

การกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี  
หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันโดยใช้วิธีการทดลอง  
แบบที่ละเอียด

REMOVAL OF COLOR AND COD FROM FLEXOGRAPHIC  
PRINTING WASTEWATER WITH WATER-BASE INK BY  
FENTON REACTION USING ONE VARIABLE AT  
A TIME APPROACH

วรากร ชูศิลป์  
สัณนา นวลสอาด  
อาณัติ น้อยแดง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟฟี  
หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันโดยใช้วิธีการทดลอง  
แบบทีละปัจจัย

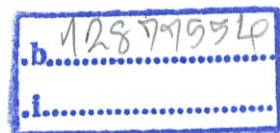
REMOVAL OF COLOR AND COD FROM FLEXOGRAPHIC  
PRINTING WASTEWATER WITH WATER-BASE INK BY  
FENTON REACTION USING ONE VARIABLE AT  
A TIME APPROACH



T148955

วรากร ชูศิลป์  
สปีนนา นवलสอาด  
อาณัติ น้อยแดง

เลขหมู่.....148955  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....1 8 S.O. 2560



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

REMOVAL OF COLOR AND COD FROM FLEXOGRAPHIC  
PRINTING WASTEWATER WITH WATER-BASE INK BY  
FENTON REACTION USING ONE VARIABLE AT  
A TIME APPROACH

WARAKORN

CHUSIN

SAPANNA

NUALSARD

ANAT

NOYDANG

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFULMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTUTUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2015

หัวข้อโครงการพิเศษ

การกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันโดยใช้วิธีการทดลองแบบทีละปัจจัย

Removal of Color and COD from Flexographic Printing Wastewater with Water-Base Ink by Fenton Reaction Using One Variable At A Time Approach

ชื่อนักศึกษา

นางสาววารากร ชูศิลป์ รหัสนักศึกษา 55050991  
นางสาวสปันนา นวลสอาด รหัสนักศึกษา 55051015  
นายอาณัติ น้อยแดง รหัสนักศึกษา 55051044

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี


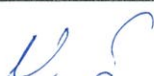

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ประธานกรรมการ	
อ.ปัทมา ลิฬหาวงศ์ กรรมการ	
ผศ.ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันโดยใช้วิธีการทดลองแบบทีละปัจจัย	
ชื่อนักศึกษา	นางสาววรากร ชูศิลป์	รหัสนักศึกษา 55050991
	นางสาวสปีณา นวลสอาด	รหัสนักศึกษา 55051015
	นายอาณัติ น้อยแดง	รหัสนักศึกษา 55051044
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียโดยใช้วิธีการทดลองแบบทีละปัจจัย (One Variable At A Time Approach) ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (20-240 นาที) ค่าพีเอช (2-8) ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (17-1,360 mg/L) และปริมาณเฟอร์รัสไอออน (500-5,400 mg/L) และใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติด้วย ANOVA และ Fisher's Pairwise comparison ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาพบว่าทุกปัจจัยมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญ ( $p$ -Value < 0.05) สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีและซีโอดี ได้แก่ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1,360 mg/L ปริมาณเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 5,400 mg/L ค่าพีเอชเท่ากับ 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 240 นาที ได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 97.8 เปอร์เซ็นต์และประสิทธิภาพการกำจัดสี 68.2 เปอร์เซ็นต์ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีโอดีเท่ากับ 1,294 mg/L และมีปริมาณสีเท่ากับ 117 ADMI

คำสำคัญ : การกำจัดสี การกำจัดซีโอดี ปฏิกิริยาเฟนตัน การทดลองแบบทีละปัจจัย  
หมึกพิมพ์ฐานน้ำ ระบบเฟล็กโซกราฟี

<b>Title</b>	Removal of Color and COD from Flexographic Printing Wastewater with Water-Base Ink by Fenton Reaction Using One Variable At A Time Approach
<b>Students</b>	Miss Warakorn Chusin student ID 55050991 Miss Sapanna Nualsard student ID 55051015 Mr. Anat Noydang student ID 55051044
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Enviromental Chemistry)
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Academic Year</b>	2015
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Usarat Thawornchaisit

### Abstract

This special project studies treatment of wastewater from Flexographic printing using water-base ink with the Fenton reaction. Factors affecting removal of color and COD were investigated using one variable at a time approach. Factors being studied were reaction time (20-240 min.), pH (2-8) , dosage of hydrogen peroxide (17-1,360 mg/L) and dosage of ferrous ion (500-5,400 mg/L) ANOVA and Fisher's Pairwise comparison was applied to determine effects of tested parameters on the removal of color and COD in wastewater. Results showed that all factors within the range of study statistically affect the efficiency removal of color. COD ( $p$ -Value <0.05). Optimum condition for color and COD removal occurred when hydrogenperoxide was applied at 1,360 mg/L, Ferrous ion at 5,400 mg/L, at pH 3 and reaction time of 240 min. At this condition, color removal and COD removal were at 68.2 percent and COD removal 97.8 percent respectively. COD and color in effluent was at 1,294 mg/L and 117 ADMI, respectively.

**Keywords:** removal of color, removal of COD, Fenton reaction, one variable at a Time, water base inks, Flexographic

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่งผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

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

ขอขอบพระคุณ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และ อ.ปัทมา ลิฬหาวงค์ ผู้ชี้แนะข้อบกพร่องและแนวทางแก้ไขรวมถึงตรวจสอบ ดิชมผลงาน ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

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

ขอขอบพระคุณ บริษัท สยามโปรครีเอชั่น เซ็นเตอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บน้ำเสียของโรงพิมพ์เพื่อใช้ทดลองในโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและความร่วมมือ จนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์สถานที่ ห้องปฏิบัติการเคมี ตึกจุฬารกรณ์ 1 ในการทดลอง และสำนักหอสมุดกลาง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ อนุเคราะห์สถานที่ในการศึกษา ค้นคว้า วิจัยในการทำโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ กำลังใจจากบิดา มารดา ตลอดจนบุคคลอื่น ๆ ที่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษจึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

วรากร ชูศิลป์

สปีนนา นวลสอาด

อาณัติ น้อยแดง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 การพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี.....	3
2.2 หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ.....	4
2.3 การบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน.....	5
2.4 การออกแบบการทดลอง.....	8
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>13</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	13
3.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา.....	13
3.3 การหาปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย.....	14
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>16</b>
4.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำ.....	16
4.2 ปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดซีโอทีในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	17
4.2.1 ผลของระยะเวลาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด.....	17
4.2.2 ศึกษาหาค่าพีเอชที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด.....	19
4.2.3 ศึกษาหาปริมาณ $H_2O_2$ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด.....	21
4.2.4 ศึกษาหาปริมาณ $Fe^{2+}$ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด.....	22
4.3 ปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดสีในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	25
4.3.1 ผลของระยะเวลาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด.....	25
4.3.2 ศึกษาหาค่าพีเอชที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด.....	27
4.3.3 ศึกษาหาปริมาณ $H_2O_2$ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด.....	29
4.3.4 ศึกษาหาปริมาณ $Fe^{2+}$ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด.....	31

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	33
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	33
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	33
เอกสารอ้างอิง.....	34
ภาคผนวก.....	36
ภาคผนวก ก หลักการและวิธีการวิเคราะห์.....	37
ภาคผนวก ข ผลการทดลองที่เกี่ยวข้อง.....	44
ภาคผนวก ค การคำนวณที่เกี่ยวข้อง.....	57
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	59

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ศักย์ออกซิเดชันของอนุมูลชนิดต่างๆ.....	6
2.2 รูปแบบการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโดของขนมปังชนิดหนึ่ง.....	9
3.1 สมบัติของน้ำที่ทำการวิเคราะห์ ในการศึกษา.....	14
4.1 การเปรียบเทียบผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อความเข้มข้น COD.....	18
4.2 การเปรียบเทียบผลของค่าพีเอชต่อความเข้มข้น COD .....	20
4.3 การเปรียบเทียบผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่า COD.....	22
4.4 การเปรียบเทียบผลของปริมาณเหล็กไอออนต่อค่า COD.....	24
4.5 การเปรียบเทียบผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อความเข้มข้น .....	26
4.6 การเปรียบเทียบผลของค่าพีเอชต่อความเข้มข้น .....	28
4.7 การเปรียบเทียบผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความเข้มข้น.....	30
4.8 การเปรียบเทียบผลของปริมาณเหล็กไอออนต่อความเข้มข้น.....	32
ก-1 การวัดหาค่า (%T) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ.....	41
ก-2 ค่า DE และค่าหน่วยสีมาตรฐาน ADMI Unit.....	41
ข-1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียตัวอย่าง.....	44
ข-2 ผลการวิเคราะห์ COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ระยะเวลาต่างกัน.....	45
ข-3 ผลการวิเคราะห์สีในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ระยะเวลาต่างกัน.....	46
ข-4 ผลการวิเคราะห์ COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ค่าพีเอชต่างกัน.....	48
ข-5 ผลการวิเคราะห์สีในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ค่าพีเอชต่างกัน.....	49
ข-6 ผลการวิเคราะห์ COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน.....	51
ข-7 ผลการวิเคราะห์สีในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน.....	52
ข-8 ผลการวิเคราะห์ COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ปริมาณเฟอร์รัสไอออนต่างกัน.....	54
ข-9 ผลการวิเคราะห์สีในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ปริมาณเฟอร์รัสไอออนต่างกัน.....	55
ง-1.1.1 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆในการบำบัด ค่า COD โดยวิธี One-way ANOVA.....	59
ง-1.1.2 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในการบำบัดสี โดยวิธี One-way ANOVA.....	60
ง-1.2.1 ผลของค่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ค่าพีเอชต่างๆ ในการบำบัด ค่า COD โดยวิธี One-way ANOVA.....	61
ง-1.2.2 ผลของค่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ค่าพีเอชต่างๆในการบำบัดสี โดยวิธี One-way ANOVA.....	62
ง-1.3.1 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ในการบำบัดค่า COD โดยวิธี One-way ANOVA.....	63

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-1.3.2 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในการบำบัดสี โดยวิธี One-way ANOVA.....	64
ง-1.4.1 ผลของปริมาณเหล็กไอออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ในการบำบัดค่า COD โดยวิธี One-way ANOVA.....	65
ง-1.4.2 ผลของปริมาณเหล็กไอออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ในการบำบัดค่าสีโดยวิธี One-way ANOVA.....	66

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของระบบพิมพ์เฟล็กโซกราฟี.....	3
2.2 ผลการทดลองที่สมมุติจาก One-Variable-At-A-Time ของการทดลองชุดที่ 1-5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และเวลาในเกิดโด (Dough) ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่กำหนด อุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส.....	9
2.3 ผลการทดลองที่สมมุติจาก One-Variable-At-A-Time ของการทดลองชุดที่ 6-10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาในเกิดโด (Dough) ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ กำหนดเวลาให้คงที่ที่ 120 นาที.....	10
4.1 ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา.....	16
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับความต้องการออกซิเจน ทางเคมีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	17
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเปอร์เซ็นต์การลดลงของ ค่า COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	17
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับความต้องการออกซิเจนทางเคมี ของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	19
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าCOD ในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	19
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า COD ของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	21
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ ความต้องการออกซิเจนทางเคมีในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	21
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กไอออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ ความต้องการออกซิเจนทางเคมีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	23
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กไอออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเปอร์เซ็นต์ การลดลงของค่า COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	23
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับความต้องการออกซิเจน ทางเคมีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	25
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเปอร์เซ็นต์การลดลงความเข้มข้น ในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	25
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับความต้องการออกซิเจนทางเคมี ของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	27
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเปอร์เซ็นต์การลดลงของ ความเข้มข้นในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	27
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เปอร์เซ็นต์การลดลงของความเข้มข้นของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	29

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ เปอร์เซ็นต์การลดลงของความเข้มข้นหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	29
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กไอออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ การกำจัดสีหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	31
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กไอออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ เปอร์เซ็นต์การลดลงของความเข้มข้นในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	31
ก-1 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐานสี.....	42

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์เป็นอุตสาหกรรมที่เริ่มมีการขยายตัวสูงขึ้น ทำให้มีการพัฒนาทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและการแข่งขันที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2554) หมึกพิมพ์จัดเป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ โดยหมึกพิมพ์ที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นหมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลาย (solvent – based link) ซึ่งมีการใช้ตัวทำละลายจำพวกสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) เป็นตัวพาให้หมึกหรือสารให้สีไปติดกับผลิตภัณฑ์ ข้อดีคือ ตัวทำละลายแห้งเร็วแต่อาจจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศได้ (นิตยาและคณะ, 2558) ด้วยเหตุนี้ องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environment Protection Agency, U.S. EPA) ร่วมกับอุตสาหกรรมการพิมพ์เฟล็กโซกราฟี (Flexography) จึงรณรงค์ให้ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำเป็นวัสดุทดแทน ซึ่งหมึกพิมพ์ประเภทนี้ไม่เพียงลดปัญหามลพิษทางอากาศจากสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) แต่ยังช่วยลดปัญหาต่อสุขภาพของมนุษย์ ข้อจำกัดของการใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำคือ การทำความสะอาดแท่นพิมพ์ด้วยน้ำ จะทำให้เกิดน้ำเสียที่มีหมึกพิมพ์ปนเปื้อนอยู่มากจากการล้างแท่นเครื่องพิมพ์ ซึ่งการปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรง อาจก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำได้ (ปิยะฉัตร, 2545) อีกทั้งส่วนให้สีของหมึกพิมพ์ฐานน้ำโดยทั่วไปจะเป็นสีย้อมชนิดเอโซ (Azo dye) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ถ้าไม่มีการบำบัดอย่างเหมาะสม ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ อนาคตของสีอาจไปดบังแสงอาทิตย์ทำให้เกิดปัญหาต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำได้ (อรชุดาและอนุรักษ์, 2550)

กระบวนการเพนตัน เป็นหนึ่งในวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก จัดเป็นกระบวนการออกซิเดชันในสภาวะที่เป็นกรด โดยตัวออกซิไดซ์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) กับเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ในสภาวะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ( $OH^\bullet$ , Hydroxyl radical) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ ทำให้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ วิธีการนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ นอกจากนี้ยังสามารถบำบัดสีในน้ำเสียซึ่งไม่สามารถบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีหรือกระบวนการทางกายภาพได้ (นาถและคณะ, 2555) งานวิจัยที่ผ่านมาของนิตยาและคณะ (2558) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเพนตันสามารถบำบัดสีและซีโอติในน้ำเสียจากการพิมพ์ด้วยระบบหมึกพิมพ์ฐานน้ำเฟล็กโซกราฟีได้ พร้อมทั้งประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงสถิติด้วยวิธีแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (Full factorial design) ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีและซีโอติในน้ำเสียจากการพิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ฐานน้ำ ซึ่งการออกแบบการทดลองดังกล่าวแม้จะสามารถทราบถึงอิทธิพลร่วมของแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษาก็ได้ แต่มีข้อจำกัดคือการเลือกระดับของตัวแปรที่ศึกษามีผลอย่างมากต่อสมการที่ใช้ทำนายสภาวะที่เหมาะสม ประกอบกับงานวิจัยของนิตยาและคณะ (2558) เลือกระดับของตัวแปรที่ศึกษาในช่วงแคบ ทำให้ไม่เห็นแนวโน้มของอิทธิพลหลักได้ชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอติของน้ำเสียจากโรงงานหมึกพิมพ์ฐานน้ำระบบเฟล็กโซกราฟีโดยใช้วิธีการทดลองแบบทีละปัจจัย (One Variable At A Time) ซึ่งความสัมพันธ์จะช่วยให้เห็นอิทธิพลของตัวแปรที่ศึกษาได้ชัดเจนขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียโดยใช้วิธีการทดลองแบบทีละปัจจัย (One Variable At A Time)

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. น้ำเสียที่ใช้ศึกษาคือ น้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ
2. ศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสีย ได้แก่ พีเอช (pH) สี (Color) และ ซีโอดี (COD)
3. ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

โดยใช้การทดลองแบบทีละปัจจัย ( One Variable At A Time)

ปัจจัยที่ศึกษาหรือตัวแปรต้น ได้แก่

- ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาแปรค่าที่ 20 , 30 , 40 , 50 , 60 , 120 และ 240 นาที
  - ค่าพีเอชของน้ำเสียแปรค่าที่ 2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 7 และ 8
  - ปริมาณของ  $H_2O_2$  แปรค่าที่ 17, 34, 68, 136, 340, 680, 1,020 และ 1,360 mg/L
  - ปริมาณของ  $Fe^{2+}$  แปรค่าที่ 500, 1,000, 2,000, 3,000, 4,000, 5,000 และ 5,400 mg/L
- ตัวแปรตาม ได้แก่ ซีโอดี (COD) และสี (Color)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

