

การเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและวิธีการตกตะกอนทางเคมี



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR) เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Comparison of textile wastewater treatment by electro-oxidation and chemical  
coagulation

Mr. Sirachon Arthasarnprasit



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University



ศิรินัน อรรถสารประสิทธิ์ : การเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและวิธีการตกตะกอนทางเคมี (Comparison of textile wastewater treatment by electro-oxidation and chemical coagulation) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์, 188 หน้า.

สรีแอกทีฟเป็นสีที่มีการนำมาใช้กันทั่วไปสำหรับการย้อมผ้าฝ้ายมีสมบัติคือมีสีของน้ำทิ้งที่เข้มข้นสูงและละลายในน้ำได้ดีถูกกำจัดโดยวิธีการบำบัดชีวภาพแบบดั้งเดิมรวมถึงวิธีตกตะกอนทางเคมีได้ยาก สีดิสเพิร์สมีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำและถูกกำจัดโดยวิธีตกตะกอนทางเคมีได้ง่าย ในงานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ 196 และสีย้อมดิสเพิร์ส 153 โดยใช้กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าปฏิกรณแบบไหลตามกันโดยใช้ขั้ว Pt/Ti เป็นทั้งขั้วแอโนดและแคโทดและกระบวนการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้สารส้ม และได้ประยุกต์ใช้วิธีการพื้นที่ผิวตอบสนองเพื่อวิเคราะห์ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้น กระแสไฟฟ้า อัตราการไหลและค่าพีเอชเริ่มต้นแบบแยกส่วนและผลรวมต่อกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า และศึกษาผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้น ความเข้มข้นสารส้มและค่าพีเอชเริ่มต้นแบบแยกส่วนและผลรวมต่อกระบวนการตกตะกอนทางเคมี มีการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองในการทำนายประสิทธิภาพในการบำบัดสี ผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองที่จะใช้แทนผลการทดลองที่สภาวะแตกต่างกัน การบำบัดสรีแอกทีฟ 196 สีดิสเพิร์ส 153 และสีย้อมของสรีแอกทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153 สามารถบำบัดสีได้ 83.3% 64.2% และ 71.6% ตามลำดับและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ 0.85 บาท/ลบ.ม. 57.42 บาท/ลบ.ม. และ 3.92 บาท/ลบ.ม. ตามลำดับ การตกตะกอนทางเคมีสามารถบำบัดสีได้ 57.5% 97.0% และ 57.0% ตามลำดับและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ 5.35 บาท/ลบ.ม. 1.22 บาท/ลบ.ม. และ 3.66 บาท/ลบ.ม. ตามลำดับ พื้นที่ผิวตอบสนองแสดงถึงผลของอัตราการไหลส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีของกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าอย่างมากในทุกช่วงการทดลอง ในขณะที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสารส้มส่งผลต่อการบำบัดสรีแอกทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มอย่างมากตามลำดับ ค่าพีเอชที่เหมาะสมของกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วงกรดพีเอช 5 ถึง 7 ในขณะที่การบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วงที่เป็นกลางถึงเบสเล็กน้อย 7 ถึง 8.75

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

# # 5570396921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ELECTRO-OXIDATION / COLOR REMOVAL EFFICIENCY / OPERATING COST / SYNTHETIC TEXTILE WASTEWATER

SIRACHON ARTHASARNPRASIT: Comparison of textile wastewater treatment by electro-oxidation and chemical coagulation. ADVISOR: ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 188 pp.

Reactive dyes most commonly used for cotton dyeing, has a strong effluent color and are highly soluble in water which is not easily removed by conventional methods and chemical precipitation. On the other hand, Disperse dye has low solubility in water and can be easily decolorize by chemical coagulation. The present work the removal of synthetic wastewater containing reactive red 196 and disperse red 153 aqueous solution was studied by plug flow electro-oxidation reactor using Pt/Ti as anode and cathode and coagulation using aluminium sulfate. A response surface methodology was applied to evaluate the single and combine effect of dye concentration, applied current, flow rate and initial pH for electro-oxidation process and evaluate combine effect of dye concentration, aluminium sulfate concentration and initial pH for coagulation process. The statistical model analysis of variance (ANOVA) was applied to test the adequacy of model constructed. The model response of color removal (%) was examined. The ANOVA results showed that the model was adequate to represents variations of response. The electro-oxidation of reactive 196, disperse 153 and mixture of reactive 196 and disperse 153 achieved removal efficiency of 83.3%, 64.2% and 71.6% respectively and operating cost of 0.85 baht/m<sup>3</sup>, 57.42 baht/m<sup>3</sup>, 3.92 baht/m<sup>3</sup> respectively. The chemical coagulation of reactive 196, disperse 153 and mixture of reactive 196 and disperse 153 achieved removal efficiency of 57.5%, 97.0% and 57.0% respectively and operating cost of 5.35 baht/m<sup>3</sup>, 1.22 baht/m<sup>3</sup>, 3.66 baht/m<sup>3</sup> respectively. The graphical model showed that flow rate strongly affect the color removal of electro-oxidation process at all range. On the other hand initial pH and aluminium sulfate concentration strongly affect the color removal of reactive 196 and disperse 153 respectively. The optimum pH for electro-oxidation process is in acid range pH 5-7 and optimum pH for coagulation is in neutral to slightly basic range pH 7-8.75.

Department: Environmental Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Environmental Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบ  
ขอบพระคุณผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้  
คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัยรวมถึงแก้ไขส่วนบกพร่องในส่วนของ  
ทดลองตลอดการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญที่ช่วยให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัยทุกท่านที่อบรมสั่งสอนและมอบความรู้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์อำนวยความสะดวกในการในการใช้วัสดุและอุปกรณ์สำหรับ  
ทำการทดลอง

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำวิธีการทดลอง รวมถึงให้  
กำลังใจ ให้คำปรึกษาในระหว่างระยะเวลาที่ทำการทดลอง

ขอขอบคุณกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความ  
อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป .....	๗
บทที่ 1.....	1
บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2.....	5
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กรรมวิธีพอกย้อมเส้นใยและสิ่งทอ.....	5
2.1.1 การพอกย้อมสีเส้นใย.....	5
2.1.2 การพอกย้อมสิ่งทอ.....	6
2.2 ประเภทของสีย้อม.....	7
2.2.1 การจำแนกสีย้อมตามวิธีใช้งาน .....	9
2.3 สารเคมีที่ใช้ในการพอกย้อม.....	11
2.3.1 สารเคมีที่ใช้ในการขจัดสิ่งสกปรก.....	11
2.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการพอกขาว.....	12

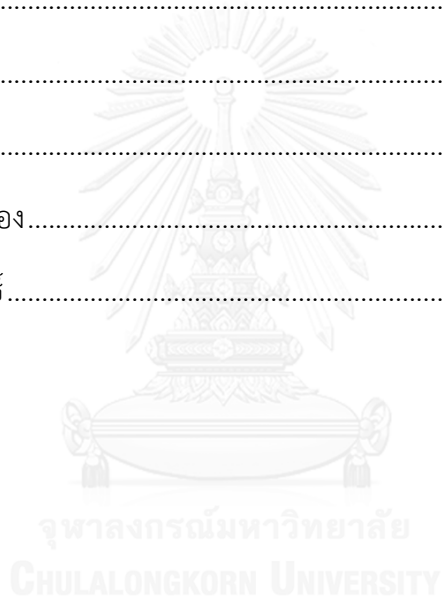
2.4 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม .....	12
2.5 เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ .....	13
2.5.1 วิธีการทางเคมี .....	14
2.5.2 วิธีทางกายภาพ .....	15
2.5.3 วิธีการทางชีวภาพ .....	16
2.5.4 ข้อมูลสัดส่วนระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ.....	19
2.5.4.1 สถิติการใช้สีของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ.....	19
2.5.4.2 ความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม .....	21
2.6 เซลล์ไฟฟ้าเคมี .....	23
2.6.1 ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรด .....	24
2.6.2 การหาความต่างศักย์ของขั้วอิเล็กโทรดเดี่ยว .....	25
2.7 การบวนการออกซิเดชันสารอินทรีย์ด้วยกระแสไฟฟ้า .....	27
2.7.1 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าทางอ้อม .....	28
2.7.2 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าทางตรง .....	28
2.7.3 กลไกการเกิดออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	29
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า .....	31
2.8.1 ค่าศักย์เกิน (Overpotential).....	32
2.8.2 ค่าศักย์เกินของออกซิเจน (Oxygen overpotential) .....	32
2.9 ขั้วอิเล็กโทรด .....	33
2.9.1 วัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนดและขั้วแคโทด .....	34
2.10 การกำจัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนทางเคมี .....	36
2.10.1 คุณสมบัติของคอลลอยด์ .....	36
2.10.2 คอลลอยด์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Colloids).....	36



2.10.3 คอลลอยด์ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Colloids).....	36
2.10.4 Electric Double Layer Theory.....	36
2.10.5 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (Colloid Destabilisation).....	38
2.10.6 การสร้างแกนตะกอน (Coagulation) .....	40
2.10.7 สารโคแอกกูแลนต์ .....	40
2.10.8 โคแอกกูแลนต์เอ็ด .....	43
2.10.9 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างแกนตะกอน .....	45
2.11 แบบจำลองพื้นที่ผิวตอบ (Response Surface Methodology).....	46
2.11.1 Factorial Design.....	47
2.11.2 Central Composite Design (CCD) .....	47
2.11.3 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ .....	48
2.12 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	49
2.12.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดมลสารด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	49
2.12.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดมลสารด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ .	55
บทที่ 3.....	59
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	59
3.1 แผนการทดลอง .....	59
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง .....	61
3.3 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้.....	61
3.4 ระบบออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	62
3.5 ขั้วไฟฟ้า.....	63
3.6 การดำเนินการทดลอง .....	65
3.7 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์น้ำเสียสังเคราะห์ .....	88

บทที่ 4.....	89
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	89
4.1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมชนิด รีแอคทีฟ 196 และสตีติสเพิร์ส 153 ในน้ำเสีย โดยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	90
4.1.1 การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196.....	93
4.1.2 การบำบัดสีย้อมสตีติสเพิร์ส 153 .....	100
4.1.3 การบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสตีติสเพิร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1.....	106
4.1.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีของสีแต่ละชนิด .....	112
4.2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมชนิด รีแอคทีฟ 196 และสตีติสเพิร์ส 153 ในน้ำเสียโดย วิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม.....	116
4.2.1 การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196.....	118
4.2.2 การบำบัดสีย้อมสตีติสเพิร์ส 153 .....	123
4.2.3 การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสตีติสเพิร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1 ในน้ำเสีย .	128
4.2.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีของสีแต่ละชนิดโดยวิธีการตกตะกอน ด้วยสารส้ม.....	133
4.3 การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ .....	135
บทที่ 5.....	141
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	141
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	141
5.1.1 การบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 และสตีติสเพิร์ส 153 ด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า	141
5.1.2 การบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 และสตีติสเพิร์ส 153 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วย สารส้ม .....	141
5.1.3 การเปรียบเทียบการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 และสตีติสเพิร์ส 153 .....	142
5.1.4 ข้อเสนอแนะในการเลือกระบบบำบัดที่เหมาะสมในการบำบัดมลพิษแต่ละประเภท .....	143

5.2 ข้อเสนอแนะ .....	147
รายการอ้างอิง .....	148
ภาคผนวก ก .....	155
ผลการทดลอง.....	155
ภาคผนวก ข .....	165
ผลการวิเคราะห์สีที่ผ่านการบำบัดด้วยเทคนิค GC-MS.....	165
ภาคผนวก ค .....	181
วิธีการคำนวณ .....	181
ภาคผนวก ง.....	185
ภาพประกอบการทดลอง.....	185
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	188



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมกลุ่มฟอกย้อมสิ่งทอ.....	12
ตารางที่ 2.2 ค่าเฉลี่ยน้ำเสียและน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ (พ.ศ. 2556) .....	13
ตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณการนำเข้าสู่ย้อมแต่ละชนิด (กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2556)).....	20
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าทางสถิติของความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานประเภท 22 .....	23
ตารางที่ 2.5 ศักยภาพในการออกซิไดซ์ของตัวออกซิไดซ์ชนิดต่างๆ.....	31
ตารางที่ 2.6 ค่าศักย์เกิน (V) ของการเกิดแก๊สที่ 25 °C.....	33
ตารางที่ 2.7 แสดงชุดการทดลองสำหรับแบบจำลองแบบ Factorial design .....	47
ตารางที่ 2. 8 แสดงชุดการทดลองสำหรับแบบจำลองแบบ Central composite design .....	48
ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติของน้ำเสียสี่สังเคราะห์ชนิดต่างๆ.....	62
ตารางที่ 3.2 แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 1.....	65
ตารางที่ 3.3 แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 2.....	68
ตารางที่ 3.4 แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 3.....	71
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1 ถึง 3.....	74
ตารางที่ 3.6 แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 4.....	75
ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.....	78
ตารางที่ 3.8 แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 5.....	79
ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5.....	82
ตารางที่ 3.10 แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 6 .....	83
ตารางที่ 3. 11 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6 .....	86
ตารางที่ 3. 12 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำเสียสังเคราะห์.....	88
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 .....	93
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่ 1.....	99

ตารางที่ 4. 3 ผลการทดลองบำบัดสีย้อมดิสเพิร์ส 153.....	100
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่ 2.....	105
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองของการทดลองบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีดิสเพิร์ส 153.....	106
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่ 3.....	111
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองของการทดลองบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี.....	118
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่ 3.4.....	122
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 โดยวิธีตกตะกอนด้วยสารส้ม.....	123
ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่ 5.....	127
ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีดิสเพิร์ส 153 โดยวิธีตกตะกอนเคมี	128
ตารางที่ 4. 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่ 3.6.....	132
ตารางที่ 4.13 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ด้วยการออกซิเดชันด้วย กระแสไฟฟ้า.....	136
ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 ด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	136
ตารางที่ 4.15 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ผสมกับ สีดิสเพิร์ส 153 วิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	137
ตารางที่ 4.16 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี ด้วยสารส้ม.....	138
ตารางที่ 4.17 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี ด้วยสารส้ม.....	139
ตารางที่ 4.18 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีดิสเพิร์ส 153 วิธี ตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม.....	140
ตารางที่ 5.1 สภาวะการทดลองของการทดลองออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	145
ตารางที่ 5.2 สภาวะการทดลองของการทดลองตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม.....	145
ตารางที่ 5.3 งานวิจัยการทดลองการบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและวิธีตกตะกอน ทางเคมีอื่นๆ.....	146

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างวัตถุดิบและของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการฟอกย้อม.....	5
รูปที่ 2.2 สัดส่วนร้อยละของโรงงานที่มีข้อมูลระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่างๆ จากการสำรวจ โรงงาน 98 โรงงาน (พ.ศ.2556).....	19
รูปที่ 2.3 แสดงจำนวนโรงงานที่มีการใช้สีชนิดต่างๆ ในการฟอกย้อมสีของโรงงานประเภทที่ 22.....	20
รูปที่ 2.4 แสดงร้อยละของโรงงานที่ใช้สีย้อมและสีรีแอคทีฟ .....	21
รูปที่ 2.5 ค่าสีของน้ำเสยรวมและน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดฯ โรงงานตัวแทนจำนวน 100 โรงงาน ().....	22
รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบต่างๆ .....	28
รูปที่ 2.7 แสดงแบบจำลองของ Electric Double Layer Theory ของอนุภาคคอลลอยด์ (Bratby (2006)).....	37
รูปที่ 2.8 แสดงผลของแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เทียบกับระยะทาง (Bratby (2006)).....	38
รูปที่ 2.9 แสดงการทำงานของพอลิเมอร์ในกระบวนการพอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Bratby (2006)).....	40
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	61
รูปที่ 3. 2 แสดงสูตรโครงสร้างของสีย้อม C.I. Reactive Red 196 ( $C_{31}H_{20}ClN_7Na_4O_{16}S_5$ ) .....	61
รูปที่ 3. 3 แสดงสูตรโครงสร้างของสีย้อม C.I.Disperse red 153 ( $C_{19}H_{17}Cl_2N_5S$ ).....	62
รูปที่ 3. 4 ระบบออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง.....	63
รูปที่ 3.5 การจัดเรียงอิเล็กโทรดจำนวน 3 แผ่น.....	64
รูปที่ 3.6 การจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรด 3 แผ่นในถังปฏิกรณ์.....	64
รูปที่ 3.7 ผังการทดลองที่ใช้สีชนิด CI Reactive Red 196 เพียงอย่างเดียว.....	66
รูปที่ 3. 8 ผังการทดลองที่ใช้สีชนิด CI Disperse red 153 เพียงอย่างเดียว .....	69

รูปที่ 3.9 ผังการทดลองที่ใช้สีชนิด CI Reactive Red 153 ผสมกับสี CI Reactive Red 196	
อัตราส่วน 1 ต่อ 1 .....	72
รูปที่ 3.10 ผังการทดลองที่ใช้สีชนิด CI Reactive Red 196 เพียงอย่างเดียว .....	76
รูปที่ 3.11 ผังการทดลองที่ใช้สีชนิด CI Disperse red 153 เพียงอย่างเดียว .....	80
รูปที่ 3.12 ผังการทดลองที่ใช้สีชนิด CI Reactive Red 60 ผสมกับสี CI Reactive Red 196	
อัตราส่วน 1 ต่อ 1 .....	84
รูปที่ 4.1 ผลกระทบของแต่ละพจน์ในแบบจำลองประสมส่วนกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี .....	92
รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ที่กระแสไฟฟ้าและอัตราไหลค่าต่างๆ .....	94
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ที่อัตราการไหลและความเข้มข้นค่าต่างๆ .....	95
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ที่กระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นค่าต่างๆ.....	96
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างกัน.....	97
รูปที่ 4.6 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 .....	97
รูปที่ 4.7 การตรวจสอบสมมติฐานแบบจำลองของการทดลองที่ 1 .....	99
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 ที่กระแสไฟฟ้าและอัตราไหลค่าต่างๆ.....	101
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 ที่อัตราการไหลและความเข้มข้นค่าต่างๆ.....	102
รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 ที่กระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นค่าต่างๆ.....	102
รูปที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอคทีฟดิสเพิร์ส 153 ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างกัน .....	103
รูปที่ 4.12 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 .....	104
รูปที่ 4.13 การตรวจสอบสมมติฐานแบบจำลองของการทดลองที่ 2.....	105
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153 อัตราส่วน 1:1 โดย	
มวลที่กระแสไฟฟ้าและอัตราไหลค่าต่างๆ เมื่อ .....	107
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 และ ดิสเพิร์ส 153 1:1 โดยมวลที่อัตรา	
การไหลและความเข้มข้นค่าต่างๆ.....	108
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 และ ดิสเพิร์ส 153 1:1 โดยมวลที่	
กระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นค่าต่างๆ เมื่อ .....	108

รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสียูวี 153 1:1 โดยมวลที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน.....	109
รูปที่ 4.18 สภาพที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสียูวี 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวล .....	110
รูปที่ 4.19 การตรวจสอบสมมติฐานแบบจำลองของการทดลองที่ 3.....	111
รูปที่ 4.20 ผลของชนิดสีที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า..	112
รูปที่ 4.21 ผลกระทบของแต่ละพจน์ในแบบจำลองประสมส่วนกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี..	116
รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสารส้มค่าต่างๆ..	119
รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสีเริ่มต้นค่าต่างๆ .....	120
รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่ความเข้มข้นสารส้มและความเข้มข้นสีเริ่มต้นค่าต่างๆ .....	121
รูปที่ 4.25 สภาพที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196.....	121
รูปที่ 4.26 การตรวจสอบสมมติฐานแบบจำลองของการทดลองที่ 3.4.....	122
รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพในการบำบัดสียูวี 153 ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสารส้มค่าต่างๆ ...	124
รูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพในการบำบัดสียูวี 153 ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสีเริ่มต้นค่าต่างๆ	125
รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพในการบำบัดสียูวี 153 ที่ความเข้มข้นสารส้มและความเข้มข้นสีเริ่มต้นค่าต่างๆ .....	125
รูปที่ 4.30 สภาพที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสียูวี 153.....	126
รูปที่ 4.31 การตรวจสอบสมมติฐานแบบจำลองของการทดลองที่ 5 .....	127
รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 และ ยูวี 153 1:1 ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสารส้มค่าต่างๆ .....	129
รูปที่ 4.33 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 และ ยูวี 153 1:1 ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสีเริ่มต้นค่าต่างๆ .....	130
รูปที่ 4.34 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 และ ยูวี 153 1:1 ที่ความเข้มข้นสารส้มและความเข้มข้นสีเริ่มต้นค่าต่างๆ .....	130



รูปที่ 4.35 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสียูวี-ดีเอสพีเอส 153.....	131
รูปที่ 4.36 การตรวจสอบสมมติฐานแบบจำลองของการทดลองที่ 6.....	132
รูปที่ 4.37 ประสิทธิภาพการบำบัดสีแต่ละชนิดที่สภาวะเหมาะสมที่สุดโดยวิธีตกตะกอนทางเคมี ..	134
รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	135
รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสียูวี-ดีเอสพีเอส 153 ด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	137
รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม.....	138
รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสียูวี-ดีเอสพีเอส 153 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม.....	139
รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสียูวี-ดีเอสพีเอส 153 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม.....	140

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหามลพิษที่เกิดจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมเป็นปัญหาที่สำคัญในปัจจุบัน เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีค่าความเข้มข้นและค่าซีโอดีที่สูง นอกจากนี้สีส่วนใหญ่ไม่สามารถถูกกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพ จึงจำเป็นต้องมีวิธีการที่ใช้สำหรับการกำจัดสีปัจจุบัน ประเทศไทยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีเพื่อกำจัดสีจากน้ำเสีย ซึ่งการใช้สารตกตะกอนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ไม่ละลายน้ำได้ดี ได้แก่ สติสเพิร์ส แต่ปัญหาที่พบจากการตกตะกอนทางเคมีคือไม่สามารถกำจัดสีที่ละลายน้ำได้ดี เช่น สีรีแอคทีฟ นอกจากนี้วิธีการใช้สารตกตะกอนทางเคมียังมีผลให้เกิดตะกอนปริมาณมาก ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งและกำจัดกากตะกอนที่สูง ระบบการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นวิธีการที่น่าสนใจในการประยุกต์กับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมได้ดี เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีค่าความนำไฟฟ้าที่สูง และการที่น้ำเสียมีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูงจากกระบวนการย้อมติดสี ก็ยังทำให้การบำบัดด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าเกิดได้ดีขึ้นเนื่องจากคลอไรด์ไอออนเป็นสารหลักที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าอีกด้วย นอกจากนี้ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นปฏิกิริยาที่กำจัดสีได้อย่างรวดเร็วและไม่ทำให้เกิดตะกอนในการบำบัด ทำให้การบำบัดน้ำเสียด้วยการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าจึงน่าจะเป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ต่ำมาก แต่เนื่องจากเทคโนโลยีการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้ามักมีกลไกการทำงานที่ซับซ้อนและยังไม่เป็นที่เข้าใจกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันและต้องอาศัยผู้ควบคุมระบบที่มีความเชี่ยวชาญ ทำให้การนำระบบออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้ามาใช้ในประเทศไทยจึงยังไม่ประสบผลสำเร็จเท่าที่ควร

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับระบบออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและระบบตกตะกอนด้วยสารเคมีโดยใช้สารส้ม (aluminium sulfate) ของสีย้อมสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ สติสเพิร์สและสีรีแอคทีฟ รวมถึงสีย้อมสังเคราะห์ผสมของสีทั้ง 2 ชนิดใน

อัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยมวล โดยจะทำการศึกษาหาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสม ปริมาณ กระแสที่เหมาะสม อัตราการไหลที่เหมาะสม รวมถึงค่าพีเอชที่เหมาะสมของระบบออกซิเดชัน ด้วยกระแสไฟฟ้า และจะหาความเข้มข้นของสีย้อม ค่าพีเอช และปริมาณสารส้มที่เหมาะสมสำหรับ ระบบตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม โดยจะทำการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมจากการใช้แบบจำลอง ทางสถิติแบบพื้นที่ผิวตอบ (Response surface methodology) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ในการกำจัดสีรวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เพื่อที่จะสามารถเป็นแนวทางและสามารถนำไป ประยุกต์ใช้กับระบบกำจัดสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อมจริงได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียสีสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ สีดีสเพิร์ส และสีรีแอคทีฟด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและวิธีตกตะกอนทางเคมี

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของกระแสไฟฟ้า อัตราการไหลน้ำเสีย ความเข้มข้นสีเริ่มต้นและค่า พีเอชที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองทางสถิติ พื้นที่ผิวตอบเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมอย่างแท้จริง

1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีของวิธี ออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าที่มีการไหลแบบต่อเนื่องเปรียบเทียบกับวิธีตกตะกอนทางเคมีของสี ย้อมแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นสีต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตของงานวิจัย ดังนี้

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สีย้อม CI Reactive Red 196 สีสังเคราะห์จากสีย้อม CI Disperse red 153 และสีสังเคราะห์จากสีย้อม CI Reactive Red 196 กับ CI Disperse red 153 ผสมกันในอัตราส่วนโดยมวลเป็นเท่ากับ 1 ต่อ 1

1.3.2 บำบัดสีน้ำเสียโดยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง ขนาดถังปฏิกรณ์ 2 ลิตร

1.3.3 ระบบออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแพลตินัมไทเทเนียมเป็น ทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

1.3.4 การจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรดของวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นแบบไบโพลาร์ หลายเซลล์แบบขนานโดยมีระยะห่างระหว่างขั้ว 5 มิลลิเมตร

1.3.5 ระบบรวมตกตะกอนด้วยสารเคมีทำการทดลองโดยใช้ชุดการทดลอง Jar-test แบบที่ละเทปปริมาตร 1 ลิตร

1.3.6 สารเคมีที่ใช้สำหรับการตกตะกอนด้วยสารเคมีคือ สารส้ม (Aluminium sulfate)

1.3.7 ศึกษาตัวแปรต่างๆ ตามที่กำหนดดังนี้

2.2.7.1 การทดลองออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

-ความเข้มข้นของสีสังเคราะห์ 5 ค่า ได้แก่ 20 22 25 28 และ 30 มิลลิกรัมต่อ ลิตร

-ปริมาณกระแสไฟฟ้า 5 ค่า ได้แก่ 0.5 0.7 1.0 1.3 และ 1.5 แอมแปร์ สำหรับ สีรีแอกทีฟ 196 กระแสไฟฟ้า 2.0 2.4 3.0 3.6 4.0 แอมแปร์ สำหรับสีดีสเพิร์ส 153 และกระแสไฟฟ้า 1.0 1.1 1.25 1.4 1.5 แอมแปร์ สำหรับสีผสมของสีรี แอกทีฟ 196 และสีดีสเพิร์ส 153

-อัตราการไหล 5 ค่า ได้แก่ 10 12 15 18 20 ลิตรต่อชั่วโมงสำหรับสีรีแอกทีฟ 196 อัตราการไหล 1.4 1.8 2.4 3.0 3.4 ลิตรต่อชั่วโมง สำหรับสีดีสเพิร์ส 153 และ อัตราการไหล 6.5 7.5 9.0 10.5 11.5 ลิตรต่อชั่วโมง สำหรับสีผสมของสีรี แอกทีฟ 196 และสีดีสเพิร์ส 153

-ปรับค่าพีเอชที่สภาวะเหมาะสมที่สุด 4 ค่า ได้แก่ 5 7 9 11

### 2.2.7.2 การทดลองตกตะกอนทางเคมีโดยใช้สารส้ม (Aluminium sulfate)

-ความเข้มข้นของสีสังเคราะห์ 5 ค่า ได้แก่ 20 22 25 28 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

-ค่าพีเอชเริ่มต้น 5 ค่า ได้แก่ 3 4.2 6 7.8 และ 9 แอมแปร์ สำหรับสีรีแอคทีฟ 196 ค่าพีเอช 4 5.2 7 8.8 10.0 สำหรับสีดิสเพิร์ส 153 และสีผสมของสีรีแอคทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153

-ความเข้มข้นของสารส้ม (Aluminium sulfate) 5 ค่า ตั้งแต่ 100 ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับสี CI Reactive Red 196 ตั้งแต่ 25 ถึง 75 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับสี CI Disperse red 153 และตั้งแต่ 50 ถึง 150 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับสี CI Reactive Red 196 ผสมกับสี CI Disperse red 153 ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1

1.3.8 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของสี (เอดีเอ็มไอ) สภาพการนำไฟฟ้า ค่าซีไอดี ปริมาณสารแขวนลอย ค่าความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้า

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสถานะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสีแต่ละชนิดด้วยวิธีการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและวิธีตกตะกอนทางเคมี

1.4.2 ทราบแนวทางสำหรับเลือกชนิดระบบบำบัดที่สามารถบำบัดชนิดของน้ำเสียให้ได้ประสิทธิภาพสูงและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ

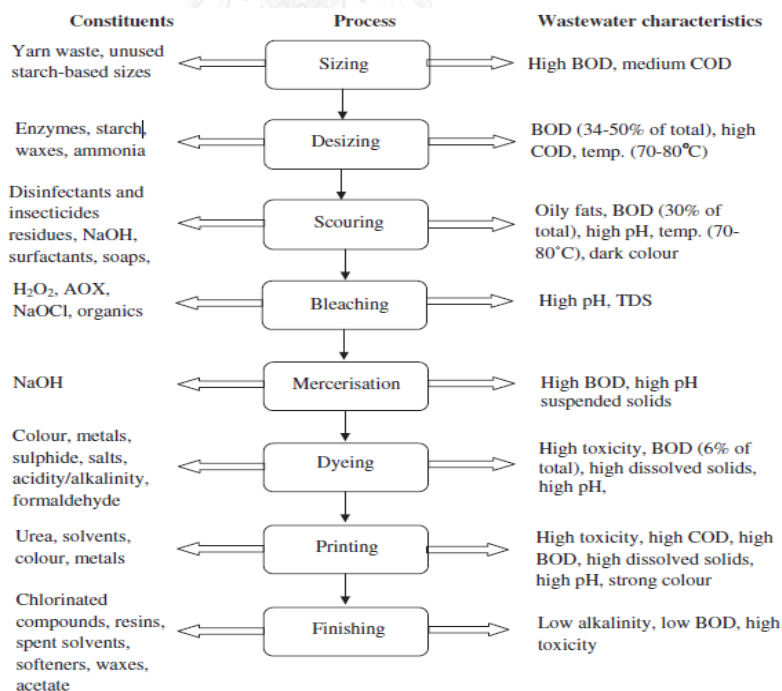
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กรรมวิธีฟอกย้อมเส้นใยและสิ่งทอ

##### 2.1.1 การฟอกย้อมสีเส้นใย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

วัตถุดิบ คือ เส้นใยหรือเส้นด้ายที่มีลักษณะเป็นม้วนด้ายหรือเช็ดด้าย การย้อมเส้นใยหรือเส้นด้ายต้องทำให้สีซึมเข้าไปติดเส้นด้ายอย่างสม่ำเสมอ โดยทุกขั้นตอนจะทำในเครื่องย้อมเส้นใย หรือเส้นด้าย ขั้นตอนในเครื่องย้อมเริ่มตั้งแต่ การขจัดสิ่งสกปรก การฟอกขาว การล้าง ด้วยสารซักล้าง ก่อนการย้อม จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการย้อม และทำการล้างด้ายด้วยน้ำสบู่ แล้วจึงนำไปทำการตกแต่ง เข้าเครื่องอบแห้ง และกรอตัวกลับเข้าหลอดพลาสติกเหมือนเดิม เพื่อ เตรียมบรรจุส่งให้ลูกค้า น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการฟอกย้อมเส้นใยหรือเส้นด้าย ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างวัตถุดิบและของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการฟอกย้อม (Verma และคณะ, 2012)

### 2.1.2 การฟอกย้อมสิ่งทอ (วรรณวรรณ เที้ยวรรณกานต์, 2546)

การเตรียมผ้าก่อนการย้อมสี เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเพราะจะทำการเตรียมผ้าหรือ ด้ายให้เหมาะสมกับการย้อมสีและตกแต่งสำเร็จได้ดี โดยมีขั้นตอนคือ การนำผ้าเข้าเครื่องคลี่ผ้า การ เผาขน ก่อนที่จะนำไปเข้าเครื่องทำความสะอาด เพื่อทำการลอกแป้งและการกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมา กับผ้า แล้วจึงนำไปผ่านการฟอกขาวและการชุบมัน โดยมีขั้นตอนที่สำคัญดังต่อไปนี้

การเผาขน (Singeing) ผ้าโดยทั่วไปมักจะมีปลายเส้นใยโพลีบ่อนผิวผ้าทำให้การย้อมติดสี เกิดความไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงต้องทำการเผาขนเพื่อให้ผ้านั้นมีผิวที่เรียบสม่ำเสมอเหมาะกับการย้อมสี โดยที่การเผาขนจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงเกินไปเนื่องจากอาจทำให้เส้นใยเสื่อมคุณภาพลง ได้

การลอกแป้ง (Desizing) การทอผ้าจำเป็นต้องมีการลงแป้งหรือสารไซซิง (Sizing reagent) ลงไปเพื่อให้ด้ายยืนมีความแข็งแรงเหมาะแก่การย้อมผ้า การลอกแป้งเป็นกระบวนการที่จะ กำจัดแป้งหรือสารไซซิงเหล่านั้นออกเพื่อที่จะทำให้ขั้นตอนการทำความสะอาดเส้นใยมีประสิทธิภาพดี นอกจากนี้การลอกแป้งยังช่วยทำให้ผ้าเปียกน้ำได้ดีและสม่ำเสมอ การลอกแป้งสามารถทำได้โดยใช้ สารลอกแป้งประเภทเอนไซม์หรือใช้สารลอกแป้งประเภทออกซิไดซ์ซิง

การกำจัดสิ่งสกปรก (Scouring) เป็นกระบวนการที่ทำให้เส้นใยผ้ามีความสะอาด โดย กำจัดสิ่งเจือปนออกเพื่อจะทำให้สีย้อมติดได้ดีและสีย้อมสามารถจะซึมผ่านเส้นใยได้มากขึ้น การกำจัด สิ่งสกปรกมีทั้งวิธีที่ง่ายอย่างการต้มด้วยสบู่และเตมิโซดาไฟ และวิธีการที่ยุ่งยากอย่างการเติมสารเคมี และทำการอัดไอน้ำอย่างต่อเนื่อง

การฟอกขาว (Bleaching) เป็นกระบวนการที่กำจัดสีตามธรรมชาติของเส้นใย หรือ กำจัดสีเจือปนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการปั่นและทอเส้นใย โดยการฟอกขาวจำเป็นสำหรับการย้อมผ้า ที่มีสีอ่อนหรือออกขาว แต่ไม่จำเป็นสำหรับการย้อมสีเข้ม นอกจากนี้เส้นใยสังเคราะห์ที่ไม่มีสีเจือปน อยู่แล้วก็ไม่จำเป็นต้องทำการฟอกขาว สารฟอกขาวที่นิยมใช้ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) การฟอกขาวจะทำให้ผ้ามีสีขาวถาวรไม่เปลี่ยนเป็นสีเหลือง และ ผ้าที่ผ่านการฟอกขาวจะย้อมติดสีย้อมได้สม่ำเสมอยิ่งขึ้น

การชุบมัน (Mercerization) เป็นกระบวนการเพิ่มความมันเงาของผ้าโดยนำผ้าที่ผ่าน การกำจัดสิ่งสกปรกและฟอกขาวมาแล้วมาผ่านสารโซดาไฟเข้มข้น จนสารโซดาไฟซึมเข้าไปในเนื้อผ้า ขณะที่มีการซิงเนื้อผ้าให้ตึง จากนั้นทำการใช้ลูกกลิ้งบีบน้ำให้ซึมออก เมื่อผ่านกระบวนการชุบมันจะ ทำให้เส้นใยที่บิดเป็นเกลียวมีการคลายตัวกลายเป็นเส้นเรียบ รวมถึงมีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้นรวมถึง ทำให้การย้อมติดสีทำได้ดีขึ้น

การย้อมสี (Dying) การย้อมสีผ้าแบ่งเป็นกระบวนการย้อมผ้าแบบทีละเท (Batch process) และแบบต่อเนื่อง (Continuous process) โดยการย้อมแบบทีละเทจะให้น้ำเสียจากการย้อมสีนั้นมีความเข้มข้นของสารสูง แต่แบบต่อเนื่องจะมีความเข้มข้นของสารต่ำ หลังจากผ่านขั้นตอนการเตรียมผ้ามาแล้ว จะนำผ้าเข้าเครื่องย้อม ได้แก่ เครื่องย้อมเจ็ท เครื่องย้อมจิก และเครื่องย้อมวินซ์

## 2.2 ประเภทของสีย้อม (จิราอนุช ทวนทอง, 2553)

การจัดการน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับประเภทของสีย้อม สารเคมีที่ใช้ในการย้อม และคุณลักษณะของน้ำเสีย เนื่องจากเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาเลือกวิธีการบำบัดน้ำเสียให้สอดคล้องกับน้ำเสียที่เกิดขึ้น มีรายละเอียดดังนี้

การย้อมสีมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติและคุณค่าของเส้นใยให้สูงขึ้น ทำให้มีความสวยงามน่าใช้ วัตถุประสงค์ที่ใช้ประกอบในการย้อมสีมี 3 ส่วนหลักคือ

- 1) สีย้อม
- 2) สารช่วยย้อม
- 3) วัสดุสิ่งทอหรือเส้นใย

การที่สีติดเส้นใยเกิดจากการรวมตัวกันของสารประกอบ 2 ชนิดและเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ โดยไม่ทำให้คุณสมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป เพียงแต่เปลี่ยนสมบัติทางกายภาพให้เห็นเป็นสีต่างๆ เท่านั้น โดยที่สารประกอบที่เกิดขึ้นนั้นอาจสลายตัวออกได้ด้วยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งโดยการที่สีย้อมเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีกลายเป็นสารประกอบอื่น การย้อมสีที่ถูกต้องสีย้อมจะย้อมสีให้ติดเข้าไปในภายในเส้นใย ไม่ใช่เพียงติดเฉพาะบริเวณรอบนอกเท่านั้น การย้อมสีโดยทั่วไปมักจะใช้น้ำเป็นสื่อ และใยผ้านั้นจะพองตัวออกตามปริมาณกลุ่ม  $-OH$  ที่มีอยู่ และทำให้สีซึมเข้าไปได้ง่าย เส้นใยแต่ละชนิดมีจำนวนและขนาดของเส้นใยไม่เท่ากัน นอกจากนี้สีแต่ละชนิดยังมีขนาดโมเลกุลที่ต่างกัน จึงเป็นสาเหตุให้สีบางชนิดติดเส้นใยได้ดีและสีบางชนิดติดเส้นใยได้ไม่ดี นอกจากนี้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสีและเส้นใยต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างน้ำและสีจึงจะย้อมได้ผลดี คุณสมบัติที่เกิดขึ้นได้จากสีมีหมู่ฟังก์ชันที่เกิดพันธะเคมีแล้วดูติดกับเส้นใยได้แน่น พันธะทางเคมีที่สีดูติดกับเส้นใยอยู่

4 ประเภทได้แก่



- พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)
- แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van de Waals Forces)
- แรงแอออนนิก (Ionic Forces)
- พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond)

โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลสี ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

- พันธะคู่สลับ (Conjugated double bonds)
- หมู่ปฏิกิริยาที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophore)
- หมู่ปฏิกิริยาที่เรียกว่า ออโซโครม (Auxochromes)

โครโมฟอร์ คือ หมู่ปฏิกิริยาที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ เป็นหมู่ที่ไม่อ้อมด้วยวง  $-NR_3^+$  หน้าทีของโครโมฟอร์ คือ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างของโครโมฟอร์ ได้แก่

- N=N- หมู่อะโซ (Azo group)
- NO<sub>2</sub> หมู่ไนโตร (nitro group)
- C=O หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group)
- NR<sub>3</sub><sup>+</sup> อนุพันธ์แอมโมเนียม (Alkyl ammonium derivatives)

ออโซโครม คือ หมู่ปฏิกิริยาที่อ้อมตัวที่มีอิเล็กตรอนซึ่งยังไม่เกิดพันธะเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับ ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างของออโซโครม ได้แก่

- NH<sub>2</sub> หมู่อะมิโน (Amino group)
- NHR หมู่โมโนแอลคิลอะมิโน (mono alkyl amino group)
- NR<sub>2</sub> หมู่ไดออลคิลอะมิโน (Dialkyl amino group)
- OH หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group)

-OR หมู่อีเทอร์ (Ether group)

ทั้งโครโมฟอร์และอโซโครมต่างเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับ ทั้ง 3 ส่วนนี้เรียกรวมกันว่า chromogen นอกจากนี้ อโซโครมยังให้คุณสมบัติการละลายน้ำ รวมทั้งการรวมตัวเกิดพันธะกับเส้นใยอีกด้วย การรวมกันของพันธะคู่สลับกับโครโมฟอร์ทำให้เกิดสีขึ้น แต่ความเข้มและความสว่างของสีขึ้นอยู่กับอโซโครม อิทธิพลเหล่านี้ไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง จะต้องมีย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไปจึงจะทำให้สีกับเส้นใยรวมตัวกันได้ การยึดเกาะกันระหว่างสีกับเส้นใยนอกจากจะเกิดจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของเส้นใยแล้วยังต้องอาศัยสารเคมีบางชนิดเข้าช่วยเพื่อให้โมเลกุลของสียอมและโมเลกุลของเส้นใยเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันได้ดีขึ้นและรวมเร็วขึ้น สารเคมีดังกล่าวคือสารช่วยย้อม

### 2.2.1 การจำแนกสีย้อมตามวิธีใช้งาน

สีย้อมในโรงงานทอผ้ามีอยู่หลายชนิดขึ้นกับเส้นใยหรือผ้าที่จะย้อมติดสี สีย้อมจำแนกออกเป็นสีที่ละลายน้ำและสีที่ไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ยังมีการจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมซึ่งยากแก่การนำไปใช้งาน การจำแนกสีย้อมตามวิธีใช้งานเป็นวิธีที่ใช้เพื่อให้ง่ายในการนำไปใช้งานในแต่ละประเภท โดยการแบ่งสีย้อมตามลักษณะการใช้งานแบ่งออกเป็น 9 ประเภทดังนี้

#### 1) สีไ้ตรงรี่ (Direct dye)

สีไ้ตรงรี่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตากง่าย และทนแสง

#### 2) สีรีแอกทีฟ (Reactive dye)

สีรีแอกทีฟเป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุดโมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง  $70-75^\circ\text{C}$  และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

### 3) สีดิสเพิร์ส (Disperse dye)

สีดิสเพิร์สเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตทเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง สีดิสเพิร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควั่นหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดิสเพิร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มโดยพิจารณากลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อม อะโซ (Azo dyes) และสีย้อมแอมมิโนแอนทราควิโนน (Amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanalamine;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

### 4) สีเอซิด (Acid dye)

สีเอซิดเป็นสีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิกใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ใยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

### 5) สีแว้ท (Vat dye)

สีแว้ทเป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว้ท ละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว้ทจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว้ท สีย้อมชนิดนี้มี ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโกอยด์ (Indigoid) และสีแอนทราควิโนอยด์ (Antraquinoid)

### 6) สีเบสิก (Basic or cationic dye)

สีเบสิกเป็นสีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุบละลายน้ำ ได้นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบ จะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทนไม่ควรรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซัก และแสง

### 7) สีซัลเฟอร์ (Sulfur dye)

สีซัลเฟอร์ เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้าฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูกแต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

### 8) สีมอร์แดนต์ หรือโครม (Mordant or chrome dye)

สีมอร์แดนต์ หรือโครม เป็นสีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้ คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนต์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนต์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่ายซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

### 9) สีอะโซอิก (Azoiic dye)

สีอะโซอิกเป็นสีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซักแต่ไม่ทนต่อการขัดถู

## 2.3 สารเคมีที่ใช้ในการฟอกย้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

### 2.3.1 สารเคมีที่ใช้ในการขจัดสิ่งสกปรก

โซดาไฟ (Sodium hydroxide : NaOH) ทำปฏิกิริยากับไขมันโดยเปลี่ยนไขมันเป็นสบู่ที่ละลายน้ำได้ นอกจากนี้ยังทำให้เส้นใยขยายตัว สิ่งสกปรกต่างๆ ถูกขจัดออกง่ายขึ้น ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่ ความร้อน นอกจากนี้ต่างยังช่วยกำจัดสารอื่นๆ เช่น โปรตีน เพกทิน สารลงแป้งที่ตกค้าง เกลือแร่ต่างๆ ให้ละลายหลุดออกมา

น้ำสบู่ (Detergent) ทำหน้าที่กำจัดไขมันในลักษณะที่ทำให้เกิดอิมัลชัน (Emulsion) การกำจัดสิ่งสกปรกอื่นๆ ออกจากวัสดุรวมทั้งป้องกันมิให้ย้อนกลับไปติดบนวัสดุอีก น้ำสบู่แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ พวกไม่มีประจุไฟฟ้า พวกมีประจุลบ พวกมีประจุบวก และพวกมีทั้งประจุบวกและประจุลบ แต่ละกลุ่มจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ได้แก่ ความสามารถในการแทรกซึม ความสามารถในการซักล้าง ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน

สารจับโลหะ (Complexing agent) เป็นพวกลิแกนด์ หรือคีเลต สารนี้สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะ เช่น  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  เป็นสารที่ละลายน้ำได้ในสถานะต่าง ไอออนเหล่านี้จะเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำในสถานะต่างปกติ ตะกอนไฮดรอกไซด์เหล่านี้มีผลเสียต่อการฟอกผ้าด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ไอออนเหล่านี้ นอกจากจะพบในน้ำแล้วยังพบว่ามาจากวัสดุด้วย เช่น ฝ้าย เป็นต้น

### 2.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการฟอกขาว

สารออกซิไดซ์ เป็นสารที่ทำให้สารอื่นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ สารประกอบเปอร์ออกไซด์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) โซเดียมเปอร์ออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) เป็นต้น สารประกอบไฮโปคลอไรท์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ( $\text{NaClO}$ ) และแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ ( $\text{Ca(OCl)}_2$ ) เป็นต้น สารประกอบคลอไรท์ เช่น โซเดียมคลอไรท์ ( $\text{NaClO}_2$ ) เป็นต้น

สารรีดิวซ์ เป็นสารที่ทำให้สารอื่นเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ โซเดียมไฮไตรซัลไฟท์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) โซเดียมเมทาไบซัลไฟท์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_6$ ) โซเดียมฟอร์มาลดีไฮด์ซัลฟอกซิเลต ( $\text{HCHOHSO}_2\text{Na} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

## 2.4 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมกลุ่มฟอกย้อมจะแปรผันไปตามประเภทของสีย้อมซึ่งจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต โดยข้อมูลของน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมได้ทำการเก็บตัวอย่างแบบจ้วงตัก (Grab sampling) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียโดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตาราง

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมกลุ่มฟอกย้อมสิ่งทอ

ชนิดของผลิตภัณฑ์	ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย					จำนวนข้อมูลโรงงาน
	pH	BOD (มก./ล.)	COD (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สี (หน่วย-Pt(Co))	
ฟอกย้อมด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าฝ้าย	9.0	110	370	50	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1200	140	670	41
ฟอกย้อมด้ายและผ้าและอื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

ที่มา : คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม (2542)

จากรายงานการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งเฉพาะประเภทอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุงค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (2556) ได้สำรวจโรงงานอุตสาหกรรมรวม 98 โรงงาน พบว่าน้ำเสียดิบก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียมีค่าสีเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 162 ถึง 902 เอดีเอ็มไอขึ้นกับประเภทอุตสาหกรรมและชนิดสีที่ใช้ โดยมีผลการวิเคราะห์สีน้ำทิ้งของโรงงานโดยแยกประเภทโรงงาน ดังนี้

โรงงานลำดับที่ 22 คือโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับฟอกย้อมสี ด้าย หรือเส้นใย สิ่งทอ และพิมพ์ผ้า มีค่าสีของน้ำเสียก่อนเข้าระบบในกลุ่มโรงงานนี้มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 738 เอดีเอ็มไอ

โรงงานลำดับที่ 98 คือ โรงงานซักฟอกและย้อมผ้ายีนส์ มีค่าสีของน้ำทิ้งมีค่าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับอีกสองกลุ่มโรงงาน โดยมีค่าเฉลี่ยสีของน้ำเสียก่อนเข้าระบบเท่ากับ 162 เอดีเอ็มไอ

ตารางที่ 2.2 ค่าเฉลี่ยน้ำเสียและน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ (พ.ศ. 2556)

โรงงานลำดับที่	น้ำเสียก่อนเข้าระบบ สี (เอดีเอ็มไอ)	น้ำเสียที่ออกจากระบบ		
		พีเอช	สารแขวนลอย	สี (เอดีเอ็มไอ)
22	738	7.31	51.98	190
22 (1)	902	7.96	47.10	99
22 (2)	786	7.02	56.70	194
22 (3)	642	7.10	55.36	150
22 (4)	621	7.16	48.75	317
24	125	7.29	27.67	199
98	162	7.69	59.60	65

ที่มา : รายงานการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งเฉพาะประเภทอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุงค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (2556)

## 2.5 เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ (Robinson และคณะ, 2001)

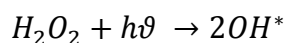
น้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารสีเกิดจากอุตสาหกรรมที่มีการใช้เม็ดสี ซึ่งส่วนมากเกิดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ น้ำเสียที่มีสีเป็นองค์ประกอบถูกจัดอยู่ในจำพวกน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสีของแข็งละลาย และของแข็งแขวนลอยที่สูง และอาจมีโลหะหนักรวมถึงอาจมีความขุ่น นอกจากนี้ยังมีช่วงพีเอชที่กว้างตั้งแต่ 2 ถึง 12 วิธีการที่ใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอมีหลายวิธีได้แก่

### 2.5.1 วิธีการทางเคมี

การออกซิเดชัน เป็นวิธีที่เป็นที่นิยมมากที่สุดเนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากในการใช้ สารออกซิไดซ์หลักคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเกิดได้จากวิธีการต่างๆ ดังนี้

- 1) การออกซิเดชันโดยสารเฟนต์ัน (Fentons reagent) ใช้หลักการดูดซับและเกิดพันธะเคมีระหว่างสารเฟนต์ัน ( $H_2O_2-Fe(II)$ ) กับสีที่ละลายในน้ำเสียสี ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ และเหมาะกับกรณีที่มีน้ำเสียสีไม่สามารถบำบัดได้ทางชีวภาพ แต่มีข้อเสียคือเกิดกากตะกอนในปริมาณสูงที่จะต้องนำไปฝังกลบ ประสิทธิภาพของการใช้สารเฟนต์ันขึ้นกับคุณภาพในการตกตะกอน อาจเกิดปัญหากับสีแคทไอออนจะไม่ตกตะกอนแบบรวมกลุ่มเลย และสีแอซิด สีไดเรกท์ สีแวท สีมอดนัท และสีรีแอคทีฟตกตะกอนแบบรวมกลุ่มได้ไม่ดีทำให้ประสิทธิภาพของวิธีนี้อยู่ในระดับปานกลาง (Raghavacharya , 1997)
- 2) การออกซิเดชันโดยโอโซน (Ozonation) โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีเนื่องจากมีค่าศักย์ในการออกซิเดชันที่สูงเมื่อเทียบกับคลอรีนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้การออกซิไดซ์โดยโอโซนยังสามารถกำจัดสารที่เป็นพิษได้แก่ สารอะโรเมติกไฮโดรคาร์บอน ยาฆ่าแมลง ฟีนอล คลอรีเนทเตดไฮโดรคาร์บอน และสารก่อมะเร็งชนิดต่างๆ ปริมาณของโอโซนที่ใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียสีขึ้นกับค่าซีโอดีและความเข้มข้นสีของน้ำเสียสี มีข้อได้เปรียบตรงที่ไม่เกิดตะกอนและสามารถกำจัดสีและค่าซีโอดีเกือบทั้งหมด นอกจากนี้ยังสามารถจ่ายในกับน้ำเสียสีในสถานะแก๊สซึ่งไม่ทำให้ปริมาตรของน้ำเสียสีเพิ่มขึ้น แต่มีข้อเสียคือค่าเครื่องชีวิตต่ำเพียงไม่ถึง 20 นาที และจะสลายตัวเร็วขึ้นในสภาวะที่เป็นเบสทำให้ต้องควบคุมค่าพีเอชให้พอเหมาะ นอกจากนี้วิธีการออกซิเดชันด้วยโอโซนมีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากค่าเครื่องชีวิตที่ต่ำของโอโซน (Slokar และMajcen Le Marechal , 1998)
- 3) ปฏิกิริยาเคมีแสง (Photochemical) เป็นวิธีสลายโมเลกุลของสีให้เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำโดยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตโดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การสลายตัวเกิดจากไฮดรอกซิลอิสระที่เกิดขึ้น แสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นตัวกระตุ้นสารเคมีได้แก่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยอัตราเร็วในการกำจัดสีขึ้นกับความเข้มข้นของแสง ค่าพีเอช โครงสร้างของสี วิธีการปฏิกิริยาเคมีแสงมีข้อได้เปรียบคือไม่เกิดตะกอนและกำจัดกลิ่นได้ดี แต่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงได้แก่ กรดอินทรีย์ กรดอนินทรีย์ กลุ่มแฮไลด์ แอลดีไฮด์ อินทรีย์ แสงอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไฮโดรเจนเปอร์

ออกไซด์ให้เกิดไฮดรอกซิลอิสระ 2 โมเลกุล ซึ่งจะเป็นตัวทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของสีต่อไป  
ดังนี้ (Slokar และMajcen Le Marechal , 1998)



- 4) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) วิธีการนี้ใช้คลอรีนไอออนในการกำจัดกลุ่มอะมิโน และเร่งให้เกิดการแตกตัวของพันธะเอสเทอร์ วิธีการนี้ไม่เหมาะกับการกำจัดสีดีสเพอร์ส และมีข้อเสียเปรียบเนื่องจากการทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของคลอรีนสูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งจะทำให้เกิดสารอะโรมาติกเอมีนที่เป็นสารก่อมะเร็งตามมาด้วย (Banat และSimandl , 1999)
- 5) วิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นวิธีการที่มีข้อได้เปรียบคือประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง ใช้สารเคมีน้อยหรือไม่ใช้เลย ไม่เกิดตะกอน รวมถึงไม่เกิดสารที่เป็นอันตราย แต่มีข้อเสียเปรียบคือประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มตามอัตราการไหลของน้ำเสียที่ค่อนข้างสูงในบางครั้งอาจทำให้ต้นทุนในการเดินระบบมีค่าใกล้เคียงกับการใช้สารเคมีได้ (dos Santos และคณะ , 2007)

#### 2.5.2 วิธีทางกายภาพ

- 1) วิธีใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการใช้ตัวดูดซับและเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสีแคทไอออน สีมอแดนท์ สีแอซิด ประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นกับชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ใช้และคุณลักษณะของน้ำเสียสี ในการเพิ่มประสิทธิภาพอาจต้องเติมในปริมาณที่สูง ข้อเสียเปรียบของวิธีการนี้คือการใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่สูงมากอาจทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่สามารถจะทำนายได้ นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์มีราคาที่สูง การที่จะฟื้นฟูสภาพจะเกิดการเสียตัวดูดซับประมาณ 10 -15% (Choy และคณะ , 1999)
- 2) การกรองโดยใช้เมมเบรน (Membrane filtration) เป็นวิธีที่จะทำให้มีส่วนที่เป็นน้ำใส ละส่วนที่น้ำเสียสีเข้มข้นโดยแยกสีออกจากน้ำทิ้งได้อย่างต่อเนื่อง มีข้อได้เปรียบคือมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมรวมถึงไม่ทำให้เกิดการพิษที่



