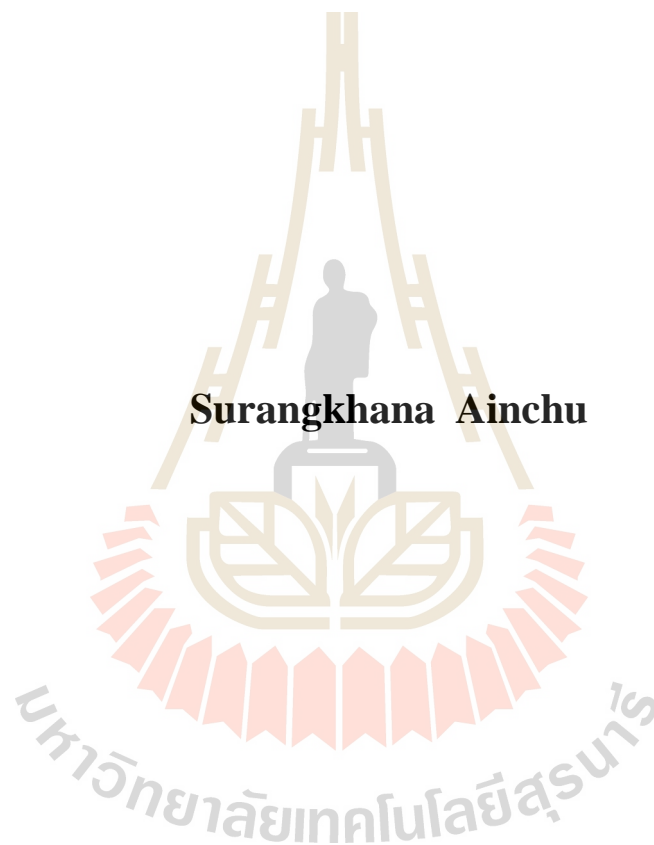


การบำบัดสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า  
แบบแบตช์และแบบไหลต่อเนื่อง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2562

**DYE REMOVAL FROM TEXTILE INDUSTRY  
USING BATCH AND CONTINUOUS FLOW  
ELECTROCOAGULATION SYSTEMS**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Industrial Systems  
and Environmental Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2019**

การบำบัดสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบ  
แบตช์และแบบไหลต่อเนื่อง

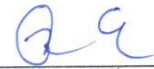
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์)

กรรมการ



(อ. ดร.อภิชน วัชรเณทร์วงศ์)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ร.อ. ดร.กนกนัธร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุรางคณา อินชู : การบำบัดสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ระบบการตกตะกอน  
ด้วยไฟฟ้าแบบแบตช์และแบบไหลต่อเนื่อง (DYE REMOVAL FROM TEXTILE

INDUSTRY USING BATCH AND CONTINUOUS FLOW

ELECTROCOAGULATION SYSTEMS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จริยา  
ยัมรัตนนवर, 212 หน้า.

สีย้อมผ้าถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอและทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม มี  
วิธีการในกำจัดสีจากน้ำเสียหลายวิธีการแต่ละวิธีพบว่ามีข้อจำกัดในการบำบัด ในวิธีการต่าง ๆ  
วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี (CC) และวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (EC) เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ  
เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อม การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ  
ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของ EC และ CC ในการบำบัดสีย้อม Acid (สีย้อมที่ละลาย  
น้ำ) และสีย้อม Vat (สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ) และเปรียบเทียบระหว่างการใช้ Fe และ Al เป็นขั้วไฟฟ้า  
ของระบบ EC และสารก่อตะกอนของระบบ CC ในการศึกษาแบบแบตช์ ผลการศึกษาพบว่า ระบบ  
EC มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ทั้งสีย้อมละลายไม่ละลายน้ำและละลายน้ำ และระบบ EC ที่ใช้ขั้ว  
Al มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมากกว่าระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Fe ประสิทธิภาพในการบำบัดสีของ  
ระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al และขั้ว Fe อยู่ในช่วงร้อยละ 97.44-99.84 และร้อยละ 87.40-91.90 ตามลำดับ  
การศึกษานี้เปรียบเทียบกับระบบ CC ที่ใช้ Al และ Fe ในปริมาณเท่ากับระบบ EC พบว่าระบบ CC  
มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat และ Acid อยู่ในช่วงร้อยละ 80.42 -92.87 และร้อยละ 96.03-  
96.37 ผลของสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีของระบบ EC แบบแบตช์นำไปใช้ในการศึกษาระบบ  
EC แบบต่อเนื่อง การบำบัดสีย้อม Vat และ Acid ของระบบ EC แบบไหลต่อเนื่องโดยใช้ขั้ว Al ที่  
อัตราการไหล 20-24 มิลลิลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพในการกำจัด อยู่ในช่วงร้อยละ 89.39-90.53 และ  
ร้อยละ 88.68-91.27 ตามลำดับ ในการศึกษาการนำไปใช้กับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอภายใน  
ครัวเรือน พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD และสี เท่ากับร้อยละ 96.47 และ 59.03 ตามลำดับ  
จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ระบบ EC เป็นทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงใน  
การบำบัดสีย้อมจากน้ำเสียฟอกย้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา สุรางคณา อินชู  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา จ.จ.



SURANGKHANA AINCHU : DYE REMOVAL FROM TEXTILE  
INDUSTRY USING BATCH AND CONTINUOUS FLOW  
ELECTROCOAGULATION SYSTEMS. THESIS ADVISOR :  
ASST. PROF. JAREEYA YIMRATTANABOVORN, Ph.D., 212 PP.

ELECTROCOAGULATION/CHEMICALCOAGULATION/DYE/ALUMINIUM  
ELECTRODE/IRON ELECTRODE

The dyes are widely used in textile industry and causes various environmental problems. There are several methods available for removal of dyes from wastewater but they have been found to exhibit certain limitations. Among these methods, chemical coagulation (CC) and electrocoagulation process (EC) has been successfully used for the treatment of textile wastewater being attractive alternative. The objective of study is to investigate the performance and optimum conditions of EC and CC for vat (Insoluble dye) and acid (soluble dye) dye decolorization and to compare between iron (Fe) and aluminium (Al) as electrode of EC and as coagulant of CC in batch studies. The results showed the EC is capable of treating both insoluble and soluble dyes and the EC with Al electrode were more effective in color removal than the EC with Fe electrode. The color removal efficiencies of the EC with Al and Fe electrode were in range of 97.44-99.84% and 87.4-91.9%, respectively. A comparison with the CC using the same amount of Fe and Al as in the EC was also carried out. The EC process show more efficient process than CC process to treat vat and acid dye solution. The optimum conditions of batch studies were applied to carry out to study continuous flow of EC. The EC using Al electrode with continuous flow of Vat and Acid dye at 20-24 ml/min had color removal efficiencies in range of 89.39-90.53%

and 88.68-91.27%, respectively. And the study of application to treat wastewater from household textile industry were carry out and showed COD and color removal efficiencies of 96.47% and 59.03%, respectively. It was concluded that the EC process is a competitive alternative process and presents a high potentiality for dye removal from textile wastewater.



School of Environmental Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature Surangkana Ainghu

Advisor's Signature Janya Jimellaha

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยี่มรัตน์บรร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาดูแลเอาใจใส่ และให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในสอบวิทยานิพนธ์ และให้ความกรุณาแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า และเจ้าหน้าที่ส่วนอาคารสถานที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด มัชชาดาไหมไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาด้านวิชาการ ให้กำลังใจและความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษา มาโดยตลอด และขอบคุณทุก ๆ คนในครอบครัว ที่คอยห่วงใย ดูแล และให้กำลังใจเสมอมาจน ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

สุรางคณา อินชู

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 สมมติฐานงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>2 ปรัชญ์นวัตกรรมการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation).....	5
2.1.1 หลักการของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	6
2.1.2 ข้อดี-ข้อเสียของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Electrocoagulation.....	7
2.2 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโทรไลซิส (Faraday's laws of electrolysis).....	8
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Electrocoagulation.....	10
2.3.1 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density).....	10
2.3.2 แรงดันไฟฟ้า (Voltage).....	11

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3	ชนิดของขั้วไฟฟ้า (Electrode) .....	12
2.3.4	ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า (Distance of electrodes).....	13
2.3.5	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction time).....	14
2.3.6	ความเข้มข้นของแอนไอออนในน้ำเสีย (Concentration of anions).....	14
2.3.7	pH เริ่มต้น .....	16
2.4	ชุดการทดลองของ Electrocoagulation แบบ Continuous .....	17
2.5	การนำกระบวนการ Electrocoagulation ไปใช้ประโยชน์ในการบำบัด น้ำเสีย.....	18
2.6	เทคโนโลยีการบำบัดสีย้อม.....	20
2.6.1	การดูดซับ (Absorption) .....	20
2.6.2	การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) .....	20
2.6.3	ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้.....	22
2.6.4	กระบวนการเฟนตัน (Fenton Reaction).....	24
2.6.5	การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation).....	24
2.7	ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	25
2.8	สีย้อม .....	27
2.8.1	องค์ประกอบของโมเลกุลสีย้อม .....	27
2.8.2	สีย้อมเอซิด (Acid dye).....	28
2.8.3	สีย้อมแวต (Vat dye) .....	30
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	32
2.9.1	งานวิจัยที่เกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Electrocoagulation .....	32
2.9.2	งานวิจัยที่เกี่ยวกับการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการ Electrocoagulation .....	34
2.9.3	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	35
3	วิธีดำเนินการวิจัย .....	
3.1	สถานที่ทำการวิจัย.....	37

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย.....	37
3.3	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย .....	37
3.4	ขั้นตอนการศึกษาระบบ EC และ CC แบบ Batch .....	38
3.4.1	สี่ข้อม.....	38
3.4.2	ชุดการทดลอง EC แบบ Batch .....	41
3.4.3	ชุดการทดลอง CC แบบ Batch .....	49
3.5	ขั้นตอนการศึกษการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสี่ข้อมของระบบ EC และ CC .....	54
3.6	ขั้นตอนการศึกษาระบบ EC แบบ Continuous.....	54
3.6.1	รายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Continuous.....	54
3.6.2	ขั้นตอนการศึกษหาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสี่ข้อมของระบบ EC แบบ Continuous.....	58
3.6.3	สรุปสถานะที่เหมาะสมของชุดการทดลอง EC แบบ Continuous .....	58
3.6.4	ขั้นตอนการศึกษประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียฟอกข้อม.....	59
3.7	เครื่องมือที่ใช้ในการวัดคุณภาพน้ำ.....	59
3.8	การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ .....	60
4	<b>ผลการศึกษาและการอภิปรายผลการศึกษา</b>	
4.1	ขั้นตอนที่ 1 ผลการศึกษาระบบ EC และ CC แบบ Batch .....	61
4.1.1	ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสี่ข้อมของระบบ EC แบบ Batch .....	61
4.1.2	สรุปสถานะที่เหมาะสมของชุดการทดลอง EC แบบ Batch .....	88
4.1.3	สรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ EC แบบ Batch .....	90
4.1.4	ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสี่ข้อมของระบบ CC แบบ Batch .....	94
4.1.5	สรุปสถานะที่เหมาะสมของชุดการทดลอง CC แบบ Batch .....	102
4.2	ขั้นตอนที่ 2 ผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสี่ข้อมของระบบ EC และ CC.....	103

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	ขั้นตอนที่ 3 ผลการศึกษาระบบ EC แบบ Continuous .....	104
4.3.1	ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีของระบบ EC แบบ Continuous .....	104
4.3.2	ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอของระบบ EC Continuous .....	110
5	สรุปผลการศึกษา.....	116
5.1	สรุปผลการศึกษา.....	116
5.1.1	สถานะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสีที่ใช้ในอุตสาหกรรม โดยระบบ EC แบบ Batch.....	116
5.1.2	ประสิทธิภาพของการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอของ ชุดการทดลอง EC แบบ Continuous Experiment.....	117
5.1.3	ประสิทธิภาพของการกำจัดสีของระบบ EC แบบ Continuous.....	117
5.1.4	ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอของ ระบบ EC แบบ Continuous .....	117
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	118
	รายการอ้างอิง.....	119
	ภาคผนวก.....	129
	ภาคผนวก ก ความเข้มข้นของสี.....	129
	ภาคผนวก ข ผลการบำบัดสีด้วยระบบ Electrocoagulation แบบ Batch .....	132
	ภาคผนวก ค การคำนวณปริมาณ Fe และ Al ที่ใช้ในระบบ CC.....	159
	ภาคผนวก ง การคำนวณอัตราการไหลของระบบ EC แบบ Continuous.....	162
	ภาคผนวก จ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีด้วยกระบวนการ EC โดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย One Way ANOVA .....	165
	ภาคผนวก ฉ การคิดค่าใช้จ่ายในการบำบัดสีของระบบ EC แบบ Continuous .....	194
	ภาคผนวก ช บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	197
	ประวัติผู้เขียน.....	210

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของขี้ไฟฟ้าที่ต่างกัน..... 13
2.2	การบำบัดน้ำเสียประเภทต่างๆ ด้วยกระบวนการ Electrocoagulation..... 19
2.3	ช่วง pH ที่เหมาะสมสำหรับสารสร้างตะกอนชนิดต่างๆ ..... 22
2.4	ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ..... 26
2.5	ความเข้มข้นของสีย้อมจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ..... 26
2.6	การจำแนกสีย้อม..... 28
3.1	รายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Batch ..... 44
3.2	สถานะชุดการทดลองผลของความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Acid สีย้อม Vat..... 45
3.3	สถานะชุดการทดลองผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... 46
3.4	สถานะชุดการทดลองผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น ..... 47
3.5	สถานะชุดการทดลองผลของ pH เริ่มต้น..... 48
3.6	สถานะชุดการทดลองผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยา..... 48
3.7	สถานะชุดการทดลองผลของระยะเวลาตกตะกอน..... 49
3.8	รายละเอียดชุดการทดลองระบบ CC แบบ Batch โดยใช้เครื่อง Jar test ..... 52
3.9	สถานะชุดการทดลองผลของความเข้มข้น Polymer ต่อประสิทธิภาพในการ บำบัดสีย้อมของระบบ CC ..... 53
3.10	สถานะชุดการทดลองผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมระบบ CC ..... 53
3.11	รายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Continuous ..... 56
3.12	สถานะชุดการทดลองผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม ของระบบ EC แบบ Continuous..... 58
3.13	สถานะชุดการทดลองผลของระยะเวลาตกตะกอน..... 59
4.1	ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid และประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม ด้วยระบบ EC แบบ Batch..... 63
4.2	ผลความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ และประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ด้วยระบบ EC และ Batch..... 66



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.3 ผลความแตกต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid ด้วยระบบ EC แบบ Batch.....	68
4.4 ผล pH เริ่มต้นและประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid ด้วยระบบ EC แบบ Batch .....	70
4.5 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมด้วยระบบ Acid ด้วยระบบ EC และ Batch.....	70
4.6 ผลของระยะเวลาในการตกตะกอนและประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid ด้วยระบบ EC แบบ Batch.....	76
4.7 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม Vat และประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมด้วยระบบ EC และ Batch.....	78
4.8 ผลความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ และประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมด้วย Vat ด้วยระบบ EC แบบ Batch.....	81
4.9 ผลความต่างศักย์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Vat ด้วยระบบ EC แบบ Batch .....	83
4.10 ผล pH เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Vat ด้วยระบบ EC แบบ Batch .....	85
4.11 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Vat ด้วยระบบ EC แบบ Batch.....	87
4.12 ผลของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid ด้วยระบบ EC แบบ Batch.....	89
4.13 สรุปสถานะที่เหมาะสมของระบบ EC แบบ Batch .....	91
4.14 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของสีข้อม Acid ก่อนและหลังบำบัดด้วยระบบ EC.....	93
4.15 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของสีข้อม Vat ก่อนและหลังบำบัดด้วยระบบ EC.....	93
4.16 สถานะที่เหมาะสมของการทดสอบ Jartest ในการบำบัดสีข้อม Acid ด้วยระบบ CC แบบ Batch โดยใช้ PACl เป็นสาร Coagulant .....	96

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17	
สถานะที่เหมาะสมของการทดสอบ Jarrest ในการบำบัดสีข้อม Acid ด้วยระบบ CC แบบ Batch โดยใช้ $FeCl_3$ เป็นสาร Coagulant.....	98
4.18	
สถานะที่เหมาะสมของการทดสอบ Jarrest ในการบำบัดสีข้อม Vat ด้วยระบบ CC แบบ Batch โดยใช้ PACl เป็นสาร Coagulant .....	100
4.19	
สถานะที่เหมาะสมของการทดสอบ Jarrest ในการบำบัดสีข้อม Vat ด้วยระบบ CC แบบ Batch โดยใช้ $FeCl_3$ เป็นสาร Coagulant.....	102
4.20	
สรุปสถานะที่เหมาะสมของระบบ CC แบบ Batch .....	103
4.21	
ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid.....	106
4.22	
ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid เฉลี่ย.....	107
4.23	
ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Vat .....	109
4.24	
ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Vat เฉลี่ย .....	109
4.25	
วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง .....	110
4.26	
สถานะที่ใช้ในการเดินระบบ EC แบบ Continuous ในการบำบัดน้ำเสียจาก อุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	111
4.27	
ผลการบำบัดสีของระบบ EC แบบ Continuous .....	114
4.28	
ผลการบำบัด COD ของระบบ EC แบบ Continuous.....	115
4.29	
สรุปสถานะที่ใช้ในการเดินระบบ EC แบบ Continuous ในการบำบัดน้ำเสียจาก อุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	115

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า..... 7
2.2	ความสัมพันธ์ของค่า pH และการตกตะกอนของเหล็ก..... 16
2.3	ความสัมพันธ์ของค่า pH และการตกตะกอนของอลูมิเนียม..... 17
2.4	ถังปฏิกรณ์ Electrocoagulation แบบ Continuous แบบที่ 1 ..... 18
2.5	ถังปฏิกรณ์ Electrocoagulation แบบ Continuous แบบที่ 2 ..... 18
2.6	โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซ Acid red B ..... 29
2.7	สีเอซิดที่ไม่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ..... 30
2.8	สีเอซิดที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ ..... 30
2.9	สีแควตชนิด Anthraquinonoid ..... 31
2.10	สีแควตชนิด Indigonoid..... 31
3.1	รายละเอียดขั้นตอนการศึกษา..... 39
3.2	รูปสีย้อม Acid..... 40
3.3	สีย้อม Vat..... 40
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อม Acid ในหน่วย mg/ และหน่วย Pt-Co และหน่วย ADMI ..... 41
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อม Vat ในหน่วย mg/l, และหน่วย Pt-Co และหน่วย ADMI ..... 42
3.6	ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Batch ..... 43
3.7	ชุดการทดลองระบบ EC แบบ Batch ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้..... 43
3.8	รายละเอียดขั้นตอนการทดลองระบบ EC แบบ Continuous..... 55
3.9	ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Continuous ..... 56
3.10	ขนาดร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Continuous (หน่วย; mm)..... 57
4.1	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid ต่อประสิทธิภาพในการบำบัด สีย้อมระบบ EC โดยใช้ Fe และ Al ..... 63

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ผลของความเข้มข้นสารอิเล็กโทไลต์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC โดยใช้ Fe และ Al.....	65
4.3 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC โดยใช้ Fe และ Al.....	68
4.4 ผลของ pH ต่อ ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC โดยใช้ Fe และ Al .....	71
4.5 Eh-ph diagram ของอนุกรมเนียม.....	71
4.6 Eh-ph diagram ของเหล็ก .....	72
4.7 สีย้อม Acid .....	72
4.8 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC โดยใช้ Fe และ Al กราฟ BET.....	74
4.9 ผลของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC โดยใช้ Fe และ Al.....	76
4.10 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Vat ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม ของระบบ EC โดยใช้ FE และ Al.....	79
4.11 ผลของความเข้มข้นสารอิเล็กโทไลต์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC โดยใช้ Fe และ Al.....	81
4.12 ผลของความต่างศักย์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe และ Al.....	83
4.13 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe และ Al .....	85
4.14 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe และ Al .....	87
4.15 ผลของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe และ Al .....	89
4.16 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของสภาวะที่เหมาะสมใน ระบบEC แบบ Batch.....	92

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 FT-IR spectrum ของลีสיום Acid ก่อนและหลังบำบัดด้วยระบบ EC.....	93
4.18 FT-IR spectrum ของลีสיום Vat ก่อนและหลังบำบัดด้วยระบบ EC .....	94
4.19 ผลของความเข้มข้น Polymer ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיום Acid ของระบบ CC โดยใช้ PACl .....	95
4.20 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיום Acid ของระบบ CC โดยใช้ PACl.....	96
4.21 ผลของความเข้มข้น Polymer ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיום Acid ของระบบ CC โดยใช้ $FeCl_3$ .....	97
4.22 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיום Acid ของระบบ CC โดยใช้ $FeCl_3$ .....	98
4.23 ผลของความเข้มข้น Polymer ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיום Vat ของระบบ CC โดยใช้ PACl .....	99
4.24 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיום Vat ของระบบ CC โดยใช้ PACl.....	100
4.25 ผลของความเข้มข้น Polymer ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיום Vat ของระบบ CC โดยใช้ $FeCl_3$ .....	101
4.26 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיום Vat ของระบบ CC โดยใช้ $FeCl_3$ .....	102
4.27 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיוםของสภาวะที่เหมาะสมในระบบ CC แบบ Batch.....	103
4.28 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיוםของระบบ EC และ CC แบบ Batch.....	109
4.29 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיום Acid.....	106
4.30 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיום Vat .....	108
4.31 ประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיוםของน้ำเสียจริง.....	112
4.32 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด COD.....	113

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ADMI	=	American Dye Manufacturers Institute
Al	=	อลูมิเนียม
CC	=	กระบวนการ โคแอกกูเลชัน
COD	=	Chemical Oxygen Demand
EC	=	กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า
Fe	=	เหล็ก
FeCl <sub>3</sub>	=	Ferric chloride
PACl	=	Poly aluminum chloride
Pt-Co	=	Platinum Cobalt scale
S.D.	=	Standard Deviation
TDS	=	ของแข็งละลายน้ำ
TS	=	ของแข็งทั้งหมด
TSS	=	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
U.S EPA	=	United States Environmental Protection Agency

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้เข้าสู่ประเทศในอันดับต้น ๆ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนของการผลิตจำเป็นต้องมีการใช้น้ำในปริมาณมาก ส่งผลให้มีการปล่อยน้ำเสียออกมาเป็นจำนวนมากเช่นกัน น้ำเสียสิ่งทอมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์และสีที่สูง ทำให้ไปขัดขวางการส่องผ่านของแสง ส่งผลทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายลงสู่แหล่งน้ำลดลง และสีย้อมบางชนิดจะมีส่วนผสมของโลหะหนักจึงเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและสุขภาพของมนุษย์เป็นอย่างมาก ดังนั้น จึงควรเลือกเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพในการบำบัด การเดินระบบไม่ยุ่งยาก มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและดูแลรักษาระบบที่ถูกและเหมาะสมกับลักษณะน้ำเสียที่มีการใช้สีที่หลากหลาย เทคโนโลยีในการกำจัดสีย้อมมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ วิธีการบำบัดทางชีวภาพ การดูดซับ การตกตะกอนด้วยสารเคมี ซึ่งเทคโนโลยีต่าง ๆ พบว่ามีข้อจำกัดได้แก่ การบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพจะมีปัญหาเนื่องจากสีย้อมมีความเป็นพิษของโลหะหนัก จึงมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ (Daneshwar et al, 2006) เทคโนโลยีการดูดซับมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดีแต่มีข้อเสีย คือ มีต้นทุนในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ และใช้ตัวดูดซับในปริมาณมากขึ้นถ้ามีน้ำเสียมีปริมาณมากขึ้น ในวิธีการเหล่านี้วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี (Coagulation-Flocculation) เป็นวิธีที่นิยมใช้ทั่วไปในการกำจัดสีย้อมจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) เพราะดูแลง่ายและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้สารเคมีในการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง และใช้สารเคมีในการรวมตะกอน นอกจากนี้ อาจจะมีการใช้สารที่ช่วยรวมตะกอนอีกด้วย จึงทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก ใช้เวลานานในการบำบัด และประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงถ้าในน้ำเสียเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำ (Kilic and Hosten, 2010) เนื่องจากสีย้อมมีโมเลกุลเล็กจึงทำให้ก่อตะกอนจากสารเคมีได้ยาก (Yamamoto and Fukushi, 2007) ดังนั้น กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation process (EC)) จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ และได้ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อม เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการตกตะกอน และตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าระบบการตกตะกอนด้วยสารเคมี (Khadim et al, 2016; Fajardo et al., 2017) ใช้เวลาในการบำบัดไม่นาน (Khandegar and Saroha, 2013) และสามารถกำจัดได้ทั้งสีที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ (Phalakomkule et al., 2010) กระบวนการ Electrocoagulation (EC) อาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี ข้อดีของ Electrocoagulation



เมื่อเปรียบเทียบกับ Coagulation คือ สามารถจัดอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กได้ดีกว่า จึงสามารถกำจัดได้ทั้ง COD และสีในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่มีการใช้สารเคมี จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาตะกอนส่วนเกิน นอกจากนี้ยังได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม จากผลการศึกษาของ Ling (1994) บำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ สีย้อมดิสเพอร์สและสีย้อมดิสเพอร์สผสมกับสีย้อมแควดด้วยระบบ Electroflotation หรือ Electrocoagulation พบว่าสามารถกำจัดสีย้อมได้มากกว่าร้อยละ 92 และสามารถกำจัดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 85 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chafi et al. (2011) ทำการศึกษากระบวนการ Electrocoagulation ในการกำจัดสีย้อมเอซิดซึ่งเป็นสีที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) พบว่าสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 98 อย่างไรก็ตามถึงแม้ระบบ Electrocoagulation จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง แต่ก็ยังต้องมีการพัฒนาแนวทางในเรื่องของการสร้างแบบจำลองของระบบ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมและภาคการณัประสิทธิภาพการบำบัดได้ในงานจริง (Holt et al., 2005) ซึ่งจะช่วยอำนวยความสะดวกในการปรับขนาดของถังปฏิกิริยาจากระดับต้นแบบเพื่อสามารถนำไปใช้งานได้จริง ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาระบบ Electrocoagulation ในระดับห้องทดลองและระบบต้นแบบ (Pilot scale) เพื่อใช้ในการบำบัดสีย้อมละลายน้ำและสีย้อมไม่ละลายน้ำ และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมและทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ Coagulation และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัด ได้แก่ ชนิดขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสีย ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาในการตกตะกอน และทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบ Coagulation เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมกับระบบ EC และนำสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบ Batch มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบ EC แบบ Continuous เพื่อนำไปประยุกต์เป็นระบบต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการ Electrocoagulation และ Coagulation ด้วยชุดการทดลองแบบ Batch

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการ Electrocoagulation โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง



### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิจัยโดยนำกระบวนการ Electrocoagulation แบบ Batch และ Continuous มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียสีย่อยสังเคราะห์ ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสี ย้อม โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 ชุดการทดลองของ Electrocoagulation ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด ได้แก่ ขั้วเหล็ก (Iron) และ ขั้วอลูมิเนียม (Aluminum)

1.3.2 สีย้อมในการศึกษานี้มี 2 ชนิด ได้แก่ สีย้อมเมซิด (Acid dye) แทนตัวอย่างสีละลายน้ำ และสีย้อมเวต (Vat dye) แทนตัวอย่างสีไม่ละลายน้ำ โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น

1) ชุดการทดลอง Electrocoagulation แบบ Batch Experiment

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Electrocoagulation แบบ Batch Experiment ได้แก่ ชนิดขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า pH เริ่มต้น ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาในการตกตะกอน

2) ชุดการทดลอง Coagulation แบบ Batch Experiment

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Coagulation แบบ Batch Experiment ได้แก่ ปริมาณ Polymer และ pH เริ่มต้น

3) ชุดการทดลอง Electrocoagulation แบบ Continuous Experiment

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Electrocoagulation แบบ Continuous Experiment ได้แก่ อัตราการไหล

1.3.3 วัดประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid และสีย้อม Vat ของชุดการทดลอง Electrocoagulation แบบ Batch Experiment เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับชุดการทดลอง Coagulation แบบ Batch Experiment

1.3.4 วัดประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid และสีย้อม Vat ของชุดการทดลอง Electrocoagulation แบบ Continuous Experiment

1.3.5 น้ำเสียฟอกย้อมที่ใช้ในการทดสอบระบบจะเก็บจากมาจากสถานประกอบการทอผ้าไหมในเขต อ.ปักธงชัย เพื่อใช้ทดสอบสำหรับชุดการทดลอง Electrocoagulation แบบ Continuous Experiment

1.3.6 วัดประสิทธิภาพของการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอของชุดการทดลอง Electrocoagulation แบบ Continuous Experiment

#### 1.4 สมมติฐานงานวิจัย

กระบวนการ Electrocoagulation สามารถกำจัดสีข้อมที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียฟอกข้อม

1.5.2 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Electrocoagulation เพื่อสามารถนำไปใช้กับร่วมกับระบบบำบัดที่มีอยู่แล้ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยการบำบัดสีข้อมจากน้ำเสียฟอกข้อมโดยใช้ระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบกะและแบบไหลต่อเนื่อง ได้ทำการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

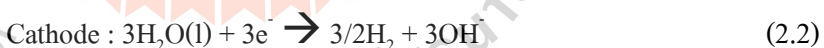
#### 2.1 การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)

การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) เป็นกระบวนการที่ใช้บำบัดน้ำเสียได้หลายลักษณะ ได้แก่ น้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนัก น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังและสิ่งทอ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร น้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษ น้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมัน และยังสามารถนำมาใช้ในการผลิตน้ำใช้ได้อีกด้วย (Moussa et al., 2017) การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า อาศัยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดสารแขวนลอย หรือสารละลายที่ปนเปื้อนในน้ำ และแยกออกจากน้ำด้วยการปล่อยให้เกิดตะกอน หรือกำจัดออกจากผิวน้ำโดยการลอยตะกอน เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วย Electrocoagulation เป็นเทคโนโลยีที่ได้ทั้งผลิตน้ำและบำบัดน้ำเสีย ซึ่ง Electrocoagulation ใช้หลักการรวมของกระบวนการ Coagulation, Flotation และหลักการทางไฟฟ้าเคมีเข้าด้วยกัน โดยการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Coagulation และ Electrocoagulation มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดอนุภาคที่ปนเปื้อนออกจากน้ำเสียโดยการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค ทำให้สารปนเปื้อนต่าง ๆ มีการหักล้าง ประจุจนมีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า เกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้น และแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีการปล่อยให้เกิดตะกอน (Precipitation) หรือการลอยตะกอน (Flotation) ข้อดีของระบบ Electrocoagulation เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ Coagulation คือ ในกระบวนการ Coagulation จะใช้สารเคมี (Coagulant) เช่น เกลือของโลหะ หรือ สารเคมีประเภทโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolytes) เพื่อทำให้อนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้ ในขณะที่กระบวนการ Electrocoagulation อาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดโลหะออกไซด์และโลหะไฮดรอกไซด์ ที่มีคุณสมบัติเป็น Coagulant ทำหน้าที่รวมตะกอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและกำจัดออกจากน้ำโดยการตกตะกอนเช่นเดียวกันกับกระบวนการ Coagulation นั่นเอง

### 2.1.1 หลักการของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

เทคโนโลยีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า เป็นกระบวนการที่ใช้บำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารเคมีทั้งที่ละลายและไม่ละลายน้ำ โดยอาศัยการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอยองค์ประกอบของชุด Electrocoagulation แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบไปด้วย เซลล์ไฟฟ้าขั้วบวก (Anode) และ ขั้วลบ (Cathode) ขั้วทั้งสองอาจเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟ (DC power supply) และ เซลล์ไฟฟ้านี้จะจุ่มอยู่ในน้ำเสียที่จะทำการบำบัด หลักการเบื้องต้น คือ การให้กระแสไฟฟ้าตกคร่อมบนขั้วไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี และเกิดไอออนของโลหะขึ้นที่ขั้วแอโนดเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังแสดงในสมการที่ (2.1) และ (2.4) ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าชนิดแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ทำให้เกิดก๊าซ  $H_2$  และ  $OH^-$  ดังแสดงในสมการที่ (2.2) และ (2.5) ไอออนเหล่านี้จะรวมตัวกันทำให้เกิดกลุ่มตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ (2.3) และ (2.6) จากนั้นจะเกิดกระบวนการ Coagulation ขึ้น เป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ทำให้สารปนเปื้อนต่าง ๆ มีการหักล้างประจุจนมีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า เกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้น และแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีการปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ทั้งโลหะหนัก สีย้อม สารอินทรีย์ ไอออนของแร่ธาตุ และ น้ำมันได้ หรือการกำจัดด้วยการลอยตะกอน (Floatation) ซึ่งเกิดจากก๊าซ  $H_2$  ดังแสดงในสมการที่ (2.3) และ (2.6) พาทะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นดังนี้

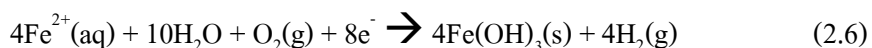
เมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า

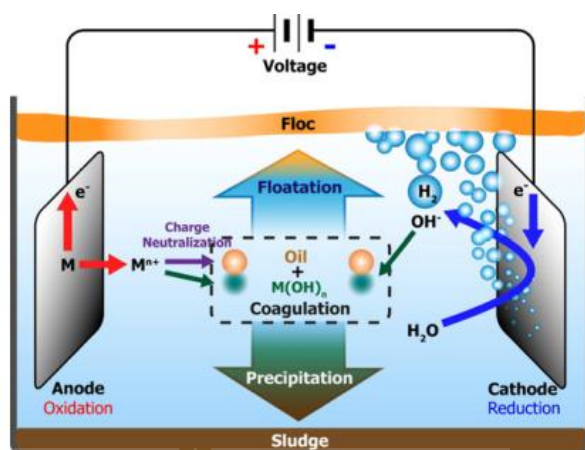


เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า



ในสารละลายที่มีออกซิเจนละลายอยู่ :





รูปที่ 2.1 กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (An et al., 2017)

### 2.1.2 ข้อดี-ข้อเสียของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Electrocoagulation

กระบวนการ Electrocoagulation นี้สอดคล้องกับการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการ Coagulation ซึ่งใช้สารเร่งตะกอน ขณะที่กระบวนการ Electrocoagulation ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีเพื่อใช้ในการรวมตะกอน เหมือนกระบวนการ Coagulation ซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อสารเคมี จากการศึกษาของ Mollah et al. (2001) สามารถสรุปข้อดี ข้อเสียของกระบวนการ Electrocoagulation ได้ดังต่อไปนี้

ข้อดีของระบบ Electrocoagulation

- 1) Electrocoagulation สามารถขจัดอนุภาคคอลลอยด์ที่เล็ก ๆ ได้เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ใช้จะทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคเร็วขึ้นทำให้เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มได้ดี
- 2) Electrocoagulation ไม่มีการใช้สารเคมี ดังนั้น จึงไม่มีปัญหาตะกอนส่วนเกิน และไม่เกิดมลภาวะทุติยภูมิที่เกิดจากการใช้สารเคมีในการบำบัด ดังนั้น น้ำทิ้งที่ผ่าน Electrocoagulation จะมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (Total dissolve solid) น้อย
- 3) ตะกอนจาก Electrocoagulation จะประกอบด้วยโลหะออกไซด์ หรือไฮดรอกไซด์เป็นหลัก ซึ่งง่ายต่อการนำออกจากน้ำ และมีปริมาณตะกอนที่ต่ำ
- 4) ฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ Electrocoagulation สามารถพาสารมลพิษบางส่วนลอยขึ้นไปไว้ที่ด้านบนของสารละลายซึ่งสามารถเก็บรวบรวมและนำออกได้ง่ายขึ้น
- 5) กระบวนการ Electrocoagulation ถูกควบคุมด้วยไฟฟ้า โดยไม่มีสิ่งใดที่เคลื่อนที่ ดังนั้นจึงต้องการการบำรุงรักษาน้อย

### ข้อเสียของ Electrocoagulation

- 1) อิเล็กโทรดหรือขั้วไฟฟ้าที่ให้อิเล็กตรอน จะค่อย ๆ กร่อนลงไปใต้น้ำเสีย ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและจำเป็นต้องเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าใหม่เป็นประจำ
- 2) กระบวนการ Electrocoagulation เป็นกระบวนการที่ใช้ไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย อาจส่งผลกระทบต่อต้นทุนในการดำเนินงาน
- 3) ในน้ำเสียจำเป็นต้องมีค่าการนำไฟฟ้าสูงถึงจะเหมาะสมต่อการบำบัด จึงทำให้น้ำเสียที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำจำเป็นต้องเพิ่มสารที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ เช่น เกลือ (NaCl) เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า

## 2.2 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโทรไลซิส (Faraday's laws of electrolysis)

ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) เป็นคนแรกที่ได้ค้นพบความสัมพันธ์แบบปริมาณวิเคราะห์ระหว่างปริมาณไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส ความมากน้อยของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับจำนวนอิเล็กตรอนที่มีการถ่ายเทในปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เป็นต้นว่า การรีดิวซ์ไอออนของเงินและของทองแดงให้เป็นโลหะตามปฏิกิริยา



จะเห็นว่าจากปฏิกิริยา (2.7) เงินหนึ่งโมล ไอออนรับอิเล็กตรอนหนึ่งโมลได้โลหะเงินหนึ่งโมลซึ่งหนัก 107.87 กรัม ซึ่งจะไปเคลือบอิเล็กโทรดที่เป็นแคโทด ส่วนปฏิกิริยา (2.8) หนึ่งโมลของไอออนของทองแดงทำปฏิกิริยากับสองโมลของอิเล็กตรอนเนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าเพราะฉะนั้นจะเห็นว่าในการรีดิวซ์ไอออนของทองแดงเพื่อให้ได้โลหะหนึ่งโมลจะต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าถึงสองเท่าของปริมาณไฟฟ้าที่ใช้กับเงิน

ปริมาณไฟฟ้าที่จะต้องผ่านเข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรไลติกเพื่อให้อิเล็กตรอนหนึ่งโมลทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดออกซิเดชันและรีดักชัน เรียกว่าหนึ่งฟาราเดย์ (Faraday) เพราะฉะนั้นกรณีดังกล่าว จะเห็นว่าจะต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์เพื่อทำให้ไอออนของโลหะเป็นโลหะเงินหนัก 107.87 กรัมและใช้ปริมาณไฟฟ้าถึง 2 ฟาราเดย์เพื่อให้ได้ทองแดงหนัก 63.54 กรัม

ปริมาณไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (coulomb) หาได้จากความสัมพันธ์

$$Q = It \quad (2.9)$$

เมื่อ  $Q =$  ปริมาณไฟฟ้าในหน่วยคูลอมบ์ (C)  
 $I =$  กระแสไฟฟ้าในหน่วยแอมแปร์ (A)  
 $t =$  เวลาในหน่วยวินาที (s)

เพราะฉะนั้น  $IC = IAs$  (2.10)

ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์ (F) เป็นผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอนหนึ่งโมลเนื่องจากประจุของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.60210 \times 10^{-19}$  C เพราะฉะนั้น

$$F = eN_A = (1.60210 \times 10^{-19} \text{ C}) (6.02252 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) = 96,487 \text{ C mol}^{-1} \quad (2.11)$$

หรือ 1 ฟาราเดย์ =  $96,487 \text{ C N}_A$  คือเลขอาโวกาโดร (Avogadro number)

น้ำหนักของสารที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดโดยการผ่านปริมาณไฟฟ้า  $96,487 \text{ C}$  เข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรลิติกเป็นน้ำหนักสมมูลของสารนั้นซึ่งคือน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากไอออนของโลหะรับอิเล็กตรอนหนึ่งโมล เพราะฉะนั้นจึงพอสรุปได้ว่า ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์จะทำให้ผลิตผลที่ได้จากออกซิเดชันหรือรีดักชันในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสหนักเท่ากับหนึ่งกรัมสมมูลเสมอ ในกรณีที่เซลล์อิเล็กโทรลิติกมีไอออนของเงินและทองแดง ถ้าหากผ่านปริมาณไฟฟ้าเข้าไปหนึ่งฟาราเดย์แล้ว เงินและทองแดงจากรีดักชันที่แคโทดจะมีน้ำหนักเป็น  $107.87$  กรัม และ  $63.54/2 = 31.77$  กรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักกรัมสมมูลของเงินและทองแดงตามลำดับ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ชัดว่า ปริมาณของผลิตผลที่เกิดขึ้นจากออกซิเดชันและรีดักชันมีความสัมพันธ์กับปริมาณไฟฟ้าหรือจำนวนฟาราเดย์ ความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจสรุปเป็นกฎได้ เรียกว่า กฎอิเล็กโทรลิซิสของฟาราเดย์ (Faraday's law of electrolysis) ดังนี้

1. มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แอโนดหรือแคโทดในขณะที่เกิดอิเล็กโทรลิซิสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์
2. มวลของสารต่าง ๆ กันที่เกิดขึ้นในระหว่างการอิเล็กโทรลิซิสที่ใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่ากันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้น ๆ



## 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Electrocoagulation

การทำงานของกระบวนการ Electrocoagulation ในการบำบัดน้ำเสียจะมีความแตกต่างกัน ตามลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการ Electrocoagulation ซึ่งมีหลายตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้าและการกำจัดสารมลพิษจากน้ำเสีย สำหรับพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะกล่าวถึงในส่วนนี้มีดังนี้

### 2.3.1 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density)

หนาแน่นของกระแสไฟฟ้านั้นใช้ในควบคุมปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นในสารละลาย (Hakizimana et al., 2017; Sahu and Chaudhari, 2013) ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ คือ ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในการละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้ไอออน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือ 1 ฟาราเดย์ ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วไฟฟ้าจำนวน 1 โมลเท่ากัน เช่น

- ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ ลงใน  $Al^{+3}$  จะได้  $Al(s)$  1 โมล =  $\frac{\text{น.น.กรัมโมล}}{\text{ประจุ}} = \frac{26.98}{3} = 9$  กรัม
- ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ ลงใน  $Fe^{+2}$  จะได้  $Fe(s)$  1 โมล =  $\frac{\text{น.น.กรัมโมล}}{\text{ประจุ}} = \frac{55.85}{2} = 27.9$  กรัม

จากกฎอิเล็กโทรไลซิสของฟาราเดย์ จะเห็นว่าปริมาณกระแสไฟฟ้านั้นเป็นตัวแปรสำคัญในก่อตัวของปริมาณสารรวมตะกอนหรือ Coagulant ที่สร้างขึ้นจากขั้วบวก จากการศึกษาของ Tir and Moulai-Mostefa (2008) พบว่าเมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจำนวนของ  $Fe(OH)_3$  จะถูกผลิตมากขึ้นเพื่อทำลายเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์พร้อมทั้งก่อตัวเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะสามารถตกตะกอนได้เร็ว ในทางกลับกัน  $H_2$  ที่ถูกสร้างขึ้นจากแคโทด เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ขนาดของฟองจะลดลง (Guohua Chen, 2004) ส่งผลให้ความหนาแน่นของฟองอากาศเพิ่มขึ้น ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กนี้มีพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นสำหรับสัมผัสกับอนุภาคคอลลอยด์ จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการแยกมลทินออกจากน้ำเสียได้สูงขึ้น (Chen et al., 2002) Ozyonar and Karagozoglu (2011) ได้ทำการศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในการกำจัด COD ความขุ่น และฟอสเฟตจากน้ำเสียชุมชน โดยใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 10-150 A/m<sup>2</sup> พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD ความขุ่น และฟอสเฟต เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 33-71, 80-98 และ 81-98 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะสามารถอธิบายด้วยกฎอิเล็กโทรไลซิสของฟาราเดย์ ซึ่งกล่าววามวลของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดขณะที่เกิดอิเล็กโทรไลซิสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์



จากกฎของฟาราเดย์สามารถนำมาเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของ  
 วัสดุโลหะที่ละลายลงสู่สารละลาย ดังสมการที่ (2.12) (ปริเมธ เจริญนพคุณ, 2545)

$$W = \frac{I \times t \times M}{z \times F}$$

(2.12)

โดย	W = ปริมาณ โลหะที่ละลาย (g)
	I = ค่ากระแสไฟฟ้าหลังการทดลอง (A)
	M = น้ำหนักโมเลกุลของขั้วแอโนด (g/mol)
	t = เวลาที่ใช้ (s)
	Z = จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
	F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 Culomb/mol)

### 2.3.2 แรงดันไฟฟ้า (Voltage)

ในวงจรไฟฟ้าใด ๆ ก็ตาม จะมีสิ่งที่ต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนหรือ  
 กระแสไฟฟ้าตลอดเวลาเรียกว่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า ซึ่งสิ่งที่บังคับให้กระแสไฟฟ้าหรือ  
 อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในวงจรได้เรียกว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้า หรือ แรงดันไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้า  
 ความต้านทานกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กันตามกฎของโอห์มดังสมการ  
 ที่ (2.13) ซึ่งกล่าวว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในวงจรได้จะมีค่าเท่ากับ ผล  
 คูณของกระแสไฟฟ้าและความต้านทานกระแสไฟฟ้า ดังนั้น ความต้านทานกระแสไฟฟ้าใน  
 กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง  
 (พลกฤษณ์ จิตรโต และ วรพันธ์ นาคบรรพต, 2557) ในการศึกษาของ Chavalparit and Ongwandee  
 (2009) ได้นำกระบวนการ Electrocoagulation มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล  
 โดยศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 10-30 โวลต์ ซึ่งวัดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าได้  
 6.7-20.8 mA/cm<sup>2</sup> พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD, Oil and Grease และ ของแข็งแขวนลอย  
 เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า 10-20 โวลต์ ในขณะที่ช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า 20-30  
 ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และได้สรุปว่าการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้ามีผลใน  
 การเพิ่มจำนวนของโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งมีผลทำให้สามารถกำจัด COD, Oil and Grease และของแข็ง  
 แขวนลอยได้มากขึ้น

$$V = I \times R \quad (2.13)$$

โดย	V	=	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)
	I	=	กระแสไฟฟ้า (A)
	R	=	ความต้านทานกระแสไฟฟ้า ( $\Omega$ )

### 2.3.3 ชนิดของขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ขั้วไฟฟ้าโลหะ (Electrode) คือ ส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า เชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเครื่องจ่ายไฟฟ้า เพื่อการต่อให้ครบวงจรจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนด (Anode) และ ขั้วแคโทด (Cathod) ขั้วไฟฟ้าเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน และมีหน้าที่นำอิเล็กตรอน วัสดุที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าได้แก่ อะลูมิเนียม เหล็ก คาร์บอน แพลตตินัม และไทเทเนียม โดยส่วนมากนิยมใช้แผ่นอะลูมิเนียมหรือแผ่นเหล็ก (วิลาสินี โคตรเจริญ, 2556) เนื่องจากขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมและเหล็กมีราคาถูกพร้อมใช้งานและได้รับการพิสูจน์แล้วว่าประสิทธิภาพจึงเป็นวัสดุอิเล็กโทรดที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุดในการใช้งานของ Electrocoagulation (An et al., 2017) แต่ในการเลือกชนิดขั้วไฟฟ้าจำเป็นต้องพิจารณาถึงข้อดีข้อด้อยของวัสดุขั้วไฟฟ้าง่ายๆ ด้วย อีกทั้งชนิดของสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำก็ให้ผลแตกต่างกันอีกด้วย Aoudj et al. (2010) ได้ใช้ Electrocoagulation ในการกำจัดสีเบสิก โดยได้เลือกใช้อลูมิเนียมเนื่องจาก  $Al(OH)_3$  มีพื้นที่ผิวสูงเป็นประโยชน์สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้อย่างรวดเร็วและการดักจับอนุภาคคอลลอยด์ แต่จากการศึกษาการกำจัดสีรีแอกทีฟของ Phalakornkule et al. (2010) พบว่าขั้วไฟฟ้าที่ใช้อลูมิเนียมมีประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ต่ำกว่าขั้วไฟฟ้าที่ใช้เหล็กในเวลาต่ำกว่า 10 นาที และได้ทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานของขั้วไฟฟ้าสองชนิดนี้พบว่าเหล็กใช้พลังงานต่ำซึ่งอยู่ในช่วง 0.5-3.0 kWh ต่อน้ำเสีย 1 m<sup>3</sup> ถึงแม้ว่าเหล็กจะมีความต้านทานที่สูงกว่าอลูมิเนียม (เหล็ก :  $1 \times 10^{-7} \Omega m$ , อลูมิเนียม :  $2.82 \times 10^{-8} \Omega m$ ) ซึ่งตามจริงแล้วจากกฎของโอห์ม ขั้วไฟฟ้าที่มีความต้านทานมากจะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ของไฟฟ้ามามากขึ้น แต่จากการทดลองตรวจลักษณะทางกายภาพของตะกอนในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว พบว่าลักษณะของตะกอนที่สร้างขึ้นโดยขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมแตกต่างขั้วไฟฟ้าที่ใช้เหล็ก โดยตะกอนจากอลูมิเนียมมีลักษณะเป็นปุยและพองตัวมีการตกตะกอนที่ไม่ดี ขณะที่ใช้เหล็กจะได้ตะกอนที่หนาและตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งความต้องการพลังงานของขั้วอลูมิเนียมที่สูงกว่าเหล็กเป็นเพราะ ตะกอนของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และ โพลีอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ อาจไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอออนทำให้ความต้านทานสูงขึ้น และใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้ในตารางที่ 2.1 ยังมีนักวิจัยอีกหลายท่านได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของขั้วไฟฟ้าที่ต่างกัน ซึ่งจากตารางในน้ำเสียจากการล้างรถ และน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ ขั้วไฟฟ้าที่ใช้เหล็กสามารถกำจัด Oil & Grease

สูงกว่าขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 90-99 และ 68-64 ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัด COD ของเหล็ก อยู่ในช่วงร้อยละ 76-88 อลูมิเนียม อยู่ในช่วงร้อยละ 65-92

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษของขั้วไฟฟ้าที่ต่างกัน

ประเภทน้ำเสีย	มลพิษที่กำจัด	ชนิดขั้วไฟฟ้า (Anode - Cathode)	ประสิทธิภาพการกำจัด	อ้างอิง
น้ำล้างรถ	COD		88%	(Gönder et al., 2017)
	Oil & Grease	Fe - Fe	90%	
	Chloride		50%	
	COD		88%	
	Oil & Grease	Al - Al	68%	
	Chloride		33%	
น้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์	COD	Fe - Fe	85%	(kobya et al., 2006)
	Oil & Grease		99%	
	COD	Al - Al	92%	
	Oil & Grease		94%	
น้ำเสียจากโรงซ่อมรถยนต์	COD	Mild steel - Stainless steel	81.51%	(Nampoothiri et al., 2016)
		Mild steel - Al	94.82%	
น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังและสิ่งทอ	COD	Fe - Fe	76%	(Can et al., 2006)
		Al - Al	65%	
	สีย้อมเอซิด	Fe - Fe	98.10%	(Chafi et al., 2011)
		Al - Al	93.40%	
	สีย้อมรีแอกทีฟ	Fe - Fe	>95%	(Sengil and Özacar, 2009)
		Al - Al	85%	

### 2.3.4 ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า (Distance of electrodes)

การติดตั้งขั้วไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการ Electrocoagulation ซึ่งการติดตั้งจะต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวสัมผัส (Effective surface) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า เนื่องจากมีผลต่อแรงดันไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดแรงดันตก (Voltage drop) เป็นตามสมการที่ (2.14) (Ghosh et al., 2008) ดังนี้

$$\eta_{IR} = I \times \frac{d}{s \times k} \quad (2.14)$$

โดย  $\eta_{IR}$  = แรงดันตก

$I$  = กระแสไฟฟ้า (A)

- d = ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (m)  
 S = active anode surface (m<sup>2</sup>)  
 k = specific conductivity (10<sup>3</sup> mS/m)

สมการข้างต้นระบุว่าเมื่อที่พื้นผิวขั้วแอโนด (S) และค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (k) คงที่ การเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (d) จะส่งผลให้ความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้า (I) ที่จ่ายเข้าไปในเซลล์จะมีค่าลดลง เป็นผลให้เกิดแรงดันตกนั่นเอง Nandi and Patel (2017) ได้ทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์ในการกำจัดสีย้อมสีเขียวด้วย Electrocoagulation ในการศึกษาในครั้งนี้ได้มีทดสอบผลของระยะห่างระหว่าง Electrode ระหว่าง 1 ถึง 3 cm พบว่า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 cm มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีร้อยละ 99.59 89.9 และ 76.14 สำหรับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสามค่าที่แตกต่างกันคือ 41.4 27.8 และ 13.9 A/m<sup>2</sup> ตามลำดับ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3 cm มีประสิทธิภาพการกำจัดสีร้อยละ 88.48 75.03 และ 63.73 สำหรับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสามค่าที่แตกต่างกันคือ 41.4 27.8 และ 13.9 A/m<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเดียวกัน ระยะห่างระหว่างขั้วที่น้อยกว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีมากกว่านั่นเอง

### 2.3.5 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction time)

เวลาในการทำปฏิกิริยามีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Electrocoagulation เนื่องจากปริมาณของโลหะและไฮดรอกไซด์ที่จะละลายลงไปในน้ำเสียจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ซึ่งจะสามารถลดระดับอนุภาคของสารมลพิษได้มากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป (Drouiche et al., 2009) จากการศึกษาของ Kobya et al. (2006) ซึ่งศึกษาผลกระทบบของเวลาในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ปีก พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการบำบัดจาก 5-40 นาที ทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจาก 4.8 เป็น 44.1 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง และมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณอลูมิเนียมที่ละลายลงในน้ำเสียจาก 0.2 เป็น 2.1 กิโลกรัมของอะลูมิเนียมต่อปริมาตรน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร แต่ทั้งนี้จะเห็นว่าเมื่อใช้เวลานานขึ้นจะทำให้เป็นการสิ้นเปลืองการใช้พลังงานทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น และประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษอาจจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นควรที่จะพิจารณาค่าใช้จ่าย ประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษ และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วเวลาที่เหมาะสมและได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีอยู่ในช่วง 20-30 นาที (Kobya et al., 2006; Malakootian et al., 2010; Xu and Zhu, 2004)

### 2.3.6 ความเข้มข้นของแอนไอออนในน้ำเสีย (Concentration of anions)

ในน้ำเสียจำเป็นต้องมีค่าการนำไฟฟ้าที่เพียงพอจึงจะเหมาะสมต่อการบำบัด จึงทำให้น้ำเสียที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำจำเป็นต้องเพิ่มสารที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ เช่น เกลือ (NaCl) เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า การเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าไม่ได้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด แต่เป็นการ

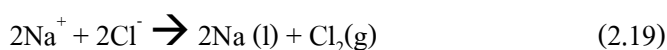
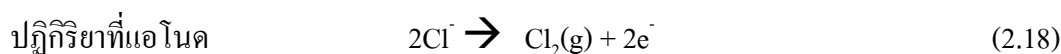
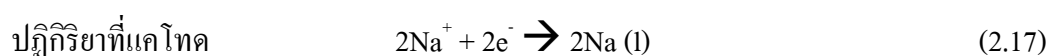
ช่วยประหยัดพลังงานที่จ่ายเข้าระบบ นอกจากนี้ความเข้มข้นของแอนไอออนในน้ำเสียที่แตกต่างกันจะมีผลต่อสมบัติการละลายของโลหะไอออนที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นหากในน้ำมีไอออนซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) จะส่งผลต่อการละลายของขั้วไฟฟ้า กล่าวคือ  $\text{SO}_4^{2-}$  จะไปลดการละลายตัวของโลหะจากขั้วไฟฟ้า ทำให้ลดการทำลายเสถียรของคอลลอยด์และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าใน Electrocoagulation ไปด้วย โดยเฉพาะเมื่อในน้ำมีไอออนของ  $\text{Ca}^{2+}$  หรือ  $\text{Mg}^{2+}$  เนื่องจากผลึกเกลือของ  $\text{Ca}^{2+}$  หรือ  $\text{Mg}^{2+}$  จะไปเคลือบที่ผิวของขั้วไฟฟ้า ทำให้ความต้านทานของกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ในทางตรงกันข้ามไอออนคลอไรด์และไนเตรท สามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจาก  $\text{SO}_4^{2-}$  ได้ โดยการตกตะกอนของเกลือที่ขั้วไฟฟ้า จะเห็นว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพและการใช้พลังงานของ Electrocoagulation เพราะถ้าสารละลายมีการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะทำให้ลดการใช้พลังงานของ Electrocoagulation เนื่องจากจะทำให้จ่ายไฟเข้าเซลล์น้อยลงแต่ประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษเพิ่มขึ้นนั่นเอง ดังนั้นการนำไฟฟ้าของสารละลายจะเพิ่มขึ้นได้โดยการเติมแอนไอออนในรูปของเกลือเช่น  $\text{NaCl}$  นอกจากนี้ไอออนคลอไรด์ที่เกิดขึ้นดังสมการที่ (2.14) ยังมีส่วนช่วยในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วย (Khandegar and Saroha, 2013; Chen, 2004) เมื่อเติมสารอิเล็กโทรไลต์เป็น  $\text{NaCl}$  ในวงจรปิดโซเดียมไอออนจะถูกรีดิวซ์ที่อิเล็กโทรดที่เป็นเหล็กและเป็นปฏิกิริยาที่แคโทด ดังสมการที่ (2.15)



เมื่อแต่ละโซเดียมไอออนถูกรีดิวซ์ที่แคโทด คลอไรด์ไอออนก็จะถูกออกซิไดส์ที่แอโนดด้วยจำนวนเท่ากัน ดังสมการที่ (2.16)



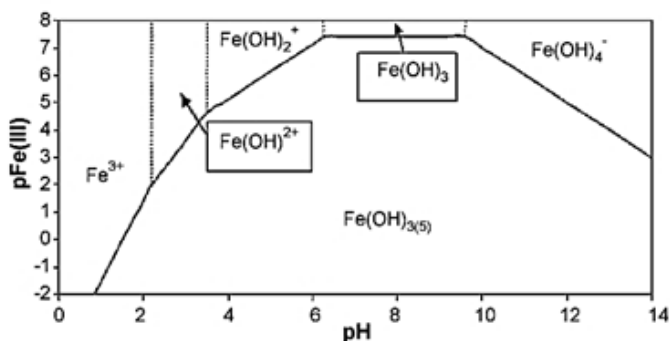
เนื่องจากอะตอมของคลอไรด์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถจะอยู่โดยลำพังได้เพราะฉะนั้นการรับและการให้อิเล็กตรอนในปฏิกิริยานี้จึงต้องเป็นอย่างละ 2 อิเล็กตรอน ดังแสดงในสมการที่ (2.17-2.19)



### 2.3.7 pH เริ่มต้น

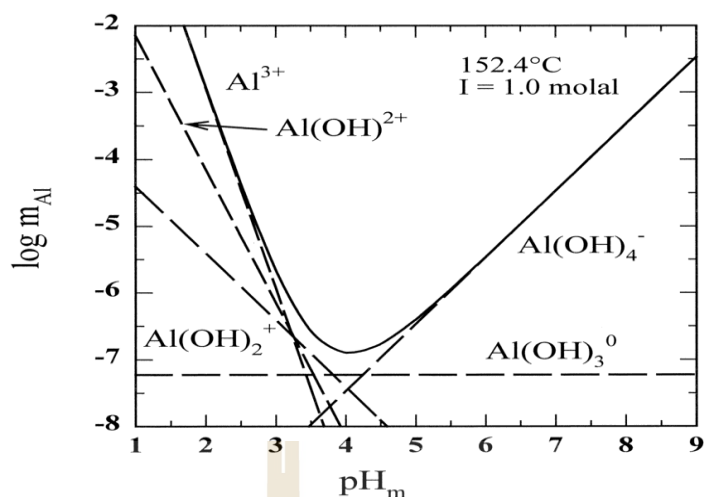
ในกระบวนการ Electrocoagulation ค่าพีเอช (pH) ของน้ำและน้ำเสียมีบทบาทสำคัญ (Ghosh et al., 2008; Daneshvar et al., 2006) เนื่องจากจะเป็นตัวกำหนดลักษณะไอออนของโลหะไฮดรอกไซด์ (Nandi and Patel, 2017) งานวิจัยของ Sengil and Ozacar (2009) ได้ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าพบว่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียสีข้อมชนิด Reactive Black 5 อยู่ในช่วง 5-9 จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่า pH ที่ต่ำกว่า 5 เหล็กจะแตกตัวเป็น  $\text{Fe(OH)}^{2+}$  และ  $\text{Fe(OH)}_2^+$  มากขึ้น ซึ่งไม่มีความสามารถในการรวมตะกอน และที่ pH 7 เหล็กจะอยู่ในรูป  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$  ซึ่งมีความสามารถรวมตะกอนในรูป  $\text{Fe(OH)}_2$  และ  $\text{Fe(OH)}_3$  ซึ่งอยู่ในรูปของแข็งไม่ละลายน้ำ ซึ่งสามารถรวมตัวกับอนุภาคของสีข้อมได้ เมื่อ pH มากกว่า 7 เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของ  $\text{Fe(OH)}_4^-$  ซึ่งมีคุณสมบัติละลายน้ำ จึงไม่เกิดการรวมตัวกับอนุภาคของสีข้อมประสิทธิภาพในการบำบัดจึงลดลง และการศึกษาของ Daneshvar et al. (2006) ได้กล่าวว่าประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับการก่อตัวของเหล็กไฮดรอกไซด์อยู่ในช่วง pH 4.5-8.5

ในกรณีที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าจะมีการละลายไอออนของอะลูมิเนียม ( $\text{Al}^{3+}$ ) เช่นเดียวกับการใช้เหล็ก Aoudj et al. (2010) ได้ทำการศึกษาบำบัดน้ำเสียจากสี Direct red 81 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมที่สูงขึ้นถูกอยู่ในช่วง pH 5-9 ซึ่งใกล้เคียงกับ pH ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการก่อตัวของแข็ง  $\text{Al(OH)}_{3(s)}$  อีกทั้งฟลอคของ  $\text{Al(OH)}_{3(s)}$  มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้อย่างรวดเร็วและการดักจับอนุภาคคอลลอยด์ (Bayramoglu et al., 2004) จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าที่ pH น้อยกว่า 3 จะพบ  $\text{Al}^{3+}$  และ  $\text{Al(OH)}^{2+}$  เป็นสปีชีส์หลักสามารถเกิดการรวมตัวกับอนุภาคของคอลลอยด์ และในสภาวะที่ pH 4-9.5 จะพบ  $\text{Al(OH)}_{3(s)}$  ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ และที่ pH มากกว่า 10 จะพบ Al ในรูป  $\text{Al(OH)}_4^-$  มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ง่าย (Terrazas et al., 2010)



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่า pH และการตกตะกอนของเหล็ก (Sengil and Özacar, 2009)



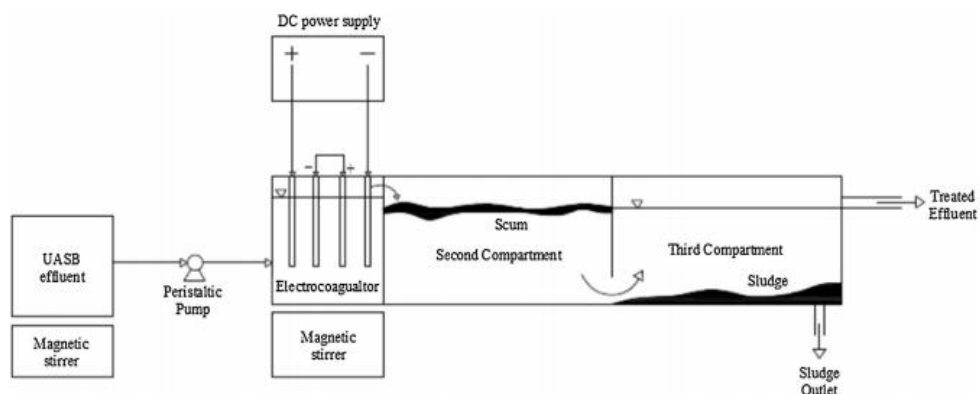


รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของค่า pH และการตกตะกอนของอลูมิเนียม (Aoudj et al., 2010)

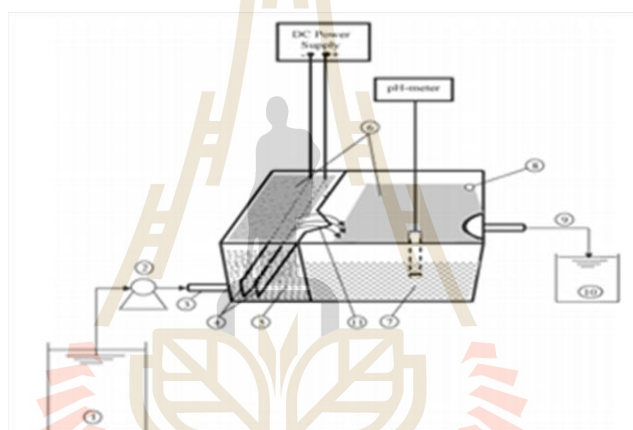
## 2.4 ชุดการทดลองของ Electrocoagulation แบบ Continuous

ในการทดลองบำบัดน้ำเสียด้วยระบบ Continuous มีความเหมาะสมกับน้ำเสียที่มาจากอุตสาหกรรมมากกว่าการทดลองแบบ Batch ในทางตรงกันข้ามการทดลองแบบ Batch จะช่วยให้สามารถศึกษาช่วงของสภาวะการทำงานต่างๆและเหมาะสมกับงานวิจัยมากกว่า ชุดการทดลองของ Electrocoagulation แบบ Continuous มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ประยุกต์ใช้ ระบบแบบ Continuous นั้นควรดำเนินในสภาวะที่ความเข้มข้นของมลพิษและอัตราการไหลที่คงที่ (Khandegar, and Saroha, 2013) ชุดการทดลองแบบ Continuous มีหลายรูปแบบ แต่ละรูปแบบมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน เช่น การวางขั้วไฟฟ้า การวางขั้วไฟฟ้าแบบแนวตั้งนั้น การเชื่อมต่อกับสายไฟทำได้สองทาง คือ ต่อไฟฟ้าด้านบน หรือ ด้านล่าง ในกรณีต่อขั้วไฟฟ้าด้านบน ดังรูปที่ 2.4 มีข้อเสียคือขั้วไฟฟ้าที่อยู่ต่ำสุดมักจะกร่อนได้เร็วกว่าด้านบน การไหลในลักษณะที่น้ำเข้าอยู่ทางด้านข้างถึงจะไม่เหมาะสมกับการวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งเนื่องจากของเหลวจะเข้าทางด้านใดด้านหนึ่งของขั้วไฟฟ้าและอยู่ด้านบนในช่วงระยะเวลาที่อยู่นิ่ง จึงทำให้ของเหลวทำปฏิกิริยาได้เพียงบางส่วน (Mollah et al., 2004)

จากการศึกษาของ Merzouk et al. (2009) ได้ทำการติดตั้งถึงปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องในการบำบัดน้ำเสียจากสีข้อม ดังรูปที่ 2.5 ใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีความยาวมากซึ่งเป็นประโยชน์ในการก่อตัวของฟองก๊าซ  $H_2$  การวางขั้วไฟฟ้าในลักษณะนี้มีข้อดีคือ เป็นการเพิ่มการผสมกันของของเหลวและก๊าซ  $H_2$  และยังช่วยให้ก๊าซ  $H_2$  ลอยอยู่เหนือขั้วไฟฟ้าเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ตะกอนไหลไปยังถังที่ 2 ได้อย่างเป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการชนกันของอนุภาคสามารถเพิ่มได้โดยการเพิ่มระดับความปั่นป่วนโดยการเพิ่มอัตราการไหลผ่าน นอกจากจะเป็นการเพิ่ม Floc แล้วยังเป็นการช่วยลดชั้นเมือกที่ติดอยู่กับขั้วไฟฟ้าได้ด้วย (Mollah et al., 2004)



รูปที่ 2.4 ถึงปฏิบัติการ Electrocoagulation แบบ Continuous (Makwana and Ahammed, 2016)



รูปที่ 2.5 ถึงปฏิบัติการ Electrocoagulation แบบ Continuous (Merzouk et al., 2009)

## 2.5 การนำกระบวนการ Electrocoagulation ไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Electrocoagulation เป็นวิธีทางไฟฟ้าเคมีที่มีศักยภาพบำบัดน้ำเสียได้หลายลักษณะ ซึ่งปัจจุบันสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้เป็น 6 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ น้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนัก น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังและสิ่งทอ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร น้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษ น้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมัน และยังสามารถนำมาใช้ในการผลิตน้ำใช้ได้อีกด้วย (Moussa et al., 2017) โดยในตารางที่ 2.2 ทำการรวบรวมประเภทน้ำเสียและประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการ Electrocoagulation ในการกำจัดมลพิษต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่า Electrocoagulation นั้นสามารถนำไปใช้ได้กับน้ำเสียจากโรงงานหลายประเภท และกำจัดมลพิษได้หลากหลาย เช่น โลหะหนัก สีข้อม ของแข็งแขวนลอย COD และน้ำมัน และประสิทธิภาพที่กำจัดมลพิษได้มากกว่าร้อยละ 50 นอกจากนี้จะเห็นว่า Electrocoagulation สามารถ



นำไปบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอได้ โดยสามารถกำจัดสีย้อมได้หลายชนิด เช่น สีเอซิด สิริแอคทีฟ และสีไดเรกต์ เป็นต้น ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีมากกว่าร้อยละ 95

ตารางที่ 2.2 การบำบัดน้ำเสียประเภทต่าง ๆ ด้วยกระบวนการ Electrocoagulation (Moussa et al., 2017)

ประเภทน้ำเสีย	มลพิษที่กำจัด	ประสิทธิภาพการกำจัด	อ้างอิง
น้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก	Chromium	99.90%	(Golder et al., 2007)
	Arsenic	81.50%	(Mohora et al., 2014)
น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังและสิ่งทอ	COD	46%	(Apaydin et al., 2009)
	Sulfide	90%	
	SS	70%	
	Chromium	97%	
	สีย้อมไดเรกต์ (Direct red 81)	มากกว่า 98%	(Aoudj et al., 2010)
	COD	65%	(Can et al., 2006)
	สีย้อมเอซิด	76%	(Chafi et al., 2011)
สีย้อมรีแอคทีฟ	98%	(Şengil and Özacar., 2009)	
น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร	COD	>95%	(Yetilmezsoy et al., 2009)
	สี	90%	
	COD	92%	
	Oil & grease	98%	
น้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษ	COD	99%	(Şengil and özacar, 2006)
	COD	95%	(Shankar et al., 2015)
	Color	94%	(Sridhar et al., 2011)
	COD	90%	
	BOD	87%	

## 2.6 เทคโนโลยีการบำบัดเสีย

การกำจัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น และเนื่องจากปัจจุบันยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับกระบวนการฟอกย้อม ทำให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นประกอบด้วยสารเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับการกำจัดสีหลายวิธี ได้แก่ ได้แก่ การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) การดูดซับ (Adsorption) การบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic treatment process) การกรอง (Filtration) กระบวนการเฟนตัน (Fenton Reaction) และการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) เป็นต้น

### 2.6.1 การดูดซับ (Absorption)

เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวดูดซับ (Adsorbent) จับอนุภาคสีไว้ภายในโพรงของตัวดูดซับ มีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้บำบัดน้ำเสียปริมาณไม่มากในเวลาสั้น ในกรณีที่น้ำเสียมีปริมาณมากวิธีการนี้อาจจะไม่เหมาะสม เนื่องจากต้องใช้ตัวดูดซับในปริมาณที่มากขึ้น และนอกจากนี้ยังต้องทำการคืนสภาพ (Regenerate) ในกับตัวดูดซับเมื่อใช้ไประยะหนึ่ง ซึ่งทำได้ยากและต้องใช้ต้นทุนสูง ตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ถ่านกัมมันต์ ชนิตา เสมรรัตน์ (2543) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมของถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ขานอ้อย พบว่ามีประสิทธิภาพในการลดสีร้อยละ 51-95

### 2.6.2 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นการเติมสารเคมีหรือเรียกว่าสารสร้างตะกอน (Coagulant) ลงไปในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสี และกวนผสมอย่างช้าๆ เพื่อให้อนุภาคสีรวมตัวกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งในกระบวนการกวนชำนั้นสามารถเติมสารช่วยก่อตะกอน (Coagulant aid) ได้ ซึ่งจะทำให้ ฟล็อกสามารถตกตะกอนได้เร็วขึ้น จากนั้นกำจัดออกจากน้ำโดยการตกตะกอน สาร Coagulant ที่นิยมใช้ได้แก่ สารส้ม ปูนขาว Ferric sulphate Poly aluminium sulphate เป็นต้น จะเห็นว่าวิธีนี้ต้องใช้สารเคมีมากและก่อให้เกิดตะกอนในปริมาณมาก ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนต่อไป จากการศึกษาของ Hai et al., (2007) พบว่าวิธีตกตะกอนด้วยสารเคมี ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง และผลในการกำจัดสีเอโซ เช่น สีเอซิด สีรีแอคทีฟ และสีเบสิค พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำ เนื่องจากสีย้อมมีโมเลกุลที่เล็กจึงยากต่อการก่อตะกอนของสี ซึ่งสอดคล้องกับ ธนกฤต พรหมทอง (2552) คือ หากโมเลกุลของสีมีขนาดเล็กและละลายน้ำได้ดีการสร้างตะกอนของสีจะเกิดขึ้นยาก จึงจำเป็นต้องใช้สารช่วยรวมตะกอน เช่น Polymer จากการศึกษาของ El-Gohary and Tawfik (2009) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมไคเรกทีฟด้วยสารส้ม และปูนขาว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมไคเรกทีฟร้อยละ 90.00 และ 78.90 ตามลำดับ

### 2.6.2.1 หลักการสร้างและรวมตะกอน

กระบวนการสร้างและรวมตะกอน คือ การทำให้คอลลอยด์หรือสารแขวนลอยขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารแขวนลอยมีประจุเป็นลบ จึงเกิดการผลักกัน ไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นจึงต้องสะเทินประจุของอนุภาคเหล่านั้น กลไกในการสร้างและรวมตะกอน มีดังนี้

กลไกของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ที่ทำให้คอลลอยด์หรือสารแขวนลอยรวมตัวกัน และตกตะกอนออกจากน้ำ คือ

#### 1) ทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์

การเติมสารเคมีที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค ทำให้ความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) ลดลง และทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ที่ผิวอนุภาคของอนุภาคคอลลอยด์เกิดการรวมตัว และแยกตัวออกจากน้ำได้

#### 2) กลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization)

สารเคมีบางชนิดสามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ถ้าสารเหล่านั้นมีประจุไฟฟ้าที่ตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ การดูดติดผิวจะมีผลในการลดค่าศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ซึ่งแตกต่างจากกลไกแรกเนื่องจากกลไกแรกจะไม่เกิดการดูดติดผิวที่อนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งกลไกการดูดติดผิวต้องการประจุที่ต่างจากอนุภาคคอลลอยด์น้อยกว่าแบบแรก เนื่องจากประจุสามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้ การลดค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคจึงได้ผลดีกว่าประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้ กลไกการดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคให้เป็นตรงกันข้ามกับของเดิม ซึ่งเกิดจากการให้สารตกตะกอนมากเกินไป ทำให้คอลลอยด์กลับมามีเสถียรภาพ

#### 3) กลไกการสร้างผลึกเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation)

เมื่อเติมสารประกอบเกลือของโลหะไปในน้ำในปริมาณที่เพียงพอจะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวเพื่อทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ หรืออาจจับตัวรวมกับผลึก ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้ถือเป็นการเพิ่มขนาดและน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ส่งผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้

เนื่องจากกลไกนี้ต้องอาศัยปริมาณของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม ซึ่งแปรผกผันกับปริมาณของคอลลอยด์ คือ น้ำที่มีปริมาณความขุ่นน้อยต้องใช้สารสร้างตะกอนปริมาณมากจึงจะตกตะกอนได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้สารตกตะกอนน้อยกว่าสาเหตุเกิดจากน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้น แม้จะมีการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แล้วแต่การตกตะกอนอาจเกิดขึ้นได้ไม่ดี จึงต้องให้สารตกตะกอนในปริมาณมากเพื่อสร้างผลึกจำนวนมาก ในการเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ในกรณีที่มีน้ำมีความขุ่นสูงโอกาสในการสัมผัสกันของอนุภาคมีสูง จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยสารตกตะกอนในปริมาณมาก

สำหรับกลไกนี้ค่า pH มีความสำคัญมาก เนื่องจากมีความสัมพันธ์ระหว่าง pH และความสามารถในการตกผลึกของสารชนิดต่าง ๆ สารสร้างตะกอนแต่ละตัวจะมีค่า pH ที่เหมาะสมแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งในการผลิตน้ำประปามักทำให้เกิดกลไก Sweep Coagulation

#### 4) กลไกสร้างสะพานเชื่อมต่ออนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging)

สารประกอบตามธรรมชาติหลายชนิด เช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาล และ โปรตีนบางชนิด รวมทั้งสารอินทรีย์โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถใช้เป็นสารในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ได้ สารเหล่านี้มีอนุภาคขนาดใหญ่มาก ประจุไฟฟ้าอาจเป็นได้ทั้งประจุบวก ลบ หรือไม่มีประจุก็ได้ ซึ่งโมเลกุลของโพลีเมอร์จะเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดอาจเป็นผลมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกัน อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่นถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว อนุภาคดังกล่าวที่สามารถจับกับอนุภาคอื่น ๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมจะเกิดขึ้นได้ตลอดหากยังมีโพลีเมอร์และตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค หากใช้โพลีเมอร์ในปริมาณมากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ เพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะที่อนุภาคของคอลลอยด์ จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคคอลลอยด์ในการจับกับโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคคอลลอยด์อื่น ๆ อนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นแบบที่มีเสถียรภาพ การกวนน้ำแรงหรือนานเกินไปอาจทำให้ Floc ที่เกิดขึ้นแตกออกและทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับบนอนุภาคเดิม เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงกลับมาอีก (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

ตารางที่ 2.3 ช่วง pH ที่เหมาะสมสำหรับสารสร้างตะกอนชนิดต่างๆ (มัลลิกา ปัญญาอะ โป, 2556)

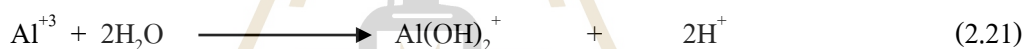
สารสร้างตะกอน	ช่วง pH ที่เหมาะสม
Alum	4.0-7.0
PACl	5.5-8.0
Ferrous sulphate	8.5 และสูงกว่า
Ferric chloride	3.5-6.5 และสูงกว่า 8.5
Ferric sulphate	3.5-7.0 และสูงกว่า 9.0

### 2.6.3 ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้

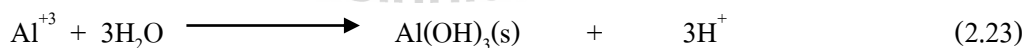
สารโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้มีดังนี้ PACl, Alum, Aluminium chloride, Ferric chloride, Ferric sulfate และ Magnesium chloride ซึ่งสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี COD และของแข็งแขวนลอยในน้ำค่อนข้างสูง โดยสารโคแอกกูแลนต์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี COD และของแข็งแขวนลอยในน้ำเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ PACl > Magnesium

chloride > Ferric chloride > Alum > Ferric sulfate > Aluminium chloride ซึ่งจากประสิทธิภาพในการกำจัดจะเห็นว่า PACI มีประสิทธิภาพในการกำจัด สี และ COD ที่สูงสุด เมื่อเทียบกับสารโคแอกกูแลนต์ชนิดอื่น ๆ และปริมาณ PACI ที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้อยกว่าสารโคแอกกูแลนต์ชนิดอื่น และนิยมใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา และสารโคแอกกูแลนต์ที่มีประสิทธิภาพรองลงมา คือ Magnesium chloride และ Ferric chloride ตามลำดับ

PACI เป็นสารเคมีที่อยู่ในรูปของแข็ง หรืออยู่ในรูปของสารละลาย เมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดการแตกตัวได้  $Al^{3+}$  ที่มีความสามารถในการให้ไฮโดรเจนไอออนจึงเกิดการไฮโดรไลซิสของอลูมิเนียมได้สารต่างๆ เช่น  $Al_3(OH)_4^{+5}$   $Al_7(OH)^{+3}$  และ  $Al_6(OH)_{15}^{+3}$  เป็นต้น เมื่อ PACI ละลายน้ำจะไฮโดรไลซ์ทันที เกิดเป็นอลูมิเนียมเชิงซ้อนมากมาย ซึ่งตัวที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ  $[Al_3O_4(OH)_{24}]^{+7}$  หรือ  $Al^{+3}$  ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของ  $Al^{+3}$  จะเกิดขึ้นทันทีโดยไลแกนด์ (Ligands) ชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $OH^-$  จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex substance) ระหว่างอลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน ดังปฏิกิริยา (2.20-2.22) ต่อไปนี้



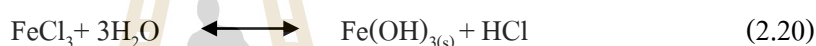
ในกรณีที่มีความเข้มข้นของ PACI สูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation Point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก  $Al(OH)_3$  ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ (2.23)



ซึ่งที่มีอลูมิเนียมหลายอะตอมเรียกว่า Polymeric Hydroxo Complex ซึ่งมีความสามารถในการปฏิกิริยากับคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ไม่เสถียร แล้วทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แล้วจึงตกตะกอน สำหรับการสร้างตะกอนค่า pH ของน้ำมีความสำคัญต่อประจุที่เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซิส เนื่องจากถ้ามีค่า pH ค่าสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวกจะเกิดขึ้นมาก ส่งผลให้มีการเพิ่มปริมาณและอัตราเร็วในการตกตะกอน นอกจาก  $Al^{+3}$  จะจับกับอนุภาคคอลลอยด์แล้ว อนุภาค  $Al^{+3}$  ยังทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำกลายเป็น  $Al(OH)_3$  เกิดเป็นตะกอนเล็ก ๆ (กาญจนาภา ครอบธรรมชาติ, 2535) ถ้า pH ของน้ำสูงกว่าจุดสะเทิน

ทางไฟฟ้า (Zero Point of Charge) ของ  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$  จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุลบ เช่น  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$  และในกรณี pH ของน้ำต่ำกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของ  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$  ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการโคแอกกูเลชันจะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก เช่น  $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{+4}$ ,  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{+5}$  ซึ่งกลไกการกำจัดคอลลอยด์ด้วย PACl คือ กลไก Charge neutralization และการดูดซับผิว หาก pH ลดลงส่งผลให้ไม่สามารถเกิดตะกอน  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ที่จะทำให้เกิดกลไก Sweep Coagulation ในการตกตะกอนคอลลอยด์

$\text{FeCl}_3$  นิยมใช้เป็นสารตกตะกอนผลึกจะมีสีน้ำตาลหรือเหลือง เมื่อละลายน้ำจะมีสีน้ำตาลแกมเหลือง เนื่องจากผลึก  $\text{FeCl}_3$  สามารถละลายน้ำได้ง่าย และตกตะกอนได้ดีที่ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 4-11 ซึ่งอยู่ในช่วง pH ของลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ และสามารถตกตะกอนได้ดีที่สุดที่ค่า pH เท่ากับ 8 โดยตกตะกอนในรูปของ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (ณัฐ ทศนเปรมสิน, 2557) จากสมการที่ (2.20)



#### 2.6.4 กระบวนการเฟนตัน (Fenton Reaction)

กระบวนการเฟนตันเป็นกระบวนการออกซิเดชันในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งประกอบด้วย  $\text{H}_2\text{O}_2$  และ  $\text{Fe}^{2+}$  ผสมกัน และให้  $\text{OH}^\cdot$  ซึ่งข้อดีของการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตันคือมีความสามารถในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ไม่เฉพาะเจาะจง โดยสามารถลดความเป็นพิษของสารอินทรีย์ได้ โดยสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารเคมีที่เป็นพิษที่ไม่สามารถบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพได้ วิธีเฟนตันรีเอเจนต์สามารถกำจัดได้ทั้งสีที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ แต่ก็มีข้อเสียคือมีตะกอนของเหล็กเกิดขึ้นซึ่งต้องมีวิธีการกำจัดต่อไป (ศิริพรรณ กำแน่น, 2554) จากการศึกษาของ Kim et al. (2004) โดยใช้เฟนตันรีเอเจนต์ในการกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำ คือสีรีแอกทีฟ และสีที่ไม่ละลายน้ำ คือสีดิสเพอร์ส และวัดค่า COD พบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟร้อยละ 92-95.8, กำจัด COD ได้ร้อยละ 70-80.3 สำหรับสีดิสเพอร์สประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 83.3-85.0 และกำจัด COD ได้ ร้อยละ 48.0-56.2

#### 2.6.5 การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)

กระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี หลักการในการกำจัดโลหะกลุ่ต้อออกจากน้ำคือการสร้างอนุภาคของโลหะไฮดรอกไซด์เพื่อดูดซับและตกตะกอนโมเลกุลสี อีกทั้งก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นยังช่วยเสริมการกำจัดสารแขวนลอยด้วยการลอยตะกอนได้อีกด้วย สามารถกำจัดได้ทั้งสีที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ (Khandegar and Saroha, 2013) ในทางปฏิบัติจริงการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าใช้



พื้นที่และเวลาในการบำบัดสั้น จากการศึกษาของ Pajootan et al. (2012) ได้ทดลองกำจัดสีข้อม Acid black 52 และ Acid yellow 220 ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า  $40 \text{ A/m}^2$  โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นอลูมิเนียม พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีร้อยละ 92 และ 95 ตามลำดับ Merzouk et al. (2009) ได้ทดลองกำจัดสีข้อม Disperse red ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า  $20.8 \text{ mA/cm}^2$  โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นอลูมิเนียม พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีร้อยละ 95

## 2.7 ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

น้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยทั่วไป ประกอบด้วยสารแขวนลอย (Total Suspended solid) และสารอินทรีย์จากกระบวนการย้อมในปริมาณสูง ได้แก่ แป้ง สีข้อม กรดอะซิติก และเส้นใยเส้นด้ายที่ปนเปื้อนออกมาจากกระบวนการผลิต อีกทั้งยังมีสารอนินทรีย์ประเภทโลหะหนักจากสีข้อมปนเปื้อนในน้ำทิ้ง เช่น ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) โคบอล (Co) สังกะสี (Zn) เป็นต้น โดยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอมีลักษณะสำคัญ คือ มีการปนเปื้อนของสีข้อม และมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ อนุภาคสีจะขัดขวางการส่องผ่านของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ส่งผลให้พืชน้ำ และสาหร่ายไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ แหล่งน้ำขาดออกซิเจน ทำให้มีผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ รวมถึงสีของน้ำทิ้งที่ปล่อยออกมาทำให้แหล่งน้ำเป็นที่น่ารังเกียจของผู้พบเห็น

จากการศึกษาลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ พบว่าน้ำเสียมีลักษณะดังแสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5 สามารถสรุปได้ว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนใหญ่มีการปนเปื้อนสี ค่า COD TSS และ TDS สูง ค่า pH ของน้ำเสียจะอยู่ในช่วงที่เป็นด่าง แต่ทั้งนี้ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอจะแปรผันไปตามประเภทของสีข้อมที่ใช้ โดยแปรผันทางด้านปริมาณและความเข้มข้นของสารปนเปื้อนน้ำเสีย โดยเฉพาะ COD BOD และ สี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) และค่า pH ที่มีช่วงกว้างตั้งแต่ 2 ถึง 12 (Poots et al., 1978, Szpyrkowicz et al, 2000; Mazumder, 2011; Franco et al., 2013) ลักษณะน้ำเสียเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกประเภทของระบบบำบัด ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำเป็นปัจจัยในการเลือกประเภทของระบบบำบัด เช่น น้ำเสียที่เกิดจากสีข้อมที่ไม่ละลายน้ำ เช่น สีข้อมแวต สีข้อมดิสเพิร์ส และสีข้อมซัลเฟอร์ เป็นต้น ควรเลือกกระบวนการตกตะกอนทางเคมีในการกำจัดสารอินทรีย์ เช่น สี ออกจากน้ำเสีย และส่งต่อไปยังระบบบำบัดทางชีวภาพเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ กรณีน้ำเสียจากสีข้อมที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี เช่น สีข้อมเอซิด สีข้อมรีแอคทีฟ และสีข้อมเบสิด เป็นต้น กระบวนการตกตะกอนทางเคมีไม่สามารถกำจัดสีได้ จึงควรเลือกใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพก่อน อย่างไรก็ตาม โรงงานอุตสาหกรรมประเภทฟอกย้อมสิ่งทอไม่สามารถฟอกย้อมสีใดสีหนึ่งได้ตลอด จึงควรเลือกระบบบำบัดน้ำเสียที่สามารถรองรับน้ำเสียได้ในทุกสภาวะ



ตารางที่ 2.4 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

ชนิดของผลิตภัณฑ์	ลักษณะของน้ำเสีย					
	pH	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	สี (ADMI)	TKN (mg/l)
ฟอกย้อมด้าย	7.87-9.50	530-1,020	1,050-1,650	80-258	471-1,240	30-70
ฟอกย้อมผ้าทอ	7.50	380	575	294	1,484	23.8
ฟอกย้อม/พิมพ์และแต่งสำเร็จผ้า	7.50	190	464	63	375	14
ฟอกและซักกรีดเนื้อผ้า	6.88	230	248	98	75	12.6

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นของสีย้อมจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

ความเข้มข้นของสีย้อม (หน่วย)		ประเภทน้ำเสีย	อ้างอิง
pt-co	ADMI		
-	471-1,240	ฟอกย้อมด้าย	กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2556)
-	1,484	ฟอกย้อมผ้าทอ	
-	375	ฟอกย้อม/พิมพ์และแต่งสำเร็จผ้า	
-	75	ฟอกและซักกรีดเนื้อผ้า	
-	1,450-4,750	ย้อมผ้า	
-	1,080	ย้อมผ้า	Eslami et al. (2013)
2,420	72.7	น้ำเสียจากกลุ่มทอผ้าบ้านโนนตะคร้อ (สีย้อมธรรมชาติ)	บุญชัย และจรียา (2562)
2,211.33	-	น้ำเสียจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านสามโคก (สีย้อมเคมี)	
1430	-	น้ำเสียจากกลุ่มสตรีทอผ้าไหมตำบลสวาย (สีย้อมธรรมชาติ)	
1,873.33	-	น้ำเสียจากกลุ่มสตรีทอผ้าไหมตำบลสวาย (สีย้อมเคมี)	
3,750	1,006.25	น้ำเสียจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มทอผ้าย้อมสีธรรมชาติบ้านหนองบัวแดง (สีย้อมธรรมชาติ)	
1,810	703.15	น้ำเสียจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มทอผ้าย้อมสีธรรมชาติบ้านหนองบัวแดง (สีย้อมเคมี)	
33,550	1,011.25	น้ำเสียจากกลุ่มสัมมาชีพชุมชนย้อมธรรมชาติ (กลุ่มผ้าไหมมัดหมี่) (สีย้อมธรรมชาติ)	
815	596.4	น้ำเสียจากกลุ่มแม่บ้านเกษตรทอผ้าไหมบ้านหนองขามน้อย (สีย้อมเคมี)	
16,050	942.75	น้ำเสียจากคณาบดี (สีย้อมเคมี)	

## 2.8 สีย้อม

สีย้อมที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายประเภท โดยสามารถแบ่งประเภทสีย้อมได้หลายประเภท ดังนี้

- การแบ่งประเภทของสีย้อมจากประจุของสี
  - สีย้อมที่มีประจุบวก ได้แก่ สีย้อมแอททิฟ และสีย้อมเบสิค
  - สีย้อมที่มีประจุลบ ได้แก่ สีย้อมแอซิด สีย้อมออร์แกนิกหรือโครม และสีย้อมทาลคอม-เพลิกซ์
- การแบ่งประเภทของสีย้อมตามความสามารถในการละลายน้ำ
  - สีย้อมที่ละลายน้ำ ได้แก่ สีย้อมไดเรกต์ สีย้อมแอททิฟ สีย้อมแอซิด สีย้อมออร์แกนิก และสีย้อมทาลคอมเพลิกซ์
  - สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ ได้แก่ สีย้อมแวต สีย้อมซัลเฟอร์ สีย้อมดิสเพอร์ส และสีย้อมโซอิก

สีย้อมที่ละลายน้ำได้ เรียกว่า สีย้อม (Dyes) และสีย้อมที่ละลายน้ำไม่ได้นั้น เรียกว่า พิกเมนต์ (Pigment) สีย้อมแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.6

### 2.8.1 องค์ประกอบของโมเลกุลสีย้อม

โมเลกุลของสีย้อมประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน (Buckly, 1992) คือ

#### 2.8.1.1 หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม (Dye chromophore group)

องค์ประกอบส่วนนี้จะประกอบไปด้วยพันธะคู่ และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีในสีย้อม โดยเมื่อ โมเลกุลของสีย้อมถูกแสงตกกระทบ โครงสร้างโครโมฟอร์จะเกิดการสั่น (Oscillate) เนื่องจากการดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่น ไปเป็นผลให้เกิดการเห็นสีตามช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ถูกดูดกลืน โครโมฟอร์จะมีอยู่ด้วยกัน 5 กลุ่มในจำนวนนี้ที่นิยม ได้แก่

- N=N กลุ่มเอโซ (Azo group)
- C=O กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl group)
- NO<sub>2</sub> กลุ่มไนโตร (Nitro group)
- N=O กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso group)
- NR<sub>3</sub><sup>+</sup> อนุพันธ์แอมโมเนียมโมเนียม (Alkyl ammonium derivatives)

โดยเฉพาะกลุ่มเอโซนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอถึงร้อยละ 60-70 ของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Zee et al., 2003)

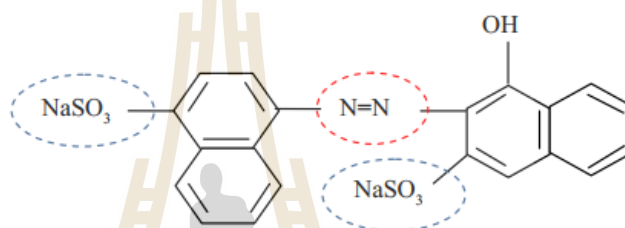
#### 2.8.1.2 หมู่ฟังก์ชันนัลของสีย้อม (Dye functional group) หรือที่เรียกว่า ออกโซโครม (Auxochrome)

องค์ประกอบของโมเลกุลส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ก่อบันทึบระหว่างโมเลกุลสีกับเส้นใย ซึ่งจะทำให้เกิดการยึดติดของสีย้อมกับเส้นใยขึ้น โดยโครงสร้างส่วนนี้มักจะเป็นวงเบนซีน (Benzene ring) ที่มีหมู่อะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive group) ติดอยู่ เช่น หมู่ SO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, COOH, OH

ตารางที่ 2.6 การจำแนกสีข้อม (พลกฤษณ์ จิตรโฑ และ วรรณัท นาคบรรพต, 2557)

ประเภทสีข้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีข้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี
สีไคแรกท์	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	พันธะไอออนิก
สีรีแอกทีฟ	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ฝ้าย - ขนสัตว์ - วิสคอส	พันธะโควาเลนต์
สีเบสิก	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี	- อะคลิลิก	พันธะไอออนิก
สีแอซิด	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	พันธะไอออนิก
สีมอร์แดนท์หรือโครม	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น - เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ	- ขนสัตว์	คอลลอยด์ของสีข้อมดูดติดผิวเส้นใย
สีเวีด	- ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	ปฏิกิริยาคตะกอนผลึกภายในเส้นใย
สีซัลเฟอร์	- เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	ปฏิกิริยาคตะกอนผลึกภายในเส้นใย
สีดิสเพอร์ส	- ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก - กระจายอยู่ในน้ำเป็นอนุภาคคอลลอยด์ - สีติดแน่นดี	- อะคลิลิก - โพลีเอสเทอร์ - ไนลอน - เซลลูโลส - อะซิเตต	คอลลอยด์ของสีข้อมดูดติดผิวเส้นใย
สีอะโซอิก	- เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	ปฏิกิริยาคตะกอนผลึกภายในเส้นใย

และ  $\text{NH}_2$  เป็นต้น โมเลกุลสีจะยึดติดกับเส้นใยได้โดยการที่หมู่ฟังก์ชันนัล (Functional group) เหล่านี้ทำปฏิกิริยากับเส้นใย โดยอาจเป็นพันธะโควาเลนต์ พันธะอิออนิก แรงวันเดอร์วาลส์หรือโดยการแทรกซึมของอนุภาคสียอมเข้าไปในเส้นใย (ศิริพรรณ คำแน่น, 2554) จากรูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสียอมเอโซแอซิด (Acid red B) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างโมเลกุลของสียอมประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ โครโมฟอร์ ซึ่งเป็นส่วนทำให้เกิดสี โครโมฟอร์แบบ (N=N) จัดอยู่ในกลุ่มสีเอโซ ดังแสดงในวงกลมสีแดง และในโครงสร้างโมเลกุลยังประกอบด้วยออกโซโครมซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้โมเลกุลของสียอมกับเส้นใยยึดติดกัน โครงสร้างส่วนนี้ประกอบไปด้วยวงเบนซีน ที่มีกลุ่มอะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยาติดอยู่ คือ กลุ่มซัลโฟนิล ดังแสดงในวงกลมสีน้ำเงิน



รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของสียอมเอโซ Acid red B (Jiang et al., 2010)

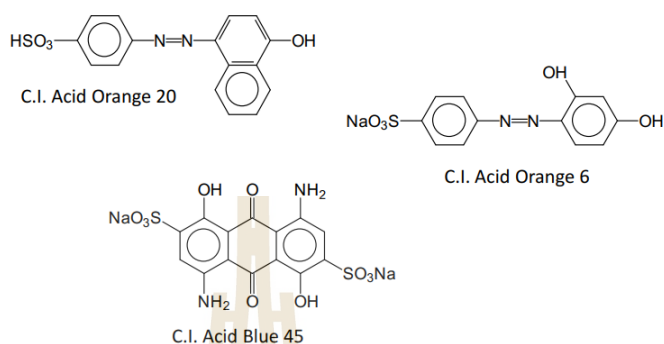
### 2.8.2 สียอมเอซิด (Acid dye)

สีเอซิดเป็นสารที่ทำให้เกิดสีบนเส้นใยไนลอนและเส้นใยโปรตีน ได้รับความนิยมในการย้อมไหมเนื่องจากเป็นสีที่เหมาะสมกับการย้อมเส้นใยโปรตีน (ฉวีฐวรรธ ชนประดิษฐ์กุล, 2555) ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีประจุบวกในสภาวะการย้อมและละลายน้ำได้ดี (พลกฤษณ์ และวรนันต์, 2557) เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันนัลเป็นกลุ่มซัลโฟนิล ( $\text{SO}_3\text{Na}$ ) จึงมีคุณสมบัติในการละลายน้ำ สีในกลุ่มนี้ต้องย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาวะเป็นกรด เพราะเหตุนี้สีกลุ่มนี้เกือบทุกตัวเป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์มีประจุลบ (Anionic) จึงเรียกสีเหล่านี้ว่าสีเอซิด เนื่องจากเป็นสีที่ละลายน้ำได้ดีจึงเป็นการยากที่จะกำจัดโดยกระบวนการทางกายภาพ สีเอซิดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

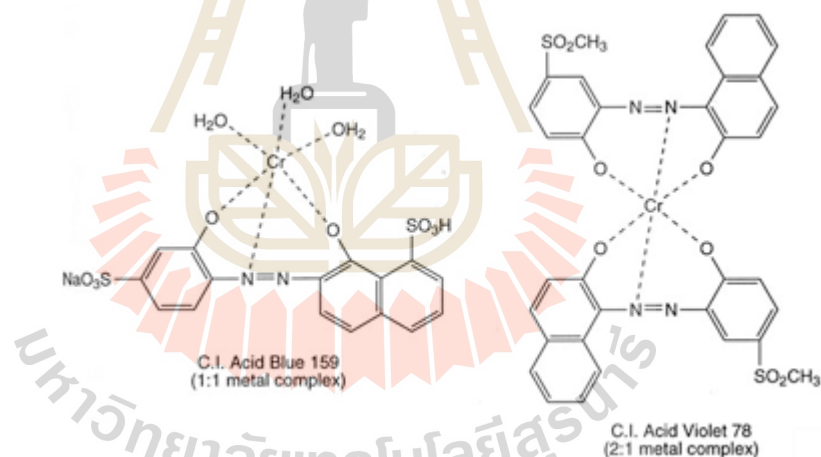
1) สีเอซิดที่ไม่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ (Non-Metallic Acid Dyes) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นว่าหมู่โครโมฟอร์ส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างแบบ Azo group และไม่มีโครงสร้างที่ยึดเกาะกับโลหะหนัก เช่น โครเมียมและโคบอลต์ นอกจากนี้ในโครงสร้างโมเลกุลยังประกอบด้วยออกโซโครมซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้โมเลกุลของสียอมกับเส้นใยยึดติดกัน โครงสร้างส่วนนี้ประกอบไปด้วยวงเบนซีน ที่มีกลุ่มอะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยาติดอยู่ คือ กลุ่มซัลโฟนิล ( $\text{SO}_3\text{Na}$ )

2) สีเอซิดที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ (Metal-Complex Acid Dyes) มีโครงสร้างที่สามารถยึดเกาะกับโลหะหนัก เช่น โครเมียมและโคบอลต์ โดยที่โลหะหนัก 1 อะตอมอาจจะถูกยึด

ด้วยโมเลกุลสีย้อม 1-2 โมเลกุล ดังรูปที่ 2.8 หมู่โครโมฟอร์เป็นโครงสร้างแบบ Azo group และมีหมู่ฟังก์ชันนัลของสีย้อม เช่น กลุ่มไฮดรอกซิล คาร์บอกซิลิก หรืออะมิโน สร้างพันธะกับไอออนของโครเมียม ทำให้สีมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อสีแพร่เข้าไปในเส้นใยจะไม่หลุดออกมาง่ายเหมือนสีที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 2.7 สีแอซิดที่ไม่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ (อรุณี คงดี อัลเตรด, 2557)

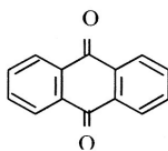


รูปที่ 2.8 สีแอซิดที่ไม่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ (อรุณี คงดี อัลเตรด, 2557)

### 2.8.3 สีย้อมเอซิด (Acid dye)

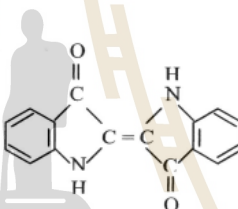
เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งเรียกว่า Vat pigment โครโมฟอร์ มักเป็นหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl) ในขั้นตอนการย้อมต้องรีดิวซ์ให้เปลี่ยนเป็นสารที่ละลายน้ำก่อน และจึงทำการย้อม หลังการย้อมต้องออกซิไดซ์เปลี่ยนกลับมาเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำเหมือนเดิม (จิราพร หุตะกมล, 2554) สีแสดประกอบด้วยหมู่ ketone หรือ carbonyl อย่างน้อย 1 หมู่ carbonyl มี 2 ชนิด (ขจีจรัส และศรันยา, 2549) ได้แก่

1) Anthraquinonoid เป็นชนิดที่มีหมู่ carbonyl 2 หมู่ ดังรูปที่ 2.9 โดยมีหมู่ ketone 2 หมู่ดังแสดงในวงกลมสีแดง



รูปที่ 2.9 สีแควตชนิด Anthraquinonoid

2) Indigonoid หรือ Indigonone จะเป็นสีแควตที่เกิดจากวงแหวน benzene และ heterocyclic เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคาร์บอน ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สีแควตชนิด Indigonoid หรือ Indigonone

รูปแบบของสีแควตที่ผลิตจำหน่าย มี 2 ประเภท คือ แบบ Insoluble vat pigment คือ สีแควตที่อยู่ในรูปของผลสีที่ไม่ละลายน้ำ และ Solubilized vat dye อยู่ในรูปเกลือโซเดียมของ Vat acid ซึ่งละลายน้ำได้ทันที (มีหมู่  $-SO_3Na$ ) เมื่อถูกออกซิไดส์จะเปลี่ยนเป็น Vat pigment ที่ไม่ละลายน้ำ

สำหรับการกำจัดสีแควต มีงานวิจัยต่าง ๆ ดังนี้ จากการศึกษาวิจัยการกำจัดสีย้อมของ Ling (1994) ด้วยวิธี Electroflotation พบว่าสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ สีย้อมดิสเพอร์ส และสีย้อมดิสเพอร์สผสมกับสีย้อมแควต ได้มากกว่าร้อยละ 92 และสามารถกำจัดสีโอดีได้ร้อยละ 85 Sundrarajan et al. (2007) ได้กล่าวไว้ว่าการบำบัดสีย้อมแควตด้วยกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดส์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้อย ประมาณร้อยละ 50 และจากการศึกษาของ Bulc and Ojstrsek (2008) ทำการศึกษาการบำบัดสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Black 5 (2) Vat Yellow 46 และ (3) Disperse Yellow 211 ด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ จากการศึกษาพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถลดสีย้อมทั้ง 3 ชนิด ได้มากกว่าร้อยละ 70

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.9.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Electrocoagulation

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Electrocoagulation พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษออกจากน้ำเสียขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า ชนิดขั้วไฟฟ้า ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของแอนไอออนในน้ำเสีย และ pH เริ่มต้น (Moussa et al., 2017)

จากการศึกษาของ Tir and Moulai-Mostefa (2008) พบว่าเมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มจำนวนของโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะสามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ พร้อมทั้งก่อตัวเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะสามารถตกตะกอนได้เร็วขึ้น และงานวิจัยของ Guohua Chen (2004) ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น  $H_2$  ที่ถูกสร้างขึ้นจากแคโทด จะมีขนาดของฟองลดลง ส่งผลให้ความหนาแน่นของฟองอากาศเพิ่มขึ้น ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กนี้มีพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นสำหรับสัมผัสกับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้มีประสิทธิภาพในการแยกมลทินออกจากน้ำเสียได้สูงขึ้น (Chen et al., 2002) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ozyonar and Karagozoglul (2011) ที่ได้ทำการศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในการกำจัด COD ความขุ่นและฟอสเฟตจากน้ำเสียชุมชน โดยใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 10-150 A/m<sup>2</sup> พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD ความขุ่น และฟอสเฟตเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 33-71, 80-98 และ 81-98 ตามลำดับ

จากกฎของโอห์มเมื่อแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นย่อมทำให้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ก็จะส่งผลต่อการเพิ่มจำนวนของโลหะไฮดรอกไซด์ ดังที่ได้กล่าวมา ในการศึกษาของ Chavalparit and Ongwandee (2009) ได้นำกระบวนการ Electrocoagulation มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 10-30 โวลต์ ซึ่งวัดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าได้ 6..7-0.8 mA/cm<sup>2</sup> พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD น้ำมันและไขมัน และของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า 10-20 โวลต์ ในขณะที่ช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า 20-30 ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของไพฑูรย์ หมั่นจำเริญ และแคทริยา ปัทมพรหม (2557) ที่ได้ศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการบำบัดความขุ่นของน้ำเสีย โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 20 25 และ 30 V พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 88.89 91.25 และ 94.12 ตามลำดับ เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามและปลดปล่อยอลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) ได้ในปริมาณมากขึ้น จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้มากขึ้น



ขั้วไฟฟ้า โดยส่วนมากนิยมใช้แผ่นอะลูมิเนียมหรือแผ่นเหล็ก เนื่องจากมีราคาถูก พร้อมใช้งานและได้รับการพิสูจน์แล้วว่าประสิทธิภาพใช้กันแพร่หลายมากที่สุดในการใช้งานของ Electrocoagulation (An et al., 2017) แต่ในการเลือกชนิดขั้วไฟฟ้าจำเป็นต้องพิจารณาถึงข้อดีข้อด้อยของวัสดุขั้วไฟฟ้างัดกล่าวด้วย อีกทั้งชนิดของสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำก็ให้ผลแตกต่างกันอีกด้วย Aoudj et al. (2006) ได้ใช้ Electrocoagulation ในการกำจัดสีเบสิก โดยได้เลือกใช้อลูมิเนียม เนื่องจาก  $Al(OH)_3$  มีพื้นที่ผิวสูงเป็นประโยชน์สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้อย่างรวดเร็วและการดักจับอนุภาคคอลลอยด์ แต่จากการศึกษาการกำจัดสีรีแอกทีฟของ Phalakorn et al. (2010) พบว่าขั้วไฟฟ้าที่ใช้อลูมิเนียมมีประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ต่ำกว่าขั้วไฟฟ้าที่ใช้เหล็กในเวลาต่ำกว่า 10 นาที และได้ทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานของขั้วไฟฟ้าสองชนิดนี้พบว่าเหล็กใช้พลังงานต่ำซึ่งอยู่ในช่วง 0.5-3.0 kWh ต่อน้ำเสีย 1 m<sup>3</sup> จากการทดลองตรวจลักษณะทางกายภาพของตะกอนในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว พบว่าลักษณะของตะกอนที่สร้างขึ้นโดยขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมแตกต่างขั้วไฟฟ้าที่ใช้เหล็ก โดยตะกอนจากอลูมิเนียมมีลักษณะเป็นปุยและพองตัวมีการตกตะกอนที่ไม่ดี ขณะที่ใช้เหล็กจะได้ตะกอนที่หนาและตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว สำหรับการกำจัด COD งานวิจัยของ Kobya et al. (2006) ได้ทำการเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าเหล็กและอลูมิเนียมในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ พบว่าขั้วไฟฟ้าเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD น้อยกว่าอลูมิเนียม ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัด COD ของเหล็กร้อยละ 85 และอลูมิเนียมร้อยละ 95 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mikko Vepsäläinen (2012) การศึกษาพบว่าไอออนโลหะไฮดรอกไซด์ที่ผลิตขึ้นจากขั้วไฟฟ้าเหล็กจะผลิต  $Fe^{2+}$  ซึ่งมีประสิทธิภาพน้อยในการทำลายเสถียรภาพของสารพิษเมื่อเทียบกับ  $Fe^{3+}$  เนื่องจากมีประจุบวกที่ต่ำกว่า และมีความสามารถในการละลายน้ำ และได้กล่าวว่อลูมิเนียมน่าจะเป็นวัสดุขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของ Electrocoagulation เพราะทำให้เกิด  $Al^{3+}$

Nandi and Patel (2017) ได้ทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์ในการกำจัดสีย้อมสีเขียวด้วย Electrocoagulation ในการศึกษาในครั้งนี้ได้มีทดสอบผลของระยะห่างระหว่าง Electrode ระหว่าง 1 ถึง 3 cm พบว่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 cm มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีร้อยละ 99.59 89.9 และ 76.14 สำหรับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสามค่าที่แตกต่างกันคือ 41.4 27.8 และ 13.9 A/m<sup>2</sup> ตามลำดับ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3 cm มีประสิทธิภาพการกำจัดสีร้อยละ 88.48 75.03 และ 63.73 สำหรับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสามค่าที่แตกต่างกันคือ 41.4, 27.8 และ 13.9 A/m<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเดียวกัน ระยะห่างระหว่างขั้วที่น้อยกว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีมากกว่านั่นเอง นักวิจัยหลายท่านได้แนะนำให้ใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม คือ 1 cm (Mameri et al., 1998 ; Bayramoglu et al., 2007 ; Kongjao et al., 2008)

การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ขี้ไฟฟ้าละลายออกมามากขึ้น จากการศึกษาของ Kobya et al. (2006) ซึ่งศึกษาผลกระทบของเวลาในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตมันฝรั่งทอด พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการบำบัดจาก 5-40 นาที ทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น จาก 4.8 เป็น 44.1 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง และมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายลงในน้ำเสีย จาก 0.2 เป็น 2.1 กิโลกรัมของอะลูมิเนียมต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร แต่ทั้งนี้จะเห็นว่าเมื่อใช้เวลานานขึ้นจะทำให้เป็นการสิ้นเปลืองการใช้พลังงานทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น และประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษอาจจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chavalparit and Ongwande (2009) พบว่าระยะเวลามากกว่า 25 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันที่เหมาะสมคือ 20 นาที ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมและได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีจะอยู่ในช่วง 20-30 นาที (Kobya et al., 2006; Malakootian et al., 2010; Xu and Zhu, 2004)

Xu and Zhu (2004) พบว่าความเข้มข้นของ NaCl มีผลต่อการกำจัด COD เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ NaCl จาก 0.1 g/l ถึง 1.4 g/l และทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าลดลงอย่างมาก Bensadok et al. (2011) ศึกษาผลของความเข้มข้นของ NaCl ระหว่าง 0.5 g/l ถึง 2 g/l ในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตนม ประสิทธิภาพการกำจัด COD, ฟอสเฟตและความขุ่นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 24 40 และ 18 เป็น 80 59 และ 96 ตามลำดับ หลังจากเวลาในการทำปฏิกิริยาได้ 2 นาที ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 50 A/m<sup>2</sup> นอกจากนี้ An et al. (2017) แนะนำว่าควรมี Cl<sup>-</sup> ร้อยละ 20 ในกระบวนการบำบัดน้ำของ Electrocoagulation

งานวิจัยของ Sengil and Özacar (2009) ได้ใช้เหล็กเป็นขี้ไฟฟ้าพบว่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียสีย้อมชนิด Reactive Black 5 อยู่ในช่วง 5-9 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Daneshvar et al. (2006) ซึ่งพบว่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการก่อตัวของเหล็กไฮดรอกไซด์จะอยู่ในช่วง pH 4.5-8.5 ในกรณีที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นขี้ไฟฟ้า Aoudj et al. (2010) ได้ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียจากสี Direct red 81 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่สูงขึ้นอยู่ในช่วง pH 5-9 ซึ่งใกล้เคียงกับ pH ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการก่อตัวของแข็ง Al(OH)<sub>3(s)</sub> งานวิจัยของ Gürses et al. (2002) กล่าวว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคอลลอยด์จะมีประสิทธิภาพดีในช่วง pH 4-7 และจะลดลงเมื่อ pH มากกว่า 9 ซึ่งที่ pH 4-9.5 จะพบ Al(OH)<sub>3(s)</sub> มีคุณสมบัติในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ และที่ pH มากกว่า 10 จะพบ Al(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ง่ายจึงเป็นสารรวมตะกอนที่ไม่ดี จึงไม่สามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้นั่นเอง (Terrazas et al., 2010)

## 2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Electrocoagulation

งานวิจัยของ Ling (1994) ได้ศึกษาการกำจัดสีด้วยวิธี Electroflotation หรือ Electrocoagulation พบว่าสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ สีย้อมดิสเพอร์ส และสีย้อมดิสเพอร์สผสมกับ

ลีสียมเวด ได้มากกว่าร้อยละ 92 และสามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 85 และ Chafi et al. (2011) ได้ใช้กระบวนการ Electrocoagulation ในการกำจัดลีสียมเอซิดซึ่งเป็นลีสียมโมเลกุลขนาดเล็ก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) สามารถกำจัดลีสียมได้ถึงร้อยละ 98 งานวิจัยของ Phalakornkule et al. (2010) พบว่าขั้วไฟฟ้าเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดลีสียมรีแอกทีฟและลีสียมดิสเพิร์สได้ออกซิเจนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของลีสียมเท่ากับ 100 mg/l โดยมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 95 จะเห็นได้ว่ากระบวนการ Electrocoagulation นั้นสามารถกำจัดได้ทั้งลีสียมที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำ และมีประสิทธิภาพสูง

Merzouk et al. (2009) ศึกษาผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดลีสียมดิสเพิร์ส ที่อัตราการไหล 25.2 30.6 37.2 48 60 และ 78 L/h ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของลีสียม 100 mg/l, pH 6.1 และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 31.25 mA/cm<sup>2</sup> ประสิทธิภาพหลังระยะเวลา 12 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดลีสียมสูงกว่าร้อยละ 80 ในทุกสภาวะยกเว้นที่ 78 L/h มีประสิทธิภาพในการกำจัดลีสียมประมาณร้อยละ 70 และที่อัตราการไหลที่ 37.2 L/h มีประสิทธิภาพในการกำจัดลีสียมมากที่สุด ซึ่งมากกว่าร้อยละ 90 จากงานวิจัยของ พลฤกษ์ จิตรโศ และ วรพันธ์ นาคบรรพต (2557) ได้ศึกษาความสามารถในการกำจัดลีสียมโดยพิจารณาจากค่าอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลง 6 8 12 16 และ 25 ml/min พบว่าที่อัตราการไหล 6 ml/min มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด เนื่องจากมีระยะเวลาพักเก็บในระบบนานพอที่ออกซิเจนไฮดรอกไซด์ดูดซับลีสียมได้ ซึ่งไพฑูรย์ หมั่นจำเริญ และ แคทลียา ปัทมพรหม (2557) ได้กล่าวว่าอัตราการไหลยิ่งต่ำจะสามารถกำจัดมลพิษได้มาก เนื่องจากอัตราการไหลช้าทำให้น้ำเสียอยู่ในกระบวนการนานกว่า อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการไหลมีข้อดีคือช่วยในการผสมสาร โลหะไฮดรอกไซด์ในการสัมผัสกับอนุภาคคอลลอยด์ และเป็นการลดระยะเวลาในการกำจัดลีสียม (Merzouk et al., 2009)

### 2.9.3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำเป็นวัตถุดิบในกระบวนการฟอกย้อมในปริมาณมาก น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมจะมีความเข้มข้นของสีสูง มีค่าความเป็นกรด-ด่าง และมีปริมาณสารอินทรีย์สูง เมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีหลายระบบแต่มีข้อจำกัดในเรื่องของประสิทธิภาพการกำจัด ต้นทุน ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมี กระบวนการ Electrocoagulation เป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องใช้สารเคมี มีความทนทานต่อการเป็นพิษของลีสียม ใช้เวลาในการบำบัดไม่นาน สามารถกำจัดได้ทั้งลีสียมที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดลีสียมสูง การทำงานของกระบวนการ Electrocoagulation ในการบำบัดน้ำเสียจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะสมบัติของน้ำเสีย จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำ

ความเข้าใจถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการ Electrocoagulation จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่าขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการนำมาใช้กำจัดสีข้อมันเป็นเหล็กและอลูมิเนียม เนื่องจากราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย ส่วนมากเหล็กจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมันได้ดีกว่า ถึงแม้ระบบ Electrocoagulation จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง แต่ในการศึกษาส่วนใหญ่จะทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้สีสังเคราะห์ จึงควรศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ Electrocoagulation ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจริงด้วย (Khandegar and Saroha, 2013) และต้องมีการพัฒนาแนวทางในเรื่องของการสร้างแบบจำลองชุดการทดลองของระบบ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้และคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดได้ในงานจริง (Holt et al., 2005) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงจะมุ่งเน้นศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยจะศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการกำจัด โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการ Electrocoagulation ได้แก่ ความเข้มข้นของสีข้อมัน ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น pH เริ่มต้น ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ระยะเวลาในการตกตะกอน และชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) โดยนำระบบ Electrocoagulation แบบ Batch และแบบ Continuous มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม และศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัด เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

สถานที่ทำการศึกษาวิจัยที่อาคารเครื่องมือ 4 5 และ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

#### 3.2 ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 12 เดือน เริ่มตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2561 ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2562

#### 3.3 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ในการดำเนินการศึกษาวิจัยแบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### ขั้นตอนที่ 1 ชุดการทดลอง EC และ CC แบบ Batch

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาระบบ EC (Electrocoagulation) และ CC (Conventional Coagulation) แบบ Batch ในห้องปฏิบัติการ โดยออกแบบชุดการทดลองทั้ง 2 ระบบ และทำการศึกษาวิจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat เพื่อหาค่าสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมของแต่ละระบบ

**ขั้นตอนที่ 2** การศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของระบบ EC และ CC

จากขั้นตอนที่ 1 จะได้สถานะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat ของระบบ EC และ CC แบบ Batch และนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด

### ขั้นตอนที่ 3 ชุดการทดลองระบบ EC แบบ Continuous

จากขั้นตอนที่ 1 และ 2 นำชุดการทดลองระบบ EC ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบ EC แบบ Continuous โดยการนำค่าสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากผลการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการเดินระบบเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมและเปรียบเทียบผลการศึกษาที่ได้กับระบบแบบ Batch ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1

## 3.4 ขั้นตอนการศึกษา ระบบ EC และ CC แบบ Batch

ในขั้นตอนการศึกษานี้จะทำการศึกษาระบบ EC และ CC แบบ Batch ในการบำบัดสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.1 มีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษา ดังต่อไปนี้

### 3.4.1 สีย้อม

ในการศึกษานี้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ EC และ CC ในการบำบัดสีย้อมละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้เลือกสีย้อม Acid เป็นตัวแทนของสีย้อมละลายน้ำ และสีย้อม Vat เป็นตัวแทนของสีย้อมไม่ละลายน้ำ

#### 3.4.1.1 ชนิดของสีย้อมที่ใช้ในการศึกษา

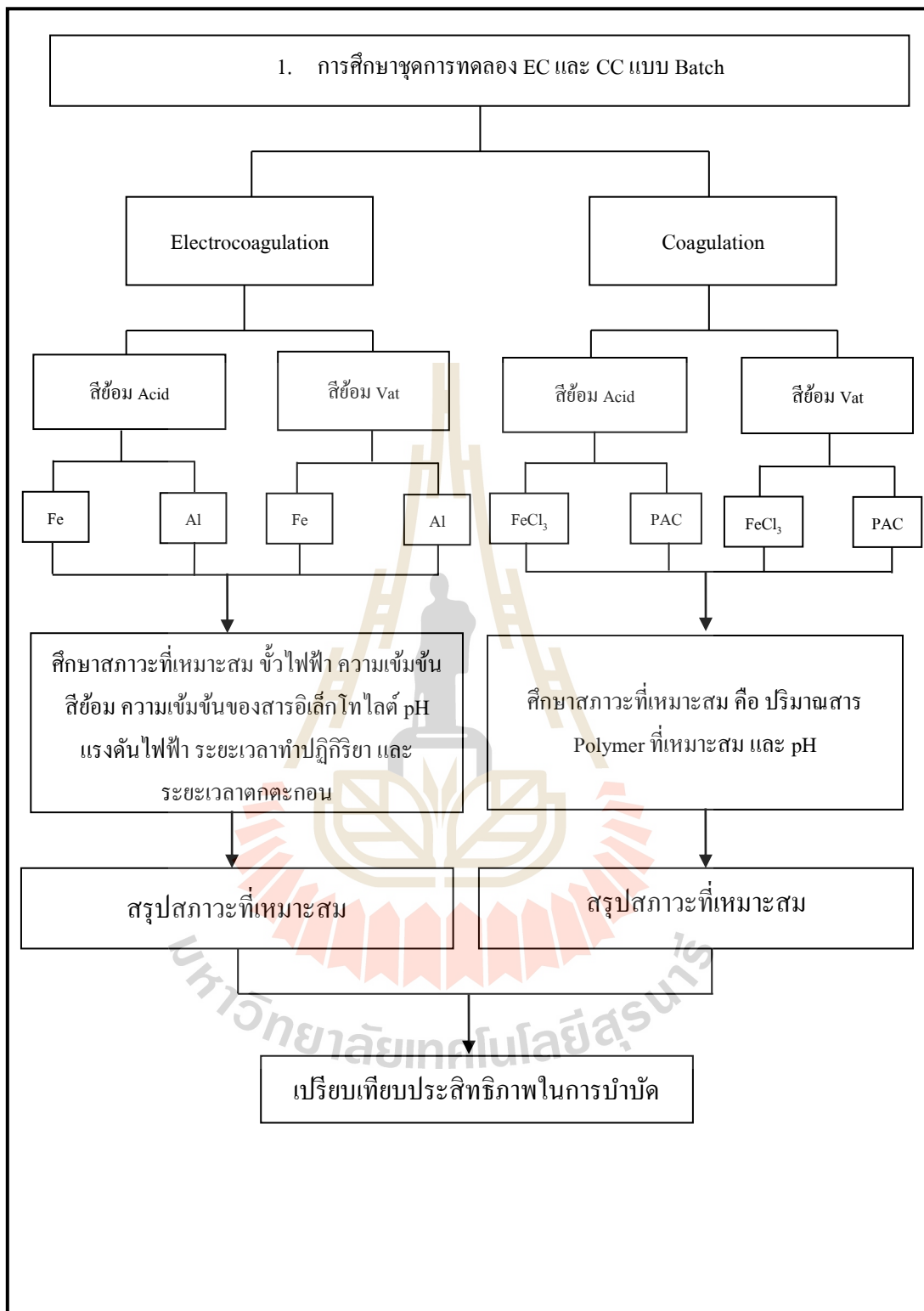
##### 1) สีย้อม Acid

สีย้อมเอซิด (Acid dye) มีคุณสมบัติเป็นสีย้อมละลายน้ำ ซึ่งได้รับความนิยมในการย้อมไหมเนื่องจากเป็นสีที่เหมาะสมกับการย้อมเส้นใยโปรตีน (ฉัฏฐวรรช ธนประดิษฐ์กุล, 2555) ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีประจุบวก และตัวสีมีประจุลบเมื่อละลายน้ำ โมเลกุลของสีเป็นเกลือของสารประกอบอินทรีย์ที่ให้สี โดยโครงสร้างส่วนนี้มักจะเป็นวงเบนซีน (Benzene ring) ที่มีหมู่อะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive group) ติดอยู่ คือ หมู่  $\text{SO}_3^-$  ดังรูปที่ 3.2 เนื่องจากเป็นสีที่ละลายน้ำได้ดีจึงเป็นการยากที่จะกำจัดโดยกระบวนการทางกายภาพ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สีย้อม Acid ซึ่งเป็นสีแดง ครั่ง ตรา สิงโตตีกลองคู่ ผลิตโดย บริษัท พัวเคียมสิน จำกัด

##### 2) สีย้อม Vat

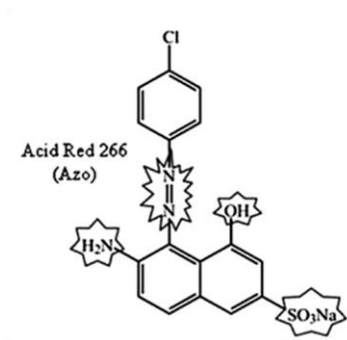
สีย้อมแวต (Vat dye) มีคุณสมบัติเป็นสีย้อมไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนการย้อมต้องรีดิวซ์ให้เปลี่ยนเป็นสารที่ละลายน้ำได้ก่อน แล้วจึงทำการย้อมและหลังจากการย้อมต้องออกซิไดซ์เปลี่ยนกลับมาเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำเช่นเดิม นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยสี Vat ที่นำมาใช้คือ Vat Yellow 33 ให้สีเหลือง ผลิตโดยบริษัท ไคสตาร์ไทย จำกัด ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยหมู่ ketone หรือ carbonyl อย่างน้อย 1 หมู่



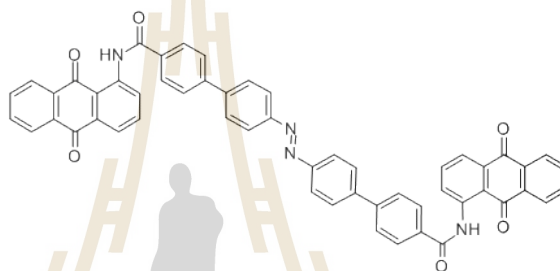


รูปที่ 3.1 รายละเอียดขั้นตอนการศึกษา





รูปที่ 3.2 สีย้อม Acid (Verma et al., 2012)



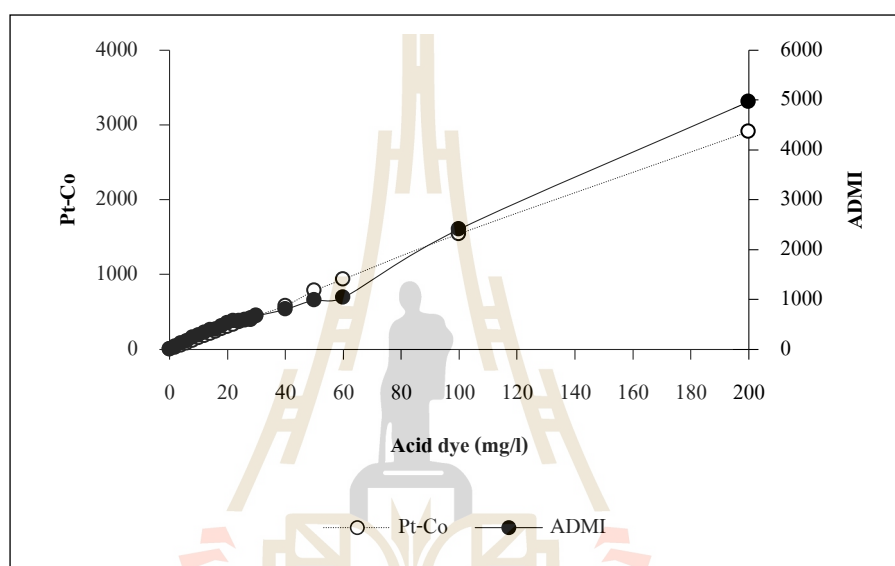
รูปที่ 3.3 สีย้อม Vat (PubChem Database., 2019)

#### 3.4.1.2 ความเข้มข้นของสีย้อม

ในการศึกษาครั้งนี้การเลือกใช้ความเข้มข้นของสีย้อมจะอ้างอิงความเข้มข้นของสีย้อมที่ให้ค่าสีในหน่วย Pt-Co และหน่วย ADMI อยู่ในช่วงค่าสีของน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอจากการทบทวนเอกสารดังสรุปไว้ในตารางที่ 2.4 (บทที่ 2) จะเห็นว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอจะมีค่าความเข้มข้นของสีย้อมจริงอยู่ในช่วง 75-4,750 ADMI และ 815-33,550 Pt-Co ดังนั้นในการเตรียมค่าความเข้มข้นของสีย้อม Acid และสีย้อม Vat ได้นำสารละลายสีย้อมทั้ง 2 สี มาตรวจวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นสีในหน่วย Pt-Co และหน่วย ADMI ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ จากผลการศึกษาจึงเลือกช่วงความเข้มข้น 20-140 mg/l ซึ่งมีค่าสีในหน่วย Pt-Co และหน่วย ADMI อยู่ในช่วงเดียวกับน้ำเสียจริงของอุตสาหกรรมสิ่งทอเพื่อนำไปใช้ในการศึกษา หลังจากนั้นจึงนำความเข้มข้นดังกล่าวไปหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์ นอกจากนี้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วย ADMI และค่าสีในหน่วย Pt-Co ของสีย้อม Acid และสีย้อม Vat มีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้  $Y = 1.448X + 55.6$  และ  $Y = 0.9172X - 50.565$  โดยค่า X เป็นค่าสีในหน่วย Pt-Co และ ค่า Y เป็นค่าสีในหน่วย ADMI

### 3.4.1.3 การหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสม

จากค่าความเข้มข้นของสีย้อมที่ได้จากข้อ 3.4.1 นำไปหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการตรวจวัดความเข้มข้นของสีย้อมโดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer รุ่น T80+ ผลิตโดย PG Instruments, Ltd. ประเทศญี่ปุ่น ความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์สีย้อม Acid อยู่ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 518 nm และสีย้อม Vat มีค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมเท่ากับ 245 nm



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อม Acid ในหน่วย mg/l และหน่วย Pt-Co และหน่วย ADMI

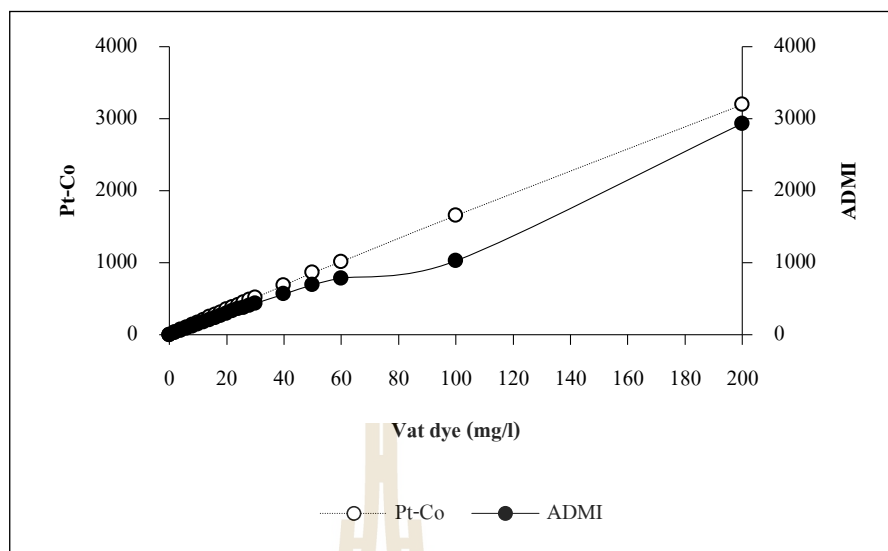
### 3.4.2 ชุดการทดลอง EC แบบ Batch

รายละเอียดอุปกรณ์และขั้นตอนการศึกษาของชุดการทดลองระบบ EC แบบ Batch มีดังต่อไปนี้

#### 3.4.2.1 รายละเอียดอุปกรณ์ชุดการทดลอง EC แบบ Batch

##### 1) ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าในการศึกษาครั้งนี้ใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ได้แก่ ขั้วเหล็ก (Iron : Fe) วัสดุเหล็กที่นำมาใช้งานเป็นชนิด Fe 306 และ ขั้วอลูมิเนียม (Aluminum : Al) วัสดุอลูมิเนียมที่นำมาใช้งานเป็นชนิด Al 406 เนื่องจากหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดทั่วไป ราคาถูก และเป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบสลายตัวและเป็นขั้วที่นิยมใช้สำหรับระบบ EC และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับสาร Coagulant PACl และ  $FeCl_3$  ซึ่งเป็นสารที่นิยมใช้ในระบบ CC ได้



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อม Vat ในหน่วย mg/l, และหน่วย Pt-Co และ หน่วย ADMI

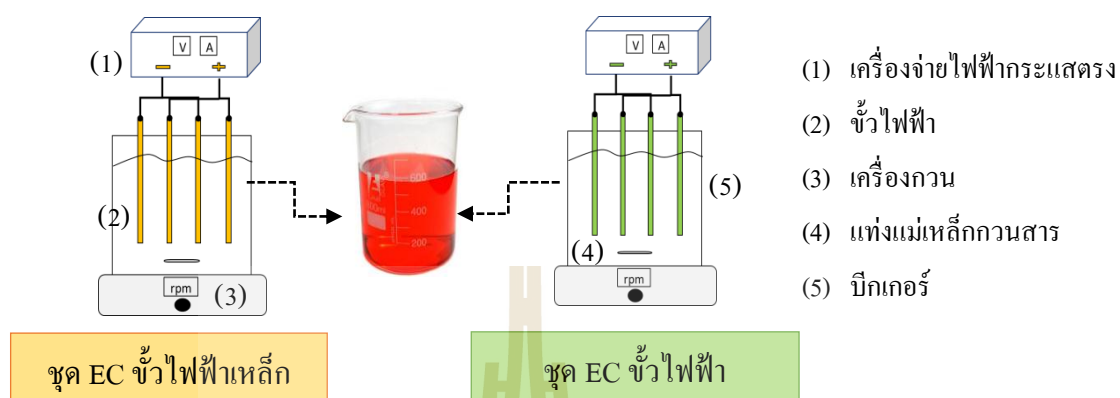
## 2) การเตรียมขั้วไฟฟ้า

การเตรียมขั้วไฟฟ้าก่อนทำการทดลองจะต้องล้างขั้วไฟฟ้าก่อน โดยนำขั้วไฟฟ้าเหล็กไปแช่ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) มีความเข้มข้นร้อยละ 35 ปริมาตร 100 cm<sup>3</sup> และสารละลาย hexamethylenetetramine มีความเข้มข้นร้อยละ 2.8 มีปริมาตร 200 cm<sup>3</sup> เป็นเวลา 5 นาที (Nandi and Patel, 2017) สำหรับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมนำไปล้างโดยใช้ Acetone ล้างทำความสะอาด จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและนำไปอบที่ 103°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น 1 ชั่วโมงและชั่งน้ำหนักจนคงที่ (Koby et al., 2003)

## 3) รายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Batch

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของ EC แสดงดังรูปที่ 3.6 จะประกอบไปด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (1) ที่สามารถปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ในช่วง 0-30 Volt และรองรับค่ากระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0-2.0 A ต่อสายไฟเข้ากับขั้วไฟฟ้าแบบ Monopolar (2) ซึ่งแต่ละคู่ของขั้วไฟฟ้าจะได้รับแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน นอกจากนี้การต่อแบบ Monopolar มีข้อดีเนื่องจากการแรงดันไฟฟ้าต่ำ ได้กระแสไฟฟ้าที่สูง มีค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระหว่างการใช้งานต่ำ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษสูงด้วยการใช้พลังงานที่ต่ำกว่าการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ Bipolar (Hakizimana et al., 2017) รูปที่ 3.7 แสดงชุดอุปกรณ์จริงที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้และรายละเอียดชุดการทดลอง แสดงในตารางที่ 3.1 โดยแต่ละชุดการทดลองจะใช้ขั้วไฟฟ้าชุดละ 4 แผ่น ระยะห่าง

ระหว่างขั้ว 1.1 cm พื้นที่ผิวทั้งหมด  $192 \text{ cm}^2$  มีปริมาตรน้ำ 600 ml และ ใช้ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.6 ร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Batch



รูปที่ 3.7 ชุดการทดลองระบบ EC แบบ Batch ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Batch

ปัจจัย	หน่วย	ชนิดขั้วไฟฟ้า	
		เหล็ก	อะลูมิเนียม
ขนาดขั้วไฟฟ้า	mm	3 x 46 x 55 (ชุดละ 4 แผ่น)	
พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยา	cm <sup>2</sup>	192	
ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	cm	1.1	
ความเร็วรอบในการกวน	rpm	200	
ปริมาตรน้ำ	ml	600	

### 3.4.2.2 ขั้นตอนการศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อมของระบบ EC แบบ Batch

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบ EC ในการบำบัดสีย้อม โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็นระบบ EC ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก และ ขั้วอะลูมิเนียม มีรายละเอียดดังนี้

#### 1) การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid และสีย้อม Vat ต่อประสิทธิภาพการบำบัดความเข้มข้นของสีย้อมที่เลือกใช้ คือ 20 40 60 80 100 120 และ 140 mg/l ซึ่งเป็นไปตามที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.4.1 สำหรับสถานะที่ใช้ในการศึกษาของแต่ละชุดการทดลอง ดังสรุปในตารางที่ 3.2 และทำการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ในการศึกษาดังต่อไปนี้ ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.06 g/l (Nandi and Patel, 2017), pH เท่ากับ 6 เนื่องจากเป็นค่าเฉลี่ย pH จากน้ำสีย้อมที่วัดได้, แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 20 V (ค่าสูงสุดของอุปกรณ์จ่ายไฟ), ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20-30 นาที (An et al., 2017), ระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที ทำการวัดความเข้มข้นของสีก่อนและหลังการทดลองโดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดโดยใช้สมการที่ (3.1) และคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ยภายในจำนวนซ้ำของการทดลอง โดยจำนวนชุดการทดลองระบบ EC แบบ Batch ขั้ว Fe มีทั้งหมด 12 ชุดการทดลอง และขั้ว Al มีทั้งหมด 12 ชุดการทดลอง

$$\text{ประสิทธิภาพในการกำจัดสี (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย  $C_0$  = ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น (mg/l)

$C_e$  = ความเข้มข้นสีย้อมหลังการบำบัด (mg/l)

ตารางที่ 3.2 สภาวะชุดการทดลองผลของความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat

ปัจจัยที่ทำการศึกษา	หน่วย	ชนิดขั้วไฟฟ้า			
		ขูดขั้วเหล็ก		ขูดขั้วอลูมิเนียม	
		ชนิดสีย้อม	Vat	ชนิดสีย้อม	Vat
ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น	mg/l		20-140		
สารละลายอิเล็กโทรไลต์	g/l	0.06	0.06	0.06	0.06
ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น	volt	20	20	20	20
pH เริ่มต้น	-	6	6	6	6
ระยะเวลาทำปฏิกิริยา	min	20	20	20	20
ระยะเวลาตกตะกอน	min	30	30	30	30

2) การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

การศึกษาผลความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในการศึกษาครั้งนี้ใช้ NaCl เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เลือกใช้ คือ 0.06 0.12 0.24 0.48 และ 0.96 g/l โดยสภาวะที่ใช้ในการศึกษาดังสรุปในตารางที่ 3.3 และทำการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ในการศึกษาดังต่อไปนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat ที่ได้ผลจากการศึกษาในหัวข้อที่ 1), pH เท่ากับ 6, แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 20 V, ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที วัดความเข้มข้นของสีก่อนและหลังการทดลองโดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดโดยใช้สมการที่ (3.1)

3) การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น

การศึกษาผลความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม โดยความต่างศักย์ที่เลือกใช้คือ 5 10 15 และ 20 Volt สำหรับสีย้อม Acid และสีย้อม Vat โดยสภาวะที่ใช้ในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.4 และทำการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ในการศึกษาดังต่อไปนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat และความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ที่ได้จากการทดลองหัวข้อ 1) และ 2), ค่า pH เริ่มต้น 6 และระยะเวลาในการทำ 20 นาที, ระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที, วัดความเข้มข้นของสีก่อนและหลังการทดลองโดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดโดยใช้สมการที่ (3.1)

ตารางที่ 3.3 สภาวะชุดการทดลองผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ปัจจัยที่ทำการศึกษา	หน่วย	ชนิดขั้วไฟฟ้า			
		ขั้วเหล็ก		ขั้ววอลุ่มิเนียม	
		ชนิดสีย้อม	Vat	Acid	Vat
ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น	mg/l	ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 1)			
สารละลายอิเล็กโทรไลต์	g/l	0.06-0.96			
ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น	volt	20	20	20	20
pH เริ่มต้น	-	6	6	6	6
ระยะเวลาทำปฏิกิริยา	min	20	20	20	20
ระยะเวลาตกตะกอน	min	30	30	30	30

## 4) การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น

การศึกษาผลความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม โดยความต่างศักย์ที่เลือกใช้คือ 5, 10, 15 และ 20 Volt สำหรับสีย้อม Acid และสีย้อม Vat โดยสภาวะที่ใช้ในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.4 และทำการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ในการศึกษาดังต่อไปนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat และความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ที่ได้จากการทดลองหัวข้อ 1) และ 2), ค่า pH เริ่มต้น 6 และระยะเวลาในการทำ 20 นาที, ระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที, วัดความเข้มข้นของสีก่อนและหลังการทดลองโดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดโดยใช้สมการที่ (3.1)

## 5) การศึกษาผลของ pH เริ่มต้น

การศึกษาผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมโดยค่า pH ที่เลือกใช้ คือ 3 5 6 8 และ 10 เนื่องจากค่า pH ของลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอมีช่วงกว้างตั้งแต่ 2 ถึง 12 โดยสภาวะที่ใช้ในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.5 ปรับ pH โดยใช้ HCl 0.1 M และ NaOH 0.1 M ในการปรับ (Sengil and Ozacar, 2009) และทำการควบคุมปัจจัยต่างๆในการศึกษาดังต่อไปนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ และความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น ที่ได้จากการทดลองหัวข้อ 1) 2) และ 3) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที วัดความเข้มข้นของสีก่อนและหลังการทดลองโดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดโดยใช้สมการที่ (3.1)



## 6) ศึกษาผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยา

การศึกษาผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม โดยระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่เลือกใช้คือ 10 15 20 25 และ 30 โดยสภาวะที่ใช้ในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.6 และทำการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ในการศึกษาดังต่อไปนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ความต่างศักย์ และ ค่า pH เริ่มต้น ที่ได้จากผลการทดลองหัวข้อ 1) 2) 3) และ 4) วัดความเข้มข้นของสีก่อนและหลังการทดลองโดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดโดยใช้สมการที่ (3.1)

ตารางที่ 3.4 สภาวะชุดการทดลองผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น

ปัจจัยที่ทำการศึกษา	หน่วย	ชนิดขั้วไฟฟ้า			
		ขูดขั้วเหล็ก		ขูดขั้วอลูมิเนียม	
		ชนิดสีย้อม		ชนิดสีย้อม	
ปัจจัย	หน่วย	Acid	Vat	Acid	Vat
ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น	mg/l	ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 1)			
สารละลายอิเล็กโทรไลต์	g/l	ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 2)			
ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น	volt	5-20			
pH เริ่มต้น	-	6	6	6	6
ระยะเวลาทำปฏิกิริยา	min	20	20	20	20
ระยะเวลาตกตะกอน	min	30	30	30	30

## 7) ศึกษาผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยา

การศึกษาผลของระยะเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม โดยระยะเวลาตกตะกอนที่เลือกใช้คือ 15 30 45 60 และ 120 โดยสภาวะที่ใช้ในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.7 และทำการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ในการศึกษาดังต่อไปนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ความต่างศักย์ ค่า pH เริ่มต้น และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ได้จากผลการทดลองหัวข้อ 1) 2) 3) 4) และ 5) วัดความเข้มข้นของสีก่อนและหลังการทดลองโดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดโดยใช้สมการที่ (3.1)

ตารางที่ 3.5 สภาวะชุดการทดลองผลของ pH เริ่มต้น

ปัจจัยที่ทำการศึกษา	หน่วย	ชนิดข้าวไฟฟ้า			
		ชุดข้าวเหล็ก		ชุดข้าวลูมิเนียม	
		ชนิดลีสיום		ชนิดลีสיום	
ปัจจัย	หน่วย	Acid	Vat	Acid	Vat
ความเข้มข้นลีสיוםเริ่มต้น	mg/l			ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 1)	
สารละลายอิเล็กโทรไลต์	g/l			ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 2)	
ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น	volt			ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 3)	
pH เริ่มต้น	-			3-10	
ระยะเวลาทำปฏิกิริยา	min	20	20	20	20
ระยะเวลาดักตะกอน	min	30	30	30	30

ตารางที่ 3.6 สภาวะชุดการทดลองผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยา

ปัจจัยที่ทำการศึกษา	หน่วย	ชนิดข้าวไฟฟ้า			
		ชุดข้าวเหล็ก		ชุดข้าวลูมิเนียม	
		ชนิดลีสיום		ชนิดลีสיום	
ปัจจัย	หน่วย	Acid	Vat	Acid	Vat
ความเข้มข้นลีสיוםเริ่มต้น	mg/l			ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 1)	
สารละลายอิเล็กโทรไลต์	g/l			ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 2)	
ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น	volt			ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 3)	
pH เริ่มต้น	-			ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 4)	
ระยะเวลาทำปฏิกิริยา	min			10-35	
ระยะเวลาดักตะกอน	min	30	30	30	30

### 3.4.2.3 สรุปสภาวะที่เหมาะสมของชุดการทดลอง EC แบบ Batch

จากผลการศึกษปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดลีสיום Acid และลีสיום Vat ของชุดการทดลอง EC ที่ใช้ข้าว Fe และ Al นำมาสรุปค่าปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมสำหรับระบบ EC เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบบ CC และเลือกระบบที่มีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบ EC แบบ Continuous ต่อไป

ตารางที่ 3.7 สภาวะชุดการทดลองผลของระยะเวลาตกตะกอน

ปัจจัยที่ทำการศึกษา	หน่วย	ชนิดขั้วไฟฟ้า			
		ชุดขั้วเหล็ก		ชุดขั้วอลูมิเนียม	
		ชนิดสี่เหลี่ยม	ชนิดสี่เหลี่ยม	ชนิดสี่เหลี่ยม	ชนิดสี่เหลี่ยม
ปัจจัย	หน่วย	Acid	Vat	Acid	Vat
ความเข้มข้นสี่เหลี่ยมเริ่มต้น	mg/l		ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 1)		
สารละลายอิเล็กโทรไลต์	g/l		ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 2)		
ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น	volt		ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 3)		
pH เริ่มต้น	-		ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 4)		
ระยะเวลาทำปฏิกิริยา	min		ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 5)		
ระยะเวลาตกตะกอน	min		15-120		

### 3.4.3 ชุดการทดลอง CC แบบ Batch

รายละเอียดอุปกรณ์และขั้นตอนการศึกษาของชุดการทดลองระบบ CC มีดังต่อไปนี้

#### 3.4.3.1 รายละเอียดอุปกรณ์และชุดการทดลอง CC

##### 1) ชนิดสาร Coagulant

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าชนิดของสาร Coagulant มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี และ COD ในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ พบว่า PACl และ  $FeCl_3$  มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี และหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึง PAC และ  $FeCl_3$  เป็นสาร Coagulant เพื่อทำการศึกษาลำหรับระบบ CC

##### 2) ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน

สาร Coagulant ที่ใช้ได้แก่ เฟอริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) และ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) โดยใช้ความเข้มข้นสาร Coagulant ที่ใช้เตรียมได้จากความเข้มข้นของ Fe และ Al ที่ละลายในสภาวะที่เหมาะสมของชุดการทดลอง EC แบบ Batch (ผลการศึกษาคำข้อ 3.4.2) โดยคำนวณจากปริมาณของโลหะไอออนบวกที่ละลายในระหว่างปฏิกิริยาที่ขั้วบวกโดยสามารถคำนวณตามกฎของฟาราเดย์ได้ดังสมการที่ 3.2

$$M = \frac{ItM_w}{zF} \quad (3.2)$$

โดยที่ M คือ ปริมาณโลหะที่ละลาย (g)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

- t คือ เวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา (s)  
 $M_w$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของขี้เถ้าไอออน (g/mol)  
 F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 C/mol)  
 z คือ จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ (2 สำหรับ  $Fe^{2+}$  และ 3 สำหรับ  $Fe^{3+}$  และ  $Al^{3+}$ )

เมื่อได้ปริมาณโลหะที่ละลายในสภาวะที่เหมาะสมของทั้ง 2 ขั้วไฟฟ้าแล้ว ในการเตรียมสาร Coagulant ในรูป PAC และ  $FeCl_3$  ความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองคำนวณเทียบได้จากปริมาณไอออนโลหะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เท่ากันแล้วคำนวณเทียบกลับเป็นปริมาณความเข้มข้นของ PACI และ  $FeCl_3$  ที่เหมาะสม ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 3.3 (แทนด้วย  $X_1$ ) และ ค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 3.5 (แทนด้วย  $X_2$ ) ตามลำดับ เป็นเกณฑ์ มีรายละเอียดวิธีคำนวณดังนี้

#### 2.1) การเตรียม PACI

ข้อมูลจาก PACI ที่นำมาจากหน่วยงานการประปาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยการวิเคราะห์ตามกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ชนิดเหลว มาตรฐานเลขที่ มอก. 2150-2546 เป็นดังนี้

มีปริมาณ $Al_2O_3$	=	10.5% W/W
ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ 20°C	=	1.202
ความหนาแน่นสัมพัทธ์	=	ความหนาแน่นของสาร/ความหนาแน่นของน้ำ
และ ความหนาแน่นของน้ำที่ 20°C	=	998.2 Kg/m <sup>3</sup>
ดังนั้น 1.202	=	(ความหนาแน่นของสาร)/(998.2 Kg/m <sup>3</sup> )
ดังนั้น ความหนาแน่นของ PACI	=	1,199.84 g/l
จาก ปริมาณ $Al_2O_3$	=	10.5% W/W
คือ ปริมาณ $Al_2O_3$	=	10.5 g/PACI 100 g
ดังนั้น สารละลาย PACI 100 g	=	100 g x 1000 ml/ 1,199.84g
	=	83.34 ml
ดังนั้น $Al_2O_3$	=	10.5 g/83.34 ml
จาก PACI 10%		
PAC 83.34 ml	มี $Al_2O_3$	10.5 g
PAC 1 ml	มี $Al_2O_3$	$\frac{10.5 \text{ g} \times 1 \text{ ml}}{83.34 \text{ ml}} = 0.126 \text{ g}$
กำหนดให้		
มวล โมเลกุลของ Al	=	26.98 g

	มวลโมเลกุลของ O	=	16 g	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	มีมวลโมเลกุล	=	26.98(2)+16(3)	= 101.96 g
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 101.96 g	มี Al		53.96 g	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.126 g	มี Al		$\frac{53.96 \text{ g} \times 0.126 \text{ g}}{101.96 \text{ g}}$	= 0.067 g
ดังนั้น 1 ml ของ PACl (10%)	มี Al		0.067 g as Al	
ปริมาณ PACl ที่ต้องการ (X <sub>1</sub> ) (ml) =			$\frac{\text{ปริมาณ Al ที่ต้องการ (g)}}{0.067 \text{ g}}$	(3.3)

### 2.2) การเตรียม FeCl<sub>3</sub>

เมื่อเติม FeCl<sub>3</sub> ให้กับน้ำจะมีผลึก Fe(OH)<sub>3</sub> เกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



ปริมาณ FeCl<sub>3</sub> ที่ต้องการ (X<sub>2</sub>)

$$\frac{\text{FeCl}_3 (x_2) \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}}\right)}{\text{Fe (mg/l)}} = \frac{\text{น้ำหนักโมเลกุลของ FeCl}_3}{\text{น้ำหนักโมเลกุลของ Fe}} \quad (3.5)$$

กำหนดให้

$$\text{มวลโมเลกุลของ Cl} = 35.4532 \text{ g}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของ Fe} = 55.8452 \text{ g}$$

### 3) รายละเอียดชุดการทดลองระบบ CC แบบ Batch

เตรียมสารละลาย PACl และ FeCl<sub>3</sub> ความเข้มข้นที่ได้จากผลการคำนวณในหัวข้อที่ 2.1) และ 2.2) ตามลำดับ และใช้ Polymer เป็นสารช่วยสร้างตะกอน ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้น 3.5 mg/l (ซาริกา แก่นจันทร์, 2561) และกำหนดค่า pH เริ่มต้นของสารละลายสี่ข้อมเท่ากับ 6 ใช้ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ความเข้มข้น 0.1 N และ NaOH ความเข้มข้น 0.1 N ในการปรับ pH โดยทำการศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการก่อตะกอนและรวมตะกอนได้แก่ ปริมาณสารช่วยสร้างตะกอน และ pH เป็นต้น ในการศึกษาหาค่าสถานะที่เหมาะสมจะใช้เครื่อง Jar Test รุ่น VELP SCIENTIFICA ผลิตในประเทศอิตาลี เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ และมีการกำหนดสถานะในการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.8 ซึ่งใช้ปริมาตรน้ำในการทดลอง 600 ml โดยทำการกวนเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที กวนช้า 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นหยุดกวนแล้วปล่อยให้ตกตะกอนอีก 30 นาที



ตารางที่ 3.9 สภาวะชุดการทดลองผลของความเข้มข้น Polymer ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid และ Vat ของระบบ CC

ปัจจัยที่ทำการศึกษา		ชนิดสาร Coagulant			
		FeCl <sub>3</sub>		PACI	
		ชนิดสีข้อม		ชนิดสีข้อม	
ปัจจัย	หน่วย	Acid	Vat	Acid	Vat
ความเข้มข้นสาร Coagulant	mg/l	ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อ 3.4.3.1			
ความเข้มข้นของ Polymer	mg/l	อ้างอิงงานวิจัยของ ชาริกา แก่นจันทร์ (2561)			
pH เริ่มต้น	-	6			

ตารางที่ 3.10 สภาวะชุดการทดลองผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid และ Vat ของระบบ CC

ปัจจัยที่ทำการศึกษา		ชนิดสาร Coagulant			
		FeCl <sub>3</sub>		PACI	
		ชนิดสีข้อม		ชนิดสีข้อม	
ปัจจัย	หน่วย	Acid	Vat	Acid	Vat
ความเข้มข้นสาร Coagulant	mg/l	ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อ 3.4.3.1			
ความเข้มข้นของ Polymer	mg/l	ได้จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 1)			
pH เริ่มต้น	-	3-10			

### 3.4.3.3 สรุปสภาวะที่เหมาะสมของชุดการทดลอง CC แบบ Batch

จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม Acid และ สีข้อม Vat ของชุดการทดลอง CC ที่ใช้สาร Coagulant FeCl<sub>3</sub> และ PACI นำมาสรุปค่าปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับระบบ CC เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบบ EC ต่อไป

## 3.5 ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมของระบบ EC และ CC

รายละเอียดขั้นตอนการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมของระบบ EC และระบบ CC ดังแสดงในรูปที่ 3.1 มีรายละเอียดดังนี้

- 1) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมของระบบ EC และระบบ CC



1.1) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของระบบ EC เมื่อทราบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบ EC ได้แก่ ชนิดขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นของสีเริ่มต้น ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า pH ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาในการตกตะกอนที่เหมาะสมของสี Acid และ สี Vat โดยวัดค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำตัวอย่างและนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดสีของระบบ CC เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจว่าระบบ EC หรือระบบ CC มีความเหมาะสมกับการกำจัดสี

1.2) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของระบบ CC เมื่อทราบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบ CC ได้แก่ ชนิดสาร Coagulant ความเข้มข้นของ Polymer และ pH ที่เหมาะสมของสี Acid และ สี Vat โดยวัดค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำตัวอย่างและนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดสีของระบบ EC เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจว่าระบบ EC หรือระบบ CC มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี Acid และ Vat

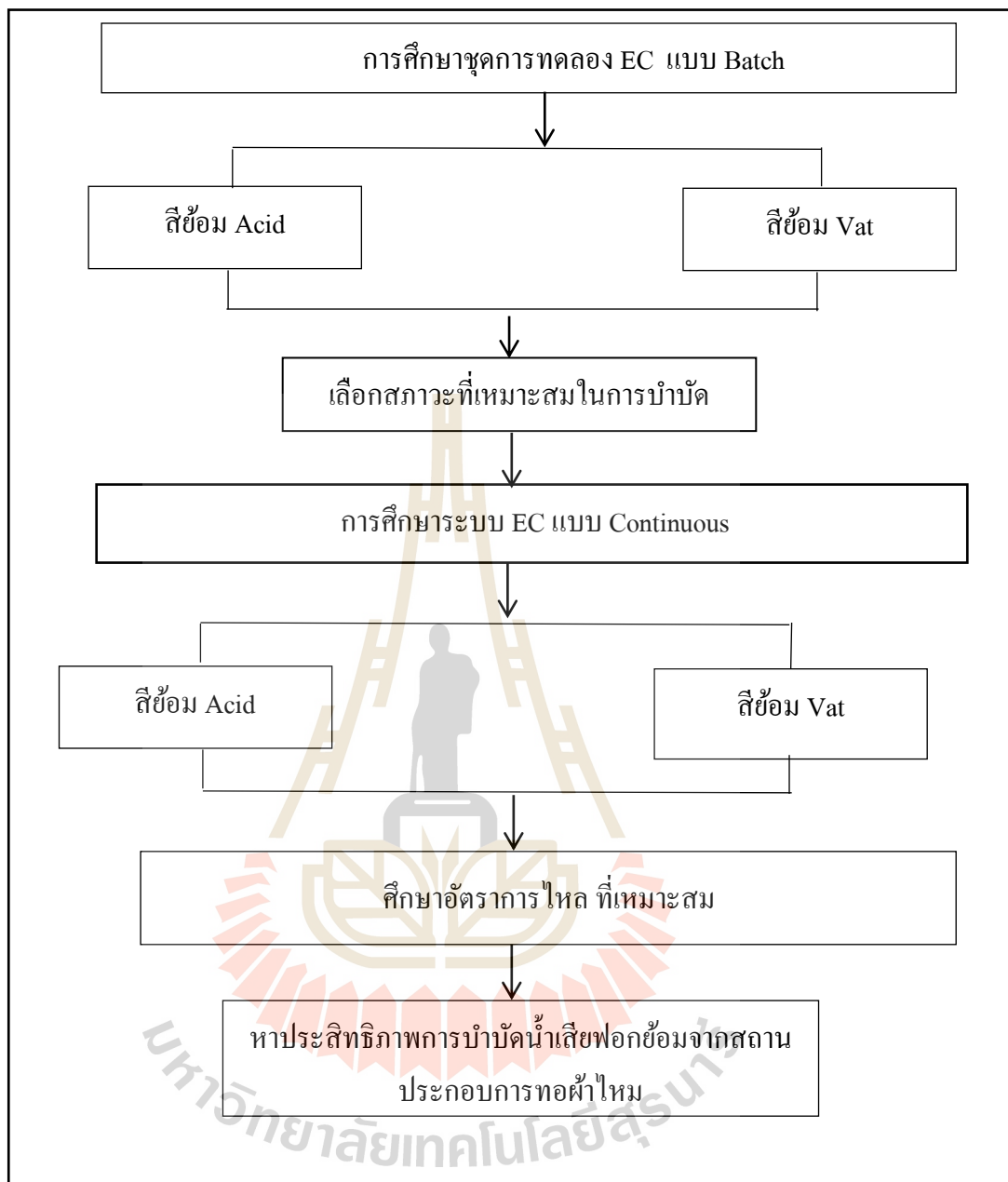
2) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีระหว่างระบบ EC และระบบ CC โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดสี Acid และ Vat

### 3.6 ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาระบบ EC แบบ Continuous

ในขั้นตอนการศึกษานี้จะทำการศึกษาระบบ EC แบบ Continuous ในการบำบัดสี Acid และสี Vat โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.8 มีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 3.6.1 รายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Continuous

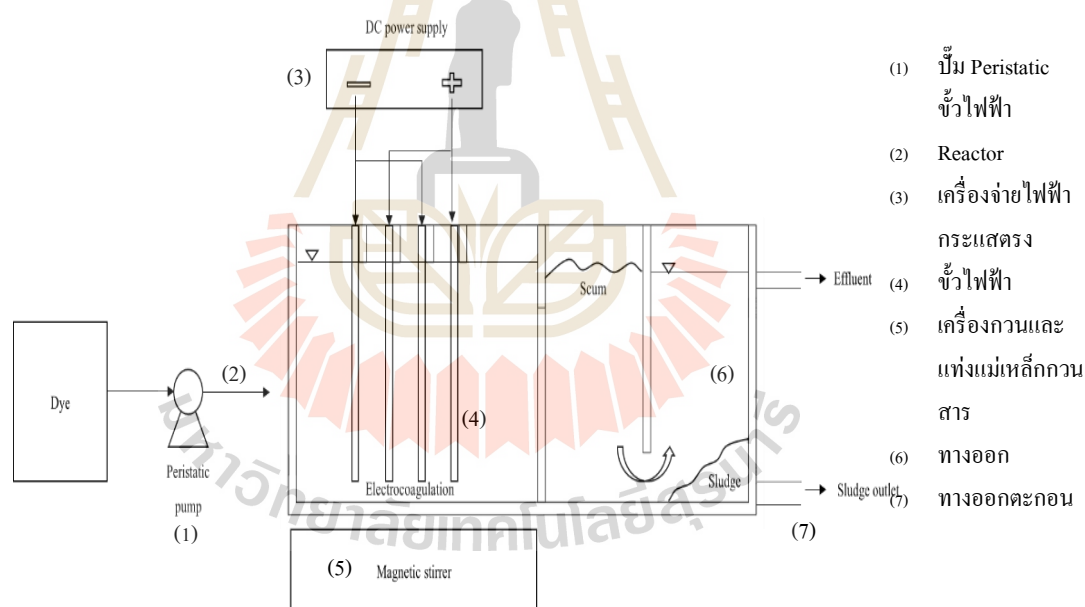
รายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของ EC แบบ Continuous สรุปในตารางที่ 3.11 และรายละเอียดการออกแบบแสดงในรูป 3.9 และ 3.10 ระบบ EC แบบ Continuous ประกอบไปด้วย บั๊ม Peristaltic (1) Reactor (2) ทำจากอคริลิกหนา 3 mm เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (3) ที่สามารถปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ในช่วง 0-30 Volt และรองรับค่ากระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0-10 A ต่อสายไฟเข้ากับขั้วไฟฟ้า (4) แบบ Monopolar โดยแต่ละชุดการทดลองจะใช้ขั้วไฟฟ้าชุดละ 4 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้ว 1.1 cm พื้นที่ผิวทั้งหมด  $192 \text{ cm}^2$  ใช้ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที มีปริมาตรน้ำในช่องแรกมีปริมาตร 600 ml ช่องที่ 2 มีปริมาตร 200 ml และช่องที่ 3 มีปริมาตร 200 ml และมีขนาดดังรูปที่ 3.10 กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 176 x 97 x 67 mm



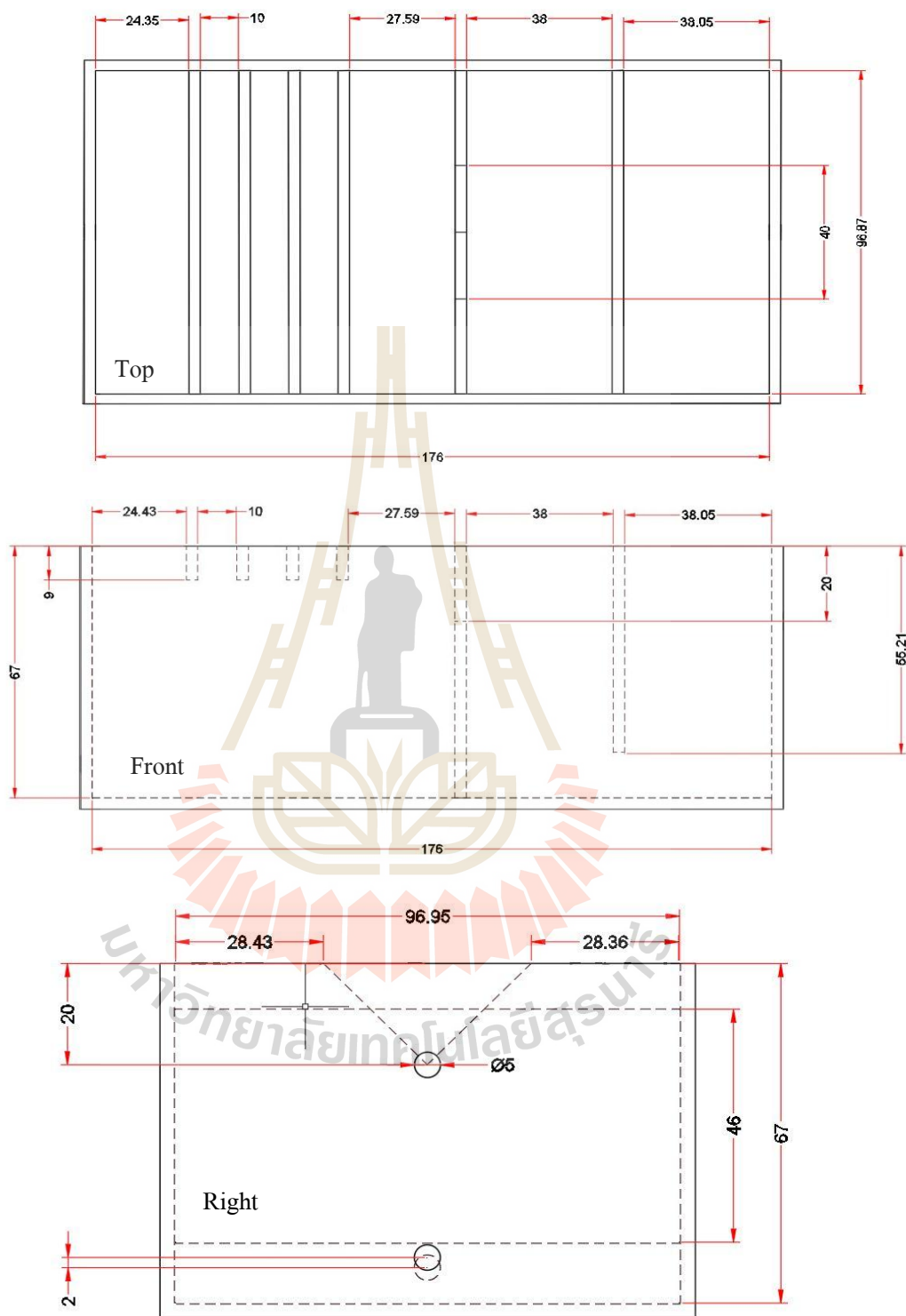
รูปที่ 3.8 รายละเอียดขั้นตอนการศึกษาระบบ EC แบบ Continuous

ตารางที่ 3.11 รายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Continuous

ปัจจัย	หน่วย	ชนิดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองระบบ	
		EC แบบ Batch (หัวข้อที่ 3.4.2)	
ขนาดขั้วไฟฟ้า	mm	3 x 46 x 55 (ชุดละ 4 แผ่น)	
พื้นที่ผิวทำปฏิกิริยา	cm <sup>2</sup>	192	
ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	cm	1.1	
ความเร็วรอบในการกวน	rpm	200	
ปริมาตรน้ำช่องที่ 1	ml	600	
ปริมาตรน้ำช่องที่ 2	ml	200	
ปริมาตรน้ำช่องที่ 3	ml	200	



รูปที่ 3.9 รูปแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Continuous



รูปที่ 3.10 ขนาดร่างแบบรายละเอียดชุดการทดลองระบบ EC แบบ Continuous (หน่วย; mm)

### 3.6.2 ขั้นตอนการศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อมของระบบ EC แบบ Continuous

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบ EC แบบ Continuous ในการบำบัดสีย้อมโดยแบ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 1) การศึกษาผลของอัตราการไหล

การศึกษาผลของอัตราการไหลประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Acid และ Vat โดยอัตราการไหลที่เลือกใช้ คือ 17 20 24 และ 30 ml/min (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง) โดยสภาวะที่ใช้ในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.12 และทำการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ในการศึกษาดังต่อไปนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ความต่างศักย์ ค่า pH เริ่มต้น ได้จากผลการศึกษาค่าสภาวะที่เหมาะสมของระบบ EC แบบ Batch ในหัวข้อที่ 3.4.2.3 ทำการวัดความเข้มข้นของสีก่อนและหลังการทดลองโดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และนำไปหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดโดยใช้สมการที่ (3.1)

ตารางที่ 3.12 สภาวะชุดการทดลองผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของระบบ EC แบบ Continuous

ปัจจัยที่ทำการศึกษา		ชนิดข้อไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองระบบ EC แบบ Batch (หัวข้อที่ 3.4.2)	
		ชนิดสีย้อม Acid	ชนิดสีย้อม Vat
ปัจจัย	หน่วย	ได้จากการสรุปสภาวะที่เหมาะสมของระบบ EC แบบ Batch ในหัวข้อที่ 3.4.2.3	
ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น	mg/l		
สารละลายอิเล็กโทรไลต์	g/l		
ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น	volt		
pH เริ่มต้น	-		
อัตราการไหล	ml/min	17, 20, 24, 30	

### 3.6.3 สรุปสภาวะที่เหมาะสมของชุดการทดลอง EC แบบ Continuous

จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid และสีย้อม Vat ของชุดการทดลอง EC แบบ Continuous นำมาสรุปค่าอัตราการไหลเหมาะสมสำหรับระบบ EC และ

หาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Acid และสีย้อม Vat จากนั้นนำน้ำเสียฟอกย้อมจากสถานประกอบการ ทอผ้าไหมในเขต อ. ปักธงชัย มาทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโดยระบบ EC แบบ Continuous

### 3.6.4 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียฟอกย้อม

จากการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของระบบ EC แบบ Continuous จะได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำในหัวข้อที่ 3.6.3 จากนั้นนำสภาวะที่เหมาะสมได้แก่ ขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความต่างศักย์ pH อัตราการไหล และ ระยะเวลาพักเก็บ ใช้ในการบำบัดน้ำเสียน้ำเสียฟอกย้อมจากสถานประกอบการทอผ้าไหมในเขต อ. ปักธงชัยเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม และ COD ของระบบ EC แบบ Continuous

### 3.7 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะคุณภาพน้ำ

ในการตรวจวัดคุณภาพน้ำก่อนกำจัดสีย้อมและหลังการกำจัดสีย้อมมีรายละเอียดพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.13 โดยพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดได้แก่ pH ค่าการดูดกลืนของแสง COD ความขุ่น และค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย

ตารางที่ 3.13 ค่าพารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ลักษณะน้ำ (APHA et al., 2005)

Parameter	Unit	Analytical methods	เครื่องมือ
pH	-	Standard Method 4500-H+B	METTLER TOLEDO รุ่น S220-Kit UV-VIS
Color	Pt-Co	Standard Method 2120 B.	Spectrophotometer รุ่น GENESYS2M 20
COD	mg/L	5220 C. Closed Reflux ,Titrimetric Method	- เครื่องวัดความขุ่นแบบ
Turbidity	NTU	Standard Method 2130 B.	พกพา Hach รุ่น 2100 QIS เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า
Conductivity	µs/cm	Standard Method v 2510B	และ TDS แบบพกพา Hach

### 3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การหาสถานะที่เหมาะสมจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ เพื่อเป็นข้อมูลช่วยในการตัดสินใจเลือกสถานะที่เหมาะสม ซึ่งจะพิจารณาจากประสิทธิภาพในการบำบัดโดยใช้สถิติในการทดสอบความแตกต่าง คือ One Way ANOVA และ Paired Sample T-Test (SPSS version 23) โดยมีสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบความแตกต่างตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป จะใช้สถิติทดสอบ คือ One Way ANOVA ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $\alpha = 0.05$ ) โดยจะปฏิเสธ  $H_0$  หรือยอมรับ  $H_1$  เมื่อค่า p-value  $< 0.05$  ซึ่งสมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

$H_0$ : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสองกลุ่มมีค่าไม่แตกต่างกัน

$H_1$ : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสองกลุ่มมีค่าแตกต่างกัน

เมื่อทดสอบความแตกต่างโดยใช้ One Way ANOVA แล้ว พบว่า ยอมรับ  $H_1$  คือ ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพอย่างน้อยหนึ่งกลุ่มมีค่าแตกต่างกัน จึงทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของ 2 กลุ่มที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน จะใช้สถิติทดสอบ คือ Paired Sample T-Test ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $\alpha = 0.05$ ) โดยจะปฏิเสธ  $H_0$  หรือยอมรับ  $H_1$  เมื่อค่า p-value  $< 0.05$  ซึ่งสมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

$H_0$ : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสองกลุ่มมีค่าไม่แตกต่างกัน

$H_1$ : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสองกลุ่มมีค่าแตกต่างกัน





## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการอภิปรายผลการศึกษา

ผลการศึกษาประสิทธิภาพบำบัดสีย้อมโดยการใส่กระบวนการ Electrocoagulation และ Coagulation โดยมีขั้นตอนในการศึกษาทั้งหมด 3 ขั้นตอน มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

#### 4.1 ขั้นตอนที่ 1 ผลการศึกษาระบบ EC และ CC แบบ Batch

##### 4.1.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อมของระบบ EC แบบ Batch

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสำหรับระบบ EC โดยใช้เหล็กและอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า มีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

##### 4.1.1.1 สีย้อม Acid

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัด EC ในการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขั้ว Fe และ Al เป็นขั้วไฟฟ้า ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น pH เริ่มต้น ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และ ระยะเวลาในการตกตะกอน มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

##### 1) ผลการศึกษาผลความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม

ในการศึกษานี้เตรียมสารละลายสีย้อม Acid ที่มีค่าความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 20 40 60 80 100 120 และ 140 mg/l มีปริมาตร 600 ml ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.06 g/l, pH อยู่ในช่วง 6-7, แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 20 V, ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที ทั้งระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al และ Fe ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC แสดงรายละเอียดผลการศึกษาในตารางที่ 4.1 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.1

##### 1.1) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว Al

ผลการศึกษาของระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Acid เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบ EC ของขั้ว Al มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 91.92 ที่ความเข้มข้นสีย้อม Acid 20 mg/l เป็นร้อยละ 96.13 ที่ความเข้มข้นสีย้อม Acid 140 mg/l (ตารางที่ 4.1) โดยพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Acid 140 mg/L มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 96.13 เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม Acid มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสไฟฟ้า

ในวงจรเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้จากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ขณะทำปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.17 A เป็น 0.37 A ซึ่งสามารถอธิบายด้วยกฎอิเล็กโทรไลซิสของฟาราเดย์ (Faraday's Laws of Electrolysis) ว่า ปริมาณกระแสไฟฟ้าในเซลล์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายที่นำไฟฟ้ามวลของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดขณะที่เกิดอิเล็กโทรไลซิส ดังนั้น จึงทำให้เกิดการผลิตสาร  $Al(OH)_3$  ที่เป็นสาร Coagulant เพิ่มขึ้นด้วย (Tir and Moulai-Mostefa, 2008) ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบเพิ่มสูงขึ้นด้วย การเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มโอกาสในการสัมผัสสาร Coagulant ได้มากกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมต่ำกว่า ดังนั้น ที่สารละลายความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นต่ำมีความต้องการสาร Coagulant มากขึ้นจึงจะเกิด Floc ได้ดี และในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความเข้มข้นสีย้อมสูงจะมีความขุ่นสูง แต่มีความต้องการสาร Coagulant น้อยกว่า เนื่องจากมีโอกาสสัมผัสกับสาร Coagulant สูง นอกจากนี้ที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำทำให้เกิดฟองก๊าซ  $H_2$  เพิ่มขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพในการแยกชั้นตะกอนให้ลอยได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ (Chen et al, 2002) จากการทดสอบค่าสถิติพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมที่ความเข้มข้น 40-140 mg/l ประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จึงเลือกใช้ความเข้มข้นสีย้อมที่ 140 mg/l ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงที่สุด นอกจากนี้ค่า pH ก่อนการทดลองจะอยู่ในช่วง 6.201-6.076 และพบว่าหลังการทดลองอยู่ในช่วง 8.63-9.11 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่ขั้วแคโทดทำให้เกิดการใช้  $H^+$  ในการสร้างก๊าซ  $H_2$  ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ดังนั้นปริมาณของ  $H^+$  จึงลดลง ส่งผลให้ pH หลังการบำบัดสีย้อมด้วย EC จึงเพิ่มขึ้นนั่นเอง (Kobyta et al., 2010) ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Al จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Acid เท่ากับ 140 mg/L เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด



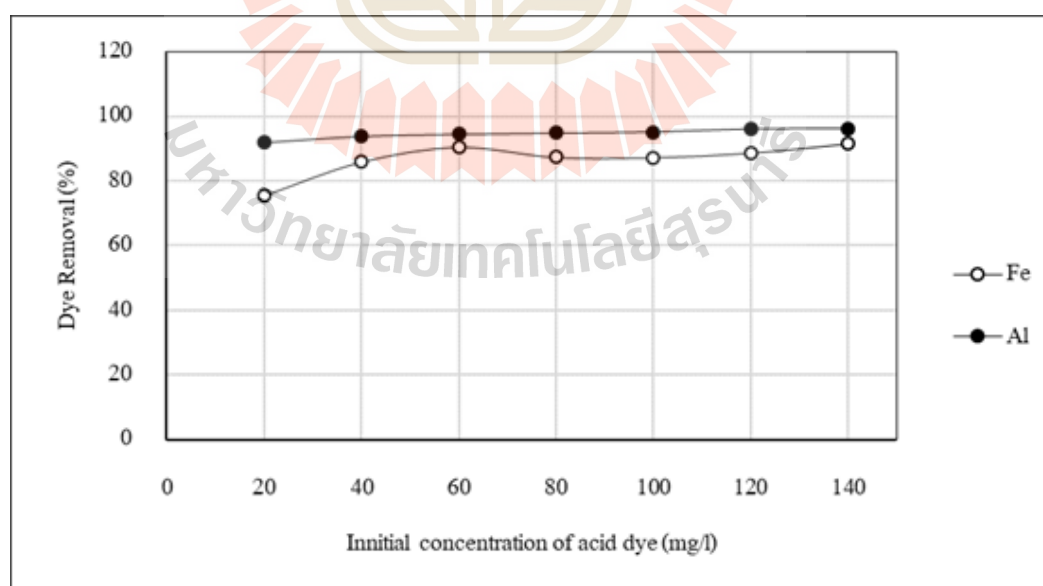
### 1.2) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว Fe

ผลการศึกษาในระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Fe ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Acid เพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid จาก 20-60 mg/L ส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับการใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า และประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 75.4 ที่ความเข้มข้นสีย้อม 20 mg/l เป็นร้อยละ 90.48 ที่ความเข้มข้นสีย้อม 60 mg/l และเมื่อความเข้มข้นของสีย้อม Acid อยู่ในช่วง 60-140 mg/L พบว่ามีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 90.48-91.55 และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Acid ที่ 140 mg/L มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงสุดร้อยละ 91.55 ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขี้ Fe จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Acid เท่ากับ 140 mg/L เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด

ตารางที่ 4.1 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยระบบ EC แบบ Batch

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (mg/l)	ใช้ Al เป็นขี้ไฟฟ้า		ใช้ Fe เป็นขี้ไฟฟ้า	
	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม (Mean $\pm$ S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean $\pm$ S.D.)	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม (Mean $\pm$ S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean $\pm$ S.D.)
20	91.92 $\pm$ 3.02	8.63 $\pm$ 0.17	75.4 $\pm$ 3.45	6.77 $\pm$ 0.01
40	93.79 $\pm$ 1.17	8.75 $\pm$ 0.05	85.86 $\pm$ 2.86	7.88 $\pm$ 0.83
60	94.41 $\pm$ 1.18	8.90 $\pm$ 0.04	90.48 $\pm$ 1.47	9.11 $\pm$ 0.004
80	94.78 $\pm$ 0.67	8.82 $\pm$ 0.01	87.35 $\pm$ 4.35	7.95 $\pm$ 0.01
100	95.12 $\pm$ 0.79	9.00 $\pm$ 0.01	87.27 $\pm$ 0.64	9.94 $\pm$ 0.05
120	96.03 $\pm$ 0.43	9.04 $\pm$ 0.04	88.67 $\pm$ 2.12	9.70 $\pm$ 0.14
140	96.13 $\pm$ 0.39	9.11 $\pm$ 0.003	91.55 $\pm$ 1.62	10.05 $\pm$ 0.09



รูปที่ 4.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของระบบ EC โดยใช้ขี้ Fe และ Al

## 2) ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์

ในการศึกษานี้เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaCl ที่มีค่าความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 0.06 0.12 0.24 0.48 และ 0.96 g/l ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid 140 mg/l ทั้งขั้วไฟฟ้า Al และ Fe (ได้จากผลการศึกษาที่ผ่านมา), pH อยู่ในช่วง 6-7, แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 20 V, ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที และ ระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.2 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.2

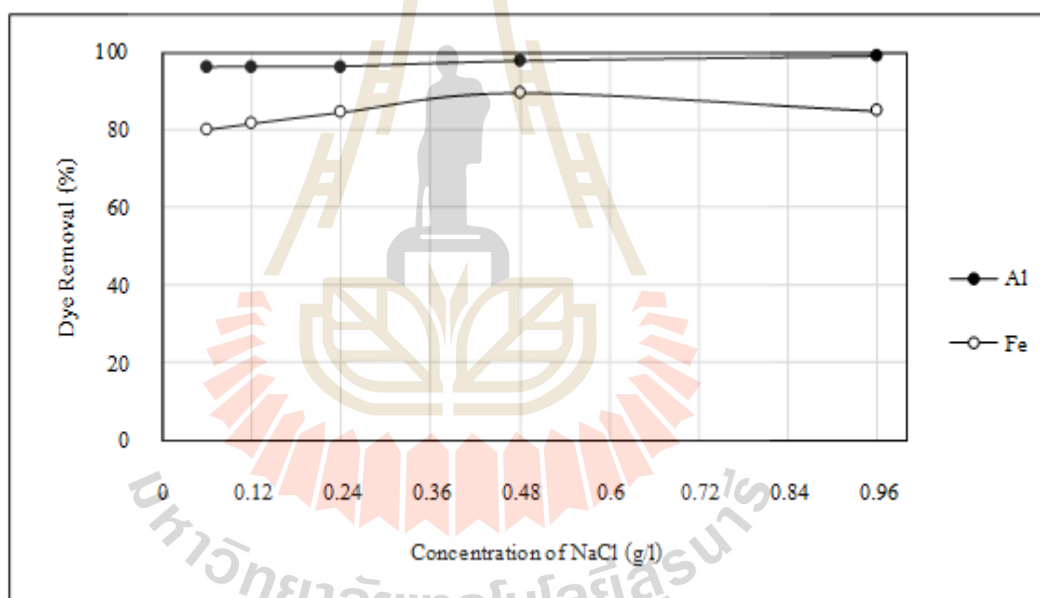
### 2.1) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว Al

ผลการศึกษาของระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบ EC ของขั้ว Al มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 96.16-99.21 (ตารางที่ 4.2) โดยพบว่าที่ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 99.21 เนื่องจากสารอิเล็กโทรไลต์มีหน้าที่ช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย ในการศึกษานี้พบว่าที่ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.06 mg/l มีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจาก 268.333  $\mu\text{s}/\text{cm}$  เพิ่มขึ้นเป็น 1,508.667  $\mu\text{s}/\text{cm}$  ที่ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 mg/l จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์จะส่งผลต่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายซึ่งทั้ง 2 ค่าเป็นตัวกำหนดปริมาณของไอออนโลหะที่ปล่อยออกมาจากขั้วไฟฟ้า (Moussa et al., 2017) จึงมีผลทำให้มีปริมาณสาร Coagulant เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การปรับค่าการนำไฟฟ้าโดยการเติม NaCl ยังเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยในการบำบัดสีย้อมเพราะ NaCl จะสามารถแตกตัวกลายเป็น HOCl ได้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่ง HOCl นี้เองเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีส่วนช่วยให้เกิดการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสีทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลสีแตกออก (Zhan et al., 2001) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นด้วย และผลการศึกษาค่า pH ก่อนการทดลองเท่ากับ 6.079 และหลังการทดลองอยู่ในช่วง 9.09-9.59 จะเห็นได้ว่ามีค่า pH เพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้  $\text{H}^+$  ในการสร้างก๊าซ  $\text{H}_2$  ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ดังนั้น ปริมาณของ  $\text{H}^+$  จึงลดลง ส่งผลให้ pH หลังการบำบัดสีย้อมด้วย EC จึงมีค่า pH เพิ่มขึ้นนั่นเอง ดังนั้น ในการศึกษาขั้นตอนต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Al จึงเลือกใช้ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 0.96 g/L เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid สูงสุดและประสิทธิภาพการบำบัดแตกต่างจากการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้น 0.06-0.48 g/l อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

### 2.2) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว Fe

ผลการศึกษาของระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Fe เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ จาก 0.06-0.48 g/L ส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเพิ่มมากขึ้น และในช่วง

ความเข้มข้น 0.48-0.96 g/L เริ่มมีค่าประสิทธิภาพลดลง และพบว่าที่ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.48 g/L มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมสูงสุดร้อยละ 89.67 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ลดลงในช่วงการเพิ่มความเข้มข้นจาก 0.48 เป็น 0.96 g/l เนื่องจากเมื่อมีปริมาณสาร Coagulant ที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการกลับตัวของประจุคอลลอยด์และการปรับโครงสร้างของคอลลอยด์ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพขึ้นอีกครั้ง ส่งผลทำให้อัตราของการเกิด Coagulation ลดลงและการรวมตัวของฟล็อกค่อนข้างน้อยทำให้เกิดประสิทธิภาพในการบำบัดได้ไม่ดี (Duan and Gregory, 2003) ดังนั้น ในการ ศึกษาขั้นตอนต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขี้ Fe จึงเลือกใช้ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 0.48 g/L เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid สูงสุดและประสิทธิภาพการบำบัดแตกต่างจากการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้น 0.06-0.24 และ 0.96 g/l อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid ของระบบ EC โดยใช้ขี้ Fe และ Al

ตารางที่ 4.2 ผลความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ด้วยระบบ EC แบบ Batch

ความเข้มข้น สารอิเล็กโทร ไลต์ (g/l)	ใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า		ใช้ Fe เป็นขั้วไฟฟ้า	
	ประสิทธิภาพการบำบัด สีย้อม (Mean ± S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean ± S.D.)	ประสิทธิภาพการบำบัด สีย้อม (Mean ± S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean ± S.D.)
0.06	96.16±0.13	9.09±0.03	80.16±0.61	10.17±0.04
0.12	96.26±0.18	9.22±0.07	81.68±	10.36±
0.24	96.30±0.23	9.15±0.09	84.48±1.53	10.46±0.01
0.48	97.84±0.57	9.36±0.05	89.67±2.46	10.48±0.03
0.96	99.21±0.10	9.59±0.05	84.79±0.15	10.58±0.03

### 3) ผลการศึกษาผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น

ในการศึกษานี้ปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นแตกต่างกันได้แก่ 5 10 15 และ 20 Volt สำหรับระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l (ได้จากผลการศึกษาที่ผ่านมา) ค่า pH อยู่ในช่วง 6-7 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที สำหรับขั้ว Fe กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.48 g/l ส่วนสภาวะปัจจัยอื่น ๆ เหมือนกันกับชุดขั้ว Al ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.3 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นสีย้อมมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.3