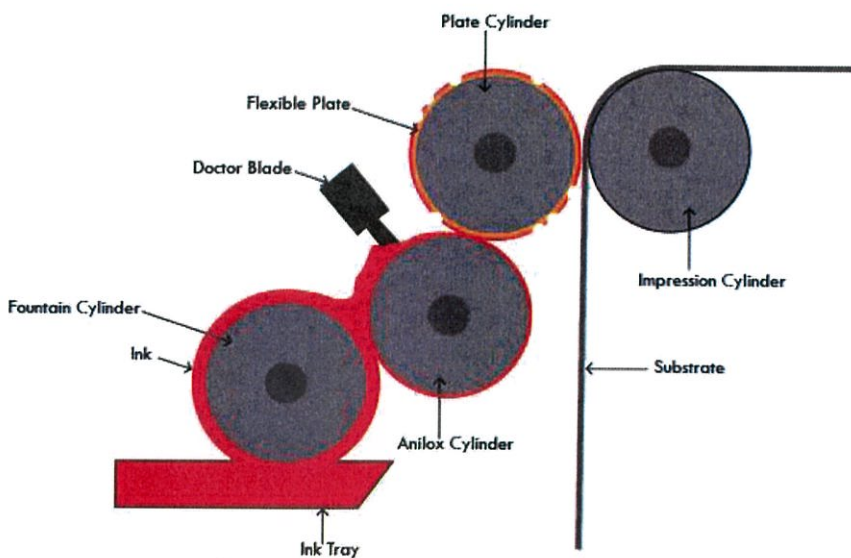
1. สามารถกำจัดหรือลดปริมาณสีและซีโอดีในน้ำเสียจากกระบวนการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ
2. เพื่อเป็นแนวทางในการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากกระบวนการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี

การพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี (Flexography Printing) เป็นการพิมพ์พื้นนูนบนวัสดุรองพิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ยางที่มีความยืดหยุ่น ขั้นตอนการพิมพ์นั้นจะถูกเชื่อมเข้ากับขั้นตอนการผลิตอื่นๆ โดยเริ่มจากการป้อนม้วนกระดาษ กระดาษแข็ง เซลโลโฟน หรือพลาสติกเข้าพิมพ์และขึ้นรูปจนได้กล่องกระดาษหรือพลาสติกในการป้อนครั้งเดียว ระบบการพิมพ์จะมีลูกกลิ้งยาง (Fountain Cylinder) จุ่มอยู่ในอ่างหมึก (Ink Tray) รูปที่ 2.1 ทำให้ลูกกลิ้งด้วยหมึกแบบต่างๆ (ink roll) ลูกกลิ้งดังกล่าวจะพาหมึกมาติดที่ลูกกลิ้งเหล็ก (anilox roll) ซึ่งจะถ่ายทอหมึกไปให้ลูกกลิ้งที่มีแม่พิมพ์ยางหุ้ม (Plate cylinder) จากนั้นแม่พิมพ์ยางจะถ่ายทอหมึกลงบนผิวของวัสดุรองพิมพ์ สิ่งพิมพ์ส่วนใหญ่มักเป็นสิ่งพิมพ์บรรจุภัณฑ์โดยวัสดุรองพิมพ์ (substrate) ได้แก่ กระดาษ พลาสติก แผ่นโลหะเปลว เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ลักษณะของระบบพิมพ์เฟล็กโซกราฟี

ที่มา : [http://tonchabubchanthaburi.blogspot.com/2014\\_10\\_01\\_archive.html](http://tonchabubchanthaburi.blogspot.com/2014_10_01_archive.html)

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 (ธีระและคณะ 2539)

## 2.2 หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ

หมึกพิมพ์ประเภทนี้เป็นหมึกพิมพ์ที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายหลัก โดยอาจมีตัวทำละลายพวก แอลกอฮอล์และไกลคอลผสมอยู่บ้างในปริมาณเล็กน้อย หมึกพิมพ์ชนิดนี้ใช้พิมพ์บนวัสดุรองพิมพ์ที่มีความสามารถในการดูดซึม เช่น กระดาษ กระดาษแข็ง กระดาษเหนียว/กระดาษคราฟท์ และ กระดาษลูกฟูก (ปิยะฉัตร, 2545) มีบางชนิดที่ใช้พิมพ์บนแผ่นอะลูมิเนียมเปลวและพลาสติก ข้อดีของหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ คือ ลดปัญหามลพิษทางอากาศ เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายที่ระเหยได้น้อยและราคาถูก การควบคุมความหนืดของหมึกพิมพ์บนเครื่องพิมพ์ยังทำได้ง่ายกว่าการใช้หมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลาย อีกทั้งหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำมีการแห้งตัวช้ากว่าหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานตัวทำละลาย การเปลี่ยนแปลงความหนืดของหมึกพิมพ์จึงมีน้อยกว่า นอกจากนี้ยังไม่เป็นอันตรายต่อลูกกลิ้งหมึกที่เป็นยางและแม่พิมพ์ทั้งชนิดที่เป็นยางและพอลิเมอร์รวมไปถึงความเป็นอันตรายต่อสวัสดิภาพของช่างพิมพ์ต่ำกว่าเนื่องจากน้ำเป็นสารไม่ติดไฟ ข้อเสียของหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำคือ น้ำเป็นตัวทำละลายที่มีแรงดึงผิวสูงกว่าหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานตัวทำละลาย ทำให้การเปียกผิววัสดุพิมพ์เพื่อให้เกิดการพิมพ์ติดทำได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพิมพ์บนวัสดุพิมพ์พวกพลาสติก นอกจากนี้เป็นหมึกพิมพ์ที่อัตราการระเหยต่ำ ในการทำให้แห้งจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าหมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลาย การใช้ความร้อนสูงเกินไปมีผลทำให้วัสดุที่ใช้พิมพ์เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ (ธีระและคณะ, 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% (ศุภณีและแววบุญ, 2557)

### 2.2.1 สารให้สี

สารให้สีในหมึกพิมพ์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ผงสี (pigment) และ สีย้อม (dye)

1) สีย้อม (Dye) เป็นสารให้สีประเภทที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายต่างๆ สีย้อมส่วนใหญ่เกิดการซีดจางได้ง่ายเมื่อได้รับแสงสว่างเป็นเวลานาน และเมื่อละลายในตัวทำละลายแล้วจะไม่กระเจิงแสง ดังนั้นจึงทำให้ได้สารละลายที่มีแต่สีใส

2) ผงสี (pigment) มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ เพียงแต่กระจายตัวอยู่ในตัวทำละลายเท่านั้น ทำให้หมึกที่มีผงสีมีสภาพเป็นสารแขวนลอย นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการกระเจิงแสง ทำให้หมึกพิมพ์ที่มีผงสีเป็นองค์ประกอบมีความทึบแสงมากกว่า อีกทั้งยังมีสภาพทนต่อแสง สีที่พิมพ์ด้วยหมึกประเภทนี้จึงซีดจางช้ากว่า อาจจำแนกออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภทตามองค์ประกอบทางเคมี คือ ผงสีอินทรีย์ และผงสีอนินทรีย์ (ธีระและคณะ, 2539)

### 2.2.2 ตัวพา

ตัวพาหลัก คือ ตัวทำละลายซึ่งในที่นี้คือ น้ำ และตัวยึดซึ่งในที่นี้คือ เรซิน

1) ตัวทำละลายมีสถานะเป็นของเหลว ทำหน้าที่ละลายเรซินและน้ำมันเพื่อผลิตเป็นวารินิขรวมทั้งละลายสารเติมแต่งต่างๆ ที่เติมเข้าไปในหมึก น้ำเป็นตัวทำละลายประเภทอนินทรีย์

เนื่องจากเป็นสารประกอบของธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนเท่านั้น น้ำบริสุทธิ์มีจุดเดือดที่ 100 องศาเซลเซียส ใช้เป็นตัวทำละลายในหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี เรซินที่ละลายได้ในน้ำได้แก่ เซลลูลอส อะคริลิก พอลิเอไมด์ เอสเทอร์ เป็นต้น

2) ตัวยึด (binder) ทำหน้าที่ยึดผงสีให้ติดแน่นอยู่บนวัสดุใช้พิมพ์ (ธีระละคณะ, 2539) นิยมใช้ซิลิโคนเรซินซึ่งละลายได้ในตัว มีข้อดีหลายประการ อาทิ ทนทานต่อการขัดถูและความร้อน ไม่เกิดฟอง พิมพ์ติดได้ดี ให้ความมันวาว แห้งตัวเร็ว อายุการใช้งานนาน การใช้งานของหมึกพิมพ์ฐานน้ำมักจะเกิดฟองมากเวลาผสม จึงต้องใช้สารต้านการก่อฟองเพื่อช่วยลดฟอง ตัวพาที่ใช้อะคริลิกเรซินจะมีความยืดหยุ่นมากขึ้นเมื่อผสมพอลิสไตรีน การใส่อะคริลิกเรซินมากเกินไป จะทำให้หมึกแห้งช้า ถ้าใส่น้อยไปผงสีจะกระจายตัวไม่ดี ไม่ทนต่อการขัดถูและไม่ทนน้ำ

### 2.2.3. สารเติมแต่ง

คือ สารที่เติมเพื่อปรับแต่งหรือเพิ่มสมบัติต่างๆ ที่ต้องการให้แก่หมึกพิมพ์ สารเติมแต่งต้องใส่ปริมาณน้อย มิฉะนั้นจะเกิดปัญหา เช่น การเกิดเป็นสบู่ ทำให้เกิดปัญหาในการพิมพ์ การเลือกใช้สารเติมแต่งต้องพิจารณาจากแรงเฉือนของแต่ละเครื่องพิมพ์และสมบัติของสิ่งพิมพ์ที่ต้องการ เช่น

- 1) สารเพิ่มเนื้อหมึก (extender) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต
- 2) สารกำจัดฟอง (defoamer) เช่น ซิลิโคน และน้ำมันแร่ซึ่งช่วยให้ฟองที่จมอยู่ใต้น้ำ ภาชนะ ด้านล่างลอยขึ้นมาบนผิวด้านบน และแตกออก
- 3) แวกซ์ ช่วยให้หมึกพิมพ์ทนทานต่อการขัดถู ทนน้ำหรือกันน้ำได้มีหลายแบบ ทั้งแว็กซ์แบบแข็งและแบบอ่อน ถ้าใช้แว็กซ์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะปกปิดผิวได้ดี ช่วยให้เงางาม
- 4) สารลดแรงตึงผิว (surfactant) คือ สารที่เติมลงไปในหมึกพิมพ์เพื่อลดแรงตึงผิว ทำให้หมึกพิมพ์เปียกและยึดติดกับวัสดุใช้พิมพ์ อาทิ กระดาษเคลือบผิวได้ดีขึ้น เพราะกระดาษเคลือบผิวจะมีพลังงานผิวต่ำ แต่ใช้ปริมาณน้อยในงานพิมพ์บนกล่องกระดาษลูกฟูกซึ่งมีรูพรุน จึงไม่จำเป็นต้องใช้ในปริมาณมาก หากใช้มากเกินไปจะทำให้เกิดฟองในหมึกพิมพ์
- 5) สารทำให้เปียก (wetting agent) และสารช่วยกระจายตัว (dispersing agent) เป็นสารพวกโคพอลิเมอร์ และพอร์เมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ช่วยให้เกิดการเปียกดีขึ้น ป้องกันไม่ให้อนุภาคผงสีจับกันเป็นก้อน ทำให้ผงสีกระจายตัวเป็นหมึก และอยู่ในสภาพที่เสถียร ช่วยปรับความหนืดให้เหมาะสม ทำให้ผงสีในหมึกพิมพ์ถ่ายโอนลงบนกระดาษได้ดีจึงทำให้พิมพ์ได้ดี (ศุภณีย์และแววบุญ 2557)

## 2.3 การบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

ปฏิกิริยาเฟนตันซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1894 โดย H.J.H Fenton การศึกษาเพิ่มเติมของ H.J.H Fenton ในระยะเวลาต่อมาได้แสดงให้เห็นว่าสารละลายผสมระหว่าง  $Fe^{2+}$  กับ  $H_2O_2$  มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ได้สูงแต่สมการกลไกการเกิดปฏิกิริยายังไม่มีความชัดเจนจนกระทั่งปี ค.ศ.1971 โดย Able (Flaherty และ Huang ,1992 อ้างถึงในวุฒิ,2540) ได้ถูกพิสูจน์และได้รับการยอมรับในเวลาต่อมา (Lipczynska-Kochany ,1994 อ้างถึงในวุฒิ,2540)

### 2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของปฏิกิริยาเฟนตัน

ปฏิกิริยาเฟนตันเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) กับเหล็กทั่วไปคือเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radical) ซึ่งมีค่าศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation Potential) สูง โดยสูงกว่าโอโซนและคลอรีนถึง 25 เฟอร์เซ็นต์และ 200 เฟอร์เซ็นต์ ตามลำดับและมีค่าสูงกว่าฟลูออรีน (Fluorine,  $\text{F}_2$ ) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ศักย์ออกซิเดชันของอนุมูลชนิดต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับสารออกซิเดชันที่เป็นโมเลกุลปกติ

Oxidant	Potential (volts)
$\text{F}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{F}^-$	2.87
$\text{HO}\bullet + \text{H}^+ + \text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$	2.33
$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	2.08
$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	2.07
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.77
$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Cl}^-$	1.39
$\text{ClO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cl}^- + 2\text{OH}^-$	0.9

ที่มา : Flaherty and Huang,1992 อ้างถึงในวุฒิ,2540

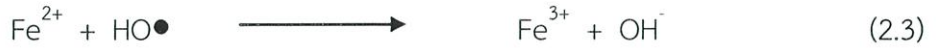
ความสามารถในการออกซิไดซ์ที่สูงของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่ได้จากสารเคมีเฟนตันทำให้สารเคมีเฟนตันถูกนำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียที่มีสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปนอยู่ เช่น ฟีนอล พอร์มัลดีไฮด์รวมไปถึงสารประกอบอะโรมาติกเบนซีน โทลูอิน ไซลีน และสารเคมีต่างๆ ที่ได้มาจากวัสดุที่ย่อยฆ่าแมลง สารกันบูด พลาสติก และยาง (วุฒิ,2540) โดยมีผลดังนี้ คือ ทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ (Organic pollutant destruction) ช่วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability improvement) ลดค่าบีโอดี (BOD) และซีโอดี (COD) กลิ่น และสี (Odor and color removal) (วุฒิ,2540)

### 2.3.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน

สารเคมีเฟนตันมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ดังสมการ



นอกจากปฏิกิริยาหลักดังแสดงในสมการ (2.1) ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาอื่นๆดังแสดงในสมการ (2.2) ถึง (2.6) (วุฒิ,2540) สมการจะไม่เกิดขึ้นทุกสมการแต่จะขึ้นอยู่กับปริมาณของ  $Fe^{2+}$  และ  $H_2O_2$  ในสถานะที่มี  $Fe^{2+}$  มากเกิน การเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการ (2.1) และ (2.3) ถ้าในสถานะที่มี  $H_2O_2$  มากเกินไป ในสถานะที่เป็นกรด การเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการ (2.1), (2.3) และ (2.4)



การทำปฏิกิริยาของสารเคมีเฟนตันกับสารประกอบอินทรีย์สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยกลไก 2 แบบ (วุฒิ,2540) คือ กลไกแบบลูกโซ่ (Chain) ตามสมการ (2.8) – (2.10) และกลไกแบบไม่โซ่ลูกโซ่ (Non-chain) ตามสมการ (2.11) และ (2.13)



ในกรณีที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชัน (Oxidized products) ที่ต้องการอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียก็คือ น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการ 2.14



### 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของสารเคมีเฟนตัน

1) ความเข้มข้นของเหล็ก อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้นได้น้อยมากถ้าหากในปฏิกิริยานั้นไม่มีไอออนเหล็ก เช่น การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปใต้น้ำเสียที่มีฟีนอลอยู่โดยที่ไม่มีไอออนเหล็กลงไป (สุกัญญา, 2558) แต่หากมีการเติมไอออนของเหล็กลงไปก็จะเร่งให้เกิดอนุมูลไฮดร

ออกซิเจนมากขึ้น จนที่ความเข้มข้นของเหล็กค่าหนึ่งปฏิกิริยาจะไม่เพิ่มขึ้น พงศกรและคณะ (2552) ได้สรุปไว้ว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ไอออนของเหล็กจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าภายในระยะเวลาที่เหมาะสมโดยไม่คำนึงถึงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ นั้นควรมีค่าระหว่าง 3 - 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สัดส่วนคงที่ของไอออนเหล็กต่อสารที่เข้าทำปฏิกิริยา (Substrate) เมื่ออยู่สูงกว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา คือ 1 ส่วนของไอออนเหล็กต่อ 10-50 ส่วนของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา (Substrate) ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ สารประกอบของเหล็กอิมตัวเป็นสมบัติของคีเลตซึ่งอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงไม่ควรแยกไอออนเหล็กออกไป เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล ทั้งนี้สัดส่วนโดยน้ำหนักของไอออนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ควรอยู่ในช่วง 1 ต่อ 5 - 25 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) (พงศกรและคณะ, 2552)

2) ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาในการเพิ่มประสิทธิภาพการสลายสารมลพิษ เมื่อปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การสลายสารมลพิษจะเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่หากปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีมากเกินไปส่วนที่เหลือจะไปรบกวนการวิเคราะห์ค่าซีโอดี ทำให้มากเกินไปจริงเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่อยู่ในแหล่งน้ำหากมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ (สุกัญญา, 2558)

3) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเฟนตันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 20 °C อย่างไรก็ตามพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 40 - 50 °C ประสิทธิภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะค่อยๆลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำด้วยเหตุนี้การประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาเฟนตันจึงมักจะใช้ที่อุณหภูมิระหว่าง 20 - 40 °C (พงศกรและคณะ, 2552)

4) พีเอช ผลของพีเอชต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีของน้ำทิ้งจากการย้อมผ้า พบว่าการกำจัดสีเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่พีเอชเป็นกรด การบำบัดน้ำเสียจากการย้อมผ้าพบว่าพีเอชที่บำบัดได้ดีที่สุดคือพีเอช 3 การบำบัดซีโอดีเกิดขึ้นได้ดีที่ พีเอช 3 เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง (อาทิตย์, 2557) หากพีเอชน้อยกว่า 3 ประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีจะไม่ดีเนื่องจากจะถูกรบกวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของเฟอรัสไอออนโดยปฏิกิริยาเฟอริกไอออน กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกยับยั้ง

5) เวลาในการเกิดปฏิกิริยา เวลาที่ต้องการทำให้เกิดปฏิกิริยาเฟนตันที่สมบูรณ์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรต่างๆที่ได้กล่าว 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 รูปแบบการทดลอง

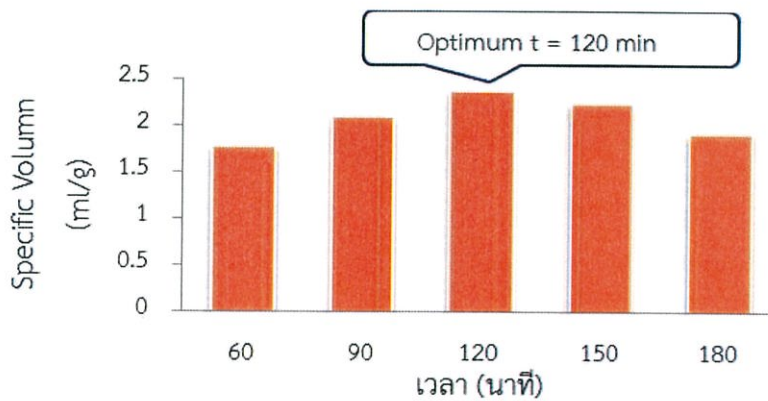
### 2.4.1 การทดลองแบบแบบทีละปัจจัย (One Variable At A Time)

การทดลองแบบทีละปัจจัยหรือที่เรียกว่า One-Variable-At-A-Time จัดเป็นรูปแบบการทดลองแบบดั้งเดิมที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการศึกษาผลของปัจจัยเพียง

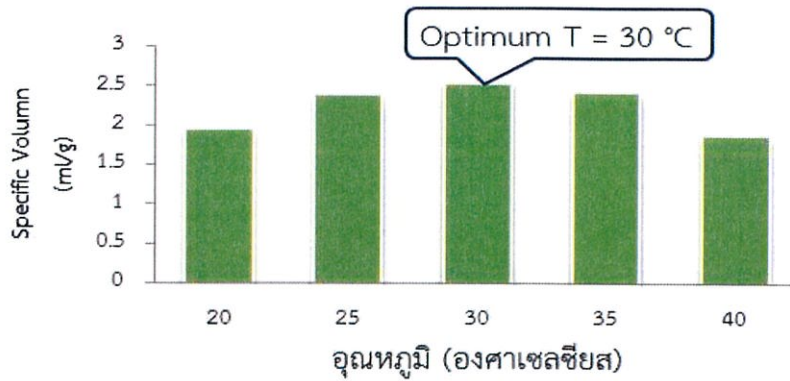
สภาวะหนึ่งเท่านั้นทำให้สามารถประมวลผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ในการทดลองจะทำการแปรผันระดับต่างๆ ของแต่ละปัจจัย/ตัวแปรอิสระที่ต้องการศึกษาจากนั้นวัดผลการตอบสนองหรือตัวแปรตามที่ได้รับอิทธิพลจากการแปรผันดังกล่าวพร้อมทั้งควบคุมให้ปัจจัย/ตัวแปรอิสระอื่นมีค่าคงที่รูปแบบการทดลองนี้สามารถยกตัวอย่างได้ดังเอกสารประกอบการสอนของนางเยาว์ (2554) ซึ่งแสดงวิธีการดำเนินการและผลที่ได้จากทดลองในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.2, 2.3

ตารางที่ 2.2 รูปแบบการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโด (Dough) ของขนมปังชนิดหนึ่ง

ลำดับ	เวลา (time; t)	อุณหภูมิ (temperature; T)
1	60	25
2	90	25
3	120	25
4	150	25
5	180	25
6	120	20
7	120	25
8	120	30
9	120	35
10	120	40



รูปที่ 2.2 ผลการทดลองที่สมมุติจาก One-Variable-At-A-Time ของการทดลองชุดที่ 1-5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และเวลาในเกิดโด (Dough) ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่กำหนดอุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส (นางเยาว์, 2554)



รูปที่ 2.3 ผลการทดลองที่สมมุติจาก One-Variable-At-A-Time ของการทดลองชุดที่ 6-10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาในเกิดโด (Dough) ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่กำหนดเวลาให้คงที่ที่ 120 นาที (นงเยาว์, 2554)

จากรูปที่ 2.13 และ 2.14 พบว่า ในการทดลองที่ละปัจจัยสถานะที่เหมาะสมในการเกิดโดในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ทำให้ค่า specific volume (ปริมาตรจำเพาะ) สูงที่สุด คือ อุณหภูมิ ที่ 30 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที แต่ถ้าเวลาในการเกิดโด หรือ อุณหภูมิ มีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่ทำให้การทดลองพร้อมกัน จะไม่สามารถทราบได้ว่าตัวแปรตามที่ศึกษาจะมีผลเป็นอย่างไร เนื่องจากการทดลองที่ละปัจจัยเป็นการทดลองที่ไม่ศึกษาผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่มีต่อตัวแปรตามหรือการตอบสนอง และเมื่อต้องการศึกษาปัจจัยที่มากกว่าหนึ่งปัจจัยจะต้องใช้ทรัพยากรในการวิเคราะห์เป็นจำนวนมากและใช้ระยะเวลานานในการทำการทดลองเพื่อให้ได้ค่าสถานะที่ดีที่สุดของกระบวนการครบทุกปัจจัยที่ศึกษาซึ่งอาจนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนจากการลองผิดลองถูกหรือเรียกว่า Trial & Error Method

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นิตยา (2558) ศึกษาการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันโดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงสถิติด้วยวิธีแฟลคทอเรียล (Full factorial design) ในการหาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากการพิมพ์หมึกพิมพ์ฐานน้ำเฟล็กโซกราฟี จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีพบว่า เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีเพิ่มขึ้นไปด้วยแต่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะสูงกว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ดังนั้น จึงเลือกใช้เวลาที่ 40 นาทีในการทำการทดลอง ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียของโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันพบว่า ปัจจัยที่ได้ในการศึกษามีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่สถานะต่างๆโดยสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์หมึกพิมพ์ฐานน้ำที่ได้จากแบบจำลองทางสถิติเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 100 เปอร์เซ็นต์ คืออัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อซีโอดีเท่ากับ 0.5 อัตราส่วนของเหล็กไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.1 ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงถึง 98.90 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียของโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันพบว่า ปัจจัยที่ได้ในการศึกษามี

ผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่สภาวะต่างๆโดยพบสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์หมึกพิมพ์ฐานน้ำที่ได้จากแบบจำลองทางสถิติเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 100 เปอร์เซ็นต์ คืออัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อซีโอดีเท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหล็กไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1.0 ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้สูงถึง 97.26 เปอร์เซ็นต์

**ปิยะฉัตร (2545)** ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ด้วยกระบวนการบำบัด 2 ขั้นตอน ได้แก่ การโคแอกกูเลชันเพื่อตกตะกอนผงสี ตามด้วยการดูดซับสีที่เหลืออยู่หลังการโคแอกกูเลชันด้วยกากของเสียจากโรงงานซูปโลหะ (กากโลหะไฮดรอกไซด์) จากการศึกษาเปรียบเทียบการตกตะกอนผงสีระหว่างโคแอกกูแลนต์ชนิดต่างๆ (เฟอร์ริซัลเฟตร่วมกับปูนขาว เฟอร์ริซัลเฟต โพสโบลูมินัมคลอไรด์ 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 สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดในห้องปฏิบัติการในถังขนาด 7 ลิตร และการบำบัดน้ำเสียในระบบบำบัดจริงของโรงพิมพ์ระบบ เฟล็กโซกราฟีนั้นให้ผลการทดลองไม่แตกต่างกัน โดยน้ำเสียสุดท้ายภายหลังผ่านการบำบัดทั้ง 2 ขั้นตอนมีค่า ความเข้มข้น พีเอช ของแข็งละลายน้ำ และปริมาณโลหะหนัก ( $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  และ  $Cr^{3+}$ ) ไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ ยกเว้นค่าซีโอดียังคงเกินมาตรฐานน้ำทิ้งอยู่เพียงเล็กน้อย

**วุฒิ (2552)** ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของสารเคมีเฟนตัน (ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ + เหล็ก) ในการกำจัดสีและสารอินทรีย์จากน้ำเสียจริงที่มีสีรีแอกทีฟจากโรงงานย้อมผ้าและด้ายฝ้าย การทดลองนี้มี 2 ขั้นตอน คือ การศึกษาการบำบัดน้ำเสียทางเคมี และการศึกษาการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ในการศึกษาการบำบัดน้ำเสียทางเคมี พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาค้นคว้า ได้แก่ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 ระดับ คือ 0 (ชุดควบคุม), 200, 500, 800, และ 1200 มก./ล., อัตราส่วนโดยโมล (R) ระหว่าง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็ก 3 ระดับ คือ  $R = 5;1$ ,  $R = 10;1$ ,  $R = 20;1$ , และเวลาสัมผัส 3 ระดับ คือ 60, 120, 180 นาที มีค่าซีโอดีประมาณ 600 มก./ล. เท่ากัน จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 200 มก./ล. ที่อัตราส่วน  $R = 5;1$  ในการบำบัดน้ำเสียโทนสีดำ, โทนสีแดง, โทนสีน้ำตาลอ่อน และที่อัตราส่วน  $R = 10;1$  ในการบำบัดน้ำเสียโทนสีม่วงจะสามารถกำจัดสีได้สูงกว่า 80% และพบว่าเวลา 1 ชั่วโมง เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ ปรากฏว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าไออาร์พีที่วัดได้อย่างเห็นได้ชัดเพื่อจะให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีถึง 80%

**โสธยา (2557)** งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการะบวนการย้อมสีแกรมโดยปฏิกิริยาเฟนตันในกระบวนการย้อมสีแกรมจะเกิดน้ำเสียจากการย้อมและล้างสีแกรม คุณลักษณะน้ำเสียที่ได้จากการะบวนการย้อมสีแกรม แบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ น้ำเสียเดี่ยว และน้ำเสียผสม ในกรณีน้ำเสียเดี่ยว ประกอบด้วย คริสตัลไวโอเลต ซาฟรานิน แกรมไอโอดีน และ แอลกอฮอล์

95% จากการทดลองพบว่าค่าซีโอดีของน้ำเสียเดี่ยวนี้อาจมีค่า 440.00 244.00 36.56 และ 1,864.52 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียผสม มีค่าซีโอดี 577.92 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเฟนตันคือ 15 นาที ที่ pH 3 ปริมาณการใช้งานที่เหมาะสมระหว่างเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$  1,000 mg/L) ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ , 35% w/w) ที่เหมาะสมต่อปริมาณน้ำเสียที่ถูกบำบัด คือ 2.5 : 2.5:50 มิลลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 70-80% น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่า ซีโอดี 81.67 32.00 10.97 449.69 และ 93.91 มิลลิกรัมต่อลิตร

สุเทพ (2553) ทำการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 0.92 กรัม/ลิตร ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6.38 กรัม/ลิตร ที่ค่า pH 3.40 และระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา คือ 150 นาทีที่สภาวะดังกล่าว ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 97.85 52.83 และ 79.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับสำหรับการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนพบว่า เมื่อใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต เป็นสารสร้างตะกอน 2.56 กรัม/ลิตร ที่ค่า pH 7.20 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นสี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 94.02 76.28 และ 42.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่โพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 4.00 กรัม/ลิตร ที่ค่า pH 7.40 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 96.12 86.75 และ 54.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Ertugay และคณะ (2013) ศึกษาการกำจัดซีโอดีและสีจากสีย้อม Blue 71 azo ด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยศึกษาผลของพีเอช ปริมาณ  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ความเข้มข้นของสีย้อม และอุณหภูมิในการกำจัดสีและซีโอดี พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสี และซีโอดีของน้ำเสียที่มีความเข้มข้น  $100 \text{ mg.L}^{-1}$  ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ที่ค่า พีเอชเป็น 3 ปริมาณ  $\text{Fe}^{2+} = 3 \text{ mg.L}^{-1}$  ปริมาณ  $\text{H}_2\text{O}_2 = 125 \text{ mg.L}^{-1}$  สามารถกำจัดสีและซีโอดีได้ 94% และ 50.7% ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า พีเอช ปริมาณของ  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{H}_2\text{O}_2$  การเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ 20 – 30 °C ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีอีกด้วย

Ipek และคณะ (2006) ศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเฟนตัน ( $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{Fe}^{2+}$ ) ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสีย้อมพรม จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 5.5 กรัม/ลิตร ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 385 กรัม/ลิตร ที่ค่า pH 3 และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา คือ 50 องศาเซลเซียส ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี เท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์

## 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  $\mu\text{m}$
9. เครื่องแก้วต่างๆ

#### 3.1.2. สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) บริษัท Carlo Erba, UK
2. โพแทสเซียมคลอโรแพลตตินेट ( $\text{K}_2\text{PtCl}_6$ ) บริษัท Altima จำกัด
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Mallinckrodt) ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Chemical
5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 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

น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นน้ำเสียที่ได้รับความอนุเคราะห์ในการเก็บจากบริษัท สยามโปรครีเอชันเซ็นเตอร์ซึ่งเป็นโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ จากนั้นนำน้ำเสียที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติของน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

### ตารางที่ 3.1 สมบัติของน้ำเสียที่ศึกษา

สมบัติที่วิเคราะห์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
สี (color)	American Dye Manufacturers Institute (2120E) (APHA, 1992 อ้างถึงในเจตนิพิฐ และคณะ, 2552 )
ซีโอดี (COD)	Closed Reflux, Titrimetric Method (5220C) (สมาคม วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2540)

## 3.3 การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย

### 3.3.1 ศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสม

ตวงน้ำเสียตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างให้มีค่าเท่ากับ 4 ด้วย 5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต กำหนดความเข้มข้นเท่ากับ 5,400 mg/L และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กำหนดความเข้มข้นเท่ากับ 1,360 mg/L นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการปรับพีเอชน้ำเสียตัวอย่าง ให้เท่ากับ 8 ด้วย 5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยา จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง นำส่วนใสไปวัดสีและซีโอดี ทำการทดลองข้างต้นซ้ำโดยแปรค่าระยะเวลาในการเขย่า จาก 20 นาที เป็น 30, 40, 50, 60, 120 และ 240 นาที ตามลำดับ

### 3.3.2 ศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

ตวงน้ำเสียตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปปรับพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 2 ด้วย 5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ 1 โมลาร์ กรดซัลฟิวริก เติมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต กำหนดความเข้มข้นเท่ากับ 5,400 mg/L และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กำหนดความเข้มข้นเท่ากับ 1,360 mg/L นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.3.1 เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการปรับพีเอชน้ำเสียตัวอย่าง ให้เท่ากับ 8 ด้วย 5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยา จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง นำส่วนใสไปวัดสีและซีโอดี ทำการทดลองข้างต้นซ้ำโดยแปรค่าพีเอชที่ศึกษาจาก 2 เป็น 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ตามลำดับ

### 3.3.3 ศึกษาหาปริมาณ $H_2O_2$ ที่เหมาะสม

ตวงน้ำเสียตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปปรับพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าที่เหมาะสมตามการทดลองในหัวข้อ 3.3.2 เติมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต กำหนดความเข้มข้นเท่ากับ 5,400 mg/L และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กำหนดความเข้มข้นเท่ากับ 17 mg/L นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.3.1 เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการปรับพีเอชน้ำเสียตัวอย่าง ให้เท่ากับ 8 ด้วย 5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยา จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง นำส่วนใสไปวัดสีและซีโอดี ทำการทดลองข้างต้นซ้ำโดยแปรค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 34, 68, 136, 340, 680, 1,020 และ 1,360 mg/L ตามลำดับ

### 3.3.4 ศึกษาหาปริมาณ $Fe^{2+}$ ที่เหมาะสม

ตวงน้ำเสียตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปปรับพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าที่เหมาะสมตามการทดลองในหัวข้อ 3.3.2 เติมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต กำหนดความเข้มข้นเท่ากับ 500 mg/L และเติม  $H_2O_2$  ในปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.3 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.3.1 เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการปรับพีเอชน้ำเสียตัวอย่าง ให้เท่ากับ 8 ด้วย 5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยา จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง นำส่วนใสไปวัดสีและซีไอดี ทำการทดลองข้างต้นซ้ำแปรค่าค่าความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 1,000, 2,000, 3,000, 4,000, 5,000 และ 5,400 mg/L ตามลำดับ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและซีโอติในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบฟลิกโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ค่าพีเอช ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน สามารถอธิบายผลได้ดังนี้

#### 4.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบฟลิกโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำ

น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นน้ำเสียจากบริษัทสยามโปรครีเอชันเซ็นเตอร์ ซึ่งเป็นโรงพิมพ์ระบบฟลิกโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ เป็นน้ำเสียที่ได้มาจากขั้นตอนการล้างเครื่องพิมพ์ ซึ่งสีที่ใช้ในการพิมพ์ ณ วันที่เก็บตัวอย่างเป็นสีแดงทำให้น้ำเสียที่ได้รับมามีสีแดงเข้มปนส้ม แสดงดังรูปที่ 4.1



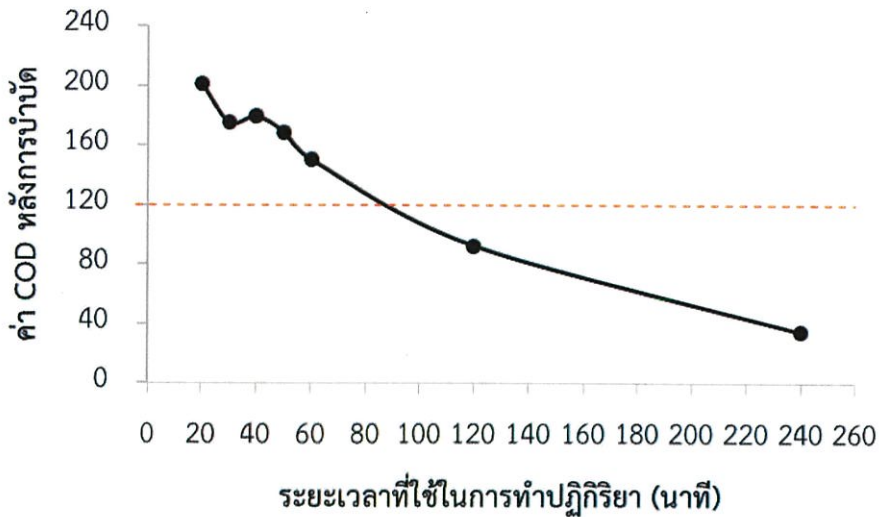
รูปที่ 4.1 ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา

ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียตัวอย่างใช้ในการศึกษา พบว่ามีค่าพีเอชเท่ากับ 7.60 มีความเข้มข้นของสี 117 ADMI และมีค่าซีโอติเท่ากับ 1,294 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2 ผลของการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน

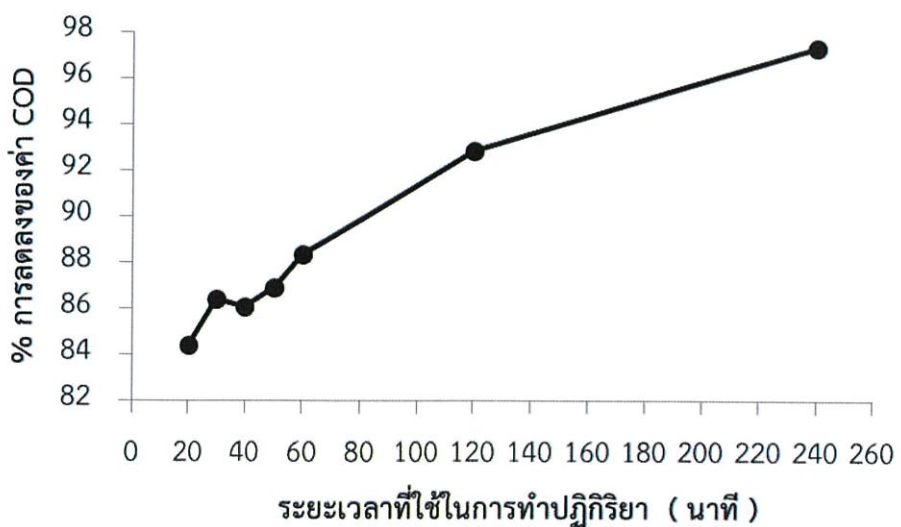
4.2.1 ศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

เมื่อนำน้ำเสีย ปริมาตร 50 mL มาบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้  $H_2O_2$  เข้มข้น 1,360mg/L และ  $Fe^{2+}$  เข้มข้น 5,400 mg/L แปรค่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 20 เป็น 30, 40, 50, 60, 120 และ 240 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับความต้องการออกซิเจนทางเคมีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

หมายเหตุ เส้นประสีแดง แสดงค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งตามประกาศของกรมโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการกำจัด COD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อใช้เวลานานขึ้น โอกาสที่สารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยามีน้อยลง ส่งผลให้เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอและซีไอดีเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ebrahiem *et al.*(2013) ที่ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยการใช้แสงร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตันพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานานขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากการทดลองเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที สามารถบำบัด COD เริ่มต้นจาก 1,294 mg/L เหลือ  $200.92 \pm 45.22$  mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัด COD เท่ากับ 84.42 % เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 20 นาทีเป็น 30, 40, 50, 60, 120 และ 240 นาที พบว่า COD มีค่าลดลงเหลือ  $161.16 \pm 16.55$ ,  $141.90 \pm 33.44$ ,  $139.22 \pm 4.64$ ,  $120.48 \pm 28.96$ ,  $90.12 \pm 4.59$  และ  $34.46 \pm 39.23$  mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัด COD เท่ากับ 86.42, 86.11, 86.93, 88.36 และ 97.33% ตามลำดับ โดยที่เวลา 120 นาทีเป็นต้นไป สามารถบำบัด COD ในน้ำเสียให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งตามประกาศของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อน โดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อความเข้มข้น COD

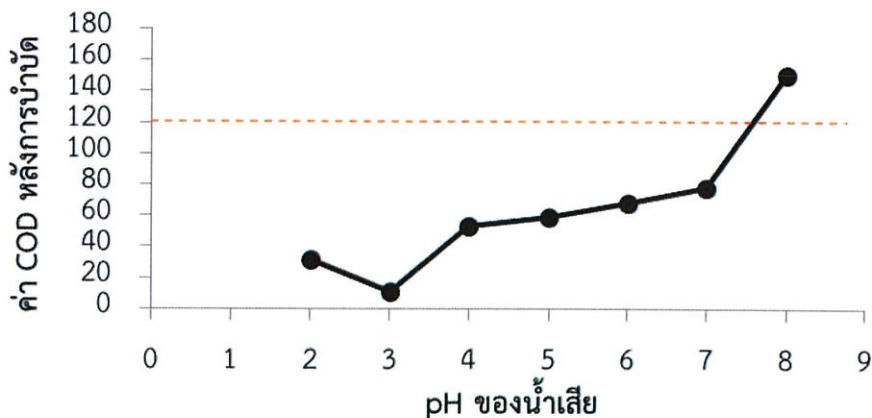
ระยะเวลา (นาที)	ระดับ N	COD ในน้ำเสียหลังการบำบัด
20	3	$200.92 \pm 45.22^a$
30	3	$161.16 \pm 16.55^{ab}$
40	3	$141.90 \pm 33.44^b$
50	3	$139.22 \pm 4.64^{bc}$
60	3	$120.48 \pm 28.96^{bc}$
120	3	$90.12 \pm 4.59^c$
240	3	$34.46 \pm 39.23^d$

**หมายเหตุ** ตัวอักษรเดียวกันแสดงถึงการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 4.1 พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อความสามารถในการบำบัดค่าซีไอดีโดยใช้กระบวนการเฟนตัน โดยพบว่าที่เวลา 120 นาทีจะสามารถบำบัดค่า COD เหลือ  $90.12 \pm 4.59$  mg/L ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม แต่เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติจะพบว่าค่า COD ในน้ำทิ้งผ่านการบำบัดโดยใช้เวลาที่ 120 นาทีไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับค่า COD ในน้ำทิ้งผ่านการบำบัดโดยใช้เวลา 50 และ 60 นาที ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า 240 นาที

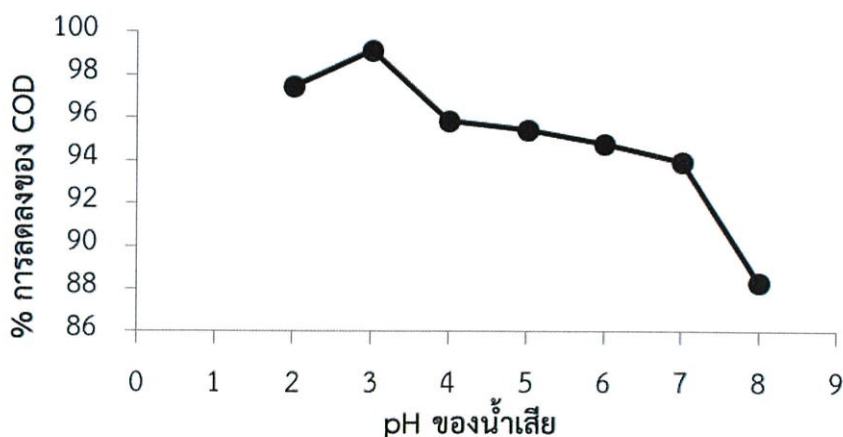
#### 4.2.2 ศึกษาหาค่าพีเอชที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

เมื่อนำน้ำเสีย ปริมาตร 50 mL มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 7 และ 8 ไปบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้  $\text{H}_2\text{O}_2$  เข้มข้น 1,360mg/L และ  $\text{Fe}^{2+}$  เข้มข้น 5,400 mg/L และมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาคงที่ที่ 240 นาที ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับความต้องการออกซิเจนทางเคมีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

หมายเหตุ เส้นประสีแดง แสดงค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งตามประกาศของกรมโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่า เมื่อเพิ่มค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัด COD มีแนวโน้มลดลง เมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 3 สามารถบำบัด COD เริ่มต้นจาก 1,294 mg/L เหลือ  $10.72 \pm 0.02$  mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 99.17 % เมื่อเพิ่มค่าพีเอชจาก 3 เป็น 4, 5, 6, 7 และ 8 พบว่า COD มีค่าลดลงเหลือ  $53.38 \pm 0.08$  ,  $58.72 \pm 21.17$  ,  $67.69 \pm 16.25$  ,  $78.10 \pm 9.01$  และ  $150.94 \pm 44.15$  mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัด COD เท่ากับ 95.88, 95.46, 94.77, 93.98 และ 88.34% โดยประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชของน้ำเสียอยู่ในช่วงกรด โดยที่พีเอชเท่ากับ 3 สามารถบำบัดค่าซีโอดีได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.72 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพ

การบำบัด 99.17% การที่ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอติมีแนวโน้มลดลงเมื่อ pH มากกว่า 3 เนื่องจากที่ pH มากกว่า 3 เพอร์สไอออน ( $Fe^{2+}$ ) มีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยาและเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอื่นต่อไปและสำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นจะมีเสถียรภาพลดลงเช่นกัน เมื่อ pH สูงขึ้นจะสลายเป็นออกซิเจนและน้ำได้ง่าย ดังนั้นเมื่อ pH สูงกว่า 3 โอกาสที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับเพอร์สไอออนเพื่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งเป็นตัวการสำคัญในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียจึงน้อยลง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของนิตยาและคณะ (2558) และงานวิจัยของ Ipek et al. (2006) ที่พบว่าการกำจัดค่าซีโอติเกิดขึ้นได้ดีในช่วงพีเอชที่เป็นกรด

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลของค่าพีเอชต่อความเข้มข้น COD

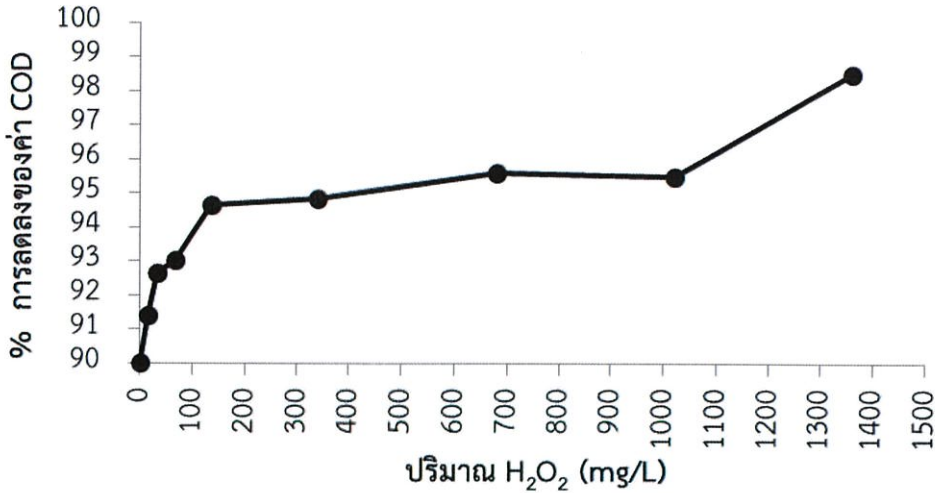
pH	ระดับ N	COD ในน้ำเสียหลังการบำบัด
8	2	150.94 ± 44.15 <sup>a</sup>
7	3	78.10 ± 9.01 <sup>b</sup>
6	3	67.69 ± 16.25 <sup>b</sup>
5	3	58.72 ± 21.17 <sup>bc</sup>
4	3	53.38 ± 0.08 <sup>bc</sup>
2	3	32.05 ± 36.95 <sup>bcd</sup>
3	3	10.72 ± 0.02 <sup>cd</sup>

**หมายเหตุ** ตัวอักษรเดียวกันแสดงถึงการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

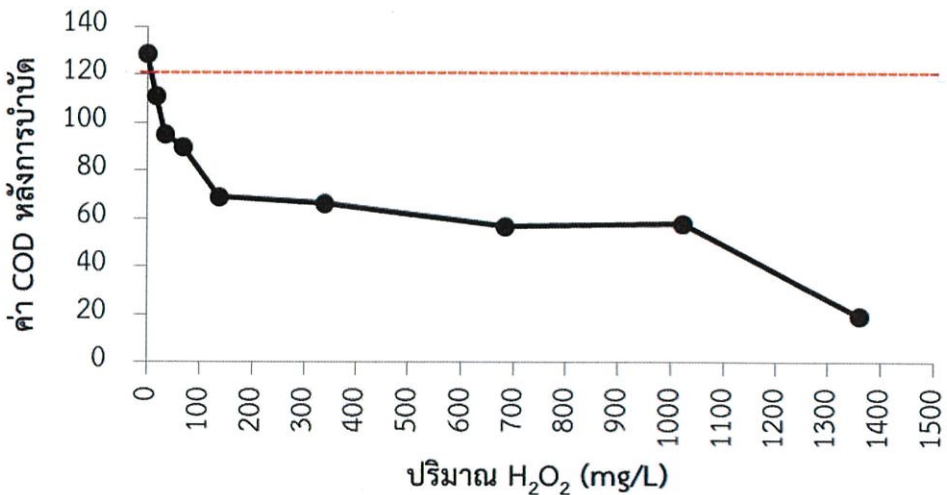
จากตารางที่ 4.2 พบว่า ค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการบำบัดซีโอติด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยพบว่าค่าซีโอติในน้ำหลังการบำบัดจะเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชโดยค่าซีโอติในน้ำทิ้งที่ค่าพีเอช 2 – 7 มีค่าซีโอติต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม นอกจากนี้พบว่าค่าซีโอติในน้ำทิ้งหลังการบำบัดที่พีเอชดังกล่าวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับในการศึกษาครั้งนี้พิจารณาที่ค่าพีเอชที่ทำให้สามารถลดค่าซีโอติจากค่าเริ่มต้นได้มากที่สุดและจากการศึกษาข้างต้น ค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 3 ถูกเลือกเพื่อนำมาใช้เป็นพีเอชของน้ำเสียคงที่ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดค่าซีโอติในน้ำเสียในการทดลองต่อไป

#### 4.2.3 ศึกษาหาปริมาณ $H_2O_2$ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

เมื่อนำน้ำเสีย ปริมาตร 50 mL มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 3 ไปบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยการเติม  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้น 17, 34, 68, 136, 340, 680, 1020 และ 1,360 mg/L มีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาครั้งที่ 240 นาที ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัด COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน



รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับค่าซีโอดีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

**หมายเหตุ** เส้นประสีแดง แสดงค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งตามประกาศของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

จากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยปริมาณ  $H_2O_2$  ทำให้การกำจัดค่าซีโอดีสูงสุดคือปริมาณ 1,360 mg/L เมื่อทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณดังกล่าวลงในน้ำเสียที่มีเฟอรัสไอออนจะสามารถกำจัด COD ได้สูงถึง 98.5% น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีโอดีเท่ากับ 19.42 mg/L (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7) เมื่อทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณลดลงจาก 1,360 mg/L เหลือ 1,020, 680, 340, 136, 68, 34, 17 mg/L จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD จะลดลงตาม

ปริมาณ  $H_2O_2$  (รูปที่ 4.7) ส่งผลให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีซีโอติสูงขึ้น(รูปที่ 4.7) ทั้งนี้เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ  $H_2O_2$  กับการก่อให้เกิดอนุภาคลิสรสไฮดรอกซิลที่จะใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ การเติมปริมาณ  $H_2O_2$  ในปริมาณมากขึ้นจะทำให้อนุภาคลิสรสไฮดรอกซิลมากขึ้นเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอติจึงมีค่าสูงขึ้นไปด้วย ในส่วนชุดควบคุมซึ่งไม่มีการเติม  $H_2O_2$  แต่ยังคงมีการกำจัดซีโอติซึ่งมีค่า COD เท่ากับ 129.6 mg/L เป็นเพราะว่า  $Fe^{2+}$  ที่เติมลงไปนั้นเกิดปฏิกิริยาโคแอกกูเลชัน โดยจะจับตัวกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆและเกิดการตกตะกอนได้ดีที่สุด

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons ได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่า COD

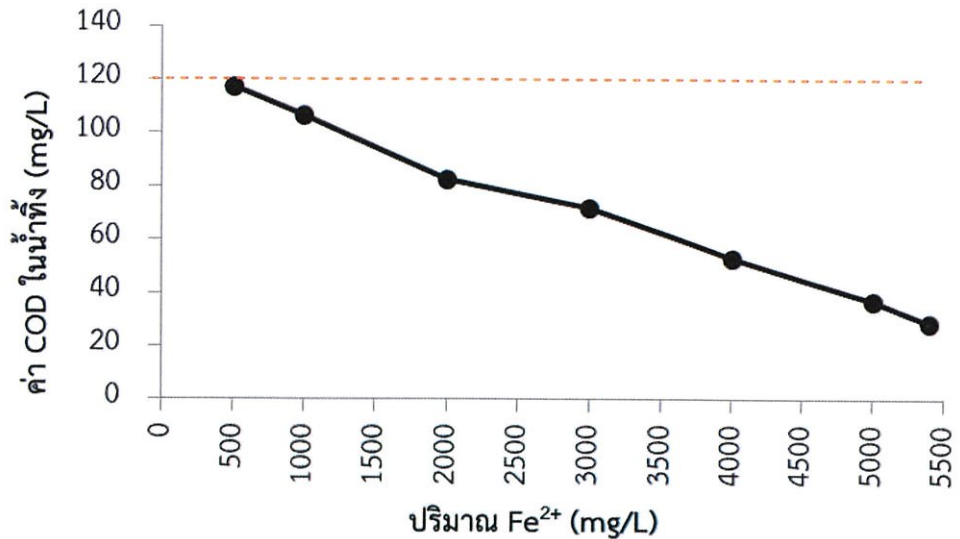
ปริมาณ $H_2O_2$	ระดับ N	ค่า COD ในน้ำเสียหลังการบำบัด
17	3	$111.16 \pm 24.24^a$
34	3	$95.30 \pm 24.27^{ab}$
68	3	$89.99 \pm 0.0^{abc}$
136	3	$69.34 \pm 22.01^{bc}$
340	3	$66.57 \pm 24.02^{bc}$
680	3	$56.86 \pm 12.71^c$
1020	3	$58.25 \pm 17.65^c$
1360	3	$19.42 \pm 0.0^d$

**หมายเหตุ** ตัวอักษรเดียวกันแสดงถึงการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่า COD ในน้ำทิ้งหลังการบำบัดโดยใช้ปริมาณ  $H_2O_2$  เท่ากับ 1,360 mg/L มีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเทียบกับ COD ในน้ำทิ้งที่บำบัดโดยใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระหว่าง 17 – 1,020 mg/L ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1360 mg/L สำหรับการศึกษาในการทดลองต่อไป

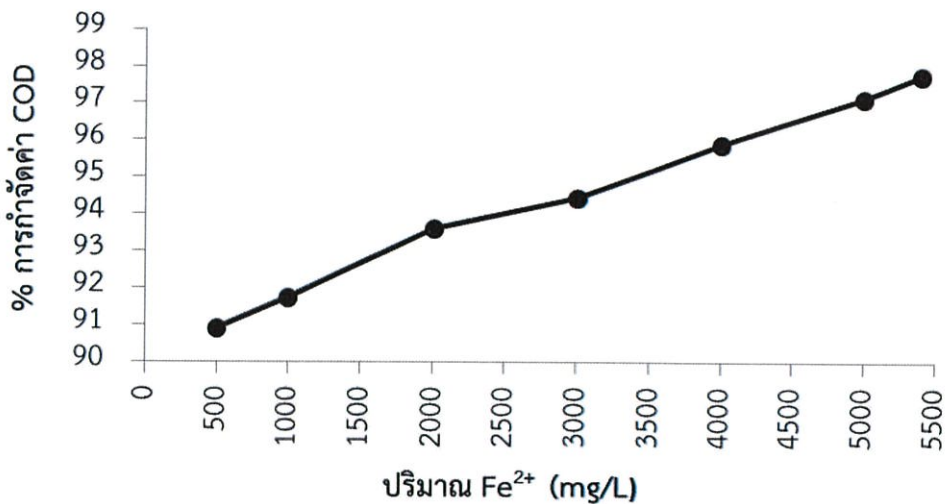
#### 4.2.4 ปริมาณ $Fe^{2+}$ ที่ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

เมื่อนำน้ำเสีย ปริมาตร 50 mL มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 3 ไปบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยการเติม  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้น 1,360 mg/L และเติม  $Fe^{2+}$  ความเข้มข้น 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 และ 5,400 mg/L มีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาครั้งที่ 240 นาที ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากกระบวนการเฟนตัน

หมายเหตุ เส้นประสีแดง แสดงค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งตามประกาศของกรมโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กไอออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

จากรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 จะพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เติมลงในน้ำเสียโดยสามารถบำบัด COD เริ่มต้นจาก 1,294 mg/L เหลือ 117.50 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด COD 90.02 % เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กไอออนในการทำปฏิกิริยาจาก 500 mg/L เป็น 1,000, 2,000, 3,000, 4,000, 5,000 และ 5,400 mg/L พบว่าค่า COD มีค่าลดลงเหลือ  $106.77 \pm 20.25$ ,  $82.63 \pm 12.29$ ,  $71.90 \pm 9.29$ ,  $53.12 \pm 1.35$ ,  $37.02 \pm 8.05$  และ  $28.97 \pm 1.26$  mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 90.9%, 91.8%, 93.6%, 94.4%, 95.9%, 97.8% และ 97.8% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเติมปริมาณเฟอร์รัสไอออนมากขึ้นจะช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลดังสมการ



นอกจากนี้  $\text{Fe}^{3+}$  ก็สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดอนุมูลของเปอร์ไฮดรอกซิล ( $\text{HO}_2\bullet$ ) ดังสมการ 4.2 ซึ่งแม้จะมีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่ต่ำกว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล แต่สามารถทำให้เกิดการสลายของสารอินทรีย์ได้



ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อน โดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons ได้ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบทางสถิติผลของปริมาณเฟอร์รัสไอออนต่อซีโอดีของน้ำทิ้ง

ปริมาณ $\text{Fe}^{2+}$	ระดับ N	ค่า COD ในน้ำเสียหลังการบำบัด
500	3	117.50 ± 0.0 <sup>a</sup>
1,000	3	106.77 ± 20.25 <sup>a</sup>
2,000	3	82.63 ± 12.29 <sup>b</sup>
3,000	3	71.90 ± 9.29 <sup>b</sup>
4,000	3	53.12 ± 1.35 <sup>c</sup>
5,000	3	37.02 ± 8.05 <sup>c</sup>
5,400	3	28.97 ± 1.26 <sup>d</sup>

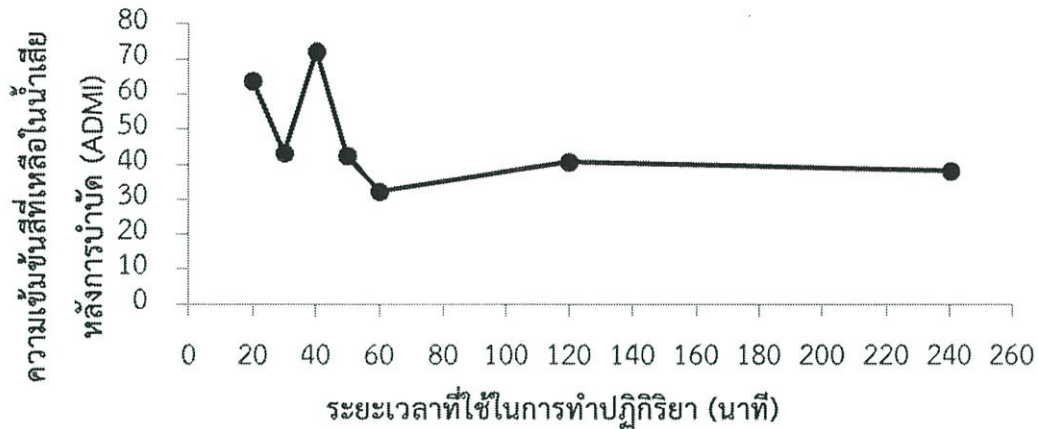
**หมายเหตุ** ตัวอักษรเดียวกันแสดงถึงการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 4.4 พบว่าซีโอดีในน้ำทิ้งที่บำบัดโดยใช้ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 5,400 mg/L มีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับซีโอดีในน้ำทิ้งที่บำบัดโดยใช้ปริมาณเฟอร์รัสไอออนในปริมาณอื่นๆ ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ปริมาณเหล็กไอออนเท่ากับ 5400 mg/L สำหรับการศึกษาในการทดลองต่อไป

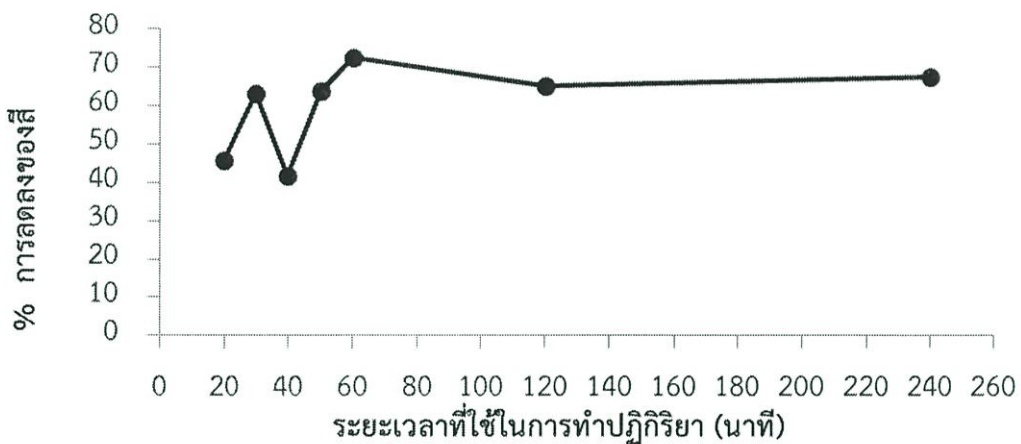
### 4.3 ผลของการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน

#### 4.3.1 ศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

เมื่อนำน้ำเสีย ปริมาตร 50 mL มาบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้  $\text{H}_2\text{O}_2$  เข้มข้น 1,360 mg/L และ  $\text{Fe}^{2+}$  เข้มข้น 5,400 mg/L แปรค่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 20 เป็น 30, 40, 50, 60, 120 และ 240 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นสีของน้ำเสีย หลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเปอร์เซ็นต์การลดลงของความเข้มข้นสีในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

จากรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการกำจัดความเข้มข้นสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาทีสามารถบำบัดค่าความเข้มข้นสี เริ่มต้นจาก 117 ADMI เหลือ  $64.018 \pm 38.23$  ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดความเข้มข้นสีเท่ากับ 45.65% เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 20 นาทีเป็น 30, 40, 50, 60, 120 และ 240 นาที พบว่าความเข้มข้นสีในน้ำเสียหลังการบำบัด มีค่าลดลงเหลือ

43.17±9.71, 72.204±54.77, 42.716±14.52 , 32.174±0.48, 40.95±42.03 และ 38.28±19.09 ADMI ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดความเข้มข้น เท่ากับ 63.35, 41.723, 63.74, 72.69, 65.24 และ 67.502% ตามลำดับ โดยที่เวลา 60 นาทีสามารถบำบัดความเข้มข้นในน้ำเสียมีค่าน้อยที่สุด โดยสามารถบำบัดความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 117 ADMI เหลือ 32.84 ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดความเข้มข้นเท่ากับ 72.69 %

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อน โดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อความเข้มข้น

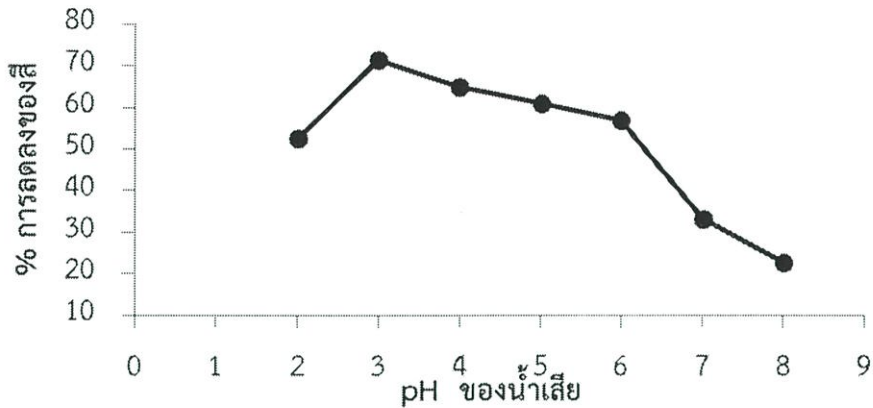
ระยะเวลา (นาที)	ระดับ N	ความเข้มข้นในน้ำเสียหลังการบำบัด
20	3	64.018 ± 38.23 <sup>a</sup>
30	3	43.172 ± 9.71 <sup>ab</sup>
40	3	72.204 ± 54.77 <sup>ab</sup>
50	3	42.716 ± 14.52 <sup>ab</sup>
60	3	32.174 ± 0.48 <sup>ab</sup>
120	3	40.95 ± 42.03 <sup>ab</sup>
240	3	38.28 ± 19.09 <sup>b</sup>

**หมายเหตุ** ตัวอักษรเดียวกันแสดงถึงการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

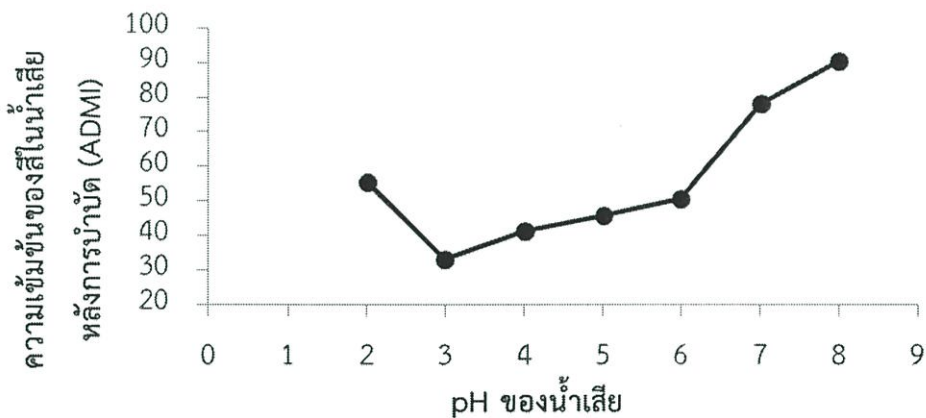
จากตารางที่ 4.5 พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อความสามารถในการบำบัดค่าสีในน้ำเสียโดยใช้กระบวนการเฟนตัน ถึงแม้ว่าที่เวลา 60 นาทีจะสามารถบำบัดสีได้ดีที่สุดแต่ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่เวลา 60 นาทีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับที่เวลา 240, 120, 50, 30, 20 นาที โดยที่ตามเกณฑ์มาตรฐานโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้ว่าน้ำทิ้งจะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้จะต้องมีสีไม่เป็นที่พึงรังเกียจ จึงได้เลือกใช้ระยะเวลาที่ 240 นาที สำหรับการศึกษในการทดลองต่อไป เนื่องจากพิจารณาที่เวลา 240 นาทีสามารถลดค่า COD ได้มีประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถกำจัดความเข้มข้นได้อีกด้วย

