

การกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟฟีที่มี  
หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอนเทียบกับวิธีโอโซนชั้น

REMOVAL OF COLOR AND COD FROM FLEXOGRAPHIC PRINTING  
WASTEWATER CONTAINING WATER-BASED INK BY  
COAGULATION-FLOCCULATION COMPARED WITH OZONATION

สปันนา นวลสอาด  
SAPANNA NUALSARD

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-016-071

การกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่มี  
หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอนเทียบกับวิธีโอโซนชั้น

REMOVAL OF COLOR AND COD FROM FLEXOGRAPHIC PRINTING  
WASTEWATER CONTAINING WATER-BASED INK BY  
COAGULATION-FLOCCULATION COMPARED WITH OZONATION

สปันนา      นवलสอาด  
SAPANNA    NUALSARD

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-016-071

REMOVAL OF COLOR AND COD FROM FLEXOGRAPHIC PRINTING  
WASTEWATER CONTAINING WATER-BASED INK BY  
COAGULATION-FLOCCULATION COMPARED WITH OZONATION

SAPANNA NUALSARD

A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE  
OF MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2019

KMITL-2019-SC-M-016-071

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่มีหมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอนเทียบกับวิธีโอโซนชั้น
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสปันนา นวลสอาด
รหัสประจำตัว	59605043
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากการพิมพ์แบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอนและวิธีโอโซนชั้น โดยใช้วิธีการออกแบบสถิติส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) ร่วมกับเทคนิควิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ปัจจัยที่ทำการศึกษาในกระบวนการสร้าง-รวมตะกอนได้แก่ ปริมาณเพอร์ริคโคลไรด์และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย สำหรับปัจจัยที่ทำการศึกษาในวิธีโอโซนชั้น ได้แก่ ระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย การทดลองแบบที่ละปัจจัยถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาผลของตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดี ผลจากการทดลองแบบที่ละปัจจัยยังถูกนำมาใช้ในการกำหนดระดับสูง-ต่ำของตัวแปรอิสระที่จะใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ CCD ผลจากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีสร้าง-รวมตะกอน พบว่าแบบจำลองแบบ Full quadratic ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดล้นใจที่ปรับค่าแล้วและค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 85.91 เปอร์เซ็นต์และ 4.32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีความเหมาะสมที่สุดในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีของวิธีสร้าง-รวมตะกอน สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดคือปริมาณเพอร์ริคโคลไรด์ 1.24 กรัมต่อลิตรและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7.5 ที่สภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีเท่ากับ  $90.83 \pm 1.60$  เปอร์เซ็นต์ และ  $60.18 \pm 5.80$  เปอร์เซ็นต์ สีและซีโอดีในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่า  $300 \pm 7.3$  ADMI และค่าซีโอดี  $1,749 \pm 78.6$  มิลลิกรัมต่อลิตร ผลจากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีโอโซนชั้น พบว่าแบบจำลองแบบ Linear + square มีความเหมาะสมที่สุดในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำด้วยวิธีโอโซนชั้น สภาวะที่เหมาะสมคือ ระยะเวลาในการเติมโอโซน 130 นาทีและค่าพีเอชเท่ากับ 2.3 ที่สภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีเท่ากับ  $91.45 \pm 0.59$  เปอร์เซ็นต์ และ  $72.7 \pm 9.2$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าสี  $293 \pm 15.3$  ADMI และค่าซีโอดี  $466 \pm 28.5$  มิลลิกรัมต่อลิตร

**คำสำคัญ :** โคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชัน การบำบัดด้วยโอโซนชั้น น้ำเสียจากการพิมพ์ สภาวะที่เหมาะสมทางสถิติ

<b>Thesis Title</b>	Removal of Color and COD from Flexographic Printing Wastewater Containing Water-Based Ink by Coagulation- Flocculation Compared with Ozonation
<b>Student Name</b>	Sapanna Nualsard
<b>Student ID</b>	59605043
<b>Degree</b>	Master of Science (Environmental Chemistry)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Year</b>	2019
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Usarat Thawornchaisit

### Abstract

The aim of this research was to find the optimum conditions for coagulation-flocculation process and ozonation process to remove color and COD from wastewater in Flexographic printing using water-base ink. We assessed the optimum conditions for the removal efficiency using Central Composite Design, CCD along with Response Surface Methodology, RSM. Independent variables in the coagulation-flocculation study are ferric chloride dosage and initial wastewater pH, while independent variables in the ozonation study are ozonation time and initial wastewater pH. One Variable At a Time (OVAT) technique was applied to investigate the effects of independent variables on color removal efficiency and COD removal efficiency. Results from the OVAT experiments was used to define the high and low levels of factors that were studied in CCD. Results from wastewater treatment by coagulation-flocculation showed that the relationship between the independent variables and color removal efficiencies, as well as COD removal efficiencies was best described by a full quadratic model with the adjusted coefficient of determination ( $R^2$ -adj) and standard error (SE) of 85.91 % and 4.32, respectively. Optimum conditions for color removal of  $90.83 \pm 1.60\%$  and COD removal of  $60.18 \pm 5.80\%$  were obtained at ferric chloride dosage of 1.24 g/L and initial pH of 7.5. At the optimized conditions, color and COD in the effluent was  $300 \pm 7.3$  ADMI and  $1,749 \pm 78.6$  mg/L. Results from wastewater treatment by ozonation showed that the relationship between the independent variables and color and COD removal efficiencies was best described by a Linear+Square model with  $R^2$ -adj and SE of 76.65 % and 18.18. Optimum conditions for color removal of  $91.45 \pm 0.59\%$  and COD removal of  $72.70 \pm 9.20\%$  were obtained at ozonation time of 130 min and initial pH of 2.3. At the optimized conditions, color and COD in the effluent was  $293 \pm 15.2$  ADMI and  $466 \pm 28.5$  mg/L.

**Keywords:** Coagulation, Flocculation, Ozonation, Printing Wastewater, Statistical Optimization

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายด้วยกัน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำ ตรวจสอบชี้แนะข้อบกพร่องอันเป็นประโยชน์ของการทำวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด และขัดเกลาวิทยานิพนธ์เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ออกมาสมบูรณ์มากที่สุด รวมทั้งให้ความรู้ คำปรึกษา และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ ช่วยตรวจสอบ ชี้แนะข้อบกพร่อง ตลอดจนเสนอแนะแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำ เสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา และช่วยตรวจสอบให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบุคลากร เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ช่วยเหลือและจัดเตรียมอุปกรณ์ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณครอบครัวรวมถึงเพื่อนสนิทของข้าพเจ้า ที่คอยเป็นที่ปรึกษา ให้กำลังใจ แรงผลักดัน และอำนวยความสะดวกในทุกๆ ด้าน เพื่อให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

นางสาวสปันนา นวลสอาด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ฐ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>5</b>
2.1 การพิมพ์แบบระบบเฟล็กโซกราฟี.....	5
2.1.1 ประเภทของหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี.....	6
2.1.2 องค์ประกอบของหมึกพิมพ์สำหรับระบบเฟล็กโซกราฟี.....	8
2.1.3 การทำความสะอาดและดูแลรักษาลูกกลิ้งอนิลอกซ์.....	10
2.1.4 ลักษณะน้ำเสียจากการพิมพ์เฟล็กโซกราฟี.....	12
2.2 กระบวนการสร้างและรวมตะกอน .....	12
2.2.1 ขั้นตอนที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.2.2 ชนิดของโคแอกกูแลนต์.....	16
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างและรวมตะกอน .....	19
2.3 การบำบัดด้วยโอโซน (Ozonation) .....	20
2.3.1 โอโซนและคุณสมบัติของโอโซน.....	20
2.3.2 ปฏิกริยาของกระบวนการเติมโอโซน .....	21
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเติมโอโซน.....	24
2.4 รูปแบบการทดลอง.....	25
2.4.1 การดำเนินการทดลองแบบที่ละปัจจัย.....	26
2.4.2 การออกแบบการทดลอง.....	28
2.4.3 การออกแบบส่วนประสมกลาง.....	32

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b> .....	<b>37</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	37
3.1.1 อุปกรณ์.....	37
3.1.2 สารเคมี.....	37
3.2 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษา.....	38
3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีการ สร้างตะกอนทางเคมี.....	38
3.3.1 ศึกษาผลของปริมาณเพอริกคลอไรด์ที่มีผลต่อการบำบัด.....	38
3.3.2 ศึกษาผลของค่าพีเอชในน้ำเสียที่มีผลต่อการบำบัด.....	39
3.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดี ด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอนด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology).....	39
3.4.1 รูปแบบการทดลอง .....	39
3.4.2 การทดลองตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบ.....	40
3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีการไอโซเนชั่น.....	41
3.5.1 การเดินระบบไอโซเนชั่น.....	41
3.5.2 การศึกษาอัตราการผลิตก๊าซไอโซน.....	42
3.5.3 ศึกษาผลของเวลาที่มีผลต่อการบำบัด.....	42
3.5.4 ศึกษาผลของพีเอชของน้ำเสียที่มีผลต่อการบำบัด.....	42
3.6 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดี ด้วยวิธีไอโซเนชั่นโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology).....	43
3.6.1 รูปแบบการทดลอง Central Composite Design.....	43
3.6.2 การทดลองตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบ.....	44
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b> .....	<b>45</b>
4.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำ.....	45
4.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอน .....	46
4.2.1 ผลของปริมาณเพอริกคลอไรด์.....	46
4.2.2 ผลศึกษาผลของค่าพีเอชในน้ำเสีย.....	49

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การหาตัวแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสี	
ด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอน.....	53
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง.....	54
4.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	55
4.3.3 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ.....	57
4.3.4 การวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ.....	57
4.3.5 การสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพการกำจัดสี	58
4.3.6 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม.....	60
4.3.7 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสม	
ที่ได้จากการทดลอง.....	61
4.4 การหาตัวแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีโอดี	
ด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอน.....	62
4.4.1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง.....	63
4.4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	63
4.4.3 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ.....	65
4.4.4 การวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ.....	65
4.4.5 การสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพ	
การกำจัดสีโอดี.....	66
4.4.6 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม.....	67
4.4.7 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสม	
ที่ได้จากการทดลอง.....	68
4.5 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีการโอโซน.....	69
4.5.1 อัตราการผลิตโอโซน.....	69
4.5.2 ผลของระยะเวลาการเติมโอโซน.....	70
4.5.3 ผลของค่าพีเอช.....	73
4.6 การหาตัวแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วย	
วิธีโอโซน.....	76
4.6.1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง.....	77
4.6.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	77
4.6.3 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ.....	79

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.4 การวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ.....	79
4.6.5 การสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพการกำจัดสี.....	80
4.6.6 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม.....	80
4.6.7 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลอง.....	82
4.7 การหาตัวแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วย วิธีไอโซเนชัน.....	83
4.7.1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง.....	83
4.7.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	84
4.7.3 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ.....	85
4.7.4 การวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ.....	86
4.7.5 การสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพ การกำจัดสี.....	86
4.7.6 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม.....	87
4.7.7 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลอง.....	89
4.8 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียระหว่างวิธีการสร้าง-รวมตะกอนกับวิธี ไอโซเนชัน.....	89
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>92</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
เอกสารอ้างอิง .....	94
ภาคผนวก.....	102
ภาคผนวก ก การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์ .....	103
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง .....	108
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ .....	116
ภาคผนวก ง วิธีการใช้โปรแกรม Minitab 17 ในการวิเคราะห์ .....	126
ประวัติผู้เขียน .....	130

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดี-ข้อด้อยของการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี .....	6
2.2 ข้อดี-ข้อเสียของหมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลาย .....	7
2.3 ข้อดี-ข้อจำกัดของหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ .....	7
2.4 ข้อแตกต่างของหมึกพิมพ์ที่ใช้สีย้อมและหมึกพิมพ์ที่ใช้ผงสี .....	8
2.5 ลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี .....	12
2.6 ค่า Oxidation potential ของสารออกซิไดซ์แต่ละชนิด .....	21
2.7 รูปแบบการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโด (Dough) ของขนมปังชนิดหนึ่ง .....	26
2.8 ข้อแตกต่างระหว่างการทดลองแบบที่ละปัจจัยกับวิธีการพ่นผิวตอบสนอง.....	28
2.9 ตัวอย่างการคำนวณระดับค่าที่แท้จริงเมื่อมีปัจจัยที่ต้องการศึกษา 2 ปัจจัย.....	34
3.1 สมบัติของน้ำเสียที่ศึกษา.....	38
3.2 ปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl <sub>3</sub> ) ที่ใช้ในการทดลอง .....	39
3.3 ตัวแปรและระดับค่าของตัวแปรของรูปแบบการทดลอง Central Composite Design.....	40
3.4 สภาวะการทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลองแบบ Central Composite Design .....	40
3.5 ตัวแปรและระดับค่าของตัวแปรของรูปแบบการทดลอง Central Composite Design.....	43
3.6 สภาวะการทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลองแบบ Central Composite Design .....	43
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำ.....	46
4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำตัวอย่าง ดำเนินการบำบัดตามสภาวะการทดลองที่ ได้จากรูปแบบการทดลอง Central Composite Design.....	54
4.3 ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองเพื่อทำนาย ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำตัวอย่าง.....	55
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic.....	57
4.5 ผลการวิเคราะห์แปรปรวน (Variance) จากแบบจำลอง Full Quadratic ของประสิทธิภาพในการบำบัดสี.....	58
4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีตามสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธีสร้าง-รวมตะกอน.....	61
4.7 คุณสมบัติของน้ำเสียหมึกพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี สร้างและรวมตะกอนตามสภาวะที่เหมาะสม.....	61
4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำตัวอย่าง ดำเนินการบำบัดตามสภาวะการทดลองที่ ได้จากรูปแบบการทดลอง Central Composite Design.....	62

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองเพื่อทำนาย ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำตัวอย่าง.....	63
4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic ของประสิทธิภาพการ บำบัดซีโอดี.....	65
4.11 ผลการวิเคราะห์แปรปรวน (Variance) จากแบบจำลอง Full Quadratic ของประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี.....	66
4.12 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีตามสภาวะที่เหมาะสม.....	68
4.13 คุณสมบัติของน้ำเสียหมักพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี สร้างและรวมตะกอนตามสภาวะที่เหมาะสม.....	68
4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำตัวอย่าง ดำเนินการบำบัดตามสภาวะการทดลอง ที่ได้จากรูปแบบการทดลอง Central Composite Design.....	76
4.15 ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองเพื่อทำนาย ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำตัวอย่าง.....	77
4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากแบบจำลอง Linear + square.....	79
4.17 ผลการวิเคราะห์แปรปรวน (Variance) จากแบบจำลอง Linear + square ในการอธิบาย ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพในการบำบัดสี.....	79
4.18 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีตามสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยโอโซนชั้น.....	82
4.19 คุณสมบัติของน้ำเสียหมักพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ผ่านการบำบัดด้วย วิธีโอโซนชั้นตามสภาวะที่เหมาะสม.....	82
4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำตัวอย่าง ดำเนินการบำบัดตามสภาวะการทดลองที่ ได้จากรูปแบบการทดลอง Central Composite Design.....	83
4.21 ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองเพื่อทำนาย ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำตัวอย่าง.....	84
4.22 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากแบบจำลอง Linear + square.....	86
4.23 ผลการวิเคราะห์แปรปรวน (Variance) จากแบบจำลอง Linear + square ในการอธิบาย ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี.....	86
4.24 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีตามสภาวะที่เหมาะสม.....	88
4.25 คุณสมบัติของน้ำเสียหมักพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ผ่านการบำบัดด้วย วิธีโอโซนชั้นตามสภาวะที่เหมาะสม.....	89

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.26 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียระหว่างวิธีการสร้าง-รวมตะกอนกับวิธี โอโซนชั้น.....	90

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะทั่วไปของระบบพิมพ์เฟล็กโซกราฟี.....	5
2.2 ส่วนประกอบหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี .....	8
2.3 การใช้แปรสแตนเลสร่วมกับน้ำยาทำความสะอาด.....	10
2.4 การใช้เครื่องล้างทำความสะอาดระบบอัลตราโซนิก .....	11
2.5 การใช้เครื่องทำความสะอาดระบบอัตโนมัติ .....	11
2.6 ผลของการเติมอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์ .....	13
2.7 ผลของการเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของ คอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ .....	14
2.8 เกล็ดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคต่างๆ ทั้ง 5 ประเภท.....	15
2.9 การรวมตัวของอะลูมิเนียมกับอนุภาคคอลลอยด์กลายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ขนาดใหญ่.....	17
2.10 กระบวนการ Coagulation และ Flocculation ของ FeCl <sub>3</sub> .....	19
2.11 ไตอะแกร์มที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูแลชั่นด้วยเพอริคคโลไรต์.....	19
2.12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน .....	21
2.13 ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนในน้ำ.....	22
2.14 ผลการทดลองที่สมมุติจาก One-Variable-At-A-Time ของการทดลองชุดที่ 1 – 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และปริมาตรจำเพาะของโด (Dough) ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง กำหนดอุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส.....	27
2.15 ผลการทดลองที่สมมุติจาก One-Variable-At-A-Time ของการทดลองชุดที่ 6-10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และปริมาตรจำเพาะของโด (Dough) ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง กำหนดเวลาให้คงที่ที่ 120 นาที.....	27
2.16 พื้นผิวการตอบสนองแสดงสถานะที่เหมาะสมของค่า specific volume และค่า specific volume ที่ได้จากการทดลอง One-Variable-At-A-Time .....	29
2.17 ผลตอบสนองโครงสร้างพื้นผิว.....	32
2.18 ส่วนประกอบของการออกแบบส่วนประสมกลาง .....	33
2.19 การออกแบบส่วนประสมกลาง ที่มีการศึกษา 2 ปัจจัย .....	33
3.1 แผนผังการทำงานของระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	41
4.1 ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา.....	45
4.2 ผลของปริมาณเพอริคคโลไรต์ต่อความสามารถในการกำจัดสีของน้ำตัวอย่าง.....	46
4.3 ผลของปริมาณเพอริคคโลไรต์ต่อความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์.....	47
4.4 ผลของปริมาณเพอริคคโลไรต์ต่อความขุ่นของน้ำที่ผ่านการบำบัด.....	48

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัดด้วยเพอร์ริคโคลไรต์.....	49
4.6 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการกำจัดสีของน้ำตัวอย่าง.....	49
4.7 ผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำต่อความสามารถในการกำจัดซีโอดี.....	51
4.8 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อความขุ่นของน้ำที่ผ่านการบำบัด.....	51
4.9 ค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัดด้วยเพอร์ริคโคลไรต์ที่พีเอชเริ่มต้นต่างกัน.....	52
4.10 แผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของข้อมูล จากแบบจำลอง Full quadratic.....	56
4.11 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับพยากรณ์ของข้อมูล จากแบบจำลอง Full quadratic.....	56
4.12 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับลำดับเวลา จากแบบจำลอง Full quadratic.....	56
4.13 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงอิทธิพลของปริมาณสารละลายเพอร์ริคโคลไรต์ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี.....	59
4.14 สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีในน้ำเสียหมักพิมพ์ฐานน้ำ.....	60
4.15 แผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของข้อมูล จากแบบจำลอง Full quadratic.....	64
4.16 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับพยากรณ์ของข้อมูล จากแบบจำลอง Full quadratic.....	64
4.17 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับลำดับเวลา จากแบบจำลอง Full quadratic.....	64
4.18 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงอิทธิพลของปริมาณสารละลายเพอร์ริคโคลไรต์ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี.....	66
4.19 สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียหมักพิมพ์ฐานน้ำ.....	67
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนในสารละลายเทียบกับเวลา.....	69
4.21 ผลของระยะเวลาการผ่านโอโซนต่อความสามารถในการกำจัดสี.....	70
4.22 ผลของระยะเวลาการผ่านโอโซนต่อความสามารถในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย.....	71
4.23 ผลของระยะเวลาการผ่านโอโซนต่อความสามารถในการกำจัดความขุ่นของน้ำ.....	72
4.24 พีเอชของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยโอโซนที่เวลาต่างกัน.....	72
4.25 ผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อความสามารถในการกำจัดสีด้วยกระบวนการโอโซนชั้น..	73
4.26 ผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อความสามารถในการกำจัดซีโอดี.....	74

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับความขุ่นของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น.....	75
4.28 ค่าพีเอชของน้ำเสียการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น.....	75
4.29 แผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของข้อมูล.....	77
4.30 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับพยากรณ์ของข้อมูล.....	78
4.31 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับลำดับเวลา.....	78
4.32 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงอิทธิพลของระยะเวลาการเติมโอโซน และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี.....	80
4.33 สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีในน้ำเสียหมักพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีโอโซนเนชั่น.....	81
4.34 แผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของข้อมูล.....	84
4.35 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับพยากรณ์ของข้อมูล.....	85
4.36 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับลำดับเวลา.....	85
4.37 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงอิทธิพลของระยะเวลาการเติมโอโซน และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี.....	87
4.38 สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดซีไอดีในน้ำเสียหมักพิมพ์ฐานน้ำ.....	88

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
มก.	มิลลิกรัม
มล.	มิลลิลิตร
ลบ.ซม.	ลูกบาศก์เซนติเมตร
°C	องศาเซลเซียส
Coef	ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (Coefficients)
g/L	กรัมต่อลิตร
g/m <sup>3</sup>	กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
g/mol	กรัมต่อโมล
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/L/hr	มิลลิกรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง
mol/L	โมลต่อลิตร
R <sup>2</sup>	ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R-Squared)
S	ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error)
SE Coef	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอย (Standard Error for the Estimated Coefficient)
DF	องศาความเป็นอิสระ (Degrees of Freedom)
Seq SS	ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)
Adj SS	ผลบวกกำลังสองที่ปรับค่าแล้ว (Adjusted Sum of Square)
Adj MS	ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ปรับค่าแล้ว (Adjusted Mean Square)
F	ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแปรปรวน
T	ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta_i$ )

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขยายตัวของอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ในปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2555 ถึง พ.ศ. 2560 อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์มีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นร้อยละ 3-4 ต่อปี ซึ่งบรรจุภัณฑ์หลักที่ได้รับความนิยมของตลาดคือบรรจุภัณฑ์ประเภทกระดาษ โดยในปี พ.ศ. 2559 บรรจุภัณฑ์ประเภทกระดาษมีมูลค่าการส่งออก 5,423.94 ล้านบาท (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2559) จากความต้องการที่เพิ่มขึ้นของบรรจุภัณฑ์ ส่งผลให้อุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์มีการขยายตัวสูงขึ้นตามไปด้วย การพิมพ์แบบเฟล็กโซกราฟิ (Flexographic printing) เป็นหนึ่งในวิธีการพิมพ์ที่นิยมใช้ในการพิมพ์งานหรือบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษ (Packaging Intelligent Unit, 2015) โดยหมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลาย (solvent – based ink) จัดเป็นหนึ่งในประเภทของหมึกพิมพ์ที่นิยมนำมาใช้ เนื่องจากหมึกพิมพ์ประเภทนี้จะใช้ตัวทำละลายจำพวกสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) เป็นตัวพาให้สารให้สีซึ่งเป็นส่วนประกอบของหมึกพิมพ์ไปติดกับวัสดุรองพิมพ์ ทำให้หมึกแห้งได้รวดเร็วบนวัสดุรองพิมพ์ (ไพรัช, 2544) ข้อจำกัดของหมึกพิมพ์ประเภทนี้คือ หมึกพิมพ์สามารถแห้งตัวอย่างรวดเร็วบนแม่พิมพ์ ส่งผลให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานสั้นลง นอกจากนี้การใช้ VOCs เป็นตัวทำละลายจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ และอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานอันเนื่องมาจากการสูดดมไอระเหยของสาร (ไพรัช, 2544) จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environment Protection Agency, U.S. EPA) ร่วมกับอุตสาหกรรมการพิมพ์เฟล็กโซกราฟี (Flexography) จึงร่วมมือผลักดันให้เกิดกระบวนการผลิตที่ปลอดภัยและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการรณรงค์ให้ผู้ประกอบการใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ (water-based ink) เป็นวัสดุทดแทนในการพิมพ์ (Caballero, 1994; US.EPA, 2002) ซึ่งหมึกพิมพ์ฐานน้ำนี้จะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศอันเนื่องมาจากการระเหยของตัวทำละลาย มีความปลอดภัยต่อสุขภาพอนามัยของผู้ปฏิบัติงาน รวมทั้งช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำในการพิมพ์จะก่อให้เกิดน้ำเสียที่มาจากขั้นตอนการล้างหัวพิมพ์ในปริมาณมาก อีกทั้งสารให้สีที่นิยมใช้ในหมึกพิมพ์ชนิดนี้ ได้แก่ สีย้อมชนิดเอโซ (Azo dye) อาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพ หากผู้ปฏิบัติงานได้รับสัมผัสในปริมาณที่มาก (อรชุดา, 2549) ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเอโซจะมีหมู่เอโซ (-N=N-) ซึ่งจัดเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง (อรุณี, 2556) นอกจากนี้ น้ำเสียที่เกิดจากการล้างหัวพิมพ์จะมีความเข้มข้นสูง หากไม่ได้รับการบำบัดอย่างถูกวิธีก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ความเข้มข้นของสีจะบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำ ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง ทำให้สัตว์น้ำอาจตายได้ (ชนิษฐา, 2550)

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ให้มีความเหมาะสมก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

การสร้างตะกอนและการรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) โดยใช้สารส้มหรือสารประกอบเหล็ก เป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ (Hydrofotech, 2562) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีและของแข็ง โดยเฉพาะสารแขวนลอยในน้ำ แต่จะมีกากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมากที่ต้องนำไปกำจัดต่อ (วนิดา, 2555) การออกซิเดชันด้วยโอโซนจัดเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียจากอุตสาหกรรมพอลิเอทิลีน (หทัยชนกและต่อพงศ์, 2562; Ozonotech, 2019) โอโซนซึ่งเป็นตัวออกซิแดนท์ที่รุนแรงมีประสิทธิภาพสูงในการทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสีหรือโครโมฟอร์ (Chromophores) แตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็ก ส่งผลให้สีของน้ำลดลงได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามพบว่าการนำโอโซนมาประยุกต์ใช้งานในกำจัดสีและซีไอดีในน้ำเสียจากการพิมพ์สิ่งพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ยังมีค่อนข้างจำกัด ประกอบกับการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการพิมพ์บรรจุภัณฑ์ด้วยวิธีการ Coagulation-Flocculation มุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลของแต่ละปัจจัยด้วยรูปแบบการทดลองแบบทีละปัจจัย (One-Variable-At-A-Time, OVAT) (สปีนนาและอุสารัตน์, 2561; วรากรและคณะ, 2558) ทำให้ไม่ทราบถึงอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปรที่ทำการศึกษา การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรแต่ละตัวด้วยการออกแบบการทดลองทางสถิติ (Experimental Design) ไม่เพียงช่วยลดจำนวนชุดของการทดลอง (ราชิต, 2553) และทำให้เราทราบถึงระดับนัยสำคัญหรืออิทธิพลของตัวแปรหลัก (Main effects) รวมไปถึงอิทธิพลร่วม (Interaction effects) ต่อตัวแปรตามที่ศึกษา วิธีการดังกล่าวเมื่อนำไปใช้ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) สามารถสร้างแบบจำลองเพื่อนำไปใช้การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามเป้าหมายที่กำหนดได้ (สิทธิชัย, 2559) ซึ่งจะทำให้การสรุปผลเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

งานวิจัยนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีในน้ำเสียจากการพิมพ์บรรจุภัณฑ์กระดาษด้วยระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำชนิดสีแดง ของวิธีการสร้างตะกอนและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) เทียบกับกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซน (Ozone oxidation) พร้อมกับศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้วิธีการออกแบบทางสถิติแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและซีโอทีในน้ำเสียจากการพิมพ์บรรจุภัณฑ์กระดาษด้วยระบบฟล็อกโคกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีการสร้างตะกอนและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation)

2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและซีโอทีในน้ำเสียจากการพิมพ์บรรจุภัณฑ์กระดาษด้วยระบบฟล็อกโคกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีการใช้โอโซน (Ozonation)

3. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการพิมพ์บรรจุภัณฑ์กระดาษด้วยระบบฟล็อกโคกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีการสร้างตะกอนและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) และวิธีการใช้โอโซน โดยใช้วิธีการออกแบบทางสถิติแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) พร้อมทั้งเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีและซีโอทีในน้ำเสียระหว่างวิธีการบำบัดทั้งสองวิธี

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. น้ำเสียที่ใช้ศึกษาคือ น้ำเสียจากการพิมพ์งานกล่องกระดาษด้วยระบบฟล็อกโคกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำชนิดสีแดง

2. ศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสีย ได้แก่ พีเอช สี ความขุ่น และความต้องการออกซิเจนทางเคมีหรือซีโอดี (COD)

3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอนโดยใช้การทดลองแบบทีละปัจจัย (One Variable At A Time)

ปัจจัยที่ศึกษา/ตัวแปรต้น ได้แก่

- ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ แปรค่าที่ 0 , 0.25 , 0.50 , 0.75 , 1 , 1.5 และ 2 g/L
- ค่าพีเอชของน้ำเสีย แปรค่าที่ 5, 6, 7, 8, 9 และ 10

ตัวแปรตาม ได้แก่ สี COD ความขุ่น และพีเอช

4. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีและซีโอทีในน้ำเสียด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอนโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง Central Composite Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology

5. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยวิธีการใช้โอโซนโดยใช้การทดลองแบบทีละปัจจัย (One Variable At A time)

ปัจจัยที่ศึกษา/ตัวแปรต้น ได้แก่

- ระยะเวลาที่ใช้ในการเติมโอโซนแปรค่าที่ 0, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที

- ค่าพีเอชของน้ำเสียแปรค่าที่ 3, 5, 7, 9 และ 11

ตัวแปรตาม ได้แก่ สี COD ความขุ่น และพีเอช

6. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการการกำจัดสีและซีโอटीในน้ำเสียด้วยวิธีการโอโซนชั้นโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง Central Composite Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

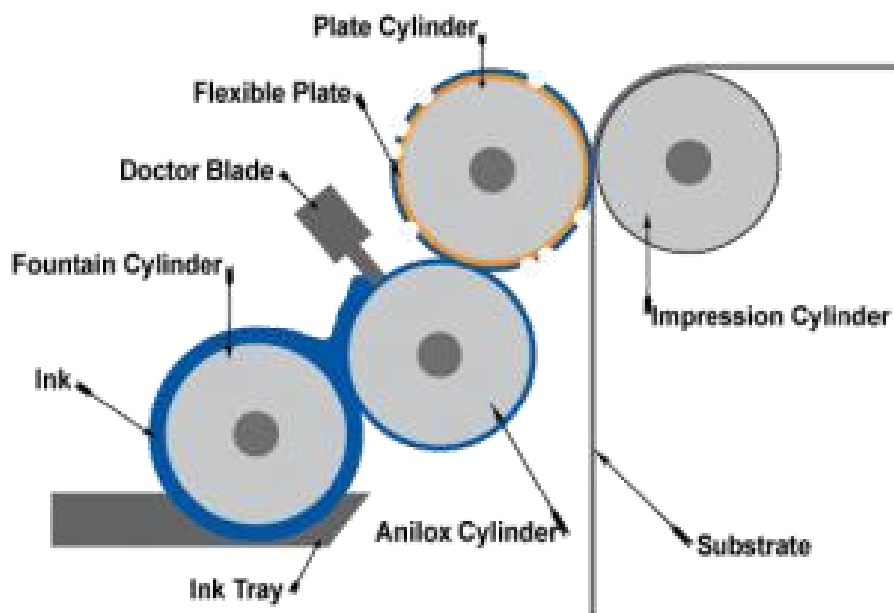
1. ได้แนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากการพิมพ์งานด้วยระบบเพล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ
2. ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการบำบัดน้ำเสียจากการพิมพ์ระบบเพล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีสร้าง-รวมตะกอนและวิธีโอโซนชั้น
3. ได้แบบจำลองที่สามารถทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสีหรือซีโอटीในน้ำเสียการพิมพ์งานด้วยระบบเพล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ ณ สภาวะการบำบัดที่เปลี่ยนไปได้
4. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีและซีโอटीในการพิมพ์งานด้วยระบบเพล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีสร้าง-รวมตะกอนและวิธีโอโซนชั้น

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การพิมพ์แบบเพล็กซ์โซกราฟิก

การพิมพ์แบบเพล็กซ์โซกราฟิก (Flexographic Printing) หรือที่เรียกสั้นๆว่า ระบบเพล็กซ์โซจัดเป็นระบบการพิมพ์ประเภทหนึ่งที่นิยมใช้ในการผลิตสิ่งพิมพ์บนวัสดุรองพิมพ์หลากหลายประเภท เช่น กล่องลูกฟูก กล่องกระดาษแข็ง ฉลาก ป้าย กล่องกระดาษ กระดาษชำระ ถุงและซองพลาสติก เป็นต้น (วีระพงษ์, 2559; Packaging Intelligent Unit, 2015) การพิมพ์ประเภทนี้เป็นการพิมพ์พื้นฐนที่ใช้แผ่นยาง/พอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น (Flexible plate) เป็นแม่พิมพ์ (รูปที่ 2.1) โดยแผ่นแม่พิมพ์จะถูกกัดผิวจนเหลือส่วนที่เป็นภาพนูนสำหรับรับหมึกพิมพ์ไว้ การถ่ายทอดภาพบนแม่พิมพ์ลงบนวัสดุที่ใช้พิมพ์จะใช้หลักการกดทับ (วีระพงษ์, 2559) สำหรับระบบการพิมพ์โดยทั่วไปเป็นดังรูปที่ 2.1 โดยจะเริ่มจากการหมุนของลูกกลิ้งยาง (Fountain Cylinder) ที่จุ่มอยู่ในอ่างหมึก (Ink Tray) ซึ่งจะทำให้ลูกกลิ้งถูกเคลือบด้วยหมึกแบบบางๆ ลูกกลิ้งดังกล่าวจะพาหมึกมาติดที่ลูกกลิ้งอนิลอกซ์ที่ทำจากโครเมียมหรือเซรามิก (anilox roll) ซึ่งจะถ่ายทอดหมึกไปให้ลูกกลิ้งอีกลูกที่มีแม่พิมพ์ยางหุ้ม (Plate cylinder) จากนั้นแม่พิมพ์ยางจะถ่ายทอดหมึกลงบนผิวของวัตถุที่ต้องการจะพิมพ์หรือที่เรียกว่าวัสดุรองพิมพ์ (substrate) ที่ป้อนเข้ามา โดยมีลูกกลิ้งเหล็กอีกอันติดอยู่เป็นลูกกลิ้งกด (Impression Cylinder) คอยกดให้หมึกซึมไปที่ผิวและเกิดเป็นภาพพิมพ์บนวัสดุรองพิมพ์อย่างทั่วถึง



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของระบบพิมพ์เพล็กซ์โซกราฟิก

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

ไอศิก้า (2547) ได้สรุปข้อดี-ข้อด้อยของการพิมพ์แบบเฟล็กโซกราฟิ กไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดี-ข้อด้อยของการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟิ

ข้อดี	ข้อด้อย
1. แม่พิมพ์มีราคาถูกเมื่อเทียบกับการพิมพ์ในระบบอื่นๆ	1. เกิดการยืดตัวของแม่พิมพ์และวัสดุที่ใช้พิมพ์ ต้องมีการยืดตัวในขั้นตอนในการทำอาร์ตเวิร์ค
2. ผลิตสิ่งพิมพ์บนวัสดุสิ่งพิมพ์ได้หลากหลายประเภท	2. การปรับแก้ไขการยืดตัวของแม่พิมพ์ทำได้ยากและใช้เวลามาก
3. การเก็บรักษาแม่พิมพ์มีวิธีและขั้นตอนการเก็บได้ง่าย	3. ภาพที่เกิดบนวัสดุที่ใช้พิมพ์จะมีความชัดเจนที่น้อยกว่าการพิมพ์ระบบอื่นๆ
4. การกระจายของหมึกพิมพ์บนวัสดุพิมพ์ได้ดีเนื่องจากหมึกมีลักษณะเหลวและแม่พิมพ์ยืดหยุ่นตัว	4.การควบคุมค่อนข้างเป็นไปได้ยากมีความแตกต่างของวัสดุแต่ละประเภทที่นำมาใช้เป็นวัสดุพิมพ์
5. สามารถพิมพ์ภาพที่มีลวดลายต่อเนื่องได้	

ที่มา : ไอศิก้า (2547)

### 2.1.1 ประเภทของหมึกพิมพ์สำหรับระบบเฟล็กโซกราฟิ

หมึกพิมพ์ที่ใช้กับการพิมพ์แบบเฟล็กโซกราฟิ กจะเป็นหมึกพิมพ์แบบเหลว สามารถจำแนกออกได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ ตามชนิดของตัวทำละลายที่ใช้เป็นตัวพาให้หมึกไปสัมผัสกับวัสดุรองพิมพ์ ดังนี้

#### 1. หมึกพิมพ์แบบยูวี (UV-ink)

หมึกพิมพ์ชนิดนี้เป็นหมึกพิมพ์ที่ไม่มีตัวทำละลายเป็นส่วนประกอบ ทำให้ไม่เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ สามารถแห้งตัวได้เร็ว โดยมีกลไกการแห้งตัวด้วยปฏิกิริยา Polymerization จากแสงยูวี ที่ไปกระตุ้นสารไวแสง (Photo-initiator) ในหมึกพิมพ์ ซึ่งจะช่วยให้เรซินเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็งและเกาะติดกับวัสดุที่พิมพ์ทันที สิ่งพิมพ์จึงมีลักษณะ มันวาวสูง ทนทาน ต่อสารเคมี ลักษณะเด่นของหมึกพิมพ์ยูวีสรุปได้ดังนี้ (ไพรัช, 2544)

- ใช้เวลาในการแห้งตัวน้อย ลดเวลาในการพิมพ์ให้สั้นลง ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่มีการระเหยของตัวทำละลาย
- สามารถใช้กับกระดาษคุณภาพต่ำได้และช่วยเพิ่มคุณภาพของกระดาษให้ดีขึ้น
- สามารถใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูงได้

หมึกพิมพ์ยูวี มีราคาแพง ไม่สามารถพิมพ์ลงบนวัสดุรองพิมพ์ที่มีความหนาแน่นมากได้ อีกทั้งเป็นการพิมพ์ที่ใช้ความร้อนสูง ซึ่งอาจทำให้เกิดการบิดงอและเสียรูปของวัสดุรองพิมพ์

## 2. หมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลาย (solvent-based ink)

หมึกพิมพ์ประเภทนี้มักใช้สำหรับพิมพ์บนวัสดุรองพิมพ์ที่เป็นกระดาษหรือฟิล์มพลาสติก ทั้งนี้ตัวทำละลายที่ใช้จำเป็นต้องมีคุณสมบัติที่ระเหยได้ง่ายและเร็ว เช่น เอทานอลหรือไกลคอล (ไพร์ซัน, 2544) มีกลไกการแห้งตัวแบบใช้ความร้อนอบเพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกจากหมึก ข้อดีและข้อเสียของหมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลายสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อดี-ข้อเสียของหมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลาย

ข้อดี	ข้อเสีย
1. สามารถแห้งตัวบนแม่พิมพ์ได้รวดเร็ว	1. หมึกพิมพ์มีการแห้งตัวบนแม่พิมพ์ ทำให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานสั้นลง
2. มีความมันวาวสูง	2. ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ
3. สิ่งพิมพ์มีความทนทานต่อแสงสีไม่ซีดจางเร็ว	3. เป็นอันตรายต่อสุขภาพของช่างพิมพ์หรือผู้ได้รับสัมผัส

ที่มา : ไพร์ซัน, 2544

## 3. หมึกพิมพ์ฐานน้ำ (water-based ink)

หมึกพิมพ์ประเภทนี้เป็นหมึกพิมพ์ที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายและอาศัยน้ำในการปรับความหนืด อีกทั้งยังมีการใช้เบส เช่น ammonia เพื่อละลายสารยึด (binder) ของหมึกพิมพ์ให้รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยถ้ามีเบสไม่เพียงพอ สารยึดจะเริ่มตกตะกอนหรือเกิดการแยกชั้นของหมึกพิมพ์ก่อนที่จะถูกพิมพ์ ส่งผลให้ค่าพีเอชของหมึกพิมพ์ลดลง ค่าความหนืดของหมึกพิมพ์จะเพิ่มขึ้น ทำให้หมึกพิมพ์เกิดการรวมตัวเป็นคอลลอยด์ (ไกรภพ, 2551) โดยหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำมีข้อดี-ข้อจำกัดสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อดี-ข้อจำกัดของหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ

ข้อดี	ข้อจำกัด
1. ลดปัญหามลพิษทางอากาศ	1. น้ำมีแรงตึงผิวสูงทำให้พิมพ์บนวัสดุพวกพลาสติกติดได้ยาก
2. ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน	2. ไม่สามารถแห้งตัวบนแม่พิมพ์ได้รวดเร็วจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำให้แห้ง
3. ไม่เป็นอันตรายต่อลูกกลิ้งหมึกและแม่พิมพ์ที่เป็นยางและพอลิเมอร์	3. หากมีการใช้ความร้อนที่สูงเกินไปจะทำให้วัสดุที่ใช้พิมพ์เกิดการเปลี่ยนสภาพ
4. การเตรียมพร้อมพิมพ์ทำได้ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายน้อย	4. ใช้น้ำเพื่อล้างลูกกลิ้งและแม่พิมพ์จำนวนมาก

ที่มา : ชีระและชุติมา (2539)

นอกจากจำแนกตามชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ หมึกพิมพ์ที่ใช้กับระบบเฟล็กโซกราฟียังสามารถจำแนกตามสารให้สีออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่หมึกพิมพ์ที่ใช้สีย้อม (dye-base ink) และหมึกพิมพ์ที่ใช้ผงสี (pigment-based ink) โดยหมึกพิมพ์แบบหลังนิยมใช้มากกว่า ความแตกต่างที่สำคัญของหมึกพิมพ์สองประเภทนี้ แสดงดังตารางที่ 2.4

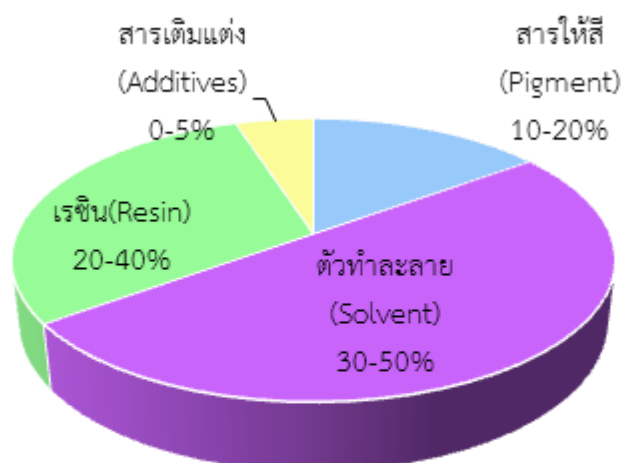
ตารางที่ 2.4 ข้อแตกต่างของหมึกพิมพ์ที่ใช้สีย้อมและหมึกพิมพ์ที่ใช้ผงสี

หมึกพิมพ์ที่ใช้สีย้อม	หมึกพิมพ์ที่ใช้ผงสี
1. สามารถละลายในตัวทำละลายต่างๆได้	1. ไม่ละลายในตัวทำละลาย แต่กระจายตัวอยู่ในตัวทำละลาย
2. เมื่อละลายในตัวทำละลายจะไม่เกิดการกระเจิงของแสง	2. เมื่อละลายในตัวทำละลายจะเกิดการกระเจิงของแสง
3. เมื่อสิ่งพิมพ์ที่พิมพ์โดยใช้หมึกพิมพ์ที่ใช้สีย้อมได้รับแสงเป็นเวลานานจะเกิดการซีดจาง	3. เมื่อสิ่งพิมพ์ที่พิมพ์โดยใช้หมึกพิมพ์ที่ใช้ผงสีได้รับแสงเป็นเวลานานจะไม่ซีดจาง
4. หมึกพิมพ์มีลักษณะใส	4. หมึกพิมพ์มีลักษณะทึบแสง

ที่มา : ไพร์ซัน (2544)

### 2.1.2 องค์ประกอบของหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี

หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีมีองค์ประกอบสำคัญ 4 ส่วน ดังรูปที่ 2.2 ได้แก่ สารให้สี (pigment) ตัวทำละลาย (solvent) เรซิน (resin) และสารเติมแต่ง (additives) มีสัดส่วนผสมโดยปริมาณของแต่ละองค์ประกอบตามลำดับดังนี้ สารให้สี 10 - 20% ตัวทำละลาย คือ น้ำ 30 - 50% เรซินซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของตัวพา 20 - 40% และสารเติมแต่ง 0-5% (ศุภณีย์และแววบุญ, 2557)



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี

### 2.1.2.1 สารให้สี

สารให้สีในหมึกพิมพ์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1. สีย้อม (dye) เป็นสารให้สีประเภทที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายต่างๆ ใช้งานง่าย สีย้อมมีสีสดใส แต่ส่วนใหญ่เกิดการซีดจางได้ง่ายเมื่อได้รับแสงสว่างเป็นเวลานาน เหมาะสำหรับ การพิมพ์งานที่ใช้ในที่ร่ม

2. ผงสี (pigment) มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ เพียงแต่กระจายตัวอยู่ในตัวทำละลายเท่านั้น ทำให้หมึกที่มีผงสีมีสภาพเป็นสารแขวนลอย นอกจากนี้ ยังมีความสามารถในการกระเจิงแสง ทำให้หมึกพิมพ์ที่มีผงสีเป็นองค์ประกอบมีความทึบแสงมากกว่า อีกทั้งยังมีสภาพทนต่อแสง สีที่พิมพ์ด้วยหมึกประเภทนี้จึงซีดจางช้ากว่า อาจจำแนกออกเป็นประเภท ใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภทตามองค์ประกอบทางเคมี คือ ผงสีอินทรีย์ และผงสีอนินทรีย์ (ธีระและชุตินา, 2539)

### 2.1.2.2 ตัวพา

ตัวพาหลัก คือ น้ำและเรซิน โดยน้ำทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ซึ่งจะละลายเรซินและ น้ำมันเพื่อผลิตเป็นวารีนิช รวมทั้งละลายสารเติมแต่งต่างๆ ที่เติมเข้าไปในหมึก ส่วนเรซิน ทำหน้าที่เป็นตัวยึด (binder) มีบทบาทในการยึดผงสีให้ติดแน่นอยู่บนวัสดุพิมพ์ (ธีระและชุตินา, 2539) นิยมใช้อะคริลิกเรซินซึ่งละลายได้ในตัว มีข้อดีหลายประการ เช่น ทนทานต่อการขีดถูและความร้อน ไม่เกิดฟอง พิมพ์ติดได้ดี ให้ความมันวาว แห้งตัวเร็ว อายุการใช้งานนาน การใช้งานของหมึกพิมพ์ฐานน้ำ มักจะเกิดฟองมากเวลาผสม จึงต้องใช้สารต้านการก่อฟองเพื่อช่วยลดฟอง ตัวพาที่ใช้อะคริลิกเรซินจะ มีความยืดหยุ่นมากขึ้นเมื่อผสมพอลิสไตรีน การใส่อะคริลิกเรซินมากไป จะทำให้หมึกแห้งช้า ถ้าใส่น้อยไปผงสีจะกระจายตัวไม่ดี ไม่ทนต่อการขีดถูและไม่ทนน้ำ

### 2.1.2.3 สารเติมแต่ง

สารเติมแต่ง เป็นสารที่เติมเพื่อปรับแต่งหรือเพิ่มสมบัติต่างๆ ที่ต้องการให้แก่หมึกพิมพ์ ทั้งนี้การเลือกใช้สารเติมแต่งต้องพิจารณาจากแรงเฉือนของแต่ละเครื่องพิมพ์และสมบัติของสิ่งพิมพ์ที่ต้องการ ได้แก่

1. สารเพิ่มเนื้อหมึก (extender) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต
2. สารกำจัดฟอง (defoamer) เช่น ซิลิโคน และน้ำมันแร่ซึ่งช่วยให้ฟองที่จมอยู่ก้นภาชนะด้านล่างลอยขึ้นมาบนผิวด้านบน และแตกออก
3. แวกซ์ ช่วยให้หมึกพิมพ์ทนทานต่อการขีดถู ทนน้ำหรือกันน้ำได้มีหลายแบบ ทั้ง แวกซ์แบบแข็งและแบบอ่อน ถ้าใช้แวกซ์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะปกปิดผิวได้ดี ช่วยให้เงางาม
4. สารลดแรงตึงผิว (surfactant) คือ สารที่เติมลงไป ในหมึกพิมพ์เพื่อลดแรงตึงผิว ทำให้หมึกพิมพ์เปียกและยึดติดกับวัสดุพิมพ์ เช่น กระดาษเคลือบผิวได้ดีขึ้น เพราะกระดาษเคลือบผิวจะมีพลังงานผิวต่ำ แต่ใช้ปริมาณน้อยในงานพิมพ์บนกล่องกระดาษลูกฟูกซึ่งมีรูพรุน จึงไม่จำเป็นต้องใช้ในปริมาณมาก หากใช้มากเกินไปจะทำให้เกิดฟองในหมึกพิมพ์

5. สารทำให้เปียก (wetting agent) และสารช่วยกระจายตัว (dispersing agent) เป็นสารพวกโคพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ช่วยให้เกิดการเปียกดีขึ้น ป้องกันไม่ให้อนุภาคผงสีจับกันเป็นก้อน ทำให้ผงสีกระจายตัวเป็นหมึก และอยู่ในสภาพที่เสถียร ช่วยปรับความหนืดให้เหมาะสม ทำให้ผงสีในหมึกพิมพ์ถ่ายโอนลงบนกระดาษได้ดีจึงทำให้พิมพ์ได้ดี (ศุภณีย์และแววบุญ, 2557)

### 2.1.3 การทำความสะอาดและดูแลรักษาลูกกลิ้งอนิลลอกซ์ (anilox roll)

ลูกกลิ้งอนิลลอกซ์ (anilox roll) เป็นหัวใจสำคัญของคุณภาพของงานพิมพ์จากการพิมพ์ด้วยระบบเพลตโซกราฟี เนื่องจากลูกกลิ้งอนิลลอกซ์มีหน้าที่ในการถ่ายโอนหมึกพิมพ์ลงสู่วัสดุรองรับ ดังนั้นเมื่อเสร็จงานพิมพ์ทุกครั้งต้องทำความสะอาดลูกกลิ้งแอนิล็อกซ์โดยทันทีด้วยวัสดุและอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับชนิดของลูกกลิ้งแอนิล็อกซ์ เพื่อป้องกันไม่ให้หมึกพิมพ์แห้งตัวในบ่อหมึก ซึ่งจะทำให้ปริมาณการจ่ายหมึกพิมพ์ของลูกกลิ้งแอนิล็อกซ์ไม่ถูกต้อง อาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับส่วนใดส่วนหนึ่งของเครื่องพิมพ์และทำให้คุณภาพงานพิมพ์ต่ำลงได้ ผู้ปฏิบัติงานจึงต้องมีการทำความสะอาดลูกกลิ้งอนิลลอกซ์ทุกครั้งหลังการใช้งาน ซึ่งการทำความสะอาดลูกกลิ้งอนิลลอกซ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีดังนี้ (นิพนธ์, 2557)

#### 1. การใช้แปรงสแตนเลสร่วมกับน้ำยาทำความสะอาด

วิธีนี้มีความง่ายต่อการปฏิบัติ สะดวก สามารถทำได้ทันทีหลังจากการพิมพ์จึงเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย การใช้แปรงสแตนเลสร่วมกับน้ำยาทำความสะอาดขัด (รูปที่ 2.3) ควรทำทุกครั้งทันทีหลังจากเสร็จงานพิมพ์ โดยใช้มือขัดคู่กับแปรงสแตนเลสและน้ำยาทำความสะอาด เช่น ผลิตภัณฑ์ซักล้าง ผงซักฟอก เป็นต้น เพื่อป้องกันไม่ให้หมึกพิมพ์แห้งตัวอุดตันในอ่างหมึกและใช้น้ำธรรมดาล้างทำความสะอาดอีกครั้ง



รูปที่ 2.3 การใช้แปรงสแตนเลสร่วมกับน้ำยาทำความสะอาด

ที่มา <http://www.harperiamge.com/AniloxRolls/Anilox-Guides/Care-and-Cleaning>

## 2. การใช้เครื่องล้างทำความสะอาดระบบอัลตราโซนิก

เป็นการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูงๆในการทำทำความสะอาด (รูปที่ 2.4) ซึ่งการใช้วิธีนี้จะสามารถทำความสะอาดได้แม้ในบริเวณกันหลุมอ่างหมึกที่ยากต่อการขัดล้างทำความสะอาด แต่มีข้อเสียคือ การใช้คลื่นเสียงทำความสะอาดในระยะเวลาที่นานเกินไป คลื่นเสียงจะไปทำลายผิวหน้าเซรามิกได้



รูปที่ 2.4 การใช้เครื่องล้างทำความสะอาดระบบอัลตราโซนิก

ที่มา <http://www.harperiamge.com/AniloxRolls/Anilox-Guides/Care-and-Cleaning>

## 3. การใช้เครื่องทำความสะอาดระบบอัตโนมัติ

การใช้เครื่องทำความสะอาดระบบอัตโนมัติ จะช่วยให้ประหยัดเวลาให้กับผู้ปฏิบัติงาน และช่วยให้การทำความสะอาดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณผิวหน้าลูกกลิ้ง (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 การใช้เครื่องทำความสะอาดระบบอัตโนมัติ

ที่มา <http://www.harperiamge.com/AniloxRolls/Anilox-Guides/Care-and-Cleaning>

### 2.1.4 ลักษณะน้ำเสียจากการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีด้วยหมึกพิมพ์ฐานน้ำ

น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการพิมพ์ด้วยระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ มีลักษณะทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี

ที่มาของงานวิจัย	คุณสมบัติของน้ำเสีย				
	pH	สี	COD	ความขุ่น	ของแข็งแขวนลอย
ปิยะฉัตร (2545)	7.70	80,200 ADMI	8,275 mg/L	*	*
อรชุดา (2549)	6.56	25.35 mg/L	16,367 mg/L	633 NTU	860 mg/L
นิตยาและคณะ (2558)	7.60	511 ADMI	276 mg/L	*	*
วรากรและคณะ (2558)	7.60	117 ADMI	1,294 mg/L	*	*

หมายเหตุ \* ไม่มีรายงาน

จากตารางที่ 2.5 พบว่าน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการพิมพ์ด้วยระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ มีค่าพีเอชเป็นกรด-ด่างเล็กน้อยระหว่าง 6.5 – 7.7 จัดเป็นน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง นอกจากนี้ยังมีสีเข้มเนื่องจากหมึกพิมพ์ส่วนใหญ่มีสีเอโซเป็นสารให้สี ซึ่งสีเอโซนี้มีคุณสมบัติให้แสงสว่างสดใสและความเข้มสูง จึงส่งผลให้มีความขุ่นและปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงตามไปด้วย

## 2.2 กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation)

กระบวนการสร้างและรวมตะกอน จัดเป็นกระบวนการบำบัดน้ำด้วยวิธีการทางเคมีที่ถูกนำมาใช้อย่างมากในกระบวนการผลิตประปาและการบำบัดน้ำเสีย กระบวนการดังกล่าวสามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์และสารแขวนลอยต่างๆ ในน้ำได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำดื่มเพื่อกำจัดอินทรีย์วัตถุตามธรรมชาติ (Natural Organic Matter, NOM) จุลินทรีย์ที่ก่อโรค (pathogen) สารหนู และฟลูออไรด์ (IWA Publishing, 2017)

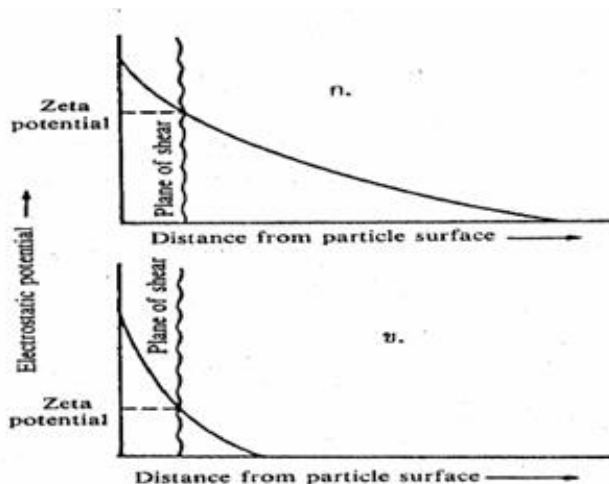
### 2.2.1 ขั้นตอนที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการสร้างและรวมตะกอน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และฟลอคคูเลชัน (Flocculation) ซึ่งมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องเป็นดังนี้

### 1. โคแอกกูเลชัน (Coagulation)

โคแอกกูเลชัน (Coagulation) เป็นขั้นตอนการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และสารแขวนลอยในน้ำด้วยการเติมสารเคมีที่มีประจุตรงข้าม หรือที่เรียกว่าโคแอกกูแลนต์ (coagulants) ลงไปในน้ำ สารเคมีที่เติมลงไปนี้จะไปสะเทินประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์หรือสารแขวนลอยในน้ำ และทำให้เกิดการรวมตัวกัน การปั่นกววนเร็วถูกนำมาใช้เพื่อให้โคแอกกูแลนต์สามารถสัมผัสกับอนุภาคต่างๆ ในน้ำได้มากขึ้น ทั้งนี้โคแอกกูแลนต์ที่เติมนั้นสามารถทำให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (Destabilization) ด้วยกลไกสำคัญ 4 แบบ ดังนี้ (สวีณา, 2543)

(ก) กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) โดยการเติมสารเคมีที่มีประจุตรงข้าม กันกับคอลลอยด์ในชั้นกระจายให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ที่ผิวนอกสุดของน้ำลดลงเนื่องจากสารเคมีที่เป็นประจุบวกจะเข้าไปอยู่ใกล้กับผิวของอนุภาคคอลลอยด์ที่เป็นประจุลบเพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคของคอลลอยด์มีประจุลบลดลงรูปที่ 2.6



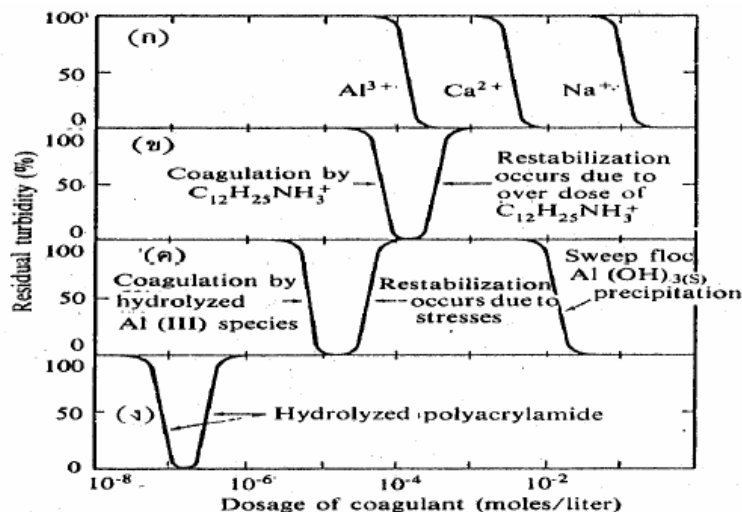
รูปที่ 2.6 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงข้ามให้กับคอลลอยด์

(ก) ก่อนเติมไอออน และ (ข) หลังจากการเติมไอออนแล้ว

ที่มา : มั่นสิน (2542)

โดยที่ไอออนของสารเคมีที่เติมลงไปมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 1, 2, 3 จะมีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจายเป็นสัดส่วน 1: 10: 100 ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น  $Al^{3+}$  จะสามารถลดความหนาของชั้นกระจายได้ดีกว่า  $Ca^{2+}$  การทำลายเสถียรภาพโดยการลดความหนาของชั้นกระจายสามารถทำได้โดยการเติมสารเคมีที่มีประจุตรงข้ามกับคอลลอยด์มีข้อที่ต้องพิจารณา ได้แก่

- ปริมาณสารที่มีไอออนประจุบวก ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ด้วยวิธีลดความหนาของชั้นกระจาย ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์
- ประจุของคอลลอยด์บางชนิดจะไม่สามารถเปลี่ยนจากประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวกได้ (Charge Reversal) ไม่ว่าจะเติมไอออนบวกมากเท่าไรก็ตาม ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลของการเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ  
ที่มา : มั่นสิน (2542)

(ข) กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization) โดยใส่สารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถให้ประจุตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์และดูดติดผิวได้ ซึ่งจะมีผลในการลดศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

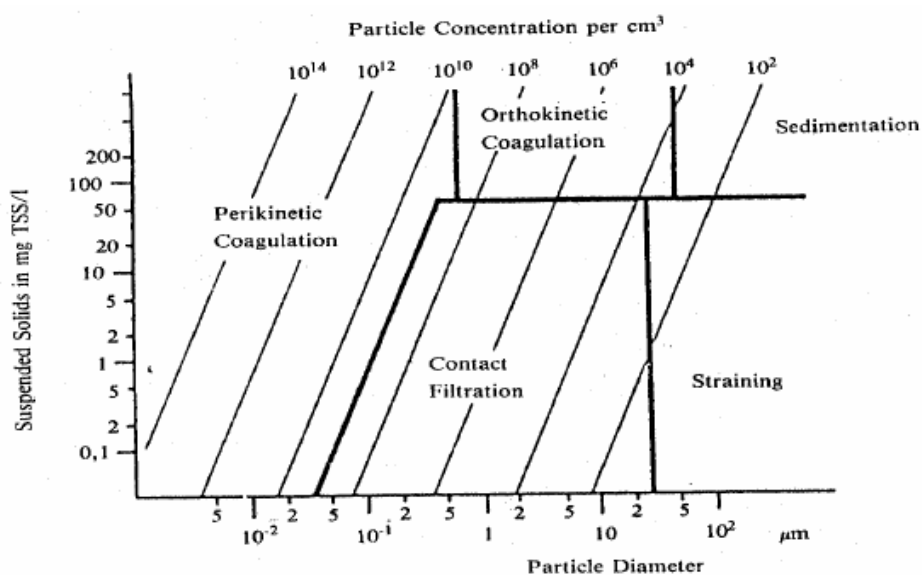
(ค) กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation) ถ้าเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไป在水里ในปริมาณที่เพียงพอจะเกิดการตกผลึกอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจถูกผลึกของสารประกอบเกลือจับตัวไว้ภายในกลายเป็นแกนของผลึกที่เกิดขึ้นจึงเป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและเกิดการตกตะกอนได้ เช่น การใส่สารส้มให้เกิดผลึก  $Al(OH)_3$  เหมือนวุ้นสีขาว เพื่อให้อนุภาคมาเกาะแล้วรวมกันเป็นฟล็อก กลไกการใช้ผลึกสารอินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรกคือ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum Dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ น้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้โคแอกกูแลนต์จำนวนมากจึงจะเกิดโคแอกกูแลชั่นได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้โคแอกกูแลนต์น้อยกว่า เหตุผลคือน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้นแม้ว่าการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นแล้วก็ตาม แต่โคแอกกูแลชั่นอาจไม่เกิดได้ดีเท่าที่ควร จึงต้องมีการใช้สารรวมตะกอนในปริมาณสูงเพื่อสร้างผลึกจำนวนมากๆสำหรับเป็นสารเป่าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูง โอกาสสัมผัสย่อมมีมาก จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป่าสัมผัสจากภายนอกมากเท่ากับกรณีแรก

(ง) กลไกสร้างสะพานเชื่อมต่ออนุภาคคอลลอยด์ เป็นการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยสารอินทรีย์ รวมทั้งใช้สารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เมื่อใส่ลงในน้ำจะให้ไอออน

เป็นจำนวนมากเพื่อเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์และยังมีแขนเชื่อมติดกับอนุภาคคอลลอยด์ตัวอื่นๆ เพื่อทำให้เกิดฟล็อก

## 2. ฟลอคคูลेशन (Flocculation)

เป็นขั้นตอนการปั่นกววนช้า ซึ่งจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์และสารแขวนลอยทั้งหมดเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มาสัมผัสและเกาะติดระหว่างกันจนเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือเรียกว่า ฟลอค (Floc) พรศักดิ์ (2552) ได้ระบุว่ากระบวนการเกิดฟลอคคูลेशनมีหลายวิธีแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เภณต์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคต่างๆ ทั้ง 5 ประเภท  
ที่มา มั่นสิน (2542)

(ก) ทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสเกิดขึ้น วิธีปฏิบัตินี้เป็นที่นิยมมากที่สุด คือ กวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆ ของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกัน เป็นเหตุให้อนุภาคต่างๆ มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่รวดเร็วจนเกินไป มิฉะนั้นแล้วฟลอคที่เกิดขึ้นอาจแตกหรือหลุดออกจากกันได้ วิธีนี้เป็นวิธีธรรมดาที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ในการสร้างสัมผัสหรือสร้างฟลอคคูลेशनเรียกว่า ถังกวนช้า และวิธีการสร้างสัมผัสแบบนี้มีชื่อเทคนิคว่า Orthokinetic Flocculation อนุภาคคอลลอยด์ที่มีฟลอคคูลेशनแบบนี้ควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1 – 1 ไมครอน

(ข) การสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ อาจเกิดขึ้นได้เองโดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์กระทบกันเองหรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การสัมผัสแบบนี้จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย จึงอาจกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนเรียกว่า Perikinetic Flocculation

(ค) การสัมผัสระหว่างอนุภาคเกิดขึ้น เนื่องจากการตกตะกอนที่มีอัตราไม่เท่ากันของอนุภาคต่างๆ ฟล็อกคูเลชันด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นพร้อมๆกับการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้เลย อนุภาคที่สามารถสร้างฟล็อกคูเลชันแบบนี้ได้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในทางปฏิบัติอนุภาคที่มีขนาดดังกล่าวอาจเกิดฟล็อกคูเลชันมาก่อนแล้วครั้งหนึ่ง เมื่อมาถึงการตกตะกอนจึงเกิดฟล็อกคูเลชันอีกในขณะที่มีการตกตะกอน

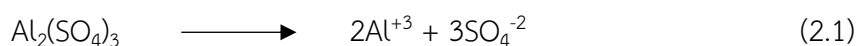
(ง) ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 –1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟล็อกคูเลชันอาจเกิดขึ้นโดยการสร้างสัมผัสแบบ Orthokinetic Flocculation แต่อาจเกิดขึ้นช้าเนื่องจากโอกาสสัมผัสน้อย

(จ) ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอนแต่มีความเข้มข้นต่ำ การสร้างสัมผัสอาจใช้วิธีกรองได้เช่นกัน แต่สารกรองที่ใช้ควรมีขนาดใหญ่กว่าทราย

## 2.2.2 ชนิดของโคแอกกูแลนต์

### 1. สารส้ม (Aluminium sulphate, Alum)

สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่างๆ และหาซื้อได้ง่ายในราคาที่ไม่แพงมาก สารส้มมีสูตรโมเลกุล คือ  $Al_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O$  (พรตักดี, 2552) เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำจะแตกตัวให้อะไอออนบวกและลบดังปฏิกิริยาในสมการที่ 2.1



เมื่อเติมสารส้มในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (2.2)



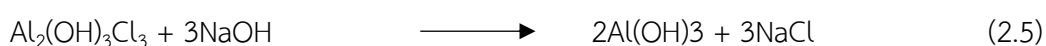
ถ้าในน้ำมีสภาพต่างที่เพียงพอ  $Al(OH)_3$  ที่เกิดขึ้นจะไปเกาะกันเป็นโพลิเมอร์ซึ่งช่วยในการรวมตะกอน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ (2.3)



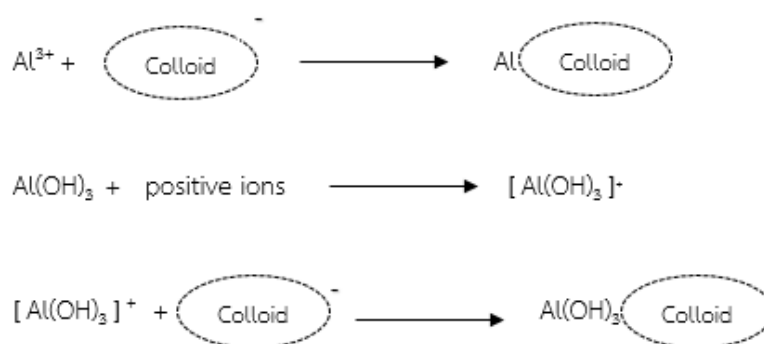
ถ้าในน้ำมีสภาพต่างไม่เพียงพอต้องเติมสารเพิ่มสภาพต่างเช่น ปูนขาว ( $Ca(OH)_2$ ) โซดาแอซ ( $Na_2CO_3$ ) เป็นต้น (มัลลิกา, 2556)

## 2. พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum Chloride, PACl)

พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารเคมีที่มีสูตรโมเลกุลเรียงต่อกันเป็นสายยาว มีสูตรโมเลกุลคือ  $(Al_n(OH)_mCl_{3n-m})_i$  เป็นสารสร้างตะกอนที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเตรียมขึ้นโดยอลูมิเนียมที่เป็น  $Al_2O_3$  จะทำปฏิกิริยากับ HCl ที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้รวมตัวเป็น  $AlCl_3$  หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยากับเบสที่อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้รวมตัวเป็นอลูมิเนียมพอลิเมอร์ ซึ่งเมื่อเติมสารส้มลงไปในสารละลายนี้ สารส้มจะไปลดความเข้มข้นของ  $Al_2O_3$  ให้เหลือร้อยละ 10 – 11 และเติมซัลเฟตลงไปเพื่อไปทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอลูมิเนียม 2 อะตอม ทำให้สามารถสร้างตะกอนได้เร็วกว่าสารส้ม ใช้เวลา กวนเร็วน้อยกว่า แต่มีราคาแพงและไม่สามารถสร้างตะกอนได้ดีในน้ำที่มีความเข้มข้นสูงๆ (สวีณา, 2543) ดังปฏิกิริยาที่ 2.4 – 2.6



$Al(OH)_3$  ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์ในน้ำเหมือนกับปฏิกิริยาของสารส้มคือ แยกตัวให้  $Al^{3+}$  ซึ่งจะรวมกับอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์จนสามารถจับกับอนุภาคคอลลอยด์อื่นกลายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ขนาดใหญ่ได้ ดังรูปที่ 2.9 นอกจากนี้  $Al^{3+}$  ยังทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็น  $Al(OH)_3$  เป็นตะกอนเล็กๆสามารถรวมตัวกับอนุภาคอื่นที่มีประจุบวก เกิดเป็นตะกอนที่มีประจุบวกไปจับกับอนุภาคคอลลอยด์กลายเป็นตะกอนใหญ่ได้เช่นกัน (มันสิน, 2542)

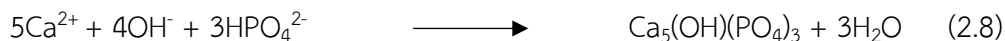


รูปที่ 2.9 การรวมตัวของอลูมิเนียมกับอนุภาคคอลลอยด์กลายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ขนาดใหญ่

## 3. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, $Ca(OH)_2$ )

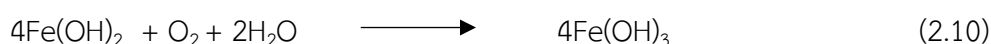
แคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาว มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยทำให้เกิดตกตะกอนผลึกในรูปหินปูน การเก็บรักษาต้องระวังอย่าให้แห้งจะต้องเก็บรักษาในลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว

(slurry) แต่มีราคาถูก เมื่อเติมลงไปใต้น้ำ จะทำปฏิกิริยากับต่างและฟอสฟอรัสที่มีอยู่กลายเป็นสารตัวใหม่จึงสามารถตกตะกอนได้ ดังปฏิกิริยาที่ 2.7 – 2.8



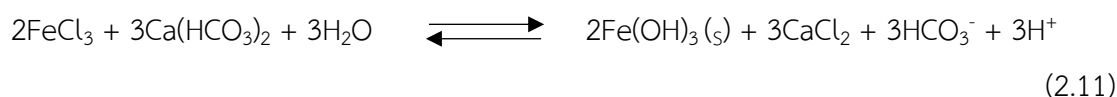
#### 4. เฟอร์รัสซัลเฟตและปูนขาว (Ferrous Sulfate and Lime)

เฟอร์รัสซัลเฟตจะทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดเป็น  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ในสภาพที่มีค่าพีเอชมากกว่า 8.5 หากพีเอชต่ำกว่า 8.5 เฟอร์รัสซัลเฟตเพียงอย่างเดียวจะไม่เกิดตะกอนผลึก จำเป็นต้องเติมปูนขาวลงไป ด้วยซึ่งการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตร่วมกับปูนขาวนิยมใช้ในการกำจัดน้ำกระด้างและใช้ในการตกตะกอนเหล็กและแมงกานีส (สวีณา, 2543) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังแสดงในสมการที่ 2.9 – 2.10



#### 5. เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride, $\text{FeCl}_3$ )

เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่แตกตัวในน้ำ รูปแบบของสารประกอบเหล็กเมื่อละลายน้ำนั้น จะมีประจุบวก สามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ประจุลบที่เกิดจากของแข็งในน้ำตะกอน ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุของการรวมกลุ่มของตะกอนเฟอร์ริกคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับ Bicarbonate alkalinity ในน้ำตะกอนและเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์กับ Bicarbonate alkalinity ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 2.11 – 2.12



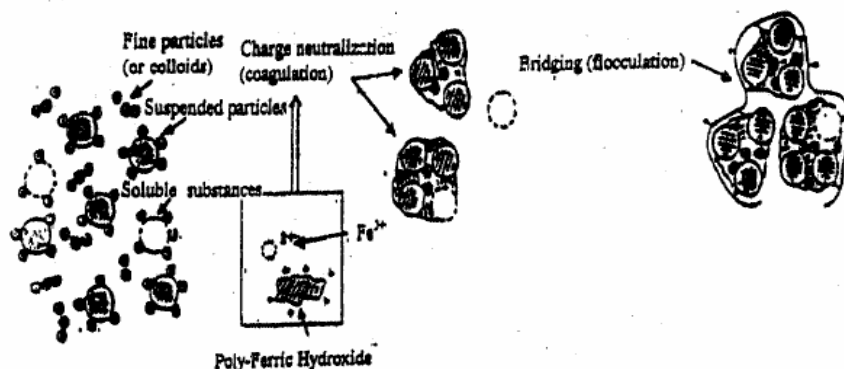
เฟอร์ริกคลอไรด์ จัดเป็นโคแอกกูแลนต์ที่ให้ผลดีกว่าสารส้มเมื่อนำไปใช้ในการบำบัดน้ำอ่อนที่มีสีเข้ม เมื่อเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ให้กับน้ำ จะมีผลึกเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นดัง (มันสิน, 2542)



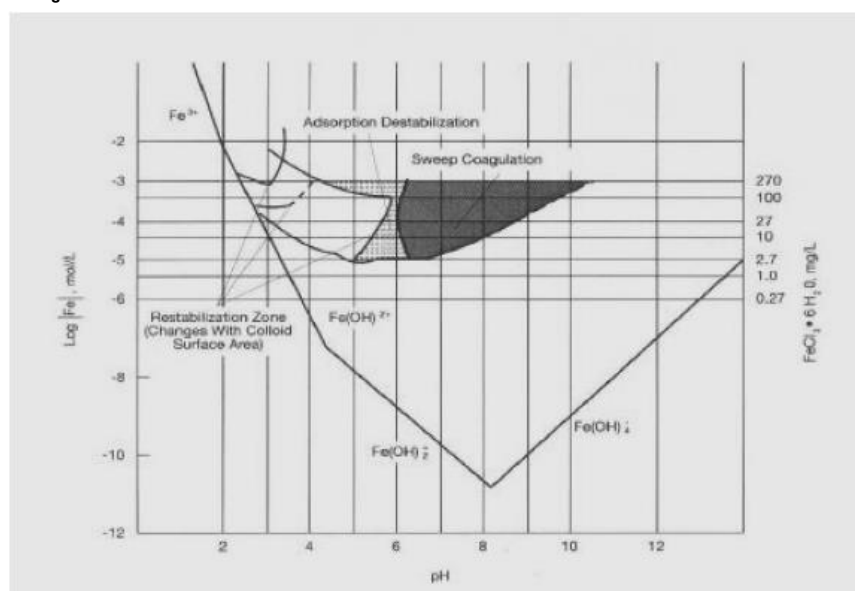
เฟอร์ริกคลอไรด์จะทำหน้าที่เป็นสารสร้างตะกอนในกระบวนการตกตะกอนได้ทั้ง 2 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 2.10 ถึง 2.11 คือ

ขั้นตอนที่ 1 Coagulation เฟอร์ริกคลอไรด์นี้จะทำหน้าที่สะเทินประจุบนผิวของอนุภาคต่างๆ ทั้งที่แขวนลอยและละลายอยู่ในน้ำให้กลายเป็นกลางโดยการดูดซับประจุ และทำปฏิกิริยากับประจุบนผิวของอนุภาคนั้นๆ ซึ่งเป็นผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคอ่อนลง และอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ขนาดระหว่าง  $10^{-9}$  –  $10^{-7}$  เมตร

ขั้นตอนที่ 2 Flocculation เฟอริกคลอไรด์จะทำหน้าที่รวมตะกอนเล็กๆ ซึ่งเกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 1 ให้เป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดมากกว่า  $10^{-7}$  เมตร ซึ่งถือว่าเป็นขนาดของตะกอนที่ใหญ่และหยาบทำให้ง่ายต่อกระบวนการแยกตะกอนออกจากน้ำในกระบวนการต่อไป



รูปที่ 2.10 กระบวนการ Coagulation และ Flocculation ของ FeCl<sub>3</sub>



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยเฟอริกคลอไรด์

(Johnson and Amirtharajah, 1983)

### 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้เฟอริกคลอไรด์เป็นสารรวมตะกอน เนื่องจากเป็นสารเคมีที่ทางบริษัทได้เติมลงในน้ำเสียจากการล้างหัวพิมพ์ก่อนระบายทิ้งสู่ท่อสาธารณะ หัวข้อนี้จึงขอทบทวนพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของเฟอริกคลอไรด์

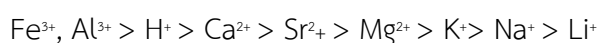
#### 1. ค่าพีเอชของน้ำ

น้ำเสียที่มีความขุ่นและค่าพีเอชสูงจัดเป็นน้ำที่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีได้ง่าย โดยทั่วไปการใช้ FeCl<sub>3</sub> เป็นสารรวมตะกอนจะให้ผลดีในน้ำที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5-8.5 (มันสิน, 2542) งานวิจัยของ Daud and Ahmad (2015) ทำการศึกษาการกำจัด

ของแข็งแขวนลอย สี ซีไอดี น้ำมันและไขมันของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารรวมตะกอน จากการศึกษาพบว่าที่ค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 7 ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ 350 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีร้อยละ 97 และ 63 ตามลำดับ

## 2. ชนิดและปริมาณของสารรวมตะกอน

สารรวมตะกอนเป็นสารเคมีที่แตกตัวให้ประจุบวกสูงเพื่อสะเทินประจุลบที่ผิวของแข็งแขวนลอยให้รวมกันและตกตะกอนได้โดยสารสร้างตะกอนที่ใช้ในการสร้างตะกอนมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการสร้างตะกอนกับสารอินทรีย์ได้แตกต่างกัน เนื่องจากประจุไฟฟ้าเคมีที่ต่างกันและสามารถในการสร้างตะกอนเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้



งานวิจัยของปิยะฉัตร (2545) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากระบบหมักเฟล็กโซกราฟีด้วยวิธีโคแอกกูเลชันร่วมกับการดูดซับด้วยกากโลหะไฮดรอกไซด์ เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้สารรวมตะกอนแต่ละชนิดพบว่าเฟอร์ริกคลอไรด์สามารถตกตะกอนผงสีได้ที่สุด รองลงมาคือ พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์และเฟอร์รัสซัลเฟต ตามลำดับ

## 3. ความขุ่น

ความขุ่นในน้ำเกิดจากเศษดินและแร่ธาตุๆขนาด 0.002 ถึง 0.005 ลูกบาศก์เซนติเมตรอนุภาคเหล่านี้จะตกตะกอนได้เองถ้ามีเวลามากพอ การใส่สารสร้างตะกอนช่วยทำให้เกิดฟล็อกได้ง่ายและรวดเร็ว น้ำที่มีความขุ่นมากโอกาสที่คอลลอยด์จะสัมผัสกันมีมากจึงใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณที่น้อยกว่าที่มีความขุ่นน้อย

## 4. เวลาและการปั่นกววน

ในการปั่นกววนนั้นจะต้องมีขีดจำกัดของพลังงานในการปั่นกววนที่เหมาะสมทั้งการกววนเร็วและกววนช้า เนื่องจากถ้าเวลาและความเร็วรอบในการปั่นกววนไม่เหมาะสม จะทำให้ไม่สามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ งานวิจัยของรุ่งทิพย์และคณะ (2545) ได้ศึกษาผลของความเร็วยรอบในการปั่นกววนเร็วต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการสร้างและรวมตะกอนพบว่า ค่าแรงแคเดียนท์แรงเฉือนที่เหมาะสมเมื่อใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนอยู่ที่ 150 รอบต่ออนาที

## 2.3 การบำบัดด้วยโอโซน (Ozonation)

กระบวนการเติมโอโซน (Ozonation,  $\text{O}_3$ ) เป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Process) โดยโอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ (Toxic Organic) ได้ดี ผลผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาส่วนมากจะมีพิษน้อยลงและถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้

### 2.3.1 โอโซนและคุณสมบัติของโอโซน

โอโซน (Ozone,  $\text{O}_3$ ) เป็นสารที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีทั้งในน้ำ สารละลาย และในอากาศ มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนจากสารอื่นเพิ่มเข้ามาได้อีก ทำให้โอโซนจัดเป็นตัว

ออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ที่รุนแรงตัวหนึ่ง มีศักย์ออกซิเดชันเท่ากับ 2.07 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าคลอรีน 1.52 เท่า (Soares et al., 2006) ดังแสดงในตารางที่ 2.6 นอกจากนี้ค่าพลังงานอิสระ (Free Energy) ของโอโซนมีค่าเท่ากับ -400 kJ/mol ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาออกซิไดซ์โดยโอโซนจะดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ ข้อเสียคือโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร ณ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจน ( $O_2$ ) ได้เร็วมากในบรรยากาศ เมื่อนำไปใช้งาน จึงต้องผลิตที่แหล่งบำบัด (On-site) โดยตรง (เจตนิพิฐ และคณะ, 2552)

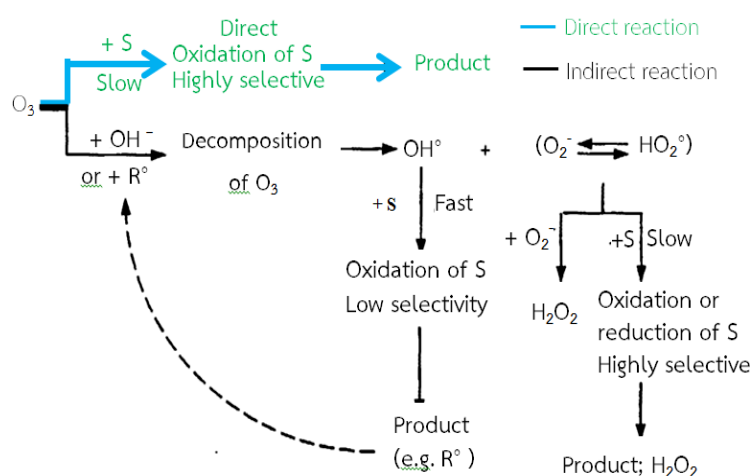
ตารางที่ 2.6 ค่า Oxidation potential ของสารออกซิไดซ์แต่ละชนิด

Oxidizing agent	Oxidation potential (mV)
Fluorine	3.03
Ozone	2.07
Permanganate	1.67
Chlorine dioxide	1.50
Hypochlorous acid	1.49
Chlorine gas	1.36
Hydroxyl radical	2.80
Hydrogen peroxide	1.77
Bromide	1.09

ที่มา : Atav (2013)

### 2.3.2 ปฏิกิริยาของกระบวนการเติมโอโซน

กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน สามารถเกิดได้ทั้งปฏิกิริยาโดยตรง (Direct Reaction) และเกิดปฏิกิริยาโดยอ้อม (Indirect Reaction) (พรรวิษา และคณะ, 2551) ดังรูปที่ 2.12



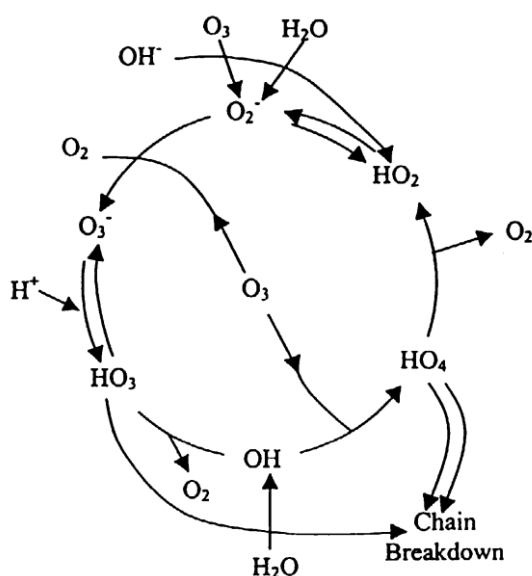
รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน (สุรชัย, 2553)

### 1. การเกิดปฏิกิริยาโดยตรง (Direct Reaction)

โมเลกุลของโอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์โดยตรง ตำแหน่งของการเกิดปฏิกิริยาคือบริเวณพันธะคู่ของสารอินทรีย์ ( $C=C$ ,  $C=C-O-R$ ,  $C=C-X$ ) หรืออะตอมที่มีประจุลบ (N, P, O, S และ Nucleophilic C) สารอินทรีย์พวก Aromatic ที่มีหมู่ฟังก์ชัน OH,  $CH_3$  หรือ  $OCH_3$  อยู่ตรงตำแหน่ง Ortho จะทำปฏิกิริยากับโอโซนได้ดี (high reactivity) แต่ถ้าสารเป็นพวกไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว และ Halogenated aliphatic compounds โอโซนจะไม่สามารถออกซิไดซ์สารเหล่านี้ได้ (พรวิษา และคณะ, 2551) ปฏิกิริยาแบบ Direct Reaction จะเกิดปฏิกิริยาช้าและส่วนใหญ่จะเกิดในสภาวะที่เป็นกรด (Gottschalk et al., 2000)

### 2. การเกิดปฏิกิริยาโดยอ้อม (Indirect reaction)

การเกิดปฏิกิริยาทางอ้อมเกี่ยวข้องกับโอโซนแตกตัวให้แรดิคอลลต่าง เช่น ไฮดรอกซิลแรดิคอลล ( $HO^\bullet$ ), ไฮโดรเปอร์ออกซิลแรดิคอลล ( $HO_2^\bullet$ ), ไฮโดรไตรออกซิลแรดิคอลล ( $HO_3^\bullet$ ), ไฮโดรเตตระออกซิลแรดิคอลล ( $HO_4^\bullet$ ) และไฮโซไนต์แอนไอออนแรดิคอลล ( $O_3^{\bullet-}$ ) (รัชตากร และคณะ, 2553) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



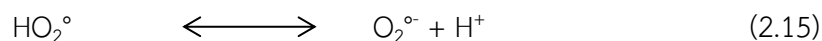
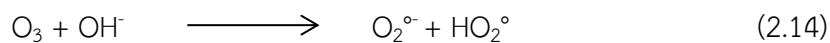
รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนในน้ำ (วีระพงศ์, 2548)

โดยแรดิคอลลเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทันที กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบ่งเป็น 3 ส่วน (ปิยะวิทย์, 2552) คือ

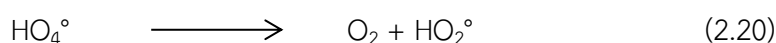
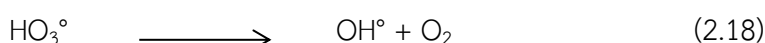
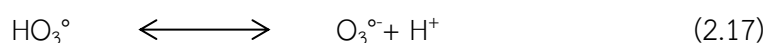
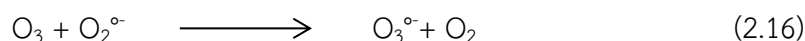
#### (ก) ขั้นเริ่มต้น (Initiation Step)

ขั้นเริ่มต้นเป็นปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนกับก๊าซโอโซนทำให้เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคอลล (Superoxide anion Radical ;  $O_2^{\bullet-}$ ) และไฮโดรเปอร์ออกซิลแรดิคอลล (hydroperoxyl radical,  $HO_2^\bullet$ ) ดังสมการ 2.14 และเมื่อไฮโดรเปอร์ออกซิลแรดิคอลล

อยู่ในสมดุลกรด-เบส (Acid - Base Equilibrium) สามารถเปลี่ยนเป็นซูเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน แรดิคอลดังสมการ 2.15



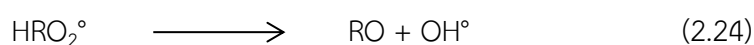
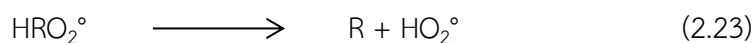
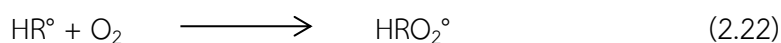
(ข) ขั้นตอนสายโซ่ของแรดิคอล (Radical Chain) ขั้นตอนนี้เป็นปฏิกิริยาระหว่าง โอโซนและซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคอลทำให้เกิดเป็น โอโซนไนด์แอนไอออนแรดิคอล ( $\text{O}_3^{\circ-}$ ) ซึ่งสามารถสลายตัวทันทีที่เกิดเป็นไฮดรอกซิล แรดิคอล ดังสมการ 2.16 ถึง 2.18 และเป็นไฮดรอกซิลแรดิคอลที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับโอโซน ดังสมการที่ 2.19 และ 2.20



การสลายตัวของไฮโดรเพอร์ออกซิลแรดิคอล ( $\text{HO}_4^{\circ}$ ) เป็นออกซิเจนและไฮโดรเปอร์ออกซิลแรดิคอล จะทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่เริ่มต้นใหม่อีกครั้งซึ่งสารใดก็ตามที่สามารถเปลี่ยนไฮดรอกซิลแรดิคอลเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคอล หรือไฮโดรเปอร์ออกซิลแรดิคอล สารนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวนำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain carrier) เรียกว่า ตัวกระตุ้น (promoter) โมเลกุลของสารอินทรีย์ (R) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นได้และสารอินทรีย์บางชนิดจะมีกลุ่มฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคอลส่งผลให้เกิดแรดิคอลของสารอินทรีย์ ( $\text{R}^{\circ}$ ) ดังสมการ 2.21



ถ้ามีออกซิเจนอยู่ในระบบสามารถเกิดออร์แกนิกเปอร์ออกซิลแรดิคอล (Organic peroxy radicals,  $\text{ROO}^{\circ}$ ) ได้ดังสมการ 2.22 ถึง 2.24



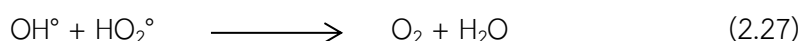
การสลายตัวของโอโซนถูกเริ่มต้นด้วยไฮดรอกซิลไอออน แล้วนำไปสู่ปฏิกิริยาลูกโซ่และผลิตไฮดรอกซิลแรดิคอลที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว

## (ค) ขั้นสุดท้าย (Termination Step)

สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์บางตัวสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัลทำให้เกิดแรดิคัลลำดับที่สอง (Secondary radicals) ซึ่งจะไม่เกิดการสร้างไฮโดรเปอร์ออกซิล-แรดิคัล หรือซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคัล จะเรียกละสารเหล่านี้ว่าตัวยับยั้ง (inhibitors หรือ scavengers) โดยสามารถหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่และยับยั้งการสลายตัวของโอโซนได้ ดังสมการ 2.25 ถึง 2.26



ความเป็นไปได้อื่นที่จะหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ คือ การทำปฏิกิริยากันของแรดิคัลสองตัว ดังสมการที่ 2.27



เมื่อรวมสมการทั้งหมดจะแสดงให้เห็นว่าโอโซนจำนวน 3 โมเลกุลจะให้ไฮดรอกซิลแรดิคัล 2 โมเลกุล ดังสมการที่ 2.28 ซึ่งไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นนี้ก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์ต่อไป



การสลายตัวของโอโซนในน้ำ โดยโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนโดยแตกตัวให้แรดิคัลต่างๆ ได้แก่ Hydroxyl radical ( $\text{OH}^\circ$ ),  $\text{HO}^\circ_3$ ,  $\text{HO}^\circ_4$  และ Super Oxide ( $\text{O}_2^\circ$ ) ซึ่งแรดิคัลต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ (Strong oxidant)

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเติมโอโซนในน้ำ

#### 1. ระยะเวลาในการเติมโอโซน

การเกิดปฏิกิริยาออกซิชั่นของกระบวนการเติมโอโซนจะเกิดจากโมเลกุลโอโซนหรือแรดิคัลต่างๆ ที่เกิดจากการสลายตัวของโอโซน ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณโอโซนเข้าไปในระบบหรือเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซนจะส่งผลให้มีโมเลกุลโอโซนหรือแรดิคัลเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิชั่นในระบบเพิ่มขึ้น งานวิจัยของอรชุตตา (2549) ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์ด้วยกระบวนการโอโซนชั้นพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะสูงขึ้นเมื่อเวลาในการบำบัดด้วยโอโซนชั้นเพิ่มมากขึ้น

## 2. ค่าพีเอช

โอโซนสามารถบำบัดน้ำเสียได้ทั้งในสภาวะที่ค่าพีเอชของน้ำเสียเป็นกรดและเบส ซึ่งที่พีเอชเป็นกรด โอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ แต่ในพีเอชที่เป็นเบส โอโซนจะแตกตัวเป็นแตรดิคอล เข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าพีเอชเป็นกรด (Gottschalk et al. 2000; Atav, 2013) โดยงานวิจัยของพันธกานต์ (2558) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำยาโบรอนที่เสื่อมสภาพด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้นพบว่า สภาวะที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำเสียคือ ค่าพีเอชเท่ากับ 3.6 สามารถกำจัดสีน้ำยาโบรอนได้ 96.53 % งานวิจัยของ นนทพงษ์ (2548) ทำการบำบัดน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบตะกอนเร่ง พบว่าที่สภาวะ pH  $10.0 \pm 0.1$  เป็นสภาวะที่สามารถกำจัดสีได้ดีที่สุดซึ่งสามารถลดปริมาณสีในหน่วย PtCo จาก 510.00 เหลือ 142 (ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 72.24 %) ค่าสีในหน่วย ADMI จาก 576 เหลือ 178 (ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 69.08 %)

## 3. สารอินทรีย์ในน้ำ

สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะส่งผลต่อกระบวนการเติมโอโซน น้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์มากจะส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณโอโซนที่เพิ่มมากขึ้นหรืออาจใช้เวลาในการบำบัดที่นานขึ้น งานวิจัยของ Wu et al. (2012) ได้ศึกษาการใช้กระบวนการเติมโอโซนในการบำบัดน้ำเสีย จากอุตสาหกรรมไม้ไผ่ด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้น พบว่าปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นในน้ำตัวอย่าง ส่งผลให้ร้อยละการกำจัดสีและซีโอดีมีค่าลดลง เมื่อใช้ปริมาณโอโซนและเวลาการบำบัดเท่ากัน

## 4. อุณหภูมิ

โอโซนละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้โอโซนละลายน้ำได้น้อยลง เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะทำให้โอโซนสลายตัวเป็นออกซิเจนได้รวดเร็วหรือการแตกตัวเป็นออกซิเจนได้มากขึ้น (Atav, 2013 ; Okafo, 2011 ) งานวิจัยของ Dehouli et al. (2010) ได้ศึกษาอิทธิพลของสมบัติของค่า pH, อุณหภูมิและ activated carbon เกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ของโอโซน activated carbon เพื่อใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ จาก 10 °C เป็น 30 °C ส่งผลให้ โอโซนเกิดการสลายตัว โดยมีค่าคงที่ของอัตราการสลายตัวของโอโซน ( $k_D$ ) เพิ่มจาก  $0.030 \text{ min}^{-1}$  เป็น  $0.097 \text{ min}^{-1}$

## 5. ค่าอัลคาไลน์ตี

น้ำเสียที่มีไอออนของ  $\text{HCO}_3^-$  และ  $\text{CO}_3^{2-}$  จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เนื่องจากไอออนดังกล่าวสามารถดักจับ  $\text{OH}^\circ$  ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าหรือสิ้นสุดลง

## 2.4 รูปแบบการทดลอง

การทำงานวิจัยเชิงวิทยาศาสตร์โดยส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์หลัก คือการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ประเภทคือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) หรือเรียกอีกอย่างว่า ปัจจัยที่ทำการศึกษา (Treatment) ที่แทนด้วยสัญลักษณ์ X กับตัวแปรตาม (Dependent Variables) หรือ

เรียกอีกอย่างว่า ผลการตอบสนอง (Responses) มีสัญลักษณ์คือ Y เพื่อหาค่าหรือสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของตัวแปรอิสระที่จะทำให้ตัวแปรตามมีค่าตรงตามที่ต้องการได้แก่สูงสุด (Maximum) หรือต่ำสุด (Minimum) (เกศระวี และคณะ, 2554) ทั้งนี้รูปแบบการทดลองที่นิยมดำเนินการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มี 2 ลักษณะ ได้แก่ การดำเนินการทดลองแบบทีละปัจจัย (One-Variable-At-A-Time, OVAT) และ การออกแบบการทดลอง (Designs of Experiments, DOEs )

#### 2.4.1 การดำเนินการทดลองแบบทีละปัจจัย (One-Variable-At-A-Time)

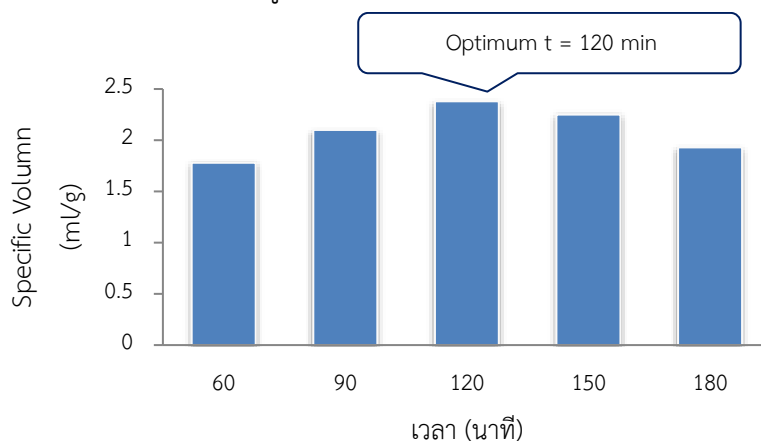
การทดลองแบบทีละปัจจัย (One-Variable-At-A-Time, OVAT) หรือที่บางครั้งเรียกว่า One-Factor-At -A- Time (OFAT) เป็นรูปแบบการทดลองที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยมากที่สุด เนื่องจากสามารถประมวลผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ลักษณะการดำเนินการทดลองคือทำการแปรผันระดับของตัวแปรอิสระที่จะศึกษา จากนั้นหาค่าตัวแปรตามที่ได้รับผลกระทบจากการแปรผันตัวแปรอิสระนั้นๆ พร้อมทั้งทำการควบคุมให้ตัวแปรอิสระอื่นคงที่ สามารถยกตัวอย่างได้ดังเอกสารประกอบการสอนของนางเยาว์ (2554) ซึ่งแสดงวิธีการดำเนินการทดลองแบบทีละปัจจัยดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 รูปแบบการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโด (Dough) ของขนมปังชนิดหนึ่ง

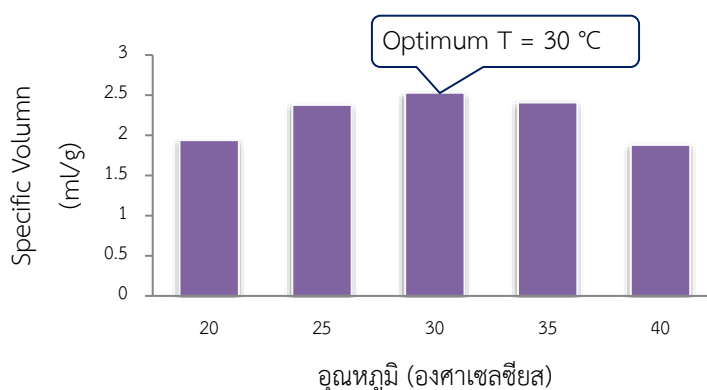
ลำดับ	เวลา (time; t)	อุณหภูมิ (temperature; T)
1	60	25
2	90	25
3	120	25
4	150	25
5	180	25
6	120	20
7	120	25
8	120	30
9	120	35
10	120	40

จากตารางที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าลำดับการทดลองตั้งแต่ 1 – 5 มีตัวแปรอิสระคือระยะเวลา และกำหนดตัวแปรอิสระที่ศึกษาอีกตัว ได้แก่ อุณหภูมิ ให้มีค่าคงที่ (25 องศาเซลเซียส) ส่วนลำดับที่ 6 – 10 เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิตั้งแต่ 20 – 40 องศาเซลเซียส ต่อปริมาตรจำเพาะ (Specific

Volume) ของโด (Dough) โดยกำหนดให้ระยะเวลาในการศึกษาครั้งที่คือ 120 นาที ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองแบบที่ละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ



**รูปที่ 2.14** ผลการทดลองที่สมมติจาก One-Variable-At-A-Time ของการทดลองชุดที่ 1 – 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจำเพาะของโด (Dough) และเวลาในผลิตภัณฑ์ขนมปังกำหนด อุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส (นงเยาว์, 2554)



**รูปที่ 2.15** ผลการทดลองที่สมมติจาก One-Variable-At-A-Time ของการทดลองชุดที่ 6 – 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และปริมาณจำเพาะเกิดโด (Dough) ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง กำหนดเวลาให้คงที่ที่ 120 นาที (นงเยาว์, 2554)

จากรูปที่ 2.14 และ 2.15 พบว่าระยะเวลาและอุณหภูมิที่จะทำให้ได้ Specific Volume สูงสุดคือ อุณหภูมิ ที่ 30 องศาเซลเซียสและเวลา 120 นาที ข้อจำกัดที่สำคัญของการทดลองแบบที่ละเอียดคือ ไม่ทราบถึงอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม หรืออีกนัยหนึ่งคือถ้าเวลาในการเกิดโด หรือ อุณหภูมิ มีการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะที่ทำการทดลองพร้อมกัน จะไม่สามารถทราบได้ว่าตัวแปรตามที่ศึกษาจะมีผลเป็นอย่างไร นอกจากนี้พบว่าเมื่อต้องการศึกษาปัจจัยที่มากกว่าหนึ่งปัจจัยจะต้องใช้เวลานานในการทำการทดลองเพื่อให้สภาวะที่ดีที่สุดของกระบวนการครบทุกปัจจัยที่ศึกษาซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนที่เรียกว่า Trial & Error Method ได้ (นงเยาว์, 2554)

## 2.4.2 การออกแบบการทดลอง

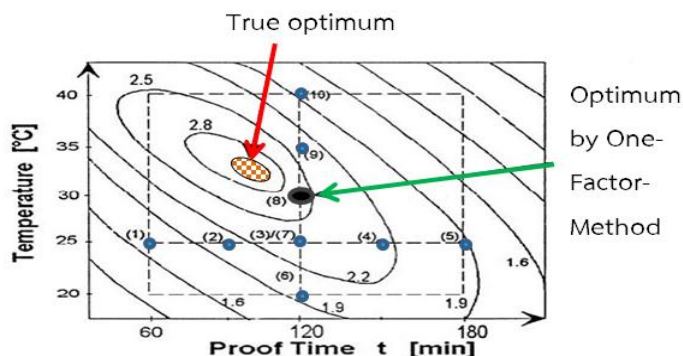
การออกแบบการทดลอง (Designs of Experiments, DOEs) เป็นการออกแบบสำหรับการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงหรือการปรับค่าของตัวแปรอิสระ (ปัจจัยที่ศึกษา, X) ที่มีผลต่อตัวแปรตาม (Y) โดยการหาค่า/สภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งจะอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษาเหล่านั้นอย่างน้อย 2 ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนอง และนำไปสู่ผลตอบสนองตามที่ต้องการ การออกแบบการทดลองนี้สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกัน ส่งผลให้จำนวนครั้งในการทำการทดลองและการใช้ทรัพยากรลดน้อยลง อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยที่ศึกษา (ตัวแปรอิสระ) มีการเปลี่ยนแปลง การออกแบบการทดลองจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการหลีกเลี่ยงข้อจำกัดของการทดลองที่ละปัจจัย รูปแบบของการออกแบบการทดลองที่ใช้อยู่มีหลากหลายรูปแบบแต่จะขอกกล่าวถึงเฉพาะรูปแบบที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งก็คือ วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) โดยแสดงข้อแตกต่างระหว่างการทดลองแบบที่ละปัจจัยกับวิธีการพื้นผิวตอบสนองดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ข้อแตกต่างระหว่างการทดลองแบบที่ละปัจจัยกับวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

การทดลองแบบที่ละปัจจัย (OVAT)	การออกแบบการทดลอง (RSM)
ศึกษาผลของตัวแปรได้ทีละหนึ่งปัจจัย	ศึกษาผลของตัวแปรที่มีอย่างน้อย 2 ตัวแปร
ไม่สามารถศึกษาผลของปัจจัยหลายปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกัน	สามารถศึกษาผลของปัจจัยหลายปัจจัยในเวลาเดียวกันได้
เมื่อระดับของปัจจัยที่ศึกษาเปลี่ยนแปลงไปจะไม่สามารถระบุผลตอบสนองได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่	เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยที่ศึกษาเปลี่ยนแปลงไป
ไม่สามารถอธิบายผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยได้	สามารถอธิบายผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยได้

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับค่าตอบสนองที่สนใจพร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) ที่ได้จากความสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านั้น ตัวอย่างเช่น การใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (Input Variable) ได้แก่ เวลาและอุณหภูมิในการเกิดโดกับค่าการตอบสนอง (Response Variable) ได้แก่ Specific Volume ของโด เป็นคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโด (dough) ของขนมปังชนิดหนึ่ง (นงเยาว์, 2554) ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 โดยมีสภาวะที่เหมาะสมทำนายได้จากแบบจำลอง ณ จุด True

Optimum เมื่อเปรียบเทียบกับ การหาสถานะที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบ One-Variable-At-A-Time จะเห็นได้ว่า สามารถวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมที่แท้จริงได้แม่นยำกว่าการทดลองที่ละปัจจัย



รูปที่ 2.16 พื้นผิวการตอบสนองแสดงสถานะที่เหมาะสมของค่า specific volume สูงที่สุดและค่า specific volume ที่ได้จากการทดลอง One-Variable-At-A-Time ในแต่ละชุด (นงเยาว์, 2554)

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

(ก) เลือกแผนการทดลองที่จะใช้ในการศึกษา โดยต้องมีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 2 ตัวแปร ซึ่งตัวแปรเหล่านั้นต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณและต้องมีตัวแปรตามอย่าง 1 ตัวแปรที่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณเช่นกัน ตัวอย่างแผนการทดลองที่บรรจุอยู่ในโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB ในหัวข้อ RSM มี 2 รูปแบบการทดลองได้แก่ Central Composite Design (CCD), Box-Behnken Design (BBD) เป็นต้น

(ข) กำหนดตัวแปรที่ต้องการศึกษา (Input Variables) ซึ่งระดับของตัวแปรอิสระที่ผันแปรจำเป็นต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา อีกทั้งข้อมูลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (X) ต้องมีความสัมพันธ์กับข้อมูลของตัวแปรตาม (Y) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) ได้

(ค) กำหนดตัวแปรที่ต้องการศึกษา (Response Variable) เป็นค่าผลตอบสนองเป็นค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ผลผลิต (Yield) ความหนืด ความแข็ง คະแนนความชอบ เป็นต้น

(ง) ออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร มีอยู่ 4 แบบ ดังสมการที่ 2.29 – 2.30 (ทัศนีย์, 2550)

Linear model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i \quad (2.29)$$

Linear + interaction model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^K \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_{ij} \quad (2.30)$$

Linear + square model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 \quad (2.31)$$

Full quadratic model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_{ij} \quad (2.32)$$

เมื่อ  $X_i, X_{ij}$  คือ ตัวแปรอิสระ

$\beta_0$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปรอิสระในแบบจำลอง

ทั้งนี้ การเลือกตัวแบบจำลองที่เหมาะสม จะพิจารณาจาก 2 ปัจจัย ได้แก่

1. ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error of the Estimate: S)

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ 2.33

$$S = \sqrt{MS_{Residual\ Error}} \quad (2.33)$$

ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าน้อย แสดงว่าตัวแบบจำลองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมค่อนข้างมาก แต่ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่ามาก แสดงว่าตัวแบบจำลองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมน้อยมาก และถ้าในกรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าเท่าศูนย์ แสดงว่าตัวแบบจำลองมีความเหมาะสมดีมาก (ทัศนีย์, 2550)

2. ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination:  $R^2$ )

$R^2$  คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ค่า  $R^2$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งตัวแบบจำลองที่ดีควรจะได้ค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 แสดงว่าตัวแปรอิสระที่อยู่ในตัวแบบจำลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ดี โดยทั่วไปค่า  $R^2$  จะสูงขึ้น เมื่อมีตัวแปรอิสระเพิ่มเข้ามาในสมการถดถอย ค่าผลรวมของส่วนเบี่ยงเบนกำลังสองทั้งหมด (Sum of Square of Total; SST) ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าผลบวกกำลังสองของการถดถอย (Sum of Squares Regression ; SSR) จะสูงและผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Sum of Squares of Error ; SSE) จะต่ำลง ดังนั้น  $R^2$  จึงมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มตัวแปรอิสระในสมการถดถอย มักมีผลทำให้มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการถดถอย และอาจทำให้สมการถดถอยมีรูปแบบที่แย่งแทนที่จะดีขึ้น ดังนั้นจึงนิยมเลือก  $R^2$  (adj) มาใช้ในการวิเคราะห์มากกว่า ซึ่งค่า  $R^2$  (adj) จะมีค่าที่ต่ำกว่า  $R^2$  เล็กน้อยโดยค่า  $R^2$  (adj) เป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว ใช้ประกอบการพิจารณาเมื่อข้อมูลมีจำนวนน้อยกว่า 30 ตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.34 หรือ สมการที่ 2.35

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} \times (1 - R^2) \quad (2.34)$$

เมื่อ  $n$  = จำนวนการทดลอง

$k$  = จำนวนตัวแปรในแบบจำลอง

$$\text{หรือ} \quad R_{adj}^2 = \frac{MS(Total) - MS(Residual)}{MS(Total)} \quad (2.35)$$

$$\text{โดยที่} \quad MS(Total) = \frac{SS(Total)}{df(Total)}$$

(ฉ) การตัดสินใจสำคัญของตัวแปรอิสระ

เมื่อได้แบบจำลองที่มีความเหมาะสมแล้ว ขั้นตอนถัดมาจะเป็นการตัดสินใจสำคัญของตัวแปรอิสระด้วยการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta_i$ ) ซึ่งเป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่นำมาใช้ในแบบจำลองสามารถนำมาใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่ โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta_i$ ) มีการทดสอบ 2 ลักษณะ (ทัศนีย์, 2550) ดังนี้

1. การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta_i$ ) ของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกัน โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติดังนี้

$H_0: \beta_i = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_K = 0$  หรือตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

$H_1: \beta_i \neq 0$  หรือมีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ F- test หรือ สามารถดูจากค่า  $p$  value ได้ โดยผู้ทดสอบจะต้องกำหนดระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) มาก่อน ถ้า  $p$  value มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) จึงตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน  $H_0$  นั่นคือตัวแปรอิสระทุกตัวในแบบจำลองไม่สามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้ แต่ถ้า  $p$  value มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) จะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  (หรือยอมรับสมมติฐาน  $H_1$ ) นั่นคือตัวแปรอิสระในแบบจำลองอย่างน้อย 1 ตัว สามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้

2. การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta_i$ ) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวโดย กำหนดสมมติฐานดังนี้

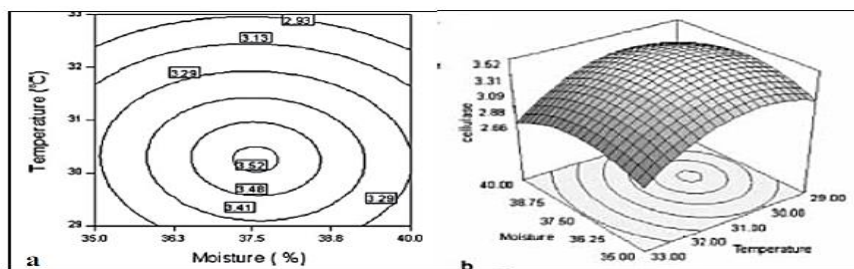
$H_0: \beta_i = 0$  หรือตัวแปรอิสระที่  $i$  ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

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

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ  $t$  - test หรือสามารถพิจารณาค่า  $p$  value ก็ได้ โดยผู้ทดสอบกำหนดระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) ถ้า  $p$  value ของตัวแปรที่  $i$  มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้นตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน  $H_0$  แสดงว่าตัวแปรอิสระที่  $i$  ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม แต่ถ้า  $p$  value ของตัวแปรที่  $i$  มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้นตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  นั่นแสดงว่าตัวแปรอิสระที่  $i$  มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

(ช) การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมจะถูกนำไปใช้ในการสร้างเป็นภาพสามมิติที่เรียกว่าพื้นผิวผลตอบ (Response Surface plot) หรือกราฟสองมิติที่เรียกว่ากราฟโครงร่าง (Contour plot) (พีรวัฒน์, 2556) ดังแสดงในรูป 2.17



รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองโครงร่างพื้นผิว (จุฬามาศ, 2553)

(a) กราฟโครงร่าง (Contour plot) และ (b) กราฟพื้นผิวดตอบสนอง (Surface plot)

### 2.4.3 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD)

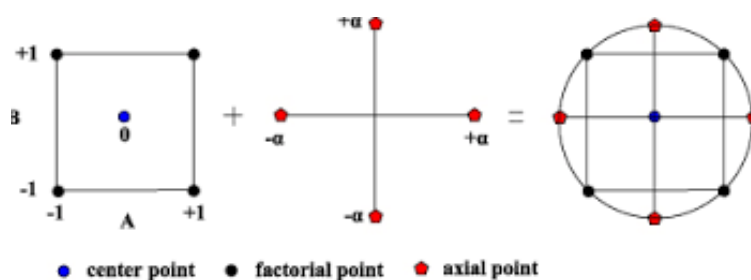
การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เป็นการออกแบบการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เมื่อตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเพิ่มหรือลดค่า ทำให้ค่าตัวแปรอื่นอาจเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง (พรรณทิพย์และราตรี, 2558) โดยเป็นการออกแบบที่ทุกระดับของปัจจัยอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลาง (Center) ของการออกแบบเป็นระยะที่เท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางของแต่ละระดับปัจจัย CCD มีส่วนประกอบและขั้นตอนการออกแบบเป็นดังนี้

1. กำหนดจุดของ factorial point โดยใช้สัญลักษณ์  $-1$  แทนระดับต่ำ และ  $+1$  แทนระดับสูง จำนวนจุดของ factorial point ที่ทำการทดลองมีค่าเท่ากับ  $2^n$  โดยที่  $n$  คือ จำนวนตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่ต้องการจะศึกษา ดังนั้นการศึกษาที่มี 2 ตัวแปรอิสระ จะมีจำนวน factorial point เท่ากับ 4 จุด (คำนวณจาก  $2^2 = 4$ ) ได้แก่  $(-1, -1)$   $(+1, -1)$   $(+1, +1)$   $(-1, +1)$  ดังแสดงในรูปที่ 2.18

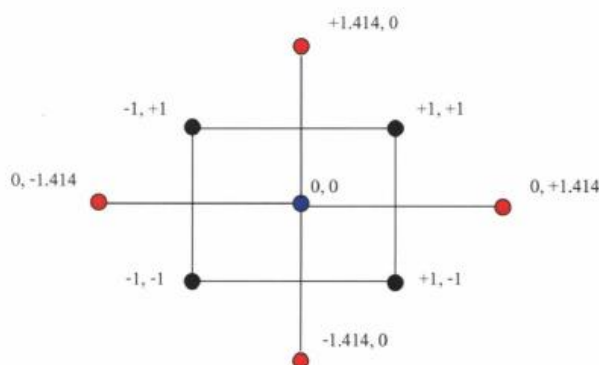
2. กำหนดจุด center point หรือจุดตรงกลางพื้นที่การทดลอง จุดดังกล่าวจะมีสัญลักษณ์เป็น  $(0, 0)$  (รูปที่ 2.18) ทั่วไปในการออกแบบการทดลอง มักกำหนดให้มีการทำซ้ำที่จุด center point มากกว่า 1 ครั้ง เพื่อใช้ประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ในที่นี้กำหนดให้ทำซ้ำที่จุดตรงกลางพื้นที่การทดลอง 5 ครั้ง (Kasem, 2001)