ทำลายจุลชีพในระบบบำบัด และมีข้อเสียเปรียบเพราะสายที่ทำให้สีเข้มข้นเกิดปัญหาการฝังกลบ เกิดปัญหาการอุดตันเมมเบรน และเป็นวิธีการที่ต้นทุนสูง นอกจากนี้ยังไม่สามารถลดค่าของแข็งละลายได้ (Raghavacharya , 1997)

- 3) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ใช้หลักการเมื่อน้ำเสียสีผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งจะกำจัดสีแคทไอออนและสีแอนไอออนได้ วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในงานกำจัดน้ำเสียสีเนื่องจากสารที่แลกเปลี่ยนไอออนไม่สามารถกำจัดสีได้หลากหลาย ข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือไม่สูญเสียตัวดูดซับจากการฟื้นฟูสภาพของเรซิน แต่มีข้อเสียเปรียบคือค่าใช้จ่ายเนื่องจากตัวทำละลายอินทรีย์มีราคาสูง และวิธีนี้ยังกำจัดสีดีสเพอร์สได้น้อย (Poots และคณะ , 1976)
- 4) การฉายรังสี (Irradiation) เป็นวิธีการที่ยังต้องพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพราะประสบความสำเร็จเฉพาะระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น เนื่องจากวิธีการนี้อาศัยการมีออกซิเจนละลายอย่างมากเพียงพอเพื่อให้สารอินทรีย์เกิดการแตกตัวจากการฉายรังสี ดังนั้นวิธีการนี้จึงมีค่าดำเนินการที่สูง การบำบัดสีนิยมใช้การผ่านน้ำเสียสีผ่านท่อคู่ที่มีการเติมอากาศ ซึ่งวิธีการนี้ยังกำจัดสีและโมเลกุลของสารประเภทฟีนอลได้ไม่เต็มที่เท่าที่ควร (Mishra และ Tripathy , 1993)
- 5) การรวมตะกอนแบบอิเล็กโทรไคเนติกส์ (Electrokinetics coagulation) เป็นวิธีที่มีการเติมเฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4$ ) และเฟอริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีส่วนใหญ่ ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เพิ่มขึ้นกับความเข้มข้นของประจุไฟฟ้า แต่มีข้อเสียเปรียบคือเฟอร์รัสซัลเฟตและเฟอริกคลอไรด์มีราคาที่สูง และยังคงเกิดกากตะกอนในปริมาณมากทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการฝังกลบ นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการที่กำจัดสีได้เร็วกว่าที่ควร (Gaehr และคณะ , 1994)

### 2.5.3 วิธีการทางชีวภาพ

- 1) การใช้ราฟุสสีขาว (White-rot fungi) ราฟุสสีขาวเป็นจุลชีพที่สามารถย่อยสลายลิกนิน บางชนิดกำจัดสารไดออกซิน โพลีคลอริเนตเตดไคโพลีน (Polychlorinated biphenyls) และคลอโรออร์แกนิก (Chloro-organic) ราฟุสสีขาวสามารถกำจัดสีโดยใช้เอนไซม์ได้แก่ ลิกนินเปอร์ออกซิเดส (Lignin peroxidases) แมงกานีสดีเพนเดนท์เปอร์ออกซิเดส (Manganese

peroxidases) และเอนไซม์อื่นที่สร้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้แก่ กลูโคสออกซิเดส (Glucose-oxidases) แลกเคส (Laccase) วิธีการนี้มีข้อเสียเพราะการเกิดเอนไซม์ไม่สามารถทำนายอย่างถูกต้องได้เนื่องจากการให้รากูขาวสัมผัสกับของเหลวจะทำให้เกิดสถานะที่ไม่คุ้นชิน (Chao และ Lee , 1994)

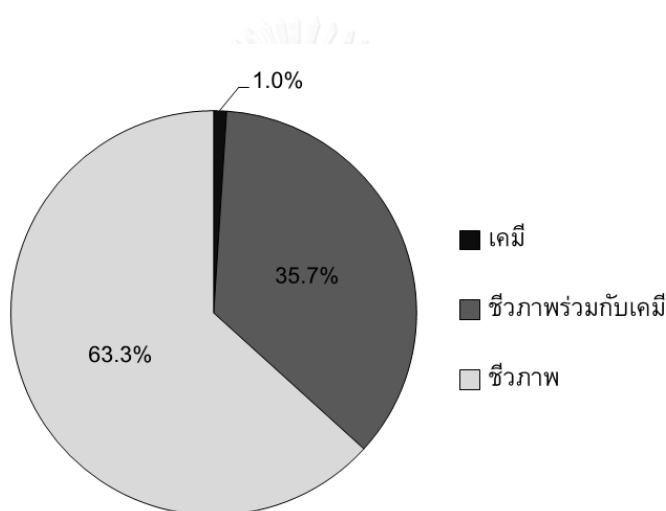
- 2) การใช้ไบโอฟิล์ม (Biofilms) จากการศึกษาพบว่าการใช้ไบโอฟิล์มโดยให้แบคทีเรียเติบโตอย่างอิสระในรูปของไบโอฟิล์มบนตัวกลางหลายชนิดพบว่าสามารถกำจัดสีผสมหลายชนิดได้ภายในเวลา 24 – 30 ชั่วโมง วิธีการนี้มีข้อเสียเปรียบเนื่องจากต้องอาศัยกระบวนการหมักและไม่สามารถบำบัดน้ำเสียในปริมาณที่สูงมากได้ (Nigam และคณะ , 2000)
- 3) การบำบัดในสภาวะไร้อากาศ พบแบคทีเรียหลายชนิดที่สามารถบำบัดสีอะโซอิกได้โดยเกิดจากสารเอนไซม์ที่เกิดในไฮโดรฟลาซิมที่ละลายน้ำ เป็นที่รู้จักกันในชื่ออะโซรีดักเตส (Azo reductases) ข้อเสียเปรียบของวิธีการนี้คือเอนไซม์ชนิดนี้อาจทำให้เกิดสารอะโรเมติกเอมีนซึ่งสารพิษ ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ และอาจเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ (Keck และคณะ , 1997)
- 4) การดูดซับโดยเซลล์จุลชีพ (Biosorption) เป็นวิธีที่ใช้จุลชีพที่มีชีวิตและตายแล้วในการดูดซับสี ได้แก่ แบคทีเรีย ยีสต์ รา วิธีการนี้พบว่าจุลชีพบางชนิดมีอัตราการยึดเกาะกับชนิดของสีแบบจำเพาะเจาะจง และสามารถกำจัดสีได้อย่างรวดเร็วโดยพบว่าจุลชีพที่มาจากกระบวนการผลิตเอทานอลมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดี แบคทีเรียสามารถกำจัดสีรีแอกทีฟได้ดี นอกจากนี้จุลชีพหลายชนิดยังสามารถจัดการกับน้ำเสียที่เป็นพิษมากได้โดยแอกทีโนไมซิสสามารถกำจัดสีอะโซอิก ฟาโลไซยาไนด์ (Phalocyanide) และแอนโทควิโนน (Anthroquinone) (Ravi Kumar และคณะ , 1998)
- 5) แอนแอโรบิกไบโอรีมีเดียชัน (Anaerobic bioremediation) เป็นวิธีที่จะกำจัดสีอะโซอิกและสีที่ละลายน้ำได้โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน กับไฮโดรเจนแทนที่จะเป็นออกซิเจนเหมือนปฏิกิริยาเติมอากาศ โดยที่สีอะโซอิกจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย โดยเมื่อ ฟลาวินนิวคลีโอไทด์ (Flavin nucleotides) เกิดการจ่ายอิเล็กตรอนและเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนต่อไปพร้อมกับการกำจัดสีของน้ำเสียสี จนเกิดเป็นแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์และแก๊สมีเทน และมีสีอะโวอิกเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ทำให้พันธะอะโซเกิดการสลายตัว ข้อได้เปรียบของวิธีการนี้คือเกิดพลังงานคือแก๊สมีเทนที่จะเป็นตัวลดการใช้พลังงานได้

นอกจากนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศเนื่องจากระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศไม่สามารถกำจัดสีอะโซอิกซึ่งเป็นสีที่มีสัดส่วนมากที่สุดของน้ำเสียสีได้ (Carliell และคณะ , 1996)

- 6) การใช้สารตัวกลางจากปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox mediator) วิธีการนี้เป็นวิธีที่ใช้แก้ปัญหาการบำบัดสีอะโซอิกที่มีกลุ่มของซัลโฟเนตในการบำบัดแบบไร้อากาศ โดยการบำบัดแบบไร้อากาศจะพบว่าโมเลกุลของจุลชีพไม่สามารถผ่านเข้าสู่เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลชีพได้ ทำให้การบำบัดแบบเดิมไม่สามารถกำจัดสีอะโซอิกและปล่อยสีอะโซโมเลกุลใหญ่ออกมา การใช้สารตัวกลางที่พบจากปฏิกิริยาการสลายตัวของไดไฮดรอกซีแนพทาลีน (1,2-dihydroxynaphthalene) พบว่าสามารถเพิ่มการกำจัดสีอะโซอิกที่มีกลุ่มซัลโฟเนตและสีอะโซอิกที่ไม่มีกลุ่มซัลโฟเนตได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงโดยมากกว่าแบบไร้อากาศทั่วไปถึง 20 เท่า และแก้ปัญหาคาร์บอนที่ติดซับโมเลกุลของซัลโฟเนตในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ และยังลดปัญหาการปล่อยสีอะโซอิกโมเลกุลใหญ่ออกมาจากระบบบำบัดได้ (Banat และ Simandl , 1999)

#### 2.5.4 ข้อมูลสัดส่วนระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

จากการสำรวจด้วยแบบสอบถามและเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานทั้งหมดจำนวน 98 โรงงาน (รายงานการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งเฉพาะประเภทอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุงค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง, 2556) พบว่ามีระบบบำบัดน้ำเสียทุกโรงงาน โดยเป็นโรงงานที่ใช้กระบวนการบำบัดทางเคมีเท่านั้น (ไม่มีระบบบำบัดทางชีวภาพ) คิดเป็นร้อยละ 1.0 ทั้งนี้ ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจะแยกได้เป็นกลุ่มที่มีเฉพาะระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเท่านั้น (ไม่มีกระบวนการบำบัดทางเคมี) คิดเป็นร้อยละ 63.3 และกลุ่มที่มีระบบบำบัดทางชีวภาพร่วมกับกระบวนการบำบัดทางเคมีคิดเป็นร้อยละ 35.7 สัดส่วนของโรงงานที่มีระบบบำบัดน้ำเสียระบบต่างๆ จำแนกดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สัดส่วนร้อยละของโรงงานที่มีข้อมูลระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่างๆ จากการสำรวจโรงงาน 98 โรงงาน (พ.ศ.2556)

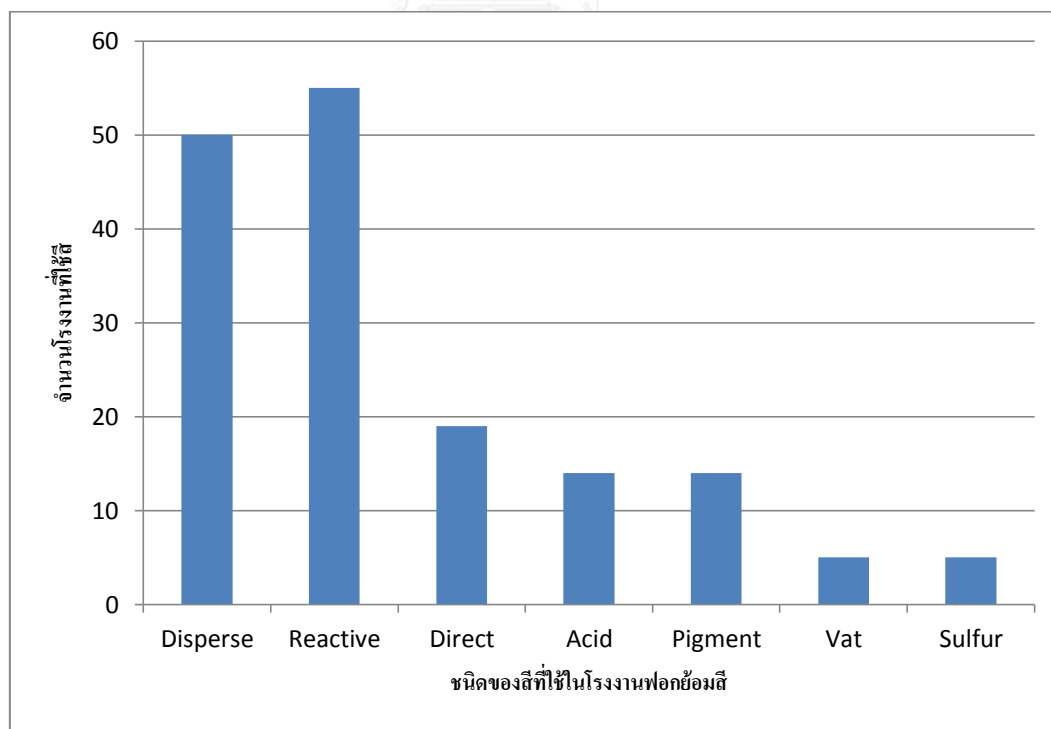
##### 2.5.4.1 สถิติการใช้สีของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

โรงงานอุตสาหกรรมที่ประกอบธุรกิจสิ่งทอในประเทศไทยมีจำนวนทั้งหมด 4,265 โรงงานในจำนวนนี้มีอุตสาหกรรมที่ฟอกย้อมสีและพิมพ์ผ้าจำนวน 388 โรงงานซึ่งเป็นโรงงานที่มีการใช้สีย้อมโดยตรงโดยมีปริมาณการนำเข้าสีชนิดต่างๆ และมูลค่าการนำเข้าดังนี้

ตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณการนำเข้าสีย้อมแต่ละชนิด (กรมโรงงานอุตสาหกรรม , 2556)

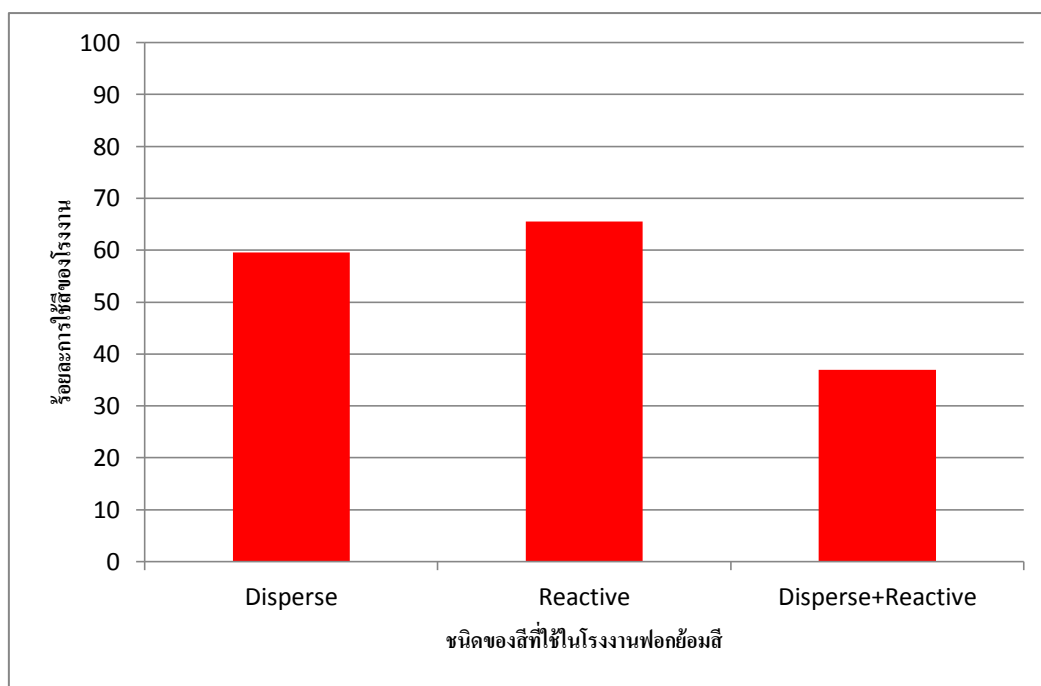
	2552		2553		2554	
	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า
สีดีสเพอร์ส (ตัน)	4,652.1	936.4	5,638.9	1,196.6	4,725.4	1,107.9
สีแอซิด (ตัน)	2,438.7	516.4	3,334.3	773.1	3,197.4	765.8
สีเบสิค (ตัน)	865.0	172.7	702.8	160.7	573.3	124.1
สีไดเรกท์ (ตัน)	1,587.2	236.5	2,083.5	252.9	1,867.5	229.3
สีแวท (ตัน)	933.3	181.6	1,387.1	253.2	1,050.8	187.9
สีรีแอคทีฟ (ตัน)	7,578.1	1,243.9	8,872.2	1,435.0	6,185.2	1,062.2
สีอื่นๆ (ตัน)	10,183.5	2,234.5	11,970.4	2,825.8	11,885.8	3,045.7
รวม	28,237.8	5,520.9	33,989.0	6,897.4	29,485.5	6,522.9

จากการสำรวจโรงงานลำดับที่ 22 จำนวน 84 โรงงานพบว่าจำนวนโรงงานที่ใช้สีแต่ละชนิดเพื่อการย้อมสีเป็นดังนี้



รูปที่ 2.3 แสดงจำนวนโรงงานที่มีการใช้สีชนิดต่างๆ ในการฟอกย้อมสีของโรงงานประเภทที่ 22

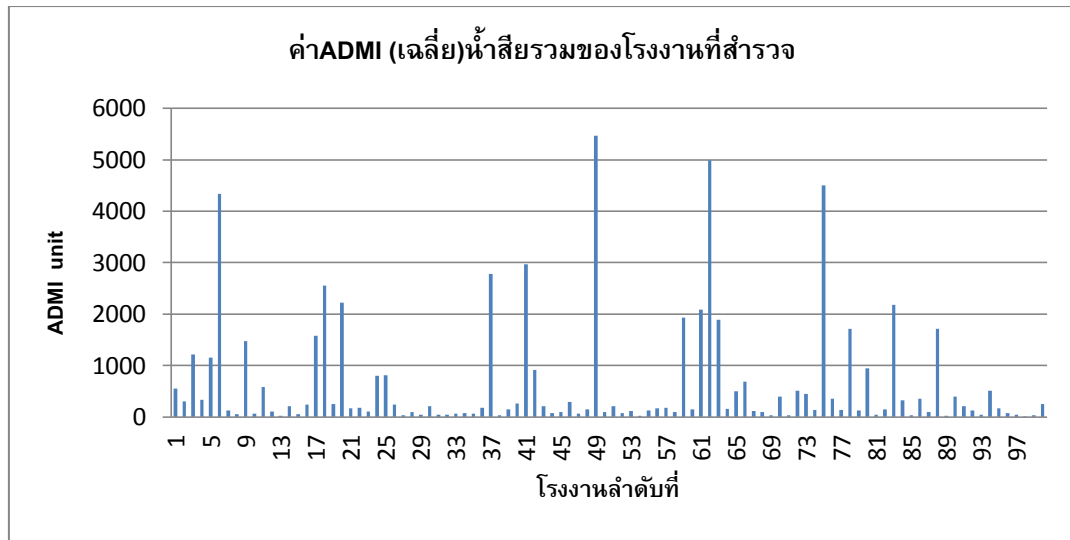
จากรูปที่ 2.3 จะพบว่าจากโรงงานตัวอย่าง 84 โรงงานมีการใช้สีชนิดรีแอคทีฟและสีดิสเพอร์สมากที่สุดโดยใช้สีรีแอคทีฟ 55 โรงงานและใช้สีดิสเพอร์สจำนวน 50 โรงงาน โดยมีการใช้สีชนิดอื่นลดลงมากได้แก่สีไดเรกต์ 19 โรงงาน สีแอซิด 14 โรงงาน สีปีกเมนต์ 14 โรงงาน สีแวท 5 โรงงานและสีซัลเฟอร์ 5 โรงงาน สามารถแสดงร้อยละของการใช้สีดิสเพอร์สและสีรีแอคทีฟดังนี้



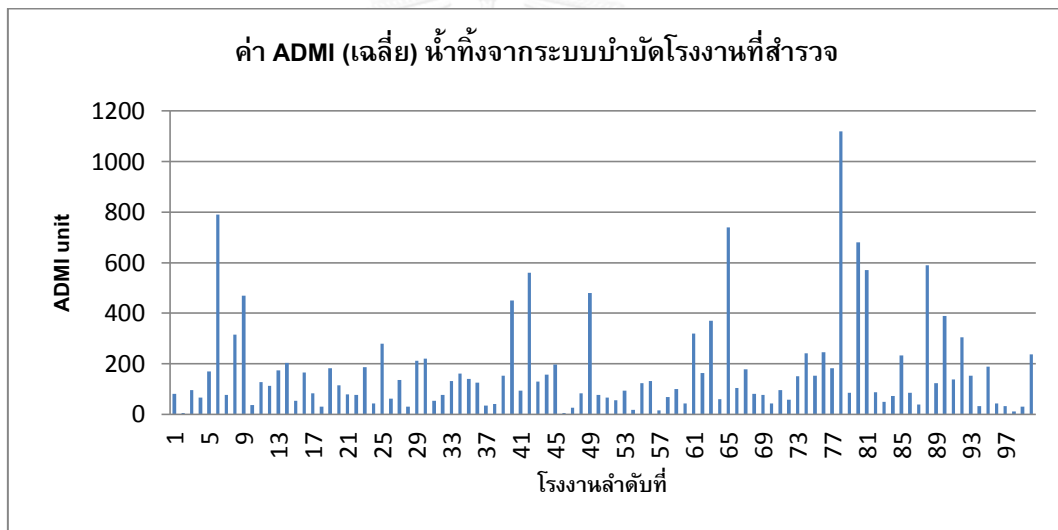
รูปที่ 2.4 แสดงร้อยละของโรงงานที่ใช้สีดิสเพอร์สและสีรีแอคทีฟ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

#### 2.5.4.2 ความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

จากข้อมูลผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียและน้ำทิ้งจากโรงงานประเภทต่างที่บำบัดเสียมีความเข้มข้นสีก่อนและหลังบำบัดในหน่วยเอทีเอ็มไอดังรูปที่ 2.6



ก) ค่าสีน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย



ข) ค่าสีน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย

รูปที่ 2.5 ค่าสีของน้ำเสียรวมและน้ำทิ้งหลังจากระบบบำบัดฯ โรงงานตัวแทนจำนวน 100 โรงงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าทางสถิติของความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานประเภท 22

ค่าสถิติ	สีน้ำทิ้ง (ADMI)							
	ประเภท 22(1)		ประเภท 22(2)		ประเภท 22(3)		ประเภท 22(4)	
	กรอง+ ไม่ปรับ พีเอช	กรอง+ ปรับ พีเอช	กรอง+ ไม่ปรับ พีเอช	กรอง+ ปรับ พีเอช	กรอง+ ไม่ปรับ พีเอช	กรอง+ ปรับ พีเอช	กรอง+ ไม่ปรับ พีเอช	กรอง+ ปรับ พีเอช
จำนวน โรงงาน	5		16		57		13	
ค่าเฉลี่ย	100	99	251	184	215	155	387	317
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	44	42	223	199	214	140	565	333
ค่าสูงสุด (maximum)	177	171	670	790	1035	740	1785	1120
ค่าต่ำสุด (minimum)	64	66	28	31	7	6	13	40
ค่ามัธยฐาน (median)	84	82	138	121	149	124	164	123
เปอร์เซ็นต์ ไทล์ที่ 95			603	550	748	456	1578	856
เปอร์เซ็นต์ ไทล์ที่ 90			565	393	449	311	1246	662
<500 ADMI			76.5	93.9	91	96.8	83.5	71.7
<300 ADMI			68.5	85.7	83	88.9	70.3	61.8

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2556)

## 2.6 เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Palanna, 2009)



เซลล์ไฟฟ้าเคมีเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดสองขั้วที่สัมผัสกับสารละลาย มีการถ่ายเทการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ (Free energy change) ระหว่างปฏิกิริยารีดอกซ์กับพลังงานจากกระแสไฟฟ้า

$$\Delta G = -nFE$$

เมื่อ  $n$  = จำนวนโมลของอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาเคมี

$F$  = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96485 C)

$E$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าของขั้วเซลล์ (V)

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

เซลล์กัลวานิกหรือเซลล์โวลตาอิก เป็นเซลล์ที่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดได้เองโดยไม่ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้า และยังมีพลังงานปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้น เซลล์กัลวานิกจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดโดยมีแอโนดมีศักย์ไฟฟ้าลบและจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดโดยมีแคโทดมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอกเซลล์อิเล็กโทรไลต์เซลล์กัลวานิกได้แก่ แบตเตอรี่ตะกั่ว

เซลล์อิเล็กโทรไลติก เป็นเซลล์ที่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นไม่ได้เอง จะต้องใช้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อนให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเกิดการดูดพลังงานของสารละลายและเกิดปฏิกิริยารีดักซ์ โดยขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกส่วนขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ

### 2.6.1 ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรด

ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดเดี่ยว หมายถึงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในบริเวณผิวของขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยเมื่อขั้วอิเล็กโทรดสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโลหะชนิดเดียวกับขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดแนวโน้มที่จะจ่ายหรือรับอิเล็กตรอนให้กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั้น การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรดจึงวัดถึงความสามารถในการจ่ายหรือรับอิเล็กตรอน

ระหว่างบริเวณที่สัมผัสกัน จะใช้สัญลักษณ์แทนศักย์ไฟฟ้าชนิดนี้เป็น  $E_{Mn+/M}$  หรือ  $E^0_{M/Mn+}$  เมื่อ M คือ ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด และ  $M^{n+}$  คือชนิดของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วอิเล็กโทรด คือการวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดแต่ละชนิดเทียบกับขั้วไฮโดรเจนที่สภาวะมาตรฐาน อุณหภูมิ 298 K และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็น 1M โดยการกำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฮโดรเจนที่สภาวะมาตรฐานเป็นขั้วอ้างอิงและมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ( $E^0=0$ )

### 2.6.2 การหาความต่างศักย์ของขั้วอิเล็กโทรดเดี่ยว

ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดขึ้นกับชนิดของขั้วอิเล็กโทรด ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุณหภูมิ จากสมการของเนิร์นสต์ (Nernst equation) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์และค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วอิเล็กโทรดดังนี้

$$E = E^0 + \frac{0.591}{n} \log_{10}[M^{n+}] \quad \text{ปฏิกิริยารีดักชัน}$$

$$E = E^0 + \frac{0.591}{n} \log_{10}[M^{n+}] \quad \text{ปฏิกิริยาออกซิเดชัน}$$

เมื่อ

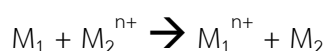
$E$  = ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดเดี่ยว (V)

$E^0$  = ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดเดี่ยวที่สภาวะมาตรฐาน (V)

$n$  = จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในปฏิกิริยา (ประจุต่อโมล)

$M^{n+}$  = ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

และมีสมการสำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์เมื่อปฏิกิริยารวมเป็นดังนี้



$$E_{cell} = E^0_{cell} - \frac{2.303 RT}{nF} \log_{10} \left[ \frac{M_1^{n+}}{M_2^{n+}} \right]$$

โดยที่  $E^0_{cell} = E^0_{cathode} - E^0_{anode}$  สำหรับเซลล์กัลวานิก

$$E_{\text{cell}}^0 = E_{\text{anode}}^0 - E_{\text{cathode}}^0 \quad \text{สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลติก}$$

ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ไอออนประจุไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าผ่านสารละลาย ความสามารถในการเคลื่อนของไอออนประจุไฟฟ้าเหล่านั้นคือค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของไอออนโดยค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ปั่นเกลือได้แก่ NaCl KCl HCl Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> มักจะมีค่าคงที่ในช่วงของความเข้มข้นของสารละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิหนึ่ง

ในการหาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีไอออนชนิดต่างๆ อยู่สามารถประมาณได้จาก

$$\sigma_{\text{solution}} = \frac{(\varphi_{\text{ion1}} + \varphi_{\text{ion2}} + \dots) \times N}{1000} \text{ mho} - \text{cm}^{-1}$$

เมื่อ

$$\sigma_{\text{solution}} = \text{ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (mho-cm}^{-1}\text{)}$$

$$\varphi_{\text{ion}} = \text{ค่าการนำไฟฟ้าของไอออนแต่ละชนิด (mho-cm}^2\text{-equivalent/1000 cm}^3\text{)}$$

$$N = \text{ค่าความเข้มข้นสารละลาย (normality)}$$

การหาค่าความต้านทานจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำได้จาก

$$\rho_{\text{solution}} = \frac{1}{\sigma_{\text{solution}}} \text{ ohm} - \text{cm}$$

และสามารถหาความต้านทานของปริมาตรสี่เหลี่ยมมุมฉากระหว่างขั้วของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้จาก

$$R_{\text{solution}} = \sigma_{\text{solution}} \frac{L}{A}$$

เมื่อ

$$\rho_{\text{solution}} = \text{ความต้านทานจำเพาะของสารละลาย (ohm-cm)}$$

$$R_{\text{solution}} = \text{ความต้านทานของปริมาตรสารละลายระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (ohm)}$$

$L$  = ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (cm)

$A$  = พื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรด ( $\text{cm}^2$ )

ความต้านทานรวมของเซลล์อิเล็กโทรไลต์หาได้ดังนี้

$$R_T = R_C + R_a + R_w + 2 R_i$$

เมื่อ

$R_T$  = ความต้านทานโดยรวมของเซลล์อิเล็กโทรไลต์

$R_C$  = ความต้านทานของขั้วแคโทด

$R_a$  = ความต้านทานของขั้วแอโนด

$R_i$  = ความต้านทานของบริเวณที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์สัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรด

โดยทั่วไปความต้านทานของขั้วอิเล็กโทรดโลหะ  $\rho_M$  และค่าความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์  $\rho_{\text{solution}}$  มีค่าต่างกันมากในระดับที่ทำให้ความต้านทานของขั้วอิเล็กโทรดไม่มีนัยสำคัญ ( $\rho_M / \rho_{\text{solution}} < 10^{-4}$ ) ในขณะที่ความต้านทานบริเวณที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์สัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรด  $R_i$  มักมีค่าน้อยกว่า  $R_{\text{solution}}$  แต่อยู่ในระดับที่มีนัยสำคัญและจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของขั้วอิเล็กโทรดมีมากขึ้นหรือพื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรดสูงขึ้น เช่น ขั้วแกรไฟต์มีความต้านทานบริเวณใกล้ขั้วอิเล็กโทรดระหว่าง 0.05 ถึง 0.1  $\text{ohm-cm}^2$  สำหรับสองขั้วอิเล็กโทรด

## 2.7 การบวนการออกซิเดชันสารอินทรีย์ด้วยกระแสไฟฟ้า (Alkire และ Kolb, 2009)

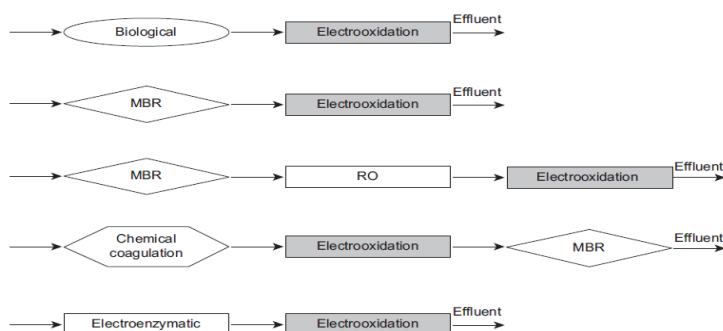
ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ที่ใช้กันปัจจุบันได้แก่ กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าทางตรง (Direct electrochemical process) และการบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าทางอ้อม (Indirect electrochemical process)

### 2.7.1 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าทางอ้อม

เป็นกระบวนการให้เกิดสารที่ใช้ทำปฏิกิริยาซึ่งจะใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์โดยที่สารอินทรีย์จะไม่สัมผัสกับขั้วไฟฟ้า โดยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นมักจะไม่ซับซ้อน และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมาก โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าทางอ้อมมีข้อได้เปรียบเนื่องจากสามารถจะเติมสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดสารที่ใช้ทำปฏิกิริยาได้มากเกินพอเพื่อให้ความเข้มข้นของสารที่ใช้ทำปฏิกิริยามีค่าคงที่ และลดปัญหาเรื่องประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาลดลงก่อนสิ้นสุดกระบวนการ นอกจากนี้สารตั้งต้นที่เปลี่ยนรูปไปยังสามารถที่จะเวียนกลับมาใช้เพื่อทำให้เกิดเป็นสารที่ใช้ทำปฏิกิริยาได้จึงไม่ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม

### 2.7.2 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าทางตรง

เป็นกระบวนการที่สารอินทรีย์เกิดปฏิกิริยาขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรดโดยตรงและเกิดการออกซิเดชันหรือรีดักชันและมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนภายในโมเลกุลสารอินทรีย์เองหรือแลกเปลี่ยนกับตัวทำละลาย ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาโดยตรง มีข้อได้เปรียบตรงที่มีค่าผลสุทธของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงและมีผลิตภัณฑ์พลอยได้ (Byproduct) น้อย นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาไม่จำเป็นต้องกันหรือแยกเครื่องปฏิกรณ์ออกจากกัน อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เพียงบริเวณขั้วอิเล็กโทรดการทำให้มีการแพร่กระจายของสารอินทรีย์ไปยังขั้วอิเล็กโทรดมีความสำคัญมาก ในกรณีที่สารตั้งต้นมีความสามารถในการละลายต่ำหรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดมีความสามารถในการดูดติดผิวอิเล็กโทรด หรือมีการเกิดชั้นฟิล์มบนขั้วอิเล็กโทรดอาจเป็นปัญหาสำคัญได้

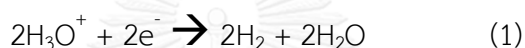


รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบต่างๆ (Water treatment by Electrical Technologies, 2010)

### 2.7.3 กลไกการเกิดออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Israilides และคณะ, 1997)

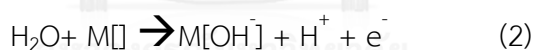
ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการแยกด้วยกระแสไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือมีความซับซ้อนและไม่เป็นที่รู้จักทั้งหมด ตั้งแต่เริ่มแรกมีเพียงการตั้งสมมติฐานขึ้นมาจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมา ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{ClO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ )

กลไกของการแยกทางกระแสไฟฟ้าที่เป็นไปได้อธิบายจากสมการด้านล่าง การเกิดขึ้นของแก๊สไฮโดรเจนในสารละลายกรดและเบสเกิดจากวิธีการที่แตกต่างกัน ในสารละลายกรดแหล่งที่มาของแก๊สไฮโดรเจนเกิดจากไฮดรอกซิเนียมไอออนซึ่งปล่อยออกมาจากขั้วแคโทดเพื่อที่จะสร้างแก๊สไฮโดรเจน (1a) (Antropov, 1977; Prentice, 1991)



ในสารละลายเบสมีสมมติฐานว่าอิเล็กตรอนถูกเติมเข้าไปในโมเลกุลของน้ำซึ่งจะสลายตัวแล้วเกิดแก๊สไฮโดรเจนและไฮดรอกซิลไอออน

สารที่ปล่อยออกมาจากขั้วแอโนดจากน้ำทำให้เกิดไฮดรอกซิลอิสระ (Hydroxyl radical) ซึ่งจะถูกดูดซับบนบริเวณเร่ง (Active site) ของพื้นผิวอิเล็กโทรด M

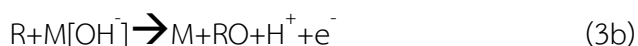


เป็นที่เชื่อกันว่าปฏิกิริยา (2) สามารถจะเกิดในสารละลายต่างเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าสูง

บริเวณที่ใกล้กับพื้นผิวของขั้วแอโนดปฏิกิริยาข้างเคียงหลักระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีคือการเกิดแก๊สออกซิเจนจากปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



กระบวนการออกซิเดชันทางเคมีด้วยกระแสไฟฟ้าของสารละลายที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โดยการใช้ขั้วแอโนดแบบดั้งเดิม (Ti/Pt, Ti/PbO, Ti/IrO<sub>2</sub>...) เกิดขึ้นด้วยสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือปฏิกิริยาที่ (2) หลังจากนั้นไฮดรอกซิลอิสระที่ถูกดูดซับจะออกซิไดซ์สารอินทรีย์



เมื่อ RO แทนสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ซึ่งสามารถจะเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจากไฮดรอกซิลอิสระที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เมื่อสารที่ปลดปล่อยจากขั้วแอโนดของน้ำดำเนินการไป สารที่ถูกปลดปล่อยของคลอไรด์ก็เกิดขึ้นพร้อมกัน และทำให้เกิดสารคลอโรไฮดรอกซิลอิสระ (chlorohydroxyl radical) ซึ่งจะถูกดูดซับบนบริเวณเร่งของพื้นผิวขั้วแอโนด M



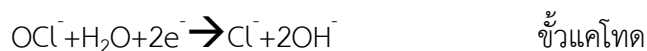
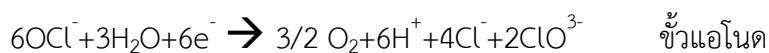
ด้วยกระบวนการเกิดที่เหมือนกับ (3a) และ (3b) คลอรีนอิสระและคลอไรด์ไอออนรวมถึงสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาต่อไปนี้



คลอรีนอิสระที่เกิดขึ้นอยู่ในสมดุลกับ  $OCl^-$  ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ (Prentice (1991))



ดังนั้นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีเบื้องต้นคือ  $Cl_2$ ,  $O_2$ ,  $OCl^-$  และ RO เมื่อความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์ดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีทุติยภูมิหลายปฏิกิริยาก็เกิดขึ้น ที่ความเข้มข้นของ  $OCl^-$  มีค่าสูง อุณหภูมิสูงและความปั่นป่วนจากการไหลสูง การถ่ายเทมวลสารจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้ (Couper และคณะ (1990))



บนขั้วแคโทดในช่วงเวลาเดียวกัน โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และคลอรีนไดออกไซด์ถูกตรวจพบระหว่างตัวออกซิไดซ์ที่เกิดขึ้นจากขั้ว Ti/Pt สารอิเล็กโทรไลต์น้ำเกลือ ตัวออกซิไดซ์เหล่านี้ถูกพบที่ขั้วแอโนดจากสมมติฐานปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าดังนี้





ตัวออกซิไดซ์อิสระคงสภาพอยู่ในระยะเวลาที่สั้นมากเนื่องจากศักยภาพในการออกซิไดซ์สูงและเนื่องจากเกิดการสลายตัวเป็นตัวออกซิไดซ์อื่น ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{ClO}_2$ ,  $\text{O}_3$  และ  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) หรืออาจเกิดจากที่ตัวออกซิไดซ์อิสระออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยตรง (Direct oxidation) หรือตัวออกซิไดซ์ทุติยภูมิ ( $\text{ClO}_2$ ,  $\text{O}_3$  และ  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ที่เกิดจากแตกตัวของตัวออกซิไดซ์อิสระมีความคงตัวสูงและแพร่สู่บริเวณที่ขั้วอิเล็กโทรดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Indirect oxidation)

ตารางที่ 2.5 ศักยภาพในการออกซิไดซ์ของตัวออกซิไดซ์ชนิดต่างๆ (Chen, 2004)

Oxidants	Formation potential
$\text{H}_2\text{O}/\text{OH}^*$ (Hydroxyl radical)	2.80
$\text{O}_2/\text{O}_3$ (Ozone)	2.07
$\text{SO}_4^{2-}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ (Peroxodisulfate)	2.01
$\text{MnO}_2/\text{MnO}_4^{2-}$ (Permanganate ion)	1.77
$\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2$ (Hydrogen peroxide)	1.77
$\text{Cl}^-/\text{ClO}_2^-$ (Chloride dioxide)	1.57
$\text{Ag}^+/\text{Ag}^{2+}$ (Silver (II) ion)	1.50
$\text{Cl}^-/\text{Cl}_2$ (Chlorine)	1.36
$\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (Dichromate)	1.23
$\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ (Oxygen)	1.23

## 2.8 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

เวลาที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดชันขึ้นอยู่กับความคงตัวและความเข้มข้นของสารประกอบ ความเข้มข้นของ  $\text{NaCl}$  ที่ใช้ อุณหภูมิ ค่าพีเอชของสารละลาย เวลาที่ใช้ในการเวียนสารละลายกับขนาดของขั้วแอโนด ค่ากระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายแก่ระบบนอกจากนี้อัตราเร็วของปฏิกิริยา



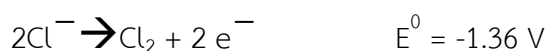
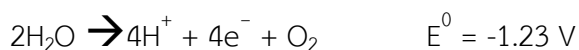
การออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าของสารอินทรีย์ขึ้นกับคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาของขั้วแอโนด อัตราการแพร่ของสารอินทรีย์ไปยังบริเวณเร่งของขั้วแอโนดและความเข้มข้นของกระแสที่จ่าย อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบทางอ้อม (Indirect electro-oxidation) ขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของตัวออกซิไดซ์ทุติยภูมิไปยังสารละลาย อุณหภูมิและค่าพีเอช การสลายตัวของสารมลพิษที่มีประสิทธิภาพขึ้นกับปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบทางตรงเนื่องจากตัวออกซิไดซ์ทุติยภูมิไม่สามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์ทั้งหมดให้กลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ในสารละลายกรด ออกซิเจน คลอรีนอิสระและอาจรวมถึงโอโซนในบางส่วน และคลอรีนไดออกไซด์เป็นสารทุติยภูมิหลักที่เป็นผลพลอยได้หลักของปฏิกิริยาออกซิเดชันทางตรง ในสารที่เป็นเบสปานกลางวัฏจักรของ คลอไรด์-คลอรีน-ไฮโปคลอไรด์-คลอไรต์ เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิด  $\text{OCl}^-$  ออกซิเจนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รวมถึงอาจเกิดโอโซน ในสารละลายเบสแก่วัฏจักรของ คลอไรด์-คลอรีน-คลอรีน ถูกรีดิวซ์เนื่องจากการเกิดของ  $\text{OCl}_3^-$  ซึ่งเป็นไอออนประจุลบที่มีความคงตัวสูง ดังนั้นในสารละลายพีเอชต่ำ คลอไรด์จะถูกกำจัดระหว่างกระบวนการแยกด้วยกระแสไฟฟ้าและจะทำให้เกิดครอเรต มีเพียงแต่สารละลายที่เป็นเบสปานกลางถึงเป็นกลางเท่านั้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของคลอไรด์ยังคงที่ (Myssides *et al.* 1996) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลอิสระอย่างต่อเนื่อง

### 2.8.1 ค่าศักย์เกิน (Overpotential) (Li และคณะ 2013)

ค่าศักย์เกินหมายถึงความแตกต่างระหว่างความต่างศักย์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่คำนวณจากค่าศักย์มาตรฐานครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยารีดักชันในทางเทอร์โมไดนามิกส์เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจริงจากการทดลอง สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลติกค่าศักย์เกินมีความต้องการพลังงานในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าค่าที่คำนวณได้จากค่าศักย์มาตรฐานครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยา สำหรับเซลล์กัลวานิกค่าศักย์เกินจะส่งผลให้พลังงานที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าที่ทำนายได้จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์

### 2.8.2 ค่าศักย์เกินของออกซิเจน (Oxygen overpotential)

จากค่าศักย์มาตรฐานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของขั้วแอโนดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายเมื่อพิจารณาของค่าศักย์มาตรฐานครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วในทางเทอร์โมไดนามิกส์แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) น่าจะเกิดได้ดีกว่าแก๊สคลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) จากปฏิกิริยา



แต่ค่าจากการทดลองพบว่าแก๊สออกซิเจนเกิดในปริมาณน้อยมากเนื่องจากค่าศักย์เกินของออกซิเจน (Oxygen overpotential) มักจะมีค่ามากกว่าค่าศักย์เกินของคลอรีนมาก (Chlorine overpotential)

ตารางที่ 2.6 ค่าศักย์เกิน (V) ของการเกิดแก๊สที่ 25 °C

Electrode	10 A/m <sup>2</sup>		100 A/m <sup>2</sup>		1000 A/m <sup>2</sup>	
	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Platinized Pt	0.015	0.398	0.030	0.521	0.040	0.638
Smooth Pt	0.024	0.721	0.068	0.85	0.288	1.28
Ag	0.475	0.588	0.762	0.729	0.875	0.984
Au	0.241	0.673	0.390	0.963	0.588	1.244
Graphite	0.599		0.778		0.977	
Pb	0.52		1.09		1.179	
Cd	0.981		1.134		1.216	
Hg	0.90		1.00		1.10	

ที่มา Council และWest (1926) International Critical Table. 6.339.

## 2.9 ขั้วอิเล็กโทรด

มีการศึกษาถึงการใช้งานของขั้วอิเล็กโทรดที่นำไฟฟ้าได้หลายชนิดสำหรับงานประยุกต์ในการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าจำเป็นที่จะต้องใช้ขั้วเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา (Inert electrode) และนำกระแสไฟฟ้าได้ดีได้แก่ Pt Au Rb Ru เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าจะเกิดโมเลกุลของแก๊สชนิดต่างที่กัดกร่อนขั้วอิเล็กโทรดทำให้อายุการใช้งานของขั้วอิเล็กโทรดสั้นลงได้ แต่เนื่องจากขั้วโลหะมีตระกูลเหล่านี้มีราคาสูงทำให้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานบำบัดน้ำเสียทางไฟฟ้าเคมีในทางปฏิบัติจึงใช้โลหะชนิดอื่นเป็นฐานหรือตัวทำละลายและนำโลหะมีค่าเหล่านี้มาเคลือบเป็นชั้นบางเพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย โดยส่วนมากจะพบขั้วเคลือบของ

แพลตินัม (Platinized Pt) และขั้วเคลือบของรูทีเนียม (Ruthenized Ru) เนื่องจากโลหะที่เคลือบนั้นทนการกัดกร่อนได้เป็นระยะเวลานาน ส่วนโลหะที่ใช้เป็นฐานของการเคลือบโลหะมักจะใช้ไทเทเนียม (Titanium) เนื่องจากเมื่อผิวที่เคลือบกัดกร่อนหรือหลุดลอกไปไทเทเนียมมีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำจึงทำให้หยุดการนำไฟฟ้าและทำให้การกัดกร่อนเกิดได้ช้าลง นอกจากนี้ยังนิยมที่จะใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์เกินของออกซิเจนที่มีค่าสูงได้แก่ขั้ว  $PbO_2$   $RuO_2$   $IrO_2$   $TaO_2$  โบรอนโด๊ปไดมอนด์ (Boron doped diamond) โดยพบว่าขั้วโลหะจะทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางกลมากกว่าขั้วคาร์บอน

### 2.9.1 วัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนดและขั้วแคโทด (Grimshaw, 2000)

#### ขั้วแอโนด

วัสดุที่ใช้ในการทำขั้วแอโนดสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าจะต้องมีค่าศักย์เกินของออกซิเจนสูงเพื่อยับยั้งการถ่ายอิเล็กตรอนให้แก่น้ำแล้วเกิดเป็นออกซิเจนเนื่องจากการเกิดออกซิเจนที่ขั้วแอโนดเป็นปฏิกิริยาแข่งขันหลักของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าของตัวถูกละลาย

- 1) ขั้วแพลตินัม (Platinum) มีค่าศักย์เกินของออกซิเจนสูงสุดสำหรับขั้วที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาและยังทนทานการกัดกร่อนจึงทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานมาก นอกจากนี้ยังนำไฟฟ้าได้ดีและเกิดตะกอนเกาะขั้วอิเล็กโทรดน้อยทำให้การถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ดี บางครั้งจึงใช้เป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดควบคู่กันไป ขั้วแพลตินัมมีราคาสูงในทางปฏิบัติอาจจะใช้การเคลือบชั้นบางของแพลตินัมลงบนโลหะที่ละลายชนิดอื่นเพื่อลดค่าใช้จ่าย เช่นการเคลือบแพลตินัมลงบนไทเทเนียม (Platinized Titanium)
- 2) ขั้วเลดไดออกไซด์ (Lead dioxide) เป็นขั้วที่นิยมเนื่องจากมีค่าศักย์เกินของออกซิเจนที่สูงมากและมีลักษณะเป็นแผ่นยึดหยุ่นคล้ายผ้าทำให้ง่ายต่อการใช้งาน รวมถึงเป็นขั้วที่ราคาถูก ขั้วเลดไดออกไซด์ยังสามารถใช้งานกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดซัลฟิวริกได้ดี ประสิทธิภาพการใช้งาน ของขั้วเลดไดออกไซด์จะขึ้นอยู่กับการสภาวะในการเตรียมการเคลือบชั้นฟิล์มของเลดไดออกไซด์บนโลหะที่เป็นตัวทำละลายและแรงยึดติดผิว (Adhesion) ระหว่างฟิล์มของเลดไดออกไซด์กับโลหะตัวทำละลาย โลหะที่เป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้กัน

มากที่สุดคือแพลตินัมเคลือบไทเทเนียม (Platinized Titanium) ขั้วเล็ดไดออกไซด์อาจมีอายุการใช้งานที่ไม่ยาวนานเมื่อเทียบกับขั้วแพลตินัม

- 3) ขั้วโบรอนโดปโดมอนด์ (Boron-doped diamond) เป็นขั้วที่เกิดจากการปรับปรุงโครงสร้างของเพชรอุตสาหกรรม โดยเติมธาตุโบรอนในลักษณะที่เป็นสารเจือปนในผลึกของเพชรทำให้เมื่อปรับปรุงโครงสร้างแล้วขั้วโบรอนโดปโดมอนด์มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี และมีค่าศักย์เกินของออกซิเจนที่สูง นอกจากนี้ยังมีเสถียรภาพทางกลและทางเคมีที่สูง และมีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดีเยี่ยมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสารอินทรีย์เนื่องจากสามารถผลิตไฮดรอกซิลอิสระซึ่งมีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ซึ่งได้แก่น้ำเสียเป็นต้น ในปัจจุบันโลหะที่เป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมส่วนใหญ่ที่มีราคาแพง

#### ขั้วแคโทด

วัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทดสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าควรมีค่าศักย์เกินของไฮโดรเจนที่สูงเนื่องจากปฏิกิริยาที่น้ำจ่ายอิเล็กตรอนแล้วเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนเป็นปฏิกิริยาแข่งขันหลักของของสารอิเล็กโทรไลต์

- 1) ขั้วแกรไฟต์ (Graphite) เป็นขั้วที่สะดวกในการใช้งาน และมีค่าศักย์เกินของไฮโดรเจนที่สูงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีและมีราคาถูกจึงนิยมใช้ทำเป็นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดเมื่อใช้เสร็จแล้วสามารถทิ้งได้เลย แต่ยังไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีความเปราะและไม่สามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางกลได้มากนัก
- 2) ขั้วปรอท (Mercury) เป็นขั้วที่มีค่าศักย์เกินของไฮโดรเจนที่สูงในการใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการนิยมใช้งานในรูปของเหลวเนื่องจากสะดวกในการใช้งานเพราะมีสมบัติที่มีพื้นผิวที่เรียบและไม่มีสิ่งเจือปน ปรอทในรูปที่เป็นของแข็งนิยมใช้ในรูปขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่น
- 3) ขั้วแคดเมียม (Cadmium) นิยมใช้ในแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม นอกจากนี้ยังใช้ทำแคโทดในรูปแคดเมียมเหลว (Liquid cadmium cathode) และใช้ในลักษณะที่เป็นของแข็งโดยการเคลือบแคดเมียมบนชั้นของเหล็กกล้า แคดเมียมมีค่าศักย์เกินของไฮโดรเจนที่สูงทำให้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาแคโทดรีดักชันได้ดี แต่แคดเมียมมีราคาที่แพงและมีความเป็นพิษมาก นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการบำบัดยังขึ้นกับอุณหภูมิค่อนข้างมากทำให้การทำนายประสิทธิภาพทำได้ยาก

## 2.10 การกำจัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนทางเคมี (ทวิศักดิ์ วังไพศาล, 2554)

### 2.10.1 คุณสมบัติของคอลลอยด์

คอลลอยด์เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวหลายประการเมื่อพิจารณาตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและตัวกลางที่อนุภาคนั้นอยู่จะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

### 2.10.2 คอลลอยด์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Colloids)

คอลลอยด์ที่ชอบน้ำเป็นคอลลอยด์ที่ชอบรวมตัวอยู่กับน้ำ ทำให้แยกตัวออกจากน้ำได้ยาก เช่น โปรตีน สบู่ สารซักฟอก แป้งที่ละลายน้ำ เป็นต้น เหตุผลที่คอลลอยด์ชนิดนี้แยกออกจากน้ำได้ยาก เพราะคอลลอยด์เหล่านี้มีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ จึงต้องใช้แรงมากในการบังคับให้อนุภาคต่างๆ เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน โมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนฉนวนกีดขวางไม่ให้อนุภาคต่างๆ เข้าใกล้และจับตัวกันได้ ดังนั้นการแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียจึงต้องใช้สารตกตะกอน (Coagulant) ปริมาณมาก

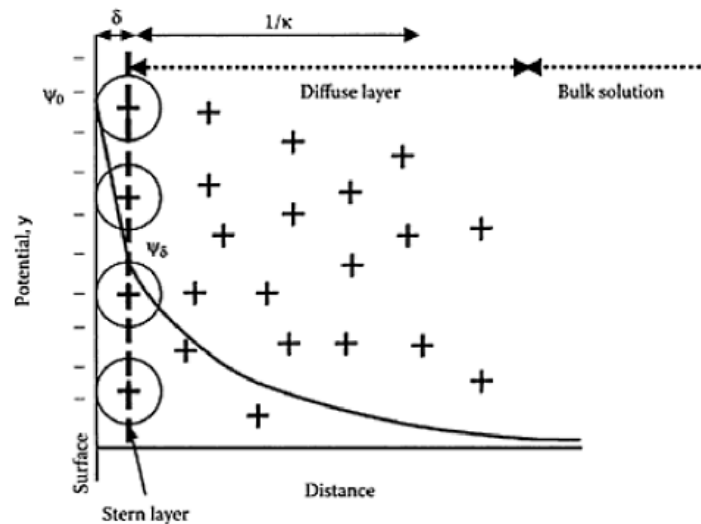
### 2.10.3 คอลลอยด์ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Colloids)

คอลลอยด์ที่ไม่ชอบน้ำเป็นอนุภาคที่พร้อมจะแยกตัวออกจากน้ำ ตัวอย่างเช่น ดินเหนียว สารอินทรีย์ละลายน้ำบางชนิด โลหะ เป็นต้น ซึ่งคงตัวอยู่ในน้ำได้ด้วยแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้า สารเหล่านี้จะถูกแยกออกจากน้ำได้ง่ายถ้าอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น การเติมสารส้มลงไป ในน้ำ การปรับค่าพีเอชของน้ำ เป็นต้น ทั้งนี้สารเหล่านี้ไม่ชอบน้ำและพร้อมที่จะแยกตัวออกจากน้ำหากน้ำหนักรวมมากขึ้น ดังนั้นเพียงแค่ทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอยเหล่านี้เพียงเล็กน้อยได้แก่การทำลายประจุสารเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดการรวมตัวกันและแยกออกจากน้ำเสียได้ง่าย

### 2.10.4 Electric Double Layer Theory

คอลลอยด์แตกต่างจากอนุภาคอื่นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์อาจมีประจุบวกหรือลบก็ได้ การที่อนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า ทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาคจึงทำให้อนุภาคต่างๆ กระจายอยู่ในน้ำโดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนหรือตะกอน ดังนั้นประจุไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ทฤษฎี Electric Double Theory อธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า จึงมีไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามถูกดูดเข้ามาล้อมรอบอนุภาคคอลลอยด์ไว้ ไอออนที่ห่อหุ้มคอลลอยด์นี้สามารถพิจารณาได้เป็น 2 ชั้นคือ 1)

