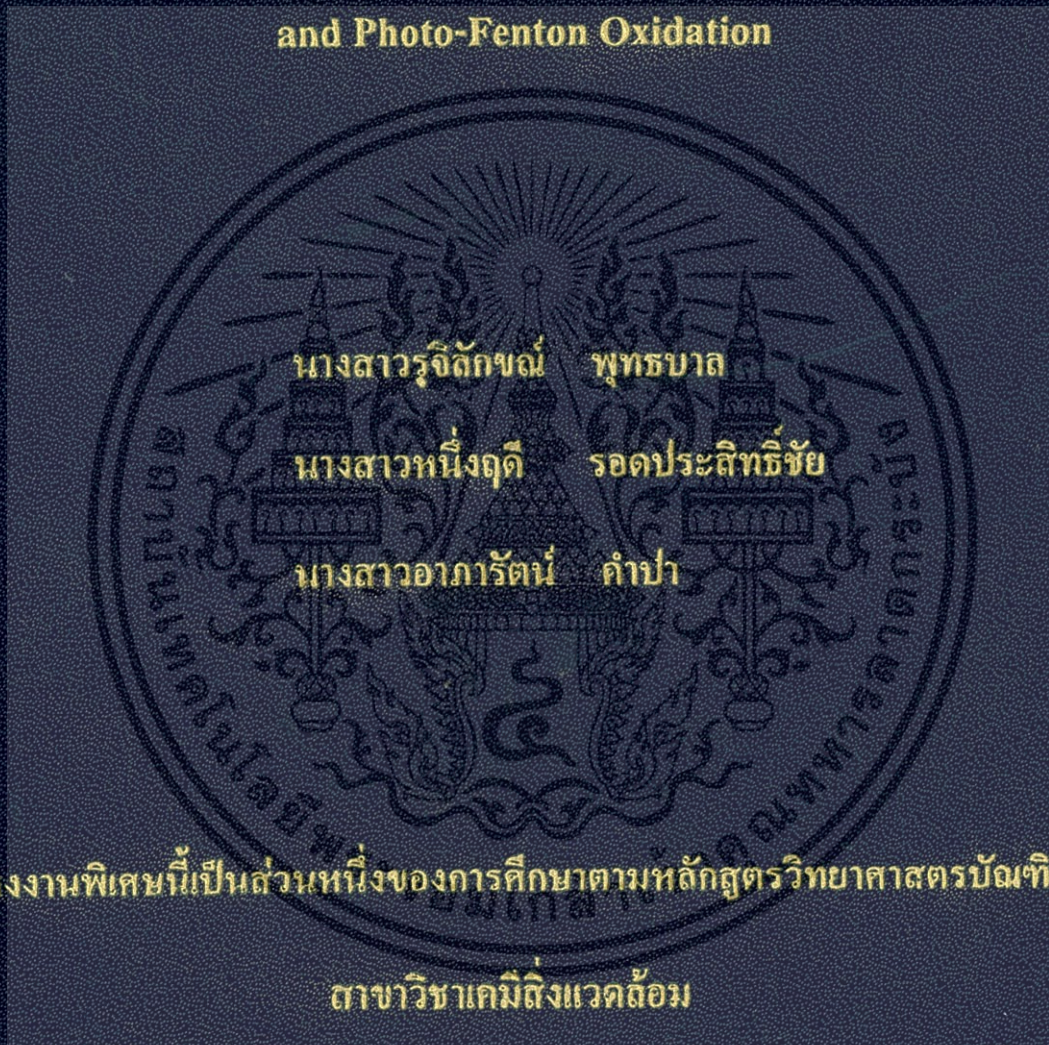


การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ เรด 195 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตัน
และโฟโตเฟนตันออกซิเดชัน

Removal of Reactive Red 195 Dye in Synthetic Wastewater by Fenton
and Photo-Fenton Oxidation



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ เรด 195 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตัน
และโฟโตเฟนตันออกซิเดชัน

Removal of Reactive Red 195 Dye in Synthetic Wastewater by Fenton
and Photo-Fenton Oxidation



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Removal of Reactive Red 195 Dye in Synthetic Wastewater by Fenton
and Photo-Fenton Oxidation**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE IN
ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การบำบัดสี้อมรีแอคทีฟ เรด 195 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ
เฟนตันและโฟโตเฟนตันออกซิเดชัน

Removal of Reactive Red 195 Dye in Synthetic Wastewater by
Fenton and Photo-Fenton Oxidation

ชื่อนักศึกษา นางสาวรุจิลักษณ์ พุทธบาล รหัส 54051116
นางสาวหนึ่งฤดี รอดประสิทธิ์ชัย รหัส 54051141
นางสาวอาภารัตน์ คำปา รหัส 54051150

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน	
อ. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การบำบัดสี้อมรีแอคทีฟเรด 195 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ
เฟนตันและโฟโตเฟนตันออกซิเดชัน

Removal of Reactive Red 195 Dye in Synthetic Wastewater by
Fenton and Photo-Fenton Oxidation

ชื่อนักศึกษา	นางสาวรุจิลักษณ์ พุทธบาล	รหัส 54051116
	นางสาวหนึ่งฤดี รอดประสิทธิ์ชัย	รหัส 54051141
	นางสาวอารัตน์ คำปา	รหัส 54051150

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาการบำบัด COD และสีของน้ำเสียสังเคราะห์ Reactive Red 195 โดยใช้วิธีการออกซิเดชันแบบเฟนตันและแบบโฟโตเฟนตัน น้ำเสียสังเคราะห์มีค่า COD และสีเริ่มต้นที่ประมาณ 771 และ 560 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ H_2O_2 : COD, สัดส่วนโดยโมลของ H_2O_2 : Fe^{2+} , ค่าพีเอชเริ่มต้น และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา แสงยูวีที่ใช้ในกระบวนการโฟโตเฟนตันมีความเข้มแสง 215 ลักซ์

ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของ H_2O_2 : COD เพิ่มขึ้นค่าประสิทธิภาพในการบำบัด COD จะเพิ่มขึ้นด้วย ค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของ H_2O_2 : COD ที่เหมาะสมคือ 1.6 : 1 เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของ H_2O_2 : Fe^{2+} ค่าประสิทธิภาพในการบำบัด COD เพิ่มขึ้นเช่นกัน ค่าสัดส่วนโดยโมลของ H_2O_2 : Fe^{2+} ที่เหมาะสมคือ 1 : 0.4 ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 3 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 30 นาที เมื่อใช้สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธีเฟนตันค่า COD และสีของน้ำเสียลดลงถึง 95.15% และ 99.93% ตามลำดับ เมื่อใช้วิธีโฟโตเฟนตันเพียง 10 นาที จะสามารถได้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียได้เทียบเท่ากับการใช้สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวของวิธีเฟนตัน

คำสำคัญ : เฟนตัน, โฟโตเฟนตัน, ออกซิเดชัน, น้ำเสีย, ซีไอดี, สี Reactive Red 195

Title	The Removal of Reactive Red 195 Dye in Synthetic Wastewater by Fenton and Photo-Fenton Oxidation		
Students	MISS RUJILAK	PUTTABAN	ID 54051116
	MISS NUENGRUDEE	RODPRASITCHAI	ID 54051141
	MISS APHARAT	KAMPA	ID 54051150
Degree	Bachelor of Science		
Program	Environmental Chemistry		
Academic Year	2014		
Advisor	Asst.Prof.Dr.Chompoonut Chaiyaraksa		

ABSTRACT

The aim of this special project was to study COD and color removal from a synthetic Reactive Red 195 wastewater by Fenton oxidation process and Photo Fenton oxidation process. The initial COD and color of synthetic wastewater was about 771 and 560 mg/L, respectively. The studied parameters were the weight ratio of H_2O_2 : COD, the mole ratio of H_2O_2 : Fe^{2+} , the initial pH and reaction time. The 215 lux uv was used in the Photo-Fenton oxidation process.

It was found that when the weight ratio of H_2O_2 : COD was increased, the COD removal efficiency was increased. The optimum weight ratio of H_2O_2 : COD was 1.6 : 1. Increasing the mole ratio of H_2O_2 : Fe^{2+} , the COD removal efficiency was increased. The optimum mole ratio of H_2O_2 : Fe^{2+} was 1 : 0.4. The optimum initial pH and reaction time were 3 and 30 minutes, respectively. When using the optimum condition for the Photo-Fenton oxidation process, COD and color were removed by 95.15% and 96.93%, respectively. The comparable oxidation efficiency could be obtained when using the Photo Fenton process with only 10 minutes oxidation time.

Keywords : Fenton , Photo-Fenton , Oxidation , COD , Wastewater , Reactive Red 195

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถลุล่วงไปด้วยดีในครั้งนี้ สืบเนื่องมาจากความช่วยเหลือและความกรุณาของทุกๆท่าน ทั้งอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ ที่กรุณาตรวจสอบดูแลและแนะนำให้คำปรึกษาตลอดเวลาจนผลงานสำเร็จลุล่วงได้ในที่สุด

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่าน นางสาวสุกัญญา โป่งรักษ์ นักศึกษาปริญญาโทที่คอยให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในเรื่องของอุปกรณ์ต่างๆและให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณบริษัทวินนี่แม็กซ์อุตสาหกรรม จำกัด ที่เอื้อเพื่อให้ผลิตภัณฑ์สีย้อมผ้ารีแอคทีฟเรด195 มาใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และบุคคลในครอบครัวที่เป็นกำลังใจในการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้ตลอดจนให้ผลงานสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งเพื่อนๆสาขาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกคนที่คอยให้กำลังใจและคอยช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความกรุณา ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีมาโดยตลอดจนโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

รุจิลักษณ์ พุทธบาล

หนึ่งฤดี รอดประสิทธิ์ชัย

อาภารัตน์ คำปา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
สัญลักษณ์และคำย่อ	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการเฟ้นต้น	4
2.1.1 สารประกอบเฟ้นต้น	4
2.1.2 กลไกปฏิกิริยาเฟ้นต้น	5
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายเฟ้นต้น	5
2.2 กระบวนการเกิดโฟโตเฟ้นต้น	8
2.2.1 ประเภทโฟโตคะตะไลต์	8
2.2.2 ปฏิกิริยาโฟโตเฟ้นต้น	10
2.2.3 พื้นฐานการออกซิเดชันของรังสียูวี	11

2.3	สีย้อม	14
2.3.1	องค์ประกอบของสีย้อม	14
2.3.2	แหล่งกำเนิดของสีย้อม	15
2.3.3	การจำแนกประเภทสีย้อม	15
2.4	น้ำเสีย	17
2.4.1	น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต	17
2.4.2	น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ	18
2.4.3	น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น	18
2.4.4	น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน	18
2.4.5	น้ำจากแหล่งอื่นๆ	18
2.5	ประเภทของสารประกอบเจือปนในน้ำเสีย	18
2.5.1	สีย้อม	19
2.5.2	สารเคมีที่ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม	19
2.5.3	สารประกอบเจือปนในน้ำเสียเส้นใย	20
2.5.4	เศษเส้นใย	20
2.5.5	สารประกอบเจือปนอื่นๆ	20
2.6	ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม	20
2.7	ปัญหาสำหรับน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อม	21
2.7.1	ปัญหามลพิษในภาพรวม	21
2.7.2	ปัญหามลพิษน้ำและการใช้น้ำจากกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อม	24
2.7.2.1	แหล่งที่มาของน้ำเสีย	26
2.7.2.2	ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยทั่วไป	27
2.7.2.3	สถานะภาพการบำบัดน้ำเสียของโรงงาน	29
2.8	แนวทางปฏิบัติที่มีด้านการป้องกันและลดมลพิษในอุตสาหกรรมฟอกย้อม	32
2.8.1	แนวใช้วัตถุดิบ	32
2.8.2	การใช้น้ำ	33

2.8.3 การใช้เชื้อเพลิง	34
2.8.4 การใช้ไฟฟ้า	35
2.8.5 อนามัยและความปลอดภัย	36
2.9 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า	37
2.9.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี	37
2.9.2 การบวนการบำบัดทางชีววิทยา	37
2.9.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	38
2.9.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน	38
2.9.5 เทคโนโลยีการใช้แผ่นเมมเบรน	39
2.9.6 นาโนฟิลเตชัน	40
2.9.7 เทคโนโลยีใหม่ๆ	40
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	44
3.1 อุปกรณ์สารเคมี	44
3.1.1 อุปกรณ์	44
3.1.2 สารเคมี	45
3.2 การบำบัดสี และค่าซีไอดี จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธี Fenton	45
3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และวิเคราะห์ค่าซีไอดีและ ความขุ่นที่สีย้อม Reactive Red 195ดูดซับ ได้สูงที่สุด	45
3.2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธี Fenton Oxidation	46
3.2.2.1 การศึกษาหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการบำบัด	46
3.2.2.2 การศึกษาหาปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมต่อการบำบัด	46
3.2.2.3 การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการบำบัด	47
3.2.2.4 การศึกษาหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัด	47
3.3 การบำบัดสีและซีไอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธี Photo Fenton Oxidation	48

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	49
4.1 คุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์	49
4.2 การศึกษาหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการบำบัด	49
4.3 การศึกษาหาปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมต่อการบำบัด	51
4.4 การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการบำบัด	52
4.5 การศึกษาหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา	53
4.6 การศึกษาหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่มีแสงยูวี	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุปผลการวิจัย	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	62
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ Reactive Red 195	65
ภาคผนวก ค การศึกษาหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการบำบัด	67
ภาคผนวก ง การศึกษาหาปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมต่อการบำบัด	71
ภาคผนวก จ การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการบำบัด	75
ภาคผนวก ฉ การศึกษาหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา	79
ภาคผนวก ช การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของแสงยูวี	83
ภาคผนวก ซ การคำนวณปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน	87

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์	21
ตารางที่ 2.2 มลพิษจากกระบวนการผลิตในโรงงานสิ่งทอ	22
ตารางที่ 2.3 ปัญหามลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอ	23
ตารางที่ 2.4 จำนวนโรงงานฟอกย้อมจำแนกตามค่า บีโอดีก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ	30
ตารางที่ 2.5 จำนวนโรงงานฟอกย้อมจำแนกตามค่า ซีโอดีก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ	30
ตารางที่ 2.6 จำนวนโรงงานฟอกย้อมจำแนกตามค่า เอสเอส ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ	31
ตารางที่ 2.7 จำนวนโรงงานฟอกย้อมจำแนกตามปริมาณสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ	31
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ค่าซีโอดีและสี	45



VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 Photo-Fenton-Schema according to Sørensen (1996)	11
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสีย้อมรีแอคทีฟ เรด 195 ที่ 542 nm	49
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD กับประสิทธิภาพการบำบัดความเข้มข้นของสีและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี	50
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : Fe^{2+} กับประสิทธิภาพการบำบัดความเข้มข้นของสีและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี	51
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับประสิทธิภาพการ บำบัดความเข้มข้นของสีและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี	52
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับประสิทธิภาพการบำบัด ความเข้มข้นของสีและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี	53
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับประสิทธิภาพการบำบัด ความเข้มข้นของสีและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี	54

คำย่อและสัญลักษณ์

H ₂ O ₂	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
Fe ²⁺	เฟอร์รัสไอออน
COD	ค่าปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำ
L	ลิตร
mg	มิลลิกรัม
ml	มิลลิลิตร
FAS	สารละลายมาตรฐานไอออนแอมโมเนียมซัลเฟต (Fe(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ ·H ₂ O)
pH	พีเอช
%	เปอร์เซ็นต์



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้ ประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มากมายหลากหลายประเภทที่กำลังเติบโตในทางเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้ก็มีส่วนประกอบของสีเพื่อใช้ในการตกแต่งผลิตภัณฑ์ให้ดูมีสีสัน น่าใช้ น่าบริโภคมากขึ้น อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้สีย้อมผ้า เพื่อให้ผ้ามีสีสันตามความต้องการของลูกค้า สีย้อมกลุ่มรีแอคทีฟเป็นสีที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมฟอกย้อม ซึ่งจะมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลัก จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดมลพิษทางน้ำ หากปล่อยสู่แหล่งน้ำก็จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ ทำให้ระบบนิเวศในน้ำเสียสมดุลน้ำเสียที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการฟอกย้อม เพราะสีย้อมต้องมีการผสมกับน้ำเป็นหลักจึงทำให้เกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการในการบำบัดน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยน้ำลงสู่แหล่งน้ำซึ่งในสถิติปีพ.ศ. 2556 อุตสาหกรรมฟอกย้อมมีมากถึง 391 โรงงานในประเทศไทย (สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ, 2556)

เทคโนโลยีหรือวิธีการในการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพเคมีและชีวภาพ ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงแต่มีข้อจำกัดคือการนำกลับมาใช้ใหม่จะต้องฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาที่ความร้อนสูงซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงการสร้างตะกอนและการรวมตะกอนโดยใช้สารส้มปูนขาว และสารประกอบเหล็กก็เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงแต่จะมีกากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมาก ซึ่งยุ่งยากในการนำไปกำจัด การใช้โอโซนก็ต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดด่าง และความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำเนื่องจากโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดทำให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง การใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพ ได้แก่ การดูดซับสีด้วยสาหร่าย การย่อยสลายสีโดยใช้เชื้อราบางชนิดมีข้อจำกัดในเรื่องความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษาการขนส่งรวมถึงการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ และการย่อยสลาย การเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับน้ำเสียของอุตสาหกรรมแต่ละประเภทต้องคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสีย ประสิทธิภาพรวมถึงค่าใช้จ่ายต่างๆ ด้วย (วนิดา, 2555) ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 195 ด้วยวิธีทางเคมี ด้วยกระบวนการเฟนตันและโฟโตเฟนตัน ซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ซึ่งจะใช้สารเคมีเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกซิไดซ์สารประกอบของสีย้อมที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในน้ำเสีย สารเคมีที่ใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ในกระบวนการเฟนตันจะใช้ H_2O_2/Fe^{2+} และโฟโตเฟนตันจะใช้ $H_2O_2/Fe^{2+}/UV$ ในการออกซิไดซ์ กระบวนการเฟนตันเกิดจากการทำปฏิกิริยาของ H_2O_2 กับไฮดรอกซิลของเพอร์ซอกไซด์ เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^\cdot) และให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ CO_2 และ H_2O ส่วนการทำปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตเฟนตัน ก็จะใช้ H_2O_2 กับไฮดรอกซิลของเพอร์ซอกไซด์ แต่มี UV เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อต้องการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 195 ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน โดยใช้เฟนตัน และโฟโตเฟนตันในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดทั้ง 2 กระบวนการ โดยคำนึงถึงสถานะที่เหมาะสม และปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทั้งสอง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการดังกล่าวมาทำการศึกษาค้นคว้า เพราะเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและเหมาะสมกับคุณสมบัติของน้ำเสีย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ เรด 195 ที่สถานะที่เหมาะสม โดยใช้วิธีการออกซิเดชันด้วยกระบวนการเฟนตัน และโฟโตเฟนตัน
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการเฟนตัน และ โฟโตเฟนตัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์น้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมรีแอคทีฟ เรด 195 เข้มข้น 560 mg/L วิเคราะห์ค่า COD และหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สี
2. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของ กระบวนการเฟนตัน
 - 2.1 แปรผันสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD เป็น 0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 และ 2.0
 - 2.2 แปรผันสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : Fe^{2+} เป็น 0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.8 โดยใช้ H_2O_2 : COD ที่ดีที่สุด
 - 2.3 แปรผันพีเอชที่ 2, 3, 4 และ 5 โดยใช้ H_2O_2 : COD และ H_2O_2 : Fe^{2+} ที่ดีที่สุด
 - 2.4 แปรผันเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 0, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาทีโดยใช้สถานะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา
3. ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตเฟนตัน โดยใช้สถานะที่เหมาะสมจากข้อ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของแสง 215 ลักซ์ แปรผันเวลาดังนี้คือ 0, 5, 10 และ 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำวิธีการทางเฟนตัน และ โฟโตเฟนตัน มาบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมในโรงงานอุตสาหกรรมได้
2. ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดสีย้อมที่เหมาะสม
3. ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเฟนตัน (Fenton process)

กระบวนการเฟนตันคือการออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนได้ไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH^\cdot) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (สุทธิณี, 2551) ซึ่งไอออนบวกของเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\cdot) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาเป็นตัวกลางสำคัญซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันสูงแสดงถึงความสามารถในการในการรับอิเล็กตรอนถ้าตัวออกซิไดซ์ที่แรงจะรับอิเล็กตรอนได้ง่ายมาก (เกรียงศักดิ์, 2546) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากจนเปลี่ยนเป็นรูปคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Yang & James, 2006) ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน ได้แก่ ความเข้มข้นของไอออนเหล็ก, ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, อุณหภูมิ, ความเป็นกรดด่าง, และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (ชนกฤต, 2552)

2.1.1 สารประกอบเฟนตัน (Fenton's reagents)

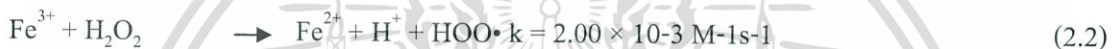
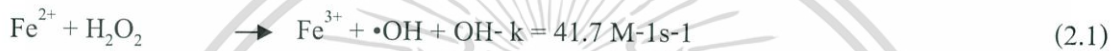
ความเป็นมาของสารประกอบเฟนตันปี ค.ศ. 1876 H.J.H Fenton เป็นบุคคลแรกที่ได้เสนอถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ปี ค.ศ. 1900 Fenton ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมให้มีความสมบูรณ์มากขึ้นซึ่งจากการศึกษาเพิ่มเติมแสดงให้เห็นว่าสารละลายที่ผสมระหว่างเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) นั้นมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ได้สูง (Flaherty และ Huang, 1992) ปี ค.ศ. 1930 Geo และคณะได้มีการศึกษากลไกปฏิกิริยาและนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีสารประกอบอินทรีย์ปะปนอยู่ เช่น ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ และสารเคมีต่างๆ โดยปฏิกิริยาเฟนตันสามารถกำจัดตะกอนดินที่มีสิ่งปนเปื้อนและสามารถทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Geo *et al.*, 2009) ปี ค.ศ. 1934 Harber และ Weiss ได้เสนอบทความที่แสดงถึงกระบวนการทางเคมีของสารประกอบเฟนตันว่าจะส่งผลทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) เป็นปฏิกิริยาถูกไล่ต่อไปโดยผลของกระบวนการจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในสารละลายปี ค.ศ. 1946 Baxendale ปี ค.ศ.1947 Mertz และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Waters และ ปี ค.ศ. 1949, Barb ได้เสนอกลไกและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสำหรับกระบวนการทางเคมีของสารประกอบเฟนตัน ปี ค.ศ. 1971 สมการการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบเฟนตันก็ได้ถูกพิสูจน์และได้รับการยอมรับในเวลาต่อมา (Lipczynska และ Kochany, 1994)

2.1.2 กลไกปฏิกิริยาเฟนตัน

ปฏิกิริยาเฟนตันเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นต่อเนื่องและรวดเร็วภายใต้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมีเฟอร์รัส (Fe^{2+}) หรือเฟอร์ริก (Fe^{3+}) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการที่ (2.1-2.8) โดยได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical, $\cdot OH$) ดังปฏิกิริยา (2.1-2.8) (Flaherty, 1992)



โดยปฏิกิริยาของระบบจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) และสารประกอบเหล็ก (Fe^{2+}) เป็นหลักโดยที่หากมีปริมาณเหล็กมากเกินไปจะมีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.1) และ (2.2) หากมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) มากเกินไปการเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.8) จะไม่เกิดขึ้นแต่จะเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.1), (2.3) และ (2.4) แทนโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเกิดในสภาวะของสารละลายเป็นกรด

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายเฟนตัน

สงกรานต์ (2546) ได้อ้างถึงการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายเฟนตันไว้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. พีเอช (pH)

Gorgor (1992) ทำการศึกษาและพบว่าปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็ก จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\cdot) จะเกิดได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำประมาณ 3 เนื่องจากพีเอช 3 จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์รัสไอออนมีส่วนมากกว่าเฟอร์ริกไอออนก่อให้เกิดการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลออกมาในปริมาณสูงแต่เมื่อพีเอชมีค่าสูงกว่า 3 สัดส่วนเฟอร์ริกไอออนจะกลับมามีสัดส่วนสูงกว่าเฟอร์รัสไอออน ทำให้เกิดปฏิกิริยาในรูปแบบปฏิกิริยาเฟนตันเสมือน (pseudo fenton) (Ntampeglitis *et al.*, 2006) ส่งผลให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลน้อยลงและเมื่อพีเอชสูงกว่า 7 มีผลทำให้ไอออนของเหล็กตกตะกอนเกิดผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์โดยตรง นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อพีเอชเปลี่ยนไปจากพีเอช 0 เป็นพีเอช 14 มีผลทำให้ค่าศักย์รีดอกซิเคชันลดลงจาก 2.80 V เป็น 1.95 V (Deng and Englehardt, 2006)

2. อุณหภูมิ Lin and Lo (1997)

ได้ทำการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียสจะมีการยับยั้งการสลายตัวของ COD เพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง H_2O_2 กับ FeSO_4 เป็นไปได้ช้าและที่อุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียสการสลายตัวของ COD เป็นไปได้ช้าเนื่องจากเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งไม่ส่งเสริมให้เกิดการสลายตัวของ COD อัตราการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 2 องศาเซลเซียสแต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงกว่า 40-50 องศาเซลเซียสประสิทธิภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากการเร่งให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำในการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาเฟนตันจึงมักดำเนินการในช่วงที่อุณหภูมิระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียส

3. เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เวลามีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด (Ma and Xia, 2009) กล่าวคือ เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์โดย (Morais และ Zamora, 2005) พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดค่า COD ณ เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาทีมีค่า 46.4 เปอร์เซ็นต์โดยการบำบัดเพิ่มขึ้นเป็น 60 นาทีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพขึ้นเป็น 57.7 เปอร์เซ็นต์โดยการบำบัดสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นอย่าง

สมบูรณ์เมื่อทำปฏิกิริยา 30 นาที (Zhang, 2005) หลังจากนั้นจะเข้าสู่สภาวะคงที่หลังทำปฏิกิริยา 60 นาที (Iaconi *et al.*, 2006; Zhang, 2005)

4. อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารประกอบเหล็ก

Powell และคณะ (1992) ได้ทำการศึกษาการใช้สารละลายเฟนตันในการลดสีและค่าทีโอซีของน้ำเสียจริงจากขั้นตอนต่างๆของโรงงานฟอกย้อมพบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเหล็กมีผลต่อความสามารถในการลดสีของน้ำเสียโดยอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเหล็กที่ทดลองอยู่ระหว่าง 10 : 1 ถึง 110 : 1 แต่ทั้งนี้แนะนำให้ใช้ค่าที่อัตราส่วน 10 : 1 หรือ 20 : 1 (Flaherty และ Huang, 1992) ทำการศึกษาการใช้สารละลายเฟนตันในการลดสีและค่าซีโอดีของน้ำเสีย Reactive Blue 15 ซึ่งเป็นสีย้อมผ้าชนิดหนึ่งโดยใช้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเหล็กระหว่าง 1 : 1 ถึง 30 : 1 โดยโมล พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารประกอบเหล็กมีผลต่อความสามารถในการลดซีโอดี

5. ปริมาณสารในการทำปฏิกิริยาเฟนตัน (Dosage of Fenton's reagents)

ปริมาณสารในการทำปฏิกิริยาเฟนตันต้องมีความเหมาะสมในการดำเนินการทั้งในด้านต้นทุนและประสิทธิภาพการบำบัดโดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเฟอร์รัสไอออนแต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้มีค่าต้นทุนเพิ่มขึ้นซึ่งแนวโน้มนี้ยังพบเช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณสัดส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่วนแนวโน้มการเพิ่มสัดส่วนของเฟอร์รัสไอออนถึงแม้ว่าจะเป็นการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ควรมีสัดส่วนที่เหมาะสมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อส่งผลให้ปฏิกิริยาเฟนตันสามารถผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลออกมาเพียงพอในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำ การเพิ่มสัดส่วนเฟอร์รัสไอออนจะทำให้ค่าของแข็งที่ละลายทั้งหมดค่าการนำไฟฟ้าและตะกอนเพิ่มขึ้น (Gogote and Pandit, 2004) ส่วนสัดส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปยังทำให้เกิดตะกอนลอยจากออกซิเจนซึ่งเป็นสาเหตุให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตกค้างอาจไปยับยั้งกระบวนการทางชีวภาพในแม่น้ำ (Sun *et al.*, 2006) ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการบำบัดส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียที่จะบำบัดเป็นสำคัญด้วย

2.2 กระบวนการโฟโตเฟนตัน

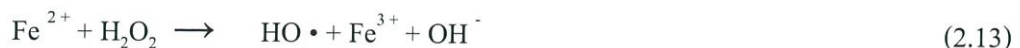
ในทางเคมีโฟโตคะตะไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงในการปรากฏตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาในตัวเร่งปฏิกิริยาแสงจะถูกดูดซึมโดยตัวดูดซับสารตั้งต้นในการเร่งปฏิกิริยา photogenerated ขึ้นอยู่กับความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างอิเล็กตรอนคู่ ซึ่งเป็นการสร้างอนุมูลอิสระ (เช่น ไฮดรอกซิลอนุมูล : $\cdot\text{OH}$) สามารถที่จะเห็นจะได้จากปฏิกิริยาที่สอง การประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัตินั้นได้ทำไปโดยการค้นพบของน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์กระบวนการที่ใช้ที่เรียกว่ากระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOP) ซึ่งมีหลายวิธีที่ AOP เหล่านี้สามารถดำเนินการได้ (แต่ไม่จำเป็น) คือ การใช้ TiO_2 หรือแม้กระทั่งการใช้แสงยูวีโดยทั่วไปจะเป็นปัจจัยที่กำหนดคือการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล

2.2.1 ประเภทโฟโตคะตะไลต์

1. โฟโตคะตะไลต์เหมือนในโฟโตคะตะไลต์สารตั้งต้นเหมือนกันและโฟโตคะตะไลต์อยู่ในขั้นตอนเดียวกันใช้กันมากที่สุดมีโอโซนและโฟโตเฟนตัน (Fe^{2+} และ $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$) ประเภทของปฏิกิริยาที่มีปฏิกิริยาเป็น $\cdot\text{OH}$ ซึ่งจะใช้สำหรับวัตถุประสงค์ที่ต่างกันกลไกของการผลิตอนุมูลไฮดรอกซิลโดยโอโซนสามารถทำได้สองทางดังนี้



ในทำนองเดียวกันกระบวนการเฟนตันจะเกิดอนุมูลของอนุมูลไฮดรอกซิลโดยกลไกดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกระบวนการโฟโตเฟนตันแหล่งที่มาของอนุมูลอิสระOHควรได้รับการพิจารณาผ่าน photolysis ของ H_2O_2 และผ่านการลดของไอออน Fe^{3+} ภายใต้อสงยูวี



ประสิทธิภาพของกระบวนการเฟนตันได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์หลายอย่าง เช่น ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, ค่า pH และ ความเข้มของรังสียูวี ประโยชน์หลักของกระบวนการนี้คือความสามารถในการใช้แสงแดดที่มีความไวแสงได้ถึง 450 นาโนเมตรจึงหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายสูงของคอมไฟยูวีและพลังงานไฟฟ้าปฏิกิริยาเหล่านี้ได้รับการพิสูจน์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าโฟโตคะตะไลต์อื่นๆ แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ จำเป็นต้องให้มีค่าพีเอชต่ำ, การตกตะกอนของเหล็กจะตกที่พีเอชที่สูงขึ้นและเหล็กจะถูกกำจัดหลังการบำบัด

2. โฟโตคะตะไลต์ต่างกันปฏิกิริยาทางเคมีที่แตกต่างมีตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนที่แตกต่างจากสารตั้งต้นโฟโตคะตะไลต์ต่างกันจะมีความหลากหลายของปฏิกิริยา เช่น การกำจัดน้ำ, การย้ายไฮโดรเจน, $^{18}O_2 - ^{16}O_2$ การแลกเปลี่ยนคิวเทอร์เรียมแอลคาไลน์, การสะสมโลหะ, การล้างพิษน้ำ และการกำจัดมลพิษที่เป็นก๊าซส่วนใหญ่ photocatalysts ที่ต่างกันส่วนใหญ่จะเป็นออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน และเซมิคอนดักเตอร์ที่มีลักษณะเฉพาะซึ่งแตกต่างจากโลหะที่มีความต่อเนื่องของสถานะ อิเล็กทรอนิกส์เซมิคอนดักเตอร์มีแถบพลังงานที่ไม่มีระดับพลังงานที่มีอยู่ในการส่งเสริมการรวมตัวของอิเล็กตรอนและการกระตุ้นของแสงผ่านรูพรุนในของแข็งแถบพลังงานซึ่งยื่นออกมาจากด้านบนของแถบเวเลนซ์ไปที่ด้านล่างของที่ว่างการนำไฟฟ้าที่เรียกว่า แถบช่องว่างเมื่อโฟตอนที่ มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างของวัสดุจะถูกดูดซึมโดย เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กตรอนจะเข้าจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบคอนดักได้ง่ายอิเล็กตรอนสามารถรวมตัวและปล่อยพลังงานที่ได้จากการกระตุ้นของอิเล็กตรอนไปเป็นความร้อนการรวมตัวกันเป็นที่ไม่พึงประสงค์และนำไปสู่ photocatalyst ที่ไม่มีประสิทธิภาพเป้าหมายสูงสุดของกระบวนการคือการมีปฏิกิริยาระหว่างการอิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ลดลงและยังก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างหลุมที่สร้างขึ้นกับผลิตภัณฑ์ที่ออกซิไดซ์เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของหลุมบวกและอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวของเซมิคอนดักเตอร์ลดลงในปฏิกิริยาออกซิเดชันหลุมบวกรทำปฏิกิริยากับความชื้นในปัจจุบันบนพื้นผิวและได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล

ปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากผลปฏิกิริยา :



ที่นี้ MO ย่อมาจากออกไซด์ของโลหะ



ปฏิกิริยาลดลงเนื่องจากผลกระทบปฏิกิริยา:



ในที่สุดอนุมูลอิสระจะเกิดขึ้นได้ในทั้งสองปฏิกิริยาอนุมูลอิสระเหล่านี้จะออกซิเดชันในธรรมชาติและไม่เสถียรภาพที่มีของรีดอกซ์ ($E_0 = 3.06 \text{ V}$)

2.2.2 ปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

ความเป็นไปได้ของกระบวนการย่อยสลายรังสียูวีที่ทำให้เกิดก็คือการใช้ไอออนของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การบำบัดและคุณสมบัติของน้ำเสียที่อาจนำไปสู่การบำบัดที่มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกระบวนการที่เรียกว่าดีที่สุดคือกระบวนการโฟโตเฟนตันซึ่งการแก้ปัญหาที่มีธาตุเหล็กจะถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนพื้นฐานของ photoreactions ต่างๆอนุมูลอิสระจะถูกสร้างขึ้นผ่านทาง photoreduction ไอออนของโลหะและเริ่มต้นกระบวนการย่อยสลายที่อธิบายข้างต้นนอกจากนี้ปฏิกิริยาอื่นๆ อีกมากมายเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการนี้ยังมีผลในการย่อยสลายของส่วนผสมน้ำอินทรีย์โดยเสียค่าใช้จ่ายการโอนปฏิกิริยาภายในที่ซับซ้อนแสดงข้างต้น photoreactions กลายเป็นที่มีประสิทธิภาพมากเมื่อนำมาใช้เป็นอย่างดีหลายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขนานหรือในลำดับบทบาทสำคัญในการตอบสนองโฟโตเฟนตันขณะที่พวกเขายังนำไปสู่การเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเดชันของเป้าหมาย (s) ปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันแสดงให้เห็นถึงข้อดีในการเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาเฟนตัน ดังนี้

- ย่อยสลายในการตอบสนองโฟโตเฟนตันมีหลายครั้งที่สูงขึ้นเป็นปฏิกิริยาเฟนตันกลายเป็นที่ปิดเองผ่านปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้น
- ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของกระบวนการโฟโตเฟนตันลดน้อยลงเนื่องจากการใช้สารเคมีที่น้อยกว่า
- กระบวนการโฟโตเฟนตันนำไปสู่การก่อตัวของตะกอนเล็กน้อยในขณะที่เฟนตันส่งผลให้เกิดตะกอนเยอะและค่ามีค่าใช้จ่ายของการกำจัดตะกอน



รูปที่ 2.1 Photo-Fenton-Schema according to Sørensen (1996)

2.2.3 พื้นฐานการออกซิเดชันของรังสียูวี

สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงของโมเลกุล R จะใช้สถานที่โมเลกุลนี้จะดูดซับแสง (แคลเวิร์ตและพิตส์, 1966) จำนวนนี้ดูดซับแสง (λ) อธิบายโดยกฎ Lambert-Beer ตามที่ I (0) กำหนด ความเข้มของแสงก่อนที่จะมีการดูดกลืนแสงและ I เป็นความเข้มของแสงที่เหลืออยู่หลังจากการดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึมผ่านสารละลายการดูดกลืนแสงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ C ความหนาของชั้น d และ ϵ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย decadal (λ)

$$A_\lambda = I_0 \frac{I}{I_0} = \epsilon \lambda \cdot d \cdot C \quad (2.25)$$

โดยดูดซับแสงที่มีพลังงานเพียงพอ โดยโมเลกุล R * ถูกสร้างขึ้นจากโมเลกุล R โดยยกระดับสถานะมีพลังโดยการป้อนข้อมูลของพลังงานโฟตอนหลักการดูดซับนี้เป็นการต้องการขั้นพื้นฐานสำหรับประเภทของปฏิกิริยาแบบใช้แสงใดๆซึ่งหมายความว่า การแก้ปัญหาแม้มีมาก อาจจะเริ่มต้นได้รับการปฏิบัติโดยยูวีออกซิเดชัน



R * อาจกลับไปยังสถานะเริ่มต้นโดยตรงหรือผ่านตัวกลางปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาทางกายภาพด้วยแสง เนื่องจากกระบวนการทางเคมีภายหลังอนุมูล, อนุมูลไอออน, ไอออนหรือสถานะที่มีเสถียรภาพจะเกิดขึ้นในสารละลาย ซึ่งปฏิกิริยาอาจจะยังคงผ่านกระบวนการทางความร้อน

ในการปรากฏตัวของตัวแทนออกซิไดซ์ ยกตัวอย่างเช่น เกิดปฏิกิริยากับแสงของความยาวคลื่นที่เหมาะสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สามารถเปลี่ยนปฏิกิริยาอนุมูลอิสระสูงโดยการ photolysis (กระบวนการ UV / H_2O_2) ซึ่งตอบสนองได้อย่างรวดเร็วด้วยองค์ประกอบของน้ำที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ (LAMING *et al.*, 1969, BAXTON and WILMARTH 1963, HOCHNADEL, 1962)



อนุมูลอิสระดังกล่าว (OH-อนุมูล) จะไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะกับปริมาณของสารเคมี ที่น้อย (Legrini *et al.*, 1993) แต่ยังมีพลังงานที่ประหยัดที่สุด (โบลตันและคณะ, 1994) โดยกระบวนการ UV / H_2O_2 เนื่องจากนี้ AOP ยังเหมาะที่ระดับเป้าหมายที่มีความเข้มข้นสูงในการบำบัดมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาน้ำเช่นน้ำเสียที่ปนเปื้อนสูง, ห้องอาบน้ำไฟฟ้าและน้ำในกระบวนการบริสุทธิ์ F หรือการบำบัดที่ระดับ ppb แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ร่วมกันคือ H_2O_2 (ดู UV-Deep-Clean)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ผ่าน OH Radicals จะเริ่มผ่านไฮโดรเจนเริ่มต้น (HABER and WILLSTÄTTER, 1931)



เมื่อ Olefines เป็นปัจจุบันนอกจาก electrophilic ของอนุมูลพื้นฐานดังนี้



ต่อไปนี่การเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของของอนุมูลต่างๆที่สร้างขึ้นกับ ออกซิเจนอินทรีย์เกิดอนุมูลอิสระ peroxy ขึ้น:

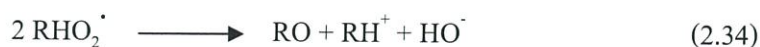


นอกจากนี้ในการแข่งขันปฏิกิริยาที่ต่างกันสามารถเกิดขึ้นได้:



โดยทั่วไปพอลิเมอร์ไม่ได้ถือว่าเป็นปฏิกิริยาที่ดีเพราะผลิตภัณฑ์ polymerised อาจนำไปสู่ปัญหาการตกตะกอนบนพื้นผิวโคมไฟยูวีนี่คือเหตุผลที่มันเป็นสิ่งสำคัญที่จะหลีกเลี่ยงโพลีเมอร์ดังกล่าว โดยการออกแบบการควบคุมกระบวนการที่เหมาะสมและรังสียูวีก่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์ในกรณีดังกล่าวอุปกรณ์กระบวนการเพิ่มเติมอาจจะจำเป็นเพื่อให้บรรลุเงื่อนไขการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพ

peroxy อนุมูลอิสระ (RHO_2^\bullet) อาจจะดำเนินการต่อการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอลดีไฮด์ที่เกิดขึ้นและคีโตนจะออกซิไดซ์ผ่านกระบวนการปฏิกิริยาที่ตามมาเป็นกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งอาจมีทั้ง decarboxylation ความร้อนหรือ photo-chemical decarboxylation (WEEKS and MATHESON, 1955)



2.3 สีย้อม (Dyestuff) (सानิต, 2549)

สีย้อม (Dyestuff) หมายถึง สารเคมีที่มีสี (Dyes) ที่สามารถเกาะติดเส้นใยได้ไม่หลุดออกง่าย ทำให้วัตถุนั้นมีสีเหมือนสีย้อม

2.3.1 องค์ประกอบของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารอินทรีย์ โครงสร้างทางเคมี มี 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophores group) เป็นกลุ่มที่มีพันธะคู่ สามารถให้สีได้โดยสามารถดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต UV และช่วงที่มองเห็นได้ (Visible range) VS ตั้งแต่ 200-800 นาโนเมตร

ตัวอย่าง C = C ethylenic chromophores

C = O carbonyl chromophores

- N = O nitroso chromophores

- N = N - azo chromophores

2. กลุ่มออกโซโครม (Auxochrom group) เป็นกลุ่มที่ทำให้สีเกาะติดกับเส้นใย ปกติแล้วหมายถึง saturated group ซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว และไม่สามารถดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นเกิน 200 นาโนเมตร แต่เมื่อไปเกาะในตำแหน่งที่ติดกับโครโมฟอร์จะทำให้เกิด resonance interaction ทำให้โครโมฟอร์ ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น

ตัวอย่าง - O hydroxyl

- NH₂ amino

- COOH carboxylic

2.3.2 แหล่งกำเนิดของสีย้อม

1. สีย้อมธรรมชาติ (natural dyestuffs) เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติโดยเฉพาะพืช และสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจาก ต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้โอ๊ก สีแสด จากดอกกรรณิการ์ สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น

2. สีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyestuffs) William Henry perkin เป็นคนแรกที่สังเคราะห์สีม่วงอ่อน (Mauve) ขึ้น โดยบังเอิญจาก alinine ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันดิบหลังจากนั้น จึงเกิดสีสังเคราะห์ขึ้นนานาชนิดขึ้น เช่น สีแดง (Fuchsin) สีส้มและสีเหลือง (Azo dyes) และสีชมพู (Phenolphthalein) ปัจจุบันนิยมใช้สีสังเคราะห์มากขึ้น เพราะราคาถูกกว่า สวยกว่า ทนทานกว่า มีสีให้เลือกมากมาย การย้อมให้สีสม่ำเสมอไม่เป็นด่างไม่เป็นดอกดวง

2.3.3 การจำแนกประเภทสีย้อม (Classification of Dyes)

สีย้อมสามารถจำแนกออกได้เป็นลักษณะใหญ่ ได้ดังนี้ คือ

1) สีเอซิด (acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

2) สีไดเร็กต์ (direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบนิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง

3) สีเบสิก (basic or cationic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุบละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุบจะยึดจับกับ โมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทนไม่ควรรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

4) สีดิสเพอร์ส (disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดีสามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอนและอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูงสีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันหรือแก๊สบางชนิด เช่นแก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากหมู่เคมีในตัวสีย้อมได้แก่ สีย้อมอะโซ (azo dyes) และสีย้อมแอมมิโนแอนทราควิโนน (amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (ethanolamine; $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5) สีรีแอคทีฟ (reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 °C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใสทุกสัณฐานในทุกสภาวะ

6) สีอะโซอิก (azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) สีแว้ต (vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว้ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์ แลโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว้ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว้ตสีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (indigoid) และ สีแอนทราควิโนอิด (anthraquinoid)

8) สีมอร์แดนท์ หรือโครม (mordant or chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียมไดบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

9) สีนินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

10) สีออกซิเดชัน (oxidation dye) เป็นสีที่มีละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ โดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

11) สีซัลเฟอร์ (sulfur dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้า สีจะติดทนและยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะ ไม่ทนต่อการซัก

2.4 น้ำเสีย (Water Pollution) (ล้นทม, 2535)

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เกิดจากการทิ้งน้ำเสีย น้ำเสียทั้งจากการฟอกย้อมมีแหล่งกำเนิดในเกือบทุกขั้นตอนของการฟอกย้อม ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผ้า ขั้นตอนการให้สี และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ โดยเฉพาะในกระบวนการชำระล้างทำความสะอาดของแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้น้ำในอัตราที่สูงมาก ซึ่งสิ่งที่สามารถพบได้ในน้ำเสียเสมอ ได้แก่ เศษเส้นใย เศษผ้า สารเคมี กรดด่าง กระจกาศา ไขมัน สีย้อม และตัวทำละลาย ดังนั้น จึงทำให้ปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียมีปริมาณสูงและเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม สภาพการเกิดและการระบายน้ำเสียจะเริ่มจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่ถ่ายน้ำเสียลงในรางระบายน้ำภายในโรงงาน หลังจากนั้นน้ำเสียจะไหลลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานก่อนระบายทิ้งออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่อไป ซึ่งน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ที่สำคัญ 5 แหล่งด้วยกัน คือ

2.4.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต

ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม น้ำใช้ในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิตน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้ยังแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อมน้ำในส่วนนี้จะมีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนค่อนข้างสูง

2. น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อมน้ำในส่วนนี้จะปริมาณมาก แต่ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยส่วนรวมน้อยกว่าน้ำเสียในประเภทแรก

2.4.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

ในกระบวนการฟอกย้อมมักมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการและเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนแก่สารละลายสีย้อมโดยตรง ก็จะเป็นการเพิ่มปริมาตรของสารละลายสีย้อม และจะถูกรวมเป็นน้ำเสียที่สกปรกที่สุด

2.4.3 น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น

ในกระบวนการฟอกย้อมมีบ่อยครั้งที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมลงในเวลาอันสั้น ซึ่งจะทำให้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็นน้ำหล่อเย็นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่

2.4.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักร

น้ำส่วนนี้นับเป็นส่วนประกอบสำคัญส่วนหนึ่งจากโรงงานน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม และในบางกรณีเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกมากด้วยเช่นน้ำล้างถังเตรียมย้อมสี เป็นต้น

2.4.5 น้ำจากแหล่งอื่นๆ

นอกจากน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ดังข้างต้น โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมยังอาจมีน้ำเสียจากแหล่งอื่นๆเช่น น้ำใช้ของคนงาน หรือน้ำฝน เป็นต้น

2.5 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

สารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นมีทั้งสารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์ ตัวอย่างของสารอนินทรีย์ เช่น ด่าง และกรดอนินทรีย์ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต ($2\text{Na}_2\text{OSiO}_2$) โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) แอมโมเนียซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารฟอกขาวธรรมชาติ ส่วนสารอินทรีย์นั้นมีการใช้อย่างกว้างขวาง ซึ่งประกอบด้วยกรดอินทรีย์ เช่น กรดฟอร์มิก (HCOOH) กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดไขมัน พวกสบู่ แป้ง สารอินทรีย์ที่ใช้แทนแป้ง ผงซักฟอก สารที่ทำให้เกิดความอ่อนนุ่ม สีย้อม สารนำพา และสารเคมีอื่นๆ อีกเช่นสารที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ ซึ่งล้วนแต่นำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อผ้ระหว่างกระบวนการตกแต่งสำเร็จทั้งสิ้น

สารเคมีบางตัวอาจมีค่าบีโอดีสูงซึ่งในขณะเดียวกันสารเคมีอื่นๆ ที่มีค่าบีโอดีต่ำและมีคุณสมบัติคล้ายกันก็สามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้ จึงนิยมใช้สารเคมีที่มีค่าบีโอดีต่ำ เช่น การใช้ Carboxylmethyl Cellulose แทนแป้งซึ่งมีประโยชน์และไม่เป็นอันตราย หรือหาทางขจัดออกไปได้ง่ายโดยวิธีทางเคมีหรือทางฟิสิกส์ แต่ทั้งนี้ก็อาจมีสารเคมีบางตัวที่ใช้ทดแทนแล้วทำให้เกิดผลต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลเสียต่อสัตว์น้ำหรือการใช้น้ำในอนาคต และทำให้ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากขึ้น

เมื่อนำน้ำใช้ไปผ่านกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนนั้นจะมีการใช้สารเคมีหลายชนิดและปริมาณต่างๆกันหลังจากน้ำใช้ผ่านเข้าไปในกระบวนการผลิตแล้วก็ต้องกลายเป็นน้ำเสียซึ่งจะต้องนำไปปรับปรุงให้มีคุณภาพที่เหมาะสมก่อนที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการฟอกสีย้อมนั้นมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งอาจจะจำแนกออกเป็นประเภทสำคัญๆ ได้ดังนี้ คือ

2.5.1 สีย้อม

ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายสีย้อม และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

2.5.2 สารเคมีที่ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม

รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมและการตกแต่ง มีอยู่หลายประเภท แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

- สารช่วยย้อม (Auxiliaries Chemiscal) ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก (Scouring Agent) สารช่วยเปียก (Wetting Agent) และสารที่ช่วยในการย้อมสีให้ได้สีที่สม่ำเสมอ (Levelling Agent)

- สารเคมีพื้นฐาน (Basic Chemicals) เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด ด่าง บัฟเฟอร์ เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง

- สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ กันยับ ฯลฯ สารเคมีต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อมสารเคมีเหล่านี้ส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย

วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมล้วนแต่มีสิ่งสกปรกเจือปนมาบ้างไม่มากนัก โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่สูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติซึ่งมีปริมาณค่อนข้างมากด้วย เช่น เส้นใยขนแกะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้าถึงร้อยละ 10 สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งสารที่เป็นสารสีผง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตก็ยังมีสารเคมีต่างๆ ลงไปในเส้นใยด้วย เช่น พวกสารหล่อลื่น และสารที่ใช้ในการลงเส้นด้วยยีน เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนฟอกย้อม และหลุดติดมาในน้ำเสียจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

2.5.4 เศษเส้นใย

ในน้ำเสียจากระบวนการฟอกย้อมมีองค์ประกอบอันหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ เศษเส้นใยที่หลุดออกมา เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็อาจจะทำให้เกิดปัญหาอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้ นอกจากนี้ ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ยังมีสารโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ที่อาจหลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนในน้ำเสียด้วย

2.5.5 สิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ

นอกจากสิ่งสกปรกเจือปนต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น น้ำเสียจากระบวนการฟอกย้อมยังอาจมีสิ่งสกปรกเจือปนชนิดอื่นๆ อีก เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปื้อนบนผ้า ซึ่งมักจะเป็็นสารประกอบพวก Chlorinated Benzene พวกเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่องเหล่านี้ เป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวก็อาจมีผลอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของน้ำเสียในภายหลังยังมีข้อคืออยู่ข้างตรงที่สารส่วนใหญ่เป็นสารที่ง่ายต่อการบำบัด และมีค่าความเป็นพิษต่ำ

2.6 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงฟอกย้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

จากการสำรวจโดยการเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล จำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (Grab Sample) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย โดยมีค่าที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ความเเคสาร์นี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกปรกในรูปค่าบีโอดี (BOD) ค่าซีโอดี (COD) ค่าความเป็นกรดค่า (pH) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และค่าปริมาณสี โดยใช้วิธีการเทียบสี (Platinum Cobalt Method) ซึ่งได้ผลสรุปค่าประเมินต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด					จำนวนข้อมูล
	pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	สี (Pt Co)	
ฟอกย้อมด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าถัก	9.0	110	370	50	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1200	140	670	41
ฟอกย้อมด้ายและผ้าหรืออื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

ที่มา : จากการประเมินผลการสำรวจของบริษัท ช.รุ่งเลิศ แอสโซซิเอท จำกัด, พ.ศ. 2542

2.7 ปัญหาสำหรับน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อม

2.7.1 ปัญหามลพิษในภาพรวม

โครงสร้างของอุตสาหกรรมสิ่งทอมีลักษณะเป็นเครือข่ายเกี่ยวโยงกันจากอุตสาหกรรมต้นน้ำไปจนถึงปลายน้ำ ดังนั้นเมื่อส่วนหนึ่งส่วนใดมีปัญหาหรือเป็นจุดอ่อนก็จะกระทบกับโครงสร้างอุตสาหกรรมทั้งระบบในภาพรวม ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขปัญหาเพื่อให้การพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอดำเนินไปได้ด้วยดีทั้งระบบ ปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมดังกล่าว ประกอบด้วยปัญหาอากาศเสีย น้ำเสีย กลิ่นเหม็น เสียงดัง สารเคมี รวมถึงของเสียที่เป็นของแข็ง เช่น เศษด้าย เศษผ้า เป็นต้น

จากการศึกษาของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทยในปี 2545 พบว่าปัญหามลพิษที่สำคัญของอุตสาหกรรมกลุ่มดังกล่าวนี้ คือกากของเสียอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นของแข็งที่มาจากวัตถุดิบในกระบวนการผลิต รongลงมาเป็นปัญหาด้านอากาศเสีย ปัญหเสียงดังและปัญหาน้ำเสียตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนปัญหาที่พบค่อนข้างน้อยคือมลพิษจากสารเคมี ซึ่งจะพบในกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมผ้า (รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 มลพิษจากกระบวนการผลิตในโรงงานสิ่งทอ

มลพิษจากกระบวนการผลิต	มลพิษในโรงงาน		รวม
	มี	ไม่มี	
อากาศเสีย	90 (60.0)	60 (40.0)	150 (100)
น้ำเสีย	39 (26.0)	111 (74.0)	150 (100)
กลิ่นเหม็น	19 (12.7)	131 (87.3)	150 (100)
เสียงดัง	75 (50.0)	75 (50.0)	150 (100)
ของเสียที่เป็นของแข็ง	133 (88.7)	17 (11.3)	150 (100)
สารเคมี	17 (11.3)	133 (88.7)	150 (100)
อื่นๆ	3(2.0)	147 (98.0)	150 (100)

ที่มา : จากการสำรวจของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย ปี 2545

นอกจากนี้หากพิจารณาตามประเภทของอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้ง 6 ประเภท ได้แก่

- อุตสาหกรรมผลิตเส้นใย
- อุตสาหกรรมปั่นด้าย
- อุตสาหกรรมทอผ้า
- อุตสาหกรรมถักผ้า
- อุตสาหกรรมฟอก ย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ
- อุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูป

ซึ่งอุตสาหกรรมแต่ละประเภทก่อให้เกิดปัญหามลพิษที่มีระดับความรุนแรงแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและวัตถุดิบที่ใช้แต่ละประเภท กล่าวคือ หากเป็นอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยจะก่อให้เกิดปัญหาด้านสารเคมีและกลิ่นเหม็นเป็นสำคัญในขณะที่อุตสาหกรรมทอผ้าจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อให้เกิดปัญหาด้านเสียงและอากาศ ส่วนอุตสาหกรรมผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูปจะก่อให้เกิดปัญหาอากาศของเสีย เช่น เศษผ้า เศษด้าย แกนกระดาษ เป็นต้น

สำหรับปัญหามลพิษที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นหน่วยงานที่ดูแลและรับผิดชอบในด้านอุตสาหกรรม ให้ความสำคัญและเร่งดำเนินการหามาตรการเพื่อควบคุมและแก้ไข สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ คือปัญหาด้านน้ำเสียและการใช้พลังงาน ซึ่งหากพิจารณาจากกระบวนการผลิตแล้วจะพบว่าส่วนใหญ่เกิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม (รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 ปัญหามลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอ

มลพิษจาก กระบวนการ ผลิต	ประเภทของโรงงาน					ผลิตเสื้อผ้า สำเร็จรูป
	ผลิตเส้น ใย	ปั่นด้าย	ทอผ้า	ถักด้าย	ฟอกย้อม พิมพ์ผ้า	
อากาศเสีย	7 (6.2)	10 (8.8)	50 (44.2)	11 (9.7)	17 (15.0)	18 (15.9)
น้ำเสีย	3 (5.6)	2 (3.7)	12 (22.2)	4 (7.4)	28 (51.9)	5 (9.3)
กลิ่นเหม็น	2 (8.0)	2 (8.0)	7 (28.0)	1 (4.0)	11 (44.0)	2 (8.0)
เสียงดัง	6 (6.5)	8 (8.6)	52 (55.9)	7 (7.5)	7 (7.5)	13 (14.0)
ของเสียที่เป็น ของแข็ง	9 (5.6)	15 (9.4)	69 (43.1)	13 (8.1)	20 (12.5)	34 (21.3)
สารเคมี	3 (11.1)	2 (7.4)	5 (18.5)	1 (3.7)	14 (51.9)	2 (7.0)
อื่นๆ	0	1 (25.0)	1 (25.0)	0	2 (50.0)	0

หมายเหตุ : บางโรงงานมีมากกว่า 1 กระบวนการผลิต ทำให้จัดอยู่ในประเภทโรงงานมากกว่า 1 ประเภท (ที่มา : จากการสำรวจของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2545)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาโครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบแล้ว เห็นได้เด่นชัดว่าปัญหาการใช้น้ำและการบำบัดน้ำเสียในโรงงานฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ เป็นปัญหาหลักในด้านสิ่งแวดล้อมอย่างหนึ่ง ที่ควรได้รับการช่วยเหลือและพัฒนาอย่างเร่งด่วน ปัญหานี้เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการผลิตซึ่งจำเป็นต้องใช้น้ำเป็นปริมาณมากในแทบทุกขั้นตอนในกระบวนการผลิต ตั้งแต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการเตรียมผ้า การให้สีและการตกแต่งสำเร็จ ซึ่งน้ำเสียที่เกิดจากอุปกรณ์ต่างๆภายในโรงงานจะต้องผ่านระบบบำบัดของโรงงานก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่อไป จากการใช้อุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการใช้น้ำเป็นปริมาณมาก เป็นเหตุให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตในปริมาณมากตามไปด้วย นอกจากนั้นแล้วน้ำเสียที่มาจากกระบวนการฟอกย้อมและพิมพ์ผ้าจะประกอบด้วยสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น สีย้อม กรด ด่าง และสารตกแต่งอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารเคมีเหล่านี้ในปริมาณสูง หากได้รับการบำบัดที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างแน่นอน

จากการทบทวนความช่วยเหลือที่องค์กรต่างประเทศและภายในประเทศให้แก่อุตสาหกรรมสิ่งทอในรอบ 10 ปีที่ผ่านมาจะเห็นว่ามักให้ความช่วยเหลือแก่กลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อม เนื่องจากเป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ โดยเฉพาะเรื่อง บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) ที่สูงเกินมาตรฐาน สี และกลิ่น รวมถึงการใช้ปริมาณน้ำมากในกระบวนการผลิต ส่วนต่อไปจึงเป็นการบรรยายให้เห็นถึงปัญหามลพิษน้ำและการใช้น้ำจากกระบวนการผลิตภายใต้กลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมและพิมพ์ผ้า รวมทั้งลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้น

2.7.2 ปัญหามลพิษน้ำและการใช้น้ำจากกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อให้ผ้าและเส้นด้ายมีสี สันสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม และให้ความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ ซึ่งกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีและสีย้อมเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใย กระบวนการเหล่านี้มักอาศัยน้ำเป็นตัวกลางเกือบทุกขั้นตอน อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก

นอกจากนี้ในน้ำที่หลังจากกระบวนการฟอกย้อมแล้วจะมีสารเคมีปนเปื้อนอยู่ เนื่องจากมีการใช้สารเคมีต่างๆในกระบวนการผลิต เช่น สารทำความสะอาด สีย้อม สารช่วยย้อม ซึ่งสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมแต่ละแห่งหรือแม้แต่การฟอกย้อมประเภทเดียวกัน แต่ต่างกันที่ขั้นตอน ก็จะมี ความแตกต่างของลักษณะน้ำเสียอย่างเห็นได้ชัด ขึ้นอยู่ประเภทของการผลิต การเลือกใช้สารเคมี เป็นต้น

ประเภทของโรงงานฟอกย้อมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ได้แก่

1. กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย
2. กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ
3. กระบวนการฟอกย้อมผ้าถัก

แต่แต่ละกระบวนการมีขั้นตอนการใช้วัตถุดิบ สารเคมี และสีย้อมต่างกัน ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงมีความแตกต่างกัน ดังนี้

กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย

ในกระบวนการฟอกย้อมเส้นด้ายนี้ เส้นด้ายจะถูกนำไปขจัดสิ่งสกปรกเจือปน (scouring) ด้วยความร้อน โดยมีสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ สารเคมีที่เป็นด่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก (scouring agent) และสารช่วยเปียก (wetting agent) ซึ่งทำให้น้ำเสียที่ออกมาจากขั้นตอนนี้มีค่า บีโอดี เอสเอส (Suspended Solids, SS) ทีเอส (Total Solids, TS) สภาพด่าง และอุณหภูมิสูง จากนั้นเส้นด้ายที่ถูกขจัดสิ่งสกปรกออกจะถูกนำไปฟอกขาว (bleaching) ซึ่งมีการใช้สารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) หรือโซเดียมคลอไรต์ (NaClO_2) รวมทั้งกรดและด่าง น้ำเสียที่ออกมาจากขั้นตอนนี้จะมีค่า บีโอดี, ทีเอสและสภาพด่างสูง ขั้นตอนการย้อม (dyeing) จะมีการใช้สารเคมีจำพวกสีย้อม สารเคมีช่วยย้อม และกรดและด่าง โดยมีการใช้ความร้อนช่วยในกระบวนการทำให้น้ำเสียที่ออกมามีอุณหภูมิสูง และมีค่า บีโอดี และทีเอสสูง รวมทั้งน้ำมีสีเข้มหลังจากนั้นก่อนที่ได้ด้ายย้อมสำเร็จจะต้องมีการนำด้ายไปล้างด้วยน้ำสบู่ก่อน (soaping) โดยจะมีการใช้สารสบู่ (soaping agent) ทำให้น้ำเสียที่ออกมามีค่า บีโอดีต่ำ แต่มีการปนเปื้อนของน้ำสบู่

กระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ

กระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบมีขั้นตอนคล้ายกับการฟอกย้อมเส้นด้าย ต่างกันที่ก่อนการฟอกย้อมผ้าดิบต้องมีการลอกแป้ง (desizing) ออกจากผ้าดิบก่อน และต้องมีการนำผ้าที่ผ่านการฟอกขาวแล้วไปซุบมัน (mercerization) ก่อนนำไปย้อม หลังจากที่ผ่านมาการย้อมแล้วต้องมีการตกแต่งสำเร็จ (finishing) โดยในขั้นตอนการลอกแป้งจะมีการใช้สารเคมี ได้แก่ เอนไซม์หรือกรดซัลฟูริกหรือสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิไดซ์ซึ่ง รวมทั้งสารช่วยเปียกและอาศัยความร้อน ดังนั้นน้ำเสียที่ออกมาจะมีค่าบีโอดี ที่เอส รวมทั้งมีอุณหภูมิสูง สำหรับขั้นตอนการชุบมันซึ่งมีการใช้โซดาไฟ จะทำให้น้ำทิ้งที่ออกมามีค่า บีโอดี, ที่เอสและสภาพต่างสูง ขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จมีการใช้สารตกแต่ง เช่น เรซิน สารกันน้ำ ฯลฯ โดยใช้ความร้อนร่วมด้วย จึงทำให้น้ำเสียที่ออกมามีอุณหภูมิสูงค่าบีโอดีสูง และมีสภาพกรด-ด่างเป็นกลางหรือ พีเอชประมาณ 7

กระบวนการฟอกข้อมผ้าดัก

กระบวนการฟอกข้อมผ้าดักมีขั้นตอนการฟอกข้อมเช่นเดียวกับการฟอกข้อมผ้าดิบ แต่ไม่มีขั้นตอนการลอกแป้ง ซึ่งลักษณะของน้ำเสียในแต่ละขั้นตอนจะเหมือนกับน้ำเสียจากกระบวนการฟอกข้อมผ้าดิบ อย่างไรก็ตามลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้น นอกจากจะมีสาเหตุมาจากสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการต่างๆ แล้ว ยังอาจมีการปนเปื้อนของน้ำมันและไขมันที่ปะปนมากับเส้นใย เศษเส้นใย และเศษผ้าได้อีกด้วย

2.7.2.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

แหล่งที่มาของน้ำเสียนอกจากจะเกิดขึ้นจากน้ำใช้ในการกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีน้ำเสียที่เกิดจากน้ำหล่อเย็น น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ฯลฯ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกข้อมหรือการพิมพ์ คือกระบวนการต้มแป้ง กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการฟอกขาว กระบวนการชุบมัน กระบวนการข้อมสีหรือการตกแต่งพิเศษ และกระบวนการพิมพ์ผ้า ซึ่งมีปริมาณน้ำเสียไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนค่อนข้างสูง

- น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกข้อมซึ่งมีปริมาณมากแต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยส่วนรวมแล้วต่ำกว่าน้ำเสียในประเภทแรก

น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกข้อม ไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนการเตรียมผ้าหรือเส้นใยก่อนข้อม ขั้นตอนการฟอกข้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ ซึ่งน้ำใช้ในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต นอกจากนี้ น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตประเภทใหญ่ๆ คือ

1. น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ มักจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการและเป็นตัวให้ความร้อนในคู่ออน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนแก่สารละลายสีข้อมโดยตรงก็จะเป็นการเพิ่มปริมาตรของสารละลายสีข้อม และจะถูกรวมเป็นน้ำเสียในที่สุด

2. น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น มีบ่อยครั้งที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายสีข้อมลงในเวลาอันสั้น ซึ่งจะทำให้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำหล่อเย็นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

3. น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน ซึ่งในบางกรณีอาจเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมาด้วย เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีข้อม เป็นต้น

4. น้ำเสียจากแหล่งอื่น เช่น น้ำใช้ของคองงาน น้ำจากโรงอาหารและห้องน้ำ เป็นต้น

2.7.2.2 ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยทั่วไป

1. มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งมีสาเหตุจากแป้ง สีข้อม กรดอะซิติก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งเป็นฝ้าคลุมผิวหนัง และสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียนี้นักมีค่าบีโอดี ประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัม/ลิตร และค่า ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัม/ลิตร

2. มีค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) และค่าสภาพด่าง (alkalinity) สูง โดยมีค่า pH ประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูน/ลิตร สารที่ทำให้ น้ำเสียฟอกย้อมมีค่า pH และค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน (scouring)

3. มีอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียสโดยเฉพาะในขั้นตอนที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อม และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

4. มีปริมาณทีเอส (หรือของแข็งละลายน้ำ) สูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือ โซเดียมและกรดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากการข้อมลึของเส้นใย เส้นใยจะมีการดูดซึมสีข้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีข้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีข้อม และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณของสีข้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีข้อมที่ใช้

6. โลหะหนักเจือปน เนื่องจากการเจือปนอยู่ในสีข้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

7. มีปริมาณทีเอสเอส (หรือของแข็งแขวนลอยทั้งหมด) สูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องข้อมได้

8. มีการปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่จะมีคั่งเหลืออยู่ในสารละลายสีข้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

เพื่อให้คุณภาพน้ำทิ้งอยู่ในเกณฑ์ที่ภาครัฐกำหนด โรงงานฟอกข้อมจึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสม เพื่อให้น้ำทิ้งที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกข้อมนั้นทำได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งการบำบัดน้ำเสียปริมาณมากนี้ ทำให้ผู้ผลิตต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงตามไปด้วย ซึ่งค่าใช้จ่ายเหล่านี้ก็จะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตโดยรวมด้วย โดยทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น

ปัญหาหลักอีกประการหนึ่งที่อุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมฟอกข้อมประสบอยู่นั้น ได้แก่ ปัญหาการใช้น้ำบาดาล ซึ่งเดิมเป็นแหล่งน้ำที่มีต้นทุนถูกกว่าน้ำประปามาก แต่ในระยะหลังเมื่อการใช้สูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ส่งผลกระทบต่อภาวะแผ่นดินทรุดและการแพร่กระจายของน้ำเค็ม ภาครัฐจึงมีการผลักดันให้ภาคอุตสาหกรรมหันมาใช้น้ำประปาให้มากขึ้น โดยการเพิ่มค่าธรรมเนียมการใช้น้ำบาดาลเป็นระยะ เป็นเหตุให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นด้วย

ดังนั้นการลดปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตและการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิต อันเป็นผลให้เกิดการเสริมสร้างความสามารถในการแข่งขันให้แก่ผู้ประกอบการทั้งในส่วนของอุตสาหกรรมฟอกข้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ และส่งผลถึงอุตสาหกรรมสิ่งทอในภาพรวมด้วย นอกจากการเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันให้แก่ผู้ผลิตแล้ว การลดการใช้น้ำและการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานยังส่งผลดีต่อสภาวะสิ่งแวดล้อมอีกด้วย จึงนับได้ว่าวิธีการนี้เป็นกลยุทธ์ที่เป็นผลดีต่อทั้งผู้ประกอบการและส่วนรวม

จากปัจจัยที่ได้กล่าวมาแล้วทำให้มีความจำเป็นที่อุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ ต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาการจัดการด้านการใช้น้ำ และมีความจำเป็นที่จะได้รับความช่วยเหลืออย่างเร่งด่วน อย่างไรก็ตาม ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า อุตสาหกรรมสิ่งทอมีความเกี่ยวโยงกันทั้งระบบ

ดังนั้นการให้ความช่วยเหลือและการพัฒนาศักยภาพในการแข่งขันให้แก่อุตสาหกรรมในภาพรวมแล้ว จะต้องดำเนินการทั้งระบบคือ 6 ประเภทอุตสาหกรรมย่อย โดยคำนึงถึงสภาพปัญหาและความต้องการความช่วยเหลือเป็นสำคัญ

2.7.2.3 สถานะภาพการบำบัดน้ำเสียของโรงงาน

จากการสำรวจโรงงานฟอกย้อมจำนวน 100 โรงงาน โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมพบว่า มีโรงงานที่ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามค่ามาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด ก่อนระบายสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนี้

- จำนวน 17 โรงงาน หรือร้อยละ 17 ของโรงงานที่สำรวจ ไม่สามารถจำกัดค่าบีโอดี ในน้ำทิ้งให้ได้มาตรฐาน (มาตรฐานกำหนด 60 มิลลิกรัมต่อลิตร) (ตารางที่ 2.4)
- จำนวน 15 โรงงาน ไม่สามารถจำกัดค่าซีโอดี ให้ได้ตามมาตรฐาน (มาตรฐานกำหนด 400 มิลลิกรัมต่อลิตร) (ตารางที่ 2.5)
- จำนวน 23 โรงงาน ไม่สามารถจำกัดค่า เอสเอส ให้ได้ตามมาตรฐาน (มาตรฐานกำหนด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) (ตารางที่ 2.6)

จากการสำรวจของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย พบว่า โรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่ได้รับการร้องเรียนเรื่องสี ซึ่งถึงแม้จะบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดแล้ว แต่สีในน้ำทิ้งยังคงมีอยู่ ซึ่งโรงงานในต่างประเทศก็ประสบปัญหาเช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีสามารถกำจัดสีได้แต่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง ในขณะที่โรงงานกำลังประสบปัญหาภาวะทางเศรษฐกิจและการแข่งขัน หากประเทศไทยกำหนดมาตรการด้านสีจะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ทำให้โรงงานจะต้องประสบปัญหาการแข่งขันในตลาดโลก

นอกจากนี้ในต่างประเทศได้มีการศึกษาแล้วว่าสีย้อมเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษต่ำ และจากการรวบรวมข้อมูลที่ผ่านมาไม่พบว่ามีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับสี

ข้อม ดังนั้นปัญหาเรื่องการกำจัดสื่อนี้จึงยังไม่มีควมจำเป็นนัก อย่างไรก็ตามควรมีการประชาสัมพันธ์ให้ชุมชนรอบโรงงานเข้าใจ เพื่อลดข้อขัดแย้งและมีทัศนคติที่ดีต่อโรงงาน

ตารางที่ 2.4 จำนวนโรงงานฟอกย้อมจำแนกตามค่า บีโอดี ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ค่า บีโอดี ก่อนปล่อยลงแหล่งน้ำ (มก./ล.)	จำนวนโรงงาน	คิดเป็น (%)	ร้อยละสะสม (%)
น้อยกว่า 10	28	28	28
11-20	32	32	60
21-30	10	10	70
31-40	5	5	75
41-50	7	7	82
51-60	1	1	83
มากกว่า 60	10	10	93
กำลังปรับปรุงระบบ	7	7	100

ตารางที่ 2.5 จำนวนโรงงานฟอกย้อมจำแนกตามค่า ซีโอดี ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ค่า ซีโอดี ก่อนปล่อยลงแหล่งน้ำ (มก./ล.)	จำนวนโรงงาน	คิดเป็น (%)	ร้อยละสะสม (%)
น้อยกว่า 50	6	6	6
51-100	15	15	21
101-150	19	19	40
151-200	11	11	51
201-250	11	11	62
251-300	13	13	75
301-350	4	4	79
351-400	6	6	85
มากกว่า 400	8	8	93
กำลังปรับปรุงระบบ	7	7	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 จำนวนโรงงานฟอกย้อมจำแนกตามค่า เอสเอส ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ค่า เอสเอส ก่อนปล่อยลงแหล่งน้ำ (มก./ล.)	จำนวนโรงงาน	คิดเป็น (%)	ร้อยละสะสม (%)
น้อยกว่า 10	8	8	8
11-20	19	19	27
21-30	22	22	49
31-40	18	18	67
41-50	10	10	77
มากกว่า 50	16	16	93
กำลังปรับปรุงระบบ	7	7	100

ตารางที่ 2.7 จำนวนโรงงานฟอกย้อมจำแนกตามปริมาณสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ปริมาณสีที่ปล่อยลงแหล่งน้ำ (PtCo หน่วย)	จำนวนโรงงาน	คิดเป็น (%)	ร้อยละสะสม (%)
น้อยกว่า 100	21	21	21
101-200	30	30	51
201-300	24	24	75
301-400	10	10	85
401-500	4	4	89
มากกว่า 500	4	4	93
กำลังปรับปรุงระบบ	7	7	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 แนวทางปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษในอุตสาหกรรมฟอกย้อม (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

เมื่อทราบแล้วว่าประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมด้านใดเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้การดำเนินงานของอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรหรือมีการสูญเสียทรัพยากรด้านใดด้านหนึ่งไปโดยเปล่าประโยชน์ การนำแนวปฏิบัติที่ดีด้านป้องกันและลดมลพิษมาใช้เพื่อปรับปรุงเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมกรรมการปฏิบัติงาน เทคโนโลยี อุปกรณ์ เครื่องมือ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต รวมทั้งการปรับเปลี่ยนวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ตามแนวทางการผลิตที่สะอาดจะช่วยให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร ลดการเกิดน้ำเสีย และของเสียที่แหล่งกำเนิดได้

สำหรับแนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษที่สามารถนำไปใช้ เป็นทางเลือกการผลิตที่สะอาดเพื่อปรับปรุงการดำเนินงานของโรงงานฟอกย้อมสำหรับปัญหาสิ่งแวดล้อมสำคัญในแต่ละประเด็นมีดังนี้

2.8.1 การใช้วัตถุดิบ

แนวปฏิบัติที่ดีด้านการใช้วัตถุดิบในกระบวนการฟอกย้อมจะให้ความสำคัญที่การลดปริมาณการใช้สีและสารเคมีโดยการควบคุมการใช้ในปริมาณที่เหมาะสม ปรับเปลี่ยนใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า ซึ่งนอกจากจะช่วยลดค่าใช้จ่ายแล้วยังช่วยลดปริมาณการใช้น้ำลดปริมาณและความสกปรกของน้ำเสียที่จะต้องนำไปบำบัดด้วย โดยมีแนวปฏิบัติที่ดีดังนี้

- ควรล้างผ้าด้วยน้ำร้อนก่อนจุ่มอัดผ้าด้วยน้ำยาลอกแป้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลอกแป้ง
- เลือกใช้สารเคมีในการลอกแป้งให้เหมาะสมกับชนิดของแป้ง เช่น เอนไซม์แอลมาอะไมเลส (L-amylase) ในการลอกแป้งธรรมชาติ
- เลือกใช้โซดาแอชแทน โซดาไฟในขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเนื่องจาก โซดาไฟมีความเป็นด่างสูงและล้างออกได้ยาก
- ใช้น้ำร้อนในการล้างสีส่วนเกินและสารช่วยย้อมออกจากผ้าเพื่อลดการใช้สารลดแรงตึงผิวในขั้นตอนการล้างผ้า
- ใช้สารลดแรงตึงผิวในขั้นตอนการล้างผ้าเฉพาะผ้าที่มีคุณสมบัติไม่ทนต่อความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ควรเติมเกลือเกลลงในหม้อต้มในรูปของสารละลายอิ่มตัว เพื่อให้เกลือสามารถละลายในหม้อต้มได้อย่างทั่วถึง และลดการเกิดผลึกเกลือหรือผงเกลือตกค้างในหม้อต้ม
- ควรเติมด่างลงในหม้อต้มภายหลังเติมเกลือและเพิ่มอุณหภูมิจนถึงจุดที่ต้องการเพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยาระหว่างสีกับด่างบนเส้นใยและในน้ำต้มซึ่งจะทำให้ได้เจดสีอ่อนกว่าที่ควรจะเป็น
- ควรแยกเครื่องต้มเฉพาะสำหรับการตกแต่งนุ่มเพื่อให้สามารถนำสารละลายตกแต่งนุ่มที่ใช้แล้วกลับมาใช้ซ้ำ
- เก็บรักษาสารละลายตกแต่งสำเร็จที่เหลือไว้ในถังปิดฝาและเก็บไว้ในที่เย็น หากต้องการตกแต่งสำเร็จด้วยสูตรเดิมภายใน 2-3 วัน
- เก็บข้อมูลอัตราการดูดซับสารละลายตกแต่งสำเร็จของผ้าแต่ละประเภท เพื่อให้สามารถเตรียมสารละลายได้ในปริมาณที่เหมาะสม
- ปรับเปลี่ยนการใช้สีต้มจากสีที่มีอัตราการผลึกสีต่ำมาใช้สีที่มีอัตราการผลึกสีสูงแทน
- ควรเลือกใช้สีต้มที่มีพิษน้อยและสามารถบำบัดได้ง่ายหากคิดไปกับน้ำเสีย
- พยายามลดการต้มซ้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของการสิ้นเปลืองน้ำ สีต้ม พลังงาน และสารเคมี
- ใช้เครื่องวัดสีคอมพิวเตอร์ (Computer Color Matching : CCM) ช่วยเทียบสีได้อย่างถูกต้องเพื่อควบคุมการออกสูตรสีต้มได้อย่างถูกต้องแม่นยำ
- ชั่ง ตวงสีและสารเคมีด้วยความระมัดระวังเพื่อลดการตกหล่นและรั่วไหล

2.8.2 การใช้น้ำ

แนวปฏิบัติที่ดีด้านการใช้น้ำในกระบวนการฟอกย้อมจะเน้นที่การลดปริมาณการใช้ ซึ่งเป็นแนวปฏิบัติที่เป็นไปได้ทางเทคนิคมากที่สุด เนื่องจากน้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์ในกระบวนการฟอกย้อมแล้วจะมีการปนเปื้อนของสีและสารเคมีทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ซ้ำหรือนำกลับมาใช้ ดังนั้นเพื่อให้การใช้น้ำเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสามารถลดปริมาณการใช้น้ำและน้ำเสียที่เกิดขึ้น สามารถทำได้ดังนี้

- ตรวจสอบและซ่อมแซมรอยรั่วหรือการชำรุดของท่อน้ำ วาล์วและอุปกรณ์การใช้น้ำต่างๆ อย่างสม่ำเสมอ
- นำน้ำล้างสุดท้ายกลับไปใช้เป็นน้ำล้างแรกในกระบวนการย้อมสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำน้ำหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิสูงกลับไปใช้เป็นน้ำล้างสุดท้ายในกระบวนการย้อมสี
- นำน้ำล้างสุดท้ายของกระบวนการชุบมันซึ่งมักมีความเข้มข้นของโซดาไฟสูงถึง 3-5% กลับมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการขจัดสิ่งสกปรกและฟอกขาวเส้นใยฝ้ายและเส้นใยผสม
- วางแผนการย้อม โดยเริ่มต้นย้อมจากเฉดสีอ่อนก่อนแล้วจึงย้อมสีเข้มปานกลางและเฉดสีเข้มตามลำดับ เพื่อลดขั้นตอนการล้างทำความสะอาดเครื่องจักร
- นำน้ำควบแน่น (น้ำคอนเดนเสท) ที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ป้อนหม้อไอน้ำใหม่ ช่วยประหยัดน้ำและพลังงาน
- นำระบบควบคุมปริมาณของแข็งละลายน้ำมาควบคุมระยะเวลาและจำนวนครั้งในการระบายไอน้ำจากหม้อไอน้ำ
- ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการจ่าย/หยุดจ่ายน้ำอัตโนมัติสำหรับเครื่องจักรย้อม
- ติดตั้งหัวฉีดน้ำแรงดันสูงสำหรับการล้างทำความสะอาด
- ปรับเปลี่ยนเครื่องจักรที่ต้องใช้อัตราส่วนวัสดุต่อน้ำ (LR) ต่ำมาใช้เครื่องที่มีอัตราส่วนวัสดุต่อน้ำสูงขึ้น (เปลี่ยนจากเครื่อง LR 10 : 1 มาเป็น 4 : 1)
- กำจัดน้ำออกจากวัสดุ (ผ้าหรือค้าย) ก่อนนำวัสดุนั้นไปผ่านกระบวนการต่อไป เช่น สกัดน้ำออกจากผ้าที่ย้อมสีก่อนนำผ้าไปล้าง
- ไม่ใช้ระบบน้ำล้น (Over Flow) ในการล้างผ้า ควรใช้การแช่หรือระบบล้างแบบไหลสวนทาง

2.8.3 การใช้เชื้อเพลิง

อุตสาหกรรมฟอกย้อมจะใช้เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานผลิตไอน้ำเพื่อให้ความร้อนกับน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต ดังนั้นปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้จึงมีความสัมพันธ์กันโดยตรงกับปริมาณไอน้ำและปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต การประหยัดน้ำในกระบวนการผลิตจึงช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงด้วย แนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการใช้เชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสามารถทำได้ดังนี้

- หุ้มฉนวนเครื่องย้อม ท่อไอน้ำ ท่อน้ำคอนเดนเสท และถังเก็บกักน้ำคอนเดนเสท และตรวจสอบ ซ่อมแซม บำรุงรักษาฉนวน ให้อยู่ในสภาพดี ไม่ฉีกขาด
- ควบคุมความดันหม้อไอน้ำให้เหมาะสมกับเครื่องจักรที่ใช้ทำงาน โดยใช้ตัวควบคุมความร้อนไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การนำน้ำควบแน่น (น้ำคอนเดนเสท) ที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาป้อนหม้อไอน้ำ
- ควบคุมความดันไอน้ำบริเวณลูกกลิ้งไซลินเดอร์ (Cylinder Dryer) เครื่องอบแห้งด้วยไอร้อน (Hot Flow Dryer) และเครื่องสเตนเลอร์ (Stenter) ที่ใช้ไอน้ำร้อนไม่ให้เกินกว่า 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- ควบคุมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ โดยควบคุมปริมาณ
- ปรับปรุงคุณภาพน้ำป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำไม่ให้มีความกระด้างสูง เพื่อลดปัญหาการเกิดตะกอนในหม้อไอน้ำ และท่อไอน้ำ
- ทำระบบเปียกไปสูเปียก (Wet-on-wet) มาใช้ในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะผ้าเนื้อบางหรือผ้าถัก เพื่อลดการใช้พลังงานในการอบแห้ง
- ควบคุมความชื้นของผ้าหลังการอบมิให้ต่ำกว่าคุณลักษณะเฉพาะของเส้นใยแต่ละประเภท เช่น ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 7 สำหรับเส้นใยฝ้าย และไม่ต่ำกว่าร้อยละ 12 สำหรับเส้นใยเรยอน
- ติดตั้งตัวดักจับไอน้ำ (Steam tap) ในระบบท่อไอน้ำเพื่อเอาน้ำคอนเดนเสทออก ทำให้การใช้ความร้อนของเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.8.4 การใช้ไฟฟ้า

แนวทางการปฏิบัติที่ดีด้านการใช้ไฟฟ้าสำหรับอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะเน้นที่การปรับแรงดันไฟฟ้าให้เพียงพอ และเหมาะสมกับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ การลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งโดยการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ และการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้างดังต่อไปนี้

- ตรวจสอบและปรับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับอุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้าของโรงงาน ติดตั้งเครื่องอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็วรอบของเครื่องจักรอย่างมีประสิทธิภาพในระบบต่างๆ เช่น พัดลมของเครื่องสเตนเลอร์และเครื่องอบแห้ง ปัมป์ของเครื่องย้อมแบบเจ็ท เป็นต้น
- วางแผนการผลิตเพื่อการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วง On-peak โดยกระจายงานให้อยู่ในช่วง Off-peak ให้มากขึ้น
- วางแผนการผลิตที่ภาระ โกลด์เคียวหรือเต็มพิกัดเครื่องจักรเพื่อลดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตรวจสอบซ่อมแซมและบำรุงรักษาเครื่องจักรให้อยู่ในสภาพที่ดีเสมอ
- ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการทำงานอัตโนมัติ เช่น การควบคุมอุณหภูมิ ควบคุมความดันเพื่อความเที่ยงตรง
- ปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการเดินเครื่องจักรและอุปกรณ์เพื่อควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาเดียวกันให้น้อยที่สุด เพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด
- จัดเวลาการผลิตให้เหมาะสมกับอัตราค่าไฟฟ้าที่ใช้ เช่น อัตราที่โอที ควรใช้ไฟฟ้าในช่วง 18.30-21.30 น. ให้น้อยที่สุด
- เลือกใช้อุปกรณ์ประหยัดไฟฟ้า เช่น โคมไฟสะท้อนแสง มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง บัลลัสต์ที่มีกำลังสูญเสียต่ำ
- เลือกใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง และมีขนาดเหมาะสมกับโหลด

2.8.5 อนามัยและความปลอดภัย

แนวทางการปฏิบัติที่ดีด้านการลดและป้องกันมลพิษสำหรับอุตสาหกรรมฟอกย้อมจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับอนามัยและความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานที่พึงระวังในการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ภายในโรงงานหรือกระบวนการฟอกย้อมดังต่อไปนี้

- ติดตั้งสัญญาณเตือนภัยในแต่ละเขตอันตราย
- ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันในบริเวณที่พนักงานอาจเกิดการสัมผัสกับน้ำร้อน ไอน้ำ และสารเคมีหกกระเด็น
- ห้ามฉนวนกันความร้อนทุกจุดที่ร้อน
- ดูแลให้บริเวณทำงานปราศจากน้ำมัน ไขมัน น้ำผงซักฟอก ผุ่น และน้ำ
- กำจัดสีย้อมและสารเคมีเสื่อมสภาพ รวมทั้งภาชนะเปล่าที่ใช้บรรจุอย่างเหมาะสม
- ควรมีเอกสารข้อมูลความปลอดภัยในการใช้สารเคมี (Material Safety Sheet : MSDS)

สำหรับการจัดและการเปลี่ยนแปลงสารเคมี

- ฝีกอบรมให้เกิดทักษะในการปฏิบัติงานอย่างปลอดภัย
- ควบคุมพนักงานให้สวมใส่อุปกรณ์ความปลอดภัยในขณะที่ปฏิบัติงาน
- จัดให้มีแผนบำรุงรักษาเครื่องจักร/อุปกรณ์เชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น เช่น น้ำมันหก รั่วไหล การเกิดเสียงดัง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หากมีการก่อสร้างในพื้นที่ปฏิบัติงานควรกันสัดส่วนให้ชัดเจนเพื่อป้องกันอันตรายจากอุบัติเหตุต่อคนงานและการผลิต

2.9 การกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า

สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสีข้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลืตกค้างอยู่ในน้ำ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง แม้จะมีการโต้เถียงกันว่าสีข้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่เนื่องจากทำให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไป ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้น น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่าง ๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน วิธีการบำบัดสีมีหลายวิธีดังนี้

2.9.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด ด่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของโมเลกุลสีข้อม ถ้าสีข้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทดีแอซิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอนเช่น โพลีอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง จะส่งผลเสียต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

2.9.2 กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment)

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสีโดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่ จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถบำบัดสีได้ แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

- ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กินดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมวลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกลดลง

- ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) คัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีอากาศและไม่มีอากาศรวมกัน โดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งต่างกัน เพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่าบีโอดี ลดลงประมาณร้อยละ 30-50

2.9.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรม สีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1,200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำที่สูง ดังนั้น ต้องมีการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้ง ด้วยการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการ ที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับพีเอช ก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

2.9.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment)

โดยทั่วไปโมเลกุลสีข้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์เป็นพวกวงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นานนัก ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้ง

เข้มข้น การโอโซน (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมี ของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำที่อย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อม ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีน หรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

2.9.5 เทคโนโลยีการใช้แผ่นเมมเบรน (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

1. ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ใช้ในการกำจัดสีย้อม ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภทสตีติสเพอร์สที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสัลเฟอร์ สีแวต และสีอะโซอิกที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (Viscose) สีย้อมดิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
2. ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) เหมาะสำหรับการใช้กำจัดออนสีย้อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ขั้นตอน คือเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (Sea Water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตามสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้ายไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้
3. ไดนามิกเมมเบรน (Dynamic Membrane) ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่นเหล็ก แสตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ Hydrous zirconium (IV) oxide และกรดโพลีอะคลีลิก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

2.9.6 นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration)

ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอกทีฟที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอกทีฟต้องใช้อิเล็กโทรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้ ออกมาและนำกลับมาใช้ได้

2.9.7 เทคโนโลยีใหม่ (New Technology)

เทคโนโลยีใหม่ๆ มากมายที่เกิดขึ้น มีพื้นฐานตั้งอยู่บนเทคนิคต่างๆ กันแต่มีวัตถุประสงค์เดียวกันคือเพื่อลดผลกระทบต่างๆ ให้เหลือน้อยที่สุด ตัวอย่าง เช่น

1. ตัวดูดซับชนิดอินทรีย์ซึ่งถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น และมีการนำมาใช้กันอยู่ในโรงงานประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างดี อัตราการกำจัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว ให้ผลการกำจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ที่กำหนดไว้แม้จะมีความแปรผันของความเข้มข้นสีที่สูงหรือมีสารเจือปนก็ตาม ซึ่งต้นทุนวิธีนี้ต่ำกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่คล้ายกันดังนั้น เทคนิคนี้จึงคุ้มค่าต่อการพิจารณาต่อไป
2. ระบบที่มีพื้นฐานของอิเล็กโทรไลซิสที่อยู่ในระหว่างกำลังพัฒนา พลังงานที่ใช้จะสูง และบางครั้งคลอรีนและไฮดรอกซีเรดิคัลสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกพันธะอย่างควบคุมไม่ได้ ตัวดูดซับชนิดอินทรีย์หรือพืชแห้ง เช่น ผักตบชวาจะมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือเซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันน้ำตาลแตกเปลี่ยนให้ออน หรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lucas และคณะ (2005) ได้ศึกษาว่าในการกำจัดสี รีแอกทีฟแบบลด 5 ด้วยการออกซิเดชันในรูปของสารละลายโดยในการศึกษานี้จะใช้กระบวนการเฟนตันและโฟโตเฟนตัน ในงานวิจัยนี้เผยให้เห็นว่าทั้งสองกระบวนการสามารถกำจัดสี รีแอกทีฟแบบลด 5 ได้การดำเนินการตรวจสอบกระบวนการจะใช้สภาวะที่เหมาะสมของพีเอช, ปริมาณ H_2O_2 , ปริมาณ Fe^{2+} , ความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟแบบลด 5 และอัตราส่วนที่เหมาะสมของ $[\text{Fe}^{2+}]_0/[\text{H}_2\text{O}_2]_0/[\text{RB5}]_0$ ผลที่ได้มาคือค่าใช้จ่ายน้อยกว่ากระบวนการอื่นๆ ใน AOP ในสภาวะที่เหมาะสมพบว่าอัตราส่วน $[\text{H}_2\text{O}_2]_0/[\text{RB5}]_0$ คือ 4.9 : 1, อัตราส่วน $[\text{H}_2\text{O}_2]_0/[\text{Fe}^{2+}]_0$ คือ 9.6 : 1 และพีเอชเท่ากับ 3 จากการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟแบบลด 5 สามารถใช้กระบวนการเฟนตันและโฟโตเฟนตันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งความแตกต่างของทั้งสองกระบวนการจะแตกต่างกันเล็กน้อยคือ 97.5% และ 98.1% ตามลำดับที่สภาวะที่เหมาะสม ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำจัดสีข้อมจะไม่เหมือนกับการกำจัด TOC แต่จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งกระบวนการโฟโตเฟนตันมีการเพิ่มขึ้นนัยสำคัญ (การกำจัด TOC 46.4%) ที่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการเฟนตัน (การกำจัด TOC อย่างเดียว 21.6%) อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วหาคอญวิธีชนิดความดันปรอททำให้ผลกระทบที่เล็กน้อยในการกำจัดสีข้อม แต่จะมีความสำคัญเฉพาะในเรื่องการกำจัดแร่ธาตุในสีข้อม

Torrades และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาว่ากระบวนการเฟนตัน และโฟโตเฟนตันออกซิเดชันจะมีการทำปฏิกิริยากันอย่างเหมาะสมในภาชนะขวดแก้วทรงกระบอกที่ทนความร้อน ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ส่วนผสมในการทำปฏิกิริยาประกอบด้วยตัวอย่างสีข้อม และปริมาณของเฟนตันรีเอเจนต์ที่เหมาะสมทั้งหมด 100 มิลลิลิตร หลังจากนั้นจะถูกนำมาปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ (298, 313 และ 333 เคลวิน) โดยใช้หลอดไฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อฟิลิปส์ 6 วัตต์ ซึ่งจะปล่อยแสงออกมาในระดับพื้นฐานคือ 350 นาโนเมตร ซึ่งจะถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเทียมสำหรับการทำงานภายใต้เงื่อนไขหรือสภาวะที่เหมาะสมของโฟโตเฟนตัน โดยที่ความเข้มข้นของแสงที่ตกกระทบนั้นสามารถวัดได้โดยใช้ยูเรไนล์ แอคติโนมิเตอร์ซึ่งพลังงานทั้งหมดของพลังงานแสงที่ถูกคาดการณ์ว่าจะเข้าสู่ระบบคือ $1.3 \times 10^{-4} \text{ W cm}^{-2}$

เมื่อทำการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก 303 เคลวิน ถึง 313 เคลวิน ระดับพลังงานรังสียูวีโดยปกติทั่วไปในวันที่มีแดดออกปกติในเวลาเที่ยงจะมีระดับค่าพลังงานอยู่ที่ 300 - 400 นาโนเมตร โดยตกกระทบกับพื้นผิวโลกในตอนใต้ของประเทศสเปน และสามารถนำมาวัดค่าได้เท่ากับ $3-4 \times 10^{-3} \text{ W cm}^{-2}$

ในช่วงของการดำเนินงาน พบว่าเฟนตันและโฟโตเฟนตันเป็นไปตามกฎของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม เพื่อการกำจัดสีและกำจัดซีโอไซด์ภายใต้เงื่อนไขเฟนตัน [10 mg l^{-1} (0.18 mm) Fe (II) and 250 mg l^{-1} (7.35 mm) H_2O_2 , อุณหภูมิ = 298 K และ pH = 3.0] เวลาที่ต้องการใช้ในการลดค่าของสีเริ่มต้นให้เหลือครึ่งหนึ่งของระบบแม่สีมาตรฐานคือ $t_{1/2} = 5.84$ นาที กับ $k_{\text{app}} = 0.1229 \text{ min}^{-1}$ เวลาที่ต้องการใช้ในการลดค่า COD ให้เหลือครึ่งหนึ่งคือ $t_{1/2} = 26.25$ นาที กับ $k_{\text{app}} = 0.0265 \text{ min}^{-1}$ พารามิเตอร์ทั้งหมดนี้ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นในที่ที่มีแสง ค่า k_{app} สำหรับการกำจัดสีและการกำจัดสารออกแกนิกคือ 0.1505 และ 0.0539 min^{-1} ตามลำดับ เวลาที่ต้องการใช้ในการลดค่าของสีเริ่มต้นและลดค่า COD ให้เหลือครึ่งหนึ่งของระบบแม่สีคือ $t_{1/2} = 4.6$ และ 12.86 นาที ตามลำดับ นอกจากนี้ การย่อยสลายของระบบแม่สีมาตรฐานจะดีขึ้นภายใต้แหล่งกำเนิดแสง ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือได้รับภายใต้พลังงานแสงอาทิตย์ พร้อมกับเงื่อนไขเหล่านี้ และใช้เวลา 120 นาทีในการบำบัด ในส่วนของการกำจัดสีและกำจัดค่า COD จะประสบความสำเร็จ 100% และสามารถกำจัด TOC ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่า 90 % ดังนั้นในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการขับเคลื่อนปฏิกิริยานี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์และสามารถพิจารณาศักยภาพที่มีค่าต่ำของ AOP ได้ นอกเหนือจากนี้ ผลการทดลองนี้ได้รับการยอมรับและสามารถนำไปใช้ได้ในอนาคตอีกด้วย

Shoda และคณะ (2007) ได้ศึกษาวิธีทางเฟนตันว่าวิธีนี้จะถูกนำไปใช้ในการกำจัดความต้องการของออกซิเจนทางเคมีโดยใช้โครเมตและน้ำเสียที่มีค่า COD_{Cr} เริ่มต้นที่ 5000-5700 mg/L สัดส่วนที่เหมาะสมของ H_2O_2 (mg/L) ค่า COD_{Cr} เริ่มต้นเป็น 1.05 และอัตราส่วนที่เหมาะสมของ H_2O_2/Fe^{2+} เป็น 2 ส่วนค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม และเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 3.5-4 และ 30 นาที ตามลำดับ

สายฝน และคณะ (2557) ได้ทำการศึกษาการฟอกสีย้อมสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตันและโฟโตเฟนตัน (UV และแสงอาทิตย์) โดยมีการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการฟอกสีได้แก่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสังเคราะห์อัตราส่วนร่วมต้นของ $Fe^{2+} : H_2O_2$ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการฟอกสีย้อมสังเคราะห์น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เลือกสีย้อมผ้าที่ชาวบ้านชุมชนต้นผึ้งจังหวัดลำพูนใช้ในกระบวนการย้อมผ้าจำนวน 3 สีคือสีแดงสีเหลืองและสีน้ำเงินผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมเคมี 3 สีทำการศึกษาโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีแดงเท่ากับ 0.025, 0.05, 0.1 และ 0.2 % w/v ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเหลืองและสีน้ำเงินเท่ากับ 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.4 % w/v ในการศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธี (กระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์กระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวีและกระบวนการเฟนตันรีเอเจนท์) โดยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์นำน้ำสีย้อมวางรับแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาระหว่าง 10:00-16:00 น. (ค่าความเข้มแสงโดยเฉลี่ยประมาณ 30,000 ลักซ์) กระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวีนำน้ำสีย้อมไปวางในตู้ทดสอบปฏิกิริยาที่ติดหลอดยูวีไว้ภายใน (ค่าความเข้มแสงเท่ากับ 205 ลักซ์) และกระบวนการเฟนตันรีเอเจนท์ทำการหุ้มภาชนะที่ทำการทดลองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันการรบกวนจากแสงผลของอัตราส่วนของ $Fe^{2+} : H_2O_2$ ที่มีต่อการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ศึกษาโดยใช้อัตราส่วนของ $Fe^{2+} : H_2O_2$ เท่ากับ 4 : 20, 4 : 40, 4 : 80, 4 : 120 และ 4 : 160 มิลลิโมลาร์ จากผลการทดลองพบว่าการใช้โฟโตเฟนตันโดยใช้แสงอาทิตย์ให้ผลดีที่สุดและเมื่อใช้อัตราส่วนของ $Fe^{2+} : H_2O_2$ เท่ากับ 4:80 mM ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 เป็นเวลา 360 นาที มีประสิทธิภาพในการฟอกสีย้อมสังเคราะห์ทั้ง 3 สี (แดง เหลือง และ น้ำเงิน) มากกว่าร้อยละ 80 นอกจากนี้เมื่อศึกษาประสิทธิภาพการฟอกสีของน้ำเสียจากโรงงานสิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทอในจังหวัดลำพูนด้วยสถานะที่เหมาะสมผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการฟอกสีเท่ากับ 76.62% ค่าซีไอลดลง 37% และค่าความขุ่นลดลง 46%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น T60
UV-VIS SPECTROPHOTO METER ยี่ห้อ Thermo Scientific
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งบริษัท Scientific Promotion Co., LTD รุ่น ED 2245 ยี่ห้อ Sartorius
3. เครื่อง pH/ISE Meter รุ่น TC-254 ยี่ห้อ Metrohm
4. ตู้อบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 150 ± 2 องศาเซลเซียส
5. หลอดย่อยสลาย (digestion Vessels)
6. เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น SH 0400.XX1. ยี่ห้อ GALLENKAMP orbital shaker
7. เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hotplate stirrer) รุ่น 11-503-49 SH บริษัท Fisher Science
8. ตู้ UV ขนาด $50 \times 45 \times 55$ เซนติเมตร
9. ตะแกรงที่ใส่หลอดทดลอง
10. เครื่องกรองแบบลดความดันและกรวยบูชเนอร์
11. เครื่องแก้วต่างๆ
12. กระดาษกรอง
13. กระจกนํ้ากลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
2. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
3. ซิลเวอร์ซัลเฟต ($AgSO_4$) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
4. ไอออนแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6 H_2O$) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
5. เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
6. พงสี Reactive Red 195 บริษัท วินนี่แม็กซ์อุตสาหกรรม จำกัด
7. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 30 % เกรดวิเคราะห์, บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
8. เฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (FerrouIndicator) บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี

3.2 การบำบัดน้ำเสียจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธี Fenton Oxidation

3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และวิเคราะห์ค่าซีโอดี และความยาวคลื่นที่สีย้อม Reactive Red 195 ดูดซับได้สูงที่สุด

นำสี Reactive Red 195 ปริมาณ 560 มิลลิกรัม ละลายในน้ำ 1 ลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์ค่า COD และความยาวคลื่นของสีย้อม Reactive Red 195 ดูดซับได้สูงที่สุด โดยวิธีดังตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ค่าซีโอดีและสี

พารามิเตอร์	วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์
COD	Close Reflux Titrimetric method
สี	Spectrophotometer

หมายเหตุ : วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน (APHA, 1992)รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์แสดงดัง

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธี Fenton Oxidation

3.2.2.1 การศึกษาหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการบำบัด

1. นำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 3 ด้วย H_2SO_4 ความเข้มข้น 1 M
2. เติมสารละลาย Fe^{2+} ปริมาณ 0.3151 กรัม ลงไปทุกขวด จากนั้นเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปในขวด โดยเติมให้สัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD เป็น 0 : 1
3. นำไปเขย่า เป็นเวลา 40 นาที
4. เมื่อครบ 40 นาที นำขวดรูปชมพู่ออกมาและทำการปรับพีเอชให้เท่ากับ 8 ด้วย NaOH 5 M เพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยา
5. ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก
6. นำน้ำเสียสังเคราะห์มากรองด้วยเครื่องกรอง เพื่อกรองตะกอนของเหล็ก
7. เก็บตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี และสีที่เหลือนอยู่ในสารละลายทุกขวด
8. ทำการทดสอบซ้ำอีก 2 ครั้ง
9. ทำการทดสอบอีก 5ขวด โดยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้สัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD เป็น 1.2 , 1.4, 1.6, 1.8 และ 2.0ตามลำดับ

3.2.2.2 การศึกษาหาปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมต่อการบำบัด

1. นำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 3 ด้วย H_2SO_4 ความเข้มข้น 1 M
2. เติม H_2O_2 ลงในขวด โดยใช้ปริมาณของ H_2O_2 ที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 3.2.2.1 และเติม Fe^{2+} ให้ค่าสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : Fe^{2+} เป็น 0 : 1
3. นำไปเขย่า เป็นเวลา 40 นาที
4. เมื่อครบ 40 นาที นำขวดรูปชมพู่ออกมาและทำการปรับพีเอชให้เท่ากับ 8 ด้วย NaOH 5 M เพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยา
5. ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก
6. นำน้ำเสียสังเคราะห์มากรองด้วยเครื่องกรอง เพื่อกรองตะกอนของเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เก็บตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ปริมาณค่าซีไอดีและสีที่เหลืออยู่ในสารละลายทุกขวด
8. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
9. ทำการทดลองอีก 5 ขวด โดยเติม Fe^{2+} ให้สัดส่วนโมลของ $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{Fe}^{2+}$ เป็น 0.2, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.8 ตามลำดับ

3.2.2.3 การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการบำบัด

1. นำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ ให้มีค่าพีเอชเป็น 2 โดยปรับด้วย NaOH 5 M หรือ H_2SO_4 1 M
3. เติม H_2O_2 ปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 3.2.2.1 และเติม Fe^{2+} โดยใช้ปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 3.2.2.2
4. นำไปนำไปเขย่า เป็นเวลา 40 นาที
5. เมื่อครบ 40 นาที นำขวดรูปชมพู่ออกมาและทำการปรับพีเอชให้เท่ากับ 8 ด้วย NaOH 5 M เพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยา
6. ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก
7. นำน้ำเสียสังเคราะห์มากรองด้วยเครื่องกรอง เพื่อกรองตะกอนของเหล็ก
8. เก็บตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ปริมาณค่าซีไอดีและสีที่เหลืออยู่ในสารละลายทุกขวด
9. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
10. ทำการทดลองอีก 3 ขวด โดยปรับพีเอชเป็น 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

3.2.2.4 การศึกษาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัด

1. นำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้พีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 3.2.2.3 จากนั้นเติม H_2O_2 ปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 3.2.2.1 และเติม Fe^{2+} โดยใช้ปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 3.2.2.2
3. นำไปทำการปั่นกวนเป็นเวลา 0 นาที

4. เมื่อทำการเขย่าครบตามเวลาแล้วนำมาทำการปรับพีเอชให้เท่ากับ 8 ด้วย NaOH 5 M เพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยา
5. ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดตะกอนของเหล็ก
6. นำน้ำเสียสังเคราะห์มากรองด้วยเครื่องกรองเพื่อกรองตะกอนของเหล็ก
7. เก็บตัวอย่างทำการวิเคราะห์ปริมาณค่าซีโอดี และสี ที่เหลืออยู่ในสารละลายทุกขวด
8. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
9. ทำการทดลองอีก 5 ขวด โดยใช้เวลาที่ต่างกันคือ 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ

3.3 การบำบัดสีและซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธี Photo Fenton Oxidation

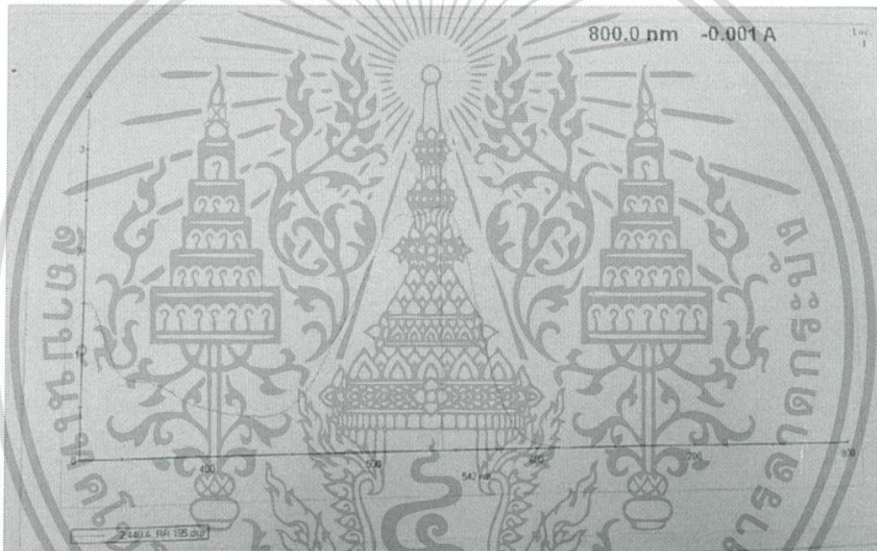
1. นำขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ไปหุ้มด้วยฟลอยด์
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่
3. เติมรีเอเจนต์ (H_2O_2 และ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$) และปรับพีเอช โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.2.1-3.2.2.3
4. เอาฟลอยด์ที่หุ้มขวดรูปชมพู่ออกก่อนจากนั้นนำขวดรูปชมพู่ไปตั้งในตู้ที่มีแสง UV และทำการปั่นกวนสารละลายโดยให้สารละลายได้รับแสง UV ที่ความเข้มชั้น 215 ลักซ์ ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาจนครบ 5 นาที
5. นำขวดรูปชมพู่ออกมาและทำการปรับพีเอชให้เท่ากับ 8 ด้วย NaOH 5 M เพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยา
6. ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดตะกอนของเหล็ก
7. นำน้ำเสียสังเคราะห์มากรองด้วยเครื่องกรองเพื่อกรองตะกอนของเหล็ก
8. เก็บตัวอย่างทำการวิเคราะห์ปริมาณค่าซีโอดี และสี ที่เหลืออยู่ในสารละลายทุกขวด
9. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
10. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-9 แต่เปลี่ยนเวลาเป็น 0, 10 และ 15 นาที

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลของคุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยสังเคราะห์โดยใช้สี Reactive red 195เข้มข้น 560 มก./ล. น้ำเสียที่สังเคราะห์ได้นำไปวัดค่าซีโอดีได้ 771 มก./ล. นำน้ำเสียไปศึกษาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดด้วยเครื่อง Spectrophotometer พบว่าสีย้อม Reactive red 195 มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ช่วงคลื่น 542 นาโนเมตร



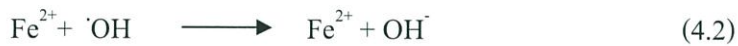
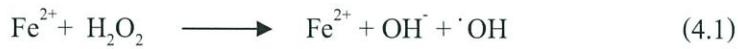
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสีย้อมรีแอคทีฟ เรด 195 ที่ 542 nm

4.2 ผลการศึกษาหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการบำบัด

นำน้ำเสีย Reactive red 195 ที่มีค่าซีโอดีเริ่มต้น 771 มก./ล. ไปบำบัดด้วยวิธีฟenton ออกซิเดชัน (Fenton Oxidation) โดยทำการแปรผันค่าสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD จาก 0 ถึง 1.6 ค่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD จาก 1.6 ถึง 2 ค่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีจะไม่เพิ่มขึ้นอีกแต่กลับลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปในระดับหนึ่งที่มากเกินไปแล้ว ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคอลลดลงตามสมการที่ 4.3 ซึ่งจะทำให้ไฮดรอกซิลเรดิคอลล

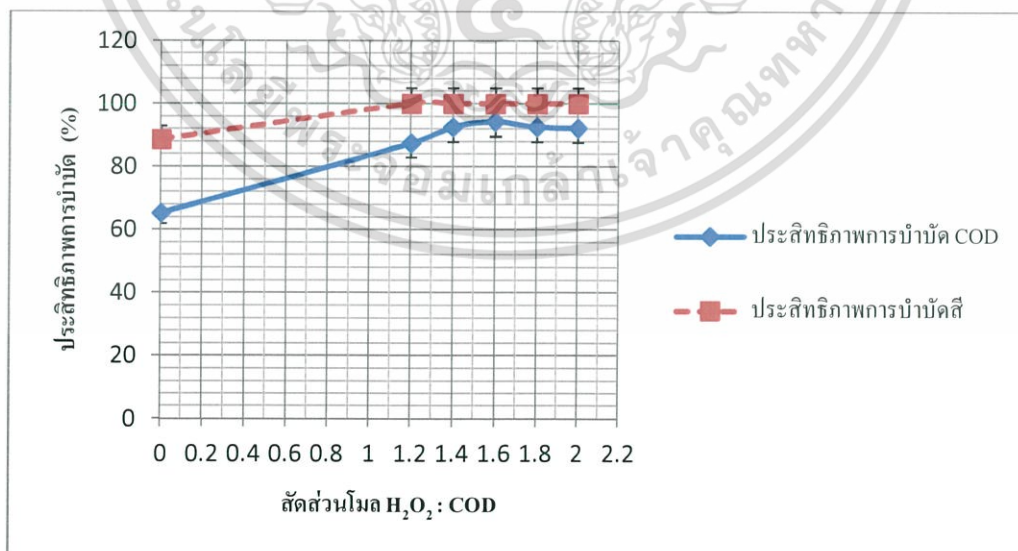
ซึ่งเป็นตัวที่ทำหน้าที่ช่วยในการออกซิไดซ์ในการบำบัดซีโอดีลดลง และเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นเปอร์-

ไฮดรอกซิลเรดิคอลลซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อน ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผลการทดลองสอดคล้องกับของ Lee, (2008) ซึ่งศึกษาผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการบำบัดซีโอดี โดยความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะทำให้การบำบัดซีโอดีลดลงดังเหตุผลที่กล่าวมา

ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงสุดเป็นร้อยละ 94.31 เมื่อค่าสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD เป็น 1.6 ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดเมื่อเพิ่มสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD จาก 0 เป็น 1.2 ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD ตั้งแต่ 1.2 ขึ้นไป มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ติดคือใกล้เคียงร้อยละ 100 จึงอาจสรุปได้ว่า ค่าสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD ที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ Reactive red 195 นี้เป็น 1.6 และค่าสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD ไม่มีผลต่อการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียและจะเห็นได้ว่า Fe^{2+} ยังสามารถบำบัดน้ำเสียได้อยู่เมื่อไม่มี H_2O_2 ซึ่งสามารถบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 61.79 และบำบัดสีได้ร้อยละ 88.59 แต่ในทางสถิติจะพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีไม่ต่างกันเมื่อใช้สัดส่วน 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 และ 2.0



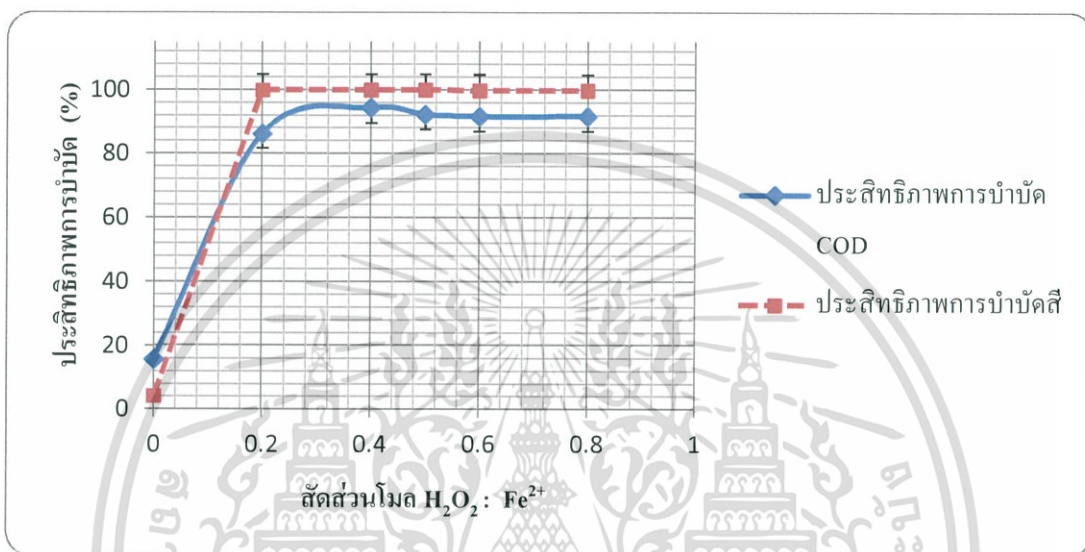
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD กับประสิทธิภาพการ

บำบัดสีและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาหาปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมต่อการบำบัด

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 ได้เลือกสัดส่วน โมล H_2O_2 : COD ที่ 1.6 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมและได้นำสัดส่วนนี้มาทดลอง โดยทำการแปรผันค่าสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : Fe^{2+} ในการบำบัดน้ำเสีย

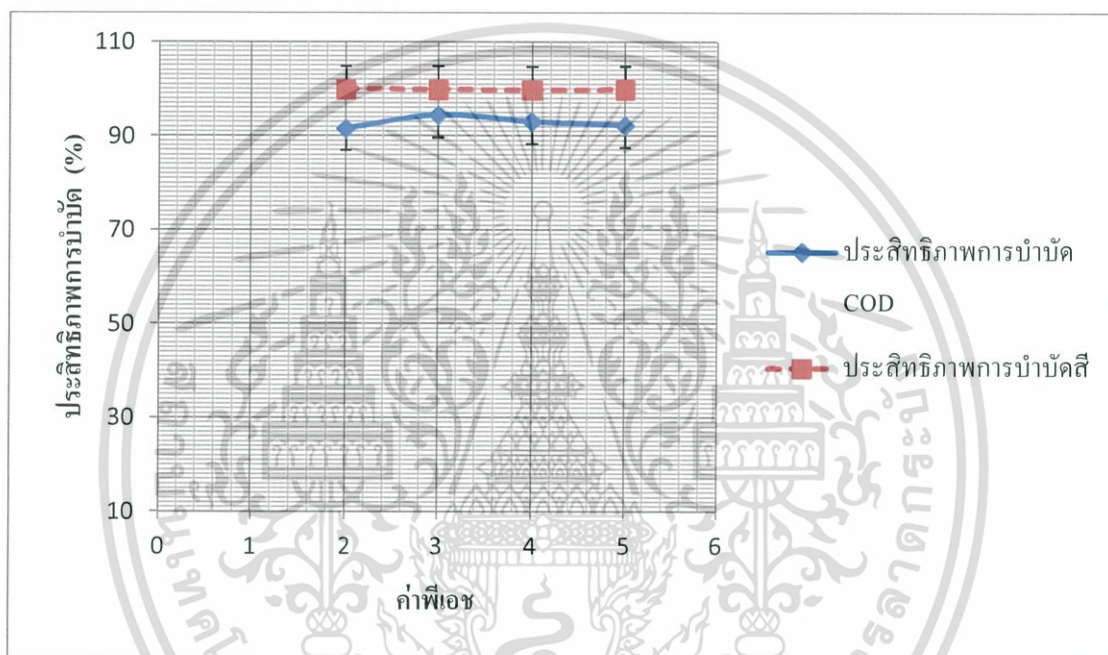


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน โมลของ H_2O_2 : Fe^{2+} กับประสิทธิภาพการบำบัดสีและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและประสิทธิภาพการบำบัดสีที่สัดส่วนโมลของ H_2O_2 : Fe^{2+} เป็น 1 : 0 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีร้อยละ 15.66 และประสิทธิภาพการบำบัดสีร้อยละ 4.23 แสดงว่าถ้ามี H_2O_2 เพียงอย่างเดียวยังไม่สามารถที่จะบำบัดสีได้ดีพอ แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนโมลของ H_2O_2 : Fe^{2+} จาก 0 ถึง 0.2 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและที่สัดส่วนโมลของ H_2O_2 : Fe^{2+} เท่ากับ 0.4 เป็นสัดส่วนที่มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีที่สุดสามารถบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 94.31 และประสิทธิภาพการบำบัดสีได้ร้อยละ 99.86 แต่ในทางสถิติจะพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีไม่ต่างกันเมื่อใช้สัดส่วน 0.2, 0.4, 0.5 และ 0.6

4.4 ผลการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการบำบัด

ทำการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์โดยศึกษากับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมรีแอคทีฟ เรด 195 ที่ค่าซีไอดี 771 มก./ล. โดยใช้สัดส่วนโมลของ H_2O_2 : COD ที่ 1.6 และใช้สัดส่วนโมลของ H_2O_2 : Fe^{2+} ที่ 0.4 ทำการแปรผันค่าพีเอชเป็น 2, 3, 4 และ 5 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเมื่อเพิ่มพีเอชจาก 2 เป็น 3 ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มพีเอชจาก 3 เป็น 4 ประสิทธิภาพจะค่อยลดลงจนถึงพีเอช 5 เริ่มคงที่ พีเอชเท่ากับ 3 เป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุดมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีร้อยละ 94.31 และประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีร้อยละ 99.87

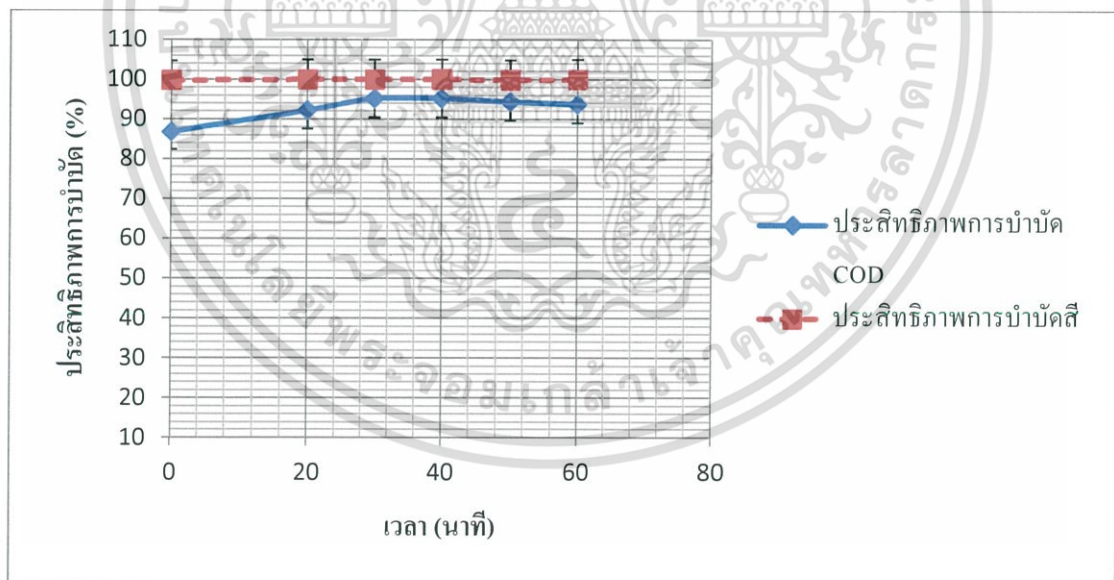
การที่ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีและสีลดลง เมื่อมีค่าพีเอชสูงกว่า 4 เนื่องจากเฟอร์รัสไอออนจะมีเสถียรภาพลดลงเมื่อค่าพีเอชสูงกว่า 4.0 (Macro S. Lucas, 1992) โดยจะเปลี่ยนรูปเป็นเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ได้ง่ายและมีแนวโน้มจะเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบต่อไป สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นจะมีเสถียรภาพลดลงเช่นกันเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น โดยจะสลายตัวเป็นแก๊สออกซิเจนและน้ำได้ง่าย ดังนั้นเมื่อค่าพีเอชมีค่าสูงกว่า 4 โอกาสที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนเพื่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกไซด์ไอออนที่เป็นตัวการสำคัญในการออกซิไดซ์ดีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียจึงมีน้อยลง จากงานวิจัยนี้ได้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lucas และคณะ, (2005) ในสถานะที่เหมาะสมพบว่าพีเอชเท่ากับ 3 สามารถใช้ในกระบวนการเฟ้นต้นและโฟโตเฟ้นต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.5 ผลการศึกษาหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา

ทำการศึกษาผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย โดยแปรผันเวลาทำปฏิกิริยาดังนี้ คือ 0, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ โดยเลือกให้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน และพีเอชที่เหมาะสมจากหัวข้อที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.5



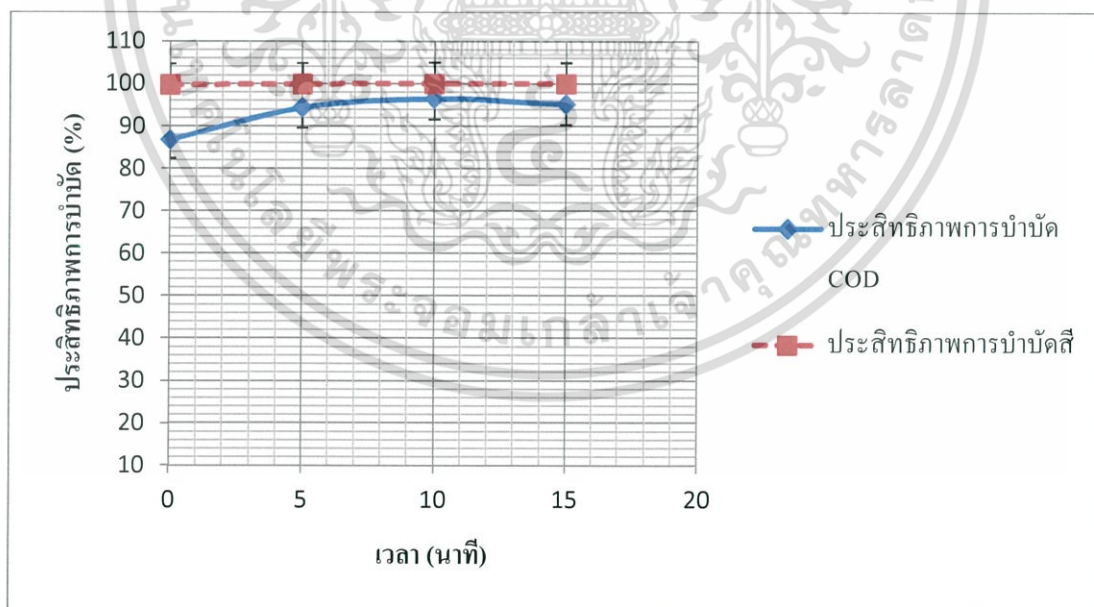
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับประสิทธิภาพการบำบัดสีและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยเวลาที่ 30 และ 40 นาที จะมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีสูงที่สุด คือได้ร้อยละ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

95.15 ซึ่งจะเลือกเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 30 นาทีหลังจากนั้นเพิ่มเวลาจนถึง 60 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีลดลงเล็กน้อย แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาที่ประสิทธิภาพการบำบัดซี จะเห็นว่าสามารถบำบัดซีได้เกือบร้อยละ 100 ในช่วงตั้งแต่ 20 นาทีแรก ซึ่งอาจสรุปได้ว่าเวลาไม่มีผลกับการบำบัดซีในช่วงเวลาตั้งแต่ 20 ถึง 60 นาที เพราะสามารถบำบัดซีได้สูงสุดไม่แตกต่างกันมาก แต่ในทางสถิติจะพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีไม่ต่างกันเมื่อใช้เวลา 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที

4.6 ผลการศึกษาหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่มีแสงยูวี

ทำการศึกษาผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย โดยแปรผันเวลาทำปฏิกิริยาดังนี้ คือ 0, 5, 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ โดยเลือกให้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน และพีเอชที่เหมาะสมจากหัวข้อที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ในระหว่างการทำปฏิกิริยาจะอยู่ภายใต้สภาวะที่มีแสงยูวี โดยมีความเข้มของแสง 215 ลักซ์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาทำปฏิกิริยากับประสิทธิภาพการบำบัดซีและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ณ เวลาที่ 0 นาที สามารถบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 86.72 และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 99.96 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยากับแสงยูวีเป็น 5 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีก็ค่อยเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเวลาที่ 10 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยาแล้วให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด คือ ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 96.42 และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 99.96 แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 15 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่เพิ่มขึ้นอีก จะเห็นว่าเมื่อใช้แสงยูวีจะทำให้ปฏิกิริยาเฟนตันเกิดได้เร็วขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสีข้อมริแอกทีฟ เรด 195 ด้วยปฏิกิริยาเฟนตันและโฟโตเฟนตันออกซิเดชัน โดยผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. จากการวิเคราะห์น้ำเสียสีสังเคราะห์มีค่าซีโอดีก่อนการบำบัดเท่ากับ 771 มิลลิกรัม/ลิตร
2. จากการศึกษาหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการบำบัดที่สัดส่วนโมล $H_2O_2 : COD$ เป็น 1.6 : 1 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีดีที่สุด
3. จากการศึกษาหาปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมต่อการบำบัดที่สัดส่วนโมลของ $H_2O_2 : Fe^{2+}$ เป็น 1 : 0.4 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด
4. จากการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการบำบัดพบว่าพีเอชเท่ากับ 3 สามารถบำบัดน้ำเสียได้ดีที่สุด
5. จากการศึกษาหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสียอยู่ที่ 30 นาที
6. ประสิทธิภาพในการบำบัดสีเป็นร้อยละ 99.93 และบำบัดซีโอดีเป็นร้อยละ 95.5 เมื่อใช้วิธีเฟนตันและใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัด
7. จากการศึกษาหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่มีแสงยูวี 215 ลักซ์ พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสียอยู่ที่ 10 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีร้อยละ 96.42 และประสิทธิภาพการบำบัดสีร้อยละ 99.96
8. จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีข้อมริแอกทีฟ เรด 195 เมื่อเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเฟนตันและปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันออกซิเดชัน พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและประสิทธิภาพในการบำบัดสีของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันออกซิเดชัน มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีเฟนตัน คือต่างกันที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพราะวิธีโฟโตเฟนตันมีแสงยูวีเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นแล้วเวลาที่ทำปฏิกิริยาจะน้อยกว่าวิธีเฟนตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำไปทดสอบกับน้ำเสียสีขุ่นที่เกิดจากอุตสาหกรรมสีขุ่นจริง เพื่อที่จะได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดจริง
2. ควรนำวิธีการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันและปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันออกซิเดชัน นำไปใช้กับการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมอื่นๆ
3. ในโครงการวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสี Reactive Red 195 ที่ความเข้มข้นต่างกัน จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจที่จะศึกษาต่อไป



เอกสารอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. ของเสียอันตราย.ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะ
วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี.หน้าที่ 301-303.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2548. แนวทางและข้อกำหนดเบื้องต้นการลดและใช้ประโยชน์ขยะมูลฝอย.
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.หน้าที่ 110-115.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2554. ปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนที่เกิดขึ้นในประเทศไทยปี 2548-2553.
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.หน้าที่ 94-96.
- ชนกฤต พรหมทอง. 2552. การกำจัดดีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำ
หมักชีวภาพและเฟินต้นรีเอเจนต์.วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, การจัดการสิ่งแวดล้อม, คณะ
การจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.หน้าที่ 225-227.
- นุสรรา โรจน์วิลาวัลย์. 2555. การบำบัดน้ำเสียไขมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า
และโฟโตอิเล็กโทรเฟนตัน (TREATMENT OF CUTTING OIL WASTEWATER BY
ELECTRO COAGULATION AND PHOTO ELECTRO FENTON PROCESS).
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.หน้าที่ 169-
171.
- บัญชา ขุนสูงเนิน. 2547. การบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยกระบวนการถังไร้อากาศแบบแผ่นกั้น.
วิทยานิพนธ์ปริญญาสาทรณสุขศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย
ขอนแก่น.หน้าที่.68-75.
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. 2521. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค.
พระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมตีพิมพ์. เล่ม 95 ตอนที่ 68.
- ปรีดา เข้มเจริญ. 2531. การจัดการขยะมูลฝอย.ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.หน้าที่ 45.
- ไพศรี วรรณแสงทอง. 2551. Chemistry Laboratory for Environmental Engineers.เอกสาร
ประกอบการสอนปฏิบัติการ วิชา 186203 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัย
ขอนแก่น.หน้าที่ 21-23.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไพศรี วรรณแสงทอง. 2551. **Chemistry Laboratory for Environmental Engineers**.เอกสารประกอบการสอนปฏิบัติการ วิชา 186203 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.หน้าที่ 21-23.

วนิดา ชูอักษร. 2555. **เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม**.ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.หน้าที่ 181.

วุฒิ วิพันธ์พงษ์. 2543. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมผ้าและด้ายด้วยปฏิกิริยาเฟนต์ในการบำบัดสีและสารอินทรีย์.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.หน้าที่ 99-100.

สาธร จันทร์หอม และ สุรัตน์ โสคธานา. 2555. การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำชะขยะด้วยกระบวนการเฟนต์.โครงการนักศึกษาชั้นปีที่ 4 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.หน้าที่ 10-17.

สายฝน มะโนคำ, มิกิ กัณณะ, นีรนุช ไชยรังสี. 2557. การฟอกสีน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าในจังหวัดลำพูนโดยกระบวนการโฟโตเฟนต์ ด้วยแสงอาทิตย์.ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.หน้าที่ 1-3.

สุทธีณี นาควิทยา. 2551. ออกซิเดชันสาร 2,6-ไดเมทิลอะนิลีนโดยกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดเฟนต์.วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.หน้าที่ 43-44.

สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์, วีระนุช บุญรุ่ง. 2551. การกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยกระบวนการเฟนต์และกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตบางเขน.หน้าที่ 8.

สงกรานต์ คำศรี. 2546. การกำจัดสีและซีโอดีในน้ำชะมูลฝอยโดยการออกซิไดซ์ด้วยสารละลายเฟนต์.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น.หน้าที่ 59-61.

สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. 2556. สถิติอุตสาหกรรมฟอกย้อม. สืบค้นข้อมูลจาก:
http://www.thaitextile.org/main/content.php?content_id=ARC140805140823&content_type=article. สืบค้นวันที่ 4 กรกฎาคม 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมหมาย ขันดี. 2524. การปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยในน้ำใต้ดินจากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยของเทศบาลนครขอนแก่น.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต.ขอนแก่น: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น.หน้าที่ 30-33.

สำนักงานรักษาความสะอาด กรุงเทพมหานคร. 2539. การฝังกลบขยะมูลฝอยอย่างถูกต้อง สุขาภิบาล. หนังสือเสริมสร้างความรู้ด้านสิ่งแวดล้อม.242.กรุงเทพมหานคร.หน้าที่ 15.

อำพาภรณ์ มั่นหมาย. 2553. เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical cell). สืบค้นข้อมูลจาก: <http://www.thaigoodview.com/node/17983>.สืบค้นวันที่ 15 สิงหาคม 2557.

Atmaca, E., 2009. Treatment of landfill leachate by using Electro -Fenton method. **Journal of Hazardous Material**.63: 109–114.

Flaherty K.A. and Huang C. P. 1992. Continuous flow application's reaction for the treatment of refractory wastewaters.**Chemical Oxidation: Technology for the nineties**.2: 58-77.

Francesc Torrades, José Antonio García-Hortal and Lluís Núñez. 2008. Fenton and Photo-Fenton oxidation of a model mixture of dyes – overall kinetic analysis.**Coloration Technology**.124: 370-374.

Gotvajin, A. Z., Tisler, T.,and Koncan, J. Z. 2009. Comparison of different treatment strategies for industrial landfill leachate.**Journal of Hazardous Materials**.162: 1446-1456.

Glaze, W.H.; Kwang, J.W. & Chapin, D.H. 1987. Chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation.**Ozone Science and Engineering** 9: 335-352.ISSN 0191-9512.**Hazardous materials**.136: 75-84.

Idil Arslan-Alaton. 2003. A review of the effects of dye-assisting chemicals on advanced oxidation of reaction dyes in wastewater.**Coloration Technology**.119: 854-857.

K. Ntampeglitis, A. Riga, V. Karayannis, V. Bontozoglou, G. Papapolymerou. 2006. Decolorization kinetics of Procion H-ex1 dyes from textile dyeing using Fenton-like reactions.**Journal of hazardous materials**.136: 75-84.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Lipczynska– Kochany E., Sprah, G. and Harms, S. 1994. Influence of some groundwater and surface waters constituents on the degradation of 4-Chlorophenol by the fenton reaction. **Chemosphere**.30: 9-20.
- Li, H., Zhou, S., Sun, Y., Jiang, L.V. 2010. Nitrogen and carbon removal from Fenton-treated leachate by denitrification and biofiltration. **Bioresource Technology**.101: 7736–7743.
- Makoto shoda, Hyunhee Lee. 2008. Removal of COD and colour from livestock wastewater by the Fenton method. **Journal of Hazardous Materials**.153: 1314-1319.
- Marco S. Lucas, José A. Peres. 2006. Decolorization of the azo dye Reactive Black 5 by Fenton and photo- Fenton Oxidation. **Dyes and Pigments** 71: 236-244.
- Qiang, Z., Chang, J.-H. Huang, C.P. 2003. Electrochemical regeneration of Fe^{2+} in Fenton oxidation processes. **Water Research**.37: 1308–1319.
- Yang Deng & James D. Englehardt. 2006. Treatment of landfill leachate by the Fenton process. **Water Research**.40: 3683-3694.
- Zhang, H., Choi, H.J., and Huang, C.P. 2005. Optimization of Fenton process for the treatment leachate. **Journal of Hazardous Materials**.125: 80-166.



ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการดำเนินงานการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการดำเนินงานการทดลอง

ภาคผนวก ก-1 ศึกษาหาช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม

โดยนำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สีชมพู Reactive Red 195 นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีค่าสูงสุด โดยใช้เครื่อง UV-VIS SPECTROPHOTO METER T60 โดยเลือกไปที่โปรแกรม Spectrophotometer แล้วทำการสแกนหาค่าการดูดกลืนแสงที่มีค่าสูงสุดและบันทึกค่า

ภาคผนวก ก-2 ศึกษากราฟมาตรฐานและหาความเข้มข้นสีของน้ำตัวอย่าง

เปิดเครื่อง UV-VIS SPECTROPHOTO METER T60 ตั้งค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่หาได้ และทำการเซตเครื่องด้วยน้ำกลั่นวัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียสังเคราะห์สีชมพู Reactive Red 195 ที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มก./ล. บันทึกค่าดูดกลืนแสงที่ได้และนำมาพลอตกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีสังเคราะห์

ภาคผนวก ก-3 การวิเคราะห์หาซีโอดีแบบ Close Reflux, Titrimetric Method

วิธีการทดลอง

- ล้างหลอดทดลองและฟาจุกด้วยกรด H_2SO_4 20% ก่อนเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสารอินทรีย์
- ปิเปตน้ำตัวอย่างมา 2.5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลองแล้วเติม Digestion reagent ลงไป 1.5 มล.
- ค่อยๆ เติมกรด Sulfuric เข้มข้นที่ผสม $AgSO_4$ ลงไป 3.5 มล. ให้ไหลลงก้นหลอดแก้วเพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นของน้ำตัวอย่างและ Digestion reagent

หมายเหตุ ภายหลังการเติมกรด Sulfuric ให้สังเกตสีของตัวอย่างดังต่อไปนี้

- ถ้าได้สีเขียวแสดงว่าปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ เหลืออยู่มาก ใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างน้อยเกินไป ต้องเพิ่มปริมาณน้ำตัวอย่างอีก

- ถ้าได้สีเขียวอมเหลืองแสดงว่าปริมาณน้ำตัวอย่างเหมาะสม สามารถนำตัวอย่างไปรี-ฟลักซ์ได้

- ถ้าได้สีเขียวอมฟ้า แสดงว่าปริมาณน้ำตัวอย่างมากเกินไปต้องทำการเจือจางน้ำตัวอย่างให้มีความเข้มข้นน้อยกว่านี้ โดยจะใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำตัวอย่าง : น้ำกลั่น เท่าไรก็ได้ แต่ผลรวมของปริมาณน้ำตัวอย่างต้องเท่ากับ 7 มล.

4. ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่น แล้วคว่ำไปมาหลายๆ ครั้งอย่างทั่วถึงก่อนจะนำตัวอย่างไปรี-ฟลักซ์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนสะสมอยู่ที่ก้นหลอด ซึ่งอาจแตกได้ในขณะทำการรีฟลักซ์

5. ให้ทำแบลนด์ โดยใช้ น้ำกลั่น แทนน้ำตัวอย่าง ด้วยวิธีการทดลองเช่นเดียวกับการวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง ประมาณ 1-2 หยด

6. นำหลอดแก้วทั้งหมดที่ใส่น้ำตัวอย่างและแบลนด์วางบนที่ตั้งหลอดทดลอง แล้วเข้าเตาอบที่ทำให้อุณหภูมิสูงถึง 150 ± 2 องศาเซลเซียส ก่อนหน้านี้แล้วเมื่อครบเวลา 2 ชั่วโมง ให้นำตัวอย่างออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกว่าจะเย็น

7. เทตัวอย่างจากหลอดลงในขวดรูปชมพู่ แล้วไทเทรตกับสารละลาย FAS จนกระทั่งถึงจุดยุติ จะเห็นการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียว และเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ อ่านปริมาตรที่ไทเทรตตอนเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดงทันที

$$\text{COD (มก./ล.)} = \frac{(a-b) \times N \times 8000}{\text{น้ำตัวอย่าง (มล.)}}$$

a = มิลลิลิตร ของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้ไทเทรต Blank

b = มิลลิลิตร ของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้ไทเทรตน้ำตัวอย่าง

N = นอร์มอล ของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้



ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ Reactive Red 195

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์สี Reactive Red 195

ตาราง ข-1 ปริมาณการวิเคราะห์ค่าซีโอดีก่อนบำบัด

ลำดับ	ปริมาตรไทเทรนต์ FAS (มล.)				ค่าเฉลี่ยปริมาตร ไทเทรนต์ของตัว ควบคุม COD (มล.)	ความ เข้มข้น FAS (นอร์มอล)
	1	2	3	เฉลี่ย		
1	2.10	2.20	2.20	2.16	2.40	0.0536

ตาราง ข-2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่น (nm) เพื่อหาความยาวคลื่นสูงสุด

ลำดับ	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	542	2.440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่เหมาะสมต่อการบำบัด

ตาราง ก-1 แสดงความสัมพันธ์ผลของสัดส่วนโมล H_2O_2 : COD กับปริมาตรไทเทรนต์ FAS

ลำดับ	สัดส่วนโมล H_2O_2 : COD	ปริมาตรไทเทรนต์ FAS (มล.)				ค่าเฉลี่ยปริมาตรไท เทรนต์ของตัว ควบคุม COD (มล.)	ความเข้มข้น FAS (นอร์มอล)
		1	2	3	เฉลี่ย		
1	0 : 1	0.80	1.20	0.90	0.85	2.30	0.0508
2	1.2 : 1	1.90	1.90	2.10	1.90	2.30	0.0508
3	1.4 : 1	2.10	2.10	2.10	2.10	2.30	0.0508
4	1.6 : 1	2.30	2.20	2.20	2.23	2.30	0.0508
5	1.8 : 1	2.10	2.10	2.10	2.10	2.30	0.0508
6	2.0 : 1	2.10	2.20	2.10	2.13	2.30	0.0508

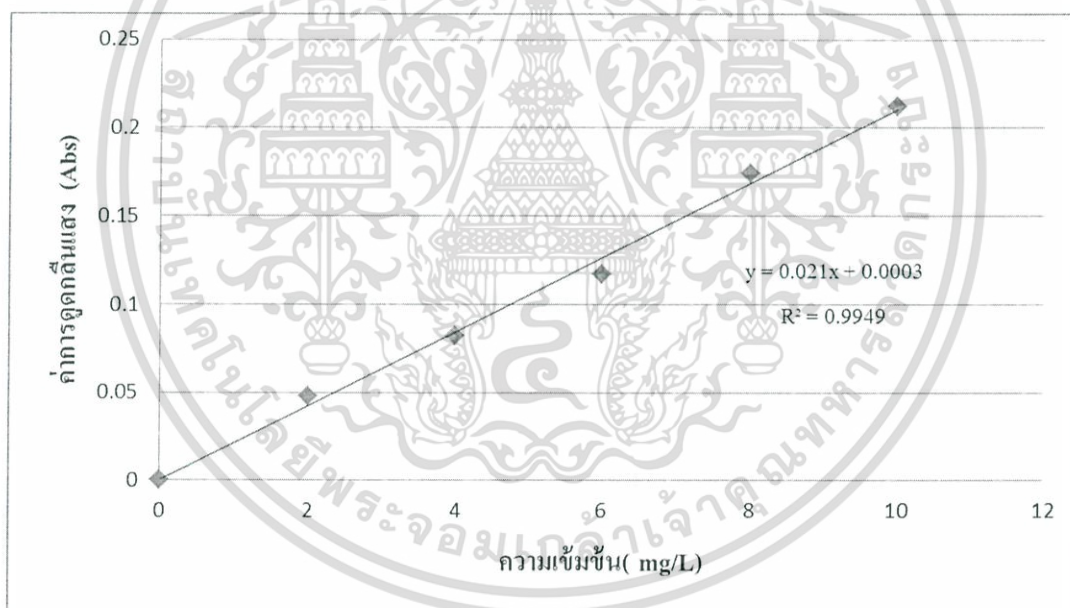
ตาราง ก-2 แสดงความสัมพันธ์ผลของสัดส่วนโมล H_2O_2 : COD และร้อยละประสิทธิภาพการ
บำบัดซีโอดี

ลำดับ	สัดส่วนโมล H_2O_2 : COD	ปริมาตร H_2O_2 (ไมโครลิตร)	ปริมาตร $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (กรัม)	ค่าซีโอดี ก่อน บำบัด (มก./ล)	ค่าซีโอดี หลังบำบัด (มก./ล)	ร้อยละ ประสิทธิภาพ การบำบัดซีโอดี (%)
1	0 : 1	0.00	0.3151	771	268.22	65.21
2	1.2 : 1	308.33	0.3151	771	97.54	87.35
3	1.4 : 1	359.80	0.3151	771	65.02	92.57
4	1.6 : 1	411.20	0.3151	771	43.89	94.31
5	1.8 : 1	462.60	0.3151	771	65.02	92.57
6	2.0 : 1	514.00	0.3151	771	60.15	92.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีสังเคราะห์

ลำดับ	ความเข้มข้น (มก./ล)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0	0.000
2	2	0.048
3	4	0.082
4	6	0.117
5	8	0.174
6	10	0.212



รูป ก-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-4 แสดงความสัมพันธ์ค่าการดูดกลืนแสงก่อนบำบัดและหลังบำบัดที่สัดส่วนโมลต่างๆ

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : COD$	ค่าการ ดูดกลืนแสง ก่อนบำบัด	ค่าการดูดกลืนแสงหลังบำบัด			
			1	2	3	เฉลี่ย
1	0 : 1	0.120	0.141	0.136	0.133	0.137
2	1.2 : 1	0.120	0.004	0.032	0.005	0.014
3	1.4 : 1	0.120	0.015	0.003	0.012	0.005
4	1.6 : 1	0.120	0.001	-0.009	-0.007	-0.00003
5	1.8 : 1	0.120	0.001	0.001	0.009	0.004
6	2.0 : 1	0.120	0.002	0.006	0.005	0.004

ตาราง ก-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมล $H_2O_2 : COD$ และร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสี

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : COD$	ความเข้มข้น ของสีเริ่มต้น (มก./ล)	ความเข้มข้น ของสีหลังบำบัด (มก./ล)	ร้อยละประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
1	0 : 1	567	64.700	88.59
2	1.2 : 1	567	0.215	99.96
3	1.4 : 1	567	0.095	99.98
4	1.6 : 1	567	-0.370	100
5	1.8 : 1	567	0.050	99.99
6	2.0 : 1	567	0.055	99.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sun with rays, flanked by two traditional Thai stupas. Below the sun is a multi-tiered umbrella (parasol) supported by two mythical creatures. The entire design is enclosed within a circular border containing Thai text.

ภาคผนวก ง
การศึกษาหาปริมาณเฟอร์สไอออนที่เหมาะสมต่อการบำบัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาหาปริมาณเพอร์สไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการบำบัด

ตาราง ง-1 แสดงความสัมพันธ์ผลของสัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$ กับปริมาณไทเทรนต์ FAS

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	ปริมาณไทเทรนต์ FAS(มล.)				ค่าเฉลี่ยปริมาณ ไทเทรนต์ของตัว ควบคุม COD (มล.)	ความเข้มข้น FAS (นอร์มอล)
		1	2	3	เฉลี่ย		
1	1 : 0	2.00	2.00	2.00	2.00	2.30	0.0508
2	1 : 0.2	2.00	1.90	2.00	1.97	2.30	0.0508
3	1 : 0.4	2.30	2.20	2.20	2.23	2.30	0.0508
4	1 : 0.5	2.10	2.20	2.10	2.13	2.30	0.0508
5	1 : 0.6	2.10	2.10	2.10	2.10	2.30	0.0508
6	1 : 0.8	2.10	2.10	2.10	2.10	2.30	0.0508

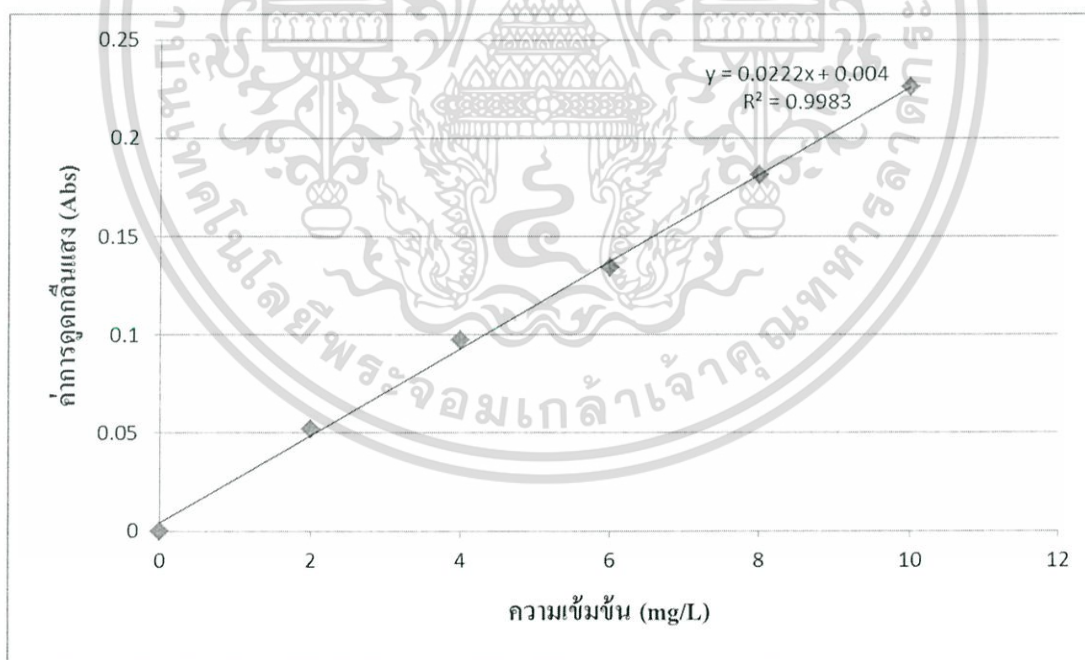
ตาราง ง-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมล $Fe^{2+} : H_2O_2$ และร้อยละประสิทธิภาพการบำบัด
ซีโอดี

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	ปริมาตร H_2O_2 (ไมโครลิตร)	ปริมาตร $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (กรัม)	ค่าซีโอดี ก่อนบำบัด (มก./ล)	ค่าซีโอดี หลังบำบัด (มก./ล)	ร้อยละ ประสิทธิภาพ การบำบัดซีโอดี (%)
1	1 : 0	411.20	0.0000	771	650.24	15.66
2	1 : 0.2	411.20	0.2016	771	86.16	86.16
3	1 : 0.4	411.20	0.4033	771	43.89	94.31
4	1 : 0.5	411.20	0.5043	771	60.15	92.20
5	1 : 0.6	411.20	0.6049	771	65.02	91.57
6	1 : 0.8	411.20	0.8065	771	65.02	91.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของสารละลาย
มาตรฐานสีสังเคราะห์

ลำดับ	ความเข้มข้น (มก./ล)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0	0.000
2	2	0.052
3	4	0.097
4	6	0.134
5	8	0.181
6	10	0.226



รูป ง-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสี
สังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง-4 แสดงความสัมพันธ์ค่าการดูดกลืนแสงก่อนบำบัดและหลังบำบัดที่สัดส่วนโมลต่างๆ

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	ค่าการดูดกลืนแสง ก่อนบำบัด	ค่าการดูดกลืนแสงหลังบำบัด			
			1	2	3	เฉลี่ย
1	1 : 0	0.138	0.106	0.133	0.136	0.125
2	1 : 0.2	0.138	0.021	0.029	0.014	0.021
3	1 : 0.4	0.138	0.022	0.023	0.011	0.018
4	1 : 0.5	0.138	0.018	0.019	0.021	0.019
5	1 : 0.6	0.138	0.029	0.031	0.031	0.030
6	1 : 0.8	0.138	0.036	0.037	0.034	0.036

ตาราง ค-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$ และร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสี

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	ความเข้มข้น ของสีเริ่มต้น (มก./ล)	ความเข้มข้น ของสีหลังบำบัด (มก./ล)	ร้อยละ ประสิทธิภาพการ บำบัด (%)
1	1 : 0	567	543	4.23
2	1 : 0.2	567	0.93	99.84
3	1 : 0.4	567	0.82	99.86
4	1 : 0.5	567	0.85	99.85
5	1 : 0.6	567	1.34	99.76
6	1 : 0.8	567	1.57	99.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ

การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการบำบัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการบำบัด

ตาราง จ-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชต่างๆกับปริมาตรไทเทรนต์ FAS

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	พีเอช	ปริมาตรไทเทรนต์ FAS(มล.)				ค่าเฉลี่ยปริมาตรไทเทรนต์ของตัวควบคุม COD (มล.)	ความเข้มข้น FAS (นอร์มอล)
			1	2	3	เฉลี่ย		
1	1.6 : 0.4	2	2.10	2.10	2.10	2.10	2.30	0.0508
2	1.6 : 0.4	3	2.20	2.20	2.30	2.23	2.30	0.0508
3	1.6 : 0.4	4	2.10	2.20	2.20	2.17	2.30	0.0508
4	1.6 : 0.4	5	2.10	2.10	2.20	2.13	2.30	0.0508

*ค่าเฉลี่ยปริมาตรไทเทรนต์ FAS ของตัวควบคุมที่พีเอช 5.71 (ไม่ปรับ) เท่ากับ 2.03 มิลลิลิตร

ตาราง จ-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชต่างๆและร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

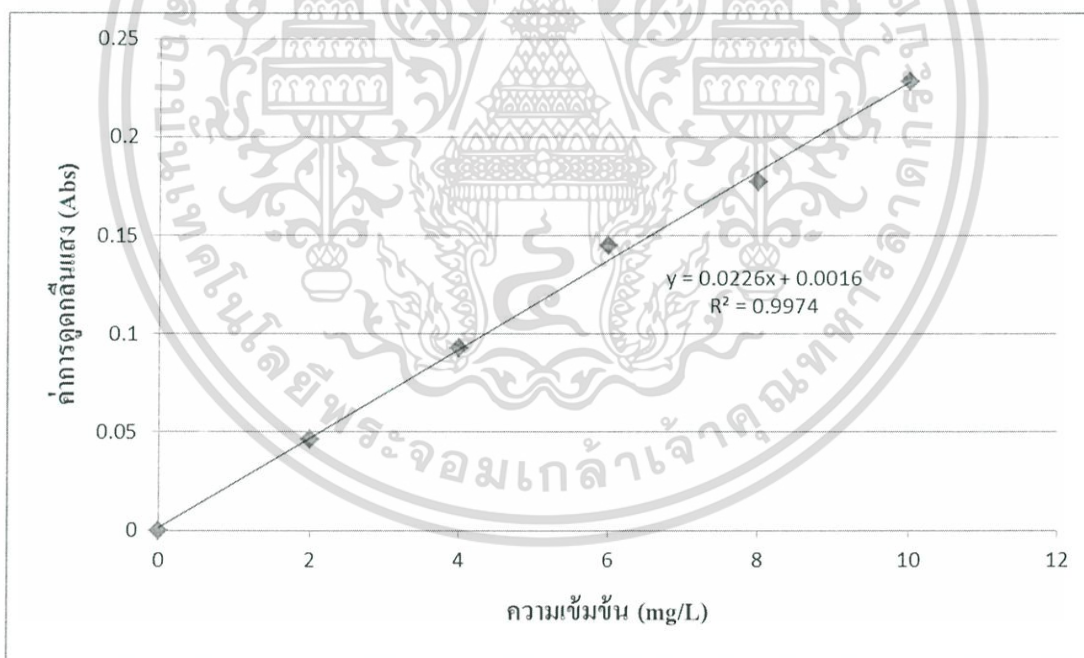
ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	ปริมาตร H_2O_2 (ไมโครลิตร)	ปริมาตร $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (กรัม)	พีเอช	ค่าซีโอดี ก่อนบำบัด (มก./ล)	ค่าซีโอดี หลังบำบัด (มก./ล)	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (%)
1	1.6 : 0.4	411.20	0.4033	2	771	65.02	91.57
2	1.6 : 0.4	411.20	0.4033	3	771	43.89	94.31
3	1.6 : 0.4	411.20	0.4033	4	771	53.64	93.04
4	1.6 : 0.4	411.20	0.4033	5	771	60.15	92.20

*ค่าซีโอดีหลังบำบัดของตัวควบคุมที่พีเอช 5.71 (ไม่ปรับ) เท่ากับ 76.40 มก./ล. และร้อยละ

ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 90%

ตาราง จ-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของสารละลาย
มาตรฐานสีสังเคราะห์

ลำดับ	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0	0.000
2	2	0.046
3	4	0.093
4	6	0.145
5	8	0.177
6	10	0.228



รูป จ-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ-4 แสดงความสัมพันธ์ค่าการดูดกลืนแสงก่อนบำบัดและหลังบำบัดที่พีเอชต่างๆ

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	พีเอช	ค่าการดูดกลืน แสงก่อนบำบัด	ค่าการดูดกลืนแสงหลังบำบัด			
				1	2	3	เฉลี่ย
1	1.6 : 0.4	2	0.134	0.014	0.017	0.020	0.077
2	1.6 : 0.4	3	0.134	0.003	0.011	0.008	0.007
3	1.6 : 0.4	4	0.134	0.032	0.022	0.031	0.028
4	1.6 : 0.4	5	0.134	0.022	0.023	0.020	0.022

ตาราง ก-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสี

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	พีเอช	ความเข้มข้นของสี เริ่มต้น (มก./ล.)	ความเข้มข้นของสี หลังบำบัด (มก./ล.)	ร้อยละ ประสิทธิภาพการ บำบัด (%)
1	1.6 : 0.4	2	567	0.73	99.87
2	1.6 : 0.4	3	567	0.32	99.94
3	1.6 : 0.4	4	567	1.23	99.78
4	1.6 : 0.4	5	567	0.93	99.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ

การศึกษาหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา

ตาราง น-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ปริมาตรไทเทรนต์ FAS

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	พีเอช	เวลา (นาที)	ปริมาตรไทเทรนต์ FAS (มล.)				ค่าเฉลี่ยปริมาตร ไทเทรนต์ ของตัวควบคุม COD (มล.)	ความ เข้มข้น FAS (นอร์มอล)
				1	2	3	เฉลี่ย		
1	1.6 : 0.4	3	0	1.80	1.90	1.90	1.87	2.40	0.0508
2	1.6 : 0.4	3	20	2.20	2.10	2.10	2.13	2.40	0.0508
3	1.6 : 0.4	3	30	2.20	2.30	2.30	2.27	2.40	0.0508
4	1.6 : 0.4	3	40	2.20	2.30	2.30	2.27	2.40	0.0508
5	1.6 : 0.4	3	50	2.30	2.20	2.20	2.23	2.40	0.0508
6	1.6 : 0.4	3	60	2.20	2.20	2.20	2.20	2.40	0.0508

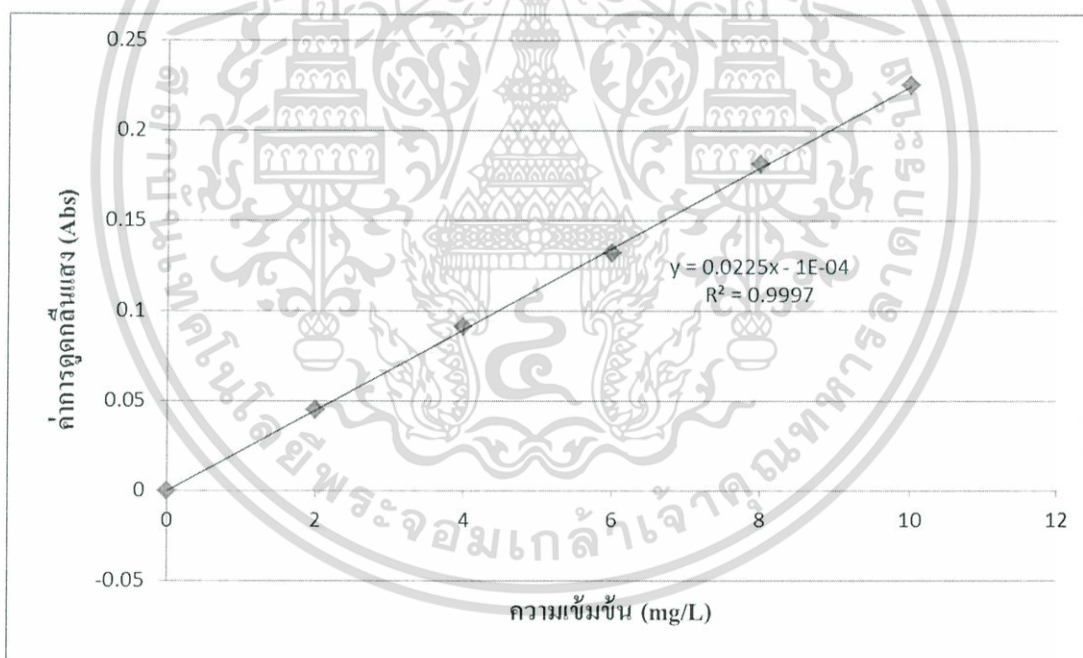
ตาราง น-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	พีเอช	เวลา (นาที)	ปริมาตร H_2O_2 (ไมโครลิตร)	ปริมาตร $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (กรัม)	ค่าซีโอดี ก่อน บำบัด (มก./ล.)	ค่าซีโอดี หลัง บำบัด (มก./ล.)	ร้อยละประ สิทธิภาพ การ บำบัดซีโอดี (%)
1	1.6 : 0.4	3	0	411.20	0.4033	771	102.41	86.72
2	1.6 : 0.4	3	20	411.20	0.4033	771	60.15	92.20
3	1.6 : 0.4	3	30	411.20	0.4033	771	37.39	95.15
4	1.6 : 0.4	3	40	411.20	0.4033	771	37.39	95.15
5	1.6 : 0.4	3	50	411.20	0.4033	771	43.89	94.31
6	1.6 : 0.4	3	60	411.20	0.4033	771	48.77	93.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ฉ-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีสังเคราะห์

ลำดับ	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0	0.000
2	2	0.045
3	4	0.091
4	6	0.132
5	8	0.181
6	10	0.225



รูป ฉ-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ฉ-4 แสดงความสัมพันธ์ค่าการดูดกลืนแสงก่อนบำบัดและหลังบำบัดที่เวลาต่างๆ

ลำดับ	อัตราส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	พีเอช	เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน แสงก่อนบำบัด	ค่าการดูดกลืนแสงหลังบำบัด			
					1	2	3	เฉลี่ย
1	1.6 : 0.4	3	0	0.134	0.040	0.042	0.039	0.040
2	1.6 : 0.4	3	20	0.134	0.012	0.009	0.004	0.008
3	1.6 : 0.4	3	30	0.134	0.005	0.013	0.008	0.009
4	1.6 : 0.4	3	40	0.134	0.008	0.006	0.001	0.005
5	1.6 : 0.4	3	50	0.134	0.020	0.028	0.025	0.024
6	1.6 : 0.4	3	60	0.134	0.007	0.017	0.008	0.011

ตาราง ฉ-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสี

ลำดับ	อัตราส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	พีเอช	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น ของสีเริ่มต้น (มก./ล.)	ความเข้มข้น ของสีหลังบำบัด (มก./ล.)	ร้อยละ ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
1	1.6 : 0.4	3	0	567	1.75	99.69
2	1.6 : 0.4	3	20	567	0.38	99.93
3	1.6 : 0.4	3	30	567	0.40	99.93
4	1.6 : 0.4	3	40	567	0.22	99.96
5	1.6 : 0.4	3	50	567	1.08	99.81
6	1.6 : 0.4	3	60	567	0.48	99.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของแสงยูวี

ตาราง ข-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ปริมาตรไทเทรนต์ FAS

ลำดับ	สัดส่วน โมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	พีเอช	เวลา (นาที)	ปริมาตรไทเทรนต์ FAS(มล.)				ค่าเฉลี่ย ปริมาตร ไทเทรนต์ของ ตัวควบคุม COD (มล.)	ความ เข้มข้น FAS (นอร์มอล)
				1	2	3	เฉลี่ย		
1	1.6 : 0.4	3	0	1.80	1.90	1.90	1.87	2.40	0.0508
2	1.6 : 0.4	3	5	2.30	2.20	2.20	2.23	2.40	0.0508
3	1.6 : 0.4	3	10	2.30	2.30	2.40	2.33	2.40	0.0508
4	1.6 : 0.4	3	15	2.20	2.30	2.30	2.27	2.40	0.0508

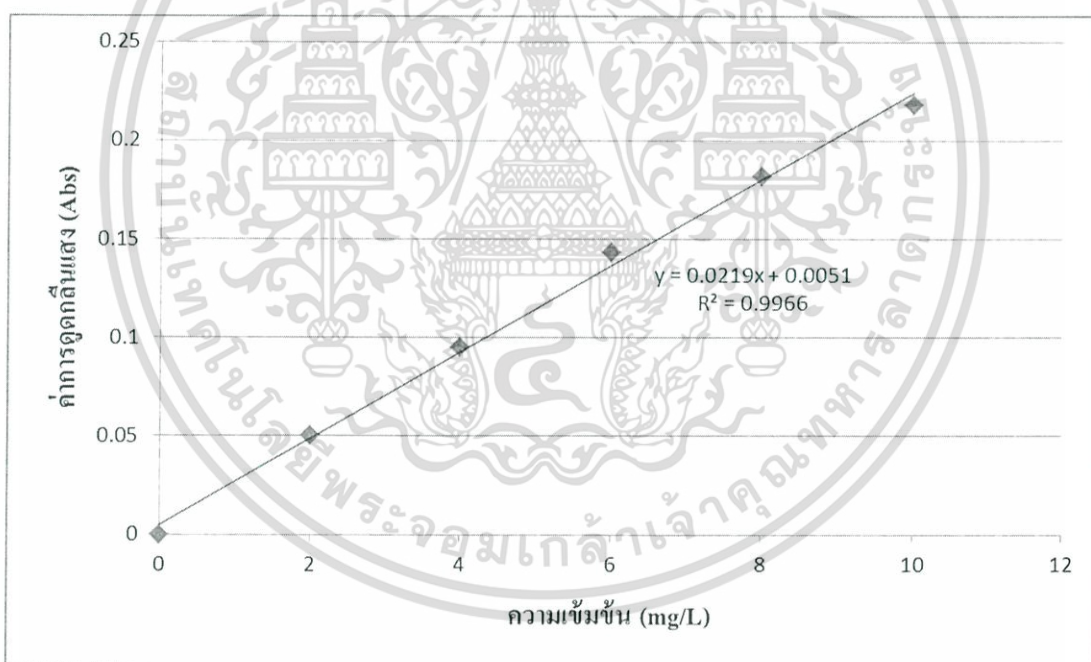
ตาราง ข-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

ลำดับ	สัดส่วน โมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	พีเอช	เวลา (นาที)	ปริมาตร H_2O_2 (ไมโครลิตร)	ปริมาตร $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (กรัม)	ค่าซีโอดี ดีก่อน บำบัด (มก./ล.)	ค่าซีโอดี หลัง บำบัด (มก./ล.)	ร้อยละ ประสิทธิภาพ การบำบัด ซีโอดี (%)
1	1.6 : 0.4	3	0	411.20	0.4033	771	102.41	86.72
2	1.6 : 0.4	3	5	411.20	0.4033	771	43.89	94.31
3	1.6 : 0.4	3	10	411.20	0.4033	771	27.64	96.42
4	1.6 : 0.4	3	15	411.20	0.4033	771	37.39	95.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของสารละลาย
มาตรฐานสีสังเคราะห์

ลำดับ	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0	0.000
2	2	0.050
3	4	0.095
4	6	0.143
5	8	0.182
6	10	0.218



รูป ข-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-4 แสดงความสัมพันธ์ค่าการดูดกลืนแสงก่อนบำบัดและหลังบำบัดที่เวลาต่างๆ

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	พีเอช	เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืน แสงก่อนบำบัด	ค่าการดูดกลืนแสงหลังบำบัด			
					1	2	3	เฉลี่ย
1	1.6 : 0.4	3	0	0.128	0.040	0.042	0.039	0.040
2	1.6 : 0.4	3	5	0.128	0.016	0.012	0.015	0.014
3	1.6 : 0.4	3	10	0.128	0.006	0.002	0.006	0.005
4	1.6 : 0.4	3	15	0.128	0.007	0.014	0.006	0.009

ตาราง ข-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสี

ลำดับ	สัดส่วนโมล $H_2O_2 : Fe^{2+}$	พีเอช	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น ของสีเริ่มต้น (มก./ล.)	ความเข้มข้น ของสีหลังบำบัด (มก./ล.)	ร้อยละ ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
1	1.6 : 0.4	3	0	567	1.75	99.69
2	1.6 : 0.4	3	5	567	0.64	99.88
3	1.6 : 0.4	3	10	567	0.21	99.96
4	1.6 : 0.4	3	15	567	0.40	99.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Surin is a circular emblem. It features a central sun with rays, flanked by two traditional Thai stupas. Below the sun is a tiered umbrella (parasol) supported by two mythical creatures. The entire design is surrounded by a decorative border with Thai script. The text 'ภาคผนวก ข' is centered over the seal, and the title 'การคำนวณปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน' is written below it.

ภาคผนวก ข

การคำนวณปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน

ซ-1 วิธีแสดงการคำนวณหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในหัวข้อ 3.2.2.1

ตัวอย่าง $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{Fe}^{2+} = 1.6 : 1$

COD 1 ใช้ H_2O_2 1.6

COD 771 มก./ล. ใช้ H_2O_2 $1.6 \times 771 = 1,233.6$ มก. / ล.

$1,233.6$ มก. / ล. $\times 1$ ล. / $1,000$ มล. $= (1,233.6 \text{ มก.} / 1,000 \text{ มล.}) \times 100 \text{ มล.}$
 $= 0.12336$ มล.

H_2O_2 ความเข้มข้น 30% $= (0.12336 \times 100) / 30$
 $= 0.4112$ มล. $= 411.2$ ไมโครลิตร

ซ-2 วิธีแสดงการคำนวณหาปริมาณเฟอร์รัสไอออนในหัวข้อ 3.2.2.1

จากการศึกษาวิจัย Lee, (2008) พบว่า COD : H_2O_2 ที่ 1 : 1 เหมาะสมที่สุด

COD 771 มก./ล. H_2O_2 771 มก./ล.

คิดที่ 100 มล. $771 \text{ มก./ล.} \times 1 \text{ ลิตร} / 1000 \text{ มล.} \times 100 \text{ มล.} = 77.1$ มก.

ทำหน่วยเป็น โมล $77.1 \text{ มล.} / (34 \text{ กรัม} / \text{โมล} \times 1,000 \text{ มก./กรัม}) = 2.2676 \times 10^{-3}$

และจากงานวิจัย Lee, (2008) พบว่า $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$ ที่ 1 : 2 เหมาะสมที่สุด

ดังนั้น จำนวน Fe^{2+} ที่ใช้ $(2.2676 \times 10^{-3} \times 55.8) / 2 = 0.0633$ กรัม

คำนวณหาปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Fe^{2+} 55.8 กรัม / โมล ใช้ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 277.8 กรัม / โมล

Fe^{2+} 0.0633 กรัม ใช้ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.3151 กรัม

ดังนั้นใช้ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 0.3151$ กรัม

ซ-3 วิธีแสดงการคำนวณหาปริมาณเฟอร์รัสไอออนในหัวข้อ 3.2.2.2

จากผลการทดลองพบว่าสัดส่วน โมลของ H_2O_2 : COD ที่เหมาะสมคือ 1.6 : 1 และสัดส่วน โมล Fe^{2+} : H_2O_2 ที่ 0.4 : 1 มีวิธีการคำนวณปริมาณ Fe^{2+} ดังต่อไปนี้

ตัวอย่าง

$$\text{COD } 1 \quad \text{H}_2\text{O}_2 \quad 1.6$$

$$\text{COD } 771 \text{ มก./ล.} \quad \text{H}_2\text{O}_2 \quad 1.6 \times 771 = 1,234 \text{ มก./ล.}$$

$$1,234 \text{ มก./ล.} \times \frac{1 \text{ ลิตร}}{1,000 \text{ มล.}} \times 100 \text{ มล.} = 123.4 \text{ มก.}$$

$$\text{H}_2\text{O}_2 = 123.4 \text{ มก.} / 34000 = 3.63 \times 10^{-3} \text{ โมล}$$

คิดที่ Fe^{2+} 0.4 โมล ;

$$\text{H}_2\text{O}_2 \quad 3.63 \times 10^{-3} \times 55.8 \times 0.4 = 0.0810 \text{ กรัม/โมล}$$

$$\text{Fe}^{2+} \quad 55.8 \text{ กรัม/โมล} \quad \text{ใช้ } \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \quad 277.8 \text{ กรัม/โมล}$$

$$\text{ถ้า } \text{Fe}^{2+} \quad 0.0810 \text{ กรัม/โมล} \quad \text{ใช้ } \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \quad 0.4033 \text{ กรัม}$$