#### 4.3.2 ศึกษาหาค่าพีเอชที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

เมื่อนำน้ำเสีย ปริมาตร 50 mL มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 7 และ 8 ไปบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้  $\text{H}_2\text{O}_2$  เข้มข้น 1,360 mg/L และ  $\text{Fe}^{2+}$  เข้มข้น 5,400 mg/L และมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาคงที่ที่ 240 นาที ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13



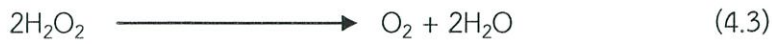
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเปอร์เซ็นต์การลดลงของความเข้มข้นในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับความเข้มข้นของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

เมื่อศึกษาผลของพีเอชต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันพบว่า การปรับค่าพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างให้อยู่ในสถานะที่มีค่าพีเอชสูงขึ้นจาก 2 เป็น 8 จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันมีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 4.12) ซึ่งค่าพีเอชทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีมีค่าสูงสุดคือ ค่าพีเอชเท่ากับ 3 ที่พีเอชดังกล่าวค่าสีในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าเท่ากับ  $33.28 \pm 0.28$  ADMI (รูปที่ 4.13) คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 71.6 % เมื่อทำการปรับค่าพีเอชในน้ำเสียให้มีค่าสูงขึ้นเป็น 4, 5, 6, 7 และ 8 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลงเหลือ 64.8%, 60.9%, 56.8%, 33.1% และ 22.6% ตามลำดับ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าในสถานะที่เป็นเบส การเกิดอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลจะมีปริมาณลดลง

เนื่องจาก  $\text{H}_2\text{O}_2$  เกิดการสลายตัวให้โมเลกุลของออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) และน้ำดังสมการที่ 4.1 (อาทิตย์ และ สิริรินาถ, 2557) ประกอบกับแก๊สออกซิเจนมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ที่ต่ำกว่าอนุมูลอิสระ ไฮดรอกซิลจึงให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ต่ำกว่า



ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อน โดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons ได้ผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลของค่าพีเอชต่อความเข้มสี

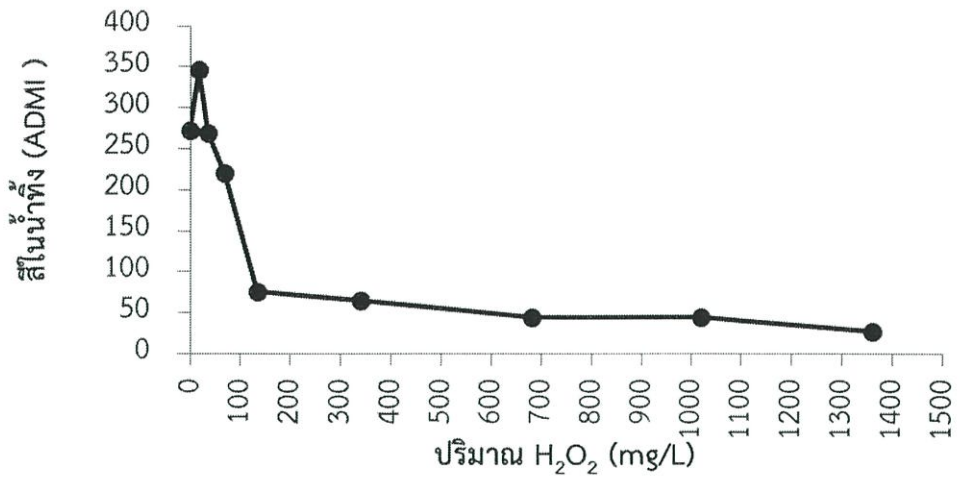
pH	ระดับ N	ความเข้มสีในน้ำเสียหลังการบำบัด
2	3	$55.55 \pm 22.14^{ab}$
3	3	$33.28 \pm 0.28^c$
4	3	$41.16 \pm 24.32^{bc}$
5	3	$45.73 \pm 22.74^{bc}$
6	3	$50.51 \pm 30.29^{bc}$
7	3	$78.31 \pm 29.41^{ab}$
8	2	$90.53 \pm 10.03^a$

**หมายเหตุ** ตัวอักษรเดียวกันแสดงถึงการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

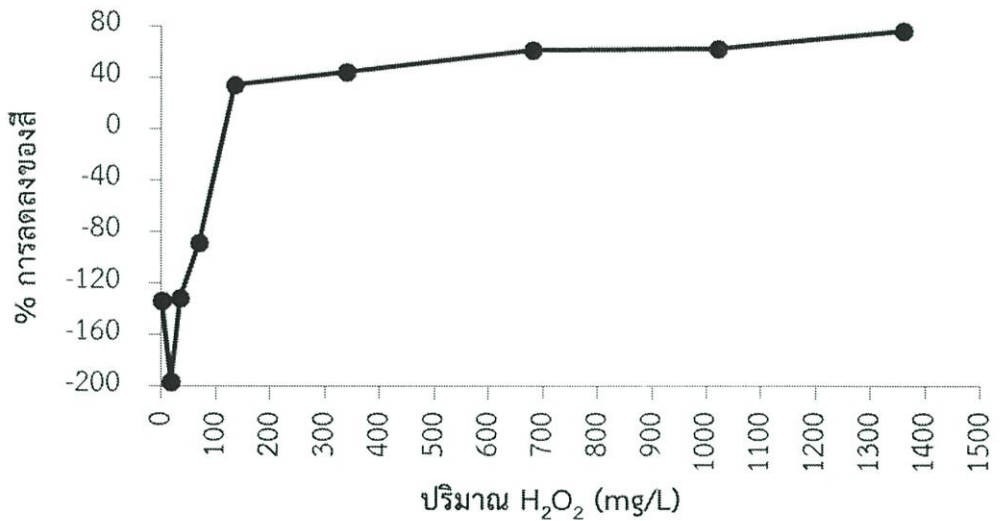
จากตารางที่ 4.6 จะพบว่าความเข้มของสีในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันที่ค่าพีเอช 2, 4, 5 และ 6 แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับการบำบัดสีของน้ำเสียที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 ประกอบกับค่าพีเอชที่ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีสูงสุดคือที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 จึงได้เลือกใช้ค่าพีเอชเท่ากับ 3 สำหรับการศึกษาในการทดลองต่อไป

#### 4.3.3 ศึกษาหาปริมาณ $\text{H}_2\text{O}_2$ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

เมื่อนำน้ำเสีย ปริมาตร 50 mL มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 3 ไปบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยการเติม  $\text{H}_2\text{O}_2$  ที่ความเข้มข้น 17, 34, 68, 136, 340, 680, 1020 และ 1,360 mg/L มีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาคงที่ที่ 240 นาที ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับความเข้มข้นของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเปอร์เซ็นต์การลดลงของความเข้มข้นในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่าเมื่อเติมปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณ 136 mg/L ถึง 1,360 mg/L จะส่งผลให้สีของน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นลดลงจาก 117 ADMI เหลือ 76.35, 65.52, 44.631, 45.49, 27.37 ADMI (รูปที่ 4.14) คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ  $H_2O_2$  (รูปที่ 4.15) โดยปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสูงสุดคือปริมาณ 1,360 mg/L เนื่องจากการเติม  $H_2O_2$  ในช่วงดังกล่าวข้างต้นจะทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากพอในการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพื่อใช้กำจัดสีของน้ำเสีย อย่างไรก็ตามพบว่าถ้าเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณ 17, 34 และ 68 mg/L พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีที่ลดลง (รูปที่ 4.14) อีกทั้งสีในน้ำทิ้งหลังการบำบัดยังมีค่ามากกว่าค่าสีเริ่มต้น

( รูปที่ 4.15 ) ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากที่สภาวะดังกล่าวมี  $H_2O_2$  ในปริมาณที่ไม่เพียงพอที่จะผลักดันให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ดำเนินไปข้างหน้าได้อย่างสมบูรณ์ก่อให้เกิดสารมัธยันต์ (intermediate) ที่อาจทำให้น้ำมีสีเข้มขึ้นดังงานวิจัย Mijangas et al.(2006) ที่พบว่า การสลายตัวของสารประกอบฟีนอลอย่างไม่สมบูรณ์จะเกิด catechol, resorcinol และ hydroquinone ทำให้น้ำมีสีเข้มขึ้น

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons ได้ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบทางสถิติผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความเข้มสี

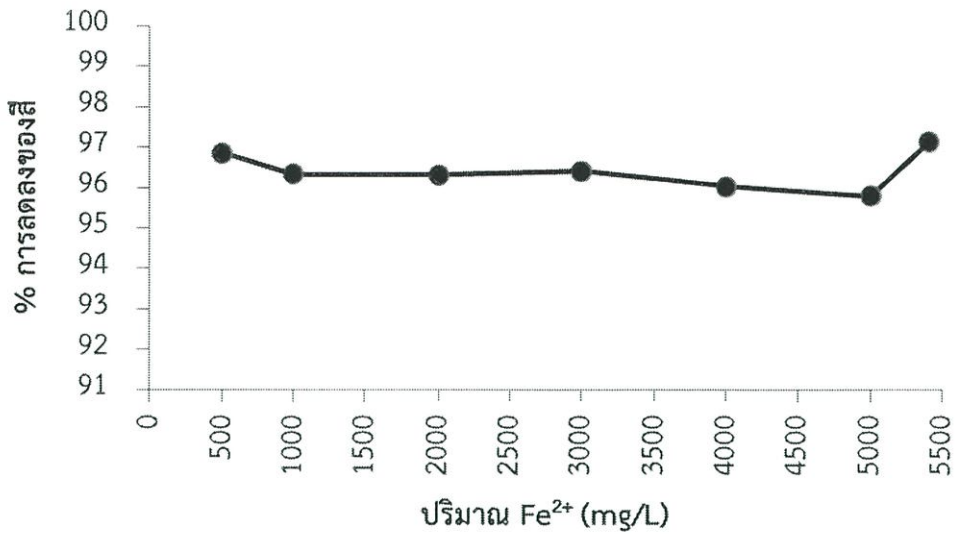
ปริมาณ $H_2O_2$	ระดับ N	ความเข้มสีในน้ำเสียหลังการบำบัด
17	3	346.00 ± 83.03 <sup>a</sup>
34	3	270.16 ± 49.22 <sup>ab</sup>
68	3	220.25 ± 19.22 <sup>b</sup>
136	3	76.35 ± 32.31 <sup>c</sup>
340	3	65.52 ± 6.64 <sup>c</sup>
680	3	44.63 ± 36.0 <sup>c</sup>
1020	3	45.49 ± 0.0 <sup>c</sup>
1360	3	27.37 ± 0.0 <sup>c</sup>

**หมายเหตุ** ตัวอักษรเดียวกันแสดงถึงการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

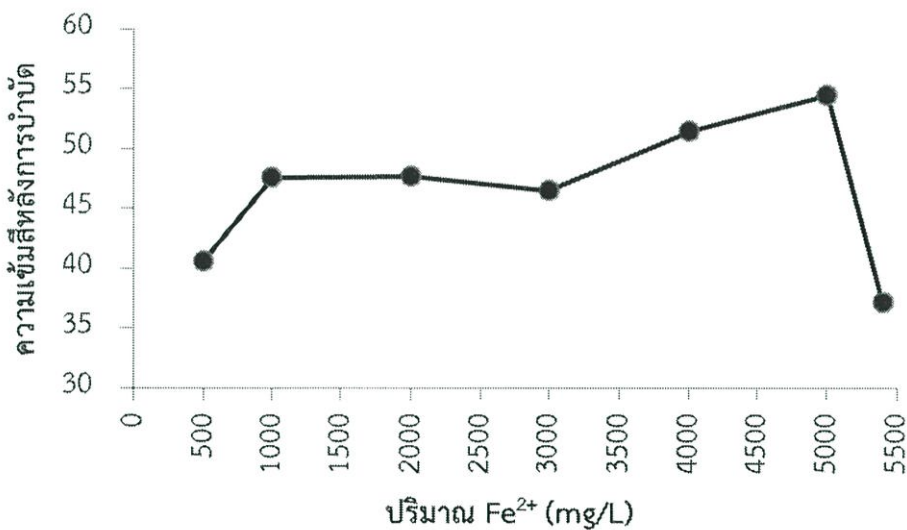
จากตารางที่ 4.7 พบว่าสีในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจึงได้เลือกใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1,360 mg/L สำหรับการศึกษในการทดลองต่อไปโดยเติมปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตั้งแต่ 136 mg/L - 1,360 mg/L มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่เนื่องจาก COD ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1,360 mg/L จะมีค่าแตกต่างกับค่า COD ในน้ำทิ้งที่บำบัดโดยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณอื่นๆ จึงได้เลือกใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1,360 mg/L สำหรับการศึกษในการทดลองต่อไป

#### 4.3.4 ปริมาณ $Fe^{2+}$ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

เมื่อนำน้ำเสีย ปริมาตร 50 mL มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 3 ไปบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันโดยการเติม  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้น 1,360 mg/L และเติม  $Fe^{2+}$  ความเข้มข้น 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 และ 5,400 mg/L มีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาครั้งที่ 240 นาที ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17



รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณเฟอร์รัสไอออนต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน



รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณเฟอร์รัสไอออนต่อสีในน้ำทิ้งจากกระบวนการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

จากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 พบว่าการกำจัดสีด้วยการเติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณระหว่าง 500 – 5400 mg/L ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีใกล้เคียงกันคือมีค่าระหว่าง 95 – 97% เมื่อนำค่าเฉลี่ยของน้ำทิ้งไปเปรียบเทียบทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดย Comparisons ได้ผลดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลของปริมาณเฟอร์รัสไอออนต่อความเข้มข้น

ปริมาณ $\text{Fe}^{2+}$	ระดับ N	สีในน้ำทิ้ง (ADMI)
500	3	$54.49 \pm 0.0^a$
1000	3	$51.48 \pm 23.21^a$
2000	3	$47.72 \pm 32.90^a$
3000	3	$47.61 \pm 32.22^a$
4000	3	$46.48 \pm 0.05^a$
5000	3	$40.68 \pm 20.16^a$
5400	3	$37.01 \pm 1.26^a$

**หมายเหตุ** ตัวอักษรเดียวกันแสดงถึงการไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 4.8 พบว่าสีในน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วยการเติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณต่างๆมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 95% แสดงให้เห็นว่าปริมาณของเฟอร์รัสไอออนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีมากกว่าปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดสีและซีโอทีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟฟีหมักพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีและสีของน้ำเสียโดยวิธีการทดลองแบบทีละปัจจัย (One Variable At A Time) ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษามีค่าพีเอชเท่ากับ 7.60 มีค่าซีโอทีเท่ากับ 1,294 mg/L มีค่าสีเท่ากับ 117 ADMI
2. การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาให้นาน ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอทีเพิ่มมากขึ้น โดยที่เวลา 240 นาที สามารถให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอทีของน้ำเสียได้ 97.33% ส่วนในการกำจัดสีที่เวลา 60 นาที สามารถให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีของน้ำเสียได้ถึง 72.69%
3. การบำบัดซีโอทีและสีของน้ำเสียจะเกิดได้ดีที่ค่าพีเอชเป็นกรด โดยที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 ให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอทีและสีเท่ากับ 99.17% และ 71.60% ตามลำดับ
4. ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่ม ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนการกำจัดสีพบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต้องใช้ควรมีค่าตั้งแต่ 136 ถึง 1,360 mg/L
5. การเพิ่มปริมาณเฟอร์รัสไอออน ทำให้ซีโอทีของน้ำทิ้งมีค่าลดลงและเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอทีมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ต้องใช้ควรมีค่าตั้งแต่ 4,000 mg/L ถึง 5,400 mg/L แต่เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีในน้ำ มีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อใช้ปริมาณเฟอร์รัสไอออนระหว่าง 500 ถึง 5,400 mg/L

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. หลังการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันจะพบตะกอนเกิดขึ้นดังนั้น ควรศึกษาวิธีกำจัดตะกอนโดยวิธีที่ถูกต้องในขั้นต่อไป
2. เนื่องจากผลของปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ศึกษาถึง 500 mg/L ให้ผลไม่ต่างกันในแง่การกำจัดสีเมื่อเทียบกับ 5,400 mg/L ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการที่ใช้เฟอร์รัสไอออนน้อยลงหรือมีการทดสอบหาในช่วงความเข้มข้นต่ำกว่าลงนี้ และอาจมีการหาอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมร่วมไปด้วย จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มมากขึ้น
3. ควรมีการปรับเปลี่ยนวิธีที่ใช้ในวิเคราะห์ซีโอทีเป็นแบบวิธีการเปรียบเทียบกับสีแทนการไทเทรต

## เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพฯ : กรมโรงงานอุตสาหกรรม.
- เจตนิพิฐ สุดทองคง, ณัฐพงษ์ โปรยสุรินทร์ และนายยา สุขประเสริฐ. 2552. การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมรีแอคทีฟด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ธีระ ตั้งวิชาญ และชุตินา สัจจามันท์. 2539. เอกสารประกอบการสอน ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการพิมพ์. หน่วยที่ 1-4 หน้า 218-264. สำนักพิมพ์สุโขทัยธรรมธิราช.
- นงเยาว์ ชูสุข. 2554. เทคนิคในการพัฒนาผลิตภัณฑ์. หน้า 1-37. ในเอกสารประกอบการสอนรายวิชาปฏิบัติการวางแผนการตลาดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- นิตยา ทองแพง, สมลักษณ์ คุชิตาและสุภลลิตี แก้วสะอาด. 2558. การกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นาก ภูวงศ์ผา, เฉลิม เรื่องวิริยะชัย และสุนันทา เลาว์ณย์ศิริ. การกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีด้วยเฟนตัน, ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. วิศวกรรมสาร มช. ปีที่ 40 ฉบับที่ 4 (1272-1284) มีนาคม - เมษายน พ.ศ.2555.
- ปิยะฉัตร จันทรังศรี. 2545. การบำบัดน้ำเสียหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการดูดซับด้วยกากโลหะไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ. 2545.
- พงษ์ทวี จุรัตน์, ยุทธนา เจริญศรีสกุล และศิริภัทร์ พลอยทับทิม. 2557. การบำบัดน้ำยาโบรอนจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พันธกานต์ ยันฉิมพลี. 2558. การบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ใช้ซ้ำในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วุฒิ วิพันธ์พงศ์. 2540. การใช้สารเคมีเฟนตันกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## เอกสารอ้างอิง ( ต่อ )

- ศุภณี เรียบเลิศศิริธัญ และแววบุญ แยมแสงสังข์. 2557. **หมักพิมพ์ฐานน้ำกับการพิมพ์งานกล่องกระดาษ**, รายงานผลการสัมมนา หมักพิมพ์ฐานน้ำกับการพิมพ์งานกล่องกระดาษ วันที่ 5 มิถุนายน 2557 ศูนย์การเรียนรู้เทคโนโลยีหมักพิมพ์ บริษัทเฉลิมชัยชาญ.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2554. **โครงการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ภายใต้กฎเกณฑ์ด้านสิ่งแวดล้อมโลก**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.oie.go.th/academic/รายงานการศึกษาโครงการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ภายใต้กฎเกณฑ์ด้านสิ่งแวดล้อมโลก> สืบค้นเมื่อ 1 ก.พ. 2559.
- สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และวีระนุช บุญรุ่ง. 2553. **การกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยกระบวนการเฟนตัน และกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม**. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน พ.ศ.2553.
- อรชุดา ชันติกุล และอนรรักษ์ ปิติรักษ์สกุล,การหาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์โดยกระบวนการโอโซนเข้มข้น. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 34 ฉบับที่ 2 (177-188) มีนาคม - เมษายน พ.ศ. 550.
- APHA, AWWA and WEF. 1995. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**. 19th Edition. USA : American Public Health Association Ertugay, N and Acar, F.N.2013. "Removal of COD and color from Direct Blue 71 azo dye wastewater by fenton'soxidation:kinetic study." Ataturk University. Arabian Journal of Chemistry.
- Flaherty K.A. and Huang.C.P.1992. **Continuous Flow Application of Fenton's Reagent for the Treatment of Refractory Wastewaters**. Chemical Oxidation : Technology for the Nineties. 2:58 – 77.
- Gregor K.H.1992. **Oxidation Decolorization of Textile Waste Water with Advanced Oxidation Process**. Chemical Oxidation : Technology for the Nineties. 2: 161 – 193.
- Lee,M. 2008.**Removal of COD and Color from livestock wastewater by the Fenton method**. Journal of Hazardous Material.153.1314-1319.
- Ramteke, L.P., and Gogate, P.R. 2015. **Treatment of toluene, benzene, naphthaleneand xylene (BTNXs) containing wastewater using improved biologicaloxidation with pretreatment using Fenton/Ultrasound based processes**.
- Wyszecki, G. and Stiles, W.S. 2000. **Color Science**. 2: 831-836. WILEY-VCH.Weinheim. [Online]. Available : <http://www.pneac.org/printprocesses/flexography>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 เมษายน 2559.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### หลักการและวิธีการวิเคราะห์

#### ก-1 การวิเคราะห์ซีโอดีโดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด/การไทเทรต (Closed-Reflux, Titrimetric Method) (สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2540)

##### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1. ภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย (Digest Vessel) ควรใช้หลอดทดลองแก้วชนิดบอโรซิ-ลิเคต (Borosilicate Glass) ซึ่งมีขนาด 16 x 100 มิลลิเมตร พร้อมทั้งฝาจุก

1.2 เครื่องให้ความร้อนหรือเตาอบ ซึ่งสามารถให้ความร้อนและสามารถควบคุมให้มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง  $150 \pm 2$  องศาเซลเซียส

##### 2. สารเคมี

2.1. น้ำยาย่อยสลายสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion Solution) ความเข้มข้น 0.0167 โมลาร์

วิธีการเตรียม ชั่งสารมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary Standard) โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate) หนัก 4.913 กรัม ซึ่งถูกทำให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้ เย็นในโถทำแห้ง (Desiccator) ใส่ลงไปในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร ค่อยๆเติมกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 167 มิลลิลิตร เติมนอร์ควิกซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วเจือจางให้มีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

##### 2.2. กรดซัลฟิวริกกรือเอเจนต์

วิธีการเตรียม ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver Sulfate;  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) จำนวน 5.5 กรัมต่อกรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid) จำนวน 1 กิโลกรัม หรือ ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต จำนวน 22 กรัมในกรดซัลฟิวริก 4.0 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) โดยต้องใช้เวลาในการละลายนาน 1 - 2 วัน

##### 2.3. เฟอโรอิน อินดิเคเตอร์

วิธีการเตรียม ละลาย 1,10 - Phenanthroline Monohydrate ( $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) หนัก 1.48 กรัม และ Ferrous Sulfate Heptahydrate ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) หนัก 0.7 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วทำให้เจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร

2.4. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตหรือสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียม ซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate; FAS) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

วิธีการเตรียม ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต [ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ] 39.2 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1000 mL สารละลายนี้ต้องเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่จะนำมาใช้

วิธีการหาความเข้มข้นของ Ferrous Ammonium Sulfate เติมสารเคมีตามตารางก-4 ในภาชนะย่อยสลาย แต่ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง น้ำ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วไทเทรตด้วย Ferrous

Ammonium Sulfate โดยใช้เฟอโรนินเป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดยุติสีจะเปลี่ยนจากฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

### การคำนวณ

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) คำนวณได้จาก สมการ

$$M_f = (6V_p M_p) / V_f$$

เมื่อ  $M_f$  = ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต เป็นโมลาร์

$V_f$  = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ เป็นมิลลิลิตร

$V_p$  = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ เป็นมิลลิลิตร

$M_p$  = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต เป็นโมลาร์

2.5. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท (Standard Potassium Phthalate Solution; KHP)

วิธีการเตรียม ละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท ซึ่งอบให้แห้งจนน้ำหนักคงที่แล้วที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นหนัก 425 มิลลิกรัมในน้ำกลั่นแล้วเจือจาง จนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร สารละลายนี้จะมีค่าซีโอดี 500 mg/L โดยที่ในทาง ทฤษฎีสารละลาย KHP มีค่าซีโอดี 1.176 มิลลิกรัม ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ต่อมิลลิกรัม

### วิธีวิเคราะห์

1. ล้างหลอดย่อยสลาย (Digestion Tubes) และฝาจุกด้วยกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 20 ก่อนนำไปใช้ เพื่อป้องกัน การปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์
2. ปิเปิดตัวอย่างน้ำใส่หลอดย่อยขนาด 16 x 100 (ม.ม. x ม.ม.) ปริมาตร 2.5 ml เติมสารละลายที่สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 1.5 ml
3. ค่อยๆ เทกรดซัลฟิวริกเอเจนต์ลงในหลอดปริมาตร 3.5 ml โดยให้กรดซัลฟิวริกเอเจนต์ไหลลงก้นหลอดแก้วเพื่อให้ ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นตัวอย่างน้ำและน้ำย่อยสลาย
4. ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่นแล้วคว่ำหลอดแก้วไปมาหลายๆครั้งเพื่อ ผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง
5. นำหลอดทดลองเหล่านี้ไปใส่ในเตาอบ (Hot Air Oven) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง
6. เปิดฝาจุก เทของผสมลงในขวดรูปกรวย ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดทดลองให้หมด เติมเฟอโรนินอินดิเคเตอร์ 1 -2 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับ Ferrous Ammonium Sulfate ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จุดยุติจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากฟ้าอมเขียว เป็นน้ำตาลแดง
7. ทำ blank โดยใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่าง แล้วทำการวิเคราะห์ตามขั้นตอนข้างต้น
8. ใช้สารละลายละลายกลูโคส แทนตัวอย่างน้ำ โดยใช้รีเอเจนต์ต่างๆเหมือนกับที่ ใช้กับตัวอย่างน้ำ แล้วคำนวณหาค่าซีโอดีเพื่อเป็นการประกันคุณภาพ

## การคำนวณหาซีโอดี

$$\text{COD} = (A-B)(8000M)/C$$

เมื่อ	COD	=	ค่าซีโอดี หน่วยเป็นมิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร
	A	=	ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการติเตรท แบลงค์ หน่วยเป็นมิลลิลิตร
	B	=	ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการติเตรท ตัวอย่าง หน่วยเป็นมิลลิลิตร
	M	=	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต หน่วย เป็นโมลาร์
	C	=	ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ หน่วยเป็นมิลลิลิตร

## ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาตรของเอฟเอเอสในการไทเทรตแบลงค์เท่ากับ 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

ปริมาตรของเอฟเอเอสในการไทเทรตน้ำตัวอย่างเท่ากับ 5.2 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{ซีโอดี, มก.ออกซิเจน/ลิตร} &= \frac{(5.9-5.2) \times 0.0254 \times 8,000}{2.5} \\ &= 56.896 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร} \end{aligned}$$

## ก-2 การวัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI) (เจตนิพิฐ, 2552)

### 1) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
2. ฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
3. เซลล์วัดแสงที่มีช่วงแสง 10 มิลลิเมตร
4. หลอดฉีดยา
5. เครื่องแก้วต่างๆ

### 2) สารเคมี

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

### 3) การทดลอง

1. การเตรียมสารละลายสีมาตรฐานที่มีสี 100, 200, 300, 400, และ 500 ADMI โดยการเจือจางสต็อกจากสารเคมีข้อ 2.1 หรือ 2.2 โดยปิเปตมา 20, 25, 30, 40 และ 50 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็นปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร สำหรับละลายสีมาตรฐานที่มีสีเท่ากับ 500 ADMI ไม่ต้องปรับปริมาตรใดๆทั้งสิ้น นำมาวัดค่าทรานส์มิตแดนซ์ (%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) โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าความเข้มสีในหน่วย ADMI ผ่านทาง Worksheet -ADMI

ตาราง ก-1 ความยาวคลื่นที่ใช้วัดค่า %T

Ordinate No.	Wavelength (nm)		
	X	Y	Z
2	435.5	489.5	422.2
5	461.2	515.2	432.0
8	544.3	529.8	438.6
11	564.1	541.4	444.4
14	577.4	551.8	450.1
17	588.7	561.9	455.9
20	599.6	572.5	462.0
23	610.9	584.8	468.7
26	624.2	600.8	477.7
29	645.9	627.3	495.2
Factor when 10 Ordinate Uesd	0.09806	0.100 00	0.118 14

ที่มา : standard method,1995

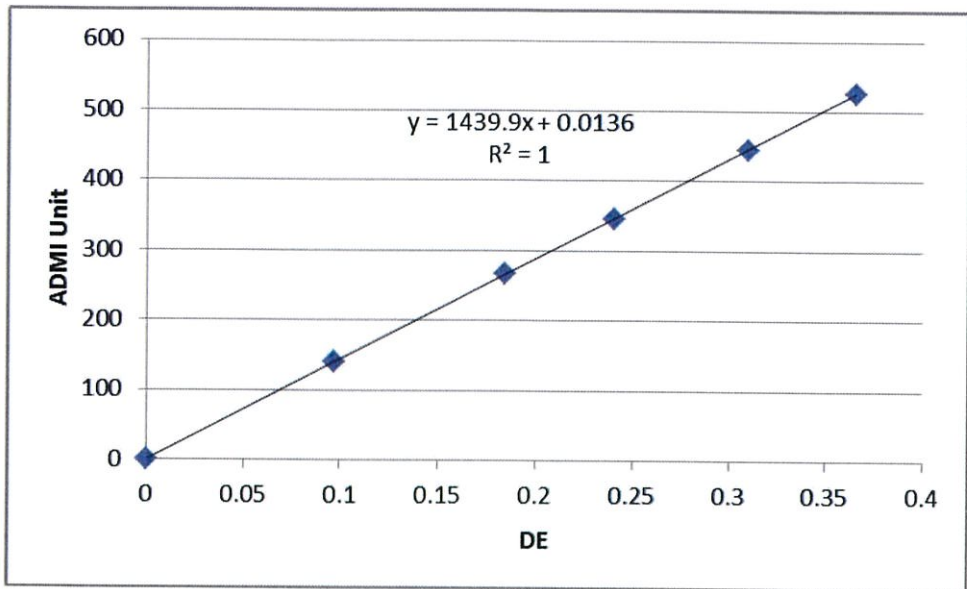
#### 4) การคำนวณและแปลผล

##### 1. การคำนวณ Calibration Factor (f)

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

ตารางที่ ก-2 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

## 2. การคำนวณค่าสี (ADMI)

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

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  $Z_c$  ได้มาจากการนำน้ำกลั่นไปวัดแล้วคำนวณเช่นเดียวกันกับตัวอย่าง แปลงเป็นค่า Musell จากตารางของ Adam-Nickerson (Wyszecki, G and Stiles W.S., 2000) จะได้ค่าเป็น  $V_{xc}, V_{yc}, V_{zc}, V_{xs}, V_{ys}$  และ  $V_{zs}$  ตามลำดับจะได้  $V_{xc}=9.99, V_{yc}=9.99, V_{zc}=9.99, V_{xs}=8.56, V_{ys}=8.42$  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

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

$$\text{ADMI} = \frac{1313.8 \times 0.389}{1}$$

$$= 511.0682$$

**ภาคผนวก ข**  
**ตารางผลการทดลอง**

ตารางที่ ข-1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียตัวอย่าง

		ปริมาตร FAS (ml)		COD
		Blank(A)	Sample (B)	
Sample	1	2.62	1.20	258.86
	2	2.62	1.15	267.10
	3	2.62	1.25	249.72
กลูโคส	4	2.62	1.45	213.18
	5	2.62	1.55	194.91
	6	2.62	1.65	176.64

หมายเหตุ 1 ความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS เท่ากับ 0.0571

หมายเหตุ 2 ตัวอย่างน้ำเสียเจือจางน้ำ 5 เท่า ดังนั้นค่า COD ของน้ำเสียตัวอย่างเริ่มต้นมีค่า 1,294 mg/L ได้มาจาก

ซีโอดี, มก.ออกซิเจน/ลิตร =  $(2.62-1.2) \times 0.0571 \times 8,000$

2.5

= 259.46 มิลลิกรัม/ลิตร

เจือจาง 10 เท่า = 1,294 mg/L

ตารางที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์ COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ระยะเวลาต่างกัน

Sample		ปริมาตร FAS (ml)		COD
		Blank(A)	Sample (B)	
20 นาที	1	2.83	1.65	187.67
	2	2.83	1.80	163.81
	3	2.83	1.25	251.28
30 นาที	4	2.84	1.90	147.91
	5	2.84	1.85	155.86
	6	2.84	1.70	179.72
40 นาที	7	2.85	1.90	152.61
	8	2.85	2.20	104.42
	9	2.85	1.80	168.67
50 นาที	10	2.85	2.00	136.54
	11	2.85	2.00	136.54
	12	2.85	1.95	144.58
60 นาที	13	2.85	1.95	144.58
	14	2.85	2.05	128.51
	15	2.85	2.30	88.35
120 นาที	16	2.85	2.25	95.42
	17	2.85	2.30	87.47
	18	2.85	2.30	87.47
240 นาที	19	2.90	2.80	15.90
	20	2.90	2.85	7.95
	21	2.90	2.40	79.52

หมายเหตุ ความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS เท่ากับ 0.0497

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์สีในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ระยะเวลาต่างกัน

Sample		Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI
20 นาที	1	100.22	100.56	116.89	9.99	9.92	9.86	0.074	106.766
	2	101.13	102.23	118.68	10.00	9.99	9.92	0.036	52.169
	3	102.19	103.74	121.14	10.00	10.00	10.00	0.023	33.120
30 นาที	4	102.50	104.27	121.77	10.00	10.00	10.00	0.023	33.120
	5	101.09	102.81	119.65	10.00	10.00	9.95	0.030	43.890
	6	100.12	102.72	119.62	9.98	10.00	9.95	0.036	52.496
40 นาที	7	98.90	1010.04	122.57	9.94	9.94	10.00	0.026	37.012
	8	94.79	97.22	118.96	9.77	9.79	9.93	0.065	93.057
	9	89.76	93.09	112.91	9.56	9.63	9.73	0.102	146.544
50 นาที	10	101.36	102.5	120.66	10.00	10.00	10.00	0.024	35.066
	11	98.00	100.27	115.29	9.90	9.91	9.81	0.041	59.465
	12	100.87	102.61	120.93	10.00	10.00	9.99	0.023	33.617

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์สีในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ระยะเวลาต่างกัน (ต่อ)

Sample		Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI
60 นาที	13	100.28	101.98	119.99	9.99	9.98	9.96	0.022	32.282
	14	101.00	102.54	121.16	10.00	10.00	10.00	0.023	33.120
	15	102.79	104.96	124.44	10.00	10.00	10.00	0.023	33.120
120 นาที	16	97.58	99.63	117.38	9.88	9.89	9.88	0.011	18.446
	17	100.22	100.56	116.89	9.99	9.92	9.86	0.074	102.816
	18	96.48	98.47	114.67	9.84	9.84	9.79	0.024	31.018
240 นาที	19	97.58	99.63	117.38	9.88	9.89	9.88	0.011	11.520
	20	96.29	98.08	115.39	9.83	9.83	9.81	0.018	24.782
	21	99.89	102.56	118.19	9.97	9.98	9.91	0.035	51.782

ตารางที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์ COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ค่าพีเอชต่างกัน

Sample		ปริมาตร FAS (ml)		COD
		Blank(A)	Sample (B)	
pH 2	1	2.86	2.80	10.72
	2	2.86	2.40	74.72
	3	2.86	2.80	10.72
pH 3	4	2.86	2.80	10.70
	5	2.86	2.80	10.72
	6	2.86	2.81	10.74
pH 4	7	2.85	2.52	53.30
	8	2.85	2.52	53.38
	9	2.85	2.52	53.46
pH 5	10	2.87	2.45	66.72
	11	2.87	2.65	34.72
	12	2.87	2.40	74.72
pH 6	13	2.87	2.35	80.70
	14	2.87	2.55	49.48
	15	2.87	2.48	62.40
pH 7	16	2.87	2.25	88.51
	17	2.87	2.30	72.89
	18	2.87	2.30	72.89
pH 8	19	2.87	1.73	182.16
	20	2.87	2.11	119.73
	21	-	-	-

หมายเหตุ ความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS เท่ากับ 0.05

ตารางที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์สีในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ค่าพีเอชต่างกัน

Sample		Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI
pH 2	1	94.24	96.23	111.58	9.75	9.75	9.68	0.044	63.983
	2	96.40	98.34	114.99	9.84	9.84	9.8	0.021	30.453
	3	93.11	94.89	110.66	9.70	9.70	9.65	0.050	72.230
pH 3	4	103.71	106.05	126.14	10.00	10.00	10.00	0.023	33.120
	5	100.15	102.27	121.33	9.98	9.99	10.00	0.023	33.601
	6	101.03	103.26	121.71	10.00	10.00	10.00	0.023	33.120
pH 4	7	96.29	98.08	115.39	9.83	9.83	9.81	0.018	25.888
	8	93.25	95.09	110.92	9.71	9.71	9.66	0.048	69.205
	9	96.80	98.62	115.45	9.85	9.85	9.81	0.019	28.374
pH 5	10	93.53	95.38	111.62	9.73	9.72	9.69	0.044	63.718
	11	96.74	98.76	117.03	9.85	9.85	9.87	0.014	20.173
	12	94.11	95.9	113.51	9.74	9.74	9.75	0.037	53.304

ตารางที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์สีในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ค่าพีเอชต่างกัน (ต่อ)

Sample	Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI	
pH 6	13	92.99	94.74	111.13	9.70	9.69	9.67	0.049	71.955
	14	93.53	95.38	111.62	9.73	9.72	9.69	0.044	63.718
	15	97.58	99.63	117.38	9.88	9.89	9.88	0.011	15.859
pH 7	16	94.30	96.17	113.05	9.75	9.75	9.73	0.035	50.998
	17	92.38	94.27	111.11	9.67	9.68	9.67	0.052	74.496
	18	89.80	91.78	108.54	9.57	9.57	9.58	0.076	109.448
pH 8	19	91.48	93.47	111.02	9.64	9.64	9.66	0.060	86.876
	20	90.45	92.59	111.52	9.59	9.61	9.68	0.075	108.076
	21	92.69	94.75	113.27	9.70	9.69	9.74	0.053	76.644

ตารางที่ ข-6 ผลการวิเคราะห์ COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน

Sample		ปริมาตร FAS (ml)		COD
		Blank(A)	Sample (B)	
17 mg/L	1	2.60	2.00	105.87
	2	2.60	2.10	89.99
	3	2.60	1.80	137.61
34 mg/L	4	2.66	1.90	121.74
	5	2.66	2.20	89.99
	6	2.66	2.10	74.12
68 mg/L	7	2.66	2.20	89.99
	8	2.66	2.20	89.99
	9	2.66	2.20	89.99
136 mg/L	10	2.66	2.45	85.98
	11	2.66	2.05	77.66
	12	2.66	2.45	44.38
340 mg/L	13	2.66	2.30	52.70
	14	2.66	2.30	52.70
	15	2.66	2.00	94.30
680 mg/L	16	2.66	2.25	69.34
	17	2.66	2.45	44.38
	18	-	-	-
1020 mg/L	19	2.66	2.20	61.02
	20	2.66	2.25	69.34
	21	2.66	2.45	44.38
1360 mg/L	22	2.66	2.55	19.42
	23	2.66	2.55	19.42
	24	2.66	2.55	19.42

หมายเหตุ ความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS เท่ากับ 0.0496

ตารางที่ ข-7 ผลการวิเคราะห์สีในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน

Sample		Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI
17 mg/L	1	97.58	90.56	107.29	9.88	9.52	9.53	0.371	533.490
	2	97.67	98.46	99.89	9.89	9.84	9.27	0.234	336.709
	3	97.32	99.52	108.88	9.87	9.88	9.59	0.117	167.790
34 mg/L	4	96.85	98.54	103.79	9.85	9.85	9.41	0.176	253.980
	5	96.45	97.74	99.86	9.84	9.81	9.27	0.219	315.437
	6	97.49	99.22	105.38	9.88	9.87	9.47	0.161	231.063
68 mg/L	7	98.92	101.12	107.71	9.94	9.95	9.55	0.161	231.443
	8	97.05	99.31	107.37	9.86	9.88	9.54	0.138	198.057
	9	96.49	98.51	104.55	9.84	9.84	9.44	0.161	231.255
136 mg/L	10	98.94	100.99	116.58	9.94	9.94	9.85	0.037	53.506
	11	98.36	90.84	113.40	9.91	9.92	9.75	0.069	99.195
	12	100.36	100.48	119.51	9.99	10.00	9.95	0.032	46.192

ตารางที่ ข-7 ผลการวิเคราะห์สีในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างกัน (ต่อ)

Sample		Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI
680 mg/L	16	93.34	95.50	113.78	9.71	9.72	9.76	0.046	65.513
	17	93.34	95.50	113.78	9.71	9.72	9.76	0.046	65.513
	18	-	-	-	-	-	-	-	-
1,020 mg/L	19	99.04	101.07	118.47	9.94	9.94	9.91	0.015	21.774
	20	96.86	98.94	115.55	9.86	9.86	9.82	0.019	26.577
	21	92.07	94.48	113.41	9.66	9.68	9.75	0.061	88.115
1,360 mg/L	22	98.06	100.21	117.18	9.90	9.91	9.87	0.019	27.371
	23	98.06	100.21	117.18	9.90	9.91	9.87	0.019	27.371
	24	98.06	100.21	117.18	9.90	9.91	9.87	0.019	27.371

ตารางที่ ข-8 ผลการวิเคราะห์ COD ในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ปริมาณเฟอร์รัสไอออนต่างกัน

Sample		ปริมาตร FAS (ml)		COD
		Blank(A)	Sample (B)	
500 mg/L	1	2.93	2.20	117.50
	2	2.93	2.20	117.50
	3	2.93	2.20	117.50
1,000 mg/L	4	2.93	2.15	125.55
	5	2.93	2.25	109.54
	6	2.93	2.40	85.31
2,000 mg/L	7	2.93	2.50	69.21
	8	2.93	2.35	93.36
	9	2.93	2.40	85.31
3,000 mg/L	10	2.93	2.45	77.26
	11	2.93	2.55	61.17
	12	2.93	2.45	77.26
4,000 mg/L	13	2.93	2.60	53.12
	14	2.93	2.60	53.12
	15	2.93	2.60	53.12
5,000 mg/L	16	2.93	2.70	37.02
	17	2.93	2.75	28.97
	18	2.93	2.65	45.07
5,400 mg/L	19	2.93	2.75	28.97
	20	2.93	2.75	28.97
	21	2.93	2.75	28.97

หมายเหตุ ความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS เท่ากับ 0.0503

ตารางที่ ข-9 ผลการวิเคราะห์สีในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ปริมาณเพอร์สไอออนต่างกัน

Sample		Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI
500 mg/L	1	97.37	99.31	116.29	9.88	9.88	9.84	0.017	23.973
	2	94.68	96.63	111.89	9.77	9.77	9.69	0.044	84.508
	3	96.48	98.47	114.67	9.84	9.84	9.79	0.024	34.991
1,000 mg/L	4	97.21	99.23	115.95	9.87	9.87	9.83	0.017	25.091
	5	95.09	97.18	110.96	9.78	9.79	9.66	0.059	84.508
	6	96.73	98.68	115.06	9.85	9.85	9.80	0.023	33.222
2,000 mg/L	7	96.22	98.47	114.67	9.84	9.84	9.79	0.024	34.756
	8	96.22	98.01	111.71	9.82	9.83	9.69	0.059	85.133
	9	95.95	98.04	116.62	9.89	9.89	9.85	0.016	23.277
3,000 mg/L	10	97.66	98.11	113.78	9.83	9.83	9.76	0.032	46.510
	11	96.11	97.03	113.37	9.79	9.79	9.74	0.032	46.441
	12	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข-9 ผลการวิเคราะห์สีในน้ำเสียหลังการบำบัดที่ปริมาณเพอร์สไอออนต่างกัน (ต่อ)

Sample		Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI
4,000 mg/L	13	97.84	99.94	116.34	9.89	9.90	9.84	0.026	37.440
	14	93.90	95.88	110.40	9.74	9.74	9.64	0.054	78.268
	15	97.01	99.05	115.36	9.86	9.87	9.81	0.027	38.736
5,000 mg/L	16	97.81	99.92	116.09	9.89	9.90	9.84	0.026	37.440
	17	96.31	98.33	113.52	9.83	9.84	9.75	0.039	57.355
	18	95.88	97.95	112.41	9.82	9.82	9.71	0.048	68.677
5,400 mg/L	19	96.87	98.94	115.05	9.86	9.86	9.80	0.026	37.012
	20	96.87	98.94	115.05	9.86	9.86	9.80	0.026	37.012
	21	96.87	98.94	115.05	9.86	9.86	9.80	0.026	37.012

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

#### 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

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

#### 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

ดังนั้นน้ำเสีย 1 L จะต้องใช้  $H_2O_2$  เท่ากับ 269.7231 mg/L

ในการทดลองใช้น้ำเสียดังกล่าวละ 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  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ  $277.8 \text{ g/mol}$ )

ดังนั้น ปริมาณ  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  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	$= 1 \times 98$	กรัม	
สารละลายที่ใช้เตรียมมีเนื้อกรด 96	กรัม จากสารละลาย	$= 100$	กรัม
สารละลายที่ใช้เตรียมมีเนื้อกรด $1 \times 98$ 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 มิลลิลิตร ตวง Sulfuric acid 96% w/w มาเท่ากับ  
 กรดซัลฟูริก 1 โมล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตวง 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	$= 5 \times 40$	กรัม
ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร เนื้อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล	$= (5 \times 40 \times 100) / 1,000$	กรัม
	$= 20$	กรัม

ดังนั้น ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 กรัม แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 5 โมลาร์

## ภาคผนวก ง

### ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

#### ง-1 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสีย

##### ง-1.1 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ ง-1.1.1 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆในการบำบัดค่า COD โดยวิธี One-way ANOVA

#### Factor Information

Factor	Levels	Values
time	7	20, 30, 40, 50, 60, 120, 240

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
time	7	50908	8485	10.14	0.000
Error	14	11714	837		
Total	20	62622			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ ในการบำบัดค่า COD โดย Fisher Pairwise Comparisons

#### Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping
20	3	200.92	A
30	3	161.16	A B
40	3	141.90	B
50	3	139.22	B C
60	3	120.48	B C
120	3	90.12	C
240	3	34.46	D

ตารางที่ ง-1.1.2 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในการบำบัดสีโดยวิธี One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
time	7	20, 30, 40, 50, 60, 120, 240

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
time	6	7707	1284	1.18	0.369
Error	14	15196	1085		
Total	20	22903			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ ในการบำบัดค่า COD โดย Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping
40	3	92.20	A
20	3	64.02	A B
30	3	43.17	A B
50	3	42.72	A B
120	3	40.95	A B
240	3	38.28	A B
60	3	32.84	B

## ง-1.2 ผลของค่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ ง-1.2.1 ผลของค่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ค่าพีเอชต่างๆ ในการบำบัดค่า COD โดยวิธี One-way ANOVA

### Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	7	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
pH	6	27466	4578	9.50	0.000
Error	13	6266	482		
Total	19	33733			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ pH ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ โดย Fisher Pairwise Comparisons

### Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
8	2	150.94	A
7	3	78.10	B
6	3	67.69	B
5	3	58.72	B C
4	3	53.38	B C
2	3	32.05	B C D
3	3	10.72	C D

ตารางที่ ง-1.2.2 ผลของค่าพีเอชที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ค่าพีเอชต่างๆ ในการบำบัดสีโดยวิธี  
One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	7	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
pH	6	7684	1281	2.46	0.077
Error	14	7277	520		
Total	20	14961			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของpHที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ  
โดย Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
8	3	90.53	A
7	3	78.31	A B
2	3	55.55	A B
6	3	50.51	B C
5	3	45.73	B C
4	3	41.16	B C
3	3	33.28	C

### ง-1.3 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ ง-1.3.1 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ค่าต่างๆ ในการบำบัดค่า COD โดยวิธี One-way ANOVA

#### Factor Information

Factor	Levels	Values
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	8	17, 34, 68, 136, 340, 680, 1020, 1360

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	7	16621.336	2374.477	9.6972	0.001
Error	15	5108.616	340.574		
Total	22	21729.952			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ โดย Fisher Pairwise Comparisons

#### Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	N	Mean	Grouping
17	3	111.16	A
34	3	95.30	A B
68	3	89.99	A B C
136	3	69.34	B C
340	3	66.57	B C
1020	3	58.25	C
680	3	56.86	C
1360	3	19.42	D

ตารางที่ ง-1.3.2 ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในการบำบัดสีโดยวิธี One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	8	17, 34, 68, 136, 340, 680, 1020, 1360

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	7	323502.361	46214.623	9.077	0.000
Error	15	76370.771	5091.385		
Total	22	399873.132			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ โดย Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	N	Mean	Grouping
17	3	346.00	A
34	3	270.16	A B
68	3	220.25	B
136	3	76.35	C
340	3	65.52	C
1020	3	45.49	C
680	3	44.63	C
1360	3	27.37	C

### ง-1.4 ผลของปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ ง-1.4.1 ผลของปริมาณเหล็กไอออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ค่าต่างๆ ในการบำบัดค่า COD โดยวิธี One-way ANOVA

#### Factor Information

Factor	Levels	Values
Fe <sup>2+</sup>	7	500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 5400

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Fe <sup>2+</sup>	6	20455	3409	33.49	0.000
Error	14	1425	102		
Total	20	21880			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของpHที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ โดย Fisher Pairwise Comparisons

#### Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Fe <sup>2+</sup>	N	Mean	Grouping
500	3	117.50	A
1000	3	106.77	A
2000	3	82.63	B
3000	3	71.90	B
4000	3	53.12	C
5000	3	37.02	C
5400	3	28.97	D

ตารางที่ ง-1.4.2 ผลของปริมาณเหล็กไอออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ค่าต่างๆ ในการบำบัดค่าสี  
โดยวิธี One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
Fe <sup>2+</sup>	7	500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 5400

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Fe <sup>2+</sup>	6	646	108	0.21	0.967
Error	13	6631	510		
Total	19	7277			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของpHที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ  
โดย Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Fe <sup>2+</sup>	N	Mean	Grouping
5000	3	54.49	A
4000	3	51.48	A
2000	3	47.72	A
1000	3	47.61	A
3000	2	46.48	A
500	3	40.68	A
5400	3	37.01	A