ส่วนที่อยู่ใกล้ผิวของคอลลอยด์จะอยู่ภายใต้อำนาจไฟฟ้าของคอลลอยด์มากและเคลื่อนที่ไปกับคอลลอยด์เรียกว่า Fixed Layer และ 2) ส่วนที่อยู่ห่างออกไปแต่ยังคงอยู่ภายใต้อำนาจไฟฟ้าของคอลลอยด์อยู่ ครอบคลุมไปจนถึงตำแหน่งที่หมดอำนาจไฟฟ้าพอดีเรียกว่าชั้นกระจายหรือ Diffuse Layer ดังรูปที่ 2.7



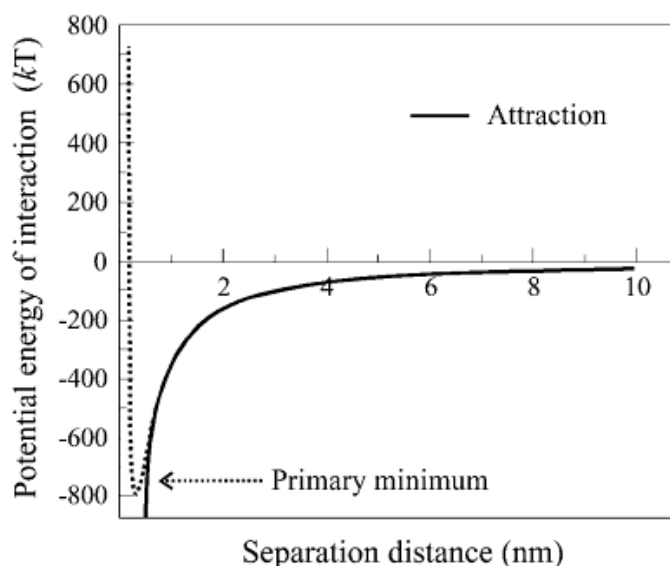
รูปที่ 2.7 แสดงแบบจำลองของ Electric Double Layer Theory ของอนุภาคคอลลอยด์ (Bratby, 2006)

กรณีที่เป็นอนุภาคดินเหนียวที่เป็นความชุ่มชื้นในน้ำ อนุภาคคอลลอยด์จะมีประจุลบ ทำให้เกิดแรงดึงดูดกับไอออนของประจุบวกที่อยู่ในน้ำ ไอออนประจุบวกเรียกว่า Counter Ion จะเข้ามาล้อมรอบคอลลอยด์โดยมีความหนาแน่นของไอออนบวกมากที่สุดบริเวณผิวของคอลลอยด์และลดน้อยลงไปตามระยะห่างที่ออกไปจากคอลลอยด์ ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์มีค่าสูงสุดที่ผิวเรียกว่า Nernst Potential ( $\Psi_0$ ) และมีค่าลดลงตามระยะทาง ณ จุดที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์หรือเขตสิ้นสุดอำนาจไฟฟ้าคอลลอยด์ดังรูปที่ 1 โดยตามทฤษฎี Electric Double Layer ไอออนบวกที่ชั้นในสุดที่ล้อมรอบคอลลอยด์ไว้จะไม่สามารถเข้าไปชิดที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ เนื่องจากไอออนบวกจะมีโมเลกุลของน้ำล้อมอยู่ ทำให้มีระยะห่างระหว่างผิวของอนุภาคคอลลอยด์และจุดศูนย์กลางของไอออนบวกชั้นในสุดนี้ เสมือนมีเปลือกบางๆ ห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์อยู่ เรียกชั้นนี้ว่า Fixed Layer หรือ Stern Layer โดยเรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งนี้ว่า Stern Potential ส่วนเปลือกชั้นนอกเริ่มจากเปลือกชั้นในไปถึงตำแหน่งที่อนุภาคคอลลอยด์หมดอำนาจไฟฟ้า เรียกชั้นนี้ว่า Diffuse Layer หรือ Gouy Layer นอกจากนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ผิวนอกสุดของน้ำที่เคลื่อนที่ไปพร้อม

กับอนุภาคคอลลอยด์เรียกว่า Plane of Shear ตำแหน่งของ Plane of Shear ไม่เป็นที่ทราบแน่นอนอยู่นอก Stern Layer และอยู่ใน Diffuse Layer และเรียกศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งนี้ว่า Zeta Potential ( $Z_p$ ) ค่าศักย์ไฟฟ้านี้เป็นตัวบ่งบอกถึงระดับเสถียรภาพของคอลลอยด์ โดยคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูงจะมีแรงผลักระหว่างอนุภาคสูงและมีค่า Zeta Potential สูงด้วย ในทางตรงกันข้ามคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพต่ำจะมีค่า Zeta Potential ต่ำและสามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนได้ง่าย

#### 2.10.5 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (Colloid Destabilisation)

แรงที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคคอลลอยด์มีแรงสำคัญ 2 ชนิด คือ 1) แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เรียกว่า van der Waals Force เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กันเป็นแรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของอนุภาคขนาดเล็กและโมเลกุล และ 2) แรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือค่า Zeta Potential ผลลัพธ์ของแรงทั้งสองจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค แรงดึงดูดจะมีอำนาจมากกว่าแรงผลักเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมาก ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงผลของแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เทียบกับระยะทาง (Bratby, 2006)

การที่คอลลอยด์หรือความขุ่นไม่สามารถตกตะกอนออกจากน้ำได้เองเรียกว่าคอลลอยด์มีเสถียรภาพสูง หากต้องการกำจัดคอลลอยด์ออกจากน้ำจะต้องทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยการทำให้อนุภาคคอลลอยด์เข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันมาก จนเกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคมากกว่าแรงผลักร ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพ เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน มีขนาดและน้ำหนักมากขึ้น และไม่สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ กลไกในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มี 4 แบบ คือ

#### 2.10.5.1. การลดความหนาของชั้นกระจาย

การเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับประจุคอลลอยด์เป็นการเพิ่มจำนวน Counter Ion ในชั้นกระจายที่อยู่โดยรอบคอลลอยด์ส่งผลให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและทำให้ Zeta potential ลดลงตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนอนุภาคบวกรอบๆ ผิวของคอลลอยด์ทำให้อำนาจของประจุลบของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม

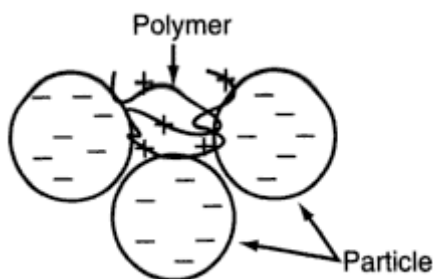
#### 2.10.5.2. การดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์

วิธีนี้เป็นการเติมสารเคมีที่มีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับประจุของคอลลอยด์ลงไปในน้ำ ทำให้เกิดการดูดติดผิวกับคอลลอยด์ ทำให้อำนาจศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ลดลงและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ วิธีนี้จะใช้ไอออนต่างประจุที่เติมลงไปน้อยกว่าวิธีการลดความหนาของชั้นกระจายเพราะเป็นการเข้าไปดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ข้อเสียสำหรับกลไกการดูดติดผิวคือ หากเติมไอออนต่างประจุนี้ลงไปมากเกินไป จะทำให้คอลลอยด์ถูกเปลี่ยนประจุกลายเป็นประจุตรงกันข้ามได้ เสถียรภาพของคอลลอยด์ก็จะฟื้นฟูสภาพขึ้นมาใหม่

#### 2.10.5.3. การเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึกสารประกอบ

การเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปลงในน้ำในปริมาณที่พอเพียงจะทำให้เกิดการตกผลึกได้อย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์จะเป็นแกนในผลึกเพื่อทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรือคอลลอยด์อาจจับตัวรวมกับผลึก วิธีนี้เป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ทำให้คอลลอยด์เสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ กลไกนี้ขึ้นกับค่าพีเอชเนื่องจากความสามารถในการตกผลึกของสารจะมีระดับพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน การสร้างแกนตะกอนเพื่อให้เกิดความขุ่นโดยใช้สารส้ม และสารประกอบอื่นๆ จะใช้กลไกแบบนี้





รูปที่ 2.9 แสดงการทำงานของพอลิเมอร์ในกระบวนการพอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม  
(Bratby, 2006)

#### 2.10.5.4. การใช้สารพอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม

สารพอลิเมอร์เป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ อาจจะมีประจุหรือไม่มีก็ได้ พอลิเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้ อนุภาคที่มีพอลิเมอร์เกาะติดอยู่ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่เสถียรภาพแล้ว อนุภาคนี้สามารถจับตัวกับอนุภาคอื่นได้โดยมีพอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม การเชื่อมต่อดังกล่าวพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้ต่อไปเรื่อยๆ หากมีพอลิเมอร์และมีที่ว่างบนผิวของคอลลอยด์จะทำให้ได้เม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่และหนักพร้อมที่จะตกตะกอนออกจากน้ำดังรูปที่ 3.5

#### 2.10.6 การสร้างแกนตะกอน (Coagulation)

การสร้างแกนตะกอนเป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคความขุ่นที่อยู่ในน้ำเสถียรภาพและจับตัวกันเกิดเป็นเม็ดตะกอน การสร้างแกนตะกอนทำได้โดยการเติมสารเคมี เช่น สารส้ม ลงไปในน้ำ และผสมกันอย่างทั่วถึงและรวดเร็ว สารส้มจะเกิดปฏิกิริยาเคมีในน้ำและทำให้เกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้น กลไกหลักที่เกิดขึ้นในการทำโคแอกกูเลชันของน้ำธรรมชาติด้วยสารส้มหรือสารประกอบเหล็ก คือ กลไกแบบ Sweep Flocculation และกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ ส่วนจะเป็นกลไกใดนั้นขึ้นกับปริมาณของสารที่เติมลงไปและขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ

#### 2.10.7 สารโคแอกกูแลนต์

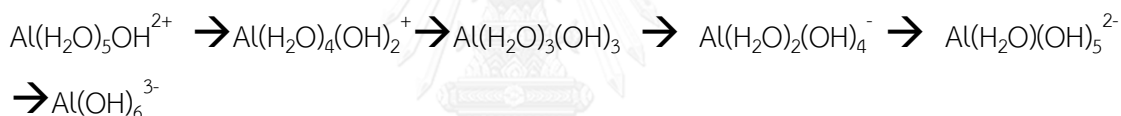
สารที่นำมาใช้ในกระบวนการสร้างแกนตะกอนหรือกระบวนการโคแอกกูเลชันเรียกว่าโคแอกกูแลนต์ เป็นสารที่ให้อนุภาคที่มีประจุบวก ซึ่งสามารถจับกับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุลบทำให้คอลลอยด์เสถียรภาพได้ แบ่งออกเป็นสารเคมีและสารอินทรีย์ ในสารเคมีนิยมใช้เกลือของธาตุอะลูมิเนียม และเกลือของธาตุเหล็กโดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.10.7.1 สารส้ม

สารส้มเป็นสารประกอบของอลูมิเนียม เรียกว่า Aluminum Sulfate หรือ Alum มีสูตรทางเคมีคือ  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$  เป็นสารโคแอกกูแลนซ์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่างๆ หาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก เมื่อสารส้มละลายน้ำจะมีการแตกตัวของไอออนดังนี้



สารส้มที่ละลายน้ำแตกตัวได้เป็นไอออนบวกของโลหะอลูมิเนียมที่มีประจุ +3 ซึ่งจะรวมอยู่กับน้ำ ไม่สามารถอยู่ในรูปอิสระได้ โดยจะอยู่ในรูปของ  $Al(H_2O)_6^{3+}$  เรียกไอออนที่ประกอบด้วยโลหะและน้ำว่า Aquametal Ion เรียกโมเลกุลของน้ำว่า Ligand เนื่องจาก  $Al^{3+}$  มีอำนาจเป็นกรดที่ทำให้  $H^+$  จึงพร้อมที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ดังนี้

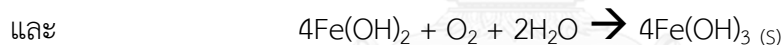


ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นต่อเนื่อง โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (OH-) ประจุบวกลดลงเรื่อยๆ จนหมดและกลายเป็นประจุลบ แต่ไอออนที่เป็นประจุลบจะไม่ช่วยให้เกิดโคแอกกูแลชันเนื่องจากมีประจุลบเช่นเดียวกับอนุภาคคอลลอยด์ จะเห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะได้  $H^+$  เพิ่มขึ้นจึงทำให้พีเอชของน้ำลดลง ดังนั้นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องเมื่อน้ำต้องมีค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) อย่างเพียงพอ เพื่อมาจับตัวกับ  $H^+$  ที่เกิดขึ้น ปฏิกิริยาเคมีในการละลายของสารส้มในน้ำธรรมชาติจะเกิดการทำให้ปฏิกิริยาของสารส้มกับ  $HCO_3^-$  ในน้ำธรรมชาติ จะเกิดแกนตะกอนของ  $Al(OH)_3$  และเกิด  $CaSO_4$  ซึ่งเป็นความกระด้างถาวร รวมทั้ง  $CO_2$  ที่เกิดขึ้นจะทำให้น้ำมีสภาพกรดมีค่าพีเอชลดลงเล็กน้อย ช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการทำงานของสารส้มอยู่ระหว่าง 6.8 ถึง 8.2 สารส้มสร้างกลไกแบบ Sweep Flocculation โดยการสร้างผลึก  $Al(OH)_3$  ซึ่งเป็นผลึกที่มีลักษณะเป็นปุย จะสัมผัสกับอนุภาคคอลลอยด์และเกาะจับกันจนเป็นเม็ดตะกอน

### 2.10.7.2 สารประกอบเหล็ก

สารประกอบเหล็กที่นิยมใช้เป็นสารโคแอกกูแลนต์ได้แก่ เฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) เฟอร์ริกซัลเฟต ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) และเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) การใช้สารประกอบเหล็กเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่มีข้อดีคือช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการใช้งานกว้างกว่าสารส้ม ค่าพีเอชใช้งานอยู่ระหว่าง 4 ถึง 11 และเมื่อดตะกอนที่เกิดขึ้นมีน้ำหนักมากกว่าการใช้สารส้ม สารประกอบเหล็กมีรายละเอียดของปฏิกิริยาดังสมการ

เฟอร์รัสซัลเฟต หรือเรียกว่า คอปเปอร่า ใช้แทนสารส้มได้อย่างดี โดยมีปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์รัสซัลเฟตกับปูนขาว และปฏิกิริยาต่อเนื่องออกซิเจนดังสมการ ผลึกของ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  มีเนื้อแน่นและตกตะกอนได้ดี แต่ต้องมีการควบคุมปริมาณปูนขาวให้เพียงพอ หากมีปริมาณปูนขาวมากเกินไปอาจมีการตกผลึกของปูนขาวในท่อจ่ายน้ำ ทำให้เกิดหินปูนตกผลึกได้ง่าย เฟอร์รัสซัลเฟตจึงเหมาะสำหรับใช้กับน้ำธรรมชาติที่มีความเป็นด่างพอเพียง ทำให้ไม่ต้องเติมปูนขาวลงไป



เฟอร์ริกคลอไรด์ ในกรณีที่เป็นน้ำอ่อนการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์จะให้ผลดีกว่าสารส้ม และสามารถเกิดโคแอกกูแลชันกับน้ำที่มี  $\text{H}_2\text{S}$  ได้ดี ปฏิกิริยาของเฟอร์ริกคลอไรด์กับความเป็นด่างและปฏิกิริยาในน้ำจะเกิดผลึกเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  เกิดดังสมการ



### 2.10.7.3 พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

นอกจากสารส้มแล้วปัจจุบันมีสารเคมีที่นิยมใช้กันมากคือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly-Aluminum Chloride) หรือ PAC ซึ่งเป็นเกลืออะลูมิเนียมที่มีสูตรเคมีคือ  $(\text{Al}(\text{OH})_n \text{Cl}_{6-n})_m$  และ  $\text{Al}_n(\text{OH})_m \text{Cl}_{3n-m}$  เป็นสารประเภทพอลิอนินทรีย์เกิดจากการรวมตัวของโมเลกุลใหญ่ เช่น  $(\text{Al}_6(\text{OH})_{15})^{3+}$  เป็นต้น สารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีความเป็นเบสแรงและมีประจุไฟฟ้าบวก ลักษณะ

ทั่วไปของสารพอลิลูมิเนียมคลอไรด์อาจอยู่ในรูปของสารละลายใสหรือขุ่นเล็กน้อยและอาจอยู่ในรูปของผงละเอียดสีขาวหรือสีเหลืองอ่อน

ข้อพิจารณาในการเลือกใช้สารพอลิลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ในการผลิตน้ำประปา คือ

- มีขนาดโมเลกุลใหญ่ มีแกนตะกอนหลายขนาด ใช้เติมในปริมาณน้อยกว่าสารส้ม เกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโคแอกกูแลชั่นได้เร็ว ไม่จำเป็นต้องใช้สารอื่นช่วยให้เกิดโคแอกกูแลชั่น ใช้งานได้ในช่วงพีเอชที่กว้าง 5 ถึง 10 และไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำ

- ให้เม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่และหนักกว่าตะกอนจากการใช้สารส้ม เกิดการตกตะกอนได้ง่าย ทำให้สามารถใช้ถึงตกตะกอนที่เล็กลงได้ ตะกอนที่หลุดล้นไปจากถังตกตะกอนมีปริมาณน้อยลง ทำให้ไม่ต้องล้างย้อนถังกรองบ่อย

- ได้ปริมาตรของตะกอนกันถึงน้อยลง ไม่ต้องล้างทำความสะอาดถังบ่อย

- สารพอลิลูมิเนียมคลอไรด์มีราคาแพง

#### 2.10.7.4 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์หลายชนิดสามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ได้ เรียกว่าสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ และในบางกรณีใช้เป็นทางเลือกเพื่อลดปัญหาจากการใช้สารเคมีในปริมาณมาก ตัวอย่างสารจากธรรมชาติที่ใช้เป็นโคแอกกูแลนต์หรือสารช่วยโคแอกกูแลนต์ได้แก่ เซลลูโลสจากเมล็ดพืช เช่น มะรุม เม็ดมะขาม กระเจี๊ยบ เป็นต้น และสารประกอบจากเปลือกของสัตว์เปลือกแข็ง เช่น ไคโทซาน เป็นต้น

#### 2.10.8 โคแอกกูแลนต์เอต

สารที่ช่วยทำให้กระบวนการโคแอกกูแลชั่นมีประสิทธิภาพดีขึ้นและได้ตะกอนที่ตกตะกอนได้ดี เรียกว่า โคแอกกูแลนต์เอต ตัวอย่างของโคแอกกูแลนต์เอต ได้แก่ สารอินทรีย์ธรรมชาติ สารอินทรีย์สังเคราะห์ ดินเหนียว ปูนขาว เป็นต้น โคแอกกูแลนต์เอตไม่ใช่สิ่งจำเป็นเสมอไป แต่ใช้ในกรณีที่การใช้โคแอกกูแลนต์เพียงอย่างเดียวอาจสิ้นเปลืองมากหรือให้ประสิทธิภาพได้ไม่เต็มที่ เช่น กรณีที่น้ำขุ่นมาก และการใช้โคแอกกูแลนต์ในปริมาณมากอาจทำให้น้ำประปามีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมได้

### 2.10.8.1 สารพอลิอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์

สารอินทรีย์สังเคราะห์ที่นิยมใช้เป็นโคแอกกูแลนต์เอ็ดเรียกว่า พอลิเมอร์ หรือ พอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) สารพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสะพานเชื่อมให้อนุภาคคอลลอยด์จับตัวกันเป็นตะกอนตามกลไก Bridging สารชนิดนี้สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ก็ได้ แต่เนื่องจากมีราคาแพงกว่าสารส้มหรือโคแอกกูแลนต์อื่นมาก ในทางปฏิบัติจึงใช้พอลิเมอร์เป็นโคแอกกูแลนต์เอ็ด ลักษณะสำคัญของพอลิเมอร์จะต้องมีขนาดใหญ่หรือมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพื่อทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคความขุ่นต่างๆ ต้องมีความแข็งแรงในการยึดเกาะและมีความต้านทานการปั่นป่วนในน้ำได้

### 2.10.8.2 สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ธรรมชาติ

สารพอลิอิเล็กโทรไลต์จากธรรมชาติได้จากเมล็ดพืชชนิดต่างๆ รวมถึงโคโทซาน การใช้สารอินทรีย์จากธรรมชาติในกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีข้อดีข้อเสียที่ควรพิจารณาดังนี้

- มีความเหมาะสมในการนำมาใช้กับประเทศไทย เนื่องจากเป็นสารที่ได้จากพืชและสัตว์ที่สามารถผลิตได้ในบางประเทศ

- ทำให้เกิดตะกอนที่ย่อยสลายได้ และไม่เกิดปัญหาจากการใช้สารเคมีตกค้างในน้ำ

- เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ อาจกลายเป็นอาหารของแบคทีเรียในน้ำ เมื่อใช้ในการผลิตน้ำประปา ทำให้มีการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในน้ำมากขึ้น

- พอลิอิเล็กโทรไลต์จากธรรมชาติจากพืชบางชนิดที่ใช้เป็นอาหารหรือยาของคนและสัตว์หากมีการนำมาใช้เป็นสารโคแอกกูแลนต์ปริมาณมากเกินไปอาจทำให้เกิดการขาดแคลนได้

- คุณภาพของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์จากธรรมชาติจะเสื่อมสภาพลงตามเวลา จึงไม่เหมาะที่จะเก็บสำรองไว้ในปริมาณมากเป็นเวลานาน

- อาจมีข้อจำกัดในการผลิตในแต่ละท้องถิ่นและตามฤดูกาล ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้งานได้

สารโคแอกกูแลนต์เอ็ดชนิดอื่น

สารชนิดอื่นที่ใช้เป็นโคแอกกูแลนท์เอตได้ เช่น แอคติเวตเต็ดซิลิกา ใช้ในกรณีที่มีน้ำมีความขุ่นน้อย ใช้เติมในน้ำดิบก่อนที่จะเติมสารส้ม เพื่อให้แอคติเวตเต็ดซิลิกาเป็นเป่าสัมผัสกับสารโคแอกกูแลนท์ให้เกิดเม็ดตะกอนที่มีน้ำหนักและตกตะกอนได้ง่าย ไม่ควรเติมแอคติเวตเต็ดซิลิกาพร้อมกันกับสารส้ม เพราะจะทำให้ปฏิกิริยากันเองจนเป็นกลาง ไม่เกิดประโยชน์ในด้านโคแอกกูเลชัน การเติมดินเหนียว เช่น ดินขาว หรือเบนทอไนต์ ลงไปในน้ำเพื่อเป็นเป่าสัมผัสก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับแอคติเวตเต็ดซิลิกา

ข้อพึงระวังในการใช้โคแอกกูแลนท์เอตคือ ไม่ควรเติมโคแอกกูแลนท์เอตลงไปพร้อมกับสารส้ม เพราะจะทำให้สารส้มสูญเสียประสิทธิภาพได้ สารที่ใช้เป่าในการสัมผัสต้องเติมก่อนการเติมสารส้ม การเติมพอลิอิเล็กโทรไลต์ในปริมาณมากทำให้ถังกรองอุดตันเร็วขึ้น การใช้งานพอลิอิเล็กโทรไลต์ต้องมีการควบคุมอย่างใกล้ชิด และในบางประเทศไม่อนุญาตให้ใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ในการผลิตน้ำดื่ม

#### 2.10.9 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างแกนตะกอน

การกำจัดความขุ่นออกจากน้ำโดยกระบวนการสร้างแกนตะกอนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

- ชนิดของคอลลอยด์ที่ไม่ชอบน้ำจะถูกกำจัดออกจากน้ำได้ง่ายกว่าคอลลอยด์ชนิดชอบน้ำ
- อุณหภูมิ น้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนืดต่ำกว่าน้ำที่อุณหภูมิต่ำ และจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ
- พีเอชปฏิกิริยาเคมีของโคแอกกูแลนท์แต่ละชนิดจะเกิดในช่วงพีเอชที่แตกต่างกัน เช่น สารส้มจะเกิดปฏิกิริยาในช่วงพีเอชระหว่าง 6.5-8.0 และเพอริกคลอไรด์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีในช่วงพีเอชระหว่าง 5-11 ซึ่งเป็นช่วงที่กว้างกว่าสารส้มเป็นต้น
- ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำ น้ำควรมีความเป็นด่างเพียงพอสำหรับทำปฏิกิริยากับโคแอกกูแลนท์ ถ้าน้ำมีความเป็นด่างต่ำอาจต้องเติมปูนขาวหรือสารอื่นเพื่อปรับสภาพน้ำด้วย
- ประเภทของโคแอกกูแลนท์ และอัตราการใช้สารแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน จำเป็นต้องทราบสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาของสารนั้นด้วย

## 2.11 แบบจำลองพื้นที่ผิวตอบ (Response Surface Methodology) (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา , 2551)

แบบจำลองพื้นที่ผิวตอบเป็นการรวบรวมวิธีการเฉพาะทางคณิตศาสตร์และทางสถิติเพื่อสร้างสูตรสำเร็จสำหรับแบบจำลองเพื่อวัตถุประสงค์ที่จะได้ผลลัพธ์ตอบสนอง (Response) ที่เหมาะสมที่สุด โดยผลลัพธ์ตอบสนองนี้ขึ้นกับตัวแปรอิสระหลายชนิด และจากชุดการทดลองที่ต่อเนื่องกันเพื่อจะทดสอบผลของการเปลี่ยนไปของตัวแปรอิสระที่มีต่อผลลัพธ์ตอบสนอง เป้าประสงค์หลักของแบบจำลองพื้นที่ผิวตอบคือลดค่าใช้จ่ายในการทำการทดลองและลดผลของความผิดพลาดจากการทดลอง

หลักการสำคัญของการทำพื้นที่ผิวตอบมีดังนี้

- 1) การทดลองจะต้องมีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 2 ตัวขึ้นไป และต้องมีตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัวขึ้นไป
- 2) ทั้งตัวแปรอิสระและตัวแปรควบคุมนั้นจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ
- 3) การเลือกช่วงของตัวแปรอิสระที่ทำการทดลองต้องครอบคลุมพื้นที่ผิวที่ต้องการศึกษา
- 4) เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสม ได้แก่ แบบจำลองแบบ Linear model, Interaction model และ Quadratic model นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปสร้างกราฟพื้นที่ผิว 3 มิติ โดยเลือกแบบจำลองทางสถิติที่เหมาะสม ได้แก่ Factorial Design, Central Composite Design (CCD),
- 5) วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ได้แก่ ค่า r-square, p-value, F-value, significance level
- 6) เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมแล้วทำการทดลองที่ค่าที่เหมาะสมเพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ

แบบจำลองแบบเชิงเส้น (Linear model)

Linear effect :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + e$$

แบบจำลองสมการกำลังสอง

Quadratic effect : 
$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_{11}X_1^2 + e$$

แบบจำลองแบบผลกระทบต่อกัน

Interaction effect : 
$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + e$$

ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองหนึ่งเขียนได้ดังนี้

$$Y = a_0 + \sum a_iX_i + \sum a_{ij}X_iX_j + \sum a_{ii}X_i^2 + e$$

### 2.11.1 Factorial Design

แผนการทดลองแบบ Factorial design เป็นการออกแบบชุดการทดลองที่เรียบง่าย เมื่อผลตอบสนองมีลักษณะที่เป็นพื้นผิวเรียบไม่มีโค้งเว้าการประมาณแบบ two-level factorial ซึ่งใช้ผลการทดลองเป็นจำนวน  $2^n$  เมื่อ n เป็นจำนวนของตัวแปรอิสระ ก็เพียงพอแล้วสำหรับการหาพื้นที่ผิวตอบ แต่ในกรณีที่พื้นที่ผิวตอบมีความซับซ้อนและโค้งเว้ามากแบบจำลองแบบ two-level factorial ไม่เพียงพอที่จะหาพื้นที่ผิวตอบที่เป็นจริงได้จึงต้องใช้ในการประมาณแบบ three-level factorial ซึ่งใช้ผลการทดลองเป็นจำนวน  $3^n$  โดยเมื่อ n มีจำนวนที่มากขึ้นจะพบว่าจำนวนการทดลองเพิ่มขึ้นสูงมาก ทำให้การทดลองสำหรับจำนวนตัวแปรอิสระหลายตัวไม่นิยมใช้การประมาณแบบ three-level factorial โดยจำนวนชุดการทดลองแบบ Factorial design เป็นดังนี้

ตารางที่ 2.7 แสดงชุดการทดลองสำหรับแบบจำลองแบบ Factorial design

จำนวนตัวแปรอิสระ = n	2	3	4	5
จำนวนตำแหน่งการทดลองของ two-level factorial	4	8	16	32
จำนวนตำแหน่งการทดลองของ three-level factorial	9	27	81	729

### 2.11.2 Central Composite Design (CCD)

แผนการทดลองของแบบจำลอง CCD จะคล้ายคลึงกับแบบจำลองแบบ Factorial design แต่จะมีตำแหน่งการทดลองที่เพิ่มขึ้นมาอีก 4 ตำแหน่งในแนว  $+\alpha$  หรือ  $-\alpha$  ในแนวแกน  $(+\alpha, 0)$   $(-\alpha, 0)$   $(0, +\alpha)$   $(0, -\alpha)$  และตำแหน่งกึ่งกลางอีก 1 ตำแหน่งคือ  $(0, 0)$  ทำให้การทดลองแบบ CCD



แบบตัวแปรอิสระ 2 ค่า จะมีตำแหน่งที่เพิ่มจาก  $2^2$  ไปอีกทั้งหมด 5 ค่า โดยจำนวนการทดลองของแบบจำลองแบบ CCD สามารถแสดงได้ดังตาราง

ตารางที่ 2. 8 แสดงชุดการทดลองสำหรับแบบจำลองแบบ Central composite design

จำนวนตัวแปรอิสระ = n	2	3	4	5
จำนวนตำแหน่งการทดลองทั้งหมดของ CCD	9	15	25	43
ค่าของ $\alpha = 2^{n/4}$	1.4142	1.6818	2.0	2.4784

### 2.11.3 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

การวิเคราะห์แบบจำลองแบบพหุคูณที่ผิวตอบแบบหลายตัวแปรในรูปแบบหลายตัวแปรได้แก่  $Y = a_0 + \sum a_i X_i + \sum a_{ij} X_i X_j + \sum a_{ii} X_i^2 + e$  เมื่อ Y คือผลตอบที่ทำนายโดยแบบจำลอง สมการถดถอยของสมการทำนายผลตอบนี้ถูกคำนวณด้วยวิธี Multiple Linear Regression (MLR) ได้แก่โปรแกรม ANOVA เพื่อลดให้ผลรวมของกำลังสองของข้อมูลที่ค่าน้อยที่สุด (Least square estimations) โดยคำนวณจากสมการดังนี้

$$\bar{b} = (\bar{X}^T \bar{X})^{-1} \bar{X}^T \bar{Y}$$

เมื่อ  $\bar{b}$  = เวกเตอร์ ( $u \times 1$ ) ของสมการถดถอย

$\bar{X}$  = เวกเตอร์ ( $N \times u$ ) ของตัวแปรอิสระ

$\bar{Y}$  = เวกเตอร์ ( $N \times 1$ ) ของผลการทดลองที่สอดคล้องกับการออกแบบการทดลอง

N = จำนวนการทดลองทั้งหมด

u = คือจำนวนของตัวแปรสมการถดถอยทั้งหมดในแบบจำลองพหุคูณที่ผิวตอบ

โดยทำการทดสอบตัวแปรของสมการถดถอยโดยใช้ Student's t-test เพื่อตรวจสอบระดับความเชื่อมั่น (Confidence level) ซึ่งหมายถึงบริเวณ  $\delta [x_j \in \delta; \delta = \{x_j | -\alpha \leq x_j \leq +\alpha\}]$  ด้วยวิธีทดสอบสมมติฐาน Hypothesis testing ที่ระดับความเชื่อมั่นปกติ  $\alpha = 0.05$  หรือตามที่กำหนดโดยตัวแปรที่ไม่สอดคล้องกับการทดสอบสมมติฐานจะถูกตัดออกไป

การแจกแจงแบบ F (F-Distribution)

การแจกแจงแบบ F (F-Distribution) เช่นเดียวกับการแจกแจงแบบ t โดยเฉพาะการทดสอบสมมติฐานของค่าเฉลี่ยหลายค่า นั้นการวิเคราะห์ความแปรปรวน และการวิเคราะห์การถดถอยสามารถใช้ตรวจสอบสมการถดถอยได้โดยเปรียบเทียบค่า F-value และ p-value ที่แสดงความเป็นไปได้ที่ความคาดเคลื่อนจากการทำนายผลของแบบจำลองจะเกิดจากความผิดพลาดจากการทดลอง เมื่อ p-value น้อยกว่า 0.05 แสดงถึงตัวแปรสมการถดถอยมีนัยสำคัญ (Significant) และเมื่อ p-value มากกว่า 0.10 แสดงถึงสมการถดถอยไม่มีนัยสำคัญ



## 2.12 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.12.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดมลสารด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

Jeong และคณะ (2009) ศึกษาการเกิดของตัวออกซิไดซ์สำคัญสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อ โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าได้แก่ คลอไรต์และออกไซด์ในรูปที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยารวมถึงเส้นทางกระบวนการเกิดของตัวออกซิไดซ์ที่เป็นไปได้ เมื่อใช้ขั้วแอโนดชนิดที่ต่างกัน ได้แก่ boron doped diamond (BDD), Ti/RuO<sub>2</sub>, Ti/IrO<sub>2</sub>, Ti/Pt-IrO<sub>2</sub> และ Pt เมื่อทำการวัดเกิดขึ้นของไฮดรอกไซด์อิสระจะพบว่า BDD >> Ti/RuO<sub>2</sub> = Pt และเกิดขึ้นน้อยมากสำหรับขั้ว Ti/IrO<sub>2</sub> และ Ti/Pt-IrO<sub>2</sub> นอกจากนี้ยังพบว่าไฮดรอกไซด์อิสระมีส่วนสำคัญในการเกิดโอโซน ส่วนการเกิดขึ้นของคลอไรต์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้ Ti/IrO<sub>2</sub> > Ti/RuO<sub>2</sub> > Ti/Pt-IrO<sub>2</sub> > BDD > Pt

Aquino และคณะ (2013) ศึกษาการกำจัดสี Disperse Orange 29 โดยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด Ti-Pt/PbO<sub>2</sub> และทำการวิเคราะห์ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าพีเอช ความเข้มข้นของเกลือ NaCl รวมถึงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการกำจัดค่าซีไอดีและความเข้มข้นของน้ำเสียโดยใช้แบบจำลองทางสถิติพื้นที่ผิวดอปเพื่อหาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมจากการศึกษาพบว่าค่าพีเอชมีความสำคัญต่อค่าใช้จ่ายในการบำบัดสีให้ได้เกิน 90% เมื่อใช้คลอไรด์ไฮดรอกไซด์ โดยค่าพีเอชในช่วงมากกว่า 8 ส่งผลต่อการบำบัดสีและใช้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดเท่ากับ 4 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตรเนื่องจากสปีดิสเพอร์สละลายน้ำได้ไม่เต็มที่เท่าที่ควร การเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 30 °C ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดลดลงเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้สปีดิสเพอร์สละลายได้ดีขึ้น ส่วนการบำบัดค่าซีไอดีพบว่าบำบัดได้ดีในช่วงพีเอชระหว่าง 3 ถึง 6.5 เนื่องจากศักยภาพในการออกซิเดชันของ HOCl มีค่าที่สูง การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้การบำบัดค่าซีไอดีเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น โดยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการบำบัดสีที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 74 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าพีเอช 6.5 ความเข้มข้นของเกลือ NaCl 1.51 กรัมต่อลิตร และอุณหภูมิ 31 °C ส่วนการบำบัดค่าซีไอดีมีสภาวะที่เหมาะสมที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 75 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าพีเอช 9.0 ความเข้มข้นเกลือ NaCl 1.71 กรัมต่อลิตรและอุณหภูมิ 35 °C

Chou และคณะ (2011) และคณะศึกษาการกำจัดสี Acid orange 7 โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่สำคัญของอิเล็กโทรดหลายชนิด ได้แก่ ACFa ACFb ACFc Pt/Ti และ Graphite พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเป็นดังนี้ ACFc > ACFb > ACFa > Pt/Ti > Graphite โดยที่ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะค่อนข้างคงที่เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่า 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพีเอชและอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การดูดซับและการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง สภาวะในการบำบัดที่ดีที่สุดของ ACFa คือที่ค่าพีเอช 9.7 และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

Andrade และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์ของสี Reactive orange 16 โดยใช้ขั้วโบรอนโดปโดมอนด์และขั้วเลดไดออกไซด์บนตัวกลางแพลตินัมไทเทเนียมโดยพบว่าในสภาวะที่ไม่เติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) พบว่าขั้วโบรอนโดปโดมอนด์มีประสิทธิภาพสูงกว่าโดย

ประสิทธิภาพการกำจัดสี 100% ใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 1.0 แอมแปร์-ชั่วโมงต่อลิตรในขณะที่ขั้วเลดไดออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดสี 85% ใช้กระแสไฟฟ้า 2.0 แอมแปร์-ชั่วโมงต่อลิตรเมื่อเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์พบว่าเวลาที่ใช้ในการบำบัดสีลดลงอย่างมากโดยเมื่อเติม NaCl 50 มิลลิโมลาร์คลอไรด์และ 35 มิลลิโมลาร์คลอไรด์สำหรับขั้วเลดไดออกไซด์และขั้วโบรอนโดปโดมอนด์จะพบว่าเวลาที่ใช้ในการบำบัดลดลงถึง 90% ที่ความหนาแน่นกระแส 50 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรการงานวิจัยสรุปว่าขั้วโบรอนโดปโดมอนด์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่าขั้วเลดไดออกไซด์

Mijin และคณะ (2012) ศึกษาการกำจัดสี Basic Yellow 28 ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและโดยการสร้างในคลอรีนในรูปที่ไวต่อปฏิกิริยาโดยใช้ขั้ว Ti/PtOx โดยทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยพบว่าที่สภาวะการบำบัดที่เหมาะสมจะมีความเข้มข้นของเกลือ NaCl เท่ากับ 20 กรัมต่อลิตรที่ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 150 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและความต่างศักย์เท่ากับ 3.35 โวลต์โดยใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1.1 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตรและพบว่าผลการกำจัดสีจะมีประสิทธิภาพดีที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 9 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 100% เนื่องจากก็มีคลอรีนในรูป HOCl เกิดขึ้นเป็นหลักที่บริเวณขั้วของอิเล็กโทรด ที่ความเข้มข้นของสีในช่วง 10-70 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถหาความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของเกลือ NaCl ว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งและมีค่าคงตัวอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.009 นาที<sup>-1</sup> และยังสรุปว่าการกำจัดสีโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นการกำจัดหมู่อะมิโนที่ทำให้เกิดสีเป็นหลัก

de Oliveira และคณะ (2011) ศึกษาการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี Methylene Blue เป็นระบบน้ำสีจำลองและทำการบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดแพลตินัมไทเทเนียม (Ti/Pt) โดยทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการบำบัดค่าทั้งค่าที่ไอซีและค่าซีโอดีโดยพบว่าผลการกำจัดสีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพการกำจัด 100% ในช่วง 150 นาทีแรกที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรแต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการกำจัดค่าซีโอดี และค่าที่ไอซีที่เวลาเดียวกันจะกำจัดได้เพียง 80% และ 25% ตามลำดับ โดยที่การกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เกิดจากการกำจัดสีส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าทั้งทางตรงและทางอ้อมเป็นหลัก โดยการ

ออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้ากำจัดเพียงหมู่โครโมฟอร์ที่ทำให้เกิดสี แต่อาจยังมีส่วนของ Aliphatic Carboxylic หลงเหลืออยู่ทำให้การกำจัดค่าซีไอดีและค่า ทีไอซีเกิดขึ้นช้ากว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลเล็กน้อยต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี การบำบัดซีไอดีและค่าทีไอซีโดยที่ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 °C เป็น 60 °C เมื่อทดลองปรับความความเร็วในการกวนจาก 300 rpm ถึง 620 rpm พบว่าการเพิ่มความเร็วรอบส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีแต่ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีและค่าทีไอซีโดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดอยู่ในช่วง 7.95 - 33.6 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตรจากการที่บำบัดได้ในอัตราไม่เท่ากันนี้ทำให้วิธีการบำบัดนี้เหมาะกับการบำบัดข้างต้น

El-Ashtoukhy และ Amin (2010) ศึกษาการกำจัดสี Acid green 50 โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า โดยใช้ขั้ว Graphite และ Stainless steel 304 สำหรับวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและใช้ขั้วอลูมิเนียมสำหรับวิธีการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบที่สภาวะที่เหมาะสมพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีของวิธีการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าเป็น 68% และ 87% ตามลำดับ การกำจัดสีของวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและวิธีการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.02 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและ 3.33 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรในการกำจัดสีให้มีประสิทธิภาพมากกว่า 90% ผลของการเติมเกลือ NaCl ส่งผลต่อวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าอย่างมากโดยเมื่อความเข้มข้นของเกลือ NaCl สูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่อวิธีการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า และนอกจากนี้พบว่าการใช้พลังงานของวิธีการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าน้อยกว่าวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยมีค่า 2.8-12.8 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัมสีที่กำจัด ในขณะที่การออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้ามีค่า 3.31-16.97 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัมสีและพบว่ากระบวนการกำจัดสีทั้งสองวิธีสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง

Zhang และคณะ (2009) ศึกษาการกำจัดสี C.I. Acid Red 2 โดยการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าควบคู่กับศึกษากลไกการเกิดการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเหล็กและทำการตรวจสอบสารละลายและตะกอนที่แยกออกเป็นสองชั้นด้วยเครื่อง UV-visible spectra ในการตรวจสอบสารละลายและ IR spectra สำหรับการตรวจสอบตะกอน พบว่ามีการเกิด

ออกซิเดชันของสี C.I. Acid Red 2 เกิดขึ้น โดยผลจากจากตรวจสอบโดย C.I. Acid Red 2 พบว่ากลุ่มของโครโมฟอร์ N=N ที่ความยาวคลื่น 215 นาโนเมตรและกลุ่มวงแหวนของเบนซีนและกลุ่มคาร์บอนิลที่ความยาวคลื่น 523 นาโนเมตรมีความเข้มข้นน้อยลงมาก เมื่อตรวจสอบ IR spectra ของตะกอนชั้นบนสุดซึ่งมีสีแดงพบว่าไม่เกิดการออกซิเดชันของสีเกิดขึ้นเกิดเพียงการรวมตัวของตะกอนสีกับ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  เท่านั้น เมื่อตรวจสอบชั้นที่สองพบว่ากลุ่มของ N=N และ C-N หายไปแต่ยังมีส่วนของวงแหวนเบนซีนเหลืออยู่แสดงให้เห็นการเกิดออกซิเดชันเกิดขึ้น เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีพบว่าที่เวลา 40 นาทีกำจัดสีได้ 98% แต่ที่เวลา 40 นาทีการบำบัดค่าซีไอดีเกิดขึ้นเพียง 33% ทำให้สรุปได้ว่าสารที่เกิดจากการออกซิเดชันของสี C.I. Acid Red 2 ไม่สามารถถูกกำจัดได้ทั้งหมดและควรจะมีการบำบัดในขั้นต่อไป

Raju และคณะ (2008) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอเส้นใยสังเคราะห์ของพอลิเอสเตอร์โดยบำบัดด้วยการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้ขั้วลุ่มิเนียมตามมาด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแล้วทำการเปรียบเทียบค่าซีไอดี ของแข็งแขวนลอย และความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่บำบัดได้ พบว่าการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้ขั้วลุ่มิเนียมสามารถลดค่าซีไอดีลงได้มากกว่า 1316 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 494 มิลลิกรัมต่อลิตรภายในเวลา 5 นาที และลดค่าของแข็งแขวนลอยได้ถึง 99% จากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 830 มิลลิกรัมต่อลิตรแต่ลดความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนเพียงเล็กน้อยจาก 922 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 850 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อมาเมื่อทำการบำบัดต่อด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างขั้ว Graphite และขั้ว  $\text{RuO}_2/\text{IrO}_2/\text{TaO}_2$  coated titanium พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ลดลงอย่างมากโดยลดจาก 850 มิลลิกรัมต่อลิตรเหลือเพียง 420 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับขั้ว Graphite และลดจาก 850 มิลลิกรัมต่อลิตรเหลือเพียง 580 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับขั้ว  $\text{RuO}_2/\text{IrO}_2/\text{TaO}_2$  coated titanium โดยการลดลงนี้สอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีที่เพิ่มสูงขึ้นแสดงถึงการเกิดคลอไรด์อิสระในการออกซิไดส์สารสีเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่การเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟาลดลง

จากที่มีค่าต่ำอยู่แล้วโดยขั้ว Graphite มีความประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าสูงสุดเพียง 45% ส่วนขั้ว RuO<sub>2</sub>/IrO<sub>2</sub>/TaO<sub>2</sub> coated titanium มีประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าสูงสุดเพียง 10%

Muthukumar และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดสี CI Acid orange 10 ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า โดยที่ทำการวิเคราะห์เพื่อหาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการรวมตะกอนและออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า โดยใช้ขั้วเหล็กเมื่อตรวจสอบความยาวคลื่นในการดูดซับจาก UV-visible spectra พบว่าที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตรความเข้มลดลงอย่างมากระหว่างกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าแสดงถึงการกำจัดโครมอฟอร์ เมื่อทดสอบโดย Chromatogram พบว่าตรงกับสาร Aniline และไม่เกิดการกำจัดสารนี้เลยในช่วง 60 นาทีซึ่งสอดคล้องกับการทดลองการบำบัดค่าทีโอซี ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเพียง 61% ทำให้สรุปได้ว่าการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าของสี CI Acid orange 10 ทำให้เกิด 1-amino-2-naphthol-6,8-disulfonic acid ซึ่งถูกกำจัดต่อไปและเกิด Aniline ที่กำจัดไม่ได้ เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีโอซี ที่ค่าพีเอช 2-11 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดที่พีเอช 7-8 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่เกิด Fe(OH)<sub>3</sub> ได้ดี เมื่อทดสอบการกำจัดสีด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าด้วยขั้ว IrO<sub>2</sub>/TaO<sub>2</sub>/RuO<sub>2</sub> coated titanium เปรียบเทียบกับขั้ว Graphite พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีโอซี ด้วยขั้ว Graphite เกิดขึ้น 100% แต่ขั้ว IrO<sub>2</sub>/TaO<sub>2</sub>/RuO<sub>2</sub> coated titanium เกิดขึ้นเพียง 60% เมื่อตรวจสอบสารละลายด้วยวิธี UV-visible spectra, IR spectra และ Chromatogram พบสารระเหยมวลโมเลกุลต่ำหลายชนิดเช่น dichloro aniline, dichlorophenol, chloroaniline เป็นต้น ผลของการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีโอซีเพิ่มขึ้นในช่วงแรกแต่คงที่เมื่อเวลาผ่านไป

Kruthika และคณะ (2013) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเจลาตินโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าตามด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า โดยการบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้ขั้วอลูมิเนียมแบบรูปแท่งในรูปทรงต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าทีโอซีเกิดขึ้นเพียง 60% และประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงอย่างมากเมื่อมีตะกอนของ CaCl<sub>2</sub> มาเกาะบนขั้วอิเล็กโทรด เมื่อทำการตกตะกอนแคลเซียมออกไป พบว่ามีประสิทธิภาพการใช้งานได้นานขึ้นมาก เมื่อทำการเพิ่มอัตราไหลจาก 1-7 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าที่อัตราไหลต่ำส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้น

ไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าที่ไอซีสูงขึ้นตาม เมื่อทำการบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบระหว่างขั้ว  $TiIrO_2-Ta_2O_5$  กับขั้ว  $TiO_2/NT$  พบว่าขั้ว  $TiO_2/NT$  มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าที่ไอซีได้สูงกว่าและกำจัดได้ถึง 80% ในขณะที่ขั้ว  $TiIrO_2-Ta_2O_5$  กำจัดได้เพียง 58% เนื่องจากการเกิดของคลอรีนอิสระเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจาก 12.5 ไปถึง 37.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ไอซีสูงขึ้น โดยจากการใช้ระบบทั้งสองร่วมกันสามารถบำบัดค่าที่ไอซีจาก 195 พีพีเอ็มลงเหลือ 12-15 พีพีเอ็มซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงมาก



### 2.12.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดมลสารด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ

Merzouk และคณะ (2011) ทำการศึกษาการจัดสีสังเคราะห์ Disperse red dye โดยเปรียบเทียบการกำจัดสีของวิธีรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าด้วยขั้วอลูมิเนียมแบบไหลต่อเนื่องกับวิธีใช้สารตกตะกอนทางเคมี โดยเมื่อทดลองผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงขึ้น โดยพบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเท่ากับ 31 มิลลิแอมแปร์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรเมื่อทดลองผลของอัตราการไหลพบว่าอัตราการไหลในช่วง 20-60 ลิตรต่อชั่วโมงไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี เมื่อทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นของสีจาก 20-200 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีในช่วงความเข้มข้นดังกล่าวค่อนข้างคงที่ การทดลองเติมเกลือ  $NaCl$  พบว่าเมื่อเติม  $NaCl$  ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงขึ้น ในการทดลองใช้สารตกตะกอนทางเคมีได้แก่  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$  กับ  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  พบว่าการตกตะกอนด้วย  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$  สามารถกำจัดสีได้โดยที่ปริมาณ  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$  มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถกำจัดสีได้ประสิทธิภาพในช่วงความเข้มข้นของสี 50-260



มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อทดลองผลของค่าพีเอชพบว่าการตกตะกอนด้วย  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$  ขึ้นกับค่าพีเอชอย่างมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของทั้งสองระบบพบว่าการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ต่ำกว่า โดยเกิดจากชนิดของสปีการละลายน้ำที่ต่ำทำให้การตกตะกอนทางเคมีมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า

Zahrim และคณะ (2011) ศึกษาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนสีจากโรงงานฟอกหนังที่มีความเข้มข้นสีสูง Durapel Black NT โดยใช้แบบจำลองพื้นผิวตอบ (Response surface methodology) โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์คือ อุณหภูมิ ค่าพีเอช และความเข้มข้นของสารส้ม (Alum sulfate) ที่ทำให้ผลตอบสนองของประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด โดยใช้แบบจำลองแบบ Central composite design เมื่อตรวจสอบความถูกต้องทางสถิติจากค่า Student's t-test พบว่าพารามิเตอร์อุณหภูมิเป็นอิสระต่อค่าพีเอช และพบว่าค่าพีเอชเป็นอิสระต่อความเข้มข้นของสารส้ม แต่ความเข้มข้นของสารส้มไม่เป็นอิสระต่ออุณหภูมิทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการละลายของสารส้ม เมื่อตรวจสอบค่า  $R^2 = 0.943$  และค่า F-value = 10.985 แสดงถึงความสอดคล้องกันระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางสถิติ เมื่อพิจารณาจากกราฟผลตอบที่ความเข้มข้นของสารส้มค่าหนึ่งจะพบว่าอุณหภูมิส่งผลกับประสิทธิภาพการบำบัดสูงมากเมื่อเทียบกับค่าพีเอช เมื่อทำการหาสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมพบว่าที่ อุณหภูมิ 40 °C ค่าพีเอช 5.61 และความเข้มข้นของสารส้ม 0.802 g/l ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดที่  $97.78 \pm 0.63$  %

Moghaddam และคณะ (2011) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสี Acid Red 119 โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของการตกตะกอนทางเคมีระหว่างพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride) และกากตะกอนพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride sludge) โดยหาสภาวะการบำบัดที่เหมาะสมโดยใช้วิธีผลตอบ (Response surface methodology) โดยใช้พารามิเตอร์ค่าพีเอช ความเข้มข้นของสารตกตะกอน และค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสี โดยเมื่อตรวจสอบด้วย Student's t-test พบว่า ค่า P-value ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีมีค่ามากกว่า 0.05 สำหรับทั้ง พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์และกากตะกอนพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ แสดงถึงความเป็นอิสระระหว่างค่าพีเอชและค่าความเข้มข้นของสี และในกรณีของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์แสดงถึงความเป็นอิสระของค่าพีเอชและความเข้มข้นของสารพอลิ

อะลูมิเนียมคลอไรด์อีกด้วย เมื่อตรวจสอบค่า  $R^2$  พบว่าเป็น 97.27% และ 94.53% สำหรับการใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์และกากตะกอนพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ตามลำดับ แสดงถึงแบบจำลองที่ใช้สามารถแทนผลการทดลองได้เป็นอย่างดี เมื่อพิจารณากราฟผลตอบแทนที่ความเข้มข้นของสีค่าหนึ่งพบว่าประสิทธิภาพการทำงานของสารตกตะกอนทั้งสองชนิดสูงสุดที่ค่าพีเอชต่ำ อาจเป็นเพราะที่ค่าพีเอชต่ำสีจะได้รับโปรตอนจากน้ำและทำให้ความแรงของประจุลบต่ำลงทำให้โมเลกุลของสีเข้าใกล้กันได้มากขึ้น เมื่อตรวจสอบผลของความเข้มข้นของสีสัมพันธ์กับปริมาณของสารตกตะกอนที่ใช้ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 พบว่าในกรณีของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์จะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้นและที่ความเข้มข้น 170 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดีตั้งแต่ความเข้มข้นสี 100-200 มิลลิกรัมต่อลิตรแสดงให้เห็นถึงกลไกการเกิด Charge neutralization Adsorption-Bridging และ Sweep flocculation ที่มีประสิทธิภาพสูง ในกรณีของกากตะกอนพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารตกตะกอนสูงขึ้นจนถึง 3.5 กรัมต่อลิตรจากนั้นจึงลดลงแสดงถึงการเกิดกลไก Sweep flocculation เนื่องจากจะเกิดลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารตกตะกอนสูง เมื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีพบว่าค่าพีเอชเท่ากับ 3.8 ความเข้มข้นของสารตกตะกอน 57 มิลลิกรัมต่อลิตรความเข้มข้นของสี 140 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3.42 ความเข้มข้นของสารตกตะกอน 4.5 กรัมต่อลิตรความเข้มข้นของสี 140 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับกากตะกอนพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสี 95.25% และ 94.1%

Moghaddam และคณะ (2010) ศึกษาการใช้กากตะกอนเฟอร์ริกคลอไรด์ในการกำจัดสี Acid Red 119 โดยมีการใช้แบบจำลองทางสถิติโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบ (Response surface methodology) ในการหา สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมในการกำจัดสีโดยใช้พารามิเตอร์คือค่าพีเอช ความเข้มข้นสีเริ่มต้นและความเข้มข้นสารตกตะกอน เมื่อตรวจสอบด้วย Student's t-test จากค่า P-value ของความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพีเอช ความเข้มข้นสารตกตะกอน และค่าความเข้มข้นของสีเริ่มต้นมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงถึงตัวแปรทุกตัวเป็นอิสระต่อกัน และเมื่อตรวจสอบค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.985 แสดงถึงความสอดคล้องกันระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางสถิติที่ใช้ จากกราฟผลตอบแทนแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเพียงเล็กน้อยส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด

เปลี่ยนแปลงอย่างมาก เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อการละลายของทั้งโลหะไฮดรอกไซด์และประจุของสาร จากกราฟผลตอบแทนพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารตกตะกอนทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นและไม่แสดงถึงการเกิดกลไก Re-stabilization เลย การแต่เกิดจากกลไก Sweep flocculation ที่ความเข้มข้นสูง จากการทดลองแสดงถึงกลไกหลักในการกำจัดสีเกิดจาก Charge neutralization เนื่องจากสีแอซิดมีหมู่ฟังก์ชันประจุลบที่จะถูกทำลายประจุโดยไอออนของโลหะได้ สถานะการดำเนินการที่เหมาะสมคือจะมีค่า พีเอชเท่ากับ 3.5 ความเข้มข้นของสารตกตะกอน 236.68 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสี 65.91 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพจากการทดลองจริงเท่ากับ 96.53% และจากการทำนายผลการทดลองเท่ากับ 100%

Furlan และคณะ (2010) ศึกษาการกำจัดสีรีสองชนิดคือ Reactive Black 5 และ Reactive Orange 16 โดยใช้การตกตะกอนด้วยสารเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ โดยผลการทดลองพบว่าที่พีเอช 6 ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของรีสองชนิดมีค่าสูงสุดโดยีประสิทธิภาพในการบำบัดสี Reactive Black 5 และ Reactive Orange 16 เท่ากับ 96.8% และ 78.2% ตามลำดับเนื่องจากสีดำที่ใช้มีหมู่ฟังก์ชันซัลโฟนิคมากกว่าสีส้ม ส่วนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ศึกษาที่อุณหภูมิ 25 °C โดยพบว่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ที่พีเอช 3 เมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิพบว่าที่อุณหภูมิสูงความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นแสดงถึงกลไกการดูดซับแบบดูดความร้อน เมื่อศึกษาผลการเติมเกลือ NaCl พบว่าความเข้มข้นของเกลือ NaCl ที่เหมาะสมเท่ากับ 6% เนื่องจากความเข้มข้นของ NaCl ที่สูงขึ้นลดประจุลบบนพื้นผิวดูดซับของถ่านกัมมันต์และทำให้โมเลกุลหมู่ฟังก์ชันสามารถยึดติดกับประจุลบของสีได้มากขึ้นกลไกการบำบัดสีสองคล้อยกับแบบจำลองแบบ Freundlich Isotherm แสดงถึงการดูดซับเกิดขึ้นหลายชั้นเมื่อทำการบำบัดร่วมกับวิธีตกตะกอนทางเคมีแล้วสามารถกำจัดสีรวมกันได้มากถึง 10



### 3.1 แผนการทดลอง

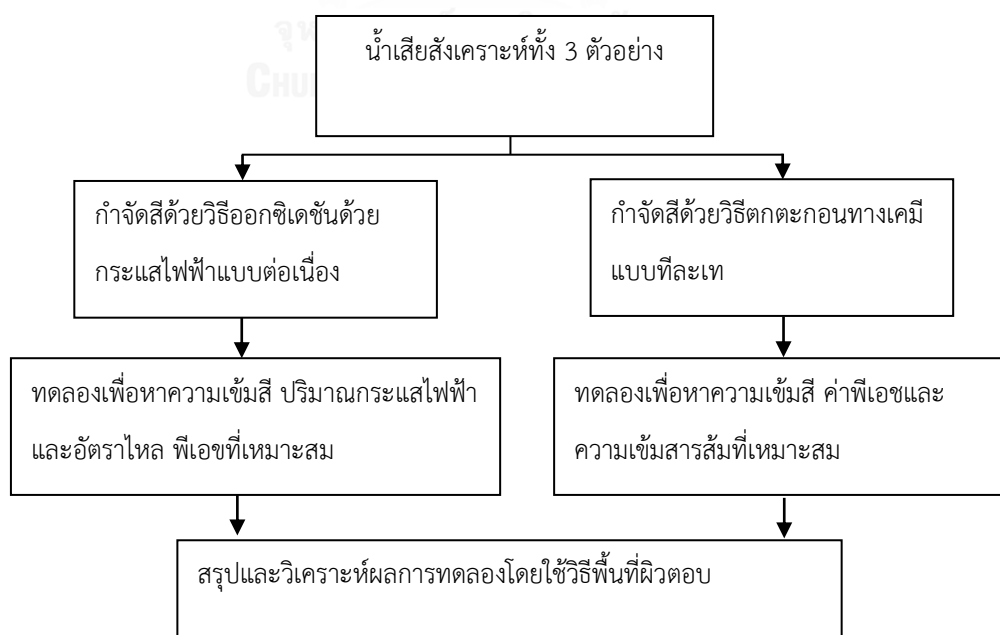
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อกำจัดสีของน้ำเสียสีสังเคราะห์ 3 ชนิด คือ สีสังเคราะห์จากสีย้อม CI Reactive Red 196 สีสังเคราะห์จากสีย้อม CI Disperse red 153 และสีสังเคราะห์จากสีย้อม CI Reactive Red 196 กับ CI Disperse red 153 ผสมกันในอัตราส่วนโดยมวลเป็นเท่ากับ 1 ต่อ 1 โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวิธีการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าที่ดำเนินการแบบต่อเนื่องและวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีโดยใช้สารส้มเป็นสารตกตะกอน ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีของน้ำเสียสีสังเคราะห์ทั้ง 3 ตัวอย่างโดยใช้วิธีการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง โดยทำการทดลองเพื่อหาค่าความเข้มข้นของสี

สังเคราะห์ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ อัตราการไหลและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์

2. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้สารส้ม ทำการทดลองเพื่อหาค่าความเข้มข้นของสีสังเคราะห์ ค่าพีเอช และค่าความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์
3. ทำการวิเคราะห์และสรุปผล โดยใช้แบบจำลองทางสถิติแบบพื้นที่ผิวผลตอบ ในการหาสถานะการดำเนินการที่เหมาะสมรวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่เหมาะสมของวิธีการบำบัดสีแต่ละวิธี

โดยแผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



### รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

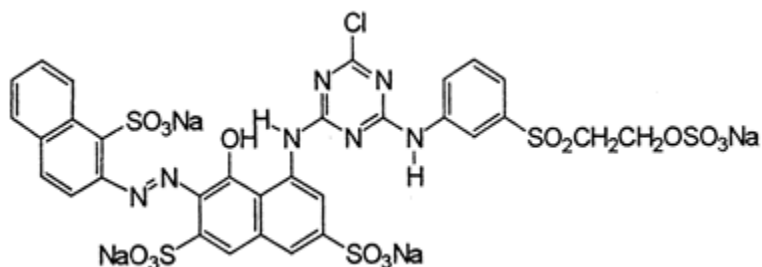
#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

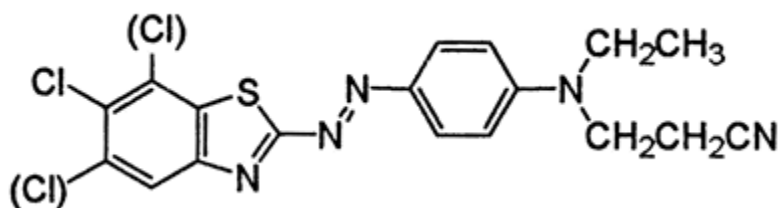
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)
2. ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองคือขั้วแพลตินัมไทเทเนียม (Platinized Titanium)
3. ถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 2 ลิตร
4. ชุดการทดลอง Jar-Test
5. เครื่องชั่งไฟฟ้า (Analytical balance)
6. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
7. เครื่องวัดการนำไฟฟ้า

#### 3.3 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง 3 ชนิดได้แก่ สีสังเคราะห์จากสีย้อม CI Reactive Red 196 สีสังเคราะห์จากสีย้อม CI Disperse red 153 และสีสังเคราะห์จากสีย้อม CI Reactive Red 196 กับ CI Disperse red 153 ผสมกันในอัตราส่วนโดยมวลเป็นเท่ากับ 1 ต่อ 1 โดยสูตรโครงสร้างและสูตรทางเคมีของสีแต่ละชนิดเป็นดังนี้



รูปที่ 3. 2 แสดงสูตรโครงสร้างของสีย้อม C.I. Reactive Red 196 ( $C_{31}H_{20}ClN_7Na_4O_{16}S_5$ )



รูปที่ 3. 3 แสดงสูตรโครงสร้างของสีย้อม C.I.Disperse red 153 ( $C_{19}H_{17}Cl_2N_5S$ )

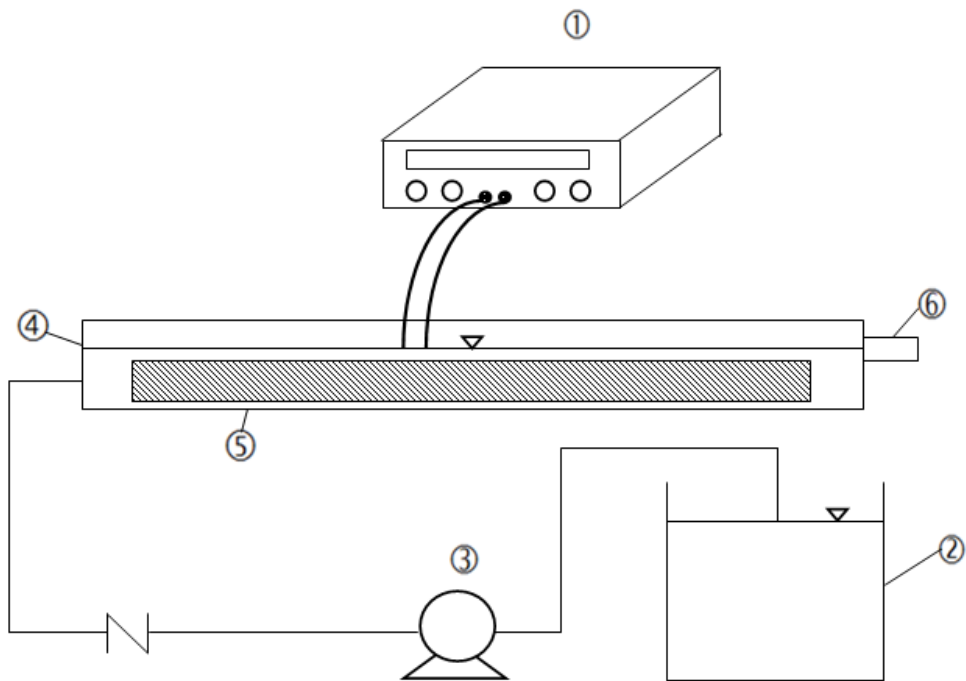
โดยสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เป็นดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดต่างๆ

ชนิดของน้ำเสียสังเคราะห์	ค่าพีเอช	เติมเกลือ NaCl (กรัมต่อลิตร)	เติมเกลือ $Na_2SO_4$ (กรัมต่อลิตร)
C.I. Reactive Red 196	6.7-6.8	0.5	0.5
C.I. Disperse Red 153	6.6-6.8	0.5	0.5
C.I. Reactive Red 196 ผสมกับ C.I. Disperse Red 153	6.7-6.8	0.5	0.5

### 3.4 ระบบออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

ระบบออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าในงานวิจัยนี้เป็นถึงปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ผลิตจากวัสดุประเภทอะครีลิก โดยมีปริมาตรใช้งานจริง 2 ลิตร และมีวาล์วสำหรับเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแล้วโดยการติดตั้งระบบออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.4



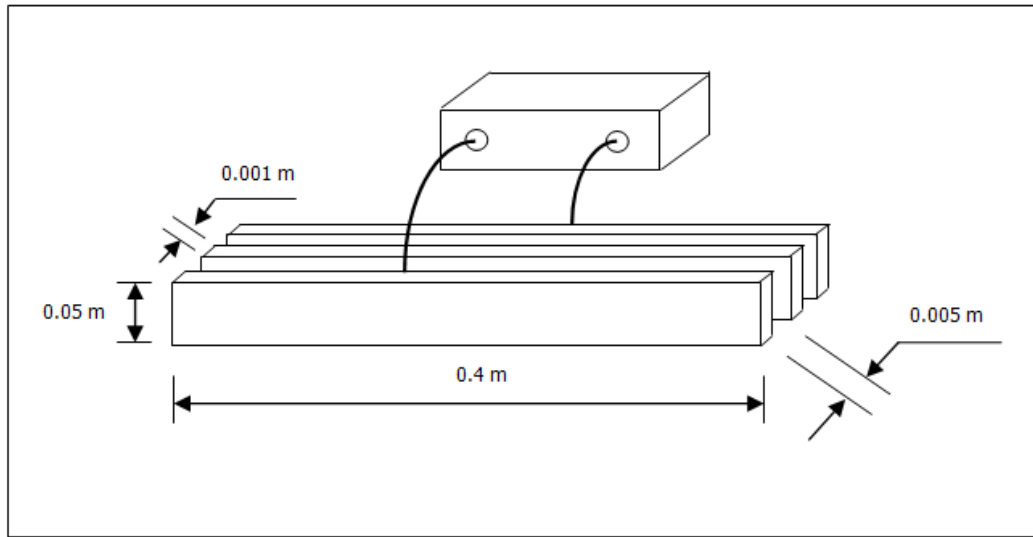
รูปที่ 3.4 ระบบออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

- |                              |                    |
|------------------------------|--------------------|
| 1. เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า   | 4. เครื่องปฏิกรณ์  |
| 2. ถังน้ำเสียสี่สี่สักระาะห์ | 5. แผ่นอิเล็กโทรด  |
| 3. ปั๊ม                      | 6. วาล์วเก็บน้ำออก |

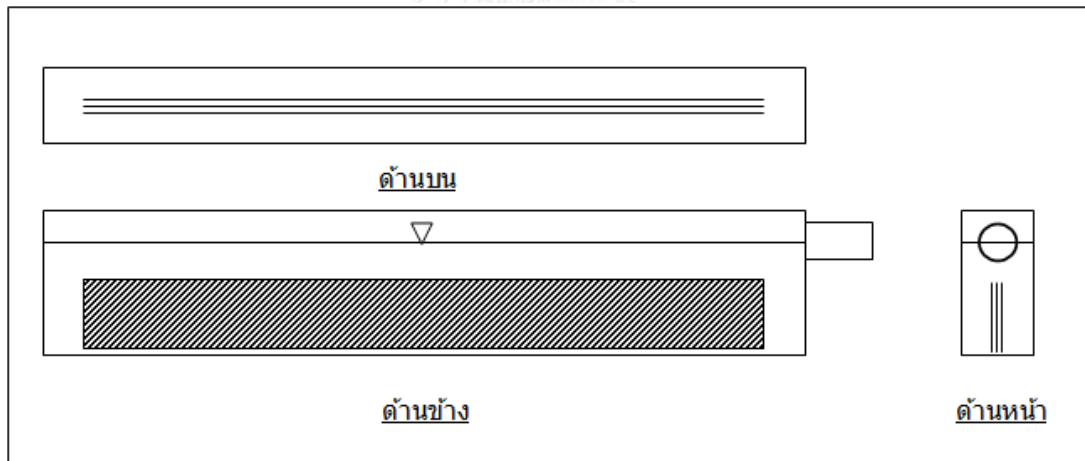
### 3.5 ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองคือขั้วชนิดแพลตินัมไทเทเนียมโดยในการทดลองจะใช้ขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $5 \times 40 \times 0.1$  เซนติเมตร จำนวน 3 ขั้ว ต่อแบบโพลาร์แบบอนุกรม และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6





รูปที่ 3.5 การจัดเรียงอิเล็กโทรดจำนวน 3 แผ่น



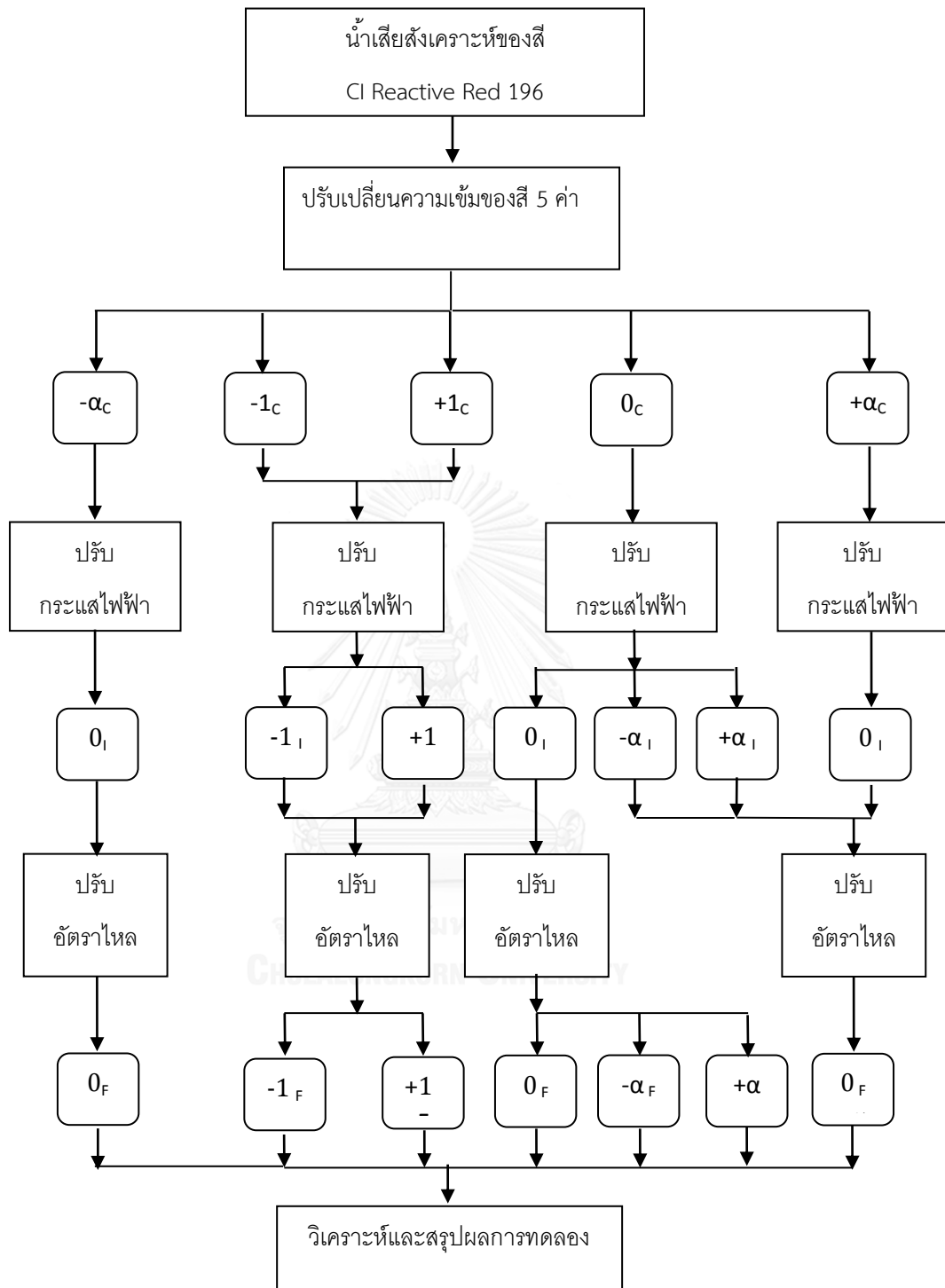
รูปที่ 3.6 การจัดเรียงขั้วอิเล็กโทรด 3 แผ่นในถังปฏิกรณ์

### 3.6 การดำเนินการทดลอง

**การทดลองที่ 1** ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า ทำการทดลองบำบัดสีน้ำเสียสังเคราะห์ CI Reactive Red 196 โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดังตารางที่ 3.2 และแผนการทดลองดังรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.2 แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 1

ตัวแปรที่ทำการปรับเปลี่ยน	รหัสที่ใช้แทนค่าที่ใช้ทำการทดลอง				
ชนิดของสี	CI Reactive Red 196				
ความเข้มข้นสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	20 ( $\alpha_c$ )	22 ( $-1_c$ )	25 ( $0_c$ )	28 ( $+1_c$ )	30 ( $+\alpha_c$ )
กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	0.5 ( $\alpha_i$ )	0.7 ( $-1_i$ )	1.0 ( $0_i$ )	1.3 ( $+1_i$ )	1.5 ( $+\alpha_i$ )
อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	10 ( $\alpha_f$ )	12 ( $-1_f$ )	15 ( $0_f$ )	18 ( $+1_f$ )	20 ( $+\alpha_f$ )



รูปที่ 3.7 ผังการทดลองที่ใช้สีชนิด CI Reactive Red 196 เพียงอย่างเดียว

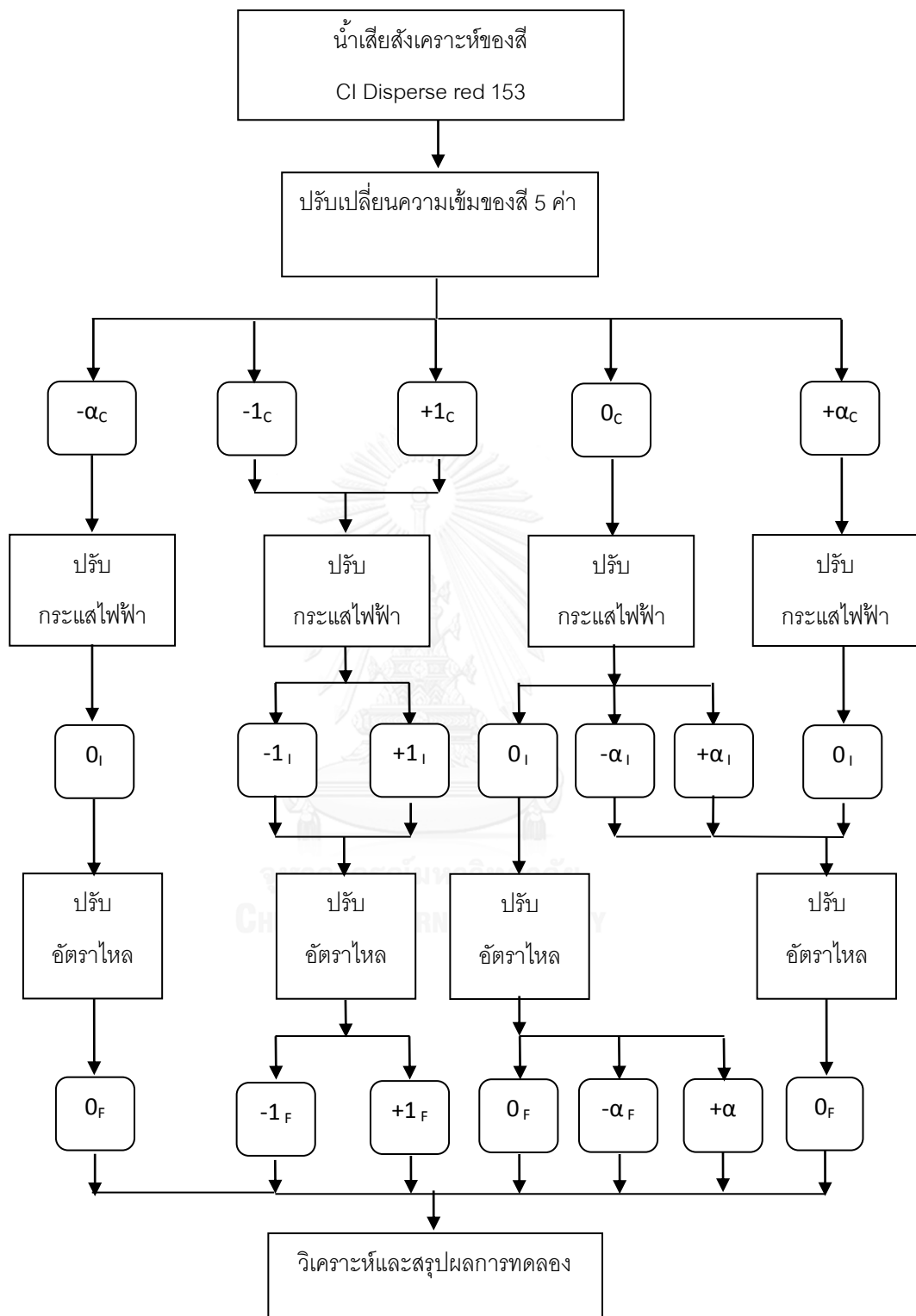
### วิธีการทดลอง

- 1) นำน้ำเสียสีสังเคราะห์ชนิดสีย้อม CI Reactive Red 196 มาปรับความเข้มข้นเป็น  $\alpha_c$  มิลลิกรัมต่อลิตรแล้วนำมาใส่ในเครื่องปฏิกรณ์
- 2) เดินระบบโดยใช้กระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ  $O_1$  แอมแปร์
- 3) ปรับอัตราไหลให้เท่ากับ  $O_F$  ลิตรต่อชั่วโมง
- 4) ทำการเก็บตัวอย่างที่เมื่อเวลาผ่านไปทุก 10 นาทีจนถึงระบบดำเนินการถึงสภาวะคงตัว (Steady state) เพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นสีในหน่วยเอตีเอ็มไอ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อกิโลกรัมสี
- 5) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 โดยเรียงลำดับตัวแปรตามรูปที่ 3.7 จนครบทุกเส้นทาง
- 6) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบเพื่อหาความเข้มข้นของสีสังเคราะห์แต่ละชนิด ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าอัตราไหลของน้ำเสียสีสังเคราะห์ที่เหมาะสม รวมถึงคำนวณหา ค่าคงที่อัตราของการบำบัด
- 7) วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดของสีย้อมแต่ละชนิดในช่วงความเข้มข้นสีค่าต่างๆ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจากวิธีพื้นที่ผิวตอบ

**การทดลองที่ 2** ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วย  
กระแสไฟฟ้า ทำการทดลองบำบัดสีน้ำเสียสังเคราะห์ CI Disperse Red 153 โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่  
 มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดังตารางที่ 3.3 และแผนการทดลองดัง  
 รูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.3 แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 2

ตัวแปรที่ทำการ ปรับเปลี่ยน	รหัสที่ใช้แทนค่าที่ใช้ทำการทดลอง				
ชนิดของสี	CI Disperse red 153				
ความเข้มข้นสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	20 ( $-\alpha_c$ )	22 ( $-1_c$ )	25 ( $0_c$ )	28 ( $+1_c$ )	30 ( $+\alpha_c$ )
กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	2 ( $-\alpha_p$ )	2.4 ( $-1_p$ )	3.0 ( $0_p$ )	3.6 ( $+1_p$ )	4 ( $+\alpha_p$ )
อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	1.4 ( $-\alpha_f$ )	1.8 ( $-1_f$ )	2.4 ( $0_f$ )	3.0 ( $+1_f$ )	3.4 ( $+\alpha_f$ )



รูปที่ 3. 8 ผังการทดลองที่ใช้สีชนิด CI Disperse red 153 เพียงอย่างเดียว

### วิธีการทดลอง

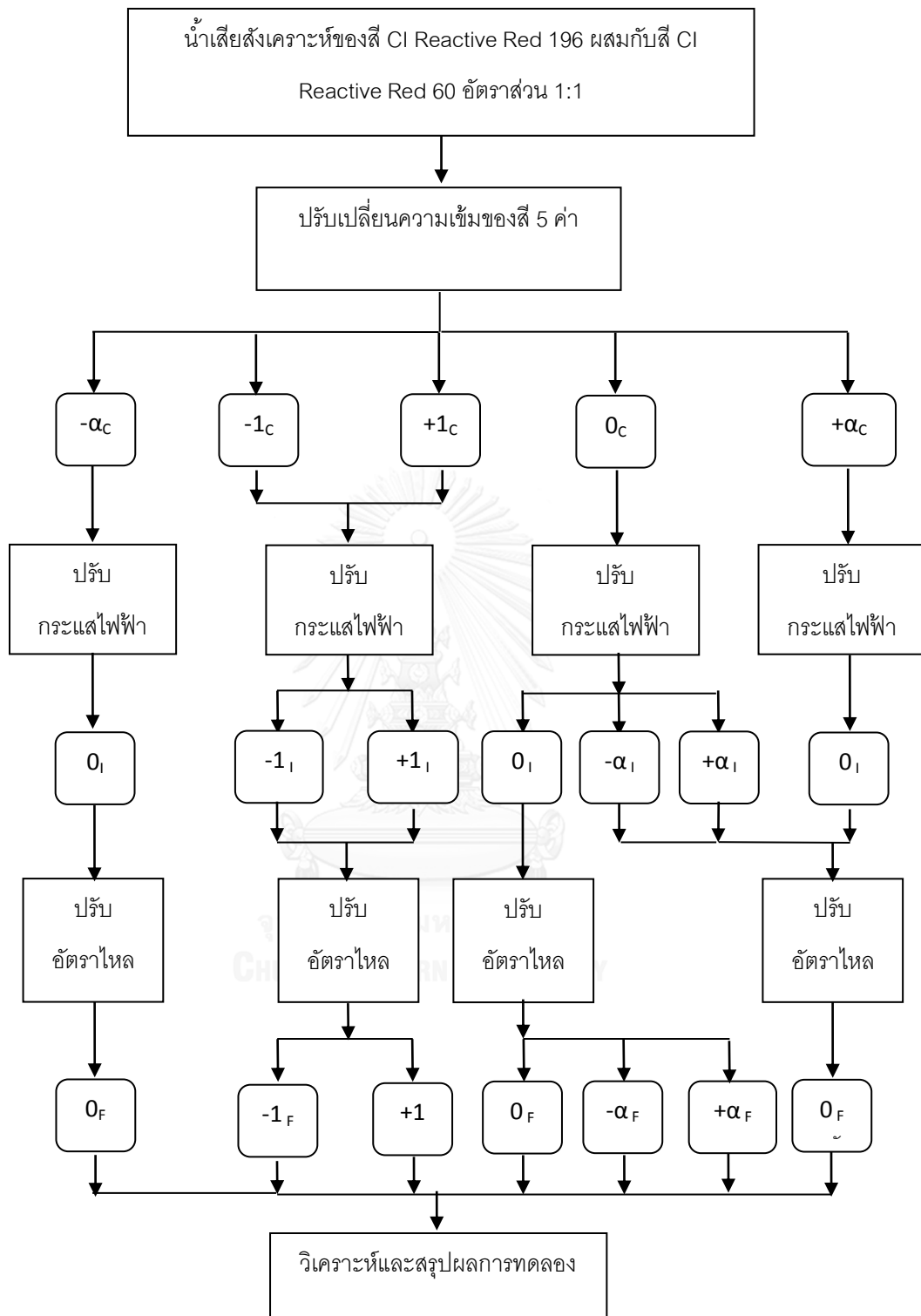
- 1) นำน้ำเสียสีสังเคราะห์ชนิดสีย้อม CI Disperse Red 153 มาปรับความเข้มข้นเป็น  $\alpha_c$  มิลลิกรัมต่อลิตรแล้วนำมาใส่ในเครื่องปฏิกรณ์
- 2) เดินระบบโดยใช้กระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ  $O_1$  แอมแปร์
- 3) ปรับอัตราไหลให้เท่ากับ  $O_F$  ลิตรต่อชั่วโมง
- 4) ทำการเก็บตัวอย่างที่เมื่อเวลาผ่านไปทุก 10 นาทีจนถึงระบบดำเนินการถึงสภาวะคงตัว (Steady state) เพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นสีในหน่วยเอตีเอ็มไอ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อกิโลกรัมสี
- 5) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 โดยเรียงลำดับตัวแปรตามรูปที่ 3.8 จนครบทุกเส้นทาง
- 6) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบเพื่อหาความเข้มข้นของสีสังเคราะห์แต่ละชนิด ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าอัตราไหลของน้ำเสียสีสังเคราะห์ที่เหมาะสม รวมถึงคำนวณหา ค่าคงที่อัตราของการบำบัด
- 7) วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดของสีย้อมแต่ละชนิดในช่วงความเข้มข้นสีค่าต่างๆ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจากวิธีพื้นที่ผิวตอบ

**การทดลองที่ 3** ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วย  
กระแสไฟฟ้า ทำการทดลองบำบัดสีน้ำเสียสังเคราะห์ CI Reactive Red 196 กับสีย้อม CI Disperse  
 red 153 ผสมกันด้วยอัตราส่วนโดยมวล 1:1 โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด  
 และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดังตารางที่ 3.4 และแผนการทดลองดังรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.4 แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 3

ตัวแปรที่ทำการ ปรับเปลี่ยน	รหัสที่ใช้แทนค่าที่ใช้ทำการทดลอง				
ชนิดของสี	CI Reactive Red 196 CI Disperse red 153 อัตราส่วน 1 ต่อ 1				
ความเข้มข้นสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	20 ( $-\alpha_c$ )	22 ( $-1_c$ )	25 ( $0_c$ )	28 ( $+1_c$ )	30 ( $+\alpha_c$ )
กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	1.0 ( $-\alpha_i$ )	1.1 ( $-1_i$ )	1.25 ( $0_i$ )	1.4 ( $+1_i$ )	1.5 ( $+\alpha_i$ )
อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	6.5 ( $-\alpha_f$ )	7.5 ( $-1_f$ )	9 ( $0_f$ )	10.5 ( $+1_f$ )	11.5 ( $+\alpha_f$ )





รูปที่ 3.9 ผังการทดลองที่ใช้สีชนิด CI Reactive Red 153 ผสมกับสี CI Reactive Red 196 อัตราส่วน 1 ต่อ 1

### วิธีการทดลอง

- 1) นำน้ำเสียสีสังเคราะห์ชนิดสีย้อม CI Reactive Red 196 กับสีย้อม CI Disperse red 153 ผสมกันด้วยอัตราส่วนโดยมวล 1:1 มาปรับความเข้มข้นเป็น  $-α_c$  มิลลิกรัมต่อลิตรแล้วนำมาใส่ในเครื่องปฏิกรณ์
- 2) เดินระบบโดยใช้กระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ  $0_i$  แอมแปร์
- 3) ปรับอัตราไหลให้เท่ากับ  $0_f$  ลิตรต่อชั่วโมง
- 4) ทำการเก็บตัวอย่างที่เมื่อเวลาผ่านไปทุก 10 นาทีจนถึงระบบดำเนินการถึงสภาวะคงตัว (Steady state) เพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นสีในหน่วยเอตีเอ็มไอ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อกิโลกรัมสี
- 5) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 โดยเรียงลำดับตัวแปรตามรูปที่ 3.9 จนครบทุกเส้นทาง
- 6) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบเพื่อหาความเข้มข้นของสีสังเคราะห์แต่ละชนิด ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าอัตราไหลของน้ำเสียสีสังเคราะห์ที่เหมาะสม รวมถึงคำนวณหา ค่าคงที่อัตราของการบำบัด
- 7) วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดของสีย้อมแต่ละชนิดในช่วงความเข้มข้นสีค่าต่างๆ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจากวิธีพื้นที่ผิวตอบ

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1 ถึง 3

การทดลอง	ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์จากวิธีพื้นที่ผิวตบ
ตัวแปรอิสระ	<p>1.-ชนิดของสีสังเคราะห์สีสังเคราะห์จากสีย้อม CI Reactive Red 196</p> <p>-สีสังเคราะห์จากสีย้อม CI Disperse red 153</p> <p>-สีสังเคราะห์จากสีย้อม CI Reactive Red 196 กับ CI Disperse red 153 ผสมกันใน อัตราส่วนโดยมวลเป็นเท่ากับ 1 ต่อ 1</p> <p>2.ความเข้มข้นของสีสังเคราะห์ <math>-a_c -1_c 0_c +1_c +a_c</math> มิลลิกรัมต่อลิตร</p> <p>3.ปริมาณกระแสไฟฟ้า <math>-a_i -1_i 0_i +1_i + a_i</math> แอมแปร์</p> <p>4.อัตราการไหล <math>-a_f -1_f 0_f +1_f + a_f</math> ลิตรต่อชั่วโมง</p>
ตัวแปรควบคุม	<p>1.ความเข้มข้นของเกลือ NaCl 0.5 กรัมต่อลิตร</p> <p>2.ความเข้มข้นของเกลือ <math>Na_2SO_4</math> 0.5 กรัมต่อลิตร</p>
ตัวแปรตาม	<p>1.ความเข้มสีที่บำบัดได้</p> <p>2.ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อกิโลกรัมสีที่บำบัดได้</p>

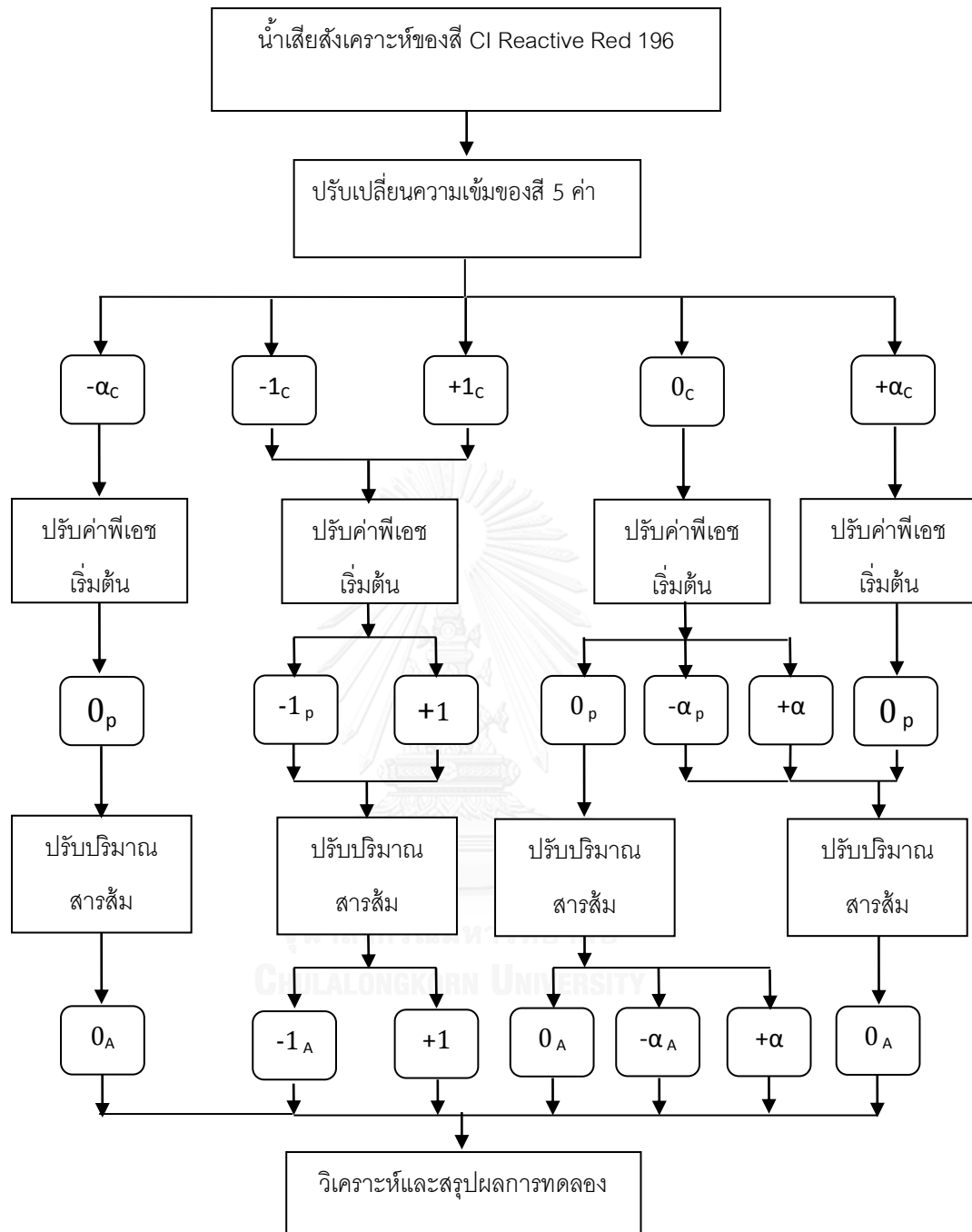
**การทดลองที่ 4** ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม  
ของน้ำเสียสีสังเคราะห์สี CI Reactive Red 196 โดยการวิเคราะห์จากวิธีพื้นที่ผิวตอ

ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียสีสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีโดยใช้สารส้ม โดยใช้น้ำเสียสี  
สังเคราะห์จากสีย้อม CI Reactive Red 196 โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด  
และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดังตารางที่ 3.6 โดยแผนการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.6 แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 4

ตัวแปรที่ทำการ ปรับเปลี่ยน	รหัสที่ใช้แทนค่าที่ใช้ทำการทดลอง				
ชนิดของสี	CI Reactive Red 196				
ความเข้มข้นสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	20 ( $\alpha_c$ )	22 ( $-1_c$ )	25 ( $0_c$ )	28 ( $+1_c$ )	30 ( $+\alpha_c$ )
ค่าพีเอช	3 ( $-\alpha_p$ )	4.2 ( $-1_p$ )	6 ( $0_p$ )	7.8 ( $+1_p$ )	9 ( $+\alpha_p$ )
ความเข้มข้นสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	150 ( $-\alpha_A$ )	250 ( $-1_A$ )	400 ( $0_A$ )	550 ( $+1_A$ )	650 ( $+\alpha_A$ )





รูปที่ 3.10 ผังการทดลองที่ใช้สีชนิด CI Reactive Red 196 เพียงอย่างเดียว

### วิธีการทดลอง

- 1) นำน้ำเสียสีสังเคราะห์ชนิดสีย้อม CI Reactive Red 196 ปรับความเข้มข้นเป็น  $\alpha_c$  มิลลิกรัม/ลิตร
- 2) ปรับค่าพีเอชเท่ากับ  $0_p$
- 3) ใช้ความเข้มข้นสารส้มเท่ากับ  $0_A$  มิลลิกรัม/ลิตร
- 4) นำน้ำเสียสีสังเคราะห์มาทดลองทำ Jar-Test โดยกำหนดให้การกวนเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำการกวนช้าต่อที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 90 นาที
- 5) ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นสีที่บำบัดได้และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อกิโลกรัมสีที่บำบัดได้
- 6) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 โดยเรียงลำดับตัวแปรตามรูปที่ 3.10 จนครบทุกเส้นทาง
- 7) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบเพื่อหาความเข้มข้นของสีสังเคราะห์แต่ละชนิด ค่าพีเอช และความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสม
- 8) วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดของสีย้อมแต่ละชนิดในช่วงความเข้มข้นสีค่าต่างๆ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจากวิธีพื้นที่ผิวตอบ

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4

การทดลอง	ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มของน้ำเสียสีสังเคราะห์ CI Reactive Red 196 โดยการวิเคราะห์จากวิธีพื้นที่ผิวตอ
ตัวแปรอิสระ	1. ความเข้มข้นของสีสังเคราะห์ $-a_c - 1_c 0_c + 1_c + a_c$ มิลลิกรัม/ลิตร 2. ค่าพีเอช $-a_i - 1_i 0_i + 1_i + a_i$ 3. ความเข้มข้นของสารส้ม $-a_f - 1_f 0_f + 1_f + a_f$ มิลลิกรัม/ลิตร
ตัวแปรควบคุม	1. ความเข้มข้นของเกลือ NaCl 0.5 กรัม/ลิตร 2. ความเข้มข้นของเกลือ Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.5 กรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	1. ความเข้มสีที่บำบัดได้ 2. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อกิโลกรัมสีที่บำบัดได้ 3. ค่าพีเอชหลังการบำบัด 4. ปริมาณตะกอนแขวนลอย

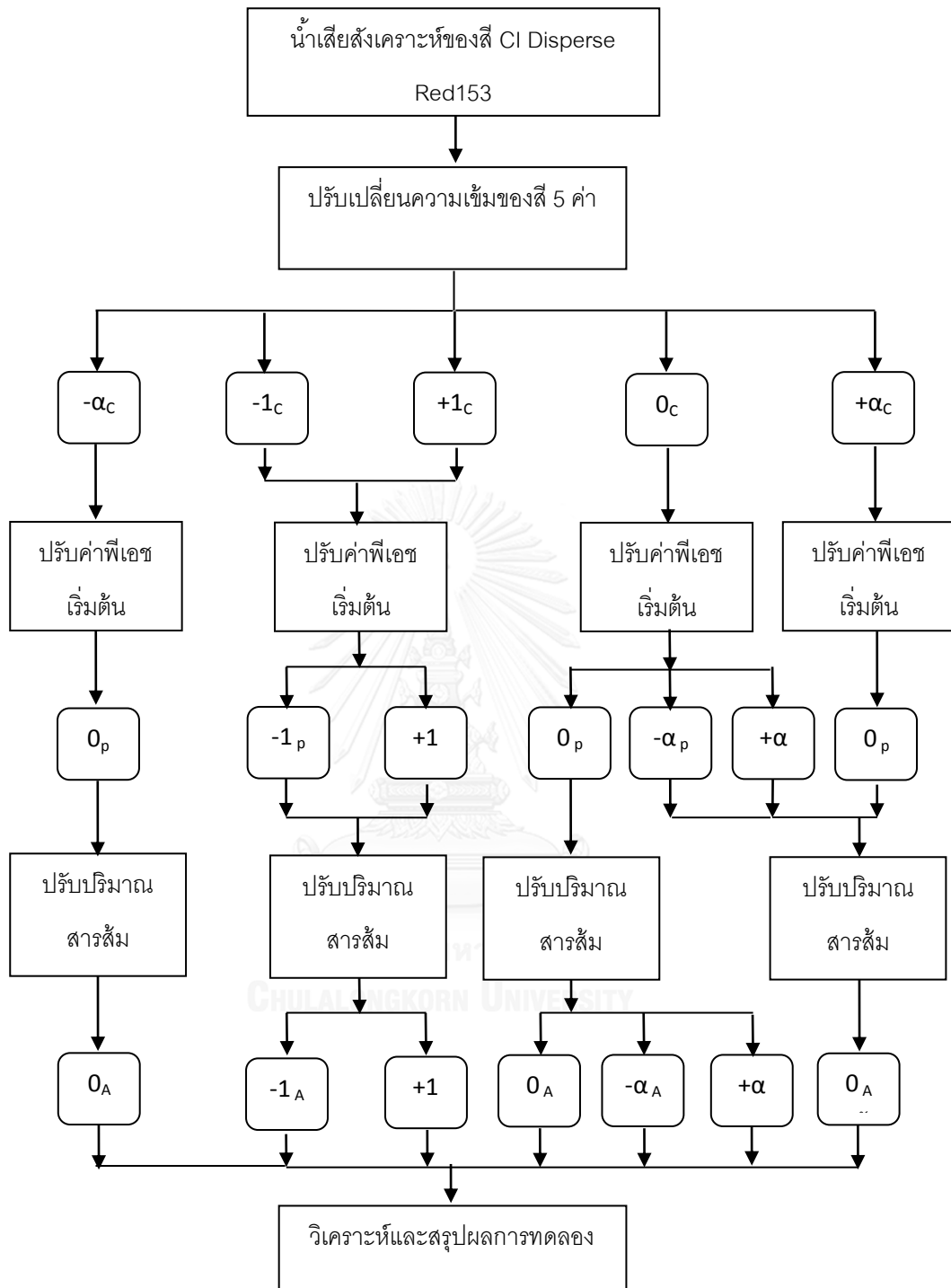
**การทดลองที่ 5** ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม  
ของน้ำเสียสังเคราะห์สี CI Disperse red 153 โดยการวิเคราะห์จากวิธีพื้นที่ผิวตอ

ทำการทดลองการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม CI Disperse red 153 โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดังตารางที่ 3.6 โดยแผนการทดลองได้แสดงไว้ในรูป 3.11

ตารางที่ 3.8 แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 5

ตัวแปรที่ทำการปรับเปลี่ยน	รหัสที่ใช้แทนค่าที่ใช้ทำการทดลอง				
ชนิดของสี	CI Disperse red 153 ทั้งหมด				
ความเข้มข้นสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	20 ( $-\alpha_c$ )	22 ( $-1_c$ )	25 ( $0_c$ )	28 ( $+1_c$ )	30 ( $+\alpha_c$ )
ค่าพีเอช	4 ( $-\alpha_p$ )	5.2 ( $-1_p$ )	7 ( $0_p$ )	8.8 ( $+1_p$ )	10 ( $+\alpha_p$ )
ความเข้มข้นสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	90 ( $-\alpha_A$ )	100 ( $-1_A$ )	115 ( $0_A$ )	130 ( $+1_A$ )	140 ( $+\alpha_A$ )





รูปที่ 3.11 ผังการทดลองที่ใช้สีชนิด CI Disperse red 153 เพียงอย่างเดียว

### วิธีการทดลอง

- 1) นำน้ำเสียสีสังเคราะห์ชนิดสีย้อม CI Reactive Red 196 ปรับความเข้มข้นเป็น  $\alpha_c$  มิลลิกรัม/ลิตร
- 2) ปรับค่าพีเอชเท่ากับ  $O_p$
- 3) ใช้ความเข้มข้นสารส้มเท่ากับ  $O_A$  มิลลิกรัม/ลิตร
- 4) นำน้ำเสียสีสังเคราะห์มาทดลองทำ Jar-Test โดยกำหนดให้การกวนเร็ว 250 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำการกวนช้าต่อที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 90 นาที
- 5) ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นสีที่บำบัดได้และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อกิโลกรัมสีที่บำบัดได้
- 6) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 โดยเรียงลำดับตัวแปรตามรูปที่ 3.11 จนครบทุกเส้นทาง
- 7) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบเพื่อหาความเข้มข้นของสีสังเคราะห์แต่ละชนิด ค่าพีเอช และความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสม
- 8) วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดของสีย้อมแต่ละชนิดในช่วงความเข้มข้นสีค่าต่างๆ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจากวิธีพื้นที่ผิวตอบ

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5

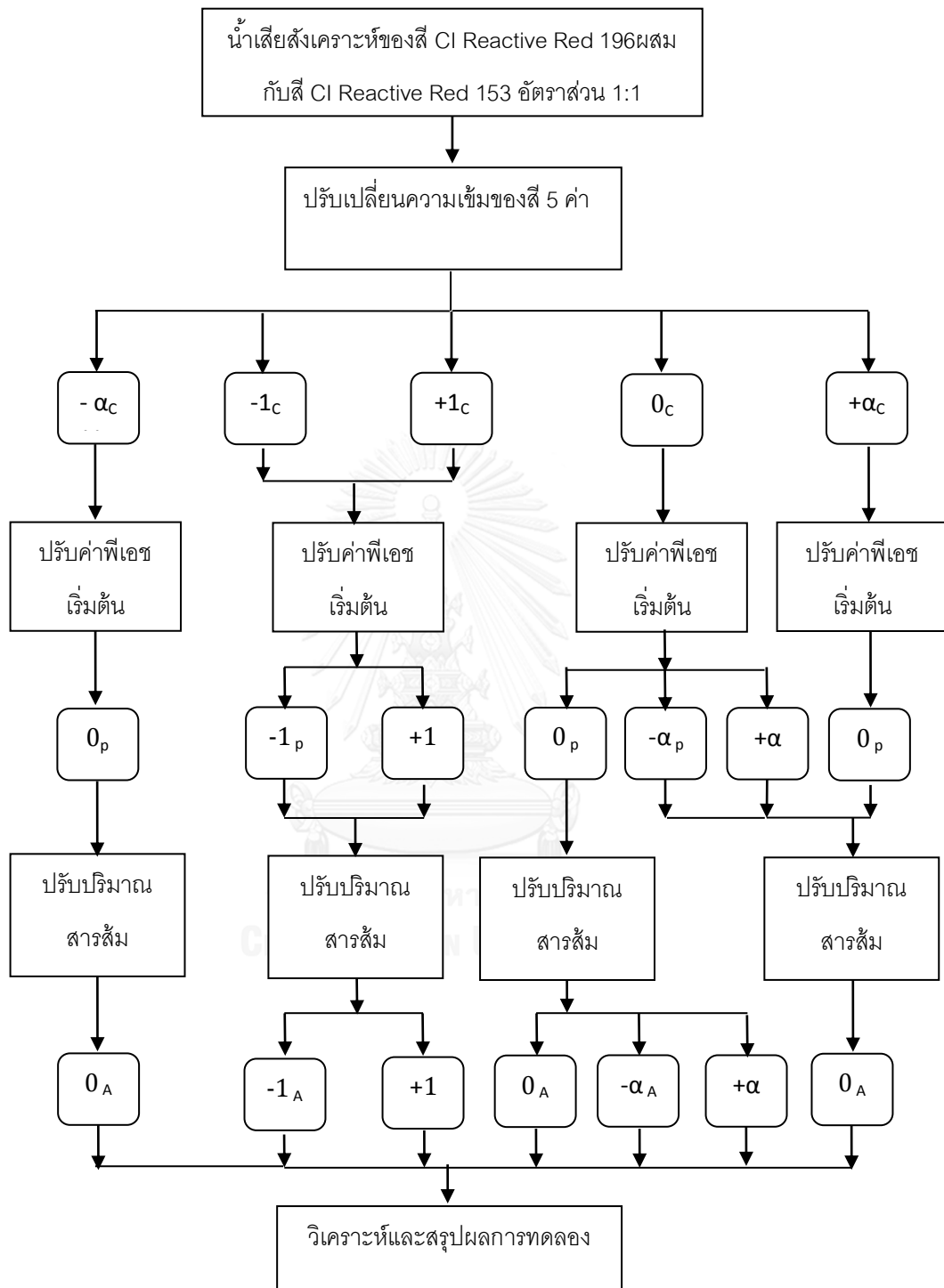
การทดลอง	ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มในสีสังเคราะห์ CI Disperse red 153 โดยการวิเคราะห์จากวิธีพื้นที่ผิวตออบ
ตัวแปรอิสระ	1. ความเข้มข้นของสีสังเคราะห์ $-a_c - 1_c 0_c + 1_c + a_c$ มิลลิกรัม/ลิตร 2. ค่าพีเอช $-a_i - 1_i 0_i + 1_i + a_i$ 3. ความเข้มข้นของสารส้ม $-a_f - 1_f 0_f + 1_f + a_f$ มิลลิกรัม/ลิตร
ตัวแปรควบคุม	1. ความเข้มข้นของเกลือ NaCl 0.5 กรัม/ลิตร 2. ความเข้มข้นของเกลือ $Na_2SO_4$ 0.5 กรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	1. ความเข้มสีที่บำบัดได้ 2. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อกิโลกรัมสีที่บำบัดได้ 3. ค่าพีเอชหลังการบำบัด 4. ปริมาณตะกอนแขวนลอย

**การทดลองที่ 6** ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มของน้ำเสียสีสังเคราะห์สี CI Reactive Red 196 ผสมกับสี CI Disperse red 153 ที่อัตราส่วนโดยมวล 1 ต่อ 1 โดยการวิเคราะห์จากวิธีพื้นที่ผิวตอ

ทำการทดลองการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม CI Reactive Red 196 ผสมกับสี CI Disperse red 153 ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดังตารางที่ 3.10 โดยแผนการทดลองได้แสดงไว้ในรูป 3.12

ตารางที่ 3.10 แสดงการปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการทดลองที่ 6

ตัวแปรที่ทำการปรับเปลี่ยน	รหัสที่ใช้แทนค่าที่ใช้ทำการทดลอง				
ชนิดของสี	CI Reactive Red 196 ผสมกับสี CI Disperse red 153 อัตราส่วน 1 ต่อ 1				
ความเข้มข้นสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	20 ( $-\alpha_c$ )	22 ( $-1_c$ )	25 ( $0_c$ )	28 ( $+1_c$ )	30 ( $+\alpha_c$ )
ค่าพีเอช	4 ( $-\alpha_p$ )	5.2 ( $-1_p$ )	7 ( $0_p$ )	8.8 ( $+1_p$ )	10 ( $+\alpha_p$ )
ความเข้มข้นสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	50 ( $-\alpha_A$ )	150 ( $-1_A$ )	300 ( $0_A$ )	450 ( $+1_A$ )	550 ( $+\alpha_A$ )



รูปที่ 3.12 ผังการทดลองที่ใช้สีชนิด CI Reactive Red 60 ผสมกับสี CI Reactive Red 196  
อัตราส่วน 1 ต่อ 1

### วิธีการทดลอง

- 1) นำน้ำเสียสีสังเคราะห์ชนิดสีย้อม CI Reactive Red 196 ผสมกับสี CI Disperse Red ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยมวลปรับความเข้มข้นเป็น  $\alpha_c$  มิลลิกรัม/ลิตร
- 2) ปรับค่าพีเอชเท่ากับ  $0_p$
- 3) ใช้ความเข้มข้นสารส้มเท่ากับ  $0_A$  มิลลิกรัม/ลิตร
- 4) นำน้ำเสียสีสังเคราะห์มาทดลองทำ Jar-Test โดยกำหนดให้การกวนเร็ว 250 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำการกวนช้าต่อที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 90 นาที แล้วปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที
- 5) ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นสีที่บำบัดได้และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อกิโลกรัมสีที่บำบัดได้
- 6) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 โดยเรียงลำดับตัวแปรตามรูปที่ 3.12 จนครบทุกเส้นทาง
- 7) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบเพื่อหาความเข้มข้นของสีสังเคราะห์แต่ละชนิด ค่าพีเอช และความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสม
- 8) วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดของสีย้อมแต่ละชนิดในช่วงความเข้มข้นสีค่าต่างๆ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจากวิธีพื้นที่ผิวตอบ

ตารางที่ 3. 11 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6

การทดลอง	ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มของน้ำเสียสีสังเคราะห์ CI Reactive Red196 ผสมกับ CI Disperse red 153 โดยการวิเคราะห์จากวิธีพื้นที่ผิวตอ
ตัวแปรอิสระ	1.ความเข้มข้นของสีสังเคราะห์ $-a_c -1_c 0_c +1_c + a_c$ มิลลิกรัม/ลิตร 2.ค่าพีเอช $-a_i -1_i 0_i +1_i + a_i$ 3.ความเข้มข้นของสารส้ม $-a_f -1_f 0_f +1_f + a_f$ มิลลิกรัม/ลิตร
ตัวแปรควบคุม	1.ความเข้มข้นของเกลือ NaCl 0.5 กรัม/ลิตร 2.ความเข้มข้นของเกลือ Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.5 กรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	1.ความเข้มสีที่บำบัดได้ 2.ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อกิโลกรัมสีที่บำบัดได้ 3.ค่าพีเอชหลังการบำบัด 4.ปริมาณตะกอนแขวนลอย

**การทดลองที่ 7** ศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียสีสังเคราะห์สี CI Reactive Red 196 กับสี CI Disperse red 153 ที่อัตราส่วนโดยมวล 1 ต่อ 1 โดยการวิเคราะห์จากวิธีพื้นที่ผิวตอ

ทำการทดลองปรับพีเอชของสี Reactive Red 196 Disperse Red 153 และสีผสมของสี Reactive Red 196 และ Disperse Red 153 ในอัตราส่วน 1:1 โดยมวลที่สภาวะการทดลองที่สภาวะร้อยละการบำบัดสีสูงสุดจากการทดลองที่ 1 ถึง 3

### วิธีการทดลอง

- 1.) เตรียมน้ำเสียสีสังเคราะห์ของ Reactive Red 196 ที่สภาวะร้อยละการบำบัดสีสูงสุดจากการทดลองที่ 1
- 2.) ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5
- 3.) ทำการบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าเก็บตัวอย่างสีที่ผ่านการบำบัดทุก 10 นาที จนถึงสภาวะคงตัว
- 4.) ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นสีที่บำบัดได้และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อกลีโกรัมสีที่บำบัดได้
- 5.) เตรียมน้ำเสียสีสังเคราะห์ตามข้อ 1.) สำหรับสี Reactive Red 196 เตรียมน้ำเสียสีสังเคราะห์ตามข้อ 6.) สำหรับสี Disperse Red 153 และตามข้อ 8.) สำหรับสีผสมของสี Reactive Red 196 และสี Disperse Red 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวล แล้วปรับพีเอชเท่ากับ 7 9 11 แล้วทำการทดลองตามข้อ 3.) ถึง 5.)
- 6.) เตรียมน้ำเสียสี Disperse Red 153 ที่สภาวะร้อยละการบำบัดสูงสุดจากการทดลองที่ 2
- 7.) ทำตามขั้นตอนการทดลองข้อ 2.) ถึง 5.)
- 8.) เตรียมน้ำเสียสี Reactive Red 196 และสี Disperse Red 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวลที่สภาวะร้อยละการบำบัดสีสูงสุดจากการทดลองที่ 3
- 9.) ทำตามขั้นตอนการทดลองข้อ 2.) ถึง 5.)



### 3.7 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์น้ำเสียสี่ถังเคราะห์

การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียแสดงดังตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3. 12 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำเสียสี่ถังเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	
			ทุกครั้ง	ค่าที่เหมาะสม
1.พีเอช	เครื่องวัดพีเอช	✓	✓	✓
2.ความเข้มข้นสี	admi weighted ordinate spectrophotometric	✓	✓	✓
3.สารแขวนลอย	Suspended Solids Dried at 103-105 °C		✓	
4.ความต่างศักย์ไฟฟ้า	เครื่อง DC Power Supply	✓	✓	✓
5.สภาพการนำไฟฟ้า	เครื่องวัดการนำไฟฟ้า	✓	✓	

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196 และสีย้อมเพิร์ส 153 ในน้ำเสีย โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและวิธีตกตะกอนทางเคมี โดยสามารถสรุปขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

- 1) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมชนิดรีแอคทีฟ 196 และสีย้อมเพิร์ส 153 ในน้ำเสีย โดยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองทางสถิติพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ในการหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด
- 2) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมชนิดรีแอคทีฟ 196 และสีย้อมเพิร์ส 153 ในน้ำเสีย โดยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มโดยใช้แบบจำลองทางสถิติพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ในการหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด
- 3) เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีย้อมแต่ละชนิดในน้ำเสียของวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและวิธีตกตะกอนทางเคมี

#### 4.1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมชนิด รีแอคทีฟ 196 และสีย้อมเพิร์ล 153 ในน้ำเสียโดยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

การสร้างแบบจำลองทางสถิติเพื่อศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความยืดหยุ่นในการใช้งานและมีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการทดลองศึกษาตัวแปรโพลีโนเมียลอันดับสอง (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา (2551)) โดยทำการศึกษาผลของตัวแปรต้น 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นสีเริ่มต้น ค่ากระแสไฟฟ้าและอัตราการไหล สำหรับกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าเนื่องจากเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการบำบัดมลพิษมากที่สุด (Asaithambi และ Matheswaran (2011)) และทำการศึกษาตัวแปร ความเข้มข้นสีเริ่มต้น ความเข้มข้นของสารส้ม และค่าพีเอชสำหรับการตกตะกอนทางเคมี การทดลองแบบประสมส่วนกลางสามารถสร้างสมการถดถอยในรูปแบบโพลีโนเมียลอันดับสองในรูปแบบของตัวแปรต้นได้ดังสมการ

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2$$

การสร้างแบบจำลองทางสถิติได้ใช้โปรแกรม Design Expert (Trial version 9-10) ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่สามารถสร้างพื้นที่ผิวตอบ สมการถดถอย แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน รวมถึงทำนายสภาวะที่เหมาะสมที่สุดได้ โดยใช้ค่าที่ได้มีการออกแบบการทดลองในการทดลองที่ 3.1-3.6 ซึ่งมีลักษณะตัวแปรต้น 3 ปัจจัย แต่ละระดับห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากันมีจำนวน 14 จุด และมีการทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลาง 6 จุด มีระดับตัวแปร 5 ระดับ คือ  $(-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha)$  เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองการบำบัดสีย้อมแต่ละชนิดด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่องและวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม รวมถึงประมาณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่เหมาะสม โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1 ถึง 4.3

- 1) การคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดสี

$$Y_{COL} = \frac{C_{ia} - C_{if}}{C_{ia}} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $C_{ia}$  คือความเข้มข้นสีเริ่มต้น (เอทีเอ็มไอ)

$C_{if}$  ความเข้มข้นสีที่ผ่านการบำบัดแล้ว (เอดีเอ็มไอ)

2) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

$$\text{Operating cost} \left( \frac{\text{baht}}{m^3} \right) = \frac{U \times I \times 3}{Q \times Y_{COL}} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $U$  คือ ความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้า (โวลต์)

$I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (แอมแปร์)

$Q$  คือ อัตราการไหลของระบบ (ลิตรต่อชั่วโมง)

ทำการศึกษามูลของความเข้มข้นสีเริ่มต้น กระแสไฟฟ้าและอัตราการไหลที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยใช้โปรแกรม Design Expert (Trial version 10) ในการออกแบบการทดลอง (วิธีการทดลองหัวข้อ 3.6 การทดลองที่ 1-3) ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.13 แสดงพจน์ของความสัมพันธ์ตัวแปรต้นกับผลตอบสนองประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 โดยสมการถดถอยสำหรับการทดลองที่ 1 ถึง 3 แสดงโดยสมการที่ 4.4 ถึง 4.6

$$R_1 = 71.77 - 2.17x_1 + 5.11x_2 - 7.24x_3 + 1.26x_1x_2 - 0.91x_1x_3 + 6.01x_2x_3 \quad (4.4)$$

$$R_2 = 35.77 - 0.31x_1 + 3.33x_2 - 9.92x_3 + 0.30x_1x_2 - 0.31x_1x_3 - 0.43x_2x_3 - 0.046x_1^2 + 0.66x_2^2 + 2.99x_3^2 \quad (4.5)$$

$$R_3 = 56.17 - 2.77x_1 + 2.47x_2 - 5.64x_3 - 1.09x_1x_2 - 0.54x_1x_3 + 0.94x_2x_3 + 0.39x_1^2 - 0.092x_2^2 + 1.38x_3^2 \quad (4.6)$$

เมื่อ

$X_1$  = ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

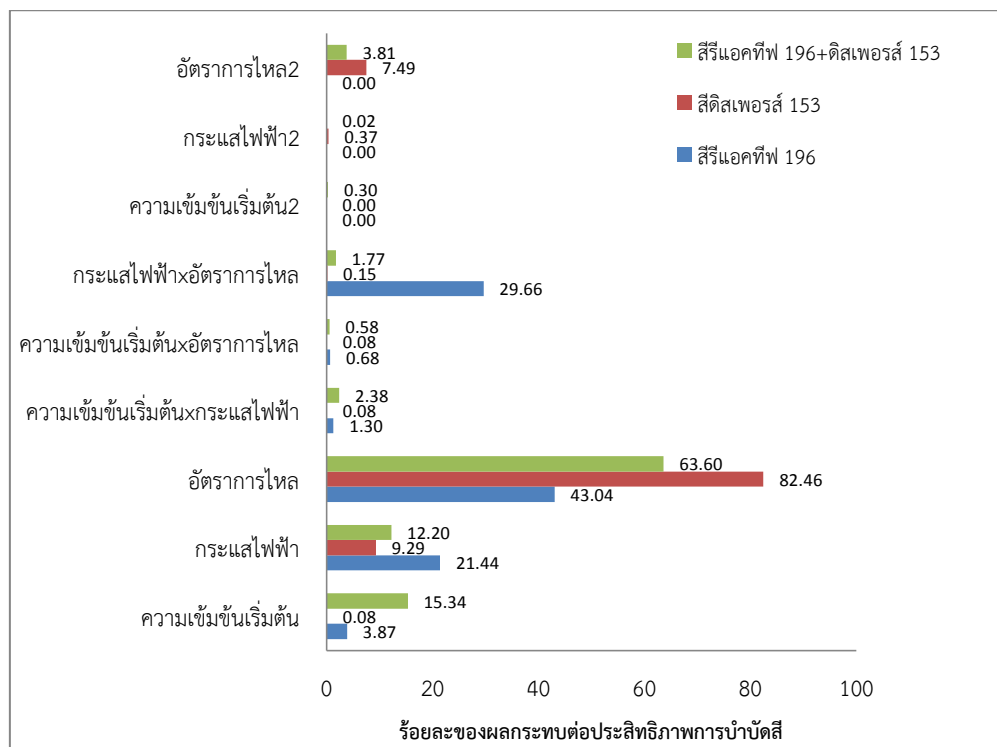
$X_2$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

$X_3$  = อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)

โดยผลของตัวแปรในพจน์แต่ละพจน์ (P) ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีสามารถแสดงโดยใช้วิธีการคำนวณพาเรโต (Pareto analysis) เพื่อใช้หาผลของแต่ละตัวแปรต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม (Amani-Ghadim, 2013)

$$P_i = \left( \frac{x_i^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \right) \times 100$$

ร้อยละของผลของแต่ละพจน์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีแต่ละชนิดในน้ำเสียแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของแต่ละพจน์ในแบบจำลองประสมส่วนกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีแต่ละชนิด

## 4.1.1 การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196

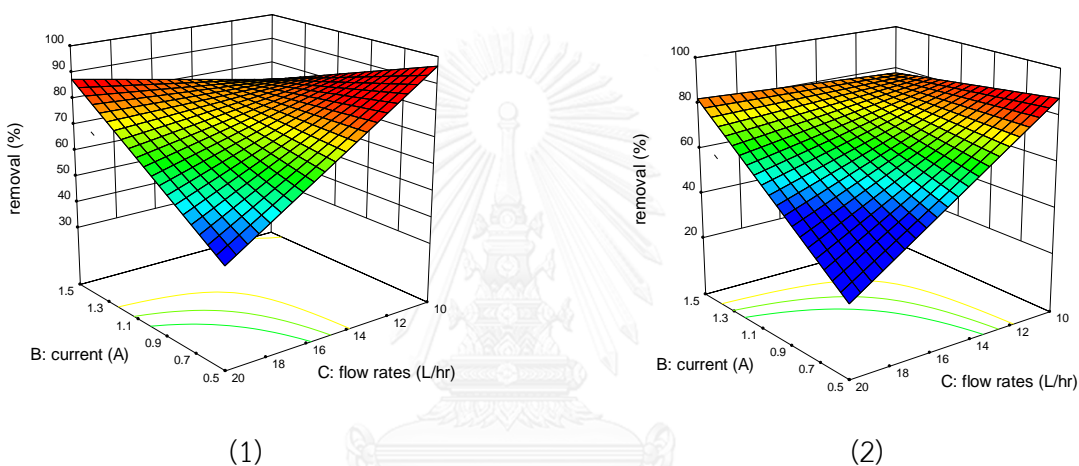
การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้น กระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ปรับความเข้มข้นในช่วง 20 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตรความเข้มข้นสีเท่ากับ 1183 ถึง 1699 เอดีเอ็มไอ กระแสไฟฟ้าในช่วง 0.5 ถึง 1.5 แอมแปร์ และอัตราการไหลในช่วง 10 ถึง 20 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองบำบัดสีรีแอคทีฟ 196

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	กระแสไฟฟ้า (A)	อัตราการไหล (L/hr)	ประสิทธิภาพการบำบัดสี (%)	ความเข้มข้นสีหลังการบำบัด (ADMI)
1	22	0.7	12	83.8	213
2	28	0.7	12	80	330
3	22	1.3	12	81.4	245
4	28	1.3	12	81.8	298
5	22	0.7	18	56.5	580
6	28	0.7	18	48.2	858
7	22	1.3	18	77.3	305
8	28	1.3	18	74.9	412
9	20	1	15	74.3	304
10	30	1	15	65.1	593
11	25	0.5	15	60	580
12	25	1.5	15	73.6	380
13	25	1	10	82.1	262
14	25	1	20	65	508
15	25	1	15	72	396
16	25	1	15	69.6	430
17	25	1	15	72.4	390
18	25	1	15	74	368
19	25	1	15	72	396
20	25	1	15	71.3	406

### 1.) ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196 ความเข้มข้นสีเริ่มต้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 เพียงเล็กน้อย ( $x_1$  3.87%) เมื่อเทียบกับอัตราการไหลและกระแสไฟฟ้า เมื่อความเข้มข้นของสีเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะทำให้สีจับกันกับตัวออกซิเดชันได้แก่  $Cl_2$  และ  $OCl^-$  ในอัตราที่สูงขึ้นและทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีลดลง จากรูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นเพิ่มจาก 20 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

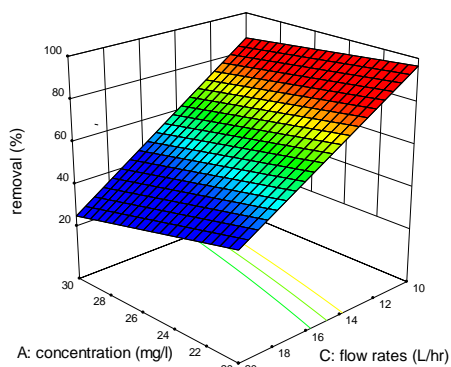


รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ที่กระแสไฟฟ้าและอัตราการไหลค่าต่างๆ เมื่อ (1) ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l (2) ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 mg/l

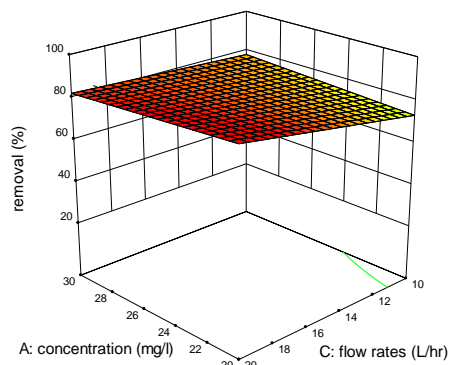
### 2.) ผลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การศึกษาผลกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196 จากรูปที่ 4.1 พบผลของกระแสไฟฟ้าส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีสูงรองจากอัตราการไหล ( $x_2$  21.44%) การกระจายของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์มีผลอย่างมากต่อกระบวนการบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า โดยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการปฏิกิริยา ดังจะเห็นได้จากสัมประสิทธิ์หน้าพจน์  $x_2$  จากสมการที่ 4.4 เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงขึ้นดังรูปที่ 4.3 ความต่างศักย์ในกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้ามีความสำคัญมากเนื่องจากส่งผลต่อชนิดของสารตัวกลางได้แก่  $Cl_2$  และ  $OCl^-$  ที่ทำหน้าที่ในการ

ออกซิไดซ์หมู่โครโมฟอร์ของน้ำเสียสี โดยความต่างศักย์ที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 6-10 ซึ่งมากเกินไปในการเกิดตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงในการบำบัดน้ำเสียสี



(1)



(2)

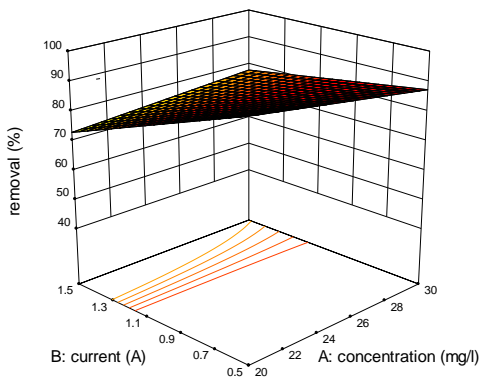
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่อัตราการไหลและความเข้มข้นค่าต่างๆ เมื่อ

(1) กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 A (2) กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 A

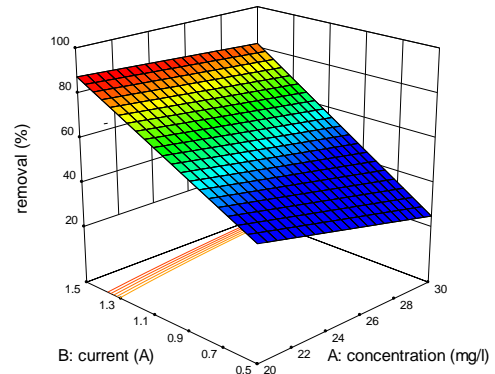
### 3.) ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การศึกษาผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 พบว่าอัตราไหลเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.1 ( $x_3$  43.04%) และรูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีลดลงอย่างมากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเนื่องจากอัตราไหลจะส่งผลต่อค่าเวลากักเก็บของระบบและค่าการกวนผสม เมื่ออัตราการไหลของระบบลดลงจะส่งผลให้เวลากักเก็บของระบบมีค่าสูงขึ้น เมื่อสารที่ทำการบำบัดมีเวลาอยู่ในปฏิกรณ์มากขึ้นจะส่งผลให้การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารตัวกลางเกิดสูงขึ้นด้วย จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงผลของเวลากักเก็บส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีสูงกว่าการกวนผสมมาก ค่าที่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการดำเนินการโดยตรงได้แก่อัตราส่วนของความเข้มข้นที่บำบัดต่อเวลากักเก็บเก็บของระบบ แต่เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้อยที่สุดดังนั้นอัตราไหลจึงส่งผลอย่างมากต่อค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย





(1)

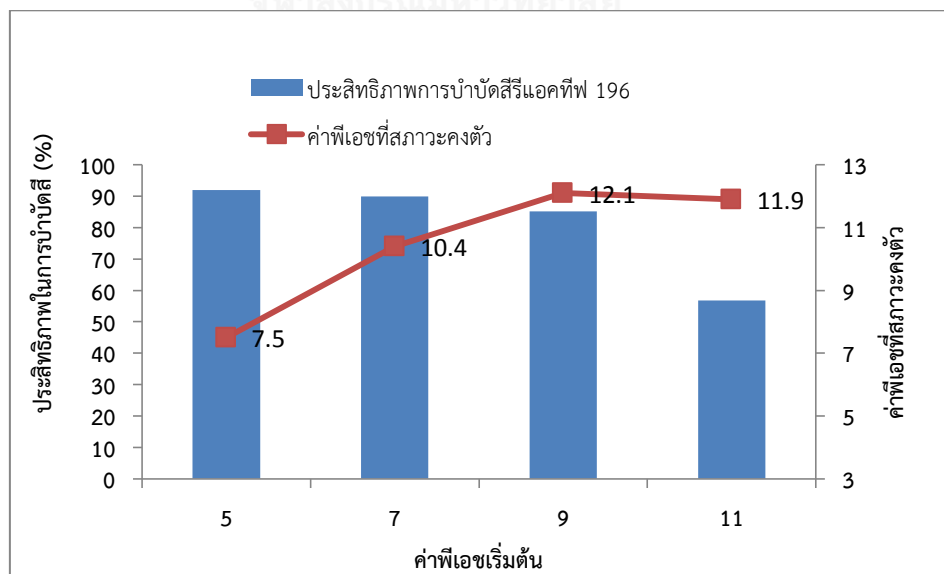


(2)

รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่กระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นค่าต่างๆ (1) เมื่ออัตราไหลเท่ากับ 10L/hr (2) อัตราไหลเท่ากับ 20L/hr

4.) ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

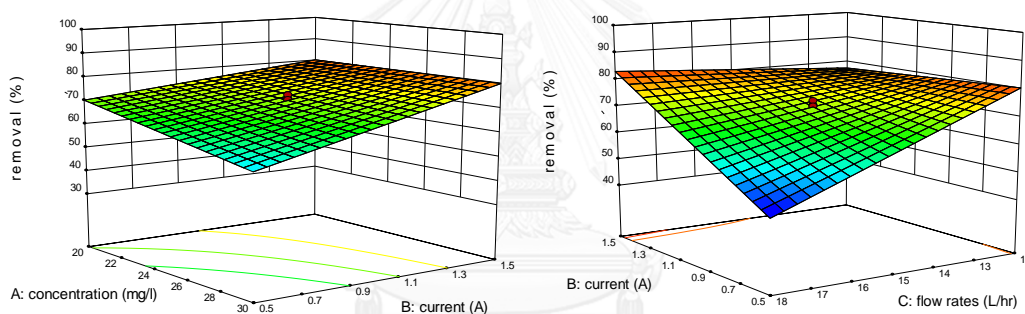
การศึกษาผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองที่ 3.1 ในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 โดยทำการศึกษาในช่วงพีเอช 5 7 9 11 จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชในระหว่างการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นที่สภาวะคงตัวเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิเดชันมีฤทธิ์เป็นเบส การบำบัดสีเกิดขึ้นได้ดีในช่วงพีเอช 5 ถึง 9 และลดลงอย่างมากที่พีเอช 11 ดังรูปที่ 4.5 ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดคือพีเอช 5



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างกัน โดยกำหนดความเข้มข้นสารเริ่มต้น 21 mg/l กระแสไฟฟ้า 1.06 A และอัตราการไหล 10 L/hr

#### 5.) การหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดลองสามารถสรุปสภาวะเหมาะสมในการกำจัดสีรีแอกทีฟ 196 โดยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองทางสถิติพื้นที่ผิวตอบสนอง คือการใช้ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 21 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 1.06 แอมแปร์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5.3 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราไหล 10 ลิตรต่อชั่วโมง เวลาพักเก็บ 0.2 ชั่วโมง ระบบจะสามารถกำจัดสีได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 83.3 และมีสีเหลือในน้ำหลังการบำบัดเท่ากับ 213 เอดีเอ็มไอดังรูปที่ 4.6 และเมื่อปรับพีเอชน้ำเนื้เริ่มต้นเท่ากับ 5 จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเป็นร้อยละ 92 มีค่าพีเอชหลังการบำบัดเท่ากับ 7.5 และมีสีเหลือหลังการบำบัดเท่ากับ 98 เอดีเอ็มไอ



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 4.6 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 (ก.) ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นและกระแสไฟฟ้าที่สภาวะเหมาะสมที่สุด (ข.) ผลของกระแสไฟฟ้าและอัตราการไหลที่สภาวะเหมาะสมที่สุด

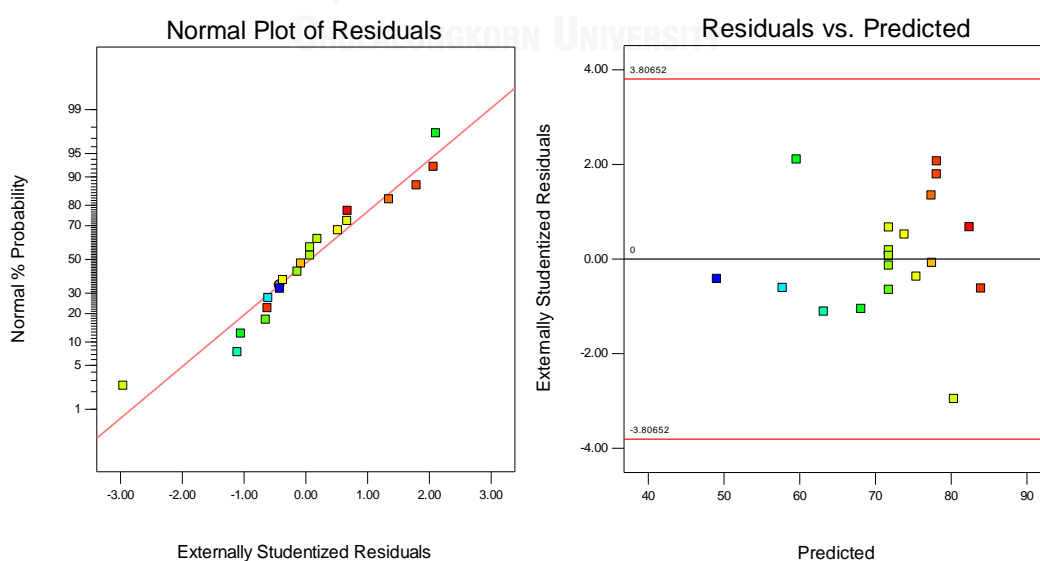
#### 6.) การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) หรือ ANOVA เป็นวิธีการพื้นฐานทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยวิเคราะห์ผลค่าผลตอบสนอง (Response) โดยอาศัยหลักความแปรปรวนในการตรวจสอบสมมติฐานซึ่งทำได้สะดวกกว่าการตรวจสอบสมมติฐานของผลของตัวแปรต้นกับตัวแปรตามทีละคู่ โดยทำการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของแบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะมีความเหมาะสมเมื่อสมมติฐานทั้ง 4 ข้อดังต่อไปนี้เป็นจริง

1. ข้อมูลหรือค่าความผิดพลาด (residual) มีการแจกแจงอย่างปกติ
2. ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0
3. ความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดคงที่
4. ค่าความผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

การตรวจสอบสมมติฐานข้อที่ 1 ทำได้โดยตรวจสอบกราฟความน่าจะเป็นของความผิดพลาดมีการแจกแจงปกติโดยกราฟความน่าจะเป็นเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.7 การตรวจสอบสมมติฐานข้อ 2, 3, 4 สามารถตรวจสอบได้จากกราฟความผิดพลาดมีการกระจายรอบเส้นศูนย์กราฟ ความกว้างแถบคงที่ และกระจายแบบไม่มีรูปแบบ ดังรูปที่ 4.7 จากตารางที่ 4.2 ค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ซึ่งน้อยกว่าระดับ 0.05 สรุปได้ว่าตัวแปรต้นทั้ง 3 ได้แก่ ความเข้มข้นสารเริ่มต้น กระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เป็นค่าที่แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองเทียบกับค่าที่แท้จริงของข้อมูล สำหรับแบบจำลองที่มีความแม่นยำในการทำนายค่าสูงค่า  $R^2$  ควรมีค่ามากกว่า 80% ซึ่งหมายถึงจุดที่ทำนายมีโอกาสสูงถึง 80% ที่จะสอดคล้องกับค่าที่ทำการทดลองจริง ค่า  $R^2$  90.8% แสดงถึงแบบจำลองสามารถแทนจุดที่ทำการทดลองจริงได้



(1)

(2)

รูปที่ 4.7 การตรวจสอบสมมติฐานแบบจำลองของการทดลองที่ 1 (1) ความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติของความผิดพลาด (2) ค่าความผิดพลาดและลำดับของข้อมูล

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่ 1

source	DF <sup>a</sup>	ANOVA parameter			
		SS <sup>b</sup>	MS <sup>c</sup>	F-Value	P-value
Model	6	1444.7	240.8	21.64	<0.0001
Residual	13	145.9	11.2	-	-
Lack-of-fit	8	135.6	16.9	8.62	0.0165
Total	1	1590.6	-	-	-

$R^2 = 90.8$

## 4.1.2 การบำบัดสีย้อมดิสเพิร์ส 153

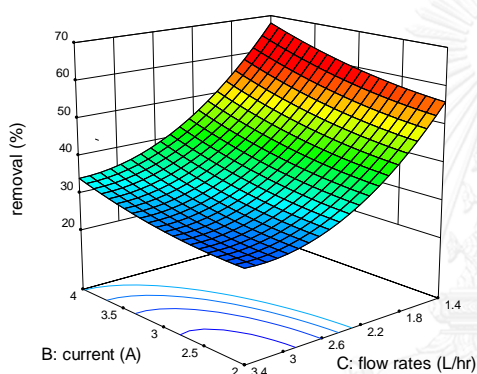
จากการทดลองบำบัดสีย้อมดิสเพิร์ส 153 ศึกษาผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้น กระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมดิสเพิร์ส 153 ปรับความเข้มข้นในช่วง 20 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสี 466 ถึง 625 เอดีเอ็มไอ กระแสไฟฟ้าในช่วง 2 ถึง 4 แอมแปร์ และอัตราการไหลในช่วง 1.4 ถึง 3.4 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4. 3 ผลการทดลองบำบัดสีย้อมดิสเพิร์ส 153

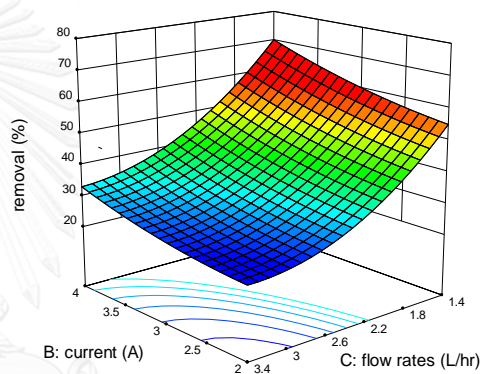
ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	กระแสไฟฟ้า (A)	อัตราการไหล (L/hr)	ประสิทธิภาพการบำบัดสี (%)	ความเข้มข้นหลังการบำบัด (ADMI)
1	22	2.4	1.8	45.78	257
2	28	2.4	1.8	47.37	320
3	22	3.6	1.8	53.62	218
4	28	3.6	1.8	51.62	268
5	22	2.4	3	28.4	308
6	28	2.4	3	23.97	428
7	22	3.6	3	29.73	312
8	28	3.6	3	31.27	378
9	20	3	2.4	36.48	296
10	30	3	2.4	35.96	400
11	25	2	2.4	30.86	372
12	25	4	2.4	45.55	284
13	25	3	1.4	59.81	217
14	25	3	3.4	29.83	334
15	25	3	2.4	38.77	338
16	25	3	2.4	30.57	368
17	25	3	2.4	39.1	336
18	25	3	2.4	32	360
19	25	3	2.4	37	340
20	25	3	2.4	37	340

### 1.) ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีของดิสเพิร์ส 153 ความเข้มข้นสีเริ่มต้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีของดิสเพิร์ส 153 น้อยที่สุด ( $x_1$  0.08% ,  $x_1^2$  0.00%) เมื่อเทียบกับอัตราการไหลและกระแสไฟฟ้า รูปที่ 4.8 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสีจาก 20 เป็น 30 มิลลิกรัมพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากสีดิสเพิร์สมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำทำให้ขั้นตอนการละลายน้ำเป็นขั้นกำหนดอัตราการบำบัดสี เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำไม่ขึ้นกับความเข้มข้นสีทำให้เมื่อปรับความเข้มข้นสีดิสเพิร์สจึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีเปลี่ยนแปลง



(1)

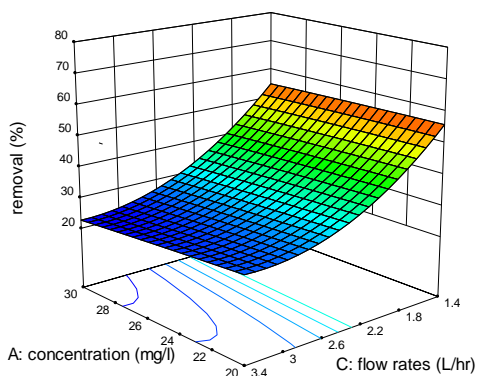


(2)

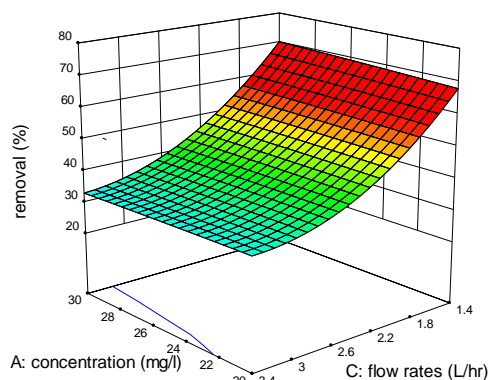
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 ที่กระแสไฟฟ้าและอัตราไหลค่าต่างๆ เมื่อ (1) ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l (2) ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 mg/l

### 2.) ผลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การศึกษาผลกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีของดิสเพิร์ส 153 จากรูปที่ 4.1 ผลของกระแสไฟฟ้าส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรองจากอัตราการไหล ( $x_2$  9.29%) เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงขึ้นดังรูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มจาก 2 เป็น 4 แอมแปร์โดยกระแสที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การออกซิไดซ์หมู่โครโมฟอร์เอโซ (Azo)  $N=N$  ซึ่งเป็นหมู่ที่ทำให้เกิดสีสลายตัวและทำให้สีแตกตัวดังรายละเอียดในภาคผนวก ข.



(1)

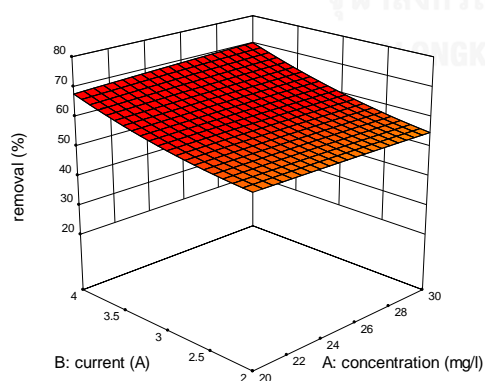


(2)

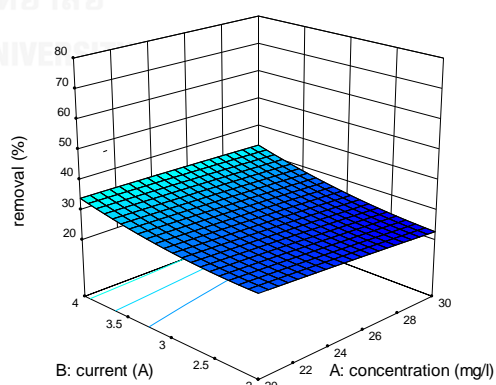
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมดิสเพิร์ส 153 ที่อัตราการไหลและความเข้มข้นค่าต่างๆ เมื่อ (1) กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2 A (2) อัตราไหลเท่ากับ 4 A

### 3.) ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การศึกษาผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมดิสเพิร์ส 153 อัตราไหลเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีมากที่สุดดังรูปที่ 4.1 ( $x_3$  82.46%) แสดงถึงประสิทธิภาพที่เปลี่ยนแปลงเกือบทั้งหมดเกิดจากการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลหรือระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียสี จากรูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีลดลงอย่างมากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 1.4 ลิตรต่อชั่วโมงเป็น 3.4 ลิตรต่อชั่วโมง



(1)

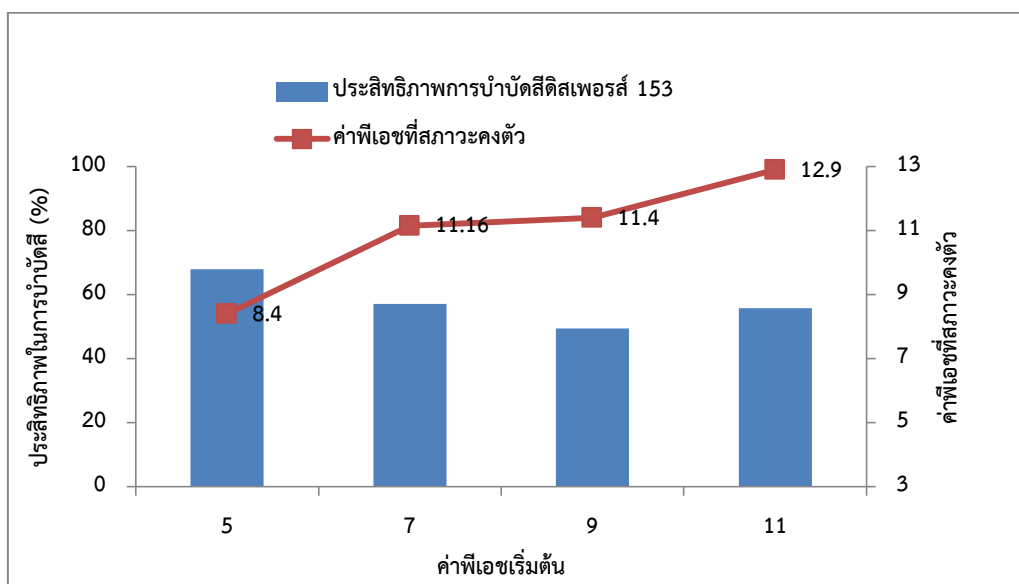


(2)

รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมดิสเพิร์ส 153 ที่กระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นค่าต่างๆ เมื่อ (1) อัตราไหลเท่ากับ 1.4 L/hr (2) อัตราไหลเท่ากับ 3.4 L/hr

#### 4.) ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การศึกษาผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองในการบำบัดสีดีสเพิร์ส 153 โดยทำการศึกษาในช่วงพีเอช 5 7 9 11 โดยค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่พีเอช 12.9 การบำบัดมีประสิทธิภาพ 50-68% ที่ค่าพีเอช 5-7 และลดลงที่พีเอช 9 แต่กลับเพิ่มขึ้นที่พีเอช 11 เนื่องจากการปรับค่าพีเอชโดยเติมเบสส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้นมาจาก 1800 เป็น 3500 ไมโครซิเมนต์ต่อเซนติเมตร โดยค่าพีเอช 5-7 ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเช่นเดียวกับการบำบัดสีรีแอกทีฟ



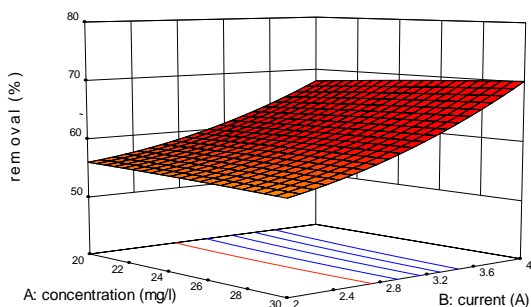
รูปที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดสีดีสเพิร์ส 153 ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างกันที่สภาวะความเข้มข้นสารเริ่มต้น 23.3 mg/l กระแสไฟฟ้า 3.51 A และอัตราการไหล 1.4 L/hr

#### 5.) การหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด

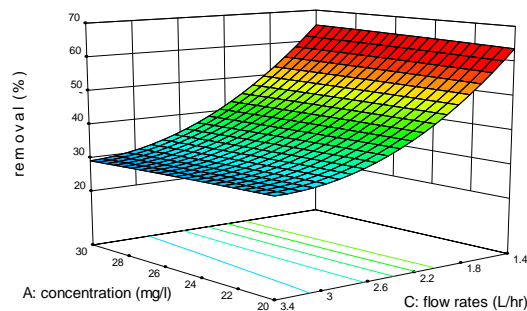
จากการทดลองสามารถสรุปสภาวะเหมาะสมในการกำจัดสีดีสเพิร์ส 153 โดยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองทางสถิติพื้นที่ผิวตอบสนอง คือการใช้ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 23.3 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 3.51 แอมแปร์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 17.6 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราไหล 1.4 ลิตรต่อชั่วโมง เวลาพักเก็บ 1.43 ชั่วโมง ระบบจะสามารถกำจัดสีได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 64.2 และมีสีเหลือในน้ำหลังการบำบัดเท่ากับ 168 เอดีเอ็มไอดังรูปที่ 4.12 และ



เมื่อปรับพีเอชน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 5 จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเป็นร้อยละ 68 มีค่าพีเอช  
หลังการบำบัดเท่ากับ 8.4 และมีสีเหลือหลังการบำบัดเท่ากับ 152 เอดีเอ็มไอ



(ก.)

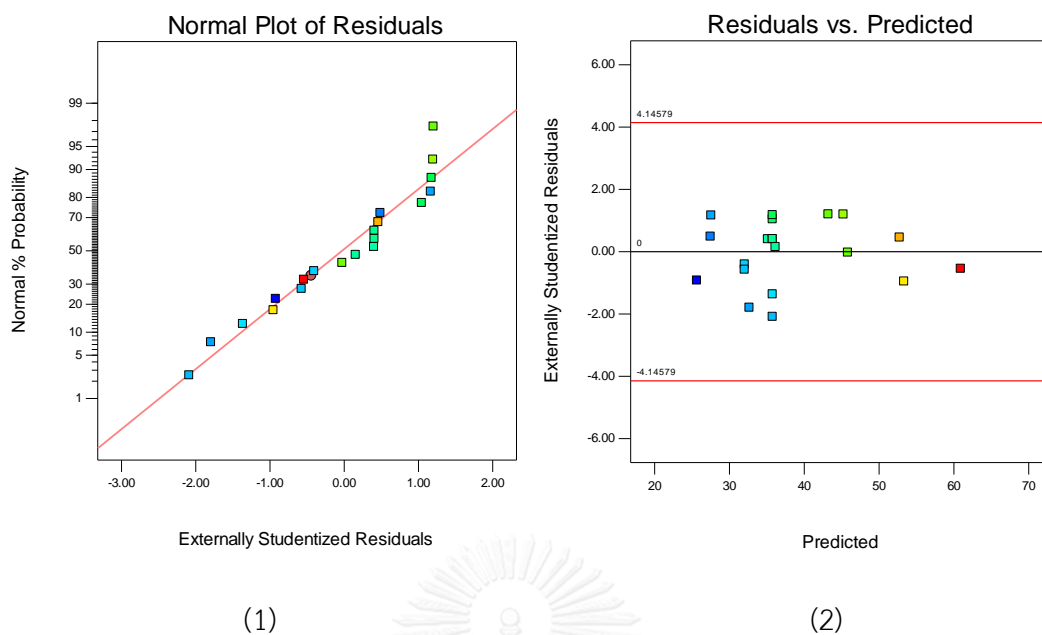


(ข.)

รูปที่ 4.12 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีดีสเพิร์ส 153 (ก.) ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นและ  
กระแสไฟฟ้าที่สภาวะเหมาะสมที่สุด (ข.) ผลของกระแสไฟฟ้าและอัตราการไหลที่สภาวะเหมาะสม  
ที่สุด

#### 6.) การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากรูปที่ 4.13 กราฟความผิดพลาดมีการกระจายรอบเส้นศูนย์กราฟ ความกว้างแถบคงที่  
และกระจายแบบไม่มีรูปแบบแสดงถึงสามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทำนาย  
ความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ จากตารางที่ 4.4 ค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ซึ่งน้อยกว่าระดับ  
0.05 สรุปได้ว่าตัวแปรต้นทั้ง 3 ได้แก่ ความเข้มข้นสารเริ่มต้น กระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลมีผลต่อ  
ประสิทธิภาพการบำบัดสีดีสเพิร์ส 153 ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า ค่าสัมประสิทธิ์  
สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) 94.3% แสดงถึงแบบจำลองสามารถแทนจุดที่ทำการทดลองจริงได้



รูปที่ 4.13 การตรวจสอบสมมติฐานแบบจำลองของการทดลองที่ 2 (1) ความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติของความผิดพลาด (2) ค่าความผิดพลาดและลำดับของข้อมูล

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่ 2

source	DF <sup>a</sup>	ANOVA parameter			
		SS <sup>b</sup>	MS <sup>c</sup>	F-Value	P-value
Model	9	1631.74	240.8	18.21	<0.0001
Residual	10	99.55	11.2	-	-
Lack-of-fit	5	35.2	16.9	0.75	0.7382
Total	19	1731.3	-	-	-

$$R^2 = 94.3\%$$

#### 4.1.3 การบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีย้อมเพอร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1

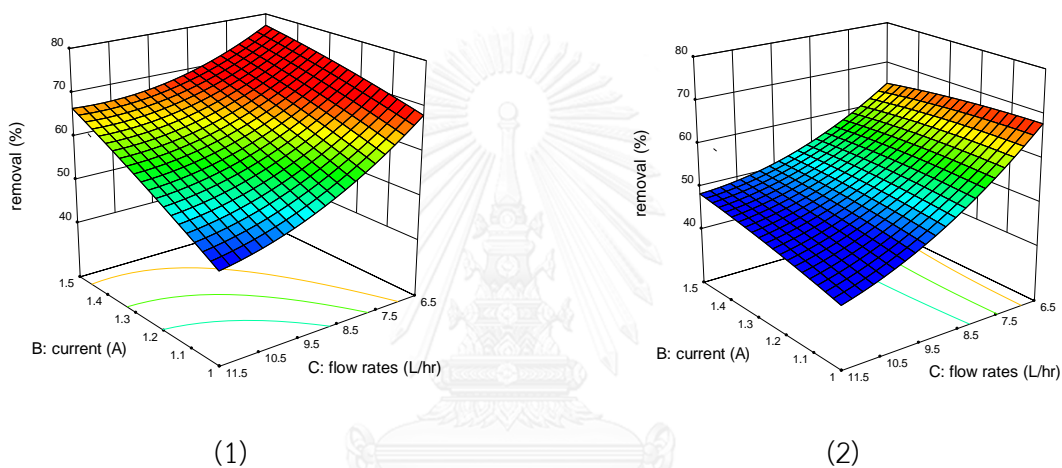
จากการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นสารเริ่มต้น กระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีย้อมเพอร์ส 153 ที่อัตราส่วน 1:1 ปรับความเข้มข้นสีเริ่มต้นในช่วง 20 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร 756 ถึง 1100 เอดีเอ็มไอกระแสไฟฟ้าในช่วง 1.0 ถึง 1.5 แอมแปร์ และอัตราการไหลในช่วง 6.5 ถึง 11.5 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองของการทดลองบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีย้อมเพอร์ส 153

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	กระแสไฟฟ้า (A)	อัตราการไหล (L/hr)	ประสิทธิภาพการบำบัดสี	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
1	22	1.1	7.5	65.1	292
2	28	1.1	7.5	60	419
3	22	1.4	7.5	67.9	265
4	28	1.4	7.5	62.5	384
5	22	1.1	10.5	51	408
6	28	1.1	10.5	47.8	539
7	22	1.4	10.5	61.6	320
8	28	1.4	10.5	50	510
9	20	1.25	9	60.45	299
10	30	1.25	9	53	517
11	25	1.0	9	50.7	460
12	25	1.5	9	60	343
13	25	1.25	6.5	69	328
14	25	1.25	11.5	50	470
15	25	1.25	9	56.1	408
16	25	1.25	9	55.5	413
17	25	1.25	9	57.59	394
18	25	1.25	9	54.2	425
19	25	1.25	9	58.3	387
20	25	1.25	9	55.5	413

### 1.) ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

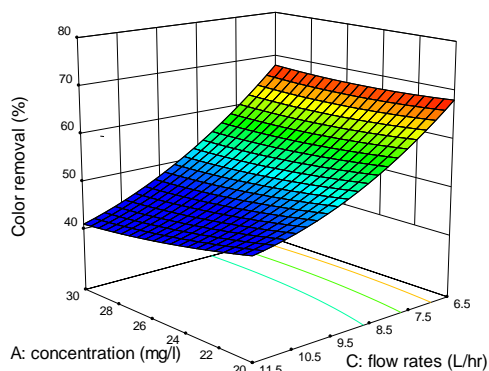
ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีย้อมเพิร์ส 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวลในน้ำเสียพบว่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรองจากอัตราการไหล ( $x_1$  15.34%) โดยจากรูป 4.14 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสีจาก 20 เป็น 30 มิลลิกรัมประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากความสามารถในการกำจัดสีย้อมเพิร์สถูกจำกัดด้วยความสามารถในการละลาย ความเข้มข้นสีย้อมเพิร์สที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นแต่ทำให้บำบัดสีได้ในสัดส่วนที่น้อยลง



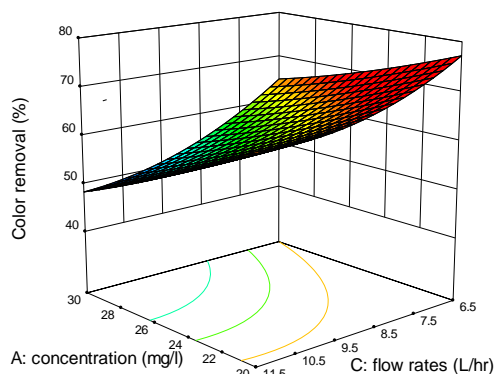
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 และสีย้อมเพิร์ส 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวลที่กระแสไฟฟ้าและอัตราไหลค่าต่างๆ เมื่อ (1) ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l (2) ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 mg/l

### 2.) ผลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การศึกษาผลกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีย้อมเพิร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1 โดยมวลในน้ำเสีย จากรูปที่ 4.1 ผลของกระแสไฟฟ้าส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่น ( $x_2$  12.20%) โดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก 1 เป็น 1.5 แอมแปร์จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงขึ้นดังรูปที่ 4.15 โดยกระแสที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การออกซิไดซ์หมู่โครโมฟอร์เอโซ (Azo) N=N ของสีย้อมเพิร์ส 153 และหมู่โครโมฟอร์ของสีรีแอคทีฟ 196 เกิดควบคู่กันไป



(1)

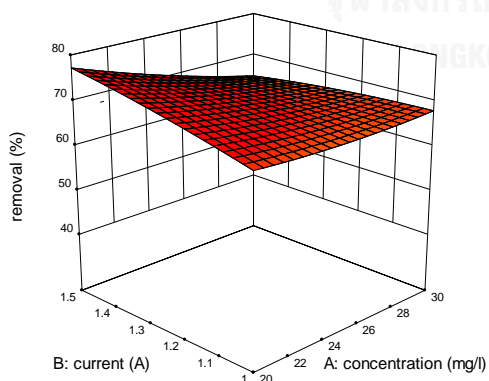


(2)

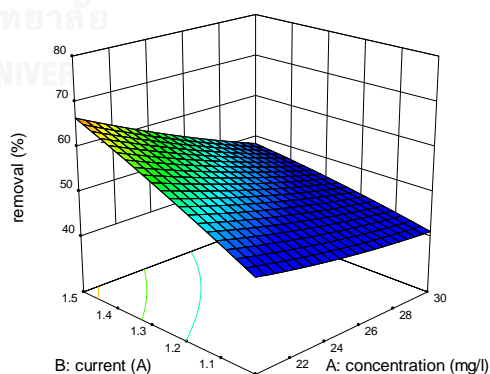
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 และ ดิสเพิร์ส 153 1:1 โดยมวลที่อัตราการไหลและความเข้มข้นค่าต่างๆ เมื่อ (1) กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1 A (2) อัตราไหลเท่ากับ 1.5 A

### 3.) ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การศึกษาผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสีดิสเพิร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1 โดยมวล อัตราไหลเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีมากที่สุดดังรูปที่ 4.1 ( $\times_3$  63.60%) จากรูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีลดลงอย่างมากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 6.5 ลิตรต่อชั่วโมงเป็น 11.5 ลิตรต่อชั่วโมง



(1)

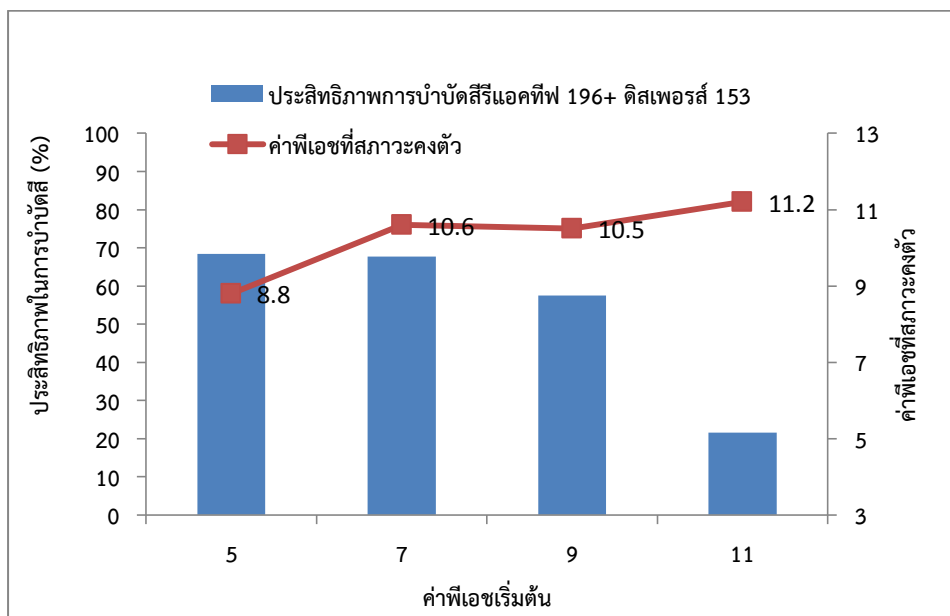


(2)

รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 และ ดิสเพิร์ส 153 1:1 โดยมวลที่กระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นค่าต่างๆ เมื่อ (1) อัตราไหลเท่ากับ 6.5 V/hr (2) อัตราไหลเท่ากับ 11.5 V/hr

#### 4.) ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การศึกษาผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองบำบัดบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีย้อมสีเพิร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1 โดยมวล โดยทำการศึกษาในช่วงพีเอช 5 7 9 11 โดยค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่พีเอช 8.8 ถึง 11.2 การบำบัดมีประสิทธิภาพ 55-68% ที่ค่าพีเอช 5 ถึง 7 และลดลงอย่างมากที่ค่าพีเอช 11 โดยค่าพีเอช 5 ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด ค่าพีเอชที่สภาวะคงตัวอยู่ในช่วงที่เป็นเบส โดยมีค่า 8.8 และ 10.6

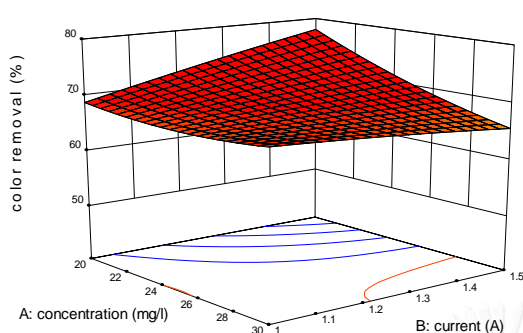


รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีย้อมสีเพิร์ส 153 1:1 โดยมวลที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน ความเข้มข้นสารเริ่มต้น 23.25 mg/L กระแสไฟฟ้า 1.35 A และอัตราการไหล 6.5 L/hr

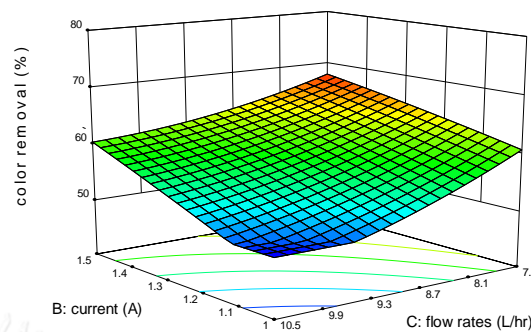
#### 5.) การหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดลองสามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีย้อมสีเพิร์ส 153 1:1 โดยมวลโดยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองทางสถิติพื้นที่ผิวตอบสนอง คือการใช้ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 23.3 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 1.35 แอมแปร์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 6.75 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราไหล 6.5 ลิตรต่อชั่วโมง เวลาพักเก็บ 0.31 ชั่วโมง ระบบจะสามารถกำจัดสีได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 71.6 ดังรูปที่ 4.18 และมีสีเหลือในน้ำหลังการ

บำบัดเท่ากับ 261 เอดีเอ็มไอดังรูปที่ 4.19 และเมื่อปรับพีเอชน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 5 จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเป็นร้อยละ 72.1 มีค่าพีเอชหลังการบำบัดเท่ากับ 8.8 และมีสีเหลืองหลังการบำบัดเท่ากับ 241 เอดีเอ็มไอ



(ก.)

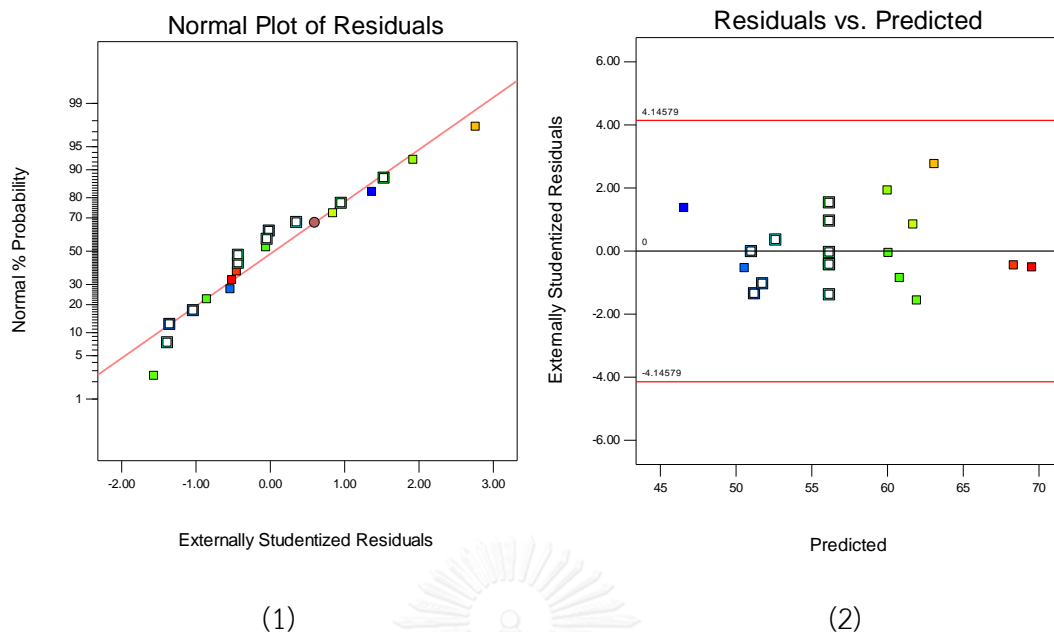


(ข.)

รูปที่ 4.18 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีดีดิสเพิร์ส 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวล (ก.) ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นและกระแสไฟฟ้าที่สภาวะเหมาะสมที่สุด (ข.) ผลของกระแสไฟฟ้าและอัตราการไหลที่สภาวะเหมาะสมที่สุด

#### 6.) การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากรูปที่ 4.19 กราฟความผิดพลาดมีการกระจายรอบเส้นศูนย์กราฟ ความกว้างแถบคองที่ และกระจายแบบไม่มีรูปแบบแสดงถึงสามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ จากตารางที่ 4.6 ค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ซึ่งน้อยกว่าระดับ 0.05 สรุปได้ว่าตัวแปรต้นทั้ง 3 ได้แก่ ความเข้มข้นสารเริ่มต้น กระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีดีดิสเพิร์ส 153 1:1 โดยมวล ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) 96.2% แสดงถึงแบบจำลองสามารถแทนจุดที่ทำการทดลองจริงได้



รูปที่ 4.19 การตรวจสอบสมมติฐานแบบจำลองของการทดลองที่ 3 (1) ความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติของความผิดพลาด (2) ค่าความผิดพลาดและลำดับของข้อมูล

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่ 3

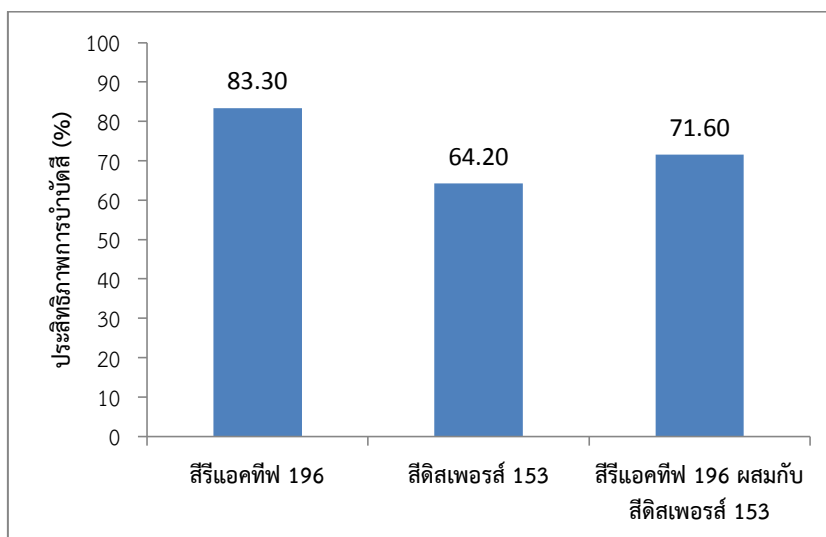
source	DF <sup>a</sup>	ANOVA parameter			
		SS <sup>b</sup>	MS <sup>c</sup>	F-Value	P-value
Model	9	670.86	74.54	28.18	<0.0001
Residual	10	26.45	2.64	-	-
Lack-of-fit	5	15.12	3.02	1.33	0.3798
Total	19	697.30	-	-	-

$$R^2 = 96.2\%$$



#### 4.1.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีของสีแต่ละชนิด

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่สภาวะเหมาะสมเท่ากับ 83.3% สีดิสเพิร์ส 153 เท่ากับ 64.2% และสีผสมของ สีรีแอกทีฟ 196 กับสีดิสเพิร์ส 153 1:1 โดยมวลเท่ากับ 71.6% ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ผลของชนิดสีที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

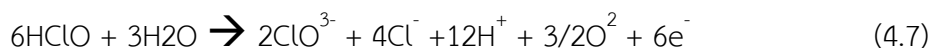
การบำบัดสีรีแอกทีฟมีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดสีของวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าขึ้นกับความสามารถในการละลายของสีย้อม สีรีแอกทีฟมีความสามารถในการละลายน้ำสูงจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูงในขณะที่สีดิสเพิร์สมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าทำให้ความสามารถในการละลายน้ำเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการบำบัดสี โดยเมื่อสีที่ละลายน้ำได้ถูกบำบัดและมีความเข้มข้นลดลงจะส่งผลให้มีการรบกวนสมดุลการละลาย และส่งผลให้มีการละลายของสีเพิ่มขึ้น ดังนั้นการบำบัดสีดิสเพิร์สให้ได้ประสิทธิภาพดีจึงต้องทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นโดยใช้กระแสไฟฟ้าในการบำบัดมีค่าสูง (2 ถึง 4 แอมแปร์) เมื่อเปรียบเทียบกับ การบำบัดสีรีแอกทีฟ (0.5 ถึง 1.5 แอมแปร์) รวมถึงต้องใช้อัตราการไหลต่ำ (1.4 ถึง 3.4 ลิตรต่อชั่วโมง) เพื่อเพิ่มเวลากักเก็บให้เกิดการทำปฏิกิริยาสมบูรณ์มากขึ้นในขณะที่การบำบัดสีรีแอกทีฟใช้อัตราการไหลสูง (10 ถึง 20 ลิตรต่อชั่วโมง) ส่วนการบำบัดสีผสมของสีรีแอกทีฟ 196 กับ ดิสเพิร์ส 153

ความเข้มข้นสีเริ่มต้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรองจากอัตราการไหลสำหรับสีผสมของสีดิสเพิร์สและสีรีแอคทีฟ ( $x_1$  15.34%) แต่ส่งผลน้อยมากสำหรับการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 และแทบไม่มีผลต่อการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 เลย ดังรูปที่ 4.15 ถึง 4.17 ความเข้มข้นของสีเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการจับกันกับสารออกซิไดซ์ได้แก่  $Cl_2$  และ  $OCl^-$  เกิดในอัตราที่สูงขึ้นและทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีลดลง ในกรณีของสีดิสเพิร์ส 153 ตัวออกซิไดซ์ที่ลดลงนี้ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี ( $x_1$  0.08%) เนื่องจากความสามารถในการละลายของสีดิสเพิร์สต่ำจึงทำให้มีตัวออกซิไดซ์มากเพียงพอ

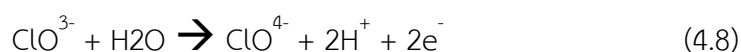
จากการศึกษาพบว่ากระแสไฟฟ้าส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยมีความสำคัญรองจากอัตราการไหลสำหรับสีรีแอคทีฟ 196 ( $x_2$  21.44%) และสีดิสเพิร์ส 153 ( $x_2$  9.29%) แตกต่างจากการบำบัดสีผสมของสีรีแอคทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งกระแสไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีต่ำกว่าปัจจัยจากอัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้น ( $x_2$  12.20%)

การศึกษามวลของอัตราการไหลพบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับการบำบัด รีแอคทีฟ 196 สีดิสเพิร์ส 153 และสีผสมของสีรีแอคทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1 แตกต่างกันเท่ากับ 10 ลิตรต่อชั่วโมง 1.4 ลิตรต่อชั่วโมง และ 6.5 ลิตรต่อชั่วโมงซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่ได้ทำการทดลองแสดงในแต่ละชุดถึงผลของการกวนผสมไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีเมื่อเทียบกับผลของเวลากักเก็บ ค่าที่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการดำเนินการโดยตรงได้แก่อัตราส่วนของความเข้มข้นที่บำบัดต่อเวลากักเก็บของระบบ แต่เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้อยที่สุดดังนั้นอัตราไหลจึงส่งผลอย่างมากต่อค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าสอดคล้องกับปฏิบัติการกำจัดสีของ Szpyrkowicz และคณะ (2001) ศึกษาการกำจัดสีดิสเพิร์สด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ พบว่าค่าพีเอชของระบบเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรกของการบำบัดจากค่าพีเอชเริ่มต้น 4.5 ขึ้นสูงถึง 8.5 ถึง 9.5 แล้วจึงคงที่ งานวิจัยของ (Israilides, 1997) ที่สภาวะเป็นกรดผลิตภัณฑ์ที่เกิดที่ขั้วแอโนดได้แก่  $OCl^-$   $Cl_2$   $O_2$  และ  $O_3$  เพราะการละลายของ  $O_2$  ในน้ำต่ำ ตัวออกซิไดซ์หลักจึงเป็น  $OCl^-$  และ  $Cl^-$  ประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูงที่ค่าพีเอชที่เป็นกรดเนื่องจากสารออกซิไดซ์หลักเกิดไฮโปคลอรัสแอซิด ( $HClO$ ) ซึ่งมีค่าศักย์ในการออกซิเดชัน 1.50 โวลต์ในขณะที่

สถานะที่เป็นเบส สารตัวกลางในการออกซิไดซ์อยู่ในรูปของไฮโปคลอริกไอออน ( $\text{ClO}^-$ ) ซึ่งมีศักย์ในการออกซิเดชันเพียง 0.89 โวลต์



นอกจากนี้ที่พีเอชสูงยังอาจเกิดปฏิกิริยาแข่งขันที่เปลี่ยนไฮโปคลอริกไอออนเป็นสารอื่นเกิดขึ้น



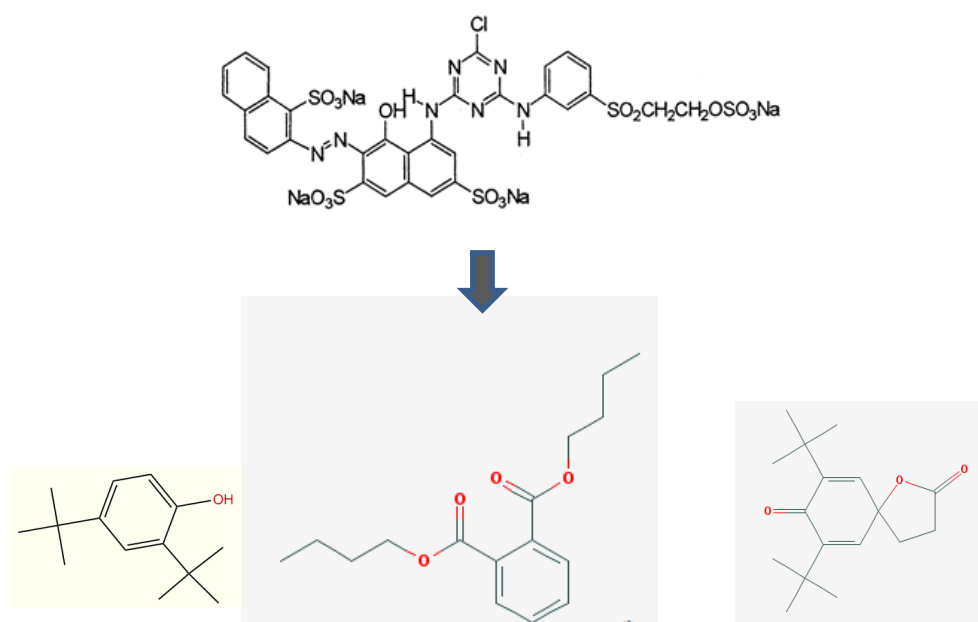
ค่าพีเอชที่สถานะคงตัวมีค่าสูงกว่าค่าพีเอชเริ่มต้นสำหรับสีทั้ง 3 ชนิด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.5 ถึง 12.9 เมื่อเกิดการบำบัดค่าพีเอชจะสูงขึ้นเนื่องจากเกิด Indirect Oxidation โดยสารอินทรีย์จับกับ  $\text{H}^+$  ดังต่อไปนี้



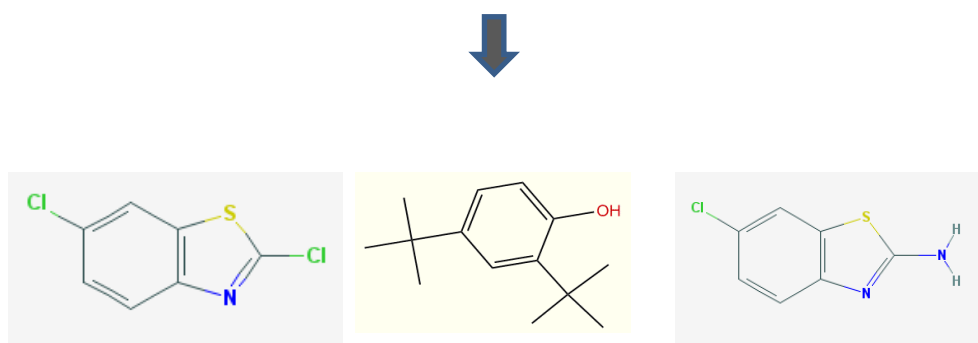
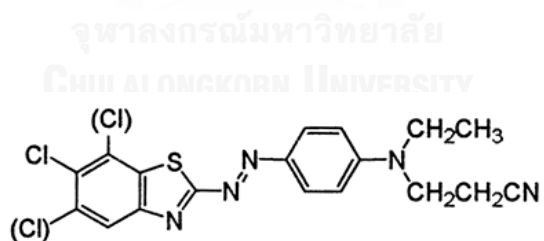
เมื่อเกิดสถานะที่เป็นเบสมากจะเกิดปฏิกิริยาที่ขี้แอนดั่งสมการและเกิดการทำให้ค่าพีเอชเข้าสู่ค่าคงที่



จากผลการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ได้โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS ได้ผลิตภัณฑ์ดังต่อไปนี้จะเห็นได้ว่าหมู่ที่ให้สี  $\text{N}=\text{N}$  ถูกกำจัดจนหมด โครงสร้างของสีรีแอกทีฟ 196 ที่มีโมเลกุลใหญ่แตกเป็นโมเลกุลย่อยที่มีขนาดเล็กลงที่มีลักษณะเป็นวงแหวนเพียงวงเดียว

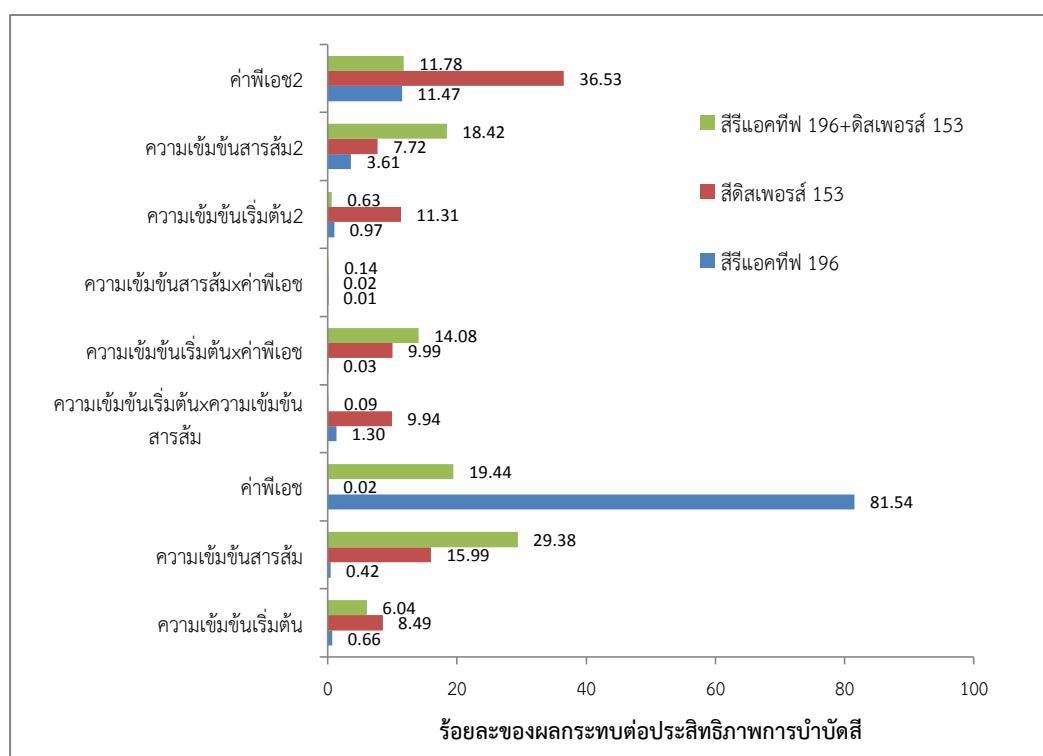


จากผลการบำบัดสีรีดิสเพิร์ส 153 ได้โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS ได้ผลิตภัณฑ์ดังต่อไปนี้จะเห็นได้ว่าหมู่ที่ให้สี N=N ถูกกำจัดจนหมด โมเลกุลของสีดิสเพิร์สแตกเป็นโมเลกุลย่อยที่มีขนาดเล็กลงและมีการแทนที่ N ด้วย Cl รวมถึงมี Cl ในโครงสร้างโมเลกุลที่เปลี่ยนเป็นหมู่เมทิล



#### 4.2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมชนิด รีแอกทีฟ 196 และสிடิสเพอร์ส 153 ในน้ำเสียโดยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม

ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้น ค่าพีเอชเริ่มต้นและความเข้มข้นสารส้มที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยใช้โปรแกรม Design Expert (Trial version 10) ในการออกแบบการทดลอง (วิธีการทดลองหัวข้อ 3.6 การทดลองที่ 4-6) ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.27 แสดงพจน์ของความสัมพันธ์ตัวแปรต้นกับผลตอบสนองประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 โดยสมการถดถอยสำหรับการทดลองที่ 1 ถึง 3 แสดงโดยสมการที่ 4.4 ถึง 4.6



รูปที่ 4.21 ผลกระทบของแต่ละพจน์ในแบบจำลองประสมส่วนกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี สมการถดถอยของการทดลองที่ 4 ถึง 6

$$R_1^* = 45.46 + 1.65y_1 + 1.32y_2 + 18.42y_3 + 2.33y_1y_2 - 0.324y_1y_3 + 0.198y_2y_3 - 0.201y_1^2 - 3.87y_2^2 - 6.91y_3^2 \quad (4.9)$$

$$R_2^* = 60.76 + 7.23y_1 + 9.93y_2 - 0.385y_3 - 7.83y_1y_2 + 7.85y_1y_3 + 0.324y_2y_3 + 8.35y_1^2 + 6.90y_2^2 - 15.00y_3^2 \quad (4.10)$$

$$R_3^* = 48.53 + 3.82y_1 + 8.43y_2 + 6.85y_3 + 0.479y_1y_2 - 5.83y_1y_3 + 0.586y_2y_3 + 1.23y_1^2 - 6.67y_2^2 - 5.33y_3^2 \quad (4.11)$$

เมื่อ

$y_1$  = ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$y_2$  = ความเข้มข้นสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$y_3$  = ค่าพีเอช

การคำนวณหาค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

- 1) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม

$$\text{Operating cost} \left( \frac{\text{baht}}{m^3} \right) = \frac{P \times A \times 1L}{1000 \times Y_{COL}} + C_1 + C_2 \quad (4.12)$$

เมื่อ P คือ ราคาสารส้ม (บาทต่อกิโลกรัม)

A คือ ความเข้มข้นสารส้มที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_1$  คือ ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอน (บาทต่อลบ.ม.)

$C_2$  คือ ค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีปรับค่าพีเอช (บาทต่อลบ.ม.)

## 4.2.1 การบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ 196

จากการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้น ความเข้มข้นสารส้อม และค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 โดยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้อม ปรับความเข้มข้นในช่วง 20 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ความเข้มข้นสีเท่ากับ 1195 ถึง 1704 เอดีเอ็มไอ) ความเข้มข้นสารส้อม 150 ถึง 650 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชเริ่มต้น 3 ถึง 9

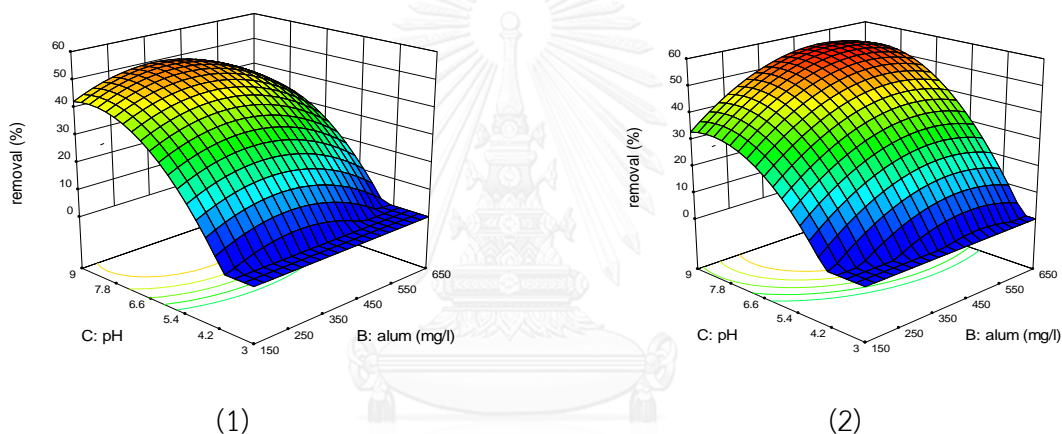
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองของการทดลองบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสารส้อม (mg/l)	พีเอชเริ่มต้น	ประสิทธิภาพการบำบัดสี	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
1	22	250	4.2	5.18	1208
2	28	250	4.2	3.11	1550
3	22	550	4.2	6.21	1194
4	28	550	4.2	11.93	1410
5	22	250	7.8	49.88	638
6	28	250	7.8	45	880
7	22	550	7.8	50.19	634
8	28	550	7.8	56.12	702
9	20	400	6	40.43	712
10	30	400	6	51.06	834
11	25	150	6	41.45	840
12	25	650	6	39.49	866
13	25	400	3	9.07	1302
14	25	400	9	54.71	650
15	25	400	6	48.78	734
16	25	400	6	41.52	838
17	25	400	6	47.2	756
18	25	400	6	41.52	838
19	25	400	6	49.1	730
20	25	400	6	42.6	822

ผลการทดลองบำบัดสีในน้ำเสียดังตารางที่ 4.10 ในภาพรวมพบว่าวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มมีประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟ 196 ค่อนข้างต่ำคิดเป็นร้อยละ 3.11- 56.12 และสีที่เหลือในน้ำยังคงมีค่าสูงเกินกว่า 300 ADMI ในทุกชุดการทดลอง

### 1.) ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ 196 จากรูปที่ 4.21 ค่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีน้อยที่สุด ( $y_1$  0.66%) จากรูปที่ 4.22 ค่าความเข้มข้นสีที่เปลี่ยนจาก 20 เป็น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

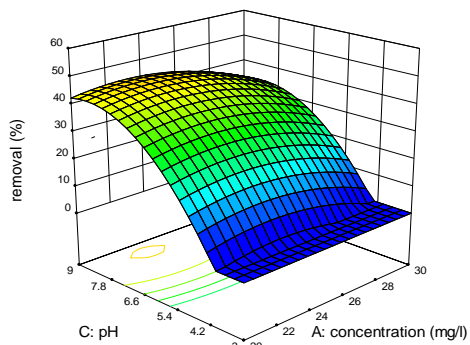


รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสารส้มค่าต่างๆ (1) ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l (2) ค่าความเข้มข้นสารส้ม 30 mg/l

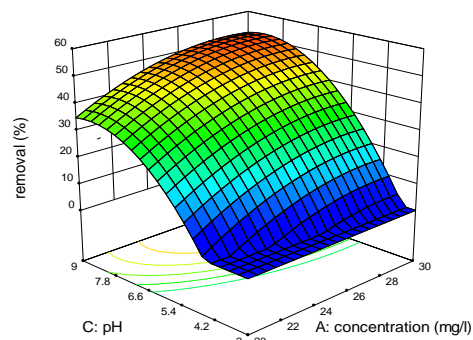
### 2.) ผลของความเข้มข้นสารส้มต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นสารส้มต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ความเข้มข้นสารส้มส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 น้อยที่สุด ( $y_2$  0.42%) จากรูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพของการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารส้มจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 650 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงถึงกลไก Charge neutralization ไม่มีผลต่อการบำบัดสีรีแอกทีฟ





(1)

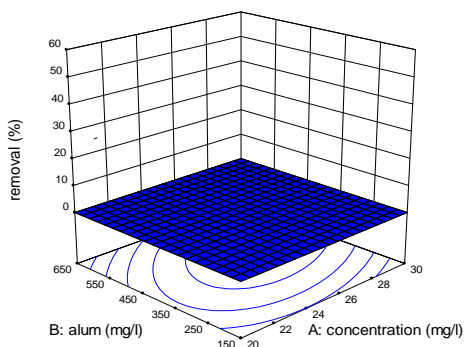


(2)

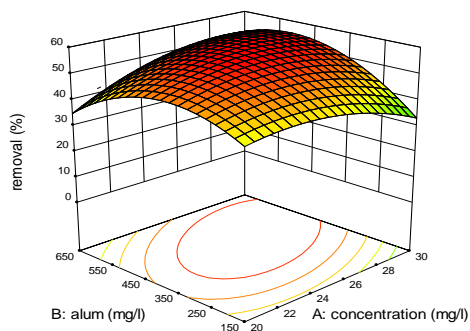
รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสีเริ่มต้นค่าต่างๆ (1) ค่าความเข้มข้นสารสี 150 mg/l (2) ค่าความเข้มข้นสารสี 650 mg/l

### 3.) ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การทดลองศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ 196 ทำการศึกษาในช่วงพีเอช 3 ถึง 9 จากการศึกษาพบว่าค่าพีเอชในช่วงที่ศึกษามีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยมีผลต่อการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ( $y_3$  81.54%) ค่าพีเอชที่สภาวะเหมาะสมที่สุดในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 คือ 8.75 ประสิทธิภาพการบำบัด 57.5% โดยที่ช่วงพีเอช 3 ถึง 4 ไม่สามารถบำบัดสีได้เลย ช่วงพีเอช 5-9 ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดลงเนื่องจากช่วงพีเอช 5-9 สมดุลการละลายของ  $Al(III)$  โดยสมดุลการละลายของในรูป  $Al(OH)_{3(s)}$  ซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำได้น้อยที่สุดและเกิดการรวมตะกอนแบบกวาด (sweep flocculation) Yilmaz และคณะ (2007)



(1)

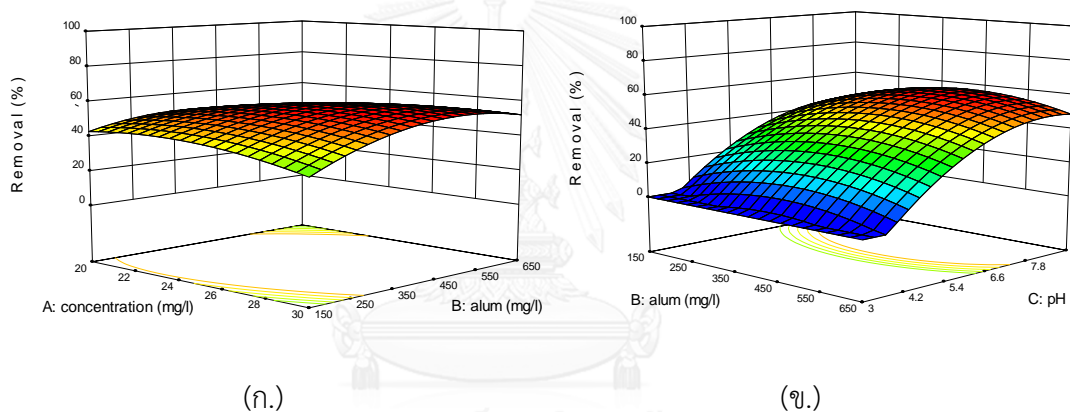


(2)

รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่ความเข้มข้นสารส้มและความเข้มข้นสีเริ่มต้นค่าต่างๆ (1) ค่าพีเอช 3 (2) ค่าพีเอช 9

#### 4.) การหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดลองสามารถสรุปสภาวะเหมาะสมในการกำจัดสีรีแอกทีฟ 196 โดยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มโดยใช้แบบจำลองทางสถิติพื้นที่ผิวตอบสนอง คือการใช้ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 24.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารส้ม 440.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้น 8.75 ระบบจะสามารถกำจัดสีได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 57.5 และมีสีเหลือในน้ำหลังการบำบัดเท่ากับ 607 เอดีเอ็มไอดังรูปที่ 4.25

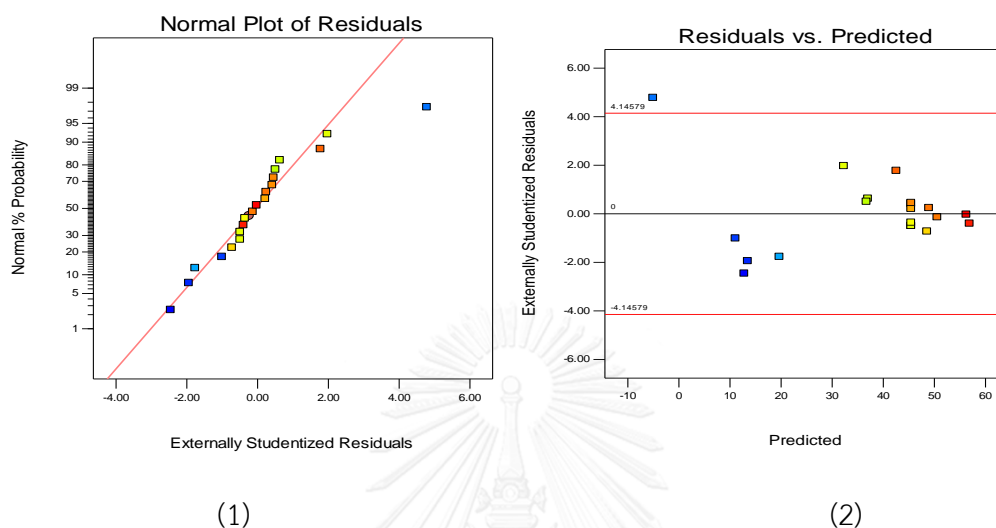


รูปที่ 4.25 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 (ก.) ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นและความเข้มข้นสารส้มที่สภาวะเหมาะสมที่สุด (ข.) ผลความเข้มข้นสารส้มและค่าพีเอชที่สภาวะเหมาะสมที่สุด

#### 5.) การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากรูปที่ 4.26 กราฟความผิดพลาดมีการกระจายรอบเส้นศูนย์กราฟ ความกว้างแถบคงที่และกระจายแบบไม่มีรูปแบบแสดงถึงสามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ จากตารางที่ 4.8 ค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ซึ่งน้อยกว่าระดับ 0.05 สรุปได้ว่าตัวแปรต้นทั้ง 3 ได้แก่ ความเข้มข้นสีเริ่มต้น ความเข้มข้นสารส้ม และค่าพีเอชมีผล

ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสรีรแอคทีฟ 196 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) 88.8% แสดงถึงแบบจำลองสามารถแทนจุดที่ทำการทดลองจริงได้



รูปที่ 4.26 การตรวจสอบสมมติฐานแบบจำลองของการทดลองที่ 3.4 (1) ความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติของความผิดพลาด (2) ค่าความผิดพลาดและลำดับของข้อมูล

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่ 3.4

source	DF <sup>a</sup>	ANOVA parameter			
		SS <sup>b</sup>	MS <sup>c</sup>	F-Value	P-value
Model	9	5589.0	74.54	8.78	<0.0001
Residual	10	707.3	2.64	-	-
Lack-of-fit	5	641.5	3.02	0.0130	0.3798
Total	19	6296.4	-	-	-

$R^2 = 88.8\%$

#### 4.2.2 การบำบัดสีย้อมดิสเพิร์ส 153

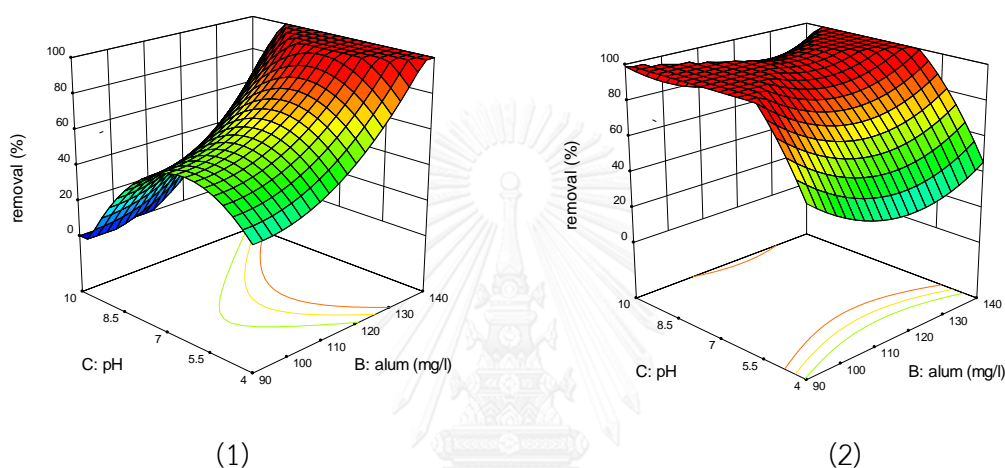
จากการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นสารเริ่มต้น กระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 โดยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม ปรับความเข้มข้นในช่วง 20 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ความเข้มข้นสีเท่ากับ 378 ถึง 600 เอดีเอ็มไอ) ความเข้มข้นสารส้ม 50 ถึง 550 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชเริ่มต้น 4 ถึง 10 ผลการทดลองของการทดลองดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 โดยวิธีตกตะกอนด้วยสารส้ม

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสารส้ม (mg/l)	พีเอชเริ่มต้น	ประสิทธิภาพการบำบัดสี	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
1	22	100	5.2	57.6	178
2	28	100	5.2	69.1	177
3	22	130	5.2	85.7	60
4	28	130	5.2	72	160
5	22	100	8.8	35.5	270
6	28	100	8.8	84.5	89
7	22	130	8.8	71	121
8	28	130	8.8	82.6	100
9	20	115	7	60	151
10	30	115	7	84	96
11	25	90	7	46.8	266
12	25	140	7	89	55
13	25	115	4	4.3	478
14	25	115	10	7.6	462
15	25	115	7	62	190
16	25	115	7	59.3	204
17	25	115	7	64	180
18	25	115	7	61.2	194
19	25	115	7	58.3	208
20	25	115	7	64	180

### 1.) ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

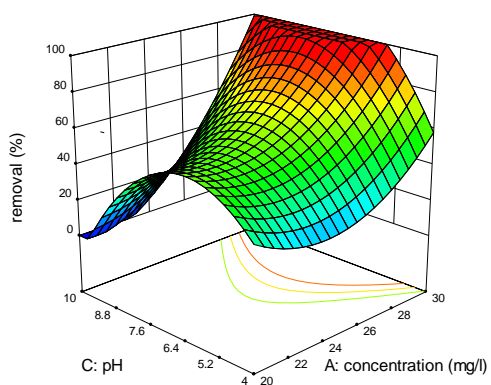
การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยส้มสีดิสเพิร์ส 153 จากรูปที่ 4.21 ค่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรองจากความเข้มข้นสารส้ม ( $y_1$  8.49%) จากรูปที่ 4.27 ค่าความเข้มข้นสีที่เปลี่ยนจาก 20 เป็น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างมากเนื่องจากบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 มีความสามารถละลายน้ำต่ำจึงสามารถจับกับสารส้มและตกตะกอนจากน้ำเสียได้ดี Kim และคณะ (2004)



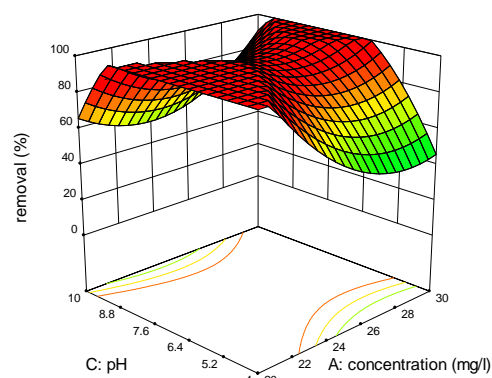
รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสารส้มค่าต่างๆ (1) ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l (2) ค่าความเข้มข้นสารส้ม 30 mg/l

### 2.) ผลของความเข้มข้นสารส้มต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นสารส้มต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 ความเข้มข้นสารส้มส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 มากที่สุด ( $y_2$  15.99%) จากรูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพของการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารส้มจาก 90 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 140 มิลลิกรัมต่อลิตรแสดงถึงผลของกลไก Charge neutralization ส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการรวมตะกอน



(1)

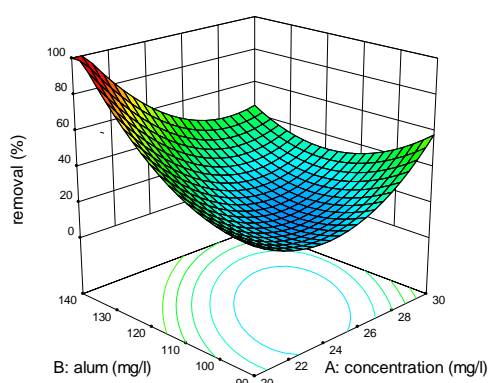


(2)

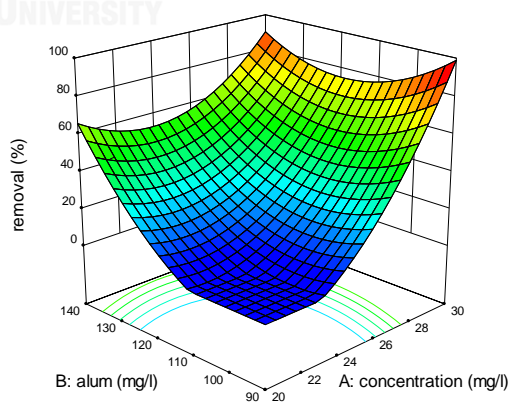
รูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพในการบำบัดสปีดิสเพิร์ส 153 ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสีเริ่มต้นค่าต่างๆ (1) ค่าความเข้มข้นสารสี 90 mg/l (2) ค่าความเข้มข้นสารสี 140 mg/l

### 3.) ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การทดลองศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดสปีดิสเพิร์ส 153 ทำการศึกษาในช่วงพีเอช 4 ถึง 10 จากการศึกษาพบว่าค่าพีเอชในช่วงที่ศึกษามีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี โดยมีผลต่อการบำบัดสปีดิสเพิร์ส 153 น้อยที่สุด ( $y_3$  0.02%) ค่าพีเอชที่สภาวะเหมาะสมที่สุดในการบำบัดสปีดิสเพิร์ส 153 คือ 7.59 ประสิทธิภาพการบำบัด 57.5% โดยที่ช่วงพีเอช 5-9 ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดลงเมื่อพีเอชสูงหรือต่ำลง



(1)

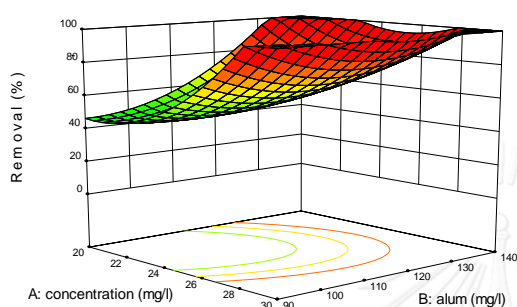


(2)

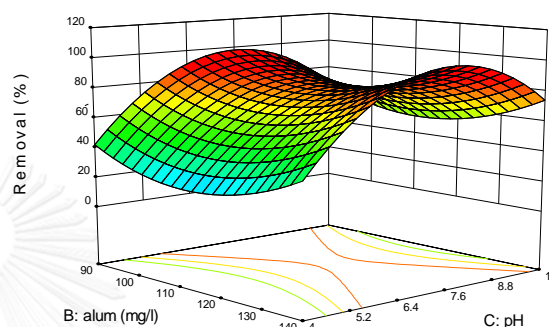
รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพในการบำบัดสปีดิสเพิร์ส 153 ที่ความเข้มข้นสารสีและความเข้มข้นสีเริ่มต้นค่าต่างๆ (1) ค่าพีเอช 4 (2) ค่าพีเอช 10

#### 4.) การหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดลองสามารถสรุปสภาวะเหมาะสมในการกำจัดสีดีสเฟิร์ส 153 โดยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มโดยใช้แบบจำลองทางสถิติพื้นที่ผิวตอบสนอง คือการใช้ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 28.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารส้ม 136.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้น 7.59 ระบบจะสามารถกำจัดสีได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 97 และมีสีเหลือในน้ำหลังการบำบัดเท่ากับ 26 เอดีเอ็มไอตั้งรูปที่ 4.30



(ก.)

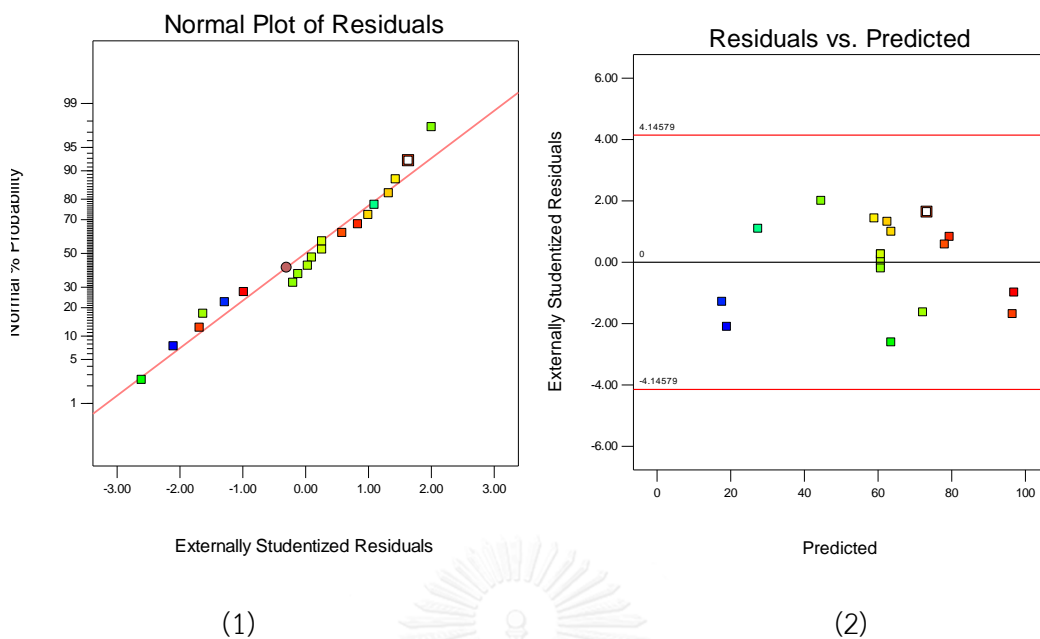


(ข.)

รูปที่ 4.30 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีดีสเฟิร์ส 153 (ก.) ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นและความเข้มข้นสารส้มที่สภาวะเหมาะสมที่สุด (ข.) ผลความเข้มข้นสารส้มและค่าพีเอชที่สภาวะเหมาะสมที่สุด

#### 5.) การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากรูปที่ 4.31 กราฟความผิดพลาดมีการกระจายรอบเส้นศูนย์กราฟ ความกว้างแถบคงที่และกระจายแบบไม่มีรูปแบบแสดงถึงสามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ จากตารางที่ 4.10 ค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ซึ่งน้อยกว่าระดับ 0.05 สรุปได้ว่าตัวแปรต้นทั้ง 3 ได้แก่ ความเข้มข้นสารเริ่มต้น ความเข้มข้นสารส้ม และค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีดีสเฟิร์ส 153 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) 83.7% แสดงถึงแบบจำลองสามารถแทนจุดที่ทำการทดลองจริงได้



รูปที่ 4. 31 การตรวจสอบสมมติฐานแบบจำลองของการทดลองที่ 5 (1) ความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติของความผิดพลาด (2) ค่าความผิดพลาดและลำดับของข้อมูล

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่ 5

source	DF <sup>a</sup>	ANOVA parameter			
		SS <sup>b</sup>	MS <sup>c</sup>	F-Value	P-value
Model	9	8523.4	347.25	12.06	<0.0001
Residual	10	1664.2	28.80	-	-
Lack-of-fit	5	1636.3	50.35	58.62	0.0002
Total	19	10187.6	-	-	-

$$R^2 = 83.7\%$$



#### 4.2.3 การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีดิสเพิร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1 ในน้ำเสีย

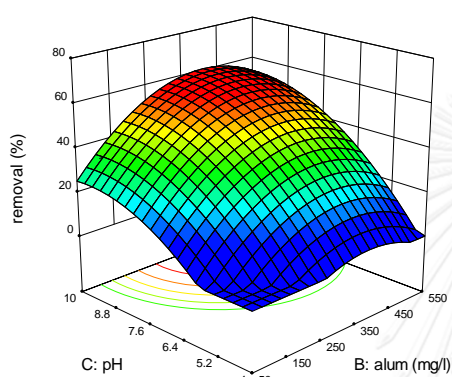
จากการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นสารเริ่มต้น กระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีดิสเพิร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1 โดยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม ปรับความเข้มข้นในช่วง 20 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารส้ม 90 ถึง 140 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชเริ่มต้น 4 ถึง 10 ผลการทดลองดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสีดิสเพิร์ส 153 โดยวิธีตกตะกอนเคมี

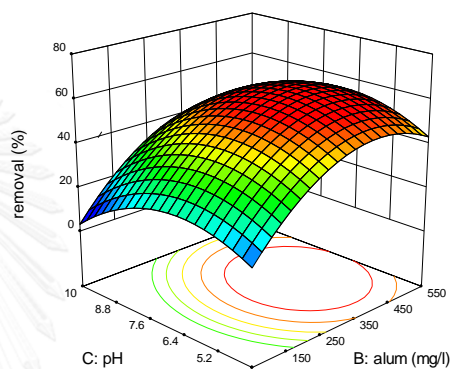
ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสารส้ม (mg/l)	พีเอชเริ่มต้น	ประสิทธิภาพการบำบัดสี	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
1	22	150	5.2	17.9	659
2	28	150	5.2	39.34	612
3	22	450	5.2	30.29	559
4	28	450	5.2	50.14	503
5	22	150	8.8	38.4	494
6	28	150	8.8	33	676
7	22	450	8.8	49.63	404
8	28	450	8.8	49.65	508
9	20	300	7	46.05	376
10	30	300	7	55.71	504
11	25	50	7	9.5	814
12	25	550	7	47.56	472
13	25	300	4	14.3	854
14	25	300	10	50.33	447
15	25	300	7	49.22	457
16	25	300	7	43.33	510
17	25	300	7	51	441
18	25	300	7	49	459
19	25	300	7	49	459
20	25	300	7	50	450

### 1.) ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสิดิสเพิร์ส 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวล จากรูปที่ 4.21 ค่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรองจากความเข้มข้นสารส้ม ( $y_1$  6.04%) จากรูปที่ 4.32 ค่าความเข้มข้นสีที่เปลี่ยนจาก 20 เป็น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดลดลง



(1)

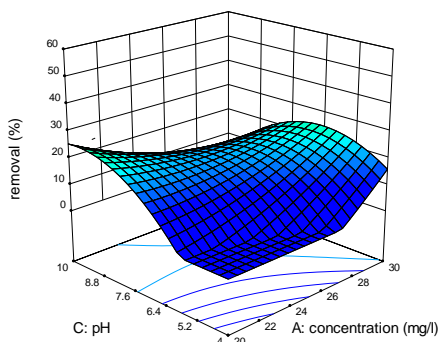


(2)

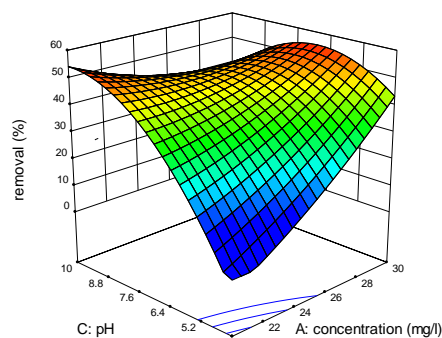
รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 และ ดิสเพิร์ส 153 1:1 ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสารส้มค่าต่างๆ (1) ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l (2) ค่าความเข้มข้นสารส้ม 30 mg/l

### 2.) ผลของความเข้มข้นสารส้มต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นสารส้มต่อประสิทธิภาพการบำบัดรีแอคทีฟ 196 ผสมกับสิดิสเพิร์ส 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวล ความเข้มข้นสารส้มส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 มากที่สุด ( $y_2$  29.38%) จากรูปที่ 4.33 ประสิทธิภาพของการบำบัดสีเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารส้มจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 550 มิลลิกรัมต่อลิตรแสดงถึงกลไก Charge neutralization มีผลอย่างมากในการรวมตะกอน



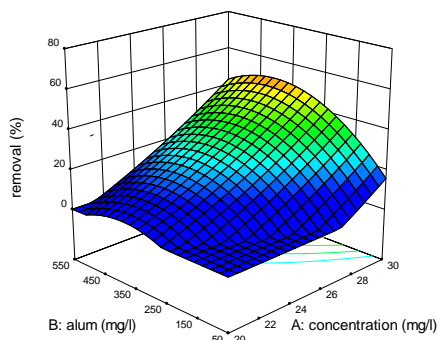
(1)



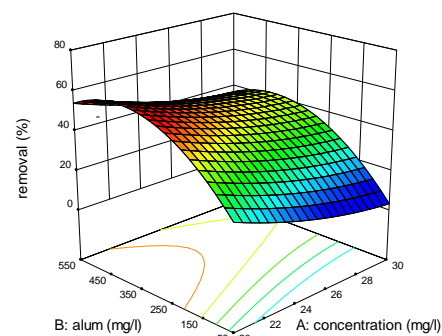
(2)

รูปที่ 4.33 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 และ ดิสเพิร์ส 153 1:1 ที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นสีเริ่มต้นค่าต่างๆ (1) ค่าความเข้มข้นสารสี 50 mg/l (2) ค่าความเข้มข้นสารสี 550 mg/l  
3.) ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การทดลองศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสีดิสเพิร์ส 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวล ทำการศึกษาในช่วงพีเอช 4 ถึง 10 จากการศึกษาพบว่าค่าพีเอชในช่วงที่ศึกษามีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยมีผลต่อการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสีดิสเพิร์ส 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวล รองจากความเข้มข้นสารสี ( $y_3$  19.44%) ค่าพีเอชที่สภาวะเหมาะสมที่สุดในการบำบัด คือ 7.01 ประสิทธิภาพการบำบัด 57.0% โดยที่ช่วงพีเอช 4 สามารถบำบัดได้เพียงเล็กน้อยตามรูปที่ 4.34 ช่วงพีเอช 5 ถึง 9 ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดลง



(1)

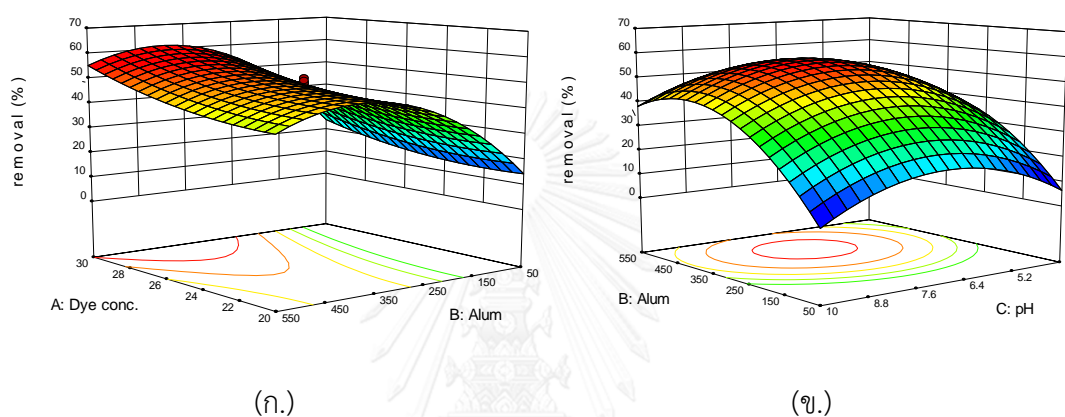


(2)

รูปที่ 4.34 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 และ ดิสเพิร์ส 153 1:1 ที่ความเข้มข้นสารสีและความเข้มข้นสีเริ่มต้นค่าต่างๆ (1) ค่าพีเอช 4 (2) ค่าพีเอช 10

#### 4.) การหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด

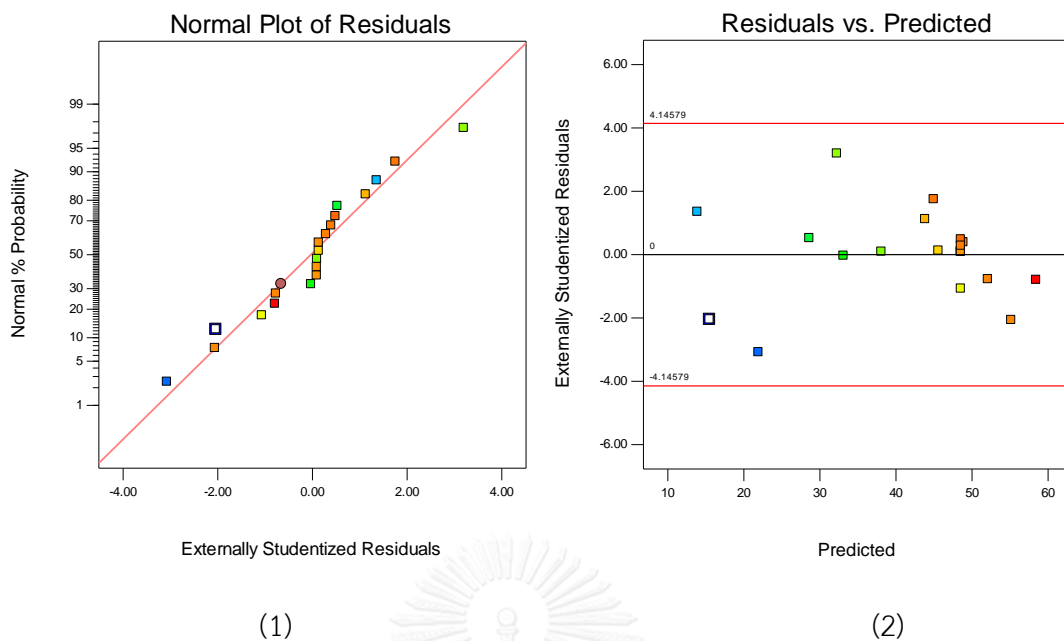
จากการทดลองสามารถสรุปสภาวะเหมาะสมในการกำจัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสีดีสเพิร์ส 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวลโดยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มโดยใช้แบบจำลองทางสถิติพื้นที่ผิวตอบสนอง คือการใช้ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 28.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารส้ม 396.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้น 7.01 ระบบจะสามารถกำจัดสีได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 57.5 และมีสีเหลือในน้ำหลังการบำบัดเท่ากับ 445 เอดีเอ็มไอดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสีดีสเพิร์ส 153 (ก.) ผลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นและความเข้มข้นสารส้มที่สภาวะเหมาะสมที่สุด (ข.) ผลความเข้มข้นสารส้มและค่าพีเอชที่สภาวะเหมาะสมที่สุด

#### 5.) การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากรูปที่ 4.36 กราฟความผิดพลาดมีการกระจายรอบเส้นศูนย์กราฟ ความกว้างแถบคงที่และกระจายแบบไม่มีรูปแบบแสดงถึงสามารถใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ จากตารางที่ 4.13 ค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ซึ่งน้อยกว่าระดับ 0.05 สรุปได้ว่าตัวแปรต้นทั้ง 3 ได้แก่ ความเข้มข้นสารเริ่มต้น ความเข้มข้นสารส้ม และค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสีดีสเพิร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1 โดยมวล ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) 91.6% แสดงถึงแบบจำลองสามารถแทนจุดที่ทำการทดลองจริงได้



รูปที่ 4.36 การตรวจสอบสมมติฐานแบบจำลองของการทดลองที่ 6 (1) ความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติของความผิดพลาด (2) ค่าความผิดพลาดและลำดับของข้อมูล

ตารางที่ 4. 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่ 3.6

source	DF <sup>a</sup>	ANOVA parameter			
		SS <sup>b</sup>	MS <sup>c</sup>	F-Value	P-value
Model	9	3125.3	347.25	12.06	<0.0001
Residual	10	288.0	28.80	-	-
Lack-of-fit	5	251.8	50.35	6.96	0.0264
Total	19	3413.2	-	-	-

$$R^2 = 91.6\%$$

#### 4.2.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีของสีแต่ละชนิดโดยวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้ม

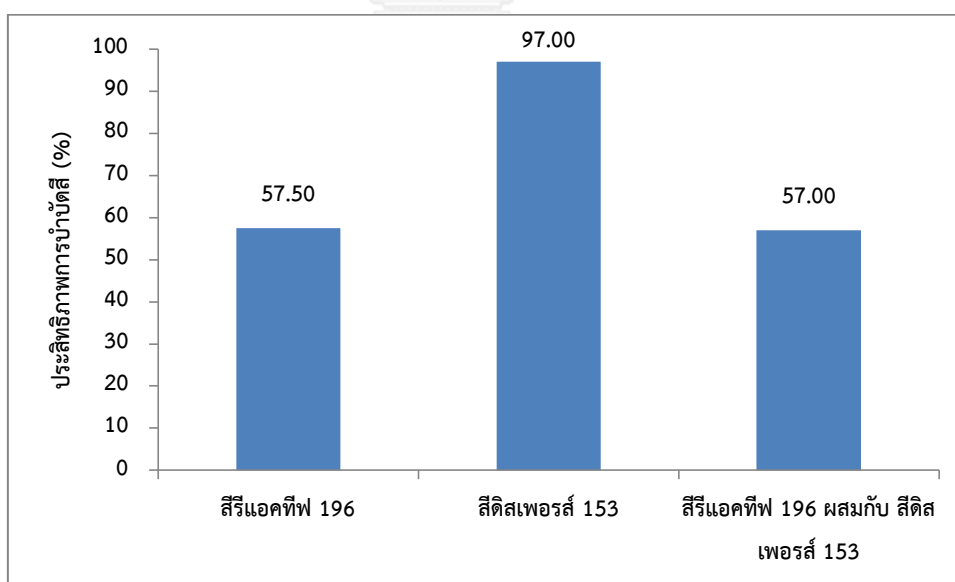
ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่สภาวะเหมาะสมเท่ากับ 57.5% สีดิสเพิร์ส 153 เท่ากับ 97.0% และสีผสมของ รีแอกทีฟ 196 กับ ดิสเพิร์ส 153 1:1 โดยมวลเท่ากับ 57.0 % จากงานวิจัยของ (Wong และคณะ (2007)) ทำการศึกษาการบำบัดสีผสมของสีดิสเพิร์สและสีรีแอกทีฟในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้วิธีตกตะกอนทางเคมีโดยใช้ PACl และ  $MgCl_2$  พบว่าสำหรับสารรวมตะกอนทั้ง 2 ชนิดประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของสีรีแอกทีฟมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดสีของวิธีตกตะกอนทางเคมีขึ้นกับความสามารถในการละลายของสีย้อม สีรีแอกทีฟมีความสามารถในการละลายน้ำสูงจึงส่งผลการรวมตะกอนเกิดขึ้นขึ้นได้ยากกว่าและใช้เวลานานกว่า สีดิสเพิร์สที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีค่ามากที่สุด

จากการศึกษาพบว่าค่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีน้อยที่สุด ( $y_1$  0.66-8.59%) ค่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นที่สภาวะเหมาะสมที่สุดในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 คือ 24.9 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะเหมาะสมสำหรับ สีดิสเพิร์ส 153 คือ 28.42 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะเหมาะสมสำหรับสีผสมของสีรีแอกทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1 โดยมวลคือ 28.21 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการวิจัยของ Kim และคณะ (2004) ศึกษาการตกตะกอนสีรีแอกทีฟและสีดิสเพิร์ส โดยใช้เฟอริกคลอไรด์ซึ่งเป็นคอลลอยด์ที่มีประจุลบการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ในช่วงก่อนถึงจุดไอโซอิเล็กทริก (Iso electric point) จะเกิดจากกลไก charge neutralization เป็นหลัก เมื่อเลยจุดไอโซอิเล็กทริกจะเกิดจากกลไกการดูดติดผิว (adsorption) และกลไก bridge formation การกำจัดสีดิสเพิร์สมีประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องจากเกิดกระบวนการกำจัดแบบกวาด sweep folc (สมคิด ,2525) จากงานวิจัยของ Wong และคณะ (2007) พบว่าเมื่ออัตราส่วนของสีรีแอกทีฟสูงขึ้นจะทำให้ต้องใช้ความเข้มข้นสารตกตะกอนมากขึ้น ที่สภาวะที่เหมาะสมความเข้มข้นสารส้มที่ใช้ในการบำบัดสีดิสเพิร์สเท่ากับ 136.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่การบำบัดสีรีแอกทีฟและสีผสมของสีรีแอกทีฟและสีดิสเพิร์สในอัตราส่วน 1:1 เท่ากับ 440.8 และ 396.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Kim และคณะ (2004) เมื่อความเข้มข้นของสารตกตะกอนมีค่าน้อยทำให้ประจุบวกไม่สมดุลกับประจุลบของคอลลอยด์ในขณะที่เมื่อความเข้มข้นของสารตกตะกอนมากเกินไปจะเกิด Charge reversal และทำให้การตกตะกอนเกิดน้อยลง ความเข้มข้นสารส้มส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

ลีดิสเพิร์ส 153 และ สีมผสมของสีรีแอกทีฟ 196 และลีดิสเพิร์ส 153 มากที่สุด ( $y_2$  15.99-25.38%) แต่ส่งผลต่อการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 น้อยที่สุด ( $y_2$  0.42%)

ค่าพีเอชเริ่มต้นที่สภาวะเหมาะสมที่สุดในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 คือ 8.75 ประสิทธิภาพการบำบัด 57.5% สำหรับลีดิสเพิร์ส 153 ค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 7.59 ประสิทธิภาพการบำบัด 97.0% และสีผสมของสีรีแอกทีฟ 196 และลีดิสเพิร์ส 153 พีเอชที่เหมาะสมคือ 7.01 ประสิทธิภาพการบำบัด 57.0% โดยสีทั้งสามชนิดที่ช่วงพีเอช 5-9 ประสิทธิภาพการบำบัดสูง จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดลง สามารถอธิบายจากกราฟสมดุลการละลายของ Al(III) โดยสมดุลการละลายของในรูป  $Al(OH)_3(s)$  ซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำได้น้อยมากเกิดที่ค่าพีเอช 5-8.5 Yilmaz และคณะ (2007) เมื่อค่าพีเอชสูงเกิน 8.5 การละลายในรูป  $Al(OH)_4^-(aq)$  เกิดมากขึ้นโดย  $Al(OH)_4^-(aq)$  ไม่เกิดการรวมตะกอนส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง จากการศึกษาพบว่าค่าพีเอชในช่วงที่ศึกษามีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยมีผลต่อการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ( $y_3$  81.54%) และสีผสม Reactive 196 และลีดิสเพิร์ส 153 ( $y_3$  29.38%) มากที่สุด แต่ส่งผลการบำบัดลีดิสเพิร์ส 153 น้อยที่สุด ( $y_3$  0.02%)



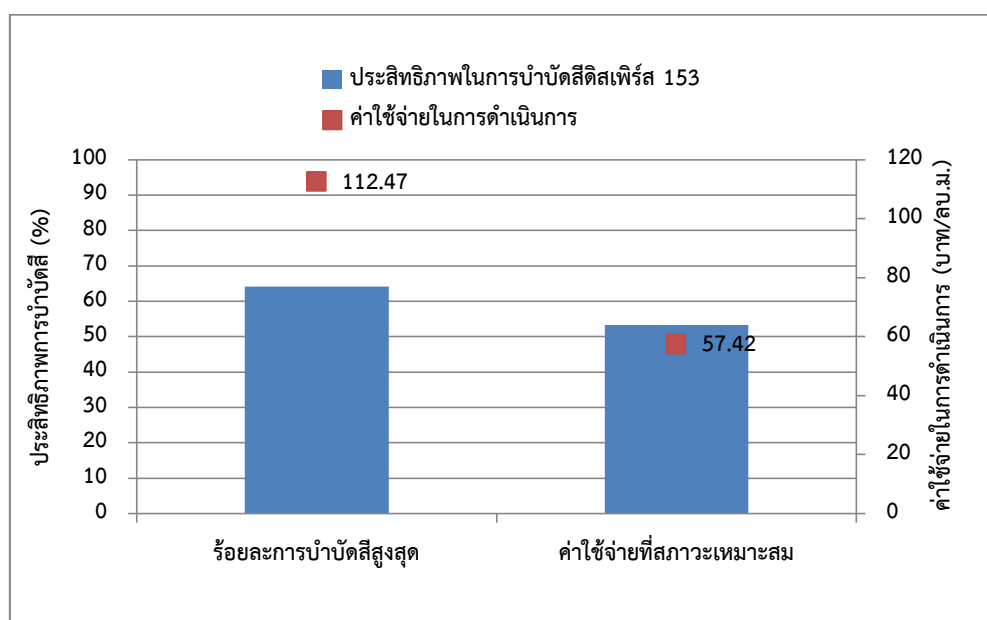
รูปที่ 4.37 ประสิทธิภาพการบำบัดสีแต่ละชนิดที่สภาวะเหมาะสมที่สุดโดยวิธีตกตะกอนทางเคมี





ตารางที่ 4.13 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ด้วยการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

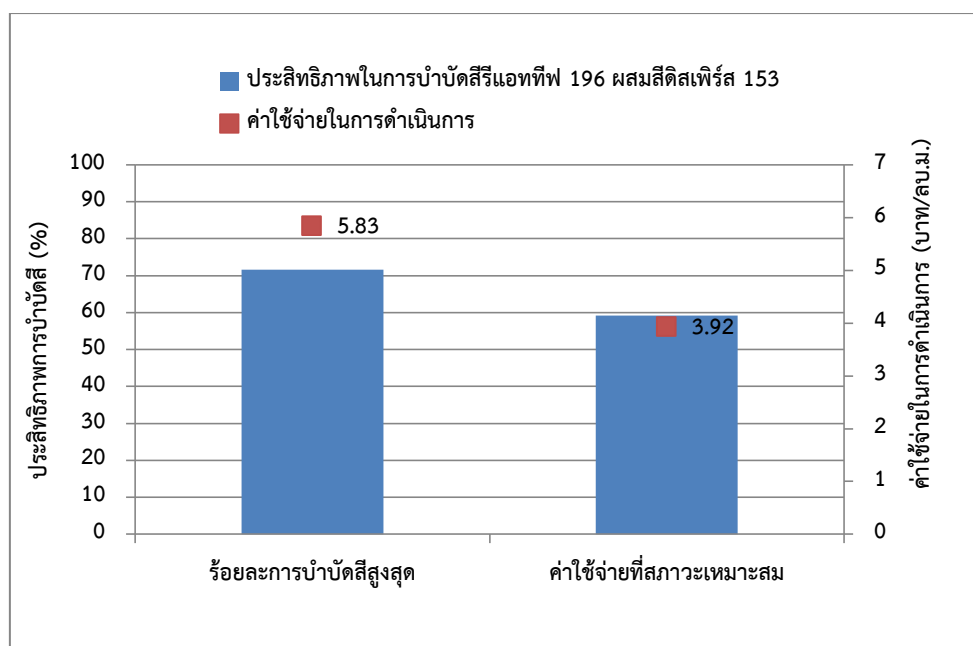
สถานะที่ทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	กระแสไฟฟ้า (A)	อัตราการไหล (l/hr)	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
ร้อยละการบำบัดสีสูงสุด	21.0	1.06	10.0	212
ค่าใช้จ่ายที่สถานะเหมาะสม	26.6	0.51	11.1	256



ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 ด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีดิสเพิร์ส 153 ด้วยการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

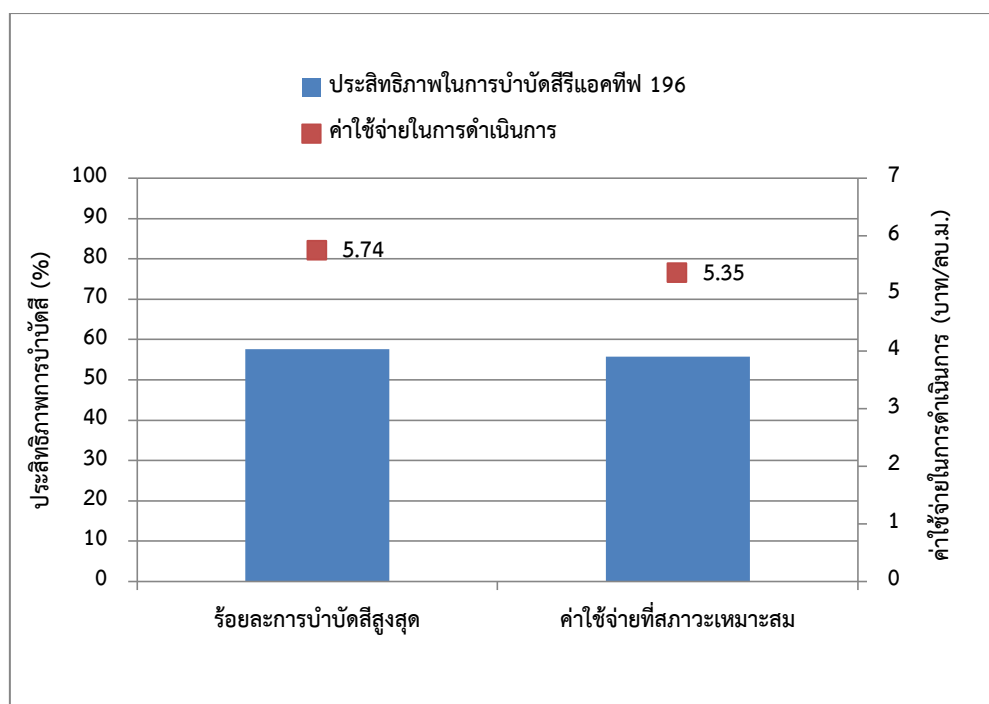
สถานะที่ทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	กระแสไฟฟ้า (A)	อัตราการไหล (l/hr)	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
ร้อยละการบำบัดสีสูงสุด	23.3	3.51	1.40	168
ค่าใช้จ่ายที่สถานะเหมาะสม	29.3	2.26	1.48	290



รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสรีรแอคทีฟ 196 ผสมกับสตีติสเฟิร์ส 153 ด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 4.15 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสรีรแอคทีฟ 196 ผสมกับ สตีติสเฟิร์ส 153 วิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

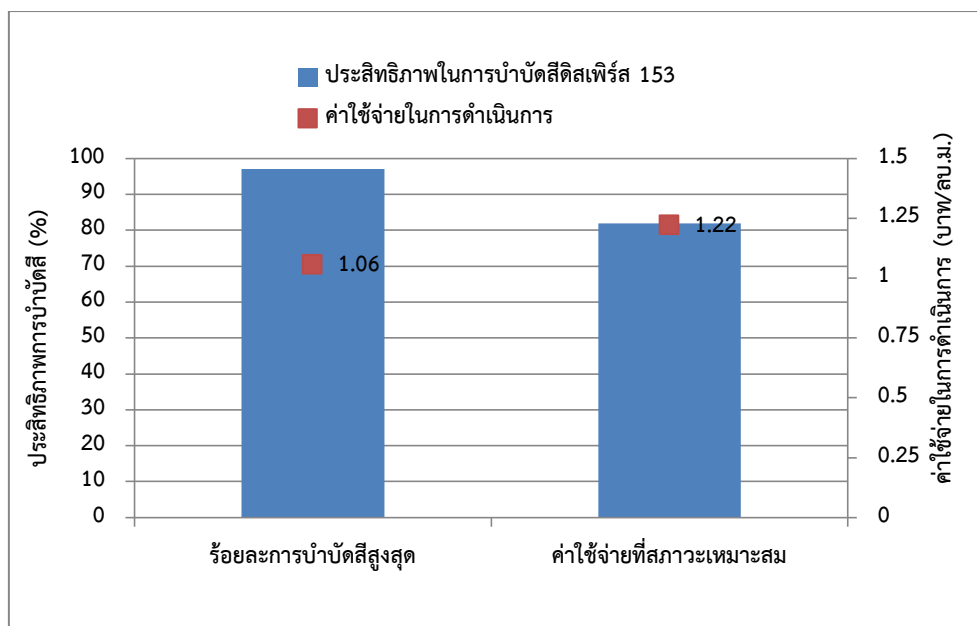
สภาวะที่ทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	กระแสไฟฟ้า (A)	อัตราการไหล (L/hr)	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
ร้อยละการบำบัดที่สูงที่สุด	23.3	1.35	6.5	261
ค่าใช้จ่ายที่สภาวะเหมาะสม	22.1	1.0	6.5	300



รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม

ตารางที่ 4.16 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม

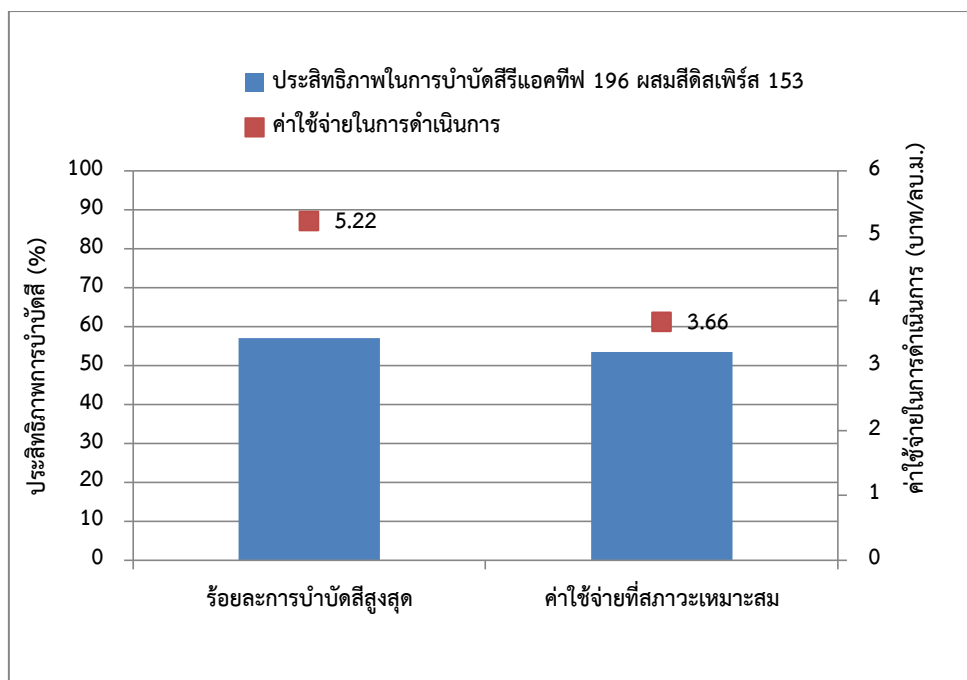
สภาวะที่ทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสารส้ม (mg/l)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
ร้อยละการบำบัดสีสูงสุด	24.9	440.8	8.75	607
ค่าใช้จ่ายที่สภาวะเหมาะสม	25.0	399.7	7.84	615



รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีดีสเฟิร์ส 153 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม

ตารางที่ 4.17 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีดีสเฟิร์ส 153 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม

สถานะที่ทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสารส้ม (mg/l)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
ร้อยละการบำบัดสีสูงสุด	28.4	136.7	7.59	26
ค่าใช้จ่ยที่สภาวะเหมาะสม	28.9	124.8	7.59	69



รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสีดีสเพิร์ส 153 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม

ตารางที่ 4.18 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสีดีสเพิร์ส 153 วิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม

สถานะที่ทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสารส้ม (mg/l)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
ร้อยละการบำบัดที่สูงที่สุด	28.2	396.8	7.01	445
ค่าใช้จ่ายที่สถานะเหมาะสม	20.1	179.5	9.13	375

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 การบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153 ด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

การบำบัดสีแต่ละชนิดด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าอัตราการไหลหรือเวลา กักเก็บเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงสุด อัตราการไหลที่ลดลงจะส่งผลให้เวลากักเก็บ มากขึ้นและทำให้การบำบัดเกิดได้สมบูรณ์มากขึ้นจะเห็นได้จากอัตราการไหลที่สภาวะร้อยละการ บำบัดสีสูงสุดของสีรีแอกทีฟ 196 สีดิสเพิร์ส 153 และสีผสมของสีรีแอกทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153 ในอัตราส่วน 1:1 โดยมวลเท่ากับ 10 ลิตรต่อชั่วโมง 1.4 ลิตรต่อชั่วโมงและ 6.5 ลิตรต่อชั่วโมง เวลา กักเก็บเท่ากับ 0.2 ชั่วโมง 1.43 ชั่วโมง และ 0.31 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งเป็นอัตราการไหลต่ำสุดหรือ เวลา กักเก็บสูงสุดที่ทำการทดลอง ผลของกระแสไฟฟ้าสำหรับกระบวนการออกซิเดชันด้วย กระแสไฟฟ้ามีผลรองจากอัตราการไหล โดยกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการสารถออกซิไดซ์  $\text{OCl}^-$  และ  $\text{Cl}_2$  เกิดในอัตราสูงขึ้นและออกซิไดซ์หมู่โครโมฟอร์ที่ทำให้เกิดสีได้มากขึ้น ความเข้มข้น เริ่มต้น ความเข้มข้นสีที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเนื่องจากเมื่อความเข้มข้นสีมาก ขึ้นจะเกิดการจับกันของสีย้อมกับสารถออกซิไดซ์ทำให้สารถออกซิไดซ์ลดลง ที่สภาวะร้อยละการบำบัดสี สูงสุดการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 สีดิสเพิร์ส 153 และสีผสมของสีรีแอกทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153 สามารถบำบัดสีได้ 83.3% 64.2% และ 71.6% ตามลำดับและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ 0.85 บาท/ลบ.ม. 57.42 บาท/ลบ.ม. และ 3.92 บาท/ลบ.ม. ตามลำดับ

##### 5.1.2 การบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม

การบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153 ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วย สารส้มตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสีแต่ละชนิดแตกต่างกันไปเนื่องจากสมบัติของสี ความ เข้มข้นสีเริ่มต้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมแต่ละชนิดน้อยที่สุดน่าจะเกิดจากความเข้มข้นสี ที่ใช้การทดลองอยู่ในช่วงแคบ 20 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตรจึงไม่เห็นผลของความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลง มากนัก ความเข้มข้นสารส้มส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 และสีผสมของสีรีแอกทีฟ

196 และสดีดิสเพิร์ส 153 มากที่สุด แต่ไม่ส่งผลต่อการบำบัดสีรีแอกทีฟ ในขณะที่ค่าพีเอชส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟมากที่สุดและเกือบทั้งหมด น่าจะเกิดจากกลไกการบำบัดสีรีแอกทีฟน่าจะเกิดจากกลไกการกวาดตะกอน (sweep coagulation) ซึ่งเกิด  $Al(OH)_{3(s)}$  ซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำได้น้อยมากเกิดที่ค่าพีเอช 5-8.5 แต่เพียงกระบวนการเดียว ไม่เกิดการดูลประจุ Charge neutralization ในขณะที่การตกตะกอนของสดีดิสเพิร์ส 153 และสีผสมของสีรีแอกทีฟ 196 ผสมสดีดิสเพิร์ส 153 เกิดทั้ง 2 กระบวนการควบคู่กันไป การตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มที่สภาวะร้อยละการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 สดีดิสเพิร์ส 153 และสีผสมของสีรีแอกทีฟ 196 และสดีดิสเพิร์ส 153 สามารถบำบัดสีได้ 57.5% 97.0% และ 57.0% ตามลำดับและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ 5.35 บาท/ลบ.ม. 1.22 บาท/ลบ.ม. และ 3.66 บาท/ลบ.ม.

### 5.1.3 การเปรียบเทียบการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 และสดีดิสเพิร์ส 153

การบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถบำบัดสีได้ดีกว่าวิธีตกตะกอนทางเคมีซึ่งไม่สามารถบำบัดสีให้ความเข้มข้นสีต่ำกว่า 300 แอติเอ็มไอได้ ในขณะที่การบำบัดสดีดิสเพิร์ส 153 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มสามารถบำบัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า โดยทั้ง 2 วิธีสามารถบำบัดสีได้ต่ำกว่า 300 แอติเอ็มไอ แต่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าวิธีตกตะกอนทางเคมีมากและไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้จริง ส่วนการบำบัดสีผสมของสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสดีดิสเพิร์ส 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวลวิธีตกตะกอนทางเคมีสามารถบำบัดได้ประสิทธิภาพสูงกว่าและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการใกล้เคียงกับวิธีตกตะกอนทางเคมี จากผลการทดลองจะพบว่าการบำบัดสีแต่ละชนิดแยกกันโดยบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ด้วยบวกรอกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า และบำบัดสดีดิสเพิร์ส 153 ด้วยการตกตะกอนทางเคมีจะสามารถบำบัดสีได้มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการได้มาก ตารางที่ 5.1 และ 5.2 สรุปสภาวะการทดลองการที่สภาวะเหมาะสมของวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มตามลำดับ ตารางที่ 5.3 ถึง 5.5 สรุปงานวิจัยการทดลองการบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและวิธีตกตะกอนทางเคมีอื่นๆ

#### 5.1.4 ข้อเสนอแนะในการเลือกระบบบำบัดที่เหมาะสมในการบำบัดมลพิษแต่ละประเภท

การบำบัดสีรีแอกทีฟควรบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าเพื่อให้สามารถกำจัดสีให้ต่ำกว่า 300 เอดีเอ็มไอและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่ต่ำ การบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าต้องปรับค่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นในช่วง 1450-1500 เอดีเอ็มไอ และปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 โดยเติมสารกรดและเบสเพื่อปรับพีเอช ควบคุมกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.06 แอมแปร์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5.3 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราไหล 10 ลิตรต่อชั่วโมง เวลาเก็บ 0.2 ชั่วโมง

การบำบัดสีดิสเพิร์สควรบำบัดด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีเพื่อให้สามารถกำจัดสีให้ต่ำกว่า 300 เอดีเอ็มไอและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่ต่ำ โดยปรับค่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นในช่วง 550-600 เอดีเอ็มไอ และใช้กรดหรือเบสเพื่อปรับค่าพีเอชสีย้อมเท่ากับ 7.6 เติมสารส้มความเข้มข้นเท่ากับ 137 มิลลิกรัมต่อลิตร

โรงงานที่บำบัดทั้งสีรีแอกทีฟและสีดิสเพิร์สควรบำบัดสีแต่ละชนิดแยกกันโดยบำบัดสีรีแอกทีฟด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและบำบัดสีดิสเพิร์สด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเลือกระบบบำบัดที่เหมาะสมกับมลพิษที่บำบัด

ชนิดสีที่บำบัด	กระบวนการบำบัด		ค่าพีเอชที่เหมาะสม	ช่วงความเข้มข้นสีที่ทำการบำบัด (เอดีเอ็มไอ)
	EO	CC		
สีรีแอกทีฟ	✓		5.0	1450-1500
สีดิสเพิร์ส		✓	7.6	550-600
สีผสมของสีรีแอกทีฟและสีดิสเพิร์ส	✓	✓	5.0 สีรีแอกทีฟ 7.6 สีดิสเพิร์ส	1450-1500 สีรีแอกทีฟ 550-600 สีดิสเพิร์ส

#### ข้อควรระวังในการบำบัดน้ำเสียสีแต่ละชนิด

การบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าควรควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการดำเนินการสามารถนำมาปรับใช้ในการขยายขนาดปฏิกิริยให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้โดยการรักษาค่าคล้าย (Similarity) โดยหลักความคล้ายที่สำคัญที่สุดสำหรับปฏิกิริยทางไฟฟ้าเคมีคือความคล้ายในด้านกระแสและความต่างศักย์โดยใช้ตัวแปรไร้นหน่วยแวกเนอร์ (Wagner number ( $W_a$ )) ดังต่อไปนี้



$$W_a = \left(\frac{k}{L}\right) \times \left(\frac{dV}{di}\right)$$

(k = ความนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์, L = ความยาวของปฏิกิริยา, dV = ความแตกต่างของความต่างศักย์ di = ความแตกต่างของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า) โดยมีหลักการว่าความคล้อยระหว่างระบบจะคงอยู่เมื่ออัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ โดยการรักษาความคล้อยกันนี้สามารถทำได้โดยการปรับระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดและการต่อขั้วในลักษณะโมโนโพลาร์และไบโพลาร์

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบการบำบัดสีผสมของสีรีแอคทีฟและสีดิสเพิร์สปริมาณอย่างละ 0.5 m<sup>3</sup>

วิธีการบำบัด	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ (บาท)
วิธี EO	<300 ADMI	3.92
วิธี CC	>300ADMI	3.66
บำบัด Reactive 196 ด้วย EO และ บำบัด Disperse 153 ด้วย CC	<300 ADMI	1.04

การบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 และสีดิสเพิร์ส 153 ปริมาณ 0.5 m<sup>3</sup> การบำบัดสีทั้งสองชนิดร่วมกันในระบบตกตะกอนทางเคมีซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในประเทศไทยในปัจจุบันไม่สามารถลดความเข้มข้นสีให้ต่ำกว่า 300 เอดีเอ็มไอ และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเท่ากับ 3.66 บาท ในขณะที่การบำบัดด้วยระบบออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าในการบำบัดสีทั้งสองชนิดรวมกันจะสามารถลดความเข้มข้นสีให้ต่ำกว่า 300 เอดีเอ็มไอได้แต่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ 3.92 บาท แต่การบำบัดสีทั้งสองชนิดแยกกันโดยบำบัดสีรีแอคทีฟ 196 0.5 m<sup>3</sup> ด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและบำบัดสีดิสเพิร์ส 153 0.5 m<sup>3</sup> ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีสามารถบำบัดสีได้ต่ำกว่า 300 เอดีเอ็มไอและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเพียง 1.04 บาท เมื่อเปรียบเทียบกับระบบตกตะกอนทางเคมีที่ใช้ในปัจจุบันสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินลงได้เป็นสัดส่วน 71.5%

ตารางที่ 5.3 สภาวะการทดลองของการทดลองออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

ชนิดสี	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm <sup>2</sup> )	เวลากักเก็บ (h)	ประสิทธิภาพการบำบัดสี	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดมลพิษ
Reactive 196	21.0	5.3	0.2	83.3	11 kWh/kgdye 0.28 kWh/m <sup>3</sup>
Disperse 153	23.3	17.6	1.43	64.2	777 kWh/kgdye 19.4 kWh/m <sup>3</sup>
สีผสมของ Reactive 196 และ Disperse 153	23.3	6.75	0.31	71.6	65 kWh/kgdye 1.31 kWh/m <sup>3</sup>

ตารางที่ 5.4 สภาวะการทดลองของการทดลองตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม

ชนิดสี	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสารส้ม (mg/l)	ค่าพีเอช	ประสิทธิภาพการบำบัดสี	ค่าใช้จ่าย (บาท/กิโลกรัมสี)
Reactive 196	24.9	440.8	8.75	57.5	5.35
Disperse 153	28.4	136.7	7.59	97.0	1.22
สีผสมของ Reactive 196 และ Disperse 153	28.2	396.8	7.01	57.0	3.66

ตารางที่ 5.5 งานวิจัยการทดลองการบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและวิธีตกตะกอนทางเคมีอื่นๆ

ชนิดสี ย้อม	ระบบบำบัด	สภาวะการ ทดลอง	ประสิทธิภาพ การบำบัดสี	ค่าใช้จ่าย	อ้างอิง
Reactive Red 198	Electro- oxidation ชั่ว Ti/Ru <sub>0.3</sub> Ti <sub>0.7</sub> O <sub>2</sub>	กระแสไฟฟ้า 50mA/cm <sup>2</sup> C <sub>0</sub> 30mg/l Time 3h	80	95x10 <sup>6</sup> kWh/kgdye	Catanho และ คณะ (2006)
Reactive Orange 4	Electro- oxidation ชั่ว Pt	C <sub>0</sub> 100mg/l กระแสไฟฟ้า 10-20 mA/cm <sup>2</sup> time 1h	91	44.1kWh/m <sup>3</sup>	Lopez- Grimau และ Gutierrez (2006)
Reactive Blue 19	Electro- oxidation PbO <sub>2</sub>	C <sub>0</sub> 25mg/l กระแสไฟฟ้า 50mA/cm <sup>2</sup> time 2h	100	1.86kWh/m <sup>3</sup>	Andrade และ คณะ (2007)
น้ำเสีย สีดีสเพอร์ สจริง	Electro- oxidation ชั่ว Pt/Ti	Charge 5000 coulombs	40	-	Szpyrkowicz และคณะ (2001)
Disperse Red	Coagulation with Alum	alum 40mg/l Time 40min	87	0.32\$/kgdye	Merzouk และ คณะ (2011)
น้ำเสียสี Reactive จริง	Coagulation with Ferrous sulfate	FeSO <sub>4</sub> 400mg/l pH 12.5-13	90		Georgiou และคณะ (2003)
Reactive Blue 49 Reactive Yellow 84	Coagulation with Ferric chloride	pH 6 dose 2mM	60,71		Kim และคณะ (2004)

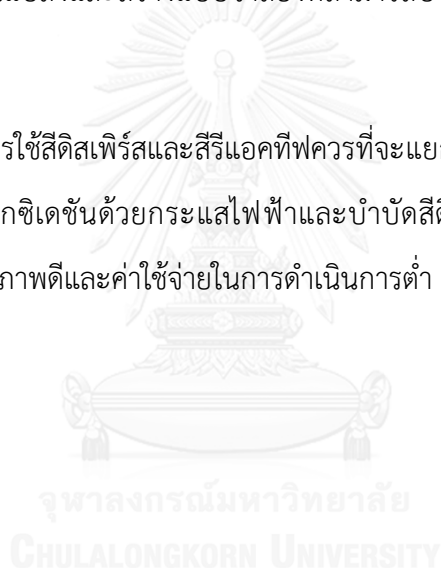
## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1.) การเลือกช่วงความเข้มข้นสีที่กว้างขึ้นจะสามารถทำให้เห็นผลของความเข้มข้นสีที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีได้ดีขึ้น

2.) ควรนำผลการทดสอบบำบัดสีรีแอกทีฟและสีย้อมสีย้อมไปขยายผลในการทดลองบำบัดน้ำเสียจริงของโรงงานฟอกย้อมและศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแล้วจึงบำบัดต่อด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี

3.) ควรมีการศึกษาพารามิเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าได้แก่ ค่าซีโอดี และค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงและสร้างแบบจำลองที่สามารถบำบัดสีและซีโอดีไปพร้อมกันอย่างมีประสิทธิภาพ

4.) โรงงานที่มีการใช้สีย้อมรีแอกทีฟและสีย้อมสีย้อมที่ควรที่จะแยกน้ำเสียสีทั้งสองชนิดแล้วบำบัดน้ำเสียรีแอกทีฟด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าและบำบัดสีย้อมด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีเพื่อให้บำบัดสีได้ประสิทธิภาพดีและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ



### รายการอ้างอิง

Alkire, R. C. and Kolb, D. M., Advances in Electrochemical Science and Engineering.(Wiley:2009).

Andrade, L. S., Ruotolo, L. A. M., Rocha-Filho, R. C., Bocchi, N., Biaggio, S. R., Iniesta, J., García-García, V. and Montiel, V. (2007). On the performance of Fe and Fe,F doped Ti-Pt/PbO<sub>2</sub> electrodes in the electrooxidation of the Blue Reactive 19 dye in simulated textile wastewater. Chemosphere **66**(11): 2035-2043.

Aquino, J. M., Rocha-Filho, R. C., Bocchi, N. and Biaggio, S. R. (2013). Electrochemical degradation of the Disperse Orange 29 dye on a  $\beta$ -PbO<sub>2</sub> anode assessed by the response surface methodology. Journal of Environmental Chemical Engineering **1**(4): 954-961.

Asaithambi, P. and Matheswaran, M. (2011). Electrochemical treatment of simulated sugar industrial effluent: Optimization and modeling using a response surface methodology. Arabian Journal of Chemistry.

Banat, F. A. and Simandl, J. (1999). Membrane distillation for dilute ethanol: separation from aqueous streams. Journal of membrane science **163**(2): 333-348.

Bratby, J., Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment.(IWA Publishing:2006).

Carliell, C., Barclay, S. and Buckley, C. (1996). Treatment of exhausted reactive dyebath effluent using anaerobic digestion: laboratory and full-scale trials. Water S. A. **22**(3): 225-233.

Catanho, M., Malpass, G. R. P. and Motheo, A. J. (2006). Photoelectrochemical treatment of the dye reactive red 198 using DSA® electrodes. Applied Catalysis B: Environmental **62**(3-4): 193-200.

Chao, W. and Lee, S. (1994). Decoloration of azo dyes by three whiterot fungi: influence of carbon source. World journal of microbiology & biotechnology **10**(5): 556-559.

Chou, W.-L., Wang, C.-T. and Chang, C.-P. (2011). Comparison of removal of Acid Orange 7 by electrooxidation using various anode materials. Desalination **266**(1-3): 201-207.

Choy, K. K., McKay, G. and Porter, J. F. (1999). Sorption of acid dyes from effluents using activated carbon. Resources, Conservation and Recycling **27**(1): 57-71.

Council, N. R. and West, C. J., International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology.(National research council:1926).

Couper, A. M., Pletcher, D. and Walsh, F. C. (1990). Electrode materials for electrosynthesis. Chemical Reviews **90**(5): 837-865.

de Oliveira, G. R., Fernandes, N. S., de Melo, J. V., da Silva, D. R., Urgeghe, C. and Martinez-Huitle, C. (2011). Electrocatalytic properties of Ti-supported Pt for decolorizing and removing dye from synthetic textile wastewaters. Chemical Engineering Journal **168**(1): 208-214.

dos Santos, A. B., Cervantes, F. J. and van Lier, J. B. (2007). Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: perspectives for anaerobic biotechnology. Bioresource Technology **98**(12): 2369-2385.

El-Ashtoukhy, E. Z. and Amin, N. (2010). Removal of acid green dye 50 from wastewater by anodic oxidation and electrocoagulation—A comparative study. J Hazard Mater **179**(1): 113-119.

Furlan, F. R., da Silva, L. G. d. M., Morgado, A. F. and de Souza, A. A. U. (2010). Removal of reactive dyes from aqueous solutions using combined coagulation/flocculation and adsorption on activated carbon. Resources, Conservation and Recycling **54**(5): 283-290.

Gaehr, F., Hermanutz, F. and Oppermann, W. (1994). Ozonation—an important technique to comply with new German laws for textile wastewater treatment. Water Science and Technology **30**(3): 255-263.

Georgiou, D., Aivazidis, A., Hatiras, J. and Gimouhopoulos, K. (2003). Treatment of cotton textile wastewater using lime and ferrous sulfate. Water Res **37**(9): 2248-2250.

Grimshaw, J., Electrochemical Reactions and Mechanisms in Organic Chemistry.(Elsevier Science:2000).

Israilides, C., Vlyssides, A., Mourafeti, V. and Karvouni, G. (1997). Olive oil wastewater treatment with the use of an electrolysis system. Bioresource Technology **61**(2): 163-170.

Jeong, J., Kim, C. and Yoon, J. (2009). The effect of electrode material on the generation of oxidants and microbial inactivation in the electrochemical disinfection processes. Water Res **43**(4): 895-901.

Keck, A., Klein, J., Kudlich, M., Stolz, A., Knackmuss, H.-J. and Mattes, R. (1997). Reduction of azo dyes by redox mediators originating in the naphthalenesulfonic acid degradation pathway of *Sphingomonas* sp. strain BN6. Applied and Environmental Microbiology **63**(9): 3684-3690.

Kim, T. H., Park, C., Yang, J. and Kim, S. (2004). Comparison of disperse and reactive dye removals by chemical coagulation and Fenton oxidation. J Hazard Mater **112**(1-2): 95-103.

Kruthika, N. L., Karthika, S., Raju, G. B. and Prabhakar, S. (2013). Efficacy of electrocoagulation and electrooxidation for the purification of wastewater generated from gelatin production plant. Journal of Environmental Chemical Engineering **1**(3): 183-188.

Li, M. F., Liao, L. W., Yuan, D. F., Mei, D. and Chen, Y.-X. (2013). PH effect on oxygen reduction reaction at Pt (111) electrode. Electrochimica Acta **110**: 780-789.

Lopez-Grimau, V. and Gutierrez, M. C. (2006). Decolourisation of simulated reactive dyebath effluents by electrochemical oxidation assisted by UV light. Chemosphere **62**(1): 106-112.

Merzouk, B., Gourich, B., Madani, K., Vial, C. and Sekki, A. (2011). Removal of a disperse red dye from synthetic wastewater by chemical coagulation and continuous electrocoagulation. A comparative study. Desalination **272**(1-3): 246-253.

Mijin, D. Ž., Ivić, M. L. A., Onjia, A. E. and Grgur, B. N. (2012). Decolorization of textile dye CI Basic Yellow 28 with electrochemically generated active chlorine. Chemical Engineering Journal **204**: 151-157.

Mishra, G. and Tripathy, M. (1993). A critical review of the treatments for decolourization of textile effluent. Colourage **40**: 35-35.

Moghaddam, S. S., Moghaddam, M. and Arami, M. (2010). A comparison study on Acid Red 119 dye removal using two different types of waterworks sludge. Water Science & Technology **61**(7).

Moghaddam, S. S., Moghaddam, M. R. and Arami, M. (2011). Response surface optimization of acid red 119 dye from simulated wastewater using Al based waterworks sludge and polyaluminium chloride as coagulant. J Environ Manage **92**(4): 1284-1291.

Muthukumar, M., Karuppiyah, M. T. and Raju, G. B. (2007). Electrochemical removal of CI Acid orange 10 from aqueous solutions. Separation and Purification Technology **55**(2): 198-205.

Nigam, P., Armour, G., Banat, I., Singh, D. and Marchant, R. (2000). Physical removal of textile dyes from effluents and solid-state fermentation of dye-adsorbed agricultural residues. Bioresource Technology **72**(3): 219-226.

Palanna, O. G., Engineering Chemistry.(McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited:2009).



Poots, V., McKay, G. and Healy, J. (1976). The removal of acid dye from effluent using natural adsorbents—I peat. Water Res **10**(12): 1061-1066.

Prentice, G., Electrochemical Engineering Principles.(Prentice Hall:1991).

Raghavacharya, C. (1997). Colour removal from industrial effluents: a comparative review of available technologies. Chemical engineering world **32**(7): 53-54.

Raju, G. B., Karupiah, M. T., Latha, S. S., Parvathy, S. and Prabhakar, S. (2008). Treatment of wastewater from synthetic textile industry by electrocoagulation–electrooxidation. Chemical Engineering Journal **144**(1): 51-58.

Ravi Kumar, M., Rajakala Sridhari, T., Durga Bhavani, K. and Dutta, P. K. (1998). Trends in color removal from textile mill effluents. Colourage **45**(8).

Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. and Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. Bioresource Technology **77**(3): 247-255.

Slokar, Y. M. and Majcen Le Marechal, A. (1998). Methods of decoloration of textile wastewaters. Dyes and Pigments **37**(4): 335-356.

Szpyrkowicz, L., Juzzolino, C. and Kaul, S. N. (2001). A Comparative study on oxidation of disperse dyes by electrochemical process, ozone, hypochlorite and fenton reagent. Water Res **35**(9): 2129-2136.

Verma, A. K., Dash, R. R. and Bhunia, P. (2012). A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. J Environ Manage **93**(1): 154-168.

Wong, P. W., Teng, T. T. and Nik Norulaini, N. (2007). Efficiency of the coagulation-flocculation method for the treatment of dye mixtures containing disperse and reactive dye. Water Quality Research Journal of Canada **42**(1): 54-62.

Yilmaz, A. E., Boncukcuoğlu, R. and Kocakerim, M. M. (2007). A quantitative comparison between electrocoagulation and chemical coagulation for boron removal from boron-containing solution. *J Hazard Mater* **149**(2): 475-481.

Zahrim, A., Tizaoui, C. and Hilal, N. (2011). Removal of highly concentrated industrial grade leather dye: Study on several flocculation and sand filtration parameters. *Separation Science and Technology* **46**(6): 883-892.

Zhang, X., Hao, J., Li, W., Jin, H., Yang, J., Huang, Q., Lu, D. and Xu, H. (2009). Synergistic effect in treatment of Cl Acid Red 2 by electrocoagulation and electrooxidation. *J Hazard Mater* **170**(2): 883-887.

วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์, "การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใช้อิทธิพลของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี," (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546)

กรมโรงงานอุตสาหกรรม, คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม. (พิมพ์ครั้งที่ 1: กรุงเทพฯ : กรม: 2542).

กรมโรงงานอุตสาหกรรม, การศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งเฉพาะประเภทอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุงค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง. (พิมพ์ครั้งที่ 1: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: 2556).

จิราณัฐ ทวนทอง, "การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี," (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553)

วังไพศาล, ท. วิศวกรรมการประปา, พิมพ์ครั้งที่ 1: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2554.

อัยยุทธยา, ป. ส. ณ., การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. (พิมพ์ครั้งที่ 1: สำนักพิมพ์ที่อุป จำกัด: 2551).





ตาราง ก.1 ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟ 196 ด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	กระแสไฟฟ้า (A)	อัตราการไหล (L/hr)	ความต่างศักย์ (Volts)	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (ADMI)	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
22	0.7	12	5.6	1315	213
28	0.7	12	5.6	1650	330
22	1.3	12	6.6	1317	245
28	1.3	12	6.6	1637	298
22	0.7	18	5.6	1333	580
28	0.7	18	5.6	1656	858
22	1.3	18	6.6	1344	305
28	1.3	18	6.6	1641	412
20	1	15	6.1	1183	304
30	1	15	5.3	1699	593
25	0.5	15	5.4	1450	580
25	1.5	15	7.0	1440	380
25	1	10	6.1	1464	262
25	1	20	6.1	1451	508
25	1	15	6.1	1414	396
25	1	15	6.1	1414	430
25	1	15	6.1	1414	390
25	1	15	6.1	1414	368
25	1	15	6.1	1414	396
25	1	15	6.0	1414	406

ตาราง ก.2 ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียสีดีสเพิร์ส 153 ด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	กระแสไฟฟ้า (A)	อัตราการไหล (L/hr)	ความต่างศักย์ (Volts)	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (ADMI)	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
22	2.4	1.8	8.0	474	257
28	2.4	1.8	8.1	608	320
22	3.6	1.8	9.1	470	218
28	3.6	1.8	8.9	554	268
22	2.4	3	8.4	430	308
28	2.4	3	8.4	563	428
22	3.6	3	9.8	444	312
28	3.6	3	9.5	550	378
20	3	2.4	8.8	466	296
30	3	2.4	8.7	625	400
25	2	2.4	7.6	538	372
25	4	2.4	9.1	522	284
25	3	1.4	8.7	540	217
25	3	3.4	8.8	476	334
25	3	2.4	8.4	552	338
25	3	2.4	8.4	530	368
25	3	2.4	8.4	552	336
25	3	2.4	8.4	530	360
25	3	2.4	8.4	540	340
25	3	2.4	8.4	540	340

ตาราง ก.3 ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสีดีสเพิร์ส 153 อัตราส่วน 1:1

โดยมวลด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	กระแสไฟฟ้า (A)	อัตราการไหล (L/hr)	ความต่างศักย์ (Volts)	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (ADMI)	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)
22	1.1	7.5	6.4	837	292
28	1.1	7.5	6.2	1048	419
22	1.4	7.5	6.8	826	265
28	1.4	7.5	6.8	1024	384
22	1.1	10.5	6.3	833	408
28	1.1	10.5	6.4	1033	539
22	1.4	10.5	6.8	833	320
28	1.4	10.5	6.8	1020	510
20	1.25	9	6.3	756	299
30	1.25	9	6.6	1100	517
25	1.0	9	6.2	933	460
25	1.5	9	7.2	858	343
25	1.25	6.5	6.6	1058	328
25	1.25	11.5	6.6	940	470
25	1.25	9	6.5	928	408
25	1.25	9	6.6	928	413
25	1.25	9	6.6	928	394
25	1.25	9	6.6	928	425
25	1.25	9	6.6	928	387
25	1.25	9	6.7	928	413

ตาราง ก.4 ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟ 196 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี

ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสารส้ม (mg/l)	พีเอชที่สถานะเริ่มต้น	พีเอชที่บำบัดแล้ว	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (ADMI)	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)	ความเข้มข้นตะกอน (mg/l)
22	250	4.2	3.94	1274	1208	-
28	250	4.2	3.92	1600	1550	-
22	550	4.2	3.81	1273	1194	-
28	550	4.2	3.9	1601	1410	-
22	250	7.8	4.94	1273	638	68
28	250	7.8	4.63	1600	880	45
22	550	7.8	3.96	1273	634	38
28	550	7.8	4.03	1600	702	41
20	400	6	3.98	1195	712	42
30	400	6	4.05	1704	834	35
25	150	6	4.23	1435	840	42
25	650	6	3.93	1431	866	42
25	400	3	3.19	1432	1302	-
25	400	9	4.14	1435	650	62
25	400	6	4.01	1433	734	44
25	400	6	4.01	1433	838	41
25	400	6	4.04	1432	756	49
25	400	6	4.06	1433	838	52
25	400	6	4.03	1433	730	39
25	400	6	4.04	1432	822	44



ตาราง ก.5 ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียสีดีสเพิร์ส 153 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี

ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสารส้ม (mg/l)	พีเอชที่สถานะเริ่มต้น	พีเอชที่บำบัดแล้ว	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (ADMI)	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)	ความเข้มข้นตะกอน (mg/l)
22	100	5.2	3.86	420	178	32
28	100	5.2	3.83	573	177	43
22	130	5.2	4.01	420	60	28
28	130	5.2	3.73	571	160	34
22	100	8.8	6.66	419	270	46
28	100	8.8	6.5	574	89	52
22	130	8.8	6.55	417	121	45
28	130	8.8	6.5	575	100	55
20	115	7	6.46	378	151	41
30	115	7	6.43	600	96	49
25	90	7	6.36	500	266	57
25	140	7	6.19	500	55	44
25	115	4	3.78	500	478	-
25	115	10	7.21	500	462	-
25	115	7	6.25	500	190	38
25	115	7	6.3	500	204	44
25	115	7	6.36	500	180	41
25	115	7	6.27	500	194	47
25	115	7	6.25	500	208	44
25	115	7	6.24	500	180	42

ตาราง ก.6 ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟ 196 ผสมกับสียูเรเชีย 153 อัตราส่วน 1:1

ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสารส้ม (mg/l)	พีเอชที่สถานะเริ่มต้น	พีเอชที่บำบัดแล้ว	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (ADMI)	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)	ความเข้มข้นตะกอน (mg/l)
22	150	5.2	4.12	802	659	-
28	150	5.2	4.22	1009	612	30
22	450	5.2	3.88	802	559	47
28	450	5.2	3.64	1009	503	31
22	150	8.8	6.1	802	494	55
28	150	8.8	5.9	1009	676	48
22	450	8.8	3.97	802	404	63
28	450	8.8	3.64	1009	508	92
20	300	7	4.34	697	376	42
30	300	7	4.25	1138	504	56
25	50	7	6.51	900	814	15
25	550	7	3.94	900	472	53
25	300	4	3.79	900	854	-
25	300	10	5.5	900	447	58
25	300	7	4.04	900	457	40
25	300	7	4.23	900	510	44
25	300	7	4.21	900	441	48
25	300	7	4.13	900	459	43
25	300	7	4.2	900	459	42
25	300	7	4.23	900	450	47

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟ 196 ที่สภาวะร้อยละการบำบัดสูงสุด (ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 21 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 1.06 แอมแปร์ อัตราไหล 10 ลิตรต่อชั่วโมง) ที่ค่าพีเอชต่างๆ จากการทดลองที่ 7

ค่าพีเอชเริ่มต้น	ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (ADMI)	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)	ความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )
5	7.5	1226	98	1570
7	10.4	1216	123	1530
9	12.1	1216	181	1710
11	11.9	1354	585	1980

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียสีดิสเพิร์ส 153 ที่สภาวะร้อยละการบำบัดสูงสุด (ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 23.3 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 3.51 แอมแปร์ อัตราไหล 1.4 ลิตรต่อชั่วโมง) ที่ค่าพีเอชต่างๆ จากการทดลองที่ 7

ค่าพีเอชเริ่มต้น	ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (ADMI)	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)	ความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )
5	8.4	474	152	1740
7	11.16	472	202	1880
9	11.4	477	241	2100
11	12.9	502	222	3500

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟ 196 ผสมดิสเพิร์ส 153 อัตราส่วน 1:1 โดยมวล ที่สภาวะร้อยละการบำบัดสูงสุด (ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 23.3 มิลลิกรัมต่อลิตร กระแสไฟฟ้า 1.35 แอมแปร์ อัตราไหล 6.5 ลิตรต่อชั่วโมง) ที่ค่าพีเอชต่างๆ จากการทดลองที่ 7

ค่าพีเอชเริ่มต้น	ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล	ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (ADMI)	ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว (ADMI)	ความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )
5	8.8	864	241	1531
7	10.6	861	278	1550
9	10.5	859	365	1580
11	11.2	991	777	2720

ตารางที่ ก.10 พารามิเตอร์การบำบัดสำหรับการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มที่สภาวะร้อยละการกำจัดสีสูงสุด

ความเข้มข้นสีเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสารส้ม (mg/l)	ค่าพีเอชที่สภาวะเหมาะสม	ค่าพีเอชก่อนปรับ	ปริมาณ NaOH 0.25N ที่เติม (ml)	ความเข้มข้นตะกอน (mg/l)
24.9	440.8	8.75	6.7	9	56
23.3	136.7	7.59	6.7	3	45
23.3	396.8	7.01	6.8	1	51

ตารางที่ ก.11 พารามิเตอร์การบำบัดสำหรับการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มที่สภาวะค่าใช้จ่ายในการดำเนินเหมาะสมที่สุด

ความเข้มข้น สีเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้น สารส้ม (mg/l)	ค่าพีเอชที่ สภาวะ เหมาะสม	ค่าพีเอช ก่อนปรับ	ปริมาณ NaOH 0.25N ที่เติม (ml)	ความเข้มข้น ตะกอน (mg/l)
25.0	399.7	7.84	6.7	4	48
28.9	124.8	7.59	6.7	3	54
20.1	179.5	9.13	6.8	11	51





รายงานผลการวิเคราะห์ GCMS ของการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 และสีดีสเพิร์ส 153 ที่สภาวะเหมาะสมที่สุด



### หน่วยเครื่องมือกลาง/Central Instrument Facility

อาคารเฉลิมพระเกียรติ ชั้น 6 ห้อง K629 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 272 ถ. พระราม 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กทม. 10400  
Chaloemprakiet Building, 6th Floor, Room K629, Faculty of Science, Mahidol University, 272 Rama VI Road,  
Rajtheevee, Payathai, Bangkok, 10400 Thailand

## GC-MS Profile Analysis Report

Page 1/5

ใบรายงานผลเลขที่ CIF.SA042/2559

ชื่อและที่อยู่ผู้ขอรับบริการ	ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทร. 087-021-0776
ใบรับตัวอย่างเลขที่	CIF.SA 042/2559
วันที่รับตัวอย่าง	31 มีนาคม 2559
วันที่ทำการทดสอบ	19 เมษายน, 17 พฤษภาคม 2559
จำนวนตัวอย่าง	2
ชื่อตัวอย่างลักษณะตัวอย่าง	1. น้ำเสียสีรีแอกทีฟ (R) เป็นสารละลายมีน้ำเป็นตัวทำละลาย ปริมาตร 250 มล. 2. น้ำเสียสีดีสเพิร์ส (D) เป็นสารละลายมีน้ำเป็นตัวทำละลาย ปริมาตร 250 มล.
ชนิดการทดสอบ	GC-MS Profile
วิธีทดสอบ	Direct inject sample solution to GC-MS
การเตรียมตัวอย่าง	ทำการสกัดตัวอย่าง 200 มล. ด้วย CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> 2 ครั้ง ทุลละ 3 มล. รวมชั้น CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> ที่สกัดได้ ทำการระเหยโดยเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจน จนเหลือปริมาตร 0.2 มล.
ภาวะการทดสอบ	Inlet temp. 280 <sup>o</sup> C, Split mode 3:1 for R and 5:1 for D injection volume 2 µL Column: DB-1MS (30m x 0.25mm, film thickness 0.25µm) Column flow: He 1.0 mL/min Oven: 40 <sup>o</sup> C ramp to 200 (rate 5 <sup>o</sup> C/min) and ramp to 300 (rate 10 <sup>o</sup> C/min) hold 5 min total run time 47 min Detector: MSD, Scan mass: 30-400 amu.
Data file	

Sample name	Data file name
น้ำเสียสีรีแอกทีฟ (R)	WASTE_R1.D
น้ำเสียสีดีสเพิร์ส (D)	WASTE_D1.D

**CiF****หน่วยเครื่องมือกลาง/Central Instrument Facility**

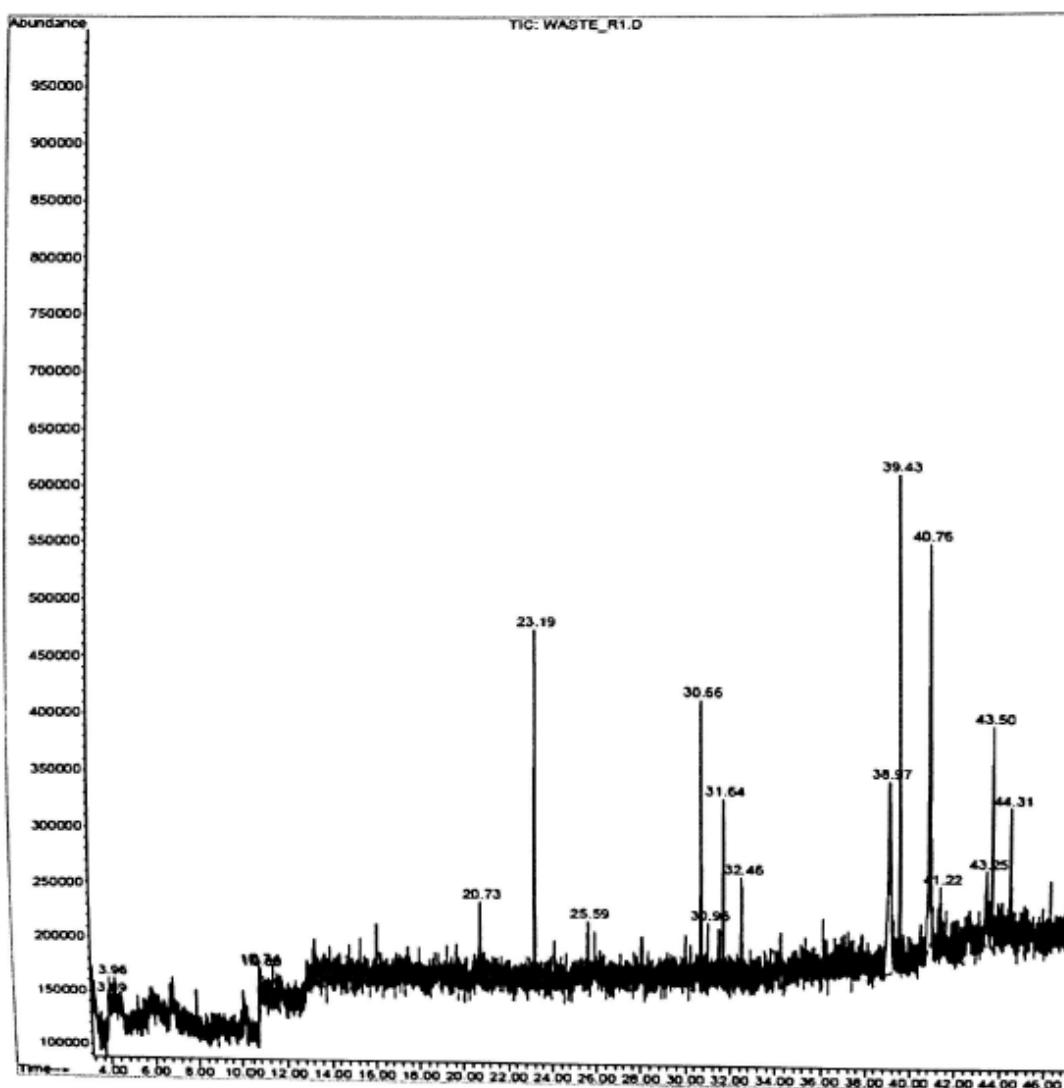
อาคารเฉลิมพระเกียรติ ชั้น 6 ห้อง K629 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 272 ถ. พระราม 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กทม. 10400  
Chaloemprakiet Building, 6th Floor, Room K629, Faculty of Science, Mahidol University, 272 Rama VI Road,  
Rajthevee, Payathai, Bangkok, 10400 Thailand

**GC-MS Profile Analysis Report**

Page 2/5

ใบรายงานผลเลขที่ CIF.SA042/2559

Total Ion Chromatogram of น้ำเสียสีแสดที่ฟ (R), Data file name WASTE\_R1.D







## หน่วยเครื่องมือกลาง/Central Instrument Facility

อาคารเฉลิมพระเกียรติ ชั้น 6 ห้อง K629 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 272 ถนนพญาไท เขตราชเทวี กทม. 10400  
Chaloemprakiet Building, 6th Floor, Room K629, Faculty of Science, Mahidol University, 272 Rama VI Road, Rajthevee, Payathai, Bangkok, 10400 Thailand

### GC-MS Profile Analysis Report

Page 3/3

ใบรายงานผลเลขที่ CIF.SA042/2559

ข้อมูลตัวอย่าง น้ำเสียสีรีแอกทีฟ (R), Data file name WASTE\_R1.D เปรียบเทียบกับ Wiley Database

Retention time (min)	Chemical name*	CAS NO.	%Area	Quality**
23.19	2,4-Bis(1,1-dimethylethyl)Phenol	96-76-4	9.60	93
31.64	7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-6,9-diene-2,8-dione	-	5.13	95
32.46	Dibutyl phthalate	84-74-2	2.87	76

\*Chemical name จากการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของพีคกับฐานข้อมูล Wiley Database

\*\*รายงานผลเฉพาะพีคที่มี %quality ตั้งแต่ 75ขึ้นไป





## หน่วยเครื่องมือกลาง/Central Instrument Facility

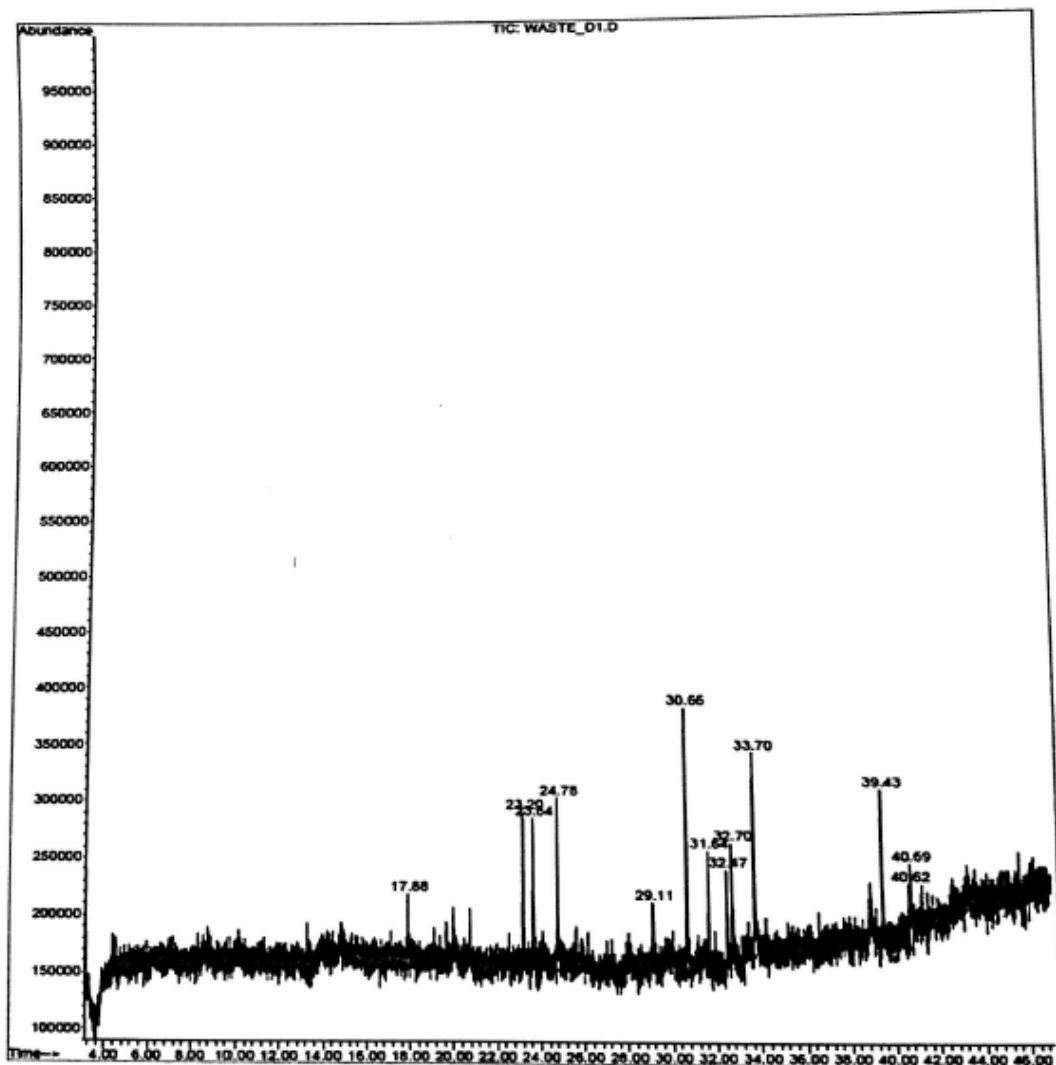
อาคารเฉลิมพระเกียรติ ชั้น 6 ห้อง K.629 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 272 ถนน 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กทม. 10400  
Chaloemprakit Building, 6th Floor, Room K629, Faculty of Science, Mahidol University, 272 Rama VI Road,  
Rajthevee, Payathai, Bangkok, 10400 Thailand

### GC-MS Profile Analysis Report

Page 4/5

ใบรายงานผลเลขที่ CIF.SA042/2559

Total Ion Chromatogram of น้ำเสียสีดิสเพอร์ส (D), Data file name WASTE\_D1.D





## หน่วยเครื่องมือกลาง/Central Instrument Facility

อาคารเฉลิมพระเกียรติ ชั้น 6 ห้อง K.629 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 272 ถ. พระราม 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กทม. 10400  
Chaloemprakiet Building, 6th Floor, Room K629, Faculty of Science, Mahidol University, 272 Rama VI Road, Rajthevee, Paththal, Bangkok, 10400 Thailand

### GC-MS Profile Analysis Report

Page 5/5

ใบรายงานผลเลขที่ CIF.SA042/2559

ข้อมูลตัวอย่าง น้ำเสียสีดิสเพอร์ส (D), Data file name WASTE\_D1.D เปรียบเทียบกับ Wiley Database

Retention time (min)	Chemical name*	CAS NO.	%Area	Quality**
23.20	2,4-Bis(1,1-dimethylethyl)Phenol	96-76-4	8.36	90
24.78	2,6-Dichlorobenzothiazole	3622-23-9	11.10	90
32.47	Dibutyl phthalate	84-74-2	5.96	76
32.70	2-Amino-5,6-dichlorobenzothiazole	-	7.07	86

\*Chemical name จากการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของพีคกับฐานข้อมูล Wiley Database

\*\*รายงานผลเฉพาะพีคที่มี %quality ตั้งแต่ 75ขึ้นไป

รายงานนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน ยกเว้นทำหิ้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

*ศิริชัย โฆษิตารัตน์*

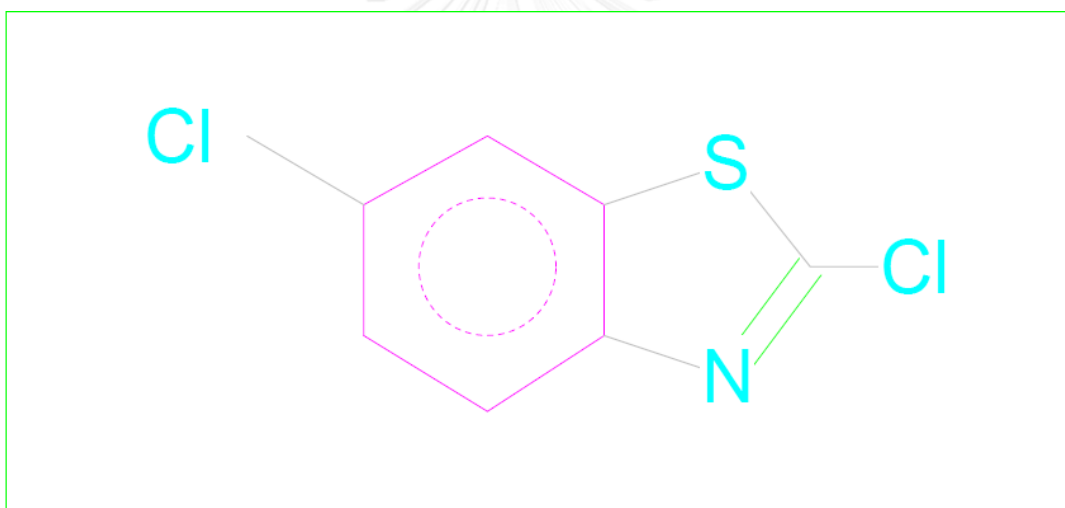
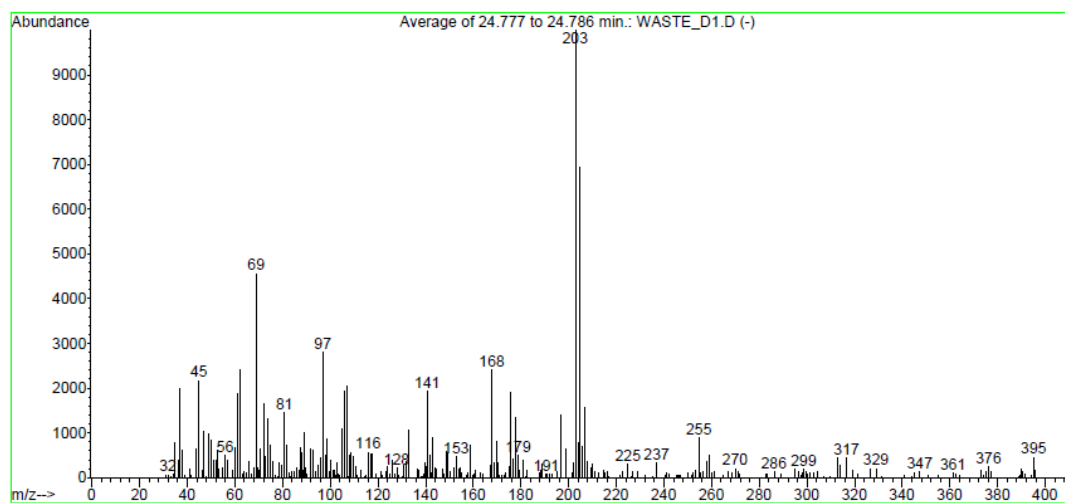
(นายศิริชัย โฆษิตารัตน์)

นักวิทยาศาสตร์

19./พฤษภาคม/2559

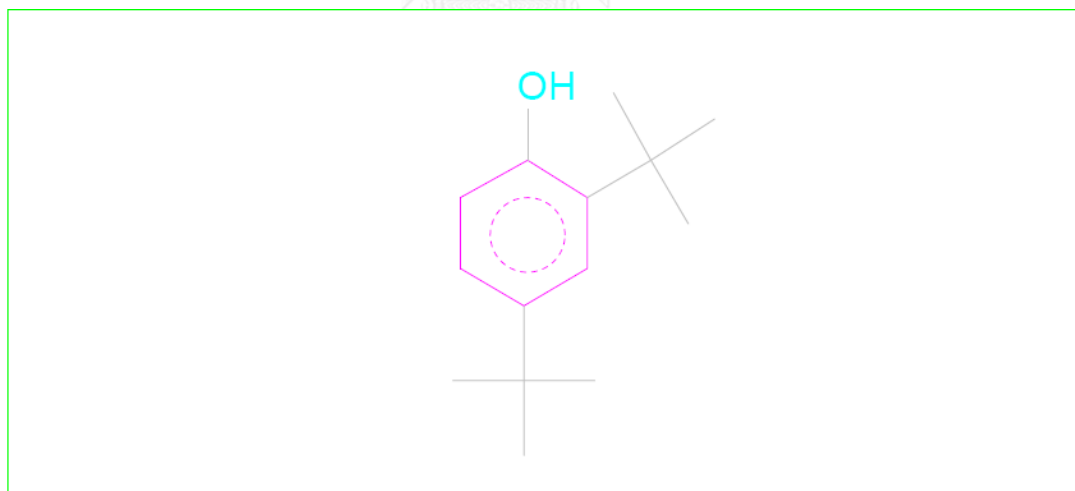
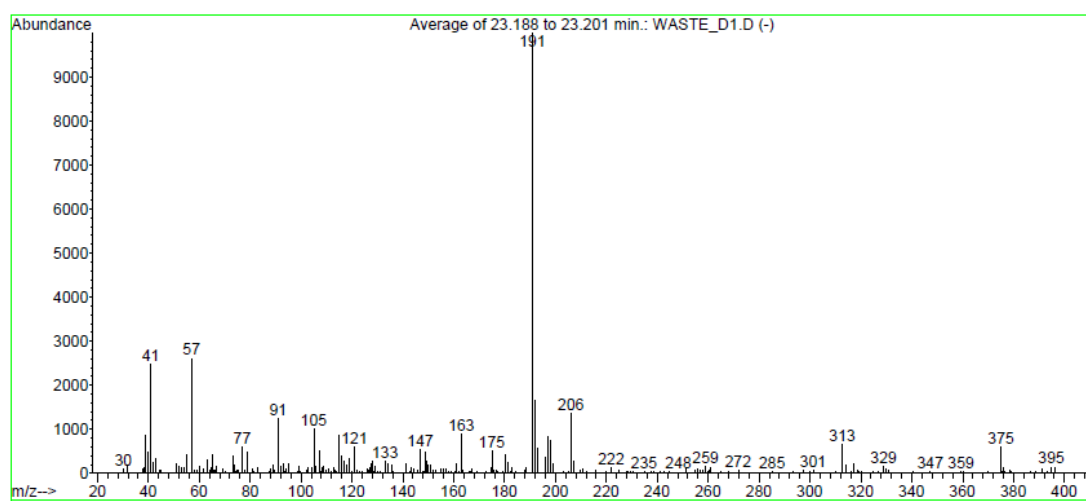
สปีดพีค 153 นาทีที่ 23.20

Library Searched : C:\Database\wiley7n.1  
Quality : 90  
ID : Benzothiazole, 2,6-dichloro-



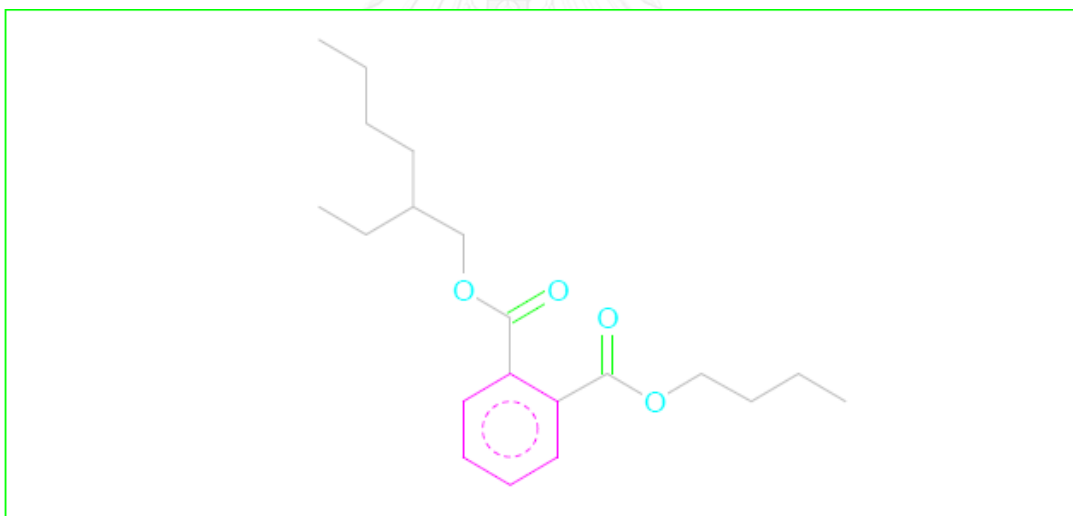
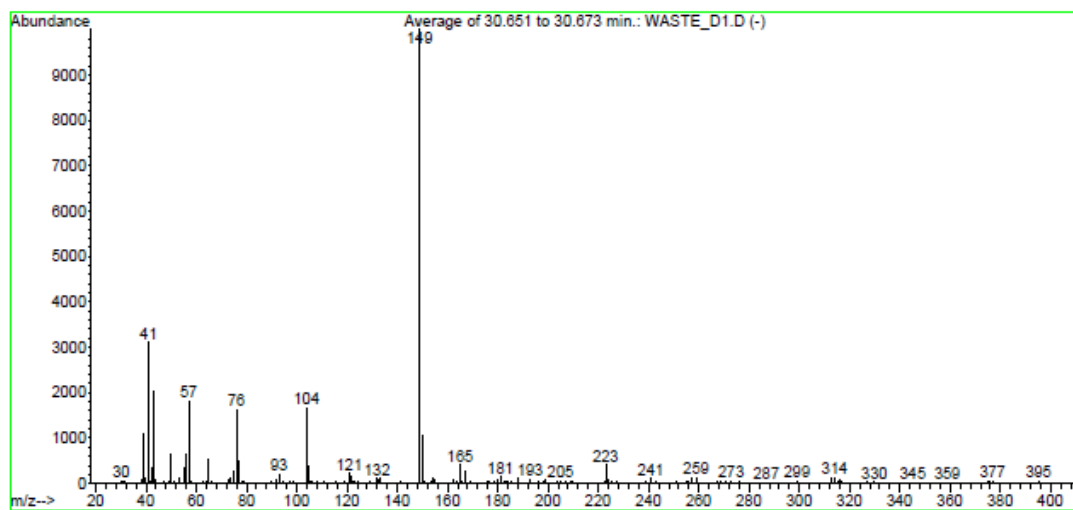
สปีดเฟิร์ส 153 นาทีที่ 24.78

Library Searched : C:\Database\wiley7n.l  
Quality : 90  
ID : Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)- (CAS) \$\$ 2,4-Di-tert-butylphenol \$\$ 2,4-BIS(TERT-BUTYL)-PHENOL \$\$ 2,4-Di-t-butylphenol \$\$ Phenol, 2,4-di-tert-butyl- \$\$ 2,4-Bis(1,1-dimethylethyl)phenol \$\$ 2,4-Di-tert-butyl-phenol \$\$ 4-(1,5-Dimethylhex-4-enyl)cyclohex-



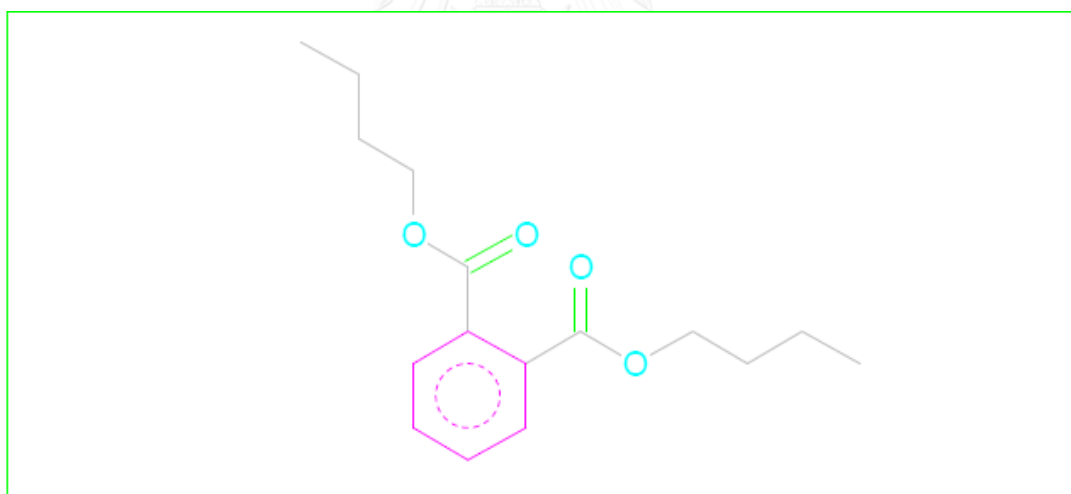
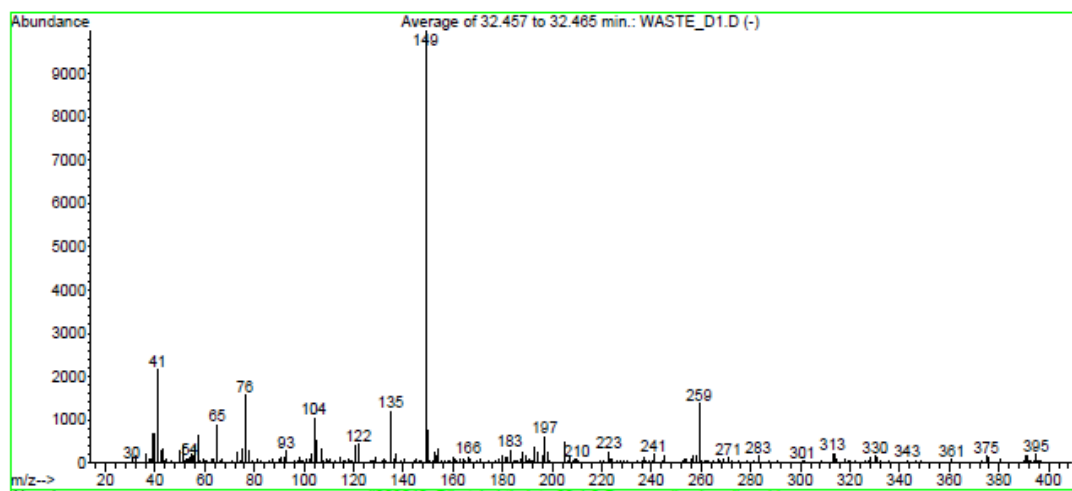
สปีดเฟิร์ส 153 นาทีที่ 30.66

Library Searched : C:\Database\wiley7n.1  
Quality : 72  
ID : 1,2-Benzenedicarboxylic acid, butyl 2-ethylhexyl ester



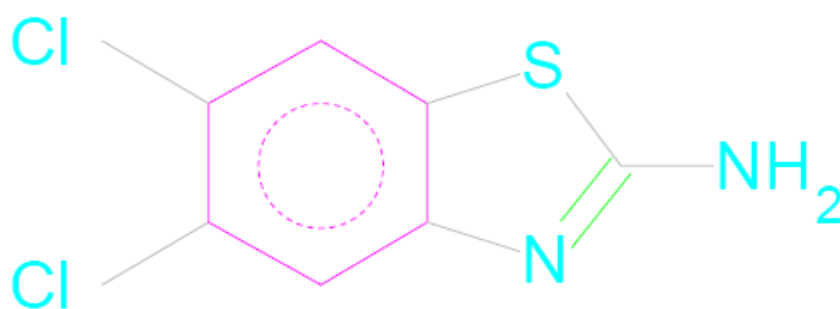
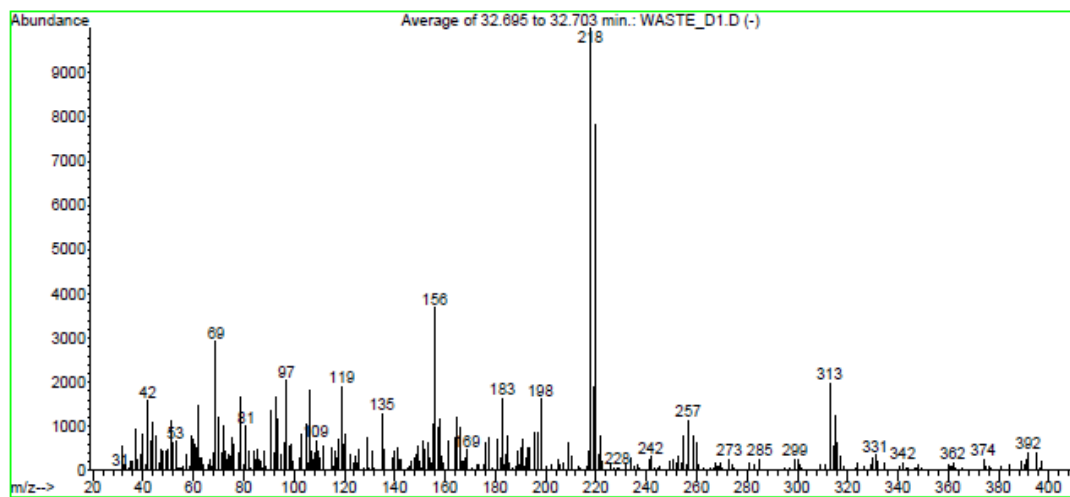
สปีดเฟิร์ส 153 นาทีที่ 32.47

Library Searched : C:\Database\wiley7n.1  
Quality : 76  
ID : Dibutyl phthalate \$\$ 1,2-Benzenedicarboxylic acid, dibutyl ester \$\$ Phthalic acid, dibutyl ester \$\$ n-Butyl phthalate \$\$ Butyl phthalate \$\$ Cellulose DPB \$\$ Elaol \$\$ Genoplast B \$\$ Hexaplas M/B \$\$ Palatinol C \$\$ Polycizer DBP \$\$ PX 104 \$\$ Staflex DBP \$\$ U



สปีดเฟิร์ส 153 นาทีที่ 32.70

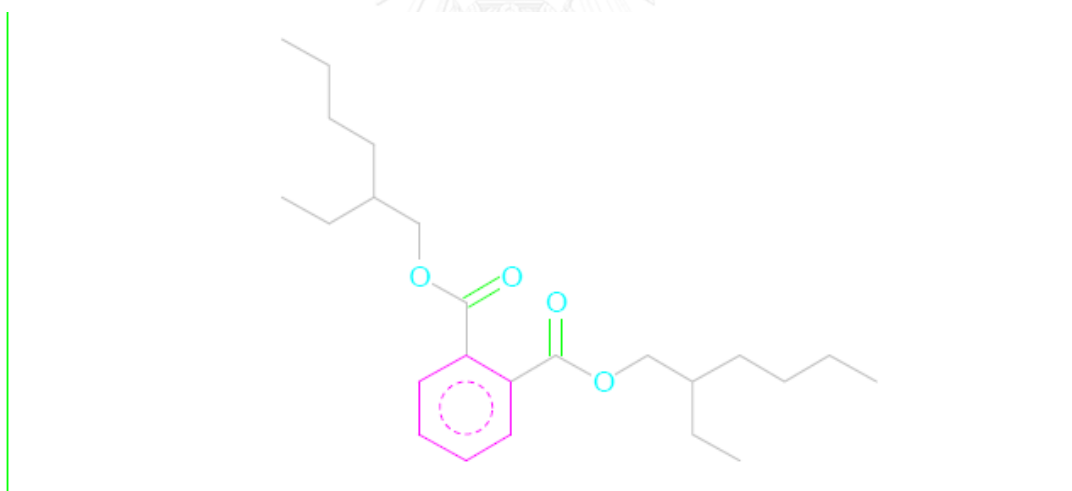
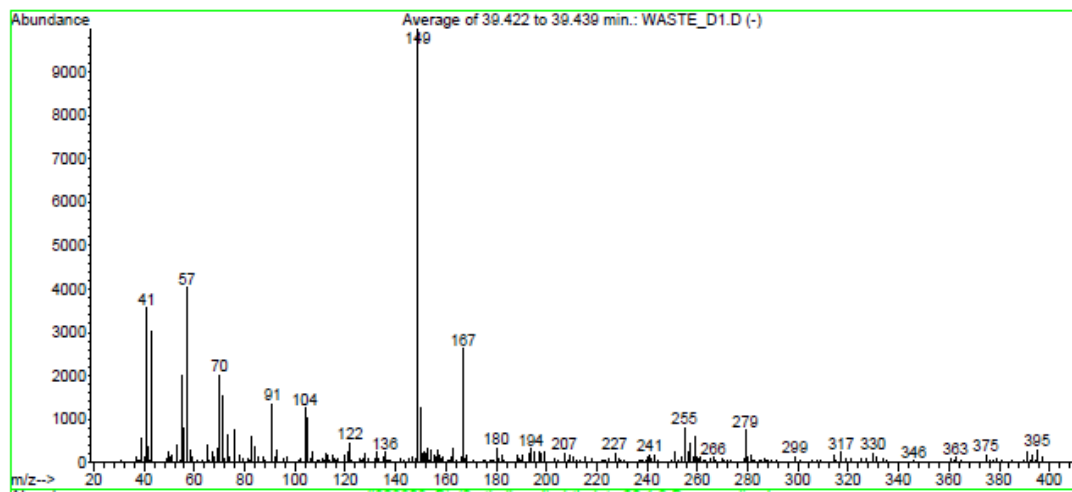
Library Searched : C:\Database\wiley7n.1  
Quality : 86  
ID : 2-Amino-5,6-dichloro-benzothiazole \$\$ 2-Benzothiazolamine, 5,6-dichloro-  
\$\$ Benzothiazole, 2-amino-5,6-dichloro- \$\$ 5,6-Dichloro-2-benzothiazolami  
ne





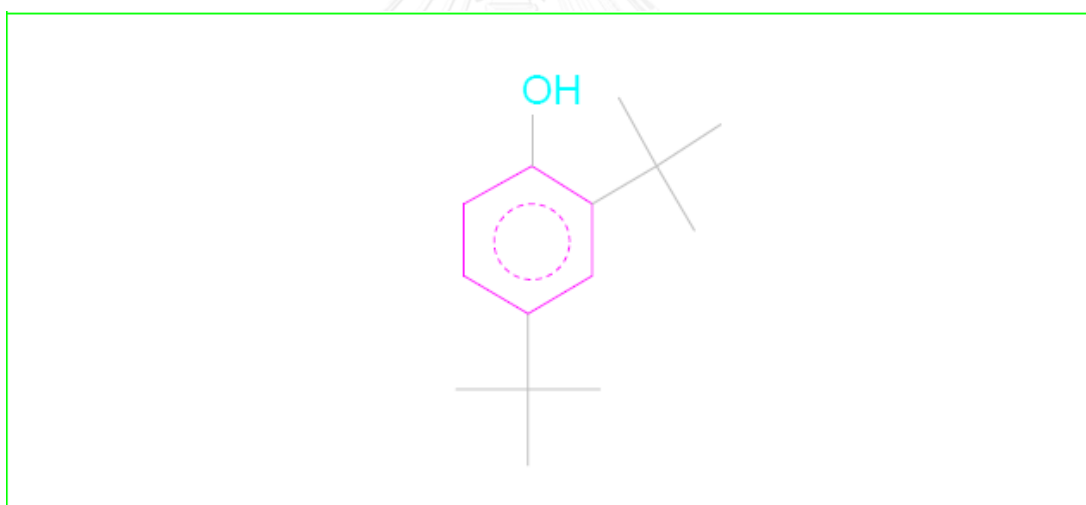
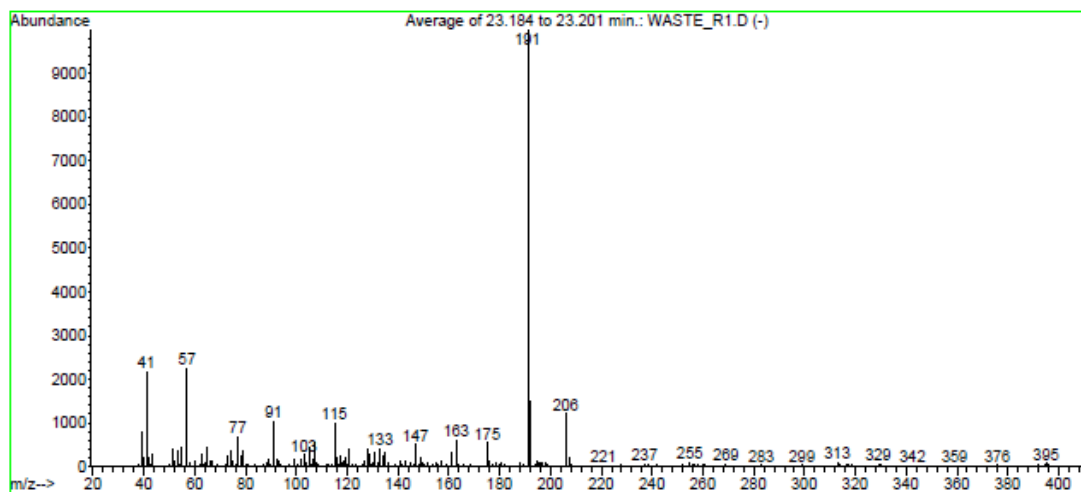
สปีดเฟิร์ส 153 นาทีที่ 39.43

Library Searched : C:\Database\wiley7n.1  
Quality : 72  
ID : Bis(2-ethylhexyl) phthalate \$\$ 1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester \$\$ Phthalic acid, bis(2-ethylhexyl) ester \$\$ Bis(2-ethylhexyl) 1,2-benzenedicarboxylate \$\$ Bisoflex 81 \$\$ Compound 889 \$\$ Di(ethylhexyl) phthalate \$\$ Di(2-ethylhexyl) pht



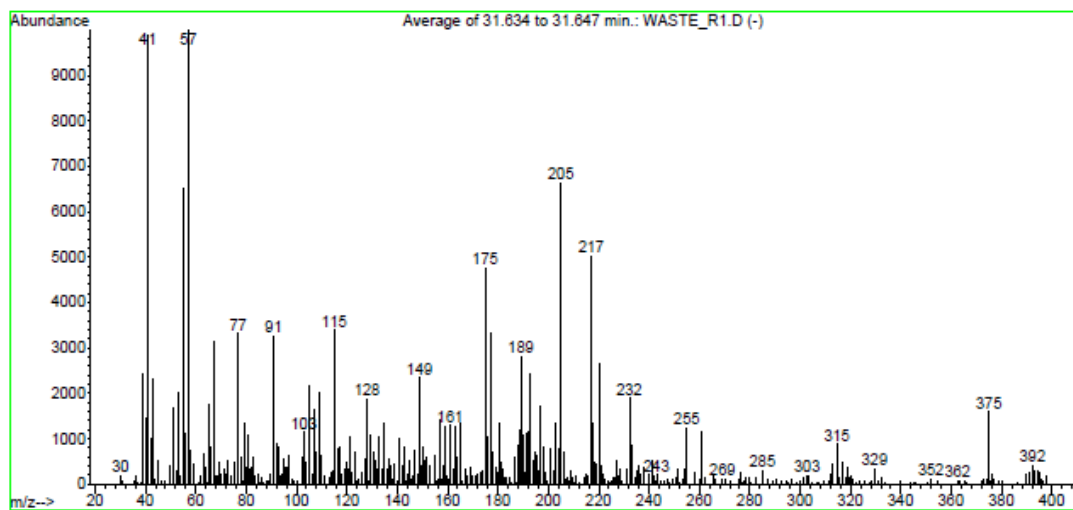
สรีรแอกทีฟ 196 นาทีที่ 23.19

Library Searched : C:\Database\wiley7n.1  
Quality : 93  
ID : Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)- (CAS) \$\$ 2,4-Di-tert-butylphenol \$\$ 2,4-BIS(TERT-BUTYL)-PHENOL \$\$ 2,4-Di-t-butylphenol \$\$ Phenol, 2,4-di-tert-butyl- \$\$ 2,4-Bis(1,1-dimethylethyl)phenol \$\$ 2,4-Di-tert-butyl-phenol \$\$ 4-(1,5-Dimethylhex-4-enyl)cyclohex-



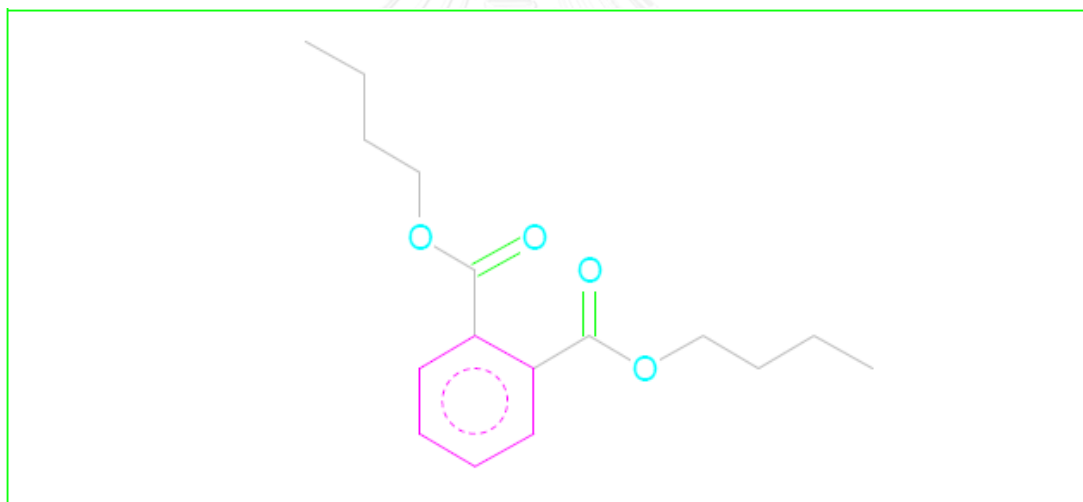
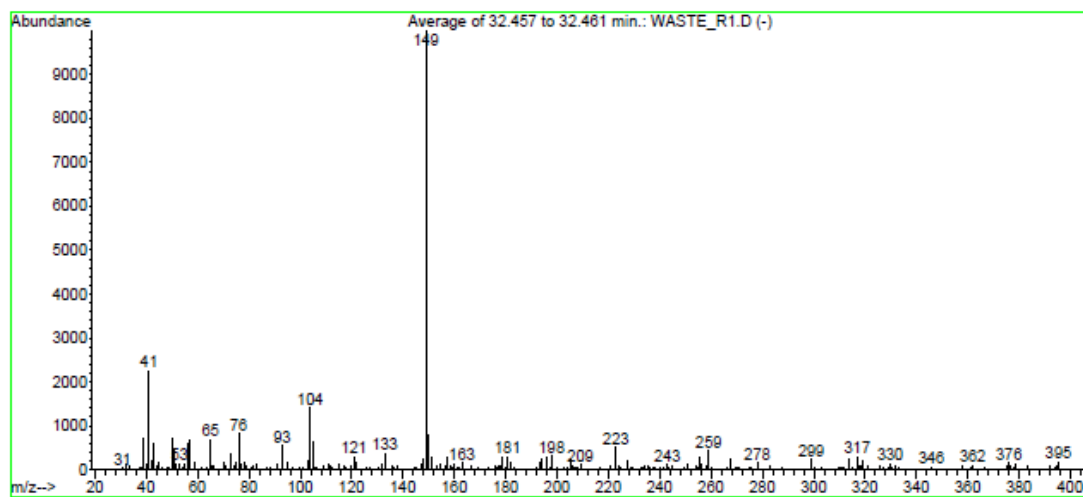
สรีรแคคทีฟ 196 นาทีที่ 31.64

Library Searched : C:\Database\wiley7n.1  
Quality : 95  
ID : 7,9-di-tert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-6,9-diene-2,8-dione \$\$ 7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione



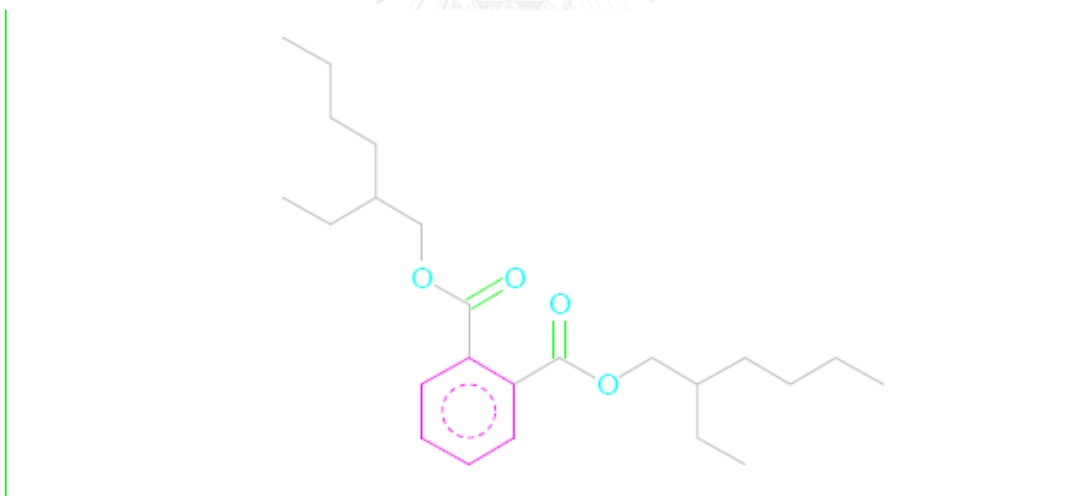
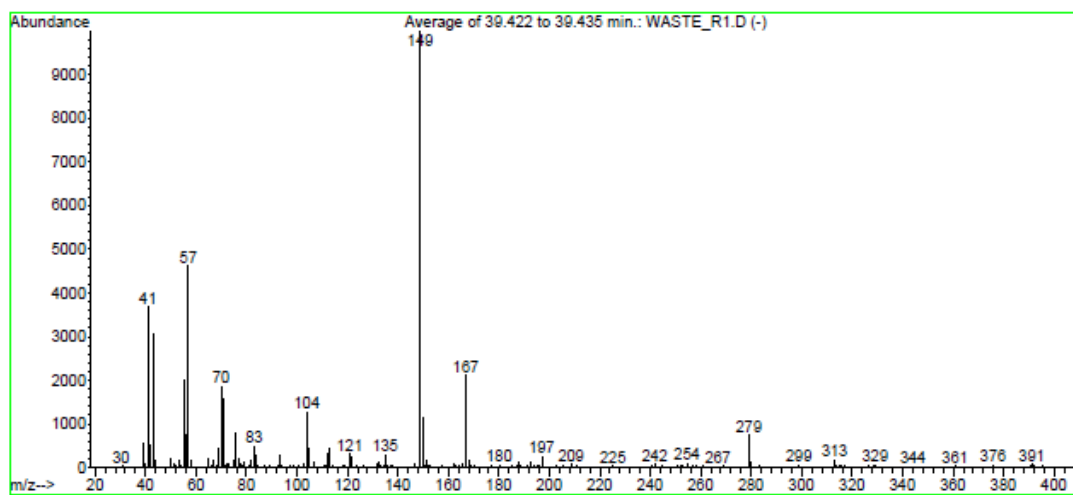
สรีรแอกทีฟ 196 นาทีที่ 32.46

Library Searched : C:\Database\wiley7n.1  
Quality : 76  
ID : 1,2-Benzenedicarboxylic acid, dibutyl ester (CAS) \$\$ Butyl phthalate \$\$ D  
I-N-BUTYLPHthalate \$\$ PX 104 \$\$ DIBUTYLPHthalate \$\$ DIBUTYL-PHTHALATE \$\$ Di  
butyl phthalate \$\$ DIBUTYL ESTER OF PHTHALIC ACID \$\$ Elaol \$\$ Unimoll DB  
\$\$ Palatinol C \$\$ Staflex DBP \$\$ Gen



สรีรแควคทีฟ 196 นาทีที่ 39.43

Library Searched : C:\Database\wiley7n.1  
Quality : 72  
ID : Bis(2-ethylhexyl) phthalate \$\$ 1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester \$\$ Phthalic acid, bis(2-ethylhexyl) ester \$\$ Bis(2-ethylhexyl) 1,2-benzenedicarboxylate \$\$ Bisoflex 81 \$\$ Compound 889 \$\$ Di(ethylhexyl) phthalate \$\$ Di(2-ethylhexyl) pht





ค.1 การคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดสี

$$Y_{COL} = \frac{C_{ia} - C_{if}}{C_{ia}}$$

เมื่อ  $C_{ia}$  คือความเข้มข้นสีเริ่มต้น (เอดีเอ็มไอ)

$C_{if}$  ความเข้มข้นสีที่ผ่านการบำบัดแล้ว (เอดีเอ็มไอ)

ค.2 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของวิธีออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

$$\text{Operating cost} \left( \frac{\text{baht}}{m^3} \right) = \frac{U \times I \times O}{Q \times Y_{COL}}$$

เมื่อ  $U$  คือ ความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้า (โวลต์)

$I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (แอมแปร์)

$O$  คือ ราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วย 3 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง

$Q$  คือ อัตราการไหลของระบบ (ลิตรต่อชั่วโมง)

ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการด้วยออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า

สภาวะร้อยละการบำบัดสูงสุดในการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 คือ ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 21 มิลลิกรัมต่อลิตร (1226 เอดีเอ็มไอ) กระแสไฟฟ้า 1.06 แอมแปร์ อัตราการไหล 10 ลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นสีที่บำบัดแล้ว 98 เอดีเอ็มไอ สามารถหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีได้

$$Y_{COL} = \frac{1226 - 98}{1226} = 0.92$$

ประสิทธิภาพการบำบัดสีเท่ากับ 92%

สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อไปนี้

$$\text{Operating cost} \left( \frac{\text{baht}}{m^3} \right) = \frac{6.1 \times 1.06 \times 3}{10 \times 0.92} = 2.1 \text{ baht} / m^3$$

ค.3 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม

$$\text{Operating cost} \left( \frac{\text{baht}}{m^3} \right) = \frac{P \times A \times 1L}{1000 \times Y_{COL}} + C_1 + C_2$$

เมื่อ P คือ ราคาสารส้ม 7.5 บาท/กิโลกรัมสารส้ม

A คือ ความเข้มข้นสารส้มที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_1$  คือ ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอน (บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำ)

$C_2$  คือ ค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีปรับค่าพีเอช (บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำ)

$$C_1 \left( \frac{\text{baht}}{m^3} \right) = \frac{K \times SS}{1000 \times Y_{COL}}$$

เมื่อ K คือ ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอน 5 บาทต่อกิโลกรัม

SS คือ ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย (settleable solids) (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$C_2 \left( \frac{\text{baht}}{m^3} \right) = \frac{0.1 \times N \times G}{1000 \times Y_{COL}}$$

เมื่อ N คือ ปริมาณโซดาไฟ NaOH ความเข้มข้น 0.25N ที่เติม (มิลลิลิตร)

G คือ ราคาโซดาไฟกิโลกรัมละ 80 บาท

ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี

การบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่สภาวะเหมาะสมที่สุด ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 24.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารส้ม 440.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดสี 57.5% ค่าพีเอชเริ่มต้น 6.7 ใช้ NaOH 0.25N ในการปรับพีเอชจาก 6.7 เป็น 8.75 เท่ากับ 9 มิลลิลิตร ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการปรับพีเอชคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$C_2 \left( \frac{\text{baht}}{m^3} \right) = \frac{0.1 \times 9 \times 80}{1000 \times 0.575} = 0.125 \text{ baht} / m^3$$



การบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่สภาวะเหมาะสมที่สุด เกิดตะกอน 56 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$C_1\left(\frac{\text{baht}}{m^3}\right) = \frac{0.1 \times 5 \times 56}{1000 \times 0.575} = 0.05 \text{baht} / m^3$$

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสำหรับการบำบัดสีรีแอกทีฟ 196 ที่สภาวะเหมาะสมที่สุดคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Operating cost}\left(\frac{\text{baht}}{m^3}\right) = \frac{7.5 \times 440.8}{1000 \times 0.575} + 0.125 + 0.05 = 5.74 \text{baht} / m^3$$







การต่อตั้งปฏิกิริยา



การวัดพารามิเตอร์ต่างๆ



เปรียบเทียบสีที่ผ่านการบำบัด



การทดลองตกตะกอนโดยใช้ Jar-test

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศิริชนม์ อรรถสารประสิทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 22 กันยายน พ.ศ. 2531 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนอัสสัมชัญกรุงเทพปี การศึกษา 2549 เข้าศึกษาต่อคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2550 และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตในปีการศึกษา 2553 เข้า ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2555

