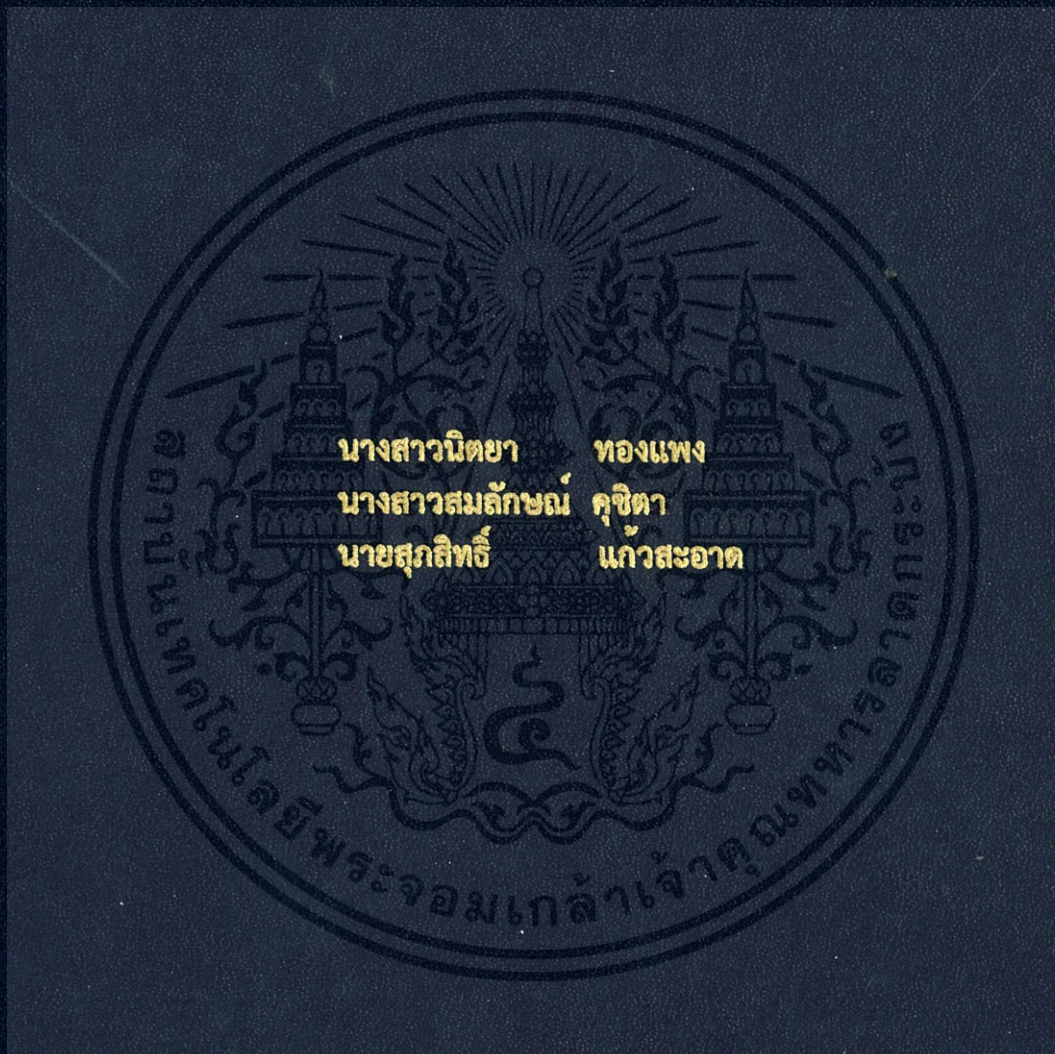


การกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี
หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

REMOVAL OF COLOR AND COD FROM FLEXOGRAPHIC
PRINTING WASTEWATER WITH WATER-BASE INK
BY FENTON REACTION



นางสาวนิตยา ทองแพง
นางสาวสมลักษณ์ คุชิตา
นายสุกสิทธิ์ แก้วสะอาด

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดมหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี
หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

REMOVAL OF COLOR AND COD FROM FLEXOGRAPHIC
PRINTING WASTEWATER WITH WATER-BASE INK
BY FENTON REACTION



นางสาวนิตยา ทองแพง
นางสาวสมลักษณ์ คุชิตา
นายสุภสิทธิ์ แก้วสะอาด

b. 128 2561 X
f.

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 148952
วัน,เดือน,ปี 19 S.ค. 2560

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REMOVAL OF COLOR AND COD FROM FLEXOGRAPHIC
PRINTING WASTEWATER WITH WATER-BASE INK
BY FENTON REACTION



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี
หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

Removal of Color and COD from Flexographic Printing
Wastewater with Water-Base Ink by Fenton Reaction

ชื่อนักศึกษา

นางสาวนิตยา ทองแพง รหัสนักศึกษา 55050940

นางสาวสมลักษณ์ คุชิตา รหัสนักศึกษา 55051016

นายสุภสิทธิ์ แก้วสะอาด รหัสนักศึกษา 55051025

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี


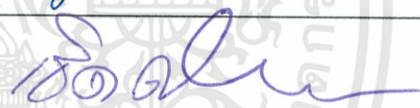

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ ประธานกรรมการ	
ดร. เชิดศักดิ์ มณีรัตนรุ่งโรจน์ กรรมการ	
ผศ.ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน		
	Removal of Color and COD from Flexographic Printing Wastewater with Water-Based Ink by Fenton Reaction		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนิตยา	ทองแพง	รหัสนักศึกษา 55050940
	นางสาวสมลักษณ์	คุชิตา	รหัสนักศึกษา 55051016
	นายสุภสิทธิ์	แก้วสะอาด	รหัสนักศึกษา 55051025
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดี โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อซีโอดี อัตราส่วนของเหล็กไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และค่าพีเอช ผลการศึกษาพบว่าทุกปัจจัยมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-Value} < 0.05$) สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสี ได้แก่ อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเหล็กไอออนเท่ากับ $0.5 : 0.1$ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ที่สภาวะดังกล่าวได้ประสิทธิภาพการกำจัดสี 98.90 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดี ได้แก่ อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเหล็กไอออนเท่ากับ $2.0 : 1.0$ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสี 97.26 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : แฟคทอเรียลแบบเต็มรูป ปฏิกิริยาเฟนตัน หมึกพิมพ์ฐานน้ำระบบเฟล็กโซกราฟี

Title	Removal of Color and COD from Flexographic Printing Wastewater with Water-Based Ink by Fenton Reaction		
Students	Miss Nittaya	Thongphaeng	ID 55050940
	Miss Somlug	Kuchita	ID 55051016
	Mr. Supasit	Kaeosa-ard	ID 55051025
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2015		
Advisor	Asst. Prof. Dr. Usarat Thawornchaisit		

Abstract

This special project studied the removal of color and COD from flexographic printing wastewater by fenton reaction. Factors affecting the color and COD removal efficiency were investigated using Full factorial experimental design. The independent variables that were investigated includes ratio of hydrogen peroxide to COD, ratio of Ferrous ions to hydrogen peroxide and pH. Results showed that all factors significantly affected efficiency of the color and COD. Optimum condition ratio of hydrogen peroxide to Ferrous ions for removal were as follow : at 0.5 : 0.1, optimum condition for removal of COD were as follow : pH 4 and reaction time of 40 minutes. At this condition, the removal of color was 98.90 percent. Optimum condition for removal of COD were as follow : ratio of hydrogen peroxide to Ferrous ions of 2.0 : 1.0, pH 4 and reaction time of 40 minutes. with the removal of color at 97.26 percent.

Keywords: Full Factorial design, Fenton reaction Flexographic water base inks

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่งผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความกรุณาเสียสละเวลา ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ดูแลเอาใจใส่และติดตามตรวจสอบ ดิชมผลให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุช ไชยรักษ์ และ ดร.เชตศักดิ์ มณีรัตน์รุ่งโรจน์ กรรมการผู้ชี้แนะข้อบกพร่องและแนวทางแก้ไขรวมถึงตรวจสอบ ดิชมผลงาน ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สิทธิชัย เจริญเศรษฐศิลป์ อาจารย์ประจำภาควิชาสถิติที่ให้ความกรุณาเสียสละเวลา ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและติดตามตรวจสอบ ดิชมผลให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท สยามโปรครีเอชัน เซ็นเตอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บน้ำเสียของโรงพิมพ์เพื่อใช้ทดลองในโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและความร่วมมือ จนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์สถานที่ ห้องปฏิบัติการเคมีในการทดลอง ตึกจุฬารัตน์ 1 และสำนักหอสมุดกลาง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ อนุเคราะห์สถานที่ในการศึกษา ค้นคว้า วิจัยในการทำโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ กำลังใจจากบิดา มารดา ตลอดจนบุคคลอื่น ๆ ที่ได้กล่าวถึงในที่นี่ ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษจึงใคร่ขอขอบพระคุณ มา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวนิตยา ทองแพง
นางสาวสมลักษณ์ คุชิตา
นายสุภสิทธิ์ แก้วสะอาด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี	3
2.2 หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ	3
2.3 การบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน	8
2.4 การออกแบบการทดลอง	11
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	18
3.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา	18
3.3 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัด	19
3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยการวางแผนการทดลองวิธีแบบเต็มเชิงแฟคทอเรียล (Full factorial design)	19
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำ	23
4.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา	23
4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีด้วย ปฏิกิริยาเฟนตัน	24
4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน	29

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอที ในน้ำเสียของโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ(สีแดง)ด้วยปฏิกิริยาเพนตัน	35
5.2 ข้อเสนอแนะ	35
เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก หลักการและวิธีการวิเคราะห์	40
ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง	47
ภาคผนวก ค การคำนวณที่เกี่ยวข้อง	54
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	57



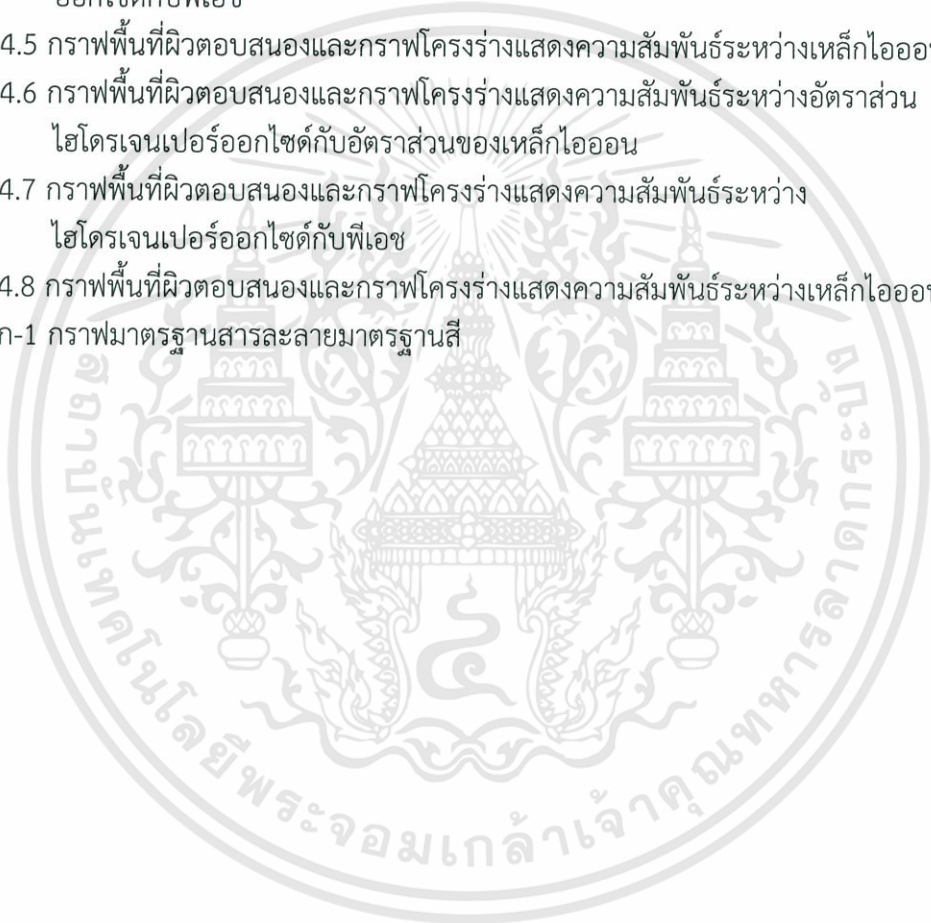
สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 สมบัติของน้ำที่ทำการวิเคราะห์ ในการศึกษา	17
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ศึกษาและระดับค่าของตัวแปร	18
ตารางที่ 3.3 ลำดับการทดลองที่ได้จากการสุ่มแบบสมบูรณ์	18
ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของประสิทธิภาพการกำจัดสี	14
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี	29
ตารางที่ ก-1 ปริมาณตัวอย่างและรีเอเจนต์ที่ใช้สำหรับขนาดต่างๆ ของภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย	38
ตารางที่ ก-2 การวัดหาค่า (%T) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ	40
ตารางที่ ก-3 ค่า DE และค่าหน่วยสีมาตรฐาน ADMI Unit	41
ตารางที่ ข-1 ข้อมูลเบื้องต้นของน้ำเสียก่อนการบำบัด	44



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะของระบบพิมพ์เฟล็กโซกราฟ	3
รูปที่ 4.1 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟที่หมักพิมพ์ฐานน้ำที่ใช้ในการศึกษา	22
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี	23
รูปที่ 4.3 กราฟพื้นที่ผิวตอบสนองและกราฟโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับอัตราส่วนของเหล็กไอออน	25
รูปที่ 4.4 กราฟพื้นที่ผิวตอบสนองและกราฟโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับพีเอช	26
รูปที่ 4.5 กราฟพื้นที่ผิวตอบสนองและกราฟโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กไอออนกับพีเอช	27
รูปที่ 4.6 กราฟพื้นที่ผิวตอบสนองและกราฟโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับอัตราส่วนของเหล็กไอออน	28
รูปที่ 4.7 กราฟพื้นที่ผิวตอบสนองและกราฟโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับพีเอช	30
รูปที่ 4.8 กราฟพื้นที่ผิวตอบสนองและกราฟโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กไอออนกับพีเอช	31
รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐานสี	41



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

หมึกพิมพ์จัดเป็นจัดเป็นวัตถุอันตรายต่อการพิมพ์สื่อสิ่งพิมพ์ต่างๆ ซึ่งที่ผ่านมาหมึกพิมพ์ที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นหมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลาย (solvent-based ink) ที่มีสมบัติสำคัญคือแห้งตัวเร็ว แต่มีข้อเสียสำคัญคือเกิดการระเหยของตัวทำละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง VOCs ในระหว่างกระบวนการแห้งตัว ที่อาจทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ ในปัจจุบันจึงมีการรณรงค์ให้โรงพิมพ์เปลี่ยนมาใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำเพื่อลดปัญหาดังกล่าว ข้อดีที่สำคัญอย่างหนึ่งของการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ฐานน้ำ คือช่างพิมพ์สามารถล้างเครื่องพิมพ์ได้ด้วยน้ำธรรมดา แต่ขณะเดียวกันก็มีข้อเสียคือเกิดน้ำเสียปริมาณมากและในน้ำเสียก็มีหมึกพิมพ์ปนเปื้อนในปริมาณสูงต่อการล้างเครื่องพิมพ์หนึ่งครั้ง (ปิยะฉัตร, 2545) อีกทั้งน้ำเสียจากโรงพิมพ์ที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำจะถูกบำบัดได้ยากขึ้น เนื่องจากสารให้สีในหมึกพิมพ์ไม่ว่าจะเป็นสีย้อม (dye) หรือผงสี (pigment) อยู่ในสภาพคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูงมากในน้ำ เป็นผลมาจากการพัฒนาวิธีการผลิตหมึกพิมพ์ให้สารให้สีนั้นสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี ไม่ตกตะกอนง่ายด้วยการเติมเรซินที่เป็น dispersing agent (Laden, 1997 ; Hahn, 1996 ; Dalfon et al., 1997 อ้างถึงใน ปิยะฉัตร, 2545) อีกทั้งสีที่เกิดจากหมึกพิมพ์ฐานน้ำทั่วไปประกอบด้วยเม็ดสี (Organic pigment) ชนิดอะโซ (Azo dye) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่โมเลกุลมีโครงสร้างซับซ้อน ซึ่งหากไม่ได้รับการบำบัดอย่างเหมาะสมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ อาจก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ และส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศน์ตามมา (อรชุดาและอนุรักษ์, 2550)

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมึกพิมพ์โดยทั่วไปมักใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับกระบวนการกำจัดทางชีววิทยาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ยังเหลืออยู่ ด้วยเหตุที่สารให้สีในหมึกพิมพ์น้ำอยู่ในสภาพคอลลอยด์ ทำให้ไม่สามารถบำบัดได้ง่ายด้วยการตกตะกอน จึงจำเป็นต้องหากรรมวิธีการบำบัดน้ำเสียของโรงพิมพ์ที่ง่ายประหยัดและประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสี การกำจัดสีในน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนต์ันจัดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากมีข้อได้เปรียบคือมีต้นทุนต่ำ เมื่อเทียบการบำบัดน้ำเสียทางเคมีวิธีอื่นๆ (สุชนม์ และบุญสร้าง, ม.ป.ป) โครงการพิเศษนี้จึงมีเป้าหมายที่จะบำบัดน้ำเสียของโรงพิมพ์ระบบเพล็กซ์โกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนต์ัน พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงสถิติด้วยวิธีแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (Full factorial design) ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Regression Analysis

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน
- 2) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดีโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) น้ำเสียที่ใช้ศึกษาคือ น้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ(สีแดง)
- 2) ศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสีย ได้แก่ พีเอช (pH) ซีโอดี (COD) และ สี (Color)
- 3) ศึกษาผลของระยะเวลาต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน
- 4) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตันและหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธี $3 \times 3 \times 3$ Factorial Experiment ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Regression Analysis ซึ่งตัวแปรต้นที่ทำการศึกษา ได้แก่
 - ปริมาณของ H_2O_2 โดยกำหนดอัตราส่วนโดยมวลของ H_2O_2 : COD ที่ 0.5, 1.0 และ 2.0
 - ปริมาณของ Fe^{2+} โดยกำหนดอัตราส่วนโดยมวลของ Fe^{2+} : H_2O_2 ที่ 0.1 , 0.5 และ 1.0
 - พีเอช 2 , 3 และ 4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

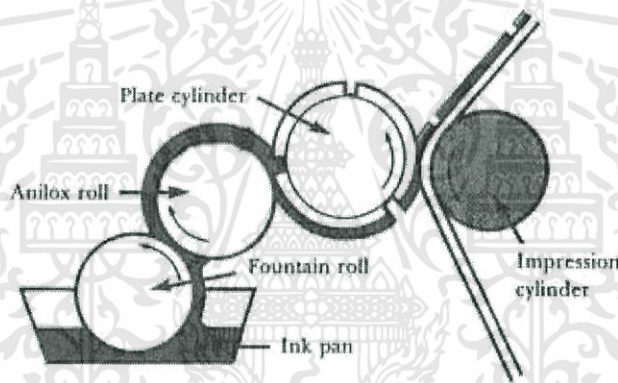
- 1) ทราบถึงแนวทางในการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน
- 2) สามารถนำข้อมูลความรู้ไปปรับปรุงพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงพิมพ์ให้มีคุณภาพดีขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี

การพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี (Flexography Printing) เป็นการพิมพ์พื้นนูนบนวัสดุรองพิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ยางที่มีความยืดหยุ่น ขั้นตอนการพิมพ์นั้นจะถูกเชื่อมเข้ากับขั้นตอนการผลิตอื่นๆ โดยเริ่มจากการป้อนม้วนกระดาษ กระดาษแข็งเซลโลโฟน หรือพลาสติกเข้าพิมพ์และขึ้นรูปจนได้กล่องกระดาษหรือพลาสติกในการป้อนครั้งเดียว ระบบการพิมพ์จะมีลูกกลิ้งยางจุ่มอยู่ในอ่างหมึก(รูปที่ 2.1) ทำให้ลูกกลิ้งด้วยหมึกแบบต่างๆ (ink roll) ลูกกลิ้งดังกล่าวจะพาหมึกมาติดที่ลูกกลิ้งเหล็ก (anilox roll) ซึ่งจะถ่ายทอดหมึกไปให้ลูกกลิ้งที่มีแม่พิมพ์ยางหุ้ม (Plate cylinder) จากนั้นแม่พิมพ์ยางจะถ่ายทอดหมึกลงบนผิวของวัสดุรองพิมพ์ สิ่งพิมพ์ส่วนใหญ่มักเป็นสิ่งพิมพ์บรรจุภัณฑ์โดยวัสดุรองพิมพ์ ได้แก่ กระดาษ พลาสติก แผ่นโลหะเปลว เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ลักษณะของระบบพิมพ์เฟล็กโซกราฟี

ที่มา : <http://www.pneac.org/printprocesses/flexography/>

หมึกพิมพ์ที่ใช้กับระบบเฟล็กโซกราฟีเป็นหมึกเหลว สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ตามตัวทำละลายที่ใช้ ได้แก่ หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานตัวทำละลาย (solvent-based ink) หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ (water-base ink) และหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟียูวี (UV-ink) นอกจากนี้ยังอาจแบ่งได้ตามสารให้สีต่างกัน ได้แก่ หมึกพิมพ์ที่ใช้สีย้อม (dye-base ink) และหมึกพิมพ์ที่ใช้ผงสี (pigment-base ink) หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีเป็นหมึกพิมพ์ที่มีความเหนียวน้อยมาก มีความหนืดสูงกว่าปกติ ทำให้ต้องมีการเจือจางให้มีความหนืดเหมาะสมก่อนนำไปใช้พิมพ์ เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการบำบัดน้ำเสียของโรงพิมพ์ที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ หัวข้อต่อไปจะทบทวนความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับหมึกพิมพ์ฐานน้ำ (ธีระ, 2539)

2.2 หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ

หมึกพิมพ์ประเภทนี้เป็นหมึกพิมพ์ที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายหลัก โดยอาจมีตัวทำละลายพวกแอลกอฮอล์และไกลคอลผสมอยู่บ้างในปริมาณเล็กน้อย ส่วนใหญ่แล้วหมึกพิมพ์ชนิดนี้ใช้พิมพ์บนวัสดุ

รองพิมพ์ที่มีความสามารถในการดูดซึม เช่น กระดาษ กระดาษแข็ง กระดาษเหนียว/กระดาษคราฟท์ และกระดาษลูกฟูก (ปิยะฉัตร, 2545) มีบางชนิดที่ใช้พิมพ์บนแผ่นอะลูมิเนียมเปลวและพลาสติก ข้อดีของหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ คือ ลดปัญหามลพิษทางอากาศ เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายและราคาถูก การควบคุมความหนืดของหมึกพิมพ์บนเครื่องพิมพ์ยังทำได้ง่ายกว่าการใช้หมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลายด้วยและเนื่องจาก หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำมีการแห้งตัวช้ากว่าหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานตัวทำละลาย การเปลี่ยนแปลงความหนืดของหมึกพิมพ์จึงมีน้อยกว่า นอกจากนี้ยังไม่เป็นอันตรายต่อลูกกลิ้งหมึกที่เป็นยางและแม่พิมพ์ทั้งชนิดที่เป็นยางและพอลิเมอร์ และไม่เป็นอันตรายต่อสวัสดิภาพของช่างพิมพ์ เนื่องจากน้ำเป็นสารไม่ติดไฟ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำคือ น้ำเป็นตัวทำละลายที่มีแรงดึงผิวสูงกว่าหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานตัวทำละลาย ทำให้การเปียกผิววัสดุใช้พิมพ์เพื่อให้เกิดการพิมพ์ติดทำได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพิมพ์บนวัสดุใช้พิมพ์พวกพลาสติก นอกจากนี้เป็นหมึกพิมพ์ที่อัตราการระเหยต่ำในการทำให้แห้งจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าหมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลายการใช้ความร้อนสูงเกินไปผลทำให้วัสดุที่ใช้พิมพ์เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ (ธีระ, 2539)

หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีมีองค์ประกอบสำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ สารให้สี (colorant) ตัวทำละลาย (solvent) เรซิน (Resin) และสารเติมแต่ง (additives) มีสัดส่วนผสมโดยปริมาณของแต่ละองค์ประกอบตามลำดับดังนี้ สารให้สี 10 - 20% ตัวทำละลาย คือ น้ำ 30 - 50% เรซินซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของตัวพา 20 - 40% และสารเติมแต่ง 0-5% (ศุภณีย์และแววบุญ, 2557)

2.2.1. สารให้สี

สารให้สีในหมึกพิมพ์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ผงสี (pigment) และสีย้อม (dye)

1). สีย้อม (Dye) เป็นสารให้สีประเภทที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายต่างๆ สีย้อมส่วนใหญ่เกิดการซีดจางได้ง่ายเมื่อได้รับแสงสว่างเป็นเวลานาน และเมื่อละลายในตัวทำละลายแล้วจะไม่กระเจิงแสง ดังนั้นจึงทำให้ได้สารละลายที่มีแต่สีใส

2). ผงสี (pigment) มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ เพียงแต่กระจายตัวอยู่ในตัวทำละลายเท่านั้น ทำให้หมึกที่มีผงสีมีสภาพเป็นสารแขวนลอย นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการกระเจิงแสง ทำให้หมึกพิมพ์ที่มีผงสีเป็นองค์ประกอบมีความทึบแสงมากกว่า อีกทั้งยังมีสภาพทนต่อแสง สีที่พิมพ์ด้วยหมึกประเภทนี้จึงซีดจางช้ากว่าอาจจำแนกออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภทตามองค์ประกอบทางเคมี คือ ผงสีอินทรีย์ และผงสีอนินทรีย์ (ธีระ, 2539)

2.1) ผงสีอินทรีย์

ผงสีอินทรีย์เป็นผงที่มีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุคาร์บอน (carbon) และไฮโดรเจน (hydrogen) และอาจมีธาตุอื่นๆเป็นองค์ประกอบร่วมอยู่ด้วยเช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน คลอรีน เป็นต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.01-1 ไมครอน หรือ 0.00001-0.001 มิลลิเมตร โดยอาจจำแนกผงสีอินทรีย์ออกได้เป็น 2 ประเภท โดยใช้สีสัน (hue) เป็นเกณฑ์ดังนี้

2.1.1) ผงสีอินทรีย์สีดำ

เป็นผงสีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ มีราคาถูก ทนทานต่อแสง ความชื้นและความร้อน มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักสูงถึง 90-99 เปอร์เซ็นต์ (ปิยะฉัตร, 2545) ที่สำคัญมี 3 ชนิด คือ

ก. เฟอร์นิชแบล็ก(furnance black) เป็นผงสีที่มีสีด้าอมน้ำเงิน (blue undertone) ได้จากการเผาหยดน้ำมันมิเนอรัลในเตาเผา (furnace) มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.002-0.2 ไมครอน มีค่าความเป็นกรดต่างระหว่าง 7-10 ผงสีอินทรีย์สีด้าที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นผงสีประเภทนี้

ข. แลมป์แบล็ก (lamp black) ผงสีด้าชนิดนี้มีสีด้าอมน้ำเงินมากกว่าผงสีเฟอร์นิชแบล็ก ได้จากการเผาบน้ำมันครีโอสต์ (creoste oil) ในท่อมี่ขนาดอนุภาคประมาณ 0.06-0.2 ไมครอนและมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 8-9 มีความมันวาวต่ำ จึงมักนิยมเติมเข้าไปใช้ในหมึกพิมพ์สีด้าที่มีผงสีแซนเนลแบล็กหรือเฟอร์นิชแบล็กเป็นองค์ประกอบ เพื่อลดความมันวาวของหมึกพิมพ์

ค. แซนเนลแบล็ก (channel black) ได้จากการเผาก๊าซธรรมชาติที่บรรจุอยู่ในท่อเหล็กรูปตัวยู (U-shaped iron channel) เป็นผงสีที่มีราคาแพงที่สุดในบรรดาผงสีด้าทั้งสามชนิด มีสีด้าอมน้ำตาล (brown undertone) มีขนาดอนุภาค 0.01-0.03 ไมครอน และมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 3-5 เป็นผงสีที่ใช้ในหมึกพิมพ์ที่ต้องการคุณภาพงานพิมพ์สูง เนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดในบรรดาผงสีด้าทั้งสามชนิด จึงทำให้หมึกพิมพ์สีด้าที่มีความดำ ความทึบแสง และความมันวาวสูงที่สุดด้วย แต่เนื่องจากมีความเป็นกรดสูง หากใช้เป็นสารให้สีในหมึกพิมพ์ที่มีการแห้งตัวโดยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยออกซิเจนจะทำให้หมึกพิมพ์แห้งตัวได้ช้าลง ปัจจุบันการผลิตผงสีประเภทนี้มีปริมาณลดน้อยลง เนื่องจากก๊าซธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตนั้นมีอยู่อย่างจำกัดในธรรมชาติ

2.1.2 ผงสีอินทรีย์ชนิดอื่นๆ

ผงสีอินทรีย์สีอื่นๆ มีอยู่ด้วยกันมากมายหลายสีสันและหลายชนิด ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะที่มีใช้กันแพร่หลายและใช้เป็นผงสีในหมึกชุดพิมพ์สอดสีเท่านั้น ซึ่งหากแบ่งตามสีสันจะแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ (ธีระ, 2539)

ก. ผงสีสำหรับหมึกพิมพ์สีน้ำเงินเขียว ที่นิยมใช้คือ ฟะทาโลไซยานินบลู (phthalocyanine blue) เป็นผงสีที่มีความทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลายต่างๆ ได้เป็นอย่างดี รวมทั้งมีความทนแสงและความร้อนดีมากด้วย

ข. ผงสีสำหรับหมึกพิมพ์สีม่วงแดง ที่นิยมใช้คือ ลิทอลรูบินเรด (Lithol Rubine red) และโรดามีนเรด (Rhodamine red) ผงสีทั้งสองชนิดใช้เป็นผงสีสำหรับหมึกพิมพ์สีม่วงแดงของทุกระบบการพิมพ์

ข.1 Lithod Rubine Red ผงสีชนิดนี้เป็งผงมีสีออกไปทางแดงมากกว่าสีม่วงแดง ทนทานต่อตัวทำละลาย น้ำมัน ไขมัน และแวกซ์ ที่เป็นองค์ประกอบในหมึกพิมพ์ได้ดี และทนแสงและความร้อนได้พอประมาณ แต่ทนกรด ต่าง และสบู่ได้น้อย

ข.2 Rhodamine Red ผงสีชนิดนี้เป็นผงสีที่มีราคาแพงและมีสีม่วงแดงมากกว่าลิทอลรูบินเรด อย่างไรก็ตามโรดามีนเรดทนต่อต่างและสบู่ น้อย มีความทนแสงต่ำโดยมีสีคล้ำขึ้นเมื่อได้รับแสงเป็นเวลานาน นอกจากนี้ยังทนต่าง สบู่ และน้ำมันได้น้อยกว่าลิทอลรูบินเรด

ค. ผงสีอินทรีย์สำหรับหมึกพิมพ์สีเหลือง ที่นิยมใช้คือ ไดแอริไรด์เยลโลว์ (Diarylde yellow) และแอริไลด์เยลโลว์ (Arylide yellow)

ค.1 Diarylide Yellow ผงสีชนิดนี้เป็นผงสีเหลืองที่นิยมใช้กันมากที่สุดมีความอึดตัวสีสูง โดยเป็นกลุ่มของผงสีเหลืองมีโครงสร้างหลักของโมเลกุลเหมือนกันแต่มีหมู่แทนที่ต่างๆในโมเลกุลแตกต่างกันทำให้ได้ผงสีเหลืองที่มีสีสันเป็นสีเหลืองมะนาวไปจนเหลืองทองและมี

ระดับความทึบแสงแตกต่างกัน มีทั้งชนิดที่มีความทึบแสงได้พอสมควรไปจนถึงดีมาก ส่วนความทนความร้อนและสบู่มาก

ค.2 Aryllide Yellow หรือที่รู้จักกันในทางการค้าว่า"แฮนซาเยลโลว์" (Hansa yellow) เป็นกลุ่มของผงสีเหลืองเช่นเดียวกับไดแอริไลด์เยลโลว์ มีทั้งชนิดที่มีสีเหลืองอมเขียวไปจนถึงสีเหลืองอมแดง ส่วนใหญ่แล้วสีเหลืองในกลุ่มนี้มีความทนทานต่อแสงและทึบแสงมากกว่า ไดแอริไลด์เยลโลว์ แต่ความอึดสีความทนความร้อนความทนทานต่อตัวทำละลาย สบู่ น้ำมัน และแวกซ์มีน้อยกว่า

2.2) ผงสีอนินทรีย์

ผงสีอนินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นผงสีที่เป็นสารประกอบของโลหะประเภทต่างๆ เช่น เหล็ก สังกะสี แคลเซียม โทเทเนียม แคลเซียม เป็นต้น โดยทั่วไปให้สีที่มีความอึดตัวน้อยกว่าผงสีอินทรีย์ แต่มีความทึบแสงความถ่วงจำเพาะความแข็งมากกว่า(ปิยฉัตร, 2545) นอกจากนี้ทนทานต่อแสง ความร้อน และสารเคมีได้ดีกว่า สามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆโดยใช้สีสันเป็นเกณฑ์ได้ดังนี้ (ธีระ, 2539)

2.2.1) ผงสีอนินทรีย์สีขาว ผงสีขาวที่ใช้ในหมึกพิมพ์ทั้งหมดเป็นผงสีอนินทรีย์เป็นสารปรับสีหมึก (extender) ในหมึกพิมพ์ต่างๆ มากกว่าที่จะใช้เป็นสารให้สีในหมึกพิมพ์โดยตรงทำหน้าที่ช่วยลดความเข้มข้นของสีหมึกพิมพ์ นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้สมบัติเชิงลักษณะปรากฏอื่นๆของหมึกพิมพ์มีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเป็นความมันวาวและความทึบแสง รวมทั้งมีส่วนช่วยในการเพิ่มเนื้อหมึก และปรับการไหลของหมึกพิมพ์ด้วย ผงสีอนินทรีย์สีขาวที่นิยมใช้ในการผลิตหมึกพิมพ์มีดังนี้

ก. โทเทเนียมไดออกไซด์ ที่นิยมใช้มากที่สุด มีความขาว ความสว่างสี และทึบแสงสูงที่สุดในผงสีขาวทั้งสามชนิด นิยมใช้เป็นสารให้สีในงานพิมพ์บรรจุภัณฑ์ที่ใช้พิมพ์เป็นสีพื้นเพื่อปิดซ่อนสีของวัสดุพิมพ์ที่มีสีที่ไม่เป็นสีขาวก่อนที่จะพิมพ์ภาพด้วยหมึกพิมพ์สีอื่นทับลงไป ส่วนในการพิมพ์ประเภทอื่นใช้เพื่อเป็นสารปรับสภาพหมึก นอกจากนี้โทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีความทนทานต่อความร้อน แสง และสารเคมีต่างๆสูงมาก

ข. แคลเซียมคาร์บอเนต ผงสีชนิดนี้เป็นสารปรับสีหมึก เป็นผงสีขาวที่ทึบแสงน้อยที่สุดในบรรดาผงสีอนินทรีย์สีขาวทั้งสามชนิด และไม่ทนกรดมีใช้ในหมึกพิมพ์ของทุกระบบการพิมพ์

ค. อะลูมิเนียมซิลิเกตเป็นผงสีขาวมีความทึบแสงสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต แต่น้อยกว่าโทเทเนียมไดออกไซด์ มีความทนทานต่อสารเคมีต่างๆดี ใช้เป็นสารปรับสีหมึกในหมึกพิมพ์เลตเตอร์เพรสส์ กราฟัวร์ และฉลุลายผ้า

2.2.2) ผงสีอนินทรีย์สีอื่นๆ

ผงสีอนินทรีย์สีอื่นๆมีอยู่ไม่กี่ชนิดที่ใช้เป็นผงสีสำหรับหมึกชุดพิมพ์สอดสี เนื่องจากให้สีที่มีความอึดตัวสีต่ำกว่าผงสีอนินทรีย์ นอกจากนี้โลหะบางชนิดที่เป็นองค์ประกอบของผงสียังมีความเป็นพิษอีกด้วยเช่น ตะกั่ว โครเมียม แคลเซียม เป็นต้น จึงมักมีการใช้งานจำกัด ตัวอย่างของผงสีอนินทรีย์ที่ยังนิยมใช้เป็นผงสีในหมึกพิมพ์ เช่น ไอร์ออนบลู (Iron blue) อัลตรามารีนบลู (Ultramarine blue) เป็นต้น

2.2.2 ตัวพา

ตัวพาหลัก คือ ตัวทำละลายซึ่งในที่นี้คือ น้ำ และตัวยึดซึ่งในที่นี้คือ เรซิน

1) ตัวทำละลายมีสถานะเป็นของเหลว ทำหน้าที่ละลายเรซินและน้ำมันเพื่อผลิตเป็นวารนิชรวมทั้งละลายสารเติมแต่งต่างๆ ที่เติมเข้าไปในหมึก น้ำเป็นตัวทำละลายประเภทอนินทรีย์ เนื่องจากเป็นสารประกอบของธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนเท่านั้น น้ำบริสุทธิ์มีจุดเดือดที่ 100 องศาเซลเซียส ใช้เป็นตัวทำละลายในหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี เรซินที่ละลายได้ในน้ำได้แก่ อะคริลิก พอลิเอไมด์ เอสเทอร์ เป็นต้น

2) ตัวยึด (binder) ทำหน้าที่ยึดผงสีให้ติดแน่นอยู่บนวัสดุพิมพ์ (ธีระ, 2539) นิยมใช้อะคริลิกเรซินซึ่งละลายได้ในน้ำ มีข้อดีหลายประการ อาทิ ทนทานต่อการขัดถูและความร้อน ไม่เกิดฟอง พิมพ์ติดได้ดี ให้ความมันวาวแห้งตัวเร็ว อายุการใช้งานนาน การที่เป็นหมึกพิมพ์ฐานน้ำในการใช้งานจะเกิดฟองมากเวลาผสม จึงต้องใช้สารต้านการก่อฟองเพื่อช่วยลดฟอง ตัวพลาที่ใช้อะคริลิกเรซินจะมีความยืดหยุ่นมากขึ้นเมื่อผสมพอลิสไตรีน การใส่อะคริลิกเรซินมากไป จะทำให้หมึกแห้งช้า ถ้าใส่น้อยไปผงสีจะกระจายตัวไม่ดี ไม่ทนต่อการขัดถูและไม่ทนน้ำ

ตัวพลาที่ใช้อะคริลิกเรซินมีหลายรูปแบบ มีข้อดี ข้อด้อย และการเลือกใช้ต่างกัน

2.1) อะคริลิกเรซินรูปแบบของแข็ง T_g สูงกว่า 90°C กระจายตัวดี มีความหนืดต่ำ แห้งตัวช้า ให้ความมันวาวดี

2.2) อะคริลิกเรซินรูปแบบสารละลาย T_g สูงกว่า 120°C กระจายตัวดีมาก ให้ความเข้มสีหมึกดี ทำให้หมึกพิมพ์ถ่ายโอนดี ความหนืดสูง แห้งตัวเร็ว ให้ความมันวาวต่ำ

2.3) อะคริลิกเรซินรูปแบบอิมัลชัน ถ้ามี T_g สูงกว่า 99°C ทึบแสงดีมาก ไหลดี แห้งเร็ว ทนน้ำ ให้สีสดใสและมันวาว ถ้ามี T_g สูงกว่า 11°C จะเพิ่มสมบัติยึดติดได้ดี มักมีปัญหาเรื่องความหนืดและไปอุดตันหัวลูกกลิ้งแอนิล็อกซ์

2.4) อะคริลิกรูปแบบคอลลอยด์ T_g สูงกว่า 11°C ช่วยให้ผงสีกระจายตัวดี ทำให้เกิดสภาพพิมพ์ที่ดี ถ่ายโอนหมึกได้ดี ไม่ติดลูกกลิ้งแอนิล็อกซ์ แห้งช้า ให้ความมันวาวต่ำ (ศุภณ, 2557)

2.2.3. สารเติมแต่ง

คือ สารที่เติมเพื่อปรับแต่งหรือเพิ่มสมบัติต่างๆ ที่ต้องการให้แก่หมึกพิมพ์ สารเติมแต่งต้องใส่ปริมาณน้อย มิฉะนั้นจะเกิดปัญหา เช่น การเกิดเป็นสบู่ ทำให้เกิดปัญหาในการพิมพ์ การเลือกใช้สารเติมแต่งต้องพิจารณาจากแรงเฉือนของแต่ละเครื่องพิมพ์และสมบัติของสิ่งพิมพ์ที่ต้องการ เช่น

1) สารเพิ่มเนื้อหมึก (extender) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต
2) สารกำจัดฟอง (defoamer) เช่น ซิลิโคน และน้ำมันแร่ซึ่งช่วยให้ฟองที่จมอยู่กับภาชนะ ด้านล่างลอยขึ้นมาบนผิวด้านบน และแตกออก

3) แร็กซ์ ช่วยให้หมึกพิมพ์ทนทานต่อการขัดถู ทนน้ำหรือกันน้ำได้มีหลายแบบ ทั้งแร็กซ์แบบแข็งและแบบอ่อน ถ้าใช้แร็กซ์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะปกปิดผิวได้ดี ช่วยให้เงางาม

4) สารลดแรงตึงผิว (surfactant) คือ สารที่เติมลงไป ในหมึกพิมพ์เพื่อลดแรงตึงผิว ทำให้หมึกพิมพ์เปียกและยึดติดกับวัสดุพิมพ์ อาทิ กระดาษเคลือบผิวได้ดีขึ้น เพราะกระดาษเคลือบผิวจะมีพลังงานผิวต่ำ แต่ใช้ปริมาณน้อยในงานพิมพ์บนกล่องกระดาษลูกฟูกซึ่งมีรูพรุน จึงไม่จำเป็นต้องใช้ในปริมาณมาก หากใช้มากเกินไปจะทำให้เกิดฟองในหมึกพิมพ์

5) สารทำให้เปียก (wetting agent) และสารช่วยกระจายตัว (dispersing agent) เป็นสารพวกโคพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ช่วยให้เกิดการเปียกดีขึ้น ป้องกันไม่ให้อนุภาคผงสีจับกันเป็นก้อน ทำให้ผงสีกระจายตัวเป็นหมึก และอยู่ในสภาพที่เสถียร ช่วย

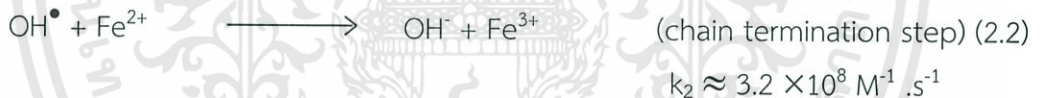
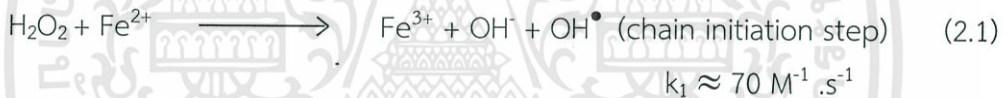
ปรับความหนืดให้เหมาะสมทำให้ผงสีในหมักพิมพ์ถ่ายโอนลงบนกระดาษได้ดีจึงทำให้พิมพ์ได้ดี (ศุภณี และแววบุญ 2557)

2.3 การบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

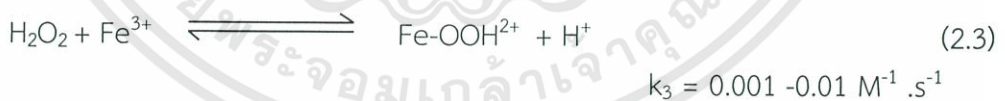
กระบวนการเฟนตันเป็นวิธีการหนึ่งของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (Advance Oxidation Process, AOPs) ที่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาทางเคมี ปฏิกิริยาเฟนตันถูกค้นพบโดย H.J.H Fenton ในปี ค.ศ. 1876 ซึ่งพบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่มีลักษณะเฉพาะและสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของสารที่เป็นพาได้ (พัชรินทร์, 2557) ปฏิกิริยานี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารพิษประเภทสารอินทรีย์เจือปนอยู่ และพบว่าช่วยลดค่า BOD COD กลิ่น สี รวมทั้งเพิ่มสัดส่วนสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ และทำสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ (สุกัญญา, 2558)

2.3.1 กลไกของปฏิกิริยาเฟนตัน

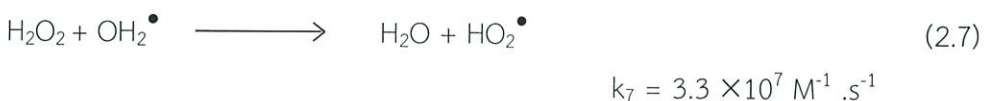
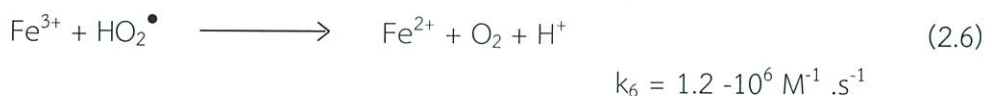
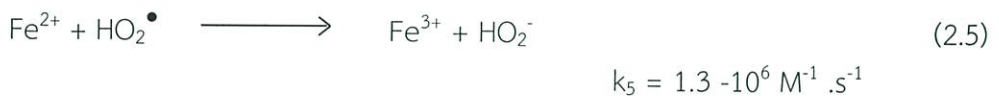
ปฏิกิริยาเฟนตันเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ที่มีกลไกของปฏิกิริยาที่เป็นแบบแรดิคอล (radical-type mechanism) H_2O_2 และ Fe^{2+} สามารถทำปฏิกิริยาเกิดอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลแรดิคอล (Hydroxyl radical, OH^\bullet) ดังสมการ (2.1) สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ให้มีโมเลกุลเล็กลง และสามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ ถ้ามีสารตั้งต้นเพียงพอปฏิกิริยาขั้นสุดท้ายจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ



เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ที่เกิดขึ้นทำให้ H_2O_2 สลายตัวกลายเป็นน้ำ และออกซิเจนได้สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิด แรดิคอล HO_2^\bullet ดังสมการ(2.3) - (2.4)



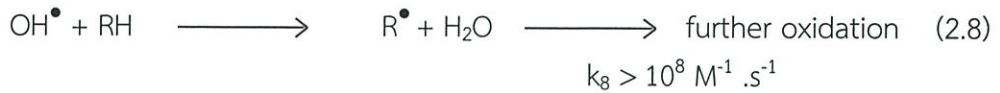
ปฏิกิริยาที่ (2.3) และ (2.4) เรียก fenton-like reaction



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าในปฏิกิริยาที่ (2.7) H_2O_2 ทำหน้าที่เป็นตัวดักจับ (scavenger) OH^\bullet ในขณะที่ปฏิกิริยาที่ (2.1) เป็นตัวผลิตไฮดรอกซิลแรดิคอลล

ไฮดรอกซิลแรดิคอลล (OH^\bullet) สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (RH) เกิดปฏิกิริยาต่อไปนี้ ดังนี้



ปฏิกิริยาที่ (2.7) และ (2.8) H_2O_2 และ RH เป็นผู้ใช้ OH^\bullet แต่เนื่องจากในปฏิกิริยาที่ (2.7) $k_2 \approx 10^7 \text{ M}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ในขณะที่ $k_8 > 10^8 \text{ M}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ในปฏิกิริยาที่ (2.8) มีค่า k สูงกว่ามาก ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วมาก ดังนั้นการคงอัตราส่วน $[\text{RH}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$ ไว้ระหว่างปฏิกิริยาดำเนินไปจึงไม่สำคัญนักเมื่อมีสารอินทรีย์ OH^\bullet จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้ดีกว่า H_2O_2 ที่ยังคงเหลือในสารละลาย

ถ้าสารตั้งต้นมีมากพอและปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไป สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

ถ้ารวมปฏิกิริยาเฟนตันคือ (2.1) และ (2.2) ได้



ถ้าสารละลายเป็นกรด ปฏิกิริยาจะมีน้ำเกิดขึ้น



ดังนั้นสารละลายควรมีกรดอย่างเพียงพอ เพื่อให้เกิด OH^\bullet ได้มากที่สุด โดยทั่วไปที่พีเอชใกล้ 3 เป็นพีเอชที่เหมาะสม

ในสถานะที่มีสารอินทรีย์ (RH), excess Fe^{2+} และ พีเอชต่ำ ไฮดรอกซิลแรดิคอลล (OH^\bullet) สามารถออกซิไดซ์สารพวกอะโรมาติก และ เฮเทอโรไซคลิกริงได้

สำหรับปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ (RH) ทั่วไป ไฮดรอกซิลแรดิคอลล (OH^\bullet) สามารถดึงไฮโดรเจนอะตอมออกจากโมเลกุลสารอินทรีย์เกิดเป็นน้ำ และอัลคิลแรดิคอลล (R^\bullet) ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไป ดังสมการ (2.11) - (2.13)



อัลคิลแรดิคอลล (R^\bullet) ที่เกิดขึ้นในสมการ (2.11) อาจถูก Fe^{3+} ออกซิไดซ์ หรือถูก Fe^{2+} รีดิวิส หรือเกิดปฏิกิริยา dimerization ดังต่อไปนี้





การเกิดปฏิกิริยาที่ (2.1), (2.2), (2.11) และ (2.14) ถือเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ของปฏิกิริยาเฟนตันที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน

เพอริกไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ (2.10) จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิด ferric hydroxo complex ion ดังต่อไปนี้



ถ้าพีเอชอยู่ในช่วง 3 และ 7 สารเชิงซ้อนเหล่านี้ จะเกิดปฏิกิริยาเป็นพอลิเมอร์ของสารรวมตะกอน ดังนี้



ดังนั้น Fenton's reagent ทำหน้าที่ได้หลายอย่างขึ้นกับ $H_2O_2/FeSO_4$ ratio ถ้ามีการใช้ Fe^{2+} มากเกิน มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยาโคเอกูเลชันร่วมด้วย

ปฏิกิริยาที่ 2.14 เป็นปฏิกิริยาแข่งขันกัน กับทั้งปฏิกิริยา chain termination reaction ที่ 2.2 และปฏิกิริยา propagation ที่ 2.11 ปฏิกิริยาเฟนตัน การแข่งขันกันระหว่าง Fe^{2+} , RH และ Fe^{3+} ในการใช้แรดิคอลทั้ง OH^\bullet และ R^\bullet ของทั้ง 3 ปฏิกิริยามีผลต่อการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ถ้าผลิตภัณฑ์มีแรดิคอลเกิดขึ้น ปฏิกิริยาลูกโซ่ยังคงดำเนินต่อไปได้ ถ้าแรดิคอลหายไปจะทำให้ปฏิกิริยาลิ้นสุดลงได้ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของ Fe^{2+} , RH และ Fe^{3+} จึงมีความสำคัญเพื่อให้เกิดการย่อยสลายได้มากที่สุด (พรรชวรณ, 2556)

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

1) ความเข้มข้นของเหล็ก อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้นได้น้อยมากถ้าหากในปฏิกิริยานั้นไม่มีไฮดรอกซิล เช่น การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในน้ำเสียที่มีฟีนอลอยู่โดยที่ไม่มีการเติมไฮดรอกซิลลงไป (สุกัญญา, 2558) แต่หากมีการเติมไฮดรอกซิลลงไปก็จะเร่งให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลมากขึ้น จนที่ความเข้มข้นของเหล็กค่าหนึ่งปฏิกิริยาจะไม่เพิ่มขึ้น พงศกรและคณะ (2552) ได้สรุปไว้ว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ไฮดรอกซิลจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าภายในระยะเวลาที่เหมาะสมโดยไม่คำนึงถึงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ นั้นควรมีค่าระหว่าง 3 - 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สัดส่วนคงที่ของไฮดรอกซิลต่อสารที่เข้าทำปฏิกิริยา (Substrate) เมื่ออยู่สูงกว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา คือ 1 ส่วนของไฮดรอกซิลต่อ 10-50 ส่วนของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา (Substrate) ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ สารประกอบของเหล็กอิมตัวเป็นสมบัติของคีเลตซึ่งอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงไม่ควรแยกไฮดรอกซิลออกไป เพื่อใช้ไฮดรอกซิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้าง

อนุมูลไฮดรอกซิลทั้งนี้สัดส่วนโดยน้ำหนักของไอออนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ควรอยู่ในช่วง 1 ต่อ 5 - 25 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) (พงศกรและคณะ, 2552)

2) ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาในการเพิ่มประสิทธิภาพการสลายสารมลพิษ เมื่อปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การสลายสารมลพิษจะเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่หากปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีมากเกินไปส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะไปรบกวนการวิเคราะห์ค่าซีโอดี ทำให้ค่าซีโอดีมากเกินจริง ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่อยู่ในแหล่งน้ำหากมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ (สุกัญญา, 2558)

3) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเฟนตันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่ออุณหภูมಿನ้อยกว่า 20°C อย่างไรก็ตามพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมากกว่า $40 - 50^{\circ}\text{C}$ ประสิทธิภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะค่อยๆลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำด้วยเหตุนี้การประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาเฟนตันจึงมักจะใช้ที่อุณหภูมิระหว่าง $20 - 40^{\circ}\text{C}$ (พงศกรและคณะ, 2552)

4) พีเอช ผลของพีเอชต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีของน้ำทิ้งจากการย้อมผ้า พบว่าการกำจัดสีเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่พีเอชเป็นกรด การบำบัดน้ำเสียจากการย้อมผ้าพบว่าพีเอชที่บำบัดได้ดีที่สุดคือ พีเอช3 การบำบัดซีโอดีเกิดขึ้นได้ดีที่ พีเอช3 เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง (อาทิตย์, 2557) หากพีเอชน้อยกว่า 3 ประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีจะไม่ดีเนื่องจากจะถูกรบกวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของเพอร์สไอออนโดยปฏิกิริยาเพอริกไอออน กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกยับยั้ง

5) เวลาในการเกิดปฏิกิริยา เวลาที่ต้องการทำให้เกิดปฏิกิริยาเฟนตันที่สมบูรณ์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยส่วนใหญ่จะเน้นในเรื่องปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความเข้มข้นของน้ำเสียก่อนการบำบัด สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลเวลาของปฏิกิริยาควรอยู่ระหว่าง 30 - 60 (พงศกร, 2552) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ พงษ์ทวี(2557) พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำยาโบราณมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มระยะเวลาบำบัดจาก 20 นาที เป็น 60 นาที แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการบำบัดสีด้วยเฟนตันสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและจากการศึกษาของ Ertugay N. & Acar, F. N. (2013) พบว่าที่เวลา 20 นาทีสามารถกำจัดซีโอดีและสีได้ดีที่สุด

2.4 การออกแบบการทดลอง (Experimental design)

การออกแบบการทดลอง หมายถึง การกำหนดการทดลองเพื่อให้ได้ผลนำมาวิเคราะห์ได้โดยกระบวนการทางสถิติ การออกแบบการทดลองใช้อย่างกว้างขวางในงานวิจัยทาง การเกษตร วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม การอุตสาหกรรม การแพทย์ การศึกษา ตลอดจนการวิจัยทางสังคมศาสตร์ ความสำคัญของการออกแบบการทดลอง คือ เพื่อให้ดำเนินการทดลองได้ถูกต้องตามหลักวิชาการ เป็นการควบคุมตัวแปรที่มีอิทธิพลบางตัวที่ไม่ต้องการ และทำให้การทดลองนั้นเป็นที่น่าเชื่อถือ อีกทั้งเพื่อใช้วิธีการทางสถิติวิเคราะห์ได้ถูกต้อง และทำให้สรุปผลการทดลอง หรือวิจัยได้อย่างถูกต้อง

2.4.1 การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment)

การทดลองแบบแฟคทอเรียลเป็นการทดลองที่รีทริเมนต์ประกอบด้วยแฟคเตอร์ ตั้งแต่ 2 แฟคเตอร์ขึ้นไปมารวมกันในรูปของรีทริเมนต์คอมบิเนชัน (treatment combination) ส่วนการจัดการกลุ่มรีทริเมนต์ เข้าในสิ่งทดลองจะใช้แบบเดียวกับการสุ่มของการทดลองพื้นฐาน (basic

design) ในการวิเคราะห์หว่าเรียนซ์ของการทดลองจะมี การแยกผลจากแต่ละแฟคเตอร์ ผลรวม และสามารถนำการเปรียบเทียบแบบอโทโกนอล (orthogonal comparison) มาใช้ประโยชน์ได้ การทดลองแบบแฟคทอเรียลมีข้อดี ข้อเสีย และประโยชน์ดังต่อไปนี้

ข้อดี

1) ในกรณีที่แต่ละปัจจัยเป็นอิสระต่อกัน (ไม่มีอิทธิพลร่วมกัน) ค่าของอิทธิพลเดี่ยว (Simple effect) จะเท่ากับค่าของอิทธิพลหลัก (main effect) จึงใช้เฉพาะอิทธิพลหลักในการอธิบายบทบาทของปัจจัยนั้นได้ และแม่นยำ (Precision) เท่ากัน เสมือนผู้ทำการทดลองใช้แต่ละปัจจัยนั้นในการทำการทดลองเท่านั้น

2) ในกรณีที่แต่ละปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกันก็จะสามารถ ทำให้สามารถศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ไปพร้อมๆกัน และรู้ถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ เหล่านั้นด้วย ทำให้สรุปผลได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้นและกว้างขวางขึ้น เพราะถ้าทำการทดลองทีละปัจจัยอาจไม่มาทราบถึงอิทธิพลร่วม ทำให้การสรุปอาจผิดพลาด

ข้อเสีย

1) เมื่อจำนวนปัจจัยเพิ่มมากขึ้น หรือระดับของแต่ละปัจจัยมากขึ้น จะทำให้ขนาดของการทดลองมีขนาดใหญ่ ทำให้ความแปรปรวนในการทดลองมีมากขึ้น ความแม่นยำก็น้อยลงและหาวัสดุทดลองที่ใกล้เคียงกันก็ยากขึ้นแม้จะมีการจัดบล็อกก็จะทำให้บล็อกมีขนาดใหญ่ขึ้น

2) การทดลองมีขนาดใหญ่จะแปลผลได้ยากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกัน

ประโยชน์

1) ใช้ในการทดลองพื้นฐาน (Preliminary Experiment) เมื่อต้องการสำรวจปัจจัยต่างๆ ที่มีจำนวนมาก เพื่อดูว่ามีปัจจัยใดบ้างที่สำคัญและปัจจัยใดไม่สำคัญ

2) ใช้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างปัจจัยต่างๆ โดยเฉพาะเพื่อดูว่าปัจจัยต่างๆนั้น มีอิทธิพลร่วมกันหรือไม่อย่างไร

3) ใช้ในการทดลองที่ต้องการข้อเสนอแนะภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งอาจใช้เงื่อนไขต่างๆ นั้นเป็นปัจจัยได้

2.4.2 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย คือ กระบวนการทางสถิติเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยมีเป้าหมาย 2 ประการคือเพื่อพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามและเพื่อศึกษาปัจจัย สาเหตุ ของตัวแปรตาม ผลการศึกษานำไปสู่การใช้ประโยชน์ที่ต่างกันคือ ในกรณีศึกษาเพื่อการพยากรณ์ จะนำผลการพยากรณ์ไปใช้กำหนดค่าของตัวแปรตาม เมื่อตัวแปรอิสระมีค่าอื่นตามกำหนด หรือเพื่อกำหนดค่าอนาคตของตัวแปรเมื่อตัวแปรอิสระมีค่าอื่นที่คาดว่าจะเป็นไปได้ในภายหน้า (มนตรี,ม.ม.ป)

การใช้หลักการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อศึกษาว่าตัวแปรอิสระที่กำหนดมีส่วนในการอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามมากน้อยเพียงใด โดยลักษณะความสัมพันธ์จะแทนด้วยสมการถดถอย (regression equation) ซึ่งหาจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) สมการถดถอยที่สร้างขึ้นจะเป็นสมการที่เหมาะสมหรือไม่นั้น จะพิจารณาได้จากค่าสถิติ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และการทดสอบสมมติฐานเพื่อพิจารณาว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยบางค่าเท่ากับศูนย์หรือไม่ นั่นคือตัวแปรอิสระบางตัวแปรมีส่วนในการอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามอย่างไร

1) รีเกรสชันเส้นตรงแบบง่าย (simple linear regression)

หากต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตัวแปรเดียว (X) และค่าตอบสนอง (Y) ตัวแปร X มักเป็นตัวแปรชนิดต่อเนื่อง นั่นคือสามารถควบคุมได้ด้วยผู้ทดลอง ซึ่งให้ค่าตอบสนองที่สังเกตได้หาความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y เป็นเส้นตรง จะได้สมการถดถอยของประชากร ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon$$

โดย	Y	คือ	ตัวแปรตาม
	X	คือ	ตัวแปรอิสระ
	β_0	คือ	ค่าคงที่
	β_1	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นตรง
	ϵ	คือ	ค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม

จากสมการข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการถดถอยของตัวอย่างเพื่อพยากรณ์ผลตอบสนองได้ ดังนี้

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_n X_n$$

โดย	Y	คือ	ค่าพยากรณ์ของตัวแปรตาม
	X	คือ	ตัวแปรอิสระ
	b_0	คือ	ค่าคงที่จากการประมาณค่า β_0
	b_1	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นตรงจากการประมาณค่า β_1
	b_n	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นตรงจากการประมาณค่า β_n

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2) เป็นการแสดงผลของตัวแปรต่อค่าตอบสนองที่สามารถอธิบายได้ และส่วนที่เหลือคือส่วนที่อธิบายไม่ได้ ดังนั้นหากสมการใดที่มีค่า R^2 ยิ่งสูงเท่าใด ความแม่นยำของการนำสมการไปใช้เพื่อทำนายหรือคาดคะเนผลลัพธ์ย่อมมีสูงยิ่งขึ้น โดยทั่วไปสมการที่มักนำไปใช้ ควรมีค่า R^2 อย่างน้อย 0.75 หากสูงกว่า 0.9 ถือว่าดีมาก (ค่า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยที่ 0 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ใดๆ ระหว่างตัวแปรอิสระ และ ค่าตอบสนอง และ 1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์) ในการวิเคราะห์รีเกรสชัน ต้องทำการทดสอบสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 = \beta_1 = 0$$

$$H_1 = \beta_1 \neq 0$$

หากยอมรับ H_0 ($P > 0.05$) แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม และค่าตอบสนอง ในทิศทางตรงกันข้าม หากปฏิเสธ H_0 ($P \leq 0.05$) แสดงว่าย่อมมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม และค่าตอบสนอง หรือหากค่า $P > 0.05$ แสดงว่าสมการที่กำหนดไว้ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2) รีเกรสชันเส้นตรงแบบหลายตัวแปร (multiple linear regression)

การวิเคราะห์ความถดถอยด้วยรีเกรสชันเส้นตรงแบบหลายตัวแปร เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Y) 1 ตัวแปร กับตัวแปรอิสระ (X) ตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป โดยที่รูปแบบและการศึกษาจะคล้ายกับการวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่ายในการทดลอง ซึ่งหากความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y เป็นเส้นตรง จะได้สมการดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon$$

แต่ถ้าความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ไม่เป็นเส้นตรง สมการที่ได้จะเป็นอื่นๆ ได้แก่

สมการถดถอยแบบควอดราติก คือ $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_1^2 + \dots + \beta_k X_k^2 + \epsilon$

สมการถดถอยแบบคิวบิก คือ $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_1^2 + \beta_3 X_1^3 + \dots + \beta_k X_k^3 + \epsilon$

สมการถดถอยแบบเอกซ์โพเนนเชียล คือ $Y = \beta_0 \beta_1^x + \epsilon$

โดย	β_0	คือ	ค่าคงที่
	β_1	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นตรงของตัวแปร X_i
	ϵ	คือ	ค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม
	k	คือ	จำนวนตัวแปรอิสระ และ $k \geq 2$

โดยการทดสอบสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k$$

$$H_1 = \beta_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

หากผลการทดสอบสมมติฐาน ปฏิเสธ H_0 แสดงว่า มี β อย่างน้อย 1 ค่าที่ไม่เท่ากับ 0 เมื่อทำการวิเคราะห์รีเกรสชัน ได้สมการแล้วจากสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปร ทำให้ทราบได้ว่าตัวแปรใดมีอิทธิพลสูงกว่า หากสัมประสิทธิ์ของตัวแปรสูงกว่าตัวแปรอื่น (ไม่คิดเครื่องหมายบวกหรือลบ โดยเครื่องหมายดังกล่าวแสดงถึงความสัมพันธ์ที่แปรผันตามหรือผกผัน) ย่อมแสดงว่าตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองสูงกว่าอีกตัวแปรหนึ่ง นอกจากนี้อาจสังเกตได้จากค่า P ของตัวแปร โดยยิ่งค่า P น้อยเท่าใด จะมีอิทธิพลมากขึ้นเท่านั้น (อัญชูลี, 2553)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุเทพ (2553) ทำการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 0.92 กรัม/ลิตร ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6.38 กรัม/ลิตร ที่ค่า pH 3.40 และระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา คือ 150 นาทีที่สภาวะดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 97.85 52.83 และ 79.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับสำหรับการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนพบว่า เมื่อใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอน 2.56 กรัม/ลิตร ที่ค่า pH 7.20 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นสี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 94.02 76.28 และ 42.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

4.00 กรัม/ลิตร ที่ค่า pH 7.40 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 96.12 86.75 และ 54.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

อาทิพย์(2557) ศึกษาการใช้เคลย์ที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน เพื่อใช้ในการกำจัดสีของน้ำทิ้งจากการย้อมผ้าจากชุมชนผู้ผลิตผ้าไหม อำเภอปักธงชัย C-Clay1 ซึ่งเป็นเคลย์ที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงที่สุด โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยา คือ ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3.0 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.6 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำทิ้งจากการย้อมผ้า และการลดลงของปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ภายในเวลา 24 ชั่วโมงเมื่อใช้ C-Clay1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

พงษ์ทวี และคณะ (2557) ศึกษาการบำบัดน้ำยาโบรอนจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้เฟนตันรีเอเจนต์ที่ประกอบด้วย เพอร์รัสซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา คือ อัตราส่วนโดยมวลของ H_2O_2 : COD, อัตราส่วนโดยโมลของ Fe^{2+} : H_2O_2 พีเอช และเวลาในการทำปฏิกิริยาจากการศึกษาพบสภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยมวลของ H_2O_2 : COD นั้นคือ 4 : 1 อัตราส่วนโดยโมลของ Fe^{2+} : H_2O_2 คือ 0.75 : 1 ค่าพีเอช คือ 3 และเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 40 นาที ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี คือ ร้อยละ 97.13 ค่าอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดที่อยู่ในน้ำยาโบรอน มีค่าเท่ากับ 17.13 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรดบอริก คือ 19.67 กรัมต่อลิตร

วุฒิ (2540) งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของสารเคมีเฟนตันในการกำจัดสีและสารอินทรีย์จำน้ำเสียจริงที่มีสีรีแอกทีฟจากโรงงานย้อมผ้า การทดลองมี 2 ขั้นตอนคือ การศึกษาการบำบัดน้ำเสียทางเคมี และการศึกษาการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ในการศึกษาการบำบัดน้ำเสียทางเคมี พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาได้แก่ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 ระดับคือ 0 (ชุดควบคุม), 200, 500, 800 และ 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนโดยโมล(R) ระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็ก 3 ระดับ คือ R = 5:1, R = 10:1, R = 20:1 และเวลาสัมผัส 3 ระดับ คือ 60, 120, 180 นาที น้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองมี 4 โทนสี คือ โทนสีดำ, โทนสีม่วง, โทนสีแดง และโทนสีน้ำตาลอ่อน มีค่าซีโอดี 600 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากันทุกโทนสี จากการทดสอบพบว่าเมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วน R = 5:1 ในการบำบัดน้ำเสียโทนสีดำ, โทนสีแดง, โทนสีน้ำตาลอ่อน และที่อัตราส่วน R = 10:1 ในการบำบัดน้ำเสียโทนสีม่วง จะสามารถกำจัดสีได้สูงกว่า 80% และพบว่าเวลา 1 ชั่วโมง เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ปรากฏว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าไออาร์พีที่วัดได้อย่างเห็นได้ชัด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีถึง 80% หรือมากกว่า ค่าไออาร์พีจะอยู่ในระดับสูง คือ ในช่วงประมาณ 583 - 614 มิลลิโวลต์ ความแตกต่างของค่าไออาร์พีในช่วงดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับโทนสีของน้ำเสียที่ใช้ อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีเฟนตันในปริมาณดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเพียง 12% - 42%

ณัชชารีย์ (2555) วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการกำจัด ซีโอดี , ของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งละลายน้ำ (TDS) จากน้ำเสียโรงอาหาร โดยกระบวนการเฟนตัน ทำการทดลองหาค่าสภาวะที่เหมาะสม ดังนี้ ศึกษาสภาวะการกวนด้วยจาร์เทสที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 , 60 และ 90 นาที ศึกษาความเข้มข้นของ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ และความเข้มข้นของ H_2O_2 ที่ความเข้มข้น 300 , 400 , 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมถึงศึกษาค่า พีเอชน้ำก่อน

การบำบัด(pH_{Pre}), pH 3 , pH 5 , pH 7 และ pH 9 จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด COD ที่ pH 3 เวลา 30 นาทีความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดได้ 83.29% สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด SS ที่ pH 5 เวลา 90 นาทีของความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดได้ 99.03% และสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด TDS ที่ pH 5 เวลา 90 นาทีความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดได้ 71.13%

ปิยะฉัตร(2545)ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ด้วยกระบวนการบำบัด 2 ขั้นตอน ได้แก่ การโคแอกกูเลชันเพื่อตกตะกอนผงสี ตามด้วยการดูดซับสีที่เหลืออยู่หลังการโคแอกกูเลชันด้วยกากของเสียจากโรงงานชุบโลหะ (กากโลหะไฮดรอกไซด์) จากการศึกษาเปรียบเทียบการตกตะกอนผงสีระหว่างโคแอกกูแลนต์ชนิดต่างๆ (เพอร์สซัลเฟตร่วมกับปูนขาว เพอร์สซัลเฟต โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ และเพอริกคลอไรด์) กับการตกตะกอนด้วยกรด พบว่าการใช้กรดซัลฟูริกปรับพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับ 2 ทำให้ผงสีเกิดการตกตะกอนได้ดีและมีกากตะกอนเกิดขึ้นน้อย สำหรับน้ำเสียหลังการตกตะกอนด้วยกรดซัลฟูริกซึ่งถูกนำมากำจัดสีที่เหลืออยู่โดยการดูดซับด้วยกากโลหะไฮดรอกไซด์ พบว่ากากโลหะไฮดรอกไซด์ ขนาดน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ปริมาณร้อยละ 3 (w/v) สามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 76 ที่เวลาสมดุล จากการศึกษาผลของพีเอชของระบบต่อการดูดซับ พบว่ากากโลหะไฮดรอกไซด์สามารถกำจัดสีได้สูงสุดที่พีเอชของระบบในช่วง 6.5-8.0 นอกจากนี้กากโลหะไฮดรอกไซด์ยังสามารถใช้ซ้ำได้ประมาณ 3 ครั้งโดยไม่ต้องมีการตากให้แห้งก่อน จากผลการศึกษาการดูดซับพบว่ากลไกการดูดซับสีของกากโลหะไฮดรอกไซด์ เป็นแบบแลกเปลี่ยนประจุ สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดในห้องปฏิบัติการในถังกวนขนาด 7 ลิตร และการบำบัดน้ำเสียในระบบบำบัดจริงของโรงพิมพ์ระบบ เฟล็กโซกราฟีนั้นให้ผลการทดลองไม่แตกต่างกัน โดยน้ำเสียสุดท้ายภายหลังผ่านการบำบัดทั้ง 2 ขั้นตอนมีค่า ความเข้มข้น พีเอช ของแข็งละลายน้ำ และปริมาณโลหะหนัก (Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} และ Cr^{3+}) ไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ ยกเว้นค่าซีโอไซด์ยังคงเกินมาตรฐานน้ำทิ้งอยู่เพียงเล็กน้อย

Ertugay และคณะ (2013) ศึกษาการกำจัดซีโอไซด์และสีจากสีย้อม Blue 71 azo ด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยศึกษาผลของพีเอช ปริมาณ Fe^{2+} และ H_2O_2 ความเข้มข้นของสีย้อม และอุณหภูมิในการกำจัดสีและซีโอไซด์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสี และซีโอไซด์ของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 100 mg.L^{-1} ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ที่ค่า พีเอชเป็น 3 ปริมาณ $Fe^{2+} = 3 \text{ mg.L}^{-1}$ ปริมาณ $H_2O_2 = 125 \text{ mg.L}^{-1}$ สามารถกำจัดสีและซีโอไซด์ได้ 94% และ 50.7% ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า พีเอช ปริมาณของ Fe^{2+} และ H_2O_2 การเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ 20 - 30°C ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีอีกด้วย

Ebrahiem และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษากำจัดสารมลพิษอินทรีย์ จากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยใช้เทคโนโลยี โฟโต-เฟนตัน ออกซิเดชัน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ต่างกันมีผลต่อสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน พารามิเตอร์ที่ศึกษามีดังนี้ ค่า pH, ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2), ปริมาณเพอร์สซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), ปริมาณความเข้มข้นของสีย้อมและเวลาจากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ pH 3, ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เท่ากับ 1 ม/ล และ ปริมาณของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} เท่ากับ 0.75 ก./ล. ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาทีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอไซด์มากกว่า 95%

Ramteke et al. (2015) ศึกษาการบำบัดโพลีอิน เบนซีนนาฟทาลีน และไซลีน (BTNXs) ในน้ำเสียโดยใช้วิธีบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน/อัลตราซาวและ ปรับสภาพต่อด้วยกระบวนการทาง

ชีวภาพ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ pH เริ่มต้น 3 - 3.5, ปริมาณ Fe^{2+} 2.00 g/L^{-1} และปริมาณ H_2O_2 1.00 g/L^{-1} ซึ่งทำให้ค่า BOD และ COD ลดลงประมาณ 80 - 95 เปอร์เซ็นต์

Lee et al. (2008) ได้ศึกษาการกำจัดซีโอทีและสีจากน้ำเสียปศุสัตว์ด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งในน้ำเสียปศุสัตว์มีซีโอที 5,000 - 5,700 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสัดส่วน H_2O_2 (มิลลิกรัมต่อลิตร) ต่อซีโอที ที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 1.05 และสัดส่วนของ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ ที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 2 ค่า pH และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 3.5 - 4 และ 30 นาที ตามลำดับ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม สัดส่วนการบำบัดซีโอที และสีสามารถตกตะกอนสลัดจ์ได้ 88 และ 95.4% ตามลำดับและการเพิ่มปัจจัยในปฏิกิริยาเฟนตันไม่มีผลต่อการบำบัดซีโอทีและสี



148952

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) บริษัท Metrohm รุ่น 827 pH Lab ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
2. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง บริษัท Sartorius ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น T60 บริษัท TG Instrument ประเทศอังกฤษ
4. ตู้อบ (Oven) บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องเขย่า (Shaker) ยี่ห้อ Gallenkamp orbital shaker บริษัท Gallenkamp ประเทศอังกฤษ
6. อุปกรณ์กรองแบบลดความดัน
7. กระดาษกรอง Whatman No.41
8. Syringe Filter Nylon membrane ขนาด 0.45 μm
9. เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.2. สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) บริษัท Carlo Erba, UK
2. โพแทสเซียมคลอโรแพลตตินेट (K_2PtCl_6) บริษัท Altima จำกัด
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Mallinckrodt) ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. กรดซัลฟูริก (Conc. H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Chemical
5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 30 % v/v เกรดวิเคราะห์บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
6. เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน

3.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา

น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นน้ำเสียที่ได้รับคำแนะนำในการเก็บจากบริษัทสยามโปรครีเอชันเซ็นเตอร์ซึ่งเป็นโรงพิมพ์ระบบพลิกโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำซึ่งมีสีแดง เก็บรวบรวมเมื่อวันที่ 18 กันยายน พ.ศ.2558 น้ำตัวอย่างถูกนำมาเจือจางให้มีความเข้มข้น 10% ของค่าเริ่มต้น จากนั้น นำน้ำเสียที่เตรียมได้มาวิเคราะห์สมบัติของน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของน้ำที่ทำการวิเคราะห์ ในการศึกษาครั้งนี้

พารามิเตอร์/ดัชนีวัดคุณภาพน้ำ	เครื่องมือหรือวิธีวิเคราะห์
พีเอช (pH)	pH meter
สี (Color)	ADMI Tristimulus Filter Method (APHA,AWWA,WEF, 1995)
ซีโอดี (COD)	Close reflux, Titrimetric Method (APHA,AWWA,WEF, 1995)

3.3 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัด

1. ตวงน้ำเสียตัวอย่าง มาปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรจำนวน 3 ขวด
2. ปรับพีเอชของน้ำเสียตัวอย่าง ให้มีค่าเท่ากับ 3 ด้วย 5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์
3. เติมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ในปริมาณที่ทำให้อัตราส่วนโดยมวลของ $Fe^{2+}:H_2O_2$ ในสารละลายเท่ากับ 0.5
4. เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณที่ทำให้อัตราส่วนโดยมวลของ $H_2O_2:COD$ ในสารละลายเท่ากับ 1
5. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที
6. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการปรับพีเอชน้ำเสียตัวอย่าง ให้เท่ากับ 8 ด้วย 5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยา จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง นำส่วนใสไปวัดสีและซีโอดี
7. ทำซ้ำข้อ 1 ถึง 6 โดยแปรค่าระยะเวลาในการเขย่า จาก 10 นาที เป็น 30, 40, 50 และ 60 นาทีตามลำดับ

3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสีย ด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยการวางแผนการทดลองวิธีเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป (Full factorial design)

3.4.1 การวางแผนการทดลองแบบ Full factorial

การวางแผนการทดลองแบบ full factorial ได้ถูกนำมาในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยมีปัจจัยที่ศึกษา 3 ตัวแปร ได้แก่ อัตราส่วนโดยมวลของ $H_2O_2 : COD$ (A) อัตราส่วนโดยมวลของ $Fe^{2+} : H_2O_2$ (B) และ พีเอช (C) และในแต่ละตัวแปรจะทำการศึกษา 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยทำการทดลองซ้ำ (replicate) จำนวน 3 ซ้ำ จะได้การทดลองทั้งหมด 81 การทดลอง

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ศึกษาและระดับค่าของตัวแปร

ตัวแปร	สัญลักษณ์	-1	0	1
อัตราส่วนโดยโมล $H_2O_2 : COD$	A	0.5	1.0	2.0
อัตราส่วนโดยโมล $Fe^{2+} : H_2O_2$	B	0.1	0.5	1.0
พีเอช	C	2.0	3.0	4.0

ซึ่งเมื่อนำไปจัดลำดับการทดลองด้วยวิธีการสุ่มแบบสมบูรณ์ จะได้ลำดับการทดลองดังแสดง
ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ลำดับการทดลองที่ได้จากการสุ่มแบบสมบูรณ์

ลำดับที่	(A)		(B)		(C)	
	Coded	Uncoded	Coded	Uncoded	Coded	Uncoded
1	-1	0.5	-1	0.1	-1	2
2	-1	0.5	0	0.5	-1	2
3	-1	0.5	0	0.5	0	3
4	-1	0.5	+1	1.0	0	3
5	-1	0.5	+1	1.0	+1	4
6	0	1.0	-1	0.1	+1	4
7	0	1.0	0	0.5	-1	2
8	0	1.0	+1	1.0	-1	2
9	0	1.0	+1	1.0	0	3
10	+1	2.0	-1	0.1	0	3
11	+1	2.0	-1	0.1	+1	4
12	+1	2.0	0	0.5	+1	4
13	+1	2.0	+1	1.0	-1	2
14	+1	2.0	+1	1.0	+1	4
15	-1	0.5	-1	0.1	0	3
16	-1	0.5	-1	0.1	+1	4
17	-1	0.5	0	0.5	+1	4
18	-1	0.5	+1	1.0	-1	2
19	0	1.0	-1	0.1	-1	2
20	0	1.0	-1	0.1	0	3
21	0	1.0	0	0.5	0	3
22	0	1.0	0	0.5	+1	4
23	0	1.0	+1	1.0	+1	4
24	+1	2.0	-1	0.1	-1	2
25	+1	2.0	0	0.5	-1	2
26	+1	2.0	0	0.5	0	3
27	+1	2.0	+1	1.0	0	3
28	-1	0.5	-1	0.1	-1	2
29	-1	0.5	-1	0.1	+1	4
30	-1	0.5	0	0.5	0	3
31	-1	0.5	+1	1.0	-1	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	(A)		(B)		(C)	
	Coded	Uncoded	Coded	Uncoded	Coded	Uncoded
32	-1	0.5	+1	1.0	+1	4
33	0	1.0	-1	0.1	0	3
34	0	1.0	0	0.5	-1	2
35	0	1.0	0	0.5	+1	4
36	0	1.0	+1	1.0	0	3
37	+1	2.0	-1	0.1	-1	2
38	+1	2.0	-1	0.1	+1	4
39	+1	2.0	0	0.5	0	3
40	+1	2.0	+1	1.0	-1	2
41	+1	2.0	+1	1.0	+1	4
42	-1	0.5	-1	0.1	0	3
43	-1	0.5	0	0.5	-1	2
44	-1	0.5	0	0.5	+1	4
45	-1	0.5	+1	1.0	0	3
46	0	1.0	-1	0.1	-1	2
47	0	1.0	-1	0.1	+1	4
48	0	1.0	0	0.5	0	3
49	0	1.0	+1	1.0	-1	2
50	0	1.0	+1	1.0	+1	4
51	+1	2.0	-1	0.1	0	3
52	+1	2.0	0	0.5	-1	2
53	+1	2.0	0	0.5	+1	4
54	+1	2.0	+1	1.0	0	3
55	1	0.5	0	0.5	-1	2
56	-1	0.5	0	0.5	-1	2
57	-1	0.5	0	0.5	0	3
58	-1	0.5	+1	1.0	0	3
59	-1	0.5	+1	1.0	+1	4
60	0	1.0	-1	0.1	+1	4
61	0	1.0	0	0.5	-1	2
62	0	1.0	+1	1.0	-1	2
63	0	1.0	+1	1.0	0	3
64	+1	2.0	-1	0.1	0	3
65	+1	2.0	-1	0.1	+1	4
66	+1	2.0	0	0.5	+1	4
67	+1	2.0	+1	1.0	-1	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	(A)		(B)		(C)	
	Coded	Uncoded	Coded	Uncoded	Coded	Uncoded
68	+1	2.0	+1	1.0	+1	4
69	-1	0.5	-1	0.1	0	3
70	-1	0.5	-1	0.1	+1	4
71	-1	0.5	0	0.5	+1	4
72	-1	0.5	+1	1.0	-1	2
73	0	1.0	-1	0.1	-1	2
74	0	1.0	-1	0.1	0	3
75	0	1.0	0	0.5	0	3
76	0	1.0	0	0.5	+1	4
77	0	1.0	+1	1.0	+1	4
78	+1	2.0	-1	0.1	-1	2
79	+1	2.0	0	0.5	-1	2
80	+1	2.0	0	0.5	0	3
81	+1	2.0	+1	1.0	+1	3

3.4.2 การทดลองตามลำดับการทดลองที่ได้จากการวางแผน

1. ตวงน้ำเสียตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.2 มาปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของน้ำเสียตัวอย่าง ให้มีค่าเท่ากับสภาวะที่จะทดลองด้วย 5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์
3. เติมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ในปริมาณที่ทำให้อัตราส่วนโดยมวลของ $Fe^{2+}:H_2O_2$ มีค่าตามสภาวะที่กำหนดในแผนการทดลอง
4. เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณที่ทำให้อัตราส่วนโดยมวลของ $H_2O_2:COD$ ในสารละลายมีค่าตามแผนการทดลอง
5. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องด้วยระยะเวลาเหมาะสมที่ได้จากข้อ

3.3

6. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการปรับพีเอชน้ำเสียตัวอย่างให้เท่ากับ 8 ด้วย 5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยาจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำส่วนใสไปวัดสีและซีไอดี และนำข้อมูลที่วัดได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพ การกำจัดสีและซีไอดีในแต่ละการทดลอง

3.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab version 17.0

ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณทั้ง 81 การทดลองถูกนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้วยวิธีการ ANOVA พร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสม(Optimization) ต่อการบำบัดด้วยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอย(Regression)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและซีโอติน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบฟล็อกโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำซึ่งมีสีแดงด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อซีโอติ อัตราส่วนของเหล็กไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และค่าพีเอช สามารถอธิบายผลได้ดังนี้

4.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบฟล็อกโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำ

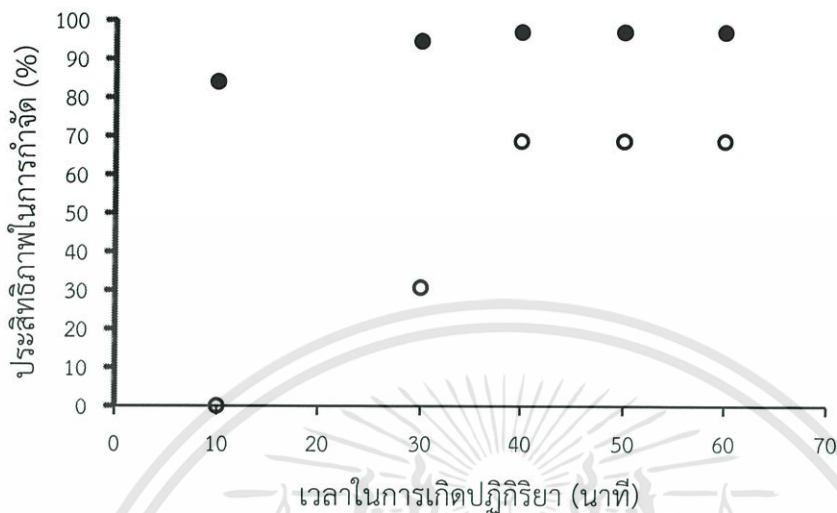
น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นน้ำเสียจากบริษัทสยามโปรครีเอชันเซ็นเตอร์ซึ่งเป็นโรงพิมพ์ระบบฟล็อกโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างเครื่องพิมพ์โดยสีที่ใช้ในการพิมพ์ ณ วันที่เก็บตัวอย่างเป็นสีแดง ดังรูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียพบว่ามีค่าพีเอชเท่ากับ 7.60 มีซีโอติเท่ากับ 269.7231 mg/L มีค่าสีเท่ากับ 511 ADMI



รูปที่ 4.1 ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา

4.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดี แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับประสิทธิภาพการกำจัดสี (●) และซีไอดี (○)

จากรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจาก 10 เป็น 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 84.04 เป็น 94.56 เปอร์เซ็นต์ และจาก 0 เป็น 30.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาให้นานขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้นจนถึงเวลาที่ 40 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีจะเริ่มคงที่ ที่ 96.98 และ 68.68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อใช้เวลานานขึ้น โอกาสที่สารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยามากขึ้น ส่งผลให้เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ebrahiem *et al.*(2013) ที่ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยการใช้แสงร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตันพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานานขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะเวลาที่ 40 นาที เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาตามแผนการทดลองขั้นต่อไป

4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเพลิกโซกราฟีด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

4.3.1 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา

เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่สภาวะการทดลองทั้ง 81 การทดลอง (ภาคผนวก ข) มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) มีสมมติฐานทางสถิติดังนี้

$H_0 : \beta_i = 0$ หรือตัวแปรอิสระที่ i ไม่มีผลต่อตัวแปรตาม

$H_1 : \beta_i \neq 0$ หรือตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Fit Regression Model

Term	Coef ^{1/}	SE Coef	t-Value ^{2/}	p-Value ^{3/}
Constant	56.65	7.92	7.15	0.000
H ₂ O ₂ (A)	15.84	3.65	4.34	0.000*
Fe ²⁺ (B)	13.76	3.67	3.75	0.000*
pH(C)	15.73	3.66	4.30	0.000*
H ₂ O ₂ x Fe ²⁺ (AxB)	-5.68	1.69	-3.36	0.001*
H ₂ O ₂ x pH (AxC)	-6.54	1.69	-3.88	0.000*
Fe ²⁺ x pH (BxC)	-5.21	1.69	-3.08	0.003*
H ₂ O ₂ x Fe ²⁺ x pH (AxBxC)	2.282	0.781	2.92	0.005*

หมายเหตุ * คือค่าความน่าจะเป็นของอิทธิพลที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี

$$S = 3.82494 \quad R^2 = 32.21\% \quad R^2(\text{adj}) = 25.52\%$$

1/ Coef คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปร

2/ t-Value คือ ตัวสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐาน

3/ p-Value คือ ความน่าจะเป็น

จากตาราง 4.1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วนของเหล็กไอออน และค่าพีเอช มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากค่า p-Value ของอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วนของเหล็กไอออน และค่าพีเอชน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงว่าตัวแปรทั้ง 3 มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี

เมื่อพิจารณาในส่วนของอิทธิพลร่วมของปัจจัย (Interaction terms) ในตารางที่ 4.1 พบว่า H₂O₂xFe²⁺ มีค่า p-Value = 0.001, H₂O₂xpH มีค่า p-Value = 0.000 และ H₂O₂xFe²⁺xpH มีค่า p-Value = 0.005 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วมของปัจจัยมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งนี้ สามารถอธิบายได้ว่า อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วนของเหล็กไอออน และค่าพีเอชมีผลต่อกัน

สมการสำหรับทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดสีจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Regression Analysis จากแบบจำลอง Fit Regression Model ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วนของเหล็กไอออน และค่าพีเอช) กับประสิทธิภาพในการกำจัดสี แสดงได้ดังสมการที่ 4.1

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี (\%)} = & 56.65 + 15.84A + 13.76B + 15.73C - 5.68AxB \\ & - 6.54AxC - 5.21BxC + 2.282AxBxC \end{aligned} \quad (4.1)$$

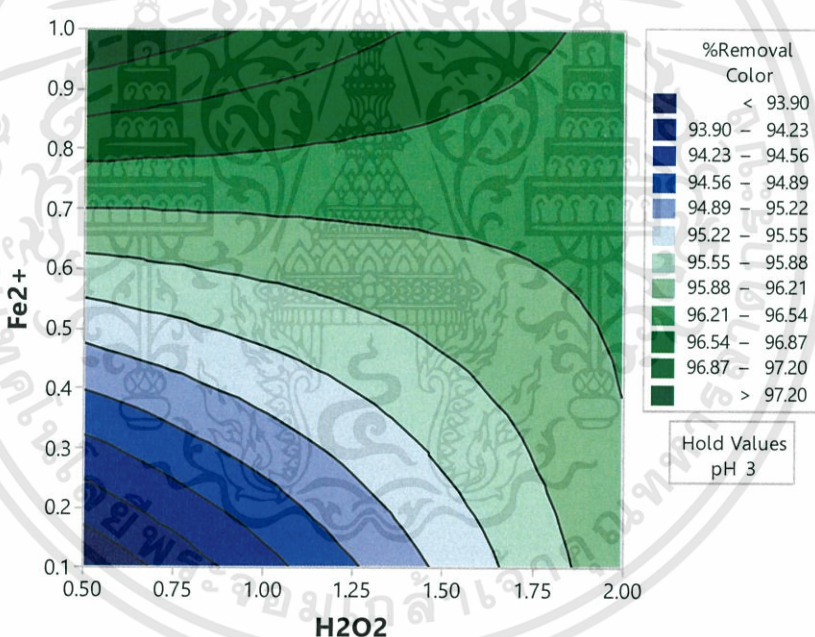
โดยที่

- A = อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
 B = อัตราส่วนของเหล็กไอออน
 C = ค่าพีเอชในการทำปฏิกิริยา

4.3.2 การสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพการกำจัดสี

จากผลการทดลองโดยใช้ Full Factorial Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Regression สามารถนำมาสร้างพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดังนี้

ก. อิทธิพลของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับอัตราส่วนเหล็กไอออน
 ข. อิทธิพลของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับอัตราส่วนของเหล็กไอออนที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 เป็นดังในรูปที่ 4.3

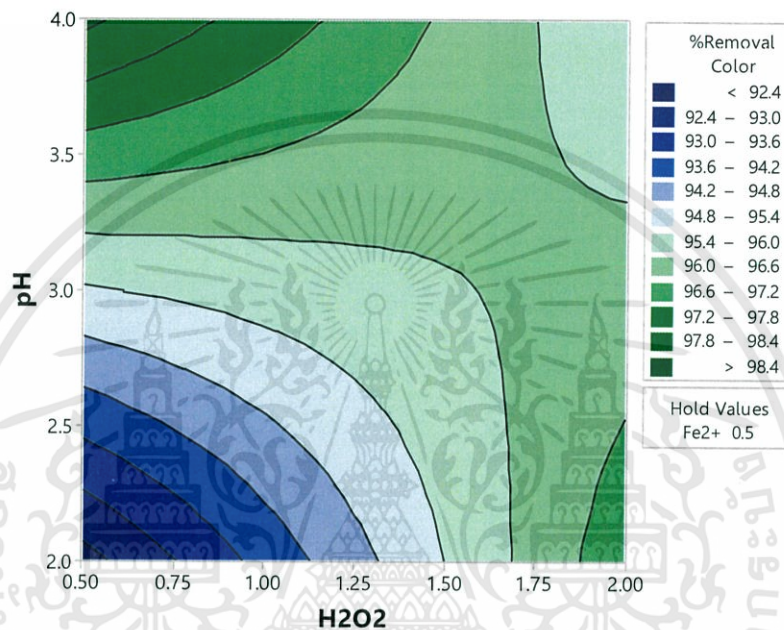


รูปที่ 4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับอัตราส่วนเหล็กไอออนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

จากรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มจาก 0.5 เป็น 2.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 93.90 เปอร์เซ็นต์ให้มามีค่าถึง 95.88 เปอร์เซ็นต์ และพิจารณาอัตราส่วนของเหล็กไอออน พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเหล็กไอออนเพิ่มจาก 0.1 เป็น 1.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีเปลี่ยนแปลง

จากน้อยกว่า 93.90 เปอร์เซ็นต์ ให้มีค่ามากกว่า 97.20 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของเหล็กไอออนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีมากกว่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

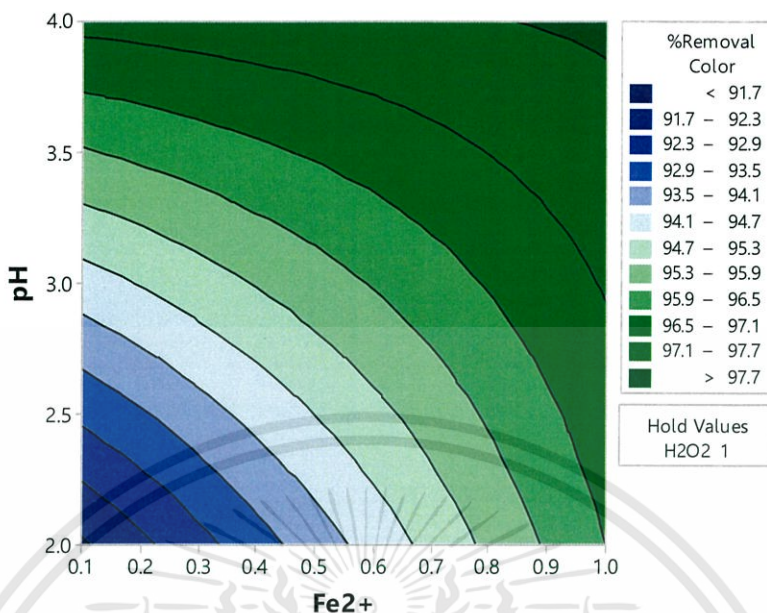
ข.อิทธิพลของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับค่าพีเอช
อิทธิพลของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับค่าพีเอชที่อัตราส่วนเหล็กไอออนเท่ากับ 0.5
เป็นดังในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

จากรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มจาก 0.5 เป็น 2.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 92.40 เปอร์เซ็นต์ ให้มีค่าถึง 97.20 เปอร์เซ็นต์ และพิจารณาค่าพีเอชพบว่า ประสิทธิภาพการในการกำจัดสีจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มจาก 2.0 เป็น 4.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการในการกำจัดสีเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 92.40 เปอร์เซ็นต์ ให้มีค่ามากกว่า 98.40 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีมากกว่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ค.อิทธิพลของอัตราส่วนของเหล็กไอออนกับค่าพีเอช
อิทธิพลของอัตราส่วนของเหล็กไอออนกับค่าพีเอชที่อัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1 เป็นดังในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของอัตราส่วนของเหล็กไอออนกับค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

จากรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของเหล็กไอออนพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มจาก 0.1 เป็น 1.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 91.70 เปอร์เซ็นต์ให้มีค่าถึง 95.90 เปอร์เซ็นต์ และพิจารณา ค่าพีเอชพบว่า ประสิทธิภาพการในการกำจัดสีจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มจาก 2.0 เป็น 4.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการในการกำจัดสีเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 91.70 เปอร์เซ็นต์ ให้มีค่ามากกว่า 97.70 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีมากกว่าอัตราส่วนของเหล็กไอออน

4.3.3 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม

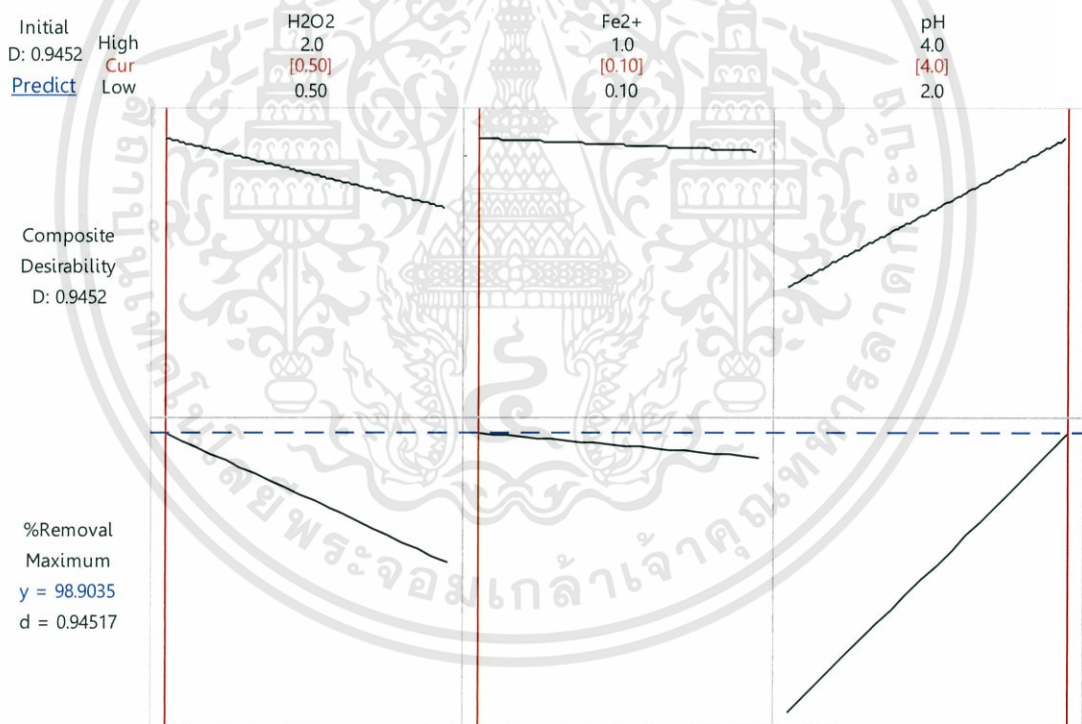
จากสมการการทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ได้จากแบบจำลอง Regression Model สามารถนำมาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ในโปรแกรม Minitab Version 17.0 สำหรับคำนวณค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ โดยในการประมวลผล มีค่าที่ต้องกำหนดค่าดังนี้

- ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) มากที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตบนเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์
- ค่าเป้าหมาย (Target) คือค่ามาตรฐานหรือค่าเป้าหมายของผลตอบ โดยวัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้เพื่อต้องการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำให้มีลักษณะใส จึงกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์

- ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) ที่มีค่าน้อยที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตล่างเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์

หมายเหตุ การกำหนดค่าขอบเขตบน ค่าเป้าหมายและค่าขอบเขตล่างของงานวิจัยนี้เกิดจากการสอบถามความต้องการลักษณะสีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบฟลักซ์โคราฟิฐานน้ำหลังบำบัดซึ่งทางโรงพิมพ์ต้องการลักษณะสีในน้ำเสียหลังการบำบัดในลักษณะที่ใส ดังนั้นจึงเลือกค่าเป้าหมายที่ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำเสียหลังการบำบัดมีลักษณะใสตามความต้องการของโรงพิมพ์ที่ใช้ระบบฟลักซ์โคราฟิในการพิมพ์หมึกพิมพ์ฐานน้ำ

สถานะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์หมึกพิมพ์ฐานน้ำที่ได้จากแบบจำลองเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 4.6 คืออัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อซีโอดีเท่ากับ 0.5 อัตราส่วนของเหล็กไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.1 ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ 98.90 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.6 สถานะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีในน้ำเสียหมึกพิมพ์ฐานน้ำ

4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

4.3.1 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา

เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่สภาวะการทดลองทั้ง 81 การทดลอง (ภาคผนวก ข) มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) มีสมมติฐานทางสถิติดังนี้

$H_0 : \beta_i = 0$ หรือตัวแปรอิสระที่ i ไม่มีผลต่อตัวแปรตาม

$H_1 : \beta_i \neq 0$ หรือตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง

Fit Regression Model				
Term	Coef ^{1/}	SE Coef	t-Value ^{2/}	p-Value ^{3/}
Constant	-55.0	27.7	-1.99	0.051
H ₂ O ₂ (A)	34.5	12.8	2.69	0.009*
Fe ²⁺ (B)	47.6	12.9	3.70	0.000*
pH(C)	15.0	12.9	1.17	0.246
H ₂ O ₂ x Fe ²⁺ (AxB)	-11.83	5.96	-1.98	0.051
H ₂ O ₂ x pH (AxC)	-9.24	5.96	-1.55	0.126
Fe ²⁺ x pH (BxC)	-11.71	5.99	-1.95	0.055
H ₂ O ₂ x Fe ²⁺ x pH (AxBxC)	5.68	2.80	2.02	0.047*

หมายเหตุ * คือค่าความน่าจะเป็นของอิทธิพลที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี

S = 3.82494 R² = 76.51% R² (adj) = 74.09%

1/ Coef คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปร

2/ t-Value คือ ตัวสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐาน

3/ p-Value คือ ความน่าจะเป็น

จากตาราง 4.2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และอัตราส่วนของเหล็กไอออน มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากค่า p-Value ของอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และอัตราส่วนของเหล็กไอออนน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่ค่าพีเอช (pH) มีค่า p-Value มากกว่าระดับนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แสดงว่าค่าพีเอชไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี

เมื่อพิจารณาในส่วนของอิทธิพลร่วมของปัจจัย (Interaction terms) ในตารางที่ 4.2 พบว่า H₂O₂xFe²⁺, H₂O₂xpH และ Fe²⁺xpH มีค่า p-Value มากกว่าระดับนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัยไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี แต่ H₂O₂xFe²⁺xpH มีค่า p-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วมของ 3 ปัจจัยมีผลต่อ

ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งนี้ สามารถอธิบายได้ว่า อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วนของเหล็กไอออน และค่าพีเอชมีผลต่อกัน

สมการสำหรับทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Regression Analysis จากแบบจำลอง Fit Regression Model ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วนของเหล็กไอออน และค่าพีเอช) กับ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี แสดงได้ดังสมการที่ 4.2

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (\%)} = -55.0 + 34.5A + 47.6B + 15.0C - 11.83AxB - 9.24AxC - 11.71BxC + 5.68AxBxC \quad (4.2)$$

โดยที่

- A = อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
 B = อัตราส่วนของเหล็กไอออน
 C = ค่าพีเอชในการทำปฏิกิริยา

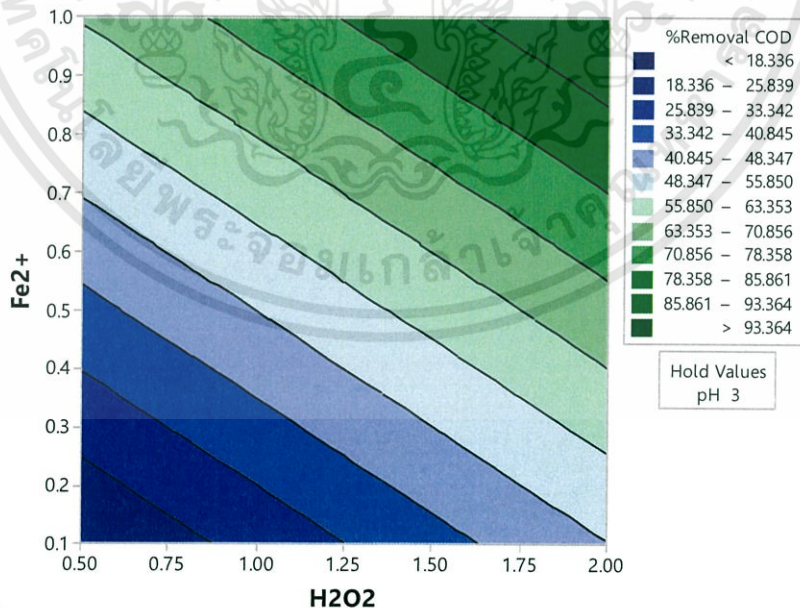
4.3.4 การสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

จากผลการทดลองโดยใช้ Full Factorial Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Regression สามารถนำมาสร้างพื้นผิวผลตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรต่อ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้ดังนี้

ก. อิทธิพลของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับอัตราส่วนเหล็กไอออน

อิทธิพลของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับอัตราส่วนเหล็กไอออนที่ค่าพีเอชเท่ากับ

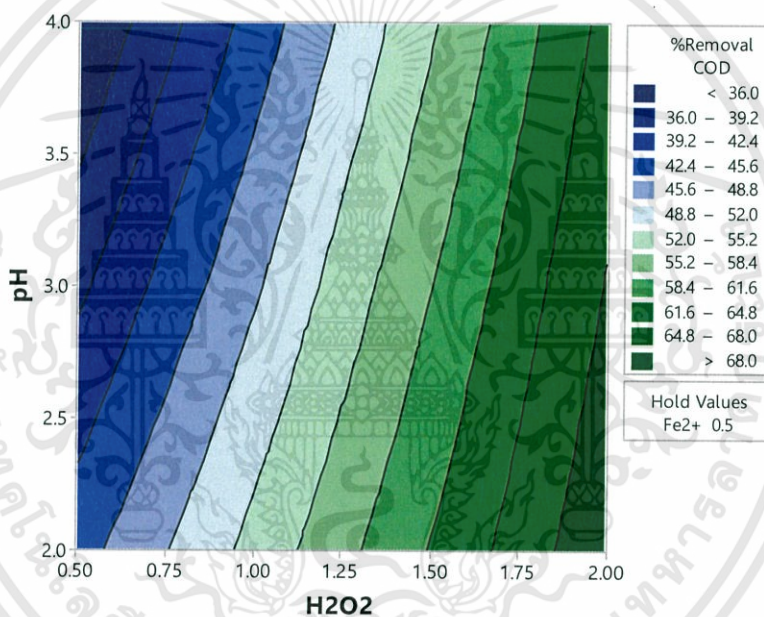
3 เป็นดังในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับอัตราส่วนเหล็กไอออน ต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

จากรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มจาก 0.5 เป็น 2.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเปลี่ยนแปลงจาก 18.33 เปอร์เซ็นต์ให้มีค่าถึง 48.34 เปอร์เซ็นต์ และพิจารณาอัตราส่วนของเหล็กไอออน พบว่า ประสิทธิภาพการในการกำจัดซีโอดีจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเหล็กไอออนเพิ่มจาก 0.1 เป็น 1.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการในการกำจัดซีโอดีเปลี่ยนแปลงจาก 18.33 เปอร์เซ็นต์ ให้มีค่า 78.35 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของเหล็กไอออนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากกว่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

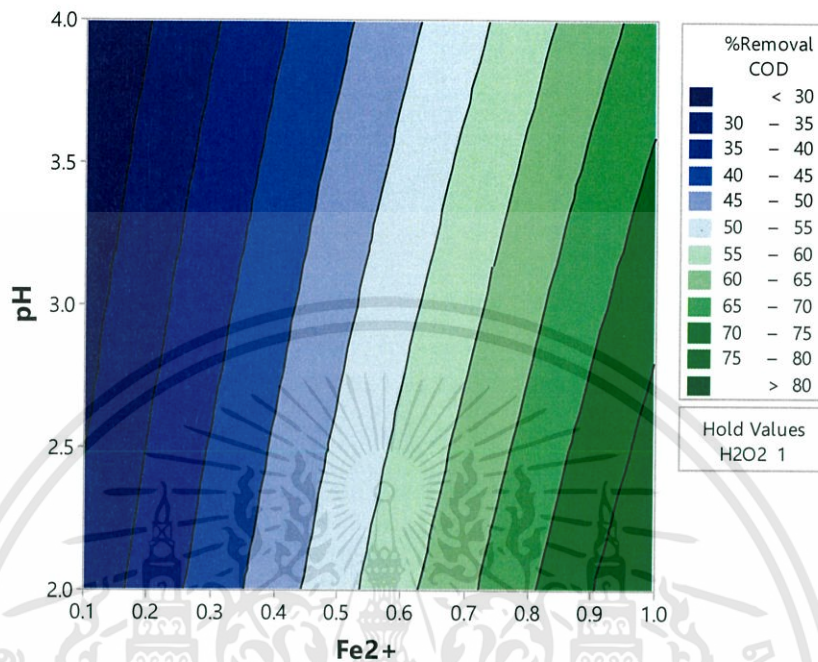
ข.อิทธิพลของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับค่าพีเอช
อิทธิพลของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับค่าพีเอชที่อัตราส่วนเหล็กไอออนเท่ากับ 0.5 เป็นดังในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

จากรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มจาก 0.5 เป็น 2.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเปลี่ยนแปลงจาก 42.20 เปอร์เซ็นต์ให้มีค่าถึงมากกว่า 68.00 เปอร์เซ็นต์ และพิจารณาค่าพีเอชพบว่า ประสิทธิภาพการในการกำจัดซีโอดีจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มจาก 2.0 เป็น 4.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการในการกำจัดซีโอดีเปลี่ยนแปลงโดยเพิ่มจาก 48.80 เปอร์เซ็นต์ ลดลงถึงน้อยกว่า 36.00 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีดังนี้ ในสภาวะกรดจะสามารถกำจัดซีโอดีได้มากกว่าในสภาวะที่เป็นต่างแต่ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากขึ้น

ค.อิทธิพลของอัตราส่วนของเหล็กไอออนกับค่าพีเอช
อิทธิพลของอัตราส่วนของเหล็กไอออนกับค่าพีเอชที่อัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1 เป็นดังในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของอัตราส่วนของเหล็กไอออนกับค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

จากรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของเหล็กไอออนพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเหล็กไอออนเพิ่มจาก 0.1 เป็น 1.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเปลี่ยนแปลงจาก 30.00 เปอร์เซ็นต์ให้มีค่าถึง 80.00 เปอร์เซ็นต์ และพิจารณาค่าพีเอชพบว่า ประสิทธิภาพการในการกำจัดซีโอดีจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มจาก 2.0 เป็น 4.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการในการกำจัดซีโอดีเปลี่ยนแปลงจาก 40.0 เปอร์เซ็นต์ ลดลงถึง 35.00 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีดังนี้ ในสภาวะกรดจะสามารถกำจัดซีโอดีได้มากกว่าในสภาวะที่เป็นด่างแต่ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนของเหล็กไอออนที่มากขึ้น

4.3.5 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม

จากสมการการทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ได้จากแบบจำลอง Regression Model สามารถนำมาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ในโปรแกรม Minitab Version 17.0 สำหรับคำนวณค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ โดยในการประมวลผลมีค่าที่ต้องกำหนดค่าดังนี้

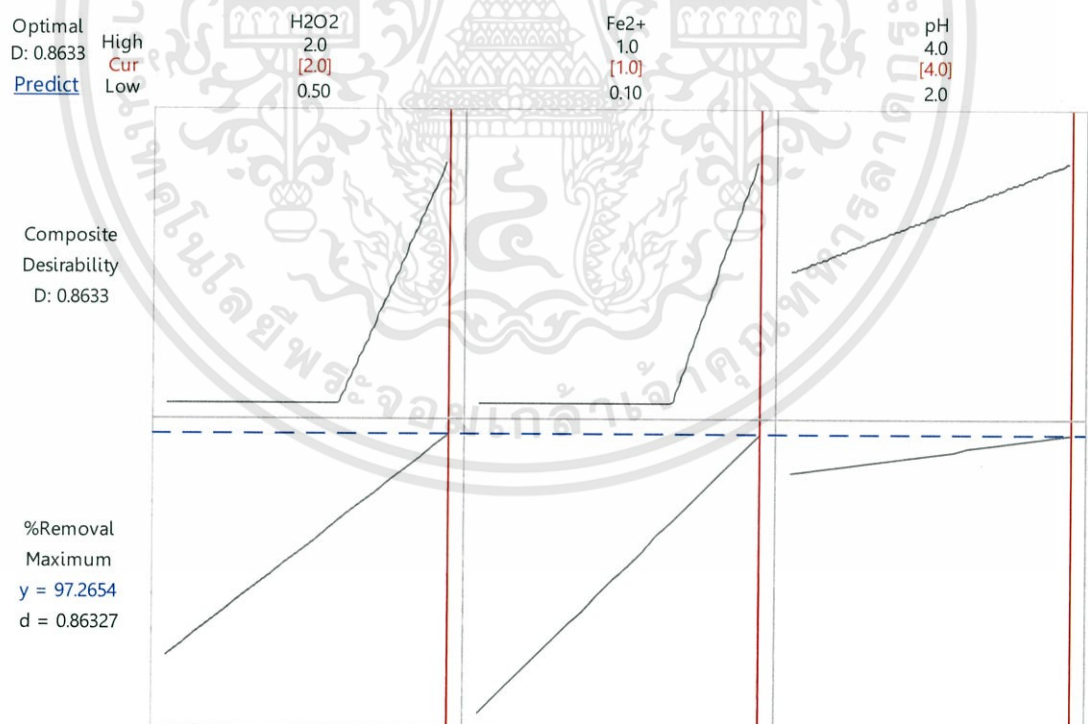
- ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) มากที่สุดหรือที่ยอมรับได้ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตบนเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์

- ค่าเป้าหมาย (Target) คือค่ามาตรฐานหรือค่าเป้าหมายของผลตอบ โดยวัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้เพื่อต้องการกำจัดซีโอทีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบฟลักซ์โคราฟีที่ใช้หมักพิมพ์ฐานน้ำให้ผ่านมาตรฐาน จึงกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์

- ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) ที่มีค่าน้อยที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตล่างเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์

หมายเหตุ การกำหนดค่าขอบเขตบน ค่าเป้าหมายและค่าขอบเขตล่างของงานวิจัยนี้เกิดจากการสอบถามความต้องการปริมาณของซีโอทีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบฟลักซ์โคราฟีฐานน้ำหลังบำบัดซึ่งทางโรงพิมพ์ต้องการให้ปริมาณของซีโอทีในน้ำเสียหลังการบำบัดในลักษณะที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงเลือกค่าเป้าหมายที่ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำเสียหลังการบำบัดมีปริมาณของซีโอทีตามความต้องการของโรงพิมพ์ที่ใช้ระบบฟลักซ์โคราฟีในการพิมพ์หมักพิมพ์ฐานน้ำ

สถานะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดซีโอทีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์หมักพิมพ์ฐานน้ำที่ได้จากแบบจำลองเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอที 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 4.10 คืออัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อซีโอทีเท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหล็กไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1.0 ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ 97.26 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.10 สถานะที่เหมาะสมต่อการกำจัดซีโอทีในน้ำเสียหมักพิมพ์ฐานน้ำ

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำสีแดงด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นน้ำเสียจากบริษัทสยามโปรครีเอชันเซ็นเตอร์ซึ่งเป็นโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างเครื่องพิมพ์โดยสีที่ใช้ในการพิมพ์ ณ วันที่เก็บตัวอย่างเป็นสีผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียพบว่ามีค่าพีเอชเท่ากับ 7.60 มีซีโอดีเท่ากับ 269.7231 mg/l มีค่าสีเท่ากับ 511 ADMI

2) ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีพบว่า เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีเพิ่มขึ้นไปด้วยแต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะสูงกว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ดังนั้น จึงเลือกใช้เวลาที่ 40 นาทีในการทำทดลองขั้นต่อไปเนื่องจาก เวลาที่ 40 นาทีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีเริ่มคงที่

3) ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียของโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันพบว่า ปัจจัยที่ได้ในการศึกษามีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่สภาวะต่างๆ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์หมึกพิมพ์ฐานน้ำที่ได้จากแบบจำลองทางสถิติเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 100 เปอร์เซ็นต์ คืออัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อซีโอดีเท่ากับ 0.5 อัตราส่วนของเหล็กไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.1 ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงถึง 98.90 เปอร์เซ็นต์

4) ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีในน้ำเสียของโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันพบว่า ปัจจัยที่ได้ในการศึกษามีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่สภาวะต่างๆโดยพบสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์หมึกพิมพ์ฐานน้ำที่ได้จากแบบจำลองทางสถิติเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 100 เปอร์เซ็นต์ คืออัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อซีโอดีเท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหล็กไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1.0 ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้สูงถึง 97.26 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) หลังการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันจะพบตะกอนเกิดขึ้นดังนั้น ควรศึกษาวิธีกำจัดตะกอนโดยวิธีที่ถูกต้องในขั้นต่อไป

2) ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology ได้

3) โดยปกติไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต้องมีการ Calibrate ใหม่ก่อนการทดลองทุกครั้ง เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีการสลายตัวได้ง่ายมากแม้จะเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C

- 4) ควรศึกษาอิทธิพลของระดับในแต่ละปัจจัยในช่วงที่กว้างกว่านี้เพื่อเห็นผลการทดลองที่ชัดเจน
- 5) ควรวิเคราะห์ผลของสารปนเปื้อนอื่นๆนอกเหนือจากการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- ณัชชาเรย์ ธนกรจิตติพัฒน์ และกรรณิการ์ ดิษยวงศ์. 2555. “การบำบัดน้ำเสียโรงอาหารโดยกระบวนการเฟนตัน”, ในการประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 9 วันที่ 6 - 7 ธันวาคม พ.ศ.2555 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- ธีระ ตั้งวิชาญ และคณะ 2539.“เอกสารประกอบการสอน ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการพิมพ์ หน่วยที่ 1-4”หน้า 218-264 โรงพิมพ์สุโขทัยธรรมิกราช.
- ปิยะฉัตร จันทร์ทรงศรี. 2545. “การบำบัดน้ำเสียหมักพิมพ์เพล็กซ์โคราฟิฐานน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการดูดซับด้วยกากโลหะไฮดรอกไซด์”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ. 2545.
- พรธรรณ ศรีนาค. 2556. การควบคุมมลพิษทางน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3 พ.ศ. 2556 กรุงเทพฯ. พิมพ์ที่ มินเซอวิเศษพลาญ
- พงษ์ทวี จุรัตน์, ยุทธนา เจริญศรีสกุล และศิริภัทร์ พลอยทับทิม. 2557. “การบำบัดน้ำยาโบรอนจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน”. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2557
- พงศกร สัจจาธรรม, พัชราภรณ์บริบูรณ์ และรวีวรรณภาประเสริฐ. 2552. “การบำบัดซีโอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Reactive black5”. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2552.
- พัชรินทร์ นาคหล่อ.2557. รู้จักเทคโนโลยีเฟนตัน (Fenton Technology) ในระบบบำบัดน้ำเสีย. {เข้าถึงเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2558] เข้าได้จาก : <http://wqm.pod.go.th>
- มนตรี. ข้อตกลงการถดถอยและกระบวนการวิเคราะห์การถดถอย.วารสารรวมคำแห่ง สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 30 ฉบับที่ 2 หน้า 67 - 68.
- ศุภณีย์ เรียบเลิศหิรัญ และแววบุญ แยมแสงสังข์. 2557. หมักพิมพ์ฐานน้ำกับการพิมพ์งานกล่องกระดาษ,รายงานผลการสัมมนา หมักพิมพ์ฐานน้ำกับการพิมพ์งานกล่องกระดาษ วันที่ 5 มิถุนายน 2557 ศูนย์การเรียนรู้เทคโนโลยีหมักพิมพ์ บริษัทเฉลิมชัยชาญ
- วุฒิ วิพันธ์พงษ์. 2540. “การใช้สารเคมีเฟนตันกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานฟอยล์ย้อม”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ. 2540.
- สุกัญญา โป่งรักษ์. 2558. “การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตัน โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตัน” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552
- สุชนม์ แก้วมาตย์. “การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการเฟนตันแบบฉายแสงโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์”. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และวีระนุช บุญรุ่ง. 2553. “การกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยกระบวนการเพนตันและกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม”. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน พ.ศ.2553.
- อัญชุลี ทองจับ. 2553. “สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโปรไบโอติกของเชื้อผสมระหว่างแบคทีเรียกรดแลคติกและยีสต์โดยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ.2553.
- อาทิตย์ อัครสุชี และสิรินาถ โมพันดุง. 2557. “การใช้เคลย์ที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเสมือนเพนตันเพื่อกำจัดสีน้ำทิ้งจากการย้อมผ้า”, วรสารมหาวิทยาลัยทักษิณ ฉบับที่ 1 หน้าที่ 21 - 28
- อรสุดา ชันติกุล และอนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล, “การหาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์โดยกระบวนการโอโซนชั้น”, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, วิศวกรรมสาร มช. ปีที่ 34 ฉบับที่ 2(177-188) มีนาคม - เมษายน พ.ศ.2550
- APHA, AWWA and WEF. 1995. *Standard Method for the Examination of Water and Wastewater*. 19th Edition. USA : American Public Health Association.
- Ebrahiem, E.E., Al-Maghrabi, M.N. and Mobarki, A.R. 2013. Removal of organic Polltants from industrial wastewater by applying photo-Fenton Oxidation technology. Jazan University.
- Ertugay, N and Acar, F.N. 2013. “Removal of COD and color from Direct Blue 71 azo dye wastewater by fenton’s oxidation: kinetic study”. Ataturk University. Arabian Journal of Chemistry.
- Lee, M. 2008. “Removal of COD and Color from livestock wastewater by the Fenton method”. *Journal of Hazardous Meterial*. 153. 1314-1319
- Ramteke, L.P., and Gogate, P.R. 2015. Treatment of toluene, benzene, naphthalene and xylene (BTNXs) containing wastewater using improved biological oxidation with pretreatment using Fenton/Ultrasound based processes.
- Wyszecki, G. and Stiles, W.S. 2000. *Color Science*. 2: 831-836. WILEY-VCH. Weinheim. [Online]. <http://www.pneac.org/printprocesses/flexography/>



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
หลักการและวิธีการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-1 ซีโอดี โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux-Titration)

หลักการทั่วไป

การวิเคราะห์หาค่าซีโอดีเป็นการวัดความสกปรกของน้ำเสีย โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ โดยใช้สารเคมีซึ่งมีอำนาจในการออกซิไดซ์สูงในสารละลายที่เป็นกรด ในการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีจากตัวอย่างจำเพาะบางชนิด สามารถหาค่าความสัมพันธ์กับค่าบีโอดี สารอินทรีย์คาร์บอน หรือสารอินทรีย์ต่างๆ เพื่อใช้ในการติดตามและควบคุมกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้ วิธีรีฟลักซ์โดยใช้ไดโครเมตเป็นที่นิยมใช้กันมากกว่าการใช้สารออกซิแดนซ์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากความสามารถในการออกซิไดซ์ได้กับตัวอย่างชนิดต่าง ๆ และวิเคราะห์ง่าย ออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่างๆ ได้ประมาณ 95 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ (คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย, 2540)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ใช้แก้วที่ทำด้วยบอโรซิลิเกต (Borosilicate culture tubes) ขนาด 16x100 มิลลิเมตร ที่มีฝาเกลียวชนิดทีเอฟอี (Tetrafluoroethylene; TFE)
2. ตู้อบ (Oven) ควบคุมอุณหภูมิที่ $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$ การใช้ตู้อบต้องแน่ใจว่าการอบ 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 150°C จะไม่ทำให้ฝาหลอดแก้วถูกทำให้เสียหาย
3. ตะแกรงใส่หลอดทดลอง (Test tube rack)
4. ปิเปต (Pipettes) ขนาด 1 และ 10 มิลลิลิตร
5. บิวเรต (Burette) ขนาด 50 มิลลิลิตร
6. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร

รีเอเจนต์

1. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ความเข้มข้น 0.0167 โมลาร์
ซึ่งสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard) โพแทสเซียมไดโครเมต 4.913 กรัม ซึ่งถูกทำให้แห้งในเตาอบอุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง ใส่ไปในน้ำกลั่นประมาณ 500 ลบ.ซม. ค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 ลบ.ซม. เติมเมอร์คิวริกซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลายตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วเจือจางให้มีปริมาตรเป็น 1,000 ลบ.ซม. ด้วยน้ำกลั่น
2. กรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์
ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 22 กรัม ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 ขวดซึ่งมี น้ำหนัก 4.0 กิโลกรัม (ต้องใช้ใช้เวลาในการละลาย 1-2 วัน)
3. สารละลายเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ (Ferriin indicator solution)
ละลายไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 0.695 กรัม และ 1, 10 ฟีนแอนโทรีนโมโนไฮเดรต [1,10 phenanthroline monohydrate ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{N}_2\text{O}$)] 1.485 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วทำให้เจือจางเป็น 100 ลบ.ซม.
4. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) ความเข้มข้น 0.025 โมลาร์
ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต [$\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] ชนิด เอ.อาร์ (Analytical grade crystal) 9.8 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 125 ลบ.ซม. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 ลบ.ซม. คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1,000 ลบ.ซม. สารละลายนี้ต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่จะนำมาใช้ เติมสารเคมีตามตารางที่ ก-1.1 ในภาชนะย่อยสลายแต่ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ ทิ้งให้เย็นที่ อุณหภูมิห้อง แล้วไทเทรตด้วยเอฟเอเอส ใช้เฟอร์โรนเป็นอินดิเคเตอร์ 0.05-0.1 ลบ.ซม. ทำประมาณ 1-2 หยด ไทเทรตจนถึงจุดยุติสีจะเปลี่ยนจากฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

การคำนวณ

ก-1.1 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต (FAS)

โมลาริตีของเอฟเอเอส = $\frac{\text{ปริมาตร } 0.0167 \text{ โมลาร์ } K_2Cr_2O_7 \text{ มิลลิลิตร} \times 0.1}{\text{ปริมาตรของFAS ที่ใช้ไทเทรต, มิลลิลิตร}}$

ปริมาตรของFAS ที่ใช้ไทเทรต, มิลลิลิตร

ตารางที่ ก-1 ปริมาณตัวอย่างและรีเอเจนต์ที่ใช้สำหรับขนาดต่างๆ ของภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย

ขนาดของภาชนะย่อยสลาย	ตัวอย่างน้ำ มิลลิลิตร	สารละลายในการย่อยสลาย	กรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ มิลลิลิตร	ปริมาตรทั้งหมด
หลอดย่อยสลาย				
16x100 มม.	2.5	1.5	3.5	7.5
20x150 มม.	5.0	3.0	7.0	15.0
25x150 มม.	10.0	6.0	14.0	30.0
แอมพูลมาตรฐาน				
10 มิลลิลิตร	2.5	1.5	3.5	7.5

5. สารละลายกลูโคส

ละลายกลูโคส 486.6 มิลลิกรัมในน้ำกลั่นเจือจางให้เป็น 1 ลิตร สารละลายนี้มีค่าซีโอดีเท่ากับ 500 มิลลิกรัม/ลิตร (กลูโคส 1 กรัมให้ค่าซีโอดี 1.067 กรัม) สารละลายกลูโคสไม่คงตัวเพราะย่อยสลายทั้งชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว ไม่ควรเตรียมทิ้งไว้นาน

การเก็บและรักษาตัวอย่างน้ำ

เก็บตัวอย่างในขวดแก้วหรือขวด Polyethylene หรือเทียบเท่า ถ้าไม่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทันที ให้เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ในปริมาณที่จะให้ค่าพีเอช ของตัวอย่างน้อยกว่า 2 (สำหรับตัวอย่างที่มีค่าพีเอช เป็นกลางให้เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร ต่อตัวอย่างน้ำ 1 ลิตร) แล้วนำตัวอย่างแช่เย็นไว้โดยวิเคราะห์ตัวอย่างภายใน 28 วัน

วิธีวิเคราะห์

- ล้างหลอดย่อยและฝาจุกด้วยกรดซัลฟิวริกร้อยละ 20 ก่อนนำไปใช้ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์
- เลือกใช้ปริมาตรของตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม ตามตารางที่ ก-1
- นำตัวอย่างน้ำมาใส่หลอดย่อยสลาย เติมสารละลายที่ใช้ในการย่อยสลายซึ่งได้แก่ สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต
- ค่อยๆ เทกรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ให้ไหลลงกันหลอดแก้ว เพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นของตัวอย่างน้ำและน้ำย่อยสลาย
- ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่น แล้วคว่ำหลอดแก้วไปมา หลายๆ ครั้งเพื่อผสมเข้ากันอย่างทั่วถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อควรระวัง

1. ในขณะที่ผสมในภาชนะให้ใส่หน้ากากป้องกัน (face shield) และใส่ถุงมือเพื่อป้องกันความร้อนด้วย

2. ต้องผสมของผสมให้เข้ากันให้ดีก่อนนำไปรีฟลักซ์ เพื่อกันไม่ให้เกิดความร้อนสะสมอยู่เฉพาะที่กันหลุด เพราะอาจทำให้ระเบิดได้

6. นำหลอดทดลองเหล่านี้ไปใส่ในเตาอบ ซึ่งได้ทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิ 150°C ก่อน ใช้เวลารีฟลักซ์ 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง

7. เปิดฝาจุก เทสารละลายใส่ขวดรูปชมพู่ เติมเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ประมาณ 0.05-0.1 ลบ. ซม. (1 หรือ 2 หยด) นำไปไทเทรตด้วย 0.05 โมลาร์เอฟเอเอส จุดยุติจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากฟ้าอมเขียวเป็นน้ำตาลแดง ถึงแม้บางครั้งสีฟ้าอมเขียวอาจจะกลับมาปรากฏอีกในหลายนาทีถัดมา และในลักษณะเดียวกันให้ทำรีฟลักซ์และไทเทรตแบบลงค์ที่มีรีเอเจนต์กับน้ำกลั่นในปริมาตรเท่ากับตัวอย่างน้ำด้วย

การคำนวณ

$$\text{ซีไอดี, มก.ออกซิเจน/ลิตร} = \frac{(A-B) \times M \times 8,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}}$$

โดย

A = ปริมาตรของเอฟเอเอสที่ใช้ในการไทเทรตแบบลงค์ (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของเอฟเอเอสที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

M = โมลาริตีของเอฟเอเอส

8,000 = milliequivalent weight ของออกซิเจน \times 1000 มิลลิลิตร/ลิตร

ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาตรของเอฟเอเอสในการไทเทรตแบบลงค์เท่ากับ 5.9 มิลลิลิตร

โมลาริตีของเอฟเอเอส คำนวณตามสูตร ก-1.1

$$M = \frac{1.5 \times 0.1}{5.9}$$

$$M = 0.0254 \text{ โมลาร์}$$

ดังนั้นโมลาริตีของเอฟเอเอสเท่ากับ 0.0254 โมลาร์

ปริมาตรของเอฟเอเอสในการไทเทรตตัวอย่างน้ำเท่ากับ 5.2 มิลลิลิตร

$$\text{ซีไอดี, มก.ออกซิเจน/ลิตร} = \frac{(5.9 - 5.2) \times 0.0254 \times 8,000}{2.5}$$

$$= 56.896 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}$$

ก-2 การวิเคราะห์สี (ADMI Tristimulus filter Method)

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
2. แผ่นเมมเบรน (Membrane Filter) ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
3. เซลล์วัดแสงที่มีช่วงแสง 10 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หลอดฉีดยา
5. เครื่องแก้วต่างๆ

2) สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริก หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางสำหรับปรับพีเอช
2. โพแทสเซียมคลอโรแพลตตินเนต (K_2PtCl_6) เตรียมได้จาก 2.1 หรือ 2.2
 - 2.1 จำนวน 1.246 กรัม ในน้ำกลั่นเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตร และโคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) 1,000 กรัม และเจือจางจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยใช้ขวดวัดปริมาตร ซึ่งมีหน่วยสีเท่ากับ 500 ADMI
 - 2.2 โลหะแพลตตินัมบริสุทธิ์ 500 มิลลิกรัม ละลายในกรดกัดทอง (Aqua regia) โดยการให้ความร้อนไล่กรดไนตริกด้วยการระเหย และเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นลงไปใหม่ จนละลายได้หมด จากนั้นเติมโคบอลต์(II) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต 1,000 กรัม แล้วจึงปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

3) การทดลอง

1. การเตรียมสารละลายสีมาตรฐานที่มีสี 100, 200, 300, 400, และ 500 ADMI โดยการเจือจางสต่อจากสารเคมีข้อ 2.1 หรือ 2.2 โดยปีเปตมา 20, 25, 30, 40 และ 50 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็นปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร สำหรับละลายสีมาตรฐานที่มีสีเท่ากับ 500 ADMI ไม่ต้องปรับปริมาตรใดๆทั้งสิ้น นำมาวัดค่าทราเนสซิวิตี (%T) แต่ละความยาวคลื่นดังตารางที่ ก-2
2. ทำการกรองตัวอย่างน้ำด้วยฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
3. นำไปวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่นด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ตามตารางที่ ก-2
4. เมื่อได้ค่า %T ของแต่ละความยาวคลื่นและค่า Calibration Factor จากความชันมาตรฐานของกราฟ ให้นำค่าที่ได้ใส่ในโปรแกรมช่วยคำนวณค่า ADMI (เจตนิพิฐ ,2552) โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าความเข้มข้นในหน่วย ADMI ผ่านทาง Worksheet -ADMI

ตารางที่ ก-2 การวัดค่า (%T) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

Coordinate No.	X	Y	Z
	Wavelength (nm)		
2	435.5	489.5	422.2
5	461.2	515.2	432.0
8	544.3	529.8	438.6
11	564.1	541.4	444.4
14	577.4	551.8	450.1
17	588.7	561.9	455.9
20	599.6	572.5	462.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23	610.9	584.8	468.7
26	624.2	600.8	477.7
29	654.9	627.3	495.2
Factor when 10 Ordinate Used	0.09806	0.10000	0.11814

ที่มา : standard method,1995

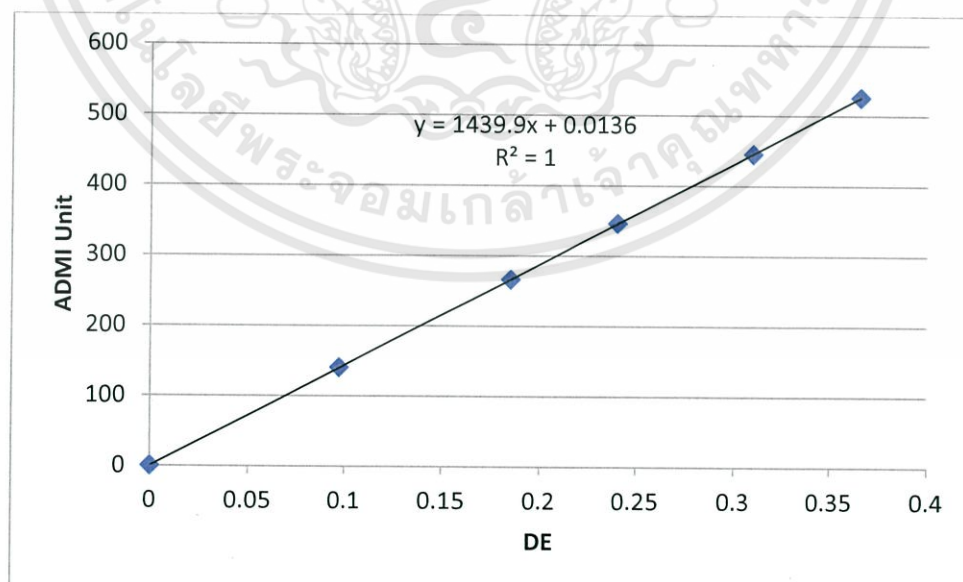
4) การคำนวณและแปลผล

1. การคำนวณ Calibration Factor (f)

เป็นการนำค่า ADMI ของสีมาตรฐานที่เตรียมได้มาพลอตเทียบกับค่า DE ที่คำนวณได้ซึ่งจะได้ Calibration Factor (f) จากกราฟความชันดังรูปที่ ก-1

ตารางที่ ก-3 ค่า DE และค่าหน่วยสีมาตรฐาน ADMI Unit

ลำดับ	หน่วยสี	DE	ADMI Unit
1	0	0	0
2	100	0.0971	139.7884
3	200	0.1846	265.8632
4	300	0.2401	345.7919
5	400	0.3092	445.2023
6	500	0.3651	525.6789



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐานสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคำนวณค่าสี (ADMI)

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

b

โดยที่ F คือ ความชันของกราฟของค่า ADMI กับค่า DE ของตัวอย่างสีมาตรฐาน
b คือ ความกว้างของเซลล์วัดแสง (cm.)

DE สามารถหาได้จากสมการของ Bridgeman

$$\text{DE} = [(0.2 \Delta V_y)^2 + (\Delta(V_x - V_y))^2 + (0.4 \Delta(V_y - V_z))^2]^{1/2}$$

$$\text{โดยที่ } \Delta V_y = V_{yc} - V_{ys}$$

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

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

ตัวอย่างการคำนวณค่าสี ADMI

- ทำการวัด %T ในแต่ละความยาวคลื่น ดังตารางที่ ก-2 จะได้ค่าดังตัวอย่าง
- นำค่าที่ได้จากแต่ละแกนมารวมกัน
- นำผลรวมที่ได้ในแต่ละแกนมาคูณกับแฟคเตอร์จากตารางที่ ก-2
- นำค่า X_c, Y_c, Z_c, X_s, Y_s และ Z_s (X_c, Y_c และ Z_c ได้มาจากการนำน้ำกลั่นไปวัด แล้วคำนวณเช่นเดียวกันกับตัวอย่าง แปลงเป็นค่า Musell จากตารางของ Adam-Nickerson (Wyszecki, G and Stiles W.S., 2000) จะได้ค่าเป็น $V_{xc}, V_{yc}, V_{zc}, V_{xs}, V_{ys}$ และ V_{zs} ตามลำดับ จะได้ $V_{xc}=9.99, V_{yc}=9.99, V_{zc}=9.99, V_{xs}=8.56, V_{ys}=8.42$ และ $V_{zs}=8.33$
- นำค่าที่ได้คำนวณหาค่า DE

$$\text{DE} = \{[(9.99-8.42) \times 0.23]^2 + [(9.99-9.99) - (8.56-8.42)]^2 + [0.4 \times [(9.99-9.99) - (8.42-8.33)]^2]\}^{1/2}$$

$$\text{DE} = 0.389$$

- หาค่าสี ADMI

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

b

$$\text{ADMI} = 1313.8 \times 0.389$$

1

$$= 511.0682$$



ภาคผนวก ข
ตารางผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 แสดงผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดซีโอดีและสี

ตัวอย่าง	H ₂ O ₂ : COD	Fe ²⁺ : H ₂ O ₂	pH	ปริมาตรสารที่ต้องใช้		ค่า COD (mg/L)	ค่าสี ADMI	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		น้ำหนักตะกอน (g)
				H ₂ O ₂ (μl)	FeSO ₄ •7H ₂ O (g)			COD	สี	
A ₁ B ₁ C ₁	0.5	0.1	2	44.9538	0.0110	226.8911	30.4248	15.88	88.72	0.0114
A ₁ B ₂ C ₁	0.5	0.5	2	44.9538	0.0551	209.44	35.3877	22.35	86.88	0.0351
A ₁ B ₂ C ₂	0.5	0.5	3	44.9538	0.0551	165.8258	2.7781	38.52	98.97	0.0370
A ₁ B ₃ C ₂	0.5	1.0	3	44.9538	0.1102	43.6682	9.7100	83.81	96.4	0.0697
A ₁ B ₃ C ₃	0.5	1.0	4	44.9538	0.1102	174.7266	9.0357	35.22	96.65	0.0604
A ₂ B ₁ C ₃	1.0	0.1	4	89.9077	0.0220	244.6119	12.6770	9.31	95.3	0.0145
A ₂ B ₂ C ₁	1.0	0.5	2	89.9077	0.1102	56.5609	5.7721	79.03	97.86	0.0523
A ₂ B ₃ C ₁	1.0	1.0	2	89.9077	0.2203	52.4072	7.3365	80.57	97.28	0.1270
A ₂ B ₃ C ₂	1.0	1.0	3	89.9077	0.2203	52.4072	1.5914	80.57	99.41	0.1273
A ₃ B ₁ C ₂	2.0	0.1	3	179.8154	0.0441	128.7388	6.9589	52.27	97.42	0.0312
A ₃ B ₁ C ₃	2.0	0.1	4	179.8154	0.0441	209.6558	7.4713	22.27	97.23	0.0239
A ₃ B ₂ C ₃	2.0	0.5	4	179.8154	0.2203	34.9291	19.1234	87.05	92.91	0.1535
A ₃ B ₃ C ₁	2.0	1.0	2	179.8154	0.4406	31.8813	19.6900	88.18	92.70	0.2174
A ₃ B ₃ C ₃	2.0	1.0	4	179.8154	0.4406	174.7266	10.4922	35.22	96.11	0.2323

หมายเหตุ เส้นคาคาสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออก

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	H ₂ O ₂ : COD	Fe ²⁺ : H ₂ O ₂	pH	ปริมาตรสารที่ต้องใช้		ค่า COD (mg/L)	ค่าสี ADMI	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		น้ำหนัก ตะกอน (g)
				H ₂ O ₂ (μl)	FeSO ₄ • 7H ₂ O (g)			COD	สี	
A ₁ B ₁ C ₂	0.5	0.1	3	44.9538	0.0110	218.179	9.6021	19.11	96.44	0.0373
A ₁ B ₁ C ₃	0.5	0.1	4	44.9538	0.0110	262.6294	0.0000	2.63	100	0.0109
A ₁ B ₂ C ₃	0.5	0.5	4	44.9538	0.0551	156.3045	11.8408	42.65	95.61	0.0267
A ₁ B ₃ C ₁	0.5	1.0	2	44.9538	0.1102	68.6175	3.2097	74.56	98.81	0.0578
A ₂ B ₁ C ₁	1.0	0.1	2	89.9077	0.0220	188.6713	10.086	30.05	96.26	0.0116
A ₂ B ₁ C ₂	1.0	0.1	3	89.9077	0.0220	200.9167	2.7781	25.51	98.97	0.0169
A ₂ B ₂ C ₂	1.0	0.5	3	89.9077	0.1102	248.7117	7.3365	7.79	97.28	0.0599
A ₂ B ₂ C ₃	1.0	0.5	4	89.9077	0.1102	137.2081	7.4713	49.13	97.23	0.0488
A ₂ B ₃ C ₃	1.0	1.0	4	89.9077	0.2203	17.4781	9.7370	93.52	96.39	0.1081
A ₃ B ₁ C ₁	2.0	0.1	2	179.8154	0.0441	165.4212	19.1234	38.67	92.91	0.0301
A ₃ B ₂ C ₁	2.0	0.5	2	179.8154	0.2203	43.6682	21.9285	83.81	91.87	0.1307
A ₃ B ₂ C ₂	2.0	0.5	3	179.8154	0.2203	60.0404	29.6426	77.74	89.01	0.1067
A ₃ B ₃ C ₂	2.0	1.0	3	179.8154	0.4406	25.7316	1.5914	90.46	99.41	0.2188

หมายเหตุ เส้นคาสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออก

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	H ₂ O ₂ : COD	Fe ²⁺ : H ₂ O ₂	pH	ปริมาตรสารที่ต้องใช้		ค่า COD (mg/L)	ค่าสี ADMI	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		น้ำหนัก ตะกอน (g)
				H ₂ O ₂ (μl)	FeSO ₄ • 7H ₂ O (g)			COD	สี	
A ₁ B ₁ C ₁	0.5	0.1	2	44.9538	0.0110	235.6301	48.7929	12.64	81.91	0.0112
A ₁ B ₁ C ₃	0.5	0.1	4	44.9538	0.0110	261.8202	10.0876	2.93	96.26	0.0138
A ₁ B ₂ C ₂	0.5	0.5	3	44.9538	0.0551	157.0867	10.076	41.76	96.26	0.0344
A ₁ B ₃ C ₁	0.5	1.0	2	44.9538	0.1102	68.2399	3.1827	74.7	98.82	0.0645
A ₁ B ₃ C ₃	0.5	1.0	4	44.9538	0.1102	200.9167	4.2347	25.51	98.43	0.0618
A ₂ B ₁ C ₂	1.0	0.1	3	89.9077	0.0220	192.906	25.6152	28.48	90.67	0.0177
A ₂ B ₂ C ₁	1.0	0.5	2	89.9077	0.1102	61.1462	6.2576	77.33	97.86	0.0708
A ₂ B ₂ C ₃	1.0	0.5	4	89.9077	0.1102	139.7705	6.3924	48.18	97.63	0.0633
A ₂ B ₃ C ₂	1.0	1.0	3	89.9077	0.2203	61.1462	4.2347	77.33	98.43	0.1240
A ₃ B ₁ C ₁	2.0	0.1	2	179.8154	0.0441	183.4657	4.2347	31.98	98.43	0.0230
A ₃ B ₁ C ₃	2.0	0.1	4	179.8154	0.0441	110.438	10.0876	21.98	96.26	0.0238
A ₃ B ₂ C ₂	2.0	0.5	3	179.8154	0.2203	58.8536	8.4154	78.18	96.88	0.1194
A ₃ B ₃ C ₁	2.0	1.0	2	179.8154	0.4406	43.6682	15.8327	83.81	94.13	0.2412
A ₃ B ₃ C ₃	2.0	1.0	4	179.8154	0.4406	52.4072	6.3924	80.57	97.63	0.2782

หมายเหตุ เส้นคาสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออก

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	H ₂ O ₂ : COD	Fe ²⁺ : H ₂ O ₂	pH	ปริมาตรสารที่ต้องใช้		ค่า COD (mg/L)	ค่าสี ADMI	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		น้ำหนัก ตะกอน (g)
				H ₂ O ₂ (μl)	FeSO ₄ • 7H ₂ O (g)			COD	สี	
A ₁ B ₁ C ₂	0.5	0.1	3	44.9538	0.0110	202.2923	9.0357	25.00	96.65	0.0116
A ₁ B ₂ C ₁	0.5	0.5	2	44.9538	0.0551	158.5432	37.8961	41.22	85.95	0.0345
A ₁ B ₂ C ₃	0.5	0.5	4	44.9538	0.0551	158.7051	18.5569	41.16	93.12	0.0288
A ₁ B ₃ C ₂	0.5	1.0	3	44.9538	0.1102	43.1018	53.1624	84.02	80.29	0.0526
A ₂ B ₁ C ₁	1.0	0.1	2	89.9077	0.0220	202.0496	1.5914	25.09	99.41	0.0175
A ₂ B ₁ C ₃	1.0	0.1	4	89.9077	0.0220	184.7064	18.5596	31.52	93.12	0.0144
A ₂ B ₂ C ₂	1.0	0.5	3	89.9077	0.1102	124.0187	1.5914	54.02	99.41	0.0544
A ₂ B ₃ C ₁	1.0	1.0	2	89.9077	0.2203	141.3619	48.4692	47.59	82.03	0.1188
A ₂ B ₃ C ₃	1.0	1.0	4	89.9077	0.2203	106.6755	1.5914	60.45	99.41	0.1297
A ₃ B ₁ C ₂	2.0	0.1	3	179.8154	0.0441	114.3896	1.594	57.59	99.41	0.0229
A ₃ B ₂ C ₁	2.0	0.5	2	179.8154	0.2203	37.207	1.5914	86.17	99.41	0.1167
A ₃ B ₂ C ₃	2.0	0.5	4	179.8154	0.2203	44.0458	1.5914	83.67	99.41	0.1166
A ₃ B ₃ C ₂	2.0	1.0	3	179.8154	0.4406	19.9325	2.7781	92.61	98.97	0.2352

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่ส่งสัยออก

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	H ₂ O ₂ : COD	Fe ²⁺ : H ₂ O ₂	pH	ปริมาตรสารที่ต้องใช้		ค่า COD (mg/L)	ค่าสี ADMI	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		น้ำหนัก ตะกอน (g)
				H ₂ O ₂ (μl)	FeSO ₄ • 7H ₂ O (g)			COD	สี	
A ₁ B ₁ C ₁	0.5	0.5	2	44.9538	0.0110	235.5222	47.5792	12.68	82.36	0.0149
A ₁ B ₂ C ₁	0.5	0.5	2	44.9538	0.0551	175.8595	29.7505	34.8	88.97	0.0364
A ₁ B ₂ C ₂	0.5	0.5	3	44.9538	0.0551	141.2	3.2097	47.65	98.81	0.0337
A ₁ B ₃ C ₂	0.5	1.0	3	44.9538	0.1102	38.2737	1.5914	85.81	99.41	0.0565
A ₁ B ₃ C ₃	0.5	1.0	4	44.9538	0.1102	141.3619	1.5914	47.59	99.41	0.0569
A ₂ B ₁ C ₃	1.0	0.1	4	89.9077	0.0220	202.0496	1.5914	25.09	99.41	0.0154
A ₂ B ₂ C ₁	1.0	0.5	2	89.9077	0.1102	60.445	7.1207	77.59	97.36	0.0774
A ₂ B ₃ C ₁	1.0	1.0	2	89.9077	0.2203	141.3619	1.5914	47.59	99.41	0.1168
A ₂ B ₃ C ₂	1.0	1.0	3	89.9077	0.2203	68.6176	1.5914	74.56	99.41	0.1126
A ₃ B ₁ C ₂	2.0	0.1	3	179.8154	0.0441	111.4766	28.6985	58.67	89.36	0.0294
A ₃ B ₁ C ₃	2.0	0.1	4	179.8154	0.0441	214.4029	14.5111	20.51	94.62	0.0199
A ₃ B ₂ C ₃	2.0	0.5	4	179.8154	0.2203	37.8961	36.2238	85.95	86.57	0.1085
A ₃ B ₃ C ₁	2.0	1.0	2	179.8154	0.4406	42.8860	1.5914	84.1	99.41	0.2261
A ₃ B ₃ C ₃	2.0	1.0	4	179.8154	0.4406	34.9561	1.5914	87.04	99.41	0.2352

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่ส่งสัยออก

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	H ₂ O ₂ : COD	Fe ²⁺ : H ₂ O ₂	pH	ปริมาณสารที่ต้องใช้		ค่า COD (mg/L)	ค่าสี ADMI	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		น้ำหนัก ตะกอน (g)
				H ₂ O ₂ (μl)	FeSO ₄ • 7H ₂ O (g)			COD	สี	
A ₁ B ₁ C ₂	0.5	0.1	3	44.9538	0.0110	211.6517	16.8307	21.53	93.76	0.0143
A ₁ B ₁ C ₃	0.5	0.1	4	44.9538	0.0110	244.3691	1.5914	9.4	99.41	0.0107
A ₁ B ₂ C ₃	0.5	0.5	4	44.9538	0.0551	158.7051	3.2097	41.16	98.81	0.0286
A ₁ B ₃ C ₁	0.5	1.0	2	44.9538	0.1102	72.6904	1.5914	73.05	99.41	0.0645
A ₂ B ₁ C ₁	1.0	0.1	2	89.9077	0.0220	180.0941	63.9513	33.23	76.29	0.0189
A ₂ B ₁ C ₂	1.0	0.1	3	89.9077	0.0220	180.0941	1.5914	33.23	99.41	0.0226
A ₂ B ₂ C ₂	1.0	0.5	3	89.9077	0.1102	108.9951	22.6298	59.59	91.61	0.0563
A ₂ B ₂ C ₃	1.0	0.5	4	89.9077	0.1102	137.2081	1.5914	49.3	99.41	0.0530
A ₂ B ₃ C ₃	1.0	1.0	4	89.9077	0.2203	94.5649	13.9717	64.94	94.82	0.0802
A ₃ B ₁ C ₁	2.0	0.1	2	179.8154	0.0441	171.5169	1.5914	36.41	99.41	0.0291
A ₃ B ₂ C ₁	2.0	0.5	2	179.8154	0.2203	30.5596	7.4713	88.67	97.23	0.1220
A ₃ B ₂ C ₂	2.0	0.5	3	179.8154	0.2203	75.9271	1.5914	71.85	99.41	0.1102
A ₃ B ₃ C ₂	2.0	1.0	3	179.8154	0.4406	42.8860	9.6291	84.1	96.43	0.3015

หมายเหตุ เส้นคาสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่ส่งสัยออก



ภาคผนวก ค
การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-1 การหาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (\%)} = \frac{(C_0 - C_e) \times 100}{C_0}$$

โดยที่ C_0 = ค่าซีโอดีเริ่มต้น (มก./ลิตร)

C_e = ค่าซีโอดีหลังการบำบัด (มก./ลิตร)

สมมติค่าซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 269.7231 มก./ลิตร

สมมติค่าซีโอดีหลังการบำบัดเท่ากับ 26.5422 มก./ลิตร

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (\%)} &= \frac{(269.7231 - 26.5422) \times 100}{269.7231} \\ &= 90.16 \% \end{aligned}$$

ค-2 วิธีคำนวณปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการบำบัด

- ตัวอย่าง เมื่อเติม H_2O_2 ที่อัตราส่วนโดยมวลของ H_2O_2 ; COD = 1 (ความหนาแน่นของ H_2O_2 เท่ากับ 1 g/ml)

เมื่อค่าซีโอดี เท่ากับ 1 mg ใช้ H_2O_2 เท่ากับ 1 mg

และเมื่อให้ค่า ซีโอดีเท่ากับ 269.7231 mg/L จะต้องใช้ H_2O_2 $269.7231 \times 1 = 269.7231$ mg/L

ดังนั้น น้ำเสีย 1 L จะต้องใช้ H_2O_2 เท่ากับ 269.7231 mg/L

ในการทดลองใช้น้ำเสียตัวอย่างละ 100 ml ดังนั้นต้องใช้ H_2O_2 เท่ากับ 27.0 mg/L

H_2O_2 ที่ใช้มีความเข้มข้น 30% (v/v) โดยจะต้องเติม $H_2O_2 = (27.0 \text{ mL} \times 1 \text{ mL}) / 300 = 0.09 \text{ mL}$

ดังนั้น จะต้องใช้ $H_2O_2 = 90 \mu\text{L}$

ค-3 แสดงวิธีการคำนวณหาปริมาณเฟอร์รัสไอออน

- จากการศึกษางานวิจัย (Lee, 2008) พบว่า H_2O_2 : COD ที่ 1:1 เหมาะสมที่สุด ดังนั้นการเติม H_2O_2 จะต้องใช้ = 27.0 mg

คิดเป็น mol H_2O_2 คือ $27.0 \text{ mg} \times (1 \text{ mol} / 34.01 \text{ g}) \times (1 \text{ g} / 1000 \text{ mg}) = 7.94 \times 10^{-4}$

(เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ H_2O_2 เท่ากับ 34.01 g/mol)

- จากการศึกษาวิจัยของ (Lee, 2008) พบว่าสัดส่วนโมล Fe^{2+} : H_2O_2 ที่ 1:2 เหมาะสมที่สุด (เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ Fe^{2+} มีค่าเท่ากับ 55.85 g/mol)

ดังนั้น จำนวน Fe^{2+} ที่ใช้ $(1.61 \times 10^{-4} \text{ mol}) \times (55.85 \text{ g/mol}) \times (0.5) = 0.0222 \text{ g}$

- คำนวณหาปริมาณ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ที่ต้องชั่งเพื่อให้ได้ $Fe^{2+} = 0.0222 \text{ g}$

โดย $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 277.8 g ประกอบด้วย Fe^{2+} 55.8 g

ถ้าต้องการ Fe^{2+} 0.0222 g จะต้องชั่ง $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ เท่ากับ

$(0.0222 \text{ g} \times 277.8 \text{ g/mol}) / 55.8 \text{ g/mol} = 0.1105 \text{ g}$ (เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ เท่ากับ 277.8 g/mol)

ดังนั้น ปริมาณ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ เท่ากับ 0.1105

ค-4 การเตรียมสารละลายกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์

จาก Sulphuric acid 96% w/w, MW = 98 และความหนาแน่นเท่ากับ 1.83

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีเนื้อกรดซัลฟูริก 1 โมล = 1×98 กรัม
 สารละลายที่ใช้เตรียมมีเนื้อกรด 95 กรัม จากสารละลาย = 100 กรัม
 สารละลายที่ใช้เตรียมมีเนื้อกรด 1×98 กรัม จากสารละลาย = $(100 \times 1 \times 98) / 96$ กรัม
 กรดซัลฟูริก 1.83 กรัม ในปริมาตร = 1 มิลลิลิตร
 กรดซัลฟูริก $(100 \times 1 \times 98) / 96$ กรัม ในปริมาตร = $(100 \times 1 \times 98 \times 1) / (96 \times 1.83)$ มิลลิลิตร
 = 55.78 มิลลิลิตร

กรดซัลฟูริก 1 โมล ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรตวง Sulfuric acid 96% w/w มาเท่ากับ

กรดซัลฟูริก 1 โมล ปริมาตร 100 มิลลิลิตรตวง Sulfuric acid 96% w/w มาเท่ากับ

$$= (55.78 \times 100) / 1,000$$

$$= 5.6 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น ตวง Sulphuric acid 96% w/w มา 5.6 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายกรดซัลฟูริก เข้มข้น 1 โมลาร์

ค-5 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, MW.=40) 5 โมลาร์

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร เนื้อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล = 5×40 กรัม

ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร เนื้อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล = $(5 \times 40 \times 100) / 1,000$ กรัม
 = 20 กรัม

ดังนั้น ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 กรัม แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 โมลาร์



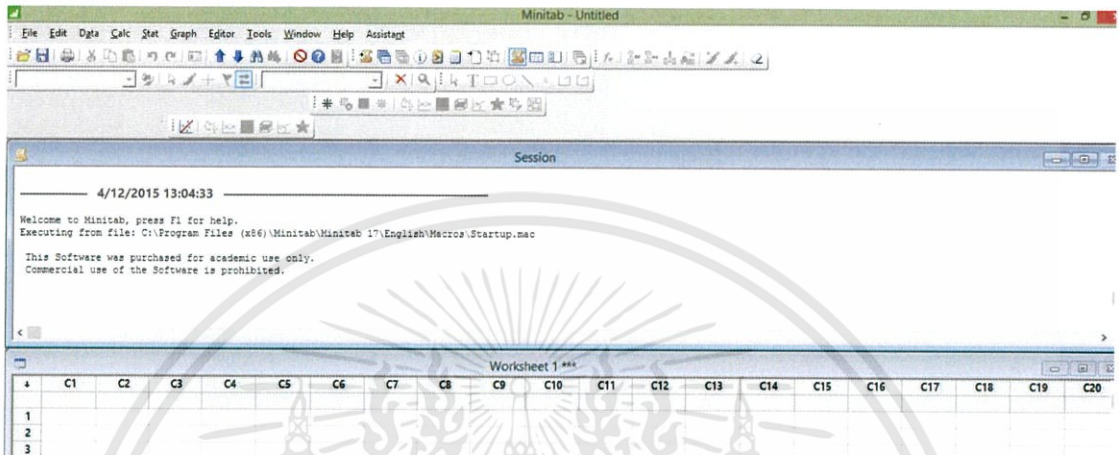
ภาคผนวก ง
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง-1. วิธีการออกแบบการทดลองโดยวิธีแฟกทอเรียล(Full Factorial Design) ด้วยโปรแกรม Minitab Ver.17

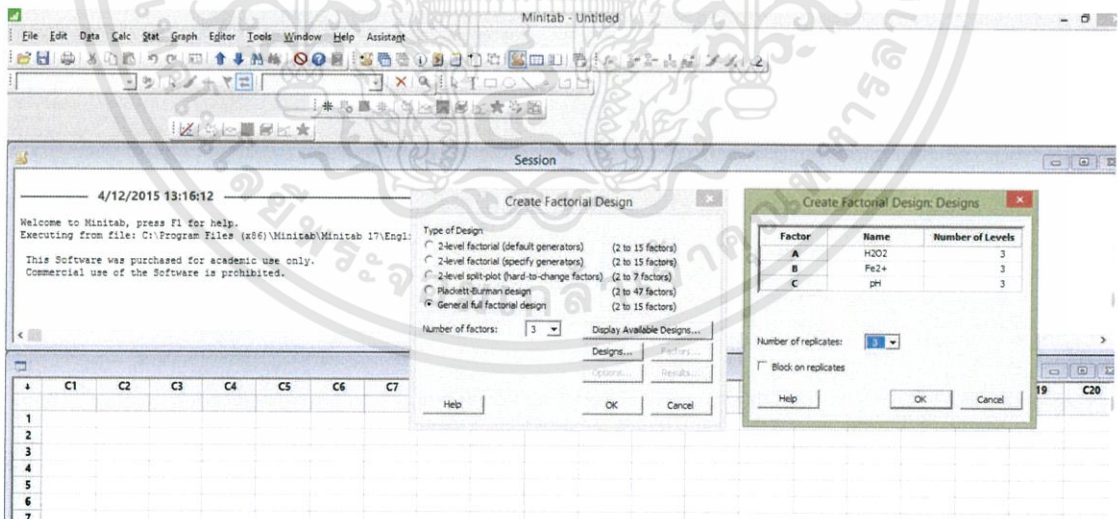
มีขั้นตอนในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- 1). เปิดโปรแกรม Minitab Ver.17 ขึ้นจะพบหน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูล ดังรูปที่ ง-1



รูปที่ ง-1 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลในโปรแกรม Minitab Ver.17

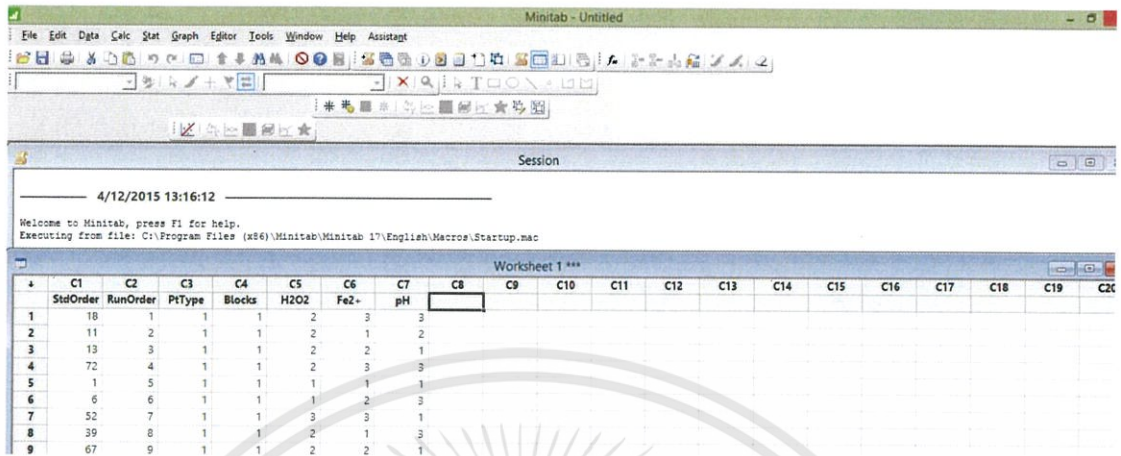
- 2). ทำการออกแบบการทดลองโดยวิธีแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (Full Factorial Design) โดยทำการเลือก Stat → DOE → Factorial → Create Factorial Design จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ ง-2



รูปที่ ง-2 การออกแบบการทดลองโดยวิธีแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (Full Factorial Design)

จากรูปที่ ง-2 จะพบหน้าต่างสำหรับใช้ในการออกแบบการทดลอง โดยเลือก General Full Factorial Design และทำการออกแบบการทดลองให้มีปัจจัย 3 ปัจจัย และคลิก Design เพื่อทำการ

ตั้งชื่อและระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษา จากนั้นกด OK จะได้การออกแบบการทดลองที่ต้องการดังรูปที่ ง-3

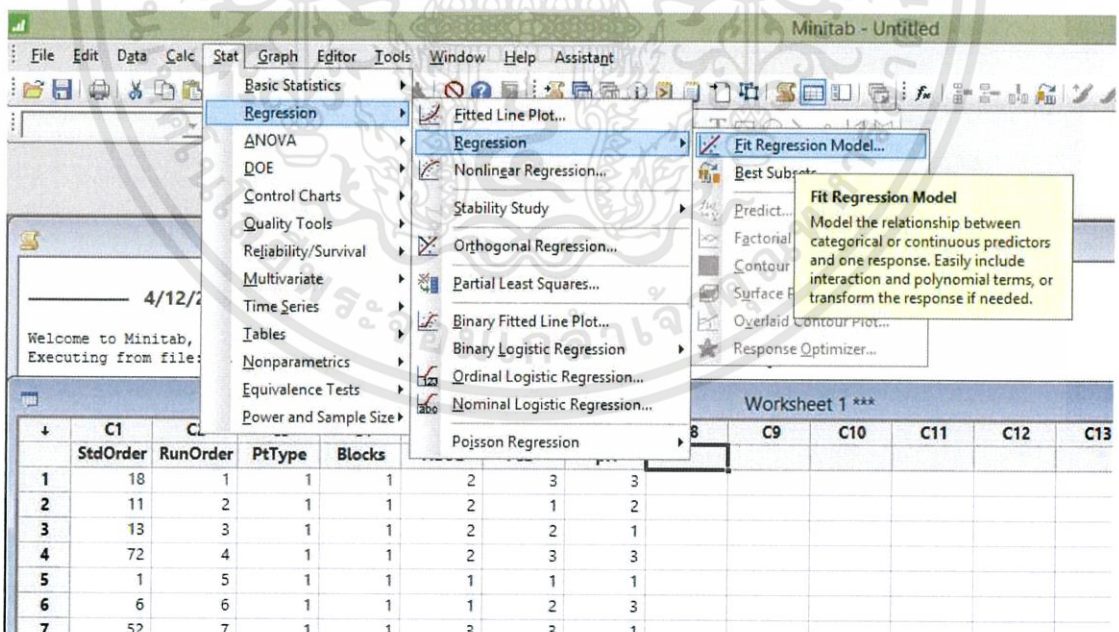


	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	H2O2	Fe2+	pH													
1	18	1	1	1	2	3	3													
2	11	2	1	1	2	1	2													
3	13	3	1	1	2	2	1													
4	72	4	1	1	2	3	3													
5	1	5	1	1	1	1	1													
6	6	6	1	1	1	2	3													
7	52	7	1	1	3	3	1													
8	39	8	1	1	2	1	3													
9	67	9	1	1	2	2	1													

รูปที่ ง-3 การออกแบบการทดลอง

ง-2. วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ด้วยโปรแกรม Minitab Ver.17

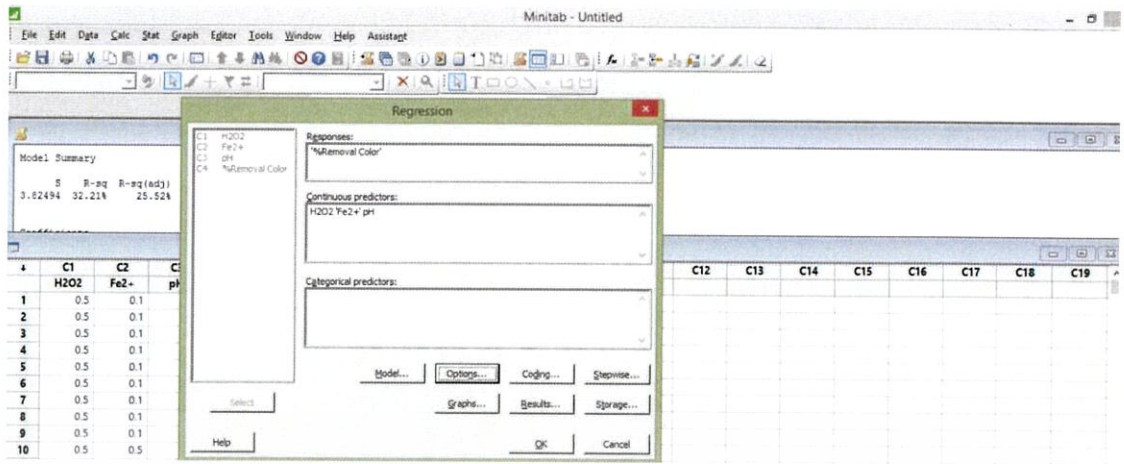
1). จากหน้าต่างโปรแกรม Minitab Ver.17 ให้เลือกที่ Stat → Regression → Fit Regression Model ดังรูปที่ ง-4



รูปที่ ง-4 หน้าต่างวิเคราะห์สมการถดถอย

2). ทำการเลือก Response และ factor ที่ต้องการดังรูปที่ ง-4 และ ง-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-5 หน้าต่างการวิเคราะห์การถดถอย

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	7	493.5	70.50	4.82	0.000
H2O2	1	276.2	276.16	18.88	0.000
Fe2+	1	206.0	206.00	14.08	0.000
pH	1	211.0	210.97	18.52	0.000
H2O2*Fe2+	1	165.9	165.35	11.30	0.001
H2O2*pH	1	220.2	220.19	15.09	0.000

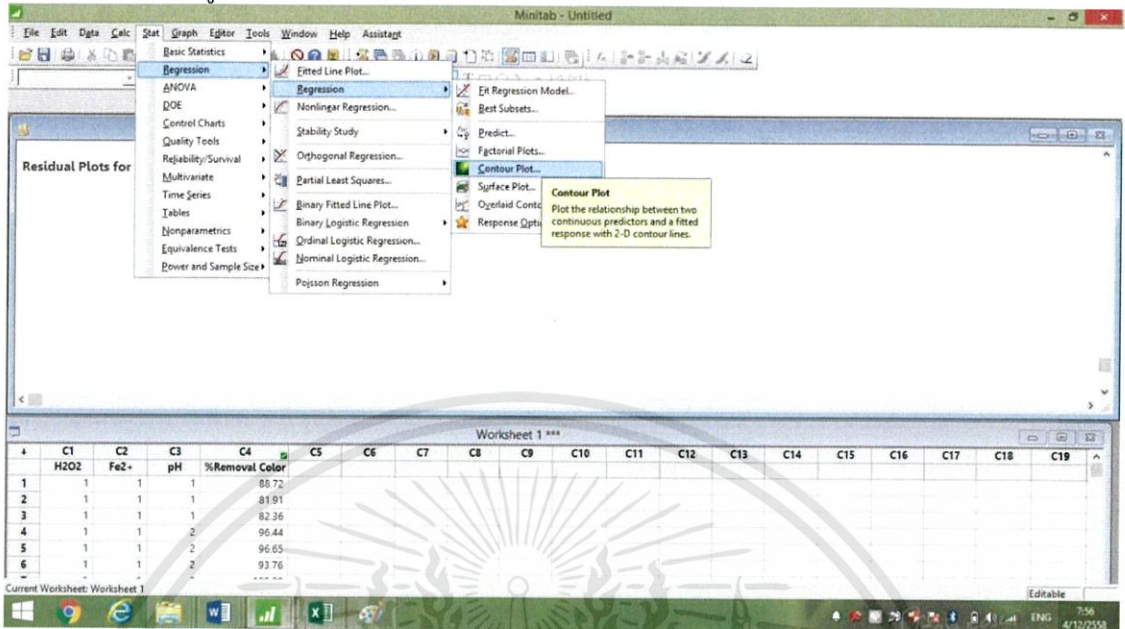
Row	C1 H2O2	C2 Fe2-	C3 pH	C4 %Removal Color
1	1	1	1	88.72
2	1	1	1	81.91
3	1	1	1	82.36
4	1	1	2	95.44
5	1	1	2	96.65
6	1	1	2	93.76

รูปที่ ง-6 หน้าต่างแสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

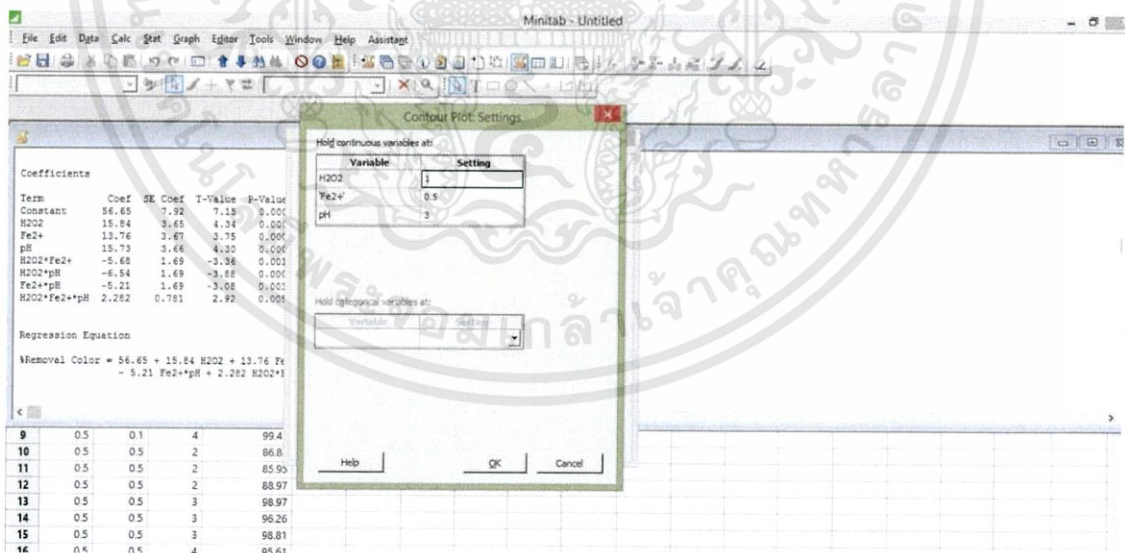
ง-3. การสร้างกราฟ Contour plot

มีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ ง-7



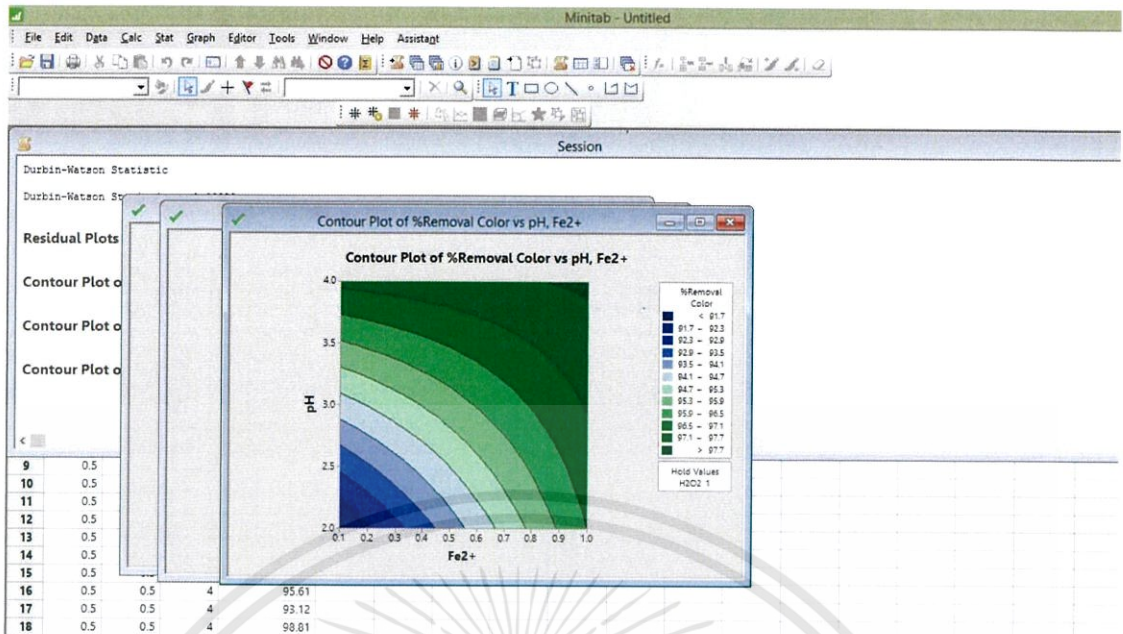
รูปที่ ง-7 การสร้างกราฟ Contour plot

จากรูปที่ ง-7 การสร้างกราฟ Contour plot จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ ง-7 จากนั้นให้กำหนดค่าคงที่ตามที่กำหนด จะได้ตามรูปที่ ง-8 และ รูปที่ ง-9



รูปที่ ง-8 หน้าต่างตั้งค่าของกราฟ Contour plot

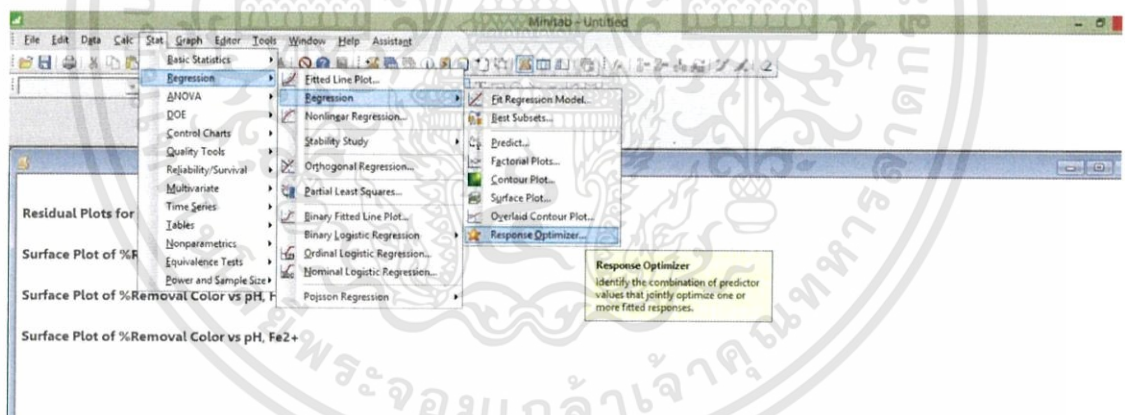
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-9 หน้าต่างแสดงกราฟ Contour plot

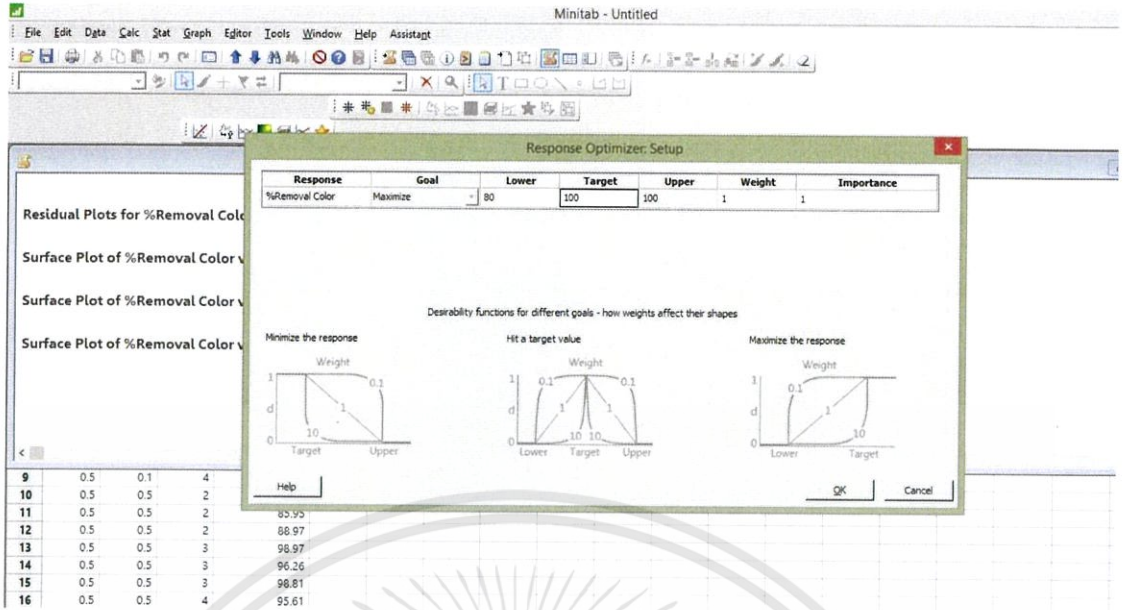
ง-4. การหาResponse Optimizer

มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ ง-10

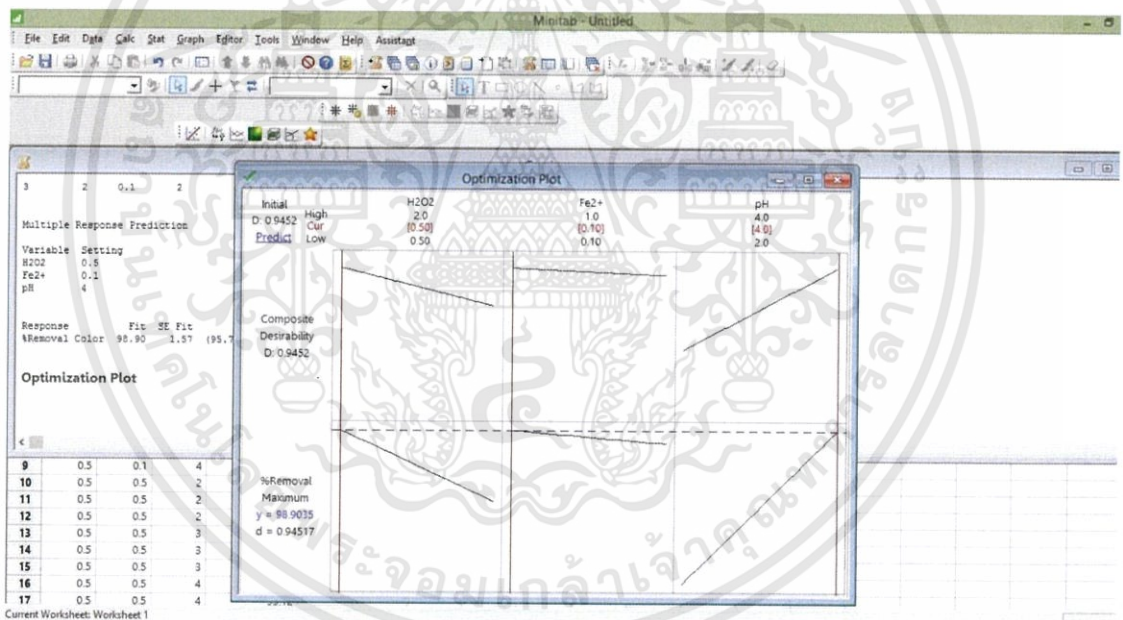


รูปที่ ง-10 แสดงหน้าต่างในการหาค่า Response Optimizer

จากรูปที่ ง-10 คลิกเข้าไปจะพบหน้าต่างให้ใส่ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเป้าหมายที่เราต้องการตั้งแสดงในรูปที่ ง-11 เมื่อเราใส่ค่าที่เราต้องการแล้ว คลิก OK จะได้ค่าที่เหมาะสมและกราฟแสดงระดับที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ ง-12



รูปที่ ง-11 แสดงหน้าต่างตั้งค่าสูงสุด ต่ำสุดและค่าเป้าหมาย



รูปที่ ง-12 แสดงระดับและกราฟของค่าที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้