#### 3.1) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว Al

ผลการศึกษาในระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 96.83 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 Volt เป็นร้อยละ 98.15 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 Volt (ตารางที่ 4.3) โดยพบว่าที่ความต่างศักย์ 20 Volt มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 98.15 ซึ่งในการเพิ่มความต่างศักย์มีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษมากขึ้นสามารถอธิบายได้จากกฎของโอห์มว่ากระแสไฟฟ้า (I) ในวงจรจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าแรงดันไฟฟ้า (ความต่างศักย์) ที่แหล่งจ่ายมีค่าเพิ่มขึ้น (จากสมการ  $V = IR$ ) โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ขณะทำการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 0.26-2.31 A และตามกฎของฟาราเดย์ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจำนวนของสาร Coagulant หรือ โลหะที่ละลายจากขั้วแอโนดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าในวงจร ดังนั้น การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์จะส่งผลทำให้จำนวนฟลอคของ  $Al(OH)_3$  เพิ่มขึ้นส่งผลต่อสามารถในการบำบัดอนุภาคคอลลอยด์หรือ



ลีส้อยมได้ และในเวลาเดียวกันเกิด  $\text{OH}^-$  จากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่ขั้วแคโทดจะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ pH เพิ่มขึ้น (Chavalparit et al., 2009) สอดคล้องกับผลการศึกษาค่า pH ก่อนการทดลองจะอยู่ในช่วง 6.02 และหลังการบำบัดจะมีค่า pH เพิ่มสูงขึ้นดัง(ตารางที่ 4.3) อยู่ในช่วง 8.91-9.71 นอกจากนี้ยังทำให้ก๊าซ  $\text{H}_2$  มีจำนวนมากขึ้นและฟองก๊าซมีขนาดลดลงทำให้เกิดการพาตะกอนลอยขึ้นไปได้เร็วขึ้น (Hamada et al., 2018) แต่จากการศึกษานี้พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 และ 20 Volt ให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกินขีดจำกัดของเครื่องจ่ายไฟฟ้า (DC power supply) ที่สามารถรองรับได้ จึงได้ทำการปรับมาใช้ค่าความต่างศักย์ที่ต่ำกว่าเพื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่เครื่องจ่ายไฟฟ้าสามารถรองรับได้ เพราะฉะนั้นในการศึกษานี้จึงได้ทำการศึกษาความต่างศักย์เพิ่มเติม โดยได้เพิ่มการศึกษาที่ความต่างศักย์ที่ต่ำกว่า 15 Volt จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดลีส้อยม Acid ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 12.5 Volt และพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดลีส้อยมร้อยละ 96.99 และเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดลีส้อยมไปทดสอบค่าความแปรปรวนทางสถิติโดยใช้ Anova ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12.5 15 และ 20 Volt พบว่ามีค่าประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้น จึงเลือกความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 12.5 เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

### 3.2) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว Fe

ผลการศึกษาในระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Fe จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 15 Volt ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 76.65 เป็น 88.05 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 Volt และ 15 Volt ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความต่างศักย์จาก 15-20 Volt ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเหลือร้อยละ 85.69 ที่ความต่างศักย์ 20 Volt เนื่องจากมีปริมาณสาร Coagulant ที่มากเกินไปจึงส่งผลทำให้เกิดการกลับตัวของประจุคอลลอยด์และการปรับโครงสร้างของคอลลอยด์ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพขึ้นอีกครั้ง (Duan and Gregory, 2003) ส่งผลทำให้อัตราของการเกิด Coagulation ลดลงและการรวมตัวของฟลอคก่อนข้างน้อยส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลีส้อยม Acid ลดลง ดังนั้น ในการศึกษาขั้นตอนต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe จึงเลือกใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นเท่ากับ 15 Volt เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด

### 4) ผลการศึกษาผลของ pH เริ่มต้น

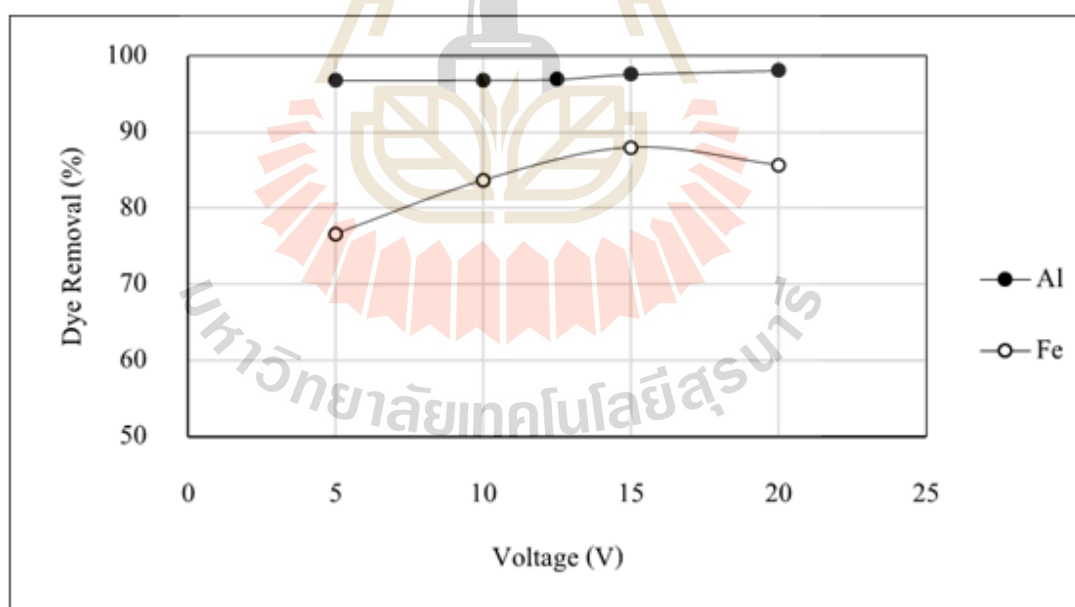
ในการศึกษานี้ปรับค่า pH ของสารละลายลีส้อยม Acid ต่างกัน ได้แก่ 3 5 6 8 และ 10 สำหรับระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al ความเข้มข้นเริ่มต้นของลีส้อยม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l, ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 12.5 V (ผลการศึกษาที่ผ่านมา) และสำหรับขั้ว Fe ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของลีส้อยม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.48 g/l, ความต่างศักย์ 15 V (จากผลการศึกษาที่ผ่านมา) ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน



30 นาที ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.4 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ผลความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ด้วยระบบ EC แบบ Batch

ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า เริ่มต้น (Volt)	ใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า		ใช้ Fe เป็นขั้วไฟฟ้า	
	ประสิทธิภาพการบำบัด สีย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)	ประสิทธิภาพการบำบัดสี ย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)
5	96.83±0.13	8.91±0.013	76.65±1.98	10.17±0.04
10	96.89±0.14	9.176±0.04	83.73±1.21	10.36±
12.5	96.99±0.17	9.14±0.10	-	-
15	97.65±0.41	9.66±0.01	88.05±1.95	10.48±0.03
20	98.15±0.48	9.71±0.05	85.69±1.15	10.58±0.03



รูปที่ 4.3 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe และ Al

#### 4.1) ผลการศึกษาโดยใช้ขี้ AI

ผลการศึกษาในระบบ EC ที่ใช้ขี้ AI แสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า pH ของสารละลายสีข้อม Acid เพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 10 ส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมของระบบ EC มีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 99.45 ที่ pH 3 เป็น 97.12 ที่ pH 10 (ตารางที่ 4.4) โดยพบว่าที่ pH 3 มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 99.45 เนื่องจากการเกิดกระบวนการ Coagulation ค่า pH เริ่มต้นของสีข้อมควรอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการสร้าง Floc (Degremont, 2005) โดยช่วง pH ที่เหมาะสมสำหรับการก่อตะกอนของอลูมิเนียมจะอยู่ในช่วงความเป็น 4 ถึง 5.5 (Tchamango, 2017) และจากข้อมูลตรวจการวัดค่า ORP ขณะทำปฏิกิริยาในระบบ EC พบว่า ที่ pH 3 มีค่า ORP เฉลี่ย +0.224 V ซึ่งจากการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าออกซิเดชัน-รีดักชัน และ pH กับรูปของ AI ในสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าการเกิด Floc ของ  $Al^{3+}$  ที่ละลายออกมาในน้ำบางส่วนจะเกิดการรวมตัวกับ  $OH^-$  เป็นโมโนเมอร์ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ปะปนในน้ำ เช่น  $Al(OH)^{2+}$  ซึ่งเป็นประจุบวกเป็น Monomeric Species ของอลูมิเนียม (Kobya et al., 2003) จึงส่งผลทำให้สามารถจับตัวกับสี Acid ได้ดี เนื่องจากสี Acid เป็นสีที่แตกตัวให้ประจุลบของ  $SO_3^-$  ก่อให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตและแรงดึงดูดกันทางกายภาพ (Sengil and Ozacar, 2009) ดังแสดงในสมการที่ 4.3

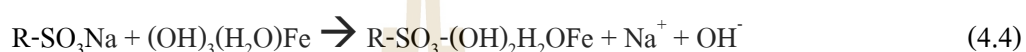


จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มค่า pH เท่ากับ 10 พบว่ามีค่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเนื่องจากที่ pH มากกว่า 9 การเกิด Floc ของ  $Al(OH)_3$  จะลดลงสาเหตุมาจากจากอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะฟอร์มตัวเป็นไอออน ที่มีประจุลบ (Chavalparit et al., 2009) หรือ Monomeric ที่มีอยู่ในรูปละลายน้ำ เช่น  $Al(OH)_4^-$  และ  $Al(OH)_5^-$  ซึ่งไม่สามารถเกิดปฏิกิริยา Coagulation กับสีข้อม Acid ซึ่งมีประจุลบได้ (Gonder et al., 2017) เพราะจะทำให้เกิดการผลักกันของประจุ ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขี้ AI จึงเลือกใช้ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 3 เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมสูงสุดและประสิทธิภาพการบำบัดแตกต่างจาก pH เริ่มต้น 5-10 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

#### 4.2) ผลการศึกษาโดยใช้ขี้ Fe

ผลการศึกษาในระบบ EC ที่ใช้ขี้ Fe พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม Acid ของระบบ EC ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า pH ของสีข้อม Acid เพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 10 จะส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 86.50 เป็น 93.97 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) โดยพบว่าที่ pH 10 มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 93.97

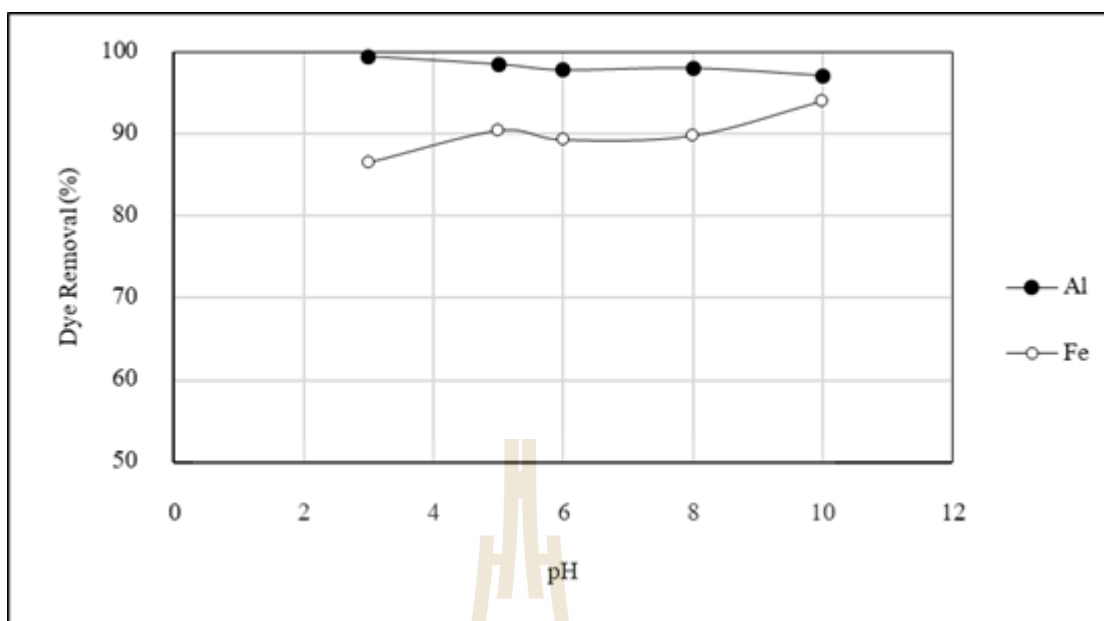
เนื่องจาก pH ที่เหมาะสมสำหรับการใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าอยู่ในช่วง pH ที่ 6-10 (Chen, 2004) จากผลการศึกษาพบว่าค่า ORP ขณะทำปฏิกิริยาในระบบ EC ที่ pH 10 มีค่าเฉลี่ย -0.173 V ซึ่งจากการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน และ pH กับรูปของ Fe ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นว่ารูปของโลหะไฮดรอกไซด์จะอยู่ในรูป  $Fe(OH)_3$  ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสาร Coagulant อยู่ในรูปไม่ละลายน้ำ สามารถบำบัดโมเลกุลของสีย้อมโดยกลไกการเกิด surface complexation หรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic attraction) และสำหรับสีย้อม Acid ที่มีฟังก์ชันลัล คือ  $NaSO_3$  ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นโครงสร้างตัวอย่างของสี Acid สามารถเขียนสมการการบำบัดสีย้อม Acid ด้วย  $Fe(OH)_3$  ซึ่งเป็นการสร้างพันธะไอออนิก ดังแสดงในสมการที่ 4.4 (Sengil and Ozacar, 2009)



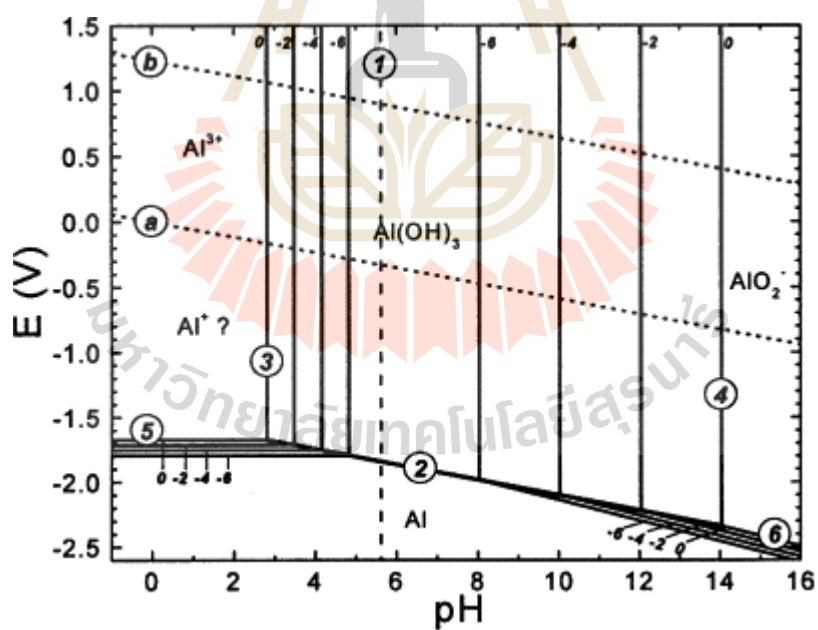
ในสภาวะที่ pH เป็นกรดระบบ EC ยังสามารถบำบัดสีย้อม Acid ได้ เนื่องจากโลหะไฮดรอกไซด์ของสาร Coagulant จะมีโครงสร้างเป็นโพลีเมอร์ที่มีประจุบวกเป็นส่วนใหญ่ และมีความสามารถในการดูดซับคอลลอยด์ที่มีประจุลบของสีย้อม Acid ได้ ถือเป็นการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ทางหนึ่ง (Sengil and Ozacar, 2009) ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe จึงเลือกใช้ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 10 เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงสุดและเหมาะกับการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเนื่องจาก pH ของน้ำเสียจากระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.88-9.50 ที่ค่อนข้างเป็นด่าง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

ตารางที่ 4.4 ผล pH เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ด้วยระบบ EC แบบ Batch

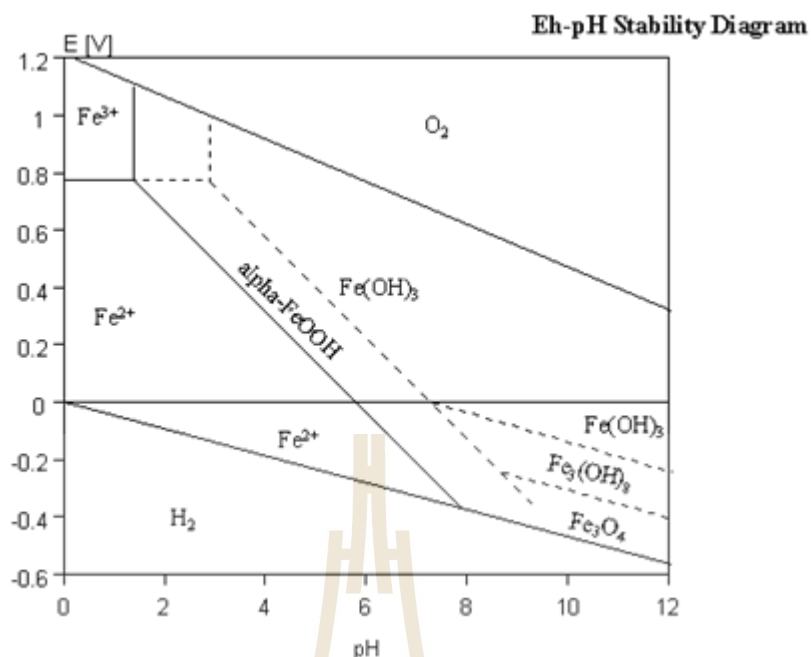
pH เริ่มต้น	ใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า		ใช้ Fe เป็นขั้วไฟฟ้า	
	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม (Mean ± S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean ± S.D.)	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม (Mean ± S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean ± S.D.)
3	99.45±0.07	9.08±0.03	86.50±2.49	6.84±0.09
5	98.50±0.28	9.37±0.06	90.37±1.32	10.36±0.07
6	97.80±0.08	9.18±0.03	89.27±0.13	10.50±0.02
8	98.03±0.01	9.27±0.001	90.10±0.50	10.70±0.08
10	97.12±0.17	9.31±0.01	93.97±2.64	10.78±0.02



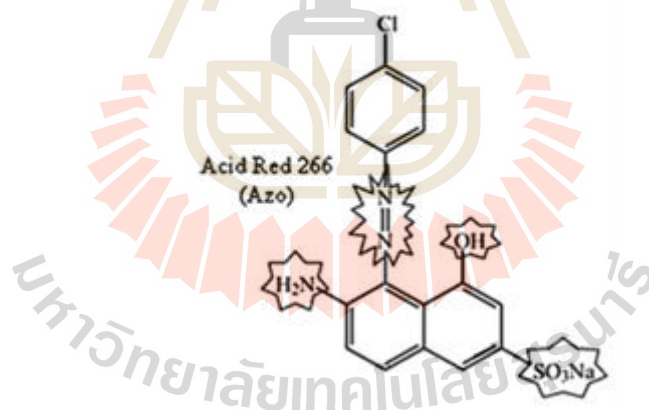
รูปที่ 4.4 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC โดยใช้ขี้วัว Fe และ Al



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ Eh-pH diagram ของอลูมิเนียม (Stepanovich Aliaksandr Stepanovi, 2013)



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ Eh-pH diagram ของเหล็ก (Stepanovich Aliaksandr Stepanovi, 2013)



รูปที่ 4.7 สีย้อม Acid (Verma et al., 2012)

##### 5) ผลการศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ในการศึกษานี้ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันได้แก่ 10 15 20 25 และ 30 นาที สำหรับระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l, ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 12.5 V, pH 3 (จากผลการศึกษาที่ผ่านมา) และสำหรับระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Fe ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.48g/l, ความต่างศักย์ 15 V, pH 10 (จากผลการศึกษาที่ผ่านมา) และระยะเวลาการ

ตกตะกอน 30 นาที ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.5 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.8

#### 5.1) ผลการศึกษาโดยใช้ขี้ AI

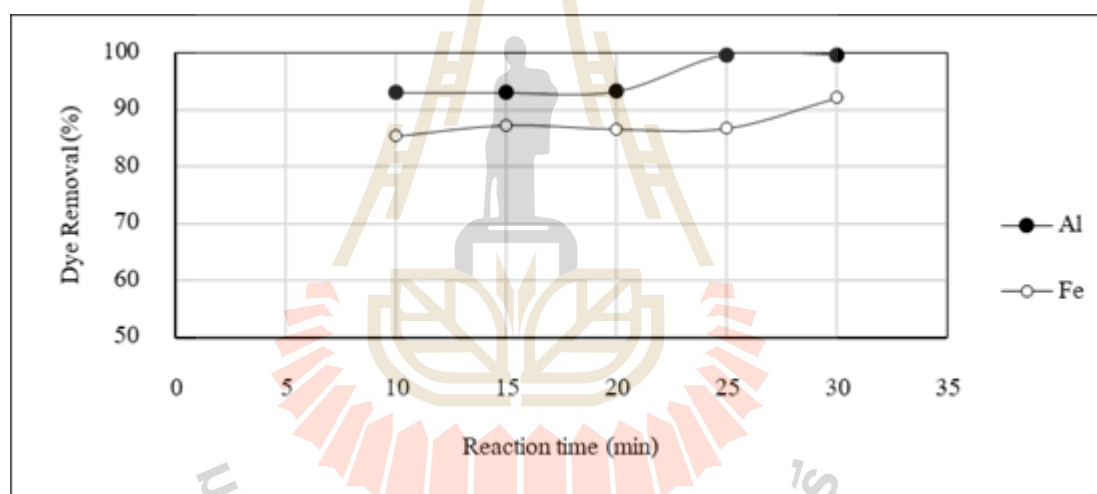
ผลการศึกษาในระบบ EC ที่ใช้ขี้ AI พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบ EC ของขี้ AI มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 92.96 ที่ระยะเวลา 10 นาที เป็น 99.62 ที่ระยะเวลา 30 นาที (ตารางที่ 4.5) โดยพบว่าที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่ 25 นาที มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 99.66 เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเนื่องจากในระบบ EC มีปริมาณ  $Al(OH)_3$  เพิ่มขึ้นตามเวลาจึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเพิ่มมากขึ้น และเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการบำบัดจะคงที่เนื่องจากมีจำนวนฟล็อกที่เพียงพอสำหรับการบำบัดมลพิษแล้วค่าประสิทธิภาพจึงไม่เปลี่ยนแปลง (Khandegar and Saroha, 2013) สอดคล้องกับผลการศึกษาครั้งนี้ที่พบว่าที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 25-30 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ในช่วง 99.66-99.62 ดังนั้นในการศึกษาขั้นต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขี้ AI จึงเลือกใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 25 นาที เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงสุดและประสิทธิภาพการบำบัดแตกต่างจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10-20 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

#### 5.2) ผลการศึกษาโดยใช้ขี้ Fe

ผลการศึกษาในระบบ EC ที่ใช้ขี้ Fe พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบ EC ของขี้ Fe มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 85.27-91.99 (ตารางที่ 4.5) โดยพบว่าที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่ 30 นาที มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 91.99 โดยในช่วง 10-20 นาที ทั้งขี้ Fe และ AI มีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากในการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็นการเพิ่มสาร Coagulant มากขึ้น โดยปริมาณของ Floc ที่เกิดขึ้นยังไม่มากพอที่จะรวมตัวกันแล้วเกิดเป็นกลุ่มก้อนตะกอนได้ภายในระยะเวลา 20 นาที แต่เมื่อให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น Floc ที่เกิดขึ้นจะมีระยะเวลามากพอที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขี้ Fe จึงเลือกใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงสุดและประสิทธิภาพการบำบัดแตกต่างจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 20 และ 25 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.5 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ด้วยระบบ EC แบบ Batch

ระยะเวลาใน การทำ ปฏิกิริยา (นาที)	ใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า		ใช้ Fe เป็นขั้วไฟฟ้า	
	ประสิทธิภาพการบำบัด สีย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)	ประสิทธิภาพการบำบัดสี ย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)
10	92.96±0.20	8.739±0.15	85.27±2.73	10.46±0.03
15	92.97±0.13	9.01±0.04	87.18±1.47	10.67±0.02
20	93.23±0.49	9.21±0.05	86.49±2.35	10.75±0.09
25	99.66±0.36	9.36±0.02	86.66±0.76	10.84±0.02
30	99.62±0.41	9.49±0.04	91.99±1.64	10.83±0.01



รูปที่ 4.8 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe และ Al

#### 6) ผลการศึกษาผลของระยะเวลาในการตกตะกอน

การศึกษานี้ใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนแตกต่างกัน ได้แก่ 15 30 45 60 และ 120 นาที สำหรับระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l, ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 12.5 V, pH 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที (จากผลการศึกษาที่ผ่านมา) และสำหรับระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Fe ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.48g/l, ความต่างศักย์ 15 V, pH 10 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC



แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.6 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.9

#### 6.1) ผลการศึกษาโดยใช้ขี้วัว AI

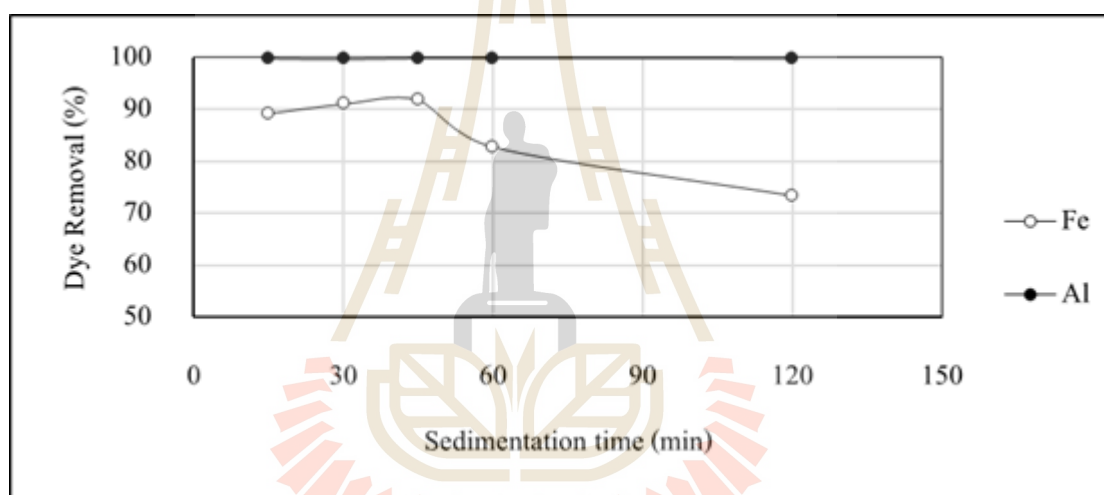
ผลการศึกษาระบบ EC ที่ใช้ขี้วัว AI พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษค่อนข้างคงที่ไม่แตกต่างกันมาก โดยประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ในช่วงร้อยละ 99.75-99.84 (ตารางที่ 4.6) โดยพบว่าที่ระยะเวลาตกตะกอน 120 นาที มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดที่ร้อยละ 99.84 แต่เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างจากระยะเวลาในการทำตกตะกอน 15-60 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นเพื่อเป็นการลดระยะเวลาในการบำบัดสีย้อมจึงเลือกใช้ระยะเวลาตกตะกอนที่ 15 นาที ของระบบ EC โดยใช้ขี้วัว AI ในการศึกษาขั้นต่อไป

#### 6.2) ผลการศึกษาโดยใช้ขี้วัว Fe

ผลการศึกษาระบบ EC ที่ใช้ขี้วัว Fe พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.6 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากระยะเวลาในการตกตะกอน 15-45 นาที โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในช่วงร้อยละ 89.29-91.90 ตามลำดับ และประสิทธิภาพลดลงหลังจากระยะเวลาตกตะกอนผ่านไป 45-120 นาที โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดลดลงอยู่ในช่วง 91.90-83.23 ตามลำดับ โดยพบว่าที่ระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 91.90 เนื่องจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาตกตะกอน ประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษหรือสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเพราะสาร Coagulant จะมีระยะเวลามากขึ้นในการจับตัวกับสารมลพิษและตกตะกอนเพิ่มขึ้น แต่จากผลการศึกษาเมื่อระยะเวลาผ่านไป ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงหลังระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที ตะกอนที่อยู่บนผิวน้ำน้ำด้านบนจากการเกิด Flotation มีการตกตะกอนลงมายังส่วนน้ำใตตรงกลางของบีกเกอร์ เมื่อทำการเก็บตัวอย่างน้ำส่วนใตตรงกลางไปวัดค่าการดูดกลืนแสงจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมลดลงและนอกจากนี้การให้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่มากเกินไประยะเวลาที่เหมาะสมจะส่งผลให้มลพิษในสารละลายเกิดการดูดซับกลับเข้าไปในสารละลาย จึงทำให้มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง (Daneshvar et al., 2003; Khandegar and Saroha (2013)) ดังนั้น ระยะเวลาตกตะกอนที่เหมาะสมของระบบ EC โดยใช้ขี้วัว Fe คือ 45 นาที เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดสำหรับใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.6 ผลของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ด้วยระบบ EC แบบ Batch

ระยะเวลาใน การตกตะกอน (นาที)	ใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า		ใช้ Fe เป็นขั้วไฟฟ้า	
	ประสิทธิภาพการบำบัดสี ย้อม (Mean $\pm$ S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean $\pm$ S.D.)	ประสิทธิภาพการบำบัดสี ย้อม (Mean $\pm$ S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean $\pm$ S.D.)
15	99.83 $\pm$ 0.00	9.19 $\pm$ 0.01	89.29 $\pm$ 1.7	10.57 $\pm$ 0.05
30	99.75 $\pm$ 0.08	9.30 $\pm$ 0.11	91.12 $\pm$ 2.2	10.65 $\pm$ 0.07
45	99.87 $\pm$ 0.03	9.55 $\pm$ 0.14	91.90 $\pm$ 2.53	10.64 $\pm$ 0.02
60	99.87 $\pm$ 0.03	9.68 $\pm$ 0.00	82.9 $\pm$ 8.39	10.65 $\pm$ 0.05
120	99.84 $\pm$ 0.00	9.72 $\pm$ 0.04	83.23 $\pm$ 4.78	10.25 $\pm$ 0.03



รูปที่ 4.9 ผลของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe และ Al

#### 4.1.1.2 สีย้อม สีย้อม Vat

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัด EC ในการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ขั้ว Fe และ Al เป็นขั้วไฟฟ้า ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาในการตกตะกอน มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

##### 1) ผลการศึกษาผลความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม

ในการศึกษานี้เตรียมสารละลายสีย้อม Vat ที่มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ 20 40 60 80 100 120 และ 140 mg/l มีปริมาตร 600 ml ความเข้มข้นของสาร

อิเล็กโทรไลต์ 0.06 g/l, pH อยู่ในช่วง 6-7, ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นเท่ากับ 20 V, ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที ทั้งระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al และ Fe ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC แสดงรายละเอียดผลการศึกษาในตารางที่ 4.7 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.10

#### 1.1) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว Al

ผลการศึกษา ระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Vat เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC ของขั้ว Al มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 50.18 ที่ความเข้มข้นสีย้อม Vat 20 mg/l เป็นร้อยละ 96.66 ที่ความเข้มข้นสีย้อม Vat 140 mg/l (ตารางที่ 4.7) โดยพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Vat 140 mg/L มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 96.66 ซึ่งผลการศึกษาที่ได้เป็นเช่นเดียวกับสีย้อม Acid เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม Vat มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสไฟฟ้าในวงจรเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้จากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ขณะทำปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.15 A ที่ความเข้มข้นสีย้อม 20 mg/l เป็น 0.23 A ที่ความเข้มข้นสีย้อม 140 mg/l ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มสูงขึ้นด้วย และการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสสาร Coagulant ได้มากกว่าความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมที่มีค่าต่ำ ดังนั้น ที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสีย้อม Vat เริ่มต้นจะมีความต้องการสาร Coagulant มากขึ้น จะส่งผลทำให้เกิด Floc ได้ดีขึ้น ในขณะเดียวกันน้ำที่มีความเข้มข้นสีย้อม Vat สูงจะทำให้มีความขุ่นสูงจึงมีความต้องการสาร Coagulant น้อยกว่าเนื่องจาก Floc มีโอกาสรวมตัวกันได้ดีกว่า นอกจากนี้ปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่ขั้วแคโทดทำให้เกิดการใช้  $H^+$  ในการสร้างก๊าซ  $H_2$  ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ดังนั้น ปริมาณของ  $H^+$  จึงลดลง ส่งผลให้ pH หลังการบำบัดสีย้อมด้วย EC จึงเพิ่มขึ้น โดย pH ก่อนการทดลองจะอยู่ในช่วง 6.01-6.04 และหลังการทดลองอยู่ในช่วง 8.24-8.98 ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Al จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Vat เท่ากับ 140 mg/L เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด และจากการทดสอบค่าสถิติพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมที่ความเข้มข้น 60-140 mg/l ประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จึงเลือกใช้ความเข้มข้นสีย้อมที่ 140 mg/l ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงที่สุด

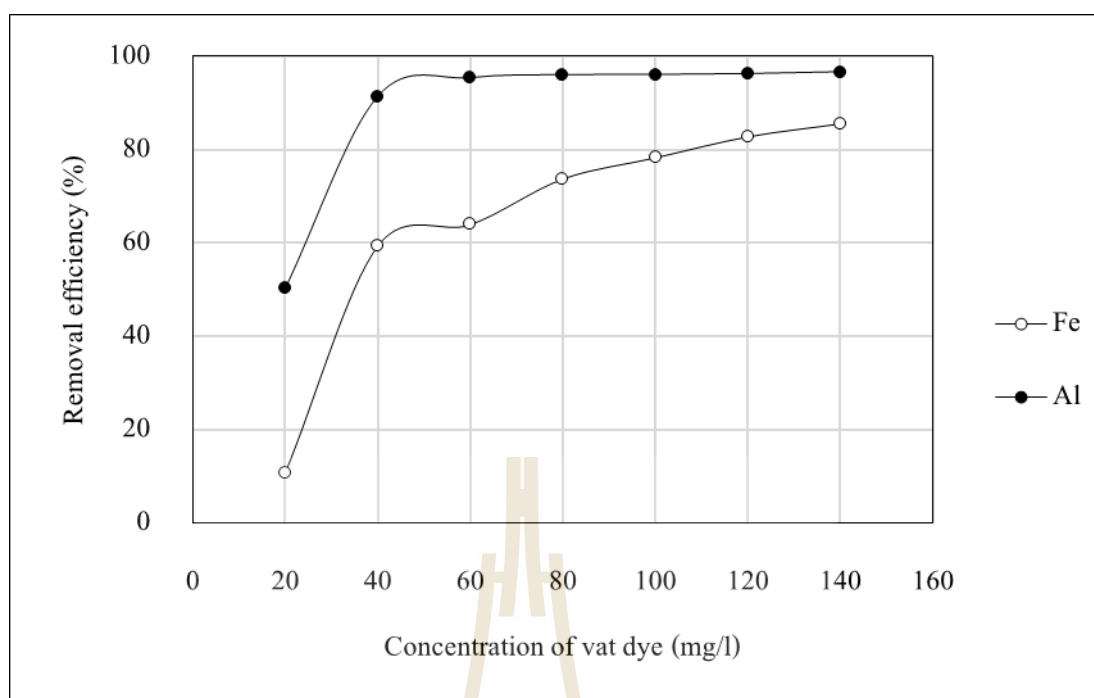
#### 1.2) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว Fe

ผลการศึกษา ระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม Vat เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC ของขั้ว Al มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 50.18 ที่ความเข้มข้นสีย้อม Vat 20 mg/l เป็นร้อยละ 96.66 ที่ความเข้มข้นสีย้อม Vat 140 mg/l (ตารางที่ 4.7) โดยพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

ลีสיום Vat 140 mg/L มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 96.66 ซึ่งผลการศึกษาที่ได้เป็นเช่นเดียวกับลีสיום Acid เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของลีสיום Vat มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสไฟฟ้าในวงจรเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้จากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ขณะทำปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.15 A ที่ความเข้มข้นลีสיום 20 mg/l เป็น 0.23 A ที่ความเข้มข้นลีสיום 140 mg/l ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มสูงขึ้นด้วย และการเพิ่มความเข้มข้นของลีสיוםเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสสาร Coagulant ได้มากกว่าความเข้มข้นเริ่มต้นลีสיוםที่มีค่าต่ำ ดังนั้น ที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นลีสיום Vat เริ่มต้นจะมีความต้องการสาร Coagulant มากขึ้น จะส่งผลทำให้เกิด Floc ได้ดีขึ้น ในขณะที่เดียวกันน้ำที่มีความเข้มข้นลีสיום Vat สูงจะทำให้มีความขุ่นสูงจึงมีความต้องการสาร Coagulant น้อยกว่าเนื่องจาก Floc มีโอกาสรวมตัวกันได้ดีกว่า นอกจากนี้ปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่ขุ่นแคะโทดทำให้เกิดการใช้  $H^+$  ในการสร้างก๊าซ  $H_2$  ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ดังนั้น ปริมาณของ  $H^+$  จึงลดลง ส่งผลให้ pH หลังการบำบัดลีสיוםด้วย EC จึงเพิ่มขึ้น โดย pH ก่อนการทดลองจะอยู่ในช่วง 6.01-6.04 และหลังการทดลองอยู่ในช่วง 8.24-8.98 ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Al จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นลีสיום Vat เท่ากับ 140 mg/L เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด และจากการทดสอบค่าสถิติพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดลีสיוםที่ความเข้มข้น 60-140 mg/l ประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จึงเลือกใช้ความเข้มข้นลีสיוםที่ 140 mg/l ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงที่สุด

ตารางที่ 4.7 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของลีสיום Vat ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיוםด้วยระบบ EC แบบ Batch

ความเข้มข้นเริ่มต้นของลีสיום (mg/l)	ใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า		ใช้ Fe เป็นขั้วไฟฟ้า	
	ประสิทธิภาพการบำบัดลีสיום (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)	ประสิทธิภาพการบำบัดลีสיום (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)
20	50.18±3.11	8.42±0.14	10.81±3.09	7.63±0.1
40	91.41±0.42	8.24±0.35	59.47±0.16	9.55±0.01
60	95.38±0.43	8.54±0.20	64.02±2.98	8.81±0.45
80	96.03±0.53	8.09±0.34	73.81±2.72	9.38±0.05
100	96.08±0.54	8.43±0.12	78.39±0.25	9.66±0.2
120	96.27±0.47	8.49±0.17	82.87±0.12	10.45±0.03
140	96.66±0.49	8.98±0.21	85.66±0.07	10.62±0.05



รูปที่ 4.10 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Vat ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของระบบ EC โดยใช้ขี้วัว Fe และ Al

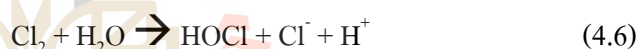
## 2) ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์

ในการศึกษานี้เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaCl ที่มีค่าความเข้มข้นแตกต่างกันได้แก่ 0.06 0.12 0.24 0.48 และ 0.96 g/l ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Vat 140 mg/l ทั้งขี้วัวไฟฟ้า Al และ Fe (ได้จากผลการศึกษาที่ผ่านมา), pH อยู่ในช่วง 6-7, แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 20 V, ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.8 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.11

### 2.1) ผลการศึกษาโดยใช้ขี้วัว Al

ผลการศึกษาของระบบ EC ที่ใช้ขี้วัว Al จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบ EC ของขี้วัว Al มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 96.71 ที่ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.06 g/l เป็น 97.57 ที่ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ 0.24 g/l (ตารางที่ 4.8) และลดลงจากร้อยละ 97.57 ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ 0.24 g/l เป็นร้อยละ 96.66 ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l โดยพบว่าที่ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ 0.24 g/l มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 97.57 เนื่องจากการเติม NaCl นอกจากจะช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายแล้ว

ยังช่วยในการบำบัดสีข้อมเพราะ NaCl จะสามารถแตกตัวกลายเป็น HOCl ได้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่ง HOCl นี้เองเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีส่วนช่วยให้เกิดการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสีทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลสีแตกออก แต่เมื่อปริมาณ NaCl เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีปริมาณสาร Coagulant ที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการกลับตัวของประจุคอลลอยด์และการปรับโครงสร้างของคอลลอยด์ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพขึ้นอีกครั้ง จากนั้นอัตราของการเกิด Coagulation จะต่ำและการรวมตัวของฟล็อกค่อนข้างน้อยทำให้เกิดประสิทธิภาพในการบำบัดได้ไม่ดี นอกจากนี้การเติม NaCl มากเกินไปอาจส่งผลให้ปฏิกิริยาการก่อตะกอนของโลหะและนำไปสู่การลดลงของ OH<sup>-</sup> จากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ (Garcia-Segura et al., 2017) ดังสมการที่ (4.5-4.8) เนื่องจากคลอไรด์ให้อิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนดกลายเป็นคลอรีน จากนั้นคลอรีนเกิดการรวมตัวกับน้ำทำให้เกิด H<sup>+</sup> และ H<sup>+</sup> รัับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดดังสมการที่ 4.6 เกิดก๊าซ H<sub>2</sub> ดังนั้น การเติม NaCl มากเกินไปจะส่งผลให้ OH<sup>-</sup> ลดลงจึงไม่สามารถเกิดเป็นสาร Coagulant หรือโลหะไฮดรอกไซด์ได้ ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Al จึงเลือกใช้ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 0.24 g/L เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดและประสิทธิภาพการบำบัดแตกต่างจากการใช้ NaCl 0.06 และ 0.96 g/l อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



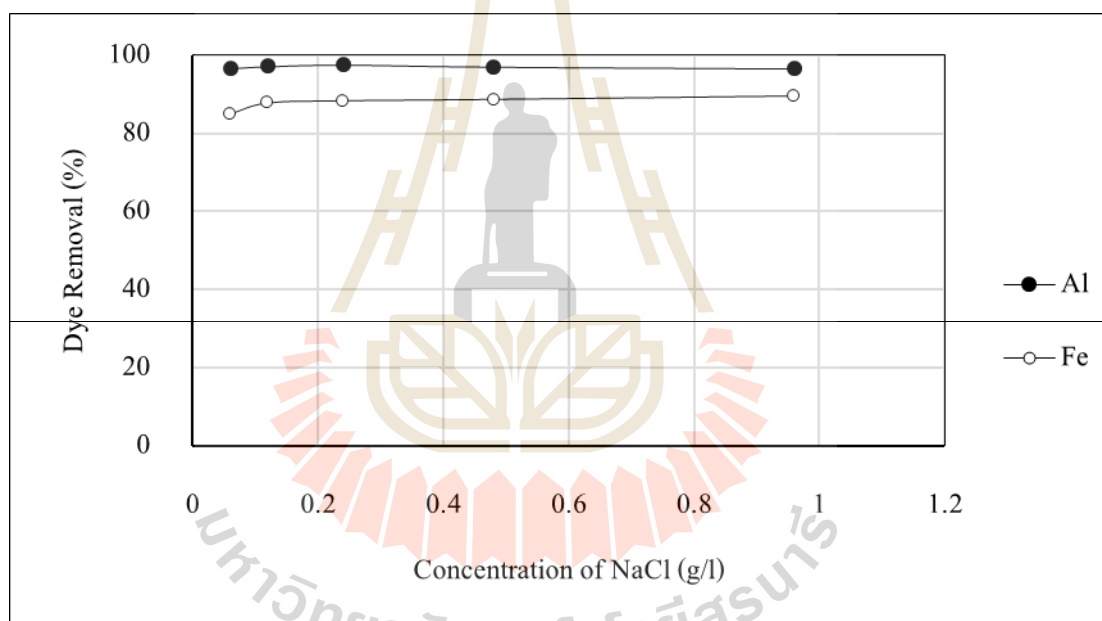
## 2.2) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว Fe

ผลการศึกษาในระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Fe จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมของระบบ EC ของขั้ว Al มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 84.86 ที่ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.06 g/l เป็น 89.68 ที่ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l (ตารางที่ 4.8) โดยพบว่าที่ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 89.68 ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe จึงเลือกใช้ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 0.96 g/L เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด



ตารางที่ 4.8 ผลความเข้มข้นสารอเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ด้วยระบบ EC แบบ Batch

ความเข้มข้น สารอเล็กโทรไลต์ ไลต์ (g/l)	ใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า		ใช้ Fe เป็นขั้วไฟฟ้า	
	ประสิทธิภาพการบำบัด สีย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)	ประสิทธิภาพการบำบัดสี ย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)
0.06	96.71±0.37	8.92±0.01	84.86±1.49	9.93±0.02
0.12	97.19±0.02	8.83±0.01	87.81±0.31	10.30±0.08
0.24	97.57±0.28	8.84±0.04	88.40±0.11	10.49±0.01
0.48	97.10±0.05	9.20±0.12	88.78±0.07	10.49±0.01
0.96	96.66±0.31	9.23±0.03	89.68±0.84	10.47±0.01



รูปที่ 4.11 ผลของความเข้มข้นสารอเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe และ Al

### 3) ผลการศึกษาผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น

ในการศึกษานี้ปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน ได้แก่ 5 10 15 และ 20 Volt สำหรับระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอเล็กโทรไลต์ 0.24 g/l (ได้จากผลการศึกษาที่ผ่านมา) และสำหรับขั้ว Fe ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ที่กำหนดไว้ทั้ง 2



ระบบคือ ค่า pH อยู่ในช่วง 6-7 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที และ ระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.9 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.12

### 3.1) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว AI

ผลการศึกษาของระบบ EC ที่ใช้ขั้ว AI จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าค่าเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบ EC ที่ใช้ขั้ว AI มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 96.69 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 5 Volt เป็น 97.70 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 20 Volt (ตารางที่ 4.9) ผลการศึกษาที่ได้เป็นไปตามสีย้อม Acid แต่เนื่องจากการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 20 Volt ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรมีค่าเกินขีดจำกัดของเครื่องจ่ายไฟฟ้า จึงทำให้การใช้ความต่างศักย์ 20 Volt ถูกปรับลดลงมาเป็น 17 Volt ด้วยตัวเครื่องจ่ายไฟฟ้า ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำการศึกษาความต่างศักย์ที่ 17 Volt โดยพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมมากที่สุดคือร้อยละ 97.85 ดังนั้นจึงเลือกความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 17 Volt เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงสุดและประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมแตกต่างจากการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 5-10 Volt อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

### 3.2) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว Fe

ผลการศึกษาของระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Fe จากผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Fe มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 83.22 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 5 Volt เป็น 86.88 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 20 Volt (ตารางที่ 4.9) โดยพบว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 20 Volt มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 86.88 ซึ่งในการเพิ่มความต่างศักย์มีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat ได้ดีมากขึ้นเนื่องจากการก่อตัวของสาร Coagulant เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวกับสีย้อมได้มากขึ้น ดังนั้น จึงเลือกความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 20 Volt เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงสุดและประสิทธิภาพการบำบัดแตกต่างจากการใช้ความต่างศักย์เริ่มต้น 5-10 Volt อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

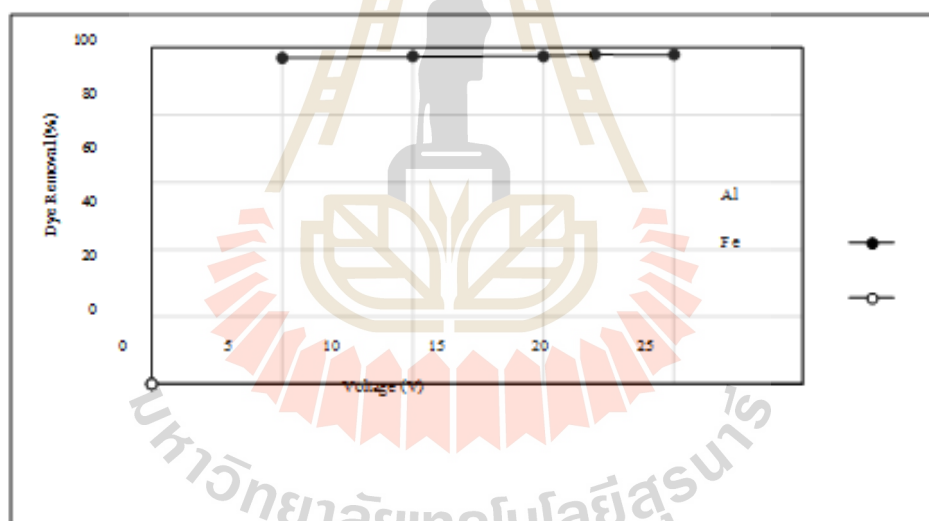
### 4) ผลการศึกษาผลของ pH เริ่มต้น

ในการศึกษานี้ปรับค่า pH แตกต่างกันได้แก่ 3 5 6 8 และ 10 สำหรับระบบ EC ที่ใช้ขั้ว AI ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.24 g/l, ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 15 V และสำหรับขั้ว Fe ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l, ความต่างศักย์ 20 V (จากผลการศึกษาที่ผ่านมา) ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที และ ระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด

ลีสีย้อม Acid ของระบบ EC แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.1 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.9 ผลความต่างศักย์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสีย้อม Vat ด้วยระบบ EC แบบ Batch

ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า เริ่มต้น (Volt)	ใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า		ใช้ Fe เป็นขั้วไฟฟ้า	
	ประสิทธิภาพการบำบัด ลีสีย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)	ประสิทธิภาพการบำบัดลีสีย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)
5	96.69±0.32	8.51±0.02	83.22±0.91	10.29±0.01
10	97.08±0.03	8.52±0.21	84.88±0.56	10.58±0.04
15	97.46±0.04	8.80±0.01	85.89±0.44	10.55±0.01
17	97.85±0.02	9.03±0.10	-	-
20	97.70±0.15	8.81±0.001	86.88±0.11	10.48±0.02

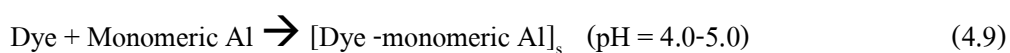


รูปที่ 4.12 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดลีสีย้อม Vat ของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe และ Al

#### 4.1) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว Al

ผลการศึกษาระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al แสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า pH ของสารละลายลีสีย้อม Vat เพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 5 ส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดลีสีย้อมของระบบ EC มีแนวโน้มสูงขึ้นจากร้อยละ 81.52 ที่ pH 3 เป็น 97.44 ที่ pH 10 (ตารางที่ 4.13) โดยพบว่าที่ pH 5 มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 97.44 และประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้ม

ลดลงจาก ร้อยละ 97.44 ที่ pH 5 เป็น 96.83 และมีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงสุดร้อยละ 97.44 ที่ pH 5 ซึ่งจากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 2.3 พบว่าช่วง pH ที่เหมาะสมสำหรับ Al ในการสร้างตะกอนคือช่วง pH 4-7 และที่ pH ช่วง 4-6 จะเกิด Monomeric และ Polymeric ของ Al ที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำจึงจับตัวกับสีย้อมได้ดัง ดังแสดงในสมการที่ 4.9 และ 4.10



ดังนั้น ในการศึกษาขั้นตอนต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขี้ Al จึงเลือกใช้ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 5 เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงสุดและจากการทดสอบทางสถิติพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ pH เริ่มต้นจาก 5-10 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีค่า pH ของน้ำเสียอยู่ในช่วง 6.88-9.50 จึงไม่จำเป็นต้องปรับ pH เนื่องจากระบบ EC สามารถบำบัดสีย้อมได้ในช่วง pH ที่กว้าง

#### 4.2) ผลการศึกษาโดยใช้ขี้ Fe

ผลการศึกษาของระบบ EC ที่ใช้ขี้ Fe พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า pH ของสีย้อม Vat เพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 6 จะส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 87.78 ที่ pH 3 เป็น 90.41 ที่ pH 6 และลดลงจากร้อยละ 90.41 ที่ pH 6 เป็น 87.27 ที่ pH 10 (ตารางที่ 4.13) โดยพบว่าที่ pH 6 มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 90.41 เนื่องจาก pH ที่เหมาะสมสำหรับการใช้เหล็กเป็นขี้ไฟฟ้าอยู่ในช่วง pH 4-7 (Hakizimana, 2017) และที่ pH 6.2-9.6 รูปของโลหะไฮดรอกไซด์ จะอยู่ในรูป  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสาร Coagulant อยู่ในรูปไม่ละลายน้ำ สามารถบำบัดโมเลกุลของสีย้อมได้ ดังนั้น ในการศึกษาขั้นตอนต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขี้ Fe จึงเลือกใช้ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 6 เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงสุดและจากการทดสอบทางสถิติพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดที่ pH เริ่มต้นจาก 5-8 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอจึงไม่จำเป็นต้องปรับ pH เนื่องจากระบบ EC สามารถบำบัดสีย้อมได้

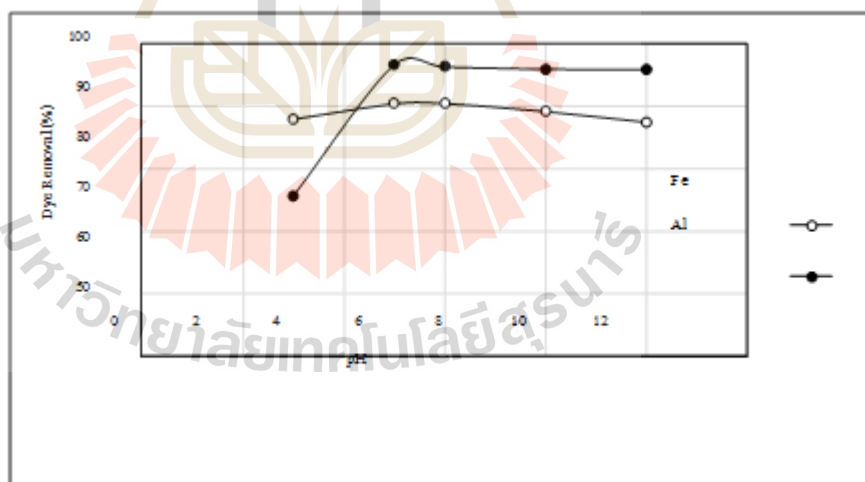
#### 5) ผลการศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ในการศึกษานี้ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันได้แก่ 10 15 20 25 และ 30 นาที สำหรับระบบ EC ที่ใช้ขี้ Al ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของ

สารอเล็กโทรไลต์ 0.24 g/l, ความต่างศักย์ 15 V, pH 5 และสำหรับระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l, ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 20 V, pH 6 (จากผลการศึกษาที่ผ่านมา) และ ระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.14 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.10 ผล pH เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ด้วยระบบ EC แบบ Batch

pH เริ่มต้น	ใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า		ใช้ Fe เป็นขั้วไฟฟ้า	
	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)
3	81.52±0.90	7.57±0.02	87.78±0.38	8.71±0.26
5	97.44±0.19	9.03±0.01	90.34±0.80	10.24±0.04
6	97.17±0.07	9.25±0.18	90.41±0.90	10.38±0.04
8	96.92±0.17	9.33±0.003	89.06±0.94	10.40±0.08
10	96.83±0.06	9.38±0.09	87.27±0.02	10.51±0.02



รูปที่ 4.13 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe และ Al

#### 5.1) ผลการศึกษาโดยใช้ขั้ว Al

ผลการศึกษาในระบบ EC ที่ใช้ขั้ว Al พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบ EC ของขั้ว Al มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 96.45

ที่ระยะเวลา 10 นาที เป็น 97.86 ที่ระยะเวลา 30 นาที (ตารางที่ 4.11) โดยพบว่าที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่ 30 นาที มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 97.86 เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเนื่องจากในระบบ EC มีปริมาณ  $Al(OH)_3$  เพิ่มมากขึ้นตามเวลาจึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อระยะเวลาผ่านไป ประสิทธิภาพการบำบัดจะคงที่ เนื่องจากมีจำนวนฟล็อกที่เพียงพอสำหรับการบำบัดมลพิษแล้ว ค่าประสิทธิภาพจึงไม่เปลี่ยนแปลง โดยผลการศึกษาค้นคว้าพบว่าที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 25-30 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ในช่วง 97.82-97.86 ซึ่งจะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้นไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้น ในการศึกษาขั้นตอนต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขี้วัว Al จึงเลือกใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด

#### 5.2) ผลการศึกษาโดยใช้ขี้วัว Fe

ผลการศึกษาในระบบ EC ที่ใช้ขี้วัว Fe พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม Vat ของระบบ EC ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมของระบบ EC ของขี้วัว Fe มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 86.98-91.09 (ตารางที่ 4.11) และลดลงจากร้อยละ 91.09 ที่ระยะเวลา 25 นาที เป็นร้อยละ 89.01 ที่ระยะเวลา 30 นาที เนื่องจากเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานทำให้ปริมาณของ  $H^+$  ถูกใช้ในการผลิตก๊าซ  $H_2$  ส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้น โดยค่า pH มากกว่า 9 จะพบ  $Fe(OH)_4^-$  ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำสูง และทำให้เป็นสาร Coagulant ที่ไม่ดี (Vepsalainen, 2012) ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีลดลง และพบว่าที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่ 25 นาที มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 91.09 โดยในช่วง 10-20 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากปริมาณของ Floc ที่เกิดขึ้นยังไม่มากพอที่จะรวมตัวกันแล้วเกิดเป็นกลุ่มก้อนตะกอนได้ภายในระยะเวลา 20 นาที แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นเป็น 25 นาที ส่งผลทำให้ Floc ที่เกิดขึ้นจะมีระยะเวลามากพอที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ดังนั้น ในการศึกษาขั้นตอนต่อไปของระบบ EC โดยใช้ขี้วัว Fe จึงเลือกใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 25 นาที เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมสูงสุดและประสิทธิภาพการบำบัดแตกต่างจากการใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 10-20 นาที แต่ไม่แตกต่างจากการใช้ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

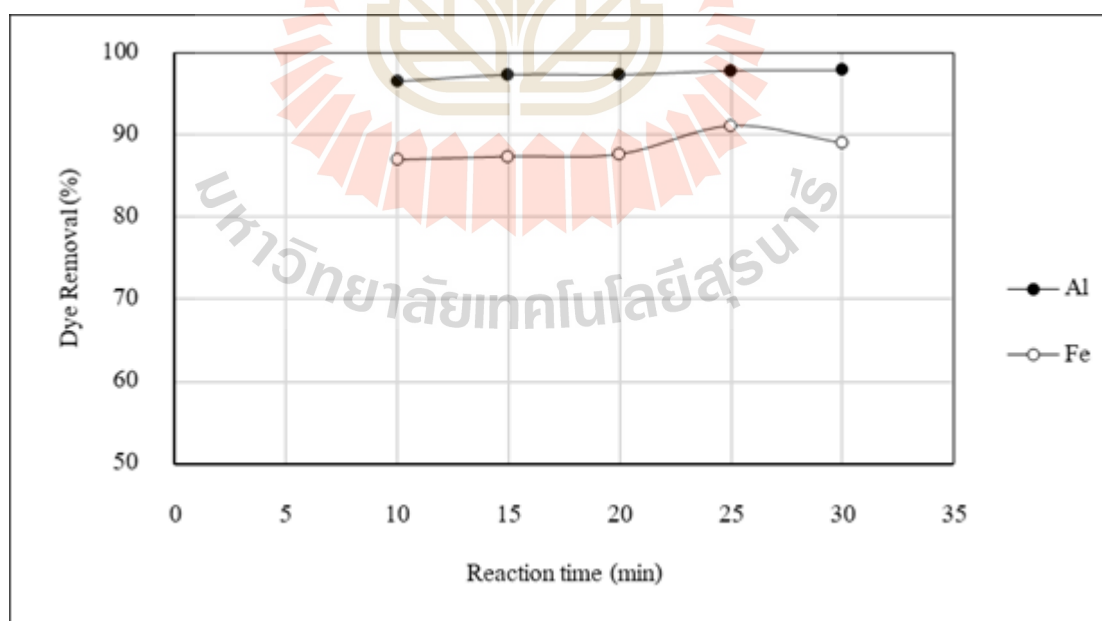
#### 6) ผลการศึกษาผลของระยะเวลาในการตกตะกอน

การศึกษานี้ใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนแตกต่างกันได้แก่ 15 30 45 60 และ 120 นาที สำหรับระบบ EC ที่ใช้ขี้วัว Al ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.24 g/l, ความต่างศักย์ 15 V, pH 5 และ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และ สำหรับระบบ EC ที่ใช้ขี้วัว Fe ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์

0.96 g/l, ความต่างศักย์ 20 V, pH 6 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที (จากผลการศึกษาที่ผ่านมา) ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.15 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.11 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ด้วยระบบ EC แบบ Batch

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า		ใช้ Fe เป็นขั้วไฟฟ้า	
	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)
10	96.45±0.53	8.82±0.02	86.98±0.43	10.34±0.04
15	97.31±0.24	8.91±0.03	87.38±0.14	10.42±0.02
20	97.30±0.25	8.85±0.06	87.66±0.01	10.37±0.01
25	97.82±0.03	8.99±0.01	91.09±0.10	10.40±0.01
30	97.86±0.04	9.04±0.04	89.01±2.47	10.29±0.15



รูปที่ 4.14 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe และ Al



#### 6.1) ผลการศึกษาโดยใช้ขี้ AI

ผลการศึกษาระบบ EC ที่ใช้ขี้ AI พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม Vat ของระบบ EC ดังแสดงในรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษไม่ค่อยแตกต่างกัน โดยประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ในช่วงร้อยละ 96.93-97.44 (ตารางที่ 4.12) โดยพบว่าที่ระยะเวลาตกตะกอน 60 นาที มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดที่ร้อยละ 97.44 แต่เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้น จึงเลือกใช้ระยะเวลาตกตะกอนที่ 15 นาที เพื่อเป็นการลดระยะเวลาในการบำบัดสีข้อมสำหรับระยะเวลาตกตะกอนที่เหมาะสมของระบบ EC โดยใช้ขี้ AI

#### 6.2) ผลการศึกษาโดยใช้ขี้ Fe

ผลการศึกษาระบบ EC ที่ใช้ขี้ Fe พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม Vat ของระบบ EC ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากระยะเวลาในการตกตะกอน 15-60 นาที โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในช่วงร้อยละ 85.75-87.40 และประสิทธิภาพลดลงหลังจากระยะเวลาตกตะกอนผ่านไป 60-120 นาที โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดลดลงอยู่ในช่วง 87.40-87.17 โดยพบว่าที่ระยะเวลาตกตะกอน 60 นาที มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด ซึ่งผลการศึกษาที่ได้เป็นเช่นเดียวกับสีข้อม Acid ที่ใช้ขี้เหล็กเป็นขี้ไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาตกตะกอนประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษหรือสีข้อมจะเพิ่มขึ้นเพราะสาร Coagulant จะมีระยะเวลามากขึ้นในการจับตัวกับสีข้อมและตกตะกอนเพิ่มขึ้น แต่จากผลการทดลองเมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการบำบัดลดลงหลังระยะเวลาตกตะกอน 60 นาที เนื่องจากตะกอนที่เกิดการ Flotation ด้านบนของผิวน้ำเริ่มมีการตกลงมาทำให้เมื่อเวลาเก็บน้ำที่ส่วนใสด้านล่างทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลง และนอกจากนี้การให้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่มากเกินไประยะเวลาที่เหมาะสมจะส่งผลให้มลพิษในสารละลายเกิดการดูดซับกลับเข้าไปในสารละลาย จึงทำให้มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง ดังนั้น ระยะเวลาตกตะกอนที่เหมาะสมของระบบ EC โดยใช้ขี้ Fe คือ 60 นาที เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดและประสิทธิภาพการบำบัดแตกต่างจากการใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนจาก 15-120 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

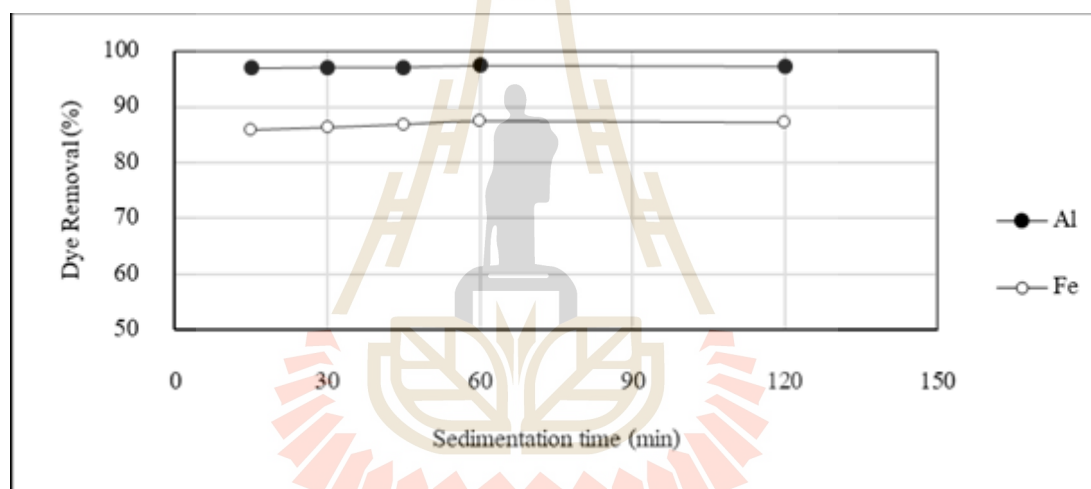
#### 4.1.2 สรุปสถานะที่เหมาะสมของชุดการทดลอง EC แบบ Batch

จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม Acid และ สีข้อม Vat ของชุดการทดลอง EC ที่ใช้ขี้ Fe และ AI นำมาสรุปค่าปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับระบบ EC ดังนี้



ตารางที่ 4.12 ผลของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ด้วยระบบ EC แบบ Batch

ระยะเวลาใน การตกตะกอน (นาที)	ใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า		ใช้ Fe เป็นขั้วไฟฟ้า	
	ประสิทธิภาพการบำบัด สีย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)	ประสิทธิภาพการบำบัดสี ย้อม (Mean±S.D.)	pH หลังบำบัด (Mean±S.D.)
15	96.93±0.50	8.98±0.02	85.78±0.06	10.35±0.01
30	97.11±0.35	9.02±0.08	86.25±0.02	10.52±0.03
45	97.13±0.05	9.07±0.02	86.81±0.04	10.53±0.03
60	97.44±0.17	9.11±0.04	87.40±0.06	10.61±0.05
120	97.31±0.05	9.23±0.08	87.17±0.01	10.31±0.01



รูปที่ 4.15 ผลของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC โดยใช้ขั้ว Fe และ Al

#### 4.1.2.1 สีย้อม Acid

จากผลการศึกษาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC ในหัวข้อที่ 4.1.1.1 สรุปสภาวะที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 4.13 ดังนี้

สภาวะที่เหมาะสมของขั้ว Al ประกอบไปด้วย ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l, ความต่างศักย์ 12.5 V pH 3, ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที และระยะเวลาตกตะกอน 15 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมร้อยละ 99.83±0.05

สภาวะที่เหมาะสมของขั้ว Fe ประกอบไปด้วย ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.48 g/l, ความต่างศักย์ 15 V pH 10, ระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม ร้อยละ 91.90±2.53

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมพบว่า ขั้วไฟฟ้า Al มี ประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าขั้วไฟฟ้า Fe เนื่องจากการใช้ขั้วไฟฟ้า Al ทำให้เกิด  $Al(OH)_3$  ซึ่งมี พื้นที่ผิวสูงกว่า  $Fe(OH)_3$  เป็นประโยชน์สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้และการดักจับ อนุภาคคอลลอยด์ (Aoudj et al., 2010) ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และจาก การศึกษาค่าความสามารถในการละลายน้ำ ( $K_{sp}$ ) ของ  $Al(OH)_3$  และ  $Fe(OH)_3$  พบว่าค่า  $K_{sp}$  เท่ากับ  $4.6 \times 10^{-33}$  และ  $2.5 \times 10^{-39}$  ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าความสามารถในการละลายน้ำของ  $Al(OH)_3$  มี ค่าความสามารถในการละลายน้ำมากกว่า  $Fe(OH)_3$  ดังนั้น ในการทำปฏิกิริยากับอนุภาคของสีย้อม สาร Coagulant  $Al^{3+}$  จึงสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าสาร Coagulant  $Fe^{3+}$  ส่งผลทำให้ระบบ EC โดยใช้  $Al^{3+}$  มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงกว่าขั้ว  $Fe^{3+}$  นั่นเอง

#### 4.1.2.2 สีย้อม Vat

จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC ในหัวข้อที่ 4.1.1.2 สรุปสภาวะที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 4.13 ดังนี้

สภาวะที่เหมาะสมของขั้ว Al ประกอบไปด้วย ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.24 g/l, ความต่างศักย์ 15 V pH 5, ระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และระยะเวลาตกตะกอน 45 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม ร้อยละ 97.44±0.17

สภาวะที่เหมาะสมของขั้ว Fe ประกอบไปด้วย ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l, ความต่างศักย์ 20 V pH 6, ระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยา 25 นาที และระยะเวลาตกตะกอน 60 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมร้อยละ 87.40±0.06 จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมพบว่า ขั้วไฟฟ้า Al มี ประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าขั้วไฟฟ้า Fe ซึ่งผลการศึกษาที่ได้เป็นเช่นเดียวกันกับสีย้อม Acid

#### 4.1.3 สรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ EC แบบ Batch

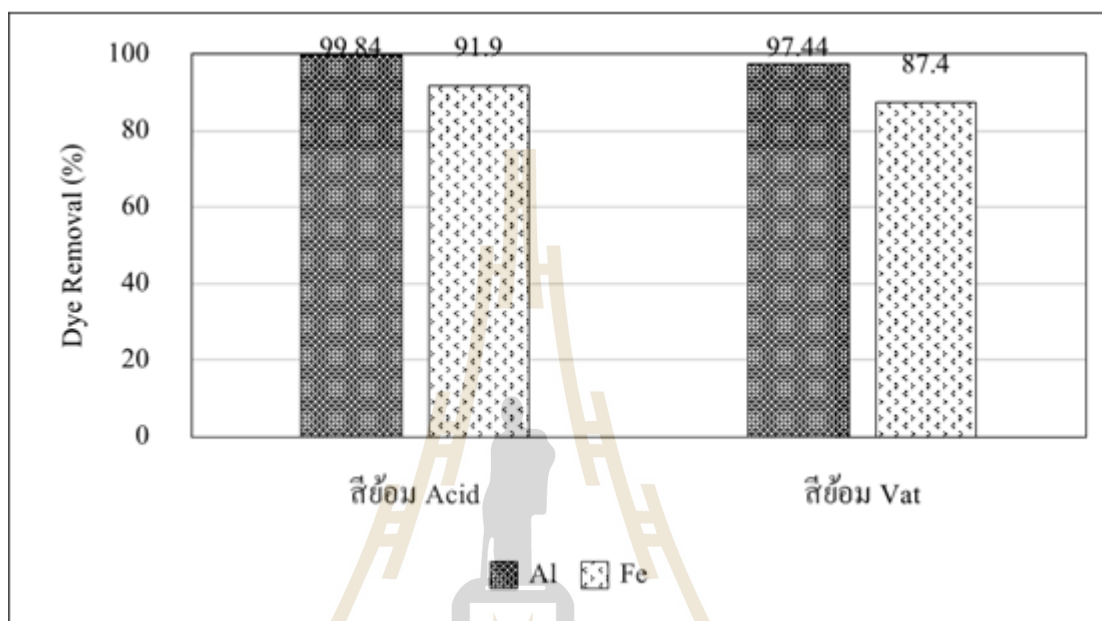
จากผลการศึกษาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าระบบ EC มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ดีกว่าสีย้อม Vat เนื่องจาก โครงสร้าง ของสีย้อมดังแสดงในรูปที่ 3.3 (บทที่ 3) เมื่อเทียบกับโครงสร้างสีย้อม Acid ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (บทที่ 3) จะเห็นได้ว่าสีย้อม Acid จะมีหมู่ฟังก์ชัน  $OH^-$  ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดีกว่า เนื่องจากมี คุณสมบัติเป็นสีย้อมประเภทละลายน้ำ ส่วนโครงสร้างของสีย้อม Vat มีหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอนิล

ตารางที่ 4.13 สรุปสถานะที่เหมาะสมของระบบ EC แบบ Batch

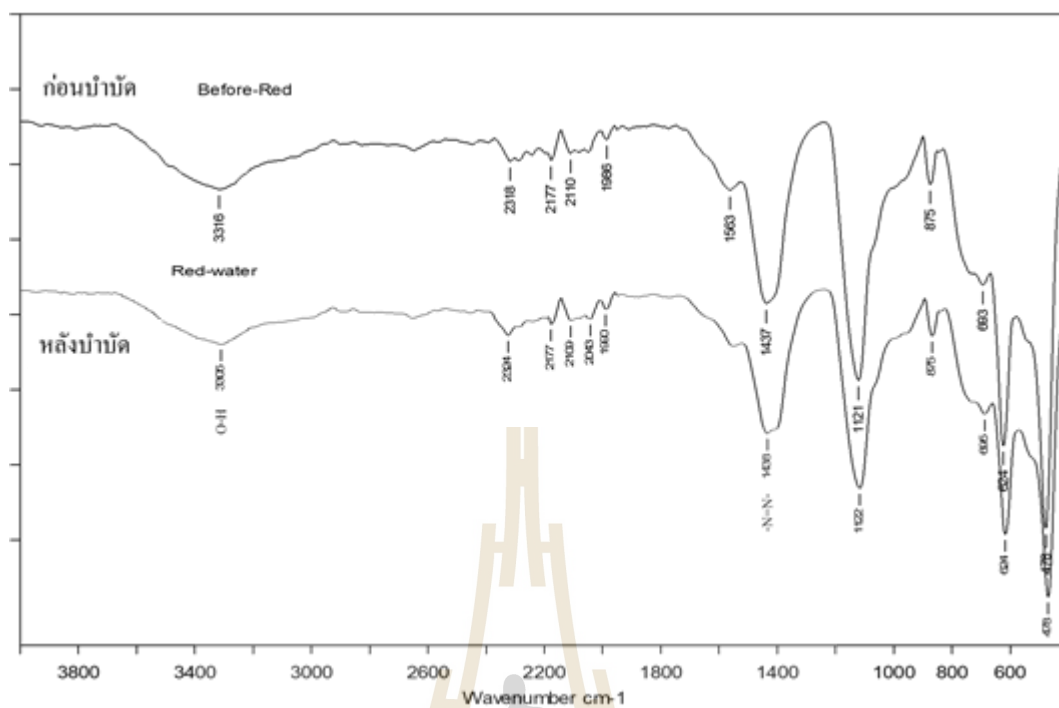
ปัจจัย	หน่วย	สีข้อม Acid		สีข้อม Vat	
ขั้วไฟฟ้า	-	Al	Fe	Al	Fe
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม	mg/l	140	140	140	140
ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทไลต์	g/l	0.96	0.48	0.24	0.96
ความต่างศักย์	Volt	12.5	15	15	20
pH	-	3	10	5	6
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	min	25	30	30	25
ระยะเวลาในการตกตะกอน	min	15	45	15	60

(C=O) ซึ่งจากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าสภาพนำไฟฟ้าของไอออนต่างๆจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยน้ำที่มี OH<sup>-</sup> จะวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าได้สูงกว่าไอออนตัวอื่น ๆ (มันสิน และ มันรักษ์, 2545) สอดคล้องกับผลการศึกษาคั้งนี้ที่พบว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าของสีข้อม Vat ที่ความเข้มข้น 140 mg/l มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 44.07-54.30  $\mu\text{s}/\text{cm}$  และสีข้อม Acid มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 154.33-206.67  $\mu\text{s}/\text{cm}$  ส่งผลทำให้ในการบำบัดสีข้อม Acid ด้วยระบบ EC แบบ Batch มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรสูงกว่าสีข้อม Vat จึงส่งผลให้มีปริมาณสาร Coagulant ก่อตะกอนมากกว่าการบำบัดสีข้อม Vat ทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสีข้อม Acid ซึ่งเป็นสีข้อมละลายน้ำแต่อย่างไรก็ตามระบบ EC มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมได้ทั้งแบบละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสีข้อม Acid และสีข้อม Vat ด้วยเทคนิค Fourier transform Infrared (FTIR) Spectroscopy ผลการศึกษาของสีข้อม Acid แสดงในรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของสีข้อม Acid พบว่าก่อนการบำบัดด้วย EC แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1437  $\text{cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ -N=N- เป็นหมู่โครโมฟอร์ Azo เป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีในสีข้อม และที่ความถี่ 3316 เป็นการสั่นของ OH ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหนึ่งในโครงสร้างของสีข้อม Acid เมื่อทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมของสีข้อม Acid ก่อนและหลังการบำบัดด้วย EC พบว่าแถบการดูดกลืนแสงทั้งสองตำแหน่งนี้เกิดการเลื่อนตำแหน่งจึงมีความเป็นไปได้ว่า  $\text{Al}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$  ทำปฏิกิริยากับหมู่โครโมฟอร์ (-N=N-) ของโครงสร้างสีข้อม โดยเข้าไปทำลายพันธะโครโมฟอร์ ส่งผลทำให้สีข้อมถูกกำจัด (ศิริลักษณ์ และจิตลดา, 2560) ผลการวิเคราะห์พันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสีข้อม Vat ด้วยเทคนิค FTIR Spectroscopy แสดงในรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.15 พบว่าก่อนการบำบัดด้วย EC แถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1411  $\text{cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ -N=N- และหลังการบำบัดด้วย EC พบว่าแถบการดูดกลืนแสงเกิดการเลื่อนตำแหน่งซึ่งเป็นเช่นเดียวกับสีข้อม Acid เนื่องจากเกิดการทำลายพันธะโครโมฟอร์

และหลังการบำบัดพบแถบการดูดกลืนแสงที่ความถี่ 3408 เป็นการสั่นของ OH แต่ก่อนการบำบัดไม่พบหมู่ฟังก์ชันนี้เนื่องจากโครงสร้างสี้อม Vat ไม่มีหมู่ OH เป็นองค์ประกอบ ซึ่งการพบ OH สามารถบอกได้ว่าน้ำหลังการบำบัดมีสาร Coagulant ที่อยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการบำบัดด้วย EC อยู่ในสารละลาย



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสี้อมของสถานะที่เหมาะสมในระบบ EC แบบ Batch



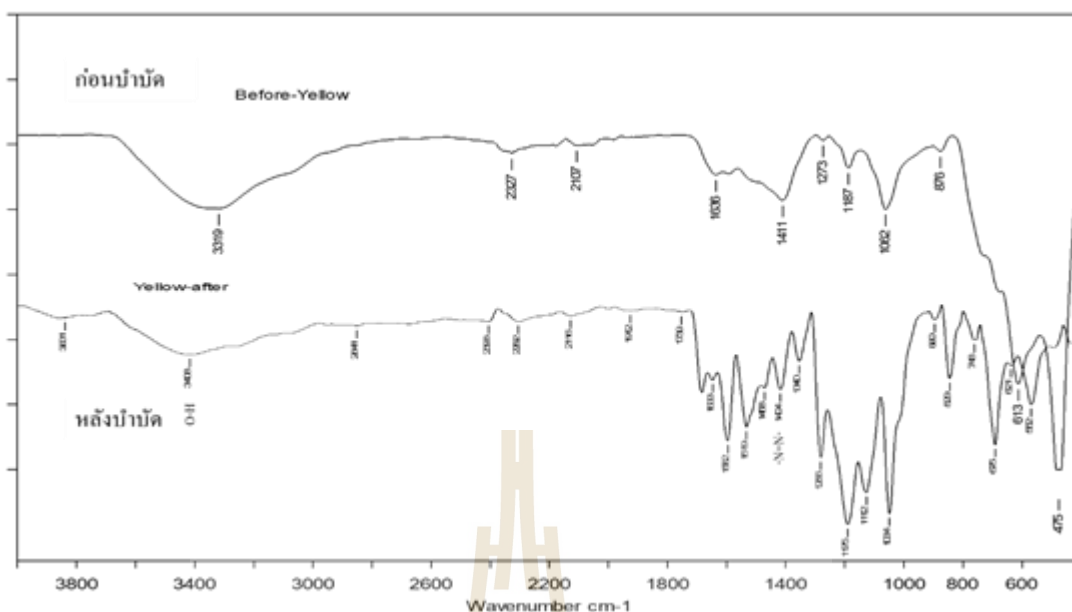
รูปที่ 4.17 FT-IR spectrum ของสีย้อม Acid ก่อนและหลังบำบัดด้วยระบบ EC

ตารางที่ 4.14 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของสีย้อม Acid ก่อนและหลังบำบัดด้วยระบบ EC

หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	สเปกตรัมก่อน EC (cm <sup>-1</sup> )	สเปกตรัมหลัง EC (cm <sup>-1</sup> )	การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัม
-N=N-	Azo	1437	1438	1
O-H	Hydroxide	3316	3305	11

ตารางที่ 4.15 ผลการศึกษา FT-IR spectrum ของสีย้อม Vat ก่อนและหลังบำบัดด้วยระบบ EC

หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	สเปกตรัมก่อน EC (cm <sup>-1</sup> )	สเปกตรัมหลัง EC (cm <sup>-1</sup> )	การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัม
-N=N-	Azo	1411	1404	7
O-H	Hydroxide	ไม่พบ	3408	-



รูปที่ 4.18 FT-IR spectrum ของสีย้อม Vat ก่อนและหลังบำบัดด้วยระบบ EC

#### 4.1.4 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อมของระบบ CC แบบ Batch

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัด CC ในการบำบัดสีย้อม Acid และสีย้อม Vat โดยใช้ PACl และ  $\text{FeCl}_3$  เป็นสาร Coagulant โดยใช้ Polymer เป็นสารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant Aids) และกำหนดสถานะในการทดสอบ Jar Test แสดงดังตารางที่ 3.8 (บทที่ 3) ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของ Polymer และ pH เริ่มต้น รายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

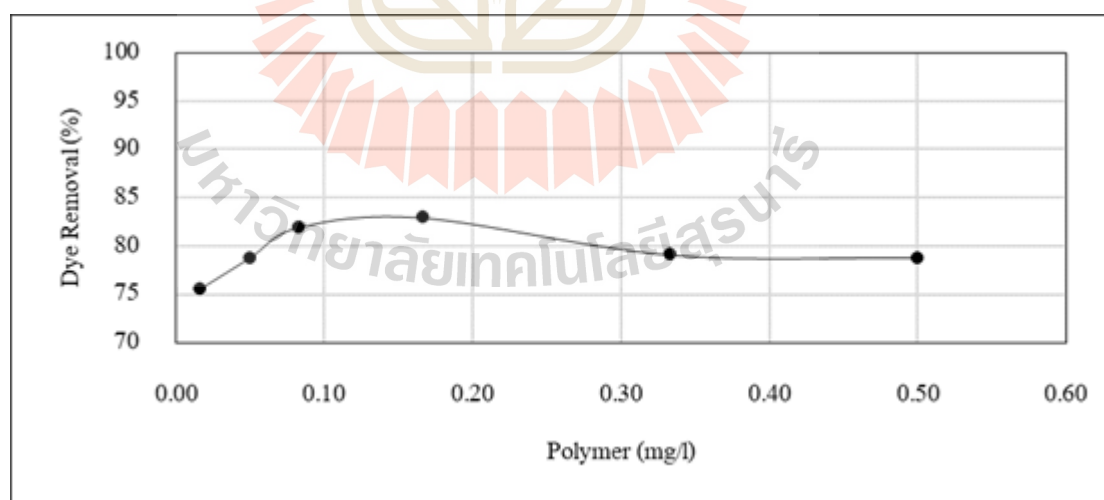
##### 4.1.4.1 สีย้อม Acid

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ CC โดยใช้ PACl และ  $\text{FeCl}_3$  เป็นสาร Coagulant ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของ Polymer และ pH เริ่มต้น รายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

- 1) ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ PACl เป็นสาร Coagulant ในการศึกษาที่กำหนดความเข้มข้นสารละลายสีย้อม Acid ที่ค่าความเข้มข้น 140 mg/l ปริมาตร 600 ml ความเข้มข้นของ PACl เท่ากับ 0.145 g/l as  $\text{Al}^{3+}$  มีรายละเอียดผลการศึกษา ดังนี้
 

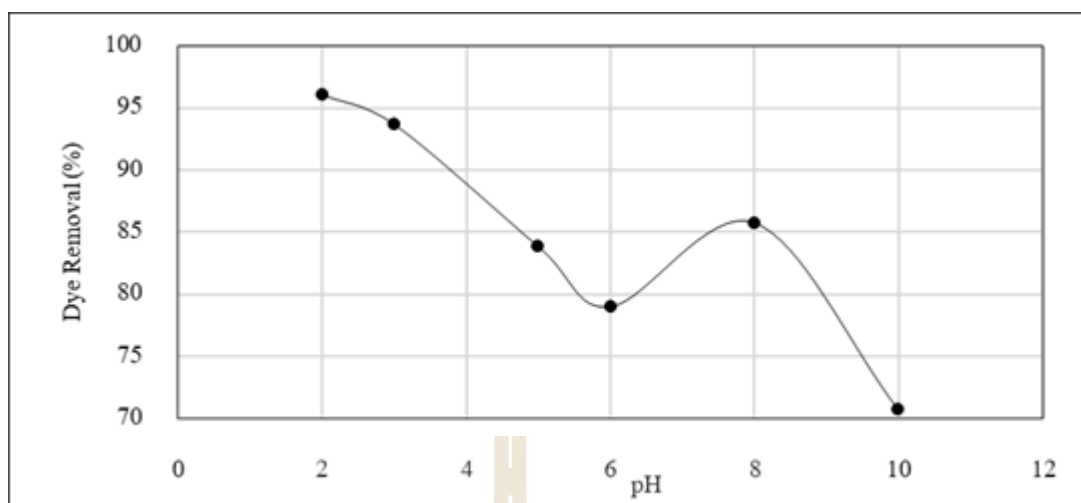
ทำการศึกษาค่าปริมาณ Polymer ที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อม Acid โดยควบคุมค่า pH ของสารละลายสีย้อมอยู่ในช่วง 6-7 ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าที่ค่าความเข้มข้น Polymer เท่ากับ 0.17 mg/L มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid สูงสุด เท่ากับร้อยละ 82.90 ต่อมาจึงทำการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อม Acid โดย

ทำการเปลี่ยนแปลงค่า pH อยู่ในช่วง 2-10 ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าที่ค่า pH ของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 2 มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid สูงสุด เท่ากับร้อยละ 96.03 ผลสรุปสถานะที่เหมาะสมของระบบ CC ในการบำบัดสีย้อม Acid แบบ Batch โดยใช้ PACI เป็นสาร Coagulant แสดงในตารางที่ 4.16 ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของระบบ EC ที่พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดอยู่ในช่วง pH 3 เนื่องจาก pH น้อยกว่า 4.7 จะพบ Al ในรูป monomeric มากกว่า Al ในรูป polymeric (Wagatsuma and Ezoe, 2012) ซึ่ง monomeric species มีประสิทธิภาพมากกว่าในชุดติดคอลลอยด์ที่เป็นประจุลบ (Canizares et al., 2006) โดย monomeric species จะมีประจุเป็นบวกเมื่อ pH น้อยกว่า 8 และมีประจุเป็นลบเมื่อ pH มากกว่า 8 (Canizares et al., 2009) สอดคล้องกับการทบทวนค่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero Point of Charge :  $P_z$ ) ของ  $Al(OH)_3$  โดยพบว่ามีความอยู่ในช่วง 5-9.6 (Jelena et al., 2008) ซึ่งการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ PACI มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดที่ pH 3 ซึ่งต่ำกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของ  $Al(OH)_{3(s)}$  ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการ Coagulation จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก เช่น  $Al(OH)^{+2}$ ,  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al_7(OH)^{17+}_4$  และ  $Al_{13}(OH)^{+5}_{34}$  ดังนั้นในการบำบัดสีย้อม Acid ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีประจุลบ ในสถานะที่ pH เท่ากับ 3 จึงเกิดการสะเทินประจุบนผิวของสีย้อม Acid ให้กลายเป็นกลางโดยการดูดซับประจุของ Al ที่อยู่ในรูป monomeric เป็นผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคทำให้ฟล็อกมีขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถตกตะกอนได้ดี



รูปที่ 4.19 ผลของความเข้มข้น Polymer ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ CC โดยใช้ PACI





รูปที่ 4.20 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ CC โดยใช้ PACI

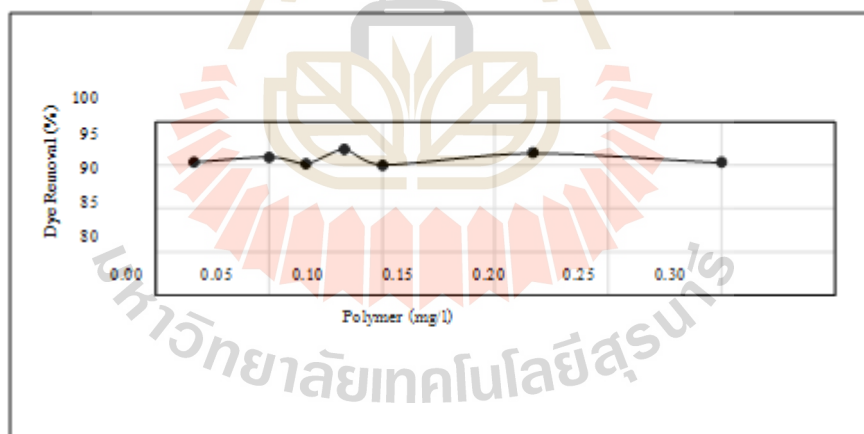
ตารางที่ 4.16 สภาวะที่เหมาะสมของการทดสอบ Jarrest ในการบำบัดสีย้อม Acid ด้วยระบบ CC แบบ Batch โดยใช้ PACI เป็นสาร Coagulant

ปัจจัย	สภาวะที่เหมาะสม		ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม
	ค่า	หน่วย	
PACI (as Al <sup>3+</sup> )	0.145	g/L	-
Cation Polymer	0.17	mg/L	82.90
pH	2	-	96.03

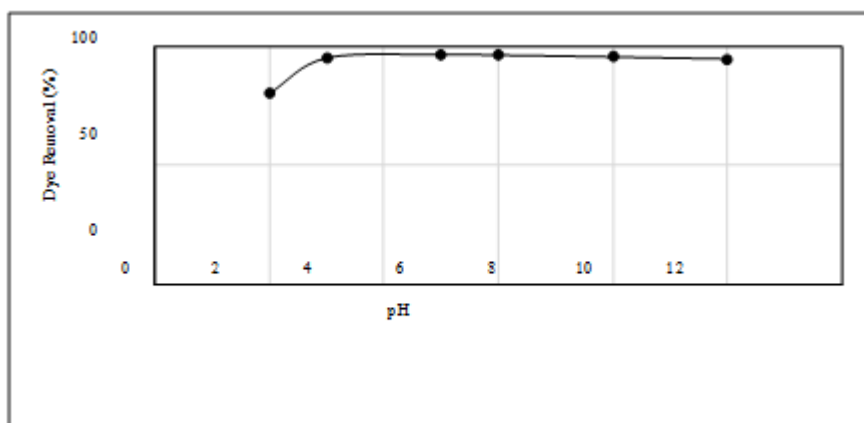
2) ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ FeCl<sub>3</sub> เป็นสาร Coagulant

ในการศึกษานี้กำหนดความเข้มข้นสารละลายสีย้อม Acid ที่ค่าความเข้มข้น 140 mg/l ปริมาตร 600 ml ความเข้มข้นของ FeCl<sub>3</sub> เท่ากับ 0.26 g/l as Fe<sup>3+</sup> มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้ ทำการศึกษาหาค่าปริมาณ Polymer ที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อม Acid โดยควบคุมค่า pH ของสารละลายสีย้อมอยู่ในช่วง 6-7 ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่า ที่ค่าความเข้มข้น Polymer เท่ากับ 0.08 mg/L มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid สูงสุด เท่ากับร้อยละ 96.91 ต่อมาจึงทำการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อม Acid โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า pH อยู่ในช่วง 2-10 ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าเมื่อ pH เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 5

ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงในช่วงค่า pH 6-10 พบว่าที่ค่า pH ของสารละลายสีข้อม Acid เท่ากับ 5 มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid สูงสุด เท่ากับร้อยละ 96.37 ผลสรุปสภาวะที่เหมาะสมของระบบ CC ในการบำบัดสีข้อม Acid แบบ Batch โดยใช้  $\text{FeCl}_3$  เป็นสาร Coagulant แสดงในตารางที่ 4.17 ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการทบทวนเอกสารซึ่งพบว่า  $\text{FeCl}_3$  จะมีประสิทธิภาพสูงในช่วง pH 3.5-6.5 และสูงกว่า 8.5 (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2556) และจากการทบทวนค่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  โดยพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 6-6.5 (Kosmulski, 2011) ซึ่งการบำบัดสีข้อม Acid โดยใช้  $\text{FeCl}_3$  มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดที่ pH 5 ซึ่งต่ำกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก ส่งผลให้เกิดกลไกในการบำบัดสีข้อมแบบ Adsorption Destabilization โดย สารคอมเพล็กซ์ประจุบวกจะทำหน้าที่สะเทินประจุบนผิวของตะกอนสีข้อม Acid ให้กลายเป็นกลางโดยการดูดซับประจุเป็นผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคทำให้ฟล็อกมีขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถตกตะกอนได้ ดังนั้น pH 5 ซึ่งอยู่ในช่วงการก่อตะกอนจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้  $\text{FeCl}_3$  ในการบำบัดสีข้อม Acid



รูปที่ 4.21 ผลของความเข้มข้น Polymer ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid ของระบบ CC โดยใช้  $\text{FeCl}_3$



รูปที่ 4.22 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ CC โดยใช้  $\text{FeCl}_3$

ตารางที่ 4.17 สภาวะที่เหมาะสมของการทดสอบ Jarrest ในการบำบัดสีย้อม Acid ด้วยระบบ CC แบบ Batch โดยใช้  $\text{FeCl}_3$  เป็นสาร Coagulant

ปัจจัย	สภาวะที่เหมาะสม		ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม
	ค่า	หน่วย	
$\text{FeCl}_3$ (as $\text{Fe}^{3+}$ )	0.26	g/L	-
Cation Polymer	0.08	mg/L	96.91
pH	5	-	96.37

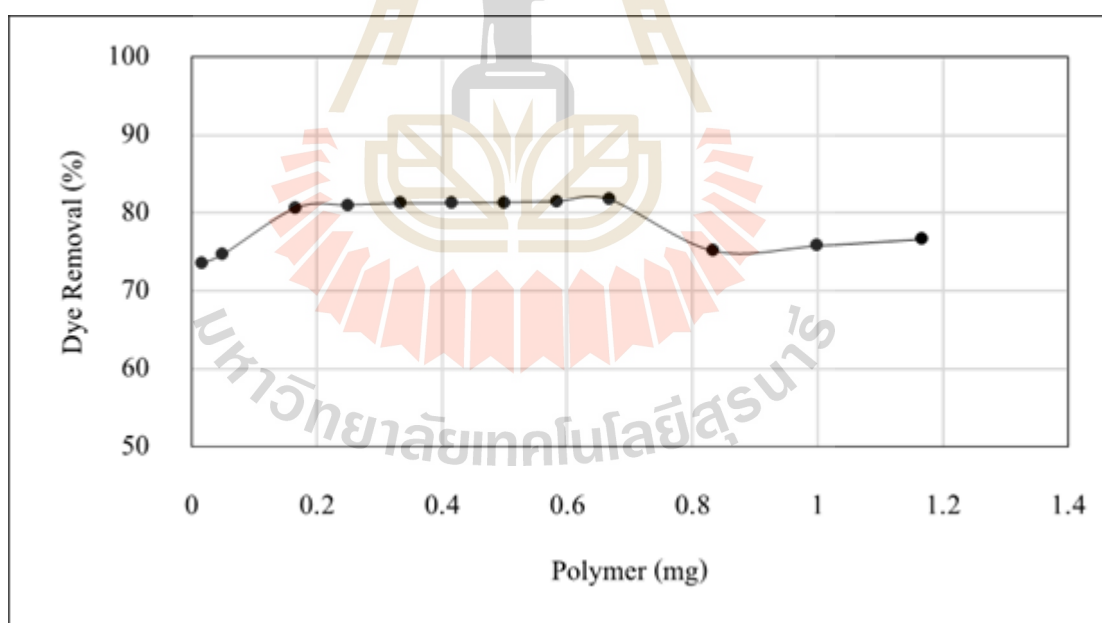
#### 4.1.4.2 สีย้อม Vat

ผลการศึกษปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ CC โดยใช้ PACI และ  $\text{FeCl}_3$  เป็นสาร Coagulant ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของ Polymer และ pH เริ่มต้น รายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

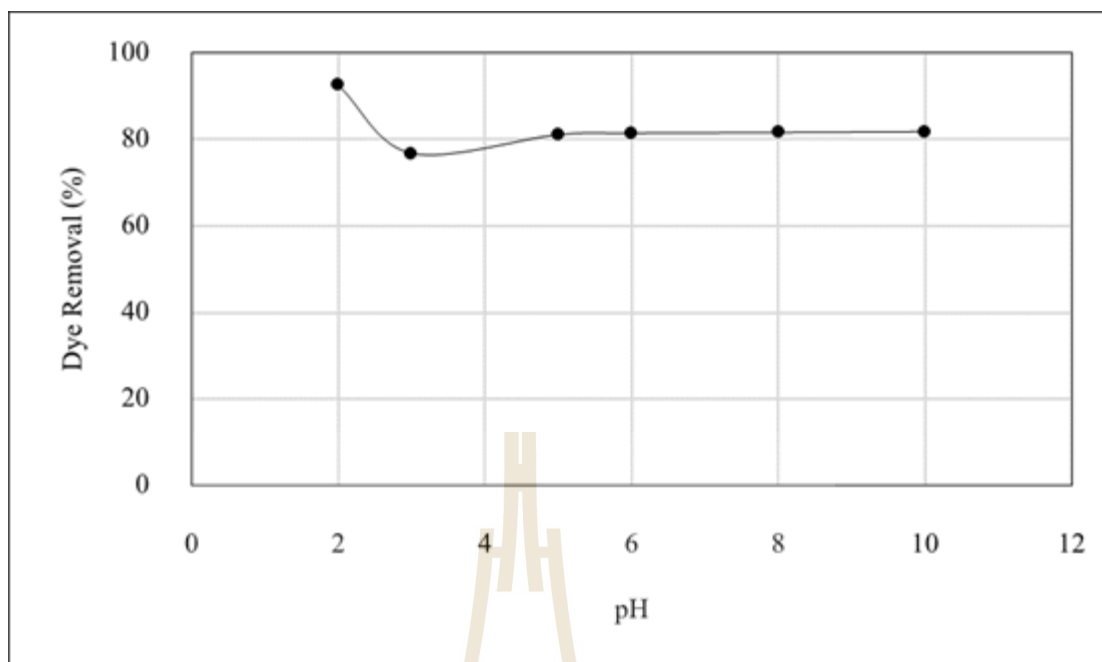
- 1) ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ PACI เป็นสาร Coagulant

ในการศึกษานี้กำหนดความเข้มข้นสารละลายสีย้อม Vat ที่ค่าความเข้มข้น 140 mg/l ปริมาตร 600 ml ความเข้มข้นของ PACI เท่ากับ 0.053 g/l as  $\text{Al}^{3+}$  มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

ทำการศึกษาค่าปริมาณ Polymer ที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อม Vat โดยควบคุมค่า pH ของสารละลายสีย้อมอยู่ในช่วง 6-7 ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่า ที่ค่าความเข้มข้น Polymer เท่ากับ 0.67 mg/L มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat สูงสุด เท่ากับร้อยละ 81.75 ต่อมาจึงทำการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อม Vat โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า pH อยู่ในช่วง 2-10 ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่า ที่ค่า pH ของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 2 มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat สูงสุด เท่ากับร้อยละ 92.87 ผลสรุปสภาวะที่เหมาะสมของระบบ CC ในการบำบัดสีย้อม Vat แบบ Batch โดยใช้ PACI เป็นสาร Coagulant แสดงในตารางที่ 4.18 ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาในการบำบัดสีย้อม Acid ที่ใช้ PACI เป็นสาร Coagulant เนื่องจาก pH น้อยกว่า 4.7 และมีค่า pH ที่ต่ำกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของ  $Al(OH)_3(s)$  จะพบ Al ในรูป monomeric ซึ่งมีประสิทธิภาพในจุดติดคอลลอยด์ ดังนั้นในการบำบัดสีย้อม Vat ในสภาวะที่ pH เท่ากับ 2 จึงเกิดการสะเทินประจุบนผิวของสีย้อม Vat ให้กลายเป็นกลางโดยการดูดซับประจุของ Al ที่อยู่ในรูป monomeric เป็นผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคทำให้ฟล็อกมีขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถตกตะกอนได้



รูปที่ 4.23 ผลของความเข้มข้น Polymer ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ CC โดยใช้ PACI



รูปที่ 4.24 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ CC โดยใช้ PACI

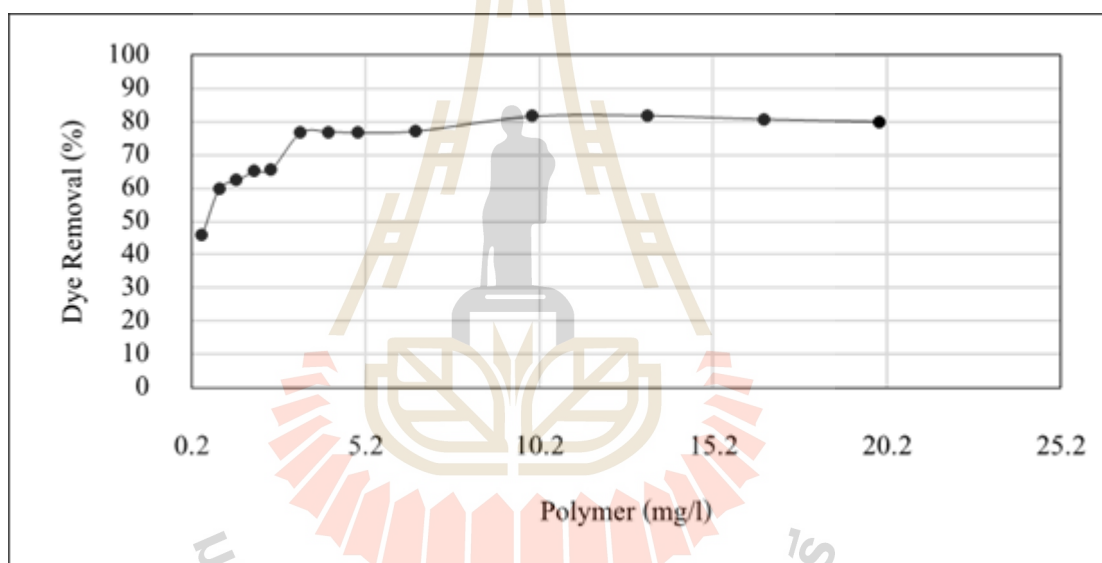
ตารางที่ 4.18 สภาวะที่เหมาะสมของการทดสอบ Jarrest ในการบำบัดสีย้อม Vat ด้วยระบบ CC แบบ Batch โดยใช้ PACI เป็นสาร Coagulant

ปัจจัย	สภาวะที่เหมาะสม		ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม
	ค่า	หน่วย	
PACI (as Al <sup>3+</sup> )	0.053	g/L	-
Cation Polymer	0.67	mg/L	81.75
pH	2	-	92.87

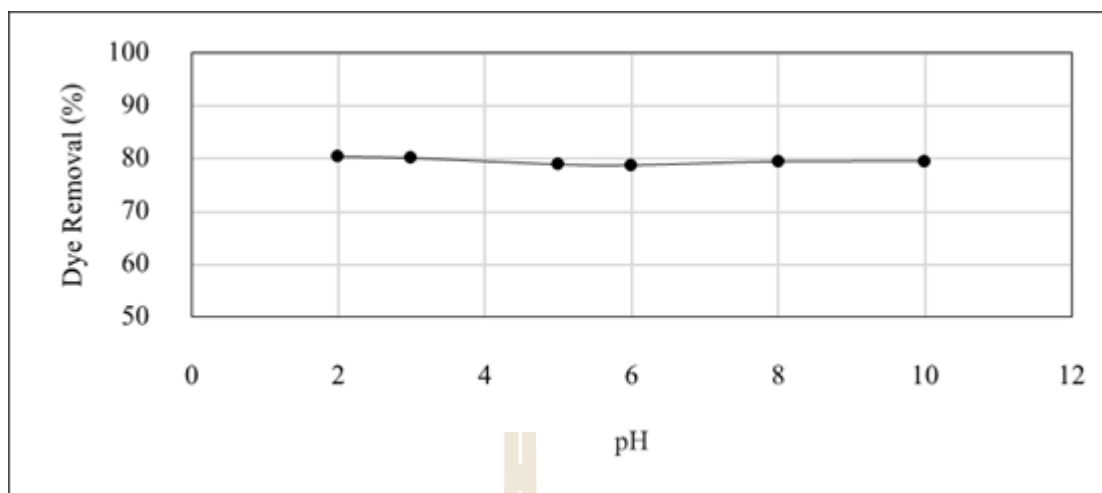
2) ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ FeCl<sub>3</sub> เป็นสาร Coagulant

ในการศึกษานี้กำหนดความเข้มข้นสารละลายสีย้อม Vat ที่ค่าความเข้มข้น 140 mg/l ปริมาตร 600 ml ความเข้มข้นของ FeCl<sub>3</sub> เท่ากับ 0.5 g/l as Fe<sup>3+</sup> มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้ ทำการศึกษาหาค่าปริมาณ Polymer ที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อม Vat โดยควบคุมค่า pH ของสารละลายสีย้อมอยู่ในช่วง 6-7 ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าที่ค่าความ

เข้มข้น Polymer เท่ากับ 0.58 mg/L มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat สูงสุด เท่ากับร้อยละ 81.65 ต่อมาจึงทำการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อม Vat โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า pH อยู่ในช่วง 2-10 ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่า ที่ค่า pH ของสารละลายสีย้อม เท่ากับ 2 มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat สูงสุด เท่ากับร้อยละ 83.30 ผลสรุปสถานะที่เหมาะสมของระบบ CC ในการบำบัดสีย้อม Vat แบบ Batch โดยใช้  $\text{FeCl}_3$  เป็นสาร Coagulant แสดงในตารางที่ 4.19 จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อ pH เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ไม่ต่างกันมาก เนื่องจาก  $\text{FeCl}_3$  มีช่วง pH ที่เหมาะสมสำหรับการก่อตะกอนในช่วง 3.5-6.5 และสูงกว่า 8.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วง pH ในการก่อตะกอนเป็นช่วงกว้าง จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat ไม่ค่อยแตกต่างกันมาก



รูปที่ 4.25 ผลของความเข้มข้น Polymer ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ CC โดยใช้  $\text{FeCl}_3$



รูปที่ 4.26 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ CC โดยใช้  $\text{FeCl}_3$

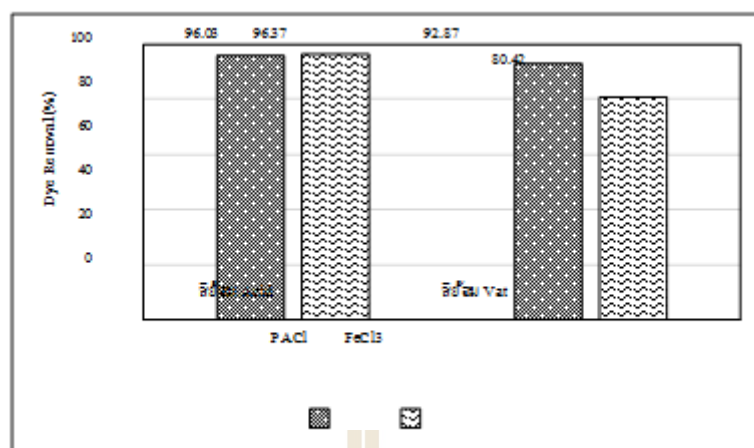
ตารางที่ 4.19 สภาวะที่เหมาะสมของการทดสอบ Jarrest ในการบำบัดสีย้อม Vat ด้วยระบบ CC แบบ Batch โดยใช้  $\text{FeCl}_3$  เป็นสาร Coagulant

ปัจจัย	สภาวะที่เหมาะสม		ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม
	ค่า	หน่วย	
$\text{FeCl}_3$ (as $\text{Fe}^{3+}$ )	0.5	g/L	-
Cation Polymer	13.33	mg/L	81.65
pH	2	-	80.42

#### 4.1.5 สรุปสภาวะที่เหมาะสมของชุดการทดลอง CC แบบ Batch

จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid และ สีย้อม Vat ของชุดการทดลอง CC ที่ใช้สาร Coagulant  $\text{FeCl}_3$  และ PACI สรุปสภาวะที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 4.20 และ ผลประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมได้ดังรูปที่ 4.27 โดยจะเห็นได้ว่าระบบ CC ที่ใช้ PACI เป็นสาร Coagulant มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี Acid และสี Vat มากกว่าการใช้  $\text{FeCl}_3$  เป็นสาร Coagulant โดยมีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 96.03 และ 96.37 ตามลำดับ





รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีของสภาวะที่เหมาะสมในระบบ CC แบบ Batch

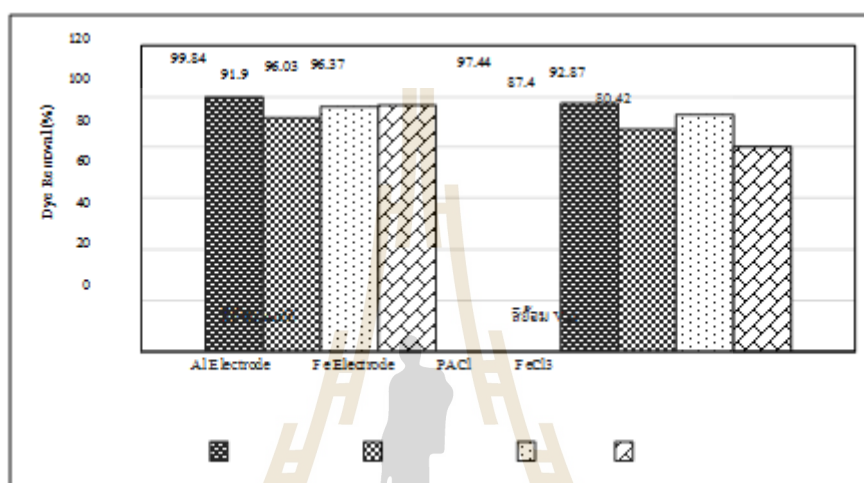
ตารางที่ 4.20 สรุปลักษณะที่เหมาะสมของระบบ CC แบบ Batch

ปัจจัย	หน่วย	สี้อม Acid		สี้อม Vat	
		PACl	FeCl <sub>3</sub>	PACl	FeCl <sub>3</sub>
ความเข้มข้นของสาร Coagulant	g/l	0.43 as Al <sup>+3</sup>	0.78 as Fe <sup>+3</sup>	0.16 as Al <sup>+3</sup>	1.5 as Fe <sup>+3</sup>
ความเข้มข้น Cation Polymer	mg/l	0.17	0.08	0.67	13.33
pH	-	2	5	2	2
ร้อยละของประสิทธิภาพในการบำบัดสี	-	96.03	96.37	92.87	80.42

#### 4.2 ขั้นตอนที่ 2 ผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีของระบบ EC และ CC

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีของระบบ EC และ CC แสดงดังรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าในปริมาณ Al และ Fe ที่ความเข้มข้นเท่ากัน ระบบ EC มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี้อมอยู่ในช่วงร้อยละ 87.40-99.84 ในขณะที่ระบบ CC มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี้อมอยู่ในช่วงร้อยละ 80.42-96.37 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าระบบ EC มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี้อมละลายน้ำและไม่ละลายน้ำสูงกว่าสำหรับการใช้ Al เปรียบเทียบกับการใช้ PACl ในระบบ CC เนื่องจากสี้อม Acid นั้นเป็นสีที่ละลายน้ำได้ดีและมีโมเลกุลขนาดเล็ก จึงเป็นการยากที่จะกำจัดโดยกระบวนการทางกายภาพ (Chafi et al., 2011) แต่ผลของการเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้า Fe และ FeCl<sub>3</sub> พบว่าระบบ CC มีประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องจากการละลายน้ำของขั้วไฟฟ้า Fe จะได้ทั้ง Fe<sup>2+</sup> และ

$Fe^{3+}$  ซึ่งมีทั้งรูปที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ สำหรับรูป  $Fe^{2+}$  นั้นมีความสามารถในการก่อตัวให้เป็นสาร Coagulant ต่ำกว่า  $Fe^{3+}$  จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ (Vepsäläinen, 2012) ส่วนการใช้  $FeCl_3$  นั้นเมื่อสารทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้  $Fe(OH)_3$  (ณัฐ ทศนเปรมสิน, 2557) ซึ่งเป็นสาร Coagulant ที่มีความสามารถในการก่อตะกอน จึงก่อตะกอนกับสีย้อมด้วยกลไก Sweep Coagulation ได้เร็วกว่าระบบ EC



รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของระบบ EC และ CC แบบ Batch

### 4.3 ขั้นตอนที่ 3 ผลการศึกษา ระบบ EC แบบ Continuous

จากผลการศึกษา ระบบ EC แบบ Batch นำข้อมูลผลการศึกษา มาประยุกต์ใช้ในการศึกษา ระบบ EC แบบ Continuous มีรายละเอียดผลการศึกษา ดังนี้

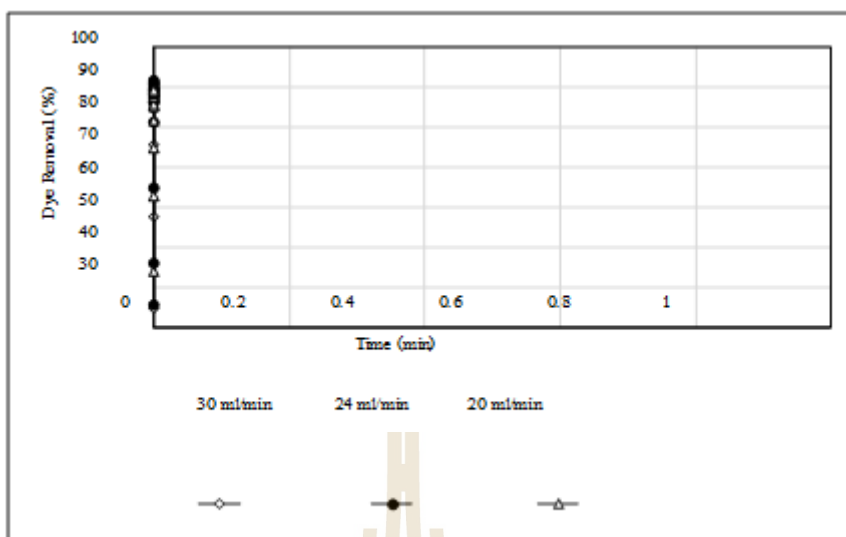
#### 4.3.1 ผลการศึกษา ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อมของระบบ EC แบบ Continuous

จากผลการศึกษา ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสำหรับระบบ EC แบบ Batch พบว่าระบบ EC ใช้ลุ่มิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid และสีย้อม Vat สูงกว่าการใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า จึงนำมาประยุกต์ใช้ในระบบ EC แบบ Continuous มีรายละเอียดผลการศึกษา ดังต่อไปนี้

##### 4.3.1.1 สีย้อม Acid

ผลการศึกษา ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัด EC แบบ Continuous ในการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขั้ว Al เป็นขั้วไฟฟ้า ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการไหล มีรายละเอียดผลการศึกษา ดังนี้

การศึกษานี้ได้ทำการปรับอัตราการไหลแตกต่างกัน ได้แก่ 20 24 และ 30 ml/min (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง) สำหรับระบบ EC ที่ใช้ขั้ว AI โดยกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l, ความต่างศักย์ 12.5 V และ pH 3 (จากผลการศึกษาแบบ Batch ที่ผ่านมา) ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid ของระบบ EC แบบ Continuous แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.21 และ 4.22 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและอัตราการไหลมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.29 จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเดินระบบจะมีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหล 20 ml/min เมื่อเริ่มเดินระบบ 0-40 นาที มีค่าประสิทธิภาพในการเดินระบบอยู่ในช่วงร้อยละ 43.87-88.24 หลังจากนั้นค่าประสิทธิภาพในการบำบัดจะเริ่มคงที่เข้าสู่สถานะ steady stage (กำหนดให้สถานะ steady stage หมายถึงสถานะที่มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ  $\pm 5$ ) และพบว่ามีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ร้อยละ  $88.74 \pm 0.38$  และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลจาก 20 เป็น 24 และ 30 ml/min พบว่ามีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และอัตราการไหลที่ 20 24 และ 30 ml/min จะเข้าสู่สถานะ steady stage หลังจากเดินระบบไปแล้ว 40 35 และ 30 นาที ตามลำดับ โดยที่อัตราการไหล 24 ml/min มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid สูงสุด มีค่าร้อยละ  $89.91 \pm 0.94$  (ตารางที่ 4.20) ซึ่งอัตราการไหล 24 ml/min เป็นอัตราการไหลที่คำนวณได้จากผลการคำนวณสถานะปัจจัยที่เหมาะสมจากผลการศึกษาระบบ EC แบบ Batch ในการเดินระบบ EC แบบ continuous ควรมีอัตราไหลที่เหมาะสมเนื่องจากหากมีอัตราการไหลที่ช้าจะส่งผลให้สารละลายสีย้อมผสมกับสารอิเล็กโทรไลต์ที่ทำการป้อนเข้าสู่ระบบได้ดีกว่า ขณะที่อัตราการไหลที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิด Floc มีการแข็งตัวดีขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เป็นการช่วยเพิ่มการก่อก้อนกับสีย้อมในกลไกการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น (Kobyas et al., 2016) และที่อัตราการไหลที่สูงมีประโยชน์ในการเพิ่มอัตราการชนกันของอนุภาคสีย้อมและตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์จึงทำให้เกิดการบำบัดสีย้อมได้ดี นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการไหลยังเป็นการช่วยลดเมือกที่ติดอยู่กับขั้วไฟฟ้าได้ด้วยจึงส่งผลให้โลหะละลายออกมาในสารละลายได้มากขึ้น (Mollah et al., 2004) จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าที่อัตราการไหล 24 ml/min ของระบบ EC แบบ Continuous เป็นอัตราการไหลที่เหมาะสม เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุดและเป็นอัตราการไหลที่มีระยะเวลาให้สีย้อมเกิดกระบวนการก่อก้อนได้เหมาะสมและพอดีกับปริมาณของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ผลิตออกมาจากระบบ เพราะถ้าใช้อัตราการไหลที่มากเกินไปจะส่งผลให้ monomeric species ของ AI ซึ่งมีประจุบวกถูกผลิตออกมามากเมื่อเกิดการดูดติดกับสีย้อม Acid ที่มีประจุลบที่มากเกินไป จะเกิดการผลัดกันของ Floc เนื่องจากมีปริมาณของ monomeric species มากเกินไปและจะทำให้คอลลอยด์หรือสีย้อมกลับมาเป็นเสถียรภาพ (มันลิน ตันจุลเวศม์, 2542)



รูปที่ 4.29 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid

ตารางที่ 4.21 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid

ระยะเวลาในการเดินระบบ (นาที)	ประสิทธิภาพในการบำบัดสี (%)		
	อัตราการไหล (ml/min)		
	17	20	24
5	43.87	35.66	34.95
10	62.79	46.21	57.58
15	74.81	64.90	75.34
20	81.55	81.16	81.25
25	85.22	86.07	84.30
30	85.59	86.27	86.21
35	87.62	89.62	86.18
40	88.24	90.65	86.68
45	89.07	89.45	88.74
50	89.10	90.45	87.86
55	88.48	89.12	87.30
60	88.73	88.98	87.30
65	88.33	90.98	87.15
70	88.70	88.68	88.30
75	89.25	91.27	87.68

ตารางที่ 4.22 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid เฉลี่ย

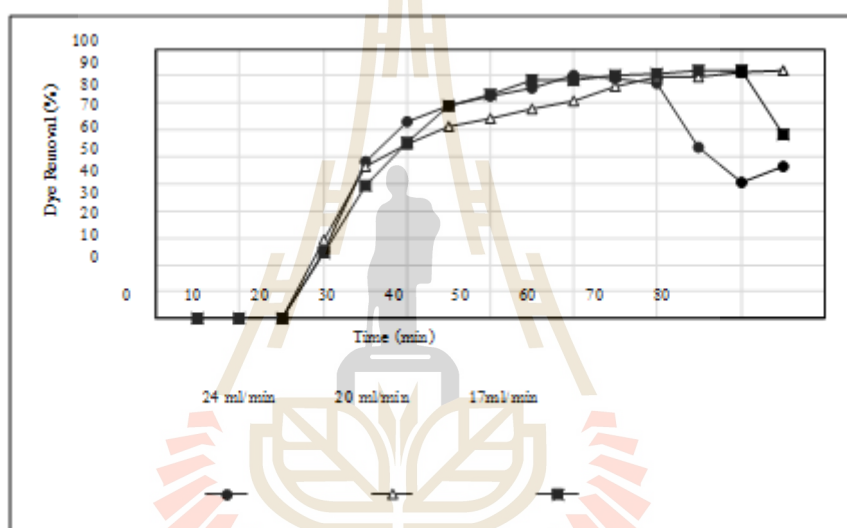
อัตราการไหล (ml/min)	ประสิทธิภาพในการบำบัดสีเฉลี่ย (%) (Mean±S.D.)	ช่วงระยะเวลาที่อยู่ในสภาวะคงที่ (Steady stage) (นาที)
20	88.74±0.38	40-75
24	89.91±0.94	35-75
30	87.34±0.84	30-75

#### 4.1.1.2 สีย้อม Vat

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัด EC แบบ Continuous ในการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ขั้ว AI เป็นขั้วไฟฟ้า ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลมีรายละเอียด ผลการศึกษาดังนี้ การศึกษานี้ได้ทำการปรับอัตราการไหลแตกต่างกัน ได้แก่ 17 20 และ 24 ml/min (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง) สำหรับระบบ EC ที่ใช้ขั้ว AI โดยกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Vat 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.24 g/l, ความต่างศักย์ 15 V และ pH 5 (จากผลการศึกษาแบบ Batch ที่ผ่านมา) ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat ของระบบ EC แบบ Continuous แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.23 และ 4.24 นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดและอัตราการไหลมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.30

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเดินระบบจะมีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหล 17 ml/min เมื่อเริ่มเดินระบบ 0-50 นาที มีค่าประสิทธิภาพในการเดินระบบอยู่ในช่วงร้อยละ 0-88.60 หลังจากนั้นค่าประสิทธิภาพในการบำบัดจะเริ่มคงที่เข้าสู่สภาวะ steady stage ที่ช่วงระยะเวลา 55-70 และพบว่ามีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ร้อยละ 91.27±0.80 (ตารางที่ 4.22) ที่อัตราการไหล 20 ml/min จะเข้าสู่สภาวะ steady stage หลังจากเดินระบบไปแล้ว 55 นาที โดยที่อัตราการไหล 20 ml/min มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ร้อยละ 90.64±1.35 ที่อัตราการไหล 24 ml/min จะเข้าสู่สภาวะ steady stage หลังจากเดินระบบไปแล้ว 40 นาที โดยที่อัตราการไหล 24 ml/min มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat ร้อยละ 88.11±2.26 ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดคือที่อัตราการไหล 17 ml/min ในการเดินระบบ EC แบบ continuous หากมีอัตราการไหลที่สูงเกินไปจะทำให้โลหะละลายออกมาในสารละลายได้มากขึ้นจากการที่อัตราการไหลที่สูงส่งผลในการลดเมือกที่ขั้วไฟฟ้า จึงทำให้มีปริมาณสารก่อตะกอนที่มากเกินไปทำให้ Floc มีปริมาณมากในระบบ EC ซึ่งจากการศึกษาพบว่า Floc เหล่านี้สะสมใน Reactor ในช่องที่ 2 สำหรับดัก Scum หากมีปริมาณที่มากเกินไปเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ Scum ไหลเข้าสู่ช่องที่ 3 สำหรับการตกตะกอนลงสู่ด้านล่างและ

ช่องน้ำใส ดังนั้น ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมลดลง และในขณะเดียวกันที่อัตราการไหล 17 ml/min ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ต่ำกว่าจากผลการคำนวณสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมจากผลการศึกษาระบบ EC แบบ Batch เมื่อเวลาผ่านไปจะช่วยเพิ่มการก่อตะกอนกับสีข้อมในกลไกการดูดซับได้ดี จึงส่งผลให้มี Floc จำนวนมากขึ้นในระบบ ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด แต่จากการศึกษาพบว่าเมื่อระยะเวลาในการเดินระบบผ่านไป 70 นาที พบว่า Floc เหล่านี้สะสมใน Reactor ในช่องที่ 2 สำหรับดัก Scum ซึ่งเป็นเช่นเดียวกันกับการใช้อัตราการไหลที่สูงกว่าจากผลการคำนวณสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมจากผลการศึกษาระบบ EC แบบ Batch ดังนั้น ที่อัตราการไหลที่ 17 ml/min มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Vat สูงสุดในช่วงสภาวะ steady stage



รูปที่ 4.30 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Vat

ตารางที่ 4.23 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Vat

ระยะเวลาในการเดินระบบ (นาที)	ประสิทธิภาพในการบำบัดสี (%)		
	อัตราการไหล (ml/min)		
	17	20	24
5	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
20	24.51	29.19	24.77
25	49.40	56.48	58.29
30	65.19	65.02	73.15
35	78.77	71.37	78.74
40	83.07	74.03	82.63
45	88.29	77.60	85.38
50	88.60	80.58	90.52
55	90.28	86.23	89.27
60	90.98	89.39	87.27
65	91.76	89.58	63.80
70	92.06	91.53	50.64
75	68.60	92.05	56.69

ตารางที่ 4.24 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Vat เฉลี่ย

อัตราการไหล (ml/min)	ประสิทธิภาพในการบำบัดสีเฉลี่ย	ช่วงระยะเวลาที่อยู่ในสภาวะคงที่
	(%) (Mean±S.D.)	(Steady stage) (นาที)
17	91.27±0.80	55-70
20	90.64±1.35	60-75
24	88.11±2.26	45-60



#### 4.3.2 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอของระบบ EC แบบ Continuous

##### 4.3.2.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอในครัวเรือน

การศึกษานี้ใช้น้ำเสียจริงจากสถานประกอบการมัชชาดาใหม่ไทย ตั้งอยู่เลขที่ 118/1 หมู่ 7 ต.นกออก อ.ปักธงชัย จ.นครราชสีมา ผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากสถานประกอบการที่ใช้สีย้อมเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4.25 พบว่า มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้น COD เท่ากับ 6,585.6 mg/l ค่า pH อยู่ในช่วง 6.93-7.30 มีค่าสีเท่ากับ 1,003 Pt-Co มีค่าของแข็งส่วนใหญ่เป็นของแข็งละลายน้ำมีค่าเท่ากับ 9,400 mg/l ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 73 ของของแข็งทั้งหมด มีค่าของแข็งแขวนลอยคิดเป็นร้อยละ 27 ของของแข็งทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียจากสถานประกอบการสิ่งทอส่วนใหญ่เป็นของแข็งละลายน้ำซึ่งยากต่อการบำบัดด้วยระบบ CC (Yamamoto and Fukushi, 2007)

ตารางที่ 4.25 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	ค่า
COD	mg/l	6,585.6
สี	Pt-Co	1,003
pH	-	6.93-7.30
TS	mg/l	12,929
TDS	mg/l	9,400
TSS	mg/l	3,520
ความขุ่น	NTU	66.53

##### 4.3.2.2 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอในครัวเรือนโดยระบบ EC แบบ Continuous

นำตัวอย่างน้ำเสียจริงจากสถานประกอบการมาทำการบำบัดโดยระบบ EC แบบ Continuous โดยใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมจากระบบ EC แบบ Continuous ในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งจะได้อัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำ (สีย้อม Acid) เท่ากับ 20 ml/min และสำหรับการกำจัดสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ (สีย้อม Vat) ใช้อัตราการไหลเท่ากับ 24 ml/min เนื่องจากอัตราไหลดังกล่าวนี้มีช่วงสถานะ steady stage ที่มากกว่าและไม่มีปัญหาของการสะสม scum ใน Reactor ในช่องที่ 2 สำหรับดัก Scum ดังเช่นผลการศึกษาในอัตราการไหลที่ 17 ml/min โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AI จากนั้นนำสถานะที่เหมาะสม ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความต่างศักย์

และ pH จากตารางที่ 4.26 มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียน้ำเสียฟอกย้อมจากสถานประกอบการเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมและCODของระบบ EC แบบ Continuous ผลการศึกษามีดังนี้

1) ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมที่ละลายน้ำ

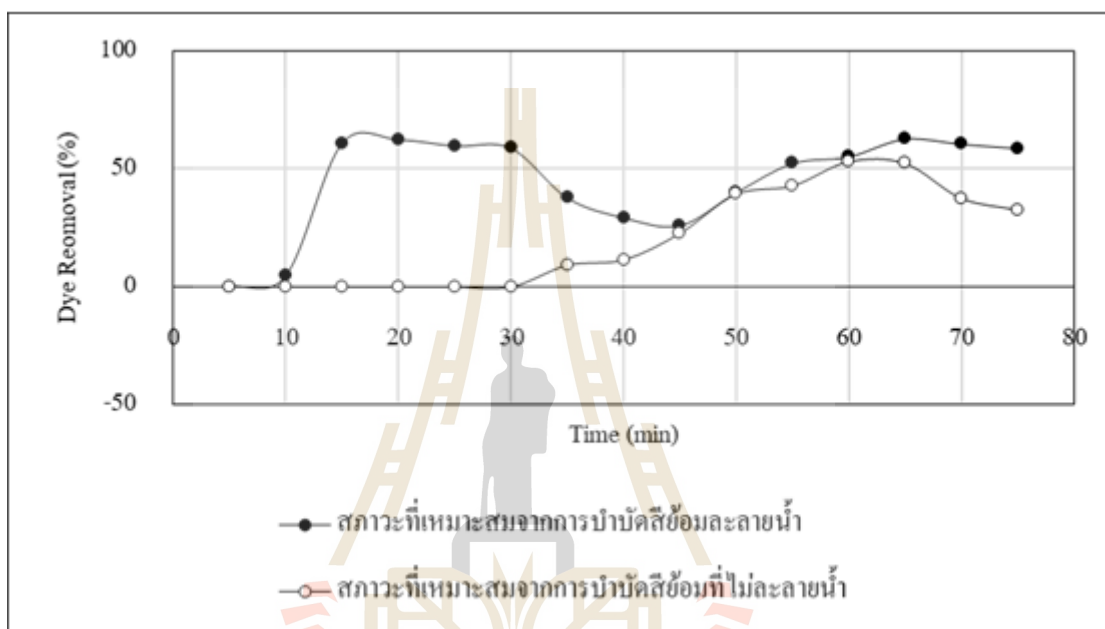
การศึกษานี้ใช้สภาวะในการเดินระบบสำหรับสีย้อมละลายน้ำดังแสดงในตารางที่ 4.26 ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l, ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 12.5 V และ pH 3 และใช้อัตราการไหล 24 ml/min โดยใช้ A1 เป็นขั้วไฟฟ้า ผลการศึกษาประสิทธิภาพบำบัดสีย้อมแสดงดังรูปที่ 4.31 และตารางที่ 4.27 พบว่าเมื่อทำการเดินระบบประมาณ 20 นาทีระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเฉลี่ยเป็นร้อยละ  $59.24 \pm 3.21$  (ตารางที่ 4.25) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการบำบัดสีย้อม Acid ที่เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมจากน้ำเสียจริงมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid และมีค่าสีในน้ำหลังการบำบัดเฉลี่ย  $241.62 \pm 60.96$  Pt-Co โดยคิดเทียบเป็นค่าสี ADMI ได้จากสมการ  $Y = 1.448X + 55.6$  รายละเอียดผลการศึกษาแสดงในภาคผนวก ก. พบว่าที่ค่าสี 241.62 Pt-Co จะมีค่าเท่ากับ 405.46 ADMI ซึ่งยังไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมซึ่งกำหนดไว้ว่าไม่เกิน 300 ADMI (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2560) เนื่องจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยทั่วไปจะประกอบด้วยสีย้อมกรดอะซิติก เส้นใยเส้นด้ายที่ปนเปื้อนออกมาจากกระบวนการผลิต สารที่ช่วยในการกระจายตัว (dispersing agents) สารลดแรงตึงผิว เกลือ และสารอินทรีย์ต่างๆ (Guimaraes et al, 2012) จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัด

ตารางที่ 4.26 สภาวะที่ใช้ในการเดินระบบ EC แบบ Continuous ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

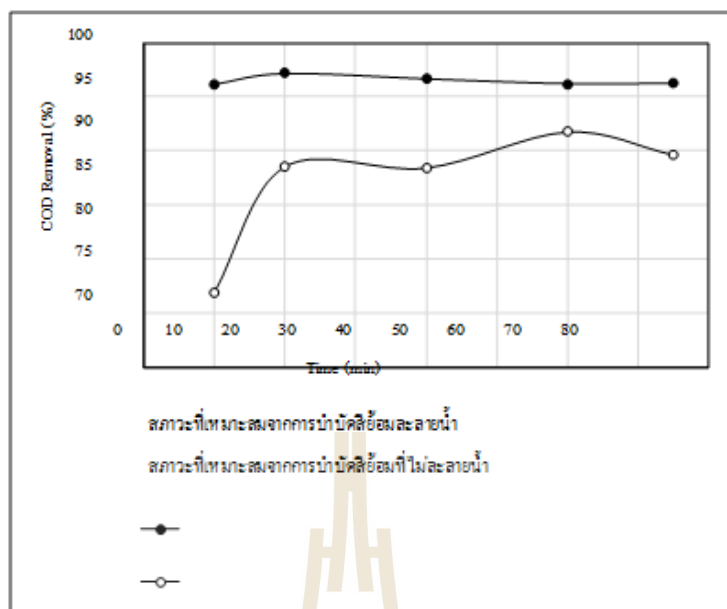
ปัจจัย	หน่วย	สภาวะที่เหมาะสมของระบบ EC	
		สีย้อมที่ละลายน้ำ	สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ
ขั้วไฟฟ้า	-	A1	A1
ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์	g/l	0.96	0.24
ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น	Volt	12.5	15
pH	-	3	5
อัตราการไหล	ml/min	24	20

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดค่า COD ในน้ำเสียแสดงในรูปที่ 4.32 และตารางที่ 4.28 จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัด COD มีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่

ระยะเวลาในการเดินระบบ 10 นาที จนถึง 75 นาที โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD เฉลี่ยร้อยละ  $96.47 \pm 0.45$  (ตารางที่ 4.26) ) และมีค่า COD น้ำออกเฉลี่ย  $116.12 \text{ mg/l}$  ซึ่งจะเห็นว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดไว้ว่าไม่เกิน  $120 \text{ mg/l}$  (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมพ.ศ.2560) จึงแสดงให้เห็นว่าระบบ EC มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.31 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำเสียจริง



รูปที่ 4.32 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด COD

2) การใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการบำบัดสีข้อมที่ไม่ละลายน้ำ

การศึกษานี้ใช้สภาวะในการเดินระบบสำหรับสีข้อมไม่ละลายน้ำดังแสดงในตารางที่ 4.26 ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.24 g/l, ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 15 V และ pH 5 และใช้อัตราการไหล 20 ml/min โดยใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า ผลการศึกษาประสิทธิภาพบำบัดสีข้อมแสดงดังรูปที่ 4.31 และตารางที่ 4.27 พบว่าเมื่อทำการเดินระบบประมาณ 55 นาที ระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมเฉลี่ยเป็นร้อยละ  $49.40 \pm 5.72$  ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดสีข้อม Vat ที่เป็นสีข้อมที่ไม่ละลายน้ำ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมจากน้ำเสียจริงมีประสิทธิภาพการบำบัดน้อยกว่าการบำบัดสีข้อม Vat และมีค่าสีในน้ำหลังการบำบัดเฉลี่ย  $267.56 \pm 38.19$  Pt-Co โดยคิดเทียบเป็นค่าสี ADMI จะมีค่าเท่ากับ 194.84 ADMI ซึ่งผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดไว้ว่าไม่เกิน 300 ADMI (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมพ.ศ.2560)

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดค่า COD ในน้ำเสียแสดงในรูปที่ 4.32 และตารางที่ 4.28 จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัด COD มีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่ระยะเวลาในการเดินระบบ 20 นาที จนถึง 75 นาที โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD เฉลี่ยร้อยละ  $89.63 \pm 4.55$  และมีค่า COD น้ำออกเฉลี่ย  $455.90$  mg/l ซึ่งจะเห็นว่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดไว้ว่าไม่เกิน 120 mg/l (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมพ.ศ.2560) และมีประสิทธิภาพน้อยกว่า

สภาวะที่ใช้ในการเดินระบบแบบสีย้อมละลายน้ำ เนื่องจากในสภาวะนี้ใช้สารอิเล็กโทรไลต์เพียง 0.24 g/l ซึ่ง NaCl นี้เองมีส่วนช่วยในการบำบัด COD โดยคลอไรด์จะให้อิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนด กลายเป็นคลอรีน มีฤทธิ์เป็นสาร Oxidizing ที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในระบบ EC ได้ ดังนั้น เมื่อความเข้มข้นของ NaCl น้อยจึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ลดลง

ตารางที่ 4.27 ผลการบำบัดสีของระบบ EC แบบ Continuous

เวลา	สีน้ำเข้า (Pt-Co)	สภาวะจากสีย้อมละลายน้ำ		สภาวะจากสีย้อมไม่ละลายน้ำ	
		สีน้ำออก (Pt-Co)	ร้อยละของประสิทธิภาพ การบำบัดสี (Mean±S.D)	สีน้ำออก (Pt-Co)	ร้อยละของประสิทธิภาพ การบำบัดสี (Mean±S.D)
5		882.22	0.00±22.50	832.78	0.00±2.56
10		453.33	4.56±0.66	666.11	0.00±0.74
15		185.56	60.94±7.28	436.11	0.00±2.07
20		178.33	62.46±3.39	423.33	0.00±13.89
25		191.11	59.77±5.46	586.67	0.00±4.96
30		195.56	58.83±4.47	502.22	0.00±3.47
35		296.11	37.66±6.86	431.11	9.24±0.00
40	1,003	336.11	29.24±1.90	420.56	11.46±1.90
45		352.22	25.85±1.16	367.22	22.69±1.24
50		285.56	39.88±0.33	288.33	39.30±6.04
55		226.67	52.28±1.49	271.67	42.81±2.40
60		213.33	55.09±0.33	222.78	53.10±0.08
65		177.22	62.69±0.58	226.67	52.28±0.00
70		187.78	60.47±4.96	296.67	37.54±2.65
75		196.11	58.71±3.89	320.00	32.63±2.81
ประสิทธิภาพการบำบัดสี		209.17±3	59.03±3.40	267.56±3	49.40±5.72
ย้อมเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (Mean±S.D)		2.25		8.19	

ตารางที่ 4.28 ผลการบำบัด COD ของระบบ EC แบบ Continuous

เวลา	COD น้ำเข้า(mg/l)	สถานะจากสีข้อมละลายน้ำ		สถานะจากสีข้อมไม่ละลายน้ำ	
		COD น้ำออก (mg/l)	ร้อยละของ ประสิทธิภาพ การกำจัด COD (Mean±S.D)	COD น้ำออก (mg/l)	ร้อยละของ ประสิทธิภาพการ กำจัดCOD. (Mean±S.D)
10		128.00	96.11±0.17	913.50	76.92±0.17
20		92.60	97.19±0.01	376.00	88.58±0.08
40	6,585.6	110.00	96.66±0.13	380.00	88.46±0.43
60		126.00	96.17±0.13	270.00	91.80±0.64
75		124.00	96.23±0.08	340.00	89.67±0.43
ประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมเมื่อ เข้าสู่สถานะสมดุล (Mean±S.D)		116.12±14.93	96.47±0.45	455.60±258.92	89.63±1.55

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากสถานประกอบการทอผ้าไหม พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมสูงสุดร้อยละ 59.03±3.40 และประสิทธิภาพในการบำบัด COD สูงสุดร้อยละ 96.47±0.45 โดยสรุปสถานะได้ดังตารางที่ 4.29 โดยใช้ ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l, ความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น 12.5 V และ pH 3 (จากผลการศึกษา EC แบบ Batch (ที่ผ่านมา) ใช้อัตราการไหล 24 ml/min และ HRT 8 นาที โดยใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้า สำหรับค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกข้อมด้วยระบบ Electrocoagulation คิดเป็นราคาต่อปริมาตรน้ำเสีย 1 m<sup>3</sup> จะได้เท่ากับ 147.13 บาท/m<sup>3</sup> รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก จ

ตารางที่ 4.29 สรุปสถานะที่ใช้ในการเดินระบบ EC แบบ Continuous ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

ปัจจัย	หน่วย	สถานะสำหรับสีข้อมที่ละลายน้ำ
ขั้วไฟฟ้า	-	Al
ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์	g/l	0.96
ความต่างศักย์	Volt	12.5
pH	-	3
อัตราการไหล	ml/min	24
HRT	min	8.3

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาการกำจัดสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอใน โดยใช้ระบบ EC แบบ Batch และแบบ Continuous เปรียบเทียบกับระบบ CC โดยได้ทำการศึกษาหาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของทั้งสองระบบ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

##### 5.1.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสีย้อมของระบบ EC แบบ Batch

###### 5.1.1.1 สีย้อม Acid

###### 1) ขี้ว Al

การกำจัดสีย้อม Acid ด้วยขี้ว Al โดยใช้ระบบ EC แบบ Batch มีสภาวะที่เหมาะสม คือ ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l ที่สภาวะ pH เท่ากับ 3 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12.5 Volt ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที และใช้เวลาในการตกตะกอน 15 นาที โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Acid ร้อยละ  $99.83 \pm 0.05$

###### 2) ขี้ว Fe

การกำจัดสีย้อม Acid ด้วยขี้วเหล็ก โดยใช้ระบบ EC แบบ Batch มีสภาวะที่เหมาะสม คือ ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.24 g/l ที่สภาวะ pH เท่ากับ 5 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 Volt ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และใช้เวลาในการตกตะกอน 45 นาที โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Acid ร้อยละ  $91.90 \pm 2.53$

###### 5.1.1.2 สีย้อม Vat

###### 1) ขี้ว Al

การกำจัดสีย้อม Vat ด้วยขี้ว Al โดยใช้ระบบ EC แบบ Batch มีสภาวะที่เหมาะสม คือ ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.48 g/l ที่สภาวะ pH เท่ากับ 10 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 Volt ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และใช้เวลาในการตกตะกอน 45 นาที โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Vat ร้อยละ  $97.44 \pm 0.17$



## 2) ขี้ Fe

การกำจัดสีขี้ม Vat ด้วยขี้เหล็ก โดยใช้ระบบ EC แบบ Batch มีสภาวะที่เหมาะสม คือ ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นสีขี้ม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l ที่สภาวะ pH เท่ากับ 6 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 Volt ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที และใช้เวลาในการตกตะกอน 45 นาที โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีขี้ม Vat ร้อยละ  $87.40 \pm 0.06$

### 5.1.2 สรุปการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีขี้มของระบบ EC และ CC แบบ Batch

ระบบ EC มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีขี้มอยู่ในช่วงร้อยละ 87.40-99.84 ในขณะที่ระบบ CC มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีขี้มอยู่ในช่วงร้อยละ 37.64-91.97 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าระบบ EC มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีขี้มละลายน้ำและไม่ละลายน้ำสูงกว่า โดยที่ระบบ EC มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีขี้มของขี้ไฟฟ้า Al มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ Fe เป็นขี้ไฟฟ้า

### 5.1.3 ประสิทธิภาพของการกำจัดสีขี้มของระบบ EC แบบ Continuous

#### 5.1.3.1 สีขี้ม Acid

การกำจัดสีขี้ม Acid ด้วยขี้ Al โดยใช้ระบบ EC แบบ Batch มีสภาวะที่เหมาะสม คือ ใช้ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีขี้ม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.96 g/l ที่สภาวะ pH เท่ากับ 3 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12.5 Volt และอัตราการไหล 24 ml/min มีประสิทธิภาพการกำจัดสีขี้ม Acid ร้อยละ  $89.91 \pm 0.94$

#### 5.1.3.2 สีขี้ม Vat

การกำจัดสีขี้ม Vat ด้วยขี้ Al โดยใช้ระบบ EC แบบ Batch มีสภาวะที่เหมาะสม คือ ใช้ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีขี้ม 140 mg/l ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.24 g/l ที่สภาวะ pH เท่ากับ 5 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 Volt และอัตราการไหล 20 ml/min มีประสิทธิภาพการกำจัดสีขี้ม Acid ร้อยละ  $90.64 \pm 1.35$

### 5.1.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอของระบบ EC แบบ Continuous

ผลการศึกษาพบว่า ระบบ Electrocoagulation แบบ Continuous โดยใช้ Al เป็นขี้ ไฟฟ้า สามารถบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการเดินระบบประมาณ 15 นาที ระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล และมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่า COD เฉลี่ยร้อยละ  $96.47 \pm 0.45$  และประสิทธิภาพการบำบัดสีเฉลี่ยร้อยละ  $59.03 \pm 3.40$  สำหรับค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกขี้มด้วยระบบ Electrocoagulation คิดเป็นราคาต่อปริมาตรน้ำเสีย 1 m<sup>3</sup> จะได้เท่ากับ 147.13 บาท/m<sup>3</sup>

5.1.5 ระบบ EC มีความสามารถในการบำบัดสีข้อมละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ โดยระบบ EC ที่ใช้ขี้วัว AI มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid และ Vat มากกว่าระบบ EC ที่ใช้ขี้วัว Fe

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการนำระบบ EC เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอุตสาหกรรมควรนำไปใช้เป็นระบบบำบัดเฉพาะที่ เช่น บำบัดน้ำเสียจากกระบวนการข้อมสี จะส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง
- 2) ควรทำการศึกษาการนำระบบ EC ในการบำบัดน้ำเสียประเภทอื่นเพิ่มเติมได้แก่ สารฟีนอล และน้ำมัน Coolant เป็นต้น



## รายการอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2556. คู่มือแนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2560. ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม. [ออนไลน์]. ได้จาก : [www.diw.go.th/hawk/news/ประกาศ%20อก.น้ำทิ้ง.PDF](http://www.diw.go.th/hawk/news/ประกาศ%20อก.น้ำทิ้ง.PDF).
- กาญจนา ครองธรรมชาติ. 2535. การกำจัดสีของน้ำเสียจากน้ำย้อมผ้าโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ด้วยสารโพลูอิมิเนียมคลอไรด์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ขจีจิรัฐ ภิรมย์ธรรมศิริ และศรันยา เกษมบุญญากร. 2549. เอกสารประกอบการสอนวิชาการย้อมสีสิ่งทอ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- จิราพร หุดะกมล. 2554. การย้อมฝ้ายด้วยสีแควตโดยใช้เครื่องย้อมสีเส้นด้าน มก.3. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (คหกรรมศาสตร์) สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชนิดา เสมรัตน์. 2543. ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอด้วกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐวรรช ชนประดิษฐ์กุล. 2555. การลดสีในสารละลายย้อมชนิดแอซิด ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน บนตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe/Al_2O_3$ . วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ณัฐวรรช ชนประดิษฐ์กุล. 2555. การลดสีในสารละลายย้อมชนิดแอซิดด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันบนตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe/Al_2O_3$ . วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ณัฐ ทิศนเปรมสิน. 2557. การสลายตะกอนเหล็กและนำกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ชนกฤต พรหมทอง. 2552. การกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพและเฟนตันรีเอเจนต์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- บุญชัย วิจิตรเสถียร และจรียา ยี่มรัตน์บวร. 256). การถ่ายทอดองค์ความรู้ เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม กรณีศึกษา กลุ่มวิสาหกิจสิ่งทอเขตจังหวัดนครชัยบุรีรินทร์ (Knowledge transfer of textile wastewater treatment technology Case study: textile enterprise group in Nakhonchaiburin area).
- ปริเมษ เจริญนพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรตในน้ำทิ้งชุมชนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- พลกฤษณ์ จิตรโธ และ วรรณต์ นาคบรรพต. 2557. การประยุกต์วิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อบำบัดน้ำเสียจากการย้อมไหม. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ไพฑูรย์ หมั่นจำเริญ และ แคทลียา ปัทมพรหม. 2557. ผลของแรงดันไฟฟ้าและช่องว่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดต่อการบำบัดความขุ่นของน้ำเสียโดยการจับตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง. ม.ป.ท. มหาวิทยาลัยรังสิต”
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมประปา. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. เล่ม 4. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มัลลิกา ปัญญาคะโป. (2556). การบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยวิธีการทางกายภาพและเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วรรษวรรณ เทียงวรรณกานต์. 2546. การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใส่กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิลาสินี โคตรเจริญ. 2556. การกำจัดอินทรีย์ในน้ำเสียจากผ้าด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและการรวมตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ศิริพรรณ คำแน่น. 2554. การใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดสีย้อมเอโซจากน้ำเสียฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- สายรุ้ง นพขุนทด. 2554. การกำจัดสีรีแอกทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อรุณี กงดี อัลเตรด. 2557. เอกสารประกอบการสอนรายวิชา.อ. 362 กระบวนการทางเคมีสิ่งแวดล้อม.
- Ahmet Gürses, A., Yalçın, M., and Dogar, C. 2002. Electrocoagulation of some reactive dyes: a statistical investigation of some electrochemical variables. **Waste Management**. 22: 491-499.
- An, C., Huang, C., Yao, Y., and Zhao, S. 2017. Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review. **Science of The Total Environment**. 579: 537-556.
- Aoudj, S., Khelifa, A., Drouiche, N., Hecini, M., and Hamitouche, H. 2010. Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. **Chemical Engineering and Process**. 49(11): 1176-1182.
- Apaydin, O., Kurt, U., and Gonullu, M. 2009. An investigation on the treatment of tan- € nery wastewater by electrocoagulation. **Global NEST Journal**. 11(4): 546-555.
- APHA, AWWA, WEF. 2012. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22st ed. American Public Health Association.
- Bayramoglu, M., Eyvaz, M., and Kobya, M. 2007. Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: economical evaluation. **Chemical Engineering Journal**. 128: 155-161.
- Bayramoglu, M., Kobya, M., Can, O.T., and Sozbir, M. 2004. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. **Separation and Purification Technology**. 37 : 117-125.
- Bensadok, K., El Hanafi, N., and Lopicque, F. 2011. Electrochemical treatment of dairy effluent using combined Al and Ti/Pt electrodes system. **Desalination**. 280: 244-251.
- Beril Gönder, Z., Balçiođlu, G., Vergili, I., and Kay, Y. 2017. Electrochemical treatment of carwash wastewater using Fe and Al electrode: Techno-economic analysis and sludge characterization. **Journal of Environmental Management**. 200: 380-390.
- Buckley, C. A. 1992. Membrane technology for the treatment of dyehouse effluents. **Water Science and Tecnology**. 25(10): 203-209.
- Bulc, T.G. and Ojstršek, A. 2008. The use of constructed wetland for dye-rich textile wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials**. 155: 76-82.

- Can, O.T., Kobyas, M., Demirbas, E., and Bayramoglu, M. 2006. Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. **Chemosphere**. 62: 181-187.
- Cañizares, C., P., Sáez, C., Sánchez-Carretero, A., and Rodrigo, M. A. 2009. Synthesis of novel oxidants by electrochemical technology. **Journal of Applied Electrochemistry**, 39: 2143.
- Chafi, M., Gourich, B., Essadki, A.H., Vial, C., and Fabregat, A. 2011. Comparison of electrocoagulation using iron and aluminium electrodes with chemical coagulation for the removal of a highly soluble acid dye. **Desalination** 281: 285-292.
- Chavalparit, O. and Ongwandee, M. 2009. Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology. **Journal of Environmental Sciences**. 21: 1491-1496.
- Chen, G. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**. 38: 11-41.
- Chen, X., Chen, G., and Yue, P.L. 2002. Novel electrode system for electroflotation of wastewater. **Environmental Science Technology**. 36: 778-783.
- Daneshvar, N., Khataee, A.R., and Djafarzadeh, N. 2006. The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution containing C.I. Basic Yellow 28 by electrocoagulation process. **Journal of Hazardous Materials**. B137: 1788-1795.
- Drouiche, N., Aoudj, S., Hecini, M., Ghaffour, N., Lounici, H., and Mameri, N. 2009. Study on the treatment of photovoltaic wastewater using electrocoagulation: fluoride removal with aluminium electrodes-characteristics of products. **Journal of Hazardous Materials**. 169: 65-69.
- Duan, J. and Gregory, J. 2003. Coagulation by hydrolyzing metal salts. *Advances in colloid interface science*, **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, (100-102). 475-502.
- El-Gohary, F. and Tawfik, A. 2009. Decolorization and COD reduction of disperse and reactive dyes wastewater using chemical-coagulation followed by sequential batch reactor (SBR) process. **Desalination**. 249: 1159-1164.
- Eslami, A., Moradi, M., Ghandari, F., and mehdipour, F. 2013. Decolorization and COD removal from real textile wastewater by chemical and electrochemical Fenton processes: a comparative study, **Journal of Environmental Health Sciences & Engineering**. 11-31.

- Fajardo, A.S., Martins, R.C., Silva, D.R., Martínez-Huitle, C.A., and Quinta-Ferreira, R.M. 2017. Dye wastewaters treatment using batch and recirculation flow electrocoagulation systems. **Journal of Electroanalytical Chemistry**. 801: 30-37.
- Franco, M.S. and Azevedo, E.B. 2013. Colour removal of Remazol dye baths wastewater by  $UV=H_2O_2$  does not decrease TOC, BOD/COD and toxicity of the effluent. **Desalin. Water Treat.** 52: 1-8.
- Ghosh, D., Medhi, C.R., and Purkait, M.K. 2008. Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections. **Chemosphere**, 73(9): 1393-1400.
- Golder, A.K., Samanta, A.N., and Ray, S. 2007. Removal of  $Cr^{3+}$  by electrocoagulation with multiple electrodes: bipolar and monopolar configurations. **Journal of Hazardous Materials**. 141(3): 653-661.
- Guimaraes, J.R., Maniero, M.G., and Araujo, R.N. 2012. A comparative study on the degradation of RB-19 dye in an aqueous medium by advanced oxidation processes. **Journal Environmental Management**. 110: 33-39
- Gürses, A., Yalçın, M., and Doğar, C. 2002. **Electrocoagulation of some reactive dyes: a statistical investigation of some electrochemical variables**. Waste Management. Vol. 22, No. 5. 491-499.
- Hai, F. I., Yamamoto, K., and Fukushi, K. 2007. Hybrid treatment systems for dye wastewater. **Critical Reviews Environmental Science Technology**. 37: 315-377.
- Hakizimana, J.N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., and Naja, J. 2017. Electrocoagulation process in water treatment: a review of electrocoagulation modeling approaches. **Desalination**. 404: 1-21.
- Hamada, M., Ghalwa, N.A., Nader, B.Farhat, Mahllawi, K.A., and Jamee, N. 2018. Optimization of Electrocoagulation on Removal of Wastewater Pollutants. **International Journal of Waste Resources**. 8(4).
- Holt, P.K., Barton, G.W., and Mitchell, C.A. (2005). The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. **Chemosphere** 59 (3): 355-367.
- Jelena J.G., Ljiljana S.C., and Slobodan K.M, 2008. Point of Zero Charge and Isoelectric Point of Alumina. **Materials and Manufacturing Processes**. 23(6): 615-619.



- Jiang, H., Zhang, G., Huang, T., Chen, J., Wang, Q., and Meng, Q. 2010. Photocatalysis membrane reactor for degradation of Acid red B wastewater. **Chemical Engineering Journal**. 156: 571-577.
- Khadim Mbacke, M., Kane, C., Oury Diallo, N., Mar Diop, C., Chauvet, F., Comtat, M., and TZedakis, T. 2016. Electrocoagulation process applied on pollutants treatment experimental optimization and fundamental investigation of the crystal violet dye removal. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. 4: 4001-4011.
- Khandegar, V. and Saroha, A.K., 2013. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent e a review. **Journal of Environmental Management**. 128: 949-963.
- Kiliç, M.G. and Hoşten, C. (2010). A comparative study of electrocoagulation and coagulation of aqueous suspensions of kaolinite powders. **Journal of Hazardous Materials**. 176: 735-740.
- Kim, T.H., Park, C., Yang, J., and Kim, S. 2004. Comparison of disperse and reactive dye removals by chemical coagulation and Fenton oxidation. **Hazardous Materials**. 112: 95-103.
- Kim, T.H., Park, C., Shinb, EB., and Kim, S. 2004. Decolorization of disperse and reactive dye solutions using ferric chloride. **Desalination**, 161: 49-58.
- Kobyas, M., Can, O.T., and Bayramoglu, M. 2003. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. **J. Hazard. Mater. B**. 100: 163-178.
- Kobyas, M., Senturk, E., and Bayramoglu, M. 2006. Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**. 133(1-3): 172-176.
- Kongjao, S., Damronglerd, S., and Hunsom, M. 2008. Simultaneous removal of organic and inorganic pollutants in tannery wastewater using electrocoagulation technique. **Korean Journal of Chemical Engineering**. 25: 703-709.
- Ling, W. 1994. **Color removal from dyeing wastewater by electroflotation technique**. M.S. thesis. Asian Institute of Technology. Thailand.
- Makwana, A.R., and Ahammed, M.M. 2016. Continuous electrocoagulation process for the post treatment of anaerobically treated municipal wastewater. **Process Safety and Environmental Protection**. 102: 724-733.

- Malakootian, M., Mansoorian, H.J., and Moosazadeh, M. 2010. Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water. **Desalination**. 255: 67-71.
- Mameri, N., Yeddou, A.R., Lounici, H., Belhocine, D., Grib, H., and Bariou, B. 1998. Defluoridation of septentrional of Sahara water of North Africa by electrocoagulation process using bipolar aluminum electrodes. **Water Research**. 32: 1604-1612.
- Mazumder D. 2011. Process evaluation and treatability study of wastewater in a textile dyeing industry. **International Journal of Energy and Environment (IJEE)**. 2(6): 1053-1066.
- Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K., Vial, Ch., and Barkaoui, M. 2009. Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process. **Chemical Engineering Journal**. 149(1-3): 207-214.
- Mikko Vepsäläinen. **Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and waste waters**. VTT SCIENCE. 19.
- Mohora, E., Roncevic, S., Agbaba, J., Tubic, A., Mitic, M., Klasnja, M., and Dalmacija, B. 2014). Removal of arsenic from groundwater rich in natural organic matter (NOM) by continuous electrocoagulation/flocculation (ECF). **Separation and Purification Technology**. 136: 150-156.
- Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmez, M., Parga, J., and Cocke, D.L. 2004. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**. 114(1-3): 199-210.
- Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R., and Cocke, D. 2001. Electrocoagulation (EC) science and applications. **Journal of Hazardous Materials**. 84(1): 29-41.
- Moussa, D.T., El-Naas, M.H., Nasser, M., and Al-Marri, M.J. 2017. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. **Journal of Environmental Management**. 186: 24-41.
- Namboodri, C. G., Perkins, W. S., and Walsh, W. K. 1994. Decolorizing dyes with chlorine and ozone : **Part I. American Dyestuff Reporter**. 83: 17-22
- Nampoothiri, H., Manilal, A.M., and Soloman, P.A. 2016. Control of electrocoagulation batch reactor for oil removal from automobile garage wastewater. **Procedia Technology**. 25: 603-610.

- Nandi, B.K. and Patel, S. 2017. Effects of operational parameters on the removal of brilliant green dye from aqueous solution by electrocoagulation. **Arabian Journal of Chemistry**. 10: S2961-S2968.
- Ozyonar, F., and Karagozoglu, B. 2011. Operating cost analysis and treatment of Domestic wastewater by electrocoagulation using aluminium electrodes. **Polish Journal of Environmental Studies**. 20: 173-179.
- Pajootan, E., Arami, M., and Mahmoodi, N.M. 2012. Binary system dye removal by electrocoagulation from synthetic and real colored wastewaters. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. 43(2): 282-290.
- Phalakornkule, C., Polgumhang, S., Tongdaung, W., Karakat, B., and Nuyut, T. 2010. Electrocoagulation of blue reactive, red disperse and mixed dyes, and application in treating textile effluent. **Journal of Environmental Management**. 91(4): 918-926.
- Poots, V.J.P., and McKay, G.J.J. 1978. Removal of Basic Dye from Effluent Using Wood as an Adsorbent. **Healy Journal (Water Pollution Control Federation)**. 50(5): 926-935.
- PubChem Database. **National Center for Biotechnology Information**. (accessed on Nov. 7, 2019). C.I. Vat Yellow 33. สืบค้นจาก <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/C.I.-Vat-Yellow-33>.
- Sahu, O.P. and Chaudhari, P.K. 2013. Review on chemical treatment of industrial waste water. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**. 17: 241-257.
- Sengil, I.A. and Ozacar, M. 2006. Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. **Journal of Hazardous Materials**. 137(2): 1197-1205.
- Sengil, I.A. and Özacar, M. 2009. The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. **Journal of Hazardous Materials**. 161: 1369-1376.
- Sergi Garcia, S. and Brillas, E. 2017. Mineralization of the recalcitrant oxalic and oxamic acids by electrochemical advanced oxidation processes using a boron-doped diamond anode. **Water Research**. 1(11): 08028.
- Shankar, R., Singh, L., and Mondal, P. 2015. Removal of lignin from wastewater through electrocoagulation, ecological technologies for industrial wastewater management: petrochemicals. **Metals Semi Conduct. Pulp and Paper Industry**. 1: 217.

- Sridhar, R., Sivakumar, V., Prince Immanuel, V., and Prakash Maran, J. 2011. Treatment of pulp and paper industry bleaching effluent by electrocoagulant process. **Journal of Hazardous Materials**. 186(2-3): 1495-1502.
- Stepanovich, A. 2013. Combinatorial development of porous semiconductor thin film photo-electrodes for solar water splitting by dealloying of binary and ternary alloys. Thesis for: Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.).
- Sundrarajan, M., Vishnu, G., and Joseph, K. 2007. Decolorisation of exhausted reactive dye batch using ozonator for reuse. **International Journal of Environmental Science and Technology**. 4(2): 263-270.
- Szpyrkowicz, L., Juzzolino, C., Kaul, S. N., Daniele, S., and De Faveri, M. 2000. Electrochemical oxidation of dyeing baths bearing disperse dyes. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 39: 3241-3248.
- Tchamango, S.R., Kamdoun, O., Donfack, D., and Babale D. 2017. Comparison of electro-coagulation and chemical coagulation processes in the treatment of an effluent of a textile factory, **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, 21(7): 1317-1322.
- Terrazas, E., Vázquez, A., Briones, R., Lázaro, I. and Rodríguez, I. 2010. EC treatment for reuse of tissue paper wastewater: Aspects that affect energy consumption. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. 181, No. 1-3, pp. 809-816.
- Tir, M. and Moulai-Mostefa, N. 2008. Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method. **Journal of Hazardous Materials**. 158: 107-115.
- Venceslau, M.C , Tom, S., and Simon J.J. 1994. Characterisation of textile wastewaters a review, **Environmental Technology**. 15(10): 917-929.
- Verma A.K., Dash, R.R., and Bhunia, P. 2012. **A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters**, Journal of Environmental Management. Vol. 93, No. 1. 154-168.
- Wagatsuma, T. and Ezo, Y. 2010. Effect of pH on Ionic Species of Aluminum in Medium and on Aluminum Toxicity Under Solution Culture. **Soil Science and Plant Nutrition**. 31(4): 547-561.

- Xu, X. and Zhu, X. 2004. Treatment of refractory oily wastewater by electro-coagulation process. **Chemosphere**. 56: 889-894.
- Yetilmezsoy, K., Ilhan, F., Sapci-Zengin, Z., Sakar, S., and Gonullu, M.T. 2009. Decolorization and COD reduction of UASB pretreated poultry manure wastewater by electrocoagulation process: a post-treatment study. **Journal of Hazardous Materials**. 162(1): 120-132.
- Zee, F.V., Bisschops, I., Blanchard, V., Bouwman, R., Lettinga, G., and Field, J. 2003. The contribution of biotic and abiotic processes during azo dye reduction in anaerobic sludge. **Water Resources**. 37(13): 3098-3109.
- Zhan, C., Sangl, J., and Bierman, S. 2001. Potentially Inappropriate Medication Use in the community-dwelling elderly: findings from the 1996 Medical Expenditure Panel Survey. **Medical Expenditure Panel Survey**. JAMA. 286(22): 2823-2829.
- Zhan, X. M., Wang, J. L., Wen, X. H., and Qian, Y. 2001. Indirect Electrochemical Treatment of Saline Dyestuff Wastewater. **Environmental Technology**. 22(9): 1105-1111.

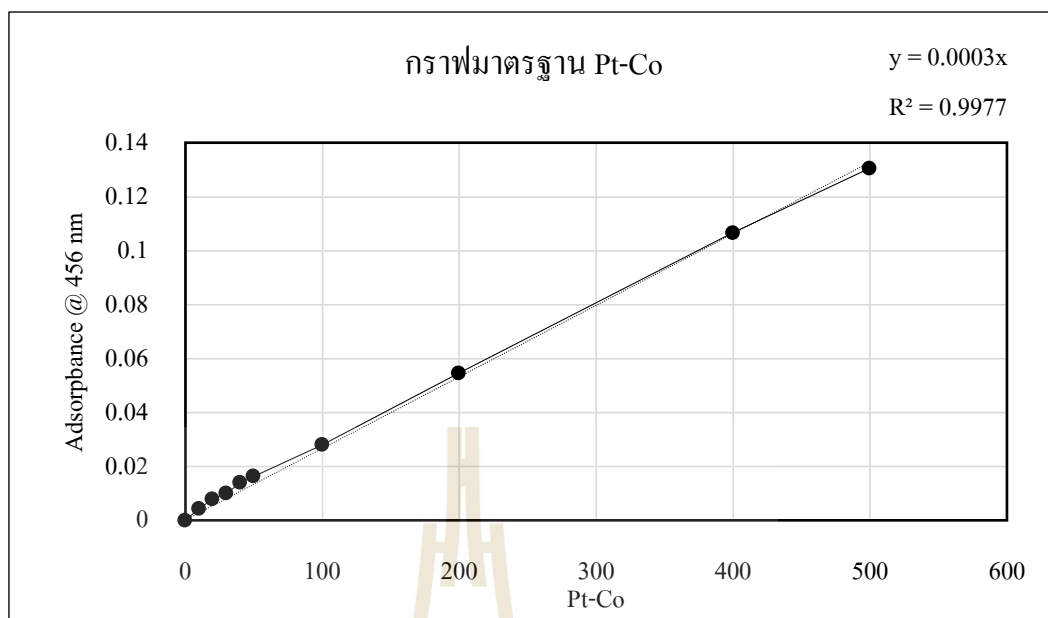




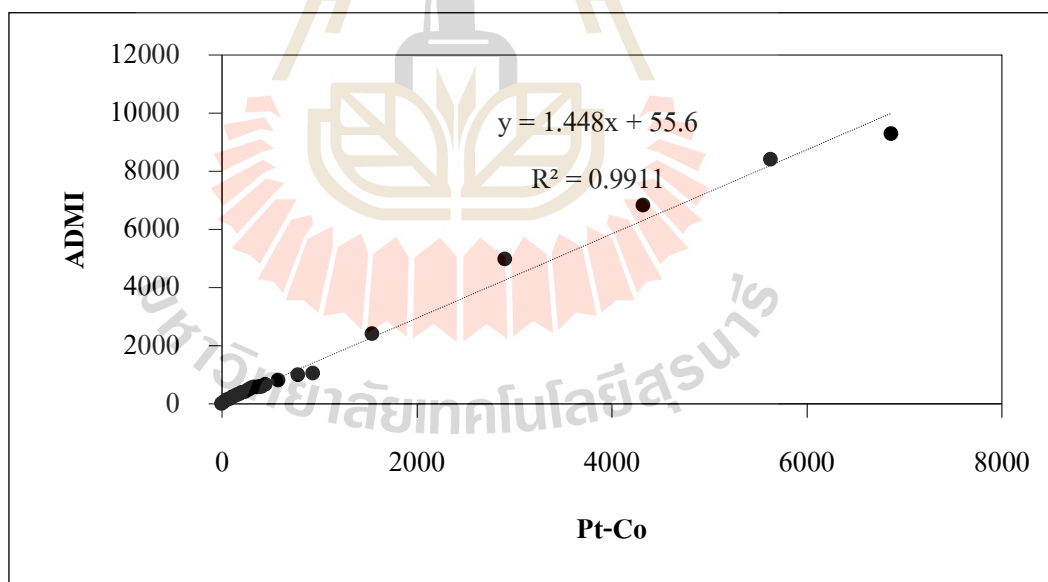
ภาคผนวก ก

ความเข้มข้นของดีเยี่ยม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

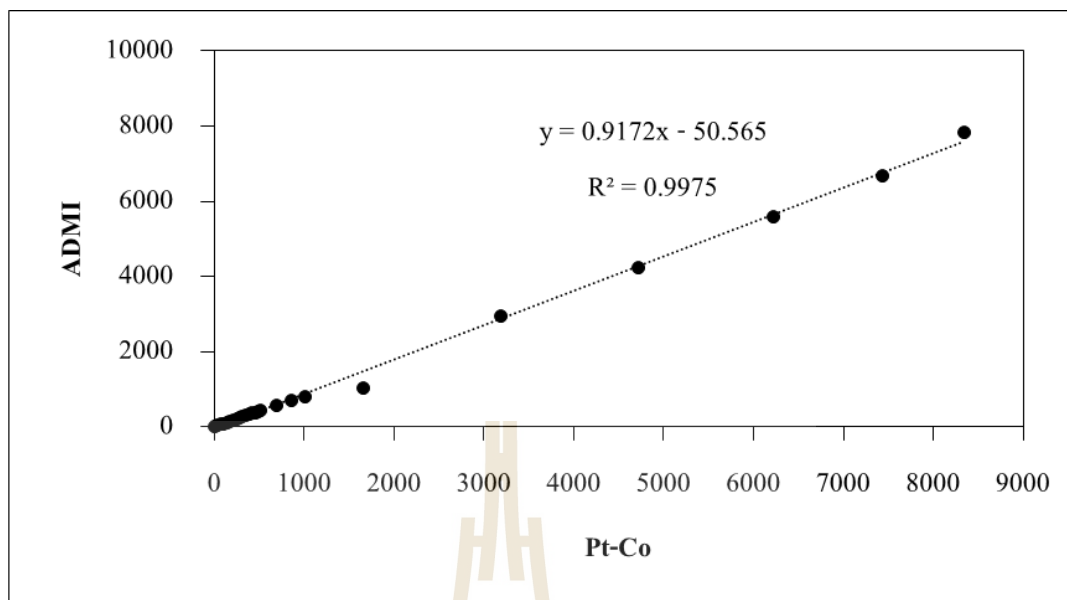


รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐาน Pt-Co ที่ความยาวคลื่น 456 นาโนเมตร



รูปที่ ก.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วย Pt-Co และ หน่วย ADMI ของสีย้อม Acid





รูปที่ ก.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วย Pt-Co และ หน่วย ADMI ของสีย้อม Acid

ภาคผนวก ข

ผลการบำบัดสีย้อมด้วยระบบ Electrocoagulation แบบ Batch

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของลิเทียม Acid โดยใช้ขั้วไฟฟ้า Al

ความเข้มข้น เริ่มต้นของลิ เทียม (mg/l)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s/cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของลิเทียม (mg/l)		ประสิทธิภาพการ บำบัดลิเทียมเฉลี่ย (%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าใน วงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
20 (1)	154.60	160.00	6.054	8.849	0.194	0.009	21.56	1.00			0.19	0.20
20 (2)	154.60	155.15	6.054	8.435	0.194	0.020	21.56	2.22	91.92	3.02	0.16	0.18
20 (3)	154.60	149.77	6.054	8.61	0.194	0.018	21.56	2.00			0.17	0.21
40 (1)	176.03	171.53	6.065	8.826	0.388	0.029	43.11	3.26			0.16	0.18
40 (2)	176.03	178.47	6.065	8.714	0.388	0.021	43.11	2.37	93.79	1.17	0.15	0.17
40 (3)	176.03	166.23	6.065	8.72	0.388	0.022	43.11	2.41			0.18	0.19
60 (1)	203.67	192.67	6.021	8.916	0.545	0.025	60.56	2.74			0.19	0.21
60 (2)	203.67	197.00	6.021	8.837	0.545	0.037	60.56	4.15	94.41	1.18	0.18	0.19
60 (3)	203.67	197.90	6.021	8.94	0.545	0.029	60.56	3.26			0.19	0.24
80 (1)	228.67	205.00	6.036	8.804	0.726	0.042	80.67	4.70			0.23	0.26
80 (2)	228.67	224.67	6.036	8.828	0.726	0.033	80.67	3.63	94.78	0.67	0.22	0.24
80 (3)	228.67	221.67	6.036	8.835	0.726	0.039	80.67	4.30			0.27	0.27
100 (1)	247.00	249.67	6.069	8.995	0.901	0.057	100.11	6.30			0.22	0.26
100 (2)	247.00	243.33	6.069	8.991	0.901	0.044	100.11	4.89	94.20	0.79	0.26	0.29
100 (3)	247.00	245.00	6.069	9.013	0.901	0.056	100.11	6.22			0.24	0.26

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Acid โดยใช้ขั้วไฟฟ้า Al (ต่อ)

ความเข้มข้น เริ่มต้นของสี ย้อม (mg/l)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s/cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสีย้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าใน วงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	120 (1)	256.67	249.67	6.028	9.012	0.112	0.056	140.00	6.22			0.25
120 (2)	256.67	243.33	6.028	9.001	0.112	0.049	140.00	5.41	96.03	0.43	0.28	0.32
120 (3)	256.67	245.00	6.028	9.100	0.112	0.045	140.00	5.04			0.27	0.28
140 (1)	299.00	257.67	6.076	9.102	0.129	0.063	161.25	6.96			0.34	0.37
140 (2)	299.00	282.00	6.076	9.104	0.129	0.054	161.25	6.00	96.13	0.39	0.31	0.34
140 (3)	299.00	270.67	6.076	9.110	0.129	0.052	161.25	5.78			0.28	0.30



ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของลิเทียม Acid โดยใช้ขั้วไฟฟ้า Fe

ความเข้มข้น เริ่มต้นของลิ เทียม (mg/l)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของลิ เทียม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดลิ เทียมเฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
20 (1)	176.03	191.33	6.006	6.772	0.178	0.039	20.42	4.52			0.24	0.30
20 (2)	176.03	189.00	6.006	6.757	0.178	0.048	20.42	5.52	75.42	3.45	0.22	0.25
40 (1)	192.57	186.35	6.043	7.052	0.355	0.043	40.77	4.94			0.25	0.27
40 (2)	192.57	192.53	6.043	8.714	0.355	0.057	40.77	6.59	85.86	2.86	0.30	0.30
60 (1)	225.33	216.00	6.003	9.108	0.530	0.045	60.96	5.17			0.26	0.29
60 (2)	225.33	229.33	6.003	9.116	0.530	0.056	60.96	6.44	90.48	1.47	0.27	0.29
80 (1)	255.67	255.00	6.077	7.943	0.704	0.067	80.88	7.74			0.36	0.37
80 (2)	255.67	252.50	6.077	7.954	0.704	0.111	80.88	12.72	87.35	4.35	0.37	0.41
100 (1)	262.67	257.67	6.054	9.885	0.883	0.116	101.46	13.37			0.32	0.35
100 (2)	262.67	266.50	6.054	9.992	0.883	0.108	101.46	12.45	87.27	0.64	0.36	0.39
120 (1)	289.33	277.50	6.095	9.558	0.106	0.114	132.92	13.07			0.38	0.41
120 (2)	289.33	302.50	6.095	9.833	0.106	0.148	132.92	17.05	88.67	2.12	0.37	0.42
140 (1)	294.67	313.50	6.066	10.145	0.122	0.127	152.50	14.64			0.43	0.49
140 (2)	294.67	317.00	6.066	9.96	0.122	0.097	152.50	11.15	91.55	1.62	0.35	0.41

ตารางที่ ข.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม Acid โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AI

ความเข้มข้น NaCl (g/l)	Conductivity หลังเติม		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีข้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสีข้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	NaCl ( $\mu\text{s/cm}$ )		ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC				
0.06 (1)	268	248	6.079	9.123	0.128	0.054	160.00	6.00			0.30	0.54
0.06 (2)	268	260	6.079	9.066	0.128	0.057	160.00	6.30	96.16	0.13	0.29	0.31
0.12 (1)	395	374	6.079	9.15	0.128	0.056	160.00	6.19			0.54	0.58
0.12 (2)	395	379	6.079	9.283	0.128	0.052	160.00	5.78	96.26	0.18	0.52	0.53
0.24 (1)	604	559	6.079	9.061	0.128	0.056	160.00	6.19			0.87	0.92
0.24 (2)	604	591	6.079	9.231	0.128	0.051	160.00	5.67	96.30	0.23	0.78	0.87
0.48 (1)	1002	1005	6.079	9.313	0.128	0.037	160.00	4.11			1.48	1.67
0.48 (2)	1002	1013	6.079	9.41	0.128	0.025	160.00	2.81	97.84	0.57	1.40	1.61
0.96 (1)	1509	1312	6.079	9.643	0.128	0.010	160.00	1.15			1.48	1.68
0.96 (2)	1505	1306	6.079	9.543	0.128	0.012	160.00	1.37	99.21	0.10	1.48	1.69

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.5 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขั้วไฟฟ้า Fe

ความเข้มข้น NaCl (g/l)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสี ย้อมเฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าใน วงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
0.06 (1)	303.00	322.67	6.18	10.21	0.146	0.358	182.50	35.41	80.16%	0.61%	0.40	0.457
0.06 (2)	303.00	339.33	6.18	10.13	0.146	0.374	182.50	37.00			0.42	0.489
0.12 (1)	411.67	429.00	6.10	9.98	0.141	0.221	176.67	21.85	87.81%	0.25%	0.57	0.69
0.12 (2)	411.67	419.67	6.10	9.44	0.141	0.214	176.67	21.22			0.54	0.61
0.24 (1)	590.00	675.33	6.18	10.45	0.146	0.306	182.50	30.30	84.48%	1.53%	0.90	1.114
0.24 (2)	590.00	685.67	6.18	10.46	0.146	0.266	182.50	26.34			0.93	1.152
0.48 (1)	992.33	1059.00	6.10	10.45	0.141	0.215	176.67	21.32	82.56%	4.21%	1.44	1.77
0.48 (2)	992.33	1095.67	6.10	10.51	0.141	0.153	176.67	15.18			1.34	1.67
0.96 (1)	1585.67	1956.33	6.18	10.55	0.146	0.278	182.50	27.56	84.79%	0.15%	2.16	2.234
0.96 (2)	1585.67	1957.67	6.18	10.61	0.146	0.282	182.50	27.95			2.24	2.27

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ตารางที่ ข.5 ผลการศึกษาความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AI

ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (Volt)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสีย้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	5 (1)	1497.67	1490.00	6.02	8.92	0.121	0.041	151.67	4.67			0.26
5 (2)	1497.67	1512.33	6.02	8.89	0.121	0.043	151.67	4.94	96.83	0.13	0.41	0.43
10 (1)	1497.67	1600.67	6.02	9.21	0.121	0.040	151.67	4.56			0.98	1.093
10 (2)	1497.67	1481.00	6.02	9.14	0.121	0.042	151.67	4.87	96.89	0.14	1.02	1.11
12.5 (1)	1441.00	1614.00	6.09	9.04	0.129	0.041	161.67	4.67			1.38	1.74
12.5 (2)	1465.33	1463.67	6.09	9.24	0.129	0.044	161.67	5.06	96.99	0.41	1.38	1.62
15 (1)	1497.67	1634.00	6.02	9.66	0.122	0.035	152.50	4.02			1.84	2.23
15 (2)	1497.67	1631.00	6.02	9.65	0.122	0.027	152.50	3.14	97.65	0.41	1.86	2.22
20 (1)	1497.67	1682.50	6.02	9.76	0.122	0.029	152.50	3.33			2.05	2.24
20 (2)	1497.67	1709.50	6.02	9.66	0.122	0.020	152.50	2.30	98.15	0.48	2.16	2.31

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.6 ผลการศึกษาความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขั้วไฟฟ้า Fe

ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (Volt)	Conductivity หลัง เติม NaCl ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสี ย้อมเฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าใน วงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	5 (1)	949.33	1038.00	6.08	7.01	0.141	0.425	176.25	42.11			0.26
5 (2)	949.33	1038.33	6.08	9.87	0.141	0.445	176.25	44.06	76.65	1.98	0.28	0.3
10 (1)	949.33	1006.00	6.08	9.85	0.141	0.377	176.25	37.29			0.26	0.28
10 (2)	949.33	1027.00	6.08	10.32	0.141	0.314	176.25	31.12	83.73	1.21	0.63	0.7
15 (1)	949.33	1030.33	6.08	10.36	0.141	0.274	176.25	27.13			0.73	0.8
15 (2)	949.33	1030.33	6.08	10.33	0.141	0.281	176.25	27.79	88.05	1.95	0.69	0.75
20 (1)	949.33	1060.33	6.08	10.47	0.141	0.215	176.25	21.32			1.02	1.14
20 (2)	949.33	1055.67	6.08	10.46	0.141	0.177	176.25	17.49	85.69	1.15	1.12	1.36

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.7 ผลการศึกษาค่า pH เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AI

pH	Conductivity หลังเติม		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	NaCl (µs/cm)		ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC				
3 (1)	1854.33	1682.67	3.10	9.11	0.142	0.009	177.083	0.891			1.51	1.79
3 (2)	1854.33	1643.00	3.10	9.05	0.142	0.011	177.083	1.056	99.45	0.07	1.3	1.52
5 (1)	1537.33	1660.67	5.03	9.42	0.142	0.030	177.083	3.003			1.48	1.91
5 (2)	1537.33	1647.00	5.03	9.31	0.142	0.023	177.083	2.310	98.50	0.28	1.45	1.7
6 (1)	1740.67	1637.00	6.12	9.15	0.142	0.040	177.083	3.993			1.3	1.48
6 (2)	1740.67	1667.33	6.12	9.21	0.142	0.038	177.083	3.795	97.80	0.08	1.42	1.61
8 (1)	1752.67	1738.00	8.02	9.27	0.142	0.035	177.083	3.498			1.58	1.79
8 (2)	1752.67	1706.00	8.02	9.27	0.142	0.035	177.083	3.465	98.03	0.01	1.52	1.73
10 (1)	1775.00	1732.67	10.04	9.32	0.142	0.049	177.083	4.884			1.56	1.86
10 (2)	1775.00	1766.33	10.04	9.30	0.142	0.054	177.083	5.314	97.12	0.17	1.48	1.81

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.8 ผลการศึกษาค่า pH เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขั้วไฟฟ้า Fe

pH	Conductivity หลังเติม NaCl (µs/cm)		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	3 (1)	1156.00	1682.67	3.06	6.93	0.286	0.226	190.89	22.41			1.49
3 (2)	1156.00	1682.67	3.06	6.75	0.286	0.294	190.89	29.14	86.50	2.49	1.39	1.72
5 (1)	963.00	1053.00	5.08	10.29	0.286	0.204	190.89	20.17			1.45	1.71
5 (2)	963.00	1072.67	5.08	10.42	0.286	0.168	190.89	16.60	90.37	1.32	1.55	1.73
6 (1)	971.33	1149.00	6.13	10.51	0.294	0.214	196.00	21.22			1.21	1.69
6 (2)	971.33	1122.33	6.13	10.48	0.294	0.211	196.00	20.86	89.27	0.13	1.29	1.61
8 (1)	1026.33	1120.50	8.09	10.62	0.294	0.210	196.00	20.79			1.48	1.81
8 (2)	1026.33	1122.67	8.09	10.78	0.294	0.196	196.00	19.41	90.10	0.50	1.45	1.78
10 (1)	1030.00	1147.00	10.01	10.80	0.294	0.082	196.00	8.15			1.44	1.70
10 (2)	1179.33	1179.33	10.01	10.76	0.294	0.156	196.00	15.48	93.97	2.64	1.38	1.70



ตารางที่ ข.9 ผลการศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AI

ระยะเวลาใน การทำ ปฏิกิริยา (นาที)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสีย้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าใน วงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	10 (1)	2176.67	1830.50	3.15	8.59	0.142	0.128	177.08	12.71			1.38
10 (2)	2176.67	1866.00	3.15	8.89	0.142	0.123	177.08	12.21	92.96	0.20	1.49	1.61
15 (1)	2176.67	1864.00	3.15	8.97	0.142	0.127	177.08	12.61			1.64	1.89
15 (2)	2176.67	1842.00	3.15	9.05	0.142	0.124	177.08	12.28	92.97	0.13	1.43	1.61
20 (1)	2176.67	1873.67	3.15	9.16	0.142	0.127	177.08	12.61			1.5	1.79
20 (2)	2176.67	1838.00	3.15	9.26	0.142	0.115	177.08	11.39	93.23	0.49	1.68	2.4
25 (1)	2176.67	1824.33	3.15	9.37	0.142	0.011	177.08	1.06			1.51	1.9
25 (2)	2176.67	1819.00	3.15	9.34	0.142	0.002	177.08	0.17	99.66	0.36	1.48	1.83
30 (1)	2176.67	1853.67	3.15	9.52	0.142	0.012	177.08	1.19			1.48	1.75
30 (2)	2176.67	1830.33	3.15	9.46	0.142	0.002	177.08	0.17	99.62	0.41	1.75	2.16

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.10 ผลการศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขี้ไฟฟ้า Fe

ระยะเวลาใน การทำ ปฏิกิริยา (นาที)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสีย้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าใน วงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	10 (1)	1129.67	1099.00	9.99	10.43	1.062	0.232	137.88	22.97			1.06
10 (2)	1129.67	1068.33	9.99	10.49	1.062	0.178	137.88	17.66	85.27	2.73	1.15	1.29
15 (1)	1129.67	1106.67	9.99	10.65	1.062	0.193	137.88	19.11			1.19	1.36
15 (2)	1129.67	1125.00	9.99	10.68	1.062	0.164	137.88	16.24	87.18	1.47	1.12	1.33
20 (1)	1129.67	1136.00	9.99	10.83	1.062	0.165	137.88	16.34			1.31	1.66
20 (2)	1129.67	1127.67	9.99	10.66	1.062	0.211	137.88	20.92	86.49	2.35	1.25	1.47
25 (1)	1129.67	1133.33	9.99	10.85	1.062	0.178	137.88	17.66			1.19	1.65
25 (2)	1129.67	1138.50	9.99	10.82	1.062	0.193	137.88	19.14	86.66	0.76	1.13	1.5
30 (1)	1129.67	1129.50	9.99	10.82	1.062	0.128	137.88	12.64			1.11	1.47
30 (2)	1129.67	1161.00	9.99	10.83	1.062	0.095	137.88	9.44	91.99	1.64	1.15	1.55

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.11 ผลการศึกษาระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AI

ระยะเวลาในการตกตะกอน (นาที)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	15 (1)	1876.33	1739.00	3.12	9.19	0.284	0.003	189.56	0.33			1.18
15 (1)	1876.33	1739.00	3.12	9.19	0.284	0.003	189.56	0.33	99.83	0.00	1.17	1.54
30 (1)	1876.33	1683.00	3.12	9.19	0.284	0.006	189.56	0.63			1.18	1.58
30 (2)	1876.33	1816.00	3.12	9.41	0.284	0.003	189.56	0.33	99.75	0.08	1.17	1.54
45 (1)	1876.33	1788.00	3.12	9.41	0.284	0.002	189.56	0.30			1.18	1.58
45 (2)	1876.33	1777.00	3.12	9.69	0.284	0.002	189.56	0.20	99.87	0.03	1.17	1.54
60 (1)	1876.33	1734.00	3.12	9.69	0.284	0.002	189.56	0.20			1.18	1.58
60 (2)	1876.33	1773.00	3.12	9.68	0.284	0.003	189.56	0.30	99.87	0.03	1.17	1.54
120 (1)	1876.33	1789.00	3.12	9.68	0.284	0.003	189.56	0.30			1.18	1.58
120 (2)	1876.33	1784.00	3.12	9.76	0.284	0.003	189.56	0.30	91.99	0.00	1.17	1.54

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ตารางที่ ข.12 ผลการศึกษาระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขี้ไฟฟ้า Fe

ระยะเวลาในการตกตะกอน (นาที)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s/cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	15 (1)	1129.67	1183.67	9.99	10.53	1.062	0.126	137.88	12.48			1.18
15 (1)	1129.67	1156.67	9.99	10.62	1.062	0.172	137.88	17.06	89.29	1.67	1.17	1.54
30 (1)	1129.67	1171.00	9.99	10.58	1.062	0.093	137.88	9.21	91.12	2.20	1.18	1.58
30 (2)	1129.67	1175.67	9.99	10.71	1.062	0.154	137.88	15.28			1.17	1.54
45 (1)	1129.67	1147.00	9.99	10.62	1.062	0.078	137.88	7.69	91.90	2.53	1.18	1.58
45 (2)	1129.67	1166.00	9.99	10.65	1.062	0.148	137.88	14.65			1.17	1.54
60 (1)	1129.67	1129.00	9.99	10.60	1.062	0.121	137.88	12.01	82.90	8.39	1.18	1.58
60 (2)	1129.67	1171.67	9.99	10.70	1.062	0.355	137.88	35.15			1.17	1.54
120 (1)	1129.67	1130.33	9.99	10.22	1.062	0.435	137.88	43.07	73.54	4.78	1.18	1.58
120 (2)	1129.67	1174.33	9.99	10.27	1.062	0.302	137.88	29.90			1.17	1.54



ตารางที่ ข.13 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Vat โดยใช้ขี้ไฟฟ้า AI

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (mg/l)	Conductivity หลังเติม						ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเฉลี่ย (%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	NaCl (µs/cm)		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC						
20 (1)	144.22	106.55	6.02	8.62	0.956	0.497	19.70	10.24			0.15	0.17
20 (2)	144.22	106.55	6.02	8.35	0.956	0.490	19.70	10.10	50.18%	3.11%	0.15	0.14
20 (3)	144.22	106.55	6.02	8.29	0.956	0.442	19.70	9.11			0.14	0.17
40 (1)	147.80	133.40	6.04	8.73	0.200	0.198	50.00	4.08			0.16	0.16
40 (2)	147.80	138.10	6.04	7.94	0.200	0.209	50.00	4.31	91.41%	0.42%	0.19	0.19
40 (3)	147.80	131.50	6.04	8.04	0.200	0.218	50.00	4.49			0.17	0.18
60 (1)	154.90	139.00	6.03	8.54	0.287	0.171	71.75	3.53			0.15	0.16
60 (2)	154.90	131.90	6.03	8.78	0.287	0.168	71.75	3.46	95.38%	0.43%	0.17	0.18
60 (3)	154.90	123.70	6.03	8.30	0.287	0.144	71.75	2.96			0.17	0.17
80 (1)	149.30	116.60	6.01	8.34	0.444	0.221	111.08	4.55			0.17	0.17
80 (2)	149.30	124.20	6.01	8.31	0.444	0.207	111.08	4.26	96.03%	0.53%	0.15	0.16
80 (3)	149.30	127.30	6.01	7.61	0.444	0.166	111.08	3.42			0.17	0.18
100 (1)	162.20	134.60	6.03	8.55	0.548	0.287	137.00	5.92			0.19	0.20
100 (2)	162.20	137.10	6.03	8.47	0.548	0.303	137.00	6.25	96.08%	0.54%	0.17	0.18
100 (3)	162.20	135.60	6.03	8.27	0.548	0.234	137.00	4.82			0.19	0.20

ตารางที่ ข.13 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม Vat โดยใช้ขั้วไฟฟ้า Al (ต่อ)

ความเข้มข้น เริ่มต้นของสี ข้อม (mg/l)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s/cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสี ข้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสีข้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
120 (1)	168.10	153.70	6.04	8.65	0.671	0.348	167.83	7.17			0.17	0.19
120 (2)	168.10	152.10	6.04	8.55	0.671	0.285	167.83	5.88	96.27	0.47	0.19	0.20
120 (3)	168.10	154.00	6.04	8.26	0.671	0.278	167.83	5.74			0.20	0.22
140 (1)	176.30	168.90	6.01	8.92	0.789	0.354	197.25	7.29			0.17	0.20
140 (2)	176.30	164.90	6.01	8.75	0.789	0.339	197.25	7.00	96.66	0.49	0.20	0.21
140 (3)	176.30	171.50	6.01	9.26	0.789	0.267	197.25	5.50			0.22	0.23

ตารางที่ ข.14 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม Vat โดยใช้ขี้วัวไฟฟ้า Fe

ความเข้มข้น เริ่มต้นของสี ย้อม (mg/l)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s/cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพการ บำบัดสีย้อมเฉลี่ย (%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าใน วงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	20 (1)	145.33	161.33	5.93	7.53	1.097	0.955	20.21	17.58	10.81	3.09	0.22
20 (2)	145.33	169.67	5.93	7.73	1.097	1.003	20.21	18.47	0.23			0.28
40 (1)	148.67	161.333	6.16	9.56	0.333	1.001	45.62	18.43	59.47	0.16	0.2	0.24
40 (2)	148.67	161.333	6.16	9.54	0.333	1.007	45.62	18.54			0.2	0.24
60 (1)	147.533	156.200	6.03	8.36	0.466	1.320	63.84	24.32	64.02	2.98	0.21	0.25
60 (2)	147.533	156.200	6.03	9.25	0.466	1.174	63.84	21.63			0.2	0.25
80 (1)	159.200	163.033	6.01	9.42	0.676	1.221	92.65	22.48	73.81	2.72	0.22	0.27
80 (2)	159.200	161.200	6.01	9.33	0.590	1.234	80.87	22.73			0.2	0.24
100 (1)	160.900	173.033	6.08	9.88	0.768	1.226	105.16	22.57	78.36	0.25	0.23	0.3
100 (2)	160.900	168.167	6.08	9.44	0.768	1.246	105.16	22.94			0.22	0.26
120 (1)	194.733	206.333	6.04	10.47	0.848	1.086	116.16	19.99	82.87	0.12	0.28	0.4
120 (2)	194.733	214.000	6.04	10.42	0.848	1.075	116.16	19.80			0.28	0.38
140 (1)	227.000	268.333	6.05	10.67	0.968	1.036	132.60	19.08	85.66	0.07	0.33	0.52
140 (2)	227.000	268.333	6.05	10.57	0.968	1.029	132.60	18.95			0.32	0.48

ตารางที่ ข.15 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AI

ความเข้มข้น NaCl (g/l)	Conductivity หลังเติม		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสีย้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	NaCl ( $\mu\text{s/cm}$ )		ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC				
0.06 (1)	168.83	159.93	6.061	8.929	0.751	0.362	187.83	6.66			0.19	0.21
0.06 (2)	168.83	164.87	6.061	8.909	0.751	0.309	187.83	5.69	96.71	0.37	0.23	0.24
0.12 (1)	285.00	282.33	6.061	8.837	0.751	0.285	187.83	5.25			0.37	0.40
0.12 (2)	285.00	278.00	6.061	8.822	0.751	0.288	187.83	5.31	97.19	0.02	0.37	0.38
0.24 (1)	491.00	487.00	6.061	8.804	0.751	0.288	187.83	5.30			0.76	0.86
0.24 (2)	491.00	497.67	6.061	8.875	0.751	0.248	187.83	4.56	97.57	0.28	0.72	0.82
0.48 (1)	858.00	875.00	6.061	9.080	0.751	0.299	187.83	5.51			1.24	1.50
0.48 (2)	858.00	940.00	6.061	9.322	0.751	0.292	187.83	5.37	97.10%	0.05	1.33	1.61
0.96 (1)	1486.67	1050.00	6.061	9.207	0.751	0.319	187.83	5.87			2.27	2.32
0.96 (2)	1486.67	1656.50	6.061	9.257	0.751	0.363	187.83	6.68	96.66%	0.31	2.16	2.16

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.16 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AI

ความเข้มข้น NaCl (g/l)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s/cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสี ย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสีย้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	0.06 (1)	177.83	191.73	6.22	9.95	1.043	1.256	142.8	23.13			0.25
0.06 (2)	177.83	191.00	6.22	9.91	1.043	1.093	142.8	20.13	84.86	1.49	0.28	0.33
0.12 (1)	294.67	325.33	6.22	10.38	1.043	0.963	142.8	17.73			0.38	0.50
0.12 (2)	294.67	317.67	6.22	10.22	1.043	0.928	142.8	17.10	87.81	0.31	0.45	0.48
0.24 (1)	541.67	583.00	6.22	10.49	1.043	0.911	142.8	16.78			0.79	1.03
0.24 (2)	541.67	603.00	6.22	10.48	1.043	0.899	142.8	16.56	88.40	0.11	0.70	1.01
0.48 (1)	981.67	1057.33	6.22	10.48	1.043	0.874	142.8	16.10			1.69	2.09
0.48 (2)	981.67	1022.33	6.22	10.49	1.043	0.866	142.8	15.95	88.78	0.07	1.53	2.02
0.96 (1)	1795.00	1935.67	6.22	10.48	1.043	0.846	142.8	15.59			2.64	3.66
0.96 (2)	1795.00	1943.00	6.22	10.46	1.043	0.754	142.8	13.89	89.68	0.84	2.54	3.77

ตารางที่ ข.17 ผลการศึกษาความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AI

ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (Volt)	Conductivity หลังเดิม		pH	ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสีย้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)			
	NaCl ( $\mu\text{s/cm}$ )			ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ก่อน EC	หลัง EC	ต่ำสุด	สูงสุด
	ก่อน EC	หลัง EC											
5 (1)	452.00	449.00	6.06	8.53	0.77	0.37	193.25	6.83			0.1	0.11	
5 (2)	452.00	453.00	6.06	8.49	0.77	0.32	193.25	5.95	96.69	0.32	0.11	0.11	
10 (1)	452.00	443.50	6.06	8.31	0.77	0.30	193.25	5.60			0.29	0.3	
10 (2)	452.00	451.50	6.06	8.72	0.77	0.31	193.25	5.69	97.08	0.03	0.3	0.31	
15 (1)	452.00	438.00	6.06	8.78	0.77	0.26	193.25	4.86			0.5	0.54	
15 (2)	452.00	456.00	6.06	8.81	0.77	0.27	193.25	4.97	97.46	0.04	0.46	0.47	
17 (1)	439.67	453.00	6.02	9.12	0.77	0.22	191.92	4.09			0.54	0.59	
17 (2)	439.67	450.00	6.02	8.93	0.77	0.23	191.92	4.16	97.85	0.02	0.59	0.63	
20 (1)	452.00	449.33	6.06	8.81	0.77	0.25	193.25	4.66			0.66	0.67	
20 (2)	452.00	449.33	6.06	8.81	0.77	0.23	193.25	4.24	97.70	0.15	0.66	0.67	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ตารางที่ ข.18 ผลการศึกษาความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม Vat โดยใช้ขั้วไฟฟ้า Fe

ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (Volt)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสี ข้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสีข้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	5 (1)	1829.00	1840.67	6.10	10.30	0.97	1.26	133.42	23.24			0.53
5(2)	1829.00	1817.67	6.10	10.28	0.97	1.17	133.42	21.53	83.22	0.91	0.55	0.59
10 (1)	1829.00	1879.67	6.10	10.54	0.97	1.12	133.42	20.71			1.13	1.2
10 (2)	1829.00	1893.00	6.10	10.62	0.97	1.07	133.42	19.64	84.88	0.56	1.11	1.32
15 (1)	1829.00	1931.67	6.10	10.55	0.97	1.04	133.42	19.24			2.08	2.84
15 (2)	1829.00	1892.33	6.10	10.54	0.97	1.00	133.42	18.42	85.89	0.44	2.02	2.53
20 (1)	1829.00	1953.33	6.10	10.50	0.97	0.96	133.42	17.61			2.69	4.03
20 (2)	1829.00	1946.67	6.10	10.46	0.97	0.94	133.42	17.40	86.88	0.11	3.09	4.12



ตารางที่ ข.19 ผลการศึกษาค่า pH เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ขี้วัวไฟฟ้า A1

pH	Conductivity หลังเติม		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	NaCl (μs/cm)		ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	ก่อน EC	หลัง EC										
3 (1)	684.00	454.67	3.09	7.59	7.68	1.81	144.84	34.24			0.56	0.7
3 (2)	684.00	434.33	3.09	7.56	7.68	1.94	144.84	36.69	75.52%	1.19%	0.49	0.52
5 (1)	620.33	643.67	5.02	9.05	7.68	0.27	144.84	5.18			0.66	0.71
5 (2)	620.33	638.33	5.02	9.02	7.68	0.25	144.84	4.66	96.60%	0.25%	0.72	0.78
6 (1)	453.00	445.00	6.05	9.07	7.68	0.29	144.84	5.53			0.49	0.5
6 (2)	453.00	453.33	6.05	9.43	7.68	0.28	144.84	5.35	96.25%	0.09%	0.55	0.58
8 (1)	458.33	451.00	8.05	9.32	7.68	0.33	144.84	6.14			0.44	0.45
8 (2)	458.33	455.00	8.05	9.33	7.68	0.30	144.84	5.69	95.92%	0.22%	0.49	0.51
10 (1)	487.00	548.67	10.09	9.47	7.68	0.33	144.84	6.16			0.49	0.5
10 (2)	487.00	521.00	10.09	9.29	7.68	0.32	144.84	6.00	95.80%	0.08%	0.54	0.56

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.20 ผลการศึกษาค่า pH เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ขี้วัวไฟฟ้า Fe

pH	Conductivity หลังเติม		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	NaCl (µs/cm)		ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC				
3 (1)	1922.00	1816.67	3.13	8.96	1.12	1.04	153.01	19.12			2.54	3.69
3 (2)	1922.00	1837.00	3.13	8.45	1.12	0.99	153.01	18.29	87.78	0.38	2.19	3.08
5 (1)	1799.00	1822.67	5.10	10.20	1.12	0.76	153.01	13.92			2.85	4.3
5 (2)	1799.00	1857.00	5.10	10.28	1.12	0.85	153.01	15.65	90.34	0.80	2.69	4.43
6 (1)	1773.67	1896.00	6.08	10.34	1.12	0.74	153.01	13.70			2.24	3.4
6 (2)	1773.67	1885.00	6.08	10.41	1.12	0.85	153.01	15.65	90.41	0.90	2.47	3.74
8 (1)	1767.67	1870.00	8.20	10.32	1.12	0.85	153.01	15.73			2.49	3.45
8 (2)	1767.67	1838.00	8.20	10.48	1.12	0.96	153.01	17.76	89.06	0.94	2.23	3.43
10 (1)	1816.50	1910.00	10.04	10.52	1.12	1.06	153.01	19.46			2.3	3.63
10 (2)	1816.50	1915.00	10.04	10.49	1.12	1.06	153.01	19.50	87.27	0.02	2.23	4.15

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.21 ผลการศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม Vat โดยใช้ขั้วไฟฟ้า Al

ระยะเวลา ในการทำ ปฏิกิริยา (นาที)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีข้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพการ บำบัดสีข้อมเฉลี่ย (%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	10 (1)	486.00	490.00	5.00	8.80	0.74	0.39	185.17			7.27	
10 (2)	486.00	481.00	5.00	8.83	0.74	0.31	185.17	5.89	96.45	0.53	0.44	0.44
15 (1)	486.00	488.00	5.00	8.94	0.74	0.28	185.17	5.29			0.53	0.55
15 (2)	486.00	485.00	5.00	8.89	0.74	0.25	185.17	4.66	97.31	0.24	0.72	0.78
20 (1)	486.00	486.00	5.00	8.79	0.74	0.28	185.17	5.33			0.49	0.52
20 (2)	486.00	476.33	5.00	8.91	0.74	0.25	185.17	4.67	97.30	0.25	0.47	0.5
25 (1)	486.00	492.33	5.00	9.00	0.74	0.21	185.17	3.99			0.48	0.53
25 (2)	486.00	489.33	5.00	8.97	0.74	0.22	185.17	4.08	97.82	0.03	0.54	0.6
30 (1)	486.00	486.33	5.00	9.09	0.74	0.21	185.17	3.91			0.53	0.6
30 (2)	486.00	486.33	5.00	9.00	0.74	0.21	185.17	4.02	97.86	0.04	0.48	0.54

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.22 ผลการศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม Vat โดยใช้ขี้วัวไฟฟ้า Fe

ระยะเวลาใน การทำ ปฏิกิริยา (นาที)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสี ข้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพ การบำบัดสีข้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าในวงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	10 (1)	1833.00	1780.00	6.01	10.30	1.12	1.08	153.01	20.39			0.45
10 (2)	1833.00	1833.00	6.01	10.37	1.12	1.03	153.01	19.47	86.98%	0.43%	0.44	0.44
15 (1)	1833.00	1877.00	6.01	10.40	1.12	1.03	153.01	19.46			0.53	0.55
15 (2)	1833.00	1842.67	6.01	10.43	1.12	1.02	153.01	19.16	87.38%	0.14%	0.72	0.78
20 (1)	1833.00	1873.00	6.01	10.36	1.12	1.00	153.01	18.89			0.49	0.52
20 (2)	1833.00	1890.33	6.01	10.38	1.12	1.00	153.01	18.86	87.66%	0.01%	0.47	0.5
25 (1)	1833.00	1947.33	6.01	10.40	1.05	0.67	143.24	12.65			0.48	0.53
25 (2)	1833.00	1900.67	6.01	10.39	1.12	0.73	153.01	13.74	91.09%	0.10%	0.54	0.6
30 (1)	1833.00	1905.33	6.01	10.44	1.12	1.03	153.01	19.48			0.53	0.6
30 (2)	1833.00	1958.67	6.01	10.14	1.12	0.75	153.01	14.14	89.01%	2.47%	0.48	0.54

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.23 ผลการศึกษาระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ขี้วัวไฟฟ้า AI

ระยะเวลาในการตกตะกอน (นาที)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s/cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าใน วงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	15 (1)	498.00	541.00	4.96	8.99	1.56	0.24	213.61	4.42			0.53
15 (1)	498.00	540.00	4.96	8.96	1.56	0.24	213.61	4.40	99.83	0.5	0.55	0.59
30 (1)	498.00	532.00	4.96	8.94	1.56	0.25	213.61	4.60			0.53	0.61
30 (2)	498.00	541.00	4.96	9.09	1.56	0.20	213.61	3.66	99.75	0.35	0.55	0.59
45 (1)	498.00	483.00	4.96	9.05	1.56	0.23	213.61	4.19			0.53	0.61
45 (2)	498.00	568.00	4.96	9.06	1.56	0.22	213.61	4.05	99.87	0.05	0.55	0.59
60 (1)	498.00	501.00	4.96	9.07	1.56	0.19	213.61	3.44			0.53	0.61
60 (2)	498.00	480.00	4.96	9.15	1.56	0.21	213.61	3.92	99.87	0.17	0.55	0.59
120 (1)	498.00	498.00	4.96	9.18	1.56	0.21	213.61	3.81			0.53	0.61
120 (2)	498.00	480.00	4.96	9.33	1.56	0.21	213.61	3.94	91.99	0.05	0.55	0.59



ตารางที่ ข.24 ผลการศึกษาระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ขี้ไฟฟ้า Fe

ระยะเวลาในการตกตะกอน (นาที)	Conductivity หลังเติม NaCl ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		pH		ค่าการดูดกลืนแสง		ความเข้มข้นของสีย้อม (mg/l)		ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม เฉลี่ย(%)	S.D.	กระแสไฟฟ้าใน วงจร (Amp)	
	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC	ก่อน EC	หลัง EC			ต่ำสุด	สูงสุด
	15 (1)	1833.00	1780.00	6.01	10.34	1.12	1.19	153.01	21.85			2.57
15 (1)	1833.00	1890.33	6.01	10.36	1.12	1.18	153.01	21.68	85.78	0.06	2.58	4.08
30 (1)	1833.00	1833.00	6.01	10.49	1.12	1.14	153.01	21.07			2.57	4.33
30 (2)	1833.00	1947.33	6.01	10.55	1.12	1.14	153.01	21.03	86.25	0.02	2.58	4.08
44 (1)	1833.00	1877.00	6.01	10.55	1.12	1.10	153.01	20.24			2.57	4.33
45 (2)	1833.00	1900.67	6.01	10.50	1.12	1.09	153.01	20.14	86.81	0.04	2.58	4.08
60 (1)	1833.00	1842.67	6.01	10.56	1.12	1.05	153.01	19.37			2.57	4.33
60 (2)	1833.00	1905.33	6.01	10.66	1.12	1.04	153.01	19.19	87.40	0.06	2.58	4.08
120 (1)	1833.00	1873.00	6.01	10.30	1.12	1.07	153.01	19.64			2.57	4.33
120 (2)	1833.00	1958.67	6.01	10.32	1.12	1.07	153.01	19.63	87.17	0.01	2.58	4.08

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาคผนวก ค

การคำนวณปริมาณ Fe และ Al ที่ใช้ในระบบ CC



### การคิดปริมาณ Al ที่ต้องการจาก PACL

#### 1) ลีซ้อม Acid

มีค่ากระแสไฟฟ้าในวงจรในสภาวะที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1.595-2.107 แอมป์ 1.851 Amp และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม 25 นาที

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } M \text{ (g)} &= ItMw/zF \\ &= 1.851 \times 25 \times 60 \times 26.98 / (3 \times 96485) \\ &= 0.087 \text{ g/ต่อปริมาตรน้ำ } 600 \text{ ml} \end{aligned}$$

ดังนั้นต้องการ Al 0.26 g จากสารละลาย PACI

$$\begin{aligned} \text{จาก } 1 \text{ ml ของ PACI (10\%)} &\text{ มี Al } 0.067 \text{ g as Al} \\ \text{ปริมาณ PACI ที่ต้องการ (X}_1\text{) (ml)} &= \frac{0.087 \text{ g}}{0.067 \text{ g}} = 1.29 \text{ ml} \text{ คิดเป็น } 0.145 \text{ g/l} \end{aligned}$$

#### 2) ลีซ้อม Vat

มีค่ากระแสไฟฟ้าในวงจรในสภาวะที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.53-0.61 แอมป์ 0.57 Amp และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม 30 นาที

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } M \text{ (g)} &= ItMw/zF \\ &= 0.57 \times 30 \times 60 \times 26.98 / (3 \times 96485) \\ &= 0.032 \text{ g/ต่อปริมาตรน้ำ } 600 \text{ ml} \end{aligned}$$

ดังนั้นต้องการ Al 0.26 g จากสารละลาย PACI

$$\begin{aligned} \text{จาก } 1 \text{ ml ของ PACI (10\%)} &\text{ มี Al } 0.067 \text{ g as Al} \\ \text{ปริมาณ PACI ที่ต้องการ (X}_1\text{) (ml)} &= \frac{0.032 \text{ g}}{0.067 \text{ g}} = 0.48 \text{ ml} \text{ คิดเป็น } 0.053 \text{ g/l} \end{aligned}$$

### การคิดปริมาณ Fe ที่ต้องการจาก FeCl<sub>3</sub>

#### 1) ลีซ้อม Acid

มีค่ากระแสไฟฟ้าในวงจรในสภาวะที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1.11-1.58 แอมป์ 1.345 Amp และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม 30 นาที

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } M \text{ (g)} &= ItMw/zF \\ &= 1.345 \times 30 \times 60 \times 55.8452 / (3 \times 96485) \\ &= 0.156 \text{ g/ต่อปริมาตรน้ำ } 600 \text{ ml} \end{aligned}$$

จากการเตรียม FeCl<sub>3</sub> ความเข้มข้น 10 g ในน้ำ 1000 ml

$\text{FeCl}_3$  1000 ml มี  $\text{FeCl}_3$  10 g

$\text{FeCl}_3$  1 ml มี  $\text{FeCl}_3$  0.01 g

จากมวลโมเลกุลของ  $\text{FeCl}_3$  162.19 g มี Fe 55.8452 g

ถ้า  $\text{FeCl}_3$  0.01 g มี จะมี Fe 0.00344 g

ดังนั้น ถ้าต้องการ Fe 0.00344 g จะใช้  $\text{FeCl}_3$  1 ml

ต้องการ Fe 0.156 g จะใช้  $\text{FeCl}_3$  45.40 ml คิดเป็น 0.26 g/l

2) ดิซ็อม Vat

มีค่ากระแสไฟฟ้าในวงจรในสภาวะที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2.23-4.08 แอมป์ 3.155 Amp และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม 25 นาที

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } M \text{ (g)} &= ItMw/zF \\ &= 3.155 \times 30 \times 60 \times 55.8452 / (3 \times 96485) \\ &= 0.30 \text{ g/ต่อปริมาตรน้ำ } 600 \text{ ml} \end{aligned}$$

จากการเตรียม  $\text{FeCl}_3$  ความเข้มข้น 10 g ในน้ำ 1000 ml

$\text{FeCl}_3$  1000 ml มี  $\text{FeCl}_3$  10 g

$\text{FeCl}_3$  1 ml มี  $\text{FeCl}_3$  0.01 g

จากมวลโมเลกุลของ  $\text{FeCl}_3$  162.19 g มี Fe 55.8452 g

ถ้า  $\text{FeCl}_3$  0.01 g มี จะมี Fe 0.00344 g

ดังนั้น ถ้าต้องการ Fe 0.00344 g จะใช้  $\text{FeCl}_3$  1 ml

ต้องการ Fe 0.30 g จะใช้  $\text{FeCl}_3$  87.21 ml คิดเป็น 0.5 g/l

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาคผนวก ง

การคำนวณอัตราการไหลของระบบ EC แบบ Continuous

## คำนวณหาปริมาณ NaCl ที่เหมาะสม

ปริมาณ NaCl ที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในระบบ EC แบบ Continuous คือ ปริมาณ NaCl ที่ได้จากระบบ EC แบบ Batch ซึ่งนำมาคำนวณหาปริมาณ NaCl ใช้ในระบบ EC แบบ Continuous ดังนี้

### ลีสיום Acid

จากสภาวะที่เหมาะสม จากระบบ EC แบบ Batch คือ ในปริมาตรมาตรฐานน้ำลีสיום 600 ml ความเข้มข้นลีสיום 140 mg/l ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที pH 3 ความเข้มข้นของ NaCl 0.96 g/l

1) ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบด้วยอัตรา 600 ml/25 min + NaCl อัตรา 600 ml/25 min

ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบจะเป็น 24 ml/min + NaCl อัตรา 24 ml/min

ใช้ NaCl มีความเข้มข้น 100 g/L

จากสูตร

$$Q_1 C_1 + Q_2 C_2 = Q_3 C_3$$

เมื่อ	$Q_1$	=	อัตราการไหลเข้าของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ
	$C_1$	=	ความเข้มข้นของ NaCl ก่อนเข้าสู่ระบบ
	$Q_2$	=	อัตราการไหลเข้าของ NaCl ในระบบ
	$C_2$	=	ความเข้มข้นของ NaCl ที่ใช้ในระบบ
	$Q_3$	=	อัตราการไหลออกทั้งหมด
	$C_3$	=	ความเข้มข้นของ NaCl ที่ออกจากระบบ

$$\text{จะได้} \quad \left(24 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times 0 \frac{\text{g}}{\text{L}}\right) + \left(24 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times C_2\right) = \left(48 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times 0.96 \frac{\text{g}}{\text{L}}\right)$$

$$C_2 = 1.92 \text{ g/L} \quad \text{***ต้องใช้ NaCl เข้มข้น 1.92 g/L ในระบบ EC แบบ Continuous***}$$

### ลีสיום Vat

จากสภาวะที่เหมาะสม จากระบบ EC แบบ Batch คือ ในปริมาตรมาตรฐานน้ำลีสיום 600 ml ความเข้มข้นลีสיום 140 mg/l ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที pH 6 ความเข้มข้นของ NaCl 0.24 g/l

2) ป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบด้วยอัตรา 600 ml/30 min + NaCl อัตรา 600 ml/30 min  
 ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบจะเป็น 20 ml/min + NaCl อัตรา 20 ml/min  
 ใช้ NaCl มีความเข้มข้น 100 g/L

จากสูตร  $Q_1C_1 + Q_2C_2 = Q_3C_3$

เมื่อ  $Q_1$  = อัตราการไหลเข้าของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ  
 $C_1$  = ความเข้มข้นของ NaCl ก่อนเข้าสู่ระบบ  
 $Q_2$  = อัตราการไหลเข้าของ NaCl ในระบบ  
 $C_2$  = ความเข้มข้นของ NaCl ที่ใช้ในระบบ  
 $Q_3$  = อัตราการไหลออกทั้งหมด  
 $C_3$  = ความเข้มข้นของ NaCl ที่ออกจากระบบ

จะได้  $(20 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times 0 \frac{\text{g}}{\text{L}}) + (20 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times C_2) = (40 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times 0.24 \frac{\text{g}}{\text{L}})$

$C_2 = 0.48 \text{ g/L}$  \*\*\*\*ต้องใช้สารส้มเข้มข้น 0.48 g/L ในระบบ EC แบบ Continuous\*\*\*\*



ภาคผนวก จ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสี้อมด้วยกระบวนการ  
EC โดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย One Way ANOVA

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ตารางที่ 1 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ตัว AI

ANOVA							
efficiency							
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ	
Between Groups	56.264	6	9.377	2.937	.045	มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน	
Within Groups	44.707	14	3.193				
Total	100.970	20					
Multiple Comparisons							
Dependent Variable: efficiency							
(I) Conc	(J) Conc	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		ผลการทดสอบ
					Lower Bound	Upper Bound	
LSD	40.00	-2.86333	1.45907	.070	-5.9927	.2661	ไม่แตกต่างกัน
	60.00	-3.49000*	1.45907	.031	-6.6194	-.3606	แตกต่างกัน
	80.00	-3.85667*	1.45907	.019	-6.9861	-.7273	แตกต่างกัน
	100.00	-4.19667*	1.45907	.012	-7.3261	-1.0673	แตกต่างกัน
	120.00	-5.11000*	1.45907	.004	-8.2394	-1.9806	แตกต่างกัน
	140.00	-5.20333*	1.45907	.003	-8.3327	-2.0739	แตกต่างกัน
20.00	20.00	2.86333	1.45907	.070	-.2661	5.9927	ไม่แตกต่างกัน
	60.00	-.62667	1.45907	.674	-3.7561	2.5027	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	-.99333	1.45907	.507	-4.1227	2.1361	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	-1.33333	1.45907	.376	-4.4627	1.7961	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	-2.24667	1.45907	.146	-5.3761	.8827	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-2.34000	1.45907	.131	-5.4694	.7894	ไม่แตกต่างกัน
40.00	20.00	3.49000*	1.45907	.031	.3606	6.6194	แตกต่างกัน
	40.00	.62667	1.45907	.674	-2.5027	3.7561	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	-.36667	1.45907	.805	-3.4961	2.7627	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	-.70667	1.45907	.636	-3.8361	2.4227	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	-1.62000	1.45907	.286	-4.7494	1.5094	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-1.71333	1.45907	.260	-4.8427	1.4161	ไม่แตกต่างกัน
60.00	20.00	3.49000*	1.45907	.031	.3606	6.6194	แตกต่างกัน
	40.00	.62667	1.45907	.674	-2.5027	3.7561	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	-.36667	1.45907	.805	-3.4961	2.7627	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	-.70667	1.45907	.636	-3.8361	2.4227	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	-1.62000	1.45907	.286	-4.7494	1.5094	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-1.71333	1.45907	.260	-4.8427	1.4161	ไม่แตกต่างกัน

Multiple Comparisons							
Dependent Variable: efficiency							
(I) Conc	(J) Conc	Mean Differen ce (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		ผลการทดสอบ
					Lower Bound	Upper Bound	
80.00	20.00	3.85667*	1.45907	.019	.7273	6.9861	แตกต่างกัน
	40.00	.99333	1.45907	.507	-2.1361	4.1227	ไม่แตกต่างกัน
	60.00	.36667	1.45907	.805	-2.7627	3.4961	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	-.34000	1.45907	.819	-3.4694	2.7894	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	-1.25333	1.45907	.405	-4.3827	1.8761	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-1.34667	1.45907	.372	-4.4761	1.7827	ไม่แตกต่างกัน
100.00	20.00	4.19667*	1.45907	.012	1.0673	7.3261	แตกต่างกัน
	40.00	1.33333	1.45907	.376	-1.7961	4.4627	ไม่แตกต่างกัน
	60.00	.70667	1.45907	.636	-2.4227	3.8361	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	.34000	1.45907	.819	-2.7894	3.4694	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	-.91333	1.45907	.541	-4.0427	2.2161	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-1.00667	1.45907	.502	-4.1361	2.1227	ไม่แตกต่างกัน
120.00	20.00	5.11000*	1.45907	.004	1.9806	8.2394	แตกต่างกัน
	40.00	2.24667	1.45907	.146	-.8827	5.3761	ไม่แตกต่างกัน
	60.00	1.62000	1.45907	.286	-1.5094	4.7494	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	1.25333	1.45907	.405	-1.8761	4.3827	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	.91333	1.45907	.541	-2.2161	4.0427	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-.09333	1.45907	.950	-3.2227	3.0361	ไม่แตกต่างกัน
140.00	20.00	5.20333*	1.45907	.003	2.0739	8.3327	แตกต่างกัน
	40.00	2.34000	1.45907	.131	-.7894	5.4694	ไม่แตกต่างกัน
	60.00	1.71333	1.45907	.260	-1.4161	4.8427	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	1.34667	1.45907	.372	-1.7827	4.4761	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	1.00667	1.45907	.502	-2.1227	4.1361	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	.09333	1.45907	.950	-3.0361	3.2227	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 2 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ตัว Fe

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	340.595	6	56.766	8.149	.007	มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน
Within Groups	48.760	7	6.966			
Total	389.355	13				

Multiple Comparisons							
Dependent Variable: efficiency							
(I) Conc	(J) Conc	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		ผลการทดสอบ
					Lower Bound	Upper Bound	
LSD	40.00	-10.43500*	2.63926	.006	-16.6759	-4.1941	แตกต่างกัน
	60.00	-15.05500*	2.63926	.001	-21.2959	-8.8141	แตกต่างกัน
	80.00	-11.93000*	2.63926	.003	-18.1709	-5.6891	แตกต่างกัน
	100.00	-11.85500*	2.63926	.003	-18.0959	-5.6141	แตกต่างกัน
	120.00	-13.25000*	2.63926	.002	-19.4909	-7.0091	แตกต่างกัน
	140.00	-16.12500*	2.63926	.000	-22.3659	-9.8841	แตกต่างกัน
20.00	20.00	10.43500*	2.63926	.006	4.1941	16.6759	แตกต่างกัน
	60.00	-4.62000	2.63926	.124	-10.8609	1.6209	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	-1.49500	2.63926	.589	-7.7359	4.7459	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	-1.42000	2.63926	.607	-7.6609	4.8209	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	-2.81500	2.63926	.322	-9.0559	3.4259	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-5.69000	2.63926	.068	-11.9309	.5509	ไม่แตกต่างกัน
40.00	20.00	15.05500*	2.63926	.001	8.8141	21.2959	แตกต่างกัน
	40.00	4.62000	2.63926	.124	-1.6209	10.8609	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	3.12500	2.63926	.275	-3.1159	9.3659	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	3.20000	2.63926	.265	-3.0409	9.4409	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	1.80500	2.63926	.516	-4.4359	8.0459	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-1.07000	2.63926	.697	-7.3109	5.1709	ไม่แตกต่างกัน
60.00	20.00	15.05500*	2.63926	.001	8.8141	21.2959	แตกต่างกัน
	40.00	4.62000	2.63926	.124	-1.6209	10.8609	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	3.12500	2.63926	.275	-3.1159	9.3659	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	3.20000	2.63926	.265	-3.0409	9.4409	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	1.80500	2.63926	.516	-4.4359	8.0459	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-1.07000	2.63926	.697	-7.3109	5.1709	ไม่แตกต่างกัน

Multiple Comparisons							
Dependent Variable: efficiocy							
(I)	(J)	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence		ผลการ ทดสอบ
Conc	Conc	Difference	Error		Interval		
		(I-J)			Lower	Upper	
					Bound	Bound	
80.00	20.00	11.93000*	2.63926	.003	5.6891	18.1709	แตกต่างกัน
	40.00	1.49500	2.63926	.589	-4.7459	7.7359	ไม่แตกต่างกัน
	60.00	-3.12500	2.63926	.275	-9.3659	3.1159	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	.07500	2.63926	.978	-6.1659	6.3159	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	-1.32000	2.63926	.632	-7.5609	4.9209	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-4.19500	2.63926	.156	-10.4359	2.0459	ไม่แตกต่างกัน
100.00	20.00	11.85500*	2.63926	.003	5.6141	18.0959	แตกต่างกัน
	40.00	1.42000	2.63926	.607	-4.8209	7.6609	ไม่แตกต่างกัน
	60.00	-3.20000	2.63926	.265	-9.4409	3.0409	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	-.07500	2.63926	.978	-6.3159	6.1659	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	-1.39500	2.63926	.613	-7.6359	4.8459	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-4.27000	2.63926	.150	-10.5109	1.9709	ไม่แตกต่างกัน
120.00	20.00	13.25000*	2.63926	.002	7.0091	19.4909	แตกต่างกัน
	40.00	2.81500	2.63926	.322	-3.4259	9.0559	ไม่แตกต่างกัน
	60.00	-1.80500	2.63926	.516	-8.0459	4.4359	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	1.32000	2.63926	.632	-4.9209	7.5609	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	1.39500	2.63926	.613	-4.8459	7.6359	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-2.87500	2.63926	.312	-9.1159	3.3659	ไม่แตกต่างกัน
140.00	20.00	16.12500*	2.63926	.000	9.8841	22.3659	แตกต่างกัน
	40.00	5.69000	2.63926	.068	-.5509	11.9309	ไม่แตกต่างกัน
	60.00	1.07000	2.63926	.697	-5.1709	7.3109	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	4.19500	2.63926	.156	-2.0459	10.4359	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	4.27000	2.63926	.150	-1.9709	10.5109	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	2.87500	2.63926	.312	-3.3659	9.1159	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 3 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขี้วัว AI

ANOVA								
efficiency								
	Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ		
Between Groups	14.452	4	3.613	40.673	.001	มีอย่างน้อย 1		
Within Groups	.444	5	.089			คู่ที่แตกต่าง		
Total	14.896	9				กัน		
Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
(I) NaCl	(J) NaCl	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		ผลการทดสอบ	
					Lower Bound	Upper Bound		
LSD	.06	.12	-.10500	.29804	.739	-.8711	.6611	ไม่แตกต่างกัน
		.24	-.14000	.29804	.658	-.9061	.6261	ไม่แตกต่างกัน
		.48	-1.68000*	.29804	.002	-2.4461	-.9139	แตกต่างกัน
		.96	-3.05500*	.29804	.000	-3.8211	-2.2889	แตกต่างกัน
	.12	.06	.10500	.29804	.739	-.6611	.8711	ไม่แตกต่างกัน
		.24	-.03500	.29804	.911	-.8011	.7311	ไม่แตกต่างกัน
		.48	-1.57500*	.29804	.003	-2.3411	-.8089	แตกต่างกัน
		.96	-2.95000*	.29804	.000	-3.7161	-2.1839	แตกต่างกัน
	.24	.06	-.14000	.29804	.658	-.6261	.9061	ไม่แตกต่างกัน
		.12	.03500	.29804	.911	-.7311	.8011	ไม่แตกต่างกัน
		.48	-1.54000*	.29804	.004	-2.3061	-.7739	แตกต่างกัน
		.96	-2.91500*	.29804	.000	-3.6811	-2.1489	แตกต่างกัน
.48	.06	1.68000*	.29804	.002	.9139	2.4461	แตกต่างกัน	
	.12	1.57500*	.29804	.003	.8089	2.3411	แตกต่างกัน	
	.24	1.54000*	.29804	.004	.7739	2.3061	แตกต่างกัน	
	.96	-1.37500*	.29804	.006	-2.1411	-.6089	แตกต่างกัน	
.96	.06	3.05500*	.29804	.000	2.2889	3.8211	แตกต่างกัน	
	.12	2.95000*	.29804	.000	2.1839	3.7161	แตกต่างกัน	
	.24	2.91500*	.29804	.000	2.1489	3.6811	แตกต่างกัน	
	.48	1.37500*	.29804	.006	.6089	2.1411	แตกต่างกัน	

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 4 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขี้วัว Fe

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	106.240	4	26.560	15.100	.005	มีอย่างน้อย 1
Within Groups	8.795	5	1.759			คู่ที่แตกต่าง
Total	115.034	9				กัน

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
(I)	(J)	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence		ผลการทดสอบ	
NaCl	NaCl	Difference	Error		Interval			
		(I-J)			Lower	Upper		
LSD	.06	.12	-1.50000	1.32624	.309	-4.9092	1.9092	ไม่แตกต่างกัน
		.24	-4.32000*	1.32624	.023	-7.7292	-.9108	แตกต่างกัน
		.48	-9.50500*	1.32624	.001	-12.9142	-6.0958	แตกต่างกัน
		.96	-4.68000*	1.32624	.017	-8.0892	-1.2708	แตกต่างกัน
	.12	.06	1.50000	1.32624	.309	-1.9092	4.9092	ไม่แตกต่างกัน
		.24	-2.82000	1.32624	.087	-6.2292	.5892	ไม่แตกต่างกัน
		.48	-8.00500*	1.32624	.002	-11.4142	-4.5958	แตกต่างกัน
		.96	-3.18000	1.32624	.062	-6.5892	.2292	ไม่แตกต่างกัน
	.24	.06	4.32000*	1.32624	.023	.9108	7.7292	แตกต่างกัน
		.12	2.82000	1.32624	.087	-.5892	6.2292	ไม่แตกต่างกัน
		.48	-5.18500*	1.32624	.011	-8.5942	-1.7758	แตกต่างกัน
		.96	-.36000	1.32624	.797	-3.7692	3.0492	ไม่แตกต่างกัน
	.48	.06	9.50500*	1.32624	.001	6.0958	12.9142	แตกต่างกัน
		.12	8.00500*	1.32624	.002	4.5958	11.4142	แตกต่างกัน
		.24	5.18500*	1.32624	.011	1.7758	8.5942	แตกต่างกัน
		.96	4.82500*	1.32624	.015	1.4158	8.2342	แตกต่างกัน
	.96	.06	4.68000*	1.32624	.017	1.2708	8.0892	แตกต่างกัน
		.12	3.18000	1.32624	.062	-.2292	6.5892	ไม่แตกต่างกัน
		.24	.36000	1.32624	.797	-3.0492	3.7692	ไม่แตกต่างกัน
		.48	-4.82500*	1.32624	.015	-8.2342	-1.4158	แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 5 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความสัมพันธ์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม  
Acid โดยใช้ขี้วัว AI

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	2.660	4	.665	7.160	.027	มีอย่างน้อย 1 คู่ แตกต่างกัน
Within Groups	.464	5	.093			
Total	3.125	9				

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
	(I) Volt	(J) Volt	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	ผลการทดสอบ	
						Lower Bound		Upper Bound
LSD	5.00	10.00	-.06000	.30476	.852	-.8434	.7234	ไม่แตกต่างกัน
		12.50	-.16000	.30476	.622	-.9434	.6234	ไม่แตกต่างกัน
		15.00	-.82000*	.30476	.043	-1.6034	-.0366	แตกต่างกัน
		20.00	-1.32000*	.30476	.007	-2.1034	-.5366	แตกต่างกัน
	10.00	5.00	.06000	.30476	.852	-.7234	.8434	ไม่แตกต่างกัน
		12.50	-.10000	.30476	.756	-.8834	.6834	ไม่แตกต่างกัน
		15.00	-.76000	.30476	.055	-1.5434	.0234	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	-1.26000*	.30476	.009	-2.0434	-.4766	แตกต่างกัน
	12.50	5.00	.16000	.30476	.622	-.6234	.9434	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	.10000	.30476	.756	-.6834	.8834	ไม่แตกต่างกัน
		15.00	-.66000	.30476	.083	-1.4434	.1234	แตกต่างกัน
		20.00	-1.16000*	.30476	.013	-1.9434	-.3766	แตกต่างกัน
	15.00	5.00	.82000*	.30476	.043	.0366	1.6034	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	.76000	.30476	.055	-.0234	1.5434	ไม่แตกต่างกัน
		12.50	.66000	.30476	.083	-.1234	1.4434	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	-.50000	.30476	.162	-1.2834	.2834	ไม่แตกต่างกัน
	20.00	5.00	1.32000*	.30476	.007	.5366	2.1034	แตกต่างกัน
		10.00	1.26000*	.30476	.009	.4766	2.0434	แตกต่างกัน
		12.50	1.16000*	.30476	.013	.3766	1.9434	แตกต่างกัน
		15.00	.50000	.30476	.162	-.2834	1.2834	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



ตารางที่ 6 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความสัมพันธ์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม  
Acid โดยใช้ขี้วัว Fe

ANOVA								
efficiency								
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ		
Between Groups	217.541	3	72.514	27.574	.000	มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน		
Within Groups	21.038	8	2.630					
Total	238.579	11						
Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
(I)	(J)	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence		ผลการ ทดสอบ	
Volt	Volt	Difference (I-J)	Error		Lower	Upper		
					Bound	Bound		
LSD	5.00	10.00	-7.07667*	1.32408	.001	-10.1300	-4.0233	แตกต่างกัน
		15.00	-11.40333*	1.32408	.000	-14.4567	-8.3500	แตกต่างกัน
		20.00	-9.04333*	1.32408	.000	-12.0967	-5.9900	แตกต่างกัน
	10.00	5.00	7.07667*	1.32408	.001	4.0233	10.1300	แตกต่างกัน
		15.00	-4.32667*	1.32408	.011	-7.3800	-1.2733	แตกต่างกัน
		20.00	-1.96667	1.32408	.176	-5.0200	1.0867	ไม่แตกต่างกัน
	15.00	5.00	11.40333*	1.32408	.000	8.3500	14.4567	แตกต่างกัน
		10.00	4.32667*	1.32408	.011	1.2733	7.3800	แตกต่างกัน
		20.00	2.36000	1.32408	.113	-.6933	5.4133	ไม่แตกต่างกัน
	20.00	5.00	9.04333*	1.32408	.000	5.9900	12.0967	แตกต่างกัน
		10.00	1.96667	1.32408	.176	-1.0867	5.0200	ไม่แตกต่างกัน
		15.00	-2.36000	1.32408	.113	-5.4133	.6933	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 7 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่า pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ข้าว AI

ANOVA								
efficiency								
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ		
Between Groups	6.012	4	1.503	62.001	.000	มีอย่างน้อย 1 คู่		
Within Groups	.121	5	.024			ที่แตกต่างกัน		
Total	6.133	9						
Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
(I)	(J)	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence		ผลการทดสอบ	
pH	pH	Difference	Error		Interval			
		(I-J)			Lower	Upper		
LSD	3.00	5.00	.95000*	.15569	.002	.5498	1.3502	แตกต่างกัน
		6.00	1.65000*	.15569	.000	1.2498	2.0502	แตกต่างกัน
		8.00	1.42000*	.15569	.000	1.0198	1.8202	แตกต่างกัน
		10.00	2.33000*	.15569	.000	1.9298	2.7302	แตกต่างกัน
5.00	3.00	3.00	-.95000*	.15569	.002	-1.3502	-.5498	แตกต่างกัน
		6.00	.70000*	.15569	.006	.2998	1.1002	แตกต่างกัน
		8.00	.47000*	.15569	.029	.0698	.8702	แตกต่างกัน
		10.00	1.38000*	.15569	.000	.9798	1.7802	แตกต่างกัน
6.00	3.00	3.00	-1.65000*	.15569	.000	-2.0502	-1.2498	แตกต่างกัน
		5.00	-.70000*	.15569	.006	-1.1002	-.2998	แตกต่างกัน
		8.00	-.23000	.15569	.200	-.6302	.1702	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	.68000*	.15569	.007	.2798	1.0802	แตกต่างกัน
8.00	3.00	3.00	-1.42000*	.15569	.000	-1.8202	-1.0198	แตกต่างกัน
		5.00	-.47000*	.15569	.029	-.8702	-.0698	แตกต่างกัน
		6.00	.23000	.15569	.200	-.1702	.6302	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	.91000*	.15569	.002	.5098	1.3102	แตกต่างกัน
10.00	3.00	3.00	-2.33000*	.15569	.000	-2.7302	-1.9298	แตกต่างกัน
		5.00	-1.38000*	.15569	.000	-1.7802	-.9798	แตกต่างกัน
		6.00	-.68000*	.15569	.007	-1.0802	-.2798	แตกต่างกัน
		8.00	-.91000*	.15569	.002	-1.3102	-.5098	แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 8 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่า pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Acid โดยใช้ขี้วัว Fe

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	57.567	4	14.392	4.727	.060	
Within Groups	15.224	5	3.045			
Total	72.791	9				

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
(I)	(J)	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence		ผลการ ทดสอบ	
pH	pH	Difference	Error		Interval			
		(I-J)			Lower	Upper		
LSD	3.00	5.00	-3.87500	1.74494	.077	-8.3605	.6105	ไม่แตกต่างกัน
		6.00	-2.77000	1.74494	.173	-7.2555	1.7155	ไม่แตกต่างกัน
		8.00	-3.25000	1.74494	.122	-7.7355	1.2355	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	-7.47500*	1.74494	.008	-11.9605	-2.9895	แตกต่างกัน
5.00	3.00	3.87500	1.74494	.077	-.6105	8.3605	ไม่แตกต่างกัน	
		6.00	1.10500	1.74494	.554	-3.3805	5.5905	ไม่แตกต่างกัน
		8.00	.62500	1.74494	.735	-3.8605	5.1105	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	-3.60000	1.74494	.094	-8.0855	.8855	ไม่แตกต่างกัน
6.00	3.00	2.77000	1.74494	.173	-1.7155	7.2555	ไม่แตกต่างกัน	
		5.00	-1.10500	1.74494	.554	-5.5905	3.3805	ไม่แตกต่างกัน
		8.00	-.48000	1.74494	.794	-4.9655	4.0055	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	-4.70500*	1.74494	.043	-9.1905	-.2195	แตกต่างกัน
8.00	3.00	3.25000	1.74494	.122	-1.2355	7.7355	ไม่แตกต่างกัน	
		5.00	-.62500	1.74494	.735	-5.1105	3.8605	ไม่แตกต่างกัน
		6.00	.48000	1.74494	.794	-4.0055	4.9655	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	-4.22500	1.74494	.060	-8.7105	.2605	ไม่แตกต่างกัน
10.00	3.00	7.47500*	1.74494	.008	2.9895	11.9605	แตกต่างกัน	
		5.00	3.60000	1.74494	.094	-.8855	8.0855	ไม่แตกต่างกัน
		6.00	4.70500*	1.74494	.043	.2195	9.1905	แตกต่างกัน
		8.00	4.22500	1.74494	.060	-.2605	8.7105	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 9 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขี้วัว AI

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	104.133	4	26.033	219.301	.000	มีอย่างน้อย 1
Within Groups	.594	5	.119			คู่ที่แตกต่าง
Total	104.726	9				กัน

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
	(I) Reaction time	(J) Reaction time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	ผลการทดสอบ	
						Lower Bound	Upper Bound	
LSD	10.00	15.00	-.01500	.34454	.967	-.9007	.8707	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	-.26500	.34454	.477	-1.1507	.6207	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	-6.69500*	.34454	.000	-7.5807	-5.8093	แตกต่างกัน
		30.00	-6.66000*	.34454	.000	-7.5457	-5.7743	แตกต่างกัน
	15.00	10.00	.01500	.34454	.967	-.8707	.9007	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	-.25000	.34454	.501	-1.1357	.6357	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	-6.68000*	.34454	.000	-7.5657	-5.7943	แตกต่างกัน
		30.00	-6.64500*	.34454	.000	-7.5307	-5.7593	แตกต่างกัน
	20.00	10.00	.26500	.34454	.477	-.6207	1.1507	ไม่แตกต่างกัน
		15.00	.25000	.34454	.501	-.6357	1.1357	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	-6.43000*	.34454	.000	-7.3157	-5.5443	แตกต่างกัน
		30.00	-6.39500*	.34454	.000	-7.2807	-5.5093	แตกต่างกัน
	25.00	10.00	6.69500*	.34454	.000	5.8093	7.5807	แตกต่างกัน
		15.00	6.68000*	.34454	.000	5.7943	7.5657	แตกต่างกัน
		20.00	6.43000*	.34454	.000	5.5443	7.3157	แตกต่างกัน
		30.00	.03500	.34454	.923	-.8507	.9207	ไม่แตกต่างกัน
	30.00	10.00	6.66000*	.34454	.000	5.7743	7.5457	แตกต่างกัน
		15.00	6.64500*	.34454	.000	5.7593	7.5307	แตกต่างกัน
		20.00	6.39500*	.34454	.000	5.5093	7.2807	แตกต่างกัน
		25.00	-.03500	.34454	.923	-.9207	.8507	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 10 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขี้วัว Fe

ANOVA								
efficiency								
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ		
Between Groups	54.002	4	13.500	3.672	.093			
Within Groups	18.383	5	3.677					
Total	72.384	9						
Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
(I)	(J)	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence		ผลการทดสอบ	
Reaction time	Reaction time	Differenc e (I-J)	Error		Interval			
					Lower Bound	Upper Bound		
LSD	10.00	15.00	-1.91500	1.91742	.364	-6.8439	3.0139	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	-1.22000	1.91742	.553	-6.1489	3.7089	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	-1.39000	1.91742	.501	-6.3189	3.5389	ไม่แตกต่างกัน
		30.00	-6.72500*	1.91742	.017	-11.6539	-1.7961	แตกต่างกัน
15.00	10.00	10.00	1.91500	1.91742	.364	-3.0139	6.8439	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	.69500	1.91742	.732	-4.2339	5.6239	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	.52500	1.91742	.795	-4.4039	5.4539	ไม่แตกต่างกัน
		30.00	-4.81000	1.91742	.054	-9.7389	.1189	ไม่แตกต่างกัน
20.00	10.00	10.00	1.22000	1.91742	.553	-3.7089	6.1489	ไม่แตกต่างกัน
		15.00	-.69500	1.91742	.732	-5.6239	4.2339	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	-.17000	1.91742	.933	-5.0989	4.7589	
		30.00	-5.50500*	1.91742	.035	-10.4339	-.5761	แตกต่างกัน
25.00	10.00	10.00	1.39000	1.91742	.501	-3.5389	6.3189	ไม่แตกต่างกัน
		15.00	-.52500	1.91742	.795	-5.4539	4.4039	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	.17000	1.91742	.933	-4.7589	5.0989	ไม่แตกต่างกัน
		30.00	-5.33500*	1.91742	.039	-10.2639	-.4061	แตกต่างกัน
30.00	10.00	10.00	6.72500*	1.91742	.017	1.7961	11.6539	แตกต่างกัน
		15.00	4.81000	1.91742	.054	-.1189	9.7389	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	5.50500*	1.91742	.035	.5761	10.4339	แตกต่างกัน
		25.00	5.33500*	1.91742	.039	.4061	10.2639	แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 11 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ตัว AI

ANOVA							
efficiency							
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ	
Between Groups	.019	4	.005	1.476	.335	ไม่มีคู่ใดที่แตกต่างกัน	
Within Groups	.016	5	.003				
Total	.036	9					
Multiple Comparisons							
Dependent Variable: efficiency							
	(I) Sed	(J) Sed	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	ผลการทดสอบ
						Lower Bound Upper Bound	
LSD	15.00	30.00	.08000	.05727	.221	-.0672 .2272	ไม่แตกต่างกัน
		45.00	-.04000	.05727	.516	-.1872 .1072	
		60.00	-.04000	.05727	.516	-.1872 .1072	
		120.00	-.01000	.05727	.868	-.1572 .1372	
30.00	15.00	45.00	-.08000	.05727	.221	-.2272 .0672	
		60.00	-.12000	.05727	.090	-.2672 .0272	
		120.00	-.12000	.05727	.090	-.2672 .0272	
		120.00	-.09000	.05727	.177	-.2372 .0572	
45.00	15.00	60.00	.04000	.05727	.516	-.1072 .1872	
		30.00	.12000	.05727	.090	-.0272 .2672	
		60.00	.00000	.05727	1.000	-.1472 .1472	
		120.00	.03000	.05727	.623	-.1172 .1772	
60.00	15.00	30.00	.12000	.05727	.090	-.0272 .2672	
		45.00	.00000	.05727	1.000	-.1472 .1472	
		120.00	.03000	.05727	.623	-.1172 .1772	
		120.00	.01000	.05727	.868	-.1372 .1572	
120.00	15.00	30.00	.09000	.05727	.177	-.0572 .2372	
		45.00	-.03000	.05727	.623	-.1772 .1172	
		60.00	-.03000	.05727	.623	-.1772 .1172	
		60.00	-.03000	.05727	.623	-.1772 .1172	

ตารางที่ 12 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Acid โดยใช้ขี้วัว Fe

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	472.846	4	118.211	2.757	.148	
Within Groups	214.361	5	42.872			
Total	687.207	9				

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
(I)	(J)	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence		ผลการทดสอบ	
Sed	Sed	Differen	Error		Interval			
		ce (I-J)			Lower	Upper		
					Bound	Bound		
LSD	15.00	30.00	-1.83500	6.54769	.791	-18.6664	14.9964	ไม่แตกต่างกัน
		45.00	-2.61000	6.54769	.707	-19.4414	14.2214	ไม่แตกต่างกัน
		60.00	6.38500	6.54769	.374	-10.4464	23.2164	ไม่แตกต่างกัน
		120.00	15.75000	6.54769	.061	-1.0814	32.5814	ไม่แตกต่างกัน
30.00	15.00	15.00	1.83500	6.54769	.791	-14.9964	18.6664	ไม่แตกต่างกัน
		45.00	-.77500	6.54769	.910	-17.6064	16.0564	ไม่แตกต่างกัน
		60.00	8.22000	6.54769	.265	-8.6114	25.0514	ไม่แตกต่างกัน
		120.00	17.58500*	6.54769	.044	.7536	34.4164	แตกต่างกัน
45.00	15.00	15.00	2.61000	6.54769	.707	-14.2214	19.4414	ไม่แตกต่างกัน
		30.00	-.77500	6.54769	.910	-16.0564	17.6064	ไม่แตกต่างกัน
		60.00	8.99500	6.54769	.228	-7.8364	25.8264	ไม่แตกต่างกัน
		120.00	18.36000*	6.54769	.038	1.5286	35.1914	แตกต่างกัน
60.00	15.00	15.00	-6.38500	6.54769	.374	-23.2164	10.4464	ไม่แตกต่างกัน
		30.00	-8.22000	6.54769	.265	-25.0514	8.6114	ไม่แตกต่างกัน
		45.00	-8.99500	6.54769	.228	-25.8264	7.8364	ไม่แตกต่างกัน
		120.00	9.36500	6.54769	.212	-7.4664	26.1964	ไม่แตกต่างกัน
120.00	15.00	15.00	-15.75000	6.54769	.061	-32.5814	1.0814	ไม่แตกต่างกัน
		30.00	-17.58500*	6.54769	.044	-34.4164	-.7536	แตกต่างกัน
		45.00	-18.36000*	6.54769	.038	-35.1914	-1.5286	แตกต่างกัน
		60.00	-9.36500	6.54769	.212	-26.1964	7.4664	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 13 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ตัว A1

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	5296.981	6	882.830	557.391	.000	มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน
Within Groups	22.174	14	1.584			
Total	5319.155	20				

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
(I)	(J)	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence		ผลการทดสอบ	
Conc	Conc	Difference (I-J)	Error		Interval			
					Lower Bound	Upper Bound		
LSD	20.00	40.00	-41.23333*	1.02757	.000	-43.4373	-39.0294	แตกต่างกัน
		60.00	-45.20000*	1.02757	.000	-47.4039	-42.9961	แตกต่างกัน
		80.00	-46.14667*	1.02757	.000	-48.3506	-43.9427	แตกต่างกัน
		100.00	-45.68667*	1.02757	.000	-47.8906	-43.4827	แตกต่างกัน
		120.00	-46.09000*	1.02757	.000	-48.2939	-43.8861	แตกต่างกัน
		140.00	-46.47333*	1.02757	.000	-48.6773	-44.2694	แตกต่างกัน
	40.00	20.00	41.23333*	1.02757	.000	39.0294	43.4373	แตกต่างกัน
		60.00	-3.96667*	1.02757	.002	-6.1706	-1.7627	แตกต่างกัน
		80.00	-4.91333*	1.02757	.000	-7.1173	-2.7094	แตกต่างกัน
		100.00	-4.45333*	1.02757	.001	-6.6573	-2.2494	แตกต่างกัน
		120.00	-4.85667*	1.02757	.000	-7.0606	-2.6527	แตกต่างกัน
		140.00	-5.24000*	1.02757	.000	-7.4439	-3.0361	แตกต่างกัน
	60.00	20.00	45.20000*	1.02757	.000	42.9961	47.4039	แตกต่างกัน
		40.00	3.96667*	1.02757	.002	1.7627	6.1706	แตกต่างกัน
		80.00	-.94667	1.02757	.373	-3.1506	1.2573	ไม่แตกต่างกัน
		100.00	-.48667	1.02757	.643	-2.6906	1.7173	ไม่แตกต่างกัน
		120.00	-.89000	1.02757	.401	-3.0939	1.3139	ไม่แตกต่างกัน
		140.00	-1.27333	1.02757	.236	-3.4773	.9306	ไม่แตกต่างกัน



Multiple Comparisons							
Dependent Variable: efficiency							
(I) Conc	(J) Conc	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		ผลการ ทดสอบ
					Lower Bound	Upper Bound	
80.00	20.00	46.14667*	1.02757	.000	43.9427	48.3506	แตกต่างกัน
	40.00	4.91333*	1.02757	.000	2.7094	7.1173	แตกต่างกัน
	60.00	.94667	1.02757	.373	-1.2573	3.1506	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	.46000	1.02757	.661	-1.7439	2.6639	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	.05667	1.02757	.957	-2.1473	2.2606	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-.32667	1.02757	.755	-2.5306	1.8773	ไม่แตกต่างกัน
100.00	20.00	45.68667*	1.02757	.000	43.4827	47.8906	แตกต่างกัน
	40.00	4.45333*	1.02757	.001	2.2494	6.6573	แตกต่างกัน
	60.00	.48667	1.02757	.643	-1.7173	2.6906	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	-.46000	1.02757	.661	-2.6639	1.7439	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	-.40333	1.02757	.701	-2.6073	1.8006	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-.78667	1.02757	.457	-2.9906	1.4173	ไม่แตกต่างกัน
120.00	20.00	46.09000*	1.02757	.000	43.8861	48.2939	แตกต่างกัน
	40.00	4.85667*	1.02757	.000	2.6527	7.0606	แตกต่างกัน
	60.00	.89000	1.02757	.401	-1.3139	3.0939	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	-.05667	1.02757	.957	-2.2606	2.1473	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	.40333	1.02757	.701	-1.8006	2.6073	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-.38333	1.02757	.715	-2.5873	1.8206	ไม่แตกต่างกัน
140.00	20.00	46.47333*	1.02757	.000	44.2694	48.6773	แตกต่างกัน
	40.00	5.24000*	1.02757	.000	3.0361	7.4439	แตกต่างกัน
	60.00	1.27333	1.02757	.236	-.9306	3.4773	ไม่แตกต่างกัน
	80.00	.32667	1.02757	.755	-1.8773	2.5306	ไม่แตกต่างกัน
	100.00	.78667	1.02757	.457	-1.4173	2.9906	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	.38333	1.02757	.715	-1.8206	2.5873	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 14 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ตัว Fe

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	7940.020	6	1323.337	357.283	.000	มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน
Within Groups	25.927	7	3.704			
Total	7965.947	13				

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
(I) Conc	(J) Conc	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		ผลการทดสอบ	
					Lower Bound	Upper Bound		
LSD	20.00	40.00	-48.66000*	1.92455	.000	-53.2108	-44.1092	แตกต่างกัน
		60.00	-53.20000*	1.92455	.000	-57.7508	-48.6492	แตกต่างกัน
		80.00	-63.00000*	1.92455	.000	-67.5508	-58.4492	แตกต่างกัน
		100.00	-67.55000*	1.92455	.000	-72.1008	-62.9992	แตกต่างกัน
		120.00	-72.05500*	1.92455	.000	-76.6058	-67.5042	แตกต่างกัน
		140.00	-74.84500*	1.92455	.000	-79.3958	-70.2942	แตกต่างกัน
40.00	20.00	48.66000*	1.92455	.000	44.1092	53.2108	แตกต่างกัน	
		60.00	-4.54000	1.92455	.050	-9.0908	.0108	แตกต่างกัน
		80.00	-14.34000*	1.92455	.000	-18.8908	-9.7892	แตกต่างกัน
		100.00	-18.89000*	1.92455	.000	-23.4408	-14.3392	แตกต่างกัน
		120.00	-23.39500*	1.92455	.000	-27.9458	-18.8442	แตกต่างกัน
		140.00	-26.18500*	1.92455	.000	-30.7358	-21.6342	แตกต่างกัน
60.00	20.00	53.20000*	1.92455	.000	48.6492	57.7508	แตกต่างกัน	
		40.00	4.54000	1.92455	.050	-.0108	9.0908	
		80.00	-9.80000*	1.92455	.001	-14.3508	-5.2492	แตกต่างกัน
		100.00	-14.35000*	1.92455	.000	-18.9008	-9.7992	แตกต่างกัน
		120.00	-18.85500*	1.92455	.000	-23.4058	-14.3042	แตกต่างกัน
		140.00	-21.64500*	1.92455	.000	-26.1958	-17.0942	แตกต่างกัน

Multiple Comparisons							
Dependent Variable: efficiency							
(I) Conc	(J) Conc	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		ผลการ ทดสอบ
					Lower Bound	Upper Bound	
80.00	20.00	63.00000*	1.92455	.000	58.4492	67.5508	แตกต่างกัน
	40.00	14.34000*	1.92455	.000	9.7892	18.8908	แตกต่างกัน
	60.00	9.80000*	1.92455	.001	5.2492	14.3508	แตกต่างกัน
	100.00	-4.55000	1.92455	.050	-9.1008	.0008	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	-9.05500*	1.92455	.002	-13.6058	-4.5042	แตกต่างกัน
	140.00	-11.84500*	1.92455	.000	-16.3958	-7.2942	แตกต่างกัน
100.00	20.00	67.55000*	1.92455	.000	62.9992	72.1008	แตกต่างกัน
	40.00	18.89000*	1.92455	.000	14.3392	23.4408	แตกต่างกัน
	60.00	14.35000*	1.92455	.000	9.7992	18.9008	แตกต่างกัน
	80.00	4.55000	1.92455	.050	-.0008	9.1008	ไม่แตกต่างกัน
	120.00	-4.50500	1.92455	.052	-9.0558	.0458	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-7.29500*	1.92455	.007	-11.8458	-2.7442	แตกต่างกัน
120.00	20.00	72.05500*	1.92455	.000	67.5042	76.6058	แตกต่างกัน
	40.00	23.39500*	1.92455	.000	18.8442	27.9458	แตกต่างกัน
	60.00	18.85500*	1.92455	.000	14.3042	23.4058	แตกต่างกัน
	80.00	9.05500*	1.92455	.002	4.5042	13.6058	แตกต่างกัน
	100.00	4.50500	1.92455	.052	-.0458	9.0558	ไม่แตกต่างกัน
	140.00	-2.79000	1.92455	.190	-7.3408	1.7608	ไม่แตกต่างกัน
140.00	20.00	74.84500*	1.92455	.000	70.2942	79.3958	แตกต่างกัน
	40.00	26.18500*	1.92455	.000	21.6342	30.7358	แตกต่างกัน
	60.00	21.64500*	1.92455	.000	17.0942	26.1958	แตกต่างกัน
	80.00	11.84500*	1.92455	.000	7.2942	16.3958	แตกต่างกัน
	100.00	7.29500*	1.92455	.007	2.7442	11.8458	แตกต่างกัน
	120.00	2.79000	1.92455	.190	-1.7608	7.3408	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 15 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ข้าว AI

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	.771	4	.193	3.098	.123	
Within Groups	.311	5	.062			
Total	1.082	9				

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
	(I) NaCl	(J) NaCl	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		ผลการทดสอบ
						Lower Bound	Upper Bound	
LSD	.06	.12	-.47500	.24938	.115	-1.1160	.1660	ไม่แตกต่างกัน
		.24	-.66500*	.24938	.045	-1.3060	-.0240	แตกต่างกัน
		.48	-.39500	.24938	.174	-1.0360	.2460	ไม่แตกต่างกัน
		.96	.05000	.24938	.849	-.5910	.6910	ไม่แตกต่างกัน
	.12	.06	.47500	.24938	.115	-1.1660	1.1160	ไม่แตกต่างกัน
		.24	-.19000	.24938	.480	-.8310	.4510	ไม่แตกต่างกัน
		.48	.08000	.24938	.761	-.5610	.7210	ไม่แตกต่างกัน
		.96	.52500	.24938	.089	-.1160	1.1660	ไม่แตกต่างกัน
	.24	.06	.66500*	.24938	.045	-.0240	1.3060	แตกต่างกัน
		.12	-.19000	.24938	.480	-.4510	.8310	ไม่แตกต่างกัน
		.48	.27000	.24938	.328	-.3710	.9110	ไม่แตกต่างกัน
		.96	.71500*	.24938	.035	.0740	1.3560	แตกต่างกัน
	.48	.06	.39500	.24938	.174	-.2460	1.0360	ไม่แตกต่างกัน
		.12	-.08000	.24938	.761	-.7210	.5610	ไม่แตกต่างกัน
		.24	-.27000	.24938	.328	-.9110	.3710	ไม่แตกต่างกัน
		.96	.44500	.24938	.134	-.1960	1.0860	ไม่แตกต่างกัน
	.96	.06	-.05000	.24938	.849	-.6910	.5910	ไม่แตกต่างกัน
		.12	-.52500	.24938	.089	-1.1660	.1160	ไม่แตกต่างกัน
		.24	-.71500*	.24938	.035	-1.3560	-.0740	แตกต่างกัน
		.48	-.44500	.24938	.134	-1.0860	.1960	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 16 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ขี้วัว Fe

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	12.396	4	3.099	2.994	.130	
Within Groups	5.176	5	1.035			
Total	17.572	9				

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
	(I) NaCl	(J) NaCl	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		ผลการทดสอบ
						Lower Bound	Upper Bound	
LSD	.06	.12	-1.46500	1.01747	.209	-4.0805	1.1505	ไม่แตกต่างกัน
		.24	-1.96500	1.01747	.111	-4.5805	.6505	ไม่แตกต่างกัน
		.48	-2.41500	1.01747	.064	-5.0305	.2005	ไม่แตกต่างกัน
		.96	-3.36500*	1.01747	.021	-5.9805	-.7495	แตกต่างกัน
	.12	.06	1.46500	1.01747	.209	-1.1505	4.0805	ไม่แตกต่างกัน
		.24	-.50000	1.01747	.644	-3.1155	2.1155	ไม่แตกต่างกัน
		.48	-.95000	1.01747	.393	-3.5655	1.6655	ไม่แตกต่างกัน
		.96	-1.90000	1.01747	.121	-4.5155	.7155	ไม่แตกต่างกัน
	.24	.06	1.96500	1.01747	.111	-.6505	4.5805	ไม่แตกต่างกัน
		.12	.50000	1.01747	.644	-2.1155	3.1155	ไม่แตกต่างกัน
		.48	-.45000	1.01747	.677	-3.0655	2.1655	ไม่แตกต่างกัน
		.96	-1.40000	1.01747	.227	-4.0155	1.2155	ไม่แตกต่างกัน
	.48	.06	2.41500	1.01747	.064	-.2005	5.0305	ไม่แตกต่างกัน
		.12	.95000	1.01747	.393	-1.6655	3.5655	ไม่แตกต่างกัน
		.24	.45000	1.01747	.677	-2.1655	3.0655	ไม่แตกต่างกัน
		.96	-.95000	1.01747	.393	-3.5655	1.6655	ไม่แตกต่างกัน
	.96	.06	3.36500*	1.01747	.021	.7495	5.9805	แตกต่างกัน
		.12	1.90000	1.01747	.121	-.7155	4.5155	ไม่แตกต่างกัน
		.24	1.40000	1.01747	.227	-1.2155	4.0155	ไม่แตกต่างกัน
		.48	.95000	1.01747	.393	-1.6655	3.5655	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 17 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความสัมพันธ์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม  
Vat โดยใช้ตัว AI

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	1.786	4	.446	16.734	.004	มีอย่างน้อย
Within Groups	.133	5	.027			1 คู่ที่
Total	1.919	9				แตกต่างกัน

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
(I)	(J)	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence		ผลการทดสอบ	
Volt	Volt	Difference	Error		Interval			
		(I-J)			Lower	Upper		
LSD	5.00	10.00	-.39000	.16334	.063	-.8099	.0299	ไม่แตกต่างกัน
		15.00	-.77000*	.16334	.005	-1.1899	-.3501	แตกต่างกัน
		17.00	-1.16000*	.16334	.001	-1.5799	-.7401	แตกต่างกัน
		20.00	-1.01000*	.16334	.002	-1.4299	-.5901	แตกต่างกัน
10.00	5.00	10.00	-.39000	.16334	.063	-.0299	.8099	ไม่แตกต่างกัน
		15.00	-.38000	.16334	.068	-.7999	.0399	ไม่แตกต่างกัน
		17.00	-.77000*	.16334	.005	-1.1899	-.3501	แตกต่างกัน
		20.00	-.62000*	.16334	.013	-1.0399	-.2001	แตกต่างกัน
15.00	5.00	10.00	-.77000*	.16334	.005	-.3501	1.1899	แตกต่างกัน
		10.00	-.38000	.16334	.068	-.0399	.7999	ไม่แตกต่างกัน
		17.00	-.39000	.16334	.063	-.8099	.0299	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	-.24000	.16334	.202	-.6599	.1799	ไม่แตกต่างกัน
17.00	5.00	10.00	1.16000*	.16334	.001	.7401	1.5799	แตกต่างกัน
		10.00	.77000*	.16334	.005	.3501	1.1899	แตกต่างกัน
		15.00	.39000	.16334	.063	-.0299	.8099	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	.15000	.16334	.401	-.2699	.5699	ไม่แตกต่างกัน
20.00	5.00	10.00	1.01000*	.16334	.002	.5901	1.4299	แตกต่างกัน
		10.00	.62000*	.16334	.013	.2001	1.0399	แตกต่างกัน
		15.00	.24000	.16334	.202	-.1799	.6599	ไม่แตกต่างกัน
		17.00	-.15000	.16334	.401	-.5699	.2699	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 18 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของความสัมพันธ์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม  
Vat โดยใช้ตัว Fe

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	14.560	3	4.853	14.721	.013	มีอย่างน้อย
Within Groups	1.319	4	.330			1 คู่ที่
Total	15.879	7				แตกต่างกัน

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
	(I)	(J)	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence		ผลการทดสอบ
	Volt	Volt	Difference	Error		Interval		
			(I-J)			Lower	Upper	
						Bound	Bound	
LSD	5.00	10.00	-1.65000*	.57420	.045	-3.2442	-.0558	แตกต่างกัน
		15.00	-2.66000*	.57420	.010	-4.2542	-1.0658	แตกต่างกัน
		20.00	-3.65000*	.57420	.003	-5.2442	-2.0558	แตกต่างกัน
	10.00	5.00	1.65000*	.57420	.045	.0558	3.2442	แตกต่างกัน
		15.00	-1.01000	.57420	.153	-2.6042	.5842	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	-2.00000*	.57420	.025	-3.5942	-.4058	แตกต่างกัน
	15.00	5.00	2.66000*	.57420	.010	1.0658	4.2542	แตกต่างกัน
		10.00	1.01000	.57420	.153	-.5842	2.6042	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	-.99000	.57420	.160	-2.5842	.6042	ไม่แตกต่างกัน
	20.00	5.00	3.65000*	.57420	.003	2.0558	5.2442	แตกต่างกัน
		10.00	2.00000*	.57420	.025	.4058	3.5942	แตกต่างกัน
		15.00	.99000	.57420	.160	-.6042	2.5842	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 19 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่า pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Vat โดยใช้जू A1

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	388.198	4	97.049	544.182	.000	มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน
Within Groups	.892	5	.178			
Total	389.089	9				

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
	(I)	(J)	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence Interval		ผลการทดสอบ
	pH	pH	Difference (I-J)	Error		Interval		
						Lower Bound	Upper Bound	
LSD	3.00	5.00	-15.91500*	.42230	.000	-17.0006	-14.8294	แตกต่างกัน
		6.00	-15.64500*	.42230	.000	-16.7306	-14.5594	แตกต่างกัน
		8.00	-15.40000*	.42230	.000	-16.4856	-14.3144	แตกต่างกัน
		10.00	-15.31000*	.42230	.000	-16.3956	-14.2244	แตกต่างกัน
	5.00	3.00	15.91500*	.42230	.000	14.8294	17.0006	แตกต่างกัน
		6.00	.27000	.42230	.551	-.8156	1.3556	ไม่แตกต่างกัน
		8.00	.51500	.42230	.277	-.5706	1.6006	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	.60500	.42230	.211	-.4806	1.6906	ไม่แตกต่างกัน
	6.00	3.00	15.64500*	.42230	.000	14.5594	16.7306	แตกต่างกัน
		5.00	-.27000	.42230	.551	-1.3556	.8156	ไม่แตกต่างกัน
		8.00	.24500	.42230	.587	-.8406	1.3306	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	.33500	.42230	.464	-.7506	1.4206	ไม่แตกต่างกัน
	8.00	3.00	15.40000*	.42230	.000	14.3144	16.4856	แตกต่างกัน
		5.00	-.51500	.42230	.277	-1.6006	.5706	ไม่แตกต่างกัน
		6.00	-.24500	.42230	.587	-1.3306	.8406	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	.09000	.42230	.840	-.9956	1.1756	ไม่แตกต่างกัน
	10.00	3.00	15.31000*	.42230	.000	14.2244	16.3956	แตกต่างกัน
		5.00	-.60500	.42230	.211	-1.6906	.4806	ไม่แตกต่างกัน
		6.00	-.33500	.42230	.464	-1.4206	.7506	ไม่แตกต่างกัน
		8.00	-.09000	.42230	.840	-1.1756	.9956	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



ตารางที่ 20 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่า pH ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม Vat โดยใช้ขี้วัว Fe

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	16.558	4	4.140	8.336	.019	มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน
Within Groups	2.483	5	.497			
Total	19.041	9				

Multiple Comparisons							
Dependent Variable: efficiency							
	(I) pH	(J) pH	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound Upper Bound	ผลการทดสอบ
LSD	3.00	5.00	-2.56000*	.70470	.015	-4.3715 - .7485	แตกต่างกัน
		6.00	-2.63500*	.70470	.013	-4.4465 - .8235	แตกต่างกัน
		8.00	-1.28000	.70470	.129	-3.0915 .5315	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	.51000	.70470	.502	-1.3015 2.3215	ไม่แตกต่างกัน
	5.00	3.00	2.56000*	.70470	.015	.7485 4.3715	แตกต่างกัน
		6.00	-.07500	.70470	.919	-1.8865 1.7365	ไม่แตกต่างกัน
		8.00	1.28000	.70470	.129	-.5315 3.0915	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	3.07000*	.70470	.007	1.2585 4.8815	แตกต่างกัน
	6.00	3.00	2.63500*	.70470	.013	.8235 4.4465	แตกต่างกัน
		5.00	.07500	.70470	.919	-1.7365 1.8865	ไม่แตกต่างกัน
		8.00	1.35500	.70470	.113	-.4565 3.1665	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	3.14500*	.70470	.007	1.3335 4.9565	แตกต่างกัน
	8.00	3.00	1.28000	.70470	.129	-.5315 3.0915	ไม่แตกต่างกัน
		5.00	-1.28000	.70470	.129	-3.0915 .5315	ไม่แตกต่างกัน
		6.00	-1.35500	.70470	.113	-3.1665 .4565	ไม่แตกต่างกัน
		10.00	1.79000	.70470	.052	-.0215 3.6015	ไม่แตกต่างกัน
	10.00	3.00	-.51000	.70470	.502	-2.3215 1.3015	ไม่แตกต่างกัน
		5.00	-3.07000*	.70470	.007	-4.8815 -1.2585	แตกต่างกัน
		6.00	-3.14500*	.70470	.007	-4.9565 -1.3335	แตกต่างกัน
		8.00	-1.79000	.70470	.052	-3.6015 .0215	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 21 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ขี้วัว A1

ANOVA						
efficiency						
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ
Between Groups	2.608	4	.652	8.021	.021	มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน
Within Groups	.406	5	.081			
Total	3.015	9				

Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
	(I)	(J)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	ผลการทดสอบ	
	Reaction time	Reaction time				Lower Bound	Upper Bound	
LSD	10.00	15.00	-.86500*	.28511	.029	-1.597	-.132	แตกต่างกัน
		20.00	-.85500*	.28511	.030	-1.587	-.122	แตกต่างกัน
		25.00	-1.37500*	.28511	.005	-2.107	-.642	แตกต่างกัน
		30.00	-1.41500*	.28511	.004	-2.147	-.682	แตกต่างกัน
	15.00	10.00	.86500*	.28511	.029	.132	1.597	แตกต่างกัน
		20.00	.01000	.28511	.973	-.722	.742	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	-.51000	.28511	.134	-1.242	.222	ไม่แตกต่างกัน
		30.00	-.55000	.28511	.112	-1.282	.182	ไม่แตกต่างกัน
	20.00	10.00	.85500*	.28511	.030	.122	1.587	แตกต่างกัน
		15.00	-.01000	.28511	.973	-.742	.722	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	-.52000	.28511	.128	-1.252	.212	ไม่แตกต่างกัน
		30.00	-.56000	.28511	.107	-1.292	.172	ไม่แตกต่างกัน
	25.00	10.00	1.37500*	.28511	.005	.642	2.107	แตกต่างกัน
		15.00	.51000	.28511	.134	-.222	1.242	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	.52000	.28511	.128	-.212	1.252	ไม่แตกต่างกัน
		30.00	-.04000	.28511	.894	-.772	.692	ไม่แตกต่างกัน
	30.00	10.00	1.41500*	.28511	.004	.682	2.147	แตกต่างกัน
		15.00	.55000	.28511	.112	-.182	1.282	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	.56000	.28511	.107	-.172	1.292	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	.04000	.28511	.894	-.692	.772	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 22 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ตัว Fe

ANOVA								
efficiency								
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ		
Between Groups	22.514	4	5.628	4.462	.066			
Within Groups	6.308	5	1.262					
Total	28.821	9						
Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
	(I) Reaction time	(J) Reaction time	Mean Differen ce (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		ผลการทดสอบ
						Lower Bound	Upper Bound	
LS D	10.00	15.00	-.40500	1.12317	.733	-3.2922	2.4822	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	-.68500	1.12317	.569	-3.5722	2.2022	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	-4.12000*	1.12317	.014	-7.0072	-1.2328	แตกต่างกัน
		30.00	-2.04000	1.12317	.129	-4.9272	.8472	ไม่แตกต่างกัน
15.00	10.00	10.00	-.40500	1.12317	.733	-2.4822	3.2922	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	-.28000	1.12317	.813	-3.1672	2.6072	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	-3.71500*	1.12317	.021	-6.6022	-.8278	แตกต่างกัน
		30.00	-1.63500	1.12317	.205	-4.5222	1.2522	ไม่แตกต่างกัน
20.00	10.00	10.00	.68500	1.12317	.569	-2.2022	3.5722	ไม่แตกต่างกัน
		15.00	.28000	1.12317	.813	-2.6072	3.1672	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	-3.43500*	1.12317	.028	-6.3222	-.5478	แตกต่างกัน
		30.00	-1.35500	1.12317	.282	-4.2422	1.5322	ไม่แตกต่างกัน
25.00	10.00	10.00	4.12000*	1.12317	.014	1.2328	7.0072	แตกต่างกัน
		15.00	3.71500*	1.12317	.021	.8278	6.6022	แตกต่างกัน
		20.00	3.43500*	1.12317	.028	.5478	6.3222	แตกต่างกัน
		30.00	2.08000	1.12317	.123	-.8072	4.9672	ไม่แตกต่างกัน
30.00	10.00	10.00	2.04000	1.12317	.129	-.8472	4.9272	ไม่แตกต่างกัน
		15.00	1.63500	1.12317	.205	-1.2522	4.5222	ไม่แตกต่างกัน
		20.00	1.35500	1.12317	.282	-1.5322	4.2422	ไม่แตกต่างกัน
		25.00	-2.08000	1.12317	.123	-4.9672	.8072	ไม่แตกต่างกัน

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 23 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ตัว A1

ANOVA							
efficiency							
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	ผลการทดสอบ	
Between Groups	.303	4	.076	1.254	.396		
Within Groups	.302	5	.060				
Total	.604	9					
Multiple Comparisons							
Dependent Variable: efficiency							
	(I) Sed	(J) Sed	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound Upper Bound	ผลการทดสอบ
LSD	15.00	30.00	-.17500	.24558	.508	-.8063 .4563	
		45.00	-.20000	.24558	.452	-.8313 .4313	
		60.00	-.50500	.24558	.095	-1.1363 .1263	
		120.00	-.37500	.24558	.187	-1.0063 .2563	
	30.00	15.00	.17500	.24558	.508	-.4563 .8063	
		45.00	-.02500	.24558	.923	-.6563 .6063	
		60.00	-.33000	.24558	.237	-.9613 .3013	
		120.00	-.20000	.24558	.452	-.8313 .4313	
	45.00	15.00	.20000	.24558	.452	-.4313 .8313	
		30.00	.02500	.24558	.923	-.6063 .6563	ไม่แตกต่างกัน
		60.00	-.30500	.24558	.269	-.9363 .3263	
		120.00	-.17500	.24558	.508	-.8063 .4563	
	60.00	15.00	.50500	.24558	.095	-.1263 1.1363	
		30.00	.33000	.24558	.237	-.3013 .9613	
		45.00	.30500	.24558	.269	-.3263 .9363	
		120.00	.13000	.24558	.619	-.5013 .7613	
120.00	15.00	.37500	.24558	.187	-.2563 1.0063		
	30.00	.20000	.24558	.452	-.4313 .8313		
	45.00	.17500	.24558	.508	-.4563 .8063		
	60.00	-.13000	.24558	.619	-.7613 .5013		

ตารางที่ 24 ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Vat โดยใช้ตัว Fe

ANOVA								
efficiency								
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.			
Between Groups	3.555	4	.889	274.302	.000			
Within Groups	.016	5	.003					
Total	3.571	9						
Multiple Comparisons								
Dependent Variable: efficiency								
(I) Sed	(J) Sed	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval		ผลการทดสอบ	
					Lower Bound	Upper Bound		
LSD	15.00	30.00	-.47000*	.05692	.000	-.6163	-.3237	แตกต่างกัน
		45.00	-1.03000*	.05692	.000	-1.1763	-.8837	
		60.00	-1.62500*	.05692	.000	-1.7713	-1.4787	
		120.00	-1.39000*	.05692	.000	-1.5363	-1.2437	
30.00	15.00	47000*	.05692	.000	.3237	.6163		
		45.00	-.56000*	.05692	.000	-.7063	-.4137	
		60.00	-1.15500*	.05692	.000	-1.3013	-1.0087	
		120.00	-.92000*	.05692	.000	-1.0663	-.7737	
45.00	15.00	1.03000*	.05692	.000	.8837	1.1763		
		30.00	.56000*	.05692	.000	.4137	.7063	
		60.00	-.59500*	.05692	.000	-.7413	-.4487	
		120.00	-.36000*	.05692	.001	-.5063	-.2137	
60.00	15.00	1.62500*	.05692	.000	1.4787	1.7713		
		30.00	1.15500*	.05692	.000	1.0087	1.3013	
		45.00	.59500*	.05692	.000	.4487	.7413	
		120.00	.23500*	.05692	.009	.0887	.3813	
120.00	15.00	1.39000*	.05692	.000	1.2437	1.5363		
		30.00	.92000*	.05692	.000	.7737	1.0663	
		45.00	.36000*	.05692	.001	.2137	.5063	
		60.00	-.23500*	.05692	.009	-.3813	-.0887	

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ภาคผนวก ฉ

การคิดค่าใช้ในการบำบัดเสียของระบบ EC แบบ Continuous

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ต้นทุนการบำบัดเสียสามารถคำนวณได้โดยพิจารณาจาก 4 ปัจจัยหลักได้แก่ ค่าไฟ ค่าขั้วไฟฟ้า ค่ากำจัดกากตะกอน และค่าสารเคมี (Bayramoglu et al., 2004) ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาเฉพาะ 2 ปัจจัย ดังสมการที่ 1 ได้แก่ ปริมาณพลังงานที่ใช้ ( $C_{\text{energy}}$ ) และ ปริมาณขั้วไฟฟ้าที่ใช้ ( $C_{\text{electrod}}$ )

$$\text{Operating Cost} = a \times C_{\text{energy}} + b \times C_{\text{electrode}}$$

a = ค่าไฟฟ้า (บาท/kWh)

b = ราคาขั้วไฟฟ้า (บาท/m<sup>2</sup>)

จาก

$$C_{\text{energy}} = \frac{W}{V} \\ = \frac{V \times I \times T}{V}$$

W = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์ ชั่วโมง)

= ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

I = ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

T = ระยะเวลาที่ใช้ไฟฟ้า (ชั่วโมง)

V = ปริมาตรน้ำ (ลบ.ม.)

ดังนั้น

$$C_{\text{energy}} = \frac{12.5 \text{ V} \times 5.06 \text{ A} \times 20 \text{ min} \times 1 \text{ h}}{60 \text{ min} \times 0.0006 \text{ m}^3} \\ = 35,139 \text{ Wh} \\ = 35.139 \text{ kWh/m}^3$$

อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการขนาดกลาง ที่มีลักษณะการใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ อุตสาหกรรม หน่วยราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น หน่วยงานรัฐวิสาหกิจ สถานที่ทำการเกี่ยวกับกิจการของต่างชาติ และสถานที่ทำการขององค์กรระหว่างประเทศ (การไฟฟ้านครหลวง, 2555) อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า 2.72 บาทต่อ kWh

ดังนั้น

$$a \times C_{\text{energy}} = \frac{35.139 \text{ kWh}}{\text{m}^3} \times \frac{2.72 \text{ บาท}}{\text{kWh}}$$

$$C_{\text{electrode}} = \frac{I \times t \times M}{Z \times F} = 95.58 \text{ บาท/m}^3$$

จาก

- $t$  = ระยะเวลาที่ใช้ไฟฟ้า (วินาที)  
 $Z$  = จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์  
 $F$  = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 Culomb/mol)  
 $M$  = น้ำหนักโมเลกุลของขั้วแอโนด (g/mol) กำหนดให้ Al 26.98 g/mol

$$\begin{aligned}
 C_{\text{electrode}} &= \frac{5.06 \text{ A} \times 20 \text{ min} \times 60 \text{ s} \times 26.98 \text{ g}}{3 \times 96,485 \text{ Culomb/mol}} \\
 &= 0.57 \text{ g ต่อ น้ำ } 600 \text{ ml} \\
 &= 950 \text{ g/m}^3
 \end{aligned}$$

ราคาอลูมิเนียม 53.95-54.56 บาท/kg (Bayramoglu et al., 2004 , Dermibas and Kodya , 2017) เฉลี่ย 54.26 บาท/kg

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad b \times C_{\text{electrode}} &= \frac{950 \text{ g}}{1000 \text{ g}} \times \frac{54.26 \text{ บาท}}{\text{kg}} \\
 &= 51.55 \text{ บาท/m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad \text{ต้นทุนการบำบัดน้ำเสีย} &= 95.58 \text{ บาท/m}^3 + 51.55 \text{ บาท/m}^3 \\
 &= 147.13 \text{ บาท/m}^3
 \end{aligned}$$

จึงสรุปได้ว่า ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยระบบ Electrocoagulation คิดเป็นราคาต่อปริมาตรน้ำเสีย  $1 \text{ m}^3$  จะได้เท่ากับ 147.13 บาท/ $\text{m}^3$





## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Ainchu, S., Yimrattanabovorn, J., Panomasak, O., Toduang, T., Klingthale, S., and Wichitsathian, B. (2020). Comparison of Electrocoagulation Using Iron and Aluminium Electrodes with Chemical Coagulation for removal of Vat Dye Solution. Naresuan University Journals : Science and Technology, Vol. 28, No. 2, pp. 1-13.



## Comparison of Electrocoagulation Using Iron and Aluminium Electrodes with Chemical Coagulation for removal of Vat Dye Solution

Surangkhan Ainchu, Jareeya Yimrattanabovorn\*, Onin Panomasak, Thanatporn Toduang, Sakawduan Klingthale and Boonchai Wichitsathian

School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand

\* Corresponding author. E-mail address: chareeya@sut.ac.th

Received: 24 April 2019; Revised: 30 October 2019; Accepted: 6 November 2019

### Abstract

The dyes are widely used in textile industry and causes various environmental problems. There are several methods available for removal of dyes from wastewater but they have been found to exhibit certain limitations. Among these methods, chemical coagulation (CC) and electrocoagulation process (EC) has been successfully used for the treatment of textile wastewater being attractive alternative. The objective of study is to investigate the performance of EC and CC for decolorization of vat dye and to compare between iron and aluminium as electrode and coagulant. The results show EC process had color removal efficiency higher than 90 % for both of Fe and Al electrode. The respective effects of operational parameters (initial dye concentration, reaction time, initial pH and applied voltage) had effect on color removal of EC. And the optimum conditions for Fe and Al electrode are 28 mg/L for initial dye concentration, 30 and 20 min for reaction time, 5 and 7 for initial pH and 30 volt for applied voltage respectively. A comparison with CC using the same amount of Fe and Al as in EC was also carried out. The EC process show more efficient process than CC process to treat vat dye solution. And for color removal of EC did not differ significantly between Al and Fe electrode. The application of EC to treat wastewater from textile household industries had color and COD removal efficiency higher than 80% and 60% respectively. It was concluded that the EC process is a competitive alternative process and presents a high potentiality for the treatment of color from textile wastewater.

**Keywords:** Electrocoagulation, Chemical Coagulation, Vat Dye, Iron Electrode, Aluminium Electrode

### Introduction

The dyes are widely used in textile industry and causes various environmental problems, not only because of its huge quantity of poisonous organic pollutants, but also due to its intense color, high COD, large quantity of suspended solids, broadly fluctuating pH and biotoxicity (Hamad, Bassyouni, El-Ashtoukhy, Amin & El-Latif, 2018; Bassyouni, Hamad, El-Ashtoukhy, Amin, & El-Latif, 2017; Verma, Dash, & Bhunia, 2012). There are several methods available for removal of dyes from wastewater. Many methods have been found to exhibit certain limitations: biological methods suffer by the toxicity of dyestuffs on microbial (Daneshwar, Khataee, & Djafarzadeh, 2006) and other advanced oxidation processes require chemicals which introduce a secondary pollutants (Alshamsi, Albadwawi, Alnuaimi, Rauf, & Ashraf, 2007). Among these methods, conventional coagulation (CC) is the most common and practical method of removal dyes from textile wastewater. However, they present all severe limitations. For instance, CC requires the addition of chemicals that decrease pH and produces large volumes of sludge, requires high treatment times and exhibits a limited effectiveness in the presence of soluble dyes (Kiliç & Hosten, 2010). Electrocoagulation process (EC) has been successfully used for the treatment of textile wastewater being attractive for a simple, reliable, and costly effective method for the treatment of wastewater without need for additional chemicals, and reduces the

amount of sludge (Khadim et al., 2016; Fajardo, Martins, Silva, & Martínez-Huitle, Quinta-Ferreira, 2017). However, no general conclusion about the compared efficiency can be made for any type of vat dyes. Vat dye is water insoluble, the structure composed of ketones or least one carbonyl, Bright colors and has the ability to withstand sun and wash well, usually applied to woven knitted fabric fiber and cotton (jiraporn hutakamol, 2011). Therefore, the objective of this study is to investigate the performance of EC for decolorization of insoluble vat dye solution and to propose a rational and systematic comparison between iron and aluminium electrodes and investigated the optimum experimental conditions. The optimum CC conditions (pH and coagulant dose; ferric chloride and PAC dosing) and optimum EC conditions (Fe/Al electrode, initial concentration of vat dye, initial pH of solution, reaction time and applied voltage) were determined and the vat dye removal effectiveness of CC and EC was compared. The results of this study could make reliable comparison of the efficiency for the CC and EC processes to remove vat dye from textile industry scale. The studies on vat dye solution were included to understand the coagulation mechanism in EC and CC. Moreover, the results of study can be widely used in dye removal from textile wastewater and engineering design purpose.

## Methods and Materials

### 2.1 Dye solutions

Vat dye was supported by DyStar Co., Ltd, Thailand. The vat dye stock solution was prepared at a concentration of 100 mg/L and the experimental solutions were obtained by diluting the stock solutions to the required initial concentrations. The wavelength of vat dye solution was determined by running a scan of dye solution on a UV-Visible spectrophotometer (GENESYS TM20, USA) and the maximum absorbance wavelengths ( $\lambda_{max}$ ) was found at 254 nm.

### 2.2 Experimental setup

#### 2.2.1 Electrocoagulation Experiments

The EC experimental set was shown in Figure 1 and had two sets for different electrode iron set and aluminium set. They are the most widely used materials for electrode in electrocoagulation process (Verma, 2017). Each set was equipped with four parallel, two anodes and two cathodes with the dimensions of 46 x 55 x 3 mm of iron and aluminium plates. To prepare electrodes by washing with acetone for surface grease removal. The impurities on aluminum and iron electrode surfaces were removed by dipping for 5 min in a solution freshly prepared by mixing 100 cm<sup>3</sup> of HCl solution (35%) and 200 cm<sup>3</sup> of hexamethylenetetramine aqueous solution (2.80%), dried and weighted (Kobya, Can, & Bayramoglu, 2003). The total effective electrode area was 192 cm<sup>2</sup> and the spacing between electrodes was 11 mm and connected to a DC digital power supply. Beaker electrocoagulator with the volume of 1,000 ml was used. The experimental set up was carried out to find the optimum conditions for EC process by varied the initial vat dye concentration from 4 to 28 mg/L, initial pH of solution from 3 to 9 (The pH was adjusted to a desirable value using 0.1 M NaOH and 0.1 M HCl) reaction time from 10 to 35 min and applied voltage from 10 to 30 volt as shown in Table 1. All experimental setups were performed at mixing speed 200 rpm, and with 600 ml of vat dye solution.

### 2.2.2 Chemical coagulation experiments

In the CC experimental sets were used a Jar test apparatus with four stirring paddles. Two coagulant agents;  $\text{FeCl}_3$  and PAC were used to compare the removal efficiencies. The operating parameters were kept constant: at ambient temperature, vat dye concentration 28 mg/L for both  $\text{FeCl}_3$  and PAC sets (the volume of vat dye solution 600 mL, rapid mixing of 200 rpm for 1 min and then slow mixing of 40 rpm for 15 min and sedimentation time for 30 min. The concentration of PAC 34.67 mg/l as Al (572.50 mg/l as PAC) and  $\text{FeCl}_3$  71.78 mg/l as Fe (206.67 mg/l as  $\text{FeCl}_3$ ), which equal as using in EC experimental sets. These concentration came from the calculation of the amount of dissolved metal in to the electrocoagulation experiment set by using equation given below (1) (Vepsäläinen, 2012). The polymer concentrations for Fe and PAC set were varied in the range of 1.67-125 mg/L, and initial pH solution was varied in the range of 2-9 to find the optimum conditions of CC for vat dye removal as shown in Table 1.

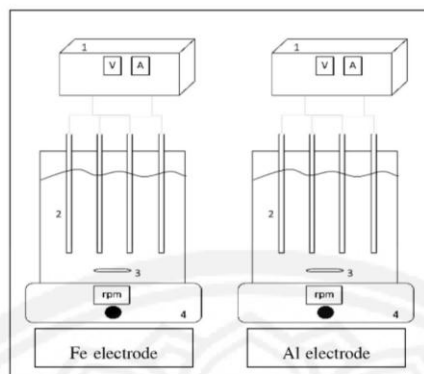
$$M = \frac{itm_w}{ZF} \quad (1)$$

The amount of metal cation dissolved during the reactions at the anode can be calculated according to Faraday's law here;  $I$  is the current,  $t$  is the operation time (s),  $m_w$  is molecular weight of the substance (g/mol),  $F$  is Faraday's constant (96,485 C/mol),  $z$  is the number of electrons involved in the reaction (2 for  $\text{Fe}^{2+}$  and 3 for  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Al}^{3+}$ ) assuming  $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$  and  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$  are supposed to be as main species forms for Fe sets and Al sets respectively, the number of electron moles in dissolution reaction are equal to two and three (Nandi & pastel, 2017) and  $M$  is the quantity of metal dissolved (g). The metal dissolved is 34.67 mg/l for Al sets and 71.78 mg/l for Fe set. The reduction of vat dye concentrations was measured and calculated by using equation given below (2).

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

Where  $C_0$  is the initial vat dye concentration before treating with electrocoagulation and coagulation process, and  $C_t$  is the vat dye concentration remain after sedimentation for 30 min.





**Figure 1** Schematic of experimental set up for Fe and AL electrocoagulation sets (1) DC power supply, (2) electrocoagulation cell, (3) magnetic bar-stirrer, (4) digital magnetic stirrer.

**Table 1** The conditions for Chemical coagulation experimental sets.

Factor	Unit	Ferric chloride (FeCl <sub>3</sub> )		Poly aluminum chloride (PAC)	
		Polymer dosage (mg/l)	pH	Polymer dosage (mg/l)	pH
Polymer dosage	mg/l	1.67 - 125	5	1.67 - 125	5
pH	-	108.33	3,5,7,9	58.33	3,5,7,9

### 2.2.3 Comparative performance of vat dye removal efficiency of EC with CC

As the results of optimum conditions finding for CC and EC experiments, the vat dye removal efficiency (%) was calculated using the equation (2) and compared.

### 2.2.4 Application of EC to treat real wastewater

To apply the EC process to treat real wastewater from textile household industry. The study was carried out to collect raw wastewater from three sampling sites of textile household industries. Three sampling sites of textile household industry were selected; two sampling sites namely, Samko and Sawai which locate in Surin province. Another sampling site namely, Kayabatic which locates in Nakhonratchasima province. Wastewater samples were analyzed for various parameters and analytical methods as shown in Table 2.

**Table 2** Parameter and analytical methods for wastewater.

Parameter	Unit	Analytical methods
pH	-	pH Meter
Color	Pt-Co	2120 C. Spectrophotometric Method
COD	mg/l	5220 C. Close Reflux , Titrimetric Method

## Results and Discussion

### 3.1 Electrocoagulation Experiments

The EC experimental set up was carried out to find the optimum conditions for EC by varied initial vat dye concentration, reaction time, initial pH solution and applied voltage as shown in Table 1 and investigated their effect on vat dye removal.

#### 3.1.1 The effect of initial vat dye concentration

The effect of the initial vat dye concentration was varied of 4,8,12,16,20,24 and 28 mg/L for both type of electrode sets. Figure 2 presented the vat dye removal efficiency of Fe and Al type electrode sets versus initial vat dye concentration. The results showed the set of Fe electrode had removal efficiencies slightly superior in range of 72.14 – 95.85% than the set of Al electrode in range of 65.91 – 95.67 %. As it can be observed both type of electrode sets are significant increase of removal efficiency with increasing initial vat dye concentration from 8 to 16 mg/L and after that they are slightly increased of removal efficiency. And the maximum removal efficiency was found at initial vat dye concentration at 28 mg/L for both of Al and Fe electrode sets. One of most significant pathways of vat dye removal by EC is adsorption of dye molecule on metal hydroxide flocs. According to Faraday's law, a constant amount of metal ion is liberated to solution at the same current and time for all initial vat dye concentration. Thus, the same amount of flocs is limited and only a specific amount of flocs is able to adsorb specific amount of vat dye molecule. So the removal efficiency depend on the appropriate of amount form flocs to adsorb all dye molecules (El-Ashtoukhy, Amin, & Abdel-Aziz, 2012; Bassyouni et al., 2017). Therefore, for comparative performance initial vat dye concentration 28 mg/L was used as optimum initial vat dye concentration for further experiment of Fe and Al electrode sets.

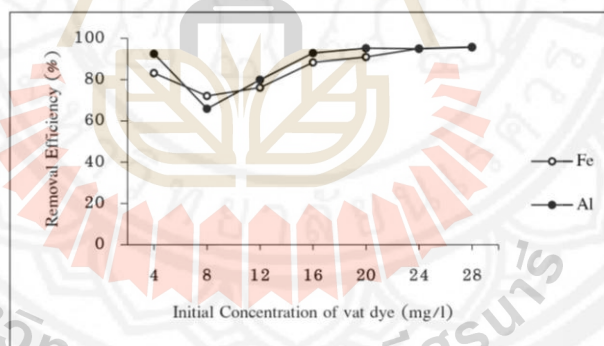


Figure 2 The effect of initial concentration of vat dye on vat dye removal efficiency of electrocoagulation

#### 3.1.2 The effect of reaction time

The results of varies electrolysis reaction time versus at dye removal efficiency was shown in Figure 3 to study their effect on vat dye removal by EC. It can be observed that increasing reaction time over 10 and 15 min for Al and Fe electrode set respectively, the vat dye removal efficiencies significant increased with increasing of reaction time. These results occur due to reaction time relates with the production rate of  $\text{Fe}^{2+}$  or  $\text{Fe}^{3+}$  ions from Fe electrodes and  $\text{Al}^{3+}$  from Al electrode. And the vat dye removal efficiency depends

directly on the concentration of hydroxyl and metal ions produced on the electrodes (Daneshvar et al., 2006). The released metal ions and hydroxyl from electrodes formed more hydroxide flocs, which would adsorb more pollutant particles as the time extended (Drouiche et al., 2009). But beyond the optimum electrolysis reaction time resulted in slightly increased in removal efficiency, this would not be applied due to the high energy and electrode consumption (An, Huang, Yao, & Zhao, 2017). This could be related to charge loading and affects the performance of electrocoagulation on colour removal (Verma, 2017) and decreasing extent of cathodic reduction and generation of nascent electrocoagulant flocs (Akyol, 2012). As shown in Figure 3, the maximum vat dye removal efficiency of Al electrode sets was 97.17% occurred at reaction time for 30 min and Fe electrode set was 97.33% occurred at reaction time for 20 min. It can be notice that both of electrode sets had the similar range of vat dye removal efficiencies. These results is corresponds by the previous literatures that found normally the optimal reaction time was 20–30 min (Koby, Hiz, Senturk, Aydiner, & Demirbas, 2006; Malakootian, Mansoorian, & Moosazadeh, 2010; Xu & Zhu, 2004). Therefore, for further experiments, reaction time for 30 min and 20 min were used as optimum reaction time for Al and Fe electrode sets respectively.

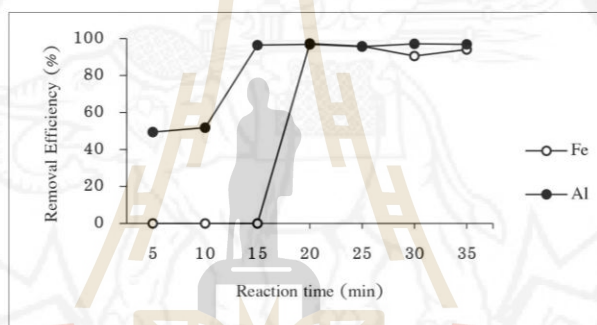


Figure 3 The effect of reaction time on vat dye removal efficiency of electrocoagulation.

### 3.1.3 The effect of initial pH

In order to investigate the effect of the initial pH of of vat dye solution on removal efficiency batch experiments were performed by adjusting the initial pH in the interval from 3 to 9. In each batch experiment of Fe electrodes, the initial vat dye concentration, reaction time and applied voltage were kept constant at 28 mg/L, 20 min and 30 V respectively. And for each batch experiment of Al electrodes, the initial vat dye concentration, reaction time and applied voltage were kept constant at 28, mg/L, 30 min and 30 V respectively. The effect of the pH on electrocoagulation is illustrated in Figure 4. The results of Al electrode sets showed that when pH of vat dye solutions was between 5 to 9, with maximum removal efficiency at 98.23%. In wastewater treatment using electrocoagulation, pH plays a very important role in determining treatment efficiency (Verma, 2017). And for Al electrode sets, higher efficiencies were recorded in range which is close to the optimal pH for  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{S})$  solid formation. The flocs of  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{S})$  have large surface areas, which are useful for a rapid adsorption of soluble organic compounds and trapping of colloidal particles (Bayamoglu, Koby, Can, & Sozbir, 2004). Previous research of Barrera-Diaz et al. (2006) studied the predominant aluminum species present in the solution at different pH values, where they



found that at pH less than 3.5,  $\text{Al}^{3+}$  is the major specie present, for pH values between 4 and 9.5,  $\text{Al(OH)}_3(\text{S})$  predominates and when the pH is greater than 10,  $\text{Al(OH)}_4^-$  forms. These results are quite reasonable since  $\text{Al(OH)}_3(\text{S})$  traps the colloids/pollutants in a sweep coagulation manner as it precipitates. On the other hand,  $\text{Al(OH)}_4^-$  is known to be a very soluble weak coagulant and will not be able to destabilize colloids. Several authors reached the same conclusion that the maximum performance of EC using aluminum anodes is around neutral pH (Moussa, El-Naas, Nasser, & Al-Marri, 2017). And the results of Fe electrode sets showed when pH of vat dye solutions was between 3 to 9, dye removal efficiency was optimal with a maximum at 97.33% at pH 7. These results supported the study of Moussa et al. (2017) that concluded the optimum operating pH range of iron electrode for EC is 5–9 and operation at an initial pH of 8–9 is favorable to ensure complete oxidation of ferrous ions which are known to be highly soluble, poor coagulants with no adsorption capacity of pollutants. And at highly alkaline pH, undesired  $\text{Fe(OH)}_4^-$  forms which is a weak coagulant and deteriorates EC performance (Vepsäläinen, 2012). Therefore, for further experiments, initial pH solution at 5 and 7 were used as optimum pH for Al and Fe electrode sets respectively.

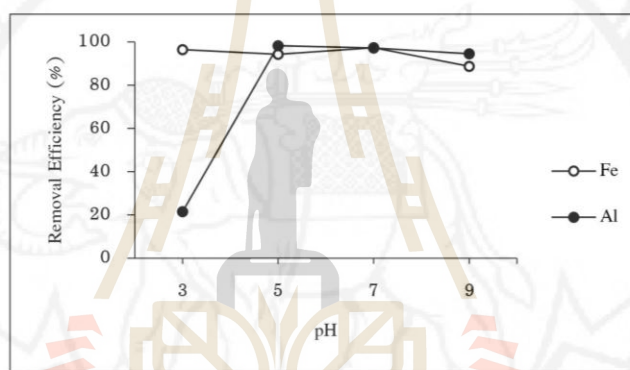


Figure 4 The effect of initial pH on the vat dye removal efficiency of electrocoagulation.

#### 3.1.4 The effect of applied voltage

The effect of current density on vat dye removal efficiency was investigated by varies applied voltage from 10 to 30 V and maintain the constant initial concentration of vat dye 28 mg/l with initial pH of 7 and reaction time for 20 min for Fe electrode sets and for Al electrode sets, the initial concentration of vat dye 28 mg/l with initial pH solution of 5 and reaction time for 30 min. As shown in Figure 5, the efficiency of vat dye removal increase according to increasing of applied voltage. The maximum vat dye removal efficiencies of both Al electrode and Fe electrode sets occur at 30 V with 98.23% and 97.33% respectively. The higher removal efficiency of impurities with increased applied voltage might be related to the higher amount of ions produced on the electrodes that promote destabilization of the pollutant molecules and, finally, the agglomeration of the induced flocs, with increase in the hydrogen evolution (Cañizares, Martínez, Rodrigo, & Sáez, 2009). It is well known that current density determines the coagulant production rate, regulates bubble production, and therefore affects the growth of flocs and therefore current density is one of the most important parameter for controlling the reaction rate in the electrocoagulation (Kobyta, Demirbas, Sik, & Oncel, 2015). Therefore, for further experiments, applied voltage at 30 V was used as optimum applied voltage for both of Al and Fe electrode sets.

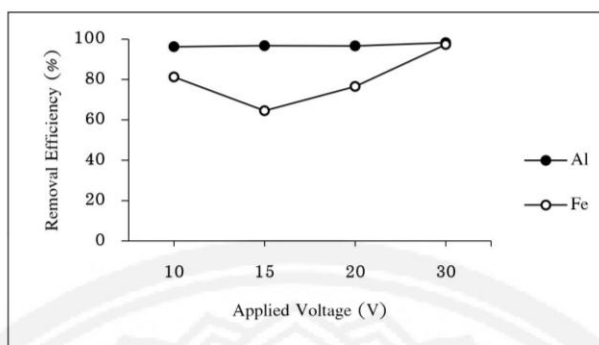


Figure 5 The effect of applied voltage on the vat dye removal efficiency in electrocoagulation

### 3.1.5 Conclusion of optimum condition for EC process

The results of optimum conditions for EC as summarized in Table 3 were carried out to measure the performance of EC process. They were found the optimum condition for Al and Fe electrode have same initial concentration of 28 mg/L and applied voltage 30V whereas, reaction time 30 and 20 min and initial pH were 5 and 7 respectively.

Table 3 The conclusion of optimum conditions for EC process.

Electrode	initial concentration of vat dye (mg/l)	reaction time (min)	pH	applied voltage (volt)	%Vat dye removal
Al	28	30	5	30	98.23
Fe	28	20	7	30	97.33

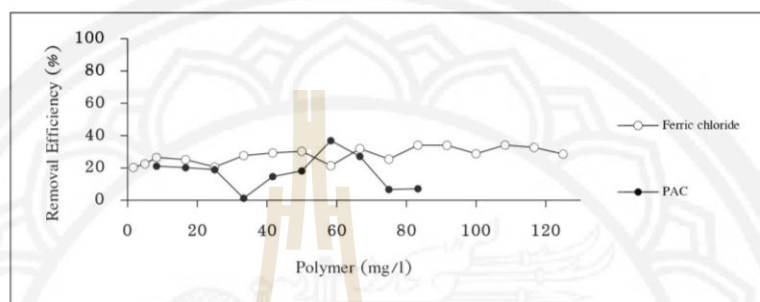
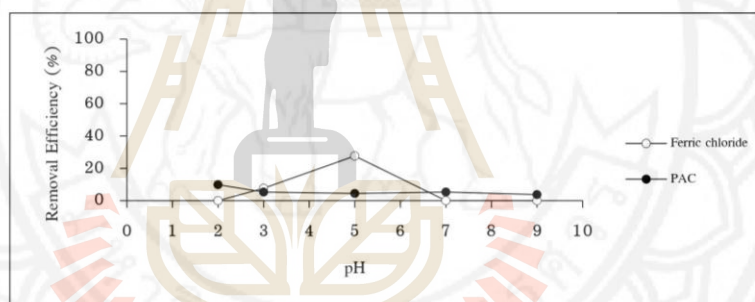
### 3.2 Chemical coagulation experiments

The optimum condition of Chemical coagulation

The chemical coagulation (CC) studies were carried out by using of two kind of coagulant; PAC and  $\text{FeCl}_3$ . The PAC concentration of 34.67 mg/l as Al (572.50 mg/l as PAC) and  $\text{FeCl}_3$  concentration of 71.78 mg/l as Fe (206.67 mg/l as  $\text{FeCl}_3$ ), which calculated amount of dissolved metal the equal as using in EC experimental sets were used. The CC studies were carried out using the jar test method to determine the optimum pH range, and polymer dosage for PAC and  $\text{FeCl}_3$  sets. And the optimum initial vat dye solution of 28 mg/L that was obtained from the results of EC experiments, was used. Overall optimum parameters with results were given in Table 4 for CC process. They were found the optimum condition for PAC sets, at polymer dosage of 58.33 mg/L and pH 2 with the removal efficiencies of 9.88% and the optimum condition for  $\text{FeCl}_3$  sets, at polymer dosage of 108.33 mg/L and pH 5 with the removal efficiencies of 27.66% as shown in Figure 6 and 7. The results showed the CC process had poor removal efficiency in vat dye solution.

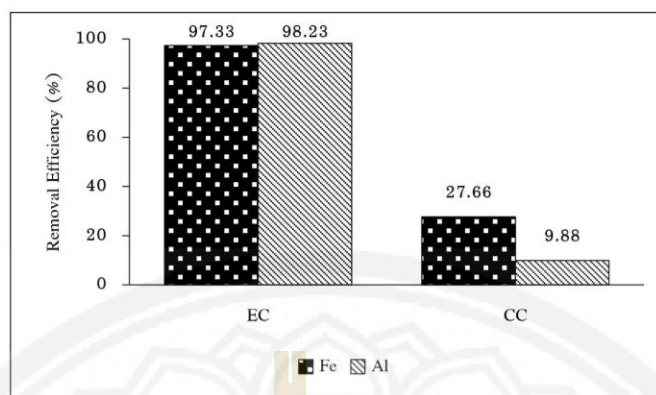
**Table 4** The conclusion of optimum conditions for chemical coagulation studies.

Set	coagulant dosage (mg/l)	Polymer (mg/l)	pH	Removal (%)
FeCl <sub>3</sub>	206.67	108.33	5	27.66%
PAC	572.50	58.33	2	9.88%

**Figure 6** The results of CC study to determine the optimum polymer dosage.**Figure 7** The results of CC study to determine the optimum pH .

### 3.3 Comparative performance of EC and CC

The results of optimum conditions for EC and CC studies were carried out to treat vat dye solution and measuring removal efficiency of each process for comparison of performance. The conclusions of vat dye removal efficiencies for EC and CC processes are presented in Figure 8. The results showed the vat dye removal efficiencies of EC were in range of 97.33–98.23% respectively and were significant higher than removal efficiencies of CC in range of 9.88–27.66%. And the comparison of vat dye removal efficiencies for Al and Fe of EC processes showed similar removal efficiency and for using Fe as coagulant had much effective than using Al. These result are similar to previous researches that concluded aluminum or PAC had not effectives for the vat dye because vat dye has too small particle for coagulant (Hai, Yamamoto, & Fukushi, 2007). As a conclusion, the superiority of EC much over CC is clearly established for vat dye removal.



**Figure 8** The conclusion of overall color removal efficiencies for EC and CC processes with different type of electrode and coagulant

### 3.4 Application of EC to treat wastewater from textile household industries

The results of optimum conditions as shown in Table 3 for EC were applied to treat raw wastewater from three sampling sites of textile household industries for measuring the performance. The results of COD and color removal efficiencies of EC were presented in Table 5 and Figure 9. They showed EC had COD and color removal efficiencies were 60.86 % and 82.63% respectively for using Al electrode, and were 65.85% and 87.24% respectively for Fe electrode. The results showed EC process had color removal efficiencies slightly lower than found in batch experiments of dye solution. And the results showed the EC process using Fe and Al electrode were in the similar range of COD and color removal efficiencies. These results proved that EC process could be used as an effective wastewater treatment for color removal from textile wastewater. However, the COD of the effluent had not meet the standard, thus the author recommend to use EC process as pretreatment of biological treatment. The EC process will be benefit for color removal that is toxic to micro-organism.

**Table 5** The removal efficiencies of EC process to treat wastewater from textile household industries

Parameter	Unit	Influent (min - max)	Al electrode set		Fe electrode set	
			Effluent (min - max)	Removal efficiency (%)	Effluent (min - max)	Removal efficiency (%)
pH	-	5.13-10.25	7.91-8.06	-	8.13-9.54	-
COD	(mg/l)	1,726-2,560	395-1,536	60.86±20.3	436-1,280	65.85±14.53
Color	(Pt-Co)	511-9,256	74 - 1,278	82.63±5.65	26-497	87.24±6.68
	ADMI	426-7758	64.24-1,074	82.63±5.65	23.99 - 418.89	87.24±6.68



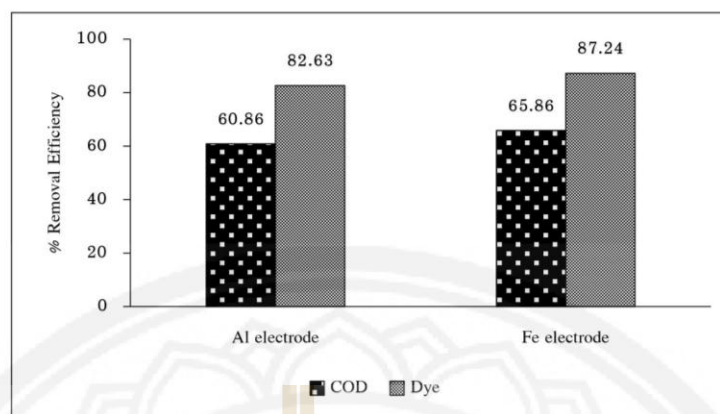


Figure 9 The COD and color removal efficiencies of EC process to treat wastewater from textile household industry

### Conclusions

The studies on comparison of EC and CC in vat dye removal led to the following conclusion; the EC process is more efficient process than CC process to treat vat dye solution. The initial concentration, initial pH, reaction time and applied voltage come out to be major operating variables which regulate the vat dye removal efficiency of EC. The application of EC to treat wastewater from textile household industries had color and COD removal efficiency higher than 80% and 60 % respectively. It was concluded that the EC process is a competitive alternative process and presents a high potentiality for the treatment of color from textile wastewater. And the EC has advantages over CC such as high efficiency and easiness of process control. The further works should address a better understanding of EC mechanisms in order to improve scale up methodology.

### Acknowledgments

This research was supported by the Suranaree University of Technology.

### References

- Akyol, A. (2012). Treatment of paint manufacturing wastewater by electrocoagulation *Desalination*, 285, 91–99.
- Alshamsi, A. F., Albadwawi, A. S., Alnuaimi, M. M., Rauf, M. A., & Ashraf, S. S. (2007). Comparative efficiencies of the degradation of crystal violet using UV/hydrogen peroxide and Fenton's reagent. *Dyes Pigm*, 74, 283–287.
- An, C., Huang, C., Yao, Y., & Zhao, S. (2017). Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review. *Science of The Total Environment*, 579, 537–556.

- Bassyouni, D. G., Hamad, H. A., El-Ashtoukhy, E.-S. Z., Amin, N. K., & El-Latif, M. M. A. (2017). Comparative performance of anodic oxidation and electrocoagulation as clean processes for electrocatalytic degradation of diazo dye Acid Brown 14 in aqueous medium. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *335*, 178–187.
- Bayamoglu, M., Kobya, M., Can, O. T., & Sozbir, M., (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology*, *37*, 117–125.
- Cañizares, P., Martínez, F. A., Rodrigo, M., & Sáez, C., (2009). The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters. *Journal of Hazardous Materials*, *163*, 158–164.
- Daneshwar, N., Khataee, A. R., & Djafarzadeh, N. (2006). The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution containing C.I. Basic Yellow 28 by electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, *B137*, 1788–1795.
- Drouiche, N., Aoudj, S., Hecini, M., Ghaffour, N., Lounici, H., & Mameri, N. (2009). Study on the treatment of photovoltaic wastewater using electrocoagulation: fluoride removal with aluminium electrodes characteristics of products. *Journal of Hazardous Materials*, *169*, 65–69.
- El-Ashtoukhy, E.-S. Z., Amin, N. K., & Abdel-Aziz, M. H. (2012). Decolorization of acid brown and reactive blue dyes by anodic oxidation in a batch recycle electrochemical reactor. *International Journal of Electrochemical Science*, *7*, 11137–11148.
- Fajardo, A. S., Martins, R. C., Silva, D. R., & Martínez-Huitle, C. A., Quinta-Ferreira, R. M. (2017). Dye wastewaters treatment using batch and recirculation flow electrocoagulation systems. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, *801*, 30–37.
- Hai, F. I., Yamamoto, K., & Fukushi, K. (2007). Hybrid treatment systems for dye wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *37*, 315–377.
- Hamad, H., Bassyouni, D., El-Ashtoukhy, E., Amin, N., & El-Latif, M. A. (2018). Electrocatalytic degradation and minimization of specific energy consumption of synthetic azo dye from wastewater by anodic oxidation process with an emphasis on enhancing economic efficiency and reaction mechanism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *148*, 501–512.
- Hutakamol, J. (2011). *Dyeing cotton with vat dye by using the KU3 Yarn dyeing machine*. Retrieved from <http://newtdc.thailis.or.th/docview.aspx?tdcid=206566>
- Khadim, M., Kane, C., Oury Diallo, N., Mar Diop, C., Chauvet, F., Comtat, M., & TZedakis, T. (2016). Electrocoagulation process applied on pollutants treatment: experimental optimization and fundamental investigation of the crystal violet dye removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *4*, 4001–4011.
- Kiliç, M. G., & Hoşten, C. (2010). A comparative study of electrocoagulation and coagulation of aqueous suspensions of kaolinite powders. *Journal of Hazardous Materials*, *176*, 735–740.
- Kobya, M., Can, O.T., & Bayramoglu, M. (2003) Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, *B100*, 163–178.
- Kobya, M., Hiz, H., Senturk, E., Aydiner, C., & Demirbas, E. (2006). Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination*, *190*, 201–211.

- Kobyas, M., Demirbas, E., Sik, F., & Oncel, S. (2015). Arsenic removal from groundwater of Sivas-Sarkila Plain, Turkey by electrocoagulation process: Comparing with iron plate and ball electrodes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, 1096-1106.
- Malakootian, M., Mansoorian, H. J., & Moosazadeh, M. (2010). Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water. *Desalination*, 255, 67-71.
- Moussa, D. T., El-Naas, M. H., Nasser, M., & Al-Marri, M. J. (2017). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*, 186, 24-41.
- Nandi, B. K., & Patel, S. (2017). Effects of operational parameters on the removal of brilliant green dye from aqueous solution by electrocoagulation. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2961-S2968.
- Vepsäläinen, M. (2012). Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters. *VTT Science*, 19, 96-50.
- Verma, A. K. (2017). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe-Al composite electrode. *Journal of Water Process Engineering*, 20, 168-172.
- Verma, A. K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2012). A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 93, 154-168.
- Xu, X., & Zhu, X. (2004). Treatment of refractory oily wastewater by electro-coagulation process. *Chemosphere*, 56, 889-894.



## ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุรางคณา อินชู เกิดเมื่อวันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ.2537 ณ จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จ การศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีนครสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ ในปี การศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2560 และได้เข้าศึกษาต่อ ระดับปริญญาโทในปีการศึกษาถัดมา โดยได้รับทุนการศึกษากิตติบัณฑิตในการศึกษาระดับ บัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ “การบำบัดสีย้อมที่ใช้ใน อุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้ระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบแบตช์และแบบไหลต่อเนื่อง” ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาของสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็น การเพิ่มพูนความรู้ใหม่ ทักษะการวิจัย รู้จักการแก้ปัญหา และการทำงานกันเป็นกลุ่มเพื่อบรรลุ เป้าหมายที่วางไว้ นอกจากนี้มีโอกาสเข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับ นานาชาติ 10th Eastern European Young Water Professionals Conference ณ ประเทศโครเอเชีย ใน หัวข้อ Comparative Performance of Electrocoagulation and Coagulation Processes for Acid Dye Removal from Textile Wastewater

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี