



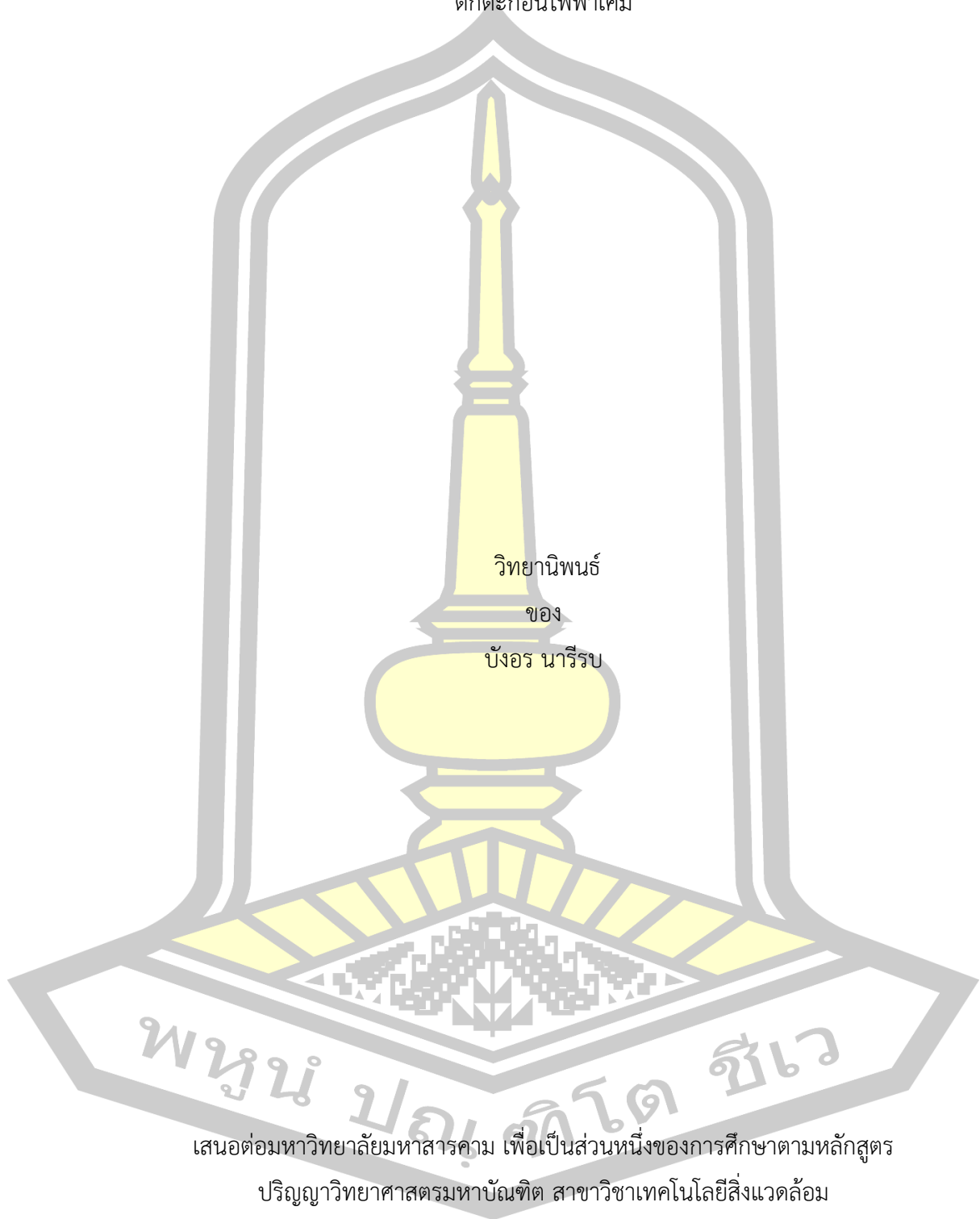
ผลของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กทรอนิกส์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยกระบวนการ
ตกตะกอนไฟฟ้าเคมี

วิทยานิพนธ์
ของ
บังอร นารีรบ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
กุมภาพันธ์ 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผลของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กทรอนิกส์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยกระบวนการ
ตกตะกอนไฟฟ้าเคมี

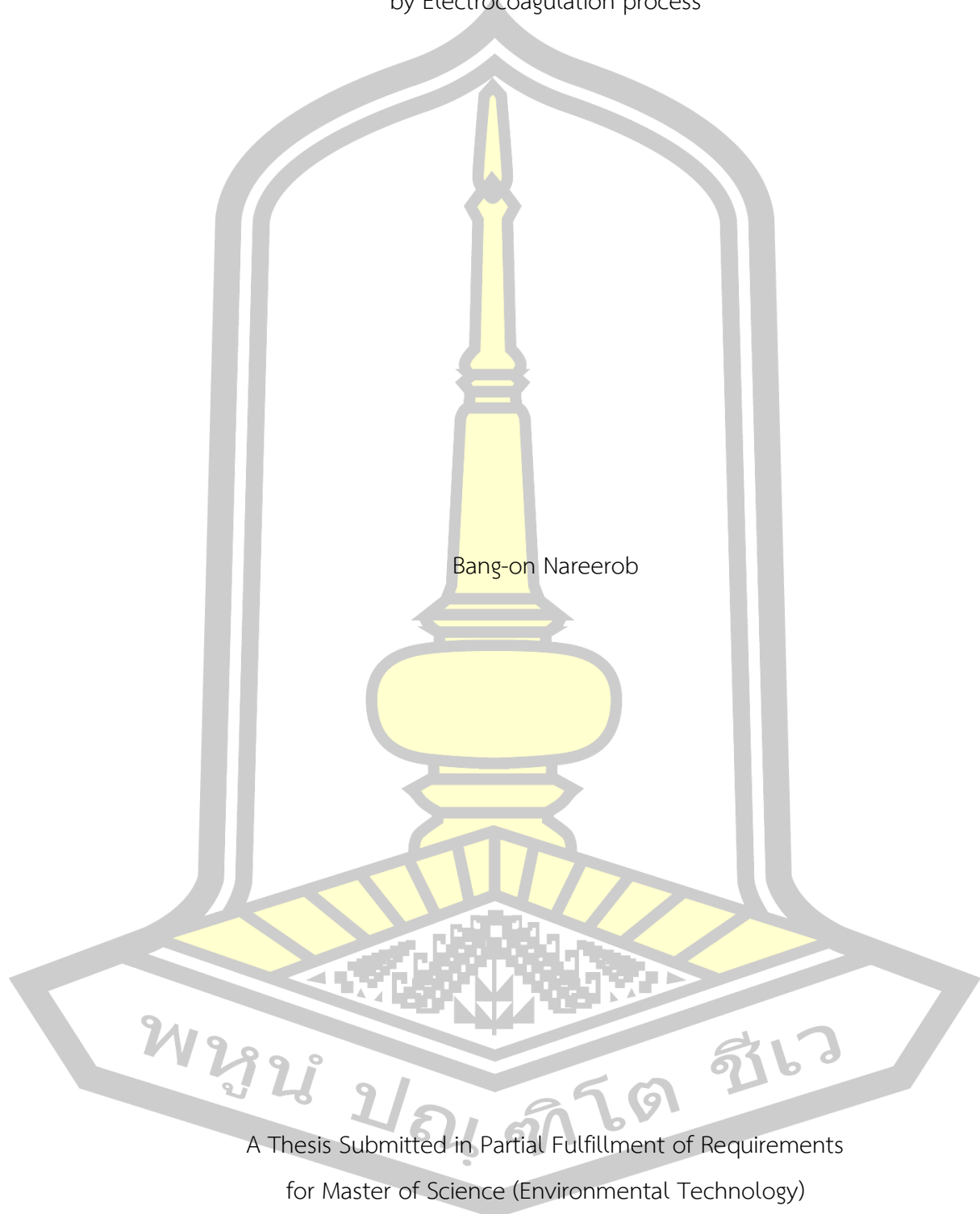


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

กุมภาพันธ์ 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Effect of Current Density per Electrode Area to Dye Wastewater Treatment Efficiency
by Electrocoagulation process



Bang-on Nareerob

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (Environmental Technology)

February 2021

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวบังอร นารีรบ แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. พลกฤษณ์ จิตรโฑ)

.....กรรมการ

(ดร. ธาตุกร พระบำรุง)

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(รศ. ดร. กิติโรจน์ หวันตาหลา)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. อติศักดิ์ สิงห์สีโว)

คณบดีคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กฤษณ์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	ผลของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อม โดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี		
ผู้วิจัย	บังอร นาริรบ		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ จิตรโต		
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของขนาดพื้นที่อิเล็กโทรดต่ออัตราการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี ผลการศึกษาพบว่า ในกรณีอิเล็กโทรดเป็นอลูมิเนียมที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.05 A และอิเล็กโทรดมีขนาดพื้นที่ 4, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 cm² พบว่ามีประสิทธิภาพเมื่อเวลา 25 นาที อยู่ในช่วง 31-76.1% แต่ประสิทธิภาพบำบัดสูงสุดเกิดขึ้นที่เวลา 60 นาที คือ 77%, 87.2%, 89.8%, 90.5%, 84%, 93.1% และ 89.6% ตามลำดับ ในกรณีอิเล็กโทรดเป็นเหล็กที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.1 A พบประสิทธิภาพเมื่อเวลา 60 นาที อยู่ในช่วง 17.6-24.8% และมีประสิทธิภาพบำบัดสูงสุดที่เวลา 140 นาที คือ 93.9%, 91.7%, 92.5%, 91.3%, 93.7%, 93.6% และ 93.4% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มขนาดอิเล็กโทรดสามารถบำบัดน้ำเสียได้เร็วขึ้น แสดงให้เห็นพื้นที่ผิวมีผลต่อการแตกตัวของโลหะโดยพื้นที่ผิวมากกว่าโลหะสามารถแตกตัวได้มากกว่า กล่าวคือสำหรับอิเล็กโทรดอลูมิเนียมและเหล็กพบว่า เมื่อเพิ่มขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้าเท่าเดิม ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลง จาก 17.1 เหลือ 5.2 volt และลดลงจาก 18.2 เหลือ 4.4 volt มีผลทำให้ค่าใช้จ่ายลดลง 427.5-130 KW.hr/m³ และ 455-110 KW.hr/m³ ตามลำดับ กรณีศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ขนาดอิเล็กโทรดคงที่คือ 40 cm² และให้กระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นคือ 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 A ในกรณีอิเล็กโทรดเป็นอลูมิเนียม พบว่ามีประสิทธิภาพเมื่อเวลา 22 นาที อยู่ในช่วง 31.6-96.5% และมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดที่เวลา 60 นาทีคือ 54.7%, 84.4%, 90%, 98.6%, 100% และ 99.7% ตามลำดับ ในกรณีอิเล็กโทรดเป็นเหล็ก พบว่ามีประสิทธิภาพเมื่อเวลา 60 นาที อยู่ในช่วง 19.6-95.4% และมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดที่เวลา 140 นาทีคือ 91.3%, 95.5%, 96.2%, 96.2% และ 96.6% ตามลำดับ เนื่องจากว่าการให้กระแสไฟสูงขึ้น ทำให้ปฏิกิริยา Redox เพิ่มมากขึ้น การแตกตัวของโลหะมีอัตราการเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) สำหรับกรณีที่สัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรดคงที่ที่ 5 mA/cm² คิดเป็นกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรดได้แก่ 50 mA (10 cm²), 200 mA (40 cm²) และ 500 mA (100 cm²) ในกรณีอิเล็กโทรดเป็นอลูมิเนียม พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลา 10 นาที อยู่ในช่วง

12.5-90.9% และมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดที่เวลา 60 นาทีคือ 87.2%, 90% และ 94.9% ตามลำดับ กรณีอิเล็กโทรดเป็นเหล็ก พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลา 30 นาที อยู่ในช่วง 10.6-93.8% และมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดที่เวลา 140 นาทีคือ 92.5%, 95.5% และ 96% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแม้ว่าสัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรดคงที่ แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าและขนาดอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเกิดเร็วกว่ากระแสไฟฟ้าและพื้นที่อิเล็กโทรดน้อยซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้นว่าประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นกับปริมาณกระแสไฟฟ้าและขนาดอิเล็กโทรด ในการศึกษาายังพบว่าสัดส่วนระหว่างปริมาณโลหะละลายจากการทดลองกับปริมาณโลหะจากสมการกฎของฟาราเดย์ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น กรณีอิเล็กโทรดเป็นอลูมิเนียม พบว่าอิเล็กโทรดขนาดเล็กลงในช่วง 20-4 cm² ต่อกระแสไฟคงที่ 0.05 A สัดส่วนปริมาณโลหะจากการทดลองต่อโลหะจากสมการฟาราเดย์มีแนวโน้มลดลงจาก 0.09 เป็น 0.043 mg/mg แต่เมื่ออิเล็กโทรดมีขนาดใหญ่ขึ้นตั้งแต่ 40-100 cm² สัดส่วนปริมาณโลหะมีค่าไม่แตกต่างกัน และกรณีอิเล็กโทรดเป็นเหล็ก ที่อิเล็กโทรดขนาดเล็กลงในช่วง 60-20 cm² ต่อกระแสไฟคงที่ 0.5 A พบว่าสัดส่วนปริมาณโลหะมีแนวโน้มลดลงจาก 0.029 เป็น 0.024 mg/mg เมื่ออิเล็กโทรดมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 80-100 cm² สัดส่วนปริมาณโลหะมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดอิเล็กโทรดมีข้อจำกัดในรองรับปริมาณกระแสไฟฟ้าในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวอิเล็กโทรดที่จำกัดมีอิทธิพลต่อขบวนการไฟฟ้าเคมีและกฎของฟาราเดย์

คำสำคัญ : การตกตะกอนไฟฟ้าเคมี, บำบัด, น้ำเสีย, สีย้อม, ขนาดอิเล็กโทรด, กระแสไฟฟ้า



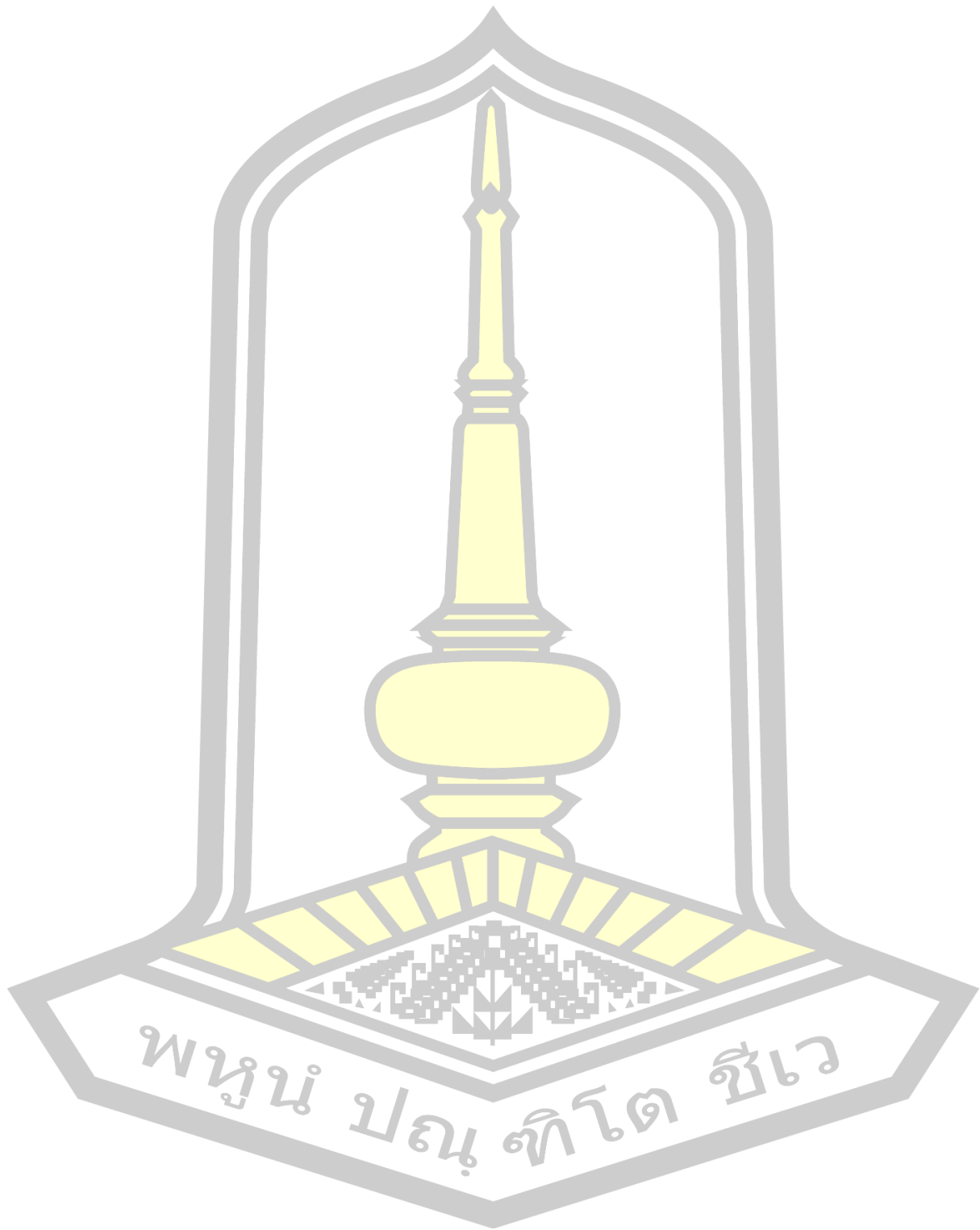
TITLE	Effect of Current Density per Electrode Area to Dye Wastewater Treatment Efficiency by Electrocoagulation process		
AUTHOR	Bang-on Nareerob		
ADVISORS	Assistant Professor Ponlakit Jitto , Ph.D.		
DEGREE	Master of Science	MAJOR	Environmental Technology
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2021

ABSTRACT

The main objective of this research was to study the effect of electrode surface area on wastewater treatment by electrocoagulation. In the case of aluminum electrodes at a constant current of 0.05 A and the electrodes surface area of 4, 10, 20, 40, 60, 80, and 100 cm². The results revealed that the removal efficiency at 25 minutes increase in range 31-76.1%, the maximum efficacy occurred at 60 minutes was 77%, 87.2%, 89.8%, 90.5%, 84%, 93.1% and 89.6%, respectively. For the case of iron electrodes at a constant current of 0.1 A; It was found that the removal efficiency at 60 minutes increase in the range 17.6-24.8%, the maximum efficacy occurred at 140 minutes was 93.9%, 91.7%, 92.5%, 91.3%, 93.7%, 93.6%, and 93.4%, respectively. It seems by increasing the electrode surface area can treat wastewater faster that indicates the electrode area affects the dissociation of metals, with more surface areas the metal more hydrolyzed. Furthermore, for aluminum and iron electrodes; increasing the electrode surface area due to constant current can decrease the voltage from 17.1 to 5.2 volt and decrease from 18.2 to 4.4 volt, resulting in a cost reduction of 427.5-130 KW.hr/m³ and 455-110 KW.hr/m³ respectively. The studies effect of current at fixed electrode surface is 40 cm² and the different current is 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5 A.; the results for aluminum electrode revealed that the removal efficiency at 22 minutes increase in range 31.6-96.5% the maximum efficacy occurred at 60 minutes was 54.7%, 84.4%, 90%, 98.6%, 100%, and 99.7%, respectively. For the case of iron electrodes, it was found that the

removal efficiency at 60 minutes increase in the range 19.6-95.4%, the maximum efficacy occurred at 140 minutes was 91.3%, 95.5%, 96.2%, 96.2%, and 96.6%, respectively. Because the higher current caused the redox reaction to increasing, and the metal dissociation has an increasing rate according to Faraday's law. The part of studies effect of current density at a fixed current density at 5 mA/cm^2 , which corresponded as currents and electrode surface area value 50 mA (10 cm^2), 200 mA (40 cm^2), and 500 mA (100 cm^2). For the case of aluminum electrodes, it was found that the removal efficiency at 10 minutes increase in the range of 12.5-90.9%, the maximum efficacy occurred at 60 minutes was 87.2%, 90%, and 94.9%, respectively. The results for the iron electrode revealed that the removal efficiency at 30 minutes increase in range 10.6-93.8% the maximum efficacy that occurred at 140 minutes was 92.5%, 95.5%, and 96%, respectively. The results of this study provided that although the current to electrode surface area ratio was constant, the current and electrode area increased. The highest removal efficiency occurred faster than the less ratio of current and electrode area, which is consistent with the study results. Moreover, the study also found that the proportion of the experimental dissolved metal and the metal according to Faraday's law equation. As the current and electrode area ratio increases; for the aluminum electrode, it was found that the electrode was smaller in the range of $20\text{-}4 \text{ cm}^2$ with a constant current of 0.05 A, the proportion of the experimental dissolved metal and the metal according to Faraday's law equation tended to decrease from 0.09 to 0.043 mg/mg. when the electrode area was larger from $40\text{-}100 \text{ cm}^2$, the proportion of the metal was similar. The results for the iron electrode revealed that the electrode was smaller in the range of $60\text{-}20 \text{ cm}^2$ with a constant current of 0.5 A, the proportion to decrease from 0.029 to 0.024 mg/mg. when the electrode area was larger from $80\text{-}100 \text{ cm}^2$, the proportion of the metal was similar. Consequently, the electrode surface area has limitations to the current in an electrochemical reaction which was shown that the limited electrode surface area influences the electrochemical reaction and Faraday's law.

Keyword : electrocoagulation, treatment, wastewater, dyes, current, electrode area



กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ จิตรโต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสที่สำคัญนี้ พร้อมทั้งถ่ายทอดองค์ความรู้ในการคิด วิเคราะห์ แยกแยะและคำแนะนำมากมายในการดำเนินการวิจัยและในการดำเนินชีวิต และขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำชี้แนะเพื่อให้งานวิจัยชิ้นนี้ลุล่วงประสบผลสำเร็จตามเป้าหมาย

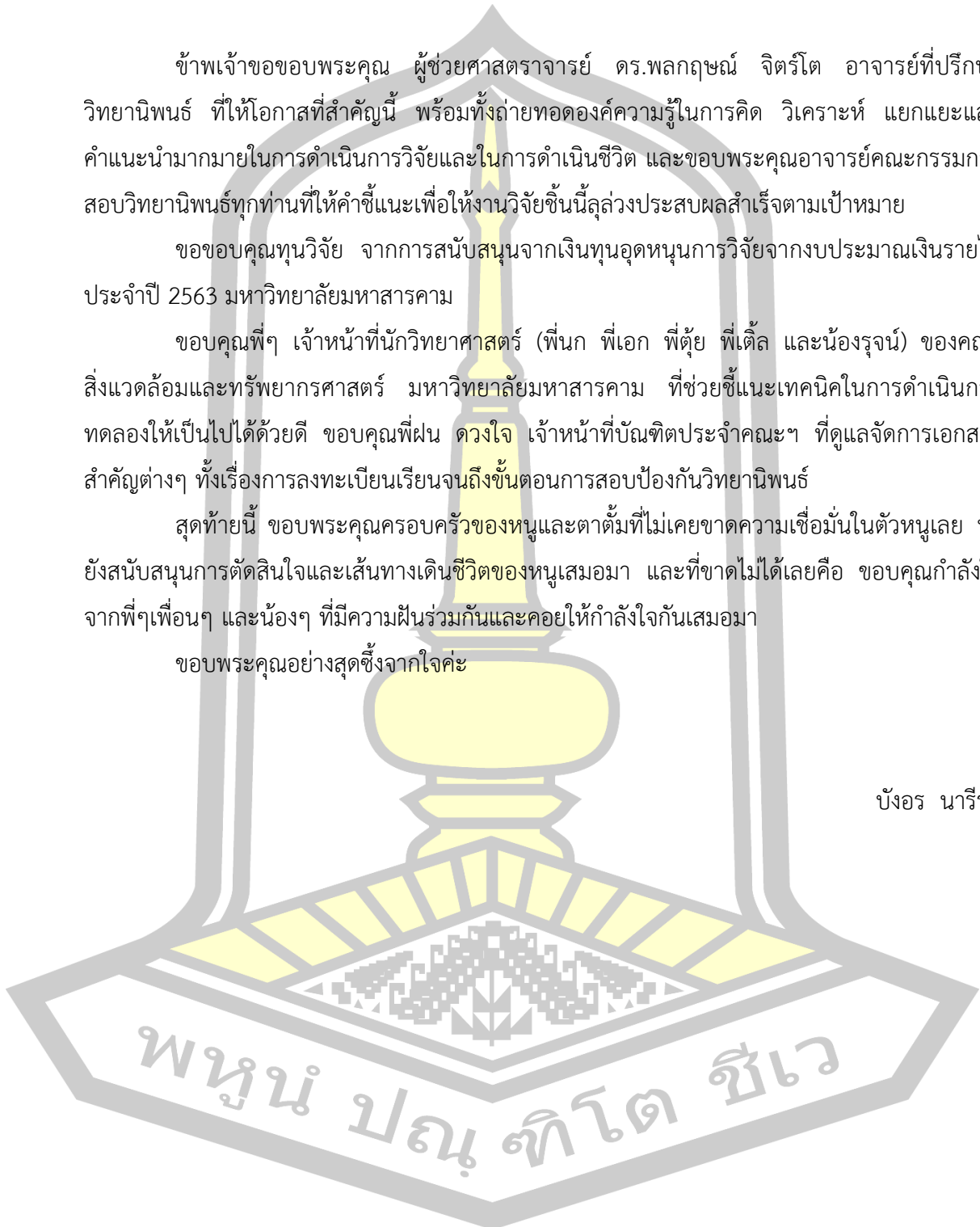
ขอขอบคุณทุนวิจัย จากการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ประจำปี 2563 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ (พีนก พี่เอก พี่ด้อย พี่เตี๊ยะ และน้องรุจน์) ของคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ช่วยชี้แนะเทคนิคในการดำเนินการทดลองให้เป็นไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณพี่ฝน ดวงใจ เจ้าหน้าที่บัณฑิตประจำคณะฯ ที่ดูแลจัดการเอกสารสำคัญต่างๆ ทั้งเรื่องการลงทะเบียนเรียนจนถึงขั้นตอนการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัวของหนูและตาต้อมที่ไม่เคยขาดความเชื่อมั่นในตัวหนูเลย ทั้งยังสนับสนุนการตัดสินใจและเส้นทางเดินชีวิตของหนูเสมอมา และที่ขาดไม่ได้เลยคือ ขอขอบคุณกำลังใจจากพี่ๆเพื่อนๆ และน้องๆ ที่มีความฝันร่วมกันและคอยให้กำลังใจกันเสมอมา

ขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งจากใจค่ะ

บังอร นารีรบ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฅ
สารบัญ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล.....	4
2.1 สืบในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	4
2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ Electrocoagulation.....	8
2.3 อธิบายปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี (Electrocoagulation process).....	15
2.4 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law).....	25
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	31
3.1 ขอบเขตการวิจัย.....	31
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	31

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	32
3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	32
3.5 การติดตั้งถังปฏิกรณ์	32
3.6 การดำเนินการทดลอง.....	33
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา	43
4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการตกตะกอน ไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Al).....	44
4.2 การศึกษาอิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วย กระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Al).....	52
4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการตกตะกอน ไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก (Fe).....	58
4.4 การศึกษาอิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วย กระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก (Fe).....	67
4.5 ศึกษาปริมาณโลหะละลายจริงในน้ำเสียสีย้อมและทฤษฎีของฟาราเดย์ (Faraday's law) ...	73
4.6 ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการดำเนินระบบ	90
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	94
5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี	94
5.2 การศึกษาอิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วย กระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี.....	95
5.3 ศึกษาปริมาณโลหะละลายในน้ำเสียสีย้อมเชื่อมโยงกับทฤษฎีของฟาราเดย์ (Faraday's law)	95
5.4 ข้อเสนอแนะ	96
บรรณานุกรม.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	103

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ประเภทของสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยต่างๆ	5
ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบสมบัติของสีแอสิดกลุ่มต่างๆ	7
ตารางที่ 2-3 สรุข้อดีและข้อเสียของกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี	10
ตารางที่ 2-4 การบำบัดน้ำเสียสีย้อมชนิดต่างๆ ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม.....	30
ตารางที่ 3-5 สัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กโทรด	40
ตารางที่ 4-6 ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมที่เวลา 60 นาที, ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย, แรงดันไฟฟ้าเข้าระบบและปริมาณพลังงานที่ใช้ที่กระแสไฟฟ้า 0.5 A (ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม).....	50
ตารางที่ 4-7 ผลของปริมาณ NaCl ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมที่เวลา 60 นาที, ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย, แรงดันไฟฟ้าเข้าระบบและปริมาณพลังงานที่ใช้ที่กระแสไฟฟ้า 0.5 A (ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม).....	52
ตารางที่ 4-8 ผลของแรงดันไฟฟ้า, ประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลา 60 นาที ตามขนาดของอิเล็กโทรด (ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม).....	56
ตารางที่ 4-9 ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมที่เวลา 140 นาที, ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย, แรงดันไฟฟ้าเข้าระบบและปริมาณพลังงานที่ใช้ที่กระแสไฟฟ้า 0.5 A (ขั้วไฟฟ้าเหล็ก).....	64
ตารางที่ 4-10 ผลของปริมาณ NaCl ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมที่เวลา 140 นาที, ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย, แรงดันไฟฟ้าเข้าระบบ และปริมาณพลังงานที่ใช้ที่กระแสไฟฟ้า 0.5 A (ขั้วไฟฟ้าเหล็ก).....	67
ตารางที่ 4-11 ผลของแรงดันไฟฟ้า, ประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลา 140 นาที ตามขนาดของอิเล็กโทรด (ขั้วไฟฟ้าเหล็ก).....	72

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 โครงสร้างทางเคมีของสี C.I. Acid Blue25	6
ภาพที่ 2-2 โครงสร้างทางเคมีของสี C.I. Acid Green25.....	6
ภาพที่ 2-3 โครงสร้างทางเคมีของสี C.I. Acid Green25.....	7
ภาพที่ 2-4 โครงสร้างสีย้อม C.I Acid Red 114.....	8
ภาพที่ 2-5 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ระบบ EC.....	11
ภาพที่ 2-6 รูปแบบการจัดวางอิเล็กโทรด (Electrodes arrangement).....	16
ภาพที่ 2-7 ประเภทของการดำเนินระบบ (Operation modes).....	17
ภาพที่ 2-8 การเปลี่ยนรูปของเหล็กและอลูมิเนียมตามค่า pH.....	24
ภาพที่ 3-9 ลักษณะการติดตั้งถังปฏิกรณ์สำหรับการทดลอง.....	33
ภาพที่ 3-10 การทดสอบปัจจัยค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	34
ภาพที่ 3-11 การทดสอบปัจจัยปริมาณกระแสไฟฟ้า (Current).....	36
ภาพที่ 3-12 การทดสอบปัจจัยระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (Distance between of electrodes)	37
ภาพที่ 3-13 การทดสอบปัจจัยการเติม NaCl.....	38
ภาพที่ 3-14 การทดสอบปัจจัยขนาดอิเล็กโทรด (Electrode surface areas).....	39
ภาพที่ 4-15 อิทธิพลของค่า pH เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม, กระแสไฟฟ้า 0.5 A	45
ภาพที่ 4-16 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อเวลา (การทดสอบอิทธิพลของค่า pH เริ่มต้น) โดยใช้ ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม, กระแสไฟฟ้า 0.5 A	45
ภาพที่ 4-17 อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม.....	47
ภาพที่ 4-18 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อเวลา (การทดสอบอิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้า) โดยใช้ ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม.....	47

ภาพที่ 4-19 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า อลูมิเนียม, กระแสไฟฟ้า 0.5 A.....	49
ภาพที่ 4-20 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อเวลา (การทดสอบอิทธิพลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม, กระแสไฟฟ้า 0.5 A	49
ภาพที่ 4-21 อิทธิพลของการเติม NaCl ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม, กระแสไฟฟ้า 0.5 A	51
ภาพที่ 4-22 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่อเวลา (อิทธิพลของการเติม NaCl) โดยใช้ขั้วไฟฟ้า อลูมิเนียม, กระแสไฟฟ้า 0.5 A.....	51
ภาพที่ 4-23 อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (ต่ำสุด) 0.05 A ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม	54
ภาพที่ 4-24 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่อเวลา (อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (ต่ำสุด) 0.05 A โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม	55
ภาพที่ 4-25 อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (สูงสุด) 0.3-0.5 A ต่อประสิทธิภาพการ บำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม	55
ภาพที่ 4-26 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่อเวลา (อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (สูงสุด) 0.3-0.5 A โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม.....	56
ภาพที่ 4-27 อิทธิพลของสัดส่วน I/A (5 mA/cm^2) ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้า อลูมิเนียม	58
ภาพที่ 4-28 อิทธิพลของค่า pH เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก, กระแสไฟฟ้า 0.5 A	59
ภาพที่ 4-29 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อเวลา (การทดสอบอิทธิพลของค่า pH เริ่มต้น) โดยใช้ ขั้วไฟฟ้าเหล็ก, กระแสไฟฟ้า 0.5 A	60
ภาพที่ 4-30 อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก	61
ภาพที่ 4-31 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อเวลา (การทดสอบอิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้า) โดยใช้ ขั้วไฟฟ้าเหล็ก	62
ภาพที่ 4-32 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก , กระแสไฟฟ้า 0.5 A.....	63

ภาพที่ 4-33 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อเวลา (การทดสอบอิทธิพลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก, กระแสไฟฟ้า 0.5 A.....	64
ภาพที่ 4-34 อิทธิพลของการเติม NaCl ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก, กระแสไฟฟ้า 0.5 A.....	66
ภาพที่ 4-35 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่อเวลา (อิทธิพลของการเติม NaCl) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก, กระแสไฟฟ้า 0.5 A.....	66
ภาพที่ 4-36 อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (ต่ำสุด) 0.1 A ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก.....	70
ภาพที่ 4-37 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่อเวลา (อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (ต่ำสุด) 0.1 A โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก.....	70
ภาพที่ 4-38 อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (สูงสุด) 0.3-0.5 A ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก.....	71
ภาพที่ 4-39 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่อเวลา (อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (สูงสุด) 0.3-0.5 A โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก.....	71
ภาพที่ 4-40 อิทธิพลของสัดส่วน I/A (5 mA/cm^2) ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก.....	73
ภาพที่ 4-41 ผลของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบต่อปริมาณอลูมิเนียม (Al) ละลาย.....	76
ภาพที่ 4-42 ผลของขนาดอิเล็กโทรดต่อปริมาณอลูมิเนียม (Al) ละลาย ($I=0.05 \text{ A}$).....	77
ภาพที่ 4-43 ผลของขนาดอิเล็กโทรดต่อปริมาณอลูมิเนียม (Al) ละลาย ($I=0.5 \text{ A}$).....	77
ภาพที่ 4-44 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ตามประสิทธิภาพการบำบัดจากการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี (ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม).....	78
ภาพที่ 4-45 ปริมาณอลูมิเนียมละลายที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH.....	78
ภาพที่ 4-46 ปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนเปรียบเทียบกับปริมาณตามทฤษฎีฟาราเดย์ตามกระแสไฟฟ้า, อิเล็กโทรดขนาด 40 cm^2 (2 cm).....	79
ภาพที่ 4-47 สัดส่วนอลูมิเนียมละลายจากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์อิเล็กโทรดขนาด 40 cm^2 (2 cm).....	80

ภาพที่ 4-48 สัดส่วนอลูมิเนียมละลายจากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์ตามขนาดของอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า 0.05-0.5 A.....	81
ภาพที่ 4-49 ผลของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบต่อปริมาณเหล็กละลาย	84
ภาพที่ 4-50 ผลของขนาดอิเล็กโทรดต่อปริมาณเหล็กละลาย (I=0.1 A).....	84
ภาพที่ 4-51 ผลของขนาดอิเล็กโทรดต่อปริมาณเหล็กละลาย (I=0.5 A).....	85
ภาพที่ 4-52 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ตามประสิทธิภาพการบำบัดจากการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี (ขั้วไฟฟ้าเหล็ก)	85
ภาพที่ 4-53 ปริมาณเหล็กละลายที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH.....	86
ภาพที่ 4-54 ปริมาณเหล็กในตะกอนเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณจากทฤษฎีฟาราเดย์ตามกระแสไฟฟ้า, อิเล็กโทรดขนาด 40 cm ² (2 cm).....	88
ภาพที่ 4-55 สัดส่วนเหล็กละลายจากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์ อิเล็กโทรดขนาด 40 cm ² (2 cm).....	88
ภาพที่ 4-56 สัดส่วนเหล็กละลายจากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์ตามขนาดของอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า 0.1-0.5 A.....	89
ภาพที่ 4-57 ปริมาณโลหะละลายตามสัดส่วนกระแสไฟต่อขนาดอิเล็กโทรด (I/A) 5 mA/cm ² กับการคำนวณตามสมการฟาราเดย์	90
ภาพที่ 4-58 ปริมาณพลังงานที่ใช้และแรงดันไฟในระบบตามกระแสไฟฟ้า, ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม.....	91
ภาพที่ 4-59 ปริมาณพลังงานที่ใช้และแรงดันไฟในระบบตามกระแสไฟฟ้า, ขั้วไฟฟ้าเหล็ก.....	92
ภาพที่ 4-60 ปริมาณพลังงานที่ใช้และแรงดันไฟในระบบตามขนาดอิเล็กโทรด, ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม	92
ภาพที่ 4-61 ปริมาณพลังงานที่ใช้และแรงดันไฟในระบบตามขนาดอิเล็กโทรด, ขั้วไฟฟ้าเหล็ก.....	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

กระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี (Electrocoagulation) เป็นกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้หลากหลาย อาทิ อุตสาหกรรมสิ่งทอ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร โรงงานฟอกหนัง รวมทั้งสามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนแบคทีเรียหรือสาหร่าย ตลอดจนน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก เป็นต้น โดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีประกอบด้วยอิเล็กโทรดจำนวน 2 ขั้วคือขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วมักใช้เป็นขั้วอลูมิเนียม (Al) และเหล็ก (Fe) ภายในระบบจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Redox reaction) และระบบจะเชื่อมต่อกับแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ปล่อยเข้าสู่เซลล์ทางอิเล็กโทรดขั้วบวกของระบบ (Mickova, 2015) ทั้งนี้ การดำเนินระบบยังมีหลากหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ รูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรด รูปแบบของถังปฏิกรณ์ ชนิดและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารมลพิษ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าระบบ สภาพความเป็นกรด-ด่าง ตลอดจนระยะเวลาที่ใช้ดำเนินระบบ ปัจจัยเหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ

หลายงานวิจัยกล่าวว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าเกินปริมาณที่เหมาะสมประสิทธิภาพการบำบัดของระบบจะค่อนข้างคงที่ (Khandegar and Saroha, 2013; Merzouk et al., 2009; Modirshahla et al., 2007) สำหรับปริมาณกระแสไฟฟ้า (I) ที่ปล่อยเข้าสู่ระบบมักคิดเป็นสัดส่วนของปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อขนาดพื้นที่อิเล็กโทรด (I/A) มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางเมตร (A/m^2) ยกตัวอย่างผลการวิจัยที่ผ่านมามาพบว่า การบำบัดน้ำเสียสีย้อม Disperse blue106 โดยกำหนด I/A อยู่ระหว่าง $2-4.5 \text{ mA/cm}^2$ ขนาดพื้นที่อิเล็กโทรด 80 cm^2 มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียอยู่ที่ 98-99.4% ในงานวิจัยยังระบุอีกว่าที่สัดส่วนของ I/A ในช่วง $1-2 \text{ mA/cm}^2$ ค่อนข้างไม่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัด (Kim et al., 2002) ในขณะเดียวกันการทดลองการบำบัดน้ำเสียสีย้อม C.I.Acid Yellow23 มีค่าของสัดส่วน I/A อยู่ในช่วง $4-12 \text{ mA/cm}^2$ ขนาดพื้นที่อิเล็กโทรด 18 cm^2 พบประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 16.4% - 99.2% และเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนของ I/A มากกว่า 12 mA/cm^2 ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างคงที่ (Modirshahla et al., 2007) รวมถึงงานวิจัยที่ทดลองกับอิเล็กโทรดขนาด 10 cm^2 พบว่าเมื่อให้สัดส่วนของ I/A อยู่ที่ $1-4 \text{ mA/cm}^2$ ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อม Acid yellow 220 และ Acid black 52 คือ 65% - 92% เมื่อทดลองไปจนถึง 12 mA/cm^2 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างคงที่ (Pajootan et al., 2012) โดยผลการวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น

สามารถอธิบายได้ด้วยกฎอเล็กโทรไลซิสของฟาราเดย์ (Faraday's law) ว่าเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในกระบวนตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เพิ่มมากขึ้นซึ่งเกิดสารรวมตะกอนเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ประสิทธิภาพบำบัดดีขึ้น (สุรพงษ์, 2531)

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาเบื้องต้นพบว่าในขณะที่ให้กระแสไฟฟ้าในระบบเท่ากันแต่ขนาดอิเล็กโทรดที่ใช้มีขนาดแตกต่างกันกลับมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง (เทียนทองและนุชรี, 2559) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนกรไฟฟ้าเคมีมีข้อจำกัดของขนาดอิเล็กโทรดซึ่งที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาด้วย ทั้งนี้ ขนาดอิเล็กโทรดยังส่งผลกระทบต่อแรงดันไฟที่เข้าระบบตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) โดยอิเล็กโทรดความยาวเท่ากัน แต่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่ขึ้นส่งผลให้มีความต้านทานต่ำทำให้ใช้แรงดันไฟฟ้าน้อยลงในขณะที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากัน ในทางกลับกันอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กทำให้มีความต้านทานสูงขึ้นจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟสูงขึ้นในการจ่ายกระแสไฟฟ้าปริมาณเท่ากันเข้าสู่ระบบ และแรงดันไฟฟ้ายังส่งผลให้ปริมาณการใช้พลังงานในการดำเนินระบบอีกด้วย (Meaden, 1965) ดังนั้นประเด็นในการศึกษานี้มุ่งเน้นศึกษาถึงสัดส่วนของปริมาณกระแสไฟฟ้าและขนาดของพื้นที่อิเล็กโทรดเป็นข้อจำกัดในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในกระบวนกรตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาสัดส่วนของปริมาณของกระแสไฟฟ้าและขนาดพื้นที่อิเล็กโทรดในการบำบัดน้ำเสียเสีย้อมโดยกระบวนกรตกตะกอนไฟฟ้าเคมี
- 1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบผลการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีของฟาราเดย์ในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี
- 1.2.3 ศึกษาผลของขนาดอิเล็กโทรดต่อปริมาณการใช้พลังงานในการดำเนินระบบในการบำบัดน้ำเสียเสีย้อมโดยกระบวนกรตกตะกอนไฟฟ้าเคมี

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ประเภทเสีย้อมไหมสีแอสิด โทนสีแดง (Acid red 114) ยี่ห้อเครื่องบิน ความเข้มข้นเริ่มต้น 400 mg/l
- 1.3.2 ถังปฏิกรณ์แบบทีละเท (Batch reactor) ขนาด 2,000 ml
- 1.3.3 ปัจจัยที่ศึกษา
 - 1.3.3.1 ชนิดอิเล็กโทรด ได้แก่ เหล็ก (Fe) และอลูมิเนียม (Al)
 - 1.3.3.2 ขนาดอิเล็กโทรด ได้แก่ 4, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 cm²
 - 1.3.3.3 ปริมาณกระแสไฟฟ้า อยู่ระหว่าง 0.05-0.5 A
 - 1.3.3.4 พื้นที่อิเล็กโทรดในการเดินระบบ 10 cm²

1.3.3.5 ระยะห่างระหว่างขั้ว ตั้งแต่ 0.5-4 cm

1.3.3.6 ระยะเวลาการทดลองอยู่ระหว่าง 0-140 นาที

1.3.3.7 ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ตั้งแต่ pH 3-10

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสัดส่วนที่เหมาะสมของปริมาณของกระแสไฟฟ้าต่อขนาดพื้นที่อิเล็กโทรด ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี

1.4.2 สามารถนำผลการจากทฤษฎีของฟาราเดย์มาปรับใช้ในการคำนวณหาสัดส่วนที่เหมาะสมของปริมาณของกระแสไฟฟ้าต่อขนาดพื้นที่อิเล็กโทรดเพื่อออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี



บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 สีในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

สารให้สี (Colorants) เป็นสารซึ่งเมื่อแสงสีขาวไปกระทบจะดูดแสงบางช่วงคลื่นไว้ แล้วยอมให้แสงบางช่วงผ่านหรือสะท้อน ทำให้มองเห็นสีเป็นสีตามช่วงคลื่นสั้นๆ สารให้สีสำหรับสิ่งทอ ได้แก่ สีย้อม (Dyestuffs) และผงสี (Pigments) ในการอธิบายในงานวิจัยนี้จะเน้นอธิบายเกี่ยวกับสีย้อมเท่านั้น (วลัยกร, 2559)

2.1.1 คุณสมบัติของสีย้อม (Dyestuffs) (วลัยกร, 2559)

สีย้อมคือ สารให้สีที่ละลายน้ำได้ หรือบางชนิดที่ละลายน้ำไม่ได้ในขณะที่ยังไม่นำไปใช้ย้อม แต่เมื่อนำไปย้อมโมเลกุลของสีย้อมจะซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยด้วยวิธีการใดๆก็ตาม และยึดติดกับโมเลกุลเส้นใยในลักษณะต่างๆได้ โดยมีคุณสมบัติของสีย้อมดังนี้

2.1.1.1 มีความเข้มสูง (Intense color) สีย้อมที่มีค่าเฉพาะการดูดกลืนแสงสูงกว่า 10,000 (Molar absorptivity) จัดเป็นสีย้อมที่มีความเข้มสูง

2.1.1.2 สามารถละลายน้ำได้ หรือเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้

2.1.1.3 มีความสามารถในการดูดซึมและติดอยู่ในเส้นใย (Substantivity) หรือสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเส้นใย (Reactivity)

2.1.1.4 มีความคงทนของสี (Colorfastness) สามารถติดอยู่บนเส้นใยได้ เมื่อเส้นใยนั้นผ่านกระบวนการต่างๆหรือเมื่อนำเส้นใยไปใช้งาน

2.1.1.5 มีความปลอดภัย

2.1.2 การจัดประเภทของสี (วลัยกร, 2559)

การจัดจำแนกสีเริ่มมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1870 ซึ่งเริ่มจัดกลุ่มสีที่มีอยู่เป็นจำนวนมากออกเป็นหมวดหมู่ดังตารางที่ 2-1 ซึ่งสามารถจำแนกประเภทสีย้อมได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

2.1.2.1 สีที่มองเห็น เช่น แดง, เหลือง, เขียว, น้ำเงิน

2.1.2.2 แหล่งที่มา เช่น สีธรรมชาติ, สีสังเคราะห์

2.1.2.3 องค์ประกอบทางเคมี เช่น Azo, Anthraquinone

2.1.2.4 วิธีการใช้งาน เช่น สีที่ละลายน้ำได้, สีที่ไม่ละลายน้ำ

2.1.2.5 ชนิดของเส้นใย เช่น สีย้อมฝ้าย, สีย้อมขนสัตว์

ตารางที่ 2-1 ประเภทของสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยต่างๆ

สีย้อม	เส้นใย
1. ละลายน้ำได้ (ขณะใช้งาน)	
1.1 สีแอซิด	โพรตีน, ไนลอน
1.2 สีโครม	โพรตีน, ไนลอน
1.3 สีไดเร็กต์	เซลลูโลส
1.4 สีเบสิก	อะคริลิก, โพรตีน
1.5 สีรีแอกทีฟ	เซลลูโลส
2. ละลายน้ำได้เล็กน้อย (ขณะใช้งาน)	
2.1 สีดิสเพิร์ส	เส้นใยสังเคราะห์
3. ไม่ละลายน้ำ	
3.1 สีเอโซอิก	เซลลูโลส
3.2 สีอินเกรน	เซลลูโลส
3.3 สีออกซิเดชัน	เซลลูโลส
3.4 สีซัลเฟอร์	เซลลูโลส
3.5 สีแวต	เซลลูโลส

ที่มา: วลัยกร, 2559

2.1.3 สมบัติและทฤษฎีการย้อมสีแอซิด

เนื่องจากงานวิจัยทำการศึกษาสีย้อมประเภทสีแอซิดจึงเน้นอธิบายเฉพาะสีแอซิด ซึ่งสีแอซิดเป็นสีย้อมที่ต้องย้อมในภาวะกรดเท่านั้น สามารถย้อมกับเส้นใยโพรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหมและเส้นใยไนลอนได้ แต่การย้อมเส้นใยไนลอนจะได้เฉดสีอ่อนกว่าการย้อมเส้นใยขนสัตว์ สีแอซิดเกือบทุกตัวเป็นเกลือของกรดอินทรีย์ มีหมู่ซัลโฟเนต (SO_3) เพื่อช่วยให้สีละลายน้ำได้และพาสีเข้าไปเกาะติดกับเส้นใย สีติดติดกับเส้นใยโพรตีนได้โดยตรง สีแอซิดดูดความชื้นจากอากาศได้ง่าย การเก็บรักษาและการบรรจุหีบห่อจำเป็นต้องระมัดระวังเป็นอย่างดี เพราะหากสีดูดความชื้นเข้าไปจะทำให้สีเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว สีแอซิดไม่มีความคงทนต่อการซักล้างและไม่สามารถนำไปย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ (วลัยกร, 2559)

2.1.3.1 โครงสร้างของสีแอซิด

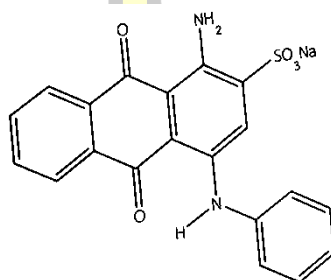
สีแอซิดจัดเป็นสีประจุลบ โครงสร้างทางเคมีของสีแอซิดคล้ายกับสีไดเร็กต์มากคือประกอบด้วยหมู่ช่วยให้สีละลายน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นหมู่ซัลโฟเนต และส่วนให้สี (Chromophore) สีแอซิดบางตัวมีขนาดโมเลกุลเล็กมาก ส่วนสีไดเร็กต์มักมีโมเลกุลใหญ่เพื่อยึดเหนี่ยวกับเส้นใยเซลลูโลสได้ดี (วลัยกร, 2559)

2.1.3.2 การจัดประเภทของสีแอซิด

สีแอซิดแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1) กลุ่มที่ต้องการกรดแก่ในการย้อม (Leveling acid dyes)

เป็นสีแอซิดที่ต้องการกรดแก่ (pH 2-4) ในการย้อมเช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) โมเลกุลค่อนข้างเล็ก สามารถละลายน้ำได้ดี การแทรกซึมของสีดี ย้อมสีได้อย่างสม่ำเสมอ มีความคงทนต่อแสง แต่ไม่คงทนต่อการซักล้าง ยกตัวอย่างเช่น C.I. Acid Blue25

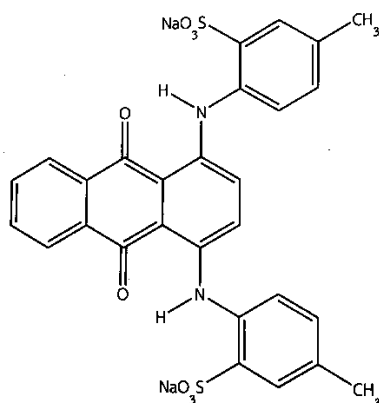


ภาพที่ 2-1 โครงสร้างทางเคมีของสี C.I. Acid Blue25

ที่มา: วลัยกร, 2559

2) กลุ่มที่ต้องการกรดปานกลางในการย้อม (Milling acid dyes)

เป็นสีแอซิดที่ต้องการกรดปานกลาง (pH 4-6) ในการย้อม เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) โมเลกุลที่ใหญ่กว่ากลุ่มแรก สามารถละลายน้ำได้ต่ำ ย้อมสีได้สม่ำเสมอปานกลาง ความคงทนต่อการซักล้างดีขึ้น ตัวอย่างเช่น C.I. Acid Green25

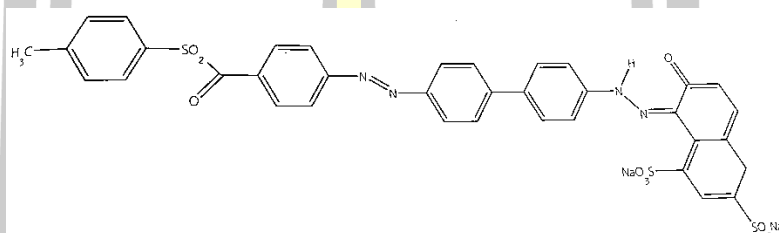


ภาพที่ 2-2 โครงสร้างทางเคมีของสี C.I. Acid Green25

ที่มา: วลัยกร, 2559

3) กลุ่มที่ต้องการกรดอ่อนหรือกลางในการย้อม (Super milling or neutral acid dyes)

เป็นสีแอซิดที่ต้องการกรดอ่อนหรือสภาวะเป็นกลาง จนกระทั่งสภาวะต่างอ่อนๆ (pH 6-8) ในการย้อม เช่น แอมโมเนียมอะซิเตต ($\text{CH}_3\text{COO}(\text{NH}_4)_2$) หรือแอมโมเนียมซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) โมเลกุลที่ใหญ่กว่ากลุ่มที่ 2 ความสามารถละลายน้ำต่ำ ย้อมสีได้สม่ำเสมอไม่ดี ความคงทนต่อการซักล้างดีเยี่ยม ตัวอย่าง C.I. Acid Red85



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างทางเคมีของสี C.I. Acid Green25

ที่มา: วลัยกร, 2559

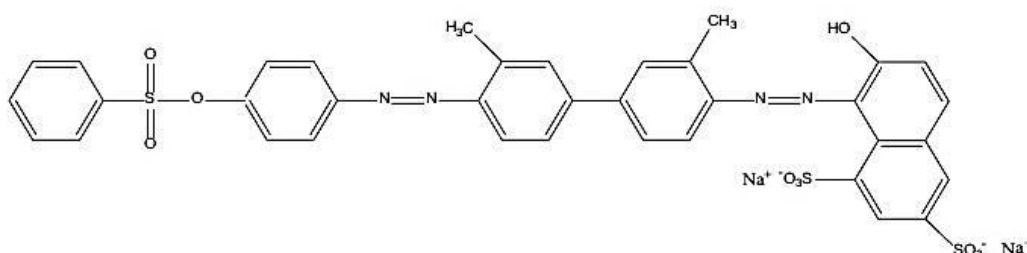
ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบสมบัติของสีแอซิดกลุ่มต่างๆ

คุณสมบัติของ Acid dyes	Leveling acid dyes	Milling acid dyes	Neutral acid dyes
1. สภาวะในการย้อม	กรดแก่ (pH 2-4)	กรดกลาง (pH 4-6)	กรดอ่อน/กลาง (pH6-8)
2. ขนาดโมเลกุล	เล็ก	ปานกลาง	ใหญ่
3. ความสามารถในการละลาย	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
4. ความสามารถในการดูดติดเส้นใย	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
5. ความสม่ำเสมอในการย้อม	ดีมาก	ดี	ปานกลาง
6. อัตราการดูดซึมสี	ช้า	ปานกลาง	เร็ว
7. เวลาในการย้อม	น้อย	ปานกลาง	มาก
8. ความคงทนต่อการซักล้าง	ปานกลาง	ดี	ดีมาก

ที่มา: วลัยกร, 2559

2.1.4 สีย้อมที่ใช้ในการทดลอง

สีย้อมที่ใช้ในการทดลองเป็นประเภทสีแอซิด คือ C.I Acid Red 114 (AR114) สูตรทางเคมีคือ $C_{37}H_{28}N_4Na_2O_{10}S_3$ น้ำหนักโมเลกุลคือ 830.81 g/mol นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีนหรือไนลอน โดยมีความสามารถในการละลายน้ำและแอลกอฮอล์ได้ ลักษณะของโครงสร้างของ AR114 แสดงดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 โครงสร้างสีย้อม C.I Acid Red 114

ที่มา: Kayan et al., 2017

2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ Electrocoagulation

การบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้าจัดเป็นเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง การลงทุนและค่าใช้จ่ายสำหรับค่าไฟฟ้าในช่วงแรกเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก ซึ่งต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงและยังเป็นเทคโนโลยีที่ยังไม่แพร่หลาย อีกทั้งเทคโนโลยีการตกตะกอนไฟฟ้าเคมียังมีความแตกต่างในการควบคุมและยากที่จะได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้ อย่างไรก็ตาม กว่าสี่ทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการวิจัยที่กว้างขวาง โดยประเทศที่พัฒนาแล้วได้มีการสะสมความรู้และประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์จนทำให้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีกลับมาเป็นที่นิยมอีกครั้ง ปัจจุบันค่าใช้จ่ายสำหรับเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีค่อนข้างใกล้เคียงกับเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียประเภทอื่นๆ และในบางครั้งอาจเป็นได้ว่าเทคโนโลยีการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียทั่วไป และไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี หากต้องการเพียงอิเล็กทรอนิกส์ในการทำปฏิกิริยาเท่านั้น สำหรับกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีมีหลากหลายเช่น Electro-coagulation, Electro-flocculation, Electro flotation, Electro-deposition, Electro oxidation, Electro-disinfection, Electro-reduction เป็นต้น (Mickova, 2015) กระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี (Electrocoagulation, EC) มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย อาทิ การใช้งานเพื่อการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมแต่ละประเภท เช่น การกำจัดอนุภาคสารแขวนลอย ดินเหนียวและแร่ดินเหนียว สารเคมีและขยะเชิงกลในน้ำเสีย เป็นต้น การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ เช่น

น้ำมันและไขมัน แอลกอฮอล์ เป็นต้น อีกทั้งยังใช้ในการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมอาหาร น้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตสารซักฟอก การกำจัดโลหะหนัก แคลที่เรีย สาหร่ายและตัวอ่อน น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ การกำจัดอนุภาคของน้ำยาง น้ำเสียจากการซักล้าง ตลอดจนการกำจัดน้ำเสีย สีย้อมและการย้อมผ้า เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดค่า COD, BOD และ TOC รวมไปถึงการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังและโรงฆ่าสัตว์เพื่อกำจัดโลหะอย่างเช่น Mn, Cu, Zn, Ni, Al, Fe, Co, Sn, Mg, Se, Mo, Ca เป็นต้น กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีสามารถใช้เพื่อกำจัดสารประกอบที่มีประจุ เช่น CN^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , F^- และ Cl^- เป็นต้น (Mickova, 2015) โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีมีความรวมถึงการสร้างกระแสไฟฟ้าของไอออนโลหะเพื่อกระบวนการตกตะกอน ซึ่งอลูมิเนียม (Al) และเหล็ก (Fe) เป็นโลหะที่สามารถช่วยสร้างอนุภาคของตะกอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อสามารถกรองออกจากน้ำเสียที่บำบัดได้ ในขณะที่ดำเนินการระบบจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้น (H_2) ซึ่งไม่มีผลต่อการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำเสีย หน้าที่ในการสร้างสารรวมตะกอนเป็นของขี้เกลือที่เล็กโดยในนี้กล่าวถึง Al และ Fe สำหรับหลักการของการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีอาศัยหลักการเช่นเดียวกับการตกตะกอนด้วยสารเคมี แตกต่างกันที่ขั้นตอนการเติมสารสร้างและรวมตะกอน การบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีจะเป็นการผลิตสารสร้างและรวมตะกอนในขณะดำเนินการด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ (Oxidation-Reduction) ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ ทั้งนี้ระบบจะเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งพลังงานไฟฟ้าภายนอก โดยขั้วบวกจะต่อเข้ากับอิเล็กโทรดที่เรียกว่า แอโนด (Anode) ซึ่งเป็นฝั่งที่ทำหน้าที่สร้างไอออนประจุบวกที่ทำหน้าที่เป็นสารสร้างตะกอนให้แก่ระบบภายในอิเล็กโทรไลต์ (น้ำเสีย) และขั้วลบต่อเข้ากับอิเล็กโทรดที่เรียกว่า แคโทด (Cathode) (Mickova, 2015) อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีจะเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายระบบมีทั้งข้อดีและข้อเสียซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-3

2.2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี

ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี จัดเป็นระบบการบำบัดน้ำเสียแบบอยู่กับที่ ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้อลูมิเนียม (Al) และเหล็ก (Fe) และเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าภายนอก เมื่อไอออนของของเหลวมาสัมผัสกับขั้วไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ไอออนที่มีประจุลบ หรือแอนไอออน จะเคลื่อนที่เข้าหาและคายอิเล็กตรอนให้แก่ขั้วไฟฟ้าวอก (Anode) ซึ่งขาดอิเล็กตรอน นั่นคือ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ส่วนที่ขั้วไฟฟ้าวอก (Cathode) เป็นขั้วที่มีอิเล็กตรอนมากเกินไป ส่งผลให้ประจุบวกเคลื่อนที่เข้าหาและรับอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้า นั่นคือ การเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) (วิโรจน์, 2540)

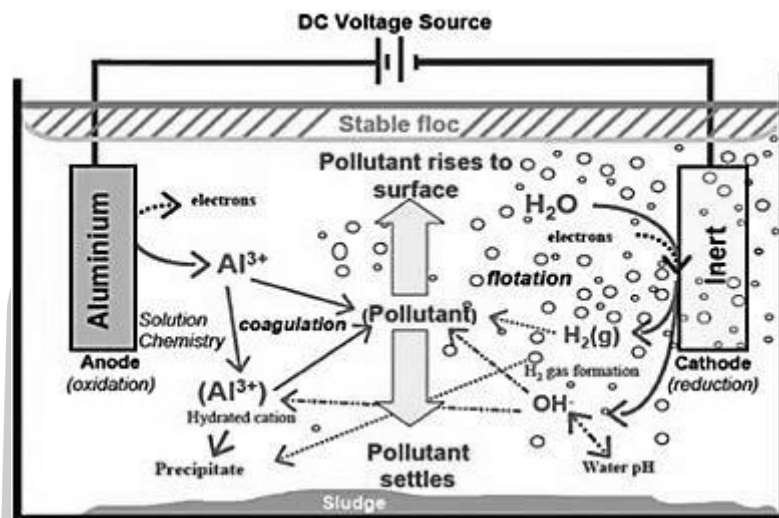
ระบบจะเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงภายนอก (DC power supply source) ประกอบด้วยอิเล็กโทรดขั้วบวกและอิเล็กโทรดขั้วลบ โดยกระแสไฟฟูกปล่อยผ่านเข้ากับ

อิเล็กโทรดขั้วบวกของระบบ ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) น้ำในระบบจะเกิดแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และเกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เมื่อเกิดปฏิกิริยาน้ำจะอยู่ส่วนล่างของระบบและจะเกิดการตกตะกอนของไอออนที่รวมอยู่กับสีที่ปนเปื้อน หรืออนุภาคที่เจือปนอยู่ในน้ำ ฟองแก๊สไฮโดรเจนจะทำหน้าที่ให้ตะกอนตกลงด้านล่างระบบ (Sediment) และเป็นตะกอนลอย (Float) ด้านบนผิวน้ำของระบบ ลักษณะนี้เรียกว่า Electro-Floatation (Patcharaprakiti, 2014) ดังภาพที่ 2-4

ตารางที่ 2-3 สรุปข้อดีและข้อเสียของกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์พื้นฐานและการดำเนินงานไม่ยุ่งยาก	1. ตะกอนของไฮดรอกไซด์ที่รวมตัวอาจละลายได้
2. ระบบไม่มีส่วนประกอบใดที่ต้องเคลื่อนที่และมีความจำเป็นต้องซ่อมบำรุงเล็กน้อย เนื่องจากกระบวนการถูกควบคุมด้วยไฟฟ้า	2. ขั้วบวกของอิเล็กโทรด (Anode) ซึ่งเป็นขั้วที่ปลดปล่อยประจุเพื่อทำปฏิกิริยา ต้องเปลี่ยนถ่ายอย่างสม่ำเสมอ
3. ผลการบำบัดน้ำเสียเป็นที่น่าพอใจ สีของน้ำไม่เป็นสีที่นํารังเกียจ ค่อนข้างใส มีสีที่เจือปนอยู่น้อยมาก และมีกลิ่นน้อย	3. พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ อาจไม่ได้มีครอบคลุมทุกพื้นที่ และยังมีราคาสูงสำหรับบางพื้นที่
4. ตะกอนประกอบด้วยโลหะออกไซด์/ไฮดรอกไซด์ ซึ่งง่ายต่อการแยกน้ำออก	4. การที่มีฟิล์มบางเคลือบที่ผิวอิเล็กโทรด (Passivation) จากขั้นตอนการผลิต อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง
5. ตะกอนมีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่าการบำบัดด้วยสารเคมี ประกอบด้วยน้ำในปริมาณน้อย มีความทนต่อการรูด และมีความเสถียรมาก	5. ต้องการค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียที่สูงเพื่อป้องกัน Ohmic drop (ความต้านทานหรือความนำไฟฟ้าของระบบ)
6. ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในกระบวนการ ซึ่งส่งผลให้เกิดมลพิษแบบทุติยภูมิต่ำ แตกต่างจากการตกตะกอนด้วยสารเคมีที่ต้องเติมสารเคมีในความเข้มข้นสูง	
7. ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นในขณะดำเนินระบบมีผลให้สารมลพิษที่ปนเปื้อนเกิดเป็นตะกอนลอยตัวขึ้น สามารถกวาดตะกอนออกได้ง่ายขึ้น	
8. สามารถประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆได้ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เพื่อใช้ในพื้นที่ชนบท ซึ่งพลังงานไฟฟ้าเข้าถึงยาก	

ที่มา: Fayad, 2017



ภาพที่ 2-5 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ระบบ EC

ที่มา: Hakizimana et al., 2017

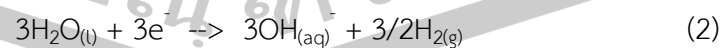
2.2.1.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของอลูมิเนียม (Al) ในระบบ EC

ภายในถังปฏิกรณ์จะเกิดฟองแก๊สของไฮโดรเจนลอยขึ้นด้านบนของถังปฏิกรณ์ การแยกสลายนี้ที่เกิดขึ้นที่อลูมิเนียมขั้วบวกส่งผลให้เกิดไอออนของ Al^{3+} ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองทันทีแล้วทำให้เกิดไอออนชนิดนี้เพิ่มขึ้นในขณะที่เกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้ การเกิดปฏิกิริยามีความแตกต่างกันตามสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เปลี่ยนแปลงไป หากค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่ 9 (pH 9) หรือสูงกว่า จะส่งผลให้การรวมตัวเป็นตะกอนของแข็งของ $Al(OH)_3$ ลดลง เนื่องจากเกิด $Al(OH)_4^-$ เพิ่มขึ้นซึ่งมักจะเกิดในสภาวะความเป็นด่างสูง (Mickova, 2015) โดยลักษณะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีรายละเอียดดังสมการดังต่อไปนี้

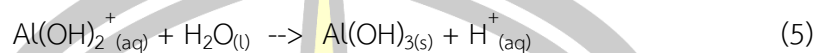
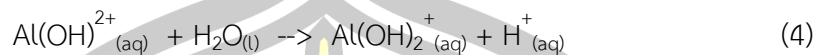
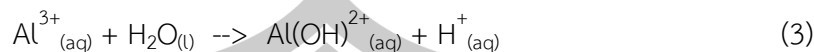
ขั้วบวก (Anode):



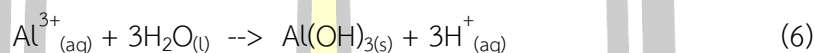
ขั้วลบ (Cathode):



ปฏิกิริยาภายใต้สภาวะกรด:



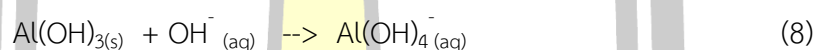
ปฏิกิริยารวม:



ปฏิกิริยาภายใต้สภาวะต่าง:



เมื่อมีค่าความเป็นด่างสูง pH 9 หรือมากกว่า:



ประจุบวกที่มีประจุสูงจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีความเสถียรโดยการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนโพลีไฮดรอกไซด์ (Poly-hydroxide) สารประกอบนี้มีคุณสมบัติในการดูดซับสูงและรวมตัวกับสารมลพิษได้ดี ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมการรวมตัวกันของ Al-O-Al-OH ที่แข็งแรงนี้สามารถดูดซับสารมลพิษและภายใต้สภาวะที่เหมาะสมยังสามารถเกิดไอออนของ Al^{3+} ได้ดีเช่นกัน

2.2.1.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเหล็ก (Fe) ในระบบ EC

เมื่อใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรดขั้วบวก (Anode) เหล็กจะแตกตัวออกเป็น 2 กลไก (ปลดปล่อยอิเล็กตรอน 2+ และอิเล็กตรอน 3+) เพื่อเปลี่ยนรูปเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_n$ โดยเหล็กในรูปของ $\text{Fe}(\text{OH})_{n(s)}$ จะคงอยู่ในสถานะสารละลายมีลักษณะแขวนลอยคล้ายวุ้นซึ่งสามารถกำจัดสารมลพิษจากน้ำเสียโดยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน หรือการเข้าจับด้วยไฟฟ้าสถิต หรือการตกตะกอน ในส่วนของการเกิดรูปสารประกอบเชิงซ้อนนั้นสารมลพิษจะเกาะกับไฮดรรัสไอออน (Hydrous iron) ในลักษณะของลิแกนด์ (Ligand, L) (Mickova, 2015) โดยกลไกการแตกตัวของเหล็กรายละเอียดตั้งสมการต่อไปนี้

กลไกที่ 1 การแตกตัวของเหล็ก (Fe^{3+}):

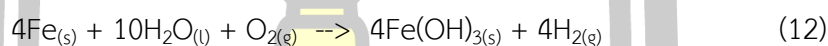
ขั้วบวก (Anode):



ขั้วลบ (Cathode):



ปฏิกิริยารวม:



กลไกที่ 2 การแตกตัวของเหล็ก (Fe^{2+}):

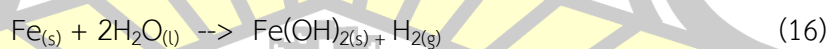
ขั้วบวก (Anode):



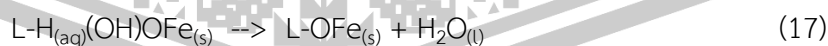
ขั้วลบ (Cathode):



ปฏิกิริยารวม:

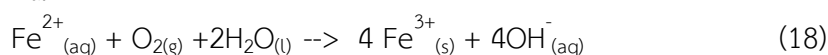


การรวมตัวของสารมลพิษกับไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydrous iron) ในลักษณะลิแกนด์

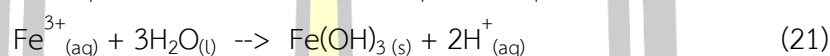
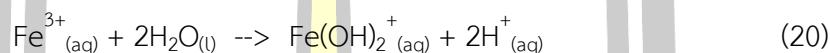
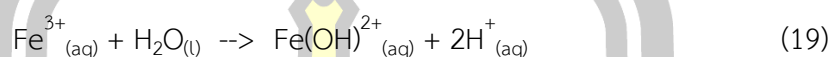


เมื่อเกิดแก๊ส H_2 ขณะดำเนินปฏิกิริยาแก๊ส H_2 สามารถช่วยบำบัดสารอินทรีย์มลพิษหรือสารแขวนลอยต่างๆได้ด้วยการทำให้ลอย (Flotation) ในสภาวะที่อ็อกซิเจนเป็นกรดและมีอากาศอยู่เหล็ก (Fe^{3+}) สามารถเกิดขึ้นได้เป็นดังสมการ

ปฏิกิริยาภายใต้สภาวะกรด:



ขั้นเริ่มการไฮโดรไลซิส (Pre-hydrolysis) ไอออนของ Fe^{3+} ที่ถูกปลดปล่อยออกมา ขณะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เมื่อดำเนินการเพื่อบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีนั้น ไอออนของ Fe^{3+} อาจรวมตัวกับน้ำ ทั้งนี้ขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียในขณะดำเนินการปฏิกิริยา โดยจะ เป็นไปตามสมการข้างล่างนี้



การเปลี่ยนรูปของไอออน Fe^{3+} เป็น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ซึ่งมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ เรียกว่า Amorphous ลักษณะเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการดูดซับสารอินทรีย์มลพิษและ สารประกอบอนินทรีย์ พร้อมทั้งยังมีประสิทธิภาพในการจับกับอนุภาคคอลลอยด์

ปฏิกิริยาภายใต้สภาวะต่าง:



เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะต่างสารประกอบของเหล็กในรูป $\text{Fe}(\text{OH})_6^{-}$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_4^{-}$ จะ เกิดขึ้น โดยไอออนที่เพิ่งถูกปลดปล่อยของอลูมิเนียมและเหล็กถือเป็นสารสร้างตะกอนที่มีประสิทธิภาพสูง ในการดักจับอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย นอกจากนี้ปริมาณของแก๊สออกซิเจนใน ระหว่างการดำเนินการปฏิกิริยารีดอกซ์นั้น อิเล็กโทรดชนิดอลูมิเนียมจะมีปริมาณออกซิเจนสูงกว่า อิเล็กโทรดชนิดเหล็ก จากนั้นอนุภาคจะรวมตัวกันเสมือนแม่เหล็กขนาดเล็กและก่อตัวเป็นมวลรวม (จับเป็นก้อน) ในขณะที่ดำเนินการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีจะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ หลากหลายที่อิเล็กโทรดขั้วบวกและอิเล็กโทรดขั้วลบในเวลาเดียวกัน (Mickova, 2015)

พูน ปณ ทิโต ชเว

2.3 อธิบายปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี (Electrocoagulation process)

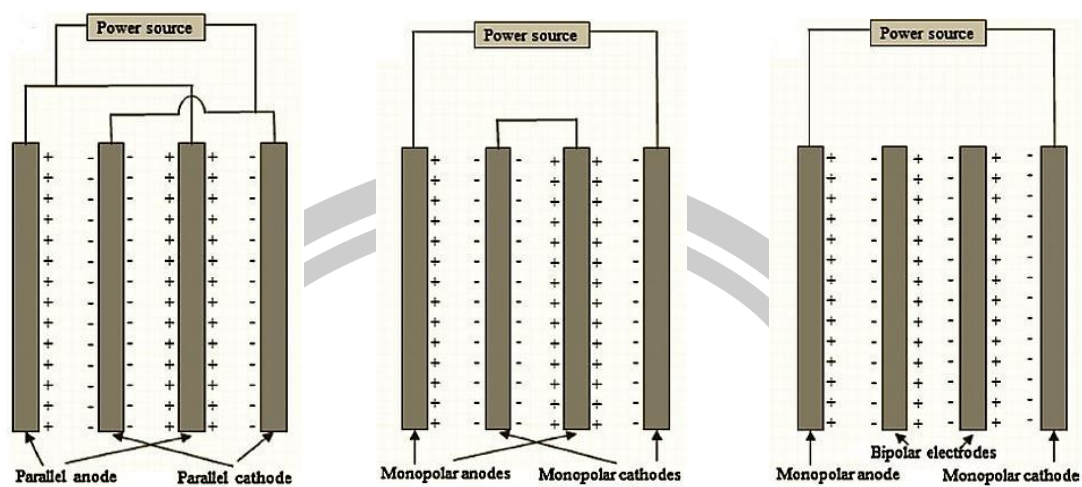
กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนไฟฟ้าเคมีเป็นระบบที่จะต้องมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนเป็นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอื่นๆ ทั้งนี้ ระบบยังมีหลากหลายปัจจัยที่ต้องควบคุมเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด ปัจจัยที่กล่าวถึงคือ การออกแบบถังปฏิกรณ์ ได้แก่ ลักษณะและประเภทของถังปฏิกรณ์ รูปแบบการจัดวางขั้วอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด เป็นต้น รวมไปถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการบำบัด ได้แก่ ปริมาณกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า อุณหภูมิ และระยะเวลาในการบำบัด เป็นต้น โดยรายละเอียดของปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบมีดังนี้

2.3.1 รูปแบบการจัดวางอิเล็กโทรด (Electrodes arrangement)

การออกแบบการจัดวางอิเล็กโทรดสามารถจัดวางได้หลายรูปแบบ โดยแบบที่ 1 เป็นการจัดวางแบบขนาน (Monopolar-parallel, MP-P) เป็นการต่อรวมทุกอิเล็กโทรดขั้วบวก (Anode) เข้ากับขั้วบวกเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (DC power supply) เช่นเดียวกับกับอิเล็กโทรดขั้วลบ (Cathode) ทุกขั้วต่อรวมกันแล้วเชื่อมเข้ากับขั้วลบของเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า ดังภาพที่ 2-5(ก) โดยกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบจะถูกแบ่งระหว่างอิเล็กโทรดทำให้เกิดความต่างศักย์ต่ำกว่าถ้าเทียบกับการต่อแบบอนุกรม (Fayad, 2017; Garcia-Segura et al., 2017)

ต่อมาเป็นการจัดวางแบบที่ 2 มีลักษณะการต่อแบบอนุกรม (Monopolar-series, MP-S) อิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบคู่ด้านนอกสุดถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า ส่วนอิเล็กโทรดคู่อื่นๆภายในเซลล์จะไม่มี การเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าภายนอกถังปฏิกรณ์ แต่จะมีการเชื่อมต่อกันระหว่างอิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบภายในถังปฏิกรณ์ รูปแบบการจัดวางเช่นนี้ส่งผลให้เกิดความต่างศักย์สูงขึ้น โดยอิเล็กโทรดที่มีการต่อกันภายในถังปฏิกรณ์อาจเป็นอิเล็กโทรดชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันได้ เพื่อลดการสลายไปของขั้วอิเล็กโทรด ดังภาพที่ 2-5(ข) (Fayad, 2017)

การจัดวางรูปแบบที่ 3 คือการจัดวางแบบอนุกรมสองขั้ว (Bipolar-series, BP-S) เป็นการต่ออิเล็กโทรดคู่ด้านนอกสุดเข้ากับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าภายนอกถังปฏิกรณ์โดยตรง ขณะที่อิเล็กโทรดภายในถังปฏิกรณ์ไม่มีการเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งง่ายต่อการบำรุงรักษา โดยกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านด้วยอิเล็กโทรดคู่หลักที่เชื่อมต่อกับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า ด้านที่อยู่ติดกันของอิเล็กโทรดด้านในจะรับขั้วและจะมีประจุตรงข้ามกับประจุของอิเล็กโทรดใกล้เคียง โดยการจัดวางลักษณะนี้จะมี การต่อแบบอนุกรมเสมอ ดังภาพที่ 2-5(ค) (Nidal, 2017)



(ก) การต่อแบบขนาน (MP-P)

(ข) การต่อแบบอนุกรม (MP-S)

(ค) การต่อแบบอนุกรมสองขั้ว (BP-S)

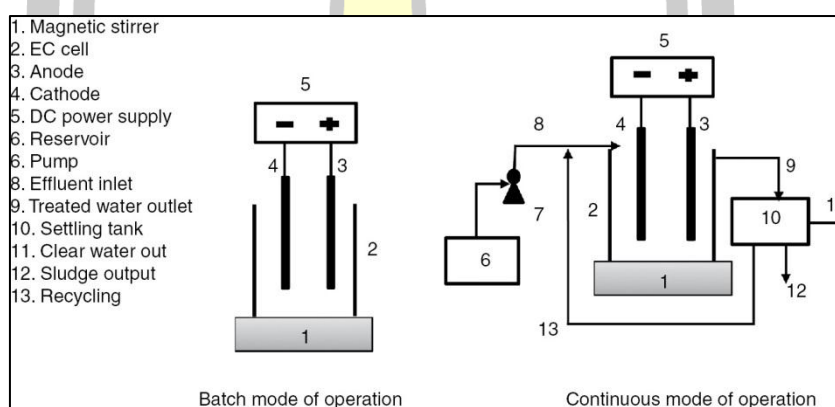
ภาพที่ 2-6 รูปแบบการจัดวางอิเล็กโทรด (Electrodes arrangement)

ที่มา: Fayad, 2017

โดยทั่วไปอิเล็กโทรดแบบขั้วเดียว (Monopolar) ต้องการแรงดันไฟฟ้าต่ำและกระแสสูงกว่า ซึ่งตรงกันข้ามกับอิเล็กโทรดแบบสองขั้ว (Bipolar) ที่ทำงานภายใต้แรงดันไฟฟ้าสูงและกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า เป็นการยากมากที่จะสรุปว่ารูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบใดดีกว่า เมื่อพิจารณาเพียงประสิทธิภาพของระบบ โดยรูปแบบการจัดเรียงแบบ BP-S มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างใกล้เคียงกันกับแบบ MP-P (Fayad, 2017; Hakizimana et al., 2017; Mehmet Kobya et al., 2003) หากพิจารณาสัดส่วนของประสิทธิภาพของระบบกับค่าใช้จ่ายอิเล็กโทรดแบบขั้วเดียวถือว่าให้ความน่าสนใจมากกว่าเพราะว่าในหลายกรณีบ่งบอกว่าการจัดเรียงอิเล็กโทรดขั้วเดียวให้ประสิทธิภาพสูง ในขณะที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ (Chou et al., 2011; Fayad, 2017; Hakizimana et al., 2017) ซึ่งอิเล็กโทรดแบบขั้วเดียวเหมาะสำหรับการใช้งานในระบบเพื่อบำบัดน้ำเสียจากการซักล้าง หรือน้ำที่มีส่วนประกอบของน้ำมัน (Fayad, 2017) ส่วนรูปแบบอิเล็กโทรดแบบสองขั้วมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในระหว่างการใช้งานค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตาม ต้นทุนและค่าใช้จ่ายยังเป็นข้อคำนึงถึงที่ต้องพิจารณาในการเลือกรูปแบบการจัดวางอิเล็กโทรด (Hakizimana et al., 2017)

2.3.2 ประเภทของการดำเนินระบบ (Operation modes)

โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตะตะกอนไฟฟ้าเคมีดำเนินระบบ 2 ประเภทคือ ระบบถังปฏิกรณ์แบบกะ (Batch system) และถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous system) ดังภาพที่ 2-6 สำหรับการดำเนินระบบด้วยระบบแบบกะประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ได้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการดำเนินระบบ การพัฒนาและควบคุมปัจจัยที่เหมาะสมของระบบแบบกะนำไปสู่การออกแบบการควบคุมปัจจัยที่ดีของระบบแบบต่อเนื่อง ประสิทธิภาพของระบบแบบต่อเนื่องไม่ได้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการดำเนินระบบเพียงอย่างเดียว ยังขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย (Inlet flow) และระยะเวลาที่กักเก็บ (Retention time) โดยต้องควบคุมสภาวะให้คงที่ โดยเฉพาะค่าความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบและอัตราการไหล ซึ่งการควบคุมมีความซับซ้อนมากกว่าระบบแบบกะ แต่ในทางกลับกันระบบแบบต่อเนื่องยังใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างน้อย (Fayad, 2017)



ภาพที่ 2-7 ประเภทของการดำเนินระบบ (Operation modes)

ที่มา: Khandegar and Saroha, 2013

2.3.3 รูปร่างของอิเล็กโทรด (Shape of the electrode)

ปัจจัยด้านรูปร่างของอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตะตะกอนไฟฟ้าเคมีมีการวิจัยที่ศึกษาเรื่องนี้ค่อนข้างน้อย แต่กลับเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่ง ลักษณะรูปร่างของอิเล็กโทรดมีผลต่อสัดส่วนพื้นที่ผิวต่อขนาดอิเล็กโทรด (Surface area to volume ratio, S/V) ซึ่งการเพิ่มสัดส่วน S/V ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

มีการศึกษาใช้อิเล็กโทรดแบบมีรูเจาะเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดแบบแนวระนาบ พบว่าอิเล็กโทรดแบบมีรูเจาะมีประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่า (Fayad, 2017; Khandegar and Saroha, 2013) อีกรงานวิจัยหนึ่งเป็นการศึกษาด้วยการใช้เหล็ก (Fe) เป็นอิเล็กโทรดขั้วบวก ซึ่งมีรูปร่างแตกต่างกันคือมีลักษณะกลมเหมือนลูกบอลและเป็นแผ่นในการบำบัดสารหนู (Arsenic) พบว่าอิเล็กโทรดที่มีลักษณะกลมมีประสิทธิภาพการบำบัดสารหนู 99.3% โดยใช้ค่าใช้จ่ายในการกำจัด 1.55 \$/m³ ที่ระยะเวลาการบำบัด 20 นาที ส่วนอิเล็กโทรดแบบแผ่นมีประสิทธิภาพการบำบัดสารหนูคือ 96.9%

ด้วยค่าใช้จ่าย $0.101 \text{ } \$/\text{m}^3$ ที่ระยะเวลาการบำบัด 6 นาที (Fayad, 2017) อย่างไรก็ตาม ยังจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงรูปร่างลักษณะของอิเล็กโทรด ไม่ว่าจะเป็ขนาดของรูที่เจาะและระยะห่างของรูที่เจาะ เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ (Khandegar and Saroha, 2013)

2.3.4 ชนิดของอิเล็กโทรด (Electrode material)

ชนิดของอิเล็กโทรดถือเป็นปัจจัยที่สำคัญมากของกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีและมีหลายงานวิจัยที่ได้กล่าวถึง อิเล็กโทรดที่ใช้ในกระบวนการอาจเป็นชนิดเดียวกันทั้งอิเล็กโทรดขั้วบวกและอิเล็กโทรดขั้วลบ หรืออาจเป็นอิเล็กโทรดต่างชนิดกัน โดยทั่วไปนิยมใช้อลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) แกรไฟต์ (Graphite) แมกนีเซียม (Mg) และไทเทเนียม (Ti) เป็นต้น อิเล็กโทรดโลหะที่มีหลายประจุ (Polyvalent metal) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเช่น อลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งเป็นโลหะที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากกว่า 2 โดยเหล็กจะมีราคาถูกกว่าอลูมิเนียม และไม่ก่อให้เกิดสารอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (Fayad, 2017; Mickova, 2015)

ชนิดอิเล็กโทรดที่ใช้มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยเฉพาะอิเล็กโทรดขั้วบวกซึ่งเป็นตัวกำหนดชนิดของไอออนที่ถูกปลดปล่อยออกมาเพื่อทำปฏิกิริยาภายในถังปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความขัดแย้งเกี่ยวกับกลไกการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กโทรดขั้วบวก โดยหลายงานวิจัยกล่าวว่าเมื่ออลูมิเนียมปลดปล่อยไอออนจะกลายเป็น Al^{3+} ส่วนเหล็กจะปลดปล่อย Fe^{2+} หรือ Fe^{3+} บางงานวิจัยได้พบว่า Fe^{3+} มีประสิทธิภาพในการเป็นสารสร้างตะกอนได้ดีกว่า Fe^{2+} เนื่องจากความสามารถในการละลายของไฮดรอกไซด์ที่ลดลงและมีประจุบวกที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะกำหนดว่าอิเล็กโทรดชนิดใดมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่ากัน บางงานวิจัยกล่าวว่าการใช้อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้เหล็ก และดูเหมือนว่าการเลือกชนิดของอิเล็กโทรดต้องพิจารณาจากประเภทของสารมลพิษที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียที่ต้องการบำบัด (Mickova, 2015)

การบำบัดน้ำเสียสีย้อมแบบกระจาย (Disperse dye) และสีย้อมแบบรีแอคทีฟ (Reactive dye) โดยใช้อิเล็กโทรด 3 ชนิด พบว่า อลูมิเนียมมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม 99% รองลงมาคือเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียสีย้อม 92% และ 87% ตามลำดับ (Kim et al., 2002) แตกต่างกับผลการศึกษาของ (Patel N B, Soni B D, 2010) ที่พบว่าเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและ COD ได้สูงกว่าอลูมิเนียม ในทางกลับกันบางงานวิจัยยังพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมมีประสิทธิภาพสูงกว่าเหล็กและอลูมิเนียม โดยสามารถกำจัด COD, BOD และของแข็งแขวนลอย (Suspended solid, SS) ได้ 98.07%, 98.07% และ 95.69% ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการดำเนินระบบ 30 นาที ขณะที่เหล็กมีประสิทธิภาพการกำจัด COD, BOD และ SS คือ 96.14%, 96.14% และ 92.55% ตามลำดับ ประสิทธิภาพของอลูมิเนียมคือ 97.64%, 96.14% และ 94.9% ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพเกือบจะเท่ากับเหล็กกล้าไร้สนิม แต่กลับทิ้งตะกอนขุ่นหนาไว้ในระบบ (Nasrullah, Siddique, & Zularisam, 2014) อีกรงานวิจัยพบว่าการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถกำจัด COD ได้ 80% (25 นาที) และ 90% (60 นาที) ในขณะที่การใช้อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดมีประสิทธิภาพการกำจัด COD 80% ได้ภายในเวลาแค่เพียง 5 นาที และเมื่อเวลาผ่านไปเป็น 90 นาทีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 86% (Arslan-Alaton et al., 2009)

2.3.5 ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (Inter-electrode distance)

ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีบทบาทสำคัญในการสร้างประจุไฟฟ้า เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดขั้วบวก (Anode) และอิเล็กโทรดขั้วลบ (Cathode) ประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษสูงสุดเกิดจากการรักษาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างอิเล็กโทรด หากระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อยลงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษลดลงตามไปด้วย เนื่องจากเกิดการชนกันของอนุภาคของไอออนที่ทำหน้าที่เป็นสารสร้างตะกอนเพื่อให้สามารถกำจัดสารมลพิษได้ด้วยการตกตะกอนเกิดการสลายตัวไป ประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษจะเพิ่มขึ้นหากระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น จากระยะห่างน้อยที่สุดไปจนถึงระยะห่างที่เหมาะสม (Optimum) ระหว่างอิเล็กโทรด เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ผลกระทบของไฟฟ้าสถิตจะลดลงทำให้ไอออนที่สร้างขึ้นข้าง โลหะออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีเวลาในการจับตัวกันเป็นก้อนตะกอน (Flocs) อันมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ ในทางกลับกันหากเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดให้มากขึ้นจากระยะห่างที่เหมาะสมทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบจะลดลง (Modirshahla et al., 2007) กล่าวคือ เวลาการเดินทางของไอออนเพิ่มขึ้นตามระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อการลดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต ทำให้เกิดการรวมตะกอนกับสารมลพิษที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียได้น้อยลง (Khandegar and Saroha, 2013)

นอกจากระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นมีผลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนจากสนามไฟฟ้าสถิต ยังส่งผลต่อความต่างศักย์ไฟฟ้า (Ohmic drop, IR) อีกทั้งค่า IR-drop มีผลกับความต่างศักย์ของระบบอันมีความเกี่ยวข้องกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ โดยระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ค่าของ IR-drop เพิ่มขึ้นตามไปด้วย อธิบายความสัมพันธ์ด้วยสมการดังนี้ (Fayad, 2017)

$$IR = \frac{I \cdot d}{A \cdot k} \quad (23)$$

โดย	IR	คือ ความต้านทานไฟฟ้า (ohms)
	I	คือ กระแสไฟฟ้า (A)
	D	คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (m)
	A	คือ พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดขั้วบวก (m ²)
	k	คือ specific conductivity (S/m)

พหุบัณฑิต ชีวะ

จากความสัมพันธ์ข้างต้นอธิบายได้ว่า จะเกิด IR-drop จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมากขึ้น ขณะดำเนินการทดลองจะเกิดการลดลงของกระแสไฟฟ้าหลังจากดำเนินการทดลองไปสักระยะหนึ่ง จำเป็นต้องเพิ่มความต่างศักย์ให้มากขึ้นเพื่อรักษาความคงที่ของกระแสไฟฟ้า ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นจาก IR-drop สูงและมีผลยับยั้งต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวก ดังนั้น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (Nasrullah et al., 2014)

เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบจะลดลงในขณะที่อัตราการถ่ายโอนไอออนน้อยลง และการเพิ่มของของค่า IR-drop ยังมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดขั้วบวก (Fayad, 2017) มีการศึกษาว่าประสิทธิภาพการบำบัด COD และ TS ลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจาก 1 cm. เป็น 3 cm. (Atashzaban et al., 2017) อีกการศึกษาด้วยการใช้อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดกล่าวว่า ประสิทธิภาพของการบำบัด COD ลดลงจาก 83.3% เป็น 48.3% เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจาก 0.8 cm. เป็น 2 cm. ซึ่งมีผลเช่นเดียวกันเมื่อใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรด โดยประสิทธิภาพการบำบัด COD ลดลงจาก 90.5% เป็น 48.3% (Abu Ghalwa and Saqer, 2016) ในการศึกษาการบำบัดสารให้สีที่เจือปนอยู่ในอาหาร (Tartrazine) เช่นกัน ซึ่งกล่าวว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดจาก 0.5 cm. เป็น 3 cm. ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณ 26.64% (Modirshahla et al., 2007) อีกหนึ่งงานวิจัยที่ศึกษาการบำบัด COD, BOD และ SS ในน้ำเสียโดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นอิเล็กโทรดพบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มจาก 1 cm. เป็น 4 cm. ประสิทธิภาพการบำบัด COD ในน้ำเสียลดลงจาก 98.07% และ 96.35% ตามลำดับ เช่นเดียวกับการบำบัด BOD คือ 98.07% และ 96.53% ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างใกล้เคียงกับการบำบัด COD สำหรับการบำบัด SS ในน้ำเสียมีประสิทธิภาพการบำบัด 97.64% และ 95.62% ตามลำดับ (Nasrullah et al., 2014)

2.3.6 อุณหภูมิ (Temperature)

ปัจจัยด้านอุณหภูมิต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีส่งผลทั้งเชิงบวกและเชิงลบ โดยมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยนี้ค่อนข้างน้อย (หากอุณหภูมิสูงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียเพิ่มขึ้นและทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลง การศึกษาการบำบัดโลหะหนักในสารละลายอุณหภูมิมีผลไม่ตึงต่อการบำบัดหลายกรณีที่อุณหภูมิถูกพิจารณาว่าเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าที่ควรคำนึงว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไรในระหว่างกระบวนการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) (Mickova, 2015)

มีงานวิจัยหนึ่งที่ศึกษาการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้อลูมิเนียมอัลลอยด์ และเหล็กอ่อนเป็นอิเล็กโทรดขั้วบวก พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่อุณหภูมิ 20 °C ลดลง 29% ซึ่งลดลงน้อยกว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่อุณหภูมิสูง อธิบายได้ว่าอัตรา

การการละลายของซั้วบวกลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำ (Mickova, 2015) การศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันปนเปื้อนพบว่า มีการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงที่อุณหภูมิ 35 °C โดยอุณหภูมียังส่งผลต่อกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีหลายด้าน เช่น อัตราการเกิดปฏิกิริยา ความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ การนำไฟฟ้าของของเหลวและกลไกการเกิดฟองแก๊สหรืออนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็ก ทั้งนี้ อุณหภูมียังไม่สามารถระบุผลกระทบโดยตรงอย่างชัดเจนที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ การก่อตัวของฟองแก๊สเป็นหนึ่งในลักษณะสำคัญของกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอาจมีผลกระทบเชิงลบ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์และการเคลื่อนที่แบบสุ่มของฟองแก๊ส การเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่แบบสุ่มของฟองแก๊สและอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็กอาจรบกวนกระบวนการของการรวมตัวกันของน้ำมันเพื่อเป็นก้อนตะกอน (Mickova, 2015) อีกหนึ่งงานวิจัยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 °C เป็น 50 °C ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียเพิ่มขึ้น ในการศึกษาใช้อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดขั้วบวก ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิอาจกระตุ้นการถ่ายโอนมวลของ Al^{3+} จากพื้นผิวอิเล็กโทรดขั้วบวกไปยังกลุ่มสารละลาย และอาจช่วยกระตุ้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Al^{3+} ให้เป็น $Al(OH)_3$ มากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามกลับเป็นการเพิ่มการใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้ค่อนข้างไม่แตกต่างจากอุณหภูมิต่ำ (Mickova, 2015) ซึ่งผลการศึกษคล้ายกับ (Mickova, 2015) ที่อธิบายว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่และการเกิดอนุภาคคอลลอยด์มากขึ้น นำไปสู่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของโลหะไฮดรอกไซด์กับสารมลพิษที่ต้องการบำบัดได้มากขึ้น และในขณะที่ความสามารถในการตกตะกอนเพิ่มสูงขึ้น การใช้พลังงานยังเพิ่มมากตามไปด้วย (Fayad, 2017)

2.3.7 ความเข้มข้นของสารมลพิษเริ่มต้น (Initial pollutant concentration)

ในขณะที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากัน ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารมลพิษเริ่มต้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนของโลหะไฮดรอกไซด์ไม่เพียงพอต่อจำนวนโมเลกุลของสารมลพิษเมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลพิษสูงขึ้น (Fayad, 2017; Khandegar and Saroha, 2013) การศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มี Tartrazine พบว่าที่ความเข้มข้นของน้ำเสียสูง ทำให้ขีดขวางการเกิดปฏิกิริยา นั่นคือเป็นการขีดขวางการรวมตัวของโลหะไฮดรอกไซด์กับสารมลพิษเพื่อจับตัวเป็นก้อนตะกอน (Modirshahla et al., 2007) สำหรับการศึกษาของ (Nandi and Patel, 2017) ทำการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันโดยใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าคงที่พบว่า ที่เวลาการบำบัด 30 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบลดลงจาก 99.87% เป็น 67.78% เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 50 mg/l เป็น 200 mg/l เช่นเดียวกันกับการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง จากการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มขึ้นจาก 100 mg/l เป็น 200 mg/l ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบลดลงจาก 96% เป็น 89% (Merzouk et al., 2009) ส่วนการศึกษาการบำบัดโลหะ

หนัก Cu, Ni, Zn และ Mn ในสารละลายที่ความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 50mg/l จนถึง 250 mg/l โดยใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรดพบว่าความเข้มข้นของโลหะสูงจำเป็นต้องใช้เวลาในการบำบัดนานกว่าที่ความเข้มข้นของโลหะต่ำ แต่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงเมื่อเริ่มดำเนินการทดลองไปในระยะเวลาสั้นๆกลับมีการลดลงของความเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมากกว่าความเข้มข้นเริ่มต้นน้อยกว่า (Al Aji et al., 2012)

2.3.8 ปริมาณกระแสไฟฟ้า (Current density)

ปริมาณกระแสไฟฟ้าหรือ I/A (A/m^2) โดย I คือกระแสไฟฟ้าในหน่วยแอมแปร์ (A) และ A คือขนาดพื้นที่ผิวอิเล็กโทรด (m^2) ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี (Fayad, 2017) เป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราการตกตะกอนของสารมลพิษ อัตราการเกิดฟองแก๊ส ขนาดและการจับตัวของก้อนตะกอน อันมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ เมื่อเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบผ่านอิเล็กโทรดขั้วบวกจะทำให้เกิดการละลายของอิเล็กโทรดมากขึ้น นำไปสู่การเพิ่มจำนวนของโลหะไฮดรอกไซด์เพื่อจับตัวกับสารมลพิษเป็นก้อนตะกอนเพื่อตกตะกอนได้มากขึ้น แต่การเพิ่มกระแสไฟฟ้าจนมากเกินไปเกินค่าที่เหมาะสม (Optimum) กลับไม่เพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด เนื่องจากปริมาณของโลหะละลายที่ออกมาจากอิเล็กโทรดขั้วบวกมีมากเกินไปสำหรับจับกับสารมลพิษที่ต้องการบำบัด (Khandegar and Saroha, 2013)

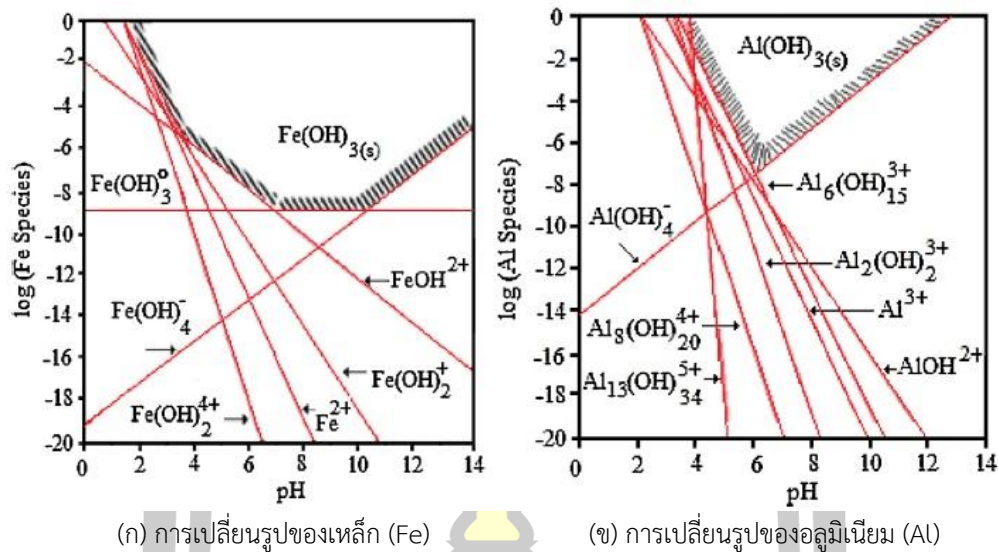
มีการศึกษาเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี จากการศึกษาการบำบัด Tartrazine โดยใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรด จากสารละลาย โดยเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก $40 A/m^2$ เป็น $120 A/m^2$ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นจาก 16.38% เป็น 99.18% และให้เหตุผลว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการจับตัวเป็นตะกอนมากขึ้นนำไปสู่ประสิทธิภาพการบำบัดที่เพิ่มมากขึ้น (Modirshahla et al., 2007) สอดคล้องกับการศึกษาการบำบัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ พบว่าเมื่อระยะเวลาการบำบัดผ่านไป 12 นาทีเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก $2.083 A/m^2$ ถึง $6.25 A/m^2$ ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นจาก 78% เป็น 93% การศึกษานี้ใช้โซลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด ฉะนั้น การเพิ่มกระแสไฟฟ้าส่งผลให้เพิ่มการแตกตัวของไอออน Al^{3+} ที่ขั้วบวกและสามารถเพิ่มอนุภาคของ $Al(OH)_3$ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการบำบัดมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเมื่อกระแสไฟฟ้ามากกว่า $3.125 A/m^2$ หากเพิ่มกระแสไฟฟ้ามากเกินไป เพื่อหวังเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดอาจก่อให้เกิดผลเสียตามมาคือ การเกิดความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้า (Joule effect) (Merzouk et al., 2009) ในการศึกษาการบำบัดโลหะหนักในสารละลายโดยกำหนดความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้น 250 mg/l เมื่อเวลาการบำบัดผ่านไป 40 นาที พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนัก Cu ลดลงเหลือ 7.9, 2.9 และ 2.15 mg/l ความเข้มข้นของ Ni ลดลงจาก 58.5, 17.25 และ 11 mg/l ส่วนความเข้มข้นของ Zn ลดลงเหลือ 52.5, 10.55 และ 6.4 mg/l สุดท้ายคือ Mn มีความเข้มข้นลดลงเหลือ 104, 100.5 และ 82.5 mg/l

จากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 0.8, 1.5 และ 2.5 A/m² ตามลำดับ (Al Aji et al., 2012) อีกหนึ่งงานวิจัยที่ศึกษาการบำบัดสีรีแอกทีฟสีแดง (Reactive red dye 24, RR24) โดยศึกษาอิเล็กโทรด 2 ชนิด คือ อลูมิเนียมและเหล็ก เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้ามีผลให้สามารถบำบัด COD สูงถึง 90.5%-99.85% (เหล็กที่เวลา 14 นาที) และ 83.8%-98.7% (อลูมิเนียมที่เวลา 35 นาที) (Abu Ghalwa and Saqer, 2016) และในปี 2017 ศึกษาการบำบัดสีย้อมสีเขียวในสารละลายโดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรด กำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทดลองในช่วง 13.9-138.9 A/m² (I= 0.1-1 A) พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 69.4-138.9 A/m² มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมมากกว่า 90% โดยเมื่อผ่านระยะเวลาการบำบัดไป 10 นาทีสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 73.6%, 64.6%, 51.8%, 41.8% และ 35.9% จากการให้กระแสไฟฟ้า 41.7, 34.7, 27.8, 20.8 และ 13.9 A/m² ตามลำดับ แต่เมื่อระยะเวลาการบำบัดผ่านไป 30 นาทีประสิทธิภาพการบำบัดเกิน 90% ในทุกๆกระแสไฟฟ้าที่มากกว่า 41.7 A/m² ในขณะเดียวกันประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 76-96% เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าระบบคือ 13.9-34.7 A/m² (Nandi and Patel, 2017)

2.3.9 สภาวะความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (pH เริ่มต้น)

ความเป็นกรด-ด่างเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำ การแตกตัวของอิเล็กโทรดขั้วบวก กระบวนการเกิดไฮดรอกไซด์ (Speciation) และมีผลต่อความต่างศักย์ของประจุไฟฟ้าระหว่างชั้นความหนาแน่นของไอออนที่อยู่รอบอนุภาคและประจุในของเหลวที่อยู่ล้อมรอบ (Zeta-potential) อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ในสารละลายและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ระหว่างดำเนินกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีได้อย่างแน่ชัด (Fayad, 2017)

อลูมิเนียมและเหล็กมีลักษณะการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกัน การเปลี่ยนรูปของสารที่ออกมา ยังมีความแตกต่างออกไปตามค่า pH ที่เกิดขึ้นด้วย การเปลี่ยนรูปเป็น Al(OH)₄⁻ และ Fe(OH)₄⁻ แสดงถึงภาพที่ 2-4 ซึ่งเห็นได้ว่าการเกิดรูป Al(OH)₄⁻ มีแนวโน้มเกิดขึ้นได้มากกว่า Fe(OH)₄⁻ โดยไอออนของเหล็กในรูปนี้มีความแข็งแรงอ่อนกว่า Fe(III) ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปได้ในช่วงที่ pH กว้างกว่า Al(III) ในสภาวะกรด การละลายของอิเล็กโทรดที่ใช้เหล็กเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยปราศจากการใช้พลังงานไฟฟ้า ภายใต้สภาวะต่าง Fe²⁺ จะถูกออกซิไดซ์เป็น Fe³⁺ ทันที (pH 7.6-14) สภาวะที่มีความเป็นกรดสูงอัตราการออกซิไดซ์จะลดลง (pH 4) (Fayad, 2017)



(ก) การเปลี่ยนรูปของเหล็ก (Fe)

(ข) การเปลี่ยนรูปของอลูมิเนียม (Al)

ภาพที่ 2-8 การเปลี่ยนรูปของเหล็กและอลูมิเนียมตามค่า pH

ที่มา: M Kobya et al., 2014

ในช่วงค่า pH 2-3 จำนวนไอออนของอลูมิเนียมจะถูกปลดปล่อยออกมาเพิ่มขึ้น หากเกินค่า pH 3 ความแตกต่างของปริมาณของอลูมิเนียมที่ละลายนั้นไม่มีนัยสำคัญ จำนวนของอลูมิเนียมที่ถูกปลดปล่อยออกมามีจำนวนมากกว่าค่าจากการคำนวณทางทฤษฎี โดยใช้กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ในกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีที่ใช้อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด เมื่ออยู่ค่า pH เริ่มต้นด้วยสภาวะกรดค่า pH สุดท้ายจะสูงขึ้น และเมื่อถ้าค่า pH เริ่มต้นด้วยสภาวะด่างค่า pH สุดท้ายจะลดลง แต่เมื่ออยู่ในสภาวะความเป็นกรดแก่หรือเป็นด่างสูงค่า pH จะคงที่ (Fayad, 2017)

2.3.10 ระยะเวลาการดำเนินระบบ (Electrolysis time)

กระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีระบบแบบกะ (Batch) และระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous) ระยะเวลาในการดำเนินระบบมีความสำคัญอย่างยิ่ง ประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการดำเนินระบบนานขึ้น แต่เมื่อผ่านระยะเวลาที่เหมาะสมประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จะมีค่อนข้างคงที่และจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการดำเนินระบบนานขึ้น ในขณะที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากัน โลหะไฮดรอกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอิเล็กโทรดขั้วบวกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการดำเนินระบบเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาผ่านไปสักระยะจะเกิดการจับตัวของก้อนตะกอนเพื่อตกตะกอน อันนำไปสู่ประสิทธิภาพการบำบัดสารมลพิษ เช่นเดียวกันหากดำเนินระบบนานกว่าระยะเวลาที่เหมาะสมประสิทธิภาพการบำบัดจะคงที่ เพราะว่ามีปริมาณของไอออนที่จับกับสารมลพิษมีจำนวนเพียงพอแล้ว (Fayad, 2017; Khandegar and Saroha, 2013)

การศึกษาการบำบัด Tartrazine ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้กระแสไฟฟ้า 120 A/m^2 ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 mg/l พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นอยู่กับปริมาณของไอออนที่ถูกปลดปล่อยออกจากอิเล็กโทรดขั้วบวก เมื่อระยะเวลาการดำเนินระบบนานขึ้น จำนวนของไอออนและตะกอนของไฮดรอกไซด์จะมีจำนวนมากขึ้น จากการศึกษาเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบำบัดจาก 2 นาที เป็น 5 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นจาก 49.53% เป็น 99.21% (Modirshahla et al., 2007) สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดความเข้มข้นของสี และบำบัดค่า COD จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้เหล็กและอลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด ทำการศึกษาที่ pH 8 ปริมาณกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15 A/m^2 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีและ COD เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้นเป็น 80 นาที และหลังจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจะเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดสีและ COD อยู่ที่ 94% และ 90% ตามลำดับ โดยในขณะที่ดำเนินระบบอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุลบจะถูกทำให้เป็นกลางโดยการชนกับไอออนของเหล็กและอลูมิเนียม ประสิทธิภาพการบำบัดสีจึงมากกว่าการบำบัด COD อาจเนื่องจากการมีสิ่งเจือปนที่ละลายได้ในน้ำเสียซึ่งไม่สามารถกำจัดออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Verma, 2017)

2.4 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้เสนอผลงานที่ได้จากการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารหรือธาตุที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถสรุปเป็นกฎสองข้อ คือ (สุรพงษ์, 2531)

2.4.1 ปริมาณของสารที่เกิดขึ้นหรือหายไปที่อิเล็กโทรดในการทำอิเล็กโทรไลซิสจะแปรผันโดยตรงกับประจุไฟฟ้า (Q) ที่ผ่านเข้าไปในสารละลาย โดยเมื่อกระแสไฟฟ้า (I) คงที่ จะได้ $Q=It$ และ t คือเวลาที่ใช้ในการทำอิเล็กโทรไลซิส

2.4.2 ปริมาณหรือมวลของสารดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักสมมูล (Equivalent weight) ของสารนั้น

จากกฎความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Zaied and Bellakhal, 2009)

พจนานุกรมศัพท์โต ชีเว

$$W = \frac{ItM}{zF} \quad (24)$$

โดย W คือ ปริมาณโลหะละลาย (กรัม, g)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A)
 t คือ เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง, hr)
 M คือ น้ำหนักมวลโมเลกุลของขั้วแอโนด (กรัม/โมล, g/mol)
 Z คือ จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
 F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 26.801 (A.hr/mol)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการกำจัดสีย้อมแบบกระจาย (Disperse dye) ได้แก่ Disperse Blue 106 (DB 106) และ Disperse Yellow 84 (DY 84) และสีย้อมแบบบริแอกทีฟ (Reactive dye) ได้แก่ Reactive Blue 49 (RB 49) และ Reactive Yellow 54 (RB 54) ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง โดยใช้ Al, Fe และ SUS เป็นอิเล็กโทรดทั้งขั้วบวกและขั้วลบ น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศเกาหลีใต้ มีค่า COD คือ 870 mg/l และมีค่าความเข้มข้นของสีคือ 1,340 Pt-Co ขนาดอิเล็กโทรดที่ทดลองคือ 10 x 10 x 0.2 cm (80 cm²) มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0.5-3 cm จัดวางสลับคู่ระหว่าง 3-7 คู่อิเล็กโทรด ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density; CD) 1.01-4.5 mA/cm² จากการศึกษาพบว่า เมื่อค่า CD อยู่ในช่วง 1-2 mA/cm² ไม่มีนัยสำคัญต่อการบำบัด แต่เมื่อ CD เพิ่มขึ้นจาก 2-4.5 mA/cm² ประสิทธิภาพการบำบัดสีเพิ่มขึ้นจาก 98% เป็น 99.4% ตามลำดับ แต่ในขณะเดียวกันปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ายังเพิ่มสูงขึ้น ส่วนอิเล็กโทรดชนิด Al มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด รองลงมาคือ Fe และ SUS การศึกษายังกล่าวอีกว่าในการทดลองโดยใช้ Fe เป็นอิเล็กโทรดค่า pH เริ่มต้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพสำหรับค่า pH ที่เหมาะสม คือ 4-10 และสีย้อมแบบกระจายมีประสิทธิภาพการบำบัดได้ดีกว่าสีย้อมแบบบริแอกทีฟ ส่งผลให้ค่า COD ของสีย้อมแบบกระจายมีค่าน้อยกว่าสีย้อมแบบบริแอกทีฟ (Kim et al., 2002)

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมในประเทศตุรกี ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้ Fe และ Al เป็นอิเล็กโทรด ซึ่งมีขนาด 4.6x5.5x0.3 cm (78 cm²) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1.1 cm การศึกษาพบว่า ในระยะเวลาการทดลอง 10 นาที อิเล็กโทรด Al การใช้ CD ที่ 150 A/cm² มีประสิทธิภาพการบำบัด COD และความขุ่นได้ดีที่สุด จากการศึกษาตามสมการฟาราเดย์พบว่าปริมาณประจุ (Charge loading) 28 F/m³ ส่วนอิเล็กโทรด Fe ปริมาณ CD ในช่วง 80-

100 A/m² มีปริมาณประจุอยู่ที่ 17 F/m³ ในขณะเดียวกันอิเล็กโทรด Al มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าอิเล็กโทรด Fe ประมาณ 67% อย่างไรก็ตาม ที่ CD 80 A/m² ปริมาณประจุที่คำนวณได้สำหรับอิเล็กโทรดทั้งสองชนิดมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน นั้นหมายความว่าอิเล็กโทรด Fe มีประสิทธิภาพดีกว่าอิเล็กโทรด Al เนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า (Mehmet Kobya et al., 2003)

ในการศึกษาการกำจัด Tartrazine (C.I Acid Yellow 23) ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี โดยใช้ Fe และ Al เป็นอิเล็กโทรด ซึ่งมีขนาด 18 cm² ทำการศึกษาในรูปแบบการจัดวางอิเล็กโทรดแตกต่างกันได้แก่ Monopolar และ Bipolar จัดวางแบบขนานและแบบอนุกรม ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดคือ 1-1.5 cm ศึกษา CD ตั้งแต่ 40-120 A/m² การศึกษาพบว่าภายใต้สภาวะค่า pH 5.78 ระยะเวลาการทดลอง 6 นาที ใช้ CD ที่ 120 A/m² โดยใช้อิเล็กโทรด Fe เป็นขั้วบวก ส่วน Al เป็นขั้วไฟฟาลบ กำหนดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1.5 cm สามารถบำบัดสีได้ 100% และมีประสิทธิภาพการบำบัด COD ได้ 90% สำหรับรูปแบบการจัดวางอิเล็กโทรดแบบอนุกรม (Monopolar series) แบบที่มี Al ทำหน้าที่ปลดปล่อยประจุ (ขั้วบวก) และมี Fe เป็นขั้วลบ มีประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่ารูปแบบขนาน (Parallel connections) ที่มี Fe เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว (Modirshahla et al., 2007)

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีแดง (Red dye: 2-naphthoic acid ผสมกับ 2-naphthol) และบำบัด COD ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง โดยใช้ลอมินเนียมเป็นอิเล็กโทรด ซึ่งมีขนาด 48 cm² กำหนดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าคือ 1 cm คุณสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ศึกษา ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า, ค่า pH และความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้น ส่วนปัจจัยต่อระบบที่ศึกษา ได้แก่ CD 20.8-62.5 mA/cm² ซึ่งคิดเป็นกระแสไฟฟ้าเข้าระบบ 1-3 A และระยะเวลาการบำบัด 60 นาที ผลการศึกษาพบว่า ที่ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้นต่ำกว่า 200 mg/l (COD 2,500 mg/l), ค่า pH อยู่ในช่วง 6-9, ระยะเวลาการบำบัด 14 นาที, CD 31.25 mA/cm², ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย 2.4 mS/cm และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 cm มีประสิทธิภาพการบำบัดสีมากกว่า 85% และบำบัด COD ได้มากกว่า 80% (Merzouk et al., 2009)

การศึกษาการบำบัดสีย้อม Acid Black 52 และ Acid Yellow 220 ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีแบบที่ละเทะ โดยใช้ Al เป็นอิเล็กโทรด มีขนาดพื้นที่อิเล็กโทรด 20 cm² ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า, CD, ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น และค่า pH พบว่า เมื่อเพิ่ม CD เป็น 40 A/m² ค่า pH ที่เหมาะสมคือ pH 5 ประสิทธิภาพการบำบัดสีจะเพิ่มขึ้นเป็น 92% (B52) และ 97% (Y220) ส่วนการเพิ่มปริมาณ NaCl จาก 0-8 g/l ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นค่อนข้างไม่แตกต่างกัน แต่มีส่วนช่วยให้ปริมาณการใช้พลังงานลดลง โดยเมื่อเติม NaCl 0-2 g/l สามารถลด

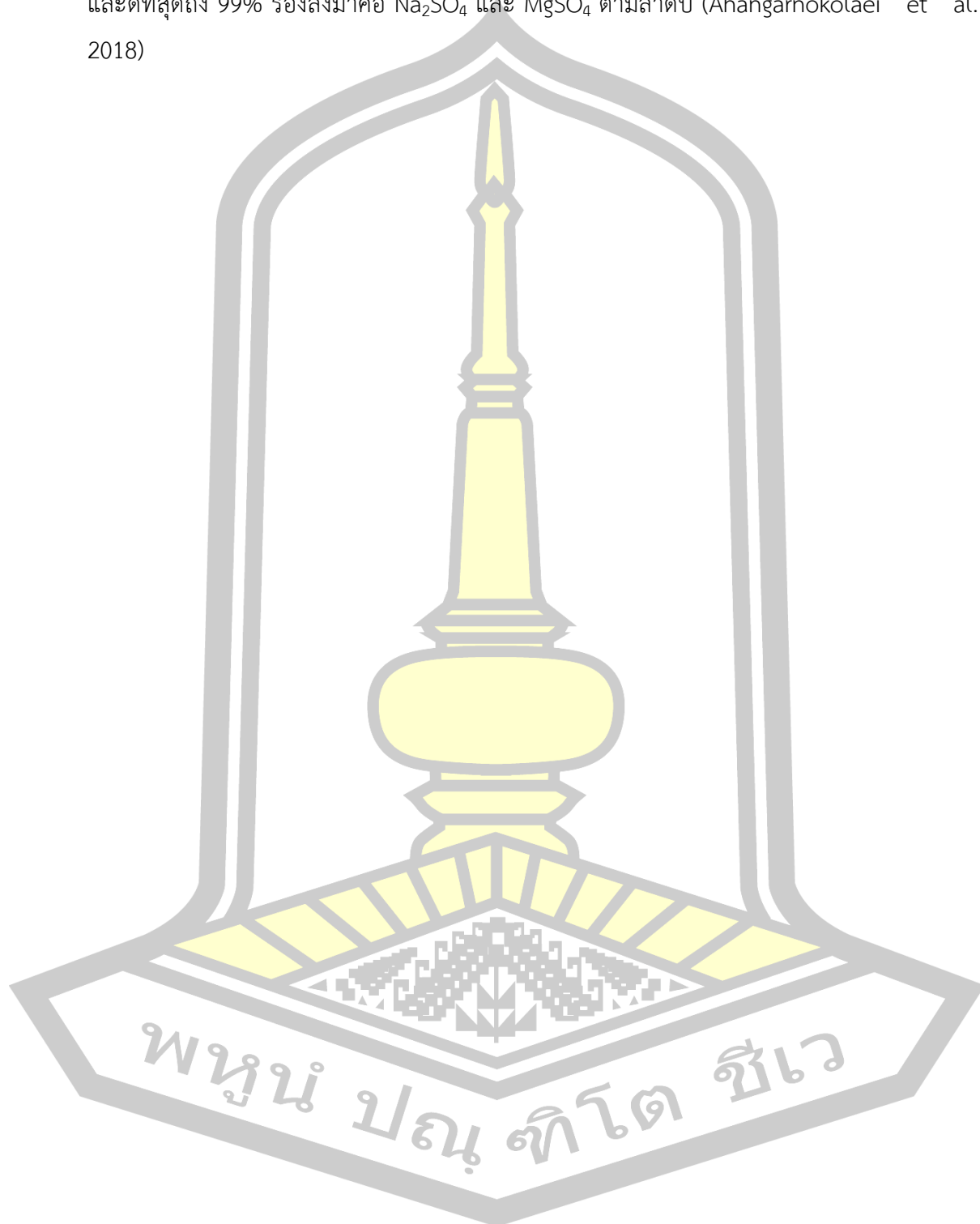
พลังงานไฟฟ้าได้จาก 5668-950 kWh/m³ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ NaCl จนถึง 8 g/l ไม่มีผลต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบ (Pajootan et al., 2012)

การศึกษาอิทธิพลปริมาณกระแสไฟฟ้าปริมาณสูงในกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีสำหรับการบำบัดน้ำเสียในเขตพื้นที่หนึ่งในประเทศมาเลเซีย ถึงปฏิกิริยาที่ใช้เป็นแบบที่ละเท ทดลองกับอิเล็กโทรด ได้แก่ สแตนเลส (stainless steel), Al และ Fe มีขนาด 240 cm² ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตั้งแต่ 1-4 cm กระแสไฟฟ้า CD ที่ทดสอบคือ 605, 908, 1,211, 1,513 และ 1,816 A/m² และระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 5-30 นาที การศึกษาพบว่าเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าปริมาณสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นตามไปด้วย โดยการใช้สแตนเลสเป็นอิเล็กโทรดที่ปริมาณ CD 1,816 A/m² ที่ระยะเวลาการทดลอง 30 นาที ภายใต้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 cm และค่า pH 7 สามารถบำบัด COD และ BOD ได้ 98.07% กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ 97.64% (Nasrullah et al., 2014)

การบำบัดน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ Brilliant green dye ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีแบบที่ละเท โดยใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรด ซึ่งมีขนาด 72 cm² กำหนดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1-3 cm และมีความเข้มข้นน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์เริ่มต้นตั้งแต่ 50-200 mg/l ทดสอบกับ CD 13.9-138.9 A/m² ศึกษาค่า pH ในช่วง 1.5-10 และการเติม NaCl 0.1-1 g/l ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเพิ่มขึ้น 76-99.59% เมื่อปริมาณ CD เข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้นจาก 13.9 เป็น 138.9 A/m² ทั้งนี้ ในการทดสอบกับความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 100 mg/l ที่ระยะเวลาการบำบัด 30 นาที ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 cm กำหนดค่า pH เริ่มต้นที่ pH 4 และค่า CD 41.7 A/m² พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 99% และที่สภาวะเดียวกันเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสูงขึ้นพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลง อย่างไรก็ตาม การศึกษาชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้า (CD) รวมถึงเพิ่มระยะเวลาการบำบัดและการลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมเพิ่มขึ้น สำหรับการเพิ่มปริมาณ NaCl สามารถลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ลงได้ (Nandi and Patel, 2017)

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียสีย้อม Acid red 14 ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี (Electrocoagulation/flotation) โดยใช้ตะแกรงแตนเลสเป็นอิเล็กโทรด ขนาด 5x5 cm ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ขนาดพื้นที่อิเล็กโทรด 13.5, 20.5 และ 24.5 cm² ศึกษาระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตั้งแต่ 0.25-2 cm ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียอยู่ที่ 400-5,200 μ S/cm และทำการศึกษาความแตกต่างของอิเล็กโทรไลต์ 3 ชนิดคือ NaCl, Na₂SO₄ และ MgSO₄ จากการศึกษาพบว่าอิเล็กโทรดขนาด 20.5 cm² ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0.5 cm กำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 150 mg/l ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้า 3,600 μ S/cm และกำหนดค่า pH เริ่มต้นคือ pH 7 ปริมาณกระแสไฟฟ้า CD 40 mA/cm² (0.8 A) ที่ระยะเวลาการบำบัด 20 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพ

การบำบัดน้ำเสียสีย้อม 99% สำหรับชนิดอิเล็กทรอนิกส์พบว่า NaCl ให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่เร็วและดีที่สุดถึง 99% รองลงมาคือ Na_2SO_4 และ MgSO_4 ตามลำดับ (Ahangarnokolaei et al., 2018)



ตารางที่ 2-4 การบำบัดน้ำเสียสีย้อมชนิดต่างๆ ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

ชนิดของน้ำเสีย	ขั้วบวก/ขั้วลบ	CD	Distance (cm)	C ₀ (mg/l)	Time (min)	pH _i	EA (cm ²)	% color removal	Reactor	การอ้างอิง
real textile wastewater	Al/Al, Fe/Fe	80 A/m ²	1.1	-	15	6-9	78		-	M.Kobyas et al. 2003
Tartrazine	Fe/Al	120 A/m ²	1.5	40	6	5.78	18	color 100%, COD 90%	batch	Modirshahla et al. 2007
Red dye	Al/Al	31.25 mA/cm ²	1	200	14	6-9	48	85%	continuous	B.Merzouk et al. 2009
Acid Black 52, Acid Yellow 220	Al/Al	40 A/m ²	1	200		5	20	B52 92%, Y220 97%	batch	Pajoon et al. 2012
sewage wastewater	SS, Al, Fe	1816 A/m ²	1	-	30	7	240	(SS) COD 98.07%, BOD 98.07%, SS 97.64%	batch	Nasrullah et al. 2014
Brilliant green dye C.I.42040	Fe/Fe	41.7 A/m ²	1	100	30	4-10	72	99.59%	batch	Nandi and Patel 2017
Acid red 14	Stainless	40 mA/cm ²	0.5	150	20	7	20.5	99%	batch	Ahangarnokolaie et al. 2018

บทที่ 3 วิธีการศึกษา

การศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อม โดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี ดำเนินการทดลองแยกเป็น 3 ส่วนคือ การศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อพื้นที่อิเล็กโทรด การศึกษาสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ และการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อปริมาณโลหะละลายเชื่อมโยงกับทฤษฎีกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสีย้อมไหมสังเคราะห์สีแดง ชนิดสีแอสิดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 400 mg/l ภายใต้การควบคุมความสภาวะที่แตกต่างกันไป

3.1 ขอบเขตการวิจัย

3.1.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์สีแดง ประเภทสีแอสิด (Acid red 114) กำหนดความเข้มข้นเริ่มต้น 400 mg/l

3.1.2 ถังปฏิกรณ์พลาสติกแบบที่ละเท (Batch reactor) ขนาด 2,000 ml

3.1.3 ปัจจัยที่ศึกษา

3.1.3.1 ชนิดอิเล็กโทรด ได้แก่ อลูมิเนียม (Al) และเหล็ก (Fe)

3.1.3.2 ขนาดอิเล็กโทรด ได้แก่ 4, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 cm² ซึ่งมีความกว้างของอิเล็กโทรดคือ 0.2, 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 cm ตามลำดับ

3.1.3.3 ปริมาณกระแสไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.05-0.5 A

3.1.3.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ศึกษาในช่วง pH 3-10

3.1.3.5 ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ได้แก่ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 cm

3.1.3.6 การเติม NaCl ในปริมาณตั้งแต่ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 g

3.1.3.7 พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดในการเดินระบบ 10 cm²

3.1.3.8 ระยะเวลาการทดลอง ตั้งแต่ 0-140 นาที

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply)

3.2.2 เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)

3.2.3 ตู้ดูดควัน (Fume hood)

3.2.4 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Shimadzu UV-1900

3.2.5 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) ยี่ห้อ Shimadzu AA-6200 (วิเคราะห์เหล็ก) และ AA-7000 (วิเคราะห์อลูมิเนียม)

3.2.6 เครื่องวัด pH (pH meter) ยี่ห้อ Hach, HQ40D Portable Multi Meter

3.2.7 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ (Electric negativity meter, EC meter)

3.2.8 เครื่องชั่งละเอียด

3.2.9 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

3.2.10 อุปกรณ์เครื่องแก้วพื้นฐาน ได้แก่ ปีกเกอร์ ขวดปรับปริมาตร กระบอกตวง กรวยกรอง ปิเปต เป็นต้น

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 ไฮโดรคลอริก (HCl) 15 %

3.3.2 กรดไนตริกเข้มข้น (conc. HNO_3 68%)

3.3.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 1 M)

3.3.4 กรดไฮโดรคลอริก (H_2SO_4 0.5 M)

3.3.5 น้ำ DI

3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมไหมแอซิด (acid dye) โทนสีแดง (Acid red 114) ยี่ห้อเครื่องบิน กำหนดความเข้มข้น 400 mg/L โดยมีวิธีการเตรียม คือ

3.4.1 ละลายสีย้อมปริมาณ 2 g ในน้ำกลั่นเดือด 2,000 ml ต้มให้สีย้อมละลาย จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ (Stock solution) ความเข้มข้น 1,000 mg/L ปริมาตร 2,000 ml

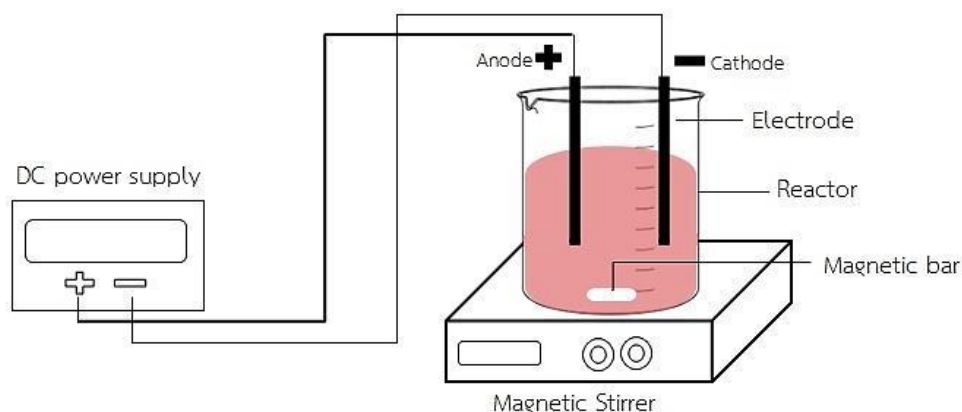
3.4.2 นำสีย้อมที่ละลายไว้ปริมาตร 800 ml เทใส่ขวดปรับปริมาตร จากนั้นเติมน้ำ DI เพื่อปรับปริมาตรเป็น 2,000 ml จะได้น้ำเสียสังเคราะห์เพื่อใช้ในการทดลองที่ความเข้มข้น 400 mg/L

3.4.3 ทำการปรับค่า pH ตามการทดลอง

3.5 การติดตั้งถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 2,000 ml ประกอบเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ที่สามารถปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต้องการทดลองได้ โดยเชื่อมต่อเข้ากับขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งทำการศึกษาอิเล็กโทรด 2 ชนิดคือเหล็ก (Fe) และอลูมิเนียม (Al) ความห่างระหว่างขั้ว 2 cm ดังภาพที่ 3-9

การเตรียมขั้วไฟฟ้าก่อนนำมาใช้ทุกครั้งต้องผ่านการทำความสะอาดพื้นผิว โดยการแช่ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 15% ประมาณ 30 นาที จากนั้นขัดด้วยกระดาษทราย แล้วชะล้างด้วยน้ำกลั่น เช็ดให้แล้วนำมาใช้ทันที



ภาพที่ 3-9 ลักษณะการติดตั้งถังปฏิกรณ์สำหรับการทดลอง

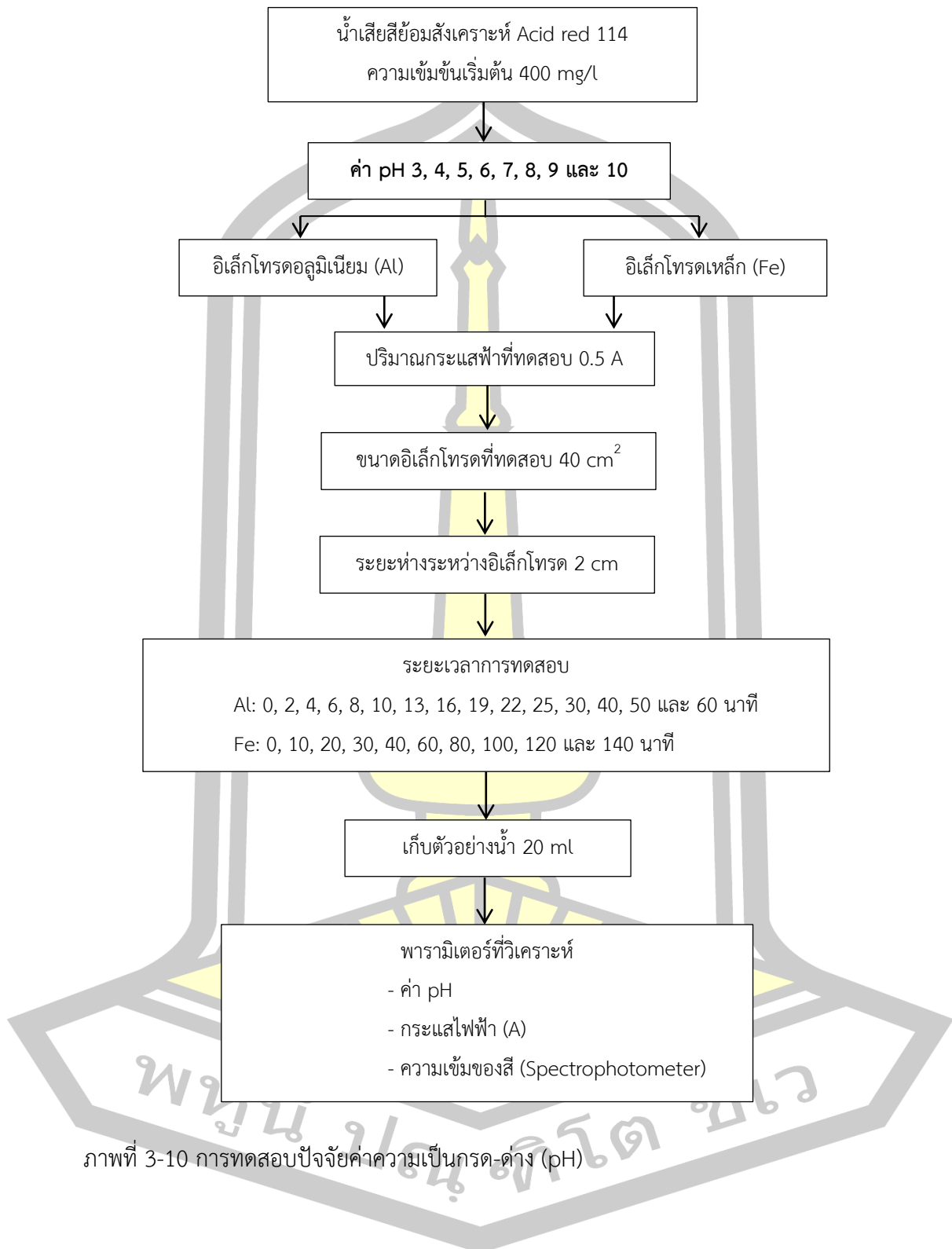
3.6 การดำเนินการทดลอง

ช่วงที่หนึ่ง เป็นการศึกษাপัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณกระแสไฟฟ้า (Current) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (Distance between of electrodes) และการเติม NaCl เพื่อปรับสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย

ช่วงที่สอง เป็นการศึกษาอิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรด และการศึกษาสัดส่วนกระแสไฟฟ้า ต่อขนาดอิเล็กโทรด และการศึกษาเปรียบเทียบกับกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) และสุดท้ายจะเป็นการคำนวณปริมาณพลังงานที่ใช้ โดยกำหนดค่าที่เหมาะสมจากการทดสอบปัจจัยในช่วงแรก กำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียอยู่ที่ 400 mg/l ระยะเวลาดำเนินการทดลองตั้งแต่ 0-140 นาที ระหว่างการทดลองมีการเก็บตัวอย่างน้ำปริมาณ 20 ml ที่เวลาต่างกันออกไป เพื่อนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการทดสอบกับอิเล็กโทรดอลูมิเนียม (Al) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ ระยะเวลา 0, 0, 2, 4, 6, 8, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 30, 40, 50 และ 60 นาที ส่วนอิเล็กโทรด เหล็ก (Fe) ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120 และ 140 นาที ซึ่งมีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

3.6.1 การศึกษาปัจจัยค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่า pH เป็นปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่อการแตกตัวของโลหะจากขั้วแอโนด การสร้างและการรวมตะกอนของโลหะไอออนกับมลสารของสีที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งโดยทั่วไปค่า pH จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นระหว่างกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี โดยทำการศึกษาค่า pH ตั้งแต่ 3-10 ทดสอบกับกระแสไฟฟ้าที่ 0.5 A กำหนดขนาดอิเล็กโทรดที่ทดสอบคือ 40 cm² (2 cm) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm ใช้ H₂SO₄ 0.5 M และ NaOH 1 M เพื่อปรับสภาพน้ำเสียก่อนทำการทดลอง รายละเอียดขั้นตอนการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-10



ภาพที่ 3-10 การทดสอบปัจจัยค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

3.6.2 การศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้า (Current, I)

กระแสไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อปริมาณการแตกตัวของโลหะที่ขั้วแอโนด โดยปริมาณการแตกตัวของโลหะแปรผันกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ สำหรับอิเล็กโทรดอลูมิเนียม ทำการศึกษากับปริมาณกระแสไฟฟ้า 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 A ส่วนอิเล็กโทรดเหล็กศึกษากับกระแสไฟฟ้า 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 A ทดสอบกับอิเล็กโทรดขนาด 40 cm^2 (2 cm) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm รายละเอียดขั้นตอนการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-11

3.6.3 การศึกษาปัจจัยระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (Distance between electrodes, D)

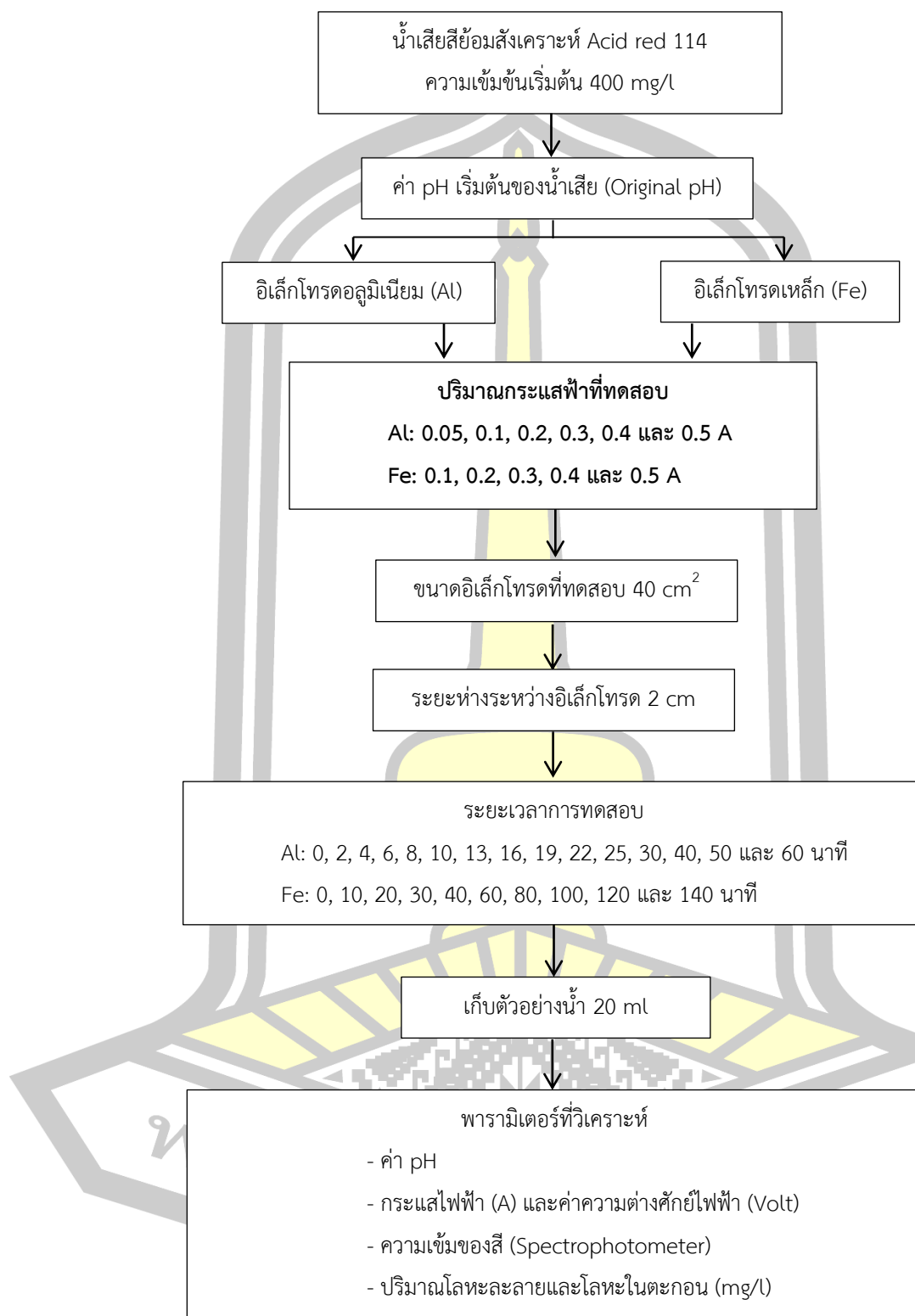
ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีอิทธิพลต่อค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จึงทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงไปของอิเล็กโทรดทั้งสองชนิด โดยทำการศึกษาระยะห่างตั้งแต่ 0.5, 1, 2, 3, และ 4 cm และทำการทดสอบกับอิเล็กโทรดขนาด 40 cm^2 (2 cm) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm รายละเอียดขั้นตอนการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-12

3.6.4 การศึกษาปัจจัยการเติม NaCl

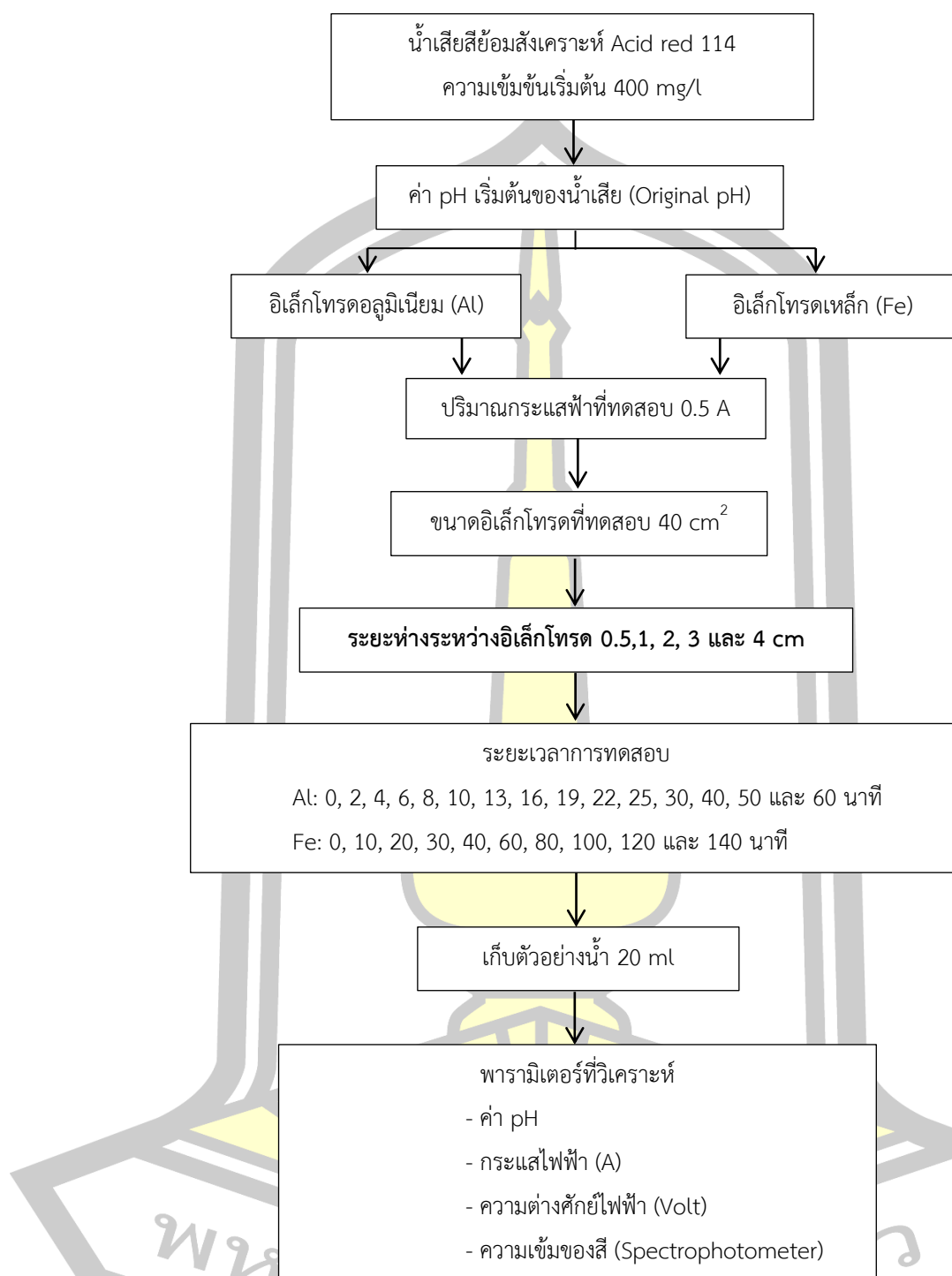
การเติม NaCl มีผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย เมื่อปริมาณการเติม NaCl มากขึ้น ส่งผลให้น้ำเสียมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น เป็นผลต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด โดยทำการศึกษาที่ปริมาณตั้งแต่ 0.5, 1, 2, 3, และ 4 g ก่อนดำเนินการทดลองทำการเติม NaCl ลงไปในน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ จากนั้นคนให้ละลายก่อนนำไปทดลอง ซึ่งทำการทดสอบกับอิเล็กโทรดขนาด 40 cm^2 (2 cm) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm รายละเอียดขั้นตอนการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-13

3.6.5 การศึกษาปัจจัยขนาดอิเล็กโทรด (Electrode surface areas, EA)

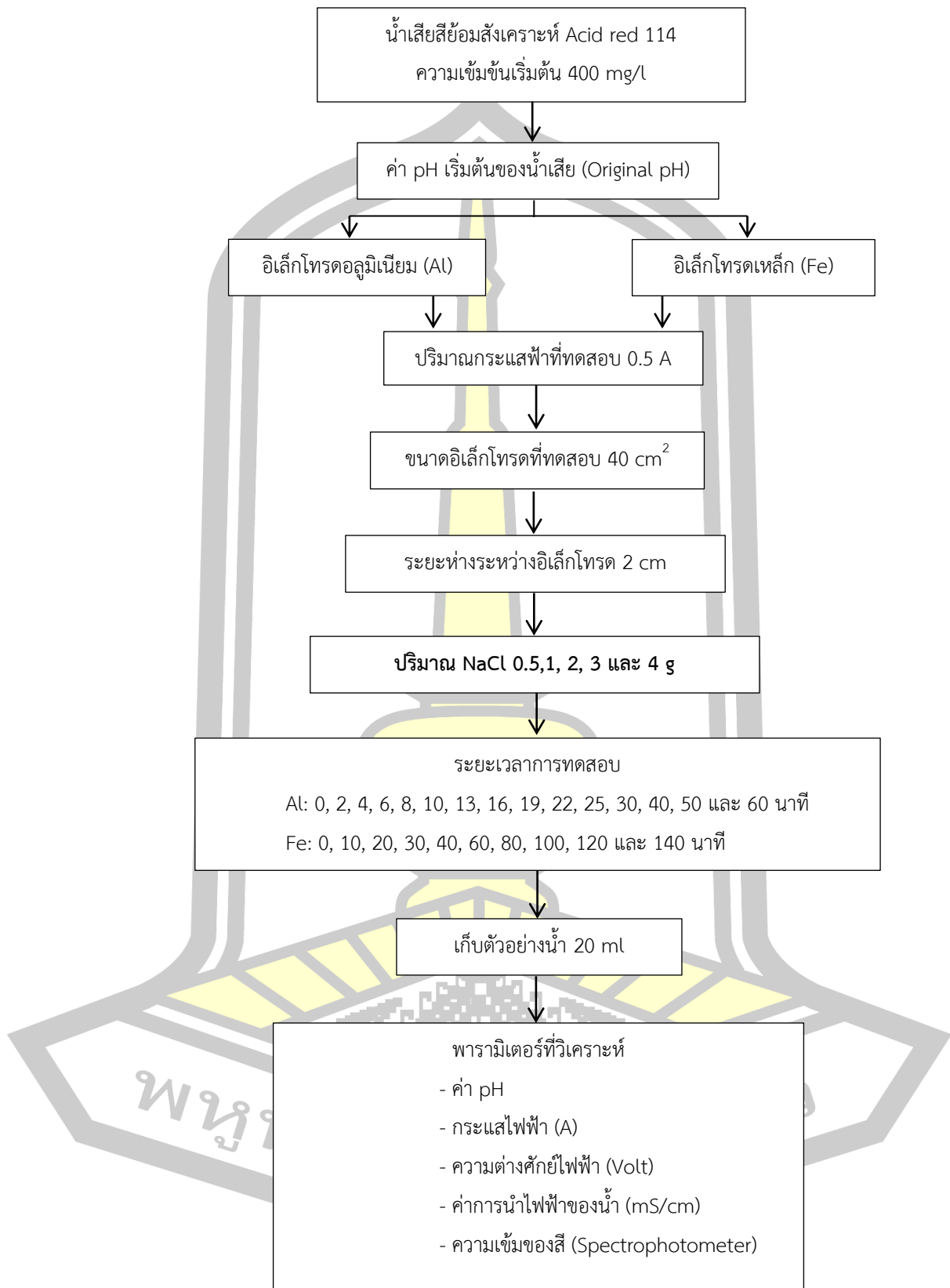
การทดสอบอยู่ภายใต้สมมติฐาน เมื่อขนาดอิเล็กโทรดใหญ่ขึ้น ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบเท่าเดิม ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมจะเพิ่มขึ้น โดยทำการทดสอบขนาดอิเล็กโทรดขนาดต่างๆ ได้แก่ 4, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 cm^2 ซึ่งมีความกว้างของอิเล็กโทรดคือ 0.2, 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 cm ตามลำดับ สำหรับอิเล็กโทรดอลูมิเนียมทดสอบกับปริมาณกระแสไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.05 A กระแสไฟสูงสุดคือ 0.3 A ($4-10 \text{ cm}^2$) และ 0.5 A ($20-100 \text{ cm}^2$) ส่วนอิเล็กโทรดเหล็กทดสอบกับกระแสไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.1 A กระแสไฟฟ้าสูงสุดคือ 0.3 A ($4-10 \text{ cm}^2$) และ 0.5 A ($20-100 \text{ cm}^2$) โดยกำหนดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดอยู่ที่ 2 cm รายละเอียดขั้นตอนการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-14



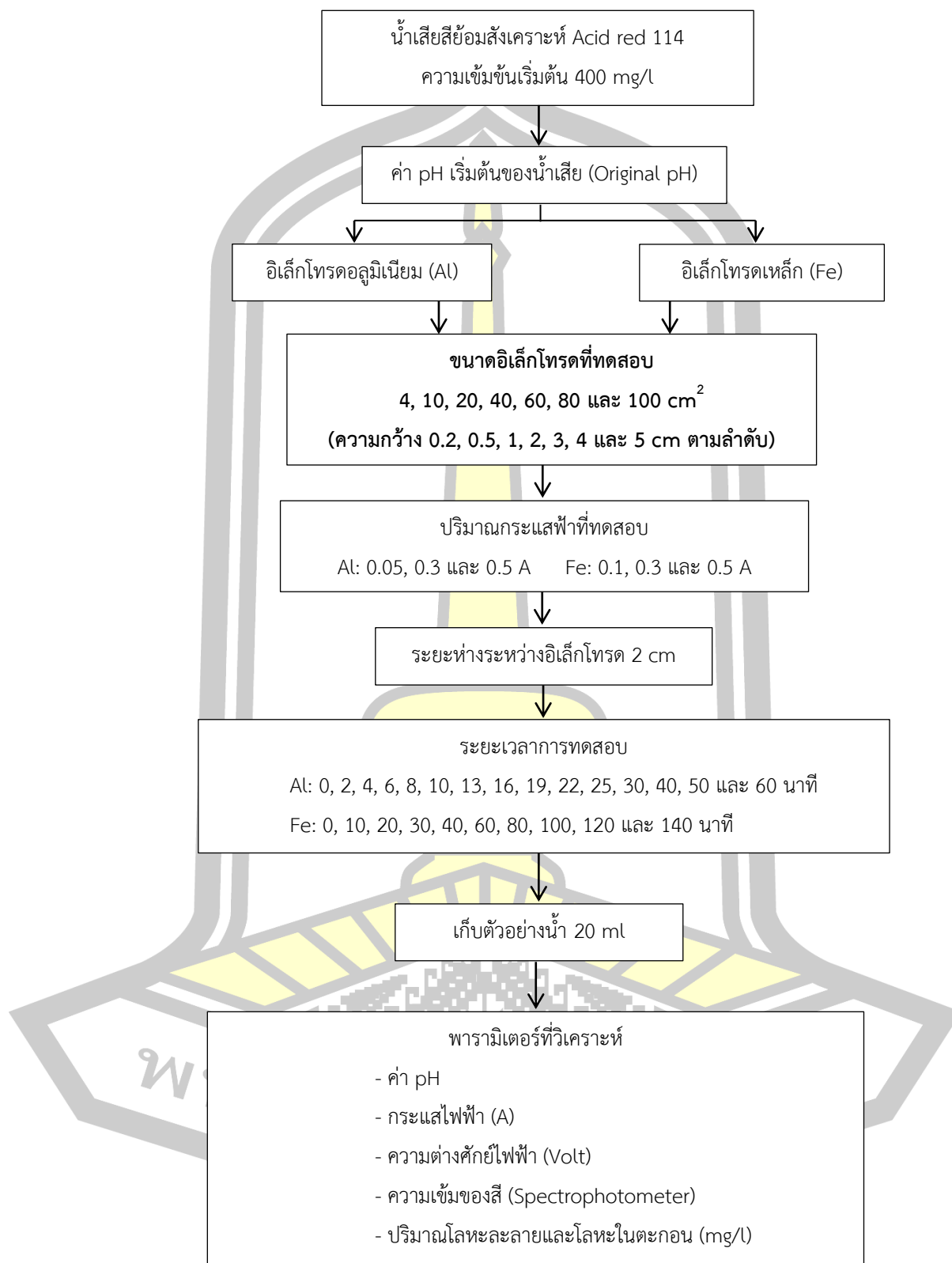
ภาพที่ 3-11 การทดสอบปัจจัยปริมาณกระแสไฟฟ้า (Current)



ภาพที่ 3-12 การทดสอบปัจจัยระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (Distance between of electrodes)



ภาพที่ 3-13 การทดสอบปัจจัยการเติม NaCl



ภาพที่ 3-14 การทดสอบปัจจัยขนาดอิเล็กโทรด (Electrode surface areas)

3.6.6 การศึกษาสัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรด (I/A)

เป็นการศึกษาโดยกำหนดสัดส่วน I/A เท่ากัน คือ 5 mA/cm^2 ซึ่งจะทำให้ค่าปริมาณกระแสไฟฟ้า และขนาดอิเล็กโทรดแตกต่างกันออกไป นั่นคือ สัดส่วน I/A จะกำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าระบบ สมมติฐานการศึกษาคือ เมื่อสัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรดเท่ากัน แต่ขนาดอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงไป ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจะค่อยๆเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 สัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กโทรด

	กระแสไฟฟ้า (I, mA)	ขนาดอิเล็กโทรด (EA, cm^2)
สัดส่วน $I/A = 5 \text{ mA/cm}^2$	100	20
	200	40
	500	100

3.6.7 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อปริมาณโลหะละลาย

อาศัยการคำนวณจากกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณโลหะละลายที่ออกมาจากอิเล็กโทรดเมื่อให้กระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป สำหรับรายละเอียดสมการที่ใช้ในการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

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

โดย W คือ ปริมาณโลหะละลาย (กรัม, g)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A)

t คือ เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง, hr)

M คือ น้ำหนักโมลโมเลกุลของซัลเฟอร์ (กรัม/โมล, g/mol)

Z คือ จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ $26.801 \text{ (A.hr/mol)}$

3.6.8 การคำนวณปริมาณโลหะละลายจากการทดลอง

เพื่อคำนวณหาปริมาณโลหะละลายจริงจากการทดลอง โดยการคำนวณจากความเข้มข้นของโลหะที่ตรวจวัดจากเครื่อง AAS ออกมาในหน่วย mg/l ด้วยวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 หาปริมาณเนื้อตะกอนที่นำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง AAS

$$MS_{AAS} = \frac{MS_d/DF}{V_d} \times 1,000 \text{ ml}$$

โดย MS_{AAS} คือ ปริมาณเนื้อตะกอนที่นำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง AAS (mg/L)
 MS_d คือ น้ำหนักตะกอนที่นำไปย่อย (mg)
 DF คือ จำนวนเท่าของการเจือจาง
 V_d คือ ปริมาตรที่เหลือหลังจากการย่อย (ml)

ขั้นที่ 2 เทียบบัญญัติโดยตรงหาค่าความเข้มข้นของโลหะทั้งหมดจากการทดลองด้วยการคำนวณจากความเข้มข้นของโลหะที่วัดได้จากเครื่อง AAS

$$C_{exp} = \frac{C_{AAS} \times MS_{total}}{MS_{AAS}}$$

โดย C_{exp} คือ ความเข้มข้นของโลหะทั้งหมดจากการทดลอง (mg/L)
 C_{AAS} คือ ความเข้มข้นของโลหะที่ตรวจวัดจากเครื่อง AAS (mg/L)
 MS_{total} คือ น้ำหนักตะกอนทั้งหมดหลังจากการทดลองเสร็จสิ้น (mg)
 MS_{AAS} คือ ปริมาณเนื้อตะกอนที่นำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง AAS (mg/L)

3.6.9 การคำนวณสัดส่วนโลหะละลายจากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณกฎของฟาราเดย์

$$\text{Metal}_{exp}/\text{Faraday} = \frac{C_{exp}}{W}$$

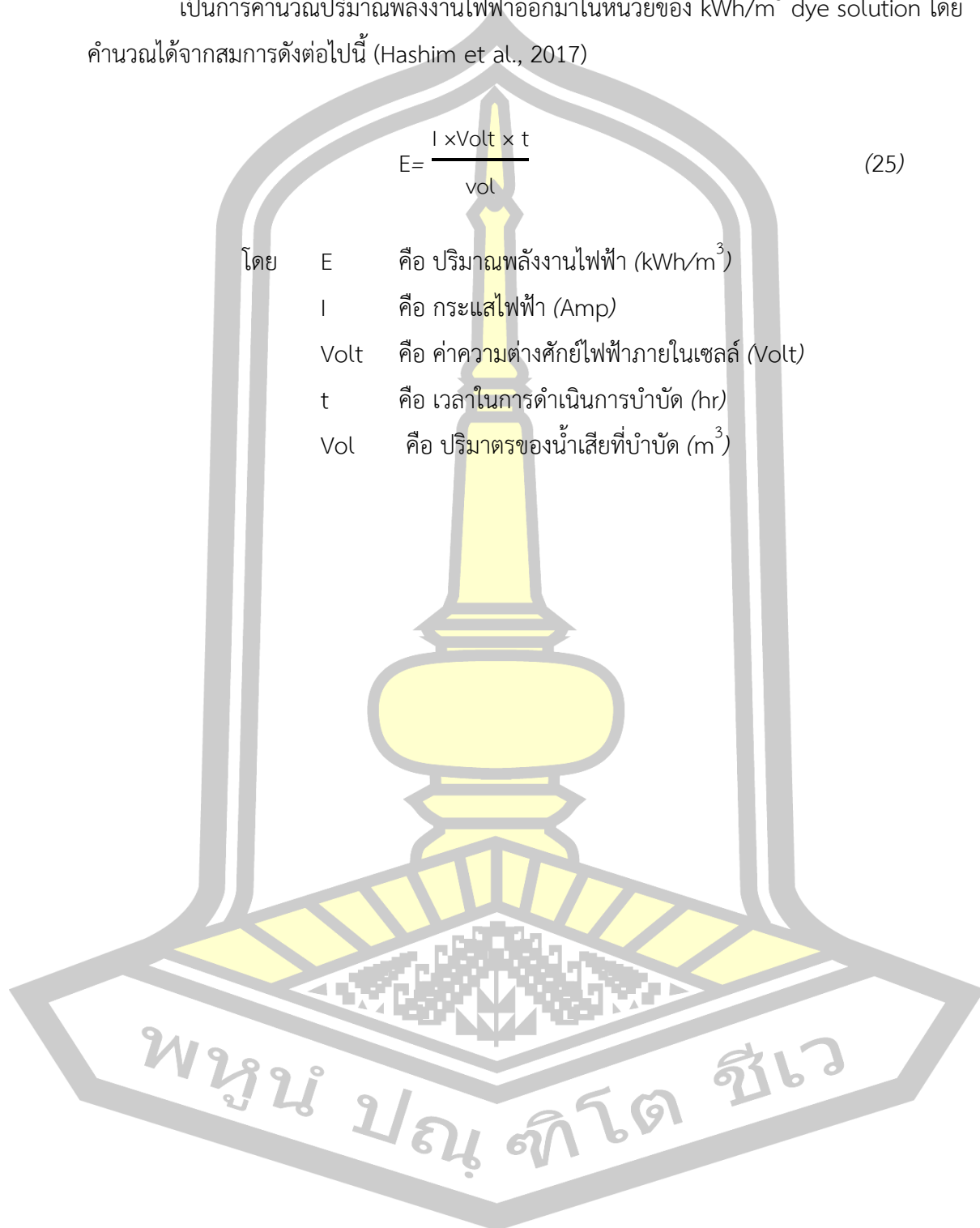
โดย C_{exp} คือ ความเข้มข้นของโลหะทั้งหมดจากการทดลอง (mg/L)
 W คือ ปริมาณโลหะละลายจากสมการฟาราเดย์ (มิลลิกรัม, mg)

3.6.10 การคำนวณปริมาณพลังงานที่ใช้ (Energy consumption)

เป็นการคำนวณปริมาณพลังงานไฟฟ้าออกมาในหน่วยของ kWh/m³ dye solution โดยคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Hashim et al., 2017)

$$E = \frac{I \times \text{Volt} \times t}{\text{vol}} \quad (25)$$

โดย	E	คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh/m ³)
	I	คือ กระแสไฟฟ้า (Amp)
	Volt	คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ (Volt)
	t	คือ เวลาในการดำเนินการบำบัด (hr)
	Vol	คือ ปริมาตรของน้ำเสียที่บำบัด (m ³)



บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำเพื่อจุดประสงค์ของการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดต่อกระแสไฟฟ้า ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี สำหรับสีย้อมใหม่ที่ศึกษาเป็นชนิดสีแดง โทนสีแดง (Acid red 114) ประกอบกับการศึกษาอิเล็กโทรด 2 ชนิดคือ อลูมิเนียม และเหล็ก ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากหาง่าย ราคาถูก และยังให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงอีกด้วย ทั้งนี้ การวิจัยยังได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี ได้แก่ การศึกษาสภาวะความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อม การศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบ ศึกษาระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ขั้ว การศึกษาผลของการเติม NaCl เพื่อปรับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสีย้อม เพื่อวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการบำบัดที่เกิดขึ้น จากนั้นนำผลการทดลองจากปัจจัยข้างต้นเป็นตัวกำหนดสภาวะในการศึกษาอิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรด และการศึกษาสัดส่วนของขนาดพื้นที่อิเล็กโทรดต่อกระแสไฟฟ้า รวมถึงการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) โดยจะมีหัวข้อสำหรับการอภิปรายผลการทดลองดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมและเหล็ก ได้แก่ ปัจจัยค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด การเติม NaCl

ส่วนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรด การศึกษาสัดส่วนขนาดอิเล็กโทรดต่อกระแสไฟฟ้า ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมและเหล็ก

ส่วนที่ 3 ปริมาณโลหะละลาย และการวิเคราะห์ผลการศึกษาเปรียบเทียบกับกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

ส่วนที่ 4 ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการดำเนินระบบ

พูน ปรณ ทิโต ชิว

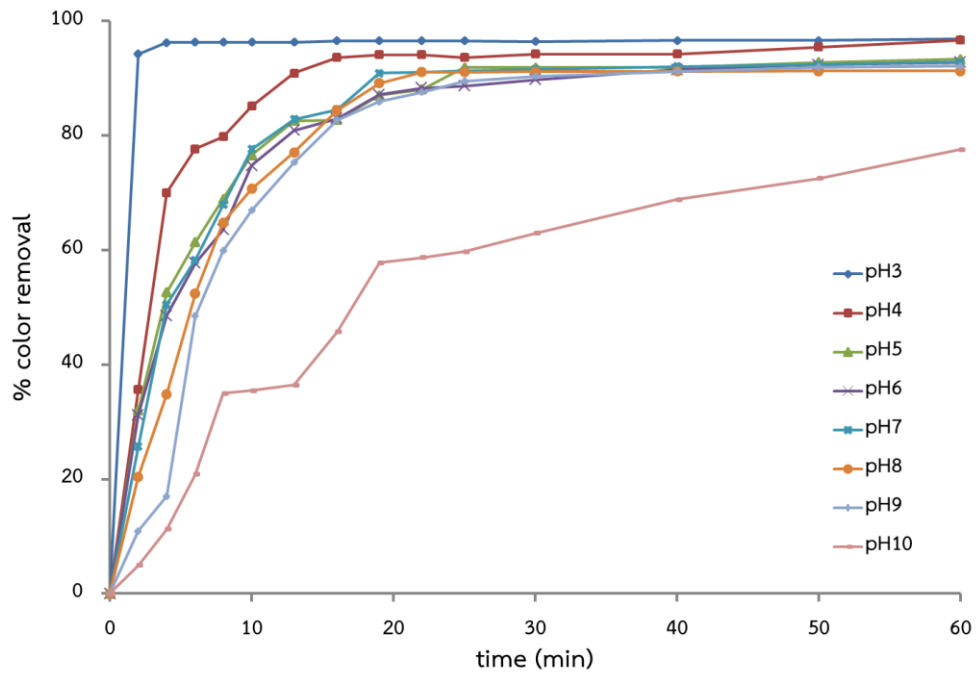
4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Al)

4.1.1 อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อม

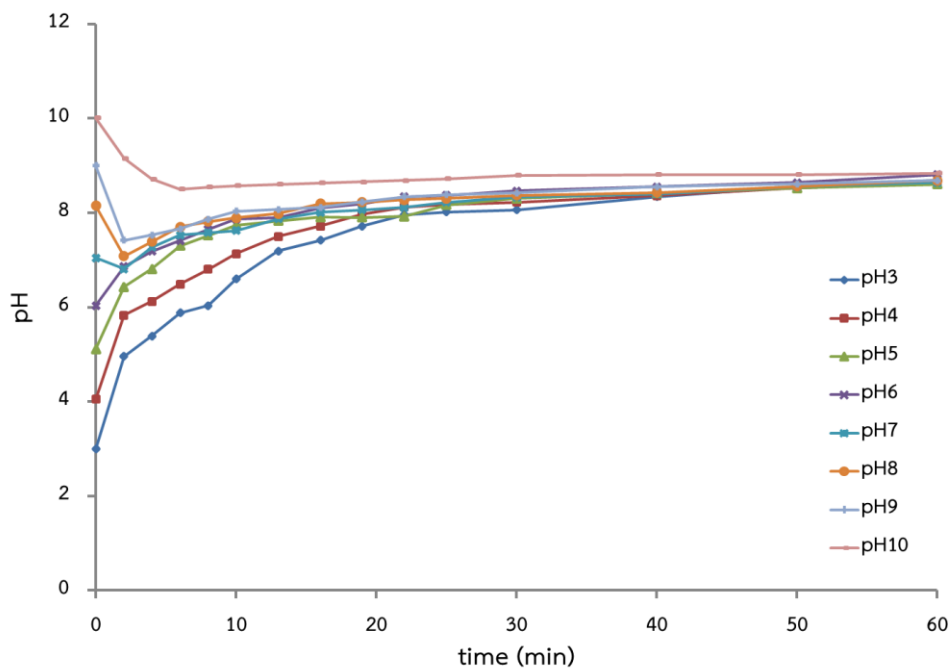
การวิจัยทำการทดสอบสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสีย้อมเริ่มต้นในช่วง 3-10 กำหนดกระแสไฟที่ใช้ทดสอบคือ 0.5 A ขนาดอิเล็กโทรด 40 cm² (2 cm) ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 400 mg/l ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm และระยะเวลาการทดลองตั้งแต่เวลา 0-60 นาที พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการบำบัดค่อยๆเพิ่มขึ้น เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งระบบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ จากภาพที่ 4-15 สังเกตเห็นว่า pH เริ่มต้น 3 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงตั้งแต่ 2 นาทีแรก (94%) จากนั้นเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 96% รองลงมาคือ pH เริ่มต้น 4 ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 96% สำหรับค่า pH เริ่มต้นระหว่าง 5-9 ประสิทธิภาพการบำบัดสุดท้ายมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน (91%-93%) และที่ค่า pH เริ่มต้น 10 ซึ่งมีความเป็นต่างมาก สังเกตเห็นได้ชัดว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดน้อยกว่าค่า pH อื่นๆ คืออยู่ที่ 77%

การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองพบว่า ถ้า pH เริ่มต้นมีความเป็นกรด (pH 3-6) เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าค่า pH จะค่อยๆเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน/รีดักชัน ทำให้เกิดประจุบวกของ Al³⁺ ที่ขั้วบวก และเกิด OH⁻ ที่ขั้วลบ แต่เมื่อ pH เริ่มต้นอยู่ระหว่าง 7-10 พบว่า pH มีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากที่ pH ในช่วงดังกล่าว OH⁻ ที่ละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยากับ Al³⁺ และเกิดเป็น Al(OH)₂⁺, Al(OH)₂²⁺ (monomeric species) และเกิดเป็น Al₆(OH)₁₅³⁺, Al₇(OH)₁₇⁴⁺, Al₁₃(OH)₃₄⁵⁺ (polymeric species) จากนั้นเปลี่ยนรูปเป็นของแข็ง Al(OH)_{3(s)} (Amorphous) โดยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากนั้นระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 40 นาที ซึ่งมีค่า pH ของระบบอยู่ในช่วง 8.6-8.84 การที่ค่า pH ของระบบในสภาวะสมดุลไม่เปลี่ยนแปลงนั้น เนื่องจาก Al³⁺ และ OH⁻ ที่เกิดขึ้นเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ทำให้เปลี่ยนรูปเป็น Al(OH)_{3(s)} ทั้งนี้ ดังนั้นค่า pH ของระบบในสภาวะสมดุลจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง (Merzouk et al., 2009) ในกรณี pH เป็นด่าง Al³⁺ มีการแตกตัวจากขั้วอิเล็กโทรด และ OH⁻ ในระบบมีอยู่แล้วถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับ Al³⁺ และ OH⁻ ที่เกิดขึ้นเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ทำให้เปลี่ยนรูปเป็น Al(OH)_{3(s)} ได้ทันทีส่งผลให้ pH ของระบบลดลงและเข้าสู่สมดุล ดังภาพที่ 4-16

ลักษณะกลไกการกำจัดน้ำเสียสีย้อมข้างต้น สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเดินระบบค่า pH มีความเป็นกรดจะเพิ่มขึ้นจะมีสภาวะเป็นด่างจึงเกิดสารรวมตะกอนและเกิดกระบวนการดูดซับสีทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-15 อิทธิพลของค่า pH เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม, กระแสไฟฟ้า 0.5 A



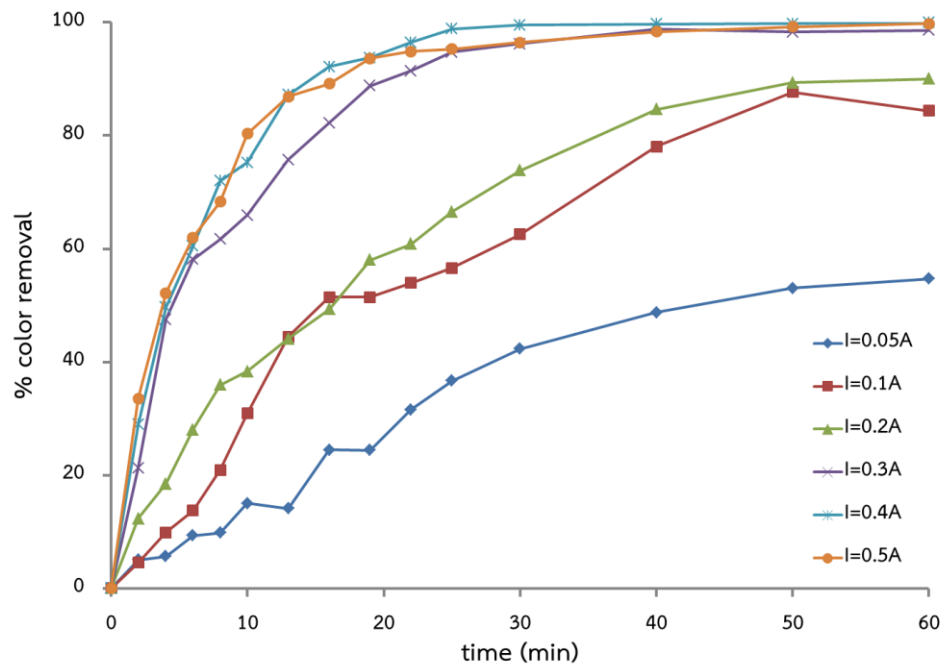
ภาพที่ 4-16 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อเวลา (การทดสอบอิทธิพลของค่า pH เริ่มต้น) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม, กระแสไฟฟ้า 0.5 A

4.1.2 อิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบ

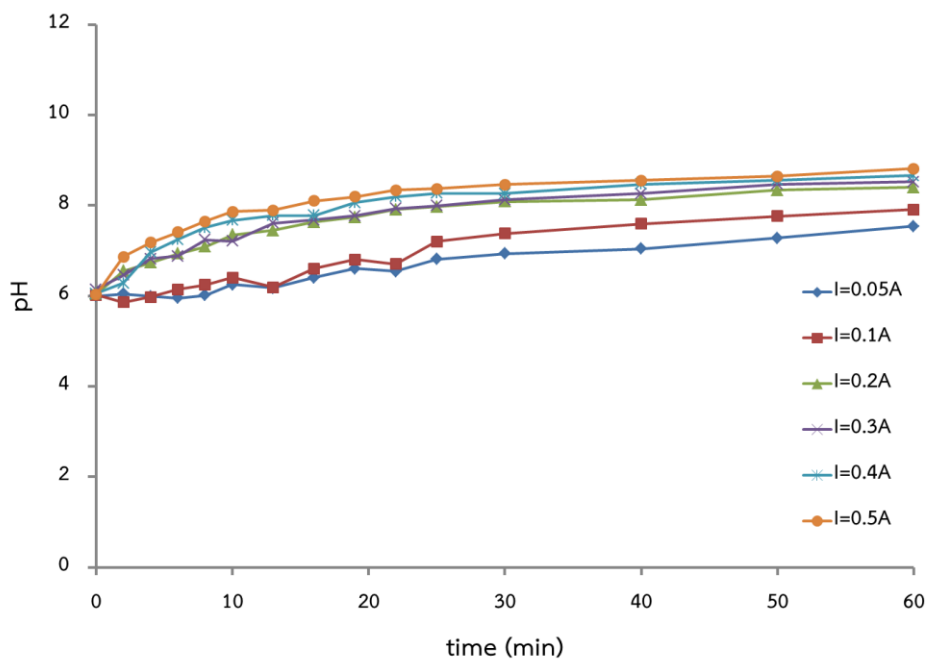
ทำการศึกษาศักยภาพด้านปริมาณกระแสไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 0.05-0.5 A โดยกำหนดขนาดอิเล็กโทรด 40 cm² (2 cm) ค่า pH ของน้ำเสียสีย้อมเริ่มต้นที่ 6 ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm และระยะเวลาการทดลอง 0-60 นาที ผลการศึกษาพบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้นตามไปด้วย โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 0.05 A ให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้อยที่สุดคือ 58% ถัดมาคือกระแสไฟฟ้า 0.1 A และ 0.2 A มีประสิทธิภาพการบำบัดคือ 84.4% และ 90% ตามลำดับ สำหรับปริมาณกระแสไฟ 0.3-0.5 A ให้ประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกันอยู่ที่ 98.6%, 100% และ 99.7% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-17 ทั้งนี้ กระแสไฟที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพการบำบัดที่รวดเร็วขึ้น เนื่องจากการให้กระแสไฟที่สูงขึ้นนั้น ทำให้ปฏิกิริยา Redox เพิ่มมากขึ้น Al³⁺ มีอัตราการเกิดเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้เกิด Al(OH)₃ มากขึ้น เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) เพื่อจับตัวกับสารมลพิษเป็นก้อนตะกอนเพื่อตกตะกอนได้มากขึ้น (Modirshahla et al., 2007)

เมื่อวิเคราะห์ร่วมกับค่า pH พบค่า pH สุดท้ายอยู่ระหว่าง 8-9 ซึ่งค่า pH มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ที่กระแสไฟ 0.05-0.1 A มีค่า pH ใกล้เคียงกันและมีค่าน้อยกว่าที่กระแสไฟอื่นๆ โดยค่า pH สุดท้ายคือ 7.54-7.91 สำหรับกระแสไฟตั้งแต่ 0.2-0.5 A พบค่า pH สุดท้ายอยู่ที่ 8.4-8.81 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างดำเนินระบบมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า pH เข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 4-18 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มกระแสไฟฟ้าจนมากเกินไปเกินค่าที่เหมาะสม (Optimum) กลับไม่เพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด เนื่องจากปริมาณของโลหะละลายที่ออกมาจากอิเล็กโทรดขั้วบวกมีมากเกินไปจนพอสำหรับจับกับสารมลพิษที่ต้องการบำบัด (Khandegar and Saroha, 2013)





ภาพที่ 4-17 อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม



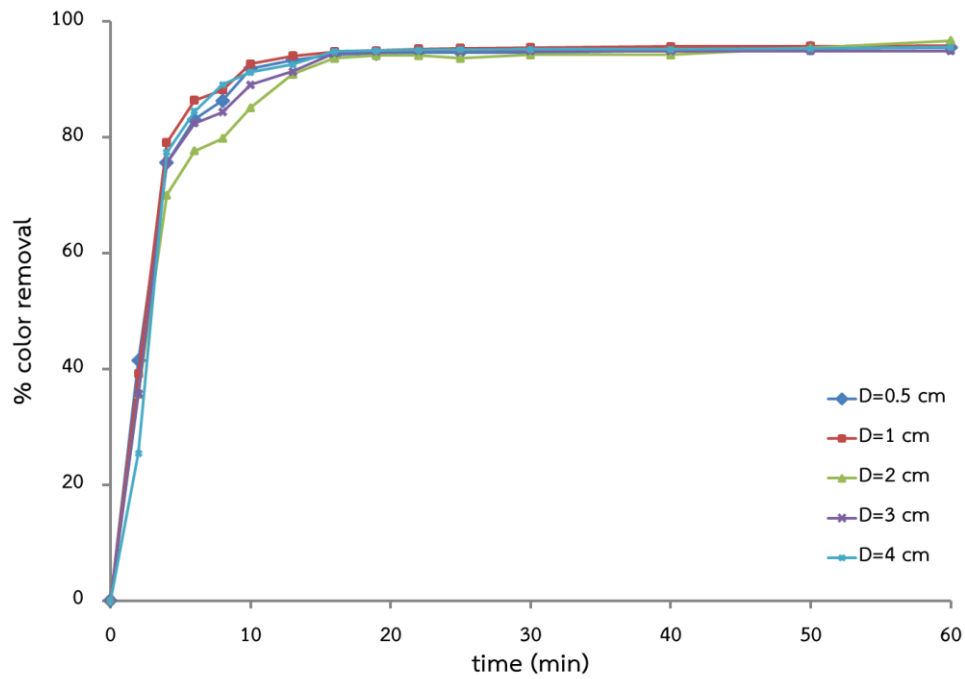
ภาพที่ 4-18 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อเวลา (การทดสอบอิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้า) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม

4.1.3 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

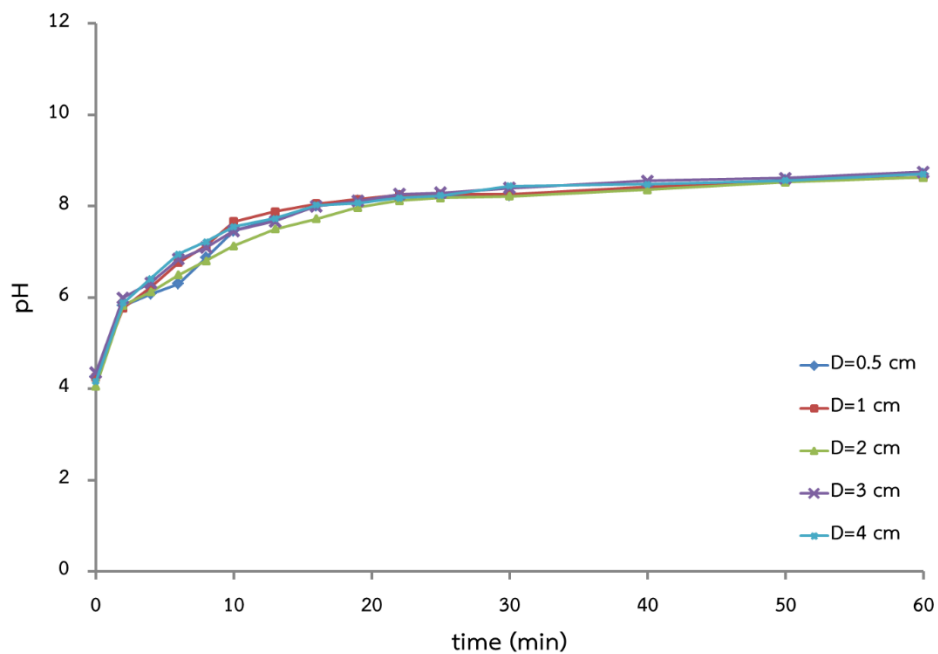
การวิจัยทำการทดสอบระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตั้งแต่ 0.5-4 cm กำหนดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบคือ 0.5 A ขนาดอิเล็กโทรด 40 cm^2 (2 cm) ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 400 mg/l ค่า pH เริ่มต้นเป็นค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จริง (pH 4.05-4.3) และระยะเวลาการทดลองตั้งแต่เวลา 0-60 นาที ผลการศึกษาพบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการบำบัดค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที ระบบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปและมีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่า pH อยู่ในช่วง 8.6-8.7 ทุกระยะห่างที่ทดสอบพบว่า มีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกัน โดยมีค่ามากกว่า 95% ดังภาพที่ 4-19 และภาพที่ 4-20

การที่ประสิทธิภาพการบำบัดและการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากการทดลองทดสอบกับกระแสไฟฟงที่ คือ 0.5 A จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพและค่า pH ที่เกิดขึ้นไม่แตกต่าง ซึ่งสอดคล้องกับกฎของฟาราเดย์ แต่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีผลโดยตรงต่อแรงดันไฟฟ้าที่ใช้และปริมาณพลังงานในการดำเนินระบบ เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจำเป็นต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Volt) ให้สูงขึ้นเพื่อรักษากระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบให้คงที่ ในทางกลับกัน เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นเป็น 4 cm พบว่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบลดลงจากค่าเริ่มต้นโดยพบว่ากระแสไฟฟ้าลดลงจาก 0.5 A เป็น 0.41 A อาจเนื่องมาจากขีดจำกัดของเครื่อง power supply ที่ใช้ในการทดลองที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้ประมาณ 63 volt แต่ด้วยระยะห่างที่มากขึ้นมีความต้องการแรงดันไฟฟ้าที่มากกว่า จึงทำให้กระแสไฟฟ้าที่เข้าระบบลดลง ในขณะที่แรงดันไฟฟงที่ ทั้งนี้ การเพิ่มแรงดันไฟฟ้ายังมีผลต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินระบบอีกด้วย โดยที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0.5 cm คำนวณปริมาณพลังงานที่ใช้ได้คือ $3,725 \text{ KW.hr/m}^3$ แต่ระยะห่างเพิ่มขึ้นเป็น 4 cm ปริมาณพลังงานที่ใช้มีจำนวนเพิ่มขึ้นเกือบ 5 เท่า นั่นคือ $15,250 \text{ KW.hr/m}^3$ ดังตารางที่ 4-6

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นข้างต้น สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมากขึ้น ขณะดำเนินการทดลองจะเกิดการลดลงของกระแสไฟฟ้าหลังจากดำเนินการทดลองไปสักระยะหนึ่ง จำเป็นต้องเพิ่มความต่างศักย์ให้มากขึ้นเพื่อรักษาความคงที่ของกระแสไฟฟ้า ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นจาก IR-drop (Ohmic drop, IR) สูง และมีผลยับยั้งต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวก (Nasrullah et al., 2014) ดังนั้น หากระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนจากสนามไฟฟ้าสถิต ซึ่งส่งผลต่อความต่างศักย์ไฟฟ้า การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นยังมีผลต่อกำลังไฟฟ้า (Watt) เชื่อมโยงไปถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ อันมีผลต่อค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น โดยระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ค่าของ IR-drop เพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Fayad, 2017)



ภาพที่ 4-19 อธิพจน์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม, กระแสไฟฟ้า 0.5 A



ภาพที่ 4-20 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อเวลา (การทดสอบอธิพจน์ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม, กระแสไฟฟ้า 0.5 A

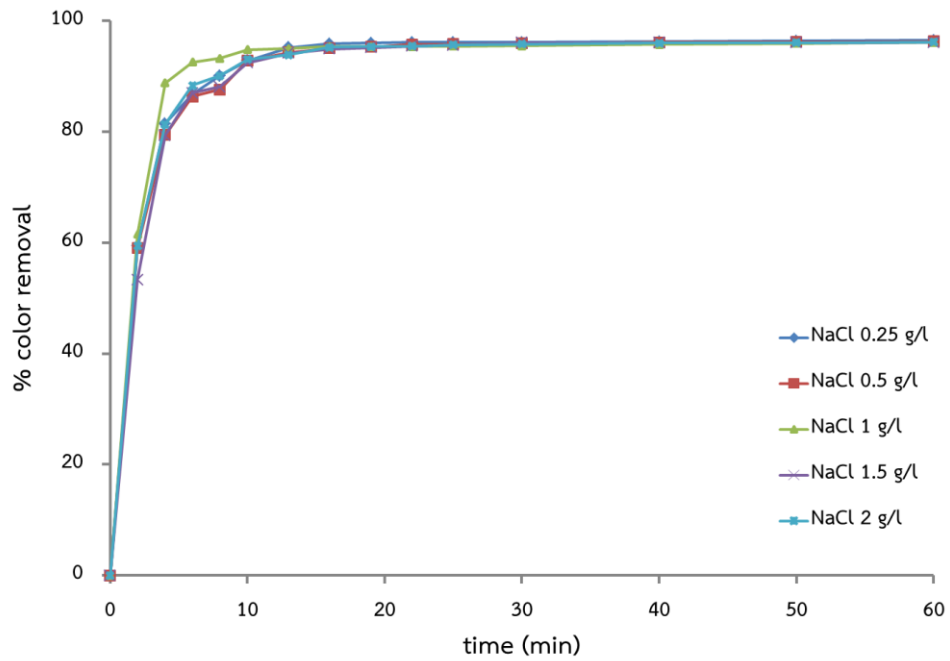
ตารางที่ 4-6 ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมที่เวลา 60 นาที, ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย, แรงดันไฟฟ้าเข้าระบบและปริมาณพลังงานที่ใช้ที่กระแสไฟฟ้า 0.5 A (ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม)

Distance (cm)	Cell voltage (volt)	Energy consumption (KW.hr/m ³)	% color removal
0.5	14.9	3,725	95.6
1	28.4	7,100	95.8
2	47.5	11,875	96.7
3	51	12,750	94.9
4	61	15,250	95.6

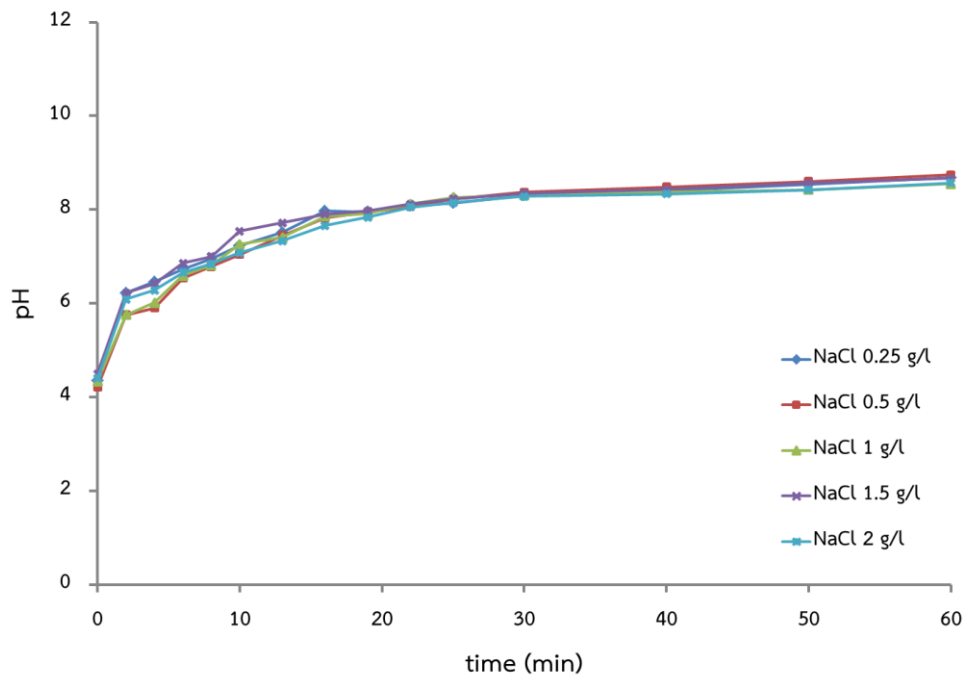
4.1.4 อิทธิพลของการเติม NaCl

การวิจัยทำการทดสอบการเติม NaCl จำนวน 0.5-4 g โดยคิดเป็นปริมาณ 0.25-2 g/l กำหนดกระแสไฟที่ใช้ทดสอบคือ 0.5 A ขนาดอิเล็กโทรด 40 cm² (2 cm) ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 400 mg/l ค่า pH เริ่มต้นเป็นค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จริง (pH 4.2-4.3) และระยะเวลาการทดลองตั้งแต่เวลา 0-60 นาที ผลการศึกษาพบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการบำบัดค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที ระบบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ มีประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกัน ซึ่งมีความมากกว่า 95% ดังภาพที่ 4-21 ในส่วนของค่า pH ในระบบมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อดำเนินการทดลองเสร็จสิ้นพบว่าค่า pH สุดท้ายอยู่ที่ 8.5-8.7 ดังภาพที่ 4-22

เมื่อพิจารณาถึงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียจากการเติม NaCl พบว่า การเติม NaCl สามารถเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ให้สูงขึ้นจาก 0.73 mS/m (NaCl 0.25 g/l) เป็น 2.67 mS/m (NaCl 2 g/l) ในขณะที่เดียวกันยังลดการใช้แรงดันไฟฟ้าจาก 23.4 volt เหลือเพียง 6.7 volt ที่สำคัญยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบได้จาก 5,850 KW.hr/m³ เหลือเพียง 1,675 KW.hr/m³ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ NaCl เป็นการเพิ่มจำนวนไอออนในน้ำเสีย อีกทั้งยังลดแรงต้านทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด อันมีผลต่อการลดแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ใช้กระแสไฟเท่าเดิม นำไปสู่การลดจำนวนพลังงานที่ใช้อีกด้วย (Ahangarnokolaei et al., 2018; Nandi and Patel, 2017) แสดงดังตารางที่ 4-5 อย่างไรก็ตาม การทดสอบปัจจัยเป็นการทดลองกับกระแสไฟเข้าระบบคงที่ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัด และการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในระบบไม่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ แต่การเติม NaCl มีผลอย่างมากต่อแรงดันไฟฟ้าที่ใช้และปริมาณพลังงานในการดำเนินระบบดังผลการศึกษาข้างต้น



ภาพที่ 4-21 อิทธิพลของการเติม NaCl ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม, กระแสไฟฟ้า 0.5 A



ภาพที่ 4-22 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่อเวลา (อิทธิพลของการเติม NaCl) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม, กระแสไฟฟ้า 0.5 A

ตารางที่ 4-7 ผลของปริมาณ NaCl ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมที่เวลา 60 นาที, ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย, แรงดันไฟฟ้าเข้าระบบและปริมาณพลังงานที่ใช้ที่กระแสไฟฟ้า 0.5 A (ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม)

ปริมาณ NaCl (g/l)	Conductivity (mS/m)	Cell voltage (volt)	Energy consumption (KW.hr/m ³)	% color removal
0.25	0.73	23.4	5,850	96.5
0.5	0.98	16.8	4,200	96.3
1	1.49	10.7	2,675	96.1
1.5	2.06	7.8	1,950	96.1
2	2.67	6.7	1,675	96.2

4.2 การศึกษาอิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Al)

4.2.1 อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดต่อกระแสไฟฟ้า

การศึกษานี้เป็นการศึกษาอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่แตกต่างกันตั้งแต่ 4, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 cm² (ความกว้างของอิเล็กโทรดคือ 0.2, 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 cm) ทดสอบกับกระแสไฟฟ้าเข้าระบบต่ำสุดคือ 0.05 A และกระแสไฟฟ้าเข้าระบบสูงสุดคือ 0.3 A สำหรับการทดสอบการอิเล็กโทรดขนาด 4-10 cm² และกระแสไฟ 0.5 A สำหรับการทดสอบการอิเล็กโทรดตั้งแต่ 20 cm² ขึ้นไป เพื่อวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสียที่ย้อมใหม่ และการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ระหว่างดำเนินระบบ ขั้นตอนและรายละเอียดการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-14 จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเสียที่ได้ไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ภายใต้สมมติฐานการทดลองคือ เมื่ออิเล็กโทรดมีขนาดพื้นที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแสไฟฟ้าเข้าระบบเท่าเดิม ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสียที่ย้อมจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ผลการศึกษาเป็นไปดังหัวข้อต่อไปนี้

4.2.1.1 การทดสอบกับกระแสไฟฟ้า (ต่ำสุด) 0.05 A

ทำการทดลองโดยกำหนดกระแสไฟที่ใช้ทดสอบคือ 0.05 A ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 400 mg/l ค่า pH เริ่มต้นเป็นค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จริง (pH 4.09-4.28) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm และระยะเวลาการทดลองตั้งแต่เวลา 0-60 นาที ผลการศึกษาพบว่าในขณะที่ให้กระแสไฟฟ้าคงที่ เมื่อเวลาการดำเนินระบบผ่านไป ประสิทธิภาพการบำบัดค่อยๆเพิ่มขึ้น โดยอิเล็กโทรดขนาดเล็กที่สุดคือ 4 cm² การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการบำบัดค่อยๆเพิ่มขึ้น เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 77% ส่วนอิเล็กโทรดที่มีขนาดตั้งแต่ 10 cm² ขึ้นไป ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ในช่วงเวลาการดำเนินระบบประมาณ 22-

25 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 87.2%, 89.8%, 90.5%, 84%, 93.1% และ 89.6% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-23 สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ระหว่างการทดลองนั้นพบว่า เมื่อระยะเวลาการเดินผ่านไป ค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีค่า pH สุดท้ายอยู่ที่ 6.94, 6.68, 6.94, 7.14, 7.44, 7.57 และ 7.24 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-24

4.2.1.2 การทดสอบกับกระแสไฟฟ้า (สูงสุด) 0.3-0.5 A

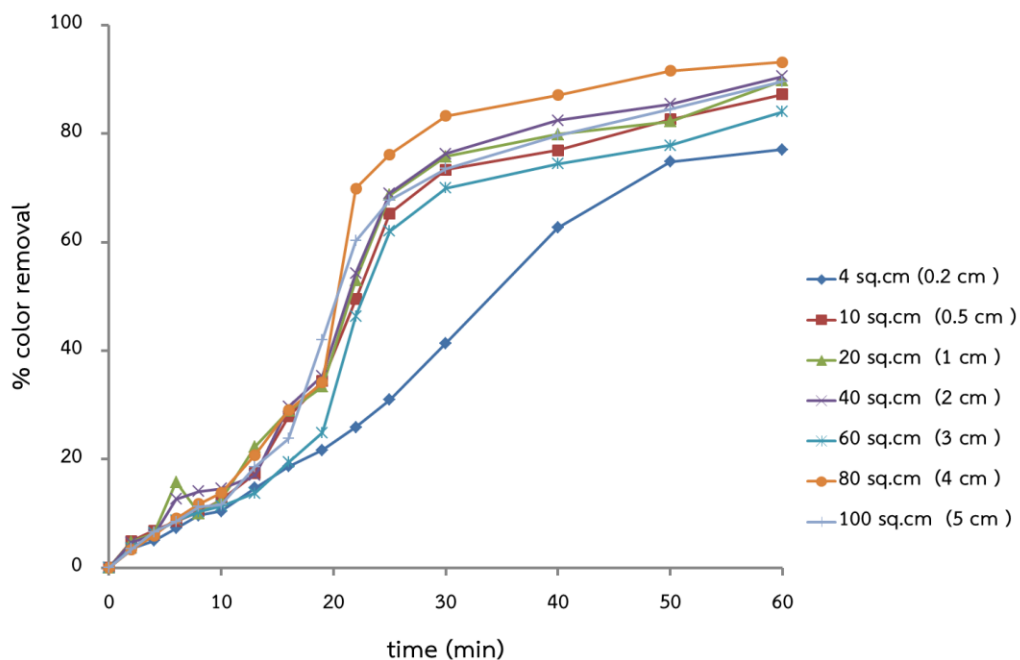
กำหนดกระแสไฟที่ใช้ทดสอบคือ 0.3 A ($4-10 \text{ cm}^2$) และกระแสไฟ 0.5 A ($20-100 \text{ cm}^2$) ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 400 mg/l ค่า pH เริ่มต้นเป็นค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จริง (pH 4.16-4.3) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm และระยะเวลาการทดลองตั้งแต่เวลา 0-60 นาที ผลการศึกษาพบว่า อิเล็กโทรดขนาด $4-10 \text{ cm}^2$ มีประสิทธิภาพการบำบัดเริ่มต้นต่ำกว่าอิเล็กโทรดขนาดตั้งแต่ 20 cm^2 ขึ้นไป แต่เมื่อระยะเวลาการดำเนินระบบผ่านไป 40 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดของอิเล็กโทรดทุกขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกันในช่วง 93.3-94.8% และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีประสิทธิภาพการบำบัด 95.2% และ 95.1% ในส่วนของอิเล็กโทรดขนาดตั้งแต่ 20 cm^2 ขึ้นไป ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นมากกว่า 90% อย่างรวดเร็วในเวลาเพียง 10 นาที จากนั้นเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 95.2, 95.2, 94.7, 94.4 และ 94.9% ดังภาพที่ 4-25 สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่า pH พบว่า ค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่า pH สุดท้าย คือ 8, 8.18, 8.39, 8.68, 8.74, 8.84 และ 8.49 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-26

จากหัวข้อ 4.2.1.1 และ 4.2.1.2 ได้อธิบายผลการศึกษาศึกษาการทดสอบขนาดอิเล็กโทรดต่อกระแสไฟฟ้าไปแล้วนั้น ในขณะที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.05 A แม้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดสุดท้ายมีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน แต่ในระหว่างดำเนินระบบกลับพบว่า ที่ขนาดอิเล็กโทรดใหญ่ขึ้น มีประสิทธิภาพการบำบัดและยังมีค่า pH ในระบบสูงกว่าอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กลง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 22-25 นาที ในส่วนของอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กมากคือ 4 cm^2 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ก่อนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 50 นาที และให้ประสิทธิภาพการบำบัดสุดท้ายต่ำที่สุด รวมถึงค่า pH ในระบบน้อยกว่าเมื่อเทียบกับขนาดอื่นๆ

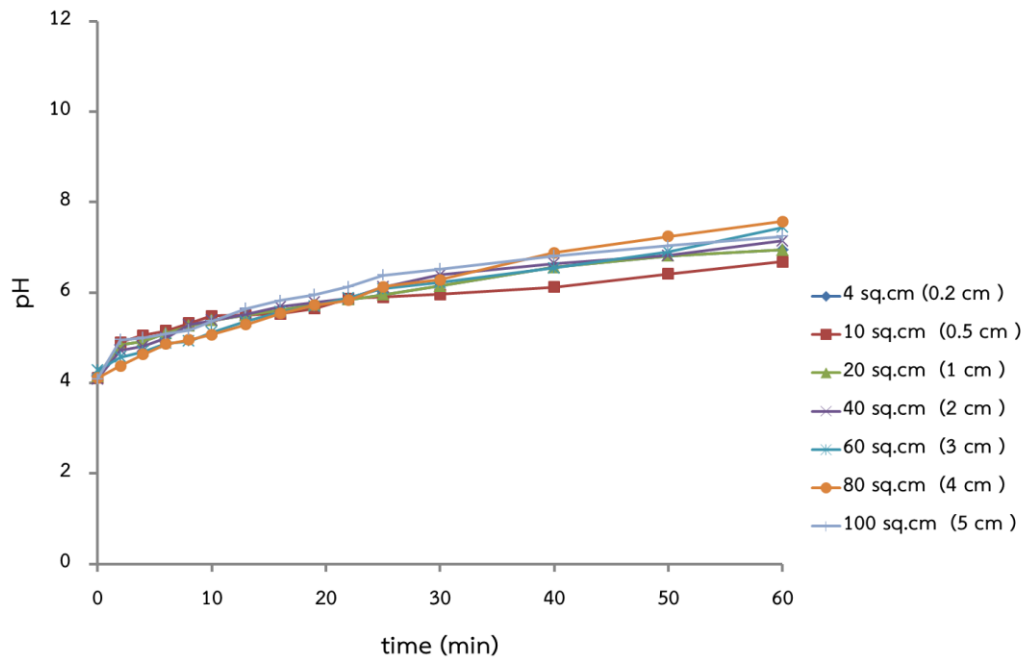
อิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กมากๆ คือ 4 และ 10 cm^2 มีข้อจำกัดในการรองรับกระแสไฟฟ้า โดยจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น เพื่อจ่ายกระแสไฟให้ได้สูงสุด แต่ทั้งนี้ ด้วยข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดกระแสไฟ (power supply) ที่ใช้ในการทดลอง จึงไม่สามารถทดสอบกับการจ่ายกระแสไฟให้มากกว่า 0.3 A ได้ สำหรับอิเล็กโทรดที่มีขนาดตั้งแต่ $20-100 \text{ cm}^2$ สามารถทดสอบด้วยกระแสไฟที่มากขึ้นอีก นั่นคือ 0.5 A จากผลการศึกษาที่ได้ เห็นได้ชัดว่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียเสีย้มมากกว่า 90% เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 10 นาที และมีค่า pH ในระบบ มีค่าไม่แตกต่างกัน

การเพิ่มขนาดพื้นที่อิเล็กโทรดยังส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบ ถ้าอิเล็กโทรดมีขนาดใหญ่ขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่เข้าระบบจะลดลง ในขณะที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่าเดิม เมื่อทดสอบกับกระแสไฟฟ้า 0.05 A กับอิเล็กโทรดขนาด 4 cm² ใช้แรงดันไฟฟ้ามากที่สุดคือ 14.2 volt สำหรับอิเล็กโทรดขนาดใหญ่ที่สุด 100 cm² สามารถลดแรงดันไฟฟ้าเข้าระบบได้เกือบสามเท่า ซึ่งใช้แรงดันไฟอยู่ที่ 4.8 volt แต่เมื่อทดสอบกับกระแสไฟมากขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ย่อมสูงขึ้นตามไปด้วย ดังตารางที่ 4-8 ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎของโอห์ม (Ohm's law) เนื่องจากความต้านทาน (resistance) ของโลหะจะแปรผกผันกับภาคตัดขวาง (surface area) ของลวดโลหะ เมื่อความยาวของโลหะคงที่ กล่าวคือ เมื่ออิเล็กโทรดความยาวเท่ากัน แต่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่ขึ้นส่งผลให้มีความต้านทานต่ำทำให้ใช้แรงดันไฟฟ้าน้อยลงในขณะที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากัน ในทางกลับกันอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็ก ทำให้มีความต้านทานสูงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟสูงขึ้นในการจ่ายกระแสไฟฟ้าปริมาณเท่ากันเข้าสู่ระบบ (Meaden, 1965)

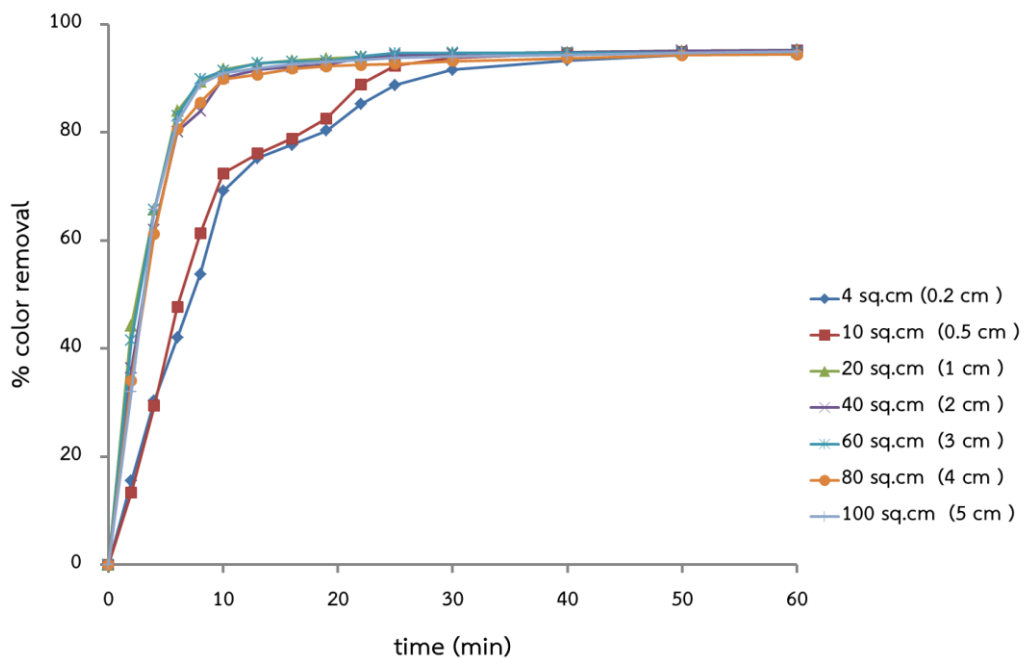
การเพิ่มขนาดของอิเล็กโทรด ในขณะที่ให้กระแสไฟฟ้าคงที่ ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยในระหว่างดำเนินการระบบอิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าอิเล็กโทรดขนาดเล็กลง ทั้งนี้ การใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นยังสามารถลดแรงดันไฟฟ้าเข้าระบบในขณะที่ใช้กระแสไฟฟ้าเท่าเดิมได้อีกด้วย



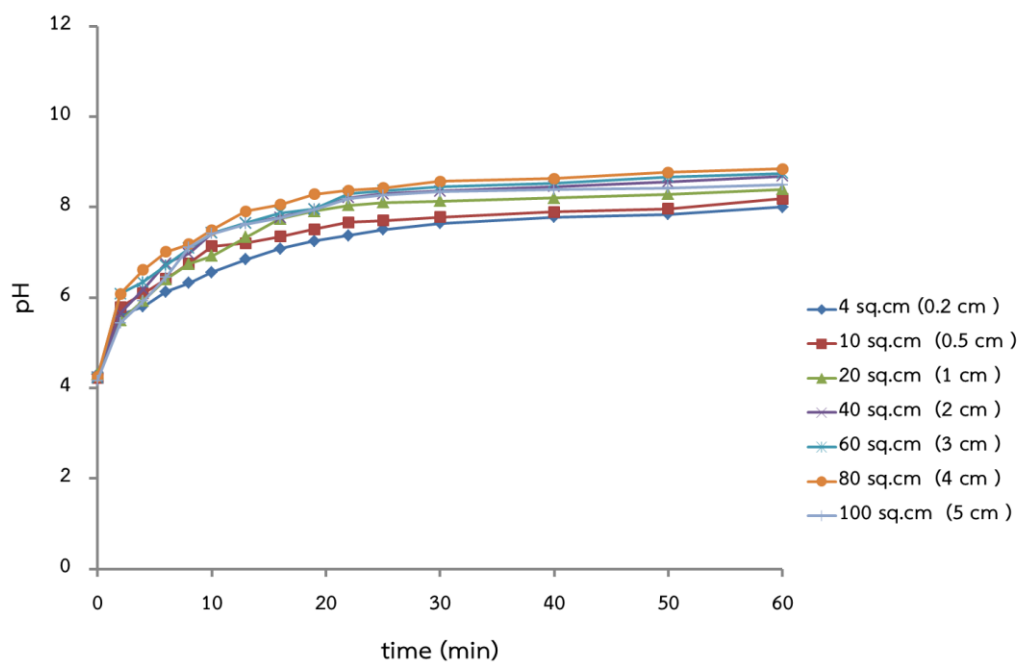
ภาพที่ 4-23 อธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (ต่ำสุด) 0.05 A ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม



ภาพที่ 4-24 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่อเวลา (อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (ต่ำสุด) 0.05 A โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม



ภาพที่ 4-25 อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (สูงสุด) 0.3-0.5 A ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม



ภาพที่ 4-26 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่อเวลา (อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (สูงสุด) 0.3-0.5 A โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม)

ตารางที่ 4-8 ผลของแรงดันไฟฟ้า, ประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลา 60 นาที ตามขนาดของอิเล็กโทรด (ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม)

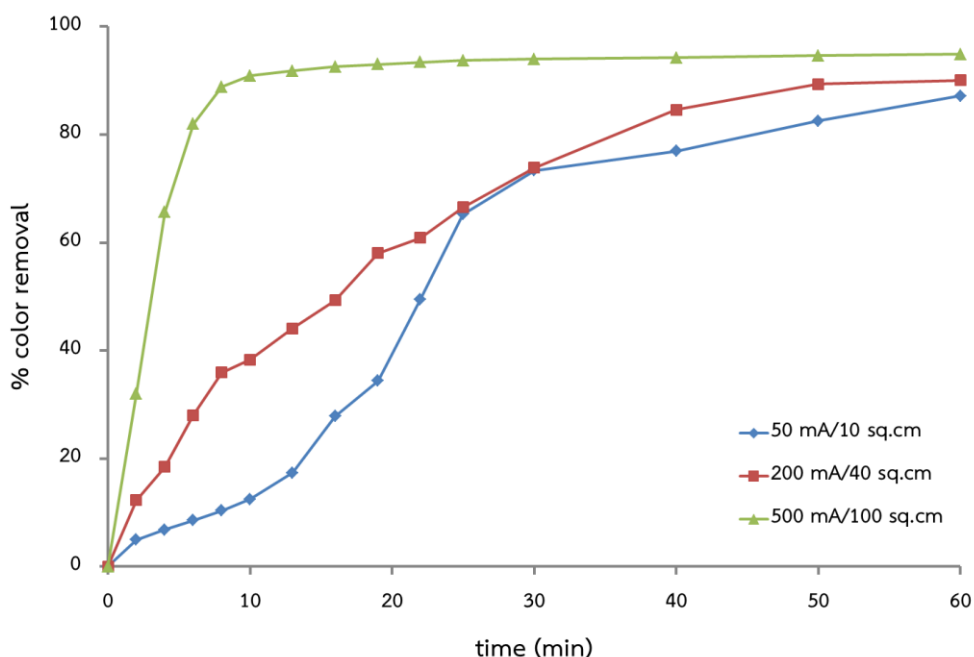
ขนาดอิเล็กโทรด (cm ²)	Cell voltage (volt)		% color removal	
	I= 0.05 A	I= 0.3-0.5 A	I= 0.05 A	I= 0.3-0.5 A
4	14.2	57	77.0	95.2
10	12	52.4	87.2	95.1
20	9	62.3	89.8	95.2
40	6.9	42.8	90.5	95.2
60	5.5	35.6	84.0	94.7
80	5.5	28.4	93.1	94.4
100	4.8	24.8	89.6	94.9

4.2.2 อิทธิพลของสัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรด

โดยทั่วไปการออกแบบกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีมักออกแบบกระแสไฟฟ้าที่เข้าระบบ โดยคิดเป็นสัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรด (current density, I/A) (Hakizimana et al., 2017) งานวิจัยชิ้นนี้จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสียสีย้อม ด้วยการกำหนดสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรดคงที่คือ 5 mA/cm^2 ภายใต้สมมติฐานคือ เมื่อสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรดคงที่ ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถคำนวณออกมาได้เป็นกระแสไฟฟ้าที่ 50, 200 และ 500 mA ต่อขนาดพื้นที่อิเล็กโทรด 10, 40 และ 100 cm^2 ตามลำดับ ทำการทดสอบกับความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 400 mg/l ค่า pH เริ่มต้นเป็นค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จริง ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm และระยะเวลาการทดลองตั้งแต่วเวลา 0-60 นาที ผลการศึกษาพบว่า ขณะที่กำหนดสัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรดเท่ากัน เมื่อดำเนินระบบผ่านไป 10 นาที การเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าระบบจาก 50 mA (10 cm^2) เป็น 200 mA (40 cm^2) และ 500 mA (100 cm^2) ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมเพิ่มขึ้น 12.5%, 38.3% และ 90.9% ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 87.2%, 90% และ 94.9% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-27

ด้านผลงานวิจัยอื่นๆ ทำการทดสอบการเพิ่มสัดส่วน I/A ในขณะที่ขนาดพื้นที่อิเล็กโทรดเท่าเดิม โดยพบว่าการเพิ่มสัดส่วน I/A ในช่วง $100\text{-}1,200 \text{ mA/cm}^2$ (ขนาดพื้นที่อิเล็กโทรด 20 cm^2) เมื่อเพิ่มสัดส่วน I/A จาก 100 mA/cm^2 เป็น 400 mA/cm^2 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมเพิ่มขึ้นจาก 65% เป็น 92% สำหรับบำบัดสี acid black 52 และประสิทธิภาพเพิ่มเป็น 97% ในการบำบัดสี acid yellow 220 แต่เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้ามากจนถึง $1,200 \text{ mA/cm}^2$ ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นค่อนข้างไม่เปลี่ยนแปลง (Pajootan et al., 2012) ในทำนองเดียวกันอีกหนึ่งงานวิจัยของ Merzouk et al., 2009 การเพิ่มสัดส่วน I/A จาก 20.83 mA/cm^2 เป็น 62.5 mA/cm^2 (ขนาดพื้นที่อิเล็กโทรด 48 cm^2) ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเป็น 78-93% แต่เมื่อสัดส่วน I/A มากกว่า 31.25 mA/cm^2 ขึ้นไป ประสิทธิภาพค่อนข้างไม่แตกต่างกัน

แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนของกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรด (I/A) ไม่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัด แต่กระแสไฟฟ้า (current, I) ที่เข้าระบบมีผลอย่างชัดเจน ถึงแม้ว่าจะกำหนดสัดส่วน I/A เท่ากัน ประสิทธิภาพการบำบัดกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้น การออกแบบกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี ควรคำนึงถึงกระแสไฟฟ้าที่เข้าระบบเป็นสำคัญ (key parameter)



ภาพที่ 4-27 อิทธิพลของสัดส่วน I/A (5 mA/cm^2) ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม

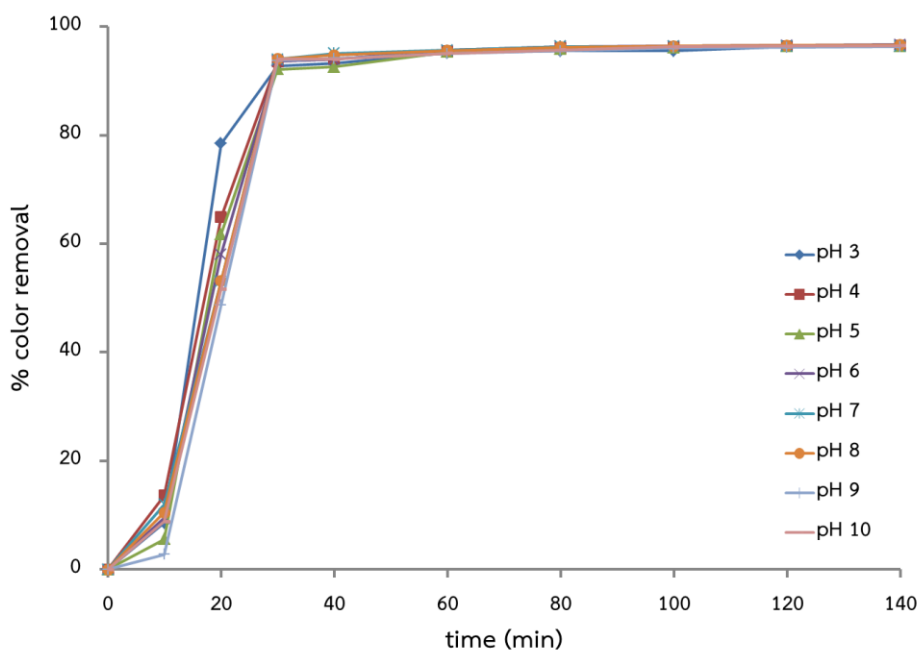
4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีข้อมด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก (Fe)

4.3.1 อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้นของน้ำเสียสีข้อม

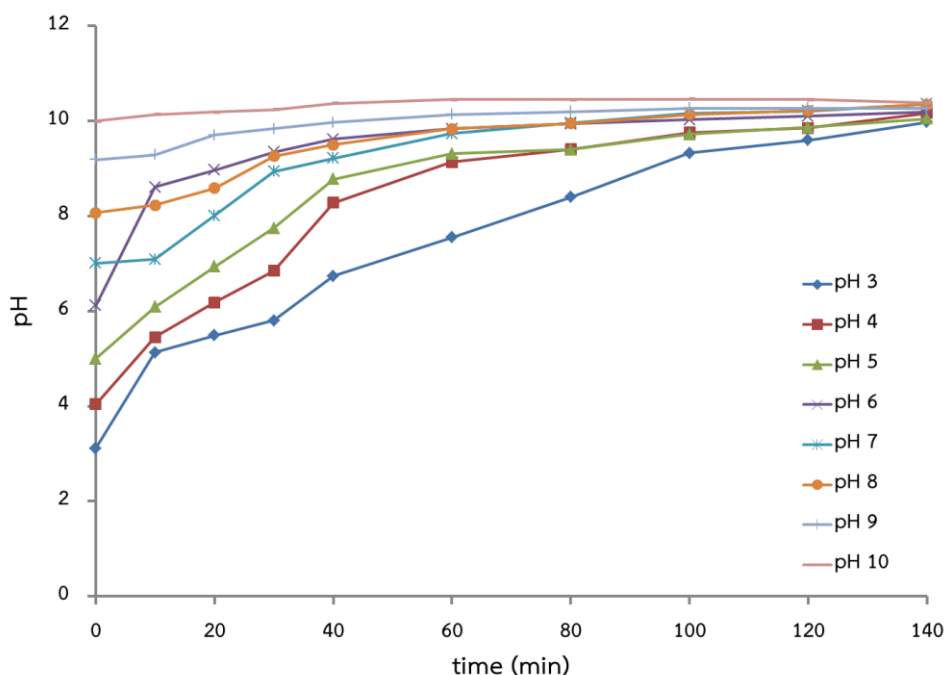
การวิจัยทำการทดสอบสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสีข้อมเริ่มต้นในช่วง 3-10 กำหนดกระแสไฟที่ใช้ทดสอบคือ 0.5 A ขนาดอิเล็กโทรด 40 cm^2 (2 cm) ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 400 mg/l ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm และระยะเวลาการทดลองตั้งแต่เวลา 0-140 นาที พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการบำบัดค่อยๆเพิ่มขึ้น เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งระบบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ จากภาพที่ 4-28 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นมากกว่า 90% ในเวลา 30 นาที (มีค่า pH ในระบบใกล้เคียงหรือมากกว่า 6) จากนั้นเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 96.5%, 96.6%, 96.3%, 96.7%, 96.4%, 96.6%, 96.3% และ 96.5% ตามลำดับ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ระหว่างการทดลองพบว่า เมื่อค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียมีสภาพเป็นกรด และสภาพเป็นกลาง (pH 3-7) ค่า pH จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และมีค่า pH สุดท้ายเข้าใกล้ช่วง 9.98-10.17 สำหรับ pH เริ่มต้นตั้งแต่ pH 8-9 เมื่อเวลาผ่านไปจะมีค่าเพิ่มขึ้นแตกต่างกับค่า pH สุดท้ายเล็กน้อย ซึ่งมีค่า pH สุดท้ายคือ 10.35 และ 10.27 ตามลำดับ สำหรับ pH 10 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยมีค่า pH สุดท้ายอยู่ที่ 10.39 ดังภาพที่ 4-29

สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าความแตกต่างของค่า pH เริ่มต้นไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสียสีขี้อม เนื่องจากเหล็ก (Fe) เมื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) เกิดเป็น Fe(OH)_2 และ $\text{Fe(OH)}_{3(s)}$ จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในระบบ โดยในช่วงค่า pH 2-6 การละลายของ Fe^{2+} ในน้ำเสียเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวก (anode) ในขณะเดียวกันขั้วลบ (cathode) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิดเป็น OH^- และ H_2 จากนั้นจะเกิดการตกตะกอนของ Fe(OH)_2 ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น ซึ่งการเกิด OH^- นั้นมีผลทำให้ค่า pH ในระบบสูงขึ้น เมื่อถึง pH 7 ไอออน Fe^{2+} ที่มีความเสถียรน้อยเกิดการออกซิเดชันด้วยออกซิเจนกลายเป็น Fe^{3+} เกิดเป็นตะกอนของ $\text{Fe(OH)}_{2(s)}$ ทำให้น้ำเสียมีสีเขียวปะปน และเกิดตะกอน $\text{Fe(OH)}_{3(s)}$ ทำให้น้ำเสียมีสีน้ำตาลแดงปะปน ในขณะเดียวกันยังเกิด H_2 ที่ขั้วลบของระบบ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเริ่มเข้าสู่สมดุล ซึ่งมีค่า pH สุดท้ายอยู่ในช่วง pH 9-10 (Hakizimana et al., 2017)

ลักษณะกลไกการกำจัดน้ำเสียสีขี้อมข้างต้น สามารถอธิบายได้ว่า หากค่า pH เริ่มต้นมีความเป็นกรดจะเกิดไอออนของ Fe^{2+} ที่มีความเสถียรน้อยเมื่อระบบมีความเป็นด่างสูงขึ้นจึงถูกออกซิไดซ์เป็น Fe^{3+} และเกิดเป็น Fe(OH)_2 และ $\text{Fe(OH)}_{3(s)}$ ซึ่งเป็นเกิดสารรวมตะกอนและเกิดกระบวนการดูดซับสีทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-28 อิทธิพลของค่า pH เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก, กระแสไฟฟ้า 0.5 A



ภาพที่ 4-29 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อเวลา (การทดสอบอิทธิพลของค่า pH เริ่มต้น) โดยใช้
 ขั้วไฟฟ้าเหล็ก, กระแสไฟฟ้า 0.5 A

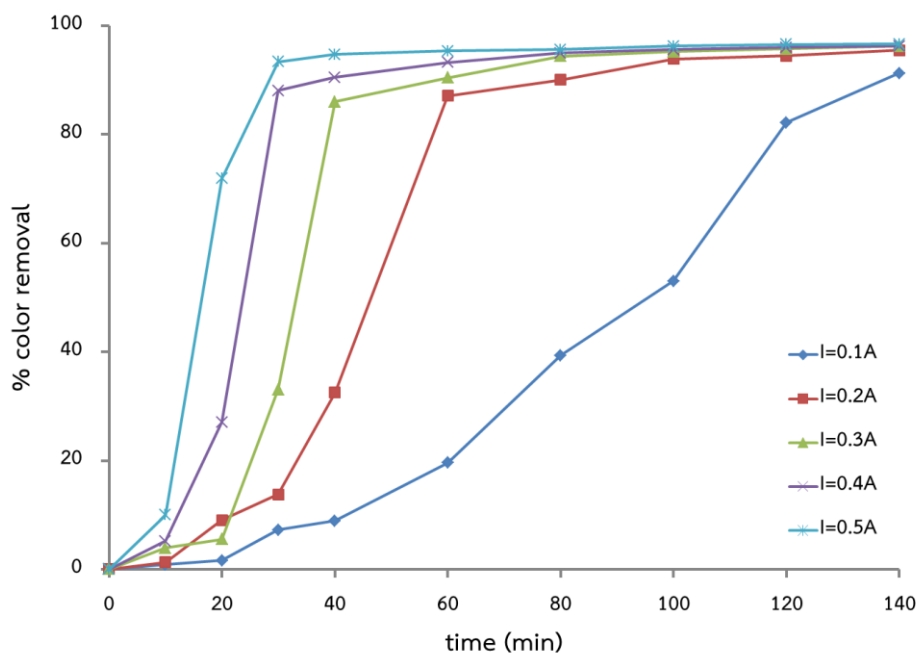
4.3.2 อิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบ

ทำการศึกษาศักยภาพด้านปริมาณกระแสไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 0.1-0.5 A โดยกำหนดขนาดอิเล็กโทรด 40 cm² (2 cm) ค่า pH เริ่มต้นเป็นค่า pH จริงของน้ำเสียสีย้อม (3.85-3.95) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm และระยะเวลาการทดลอง 0-140 นาที พบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ประสิทธิภาพมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยกระแสไฟฟ้าต่ำที่ 0.1 A ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับกระแสไฟอื่น ซึ่งพบประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 91.3% ส่วนกระแสไฟฟ้า 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 A พบประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากกว่า 95% ที่ระยะเวลาการบำบัด 140, 100, 80 และ 60 นาที ตามลำดับ จากนั้นเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ และมีประสิทธิภาพการบำบัดสุดท้ายคือ 95.5%, 96.2%, 96.2% และ 96.6% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-30

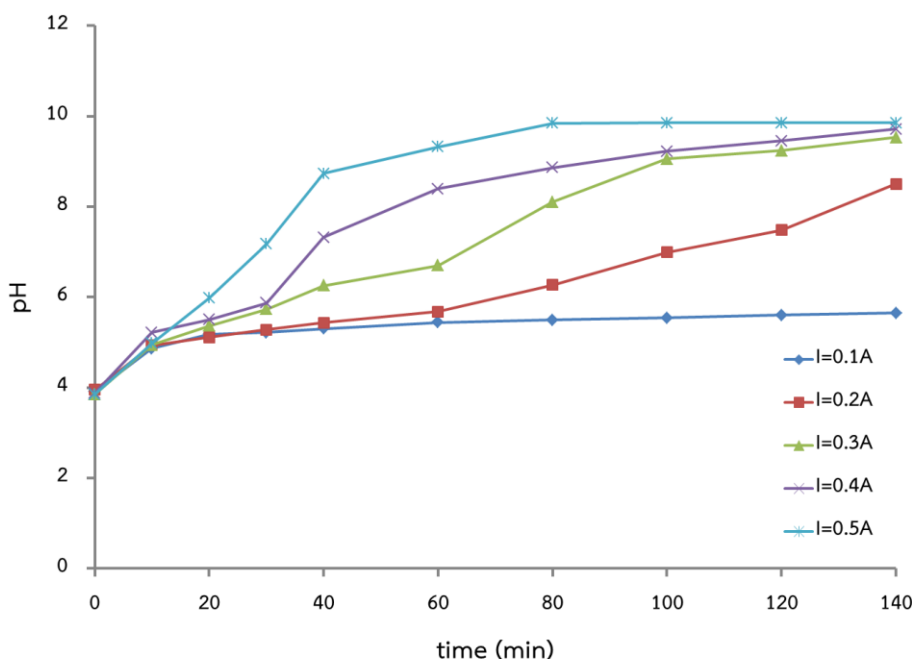
เมื่อวิเคราะห์ร่วมกับค่า pH พบว่าที่กระแสไฟฟ้า 0.1 A ค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลา 10 นาที จาก pH เริ่มต้น 3.91 เป็น 4.86 จากนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย โดยมีค่า pH สุดท้ายคือ 5.65 ส่วนกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 0.2-0.5 A มีการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในระบบสูงขึ้น รวดเร็วกว่าที่กระแสไฟฟ้าต่ำ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่า pH สุดท้ายอยู่ที่ 8.5, 9.53, 9.71 และ 9.85 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-31 โดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น เวลาในการดำเนินระบบเพื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ลดลงตามไปด้วย หากใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ จำเป็นต้องใช้

เวลาในการดำเนินระบบนานขึ้น เนื่องจากปริมาณไอออนของโลหะที่แตกตัวออกมายังคงไม่เพียงพอต่อการจับกับอนุภาคของสี (M. Kobya et al., 2016; Nandi and Patel, 2017) เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) นั่นคือ กระแสไฟที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพการบำบัดที่รวดเร็วขึ้น เนื่องจากการให้กระแสไฟที่สูงขึ้นนั้น ทำให้ปฏิกิริยา Redox เพิ่มมากขึ้นทำให้ Fe^{2+} , Fe^{3+} มีอัตราการเกิดเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้เกิด $Fe(OH)_2$ และ $Fe(OH)_3$ มากขึ้น เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) เพื่อจับตัวกับสารมลพิษเป็นก้อนตะกอนเพื่อตกตะกอนได้มากขึ้น (Modirshahla et al., 2007)

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มกระแสไฟฟ้าจนมากเกินไปค่าที่เหมาะสม (Optimum) กลับไม่เพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด เนื่องจากปริมาณของโลหะละลายที่ออกมาจากอิเล็กโทรดขั้วบวกมีมากเกินไปสำหรับจับกับสารมลพิษที่ต้องการบำบัด (Khandegar and Saroha, 2013) และการใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็กขณะดำเนินการทดลองจะพบว่าน้ำมีลักษณะเป็นสีเขียวเจือปนออกมา ซึ่งเป็นเรื่องปกติของการใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า เนื่องจากเกิดการเจือปนไฮดรอกไซด์ของ Fe(II) และ Fe(III) (Naje et al., 2017)



ภาพที่ 4-30 อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก



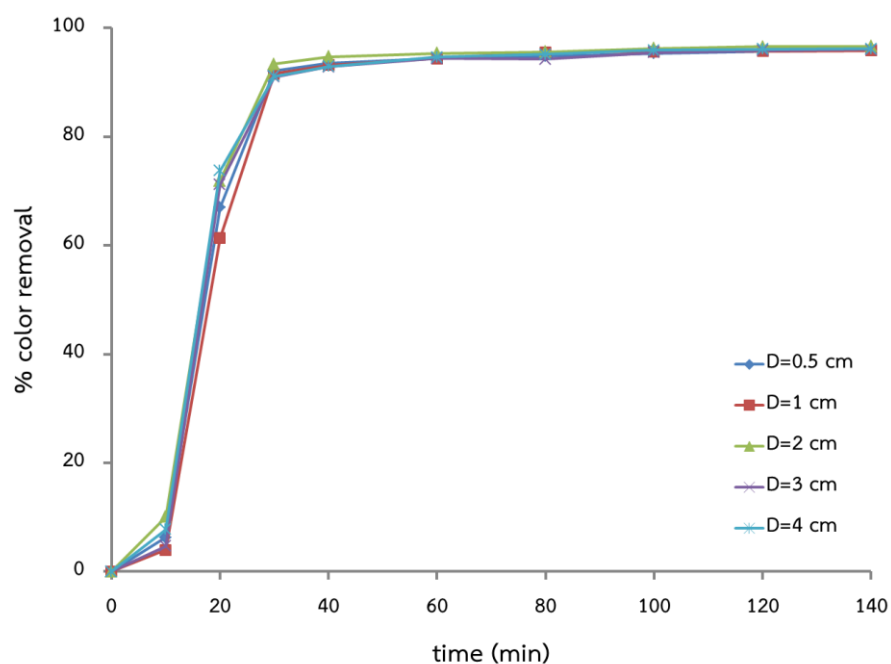
ภาพที่ 4-31 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อเวลา (การทดสอบอทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้า) โดยใช้
ขั้วไฟฟ้าเหล็ก

4.3.3 อธิพลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

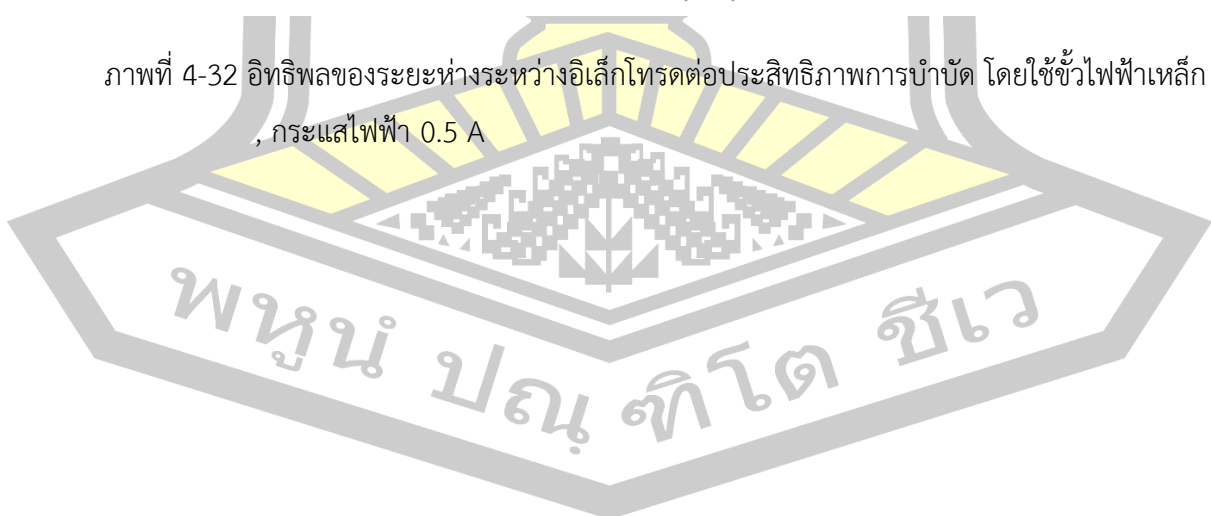
การวิจัยทำการทดสอบระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตั้งแต่ 0.5-4 cm กำหนดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบคือ 0.5 A ขนาดอิเล็กโทรด 40 cm^2 (2 cm) ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 400 mg/l ค่า pH เริ่มต้นเป็นค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จริง (pH 3.41-3.85) และระยะเวลาการทดลองตั้งแต่เวลา 0-140 นาที ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 90% จากนั้นระบบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ที่เวลา 100 นาที ซึ่งทุกระยะห่างที่ทดสอบพบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 95% โดยเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 96%, 95.9%, 96.6%, 96% และ 96.2% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-32 ส่วนค่า pH ที่ทำการตรวจวัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อดำเนินการทดลองเสร็จสิ้นพบว่าค่า pH สุดท้ายอยู่ที่ 9.76-10.41 ดังภาพที่ 4-33

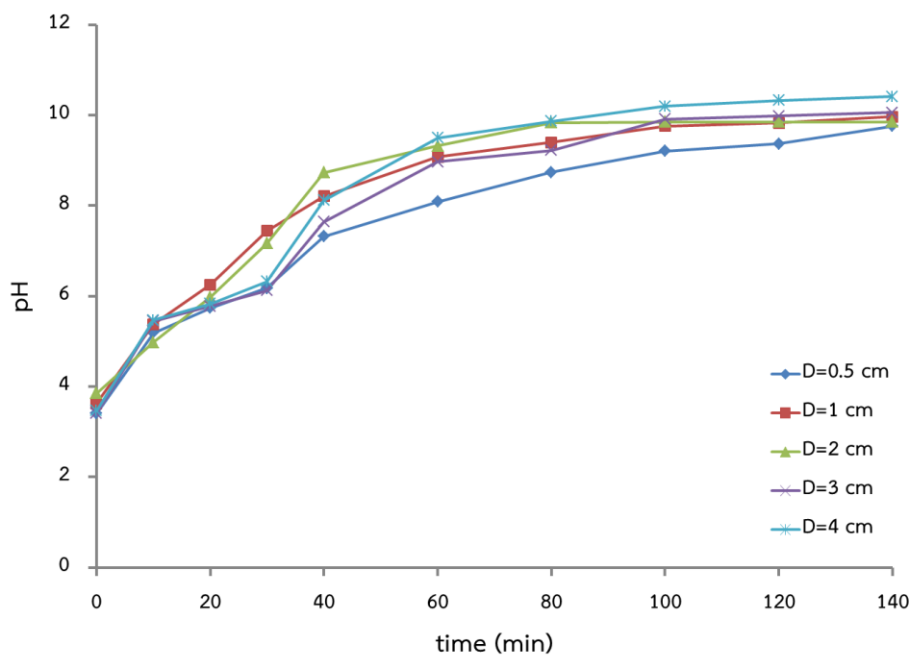
ความแตกต่างของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ผลโดยตรงต่อแรงดันไฟฟ้าที่เข้าระบบ จากตารางที่ 4-9 พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมาก แรงดันไฟฟ้าที่ใช้เพื่อรักษากระแสไฟฟ้าให้คงที่ย่อมสูงขึ้นตาม จากความแตกต่างของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตั้งแต่ 0.5-4 cm ใช้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น 13.4, 24.2, 35.2, 39 และ 47.2 volt ตามลำดับ และยังส่งผลให้มีปริมาณพลังงานที่ใช้มากขึ้นจาก 3,350 KW.hr/m³ (0.5 cm) เพิ่มขึ้นเป็น 11,800 KW.hr/m³ (4 cm)

สอดคล้องกับศึกษาของ Nandi and Patel, 2017 ซึ่งกล่าวว่า การเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ทำให้เพิ่มค่าความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดและมีผลให้กระแสไฟฟ้าลดลง การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะ ช่วยรักษากระแสไฟฟ้าที่เข้าระบบให้คงที่ได้ อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการทดสอบกับ กระแสไฟฟ้าคงที่ ดังนั้น ประสิทธิภาพการบำบัดและค่า pH ในระบบจึงมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นไป ตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) แต่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดส่งผลโดยตรงต่อแรงดันไฟฟ้า และการใช้พลังงานไฟฟ้าในการดำเนินระบบ



ภาพที่ 4-32 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก, กระแสไฟฟ้า 0.5 A





ภาพที่ 4-33 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อเวลา (การทดสอบอิทธิพลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก, กระแสไฟฟ้า 0.5 A

ตารางที่ 4-9 ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมที่เวลา 140 นาที, ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย, แรงดันไฟฟ้าเข้าระบบและปริมาณพลังงานที่ใช้ที่กระแสไฟฟ้า 0.5 A (ขั้วไฟฟ้าเหล็ก)

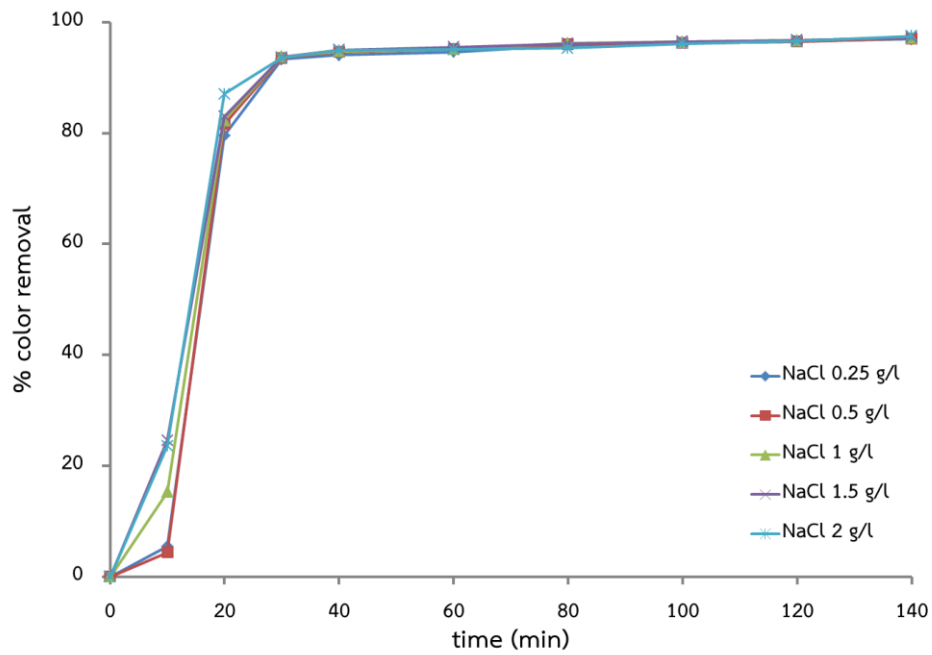
Distance (cm)	Cell voltage (volt)	Energy consumption (KW.hr/m ³)	% color removal
0.5	13.4	3,350	96.0
1	24.2	6,050	95.9
2	35.2	8,800	96.6
3	39	9,750	96.0
4	47.2	11,800	96.2

4.3.4 อิทธิพลของการเติม NaCl

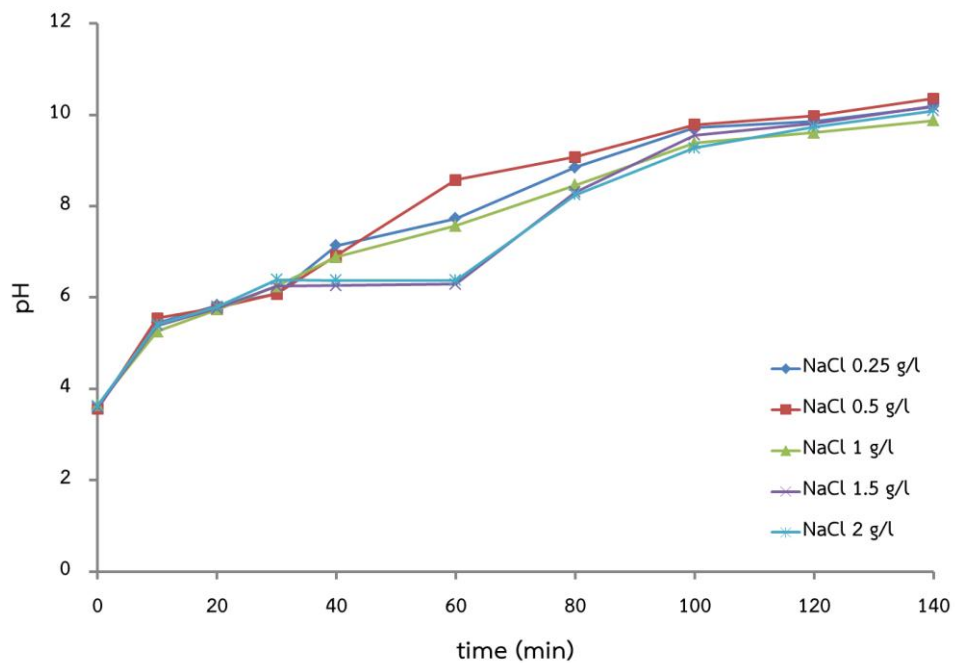
การวิจัยทำการทดสอบการเติม NaCl จำนวน 0.5-4 g โดยคิดเป็นปริมาณ 0.25-2 g/l กำหนดกระแสไฟที่ใช้ทดสอบคือ 0.5 A ขนาดอิเล็กโทรด 40 cm² (2 cm) ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 400 mg/l ค่า pH เริ่มต้นเป็นค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จริง (pH 3.56-3.64) และระยะเวลาการทดลองตั้งแต่เวลา 0-140 นาที ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 80 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 95% เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 97%, 97%, 97.2%, 97.3% และ 97.5% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-34 ส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่า pH พบว่าค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อดำเนินการทดลองเสร็จสิ้นพบว่าค่า pH สุดท้ายอยู่ที่ 9.88-10.36 ดังภาพที่ 4-35

เมื่อพิจารณาถึงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียจากการเติม NaCl พบว่า การเติม NaCl สามารถเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ให้สูงขึ้นจาก 0.99 mS/m (NaCl 0.25 g/l) เป็น 4.33 mS/m (NaCl 2 g/l) ในขณะเดียวกันยังใช้แรงดันไฟฟ้าลดลงจาก 19.7 volt เหลือเพียง 6.2 volt แสดงดังตารางที่ 4-10 และมีปริมาณพลังงานที่ใช้ลดลงจาก 4,925 KW.hr/m³ เป็น 1,550 KW.hr/m³ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การเติม NaCl เป็นการเพิ่มจำนวนไอออนในน้ำเสีย สามารถลดแรงต้านไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งมีผลต่อการลดแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ใช้กระแสไฟเท่าเดิม นำไปสู่การลดปริมาณพลังงานที่ใช้อีกด้วย (Ahangarnokolaei et al., 2018; Nandi and Patel, 2017) อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการทดสอบกับกระแสไฟฟ้าคงที่ ดังนั้น ประสิทธิภาพการบำบัดและค่า pH ในระบบจึงมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) แต่ปริมาณของ NaCl ส่งผลโดยตรงต่อค่าการนำไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ตลอดจนปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ดำเนินระบบ





ภาพที่ 4-34 อิทธิพลของการเติม NaCl ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก, กระแสไฟฟ้า 0.5 A



ภาพที่ 4-35 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่อเวลา (อิทธิพลของการเติม NaCl) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก, กระแสไฟฟ้า 0.5 A

ตารางที่ 4-10 ผลของปริมาณ NaCl ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมที่เวลา 140 นาที, ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย, แรงดันไฟฟ้าเข้าระบบ และปริมาณพลังงานที่ใช้ที่กระแสไฟฟ้า 0.5 A (ขั้วไฟฟ้าเหล็ก)

ปริมาณ NaCl (g/l)	Conductivity (mS/m)	Cell voltage (volt)	Energy consumption (KW.hr/m ³)	% color removal
0.25	0.99	19.7	4,925	97
0.5	1.42	14	3,500	97
1	2.34	9	2,250	97.2
1.5	3.3	6.6	1,650	97.3
2	4.33	6.2	1,550	97.5

4.4 การศึกษาอิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก (Fe)

4.4.1 อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรด

การศึกษานี้เป็นการศึกษาอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่แตกต่างกันตั้งแต่ 4, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 cm² (ความกว้างของอิเล็กโทรดคือ 0.2, 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 cm) ทดสอบกับกระแสไฟฟ้าเข้าระบบต่ำสุดคือ 0.1 A และกระแสไฟฟ้าเข้าระบบสูงสุดคือ 0.3 A สำหรับการทดสอบการอิเล็กโทรดขนาด 4-10 cm² และกระแสไฟ 0.5 A สำหรับการทดสอบการอิเล็กโทรดตั้งแต่ 20-100 cm² เพื่อวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสียสีย้อมใหม่ และการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ระหว่างดำเนินระบบ ขั้นตอนและรายละเอียดการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-14 จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเสียที่ได้ไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ภายใต้สมมติฐานการทดลองคือ เมื่ออิเล็กโทรดมีขนาดพื้นที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแสไฟฟ้าเข้าระบบเท่าเดิม ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสียสีย้อมจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ผลการศึกษาเป็นไปดังหัวข้อต่อไปนี้

4.4.1.1 การทดสอบกับกระแสไฟฟ้า (ต่ำสุด) 0.1 A

ทำการทดลองโดยกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบคือ 0.1 A ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 400 mg/l ค่า pH เริ่มต้นเป็นค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จริง (pH 3.49-3.91) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm และระยะเวลาการทดลองตั้งแต่เวลา 0-140 นาที ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงที่เวลา 60 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดของอิเล็กโทรดทุกขนาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 17.6%, 19.8%, 24.8%, 19.6%, 21.5%, 20.9% และ 16.2% ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าของประสิทธิภาพการบำบัดมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่

93.9%, 91.7%, 92.5%, 91.3%, 93.7%, 93.6% และ 93.4% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-36 ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง พบว่าค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และมีค่าค่อนข้างไม่แตกต่างกันเมื่อขนาดอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงไป โดยค่า pH มีลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจนถึงที่เวลา 100 นาที จากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งค่า pH สุดท้ายใกล้เคียง pH 6 โดยมีค่าอยู่ที่ 5.93, 6.14, 6.15, 5.65, 5.97, 6.05 และ 6.12 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-37

4.4.1.2 การทดสอบกับกระแสไฟฟ้า (สูงสุด) 0.3-0.5 A

กำหนดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบคือ 0.3 A ($4-10 \text{ cm}^2$) และกระแสไฟฟ้า 0.5 A ($20-100 \text{ cm}^2$) ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 400 mg/l ค่า pH เริ่มต้นเป็นค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จริง (pH 3.46-3.85) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm และระยะเวลาการทดลองตั้งแต่เวลา 0-60 นาที ทั้งนี้ ในระหว่างการทดลองพบว่าที่เวลาการบำบัด 100 นาที อิเล็กโทรดขนาด 4 cm^2 ด้านขั้วบวกเกิดขดออกจากกัน ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลในส่วนของขนาดนี้ได้ถึงที่เวลา 100 นาทีเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษายังสามารถเห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน โดยพบว่า อิเล็กโทรดขนาด $4-10 \text{ cm}^2$ มีประสิทธิภาพการบำบัดเริ่มต้นต่ำกว่าอิเล็กโทรดขนาดตั้งแต่ 20 cm^2 ขึ้นไป เมื่อถึงระยะเวลาการบำบัดที่ 60 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดของอิเล็กโทรดทุกขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกัน (อยู่ในช่วงประมาณ 93.6-95.4%) สำหรับอิเล็กโทรดขนาดตั้งแต่ $20-100 \text{ cm}^2$ พบประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 20 นาที ในทำนองเดียวกันอิเล็กโทรดขนาด $4-10 \text{ cm}^2$ ที่ประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดภายในเวลา 60 นาที จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดของอิเล็กโทรดทุกขนาดมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างไม่แตกต่างกัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 94.7% (เวลา 100 นาที), 96.4%, 96.8%, 96.6%, 96.9%, 96.3% และ 96% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-38 ในส่วนของค่า pH พบว่าค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จากการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการบำบัดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว นั้น จะมีค่า pH ใกล้เคียงกับ pH 6 (ที่เวลา 20 นาที) แต่ในส่วนของอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กมากมีค่า pH อยู่ใกล้เคียงกับ pH 8 (ที่เวลา 100 นาที) เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่า pH สุดท้าย คือ 8.87 (ที่เวลา 100 นาที), 10.15, 10.09, 9.85, 10.07, 10.23, 10.06 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-39 ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการทดสอบกับกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า pH สูงขึ้นตามไปด้วย

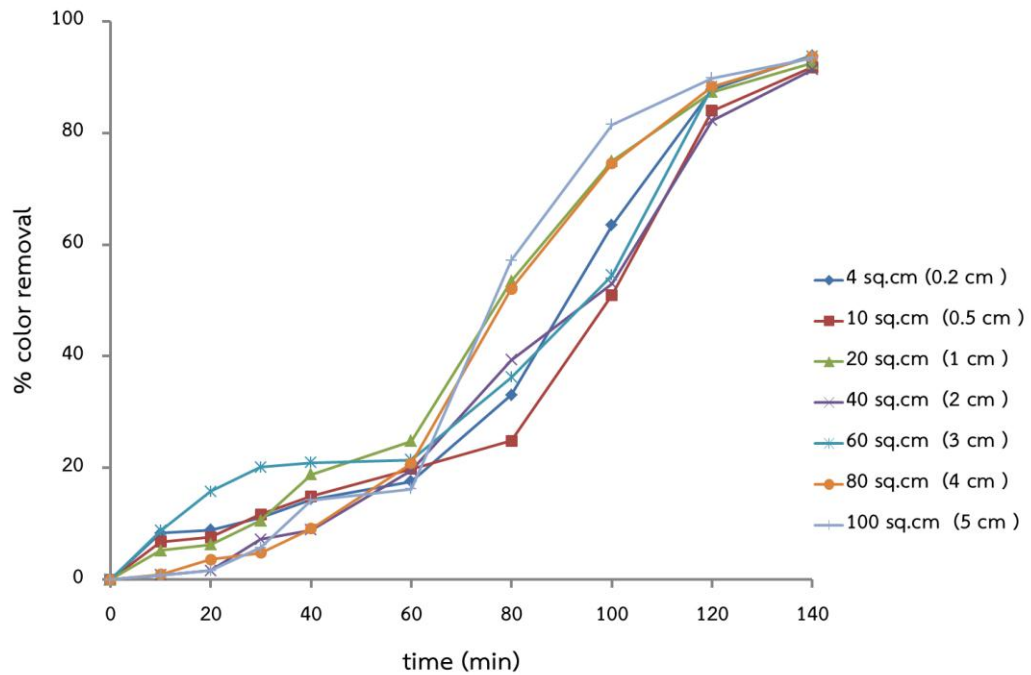
จากรายละเอียดผลการทดลองหัวข้อ 4.4.1.1 และ 4.4.1.2 ข้างต้น จะเห็นได้ว่าในระหว่างดำเนินการระบบ เมื่อกระแสไฟฟ้าคงที่ (0.1 A) แม้ว่าประสิทธิภาพสุดท้ายไม่แตกต่างกัน แต่ในระหว่างเวลาตั้งแต่ 60-120 นาที อิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มสูงกว่าอิเล็กโทรดขนาดเล็กลง เมื่อทดสอบกับกระแสไฟฟ้า 0.3 A ($4-10 \text{ cm}^2$) ประสิทธิภาพเกิดขึ้นเร็วกว่าที่กระแสไฟฟ้าต่ำ และในส่วนของการทดสอบกับกระแสไฟฟ้า 0.5 A ($20-100 \text{ cm}^2$) เกิดการ

เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากกว่าที่กระแสไฟต่ำ แต่มีประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกันเมื่ออิเล็กโทรดมีขนาดเปลี่ยนแปลง

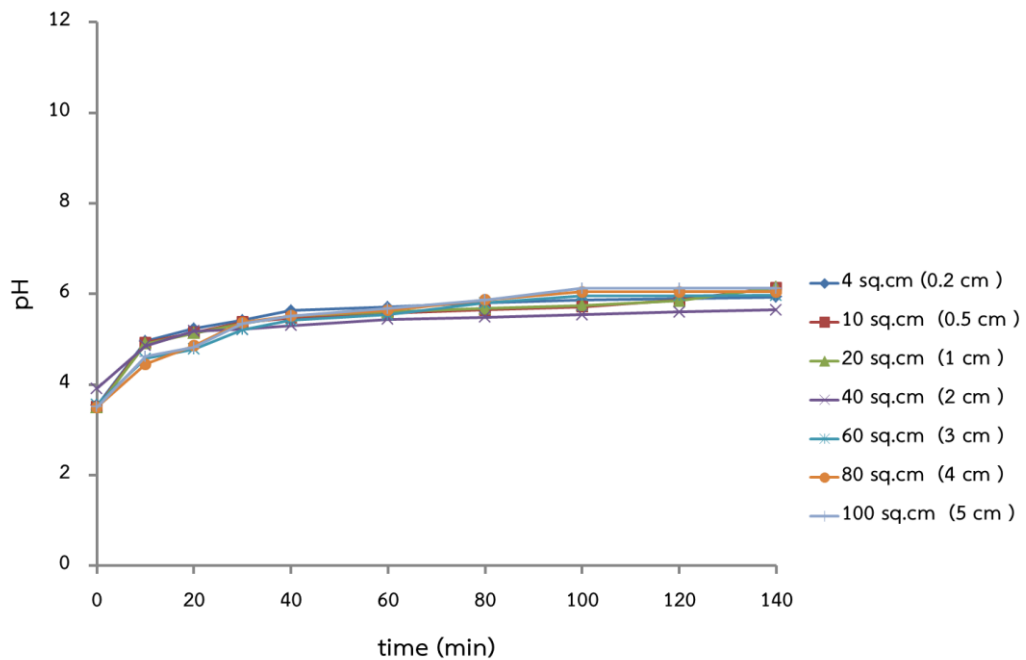
อิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กมากๆ นั้นคือขนาด 4 และ 10 cm^2 มีข้อจำกัดในการรองรับกระแสไฟฟ้า โดยจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงมากขึ้นเพื่อจ่ายกระแสไฟให้ได้สูงสุด เมื่ออิเล็กโทรดมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่เข้าระบบเพื่อรักษากระแสไฟฟ้าให้คงที่มีแนวโน้มลดลง ดังตารางที่ 4-11 เมื่อขนาดอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจาก 4-100 cm^2 พบแรงดันไฟฟ้าลดลงจาก 18.2-4.4 volt ($I=0.1\text{A}$) คิดเป็น 75.8% และลดลงจาก 45.8-20.4 volt ($I=0.3-0.5\text{A}$) หรือคิดเป็น 55.5% เนื่องจากสภาพความต้านทาน (resistance) ของโลหะจะแปรผกผันกับภาคตัดขวาง (surface area) ของลวดโลหะ เมื่อความยาวของโลหะคงที่ตามทฤษฎีกฎของโอห์ม (Ohm's law) กล่าวคือ ที่อิเล็กโทรดความยาวเท่ากัน แต่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่ขึ้นส่งผลให้มีความต้านทานต่ำทำให้ใช้แรงดันไฟฟ้าน้อยลงในขณะที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากัน ในทางกลับกันอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กทำให้มีความต้านทานสูงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟสูงขึ้นในการจ่ายกระแสไฟฟ้าปริมาณเท่ากันเข้าสู่ระบบ (Meaden, 1965)

การเพิ่มขนาดของอิเล็กโทรด ในขณะที่ให้กระแสไฟฟ้าคงที่ ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยในระหว่างดำเนินระบบอิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าอิเล็กโทรดขนาดเล็กลง ทั้งนี้ การใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นยังสามารถลดแรงดันไฟฟ้าเข้าระบบในขณะที่ใช้กระแสไฟฟ้าเท่าเดิมได้อีกด้วย

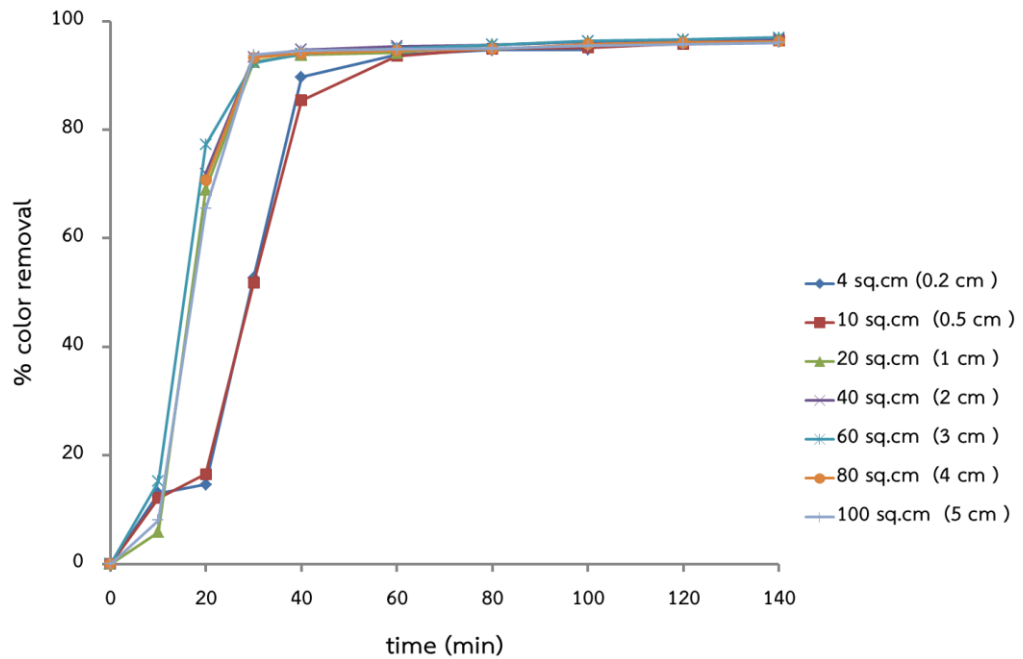




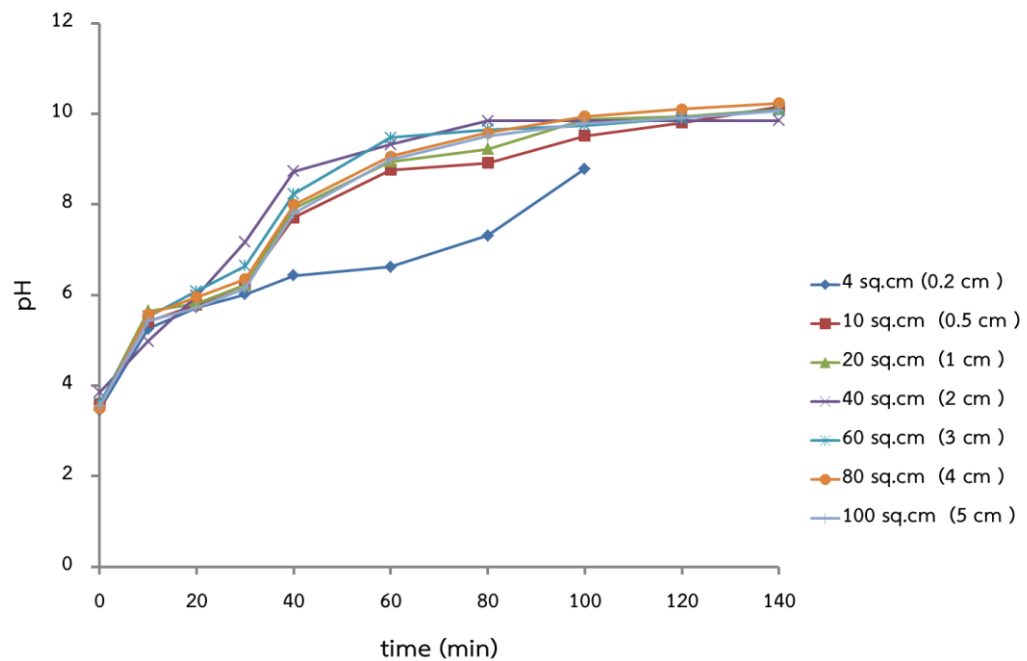
ภาพที่ 4-36 อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (ต่ำสุด) 0.1 A ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก



ภาพที่ 4-37 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่อเวลา (อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (ต่ำสุด) 0.1 A โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก



ภาพที่ 4-38 อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (สูงสุด) 0.3-0.5 A ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก



ภาพที่ 4-39 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่อเวลา (อิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า (สูงสุด) 0.3-0.5 A โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก

ตารางที่ 4-11 ผลของแรงดันไฟฟ้า, ประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลา 140 นาที ตามขนาดของ อิเล็กโทรด (ขั้วไฟฟ้าเหล็ก)

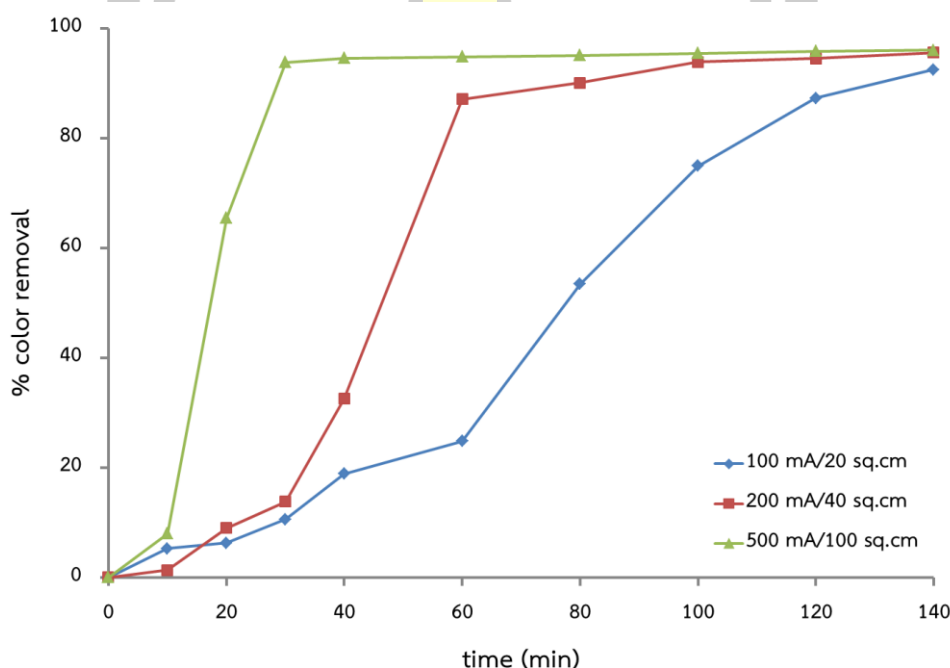
ขนาดอิเล็กโทรด (cm ²)	Cell voltage (volt)		% color removal	
	I= 0.1 A	I= 0.3-0.5 A	I= 0.1 A	I= 0.3-0.5 A
4	18.2	45.8	93.9	94.7
10	13.2	41	91.7	96.4
20	10.4	49.8	92.5	96.8
40	7.6	35.2	91.3	96.6
60	6.8	29.6	93.7	96.9
80	5	23.8	93.6	96.3
100	4.4	20.4	93.4	96.0

4.4.2 อิทธิพลของสัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรด

โดยทั่วไปการออกแบบกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีมักออกแบบกระแสไฟฟ้าที่เข้าระบบ โดยคิดเป็นสัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรด หรือ I/A (current density, CD) (Hakizimana et al., 2017) งานวิจัยชิ้นนี้จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสียสี ย้อม ด้วยการกำหนดสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรดคงที่คือ 5 mA/cm² ภายใต้ สมมติฐานคือ เมื่อสัดส่วนของกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรดคงที่ ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียไม่ เปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถคำนวณออกมาได้เป็นกระแสไฟฟ้าที่ 50, 200 และ 500 mA ต่อขนาดพื้นที่ อิเล็กโทรด 10, 40 และ 100 cm² ตามลำดับ ทำการทดสอบกับความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 400 mg/l ค่า pH เริ่มต้นเป็นค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จริง ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2 cm และ ระยะเวลาการทดลองตั้งแต่เวลา 0-140 นาที ผลการศึกษาพบว่า ขณะที่กำหนดสัดส่วนกระแสไฟฟ้า ต่อขนาดอิเล็กโทรดเท่ากัน เมื่อดำเนินระบบในช่วง 10-20 นาที ที่กระแสไฟฟ้าเข้าระบบ 500 mA (100 cm²) มีการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการบำบัดอย่างรวดเร็ว โดยที่เวลา 30 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 93.8% โดยหลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ถัดมาคือ กระแสไฟฟ้า 200 mA (40 cm²) ในช่วงเวลาประมาณ 30-60 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดมี แนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ 50 mA

(10 cm²) ระหว่างดำเนินระบบพบประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าแตกต่างกันต่อขนาดอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่สัดส่วน CD คงที่นั้น เมื่อสิ้นสิ้นการทดลองพบประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสียสีเขียวคือ 92.5%, 95.5% และ 96% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-40

จากการศึกษาข้างต้นชี้ให้เห็นว่า เมื่อกำหนดสัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กโทรด (CD) คงที่ ในขณะที่ปรับเปลี่ยนขนาดอิเล็กโทรด ซึ่งส่งผลให้จ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสุดท้ายไม่แตกต่างกัน แต่ในระหว่างการบำบัดพบว่า การจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น (ขนาดอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น) ประสิทธิภาพการบำบัดจะเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลได้ในเวลาอันสั้น กล่าวคือ สามารถลดระยะเวลาการบำบัดเพื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nandi and Patel, 2017 ทำการศึกษาค่า CD ที่แตกต่างกันในช่วง 13.9-138.9 A/m² (I=0.1-1 A) พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีเขียว (Brilliant green dye) เพิ่มขึ้นเมื่อค่า CD เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-40 อิทธิพลของสัดส่วน I/A (5 mA/cm²) ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก

4.5 ศึกษาปริมาณโลหะละลายจริงในน้ำเสียสีเขียวและทฤษฎีของฟาราเดย์ (Faraday's law)

จากการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีเขียวตามรายละเอียดผลการศึกษาที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ได้นำตัวอย่างน้ำที่เก็บตามระยะเวลาต่างๆ มาตรวจวัดปริมาณโลหะละลายด้วยเครื่อง Frame Atomic Absorption Spectrophotometer (FAAS) เพื่อศึกษาถึงแนวโน้มของ

ปริมาณโลหะที่แตกตัวออกมาที่ระยะเวลาต่างๆ ตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบ รวมถึงการทดสอบกับขนาดอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยทำการตรวจวัดทั้งปริมาณอลูมิเนียมและเหล็กละลาย อันมีรายละเอียดของผลการตรวจวัดดังหัวข้อต่อไปนี้

4.5.1 ปริมาณโลหะละลายจริงในน้ำเสียสีย้อม ชั่วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Al)

4.5.1.1 ปริมาณเหล็กละลายจริงในน้ำเสียสีย้อมต่อกระแสไฟฟ้า

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลของปริมาณอลูมิเนียมละลายจากการให้กระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ แตกต่างกันตั้งแต่ 0.05-0.5 A จากดังภาพที่ 4-41 พบว่า ที่กระแสไฟฟ้าต่ำสุด 0.05 A มีปริมาณอลูมิเนียมละลายอยู่ในน้ำเสียเพิ่มน้อยที่สุด แต่เมื่อเวลาผ่านไปกลับละลายอยู่ในน้ำเสียสีย้อมนานที่สุด จนเมื่อดำเนินระบบไปถึง 25 นาที (pH 6.81) พบมีปริมาณอลูมิเนียมละลายออกมามากที่สุด จากนั้นค่อยๆ ลดลงจนเมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ ยังคงมีปริมาณอลูมิเนียมละลายอยู่ค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับที่กระแสไฟฟ้าอื่นๆ โดยที่กระแสไฟฟ้า 0.1 A มีปริมาณอลูมิเนียมละลายออกมาในน้ำเสียสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปและมีปริมาณมากที่สุดที่เวลา 25 นาที (pH 7.2) จากนั้นค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 A ระยะเวลาที่อลูมิเนียมละลายสูงสุดคือ 13, 8, 8 และ 6 นาที ซึ่งมีค่า pH ในเวลานั้นอยู่ที่ 7.45, 7.24, 7.51 และ 7.41 ตามลำดับ อีกนัยหนึ่ง การเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบส่งผลให้อลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ถูกปลดปล่อยออกมาในจำนวนมากขึ้นและแปรผันตามเวลา (Modirshahla et al., 2007; Nandi and Patel, 2017) โดยในระยะเวลาที่นานขึ้นจะพบไอออนของอลูมิเนียมสูงขึ้นเป็นไปตามทฤษฎีกฎฟาราเดย์ (Faraday's law) การแตกตัวของโลหะไอออนจำนวนมากจะเกิดการรวมตัวกับอนุภาคสีย้อมและเกิดเป็นตะกอนในขณะเดียวกันส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น เมื่อเลยระยะเวลาที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นปริมาณอลูมิเนียมละลายอยู่ในน้ำจะลดลงจนไม่สามารถตรวจวัดได้ (Hashim et al., 2017)

4.5.1.2 ปริมาณอลูมิเนียมละลายจริงในน้ำเสียสีย้อมต่อขนาดอิเล็กโทรด

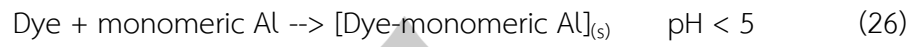
ผลการวิเคราะห์ปริมาณอลูมิเนียมละลายด้วยการทดสอบกับอิเล็กโทรดที่มีขนาดแตกต่างกันตั้งแต่ 4, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 cm^2 กำหนดกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบคือ 0.05 A (กระแสไฟฟ้าต่ำสุด) และกระแสไฟฟ้าที่ 0.3-0.5 A (กระแสไฟฟ้าสูงสุด) เมื่อนำตัวอย่างน้ำเสียตามระยะเวลาต่างๆ มาตรวจวัดปริมาณอลูมิเนียมละลายพบว่า การทดสอบกับกระแสไฟฟ้า 0.05 A มีปริมาณเหล็กละลายอยู่ในน้ำนานกว่าการทดสอบที่กระแสไฟฟ้า 0.5 A ในอิเล็กโทรดขนาด 4 cm^2 มีปริมาณอลูมิเนียมละลายในน้ำเสียมากที่สุดและละลายอยู่ในน้ำนานกว่าอิเล็กโทรดขนาดอื่นๆ ที่เวลา 13 นาที (pH 5.5) พบปริมาณอลูมิเนียมละลายสูงสุดจากนั้นค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนอิเล็กโทรดขนาดตั้งแต่ 10-100 cm^2 พบปริมาณอลูมิเนียมละลายออกมามากที่สุดในช่วง 13-16 นาที (pH 5.29-5.82) หลังจากนั้นค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังภาพที่ 4-42 ส่วนการทดสอบกับ

กระแสไฟฟ้าสูงสุด 0.3-0.5 A พบว่า อิเล็กโทรดขนาด 4 และ 10 cm² มีปริมาณอลูมิเนียมละลายในน้ำเสียสีย้อมสูงสุดที่เวลา 8 และ 6 นาที ซึ่งมีค่า pH อยู่ที่ 6.32 และ 6.41 ตามลำดับ จากนั้นค่อยๆ ลดลงจนไม่สามารถตรวจวัดได้ สำหรับอิเล็กโทรดขนาดตั้งแต่ 20 cm² ขึ้นไปนั้น มีปริมาณอลูมิเนียมละลายในน้ำเสียสีย้อมสูงสุดที่เวลาค่อนข้างใกล้เคียงกันคือที่เวลา 4 นาที มีค่าคือ pH 5.92-6.61 หลังจากนั้นปริมาณอลูมิเนียมค่อยๆ ลดลงจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังภาพที่ 4-43 และสังเกตได้ว่า เมื่อให้กระแสไฟฟ้ามากขึ้นปริมาณเหล็กละลายสูงสุดที่พบในน้ำเสียสีย้อมจะพบในเวลาสั้นขึ้น และมีปริมาณน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรที่ให้กระแสไฟฟ้าต่ำลง

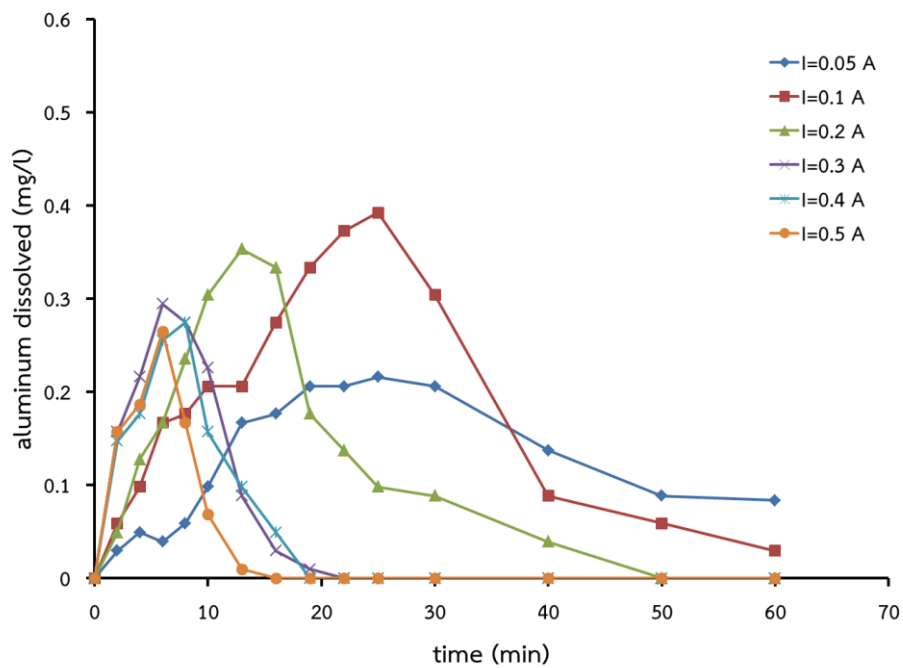
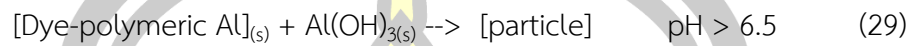
ในขณะที่กระแสไฟฟงที่ ขนาดอิเล็กโทรดที่ทดสอบมีขนาดเปลี่ยนแปลงไป สังเกตเห็นได้ว่า ที่เวลาเท่ากัน พบปริมาณโลหะละลายหรือโลหะที่แตกตัวออกมามีความแตกต่างกัน โดยอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่โลหะที่แตกตัวออกมาสูงกว่าอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวขนาดเล็ก เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อปลดปล่อยโลหะ (Al³⁺) ออกมา เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของอิเล็กโทรด (electrode surface) เป็นไปตามกลไกการถ่ายเทมวลสารระหว่างอิเล็กโทรด (Kinetics of electrode reaction) ดังนั้น เมื่อให้กระแสไฟฟ้าเข้าระบบเท่ากัน ในระหว่างดำเนินระบบในอิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น มีผลให้โลหะสามารถแตกตัวได้เร็วกว่าอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็ก (Walsh, 1992)

การที่มีปริมาณอลูมิเนียมละลายในน้ำเสียสีย้อมมากขึ้นจากนั้นค่อยๆ ลดลงเกิดจากขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคของสีย้อมและประจุบวกอลูมิเนียมในรูปของ monomeric species และ polymeric species เกิดกลไกการตกตะกอนและการดูดซับ ซึ่งมีอิทธิพลจากค่า pH ภายในระบบ โดยในช่วง pH 4-6 เกิดกระบวนการตกตะกอนด้วยการทำให้ประจุเป็นกลาง (neutralization) มักเกิดในช่วง pH เป็นกรดกลางๆ ดังสมการ (26) และ (27) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระบบดำเนินไปจนถึง pH 6.5-7 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยในช่วงนี้จะเกิดกระบวนการดูดซับอนุภาคสีย้อมด้วย Al(OH)₃ ดังสมการ (28) และ (29) ด้วยพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ทำให้สามารถดูดซับอนุภาคของสีย้อมที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย รวมถึงสามารถดักจับกับอนุภาคคอลลอยด์ที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียสีย้อมได้ และเป็นผลทำให้ปริมาณอลูมิเนียมละลายน้ำลดลงเรื่อยๆ จนไม่สามารถตรวจวัดได้ (Aoudj et al., 2010; Martínez-Huitle and Brillas, 2009) ทั้งนี้ ลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นจากการใช้อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดได้มีการวิเคราะห์ตะกอนของน้ำเสียที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD พบอยู่ในรูป amorphous (Al(OH)₃ หรือ AlO(OH) เป็นความจริงที่ว่าน้ำเสียสีย้อมบำบัดได้เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการดังกล่าว (Naje et al., 2017)

การตกตะกอน

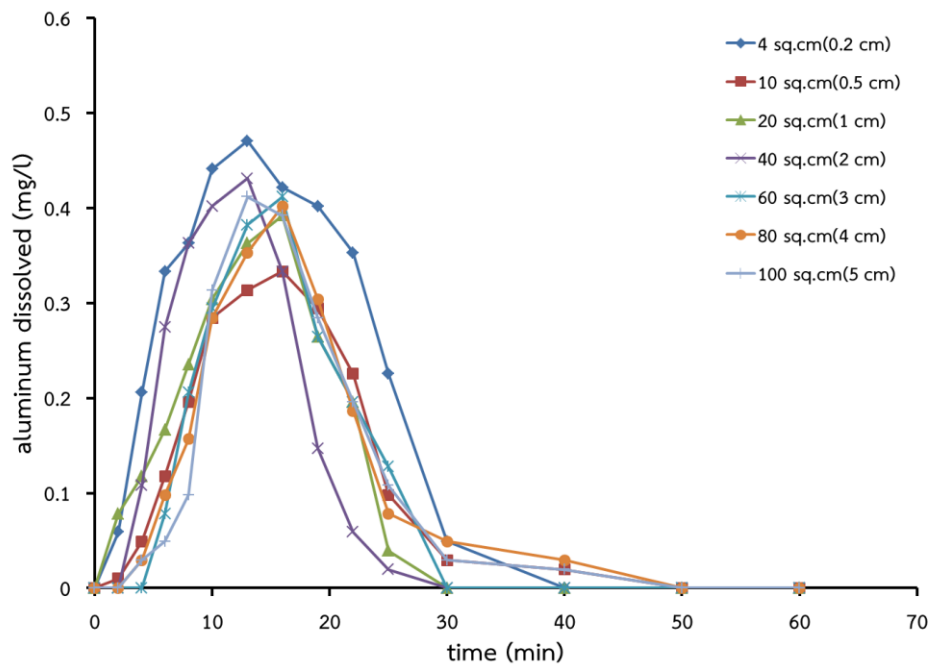


การดูดซับ

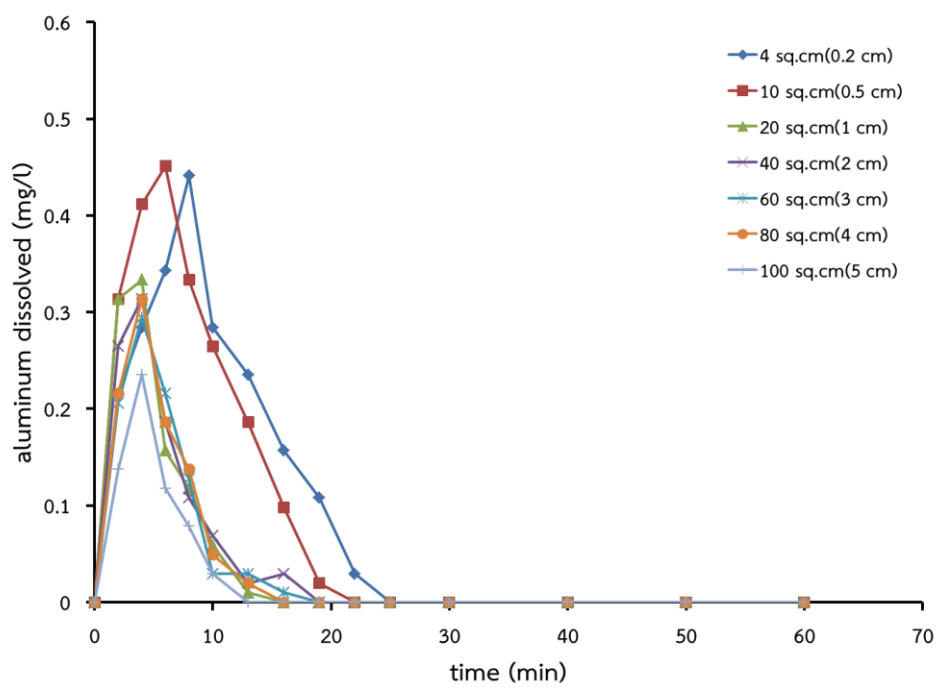


ภาพที่ 4-41 ผลของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบต่อปริมาณอลูมิเนียม (Al) ละลาย

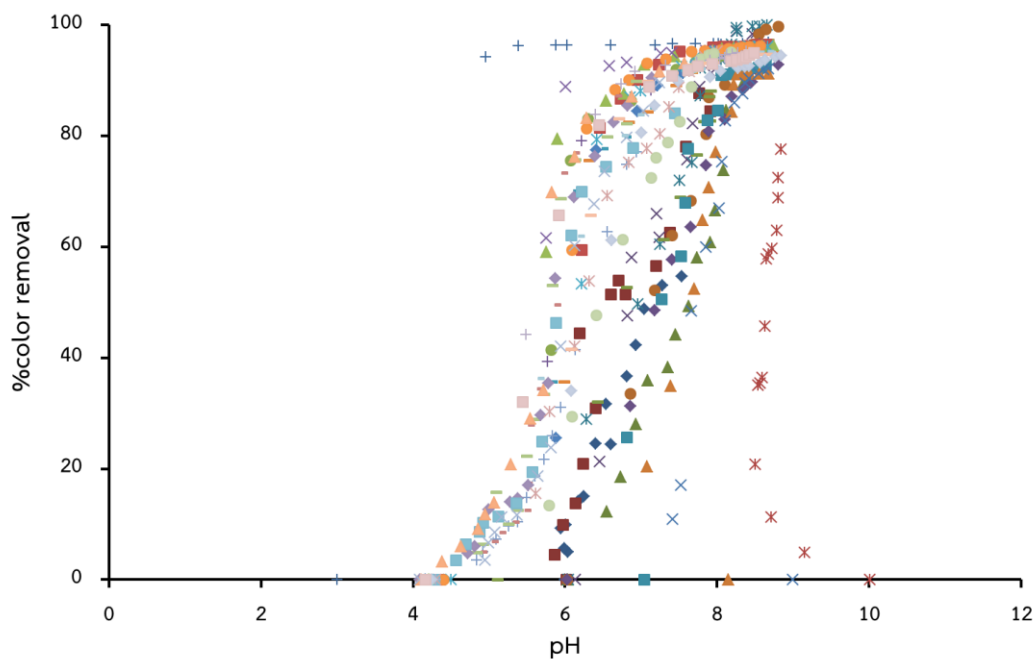




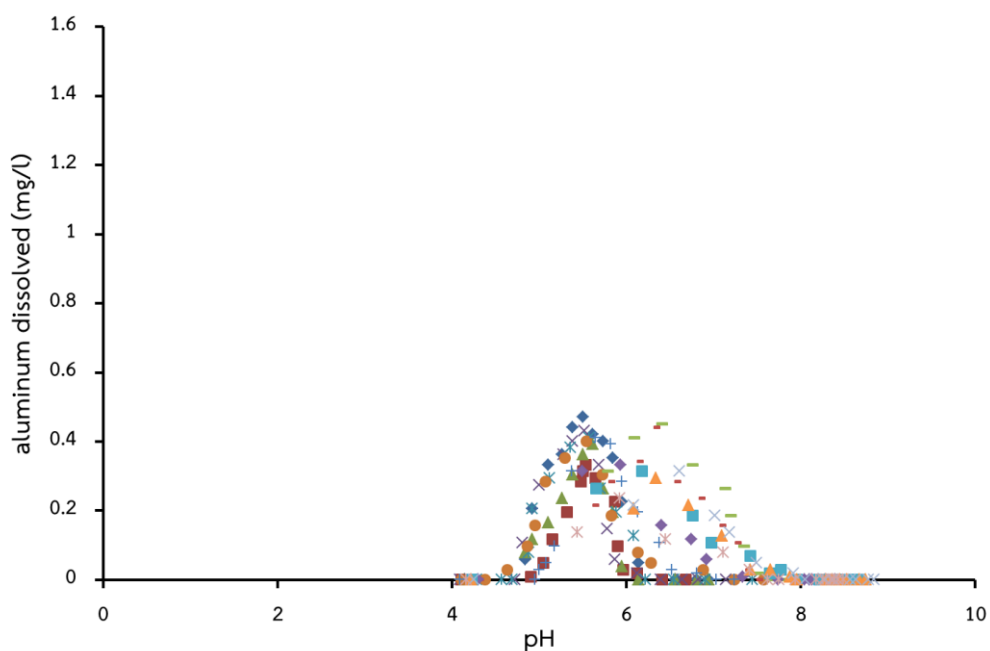
ภาพที่ 4-42 ผลของขนาดอิเล็กโทรดต่อปริมาณอลูมิเนียม (Al) ละลาย (I=0.05 A)



ภาพที่ 4-43 ผลของขนาดอิเล็กโทรดต่อปริมาณอลูมิเนียม (Al) ละลาย (I=0.5 A)



ภาพที่ 4-44 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ตามประสิทธิภาพการบำบัดจากการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี (ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม)

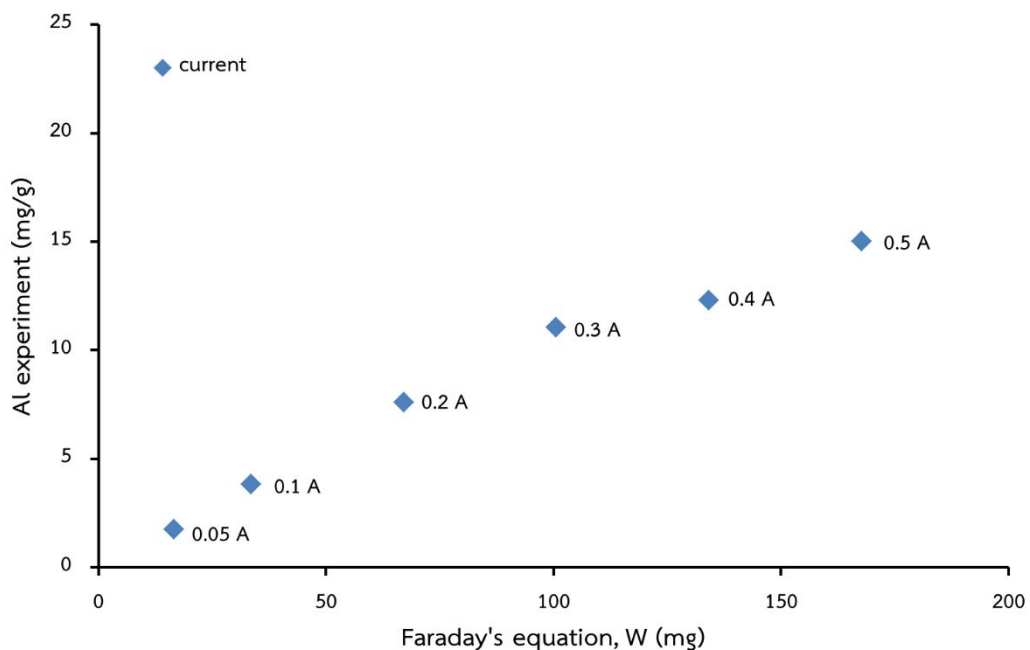


ภาพที่ 4-45 ปริมาณอลูมิเนียมละลายที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH

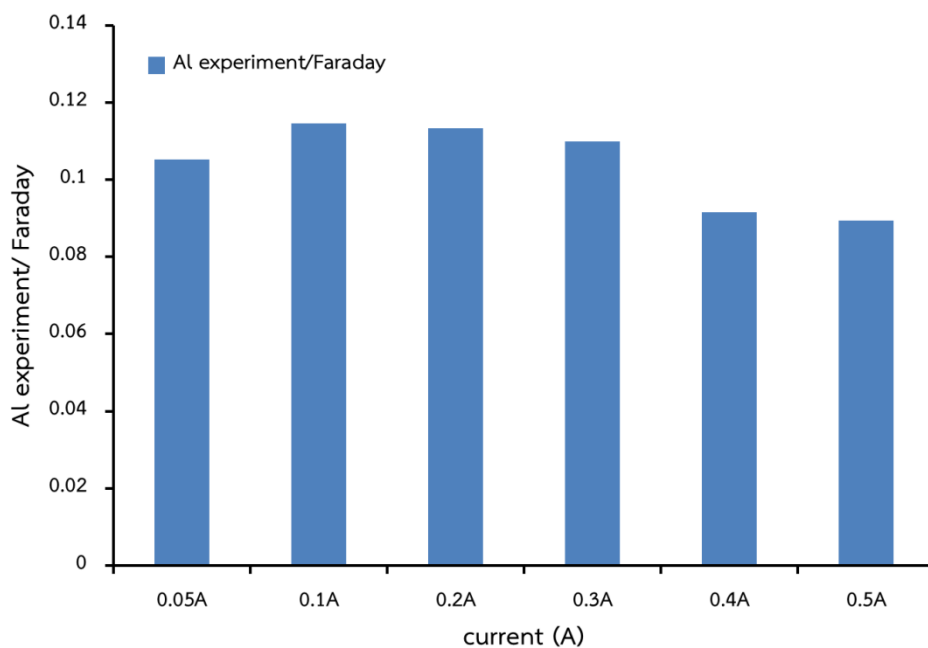
4.5.2 การวิเคราะห์เชื่อมโยงกับทฤษฎีฟาราเดย์ (ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม)

4.5.2.1 สัดส่วนปริมาณอลูมิเนียมละลายจริงกับสมการฟาราเดย์ตามกระแสไฟฟ้า

ทำการเปรียบเทียบปริมาณโลหะละลายจากการทดลองที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค FAAS และการคำนวณจำนวนโลหะที่ถูกปลดปล่อย (W) จากสมการของฟาราเดย์ ($z=+3$) ดังสมการ (24) เพื่อวิเคราะห์ความเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 0.05-0.5 A อิเล็กโทรดขนาด 40 cm^2 (2 cm) ที่เวลา 60 นาที พบว่า ปริมาณโลหะที่ตรวจวัดเพิ่มขึ้นไปตามกระแสไฟฟ้าที่เข้าระบบซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีของฟาราเดย์ แต่ค่าที่มาจากผลการตรวจวัดจริงมีค่าต่ำกว่าค่าจากการคำนวณ ดังภาพที่ 4-46 สำหรับการวิเคราะห์สัดส่วนระหว่างปริมาณอลูมิเนียมละลายจากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์ ($Al_{\text{experiment}} / \text{Faraday}$) เมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ใช้อิเล็กโทรดขนาดเท่าเดิม การใช้กระแสไฟฟ้าในช่วง 0.05-0.1 A พบว่า สัดส่วนความแตกต่างเพิ่มขึ้น แต่เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.2-0.5 A สังเกตเห็นได้ว่าสัดส่วนความแตกต่างมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากพื้นที่อิเล็กโทรดต่อกระแสน้อยลงจึงทำให้ปริมาณอลูมิเนียมที่ถูกปลดปล่อยออกมาลดลง ในทางกลับกันเมื่อให้กระแสไฟฟ้าต่ำๆ กับขนาดพื้นที่อิเล็กโทรดเท่าเดิม ปริมาณอลูมิเนียมที่ถูกปลดปล่อยออกมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า ขนาดอิเล็กโทรดต่อการใช้กระแสไฟฟ้ามืดจำกัด และยังส่งผลต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ละลายออกมา ดังภาพที่ 4-47

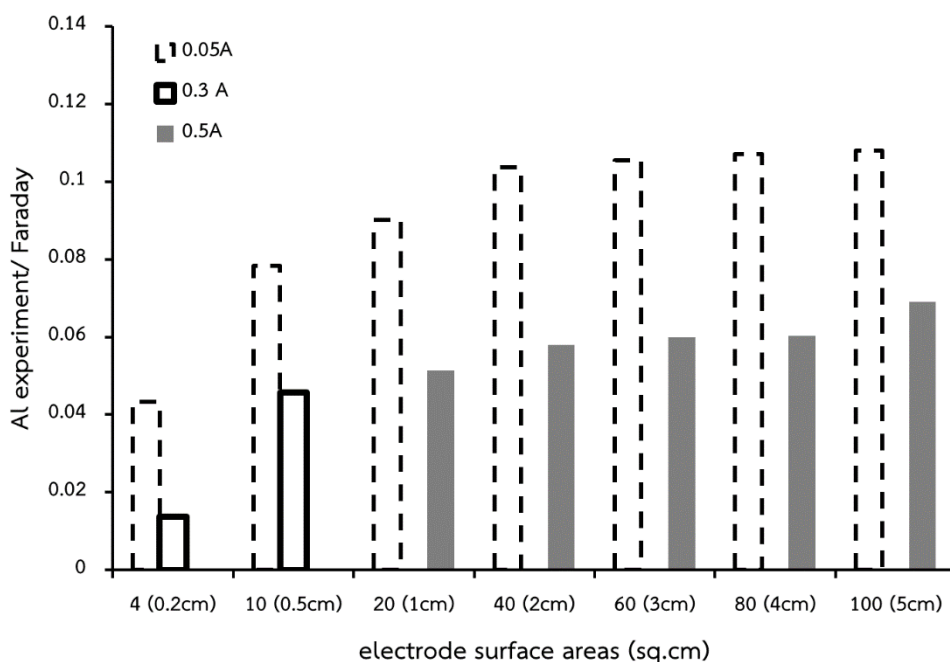


ภาพที่ 4-46 ปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนเปรียบเทียบกับค่าคำนวณตามทฤษฎีฟาราเดย์ตามกระแสไฟฟ้า, อิเล็กโทรดขนาด 40 cm^2 (2 cm)



ภาพที่ 4-47 สัดส่วนอลูมิเนียมละลายจากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์ อิเล็กโทรดขนาด 40 cm^2 (2 cm)

4.5.2.2 สัดส่วนปริมาณอลูมิเนียมละลายจริงกับสมการฟาราเดย์ตามขนาดอิเล็กโทรด การวิเคราะห์สัดส่วนของอลูมิเนียมละลายต่อค่าจากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์ โดยทำการวิเคราะห์ห้อเล็กโทรดที่มีความแตกต่างกันตั้งแต่ $4-100 \text{ cm}^2$ ($0.2-5 \text{ cm}$) เมื่อขนาดอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่พบว่า อิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กจะมีสัดส่วนความแตกต่างน้อย นั้นหมายความว่า ปริมาณอลูมิเนียมที่ถูกปลดปล่อยออกมามีค่าแตกต่างจากการคำนวณน้อย แต่เมื่ออิเล็กโทรดมีขนาดใหญ่ขึ้น สัดส่วนความแตกต่างกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณอลูมิเนียมถูกปลดปล่อยออกมามากขึ้นในขณะที่ใช้กระแสไฟฟ้าเท่าเดิม สัดส่วนความแตกต่างกับค่าทางทฤษฎีจึงเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4-48 ซึ่งความแตกต่างของปริมาณโลหะที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากหรือน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี เนื่องจากการคำนวณตามทฤษฎี ไม่ได้นำขนาดอิเล็กโทรดมาคำนวณด้วย ทั้งนี้ จากการศึกษาที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นพบว่า ในขณะที่ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ ขนาดอิเล็กโทรดส่งผลต่อการแตกตัวของโลหะ และอาจมีผลจากปฏิกิริยาเคมีร่วมอื่นๆ รวมถึงอุทกพลศาสตร์ภายในถังปฏิกรณ์ เป็นต้น (Omwene and Kobya, 2018)



ภาพที่ 4-48 สัดส่วนอลูมิเนียมละลายจากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์ตามขนาดของอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า 0.05-0.5 A

4.5.3 ปริมาณโลหะละลายจริงในน้ำเสียสีย้อม ขั้วไฟฟ้าเหล็ก (Fe)

4.5.3.1 ปริมาณเหล็กละลายจริงในน้ำเสียสีย้อมต่อกระแสไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณเหล็กละลายจากการให้กระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบแตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.1-0.5 A พบว่า ที่กระแสไฟฟ้าต่ำสุด 0.1 A มีปริมาณเหล็กละลายอยู่ในน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปและละลายอยู่ในน้ำเสียสีย้อมนานที่สุด จนที่ระยะเวลาการดำเนินระบบ 80 นาที (pH 5.49) พบมีปริมาณเหล็กละลายออกมามากที่สุด จากนั้นเริ่มลดลงจนถึงเวลา 140 นาที ตรวจพบว่า มีปริมาณเหล็กละลายอยู่น้อยที่สุด เมื่อทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 A ระยะเวลาที่เหล็กละลายสูงสุดคือ 40, 30, 20 และ 10 นาที มีค่า pH อยู่ที่ 5.43, 5.73, 5.5 และ 4.98 ตามลำดับ เมื่อเลยระยะเวลาที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ปริมาณเหล็กละลายอยู่ในน้ำจะลดลงจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังภาพที่ 4-49 การเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบสูงขึ้นทำให้เกิดการละลายของอิเล็กโทรดขั้วบวกมากขึ้น (Fe^{2+} , Fe^{3+}) ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) นำไปสู่การเพิ่มจำนวนของโลหะไฮดรอกไซด์เพื่อจับตัวกับสารมลพิษเป็นก้อนตะกอนเพื่อตกตะกอนได้มากขึ้น ทำนองเดียวกันประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นตามไปด้วย (Nandi and Patel, 2017; Pajootan et al., 2012) ทั้งนี้ การเพิ่มกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ลดลงด้วยเช่นกัน หากใช้กระแสไฟฟ้าต่ำจำเป็นต้องใช้เวลาในการดำเนินระบบนานขึ้น เนื่องจากปริมาณไอออนของโลหะที่

แตกตัวออกมายังคงไม่เพียงพอต่อการจับกับอนุภาคของสี (M. Kobya et al., 2016; Nandi and Patel, 2017) ทำให้ยังมีปริมาณเหล็กละลายอยู่ในน้ำเสียในจำนวนหนึ่ง แต่หลังจากนั้นจะค่อยๆลดจำนวนลงจนน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้

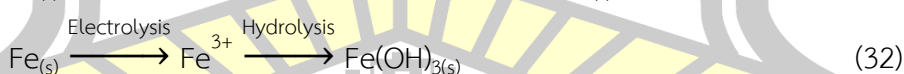
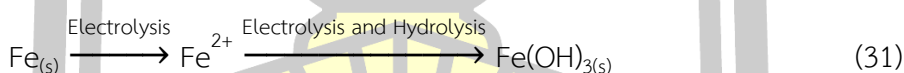
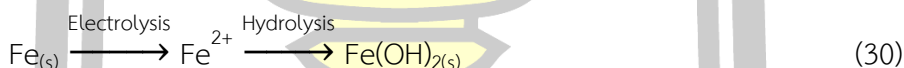
4.5.3.2 ปริมาณเหล็กละลายจริงในน้ำเสียน้อยต่อขนาดอิเล็กโทรด

การทดสอบกับอิเล็กโทรดที่มีขนาดแตกต่างกัน ตั้งแต่ 4, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 cm² โดยกำหนดกระแสไฟฟ้าที่เข้าระบบคือ 0.1 A (กระแสไฟฟ้าต่ำสุด) และกระแสไฟฟ้าที่ 0.3-0.5 A (กระแสไฟฟ้าสูงสุด) เมื่อนำตัวอย่างน้ำเสียที่เก็บตามระยะต่างๆไปตรวจวัดปริมาณเหล็กละลายพบว่า การทดสอบกับกระแสไฟฟ้า 0.1 A มีปริมาณเหล็กละลายอยู่ในน้ำน้อยกว่าการทดสอบที่กระแสไฟฟ้า 0.5 A โดยที่ทุกขนาดอิเล็กโทรดมีแนวโน้มของปริมาณเหล็กละลายเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จากนั้นหลังระยะเวลา 80 นาที (pH 5.49-9.84) ทุกขนาดอิเล็กโทรดมีปริมาณเหล็กละลายเริ่มลดลงเรื่อยๆ จนมีปริมาณเหล็กละลายน้อยที่สุดที่ระยะเวลา 140 นาที ในส่วนของอิเล็กโทรดขนาด 4 cm² (0.2 cm) ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดพบว่าปริมาณเหล็กละลายอยู่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับขนาดอื่นๆ ที่เวลาเท่ากัน สำหรับการทดสอบกับกระแสไฟฟ้าสูงสุด (0.3-0.5 A) พบว่าที่ขนาดอิเล็กโทรด 4-10 cm² พบปริมาณเหล็กละลายสูงสุดที่เวลา 20 และ 30 นาที ซึ่งมีค่า pH อยู่ที่ 5.72 และ 6.22 ตามลำดับ ในส่วนของอิเล็กโทรดที่มีขนาดตั้งแต่ 20-100 cm² พบปริมาณเหล็กละลายสูงสุดที่เวลาประมาณ 10 นาที (pH 4.98-5.64) และที่เวลาเดียวกันเมื่ออิเล็กโทรดมีขนาดใหญ่ขึ้นปริมาณเหล็กละลายมีจำนวนน้อยลง จากนั้นปริมาณเหล็กละลายจะลดลงจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังภาพที่ 4-50 และภาพที่ 4-51

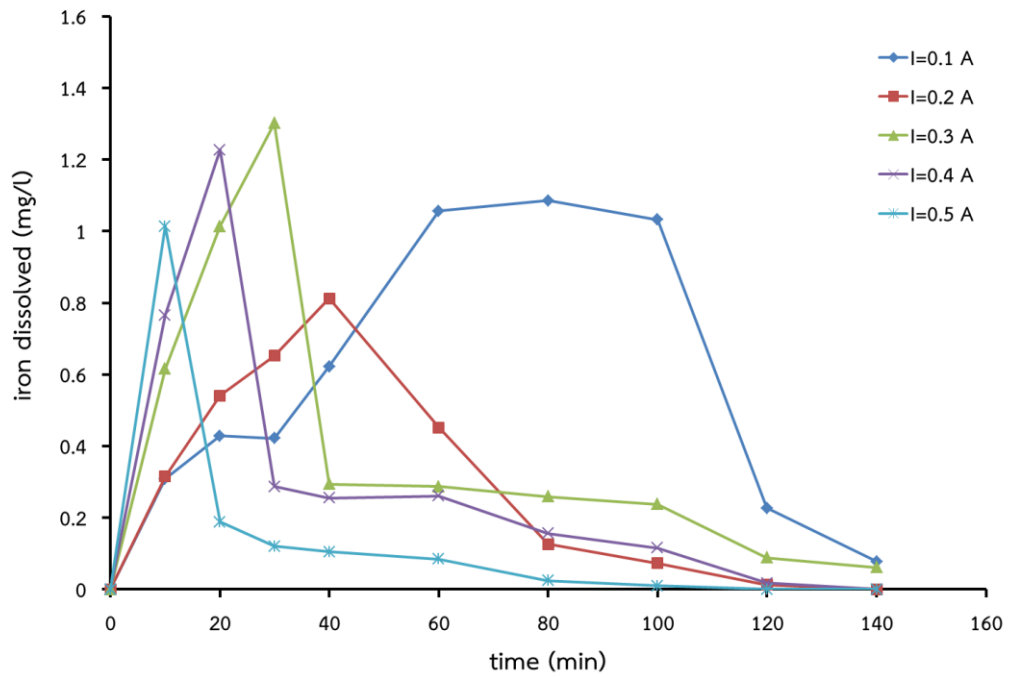
ในขณะที่กระแสไฟฟงที่ ขนาดอิเล็กโทรดที่ทดสอบมีขนาดเปลี่ยนแปลงไป สังเกตเห็นได้ว่า ที่เวลาเท่ากัน พบปริมาณโลหะละลายหรือโลหะที่แตกตัวออกมามีความแตกต่างกัน โดยอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่โลหะที่แตกตัวออกมาสูงกว่าอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวขนาดเล็ก เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อปลดปล่อยโลหะ (Fe²⁺, Fe³⁺) ออกมา เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของอิเล็กโทรด (electrode surface) เป็นไปตามกลไกการถ่ายเทมวลสารระหว่างอิเล็กโทรด (Kinetics of electrode reaction) ดังนั้น เมื่อให้กระแสไฟฟ้าเข้าระบบเท่ากัน ในระหว่างดำเนินระบบในอิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น มีผลให้โลหะสามารถแตกตัวได้ไวกว่าอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็ก (Walsh, 1992)

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเหล็กละลายน้ำนั้นมีผลมาจากการเปลี่ยนเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์อันเนื่องมาจากค่า pH ภายในระบบที่เปลี่ยนแปลงไป ที่ค่า pH 2-6 การละลายของ Fe²⁺ ในน้ำเสียเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวก (anode) ในขณะที่ขั้วลบ (cathode) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิด OH⁻ และ H₂ จากนั้นจะเกิดการตกตะกอนของ Fe(OH)₂ ดังสมการ (30) ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น จากการเกิด OH⁻ มีผลให้ค่า pH ในระบบสูงขึ้นจนถึง pH 7 ไอออน

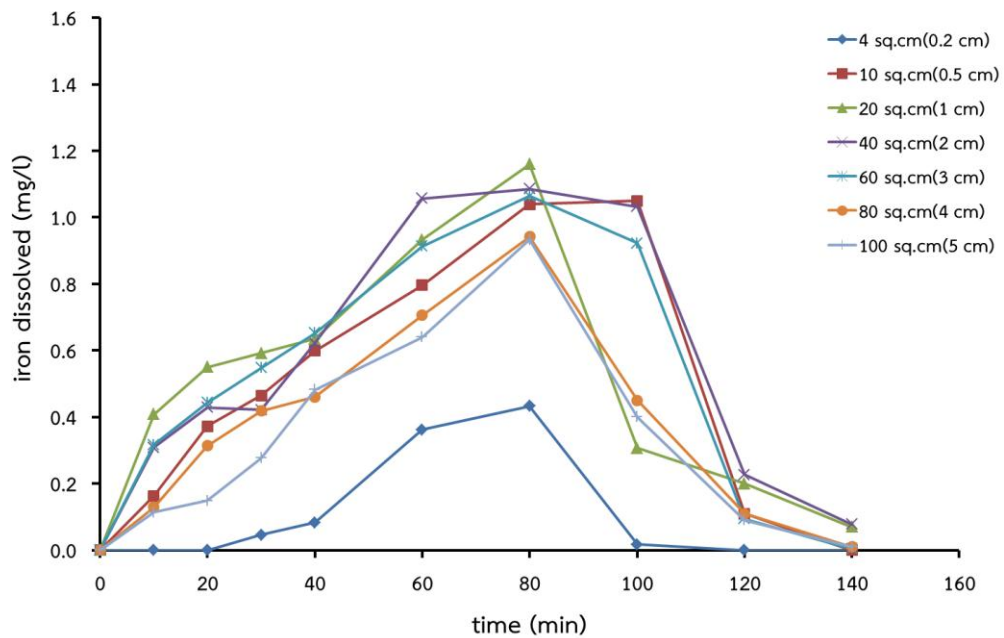
Fe^{2+} ที่มีความเสถียรน้อยจึงเกิดการออกซิเดชันด้วยออกซิเจนกลายเป็น Fe^{3+} เกิดการตกตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_{2(s)}$ ทำให้น้ำเสียมีสีเขียวปะปนและ $\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}$ ทำให้น้ำเสียมีสีน้ำตาลแดงปะปน ดังสมการ (31) ในขณะที่เดียวกันยังเกิด H_2 ที่ขั้วลบของระบบและทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังภาพที่ 4-52 เมื่อระบบมีค่า pH 12 จะเกิดการตกตะกอนของเหล็กในรูป $\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}$ ดังสมการ (32) แต่ค่อนข้างเกิดในจำนวนน้อยกว่าที่สภาวะเป็นกรดและสภาพความเป็นกลาง ในขณะที่เดียวกันทำให้ปริมาณเหล็กละลายในน้ำเสียนี้น้อยลงเรื่อยๆ จนมีปริมาณน้อยมากทำให้ไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังภาพที่ 4-53 ทั้งนี้ การเกิดของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ จะเกิดภายใต้สภาวะที่มีความเป็นกรดสูงกว่า $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ในสภาวะสมดุลยังเกิดการสร้างตัวเป็นโครงข่ายคล้าย monomeric species เช่น $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ และเกิดไอออนบวกของ polymeric ได้แก่ $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$ และ $\text{Fe}_2(\text{OH})_4^{2+}$ เป็นต้น โครงข่ายแบบโพลิเมอร์ไอออนเหล็กในรูปต่างๆ และการเพิ่มขึ้นของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ จะสามารถกำจัดอนุภาคของสีที่ย้อมที่ละลายอยู่ในน้ำเสียได้ด้วยกระบวนการเชิงซ้อนที่พื้นผิว (surface complexation) หรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Martinez-Huitle and Brillas, 2009) ลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นจากการใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรดสำหรับบำบัดน้ำเสียสีย้อม Acid red 114 ด้วยเทคนิค XANES มีความคล้ายคลึงกับตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มากถึง 97.9% (Chaikratang et al., 2559) สอดคล้องกับการศึกษาของ Naje et al., 2017 วิเคราะห์ผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยเทคนิค XRD พบว่าตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดนั้นยังมีความคล้ายกับ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มากที่สุด



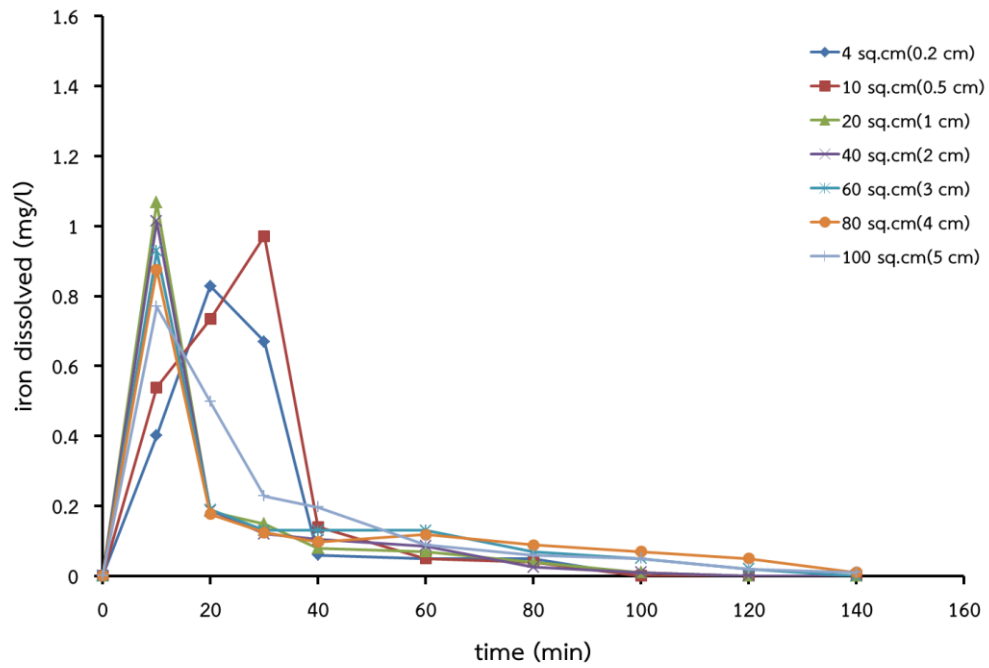
พหุ ประสิทธิภาพ



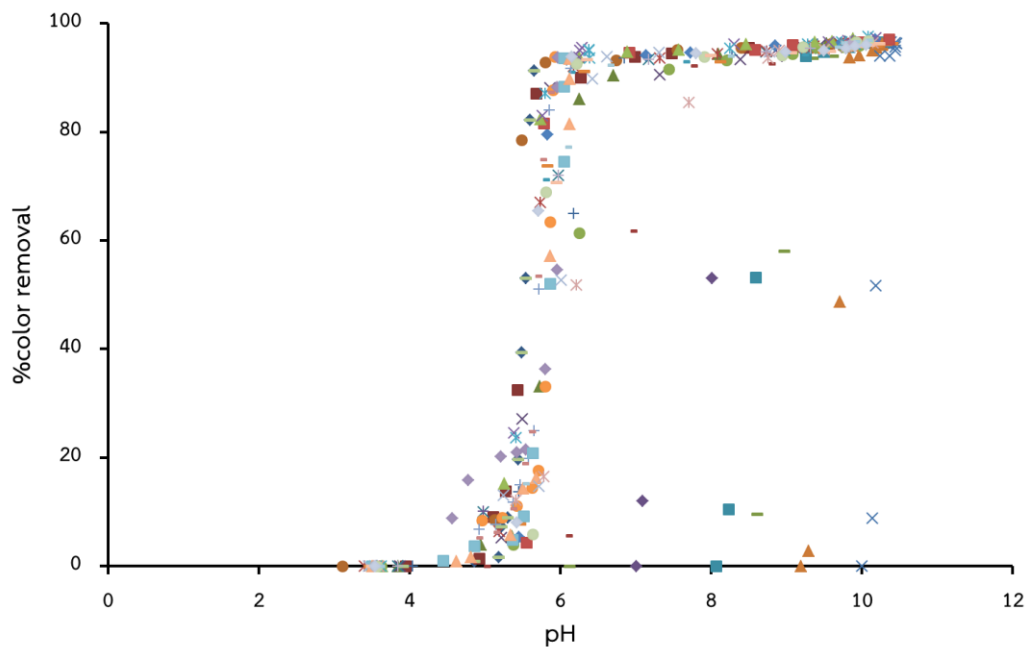
ภาพที่ 4-49 ผลของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบต่อปริมาณเหล็กละลาย



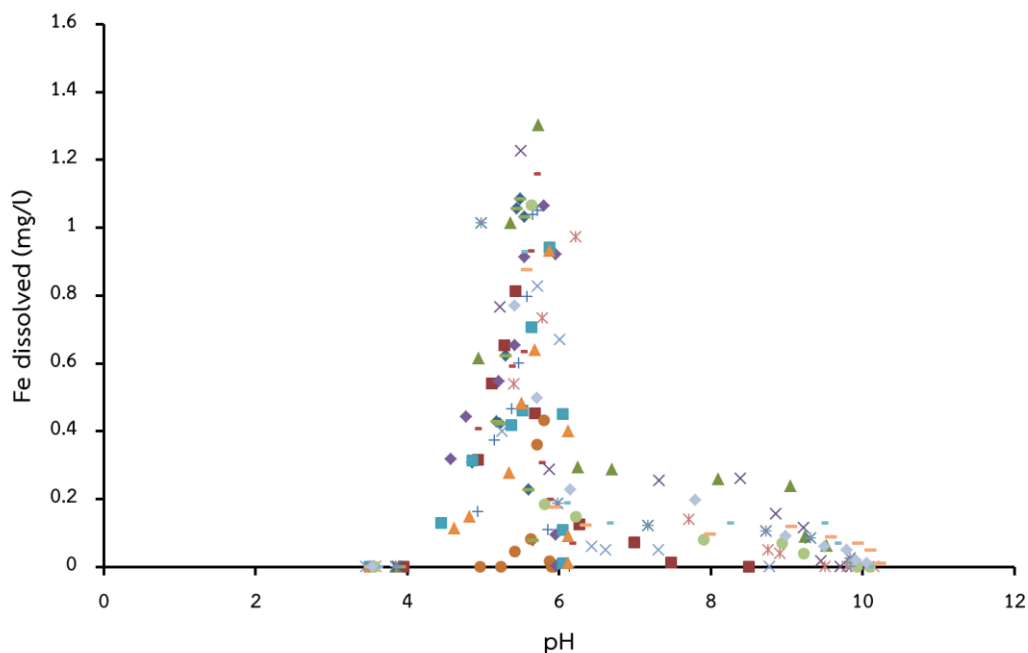
ภาพที่ 4-50 ผลของขนาดอิเล็กโทรดต่อปริมาณเหล็กละลาย ($I=0.1$ A)



ภาพที่ 4-51 ผลของขนาดอิเล็กโทรดต่อปริมาณเหล็กละลาย ($I=0.5\text{ A}$)



ภาพที่ 4-52 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ตามประสิทธิภาพการบำบัดจากการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี (ขั้วไฟฟ้าเหล็ก)



ภาพที่ 4-53 ปริมาณเหล็กละลายที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH

4.5.4 การวิเคราะห์เชื่อมโยงกับทฤษฎีฟาราเดย์ (ขั้วไฟฟ้าเหล็ก)

4.5.4.1 สัดส่วนปริมาณเหล็กละลายจริงกับค่าจากสมการฟาราเดย์ตามกระแสไฟฟ้า

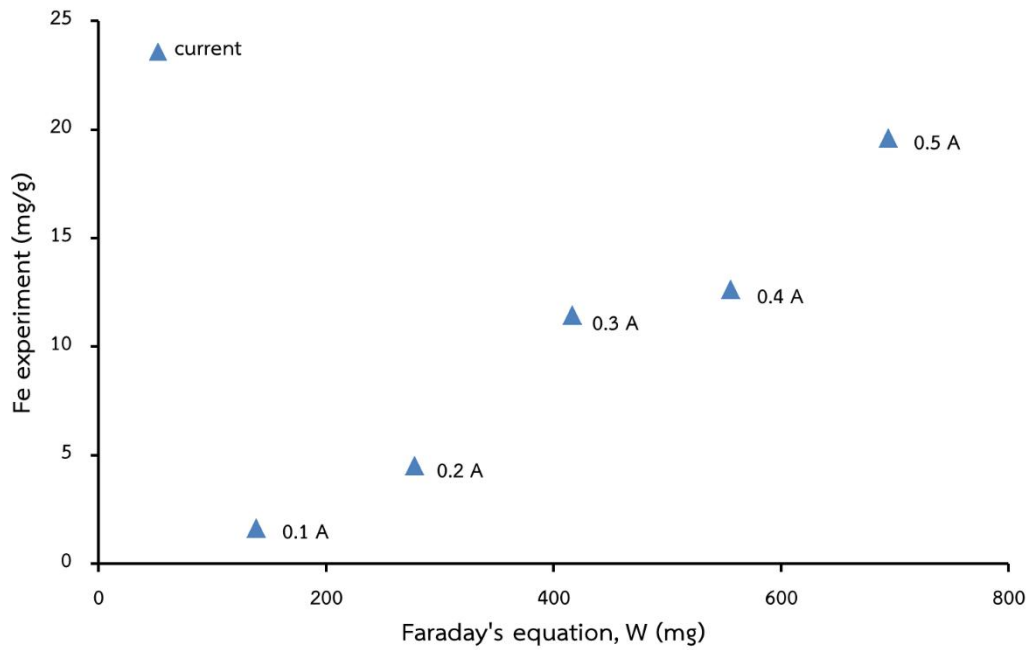
การวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณโลหะละลายจากการตรวจวัดปริมาณโลหะที่อยู่ในตะกอนน้ำเสียสีย้อมด้วยเทคนิค FAAS และการคำนวณจำนวนโลหะที่ถูกปลดปล่อย (W) ตามสมการของฟาราเดย์ ($z=+3$) ดังสมการ (24) เพื่อวิเคราะห์ความเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น ค่ามวลปริมาณกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 0.1-0.5 A ทดสอบกับขั้วเหล็กโทรดขนาด 40 cm^2 (2 cm) ที่ระยะเวลา 140 นาที สำหรับขั้วไฟฟ้าเหล็ก ($z=+3$) พบว่า ปริมาณเหล็กที่ตรวจวัดเพิ่มขึ้นไปตามกระแสไฟฟ้าที่เข้าระบบซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีของฟาราเดย์ แต่ค่าที่มาจากการตรวจวัดจริงมีค่าต่ำกว่าค่าจากการคำนวณ ดังภาพที่ 4-54

เมื่อวิเคราะห์สัดส่วนระหว่างปริมาณเหล็กละลายจากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์พบว่า มีสัดส่วนความแตกต่างเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้น โดยที่กระแสไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.1 A จะมีสัดส่วนความแตกต่างน้อยที่สุด เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสัดส่วนความแตกต่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม นั่นคือ ในขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่ขนาดคงที่ ปริมาณเหล็กที่ละลายออกมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมที่มีแนวโน้มลดลง จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าในการใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็กในการทดสอบกับกระแสไฟ 0.1-0.5 A ยังไม่เพียงพอให้เห็นถึงข้อจำกัดของกระแสไฟต่อขนาดอิเล็กโทรด ดังนั้น ควรศึกษาเพิ่มเติมกับกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น ดังภาพที่

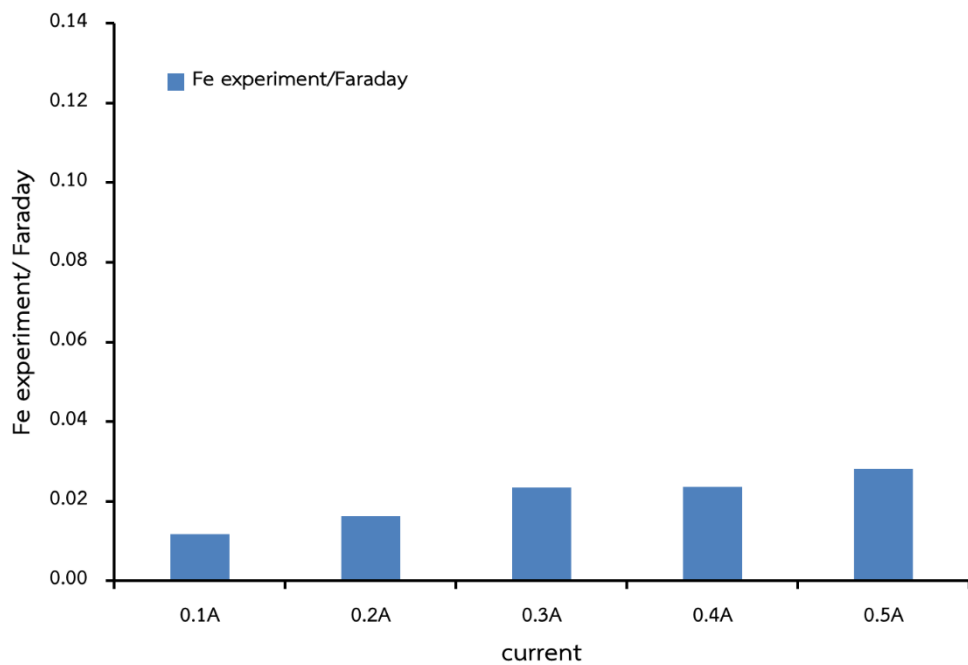
4-55 ซึ่งความแตกต่างของปริมาณโลหะที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากหรือน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี เนื่องมาจากการผุกร่อนทางเคมีของโลหะ (Chemical corrosion), อุทกพลศาสตร์ภายในถึงปฏิกรณ์ (Hydrodynamics), ปฏิกิริยาเคมีร่วมอื่นๆ (electrochemical side-reaction) (Omwene and Kobya, 2018)

4.5.4.2 สัดส่วนปริมาณเหล็กละลายจริงกับค่าจากสมการพาราเดย์ตามขนาดอิเล็กโทรด การวิเคราะห์สัดส่วนของเหล็กละลายต่อค่าจากการคำนวณตามสมการพาราเดย์ โดยทำการวิเคราะห์อิเล็กโทรดที่มีความแตกต่างกันตั้งแต่ 4-100 cm² (0.2-5 cm) เมื่อขนาดอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่พบว่า อิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กจะมีสัดส่วนความแตกต่างน้อย นั้นหมายความว่า ปริมาณเหล็กที่ถูกปลดปล่อยออกมามีค่าแตกต่างจากการคำนวณน้อย แต่เมื่ออิเล็กโทรดมีขนาดใหญ่ขึ้น สัดส่วนความแตกต่างกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณเหล็กที่ถูกปลดปล่อยออกมามากขึ้นในขณะที่ใช้กระแสไฟฟ้าเท่าเดิม สัดส่วนความแตกต่างกับค่าทางทฤษฎีจึงเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4-56 และจากการศึกษาที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นพบว่า ในขณะที่ให้กระแสไฟฟ้าคงที่ ขนาดอิเล็กโทรดส่งผลต่อการแตกตัวของโลหะ ทั้งนี้ ความแตกต่างของปริมาณโลหะที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากหรือน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี เนื่องมาจากการผุกร่อนทางเคมีของโลหะ (Chemical corrosion), อุทกพลศาสตร์ภายในถึงปฏิกรณ์ (Hydrodynamics), ปฏิกิริยาเคมีร่วมอื่นๆ (electrochemical side-reaction) รวมไปถึงคุณลักษณะของน้ำเสียที่บำบัดและสภาวะที่ใช้ในการศึกษา เป็นต้น (Omwene and Kobya, 2018)

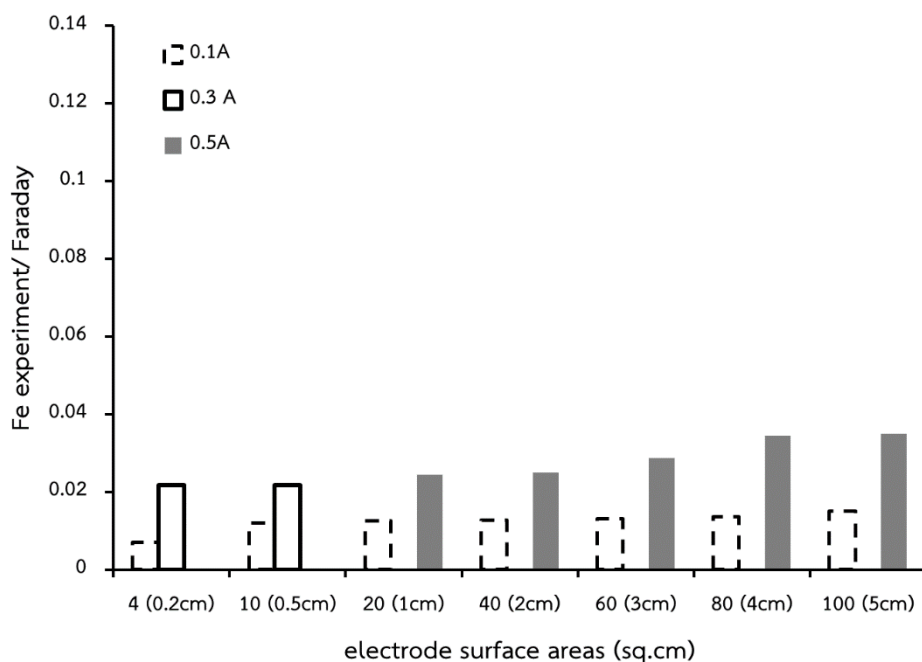




ภาพที่ 4-54 ปริมาณเหล็กในตะกอนเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากทฤษฎีฟาราเดย์ตามกระแสไฟฟ้า, อิเล็กโทรดขนาด 40 cm^2 (2 cm)



ภาพที่ 4-55 สัดส่วนเหล็กละลายจากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์, อิเล็กโทรดขนาด 40 cm^2 (2 cm)

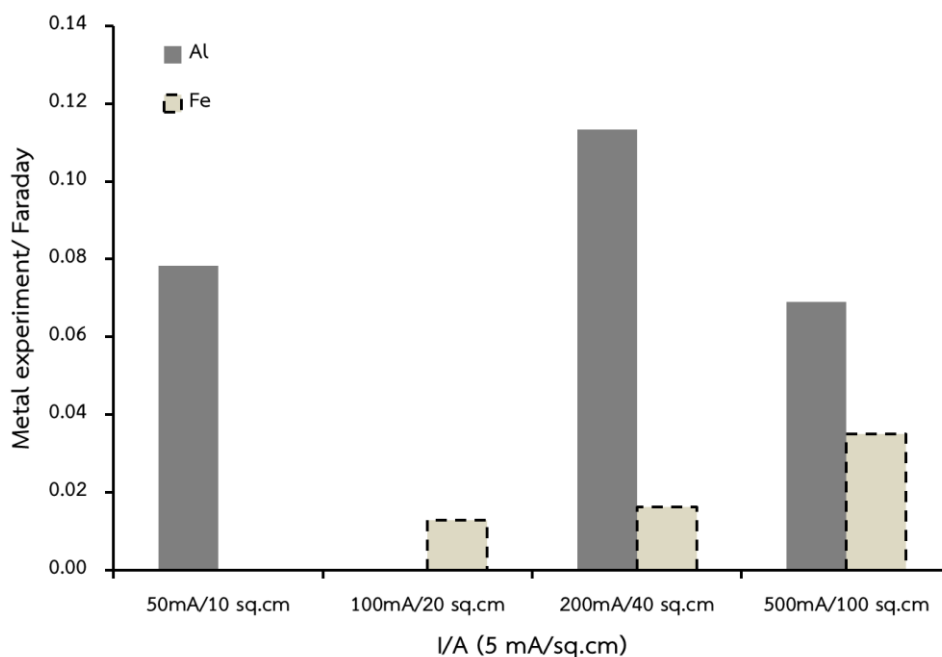


ภาพที่ 4-56 สัดส่วนเหล็กละลายจากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์ตามขนาดของอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้า 0.1-0.5 A

4.5.5 สัดส่วนปริมาณโลหะละลายจริงกับค่าจากสมการฟาราเดย์ตามกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรด (I/A: 5mA/cm²)

การวิเคราะห์สัดส่วน I/A ต่อค่าจากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์ โดยทำการวิเคราะห์สัดส่วน I/A คือ 5 mA/cm² ซึ่งสามารถคำนวณเป็นกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรดที่ใช้ทดสอบได้แก่ 50 mA/10 cm², 200mA/40 cm² และ 500mA/100 cm² สำหรับใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม และ 100 mA/20 cm², 200mA/40 cm² และ 500mA/100 cm² เมื่อทดสอบกับขั้วไฟฟ้าเหล็ก พบว่าเมื่อสัดส่วน I/A คงที่ แต่มีปริมาณกระแสไฟฟ้าเข้าระบบแตกต่างกันและใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น สัดส่วนของโลหะละลายจากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และลดลงเล็กน้อยที่สัดส่วน I/A คือ 500mA/100 cm² อีกทั้งยังเห็นได้ว่า ชนิดขั้วไฟฟ้ามีความแตกต่างของสัดส่วนโลหะละลายจากการทดลองต่อค่าจากสมการฟาราเดย์ค่อนข้างมาก โดยอลูมิเนียมจะมีสัดส่วนความแตกต่างสูงกว่าเหล็กอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพที่ 4-57 เมื่อกำหนดสัดส่วนของ I/A เข้าระบบเท่ากัน ขนาดอิเล็กโทรดแตกต่างกันมีผลต่อปริมาณโลหะละลายที่แตกตัวออกมาจากขั้วบวก ทั้งนี้ ชนิดของขั้วไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อสัดส่วนโลหะที่ละลายออกมา โดยความแตกต่างของปริมาณโลหะที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากหรือน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ

ตามทฤษฎี เนื่องมาจากการผูกมัดทางเคมีของโลหะ หรือปฏิกิริยาเคมีร่วมอื่นๆ เป็นต้น (Omwene and Kobya, 2018)

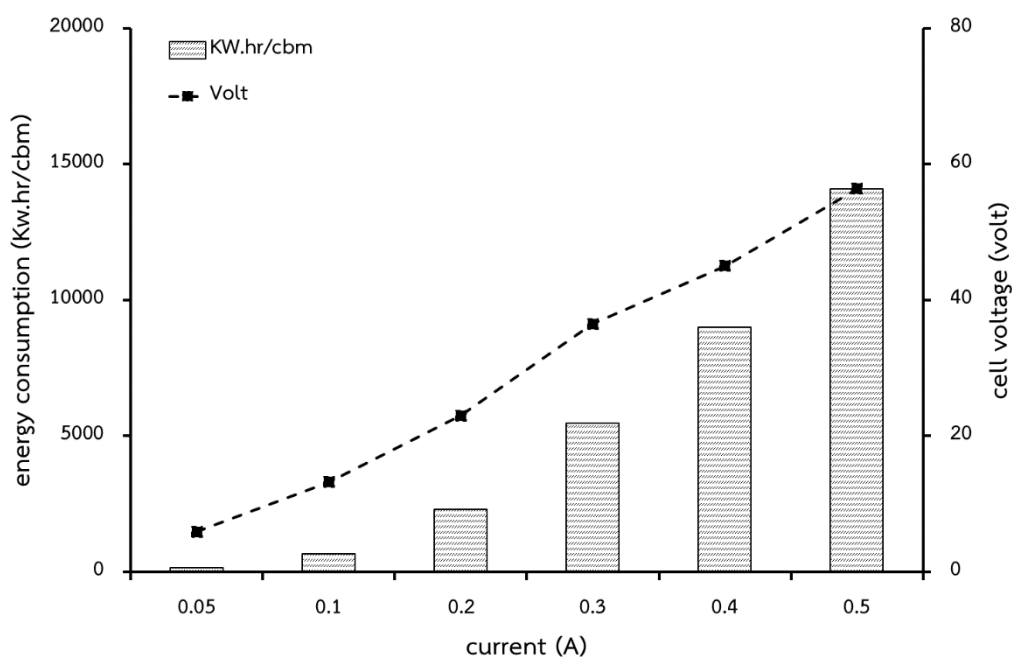


ภาพที่ 4-57 ปริมาณโลหะละลายตามสัดส่วนกระแสไฟฟ้าต่อขนาดอิเล็กโทรด (I/A) 5 mA/cm² กับการคำนวณตามสมการฟาราเดย์

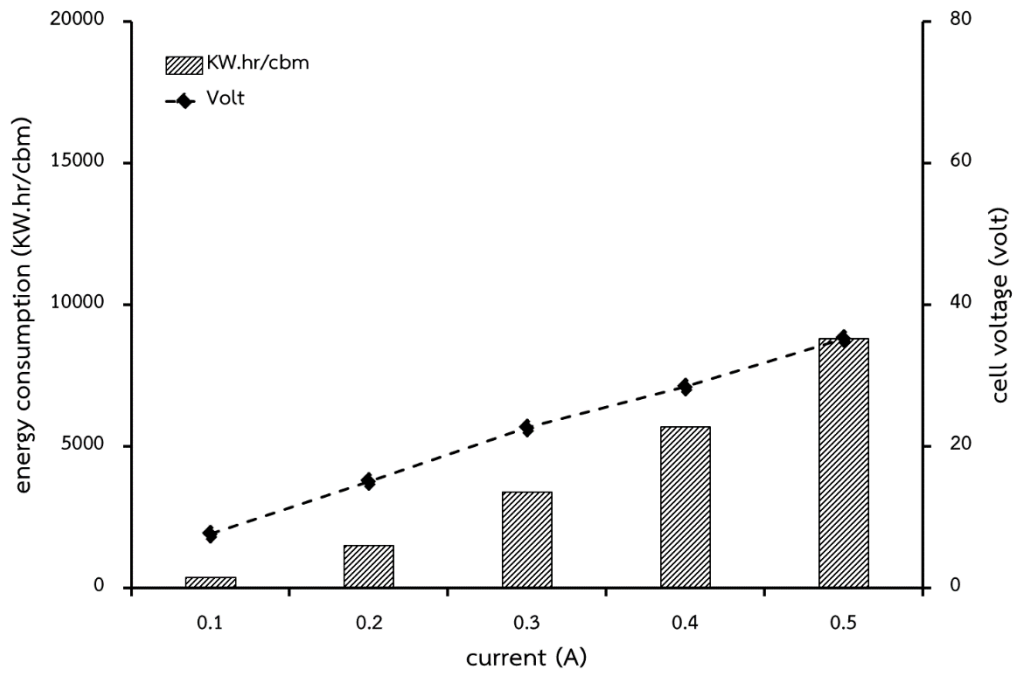
4.6 ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการดำเนินระบบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการคำนวณปริมาณพลังงานที่ใช้ออกมาในหน่วย KW.hr/m³ โดยคำนวณจากสมการ (25) แบ่งออกเป็นปริมาณพลังงานที่ใช้ตามกระแสไฟฟ้า (0.05-0.5 A) และจำนวนพลังงานที่ใช้ตามการเปลี่ยนแปลงของขนาดอิเล็กโทรด (4-100 cm²) ที่ระยะเวลาดำเนินระบบ 60 นาที เท่ากัน ซึ่งปริมาณพลังงานที่ใช้ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าและแรงดันภายในระบบ ผลการคำนวณปริมาณพลังงานที่ใช้พบว่า ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูงตามนั้นคือ 5.9-56.4 volt ส่งผลให้มีจำนวนพลังงานที่ใช้สูงขึ้นจาก 147.5 (0.05 A) เป็น 14,100 KW.hr/m³ (0.5 A) ในทำนองเดียวกัน การทดสอบกับขั้วไฟฟ้าเหล็กมีแนวโน้มการใช้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นเช่นกันคือ 7.6-35.2 volt ทำให้ปริมาณพลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้นจาก 380 (0.1 A) เป็น 8,800 KW.hr/m³ (0.5 A) ดังภาพที่ 4-58 และภาพที่ 4-59 สังเกตเห็นได้ว่า ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงขนาดอิเล็กโทรดที่ใช้ นั้น มีผลให้แรงดันไฟฟ้าในระบบลดลง เมื่ออิเล็กโทรดมีขนาดพื้นที่ใหญ่ขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ลดลง สำหรับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมในการทดสอบที่กระแสไฟ 0.05 A เมื่ออิเล็กโทรดใหญ่ขึ้นจำนวน

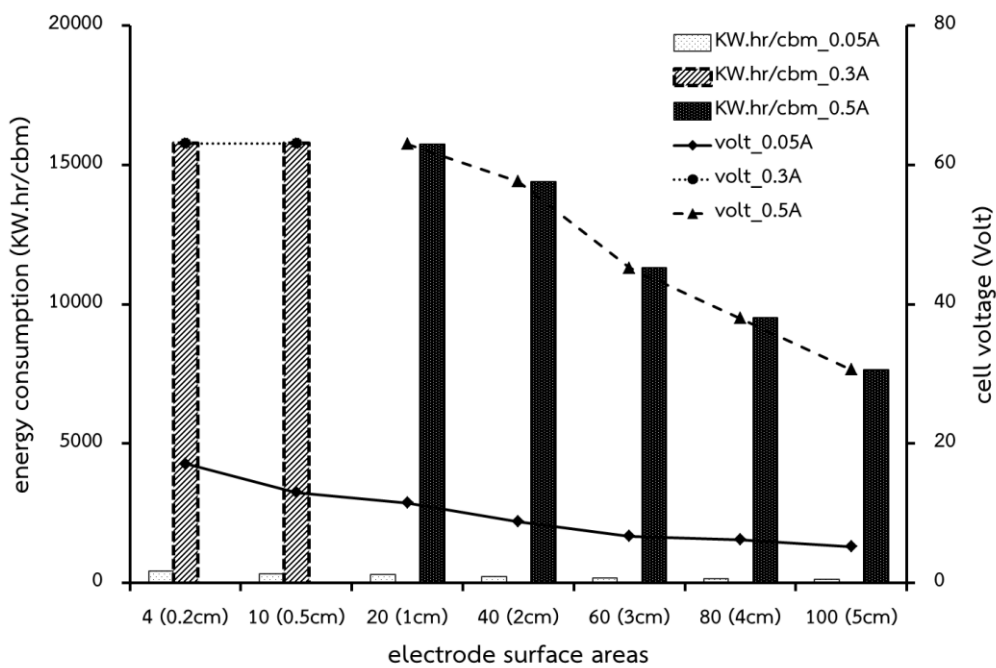
แรงดันที่ใช้ลดลงจาก 17.1 volt (4 cm^2) เป็น 5.2 volt (100 cm^2) มีปริมาณพลังงานที่ใช้อยู่ที่ 427.5-130 KW.hr/ m^3 ในการทดสอบที่กระแสไฟ 0.5 A มีแรงดันไฟเข้าระบบลดลงจาก 63.1 เป็น 30.6 volt สามารถลดปริมาณพลังงานที่ใช้จาก 15,775 เป็น 7,650 KW.hr/ m^3 ดังภาพที่ 4-60 ในทำนองเดียวกัน การใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็กที่การทดสอบกับกระแสไฟ 0.1 A มีการใช้แรงดันไฟอยู่ที่ 18.2-4.4 volt คำนวณปริมาณพลังงานที่ใช้ คือ 455-110 KW.hr/ m^3 เมื่อทดสอบกับกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเป็น 0.5 A พบว่ามีการใช้แรงดันอยู่ที่ 45.8-20.4 volt ทำให้การใช้พลังงานลดลงจาก 11450 เป็น 5100 KW.hr/ m^3 ดังภาพที่ 4-61 เมื่อใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นสามารถลดแรงดันไฟฟ้าที่เข้าระบบได้ เนื่องจากสภาพความต้านทาน (resistance) ของโลหะแปรผกผันกับภาคตัดขวาง (surface area) ของลวดโลหะที่ความยาวของโลหะนั้นคงที่ กล่าวคือ ที่อิเล็กโทรดความยาวเท่ากันและใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากัน แต่อิเล็กโทรดมีพื้นที่หน้าตัดใหญ่ขึ้นส่งผลให้มีความต้านทานต่ำทำให้ใช้แรงดันไฟฟ้าน้อยลง ในทางกลับกันอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กทำให้มีความต้านทานสูงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟสูงขึ้นในการจ่ายกระแสไฟฟ้าปริมาณเท่ากันเข้าสู่ระบบ เป็นไปตามทฤษฎีของโอห์ม (Ohm's law) (Meaden, 1965)



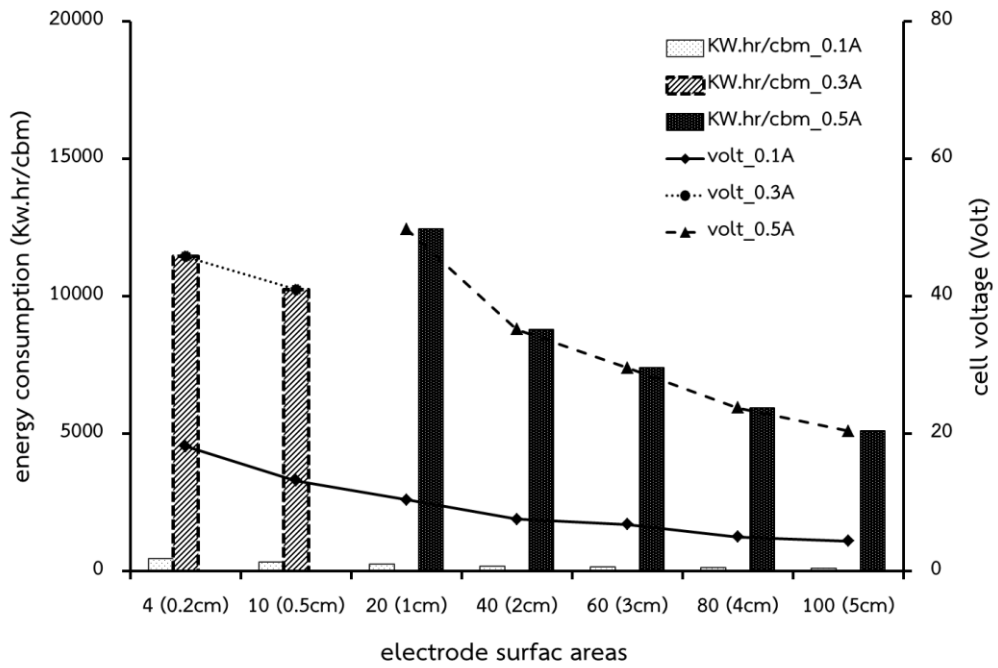
ภาพที่ 4-58 ปริมาณพลังงานที่ใช้และแรงดันไฟเข้าระบบตามกระแสไฟฟ้า, ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม



ภาพที่ 4-59 ปริมาณพลังงานที่ใช้และแรงดันไฟเข้ระบบตามกระแสไฟฟ้า, ขั้วไฟฟ้าเหล็ก



ภาพที่ 4-60 ปริมาณพลังงานที่ใช้และแรงดันไฟเข้ระบบตามขนาดอิเล็กโทรด, ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม



ภาพที่ 4-61 ปริมาณพลังงานที่ใช้และแรงดันไฟฟ้าในระบบตามขนาดอิเล็กโทรด, ขั้วไฟฟ้าเหล็ก



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี

5.1.1 ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม

1) ค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อม ช่วง pH 4-6 เกิดการปลดปล่อย Al^{3+} ที่ขั้วบวกและเกิดกระบวนการตกตะกอนด้วยการทำให้ประจุเป็นกลาง (neutralization) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณอลูมิเนียมละลายเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระบบดำเนินไปจนถึง pH 6.5-7 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยในช่วงนี้จะเกิดกระบวนการดูดซับอนุภาคสีย้อมด้วย $Al(OH)_3$ ทำให้ปริมาณอลูมิเนียมละลายลดเรื่อยๆ จนเหลือน้อยมากและไม่สามารถตรวจวัดได้ และค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสม ได้แก่ pH 3-9

2) ปริมาณกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ โดยกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ ตั้งแต่ 0.3-0.5 A ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 98.6-99.7%

3) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดจาก 0.5 เป็น 4 cm พบว่าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพ แต่มีผลโดยตรงต่อทำให้แรงดันไฟฟ้าและนำไปสู่ปริมาณพลังงานที่ใช้ดำเนินระบบ โดยมีปริมาณการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจาก $3,725 \text{ KW.hr/m}^3$ (14.9 V) เป็น $15,250 \text{ KW.hr/m}^3$ (61 V)

4) การเพิ่ม NaCl ตั้งแต่ 0.25-2 g/l สามารถเพิ่มค่าการนำไฟของน้ำเสียสีย้อมจาก 0.73 เป็น 2.67 mS/m ทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงและทำให้ปริมาณพลังงานที่ใช้ดำเนินระบบลดลง $5,850 \text{ KW.hr/m}^3$ (23.4 V) ลดลงเหลือ $1,675 \text{ KW.hr/m}^3$ (6.7 V)

5.1.2 ขั้วไฟฟ้าเหล็ก

1) ค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อม ในช่วงค่า pH 2-6 การละลายของ Fe^{2+} ในน้ำเสียเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวก (anode) ในขณะเดียวกันขั้วลบ (cathode) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิด OH^- และ H_2 จากนั้นจะเกิดการตกตะกอนของ $Fe(OH)_2$ ทำให้ปริมาณเหล็กละลายในน้ำเสียเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น เมื่อระบบมีค่า pH 7 ไอออน Fe^{2+} ที่มีความเสถียรน้อยจึงเกิดการออกซิเดชันด้วยออกซิเจนกลายเป็น Fe^{3+} เกิดการตกตะกอนของ $Fe(OH)_{2(s)}$ ทำให้น้ำเสียมีสีเขียวปะปนและ $Fe(OH)_{3(s)}$ ทำให้น้ำเสียมีสีน้ำตาลแดงปะปน จากนั้นประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล ส่งผลให้ปริมาณเหล็กละลายในน้ำเสียลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเมื่อระบบมีค่า pH 12 จะเกิดการตกตะกอนของเหล็กในรูป $Fe(OH)_{3(s)}$ และใน

ขณะเดียวกันทำให้ปริมาณเหล็กละลายในน้ำเสียมีปริมาณลดลงเรื่อยๆ จนมีปริมาณน้อยมากและไม่สามารถตรวจวัดได้ และค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสม ได้แก่ pH 3-10

2) ปริมาณกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ โดยกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ ตั้งแต่ 0.3-0.5 A ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 96.2-96.6%

3) ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด อิเล็กโทรด เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดจาก 0.5 เป็น 4 cm พบว่าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพ แต่มีผลโดยตรงต่อทำให้แรงดันไฟฟ้าและนำไปสู่ปริมาณพลังงานที่ใช้ดำเนินระบบ โดยมีปริมาณการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจาก 3,350 KW.hr/m³ (13.4 V) เป็น 11,800 KW.hr/m³ (47.2 V)

4) การเพิ่ม NaCl ตั้งแต่ 0.25-2 g/l สามารถเพิ่มค่าการนำไฟของน้ำเสียเสียจาก 0.99 เป็น 4.33 mS/m ทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงและทำให้ปริมาณพลังงานที่ใช้ดำเนินระบบลดลง 4,925 KW.hr/m³ (19.7 V) ลดลงเหลือ 1,550 KW.hr/m³ (6.2 V)

5.2 การศึกษาอิทธิพลของขนาดอิเล็กโทรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี

การเพิ่มขนาดของอิเล็กโทรด ในขณะที่ให้กระแสไฟฟ้าคงที่ ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยในระหว่างดำเนินระบบอิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าอิเล็กโทรดขนาดเล็กลง ทั้งนี้ การใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นยังสามารถลดแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ระบบในขณะที่ใช้กระแสไฟฟ้าเท่าเดิมได้อีกด้วย โดย ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมและเหล็กพบว่า เมื่อเพิ่มขนาดอิเล็กโทรดที่กระแสไฟฟ้าเท่าเดิมทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลง จาก 17.1 เหลือ 5.2 volt และลดลงจาก 18.2 เหลือ 4.4 volt มีผลทำให้ค่าใช้จ่ายลดลง 427.5-130 KW.hr/m³ และ 455-110 KW.hr/m³ ตามลำดับ

5.3 ศึกษาปริมาณโลหะละลายในน้ำเสียเสียเชื่อมโยงกับทฤษฎีของฟาราเดย์ (Faraday's law)

5.3.1 ปริมาณโลหะละลายต่อกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นปริมาณโลหะละลายจากการทดลองสูงขึ้นสอดคล้องกับกฎของฟาราเดย์

5.3.2 สัดส่วนระหว่างปริมาณโลหะละลายจากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการฟาราเดย์ (Metal_{experiment}/ Faraday) สำหรับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมเมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ใช้อิเล็กโทรดขนาดเท่าเดิม การใช้กระแสไฟฟ้าพบว่า สัดส่วนความแตกต่างเพิ่มขึ้น แต่เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นพบว่าสัดส่วนความแตกต่างมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากพื้นที่อิเล็กโทรดต่อกระแสไฟฟ้าน้อยลงจึงทำให้ปริมาณอลูมิเนียมที่ถูกปลดปล่อยออกมาลดลง ในทางกลับกันเมื่อให้

กระแสไฟต่ำๆ กับขนาดพื้นที่อิเล็กโทรดเท่าเดิม ปริมาณอลูมิเนียมที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า ขนาดอิเล็กโทรดต่อการใช้กระแสไฟมีขีดจำกัด และยิ่งส่งผลต่อปริมาณอลูมิเนียมที่ละลายออกมา อย่างไรก็ตาม การใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็ก เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่ม ปริมาณเหล็กที่ละลายออกมาจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และยังไม่สามารถเห็นถึงข้อจำกัดของกระแสไฟต่อขนาดอิเล็กโทรด ดังนั้น ควรศึกษาเพิ่มเติมกับกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น และควรศึกษากับกระแสไฟต่ำมากๆ กับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมเพื่อวิเคราะห์ถึงความสามารถของขั้วไฟฟ้า

5.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะละลายตามสัดส่วน I/A ที่ 5 mA/cm^2 พบว่า เมื่อสัดส่วน I/A คงที่ แต่มีกระแสไฟฟ้าเข้าระบบเพิ่มขึ้นและมีขนาดอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นมีสัดส่วนของค่าโลหะละลายจากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และชนิดขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมมีความแตกต่างมากกว่าขั้วไฟฟ้าเหล็ก

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 งานวิจัยนี้ศึกษาโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ คุณลักษณะของน้ำเสียจึงมีความแตกต่างจากน้ำเสียจริง ซึ่งมีการปนเปื้อนของสารเคมีที่เดิมเพื่อช่วยในการรักษาความคงทนของสี อีกทั้งสารช่วยเคลือบติดผ้าอื่นๆ ดังนั้นจึงควรศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของน้ำเสียจริง

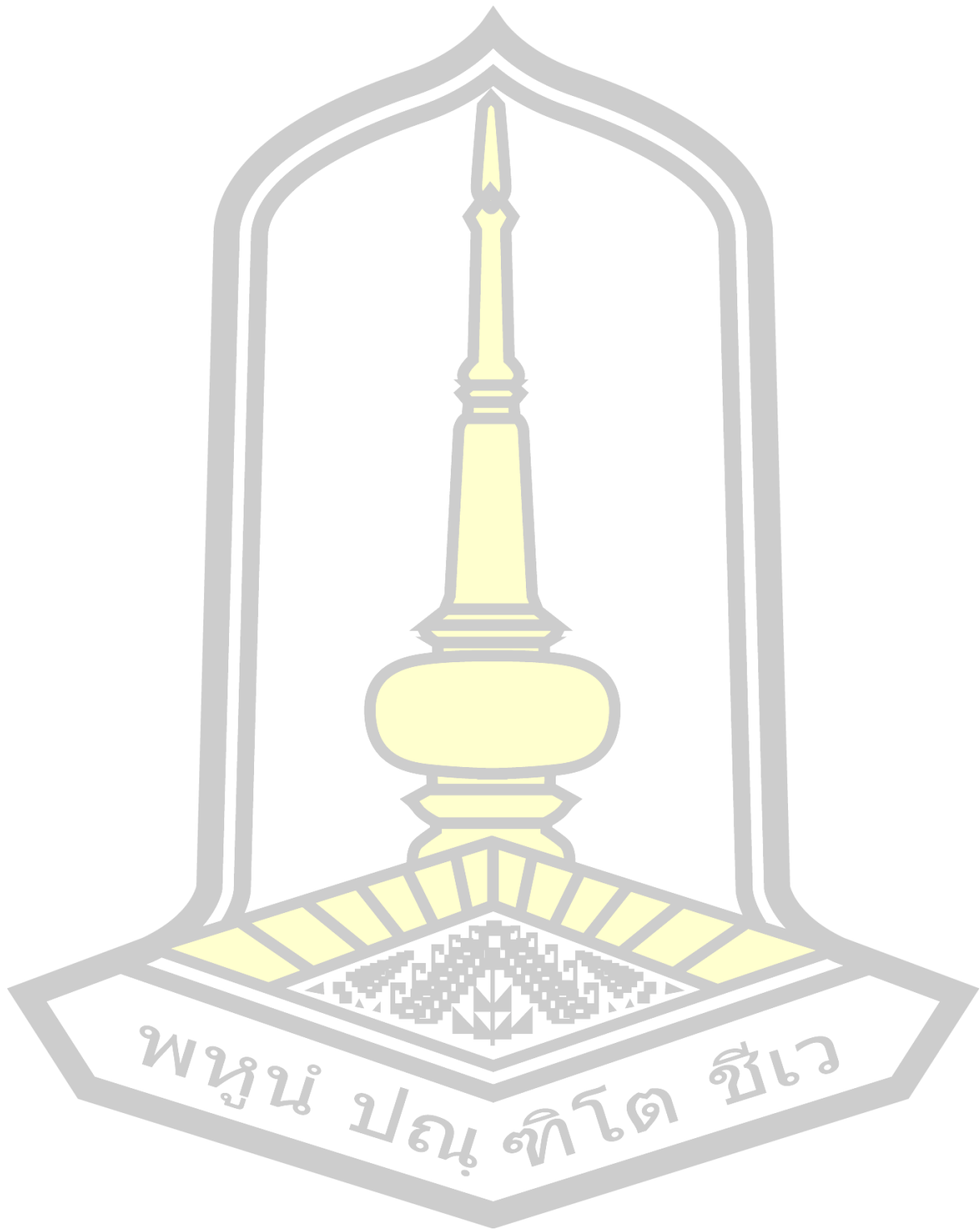
5.4.2 ควรทดสอบกับเครื่องจ่ายกระแสไฟที่สามารถกำหนดแรงดันไฟเข้าระบบที่แน่นอนได้ เพื่อความเพิ่มความแม่นยำของการดำเนินระบบ ตลอดจนการทดสอบกับกระแสไฟที่น้อยมากและกระแสไฟที่มากขึ้น เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ข้อจำกัดของขนาดอิเล็กโทรดได้อย่างชัดเจน

5.4.3 ศึกษาความสามารถของขนาดอิเล็กโทรดเพิ่มเติม โดยทดสอบกับกระแสไฟต่ำมากๆ สำหรับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม และทดสอบกับกระแสไฟสูงๆ สำหรับขั้วไฟฟ้าเหล็ก เพื่อวิเคราะห์ถึงความสามารถและขีดจำกัดของสัดส่วนขนาดอิเล็กโทรดต่อกระแสไฟในการปลดปล่อยโลหะ

5.4.4 ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาบริเวณพื้นผิวของอิเล็กโทรด ตามกลไกการถ่ายเทมวลสารระหว่างอิเล็กโทรด (Kinetics of electrode reaction) เพื่อวิเคราะห์อัตราการปลดปล่อยโลหะหรือการแตกตัวของโลหะที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กโทรดมีขนาดเปลี่ยนแปลงไป

พูน ปรณ จิต ชิว

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

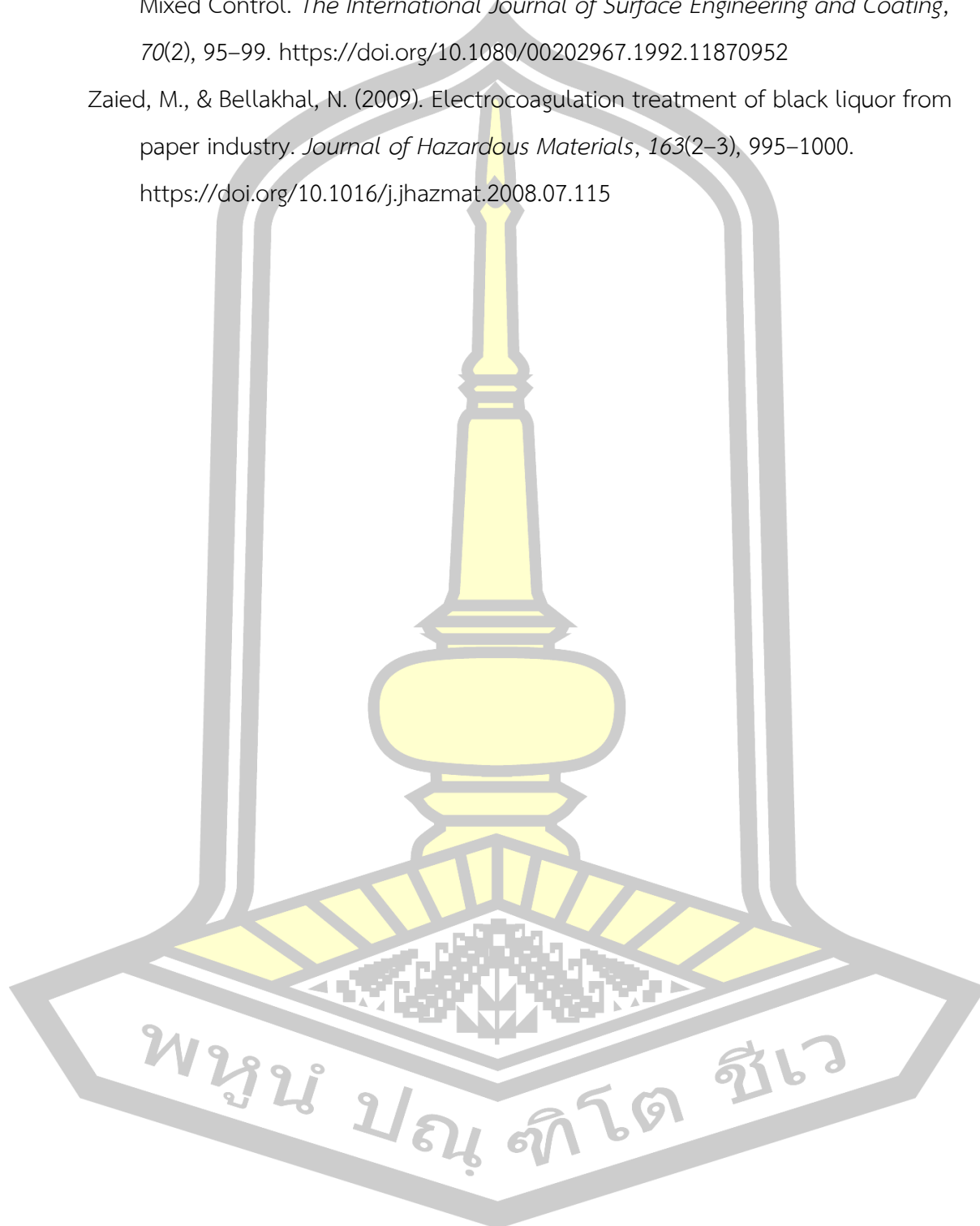
- วลัยกร นิตยพัฒน์. (2559). *หลักการย่อยสีสิ่งทอ*. กรุงเทพมหานคร: จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์.
- วิโรจน์ ปิยวัชรพันธุ์. (2540). *เคมีเชิงฟิสิกส์ 1*. กรุงเทพมหานคร: โอ.เอส.พรีนติ้ง เฮ้าส์.
- สุรพงษ์ สุวจิตตานนท์. (2531). *ไฟฟ้าเคมี*. กรุงเทพมหานคร: โอ.เอส.พรีนติ้ง เฮ้าส์.
- Abu Ghalwa, N. M., & Saqer, A. M. (2016). Removal of Reactive Red 24 Dye by Clean Electrocoagulation Process Using Iron and Aluminum Electrodes. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 07(01), 1–7.
<https://doi.org/10.4172/2157-7048.1000269>
- Ahangarnokolaei, M. A., Ganjidoust, H., & Ayati, B. (2018). Optimization of parameters of electrocoagulation/ flotation process for removal of acid red 14 with mesh stainless steel electrodes. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(2), 278–292. <https://doi.org/10.2166/wrd.2017.091>
- Al Aji, B., Yavuz, Y., & Koparal, A. S. (2012). Electrocoagulation of heavy metals containing model wastewater using monopolar iron electrodes. *Separation and Purification Technology*, 86, 248–254.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.11.011>
- Aoudj, S., Khelifa, A., Drouiche, N., Hecini, M., & Hamitouche, H. (2010). Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(11), 1176–1182. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.08.019>
- Arslan-Alaton, I., Kabdaşlı, I., Vardar, B., & Tünay, O. (2009). Electrocoagulation of simulated reactive dyebath effluent with aluminum and stainless steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2–3), 1586–1594.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.004>
- Atashzaban, Z., Seidmohammadi, A., Nematollahi, D., Azarian, G., Heidary Shayesteh, O., & Rahmani, A. R. (2017). The Efficiency of Electrocoagulation and Electroflotation Processes for Removal of Polyvinyl Acetate From Synthetic Effluent. *Avicenna Journal of Environmental Health Engineering, In Press(In Press)*. <https://doi.org/10.17795/ajehe-7469>

- Chaikratang, T., Jitto, P., & Nakbanpote, W. (2559). Studies residues pollutant and flocculation of dye wastewater by Electrocoagulation process. *The 12th Mahasarakham University Research Conference*, 148–155.
- Chou, W.-L., Wang, C., Liu, T., & Chou, L. (2011). Effect of Process Parameters on Removal of Salicylic Acid from Aqueous Solutions via Electrocoagulation. *Environmental Engineering Science*, 28(5), 365–372.
<https://doi.org/10.1089/ees.2010.0262>
- Fayad, N. (2017). *The application of electrocoagulation process for wastewater treatment and for the separation and purification of biological media*. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01719756>
- Garcia-Segura, S., Eiband, M. M. S. G., de Melo, J. V., & Martinez-Huitle, C. A. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 801, pp. 267–299.
<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047>
- Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., & Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, Vol. 404, pp. 1–21.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>
- Hashim, K. S., Shaw, A., & Phipps, D. (2017). Iron removal , energy consumption and operating cost of electrocoagulation of drinking water using a new flow column reactor. *Journal of Environmental Management*, 189, 98–108.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.035>
- Kayan, B., Akay, S., Kulaksız, E., Gözmen, B., & Kalderis, D. (2017). *Acid Red 1 and Acid Red 114 decolorization in H₂O₂-modified subcritical water : process optimization and application on a textile wastewater*. 59, 248–261.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2017>
- Khandegar, V., & Saroha, A. K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent: A review. *Journal of Environmental Management*, 128, 949–963. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043>

- Kim, T. H., Park, C., Shin, E. B., & Kim, S. (2002). Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. *Desalination*, 150(2), 165–175. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00941-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00941-4)
- Kobyas, M., Gengec, E., & Demirbas, E. (2016). Operating parameters and costs assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 101(November), 87–100. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.11.012>
- Kobyas, M., Oncel, M. S., Demirbas, E., Şi, E., Akyol, A., & Ince, M. (2014). *Journal of Environmental Chemical Engineering The application of electrocoagulation process for treatment of the red mud dam wastewater from Bayer ' s process.* 2, 2211–2220. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.09.008>
- Kobyas, Mehmet, Can, O. T., & Bayramoglu, M. (2003). *Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes.* 100, 163–178. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00102-X)
- Martínez-Huitle, C. A., & Brillas, E. (2009). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 87(3–4), 105–145. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.09.017>
- Meaden, G. T. (1965). *Electrical Resistance of Metals* (1st editio). <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5717-7>
- Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K., Vial, C., & Barkaoui, M. (2009). Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering Journal*, 149(1–3), 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.10.018>
- Mickova, I. (2015). Advanced Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment Part I : Electrocoagulation. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS) ISSN*, 14(2), 233–257.

- Modirshahla, N., Behnajady, M. A., & Kooshaiian, S. (2007). Investigation of the effect of different electrode connections on the removal efficiency of Tartrazine from aqueous solutions by electrocoagulation. *Dyes and Pigments*, 74(2), 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.02.006>
- Naje, A. S., Chelliapan, S., Zakaria, Z., Ajeel, M. A., & Alaba, P. A. (2017). A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(3), 263–292. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0019>
- Nandi, B. K., & Patel, S. (2017). Effects of operational parameters on the removal of brilliant green dye from aqueous solutions by electrocoagulation. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2961–S2968. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.11.032>
- Nasrullah, M., Siddique, M. N. I., & Zularisam, A. W. (2014). Effect of high current density in electrocoagulation process for sewage treatment. *Asian Journal of Chemistry*, 26(14), 4281–4285. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2014.16134>
- Omwene, P. I., & Kobya, M. (2018). Treatment of domestic wastewater phosphate by electrocoagulation using Fe and Al electrodes : A comparative study. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 34–51.
- Pajootan, E., Arami, M., & Mohammad, N. (2012). Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers Binary system dye removal by electrocoagulation from synthetic and real colored wastewaters. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43(2), 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2011.10.014>
- Patcharaprakiti, N. (2014). *Water Purification by Solar Powered Electrocoagulation System*.
- Patel N B, Soni B D, R. J. P. (2010). Studies on Removal of Dyes from wastewater using. *Nirma University Journal of Engineering and Technology*, 1(1), 20–25.
- Verma, A. K. (2017). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe-Al composite electrode. *Journal of Water Process Engineering*, 20(May), 168–172. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.11.001>

- Walsh, F. C. (1992). The Kinetics of Electrode Reactions: Part II—Mass Transfer and Mixed Control. *The International Journal of Surface Engineering and Coating*, 70(2), 95–99. <https://doi.org/10.1080/00202967.1992.11870952>
- Zaied, M., & Bellakhal, N. (2009). Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2–3), 995–1000. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.115>



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวบังอร นารีรบ
วันเกิด	วันที่ 19 พฤศจิกายน พ.ศ.2533
สถานที่เกิด	อำเภอหนองวัวซอ จังหวัดอุดรธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 70 หมู่ 1 อำเภอหนองวัวซอ จังหวัดอุดรธานี รหัสไปรษณีย์ 41360
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2552 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอุดรพิชัยรัษฎ์พิทยา จังหวัดอุดรธานี พ.ศ.2556 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ.2563 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชา เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนัน ปณุกิตโต ชีวะ