3. กำหนดจุด axial point หรือเรียกอีกอย่างว่า star point ทั้งนี้ star point จะห่างจากจุด center point เป็นระยะห่างที่เท่าๆกัน และใช้  $\alpha$  เป็นสัญลักษณ์ ซึ่งการกำหนดตำแหน่ง star point คำนวณโดยใช้สมการคือ  $\alpha = 2^{n/4}$  เมื่อ  $n$  คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่ต้องการจะศึกษา ตัวอย่างเช่น การศึกษาที่มี 2 ตัวแปรอิสระ จะได้จุด axial point คือที่ตำแหน่ง 1.4142 นั้นแสดงว่าจุด star point จะห่างจากจุด center point เป็นระยะ 1.4142 เท่าๆกัน ได้แก่  $(+1.4142, 0)$   $(-1.4142, 0)$   $(0, +1.4142)$   $(0, -1.4142)$

จำนวนจุดการทดลองทั้งหมดในการทดลองแบบ CCD หาได้จากสมการ  $2^n + 2(n) + m$  เมื่อ  $n$  คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่ต้องการจะศึกษา  $m$  คือจำนวนทำซ้ำที่จุดตรงกลางพื้นที่การทดลอง ดังนั้น ถ้ามีปัจจัยที่ต้องการจะศึกษา 2 ปัจจัย จะมีจำนวนจุดการทดลองทั้งหมดเท่ากับ  $2^2 + 2(2) + 5 = 13$  จุด แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบของการออกแบบส่วนประสมกลาง



รูปที่ 2.19 การออกแบบส่วนประสมกลาง ที่มีการศึกษา 2 ปัจจัย

● แทน จุด factorial point   ● แทนจุด center point   ● แทนจุด star point

เมื่อกำหนดตำแหน่ง/จุดของการทดลองได้แล้ว ลำดับถัดมาคือการกำหนดค่าที่แท้จริงของแต่ละตำแหน่ง ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานเป็นดังนี้

1. การกำหนดค่าสูงสุด (+1) และค่าต่ำสุด (-1) ของตัวแปรที่ศึกษา วิธีการกำหนดสามารถทำได้โดยพิจารณาจากระดับของตัวแปรอิสระที่ให้ผลการตอบสนองที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากการทดลองแบบทีละปัจจัย (One-Variable-At-A-Time)

2. นำค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดมาคำนวณหาค่าที่แท้จริงของจุด center point และจุด axial point ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.36

$$X_i = \frac{A_i - A_0}{\Delta A} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $X_i$  คือ ค่าของจุด center point และจุด axial point

$A_i$  คือ ค่าระดับที่แท้จริงของจุด center point และจุด axial point

$A_0$  คือ ค่าเฉลี่ยของระดับปัจจัย

$\Delta A$  คือ ค่าช่วงกลาง คัดจาก (ค่าสูงสุด - ค่าต่ำสุด)/2

ตัวอย่างการหาค่าที่แท้จริงการออกแบบส่วนประสมกลางที่มีการศึกษา 2 ปัจจัย ในงานวิจัยของราชิต (2553) ที่มีตัวแปรอิสระที่ศึกษา 2 ปัจจัยได้แก่ ปริมาณสารตกตะกอน และค่าพีเอช ในงาน

ดังกล่าวได้กำหนดให้ ปริมาณสารตกตะกอน 60 กรัมต่อลิตร เป็นค่าสูงสุด ปริมาณสารตกตะกอน 20 กรัมต่อลิตร เป็นค่าต่ำสุด ค่าพีเอชเท่ากับ 12 เป็นค่าสูงสุดและค่าพีเอชเท่ากับ 8 เป็นค่าต่ำสุด จากนั้นนำค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดมาคำนวณตามสมการที่ 2.36 จะได้ค่าที่แท้จริงดังตารางที่ 2.9

**ตารางที่ 2.9** ตัวอย่างการคำนวณระดับค่าที่แท้จริงเมื่อมีปัจจัยที่ต้องการศึกษา 2 ปัจจัย

ตัวแปร	-1.4142	-1	0	1	1.4142
ปริมาณสารตกตะกอน (g/L)	11.72	20	40	60	68.28
ค่าพีเอช	7.17	8	10	12	12.83

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**ปิยะฉัตร (2545)** ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีด้วยกระบวนการบำบัด 2 ขั้นตอน ได้แก่ การโคแอกกูเลชันเพื่อตกตะกอนผงสีตามด้วยการดูดซับสีที่เหลืออยู่หลังการโคแอกกูเลชันด้วยกากของเสียจากโรงงานชุบโลหะ (กากโลหะไฮดรอกไซด์) จากการศึกษาเปรียบเทียบการตกตะกอนผงสีระหว่างโคแอกกูแลนต์ชนิดต่างๆ (เพอร์สัลเฟตร่วมกับปูนขาว เพอร์สัลเฟต โพลีลูมินัมคลอไรด์ และเพอริกคลอไรด์) กับการตกตะกอนด้วยกรด พบว่าการใช้กรดซัลฟูริกปรับพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับ 2 ทำให้ผงสีเกิดการตกตะกอนได้ดีและมีกากตะกอนเกิดขึ้นน้อย สำหรับน้ำเสียหลังการตกตะกอนด้วยกรดซัลฟูริกซึ่งถูกนำมากำจัดสีที่เหลืออยู่โดยการดูดซับด้วยกากโลหะไฮดรอกไซด์ พบว่ากากโลหะไฮดรอกไซด์ขนาดน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ปริมาณร้อยละ 3 (w/v) สามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 76 ที่เวลาสมดุล จากการศึกษาผลของพีเอชของระบบต่อการดูดซับ พบว่ากากโลหะไฮดรอกไซด์สามารถกำจัดสีได้สูงสุดที่พีเอชของระบบในช่วง 6.5 - 8.0 นอกจากนี้กากโลหะไฮดรอกไซด์ยังสามารถใช้ซ้ำได้ประมาณ 3 ครั้งโดยไม่ต้องมีการตากให้แห้งก่อน จากผลการศึกษาการดูดซับพบว่ากลไกการดูดซับสีของกากโลหะไฮดรอกไซด์ เป็นแบบแลกเปลี่ยนประจุ สำหรับการศึกษาศักยภาพในการบำบัดในห้องปฏิบัติการในถังกวนขนาด 7 ลิตร และการบำบัดน้ำเสียในระบบบำบัดจริงของโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีนั้นให้ผลการทดลองไม่แตกต่างกัน โดยน้ำเสียสุดท้ายภายหลังผ่านการบำบัดทั้ง 2 ขั้นตอนมีค่าความเข้มข้น พีเอช ของแข็งละลายน้ำ และปริมาณโลหะหนัก ( $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  และ  $Cr^{3+}$ ) ไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ ยกเว้นค่าซีโอดียังคงเกินมาตรฐานน้ำทิ้งอยู่เพียงเล็กน้อย แต่งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดคือเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการดูดซับจะต้องนำกากโลหะไฮดรอกไซด์นั้นไปกำจัดอีกครั้งหนึ่งซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายและเพิ่มความยุ่งยากให้การบำบัด

**อรชุดา (2549)** ได้ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีและความขุ่นของน้ำเสียจากโรงงานหมึกพิมพ์ด้วยกระบวนการโอโซนชั้นโดยใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) ร่วมกับ RSM ซึ่งตัวแปรที่คาดว่าส่งผลต่อการลดลงของสีของน้ำเสียมี 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปร จะศึกษา 5 ระดับ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic Loading) อยู่ระหว่าง 650 - 1950 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) อยู่ระหว่าง 3 - 11 และเวลาที่ใช้ในการโอโซน

ชั้นอยู่ระหว่าง 10 - 60 นาที ซึ่งทำการทดลองที่อัตราการไหลของโอโซนคงที่เท่ากับ 700 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อนาที ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่า pH และเวลาที่ใช้ในการโอโซนชัน ส่วนการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองพบว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยในทอมของ Linear และปริมาณสารอินทรีย์ในทอมของ Square มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี เนื่องจาก p-values มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญส่วนปัจจัยอื่นในทอมของ Square และ ทุกปัจจัยในทอม Interaction ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี นอกจากนั้นพบว่า สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดด้วยโอโซน คือ ปริมาณสารอินทรีย์ 650 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 8.7 และเวลาที่ใช้ในการโอโซนชัน 20 นาที สามารถบำบัดสีในน้ำเสียให้เป็นไปตามมาตรฐานแต่ไม่สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีเท่าที่ควร โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสี 98 %และประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น 67%

**นิตยาและคณะ (2558)** ศึกษาการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันโดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงสถิติด้วยวิธีแฟกทอเรียล (Full factorial design) โดยใช้เวลาที่ 40 นาทีในการทำการทดลอง ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 100 เปอร์เซ็นต์ คืออัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อซีโอดีเท่ากับ 0.5 อัตราส่วนของเหล็กไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.1 ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงถึง 98.90 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 100 เปอร์เซ็นต์ คืออัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อซีโอดีเท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหล็กไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1.0 ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้สูงถึง 97.26 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าซีโอดีและค่าสีเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

**วารการและคณะ (2558)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียโดยใช้วิธีการทดลองแบบทีละปัจจัย (One Variable At A Time Approach) ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (20-240 นาที) ค่าพีเอช (2-8) ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (17-1,360 มิลลิกรัมต่อลิตร) และปริมาณเฟอร์รัสไอออน (500-5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร) ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีและซีโอดี ได้แก่ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1,360 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณเหล็กไอออนเท่ากับ 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 240 นาที ได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 97.8 เปอร์เซ็นต์และประสิทธิภาพการกำจัดสี 68.2 เปอร์เซ็นต์ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีโอดีเท่ากับ 1,294 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีปริมาณสีเท่ากับ 117 ADMI จะเห็นว่าค่าซีโอดียังเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเฟนตันอาจจะบำบัดน้ำเสียจากระบบพิมพ์เฟล็กโซกราฟีไม่เต็มที่เท่าที่ควร

**Kim (2016)** ทำการสร้างและการรวมตะกอนทางเคมีเพื่อบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design โดยใช้ โพลีออลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เป็นสารโคแอกกูแลนต์และใช้ cationic polyacrylamide เป็นสารช่วยรวมตะกอน ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ปริมาณของสาร โคแอกกูแลนต์ ค่า pH และปริมาณสารช่วยรวมตะกอน โดยพบว่าที่ PACl 3689 มิลลิกรัมต่อลิตร, PAM 39.9 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 5.4 สามารถกำจัด COD TSS และ SVI ได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ 35.3%, 77.5% และ 89.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

**Lin and Lai (2000)** ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอที่ใช้สีเอโซในกระบวนการผลิต พบว่า เมื่อใช้อัตราการไหลของโอโซนที่ 4 ลิตรต่อนาที บำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณ COD เริ่มต้น เท่ากับ 220 มิลลิกรัมต่อลิตร นาน 60 นาที สามารถกำจัด COD ได้สูงถึง 85.1% แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกำจัด COD ในน้ำเสียที่มี COD เริ่มต้นเท่ากับ 1,740 มิลลิกรัมต่อลิตร จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ลดลงคือ มีค่า 47.4%

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่อง Jar test ยี่ห้อ Raypa รุ่น R. Espinar, S.L. บริษัท จีรัฐแอสโซซิเอตส์ จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องผลิตโอโซน (Ozone Generator) บริษัท OZZON รุ่น OZ-A1-FT ประเทศไทย
3. ถังปฏิกิริยาทำจากอะคริลิกใส โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.4 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร
4. หัวกระจายอากาศ
5. เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH Meter) ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น UB-10 ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น T60 บริษัท TG Instrument ประเทศอังกฤษ
7. เตาย่อยวิเคราะห์ซีไอดี (COD digester) ยี่ห้อ Velp รุ่น ECO25 ประเทศอิตาลี
8. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius ประเทศสหรัฐอเมริกา
9. เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100p ประเทศเยอรมนี
10. ตู้อบ
11. หลอดย่อยสลาย (Digestion Vessels)
12. โถดูดความชื้น
13. เครื่องกรองสุญญากาศ รุ่น A-35 บริษัท Aspirator ประเทศญี่ปุ่น
14. กระดาษกรองใยแก้ว
15. เครื่องแก้วต่างๆ

##### 3.1.2 สารเคมี

1. เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) เกรดการค้า บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
2. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
3. โซเดียมไธโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย

5. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc.H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศเยอรมนี
6. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
7. โพแทสเซียมไดโครเมต (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
8. น้ำแ่่ง
9. น้ำกลั่น

### 3.2 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษา

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นน้ำเสียที่ได้เก็บรวบรวมจากการพิมพ์งานกล่องกระดาษ ด้วยระบบเพล็กซ์โกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำชนิดสีแดง ตัวอย่างน้ำเสียจะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติของน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของน้ำเสียที่ศึกษา

สมบัติที่วิเคราะห์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
พีเอช (pH)	pH meter
สี (color)	ADMI ตามวิธี Standard Methods 2120 E (APHA et al., 1992) อ้างถึงในเจตนิพิฐุ และคณะ, 2552)
ซีโอดี (COD)	Closed Reflux, Colorimetric Method ตามวิธี Standard Methods 5220 D (APHA et al., 2005)
ความขุ่น (turbidity)	Turbidity meter

### 3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอน

#### 3.3.1 ศึกษาผลของปริมาณเพอริคลอไรด์ที่มีผลต่อการบำบัด

1. ปิเปตสารละลายเพอริคลอไรด์เข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ปริมาตรตามที่ระบุในตารางที่ 3.2 ลงในหลอดทดลองขนาดใหญ่ เติมน้ำกลั่นลงในแต่ละหลอด ให้มีปริมาตรสุทธิ 10 มิลลิลิตร พร้อมคนให้ละลายผสมกันทั่ว

2. ตวงน้ำเสียตัวอย่างมา 200 มิลลิลิตร ใส่ลงในปิเปกเกอร์ นำไปวางในเครื่องจาร์เทสต์พร้อมปั่นกวนเร็วที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที

3. เทสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 1 (หลอดที่ 1 – 6) ลงในปิเปกเกอร์อย่างรวดเร็ว เติมน้ำกลั่นปั่นกวนที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นลดความเร็วในการปั่นกวนลงให้เหลือ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

4. ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปิเปตส่วนใสมาวัดสีและซีโอดี

5. ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 2 – 4 ซ้ำอีก 2 ครั้ง

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) ที่ใช้ในการทดลอง

หลอดที่	ปริมาตรสารละลาย $\text{FeCl}_3$ (mL)	ปริมาตรน้ำกลั่น (mL)	ปริมาณ $\text{FeCl}_3$ ในน้ำตัวอย่าง (g/L)
1	0	10.0	0
2	0.5	9.5	0.25
3	1.0	9.0	0.50
4	1.5	8.5	0.75
5	2.0	8.0	1.00
6	3.0	7.0	1.50
7	4.0	6.0	2.00

### 3.3.2 ศึกษาผลของค่าพีเอชในน้ำเสียที่มีผลต่อการบำบัด

1. ปิเปตสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ปริมาตรตามความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองก่อนหน้า ลงในหลอดทดลองขนาดใหญ่ เติมน้ำกลั่นลงในแต่ละหลอดให้มีปริมาตรสุทธิ 10 มิลลิลิตร พร้อมคนให้ละลายผสมกันทั่ว

2. ตวงน้ำเสียตัวอย่างใส่ลงในปิเปเจอร์ 6 ใบ ใบละ 200 มิลลิลิตร ปรับพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างให้เป็น 5, 6, 7, 8, 9, 10 ด้วย 5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ 1 โมลาร์ กรดซัลฟิวริก นำไปวางในเครื่องจาร์เทสต์พร้อมปั่นกวนเร็วที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที

3. เทสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 1 ลงในปิเปเจอร์อย่างรวดเร็ว เติมน้ำกลั่นปั่นกวนที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นลดความเร็วในการปั่นกวนลงให้เหลือ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

4. ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปิเปตส่วนใสมาวัดสี และซีไอดี

5. ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 2 – 5 ซ้ำอีก 2 ครั้ง

## 3.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีไอดีด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอนด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

### 3.4.1 รูปแบบการทดลอง

รูปแบบการทดลอง Central Composite Design ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 17.0 โดยมีปัจจัยที่ศึกษา 2 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (Dose) และ

ค่าพีเอชของน้ำเสีย (pH) และในแต่ละตัวแปรจะทำการศึกษา 5 ระดับคือ -1.4142, -1, 0, 1, 1.4142 โดยค่าสูงสุด (+1) และค่าต่ำสุด (-1) จะเลือกจากผลการทดลองในหัวข้อ 3.3 และนำค่าสูงสุดและต่ำสุดมาคำนวณหาค่าที่แท้จริงจากสมการที่ใช้ในการทดลองโดยใช้สมการที่ (2.36) แสดงดังตารางที่ 3.3 โดยสมการการทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลองแบบ Central Composite Design โดยใช้โปรแกรม MINITAB แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและระดับค่าของตัวแปรของรูปแบบการทดลอง Central Composite Design

ตัวแปร	-1.4142	-1	0	1	1.4142
ปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (กรัมต่อลิตร)	0.2	0.5	1.25	2	2.3
ค่าพีเอชของน้ำเสีย	4	5	7.5	10	11

ตารางที่ 3.4 สมการการทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลองแบบ Central Composite Design

ลำดับที่	ปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (กรัมต่อลิตร)		ค่าพีเอชของน้ำเสีย	
	coded	Uncoded	coded	Uncoded
1	-1	0.5	-1	5
2	0	1.25	-1.4142	4
3	0	1.25	0	7.5
4	-1	0.5	1	10
5	0	1.25	0	7.5
6	1	2	-1	5
7	0	1.25	0	7.5
8	0	1.25	0	7.5
9	1	2	1	10
10	1.4142	2.3	0	7.5
11	-1.4142	0.2	0	7.5
12	0	1.25	1.4142	11
13	0	1.25	0	7.5

### 3.4.2 การทดลองตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบ

1. ทำการบำบัดน้ำเสียตามลำดับการทดลองที่แสดงในตาราง 3.4 ทั้ง 13 การทดลองโดยใช้ปริมาตรน้ำเสียครั้งละ 200 มิลลิลิตร และนำน้ำเสียทั้งก่อนและหลังการบำบัดมาวิเคราะห์สีและซีโอดี
2. ทำชุดควบคุมตามสภาวะที่ใช้ในการทดลองในตารางที่ 3.4 แต่ไม่ต้องบำบัด แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติ พีเอช สี และค่าซีโอดี
3. บันทึกผลการทดลองและคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีในแต่ละการทดลอง ดังสมการ 3.1 และสมการที่ 3.2

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี (\%)} = \frac{\text{ค่าสีก่อนบำบัด} - \text{ค่าสีหลังบำบัด}}{\text{ค่าสีก่อนบำบัด}} \times 100 \quad (3.1)$$

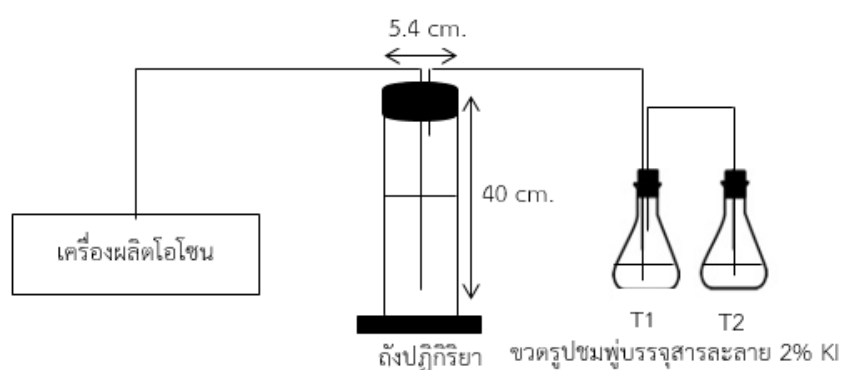
$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (\%)} = \frac{\text{ค่าซีโอดีก่อนบำบัด} - \text{ค่าซีโอดีหลังบำบัด}}{\text{ค่าซีโอดีก่อนบำบัด}} \times 100 \quad (3.2)$$

4. นำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณไปวิเคราะห์ทางสถิติพร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) ต่อการบำบัดด้วยวิธี RSM
5. บำบัดน้ำเสียตามสภาวะที่เหมาะสมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

### 3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีการโอโซนเนชั่น

#### 3.5.1 การเดินระบบโอโซนเนชั่น

การเดินระบบในงานวิจัยนี้เป็นแบบครั้ง (Batch test) ซึ่งแผนผังการทำงานของระบบแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานของระบบที่ใช้ในการทดลอง

### 3.5.2 การศึกษาอัตราการผลิตก๊าซโอโซน

1. จัดเตรียมระบบการทดลองดังรูปที่ 3.1
2. บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ความเข้มข้น 2% ลงในถังปฏิกิริยา 300 มิลลิลิตรและขวดดักจับก๊าซโอโซน (T1,T2) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
3. เปิดเครื่องผลิตโอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบเป็นเวลา 10 นาที
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำสารละลาย 2% KI ในถังปฏิกิริยาและขวด T1, T2 ไปวิเคราะห์ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้
5. ทำการทดลองข้อ 2-4 ซ้ำ แต่เปลี่ยนระยะเวลาการเดินระบบเป็น 20, 30, 40, 50, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ

### 3.5.3 ศึกษาผลของเวลาที่มีผลต่อการบำบัด

1. จัดเตรียมระบบดังรูปที่ 3.1
2. เติมน้ำเสียตามสภาพที่ได้รับลงในถังปฏิกิริยาปริมาตร 300 มิลลิลิตร และเติมสารละลาย 2% KI ลงในขวด ดักจับโอโซน (T1,T2) ขวดละ 100 มิลลิลิตร
3. เปิดเครื่องผลิตโอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบบำบัดน้ำเสียเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบตามกำหนดเวลาทำการวิเคราะห์น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ได้แก่ สีและซีไอดี
4. ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนเวลาในการบำบัดเป็น 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ตามลำดับ
5. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

### 3.5.4 ศึกษาผลของพีเอชของน้ำเสียที่มีผลต่อการบำบัด

1. จัดเตรียมระบบดังรูปที่ 3.1
2. ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 โดยใช้ 1 โมลาร์ของกรดซัลฟิวริกจากนั้นเทลงในถังปฏิกิริยา ปริมาตร 3,000 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลาย 2% KI ลงในขวดดักจับโอโซน T1 และ T2 ขวดละ 100 มิลลิลิตร
4. เปิดเครื่องผลิตโอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบบำบัดน้ำเสียที่ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 3.5.3
5. เมื่อครบตามกำหนดเวลาทำการวิเคราะห์น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ได้แก่ สีและซีไอดี
6. ทำการทดลอง ซ้ำแต่เปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียเป็น 5, 7, 9, 11
7. ทำการทดลอง ซ้ำอีก 2 ครั้ง

### 3.6 การหาสถานะที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีไอดีด้วยวิธี โอโซเนชันโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

#### 3.6.1 รูปแบบการทดลอง

ปัจจัยที่ศึกษา 2 ตัวแปร ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการบำบัด (Time) และค่าพีเอชของน้ำเสีย (pH) ตัวแปรและระดับค่าของตัวแปรทั้ง 5 ระดับที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.36 เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.5 ลำดับการทดลองที่ได้จากการออกแบบได้จากรูปแบบการทดลองแบบ Central Composite Design โดยใช้โปรแกรม MINITAB แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรและระดับค่าของตัวแปรของรูปแบบการทดลอง Central Composite Design

ตัวแปร	-1.4142	-1	0	1	1.4142
เวลาที่ใช้ในการบำบัด (Time)	23	45	98	150	172
ค่าพีเอชของน้ำเสีย (pH)	1.34	3	7	11	12.66

ตารางที่ 3.6 สถานะการทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลองแบบ Central Composite Design โดยใช้โปรแกรม MINITAB

ลำดับที่	เวลาที่ใช้ในการบำบัด (นาที)		ค่าพีเอชของน้ำเสีย	
	coded	Uncoded	coded	Uncoded
1	0	98	0	7
2	1	150	-1	3
3	0	98	0	7
4	0	98	0	7
5	-1.4142	23	0	7
6	-1	45	1	11
7	0	98	0	7
8	1.4142	172	0	7
9	0	98	0	7
10	0	98	1.4142	12.66
11	1	150	1	11
12	0	98	-1.4142	1.34
13	-1	145	-1	3

### 3.6.2 การทดลองตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบ

1. ทำการบำบัดน้ำเสียตามลำดับการทดลองที่แสดงในตาราง 3.6 ทั้ง 13 การทดลอง โดยใช้ปริมาตรน้ำเสียครั้งละ 300 มิลลิลิตร และนำน้ำเสียทั้งก่อนและหลังการบำบัดมาวิเคราะห์สีและซีไอดี

2. ทำชุดควบคุมตามสภาวะที่ใช้ในการทดลองในตารางที่ 3.5 แต่ไม่ต้องบำบัด แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติสี และค่าซีไอดี

3. บันทึกผลการทดลองและคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีในแต่ละการทดลอง ดังสมการ 3.1 และสมการที่ 3.2

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี (\%)} = \frac{\text{ค่าสีก่อนบำบัด} - \text{ค่าสีหลังบำบัด}}{\text{ค่าสีก่อนบำบัด}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (\%)} = \frac{\text{ค่าซีไอดีก่อนบำบัด} - \text{ค่าซีไอดีหลังบำบัด}}{\text{ค่าซีไอดีก่อนบำบัด}} \times 100 \quad (3.2)$$

4. นำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณไปวิเคราะห์ทางสถิติพร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) ต่อการบำบัดด้วยวิธี RSM

5. บำบัดน้ำเสียตามสภาวะที่เหมาะสมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมักพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอน (Coagulation-flocculation) เทียบกับวิธีโอโซนชัน (Ozonation) พร้อมทั้งหาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธีการออกแบบทางสถิติแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ผลการศึกษาที่ได้เป็นดังนี้

#### 4.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมักพิมพ์ฐานน้ำ

น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นน้ำเสียที่เก็บรวบรวมจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมักพิมพ์ฐานน้ำ ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการล้างลูกกลิ้งอนิลอกซ์ ลักษณะของน้ำตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา

ผลการวิเคราะห์สมบัติน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมักพิมพ์ฐานน้ำ พบว่าตัวอย่างน้ำมีค่าพีเอชเท่ากับ  $7.03 \pm 0.03$  สีในน้ำมีค่าเท่ากับ  $3,244 \pm 48$  ADMI ซีโอดีมีค่าเท่ากับ  $3,049 \pm 147$  มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าความขุ่นเท่ากับ  $2,173 \pm 3$  NTU ดังแสดงในตารางที่ 4.1 (ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข-1) จะเห็นได้ว่าน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมักพิมพ์ฐานน้ำมีค่าพีเอชเป็นกลาง มีความขุ่นสูง มีค่าสีและค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี หรือซีโอดี (COD) สูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560) ซึ่งหากไม่ได้รับการบำบัดอย่างถูกวิธีก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะอาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้

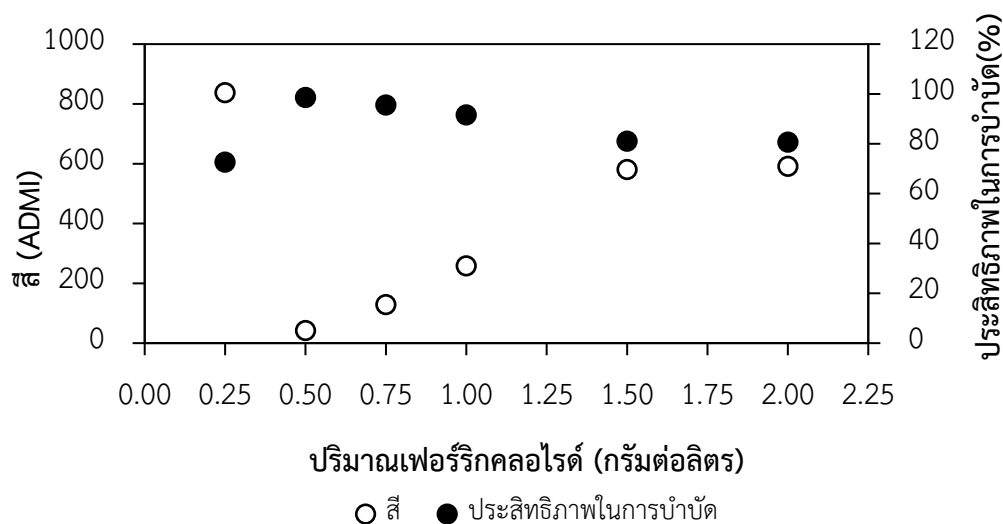
ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำ

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้
pH	7.03 ± 0.03
สี (ADMI)	3,244 ± 48
COD (mg/L)	3,049 ± 147
ความขุ่น (NTU)	2,173 ± 3.0

## 4.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอน

### 4.2.1 ผลของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์

เมื่อนำน้ำเสียโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำปริมาตร 300 มิลลิลิตร ซึ่งมีค่าพีเอชตามสภาพที่ได้รับมาบำบัดด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอนโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) เป็นสารรวมตะกอน พร้อมกับแปรค่าปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ระหว่าง 0.25 – 2.00 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข-3.1)

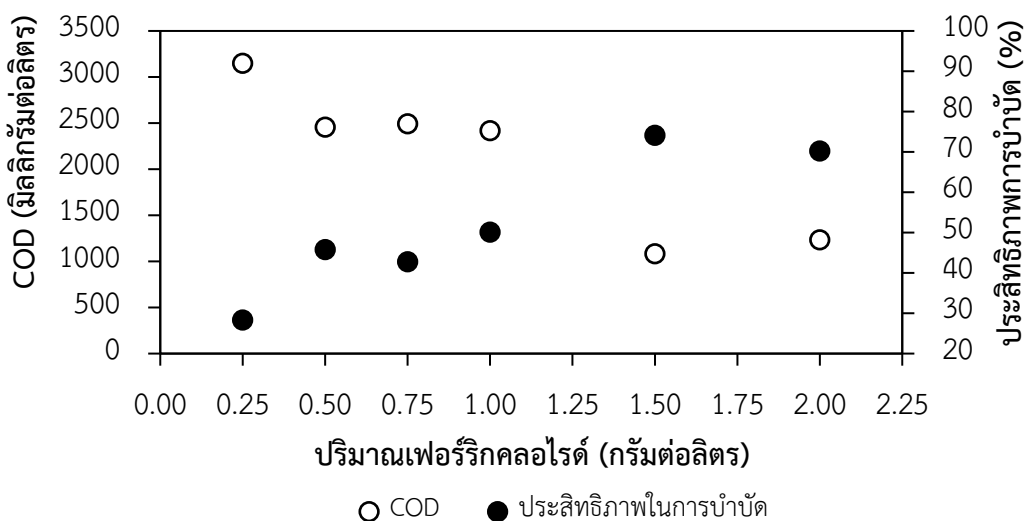


รูปที่ 4.2 ผลของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อความสามารถในการกำจัดสีของน้ำตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.2 พบว่าการเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์มีผลต่อความสามารถในการกำจัดสีด้วยวิธี coagulation-flocculation ตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจะมีค่าสีลดลงจาก  $987 \pm 275$  ADMI เหลือ  $42 \pm 9$  ADMI เมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ในน้ำจาก 0.25 กรัมต่อลิตร เป็น 0.5 กรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดสี 98.6 % ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลมาจากปริมาณเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ที่มีมากขึ้นในระบบ ทำให้ค่าศักย์ซีตา (Zeta potential) ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงศูนย์ (Kim et al., 2004) ส่งผลให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค (Destabilization) ลดแรงผลักของอนุภาคและทำให้เกิดการเกาะรวมกันของอนุภาคมากขึ้น

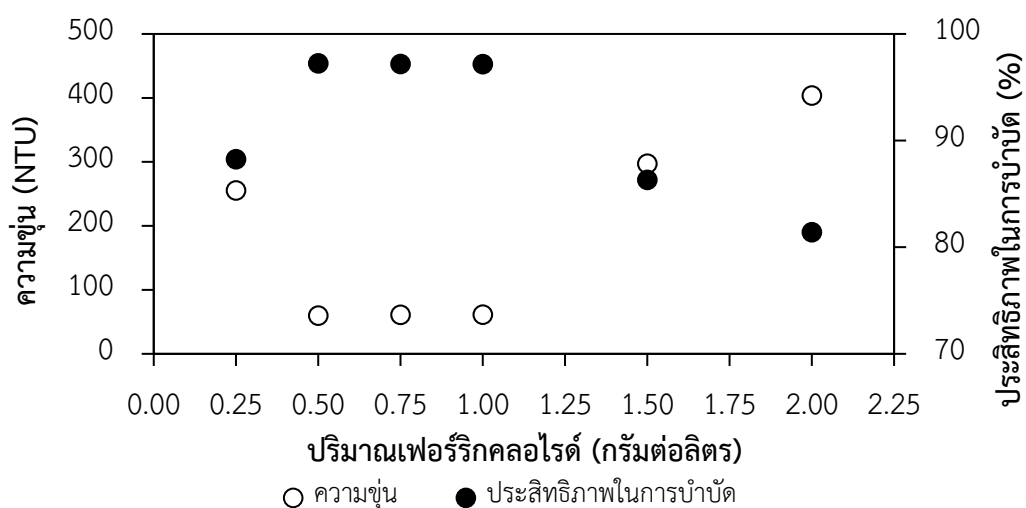
(พรรคัด, 2560) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์จาก 0.5 กรัมต่อลิตร เป็น 2.0 กรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีมีแนวโน้มลดลงจาก 98.6 % เหลือ 80.7 % (รูปที่ 4.2) สีในตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $42 \pm 9$  ADMI เป็น  $592 \pm 4$  ADMI สะท้อนให้เห็นว่าการเติมสารรวมตะกอนในปริมาณมากเกินไป สามารถทำให้อนุภาคแขวนลอย รวมทั้งสีในน้ำจะกลับมาอยู่ในสถานะเสถียรอีกครั้ง (Restabilization) ซึ่งเป็นผลมาจากเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ที่มีมากขึ้น ทำให้พื้นผิวของอนุภาคต่างๆ ในน้ำมีสภาพเป็นบวกสูงขึ้น จนเกิดแรงผลักรวมกว่าแรงดูด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim et al. (2004) ที่พบว่า Zeta potential ของสีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) และสีดีสเพอร์ส (Disperse dyes) มีค่าเพิ่มจากศูนย์เป็นบวก เมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์จนเข้าสู่สถานะดังกล่าว ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการ Coagulation-Flocculation ในการกำจัดสีทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดลง

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อความสามารถในการกำจัดซีโอดี (รูปที่ 4.3) พบว่าซีโอดีในน้ำเสียมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ในปริมาณมากขึ้น ตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีโอดีลดลงจาก  $3,049 \pm 147$  มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ  $1,233 \pm 15$  มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์จาก 0.25 กรัมต่อลิตร เป็น 2 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 28.3% เป็น 74.1% (ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข-3.1) ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ สีนินากู (2543) ที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์กล่องกระดาษโดยใช้สารส้มเฟอร์ริกคลอไรด์และพอลิเมอร์ประจุบวกเป็นสารสร้างและรวมตะกอน อย่างไรก็ตามพบว่าซีโอดีในน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดยังมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องมีกระบวนการอื่นมาใช้ร่วมกันเพื่อบำบัดน้ำเสียให้มีค่าซีโอดีเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด



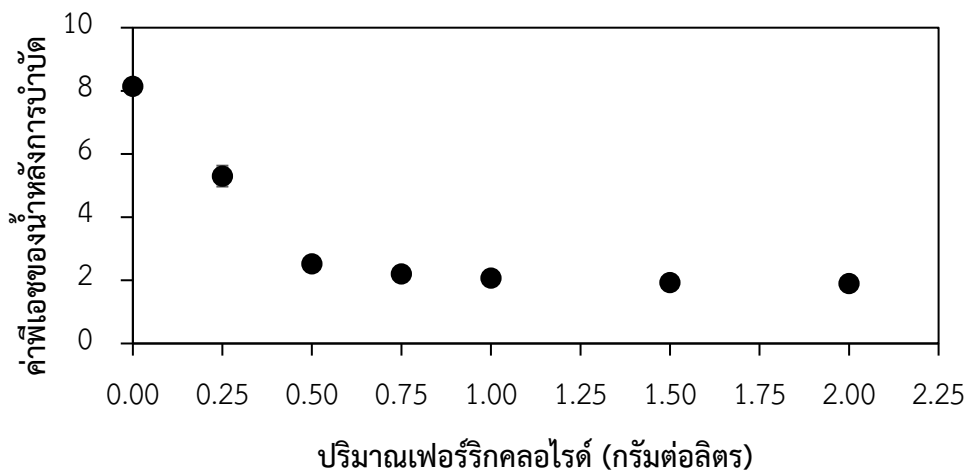
รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์

ผลการวิเคราะห์สมบัติอื่นๆ ได้แก่ ค่าความขุ่นและค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการบำบัด แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 (ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข-3.1) ตามลำดับ ซึ่งพบว่าผลของปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำมีแนวโน้มคล้ายกับผลของปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี โดยพบว่าตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจะมีค่าความขุ่นลดลงจาก  $255 \pm 0.6$  NTU เหลือ  $59 \pm 0.1$  NTU เมื่อปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์ในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.25 กรัมต่อลิตร เป็น 0.5 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 72.7 % เป็น 98.6 % (รูปที่ 4.4) การเพิ่มปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์จาก 0.5 กรัมต่อลิตร เป็น 2.0 กรัมต่อลิตร ทำให้ตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าความขุ่นเพิ่มขึ้นเป็น  $404 \pm 0.2$  NTU ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจึงมีแนวโน้มลดลงเหลือ 81.41% ทั้งนี้อิทธิพลของปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์ต่อการกำจัดความขุ่นในน้ำสามารถอภิปรายได้ในทำนองเดียวกันกับผลของปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์ที่มีผลต่อการกำจัดสีในน้ำ



รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์ต่อความขุ่นของน้ำที่ผ่านการบำบัด

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์ต่อพีเอชของน้ำหลังการบำบัดด้วยวิธี Coagulation-Flocculation พบว่าพีเอชของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีแนวโน้มลดลงและมีฤทธิ์เป็นกรดมากขึ้นตามปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.5) ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการใช้เพอร์ริกคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอนและรวมตะกอนซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรด ทำให้เป็นการเพิ่มไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) กับระบบมีผลทำให้น้ำเสียมีความเป็นกรดมากขึ้นค่าพีเอชหลังการบำบัดจึงมีค่าลดลง

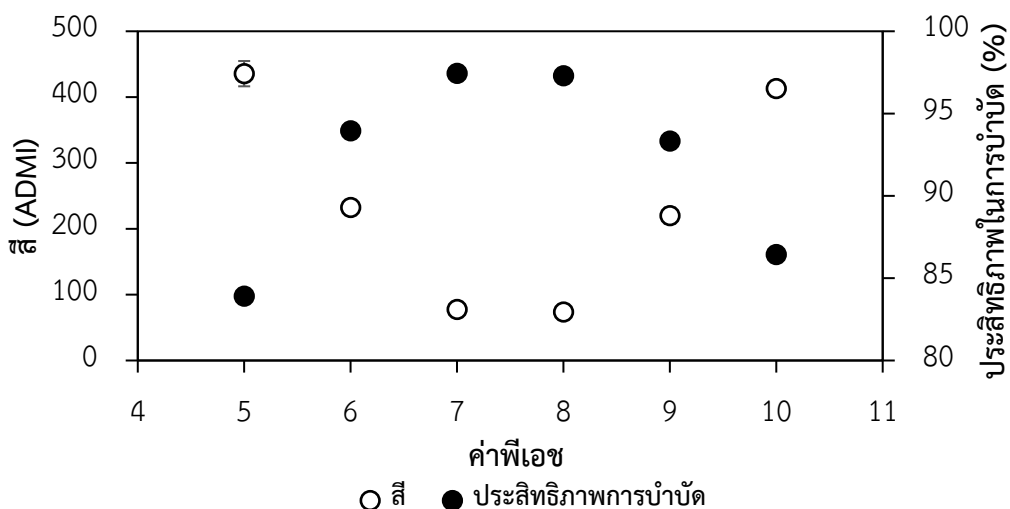


รูปที่ 4.5 ค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัดด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์

จากผลการทดลองดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ 0.5 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าสีในน้ำเสียได้มากที่สุด และทำให้ค่าสีในน้ำเสียเป็นไปตามมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเกิดขึ้นได้สูงสุดเมื่อใช้ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ 1.5 กรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามพบว่าค่าซีโอดีในน้ำที่ผ่านการบำบัด ณ สถานะดังกล่าว ยังมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ 0.5 กรัมต่อลิตร สำหรับการศึกษาในการทดลองต่อไป

#### 4.2.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นในน้ำเสีย

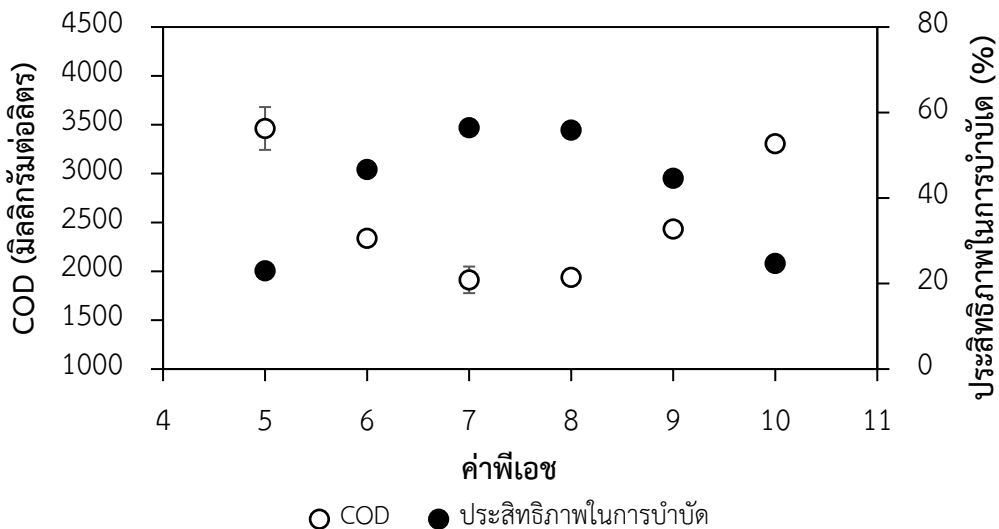
การศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดี ทำการทดลองโดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำตัวอย่างมีค่าแตกต่างกัน พร้อมกับเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ในปริมาณที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2.1 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6 (ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข-3.2)



รูปที่ 4.6 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการกำจัดสีของน้ำตัวอย่าง

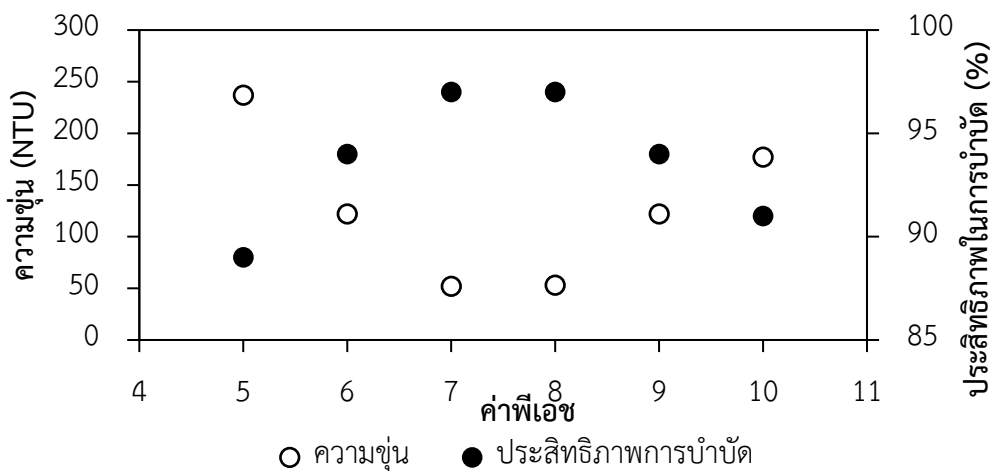
จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสี เมื่อค่าพีเอชเพิ่มจาก 5 เป็น 8 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 83.91 เปอร์เซ็นต์เป็น 97.3 เปอร์เซ็นต์ น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าสีลดลงจาก  $436 \pm 1.1$  ADMI เหลือ  $76 \pm 2.1$  ADMI ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีแนวโน้มลดลง เมื่อพีเอชของน้ำเสียมีค่าเพิ่มเป็น 9 และ 10 ผลจากการศึกษาพบว่าสีในน้ำเสียถูกกำจัดได้ดีเมื่อพีเอชของน้ำเสียอยู่ในช่วงเป็นกลางไปถึงด่าง (7-8) ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจาก ผลของพีเอชต่อการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของสารประกอบเชิงซ้อนหรือสารคอมเพล็กซ์ระหว่าง  $Fe^{3+}$  กับ  $OH^-$  โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_{3(s)}$ ) หรือที่เรียกว่า ferric flocs ที่เกิดขึ้นได้ในน้ำที่มีพีเอชระหว่าง 4-12 และจะมีปริมาณหนาแน่นมากที่สุดเมื่อพีเอชมีค่าในช่วง 7-8 (Reynolds, 1982; Kim et al., 2004; Roa-Morales et al., 2014) Ferric floc ที่เกิดขึ้นทำหน้าที่เป็นเป้าสัมผัสให้สารแขวนลอยรวมทั้งสารที่ทำให้เกิดสีในน้ำมาเกาะเป็นกลุ่มมากขึ้น จนมีน้ำหนักมากพอที่จะจมตัวลงสู่ด้านล่างโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ส่งผลให้สีของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลง ปริมาณตะกอนเบาของ Ferric Floc มีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำมีค่าพีเอชเป็นกรดหรือเป็นด่างมากขึ้น (Reynolds, 1982; Kim et al., 2004; Roa-Morales et al., 2014) นอกจากนี้พีเอชของน้ำมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงศักย์ซีตาของอนุภาคที่พบในน้ำ โดยในงานวิจัยของ Kim et al. (2004) พบว่า ค่า zeta potential ของสีย้อมเอโซ่จำพวกสีรีแอกทีฟ (reactive dyes) และสีย้อมกระจาย (Disperse dye) จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น เมื่อพีเอชในน้ำมีค่าเพิ่มจาก 4 เป็น 6 จะมีแนวโน้มในการทำลายเสถียรภาพมากขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 9 – 10 จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุลบ ที่สำคัญคือ  $Fe(OH)_4^-$  ซึ่งมีประจุลบเช่นเดียวกับอนุภาคของสีย้อมเอโซ่ ทำให้เกิดการผลักกันระหว่างอนุภาค ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าลดลง เมื่อพีเอชมีค่ามากกว่า 8 (Tak-Hyun et al., 2004)

พีเอชเริ่มต้นของน้ำยังมีผลต่อความสามารถของวิธี Coagulation-Flocculation ในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียในทำนองคล้ายคลึงกันกับผลของพีเอชต่อความสามารถในการกำจัดสีในน้ำเสีย ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข-3.2) ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเกิดขึ้นได้ดีเมื่อน้ำมีค่าพีเอชในช่วงระหว่าง 7-8 ที่สภาวะดังกล่าว ซีโอดีของน้ำมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้น (ก่อนบำบัด) เท่ากับ  $3,049 \pm 147$  มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ  $1,937 \pm 51$  มิลลิกรัมต่อลิตร การเพิ่มหรือลดพีเอชจาก 7-8 ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 4.7) ซึ่งอาจเกี่ยวเนื่องกับการเกิดของตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (ferric flocs) ที่ทำหน้าที่เป็นเป้าสัมผัสให้เกิดการรวมตะกอนของอนุภาคในน้ำ โดยตะกอนดังกล่าวจะพบหนาแน่นมากที่สุด เมื่อน้ำมีค่าพีเอชระหว่าง 7-8 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำมีค่าพีเอชลดลงหรือเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์มีแนวโน้มลดลง

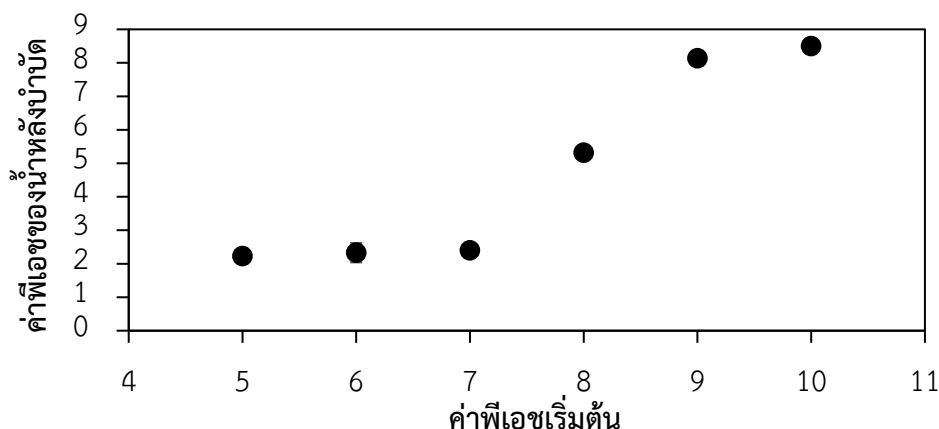


รูปที่ 4.7 ผลของฟิเอชเริ่มต้นของน้ำต่อความสามารถในการกำจัดซีโอดี

ผลการวิเคราะห์สมบัติอื่นๆ ได้แก่ ค่าความขุ่นและค่าฟิเอชของน้ำเสียหลังการบำบัด แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ (ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข-3.2) โดยจากรูปที่ 4.8 พบว่าผลของค่าฟิเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำ มีแนวโน้มคล้ายกับผลของค่าฟิเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี โดยพบว่า ตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจะมีความขุ่นลดลงจาก  $237 \pm 1.1$  NTU เหลือ  $52 \pm 0.2$  NTU เมื่อค่าฟิเอชในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 8 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 89.2 เปอร์เซ็นต์ เป็น 97.6 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อค่าฟิเอชเพิ่มขึ้นจาก 9 เป็น 10 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะมีค่าลดลงจาก 97.6 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 91.1 เปอร์เซ็นต์ โดยผลของค่าฟิเอชเริ่มต้นในน้ำเสีย ต่อการกำจัดความขุ่นในน้ำ สามารถอธิบายได้ในการทำงานเดียวกันกับผลของค่าฟิเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อการกำจัดสีในน้ำ

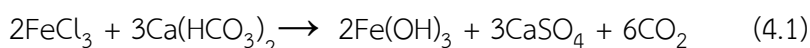


รูปที่ 4.8 ผลของฟิเอชเริ่มต้นต่อความขุ่นของน้ำที่ผ่านการบำบัด



รูปที่ 4.9 ค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัดด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ที่พีเอชเริ่มต้นต่างกัน

จากรูปที่ 4.9 พบว่าค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย การลดลงของพีเอชเป็นผลมาจากธรรมชาติของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่มีฤทธิ์เป็นกรด เฟอร์ริกคลอไรด์เข้าทำปฏิกิริยาสารที่ทำให้เกิดสภาพต่างในน้ำ เช่น  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  เพื่อเกิดเป็นตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ดังสมการ (4.1) (Reynolds, 1982) ส่งผลให้สภาพต่างในตัวอย่างน้ำมีค่าลดลง พีเอชของน้ำมีความเป็นกรดมากขึ้นเมื่อเทียบกับค่าพีเอชเริ่มต้น ในขณะที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 9 – 10 จะมีค่าพีเอชหลังการบำบัดลดลงไม่มากเป็นผลมาจากการที่น้ำเสียมีสภาพต่างเพิ่มขึ้นจากการปรับพีเอชด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำเสียเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่าช่วงพีเอช 5 – 8 (วรินทร์, 2554)



ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำที่พีเอชเริ่มต้นต่างกัน พบว่าความสามารถในการกำจัดสีที่พีเอชเริ่มต้น 7 และ 8 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ค-1.2) และทำให้ค่าสีในน้ำเสียเป็นไปตามมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ นอกจากนี้จากผลการทดลองพบว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7 จะสามารถบำบัดค่าซีไอได้ดีมากที่สุด อีกทั้งน้ำเสียตามสภาพที่ได้รับมีค่าพีเอชเท่ากับ  $7.03 \pm 0.03$  ดังนั้นจึงเลือกค่าปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตรและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ  $7.03 \pm 0.03$  ไปใช้ในการกำหนดระดับค่าของตัวแปรเพื่อใช้ในการออกแบบการทดลอง Central Composite Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีและสารอินทรีย์ด้วยวิธี Coagulation-Flocculation ต่อไป

### 4.3 การหาตัวแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอน

ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MINITAB นั้นแบบจำลองที่จะใช้อธิบายผลของตัวแปรอิสระ ( $X_1, X_2$ ) ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีด้วยวิธี Coagulation-Flocculation มี 4 แบบจำลอง ดังแสดงในสมการที่ (4.2)-(4.5) สำหรับการทดลองพร้อมกับสถานะที่ทำการศึกษาออกแบบและวิเคราะห์ผลโดยใช้วิธี Central Composite Design (CCD) ร่วมกับวิธี Response Surface Methodology (RSM) รวมไปถึงผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีตามสถานะที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้น เป็นดังตารางที่ 4.2

*Linear Model:*

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \quad (4.2)$$

*Linear+Square Model*

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_1^2 X_1^2 + \beta_2^2 X_2^2 \quad (4.3)$$

*Linear+Interaction Model:*

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (4.4)$$

*Full quadratic Model:*

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_1^2 X_1^2 + \beta_2^2 X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (4.5)$$

เมื่อ  $Y$  = ตัวแปรตาม ซึ่งในหัวข้อนี้คือ ประสิทธิภาพการกำจัดสี

$X_1, X_2$  = ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ตามลำดับ

$\beta_0$  = ค่าคงที่ของสมการถดถอย

$\beta_i$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ  $X_i$  แต่ละตัว

$\beta_i^2$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยยกกำลังสองของตัวแปรอิสระ  $X_i$  แต่ละตัว

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำตัวอย่าง ดำเนินการบำบัดตามสภาวะการทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลอง Central Composite Design

ลำดับที่	ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ (กรัมต่อลิตร) ( $X_1$ )		ค่าพีเอชของน้ำเสีย ( $X_2$ )		ประสิทธิภาพในการบำบัดสี (%)
	coded	Uncoded	coded	Uncoded	
1	-1	0.5	-1	5	85.57
2	0	1.25	-1.4142	4	81.49
3	0	1.25	0	7.5	89.32
4	-1	0.5	1	10	68.84
5	0	1.25	0	7.5	89.20
6	1	2	-1	5	71.56
7	0	1.25	0	7.5	90.99
8	0	1.25	0	7.5	94.01
9	1	2	1	10	74.84
10	1.4142	2.3	0	7.5	64.05
11	-1.4142	0.2	0	7.5	61.31
12	0	1.25	1.4142	11	91.62
13	0	1.25	0	7.5	89.97

#### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง

ในการตัดสินใจความเหมาะสมของตัวแบบจำลองทั้ง 4 แบบตามที่กล่าวมาข้างต้น จะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้ว ( $R^2$ -adj) เพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามที่ศึกษา ผลจากการใช้โปรแกรม MINITAB ประมวลผล ได้ค่าดังกล่าวของแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.3

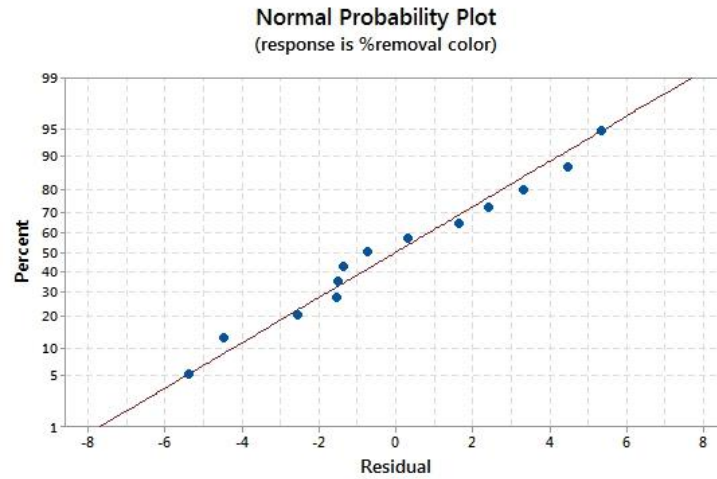
**ตารางที่ 4.3** ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองเพื่อทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำตัวอย่าง

แบบจำลอง	SE	R <sup>2</sup> (%)	R <sup>2</sup> -adj (%)
Linear	12.52	0.14	0
Linear + square	5.37	85.35	77.99
Linear + interaction	12.77	6.48	0
Full quadratic	4.32	91.67	85.91

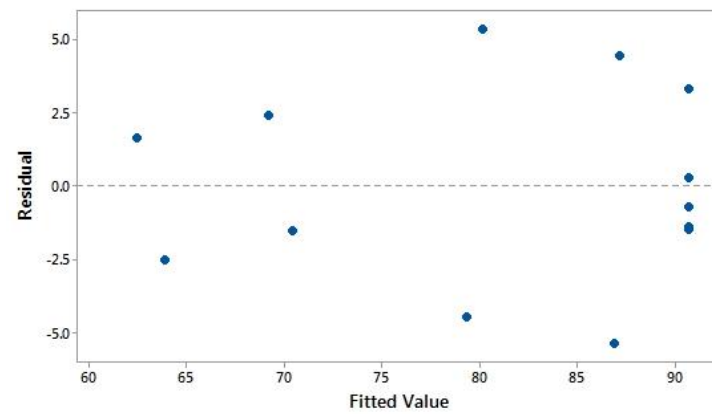
จากตารางที่ 4.3 พบว่าแบบจำลอง Full quadratic มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำสุดคือ 4.32 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R<sup>2</sup>-adj) มากที่สุดคือ 85.91% แสดงว่าแบบจำลอง Full Quadratic มีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองที่เหลือในการนำมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์และพีเอชเริ่มต้นของน้ำ) กับตัวแปรตามที่ศึกษา ซึ่งในที่นี้ก็คือประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยวิธี Coagulation-flocculation

#### 4.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

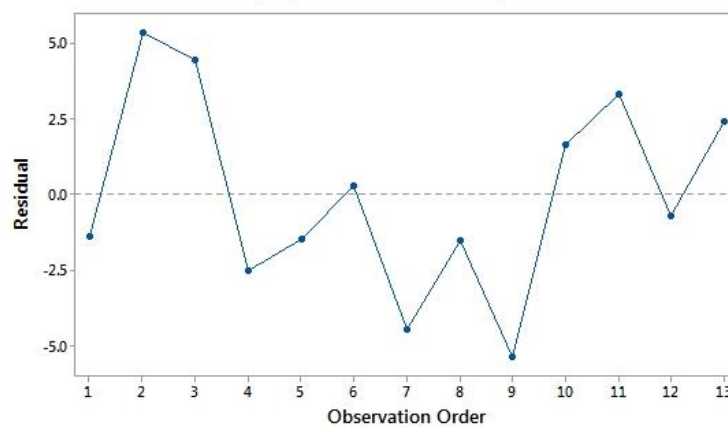
ความถูกต้องของแบบจำลอง Full quadratic เพื่อใช้ทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรที่ศึกษา ขึ้นอยู่กับลักษณะความคลาดเคลื่อน ( $\epsilon$ ) ของตัวแบบ ซึ่งต้องเป็นไปตามข้อตกลง (assumption) ที่กำหนดไว้ 4 ข้อ ได้แก่ (1) ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ (2) ความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนคงที่เท่ากับ  $\sigma^2$  (3) ความคลาดเคลื่อนแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน และ (4) ความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ (ศิริชัย, 2018) การตรวจสอบ assumption ของความคลาดเคลื่อน ทำได้โดยการตรวจสอบจากแผนภาพการกระจายของส่วนเหลือ (residual) ใน 3 ลักษณะ ได้แก่ (1) การวิเคราะห์การแจกแจงปกติของ residual ด้วยการใช้อนุภาพความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) (2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ residual ด้วยแผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับค่าพยากรณ์ (Residual vs. Fitted Value) และ (3) การวิเคราะห์ความเป็นอิสระของ residual ด้วยแผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับลำดับเวลา (Residual vs. Observation Order) หากผลการวิเคราะห์แผนภาพการกระจายของส่วนเหลือทั้ง 3 ลักษณะเป็นไปตามข้อตกลงที่กำหนด ทำให้ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของส่วนเหลือ ซึ่งประมาณค่าคลาดเคลื่อนจะมีลักษณะเป็นไปตาม assumption ของข้อ (4) (ศิริชัย, 2018) ทั้งนี้แผนภาพการกระจายของส่วนเหลือที่ได้จากผลการทดลอง มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.12



รูปที่ 4.10 แผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของข้อมูล  
จากแบบจำลอง Full quadratic



รูปที่ 4.11 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับพยากรณ์ของข้อมูล  
จากแบบจำลอง Full quadratic



รูปที่ 4.12 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับลำดับเวลาจากแบบจำลอง Full quadratic

จากรูปที่ 4.10 พบว่าจุดต่างๆมีการเรียงตัวกันในเชิงเส้นตรง 45 องศา แสดงให้เห็นว่าส่วนเหลือมีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนจึงเป็นไปตาม assumption ที่กำหนด ผลการพล็อตการกระจายในรูปแบบที่ 4.11 พบว่าส่วนเหลือมีการกระจายที่สม่ำเสมอ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่าส่วนเหลือมีความแปรปรวนคงที่ ผลการพล็อตกราฟในรูปแบบที่ 4.12 พบว่า ข้อมูลมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงให้เห็นว่า ข้อมูลชุดนี้เป็นอิสระต่อกัน สะท้อนให้เห็นว่า ข้อมูลที่นำมาใช้สร้างแบบจำลอง Full quadratic มีสมบัติเป็นไปตามข้อตกลงที่กำหนดไว้ในเรื่องของความคลาดเคลื่อน แบบจำลองที่ได้จึงมีความถูกต้องเหมาะสมที่นำไปใช้ในการทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วยวิธีสร้างและรวมตะกอน

#### 4.3.3 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ

การดำเนินการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปร ( $\beta$ ) โดยใช้วิธี Response Surface Regression จากโปรแกรม MINITAB ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic

Term	Coef.	SE Coef.	t	p-value
Constant	60.2	19.1	3.15	0.016
$\beta_1$	41.9	11.6	3.62	0.008*
$\beta_2$	1.23	4.29	0.29	0.783
$\beta_1^2$	-25.00	2.96	-8.46	0.000*
$\beta_2^2$	-0.301	0.266	-1.13	0.295
$\beta_{12}$	2.66	1.15	2.31	0.054

หมายเหตุ S = 4.322 R<sup>2</sup> = 91.67% R<sup>2</sup>(adj) = 85.71%

\* หมายถึง ค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 95% (p < 0.05)

จากตารางที่ 4.4 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสีกับตัวแปรอิสระ (ปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (dose) และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (pH)) กับ ได้ดังสมการที่ (4.6)

$$Y = 60.2 + 41.9X_1 + 1.23X_2 - 25X_1^2 - 0.301X_2^2 + 2.66X_1X_2 \quad (4.6)$$

#### 4.3.4 การวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ

การทดสอบนัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย เป็นการทดสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวในสมการนั้นมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามหรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐานดังนี้

H<sub>0</sub>:  $\beta_i = 0$  หรือตัวแปรอิสระที่ i ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

H<sub>1</sub>:  $\beta_i \neq 0$  หรือตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

การตัดสินใจสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยสามารถพิจารณาได้จากค่าสถิติ  $t$  หรือ  $p$ -value โดยจะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อค่าสถิติ  $t$  ที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 4.4 มีค่ามากกว่า  $t_{\alpha/2, n-k-1}$  (เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนการทดลอง และ  $k$  คือจำนวนสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง) โดยเป็นค่าที่เปิดได้จากตารางสถิติ (ธีรยุทธ์, 2558) นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากค่า  $p$ -value โดยจะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ  $p$ -value ของตัวแปรอิสระมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ( $\alpha = 0.05$ ) จากตารางที่ 4.4 ในส่วนของ Linear term อันได้แก่  $X_1$  และ  $X_2$  พบว่าค่า  $p$ -value ในการวิเคราะห์นัยสำคัญของ  $\beta_1$  มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) แสดงว่าปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ในส่วนของ Linear terms มีค่า  $p$ -value ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (ตารางที่ 4.5) ยืนยันว่าปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสี เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์นัยสำคัญในส่วนของตัวแปรอิสระยกกำลังสอง (Square terms:  $X_1^2, X_2^2$ ) จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าค่า  $p$ -value ในการวิเคราะห์นัยสำคัญของ  $\beta_1^2$  มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) แสดงว่าเทอมของ dose  $\times$  dose มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาในส่วนของอิทธิพลร่วมของปัจจัย (Interaction terms) ได้แก่ dose  $\times$  pH พบว่า ค่า  $p$ -value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) แสดงว่าอิทธิพลร่วมของตัวแปรอิสระทั้งสองปัจจัยไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมนัยสำคัญ

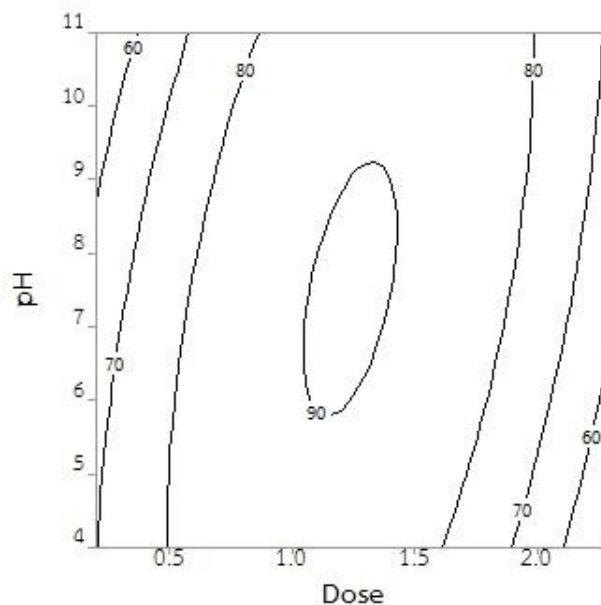
**ตารางที่ 4.5** ผลการวิเคราะห์แปรปรวน (Variance) จากแบบจำลอง Full Quadratic ของประสิทธิภาพในการบำบัดสี

Source	$p$
Linear	0.021*
Square	0.000*
Interaction	0.054

หมายเหตุ \* หมายถึง ค่า  $p$ -value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 95% ( $p < 0.05$ )

#### 4.3.5 การสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพการกำจัดสี

แบบจำลอง Full quadratic ที่ได้ดังแสดงในสมการ (4.6) ถูกนำมาใช้สร้างพื้นผิวตอบสนองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรที่ศึกษาต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วยวิธี Coagulation-Flocculation กราฟโครงร่าง (Contour plot) ที่ได้จากสมการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.13



**รูปที่ 4.13** กราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงอิทธิพลของปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

จากรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีจะเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ซึ่งหากมีการเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์มากกว่าจุดที่เหมาะสมนั้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีค่าลดลง โดยจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีจะเปลี่ยนแปลงจากช่วง 50 - 60 % เป็นมากกว่า 90 % เมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์จาก 0.2 กรัมต่อลิตรเป็น 1.25 กรัมต่อลิตร แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์จาก 1.25 กรัมต่อลิตรเป็น 2.3 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 50 - 60 % สอดคล้องกับงานวิจัยของ Papic et al. (2004) ที่ทำการบำบัดน้ำเสียจากสังเคราะห์รีแอกทีฟเรด ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารสร้างและรวมตะกอน ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 กรัมต่อลิตร สามารถบำบัดสีย้อมได้ 99 % แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็น 5 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจากเบสเป็นกรด (ค่าพีเอชจาก 11 เป็น 4) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจากเบสเป็นกรด ที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ 0.2 กรัมต่อลิตร จะเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดจากช่วง 60 - 70 % เป็น 70 - 80 % จะพบว่าที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ 1.25 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7.5 จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีอย่างน้อย 90 %

#### 4.3.6 การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมและการยืนยันผล

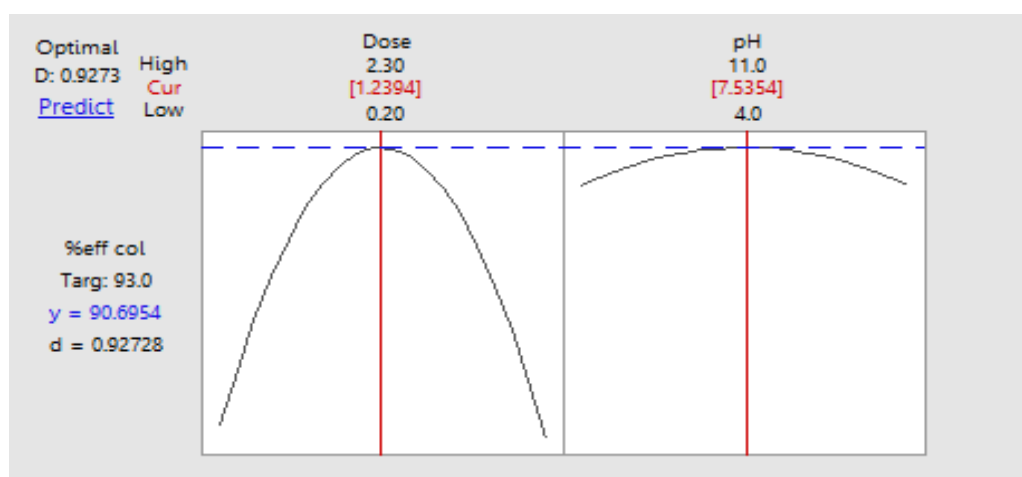
แบบจำลอง Full Quadratic ที่ได้ ถูกนำมาวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสม โดยใช้ ฟังก์ชัน Response Optimization ในโปรแกรม Minitab Version 17.0 กำหนดค่าที่เกี่ยวข้องดังนี้

- ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) คือ ค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) มากที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตบนเท่ากับ 94 เปอร์เซ็นต์

- ค่าเป้าหมาย (Target) คือ ค่ามาตรฐานหรือค่าเป้าหมายของผลตอบ โดยวัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้เพื่อต้องการบำบัดสีในน้ำเสียให้มีค่าสีเป็นไปตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานจึงกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 91 เปอร์เซ็นต์

- ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) คือ ค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) ที่มีค่าน้อยที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตล่างเท่ากับ 61.31 เปอร์เซ็นต์

สถานะที่เหมาะสมของการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์แบบเฟล็กโซกราฟฟิกที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำที่ได้จากแบบจำลองเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 91 เปอร์เซ็นต์ คือปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ 1.2394 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7.54 (รูปที่ 4.14)



รูปที่ 4.14 สถานะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีในน้ำเสียจากการพิมพ์กล่องกระดาษแบบเฟล็กโซกราฟฟิกที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ

การยืนยันความถูกต้องของผลการทำนายสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีด้วยวิธี Coagulation-Flocculation ของแบบจำลอง Full Quadratic ทำการทดลองด้วยการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียจำนวน 10 ตัวอย่าง -สถานะที่ใช้ในการบำบัดคือ คือปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ 1.24 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7.5 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีตามสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธีสร้าง-รวมตะกอน

การทดลองที่	ประสิทธิภาพในการกำจัดสี (%)
1	93.17
2	89.01
3	90.95
4	92.74
5	88.66
6	89.92
7	91.91
8	92.24
9	89.81
10	90.15
เฉลี่ย	90.83 ± 1.61

จากตารางที่ 4.6 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีจากการทดสอบเพื่อยืนยันความเหมาะสมของแบบจำลอง มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 90.83 ± 1.61 % และไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากค่าที่ทำนายได้จากสมการ (Predicted value) เท่ากับ 90.67%

4.3.7 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดตามสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลอง ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีสร้างตะกอนและรวมตะกอนตามสภาวะที่เหมาะสม

คุณลักษณะ	หลังการบำบัด
พีเอช	5.30 ± 1.2
สี (ADMI)	300 ± 7.3
ซีโอดี (COD, mg/L)	1,749 ± 78.6

จากตารางที่ 4.7 พบว่าสีในตัวอย่างน้ำที่บำบัดมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ อย่างไรก็ตามพบว่าการบำบัดน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบฟล็อกโซกราฟีที่ใช้หมัก

พิมพ์ฐานน้ำที่สภาวะดังกล่าว ยังไม่สามารถบำบัดให้ค่าซีโอดีในน้ำมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

#### 4.4 การหาตัวแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอน

ในการหาตัวแบบจำลองที่เหมาะสมในการอธิบายผลของตัวแปรอิสระ ( $X_1$ ,  $X_2$ ) ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีด้วยวิธี Coagulation-Flocculation จะใช้แบบจำลองและวิธีการดำเนินการทดสอบเช่นเดียวกับที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.3 ต่างกันตรงตัวแปรตามที่ใช้ในตัวแบบจำลองคือ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี CCD ร่วมกับวิธี RSM เป็นดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำตัวอย่าง ดำเนินการบำบัดตามสภาวะการทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลอง Central Composite Design

ลำดับที่	ปริมาณเพอร์ริคคลอไรด์ (กรัมต่อลิตร) ( $X_1$ )		ค่าพีเอชของน้ำเสีย ( $X_2$ )		ประสิทธิภาพในการบำบัดสี (%)
	coded	Uncoded	coded	Uncoded	
1	-1	0.5	-1	5	74.43
2	0	1.25	-1.4142	4	64.08
3	0	1.25	0	7.5	75.87
4	-1	0.5	1	10	69.56
5	0	1.25	0	7.5	78.74
6	1	2	-1	5	72.56
7	0	1.25	0	7.5	74.68
8	0	1.25	0	7.5	74.25
9	1	2	1	10	74.04
10	1.4142	2.3	0	7.5	74.09
11	-1.4142	0.2	0	7.5	75.74
12	0	1.25	1.4142	11	74.76
13	0	1.25	0	7.5	75.60

#### 4.4.1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง

ผลจากการใช้โปรแกรม MINITAB ประมวลผลด้วยวิธี Response Surface Methodology ได้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้ว ( $R^2$ -adj) ของแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.9

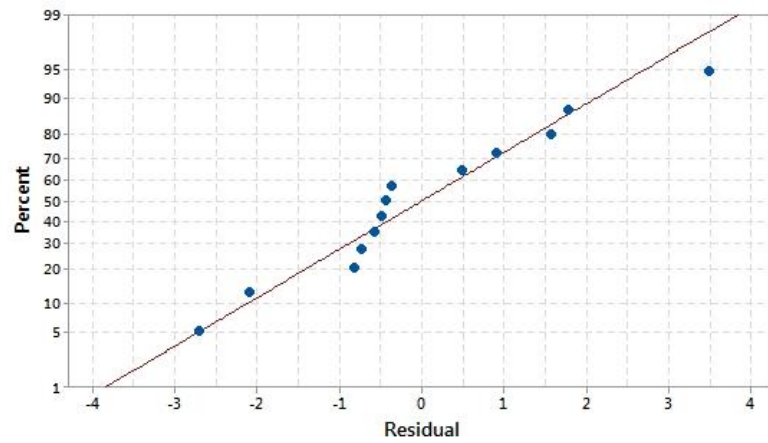
**ตารางที่ 4.9** ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองเพื่อทำนายประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำตัวอย่าง

แบบจำลอง	SE	$R^2$ (%)	$R^2$ (adj) (%)
Linear	3.04	39.37	27.25
Linear + square	2.81	58.37	37.55
Linear + interaction	2.61	59.59	46.13
Full quadratic	2.16	78.59	63.38

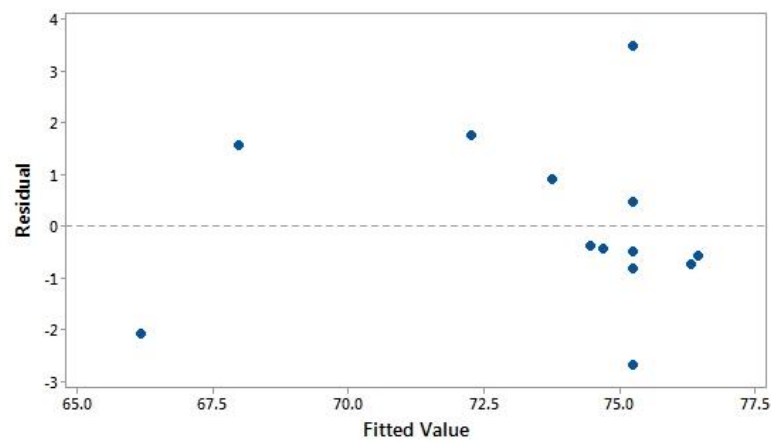
จากตารางที่ 4.9 พบว่าแบบจำลอง Full quadratic มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานน้อยที่สุดคือ 2.16 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้ว ( $R^2$  (adj)) มากที่สุดคือ 63.38% แสดงว่าแบบจำลอง Full Quadratic มีความเหมาะสมที่สุดอธิบายผลของตัวแปรอิสระที่ศึกษาต่อความสามารถในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย

#### 4.4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

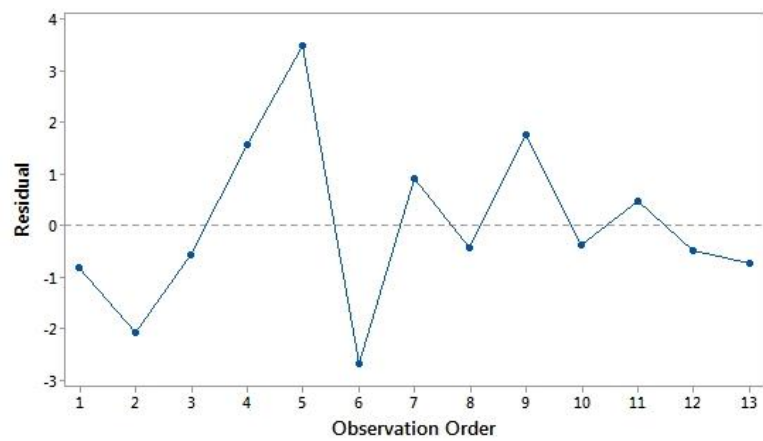
ผลการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของข้อมูลว่าเป็นไปตาม assumption ที่กำหนดไว้โดยใช้การพล็อตแผนภาพการกระจายของส่วนเหลือ (residual) ทั้ง 3 ลักษณะ ตามที่อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.3.2 พบว่าส่วนเหลือมีการแจกแจงแบบปกติ ดังจะเห็นได้จากจุดต่างๆ มีการเรียงตัวกันในเชิงเส้นตรง 45 องศา ของแผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของข้อมูล (รูปที่ 4.15) ส่วนเหลือมีความแปรปรวนที่คงที่ โดยพบการกระจายที่สม่ำเสมอ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 อีกทั้งข้อมูลมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลชุดนี้เป็นอิสระต่อกันดังแสดงในรูปที่ 4.17 สะท้อนให้เห็นว่าข้อมูลที่นำมาใช้สร้างแบบจำลอง Full quadratic มีสมบัติเป็นไปตามข้อตกลงที่กำหนดไว้ในเรื่องของความคลาดเคลื่อนแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องเหมาะสมที่นำไปใช้ในการทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีด้วยวิธีสร้างและรวมตะกอน



รูปที่ 4.15 แผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของข้อมูล  
จากแบบจำลอง Full quadratic



รูปที่ 4.16 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับพยากรณ์ของข้อมูล  
จากแบบจำลอง Full quadratic



รูปที่ 4.17 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับลำดับเวลาจากแบบจำลอง Full quadratic

#### 4.4.3 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ

การดำเนินการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปร ( $\beta$ ) โดยใช้วิธี Response Surface Regression จากโปรแกรม MINITAB ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic ของประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

Term	Coef.	SE Coef.	t	p-value
Constant	43.22	9.54	4.53	0.003
$\beta_1$	23.31	5.76	4.04	0.005*
$\beta_2$	3.55	2.14	1.66	0.141
$\beta_1^2$	-3.36	1.47	-2.48	0.042*
$\beta_2^2$	-0.073	0.133	-0.55	0.597
$\beta_{12}$	-1.479	0.575	-2.57	0.037*

หมายเหตุ S = 2.156 R<sup>2</sup> = 78.59% R<sup>2</sup>(adj) = 63.30%

\* หมายถึง ค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 95% (p < 0.05)

จากตารางที่ 4.10 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีกับตัวแปรอิสระ (ปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (dose) และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (pH) ) กับ ได้ดังสมการที่ (4.7)

$$Y = 43.22 + 23.31X_1 + 3.55X_2 - 3.66X_1^2 - 0.073X_2^2 - 1.479X_1X_2 \quad (4.7)$$

#### 4.4.4 การวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ

การทดสอบนัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย เป็นการทดสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวในสมการนั้นมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามหรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐานเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.3.4 ผลการศึกษาระดับนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ถดถอยในส่วนของ Linear terms และในส่วนของ Square terms: (ตารางที่ 4.10 และ 4.11) พบว่าปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ (dose) และเทอมของ dose x dose มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ดังจะเห็นได้จาก p-value ในส่วนที่เกี่ยวข้องมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์และพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีผลร่วมกันต่อความสามารถในการบำบัดซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

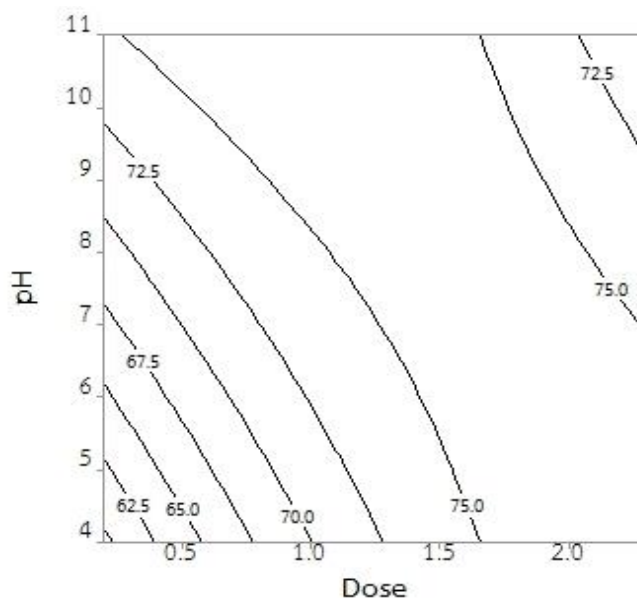
ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์แปรปรวน (Variance) จากแบบจำลอง Full Quadratic ของประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี

Source	p
Linear	0.014*
Square	0.108
Interaction	0.037*

หมายเหตุ \* หมายถึง ค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 95% ( $p < 0.05$ )

#### 4.4.5 การสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

แบบจำลอง Full quadratic ที่ได้ดังแสดงในสมการ (4.7) ถูกนำมาใช้สร้างพื้นผิวตอบสนองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรที่ศึกษาต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีด้วยวิธี Coagulation-Flocculation กราฟโครงสร้าง (Contour plot) ที่ได้จากสมการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.18 ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์เพิ่มจาก 0.2 เป็น 2.3 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ให้มากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ และพิจารณาค่าพีเอชพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มจาก 4.0 เป็น 11.0 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ให้มากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.18 กราฟโครงสร้าง (Contour Plot) แสดงอิทธิพลของปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

#### 4.4.6 การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมและการยืนยันผล

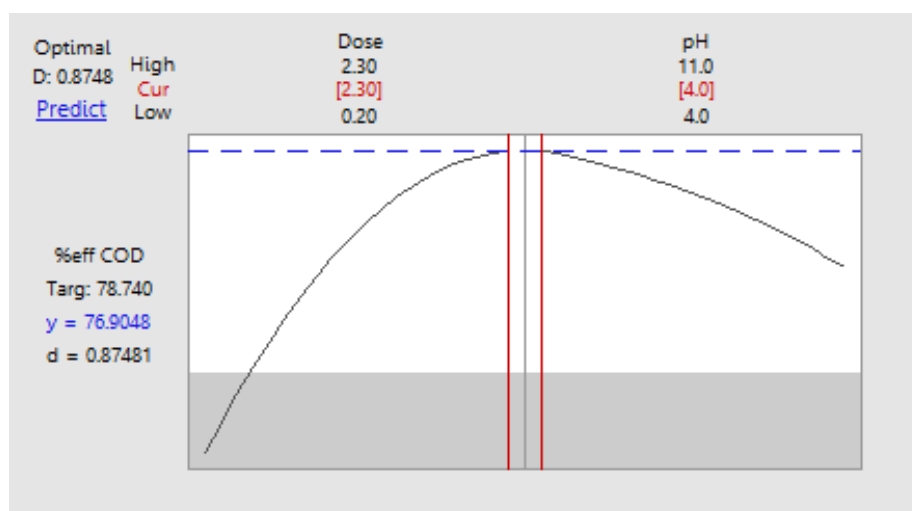
แบบจำลอง Full Quadratic ที่ได้ ถูกนำมาวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสม โดยใช้ ฟังก์ชัน Response Optimization ในโปรแกรม Minitab Version 17.0 กำหนดค่าที่เกี่ยวข้องดังนี้

- ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) มากที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตบนเท่ากับ 91 เปอร์เซ็นต์

- ค่าเป้าหมาย (Target) คือค่ามาตรฐานหรือค่าเป้าหมายของผลตอบสนอง โดยวัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้เพื่อต้องการบำบัดสีในน้ำเสียให้มีค่าซีโอดีเป็นไปตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน จึงกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 91 เปอร์เซ็นต์ แต่จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงสุดคือ 78.74 เปอร์เซ็นต์ ในงานวิจัยนี้กำหนดค่าเป้าหมายเท่ากับ 78.74 เปอร์เซ็นต์

- ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) ที่มีค่าน้อยที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตล่างเท่ากับ 64.08 เปอร์เซ็นต์

สถานะที่เหมาะสมของการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์หมึกพิมพ์ฐานน้ำที่ได้จากแบบจำลองเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 78.74 เปอร์เซ็นต์ คือปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ 2.3 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 4 ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ 76.90 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.19)



รูปที่ 4.19 สถานะที่เหมาะสมต่อการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียหมึกพิมพ์ฐานน้ำ

การยืนยันความถูกต้องของผลการหาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีด้วยวิธี Coagulation-Flocculation ของแบบจำลอง Full Quadratic โดยทดลองบำบัดตัวอย่างน้ำเสียจำนวน 10 ตัวอย่าง สถานะที่ใช้ในการบำบัดคือ คือปริมาณสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ 2.3 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 4.0 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีตามสภาวะที่เหมาะสม

การทดลองที่	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (%)
1	74.51
2	74.89
3	75.27
4	76.03
5	77.94
6	77.56
7	77.56
8	71.84
9	79.84
10	70.7
<b>เฉลี่ย</b>	<b>75.61 ± 2.81</b>

จากตารางที่ 4.12 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียหมักพิมพ์ฐานน้ำโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมตามแบบจำลอง Full Quadratic มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $75.61 \pm 2.81$  และไม่แตกต่างกับค่าที่ทำนายได้จากสมการ (Predicted value) เท่ากับ 76.9 %

4.4.7 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดตามสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 คุณสมบัติของน้ำเสียหมักพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีสร้างและรวมตะกอนตามสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อ 4.4.6

คุณลักษณะ	หลังการบำบัด
พีเอช	$2.20 \pm 0.8$
ความเข้มข้น (ADMI)	$574 \pm 13.3$
ซีโอดี (COD, mg/L)	$1,065 \pm 128.5$

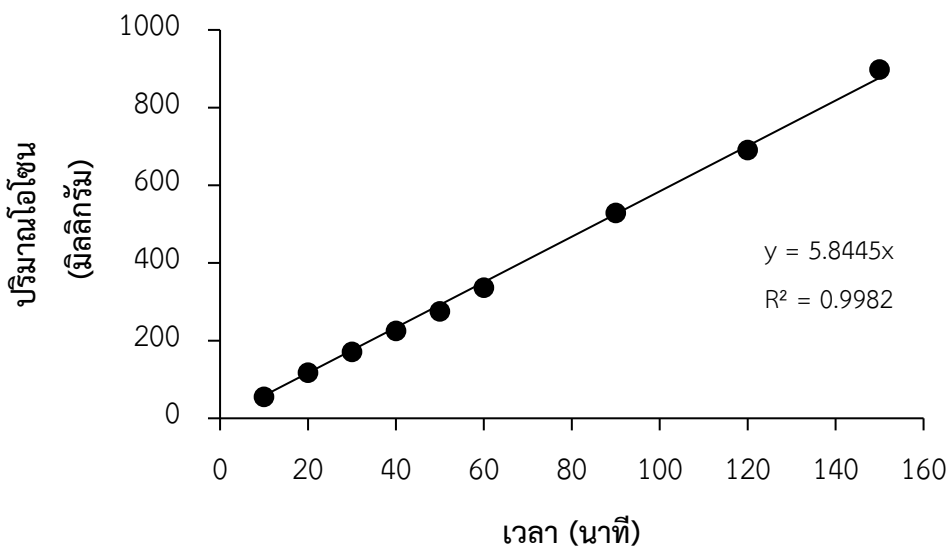
จากตารางที่ 4.13 พบว่าการบำบัดน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมักพิมพ์ฐานน้ำที่สภาวะดังกล่าว ยังไม่สามารถบำบัดให้ความเข้มข้นและค่าซีโอดีในน้ำเสียเป็นไปตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

เมื่อพิจารณาผลจากการบำบัดน้ำเสียตามสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง Full quadratic โดยใช้สมการ (4.6) และสมการ (4.7) พบว่าการบำบัดน้ำเสียตามสภาวะที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการที่ 4.6 ได้น้ำทิ้งที่มีค่าสีเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ในขณะที่การบำบัดตามสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการที่ 4.7 พบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดยังมีค่าสีและซีโอดีสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด จากเหตุผลดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่าสภาวะเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการพิมพ์แบบเพล็ทโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีการสร้างตะกอน-รวมตะกอน คือ ปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์ 1.24 กรัมต่อลิตร และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7.5

#### 4.5 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีการโอโซนเนชั่น

##### 4.5.1 อัตราการผลิตโอโซน

จากการศึกษาอัตราการผลิตโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน Ozzon รุ่น OZ- A1 -FT ทำการวัดโดยการผ่านก๊าซโอโซนจากเครื่องผลิตเข้าสู่ถังปฏิกิริยาและขวดดักจับโอโซนจำนวนสองขวด (T1,T2) ที่บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 2% (KI 2%) ตามระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นทำการวิเคราะห์โอโซนด้วยวิธีการไทเทรตแบบย้อนกลับกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน คำนวณปริมาณก๊าซโอโซน ณ ระยะเวลาผ่านก๊าซโอโซนนั้นๆ จากปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต ผลการหาปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่ค่าเวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.20 (ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข-2)



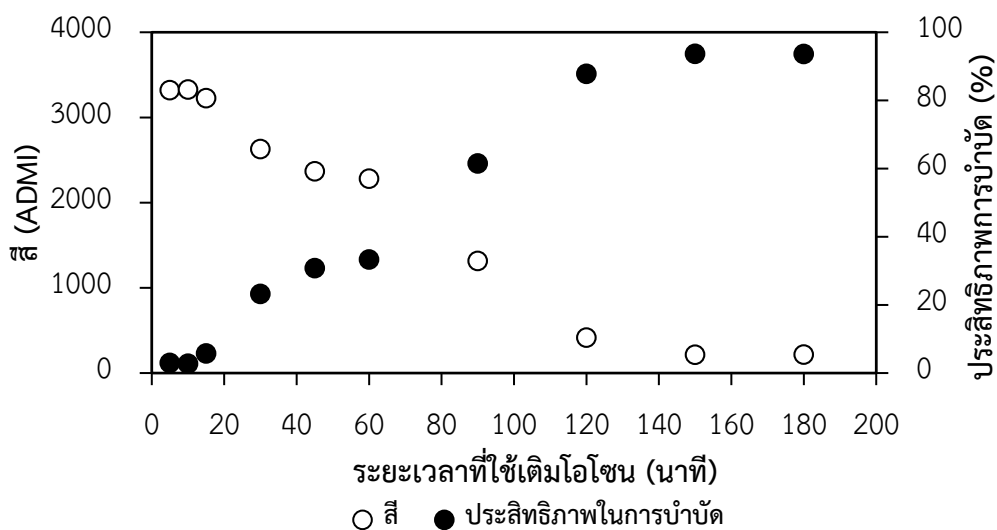
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนในสารละลายเทียบกับเวลา

จากรูปที่ 4.20 พบว่าปริมาณโอโซนในระบบมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาการผ่านก๊าซลงในสารละลาย KI ณ อัตราการไหลของอากาศที่คงที่ โดยในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ 150 นาที ปริมาณโอโซนมีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรงเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ จากการพลอตกราฟและหา

ฟังก์ชันสมการถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Ordinary least square fit) โดยใช้คำสั่ง Regression ในโปรแกรม EXCEL พบว่าได้ฟังก์ชันสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนกับเวลาคือ ผลการหาอัตราการผลิตโอโซนที่คำนวณได้จากค่าความชันของสมการเส้นตรง พบว่าเครื่องผลิตโอโซน OZZON รุ่น OZ-A1-FT ผลิตก๊าซโอโซนได้ 347 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

#### 4.5.2 ผลของระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซน

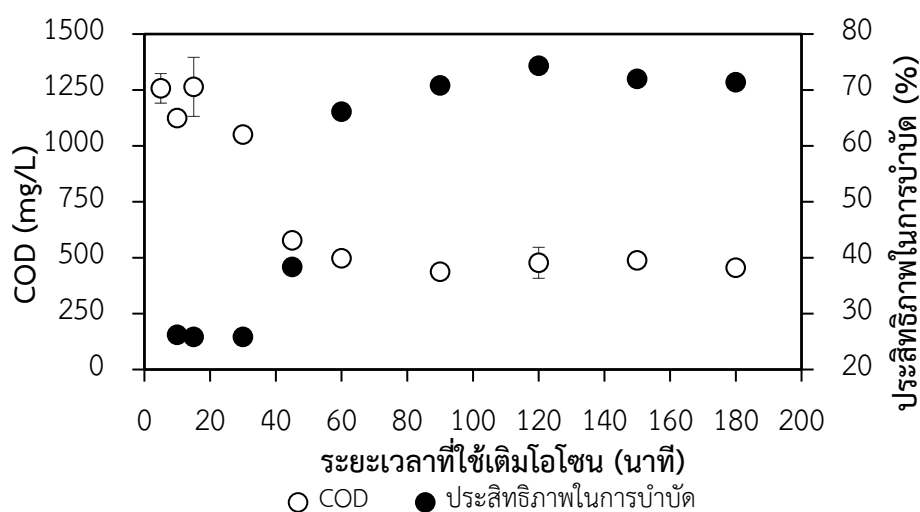
เมื่อนำน้ำเสียโรงพิมพ์ระบบเพล็กโซกราฟีหมักพิมพ์ฐานน้ำปริมาตร 200 มิลลิลิตร ซึ่งมีค่าพีเอชตามสภาพที่ได้รับมาบำบัดด้วยวิธีโอโซนเซนซ์ โดยแปรค่าระยะเวลาการผ่านโอโซน นานถึง 180 นาที ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด (รูปที่ 4.21) สีของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงจาก  $3,322 \pm 33$  ADMI เป็น  $216 \pm 19$  ADMI (ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข-5.1)เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการผ่านก๊าซโอโซนจาก 5 นาทีเป็น 150 นาที คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 3.1% และ 93.6% ตามลำดับ การลดลงของสีในน้ำอาจเป็นผลมาจากความสามารถของโอโซนในการออกซิไดซ์พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี (Chromophores) ทำให้โครงสร้างของ Chromophores เกิดการเปลี่ยนแปลงและสูญเสียความสามารถในการดูดซับแสงที่มองเห็น ทำให้สีของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลง (พันธกานต์, 2558) ความสามารถในการกำจัดสีที่เพิ่มขึ้นเกี่ยวข้องกับปริมาณโอโซนที่มีมากขึ้นในระบบ ซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลาในการผ่านก๊าซโอโซน (รูปที่ 4.20) สอดคล้องกับงานวิจัยของอรชุดา (2549) งานวิจัยของสุรัชย์ (2553) และงานวิจัยของพันธกานต์ (2558) ที่พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเติมโอโซนมากขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดสีจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.21 ผลของระยะเวลาการผ่านโอโซนต่อความสามารถในการกำจัดสี

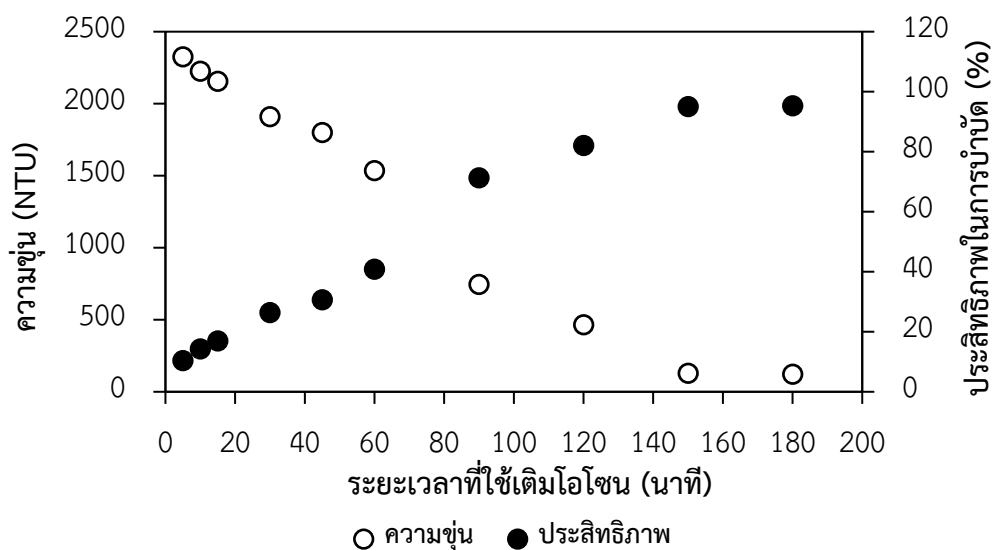
ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีโอดีด้วยโอโซน พบว่าโอโซนสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ ประสิทธิภาพในการบำบัดสีโอดีมีค่าสูงขึ้นจาก 26.2 % เป็น 70.8% เมื่อเพิ่ม

ระยะเวลาในการผ่านก๊าซโอโซนจาก 5 นาที เป็น 60 นาที ซีโอดีในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงจาก  $1,257 \pm 66$  มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น  $497 \pm 29$  มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.22) การลดลงของซีโอดีมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการผ่านก๊าซโอโซนนานขึ้นจาก 60 นาที น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 418-503 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.22) สอดคล้องกับงานวิจัย Abidin and Ridwan (2011) ที่พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในสารละลายสีย้อมเอโซ่ ชนิดรีแอคทีฟเรด 120 (Reactive red 120) มีแนวโน้มคงที่ ภายหลังจากการผ่านโอโซนลงในสารละลายสีย้อมในช่วงเวลาหนึ่ง การลดลงของค่าซีโอดีในน้ำเสียชนิดนี้ สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากความสามารถในการออกซิไดซ์ของโอโซน ซึ่งเข้าไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและอาจทำให้เกิดการทำลายพันธะ โดยเฉพาะกับสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ จนทำให้เกิดการย่อยสลายสมบูรณ์ ส่งผลให้ค่าซีโอดีมีค่าลดลง ( สุทธิชัย, 2546; Abidin and Ridwan, 2011)



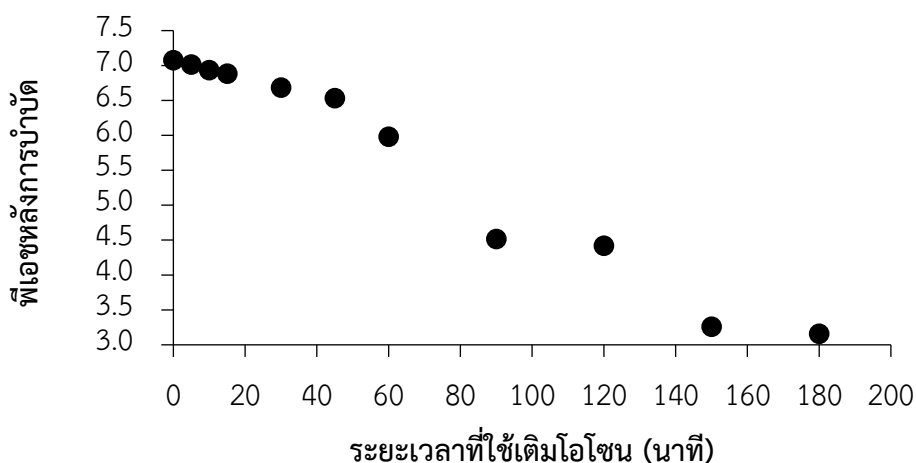
รูปที่ 4.22 ผลของระยะเวลาการผ่านโอโซนต่อความสามารถในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย

โอโซนสามารถช่วยลดความขุ่นในน้ำ ดังจะเห็นได้จากความขุ่นในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีแนวโน้มลดลงจาก 2,595 NTU เหลือ  $122 \pm 12$  NTU (ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข-5.1) เมื่อเวลาในการผ่านโอโซนเข้าสู่ระบบนานขึ้นจาก 5 นาที เป็น 180 นาที (รูปที่ 4.23) คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 95.3 % แสดงให้เห็นว่าโอโซนสามารถทำให้ โมเลกุลของสารแขวนลอยในน้ำเกิดการสลายตัวหรือถูกทำลายกลายเป็นโมเลกุลที่ละลายได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของอรชุดา (2549) ได้ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีและความขุ่นของน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์ด้วยกระบวนการโอโซนค้นพบว่าเมื่อระยะเวลาในการผ่านก๊าซโอโซนนานขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจะเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.23 ผลของระยะเวลาการผ่านโอโซนต่อความสามารถในการกำจัดความขุ่นของน้ำ

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเติมโอโซนกับค่าพีเอชของน้ำเสียหลังบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนชั้นที่เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.24



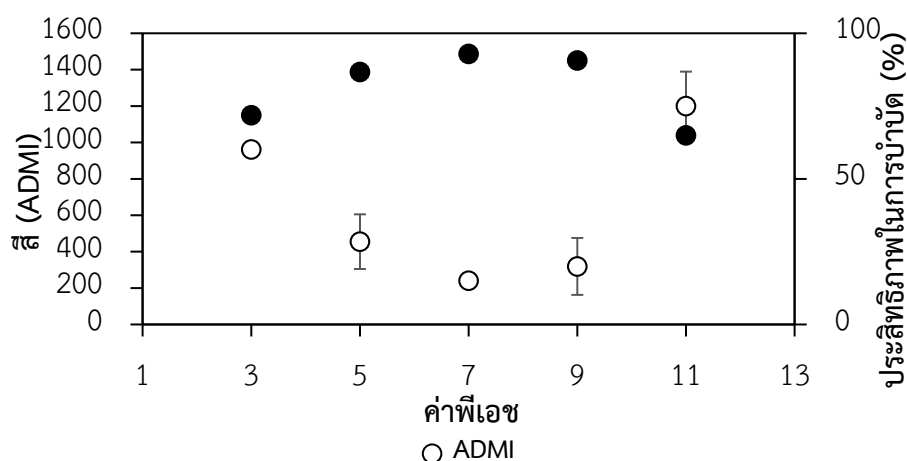
รูปที่ 4.24 พีเอชของน้ำหลังการบำบัดด้วยโอโซนที่เวลาต่างกัน

จากรูปที่ 4.24 พบว่าพีเอชของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการสัมผัสโอโซน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่โอโซนเข้าทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ที่บริเวณพันธะคู่ของคาร์บอนไนโตรเจน และวงอะโรมาติกของสารที่ทำให้เกิดสี โดยเฉพาะสีย้อมจำพวกเอโซที่พบเป็นหลักในน้ำเสียจากการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสีย้อม โดยเฉพาะการทำลายพันธะคู่และการแตกออกของวงอะโรมาติก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเป็นกรดและคาร์บอนไดออกไซด์ (Clark, 2011) จึงทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าลดลงตามระยะเวลาการเติมโอโซนที่เพิ่มขึ้น

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการบำบัดสีและซีโอดีด้วยโอโซน ไปทดสอบระดับนัยสำคัญทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีเกิดได้ดีที่สุดและทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพเป็นไปตามประกาศของกรมโรงงานอุตสาหกรรม เกิดขึ้นที่ระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนนาน 150 นาที ที่ระยะเวลาดังกล่าว ซีโอดีในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพไม่แตกต่างกันซีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้เลือกระยะเวลาที่ 150 นาที สำหรับการศึกษาในการทดลองต่อไป

#### 4.5.3 ผลของค่าพีเอช

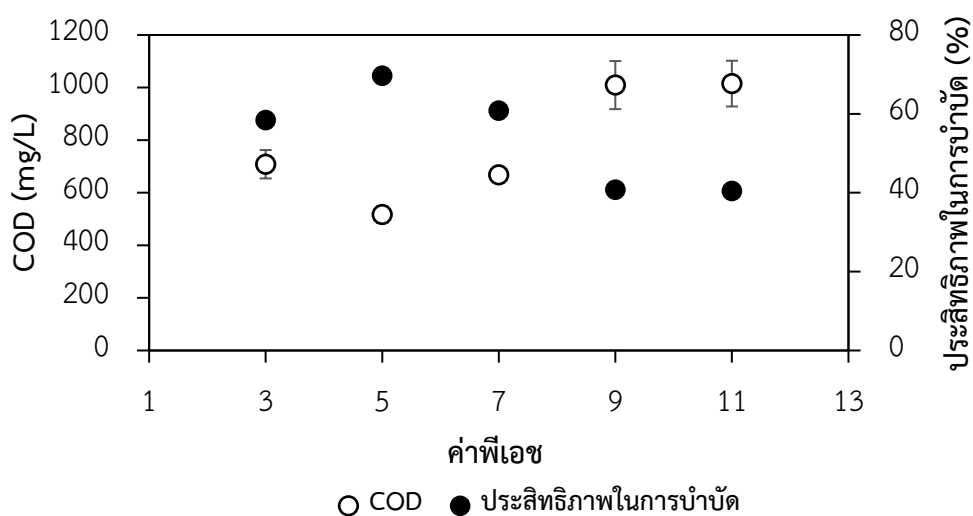
ผลการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นต่างกันด้วยวิธีโอโซน ที่ระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซนนาน 150 นาที พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 72.2 % เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 3 เป็น 87.0% และ 93.7 % เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5 และ 7 ตามลำดับ (รูปที่ 4.25) สีของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีแนวโน้มลดลงจาก  $962 \pm 73$  ADMI เป็น  $455 \pm 150$  และ  $241 \pm 93$  ADMI ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มลดลงเมื่อพีเอชเริ่มต้นมีค่าเป็นต่าง สีในน้ำเสียหลังบำบัดมีค่าเท่ากับ  $319 \pm 156$  ADMI และ  $1,200 \pm 189$  ADMI (ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข-5.2)เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 9 และ 11 ตามลำดับ (รูปที่ 4.25) ผลการทดสอบทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons พบว่าสีในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ใช้ในการบำบัดด้วยโอโซนมีค่าเป็น 5, 7 และ 9 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gottschalk et al. (2010) ที่พบว่าโอโซนสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้ทั้งทางตรง (Direct Reaction) และทางอ้อม (Indirect reaction) พร้อมกันได้ดีที่ค่าพีเอช 6 – 8



รูปที่ 4.25 ผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำต่อความสามารถในการกำจัดสีด้วยกระบวนการโอโซน

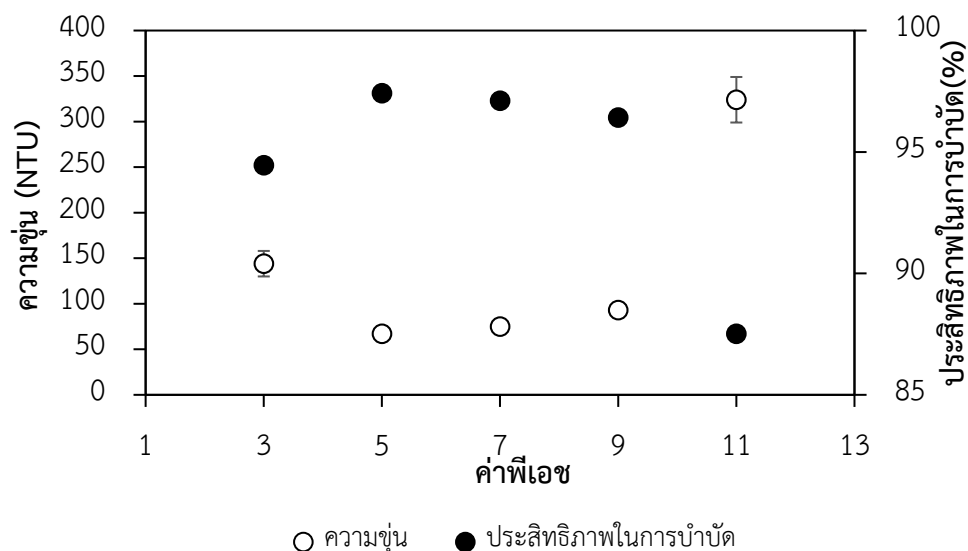
พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ใช้ในการบำบัด มีผลต่อความสามารถในการกำจัดซีโอดีของโอโซน ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเกิดขึ้นได้ดีเมื่อน้ำเสียอยู่ในสภาวะที่เป็นกรดมากกว่าสภาวะที่เป็นด่าง (รูปที่ 4.26) โดยที่พีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 5 สามารถบำบัดค่าซีโอดีได้ดีที่สุด ทำให้อัตราซีโอดีในน้ำเสียมีค่า

ลดลงจากค่าเริ่มต้น 1,704 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 517 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด  $70.95 \pm 0.33 \%$  ทั้งนี้การที่ค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วงกรดสามารถบำบัดค่าซีไอได้ดีเนื่องจากการปรับค่าพีเอชน้ำเสียให้อยู่ในช่วงกรด อาจส่งผลต่อโครงสร้างของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสารเคมีที่ง่ายต่อการออกซิไดซ์โดยโมเลกุลของโอโซนในปฏิกิริยา Direct Reaction ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนุชนกกาญจน์ (2550) และงานวิจัยของ Herath. et al. (2011) ที่พบว่าโอโซนสามารถเข้าไปออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและอาจเกิดการทำลายพันธะของสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ จนทำให้เกิดการย่อยสลายสมบูรณ์ ส่งผลให้ค่าซีไอมีค่าลดลง



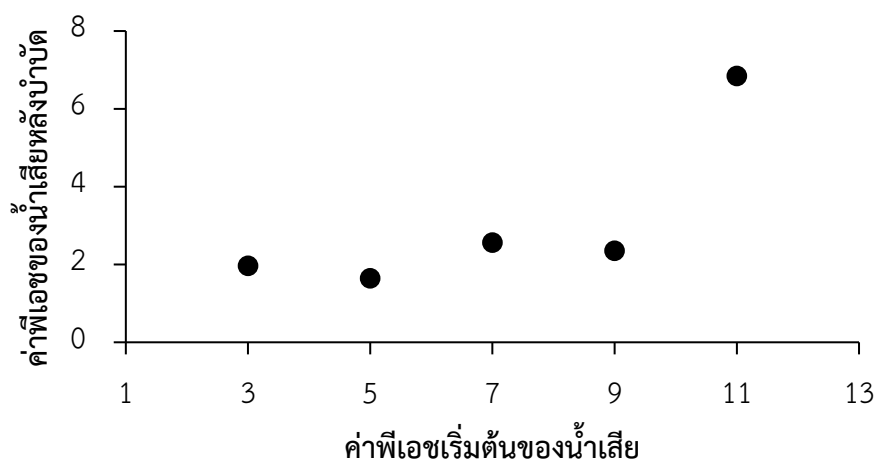
รูปที่ 4.26 ผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อความสามารถในการกำจัดซีไอดี

โอโซนมีความสามารถในการกำจัดความขุ่น ดังจะเห็นได้จากค่าความขุ่นมีแนวโน้มลดลง เมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 7 ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นมีค่าสูงขึ้นจาก 94.2 % เป็น 97.7 % (รูปที่ 4.27) ทั้งนี้อิทธิพลของค่าพีเอชของน้ำเสียต่อการกำจัดความขุ่นในน้ำสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับที่กล่าวไว้ในเรื่องผลของค่าพีเอชของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับความขุ่นของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นกับค่าพีเอชของน้ำเสียหลังบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น แสดงดังรูปที่ 4.28 พบว่าค่าพีเอชของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียก่อนบำบัด ทั้งนี้การลดลงของค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการบำบัดอาจเกิดจากการที่โอโซนเข้าทำปฏิกิริยาที่บริเวณพื้นระคู่ของคาร์บอน ไนโตรเจนและวง อะโรมาติก ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของวงอะโรมาติก ซึ่งผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการทำปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเป็นกรดและคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าลดลง



รูปที่ 4.28 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำที่พีเอชเริ่มต้นต่างกัน พบว่าสีในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ

พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ใช้ในการบำบัดด้วยโอโซนมีค่าเป็น 5, 7 และ 9 (รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ค) ประกอบกับน้ำเสียตามสภาพที่ได้รับมีค่าพีเอชเท่ากับ  $7.03 \pm 0.03$  ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาการผ่านก๊าซโอโซน 150 นาทีและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7 ไปใช้ในการกำหนดระดับค่าของตัวแปรเพื่อใช้ในการออกแบบการทดลอง Central Composite Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีและสารอินทรีย์ด้วยวิธี Ozonation ต่อไป

#### 4.6 การหาตัวแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยวิธีโอโซนเนชั่น

แบบจำลองที่จะใช้อธิบายผลของตัวแปรอิสระ ( $X_1, X_2$ ) ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีด้วยวิธี Ozonation ตลอดจนการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MINITAB จะมีขั้นตอนการดำเนินการเช่นเดียวกับที่อธิบายในหัวข้อ 4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design (CCD) เป็นดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำตัวอย่าง ดำเนินการบำบัดตามสภาวะการทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลอง Central Composite Design

ลำดับที่	เวลาที่ใช้ในการบำบัด (นาที) ( $X_1$ )		ค่าพีเอชของน้ำเสีย ( $X_2$ )		ประสิทธิภาพในการ บำบัดสี (%)
	coded	Uncoded	coded	Uncoded	
1	0	98	0	7	90.48
2	1	150	-1	3	71.96
3	0	98	0	7	89.56
4	0	98	0	7	91.98
5	-1.4142	23	0	7	16.87
6	-1	45	1	11	11.94
7	0	98	0	7	95.24
8	1.4142	172	0	7	95.77
9	0	98	0	7	85.47
10	0	98	1.4142	12.66	7.15
11	1	150	1	11	7.36
12	0	98	-1.4142	1.34	79.18
13	-1	145	-1	3	91.1

#### 4.6.1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง

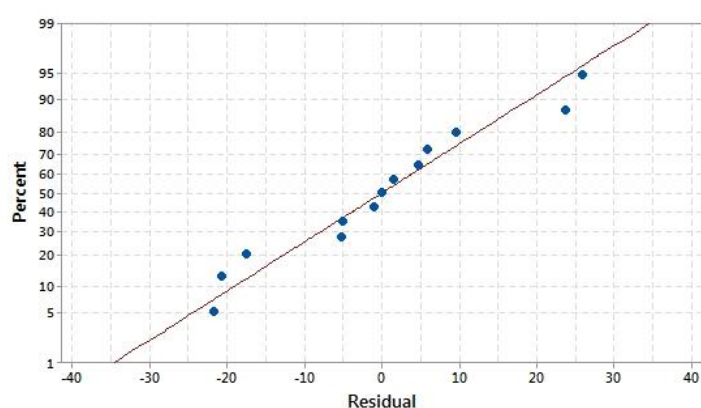
ผลจากการใช้โปรแกรม MINITAB ประมวลผลด้วยวิธี Response Surface Methodology ได้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้ว ( $R^2$ -adj) ของแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.15 ซึ่งพบว่าแบบจำลอง Linear + square มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำสุดคือ 18.18 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้ว ( $R^2$ -adj) มากที่สุดคือ 76.65 % แสดงว่าแบบจำลอง Linear + square มีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองที่เหลือในการนำมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามที่ศึกษา

**ตารางที่ 4.15** ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองเพื่อทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำตัวอย่าง

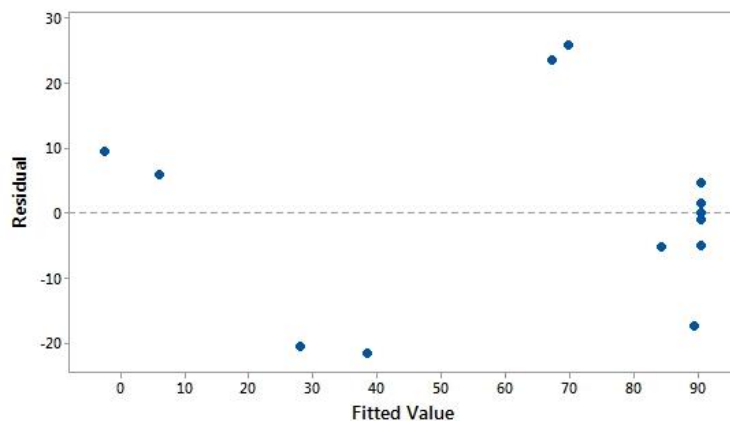
แบบจำลอง	S	$R^2$ (%)	$R^2$ -adj (%)
Linear	29.07	50.23	40.27
Linear + square	18.18	84.44	76.65
Linear + interaction	30.55	50.55	34.06
Full quadratic	19.23	84.76	73.87

#### 4.6.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

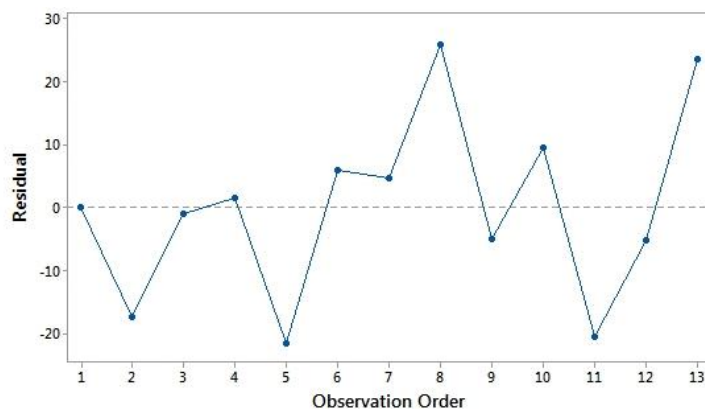
ผลการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของข้อมูลว่าเป็นไปตาม assumption ที่กำหนดไว้ โดยใช้การพล็อตแผนภาพการกระจายของส่วนเหลือ (residual) ทั้ง 3 ลักษณะ ตามที่อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.3.2 ได้แผนภาพการกระจายของส่วนเหลือ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 - 4.31



**รูปที่ 4.29** แผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของข้อมูล



รูปที่ 4.30 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับพยากรณ์ของข้อมูล



รูปที่ 4.31 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับลำดับเวลา

จากรูปที่ 4.29 พบว่าจุดต่างๆ มีการเรียงตัวกันในเชิงเส้นตรง 45 องศา แสดงให้เห็นว่าส่วนเหลือมีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนจึงเป็นไปตาม assumption ที่กำหนด ผลการพล็อตการกระจายในรูปที่ 4.30 พบว่าส่วนเหลือมีการกระจายที่สม่ำเสมอ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่าส่วนเหลือมีความแปรปรวนที่คงที่ ในขณะที่รูปที่ 4.31 พบว่า ข้อมูลมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลชุดนี้เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องเหมาะสมที่นำไปใช้ในการทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดสปีดด้วยวิธีไอโซเนชั่น

#### 4.6.3 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ

การดำเนินการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปร ( $\beta$ ) โดยใช้วิธี Response Surface Regression จากโปรแกรม MINITAB ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากแบบจำลอง Linear + square

Term	Coef.	SE Coef.	t	p-value
Constant	-14.0	32.2	-0.44	0.675
$\beta_1$	1.482	0.50	2.97	0.018*
$\beta_2$	13.96	6.24	2.24	0.056
$\beta_1^2$	-0.00653	0.00249	-2.62	0.030*
$\beta_2^2$	-1.545	0.43	-3.59	0.007*

หมายเหตุ S = 18.18  $R^2 = 84.44\%$   $R^2(\text{adj}) = 76.65\%$

\* หมายถึง ค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 95% ( $p < 0.05$ )

จากตารางที่ 4.16 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด สึกกับตัวแปรอิสระ (เวลาที่ใช้ในการบำบัด (time) และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (pH) กับ ได้ดังสมการที่ (4.8)

$$Y = -14.0 + 1.482X_1 + 13.96X_2 - 0.00653X_1^2 - 1.545X_2^2 \quad (4.8)$$

#### 4.6.4 การวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ

การทดสอบนัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย เป็นการทดสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัว ในสมการนั้นมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามหรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐานเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.3.4 ผลการศึกษาในระดับนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ถดถอยในส่วนของ Linear terms พบว่า ระยะเวลาการผ่านก๊าซไอโซน ( $X_1$ ) มีผลในทางบวกต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี ในขณะที่ตัวแปรอิสระยกกำลังสองของระยะเวลาการผ่านก๊าซไอโซน ( $X_1^2$ ) และพีเอชของน้ำ ( $X_2^2$ ) มีผลทางลบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 4.16 และ 4.17)

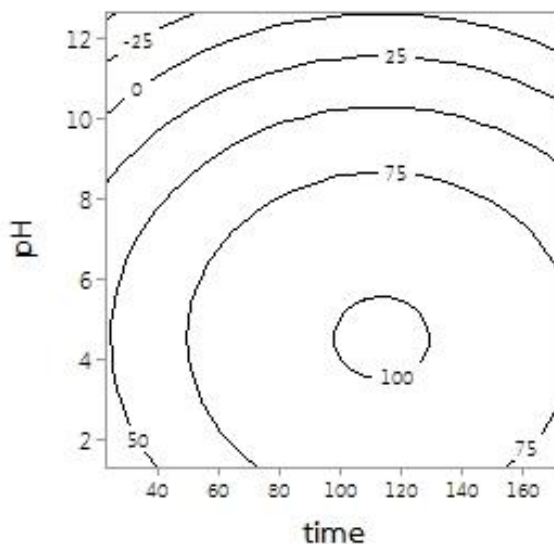
ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์แปรปรวน (Variance) จากแบบจำลอง Linear + square ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพในการบำบัดสี

Source	p
Linear	0.003*
Square	0.010*

หมายเหตุ \* หมายถึง ค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 95% ( $p < 0.05$ )

#### 4.6.5 การสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพการกำจัดสี

แบบจำลอง Linear + square ที่ได้ดังแสดงในสมการ (4.8) ถูกนำมาใช้สร้างพื้นผิวตอบสนองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรที่ศึกษาต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วยวิธี โอโซนเนชั่น กราฟโครงร่าง (Contour plot) ที่ได้จากสมการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงอิทธิพลของระยะเวลาการเติมโอโซนและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

จากรูปที่ 4.32 จะพบว่าเมื่อระยะเวลาในการเติมโอโซนมากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีจะเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งหากมีการเพิ่มระยะเวลาเติมโอโซนมากกว่าจุดที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของอรชуда (2549) งานวิจัยของสุรชัย (2553) และงานวิจัยของพันธกานต์ (2558) โดยจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีจะเปลี่ยนแปลงจากช่วง 50 % เป็น 100 % เมื่อระยะเวลาในการเติมโอโซนเพิ่มจาก 40 นาทีเป็น 120 นาทีแต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซนจาก 120 นาทีเป็น 160 นาทีประสิทธิภาพในการบำบัดสีจะมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 75 % ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจะพบว่าพีเอชที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 4 – 6 เมื่อค่าพีเอชเพิ่มจาก 6 เป็น 12 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีจะมีค่าลดลง

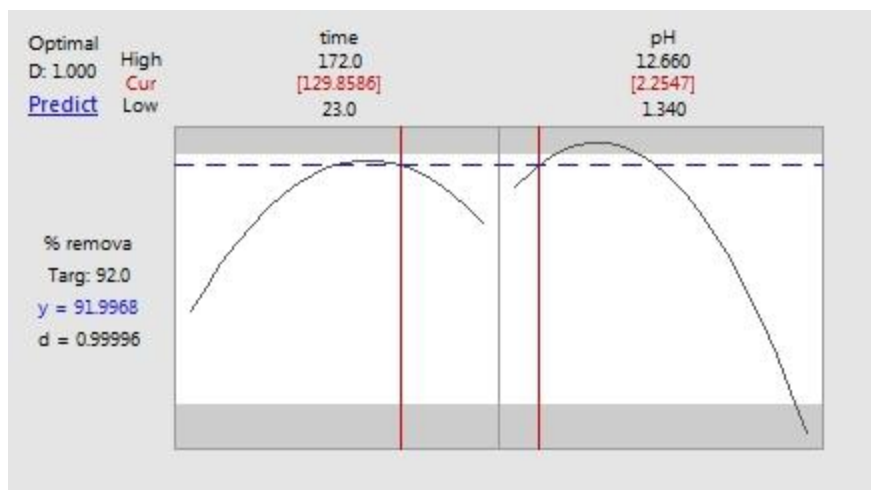
#### 4.6.6 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมและการยืนยันผล

แบบจำลอง Full Quadratic ที่ได้ ถูกนำมาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ในโปรแกรม Minitab Version 17.0 กำหนดค่าที่เกี่ยวข้องดังนี้

- ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) มากที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตบนเท่ากับ 96 เปอร์เซ็นต์

- ค่าเป้าหมาย (Target) คือค่ามาตรฐานหรือค่าเป้าหมายของผลตอบสนอง โดยวัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้เพื่อต้องการบำบัดสีในน้ำเสียให้มีค่าสีเป็นไปตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานจึงกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 91.24 เปอร์เซ็นต์

- ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) ที่มีค่าน้อยที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตล่างเท่ากับ 7 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.33 สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีในน้ำเสียหมักพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีโอโซนชั้น

สภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงพิมพ์หมักพิมพ์ฐานน้ำที่ได้จากแบบจำลองเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 92 เปอร์เซ็นต์ คือระยะเวลาการเติมโอโซน 130 นาที ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 2.25 แสดงดังรูปที่ 4.33 การยืนยันความถูกต้องของผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีด้วยวิธีโอโซนชั้น ของแบบจำลอง Linear + square โดยทดลองบำบัดตัวอย่างน้ำเสียจำนวน 10 ตัวอย่าง โดยใช้สภาวะที่ได้จากรูปที่ 4.33 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ได้จากการทดลองจำนวน 10 ชั่วโมง มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $91.45 \pm 0.59$  และมีค่าไม่แตกต่างจาก Predicted value อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 4.18 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีตามสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธีโอโซนชั้น

การทดลองที่	ประสิทธิภาพในการกำจัดสี (%)
1	92.19
2	91.21
3	91.87
4	92.12
5	91.47
6	90.83
7	91.91
8	91.21
9	91.36
10	90.31
<b>เฉลี่ย</b>	<b>91.45 ± 0.59</b>

4.6.7 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมในหัวข้อ 4.6.6 จำนวน 10 ซ้ำ ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 คุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีโอโซนชั้นตามสภาวะที่เหมาะสม

คุณลักษณะ	หลังการบำบัด
พีเอช	2.03 ± 0.05
ความขุ่นสี (ADMI)	293 ± 15.3
ซีโอดี (COD, mg/L)	466 ± 28.5

จากตารางที่ 4.19 พบว่าสีในตัวอย่งน้ำที่บำบัดมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ แต่การบำบัดน้ำเสียที่สภาวะดังกล่าว ยังไม่สามารถบำบัดให้ค่าซีโอดีในน้ำมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

#### 4.7 การหาตัวแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วยวิธีโอโซนชั้น

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วย Central Composite Design เป็นดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำตัวอย่าง ดำเนินการบำบัดตามสภาวะการทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลอง Central Composite Design

ลำดับที่	เวลาที่ใช้ในการบำบัด (นาทีก) ( $X_1$ )		ค่าพีเอชของน้ำเสีย ( $X_2$ )		ประสิทธิภาพในการ บำบัดซีโอดี (%)
	coded	Uncoded	coded	Uncoded	
1	-1	0.5	-1	5	52.92
2	0	1.25	-1.4142	4	47.49
3	0	1.25	0	7.5	74.03
4	-1	0.5	1	10	77.75
5	0	1.25	0	7.5	7.71
6	1	2	-1	5	9.02
7	0	1.25	0	7.5	76.88
8	0	1.25	0	7.5	89.22
9	1	2	1	10	78.19
10	1.4142	2.3	0	7.5	3.36
11	-1.4142	0.2	0	7.5	9.89
12	0	1.25	1.4142	11	80.31
13	0	1.25	0	7.5	46.73

##### 4.7.1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง

ผลจากการใช้โปรแกรม MINITAB ประมวลผลด้วยวิธี Response Surface Methodology ได้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้ว ( $R^2$ -adj) ของแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.21

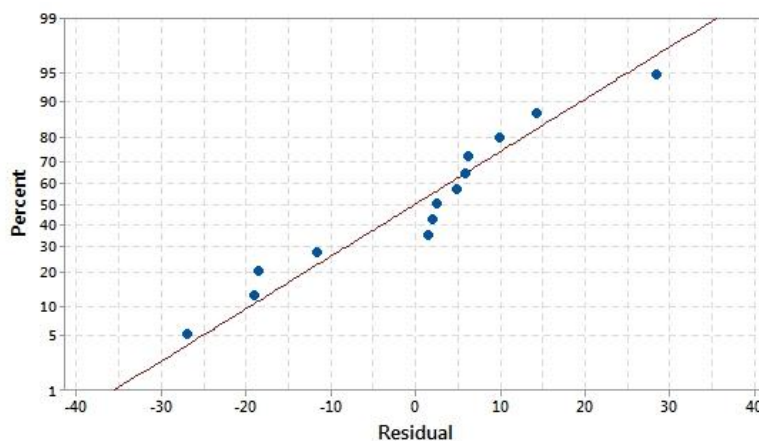
ตารางที่ 4.21 ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองเพื่อทำนายประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำตัวอย่าง

แบบจำลอง	S	R <sup>2</sup> (%)	R <sup>2</sup> -adj (%)
Linear	25.73	47.45	36.94
Linear + square	18.66	77.89	66.84
Linear + interaction	27.12	47.45	29.93
Full quadratic	19.95	77.89	62.10

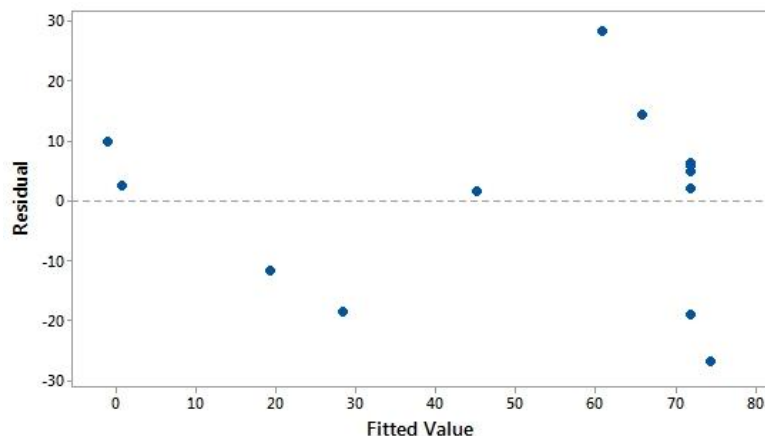
จากตารางที่ 4.21 Linear + square มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำสุดคือ 18.66 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R<sup>2</sup>-adj) มากที่สุดคือ 66.84 % แสดงว่าแบบจำลอง Linear + square มีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองที่เหลือในการนำมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามที่ศึกษา

#### 4.7.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

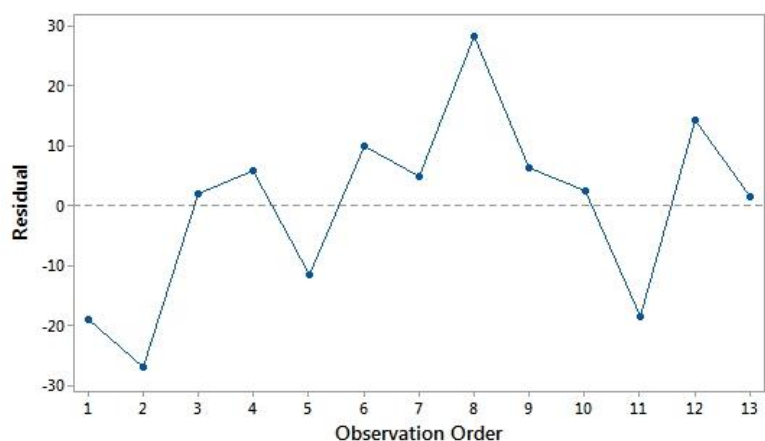
ผลการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของข้อมูลว่าเป็นไปตาม assumption ที่กำหนดไว้ โดยการใช้การพล็อตแผนภาพการกระจายของส่วนเหลือ (residual) ทั้ง 3 ลักษณะ ตามที่อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.3.2 ได้แผนภาพการกระจายของส่วนเหลือ ดังแสดงในรูปที่ 4.34 - 4.36



รูปที่ 4.34 แผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของข้อมูล



รูปที่ 4.35 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับพยากรณ์ของข้อมูล



รูปที่ 4.36 แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนเหลือกับลำดับเวลา

จากรูปที่ 4.34 พบว่าจุดต่างๆ มีการเรียงตัวกันในเชิงเส้นตรง 45 องศา แสดงให้เห็นว่าส่วนเหลือมีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนจึงเป็นไปตาม assumption ที่กำหนด ผลการพล็อตการกระจายในรูปที่ 4.35 พบว่าส่วนเหลือมีการกระจายที่สม่ำเสมอ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่าส่วนเหลือมีความแปรปรวนที่คงที่ ในขณะที่รูปที่ 4.36 พบว่า ข้อมูลมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องเหมาะสมที่นำไปใช้ในการทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีด้วยวิธีโอโซนชั้น

#### 4.7.3 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแปร

การดำเนินการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปร ( $\beta$ ) โดยใช้วิธี Response Surface Regression จากโปรแกรม MINITAB ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.22 และสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสีกับตัวแปรอิสระ (เวลาที่ใช้ในการบำบัด (time) และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (pH) )กับ ได้ดังสมการที่ (4.9)

$$Y = -28.5 + 1.394X_1 + 11.10X_2 - 0.00572X_1^2 - 1.204X_2^2 \quad (4.9)$$

ตารางที่ 4.22 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากแบบจำลอง Linear + square

Term	Coef.	SE Coef.	t	p-value
Constant	-28.5	33.1	-0.86	0.414
$\beta_1$	1.394	0.513	2.72	0.026*
$\beta_2$	11.10	6.40	1.73	0.121
$\beta_1^2$	-0.00572	0.00255	-2.24	0.055
$\beta_2^2$	-1.204	0.442	-2.72	0.026*

หมายเหตุ S = 18.6 R<sup>2</sup> = 77.89 % R<sup>2</sup> (adj) = 66.84%

\* หมายถึง ค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 95% (p<0.05)

#### 4.7.4 การวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta$ ) ของตัวแบบ

การทดสอบนัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย เป็นการทดสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวในสมการนั้นมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามหรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐานเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.3.4 ผลการศึกษาในระดับนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ถดถอยในส่วนของ Linear terms พบว่าระยะเวลาการผ่านก๊าซไอโซน ( $X_1$ ) มีผลในทางบวกต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ในขณะที่ตัวแปรอิสระยกกำลังสองของพีเอชของน้ำ ( $X_2^2$ ) มีผลทางลบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05) (ตารางที่ 4.22 และ 4.23)

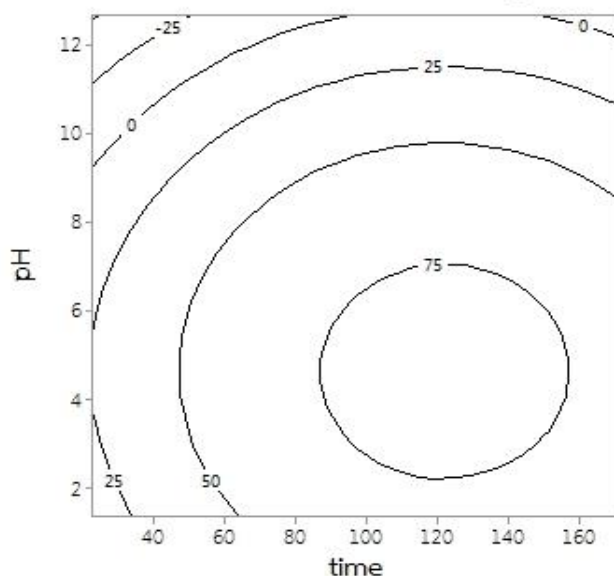
ตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์แปรปรวน (Variance) จากแบบจำลอง Linear + square ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี

Source	p
Linear	0.003*
Square	0.010*

หมายเหตุ \* หมายถึง ค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 95% (p<0.05)

#### 4.7.5 การสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

แบบจำลอง Linear + square ที่ได้ดังแสดงในสมการ (4.9) ถูกนำมาใช้สร้างพื้นผิวตอบสนองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรที่ศึกษาต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีด้วยวิธีไอโซเนชัน กราฟโครงร่าง (Contour plot) ที่ได้จากสมการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงอิทธิพลของระยะเวลาการเติมโอโซนและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

จากรูปที่ 4.37 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเติมโอโซนมากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีจะเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งหากมีการเพิ่มระยะเวลาเติมโอโซนมากกว่าจุดที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีค่าลดลง กล่าวคือเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซนจาก 40 นาที เป็น 130 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดจะเพิ่มจาก 25 % เป็น 75 % แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซนจาก 130 นาทีเป็น 160 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงจาก 75 % เหลือ 50 % และการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจากกรดเป็นด่างจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีเท่าใดนัก เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาในการผ่านโอโซนของน้ำเสีย

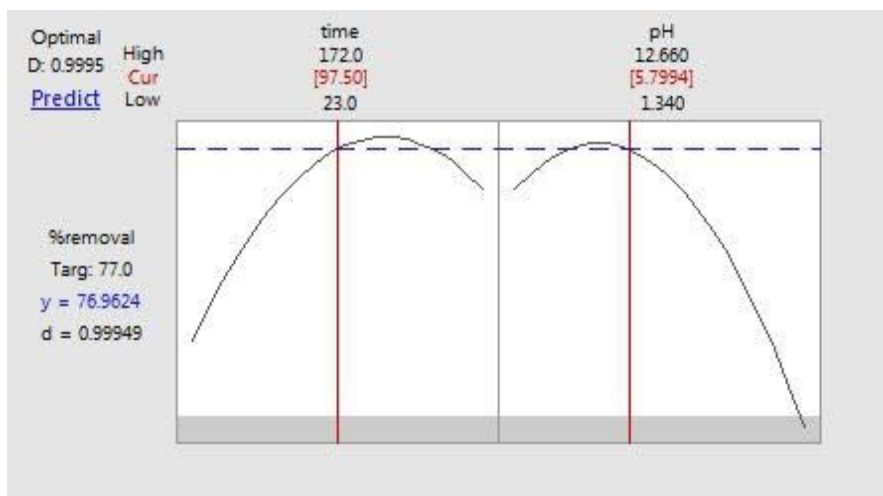
#### 4.7.6 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมและการยืนยันผล

แบบจำลอง Full Quadratic ที่ได้ ถูกนำมาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ในโปรแกรม Minitab Version 17.0 กำหนดค่าที่เกี่ยวข้องดังนี้

- ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) มากที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตบนเท่ากับ 89.22 เปอร์เซ็นต์

- ค่าเป้าหมาย (Target) คือค่ามาตรฐานหรือค่าเป้าหมายของผลตอบสนอง โดยวัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้เพื่อต้องการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียให้มีค่าสีเป็นไปตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน จึงกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์

- ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) ที่มีค่าน้อยที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตล่างเท่ากับ 3.34 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.38 สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียหมักพืชมัฐานน้ำ

สภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากโรงพืชมัหมักพืชมัฐานน้ำที่ได้จากแบบจำลองเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซี 77 เปอร์เซ็นต์ คือระยะเวลาการเติมโอโซน 98 นาที ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 5.80 (รูปที่ 4.38) การยืนยันความถูกต้องของผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดซีด้วยวิธีโอโซนชั้นของแบบจำลอง Linear + square โดยทดลองบำบัดตัวอย่างน้ำเสียจำนวน 10 ตัวอย่าง ตามสภาวะข้างต้นพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในตัวอย่างน้ำจำนวน 10 ซ้ำ ได้ค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $75.97 \pm 1.87$  (ตารางที่ 4.24) และไม่แตกต่างจาก Predicted value เท่ากับ 76.96 %

ตารางที่ 4.24 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีตามสภาวะที่เหมาะสม

การทดลองที่	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (%)
1	73.53
2	73.43
3	77.25
4	78.13
5	73.24
6	76.66
7	77.05
8	75.98
9	76.57
10	77.84
เฉลี่ย	$75.97 \pm 1.87$

4.7.7 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมในหัวข้อ 4.7.6 จำนวน 10 ซ้ำ ได้ผลดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 คุณสมบัติของน้ำเสียหมักพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีโอโซนชั้นตามสภาวะที่เหมาะสม

คุณลักษณะ	หลังการบำบัด
พีเอช	2.38 ± 0.05
ความเข้มข้น (ADMI)	692 ± 9.6
ซีโอดี (COD, mg/L)	409. ± 38.2

จากตารางที่ 4.25 พบว่าการบำบัดน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมักพิมพ์ฐานน้ำที่สภาวะดังกล่าว ยังไม่สามารถบำบัดให้ความเข้มข้นและค่าซีโอดีในน้ำเสียเป็นไปตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

เมื่อพิจารณาผลจากการบำบัดน้ำเสียตามสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง Linear + square โดยใช้สมการ (4.8) และสมการ (4.9) พบว่าการบำบัดน้ำเสียตามสภาวะที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการที่ 4.8 ได้น้ำทิ้งที่มีค่าสีเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ในขณะที่การบำบัดตามสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการที่ 4.9 พบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดยังมีค่าสีและซีโอดีสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด จากเหตุผลดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่าสภาวะเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการพิมพ์แบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมักพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีการโอโซนชั้น คือ ระยะเวลาการเติมโอโซน 130 นาที ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 2.25

4.8 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียระหว่างวิธีการสร้าง-รวมตะกอนกับวิธีโอโซนชั้น

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างวิธีการบำบัดแบบสร้าง-รวมตะกอนเปรียบเทียบกับวิธีโอโซนชั้นเป็นการประเมินเพื่อประกอบการตัดสินใจในเลือกกระบวนการบำบัดให้เหมาะสมที่สุด โดยการนำสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอนคือปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ 1.24 กรัมต่อลิตรและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7.5 มาคิดค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบกับสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธีโอโซนชั้นคือ ระยะเวลาในการเติมโอโซน 130 นาทีและค่าพีเอชเท่ากับ 2.3 แสดงดังในตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียระหว่างวิธีการสร้าง-รวมตะกอนกับวิธีโอโซนชั้น

วิธีการบำบัด	ค่าสารเคมี (บาท/ลิตร)	ค่ากำจัดกากตะกอน (บาท/ลิตร)	ค่าไฟฟ้า (บาท/ลิตร)	รวม (บาท/ลิตร)
วิธีสร้าง-รวมตะกอน	1.088	9.78	0.04	10.908
วิธีโอโซนชั้น	0.593	-	7.8	8.393

เงื่อนไขของการคำนวณเป็นดังนี้

1. คำนวณจากปริมาณน้ำเสีย 300 มิลลิเมตร
2. ค่าสารเคมีในวิธีสร้าง-รวมตะกอน คำนวณจาก
  - 2.1 เฟอร์ริกคลอไรด์ 40% เกรดการค้า จากบริษัท Merck ประเทศเยอรมนี ปริมาตร 20 ลิตร ราคา 2,900 บาท
  - 2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย ปริมาตร 1 กิโลกรัม ราคา 420 บาท
3. ค่าไฟในวิธีสร้าง-รวมตะกอน อ้างอิงจาก การคิดค่าไฟบ้านของการไฟฟ้านครหลวง
  - 3.1 เครื่อง Jar test ยี่ห้อ Raypa รุ่น R. Espinar, S.L. บริษัท จักรเย็บผ้าโอโซน จำกัด ใช้กำลังไฟฟ้า 220 วัตต์
4. ค่ากำจัดกากตะกอน อ้างอิงจาก ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมเสมาดำ ค่ากำจัดกากตะกอนคิดเป็น 1,899 บาทต่อลูกบาศก์เมตร
5. ค่าสารเคมีในวิธีโอโซนชั้น คำนวณจาก
  - 5.1 กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc.H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศเยอรมนี ปริมาตร 2.5 ลิตร ราคา 450 บาท
6. ค่าไฟในวิธีโอโซนชั้น อ้างอิงจาก การคิดค่าไฟบ้านของการไฟฟ้านครหลวง
  - 6.1 เครื่องผลิตโอโซน (Ozone Generator) บริษัท OZZON รุ่น OZ-A1-FT ประเทศไทย ใช้กำลังไฟฟ้า 125 วัตต์
7. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีวิธีการสร้าง-รวมตะกอนกับวิธีโอโซนชั้นนี้ ไม่ได้รวมถึงต้นทุนเครื่องผลิตโอโซน ต้นทุนเครื่องจาร์เทส ค่าดำเนินการติดตั้งระบบ ค่าซ่อมบำรุงและอื่น



## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอนเทียบกับวิธีโอโซนเนชั่น ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียพบว่าค่าพีเอชเท่ากับ  $7.03 \pm 0.03$  ความเข้มข้นเท่ากับ  $3,244 \pm 48$  ADMI ซีโอดีมีค่าเท่ากับ  $3,244 \pm 48$  มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าความขุ่นเท่ากับ  $2,173 \pm 3.0$  NTU

2. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอนโดยใช้การทดลองแบบ One Variable At A Time พบว่า

2.1 ปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์ที่ 0.5 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าสีในน้ำเสียได้มากที่สุด และทำให้ค่าสีในน้ำเสียเป็นไปตามมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ แต่พบว่าค่าซีโอดีในน้ำที่ผ่านการบำบัด ณ สภาวะดังกล่าว ยังมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

2.2 ความเข้มข้นของสี ซีโอดีและความขุ่น มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียอยู่ในช่วง 5 – 8

3. การหาตัวแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอน พบว่า

3.1 แบบจำลองแบบ Full Quadratic เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสีย

3.2 ปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำเสียแต่ตัวแปรอิสระในเทอมของ Interaction Terms ไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสี ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.3 ปริมาณเพอร์ริกคลอไรด์มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีรวมถึงตัวแปรอิสระในเทอมของ Interaction Terms มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.4 สภาวะที่เหมาะสมของประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีสร้าง-รวมตะกอนที่ได้จากแบบจำลองคือ ปริมาณสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ 1.24 กรัมต่อลิตรและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7.5 ที่สภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีเท่ากับ  $90.83 \pm 1.61$

เปอร์เซ็นต์ และ  $60.01 \pm 5.75$  เปอร์เซ็นต์ น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าสี  $300 \pm 7.3$  ADMI และค่าซีไอดี  $1,749 \pm 78.6$  มิลลิกรัมต่อลิตร

4. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีไอดีด้วยวิธีโอโซนชั้นโดยใช้การทดลองแบบ One Variable At A Time พบว่าความเข้มข้นของสี ซีไอดีและความขุ่น หลังการบำบัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซนและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 7

5. การหาตัวแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีไอดีด้วยวิธีโอโซนชั้น พบว่า

5.1 แบบจำลองแบบ Linear + square มีความเหมาะสมที่สุดในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีด้วยวิธีโอโซนชั้น

5.2 ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำเสีย รวมถึงตัวแปรอิสระยกกำลังสอง (Square terms:  $X_1^2, X_2^2$ ) มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสี ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการเติมโอโซนมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีในน้ำเสีย รวมถึงตัวแปรอิสระยกกำลังสอง (Square terms:  $X_1^2, X_2^2$ ) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5.4 สภาวะที่เหมาะสมของประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีไอดีด้วยวิธีโอโซนชั้นที่ได้จากแบบจำลองคือ ระยะเวลาที่ใช้เติมโอโซน 130 นาทีและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 2.3 ที่สภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีเท่ากับ  $91.44 \pm 1.7$  เปอร์เซ็นต์ และ  $72.65 \pm 9.23$  เปอร์เซ็นต์ น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าสี  $293 \pm 15.3$  ADMI และค่าซีไอดี  $466 \pm 28.5$  มิลลิกรัมต่อลิตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีไอดีของน้ำเสียหมักพิมพ์เฟล็กโซกราฟีหมักพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีและวิธีโอโซนชั้น คือ ปริมาณสารอินทรีย์และความเข้มข้นของโอโซน

2. น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังคงมีค่าซีไอดีสูงกว่ามาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด ควรมีการศึกษาวิธีการบำบัดทางชีวภาพร่วมกับวิธีการบำบัดทางเคมี

3. หลังการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีจะพบตะกอนเกิดขึ้นดังนั้น ควรศึกษาวิธีการกำจัดตะกอนโดยวิธีที่ถูกต้องในขั้นต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- กมลลสิริ จุไรสง, กษมา ประสงค์เงินและพรศิริ เฟิงจันทร์. 2560. “การหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงออกจากกากตะกอนโดยการสกัดด้วยสารละลายกรด” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2559. **สภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมประจำปี 2559**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.oie.go.th/academic/industryoverview> สืบค้นเมื่อ 10 พ.ค.2560
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2560. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560, แหล่งข้อมูล : <http://www.diw.go.th/hawk/content.php?mode=laws&tabid=1&secid=3> คนเมื่อวันที่ 8 มิถุนายน 2560.
- กัลยาณี เต็งพงศธร. 2554. “พื้นที่ผิวตอบสนอง” หน้า 1-15. ใน **เอกสารประกอบการสอนรายวิชาการวางแผนการตลาดทางอุตสาหกรรมเกษตร** คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เกศระวี ปานทับ, สุทธิมา ลิมหลัก และณพพร โกไศยกานนท์. 2554. “การใช้ประโยชน์ของไขมันโคเจียวเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ไกรภพ เจริญโสภา. 2551. “การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะน้ำหนักสีของงานพิมพ์เพล็กซ์โกราฟีบนสติ๊กเกอร์ชนิดกระดาษและพลาสติก”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ. 2551
- ชนิษฐา เจริญลาภ. 2550. “การกำจัดสปีดิสเพอร์ส สีไต้เร็กซ์และสีรีแอคทีฟจากน้ำทิ้งย้อมผ้าโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี”. **คัลเลอร์เวย์**. ปีที่ 7. ฉบับที่ 34. หน้า. 32-38.
- จุฑามาศ รดา. 2553. “การผลิตเอนโดกลูคาเนสโดยเชื้อราที่แยกจากดิน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- เจตนิพิฐ สุดทองคง, ณัฐพงศ์ โปรายสุรินทร์ และนัตยา สุขประเสริฐ. 2552. “การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมรีแอคทีฟด้วยกระบวนการโอโซนชั้น.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ทัศนีย์ สวัสดิ์พาณิชย์. 2550. “การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ธีระ ตั้งวิชาญ และชุตินา สัจจามันท์. 2539. เอกสารประกอบการสอนความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ การพิมพ์. หน่วยที่ 1-4 หน้า 218-264. สำนักพิมพ์สุโขทัยธรรมจริราช.
- ธีระยุทธ พึ่งเทียร. 2558. สถิติเบื้องต้นและการวิจัย. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดดูเคชั่น
- นงเยาว์ ชูสุข. 2554. “เทคนิคในการพัฒนาผลิตภัณฑ์.” หน้า 1-37. ใน เอกสารประกอบการสอน รายวิชาปฏิบัติการวางแผนการตลาดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- นนทพงษ์ ภาณุตุลภิตติ. 2548. “การบำบัดสีน้ำทิ้งโรงงานเยื่อและกระดาษโดยใช้กระบวนการ โอโซนเนชั่น.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิตยา ทองแพง, สมลักษณ์ คุชิตาและสุภสิทธิ์ แก้วสะอาด. 2558. “การกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสีย จากโรงพิมพ์ระบบฟลักซ์โซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเพนตัน.” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า ทหารลาดกระบัง.
- นิพัฒน์ จงเจริญศิริ. 2557. “ระบบจัดการความรู้การแก้ปัญหาทางพิมพ์ผลากและบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว ด้วยระบบฟลักซ์โซกราฟีและกราฟวัวร์” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยี การพิมพ์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี. พ.ศ. 2557.
- นุชนกาญจน์ พรหมมาแพทย์. 2550. “การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการ การเติมโอโซน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ปิยะฉัตร จันทรังศรี. 2545. “การบำบัดน้ำเสียหมึกพิมพ์ฟลักซ์โซกราฟีฐานน้ำโดยกระบวนการโคแอก กูเลชันร่วมกับการดูดซับด้วยกากโลหะไฮดรอกไซด์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้า ธนบุรี.พ.ศ. 2545.
- ปิยะวิทย์ ทิพรส. 2552. “โอโซน : สมบัติทางเคมีกายภาพและการประยุกต์ใช้เพิ่มความขาว ผลิตภัณฑ์เนื้อปลา.” วารสารสุทธิปริทัศน์. 23(70) : 105-120.
- พรศักดิ์ สมรโกรสรกิจ. 2552. “กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน”. ส่วนวิเคราะห์ จัดการสิ่งแวดล้อม. กองจัดการสิ่งแวดล้อมและมลพิษ. ฝ่ายควบคุมคุณภาพน้ำ. การประปา นครหลวง.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- พรหมทิพย์ แสงสุขเอี่ยมและราตรี ชูย์หิรัญ. 2558. “การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสีย้อมจากกลีบดอกอัญชันโดยใช้พื้นที่ผิวตอบสนอง”. การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม นครปฐม.
- พรวิษา แกสมาน, ภัทรา คงภักดี และ ภาณุพงศ์ เฟื่องวัน. 2551. “การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนชั้น”. ปรินญาณิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พันธกานต์ ยันฉิมพลี. 2558. “การบำบัดสีของน้ำยาโบราณที่ใช้ซ้ำในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราด้วยกระบวนการโอโซนชั้น”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พีรวัฒน์ วงศ์คา. 2556. “การหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดไลโคปีนและบีต้าแคโรทีนจากเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าว โดยใช้คลื่นเสียงและวิธีพื้นผิวผลตอบ”. โครงการวิจัยวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ไพรัชช์ ลิทธิรัตนยืนยง. 2544. “อิทธิพลของภาวะการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์เฟล็กโซกราฟีต่อคุณภาพของวัสดุพิมพ์พอลิโพรพิลีน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ. 2544
- มันสิน ตันกุลเวศน์. 2542. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร.
- มันสิน ตันกุลเวศน์ และ มันรัก ตันกุลเวศน์. (2547). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 6/3-6/7
- มัลลิกา ปัญญาคะโป. 2556. “การฆ่าเชื้อโรค” หน้า 21-24. ใน เอกสารประกอบการสอนรายวิชาการบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
- รัชดากร สำเนากลาง, กฤษณศ ฝ้ายสงค์ และ พรพรรณ แม้นศิริ. 2553. “การประยุกต์ใช้โอโซนร่วมกับเฟนตันในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ.” โครงการงานนักศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ราชิด สราทพันธ์. 2553. “การหาจุดเหมาะสมของกระบวนการตกและรวมตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีของอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยสถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิว.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- รุ่งทิพย์ เบอร์พันธ์, พิรพงษ์ ธงสินธุ์ศักดิ์, ภาวณี นันตรักษาและอนุรักษ์ ปิติรักษสกุล. 2545. “การศึกษาผลของค่าแกรเดียนท์แรงเฉือนต่อกระบวนการรวมตะกอน”. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 โรงแรมโซล ทวิน ทาวเวอร์. กรุงเทพมหานคร.
- วนิดา ชูอักษร. 2555. “เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม” *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 17 : 181-191
- วรินทร์ คำพิลา 2554. “การลดซีโอดีและสีในน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบของเสียอันตรายโดยใช้เพอร์ริกคลอไรด์ ซีโอไลต์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ. 2544
- วรากร ชูศิลป์, สปีนนา นวลสอาดและอาณัติ น้อยแดง. 2558. “การกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียโรงพิมพ์เฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตันโดยใช้กาออกแบบการทดลองแบบที่ละลายง่าย.” *โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*
- วีระพงษ์ เลิศรัตนเทวี. 2548. “การลดสีจากนาที่ ที่บำบัดแล้วของโรงงานสุราโดยกระบวนการโอโซนเนชั่น.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วีระพงษ์ นาคเจือทอง. 2559. กระบวนการพิมพ์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.d-conceit.com/printing-processes/>
- ศิริชัย จันทร์ปรง. 2561. การวิเคราะห์การถดถอยสหสัมพันธ์. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดดูเคชั่น
- ศุภณี เรียบเลิศศิริธัญ และแววบุญ แยมแสงสังข์. 2557. หมึกพิมพ์ฐานน้ำกับการพิมพ์งานกล่อง, รายงานผลการสัมมนา หมึกพิมพ์ฐานน้ำกับการพิมพ์งานกล่องกระดาษ วันที่ 5 มิถุนายน 2557 ศูนย์การเรียนรู้เทคโนโลยีหมึกพิมพ์ บริษัทเฉลิมชัยชาญ.
- สปีนนา นวลสอาดและอุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์. 2561. “ การกำจัดสี ความขุ่นและซีโอดีในน้ำเสียจากการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ” *ลาดกระบัง*. 27(1) : 18 – 27
- สวีณา เกตุสุวรรณ. 2543. “การลดค่าซีโอดีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีกับโพลีลูมิเนียมคลอไรด์เพอร์ริกซัลเฟตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์.”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ. 2543

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- สิทธิชัย เจริญเศรษฐศิลป์. 2559. การวางแผนการทดลอง Experimental Design. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สินินาฏ ทิพย์ดนตรี. 2543. “การบำบัดน้ำเสียจากโรงพิมพ์กล่องกระดาษ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม , มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- สุทธิชัย อินนุรักษ์. 2546. ระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุรัชย์ จอดพิมาย. 2553. “การกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเบียร์ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น.” การค้นคว้าอิสระ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- หทัยชนก อภิวัฒนาภิวัดและต่อพงศ์ กริธาชาติ 2550. “การลดสีน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดยโอโซนออกซิเดชัน” หน้า. 825-834. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 45:สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรชุดา ชันดีกุล. 2549. “การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์โดยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- อรุณี คงดี อัลเดรด. 2556. “การจำแนกและชนิดของสีย้อม” หน้า 1-46. ใน เอกสารประกอบการสอนรายวิชาการกระบวนการทางเคมีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- ไอศิกา ตันตรวงค์. 2547. “การกำจัดสีหมักพิมพ์ออกจากน้ำทิ้งโรงพิมพ์ระบบเพล็กโซกราฟีโดยใช้กากโลหะ.”. โครงการพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. พ.ศ.2547.
- Abidin, C.Z. and Ridwan, F. 2011. “Characteristic of COD and Colour Removal of Azo Dye in Ozonation and Biological Treatment” 117-123. In **National Postgraduate**. Perak : Seri Iskandar.
- APHA, AWWA and WEF. 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Washington DC : American Public Health Association
- Atav, R. 2013. **The Use of New Technologies in Dyeing of Proteinous Fibers : Eco-Friendly Textile Dyeing and Finishing**. Croatia : InTech. 111-116.
- Caballero. K.P. 1994. “Flexographers Work with EPA to Facilitate Future Compliance”, **Flexo**, pp. 81-93.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Dehouli, H., Chedeville, O., Cagnon, B., Caqueret, V. and Porte, C. 2010. “Influences of pH, Temperature and Activated Carbon Properties on the Interaction Ozone/Activated Carbon for a Wastewater Treatment Process.” *Desalination*, 254(1-3): 12-16.
- Gottschalk, C., Libra, J.A., and Saupe, A. 2000 . **Ozonation of Water and Waste Water: A Practical Guide to Understanding Ozone and its Application.** Weinheim: WILEY-VCH.
- Herath N.K., Ohtani Y. and Ichiura H. 2011. “Color and Phenolic Compounds Reduction of Kraft Pulp Mill Effluent by Ozonation with Some Pretreatments.” *American Journal of Scientific and Industrial Research*. 2(5) :798-806.
- Hydroflotech. 2558. **Water Based Flexographic Ink Wastewater Treatment System Process Description.** [Online]. Available : <http://www.hydroflotech.com/water-based-flexographic-ink-wastewater-treatment->
- Johnson, P. N. and Amirtharajah A. 1983. “Ferric Chloride and Alum as Single and Dual Coagulants,” *Journal of American Water Works Association*. 75(5): 232-239
- Kim, T.-H., Park, C., Shin, E.-B. and Kim, S. 2004. “Decolorization of disperse and reactive dye solutions using ferric chloride.” *Desalination*, 161, 49-58.
- Lin S. H. and Lai C.L. 2000. “Kinetic Characteristics of Textile Wastewater Ozonation in Fluidized and Fixed Activated Carbon Beds.” *Water Research*, 34(3) :763–772.
- Mihaelal, S. 2017. **Advanced Oxidation Processer for Water Treatment.** London : IWA Publishing
- Okafo, N. 2011. **Environmental Microbiology of Aquatic and Waste Systems.** New York : Springer Science & Business Media. 227-229
- Ozonetech. 2019. **Wastewater - Ozone Treatment.** [Online]. Available : <https://www.ozonetech.com/industries/Wastewater-Ozone-Treatment>
- Johnson, P. N. and Amirtharajah A. 1983. “Ferric Chloride and Alum as Single and Dual Coagulants.” *Journal of American Water Works Association*. 75(5): 232-239.
- Papic, S., Koprivanac, N. and Metes, A. 2004. “Removal of some reactive dyes from synthetic wastewater by combined Al(III) coagulation/carbon adsorption process”. *Journal of Dyes and Pigments*. 62(3): 291-298

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Packaging Intellelgent Unit. 2558. **Water Based Flexographic Ink Wastewater Treatment System Process Description.** [Online]. Available : <http://www.hydroflotech.com/water-based-flexographic-ink-wastewatertreatment-system-process-description>.
- Reynolds, T.D., 1982. **Unit Operations and Processes in Environmental Engineering.** Boston, Massachusetts : Bic Engineering Division.
- Roa-Morales, G., Barrera Diaz, C., Balderas-Hernandez, P., Zaldumbide-Oritz, F., Perez, H. and Bilyeu, B. 2014. Removal of color and chemical oxygen demand using a coupled coagulation-electrocoagulation-ozone treatment of industrial wastewater that contains offset printing dyes. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 58, 362-368.
- Kim, S.C. 2016. “Application of response surface method as an experimental design to optimize coagulation–flocculation process for pre-treating paper wastewater” *Industrial and Engineering Chemistry*, 38:93 – 102.
- Soares, O.S., Orfão J.J., Portela, D., Vieira, A. and Pereira, M.F. 2006. “Ozonation of Textile Effluents and Dye Solutions under Continuous Operation: Influence of Operating Parameters.” *Journal of Hazardous Materials*, 137(3) : 1664-1673.
- Tak-Hyun. K, Jae-Kwang. L and M. Lee, “Biodegradability enhancement of textile wastewater by electron beam irradiation” *Journal of Radiation Physics and Chemistry*, 76(5), : 1037-1041.
- US.EPA (United States Environment Protection Agency). 2002. An Introduction to Indoor Air Quality : Volatile Organic Compounds (VOC.s) เข้าถึงได้จาก <http://www.epa.gov/iaq/voc.html>
- Wu, D., Yang, Z., Wang, W., Tian, G., Xu, S. and Sims, A. 2012. “Ozonation as a Advanced Oxidant in Treatment of Bamboo Industry Wastewater.” *Chemosphere*, 88(9) : 1108-1113.
- Daud, Z. and Awangb, Z. 2015. “ Suspended Solid, Color, COD and Oil and Grease Removal from Biodiesel Wastewater by Coagulation and Flocculation Processes.” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195:2407 – 2411.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์

#### ก-1 การวัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI)

1. นำตัวอย่างมาแยกตะกอนโดยใช้เครื่องเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปวัดค่า %T ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นที่แสดงในตารางโดยใช้น้ำกลั่น เป็น blank

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

2. เมื่อได้ค่า %T ของแต่ละความยาวคลื่นแล้วให้นำค่าที่ได้ใส่ในโปรแกรม UVWin5 Software v5.1.1.1 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณค่า ADMI (เจตนิพิฐ และคณะ, 2552)

## ก-2 การวิเคราะห์ซีโอทีโดยวิธีฟลักซ์แบบปิด/เปรียบเทียบสี (Closed-Reflux, Colorimetric Method)

### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1. ภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย (Digest Vessel) ควรใช้หลอดทดลองแก้วชนิดบอโรซิลิเกต (Borosilicate Glass) ซึ่งมีขนาด 16 x 100 มิลลิเมตร พร้อมทั้งฝาจุก

1.2 เครื่องให้ความร้อนหรือเตาอบ ซึ่งสามารถให้ความร้อนและสามารถควบคุมให้มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง  $150 \pm 2$  องศาเซลเซียส

1.3 Spectrophotometer ที่สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตรได้

### รีเอเจนต์

1. น้ำย่อยสลายสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ความเข้มข้น 0.0167 โมลาร์

#### วิธีการเตรียม

ชั่งสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary Standard) โพแทสเซียมไดโครเมต 4.913 กรัม ซึ่งถูกทำให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง (Desiccator) ใส่ลงไปใต้น้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร ค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร เติมเมอร์คิวริกซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วเจือจางให้มีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. กรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ เช่นเดียวกับวิธีฟลักซ์แบบเปิด
3. เพอร์โรอิน อินดิเคเตอร์ เช่นเดียวกับวิธีฟลักซ์แบบเปิด
4. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลทและ/หรือสารละลาย

#### มาตรฐานกลูโคส

เตรียมขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจสอบวิธีและการดำเนินการวิเคราะห์ ซึ่งวิธีเตรียมมีลักษณะเช่นเดียวกับวิธีฟลักซ์แบบเปิด

### วิธีวิเคราะห์

1. ล้างหลอดย่อยสลาย (Digestion Tubes) และฝาจุกด้วยกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 20 ก่อนนำไปใช้ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์
2. นำตัวอย่างน้ำมาใส่หลอดย่อยสลายที่เตรียมไว้ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร เติมสารละลายที่ใช้ในการย่อยสลายซึ่งได้แก่สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 1.5 มิลลิลิตร

3. ค่อยๆ เทกรดซัลฟิวริกเอเจนต์ปริมาตร 3.5 มิลลิลิตรลงไปในหลอด โดยให้กรดซัลฟิวริกเอเจนต์ไหลลงก้นหลอดแก้ว เพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ที่ชั้นของตัวอย่างน้ำและน้ำยาย่อยสลาย

4. ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่นแล้วคว่ำหลอดแก้วไปมาหลายๆ ครั้ง เพื่อผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง

ข้อควรระวัง

- ในขณะที่ผสมในภาชนะให้ใส่น้ำกากป้องกัน (Face Shield) และให้ใส่ถุงมือเพื่อกันความร้อนด้วย
- ต้องผสมของผสมให้เข้ากันให้ดีก่อนนำไปรีฟลักซ์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนสะสมอยู่เฉพาะที่ก้นหลอด เพราะอาจทำให้ระเบิดได้

5. นำหลอดทดลองเหล่านี้ไปใส่ในเครื่องย่อยสลาย (Block Digestion) หรือเตาอบ (Hot Air Oven) ซึ่งได้ทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสก่อน ใช้เวลารีฟลักซ์นาน 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง

6. ทำวิธีเช่นเดียวกันในข้อ 1 ถึง ๓ แต่ให้ใช้สารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 20 ถึง 900 ไมโครกรัมต่อลิตรอย่างน้อย 5 ความเข้มข้น โดยใช้ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานเท่ากับตัวอย่างที่ใช้

7. ทำวิธีทำเช่นเดียวกัน ให้รีฟลักซ์น้ำกลั่น (Blank) ซึ่งจะมีรีเอเจนต์ต่างๆ และปริมาตรน้ำกลั่นเท่ากับปริมาตรของตัวอย่างน้ำที่ใช้

8. ผสมสารละลายในหลอดย่อยสลายให้เข้ากันอย่างดี ทั้งตัวอย่าง และแบลนด์ และสารละลายมาตรฐาน ถ้ามีตะกอนเกิดขึ้นให้ตั้งสารละลายทิ้งไว้จนตะกอนนอนก้นแล้วนำสารละลายที่ใสไม่มีตะกอนมาวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

9. ทำกราฟมาตรฐาน (Standard Calibration Curve) และค่าซีไอดีของตัวอย่างจากกราฟมาตรฐาน

การคำนวณ

$$\text{COD} = 1000 A/B$$

เมื่อ COD = ค่าซีไอดีหน่วยเป็นมิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร

A = ปริมาณออกซิเจนของตัวอย่างที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐาน

B = ปริมาตรน้ำตัวอย่าง หน่วยเป็นมิลลิลิตร



- $V_{\text{titrant}}$  คือปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต เข้มข้น 0.1 นอร์มอล ( $0.1 \text{ N Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) ที่ใช้ไทเทรตกับสารละลาย 2% KI ในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
- N คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไทโอซัลเฟต
- time คือ เวลาที่สัมผัสไอโอดีน (min)

## ภาคผนวก ข

### ผลการทดลอง

#### ข-1 น้ำเสียหมักพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมักพิมพ์ฐานน้ำ

ตารางที่ ข-1. ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมักพิมพ์ฐานน้ำ

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
pH	7.05	7.03	7.00
สี (ADMI)	3,244	3,292	3,196
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD)	3,049	2,902	3,198
ความขุ่น (turbidity)	2,173	2,169	2,175

#### ข-2 อัตราการผลิตโอโซน

ตารางที่ ข-2 การวัดปริมาณโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน

เวลา ( นาที)	ปริมาณโอโซน (mg)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
10	58.94	51.76	55.29
20	120.71	116.94	115.53
30	170.69	167.76	175.29
40	228.76	223.06	223.76
50	279.81	270.82	275.76
60	351.57	323.06	334.82
90	539.40	523.76	523.29
120	687.06	697.88	687.06
150	890.12	894.89	909.70

### ข-3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีไอดีด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอน

ตารางที่ ข-3.1 ผลของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์

ความเข้มข้น	ค่า COD (mg/L)	สี (ADMI)	ความขุ่น (NTU)	พีเอชหลัง การบำบัด
0	4527	3012.38	2030	8.14
	4528	3024	2030	8.17
	4550	3036.56	2030	8.1
0.25	3160	828	255	5.54
	3193.3	828	256	5.44
	3093	857	255	4.93
0.5	2460	34.665	59.7	2.52
	2453	52.784	59.9	2.51
	2455	39.677	59.9	2.52
0.75	2497	121.3674	61.1	2.18
	2493	121.3674	61.1	2.2
	2490	144.1523	61.1	2.22
1	2423	255.59	61.3	2.06
	2423	252.08	61.5	2.07
	2407	267.94	61.5	2.07
1.5	1077	579.8	297	1.93
	1100	581.89	297	1.92
	1073	579.8	297	1.94
2	1227	587.89	404	1.9
	1250	591.34	404	1.9
	1223	595.65	403.7	1.9

ตารางที่ ข-3.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นในน้ำเสีย

ค่าพีเอชเริ่มต้น	ค่าCOD (mg/L)	สี (ADMI)	ความขุ่น (NTU)	พีเอชหลัง การบำบัด
5	3360	415.54	237	2.14
	3500	437.6	237	2.32
	3226.7	453.7	239	*
6	2340	241.66	122	2.08
	2333.3	229.936	122.3	2.26
	2343.3	225.6	122.3	2.65
7	1960	78.228	52.3	2.4
	1760	78	52.3	2.38
	2020	76.467	52.7	2.41
8	1926.7	75.288	53.2	5.2
	1893.3	74.471	53.2	5.33
	1993.3	71.23	53.2	5.43
9	2445.7	213.44	123	8.14
	2426.7	213.557	123	8.14
	2426.7	234.445	123.3	8.14
10	3360	402.34	177	8.49
	3236.7	419.34	177	8.5
	3324.3	419.34	177	8.51

**ข-4 ผลการบำบัดน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเพลิกโซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธี  
สร้าง-รวมตะกอนโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite  
Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี RSM**

ตารางที่ ข-4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอทีในน้ำตัวอย่าง ดำเนินการบำบัดตามสภาวะการ  
ทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลอง Central Composite Design

ลำดับ การ ทดลอง	ปริมาณสาร (g/L)	ค่าพีเอช เริ่มต้น	ความ เข้มข้น (ADMI)	ประสิทธิภาพ ในการบำบัดสี (%)	COD (mg/L)	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด ซีไอที (%)
1	1.25	7.5	293.90	89.32	1118.7	74.43
2	0.5	5	398.56	85.51	1133.7	64.08
3	1.25	11	230.58	91.62	1055.7	75.87
4	0.2	7.5	1064.	61.31	1331.6	69.56
5	1.25	7.5	297.11	89.2	929.86	78.74
6	1.25	7.5	247.88	90.99	1200.3	72.56
7	2	10	692.25	74.84	1107.	74.68
8	0.5	10	857.98	68.84	1126.2	74.25
9	1.25	4	509.59	81.49	1135.4	74.04
10	2.3	7.5	989.03	64.05	1133.5	74.09
11	1.25	7.5	164.74	94.01	1061.2	75.74
12	1.25	7.5	275.95	89.97	1104.0	74.76
13	2	5	782.59	71.56	1068.7	75.6

## ข-5 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีโอโซนเนชั่น

ตารางที่ ข-5.1 ผลของระยะเวลาในการเติมโอโซน

เวลา (นาที)	ค่า COD (mg/L)	สี (ADMI)	ความขุ่น (NTU)	พีเอชหลัง การบำบัด
5	1330.87	3341.01	2325.32	7.01
	1253.94	3341.01	2325.08	7.01
	1187.20	3282.57	2325.41	7.02
10	1124.84	3412.85	2224.60	6.90
	1117.47	3277.6	2224.87	6.91
	1129.70	3298.87	2225.66	6.99
15	1409.68	3143.00	2155.32	6.86
	1122.43	3245.18	2155.34	6.89
	1261.02	3292.34	2155.38	6.90
30	1049.29	2629.64	1910.11	6.62
	1058.71	2611.40	1911.84	6.67
	1031.55	2647.78	1910.35	6.76
45	586.00	2299.86	1800.21	6.44
	568.00	2342.42	1801.09	6.55
	578.56	2466.77	1800.45	6.61
60	502.00	2238.74	1535.64	6.08
	467.00	2237.36	1535.56	5.92
	523.00	2370.62	1535.62	5.94
90	440.00	1227.99	745.39	4.94
	490.01	1329.54	745.00	4.48

ตารางที่ ข-5.1 ผลของระยะเวลาในการเติมโอโซน (ต่อ)

เวลา (นาที)	ค่า COD (mg/L)	สี (ADMI)	ความขุ่น (NTU)	พีเอชหลัง การบำบัด
150	487.50	235.982	149.11	3.27
	504.00	214.907	125.69	3.25
	471.00	197.967	114.88	3.25
180	454.00	220.00	185.88	3.13
	464.16	214.91	170.85	3.19
	445.17	216.08	183.72	3.17

ตารางที่ ข-5.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นในน้ำเสีย

ค่าพีเอชเริ่มต้น	ค่า COD (mg/L)	สี (ADMI)	ความขุ่น (NTU)	พีเอชหลัง การบำบัด
3	646.67	1010.123	136.42	1.86
	731.67	938.000	144.50	2.02
	746.67	938.000	153.44	2.02
5	480.00	628.225	67.73	1.56
	546.67	367.908	69.61	1.47
	523.33	367.908	66.43	1.9
7	648.00	271.406	75.22	2.56
	673.00	219.982	78.84	2.56
	681.67	232.685	71.39	2.57
9	881.67	240.755	93.44	2.2
	723.33	216.290	92.65	2.3
	1423.33	498.650	94.81	2.56
11	1073.33	1091.131	324.08	6.22
	915.00	1419.140	302.56	7.76
	1056.67	1091.131	347.70	6.55

**ข-6 ผลการบำบัดน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเพล็กโซกราฟฟีที่ใช้หมักพิมพ์ฐานน้ำด้วยวิธี  
โอสโซเนชันโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design ร่วมกับ  
การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี RSM**

ตารางที่ ข-4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีในน้ำตัวอย่าง ดำเนินการบำบัดตามสภาวะการ  
ทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลอง Central Composite Design

ลำดับ การ ทดลอง	เวลาที่ใช้ใน การบำบัด (นาที)	ค่าพีเอช เริ่มต้น	ความ เข้มสี (ADMI)	ประสิทธิภาพ ในการบำบัดสี (%)	COD (mg/L)	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด ซีไอดี (%)
1	98	7	326.11	90.48	802.22	52.92
2	150	3	960.21	71.96	894.81	47.49
3	98	7	357.58	89.56	442.50	74.03
4	98	7	274.55	91.98	379.07	77.75
5	23	7	2847.19	16.87	1572.59	7.71
6	45	11	3016.00	11.94	1550.37	9.02
7	98	7	163.19	95.24	393.89	76.88
8	172	7	144.94	95.77	183.70	89.22
9	98	7	497.73	85.47	371.67	78.19
10	98	12.66	3180.15	7.15	1646.67	3.36
11	150	11	3172.94	7.36	1535.56	9.89
12	98	1.34	713.20	79.18	335.56	80.31
13	45	3	304.77	91.10	907.78	46.73

## ภาคผนวก ค

### ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ค-1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีไอดีด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอน

ค-1.1 ผลของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์

ตารางที่ ค-1.1.1 ผลของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์กับค่าความเข้มข้นสี

Factor Information

Factor	Levels	Values
Dose	7	0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Dose	6	19066252	3177709	28774.49	0.000
Error	14	1546	110		
Total	20	19067798			

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Dose	N	Mean	Grouping
0.00	3	3024.31	A
0.25	3	837.67	B
2.00	3	591.63	C
1.50	3	580.497	C
1.00	3	258.54	D
0.75	3	128.96	E
0.50	3	42.37	F

ตารางที่ ค-1.1.2 ผลของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์กับค่า COD

Factor	Levels	Values
Dose	7	0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Dose	6	24538882	4089814	8673.61	0.000
Error	14	6601	472		
Total	20	24545483			

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Dose	N	Mean	Grouping
0.00	3	4535.00	A
0.25	3	3148.7	B
0.75	3	2493.33	C
0.50	3	2456.00	C
1.00	3	2417.67	D
2.00	3	1233.33	E
1.50	3	1083.33	F

ตารางที่ ค-1.1.3 ผลของปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์กับความชุ่มในน้ำเสีย

Factor	Levels	Values
Dose	7	0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Dose	6	9042712	1507119	27050846.58	0.000
Error	14	1	0		
Total	20	9042712			

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Dose	N	Mean	Grouping
0.00	3	2030	A
2.00	3	403.900	B
1.50	3	297.0	C
0.25	3	255.333	D
1.00	3	61.4333	E
0.75	3	61.10	E
0.50	3	59.8333	F

### ค-1.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

#### ตารางที่ ค-1.2.1 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียกับค่าความเข้มข้น

Factor	Levels	Values
pH	6	5, 6, 7, 8, 9, 10

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
pH	5	6726700	1345340	110.12	0.000
Error	12	146607	12217		
Total	17	6873307			

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

Dose	N	Mean	Grouping
5	3	3462	A
10	3	3307.0	A
9	3	2433.03	B
6	3	2338.87	B
8	3	1937.8	C
7	3	1913.3	C

ตารางที่ ค-1.2.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียกับค่า COD

Factor	Levels	Values
pH	6	5, 6, 7, 8, 9, 10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
pH	5	6726700	1345340	110.12	0.000
Error	12	146607	12217		
Total	17	6873307			

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Dose	N	Mean	Grouping
5	3	3462	A
10	3	3307.0	A
9	3	2433.03	B
6	3	2338.87	B
8	3	1937.8	C
7	3	1913.3	C

ตารางที่ ค-1.2.3 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียกับความชุ่ม

Factor	Levels	Values
pH	6	5, 6, 7, 8, 9, 10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
pH	5	77378.8	15475.8	49390.70	0.000
Error	12	3.8	0.3		
Total	17	77382.5			

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Dose	N	Mean	Grouping
5	3	237.667	A
10	3	177.0	B
9	3	122.767	C
6	3	122.200	C
8	3	53.20	D
7	3	52.433	D

## ค-2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีไอต์ด้วยวิธีโอโซนชั้น

### ค-2.1 ผลของระยะเวลาในการเติมโอโซน

#### ตารางที่ ค-2.1.1 ผลของระยะเวลาเติมโอโซนกับค่าความเข้มสี

Factor Information

Factor	Levels	Values
Time	11	0, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Time	10	50830580	5083058	1478.84	0.000
Error	22	75618	3437		
Total	32	50906198			

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Dose	N	Mean	Grouping
0	3	3425.03	A
10	3	3329.8	A B
5	3	3321.5	B C
15	3	3226.8	C
30	3	2629.6	D
45	3	2369.7	E
60	3	2282.2	E
90	3	1317.3	F
120	3	417.3	G
180	3	217.0	H
150	2	216.3	H

ตารางที่ ค-2.1.2 ผลของระยะเวลาเติมโอโซนกับค่า COD

Factor Information

Factor	Levels	Values
Time	11	0, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Time	10	4772512	477251	150.12	0.000
Error	15	47686	3179		
Total	25	4820198			

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Dose	N	Mean	Grouping
0	3	1637.3	A
15	2	1264.0	B
5	2	1257.3	B
10	2	1124.0	C
30	2	1050.7	C
45	2	577.34	D
60	2	497.3	D E
150	3	487.55	D E
120	3	477.3	D E
180	2	454.67	E
90	2	437.3	E

## ค-2.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

### ตารางที่ ค-2.2.1 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียกับค่าความเข้มข้น

Factor	Levels	Values
pH	5	3, 5, 7, 9, 11

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
pH	4	2142927	535732	31.37	0.000
Error	10	170751	17075		
Total	14	2313678			

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

Dose	N	Mean	Grouping
11	3	1200.5	A
3	3	962.0	B
5	3	454.7	C
9	3	318.6	C
7	3	241.4	C

ตารางที่ ค-2.2.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียกับค่า COD

Factor	Levels	Values
pH	5	3, 5, 7, 9, 11

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
pH	4	584807	146202	4.98	0.000
Error	10	293347	29335		
Total	14	878154			

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Dose	N	Mean	Grouping
11	3	1015.0	A
9	3	1009.4	A
3	3	708.3	A B
7	3	667.6	B
5	3	516.7	B

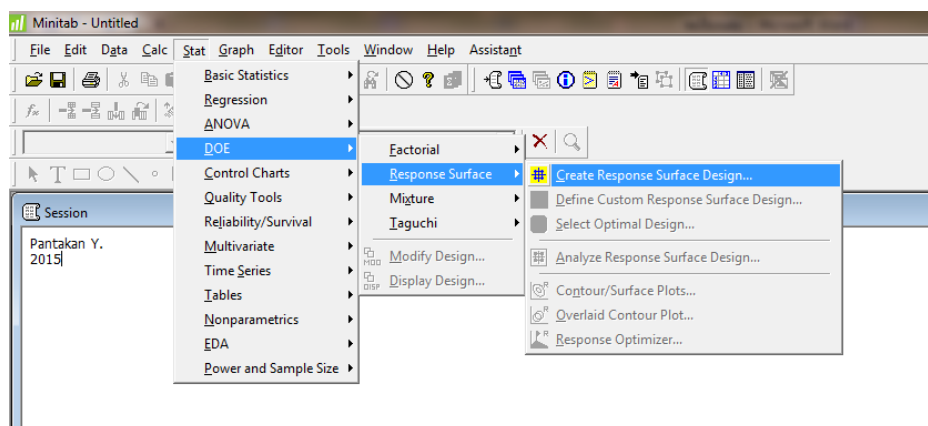
## ภาคผนวก ง

### วิธีการใช้โปรแกรม Minitab 17 ในการวิเคราะห์

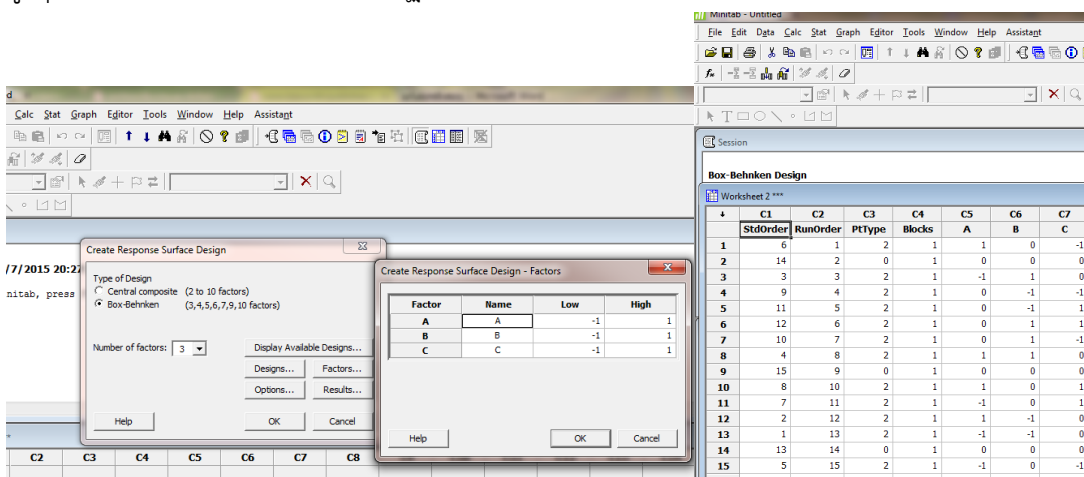
โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบการทดลองของงานวิจัยนี้คือ Minitab 16 Statistical Software มีขั้นตอนการตั้งค่าดังนี้

#### 1. การออกแบบการทดลอง

##### 1.1 เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Create Response Surface Design...



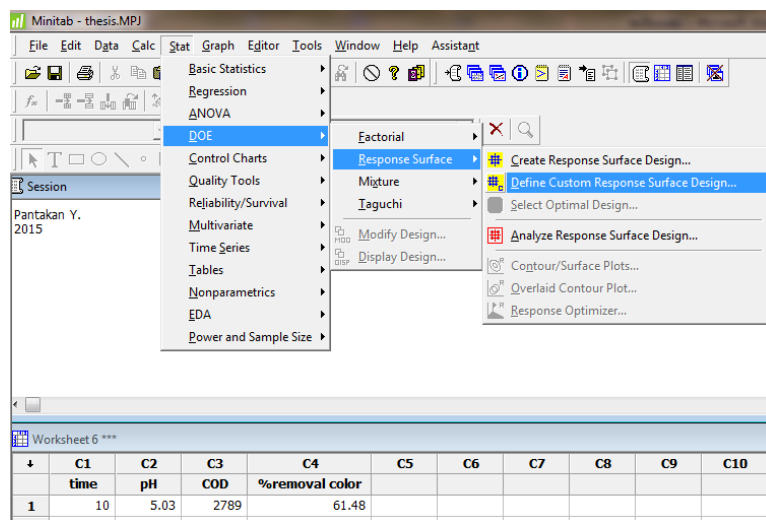
##### 1.2 เลือก Central Composite Design > Design... > OK > Factor... ใส่ข้อมูลระดับต่ำสุดและสูงสุดที่จะศึกษา > OK แล้วจะปรากฏเป็นตารางการทดลองใน work sheet



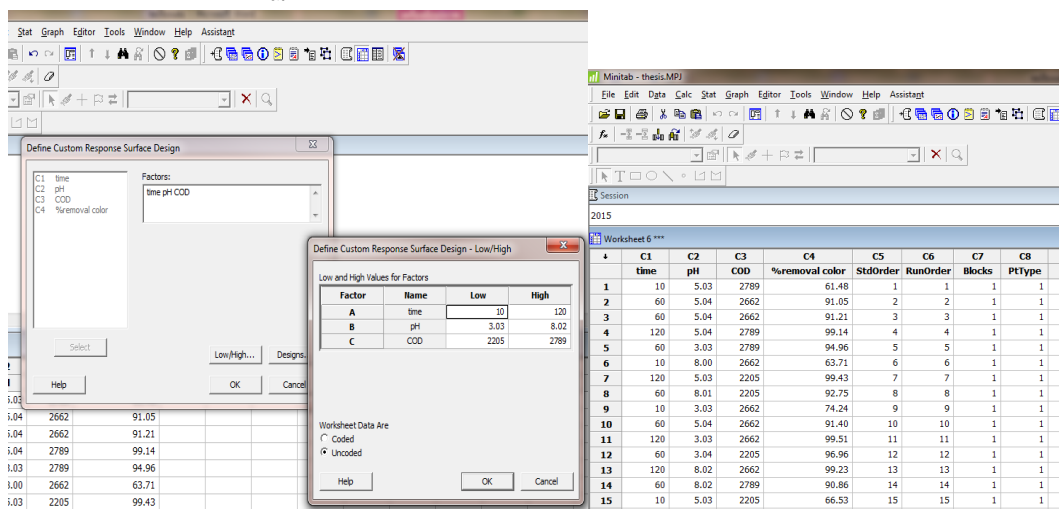
หมายเหตุ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลจากการทดลองที่ละปัจจัยเพื่อกำหนดขอบเขตต่ำสุด สูงสุด จึงใช้การเข้ารหัส (Code, -1, 0, 1) แต่ในกรณีที่ทราบช่วงข้อมูลของปัจจัยที่มีผลต่อ Yield อยู่แล้ว ก็สามารถใช้ ค่าต่ำสุด สูงสุดของข้อมูลที่จะศึกษานั้นๆ เพื่อออกแบบการทดลองได้เลยซึ่งโปรแกรมจะกำหนดค่ากลาง (0) ให้อัตโนมัติ

2. การหาสภาวะที่เหมาะสม หลังจากที่ได้ทำการทดลองและทราบค่าผลตอบ (Y) แล้ว

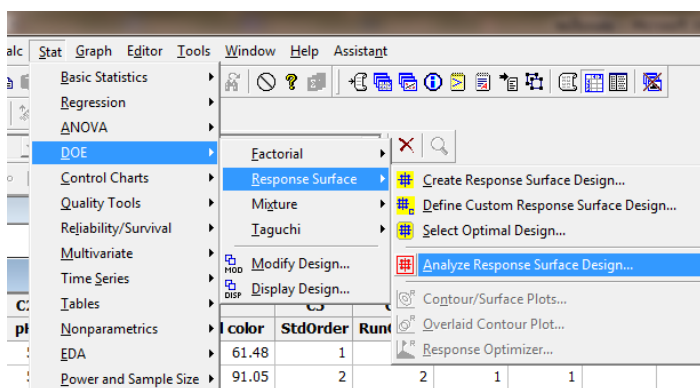
2.1 เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Define Custom Response Surface Design..



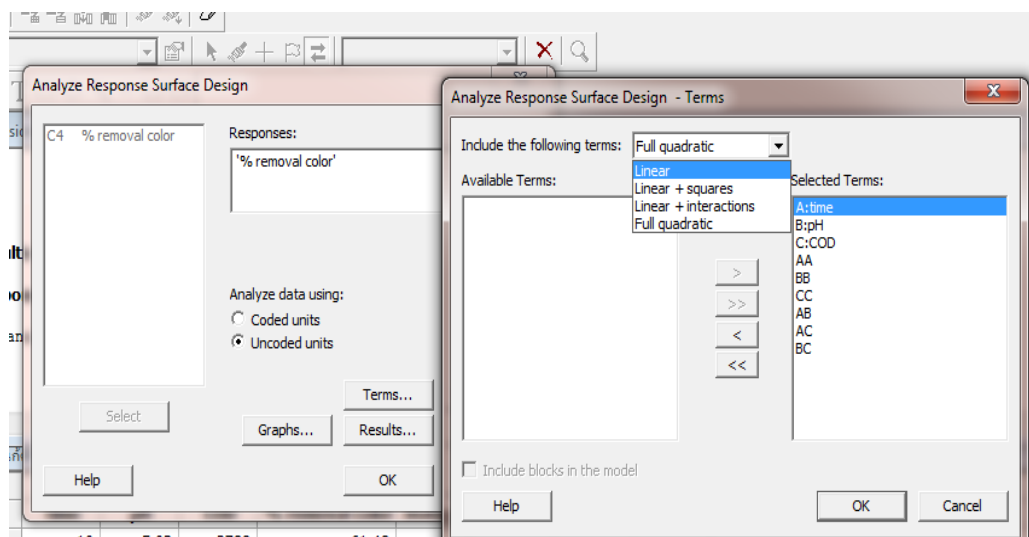
2.2 เลือก Factors > Low/High > เลือก Uncode เนื่องจากเป็นค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง > OK แล้วจะปรากฏเป็นตาราง work sheet



2.3 เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface Design ...



2.4 เลือก Response > เลือก Uncode > Terms เพื่อเลือกแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ > OK



2.5 เลือก Results > Coefficients and ANOVA table > OK > OK แล้วจะปรากฏเป็นตารางผลการวิเคราะห์ที่ในหน้าต่าง Session

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for % removal color

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	33.6377	129.885	0.259	0.806
time	0.6459	0.174	3.707	0.014
pH	-7.1415	4.218	-1.693	0.151
COD	0.0448	0.104	0.429	0.686
time*time	-0.0037	0.000	-9.751	0.000
pH*pH	0.5114	0.193	2.654	0.045
COD*COD	-0.0000	0.000	-0.467	0.660
time*pH	0.0162	0.008	2.051	0.096
time*COD	0.0000	0.000	0.304	0.773
pH*COD	-0.0002	0.001	-0.134	0.898

2.6 เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Response Optimizer > ตั้งค่า Target Lower และ Upper ให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ > OK > OK แล้วจะปรากฏสถานะที่เหมาะสม โดย

- ค่าเป้าหมาย (Target) คือ ค่าของตัวแปรตาม/ผลตอบที่สนใจศึกษา (Y) ที่ต้องการ
- ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) คือ ค่าของตัวแปรตาม/ผลตอบที่สนใจศึกษา (Y) ที่มีค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิบัติการ
- ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) คือ ค่าของตัวแปรตาม/ผลตอบที่สนใจศึกษา (Y) ที่มีค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิบัติการ

The screenshot illustrates the Minitab Response Optimizer interface. The main menu path is Stat > DOE > Response Surface > Response Optimizer. The 'Response Optimizer' dialog box shows the selection of response variables, with 'C4 %removal color' selected. The 'Response Optimizer - Setup' dialog box shows the configuration of goals and weights for the response variable. The 'Optimization Plot' window displays the optimal solution and desirability curves for the response variable.

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
C4 %removal color	Target				1	1

Optimal	High	Low
D	1.0000	Cur
time	120.0	[65.0]
	10.0	
pH	8.0200	[3.5972]
	3.030	
COD	2789.360	[2205.4667]
		2205.4667

Composite Desirability
1.0000

%removal
Targ: 97.0
y = 97.0
d = 1.0000

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวสปันนา นวลสอาด
วัน เดือน ปีเกิด	20 เมษายน 2537
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม เกรดเฉลี่ย 2.83 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	1. ได้รับการตอบรับการตีพิมพ์ผลงานทางวิชาการ วารสารวิทยาศาสตร์ ลาดกระบัง ปีที่ 26 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม 2560 เรื่อง ผลของสารรบกวนจำพวกเหล็กเฟอร์รัสและเทคนิคการวัดต่อค่า ความต้องการออกซิเจนทางเคมีของตัวอย่างน้ำที่ผ่านการย่อยด้วยวิธีรี ฟลักซ์แบบปิด 2. ได้รับการตอบรับการตีพิมพ์ผลงานทางวิชาการ วารสารวิทยาศาสตร์ ลาดกระบัง ปีที่ 27 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน มกราคม-มิถุนายน 2561 เรื่อง การกำจัดสี ความขุ่นและซีโอทีในน้ำเสียจากการพิมพ์ระบบเฟล็ก โซกราฟีที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน