

รหัสโครงการ SUT7-715-58-24-54



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินและการผลิตก๊าซ
คลอรีนและไฮโดรเจนด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์

Treatment of Wasted Brine from Resin Regeneration Process and
Chlorine and Hydrogen Gas Production using Electrolytic Cell

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีงบประมาณ 2558-2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2563

รหัสโครงการ SUT7-715-58-24-54



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินและการผลิตก๊าซ
คลอรีนและไฮโดรเจนด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์

Treatment of Wasted Brine from Resin Regeneration Process and
Chlorine and Hydrogen Gas Production using Electrolytic Cell

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรินทร์ ราชโซ

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีงบประมาณ 2558-2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2563

บทคัดย่อ

น้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินมีการปนเปื้อนของไอออนที่ละลายอยู่จำนวนมากแต่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ต่ำมาก โดยทั่วไปน้ำเสียจากกระบวนการนี้จะมีค่าของแข็งละลายน้ำ และค่าคลอไรด์ปนเปื้อนน้ำเสียประมาณ 40,000 – 50,000 mg/L ซึ่งเป็นน้ำเสียมีความเค็มสูงส่งผลกระทบต่อเกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดทางชีวภาพและอาจทำให้เกิดสถานะดินเค็ม ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งจากการศึกษาระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน และศึกษาความเป็นไปได้การใช้วิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการเดินระบบระยะยาว จากการศึกษาพบสถานะที่เหมาะสม คือ ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที พื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตารางเซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดเกลือของคลอไรด์คือร้อยละ 67.55 ± 1.02 ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ 67.63 ± 1.05 ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ 97.56 ± 0.68 ทั้งนี้ประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัส พื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองและทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดเกลือของคลอไรด์คือร้อยละ 74.45 ± 4.78 ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ 74.39 ± 4.79 ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ 96.31 ± 0.21 เมื่อเข้าสู่เวลาที่ 144 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าภายในระบบลดลงจึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าลดลงเนื่องจากเกิดการอิ่มตัวของไอออนภายในถังปฏิกิริยา ส่วนขั้วไฟฟ้าบางส่วนมีตะกอนเกาะและเกิดการผุกร่อนจากการใช้งานจึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในระบบลดลงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการและเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

Abstract

Waste brine from resin regeneration process contain total dissolved solid and chloride concentration in the range of 40,000 - 50,000 mg/l that affect microorganism activities in wastewater. Electrolytic cell can be high efficiency in the wastewater with high amounts of suspended solids, less cost and unnecessary required an expert for system. The wastewater has high salinity affected the inhibitory activity of microorganisms in biological treatment systems and can cause salinity conditions. This is not a standard effluent. The study electrolytic cell with the aim to evaluate the efficacy and factors affecting treatment of wastewater from the resin regeneration process. And study the feasibility of using electrolytic cell in the long term. The study found the optimal conditions the contact time of 25 minutes, the surface area of 200 square centimeters and voltage of 10 V. The effective elimination of the chloride is 67.55 ± 1.02 %, total dissolved solid is 67.63 ± 1.05 % and total hardness 97.56 ± 0.68 %. The performance and the factors that affect electrolytic cell is based on the contact time surface area and voltage are related because the electricity supply to the two electrodes. Then, the system for a period of 7 days, the average effective removal of chloride is 74.45 ± 4.78 %, total dissolved solid is 74.39 ± 4.79 % and total hardness 96.31 ± 0.21 %. When entering the period 144 hours of the removal performance was reduced due to the electrical current within the system, thus causing the oxidation reaction and formal the electrodes due to the saturation of the ion within the reaction tank. However, electrodes have a scale deposits and corrosion due to use, resulting in reduced electric shifts through the system, resulting in efficiency and stability in the electrolytic cell operation.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนเงินทุนอุดหนุนงานวิจัยประจำปีงบประมาณ 2559 เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดโลหะหนัก ด้วยแป้งโมดิฟายด์ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ให้การช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยทุกท่านที่มีได้กล่าวไว้ในที่นี้

พัชรินทร์ ราโช

พฤษภาคม 2564



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่.....	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 กรอบแนวคิดงานวิจัย.....	3
2. ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ความต้องการน้ำอ่อนในอุตสาหกรรม.....	5
2.1.1 ความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม.....	5
2.2 การผลิตน้ำอ่อนด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน.....	9
2.2.1 หลักการ.....	9
2.3 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูเรซิน.....	11
2.4 วิธีการบำบัดน้ำเค็ม.....	13
2.4.1 วิธีการใช้ความร้อน (Thermal Techniques).....	13
2.4.2 วิธีแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-Exchange).....	16
2.4.3 วิธีเยื่อกรอง (Membrane techniques).....	18
2.4.4 วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemical techniques).....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic Cell)	24
2.5.1 หลักการ	24
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลติก	25
2.5.3 รูปแบบถังปฏิกรณ์	26
2.5.4 ขั้วไฟฟ้า	28
2.5.5 การกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้า	32
3. วิธีดำเนินการวิจัย	34
3.1 การเก็บข้อมูลเบื้องต้น	36
3.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสีย	38
3.3 ชุดทดลองระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์	38
3.3.1 ส่วนประกอบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์	38
3.3.2 การจัดรูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์	39
3.3.3 เมมเบรน	41
3.4 การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์	42
3.4.1 ระยะเวลาสัมผัส	42
3.4.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้า	43
3.4.3 พื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า	43
3.5 การประเมินสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์	44
3.5.1 การประเมินประสิทธิภาพ	45
3.6 การศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในระยะยาว	45
3.6.1 การประเมินเสถียรภาพ	46
3.6.2 แนวโน้มการเกิดก๊าซ	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การบำรุงและรักษาระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์	47
3.7.1 การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า	47
3.7.2 การทำความสะอาดเมมเบรน	47
3.8 การวิเคราะห์ตัวอย่าง	48
3.8.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)	48
3.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)	49
4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล	50
4.1 การเก็บข้อมูลเบื้องต้น	50
4.2 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา	52
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์	52
4.3.1 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัส	52
4.3.2 ผลกระทบของความต่างศักย์	59
4.3.3 ผลกระทบของพื้นที่ผิวสัมผัส	64
4.3.4 ผลกระทบของรูปแบบการไหลในถังปฏิริยาต่อประสิทธิภาพของระบบ	69
4.3.5 การประเมินปัจจัยการเดินระบบที่มีความเหมาะสม	72
4.4 การเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง	73
4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัด	73
4.4.2 สัณฐานวิทยา	77
4.4.3 การศึกษากลไกการบำบัดของระบบด้วยสมมูลมวล	81
4.4.4 ผลพลอยได้	82

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. บทสรุป.....	84
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	84
5.1.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กทรอนิกส์.....	84
5.1.2 ผลการศึกษาความเป็นไปได้การใช้อิเล็กทรอนิกส์.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
เอกสารอ้างอิง	89
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของระบบแบกะ	92
ภาคผนวก ข. ข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของระบบต่อเนื่อง	121
ภาคผนวก ค. ข้อมูลการศึกษาพื้นฐานวิทยา.....	125
ภาคผนวก ง. ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าในระบบ.....	131
ภาคผนวก จ. ข้อมูลการนำเสนอผลงาน	134
ประวัติผู้เขียน.....	136

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อัตราการใช้น้ำตาม.....	5
2.2 แสดงอัตราการใช้น้ำต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ.....	6
2.3 ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิตปลากะป๋อง.....	8
2.4 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการการฟื้นฟูสภาพเรซิน.....	12
2.5 ข้อดีและข้อเสียระบบ MSF-Multi-Stage Flash Distillation.....	14
2.6 ข้อดีและข้อเสียระบบ MED-Multi-Effect Distillation.....	15
2.7 ข้อดีและข้อเสียระบบ VC-Vapor Compression Distillation.....	15
2.8 ข้อดีและข้อเสียวิธีแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-Exchange).....	17
2.9 ข้อดีและข้อเสียวิธีเยื่อกรอง (Membrane Technology).....	19
2.10 แสดงเปรียบเทียบชนิดเยื่อกรองเมมเบรน.....	19
2.11 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบการทำงานของทั้ง 3 ระบบ.....	23
2.12 แรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่มาตรฐานของโลหะต่างๆ.....	29
2.13 แกลแวนิกซีรีส์(Galvanic series) ของโลหะบางชนิดในน้ำทะเล.....	30
3.1 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการการฟื้นฟูสภาพเรซิน.....	37
3.2 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์จากการฟื้นฟูสภาพเรซิน.....	38
3.3 ลักษณะเยื่อกรองที่ใช้ในระบบอิเล็กโทรไลต์.....	42
3.4 การศึกษาสภาวะระบบอิเล็กโทรไลต์.....	44
3.5 ขั้นตอนการทำความสะอาดเยื่อกรอง.....	48
3.6 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการทดลอง.....	48
4.1 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการการฟื้นฟูสภาพเรซิน.....	51
4.2 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์และปริมาณสารเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์.....	52
4.3 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส.....	57
4.4 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนความต่างศักย์.....	62

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5	ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนพื้นที่ผิวสัมผัส.....67
4.6	ลักษณะน้ำเข้าและออกของรูปแบบการเดินระบบแบบที่ 2.....71
4.7	ประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้า.....73
4.8	ลักษณะน้ำเข้าและออกของการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง.....76
4.9	วิเคราะห์ปริมาณธาตุของขั้วไฟฟ้าผิวก่อนทำปฏิกิริยา.....78
4.10	วิเคราะห์ปริมาณธาตุของขั้วไฟฟ้าผิวหลังทำปฏิกิริยา.....79
4.11	ประเมินสมดุลมวล.....82
4.12	วิเคราะห์ปริมาณก๊าซ.....83



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย.....35
3.2	การติดตั้งถังปฏิกริยา.....39
3.3	แบบถังปฏิกริยาแบบที่1.....40
3.4	แบบถังปฏิกริยาแบบที่2.....41
3.5	แผนผังการประเมินสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์.....45
3.6	แผนผังการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในระยะยาว.....46
4.1	ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ.....54
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์กับระยะเวลาสัมผัส.....54
4.3	ผลกระทบการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสกับประสิทธิภาพการกำจัด.....55
4.4	ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ที่ความต่างศักย์ต่างๆ.....60
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์กับความต่างศักย์.....60
4.6	ผลกระทบการแปรเปลี่ยนความต่างศักย์กับประสิทธิภาพการกำจัด.....61
4.7	ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ที่พื้นที่ผิวสัมผัสต่างๆ.....65
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์กับพื้นที่ผิวสัมผัส.....66
4.9	ผลกระทบของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัด.....66
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัด.....70
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัด.....75
4.12	ภาพถ่ายขั้วแกรไฟต์ก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM.....80
4.13	ภาพถ่ายขั้วแกรไฟต์หลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM.....80
4.14	ภาพถ่ายขั้วไทเทเนียมก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM.....80
4.15	ภาพถ่ายขั้วไทเทเนียมหลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM.....81
4.16	ประเมินกลไกการบำบัดของระบบแบบต่อเนื่องด้วยสมดุลมวล.....82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นทำให้มีความต้องการใช้น้ำที่ปราศจากความกระด้างหรือน้ำอ่อน (Soft Water) ในงานกระบวนการผลิต งานหม้อต้มน้ำ (Boiler) งานระบบปรับอากาศแบบใช้เครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) และน้ำอ่อนอาจเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ เช่น อุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง ผลไม้กระป๋อง แป้งมันสำปะหลัง และอาหารแช่แข็ง ประโยชน์การใช้น้ำอ่อนในงานหม้อต้มน้ำ เพื่อป้องกันการขังหรือตะกรันในเส้นท่อหรือหม้อต้มน้ำและใช้ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหารซึ่งต้องใช้ไอน้ำในการฆ่าเชื้อโรค และระบบหล่อเย็นในระบบปรับอากาศแบบใช้เครื่องทำน้ำเย็น ของห้างสรรพสินค้าหรือโรงแรมขนาดใหญ่ เป็นต้น การผลิตน้ำอ่อนด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ด้วยเรซินได้รับความนิยมในภาคอุตสาหกรรมและพาณิชย์กรรมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบน้อย ดูแลระบบง่ายสามารถควบคุมการทำงานของระบบให้เป็นอัตโนมัติ และสามารถกำจัดค่าความกระด้างให้หมดไปจากน้ำหรือให้ความเข้มข้นต่ำๆได้ ในกระบวนการทำน้ำอ่อนซึ่งในหอหล่อเย็นจะมีการใช้เกลือแกง (NaCl) ความเข้มข้น 8-15% เป็นสารเคมีในการฟื้นฟูเรซินทำให้น้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินมีการปนเปื้อนของไอออนที่ละลายอยู่จำนวนมากแต่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ต่ำมาก โดยทั่วไปน้ำเสียจากกระบวนการนี้จะมีค่าของแข็งละลายน้ำ (total dissolved solids, TDS) อยู่ประมาณ 40,000 – 50,000 mg/L หรือมีค่าคลอไรด์ปนเปื้อนน้ำเสีย 40,000 – 50,000 mg/L (Ksayer et al., 2012) จึงทำให้น้ำเสียมีความเค็มสูง ส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดทางชีวภาพ สภาพแวดล้อมอาจทำให้เกิดสภาวะดินเค็ม และน้ำทิ้งมีค่าของแข็งละลายน้ำไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงาน

การกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำที่มีความเค็มสูงในปัจจุบันมีด้วยหลายวิธี ได้แก่ การใช้ความร้อนสามารถรองรับอัตราการไหลได้สูง ปริมาณความเข้มข้นของเกลือในน้ำไม่มีผลต่อค่าใช้จ่ายและกระบวนการกำจัดน้ำเสียที่บำบัดแล้วมีความบริสุทธิ์สูงแต่การก่อสร้างมีค่าใช้จ่ายและใช้พลังงานสูง จำเป็นต้องใช้ผู้มีความรู้ในการดูแลระบบ การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยกสารละลายออกจากน้ำได้ ใช้งานได้ดีในน้ำเสียความเข้มข้นสูง แต่ต้องหยุดระบบเพื่อฟื้นฟูสภาพเรซินทำให้น้ำเสียเกิดการฟื้นฟูสภาพเรซินและต้องนำไปบำบัดต่อ ระบบออสโมซิสผันกลับสามารถรองรับอัตราการไหลได้สูง

มีประสิทธิภาพในการกำจัดโซเดียมคลอไรด์สูง แต่เมมเบรนที่ใช้มีราคาสูงและอายุการใช้งานต่ำ อาจต้องหยุดการเดินระบบเมื่อน้ำเกลือมีความเข้มข้นสูง (Binglun Chen et al., 2018) น้ำที่จะเข้าระบบต้องบำบัดขั้นต้นเพื่อกำจัดอนุภาคทั้งแขวนลอยและละลายน้ำเพื่อยืดอายุการใช้งานระบบ การเติมลงในใช้ได้ วิธีนี้ประหยัดค่าใช้จ่ายแต่น้ำเกลือที่สูบลงใต้ดินอาจปนเปื้อนแหล่งน้ำใต้ดินทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเซลล์อิเล็กโทรไลต์ใช้หลักการทางไฟฟ้าเคมีในการบำบัดทำให้ใช้พื้นที่น้อยและเกิดผลพลอยได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Fernandez-Gonzalez C. et al., 2015) ซึ่งแต่ละแนวทางในการกำจัดมีความยุ่งยากและมีการใช้งานจริงในปัจจุบันค่อนข้างน้อย ทำให้ภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบันส่วนใหญ่มีการลักลอบปล่อยน้ำเสียลงสู่ท่อระบายน้ำ หรือออกไปพร้อมกับน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและสภาพดินเค็มได้ (Fernandez-Gonzalez C et al., 2017)

ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) สามารถใช้งานได้ดีแม้ว่าน้ำเสียจะมีค่าของแข็งแขวนลอยปริมาณสูง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงประมาณร้อยละ 85-90 ค่าใช้จ่ายน้อย ระบบไม่มีความยุ่งยากไม่จำเป็นต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการดูแลระบบ (Balasubramanian P et al., 2013) และผลพลอยได้ที่เกิดจากการบำบัดด้วยระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ คือ ก๊าซคลอรีน ก๊าซไฮโดรเจน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สามารถนำผลพลอยได้ทั้งตัวกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมได้ เช่น ก๊าซคลอรีนสามารถฆ่าเชื้อโรคในระบบผลิตน้ำประปาและเป็นพลังงานหมุนเวียนในโรงงานอุตสาหกรรม และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นเบสที่แรง จึงนำไปใช้ในการควบคุมมลภาวะที่เกิดจากกรดหรือใช้ปรับสภาพกรดเบส เช่น ในปฏิกิริยาการปรับสภาพกรดของของเสียที่ได้จากโรงงานผลิตโลหะ โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังใช้ในการผลิตอะลูมิเนียม และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดประเภทต่างๆ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงสนใจใช้ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน และการประเมินประสิทธิภาพเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยปัจจัยที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพได้แก่ การกำจัดคลอไรด์ การกำจัดของแข็งละลายในน้ำ แนวโน้มการเกิดก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจน และปัจจัยที่ประเมินเสถียรภาพของระบบคือการสะสมของตะกอนที่ขั้วไฟฟ้า สุดท้ายระบบนี้สามารถนำก๊าซคลอรีนฆ่าเชื้อโรคในระบบประปา ก๊าซไฮโดรเจนเป็นพลังงานหมุนเวียนในโรงงาน

อุตสาหกรรม และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ในการปรับพีเอช สามารถลดต้นทุนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้การใช้วิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน ด้วยระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) ซึ่งมีขอบเขตการศึกษาดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นตัวแทนจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินในระบบผลิตน้ำอ่อนของภาคอุตสาหกรรม

1.3.2 การศึกษาสภาวะการเดินระบบและการออกแบบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่มีความเหมาะสมโดยแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ดังนี้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาสัมผัส และพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้า

1.3.3 ประเมินประสิทธิภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยพิจารณาจากค่าการกำจัดคลอไรด์ การกำจัดของแข็งละลายน้ำ ปริมาณการเกิดก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจน

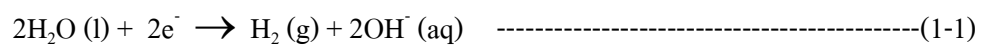
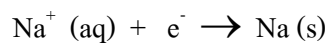
1.3.4 ประเมินความเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยพิจารณาจากคราบสะสมและการสุกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้า และการอุดตันของเยื่อกรอง

1.3.5 การเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ระยะยาวเป็นเวลา 7 วัน

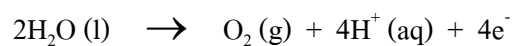
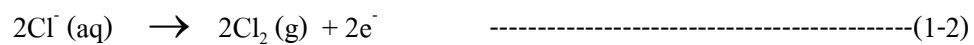
1.4 กรอบแนวคิดงานวิจัย

การนำน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินบำบัดด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์ซึ่งน้ำเสียมีองค์ประกอบหลักคือโซเดียมคลอไรด์เมื่อถูกบำบัดด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์มีกลไกการปฏิกิริยาดังสมการที่ 1-1 ถึง 1-3 ซึ่งสามารถลดปริมาณของคลอไรด์และของแข็งละลายเนื่องจากกลายเป็นก๊าซคลอรีนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นการเปลี่ยนรูปของโซเดียมคลอไรด์ตามกลไกของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

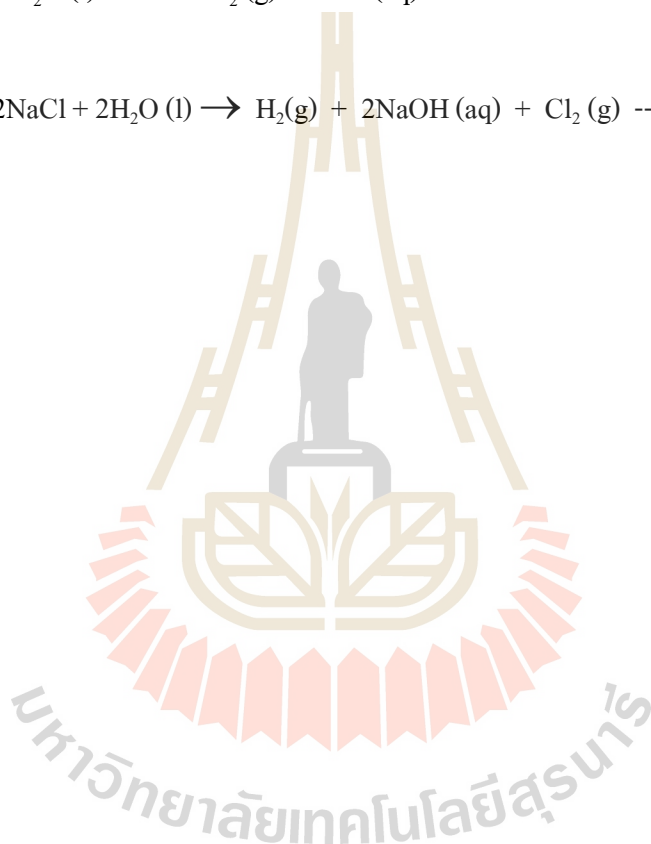
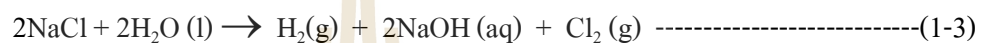
ขั้วแคโทด (ขั้วลบ): ปฏิกริยาออกซิเดชัน



ขั้วแอโนด (ขั้วบวก): ปฏิกริยารีดักชัน



ปฏิกิริยารวม



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความต้องการน้ำอ่อนในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันน้ำอ่อนมีความจำเป็นในกระบวนการผลิตต่างๆ ในภาคอุตสาหกรรมและเป็นส่วนหนึ่งในผลิตภัณฑ์ การใช้น้ำอ่อนในงานหม้อต้มน้ำ (Boiler) เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งต้องใช้ไอน้ำในการฆ่าเชื้อโรค เช่น น้ำตาล อาหารกระป๋อง แป้งมันสำปะหลัง อาหารกึ่งสำเร็จรูป อาหารแช่แข็ง อุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าใช้ในหม้อต้มน้ำเพื่อนำพลังงานความร้อนมาผลิตกระแสไฟฟ้า ใช้ภายในโรงงาน อุตสาหกรรมสิ่งทอใช้ในกระบวนการการฟอกย้อม ผสมสีย้อม และล้างทำความสะอาดของหนัง ฟ้าย หรือผ้าทอ และห้างสรรพสินค้าหรือโรงแรมขนาดใหญ่มีความต้องการใช้น้ำอ่อนในระบบหล่อเย็นของระบบปรับอากาศแบบใช้ Chiller

2.1.1 ความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม

ความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรมเป็นการหาความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรมของโรงงานประเภทต่างๆ ซึ่งมีความต้องการใช้น้ำที่แตกต่างกัน กำหนดอัตราการใช้น้ำตามประเภทของโรงงานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกเอาไว้ เป็น 10 ประเภท ดังรายละเอียดอัตราการใช้น้ำของโรงงานแต่ละประเภท ดังตารางที่ 2.1 โดยความต้องการน้ำในอุตสาหกรรมนั้นแสดงถึงความต้องใช้น้ำอ่อนด้วยเช่นกันเนื่องจากในกระบวนการผลิตของแต่ละอุตสาหกรรมมีความจำเป็นต้องใช้หม้อต้มน้ำ (Boiler) และในอุตสาหกรรมอาหารน้ำอ่อนสามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่ามีความต้องการใช้น้ำสูงสุด

ตารางที่ 2.1 อัตราการใช้น้ำตามประเภทของโรงงาน

ประเภท	รายละเอียดประเภทอุตสาหกรรมหลัก	ปริมาณความต้องการ (ลบ.ม./ไร่/วัน)
Accessory	อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์ต่างๆ	6.00
Chemical	อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์	8.00
Food	อุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม	12.00

ตารางที่ 2.1 อัตราการใช้น้ำตามประเภทของโรงงาน (ต่อ)

ประเภท	รายละเอียดประเภทอุตสาหกรรมหลัก	ปริมาณความต้องการ (ลบ.ม./ไร่/วัน)
Other	อุตสาหกรรมทั่วไป	7.00
Outside	อุตสาหกรรมกลางแจ้ง เช่น โม้-บดหิน ดูดทราย เผาถ่าน หีบฝ้าย อบเม็ล็ดพีช ฯลฯ	4.00
Paper	อุตสาหกรรมกระดาษ เช่น ผลิตเยื่อกระดาษ ภาชนะกระดาษ	4.00
Textile	อุตสาหกรรมสิ่งทอ ฟอกหนัง ย้อมสี	5.00
Unmetal	ผลิตภัณฑ์โลหะ เช่น แก้ว กระเบื้องเคลือบ ปูน ฯลฯ	8.00
Wood	ผลิตภัณฑ์ไม้ เครื่องเรือน	3.00

ที่มา : สำนักนโยบายสาธารณะ สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ.2547 .โครงการศึกษา การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของชาติอย่างมีประสิทธิภาพ และการจัดการ 25 กลุ่มน้ำสำคัญของประเทศ

การประเมินอัตราการใช้น้ำอุตสาหกรรมสามารถประเมิน โดยใช้หน่วยผลิตภัณฑ์ที่โรงงานทำการผลิต ซึ่งจำแนกตามประเภทกิจการรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.2 จากตารางจะพบว่าน้ำอ่อนมีความจำเป็นในอุตสาหกรรมต่างๆ ในกระบวนการผลิตของแต่ละอุตสาหกรรมเช่น อุตสาหกรรมอาหารมากโดยใช้ในกิจกรรมการทำความสะอาดวัตถุดิบ ส่วนผสมของอาหาร และในกระบวนการผลิตของเครื่องจักร อุตสาหกรรมหล่อเหล็กต้องใช้น้ำอ่อนในการทำความสะดวกขึ้นงาน เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 แสดงอัตราการใช้น้ำต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ

กิจการ	อัตราการใช้น้ำ(ต่อหน่วยผลิตภัณฑ์)
ไก่สดแช่แข็ง	17.73 ลบ.ม./ตัน
ไส้กรอก,เนื้อปลาบดควั่น	157 ลบ.ม./ตัน
กุนเชียง แหนม ไส้กรอก หมูยอ ลูกชิ้น	16.75 ลบ.ม./ตัน

ตารางที่ 2.2 แสดงอัตราการใช้น้ำต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ(ต่อ)

กิจการ	อัตราการใช้น้ำ(ต่อหน่วยผลิตภัณฑ์)
ผักหรือผลไม้กระป๋องปิดสนิท	19.46 ลบ.ม./ตัน
ผลิตภัณฑ์นมพร้อมดื่ม	3.38 ลบ.ม./ตัน
ผลิตภัณฑ์นมผง	9.87 ลบ.ม./ตัน
ไอศกรีมที่เกี่ยวกับนมหรือน้ำนม	46.95 ลบ.ม./ตัน
ผัก ผลไม้แช่แข็ง	28.95 ลบ.ม./ตัน
ผัก ผลไม้กระป๋อง	5.98 ลบ.ม./ตัน
ผลิตแป้งมันสำปะหลัง	15.81 ลบ.ม./ตัน
แป้งข้าวโพด ข้าวเจ้า ข้าวเหนียว	1.19 ลบ.ม./ตัน
ผลิตเส้นเส้น, แป้งถั่วเขียว	36.19 ลบ.ม./ตัน
ข้าวเกรียบ	33.33 ลบ.ม./ตัน
ขนมปังกรอบ	11.89 ลบ.ม./ตัน
น้ำตาลทราย	8.65 ลบ.ม./ตัน
ผลิตเครื่องดื่ม(ชา กาแฟ น้ำบ๊วย)	0.52 ลบ.ม./ตัน
ซีอิ๊ว เต้าเจี้ยว ซอสปรุงรส	1.69 ลบ.ม./ตัน
น้ำปลา	1.56 ลบ.ม./ตัน
ผลิตสุราจากกากน้ำตาล	21.20 ลบ.ม./ลบ.ม.
ผลิตเบียร์	3.33 ลบ.ม./ตัน
เครื่องดื่มบรรจุขวด	6.99 ลบ.ม./ตัน
ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด	534.67 ลบ.ม./ตัน
ทอผ้าขนสัตว์	1.76 ลิตร/หลา
ผลิตเยื่อกระดาษฟอกขาว	18.04 ลบ.ม./ตัน
รีด หล่อ หลอม โลหะ 3.63 ลบ.ม./ตัน	3.63 ลบ.ม./ตัน

ที่มา 1) รายงานการจัดการคุณภาพน้ำและจัดทำแผนปฏิบัติการในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ,กรมควบคุมมลพิษ, 2540

2) โครงการศึกษาเพื่อประเมินปริมาณสารมลพิษอุตสาหกรรมทางน้ำจากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยจัดทำโดย บริษัท ซีเอ็มเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์ แมเนจเมนท์ จำกัด

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

มีความต้องการใช้น้ำอ่อนปริมาณมากกว่า 200 ลบ.ม ต่อวัน สำหรับป้อนเข้าหอผึ่งเย็น (Make-up water) โดยน้ำจะหมุนเวียนอยู่ในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (condenser) ของเครื่องทำความเย็น (chiller) ที่ใช้ในระบบปรับอากาศของโรงงานได้ 3-5 รอบ โดยน้ำอ่อนจะต้องมีคุณสมบัติไม่ก่อให้เกิดตะกอนและการกัดกร่อนภายในเส้นท่อนมากเกินไปเพื่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี (โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง ตั้งอยู่ที่ ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จังหวัดปทุมธานี)

อุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร

การใช้น้ำอ่อนในกระบวนการผลิตมีหลายขั้นตอน แสดงในตารางที่ 2.3 และ จากการศึกษาในโรงงานตัวอย่างที่มีกำลังการผลิต 8.66 ตันต่อวัน พบว่ามีการใช้น้ำสูงในการล้างวัตถุดิบ กระจบองเปล่า และบริเวณพื้นที่ปฏิบัติงาน การใช้พลังงานความร้อนในการปรุงอาหารและการฆ่าเชื้อโรคนั้น เป็นหัวใจสำคัญของกระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง โดยพลังงานความร้อนที่ใช้ จะอยู่ในรูปไอน้ำ ปริมาณไอน้ำที่ใช้ในการนึ่งฆ่าเชื้อประมาณ 290 กิโลกรัมต่อตันปลากระป๋อง (UNEP, 2000) (กรมควบคุมมลพิษ โครงการสนับสนุนการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา กิจกรรมเสริมสร้างศักยภาพการจัดการ มลพิษจากแหล่งกำเนิดประเภทอุตสาหกรรมในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา, 2548) ตารางที่ 2.3 ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิตปลากระป๋อง

ขั้นตอนการผลิต	ปริมาณน้ำใช้ (ลูกบาศก์เมตร/ตันวัตถุดิบ)
การละลายน้ำแข็งและการล้างปลา	0.2
การตัดแต่ง	0.06
การคัดเลือกปลา	0.2
การบรรจุกระป๋อง	0.2-0.9
การนึ่งให้ความร้อน	0.5
การนึ่งฆ่าเชื้อ	2.93
การล้างกระป๋อง	0.15

ที่มา : 1 กรมควบคุมมลพิษ, 2546. หน้า 6-22.

2 UNEP, 2000. page 41. อุตสาหกรรมฟอกย้อม

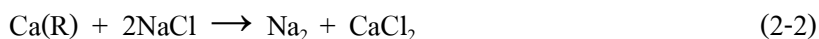
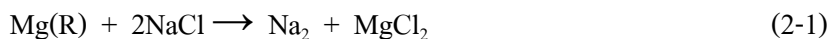
มีความต้องการใช้น้ำอ่อนในการผสมสีที่ใช้ย้อมและล้างหลังการย้อม น้ำที่ใช้ในหม้อน้ำหรือน้ำที่ใช้ในระบบหล่อเย็นปริมาณ 1,000 ลบ.ม ต่อ วัน โดยน้ำอ่อนในแต่ละโรงงานจะมีค่ามาตรฐานต่างกันขึ้นอยู่กับนำไปใช้งานในแต่ละกระบวนการผลิต ส่วนของกระบวนการฟอกย้อมผ้าสามารถมีความกระด้างได้ไม่เกิน 10 mg/l as CaCO₃ แต่ในกระบวนการหม้อมันน้ำไม่ต้องการความกระด้างอยู่ในน้ำ (สำนักเทคโนโลยีน้ำและสิ่งแวดล้อม เรื่องการปรับปรุงการฟื้นฟูสภาพเรซินในการลิตน้ำอ่อน)

2.2 การผลิตน้ำอ่อนด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน

2.2.1 หลักการ

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยกโลหะออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกจับโดยสารแลกเปลี่ยนไอออน หรือเรซิน (Resin) ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์เรซินมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามเป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย การแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคลไอออนเอกเซนเจอร์ (Cation Exchanger) ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบเรียกว่า แอนไอออนเอกเซนเจอร์ (Anion Exchanger) กระบวนการผลิตน้ำอ่อน (Soft Water) อีออนในน้ำทำการแลกเปลี่ยนประจุกับเรซินที่ใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนโดยโซเดียม (Na⁺) 2 ไอออน จะแลกเปลี่ยนประจุกับ 1 ไอออนของแคลเซียม (Ca²⁺) หรือ 1 ไอออนของแมกนีเซียม (Mg²⁺) น้ำที่ผ่านเรซินสำหรับทำน้ำอ่อนจะมีโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมคลอไรด์และความกระด้างอีกเล็กน้อยปนออกมาเมื่อมีการฟื้นฟูสภาพด้วยเกลือแกงจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับโดย 2 ไอออนของโซเดียม จะเข้าไปจับกับเรซินและเรซินจะปลดปล่อยไอออนของแคลเซียม ออกมา 1 ไอออน น้ำทิ้งที่ออกมาจากการฟื้นฟูสภาพเรซินจะมีส่วนประกอบของเกลือแกง (NaCl), แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) และแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂) เรซินประเภทโซเดียมฟอร์ม (Sodium Form) จะไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ครบ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 2-1 และ 2-2 เป็นกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนของน้ำกระด้างกับตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออน ฉะนั้นการผลิตน้ำอ่อนด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนนี้ น้ำกระด้างไหลผ่านถึงที่บรรจุด้วยสารแลกเปลี่ยนไอออน ส่วนไอออนที่ทำให้เกิดความกระด้างในน้ำจะแลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่บนสารแลกเปลี่ยนไอออน

สมการการฟื้นฟูสภาพเรซิน



วิธีนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในภาคอุตสาหกรรมและพาณิชย์กรรม เนื่องจากใช้พื้นที่ติดตั้งระบบต่ำ ควบคุมง่าย และสามารถกำจัดน้ำกระด้างให้หมดไปหรือมีค่าต่ำๆได้ เรซินธรรมชาติที่นิยมใช้งาน คือ ซีโอไลต์ ซึ่งเป็นเรซินแบบกรวดอ่อน นิยมใช้ตัวแลกเปลี่ยนไอออนในรูปของโซเดียม (Na^+) โดยโซเดียมไอออนจะถูกแทนที่ด้วยแคลเซียมหรือแมกนีเซียมไอออนในเรซิน เมื่อใช้งานเรซินไปสักระยะก็จะมีแต่ไอออนของแคลเซียมหรือแมกนีเซียมเกาะอยู่บนผิวของซีโอไลต์ จึงทำให้ประสิทธิภาพของเรซินลดลง จึงต้องมีการฟื้นฟูสภาพเรซิน โดยใช้เกลือแกง (NaCl) เข้มข้น 8-15% ซึ่งในกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินจะทำให้เกิดน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์สูงถึง 40,000-150,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Ksayer et al., 2012) ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องใช้จ่ายเงินจำนวนหนึ่งเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน มีความสามารถในการกำจัดสารเจือปนต่างๆ รวมถึงโลหะหนักที่อยู่ในรูปละลายน้ำ แต่ไม่เหมาะสมกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงมากๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายอีกทั้งก่อนที่น้ำเสียจะเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน จำเป็นต้องมีการกำจัดสารแขวนลอยออกจากรน้ำเสียก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันในถังปฏิกรณ์ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าการใช้การแลกเปลี่ยนไอออนเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างมากกว่า 50% ซึ่งน้ำกระด้างเป็นสาเหตุของปัญหาการอุดตัน เนื่องจากตะกอนเกิดขึ้นในระบบท่อทำให้เกิดปัญหาในเรื่องอายุการใช้งานของอุปกรณ์และเครื่องจักรลดลง จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์และเครื่องจักรเหล่านั้นมากขึ้นและส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำลดลง นอกจากนี้คราบตะกอนที่เกิดขึ้นยังสามารถส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่ใช้ในระบบอีกด้วยทำให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้มากขึ้น

จากกรณีศึกษาการผลิตของโรงงานฟอกย้อมแห่งหนึ่งพบว่าปริมาณน้ำทิ้งจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินทั้งหมด 120 ลบ.ม โดยน้ำทิ้งจากขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพเรซินซึ่งใช้น้ำเกลือ 15 % Regeneration level 333.33 g-NaCl/l-Resin มีปริมาณ 60 ลบ.ม และจากศึกษาการพัฒนาเรซิน shell-core ในการผลิตน้ำอ่อน 7,080 ลิตร ได้ทำการฟื้นฟูเรซินด้วยวิธี co-current regeneration โดยใช้เรซิน shell-core SAC ในการฟื้นฟูสภาพเรซินพบว่าเกิดน้ำเกลือ 1,452 แกลลอน และมีความกระด้าง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน

ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ของแข็งละลายน้ำ โดยเฉพาะโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากขั้นตอนการล้างเรซินเนื่องจากใช้สารเคมีที่นิยมใช้สำหรับการฟื้นฟูสภาพเรซิน จะมีคลอรีนความเข้มข้นสูงออกมากับน้ำเสียรวมถึงไฮดรอกไซด์ที่เป็นเหตุทำให้น้ำเกิดความกระด้างรวมอยู่ด้วยจากตารางที่ 2.4 แสดงลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินทำให้ทราบลักษณะทางเคมีของน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการผลิตน้ำอ่อนด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน ลักษณะของน้ำเสียที่ออกมามีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูงเกินมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมควบคุมมลพิษคือค่าของแข็งละลายน้ำต้องไม่เกิน 3,000 mg/l (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) จึงจำเป็นต้องบำบัดเพื่อลดค่าของแข็งละลายน้ำเพิ่มเพื่อลดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากของแข็งละลายน้ำมี โซเดียมไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์ ปนเปื้อนอยู่ค่าเหล่านี้มีฤทธิ์ของความเค็มส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพและส่งผลต่อสภาพของดินเมื่อปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอาจเกิดสภาวะดินเค็มทำให้ไม่สามารถใช้ดินในการเพาะปลูกพืชอาหารได้ จึงสนใจในการลดค่าของแข็งละลายน้ำด้วยระบบอิเล็กโทรไลต์เป็นวิธีการทางเคมีไฟฟ้า โดยมีส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเครื่องจ่ายไฟฟ้า ไอออนประจุบวกพวก แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม ควรบำบัดก่อนเข้าระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์เนื่องจากไอออนบวกของน้ำเสียอาจมาทำปฏิกิริยากับขั้วแคโทดในระบบจนเกิดคราบตะกอนเกาะอยู่ที่ขั้วทำให้ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดจะทำกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลง

น้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินการจากผลิตน้ำอ่อนมีลักษณะเป็นน้ำเค็มมีความเข้มข้น 241 กรัมต่อลิตร ความกระด้างประมาณ 47 กรัมต่อลิตร เมื่อปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้จึงทำการสำรวจเก็บน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดนครราชสีมาพบว่าลักษณะน้ำเสียมีความเค็มสูงเช่นกันในตารางที่ 2.4 และมีค่าความกระด้างสูงเพราะฉะนั้นจึงควรบำบัดน้ำเสียที่การฟื้นฟูสภาพเรซิน จากการศึกษาของ (A.Hayani et al, 2016) เป็นลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินจากการผลิตน้ำอ่อนโดยใช้น้ำกร่อยตั้งคราะห์จากการทดลองการผลิตน้ำอ่อนโดยใช้เรซินชนิด Duolite 206A สามารถกำจัดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 63-70 และกำจัดแมกนีเซียมได้ร้อยละ 54-5 ในการฟื้นฟูสภาพเรซินจะใช้น้ำเกลือเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

จากการสำรวจและทบทวนวรรณกรรมลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินพบว่าโรงงานอุตสาหกรรมทั้ง 3 แห่ง ในจังหวัดนครราชสีมาและ EPA 1974 มีค่าของแข็งละลายน้ำสูงซึ่งเกิดจากการใช้น้ำเกลือเข้มข้นในกระบวนการล้างเรซินโดยความเข้มข้นประมาณร้อยละ 8-10 ซึ่งจากค่าคลอไรด์แสดงถึงความเข้มข้นของน้ำเกลือที่ใช้ในแต่ละโรงงาน พบว่าโรงงานแปรรูปอาหารมีค่าคลอไรด์ต่ำกว่าโรงงานอื่นและต่ำกว่าค่าน้ำเกลือเข้มข้นของโรงงานที่กำหนดใช้งานคือน้ำเกลือเข้มข้นร้อยละ 8 ซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากผู้ดูแลระบบเนื่องจากขั้นตอนการเตรียมน้ำเกลือไม่ได้เป็นระบบอัตโนมัติใช้ผู้ดูแลระบบเตรียมน้ำเกลือ ส่วนค่าความกระด้างของโรงงานอุตสาหกรรมทั้ง 3 แห่ง ในจังหวัดนครราชสีมา แตกต่างกับ EPA 1974 เนื่องจากนำน้ำเสียชุมชนที่มีค่าความกระด้างสูงมาบำบัดด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออนและใช้น้ำเกลือเข้มข้นร้อยละ 10-16 ในการฟื้นฟูสภาพเรซินจึงทำให้น้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินมีค่าความกระด้างสูง จากการศึกษา (Hayani A. et al., 2016) ผลิตน้ำอ่อนโดยใช้น้ำกร่อยที่มีค่าความกระด้างเริ่มต้น 810 mg/l as CaCO₃ และใช้น้ำเกลือเข้มข้นร้อยละ 10 ในการฟื้นฟูสภาพเรซินโดยใช้เรซินกรดแก่ชนิด Duolite 206A จึงทำให้น้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินมีค่าความกระด้างสูงจากคุณลักษณะน้ำที่นำมาใช้ผลิตน้ำอ่อน และประเภทการนำน้ำอ่อนไปใช้งานเมื่อทำการฟื้นฟูสภาพเรซินน้ำเสียที่ออกมาจึงมีค่าความกระด้างที่ต่างกัน จึงเลือกใช้ลักษณะน้ำเสียของโรงงานนี้เดิมบรรจุขวดเป็นตัวแทนลักษณะน้ำเสียในการทดลองเนื่องจากค่าคลอไรด์ใกล้เคียงกับโรงงานอื่นและน้ำเกลือเข้มข้นอยู่ในช่วง 8-10 ตารางที่ 2.4 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการการฟื้นฟูสภาพเรซิน

พารามิเตอร์	EPA, 1974	A.Hayani et al., 2016
	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน
Total dissolved solids (mg/l)	-	-
NaCl (mg/l)	241,000	10,000
Cl ⁻ (mg/l)	147,853	6,135
Total hardness (mg/l as CaCO ₃)	4,700	2,885

ตารางที่ 2.4 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟลูสสภาพเรซิน (ต่อ)

พารามิเตอร์	EPA, 1974	A.Hayani et al., 2016
	น้ำเสียฟลูสสภาพเรซิน	น้ำเสียฟลูสสภาพเรซิน
Ca ²⁺ (mg/l as CaCO ₃)	43,000	2,048
Mg ²⁺ (mg/l as CaCO ₃)	4,000	837
pH	-	-

2.4 วิธีการบำบัดน้ำเค็ม

น้ำเกลือที่ออกจากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเกิดขึ้นในขั้นตอนการฟลูสสภาพเรซินซึ่งเป็นตัวกลางที่ใช้สำหรับปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ เมื่อเรซินถูกใช้งานไประยะเวลาหนึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างลดลงจึงจำเป็นต้องได้รับการฟลูสสภาพเรซินด้วยน้ำเกลือความเข้มข้นร้อยละ 8-15 ทำให้เกิดน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์สูงถึง 40,000-150,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (U.S Department of the Interior, 2002) ทำให้น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการฟลูสสภาพเรซินมีความเค็มสูง ดังนั้นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีความเค็มสูงจึงมีความจำเป็นในปัจจุบันวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อน การกรองผ่านเยื่อ เซลล์ไฟฟ้า เป็นต้น

2.4.1 วิธีการใช้ความร้อน (Thermal Techniques)

เป็นระบบกำจัดหรือแยกเกลือออกจากน้ำบริสุทธิ์ใช้กระบวนการทางความร้อนใช้เทคนิคการระเหยและกลั่นตัวของน้ำหลังจากที่ได้รับความร้อน ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้แยกเกลือออกจากน้ำบริสุทธิ์เพื่อผลิตน้ำจืดสำหรับประเทศที่มีความขาดแคลนน้ำสำหรับอุปโภค-บริโภค โดยใช้วิธีคล้ายคลึงกับวัฏจักรน้ำตามธรรมชาติ ปัจจุบันนิยมใช้กัน 3 วิธี ได้แก่

2.4.1.1 MSF-Multi-Stage Flash Distillation

หลักการของระบบ MSF จะใส่น้ำเกลือเข้าไปในเวสเซล (Vessel) และถูกทำให้ร้อนจนเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำ หลังจากทีน้ำเกลือผ่านเข้าไปในแต่ละเวสเซล ซึ่งเรียกว่า ชั้น (Stage) ซึ่งมีความดันอากาศต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เป็นผลให้น้ำเกิดการเดือดอย่างรวดเร็วและเกิดเป็นไอน้ำและหยดลงมาที่ถาดรองรับ วิธีกำจัดเกลือออกจากน้ำโดยเทคนิคการใช้ความร้อนแบบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

ผลิตน้ำดื่มและใช้สำหรับการแยกเกลือจากน้ำทะเลในขั้นต้น โดยมีการใช้มาแล้วกว่า 30 ปี (Garcia-Rodriguez and Gomez-Camacho, 1999)

2.4.1.2 MED-Multi-Effect Distillation

ระบบกำจัดน้ำเกลือแบบ MED เป็นระบบใหญ่ที่ใช้กระบวนการระเหยมีความคุ้มค่าและประหยัดกว่าระบบกำจัดน้ำเกลือในระบบใช้ความร้อนแบบอื่นๆ เมื่อเทียบกับขนาดของระบบคาดว่าระบบนี้ได้รับความนิยมในอนาคตมากกว่าระบบ MSF โดยในการสร้างระบบ MED จะออกแบบอัตราการรองรับได้ไม่น้อยกว่า 300 ลบ.ม/วัน เนื่องจากการหากออกแบบระบบที่มีขนาดเล็กกว่านี้จะส่งผลต่อความคุ้มค่าในการใช้งานในเชิงเศรษฐศาสตร์ (Alarcon-Padilla et al., 2010)

ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียระบบ MSF-Multi-Stage Flash Distillation

ข้อดี	ข้อเสีย
สามารถรองรับอัตราไหลได้สูง ปริมาณความเข้มข้นของเกลือไม่มีผลต่อค่าใช้จ่าย และกระบวนการกำจัด	การก่อสร้างระบบมีค่าใช้จ่ายสูงและจำเป็นต้องใช้ความรู้ในการเดินระบบ
ได้มีความบริสุทธิ์สูง (น้อยกว่า 10 mg/l as TDS)	ใช้พลังงานสูง
สามารถใช้พลังงานที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้ในกระบวนการอื่น	ระบบใช้งานต่ำกว่า 70-80% ของการออกแบบ
เดินระบบง่าย ไม่จำเป็นต้องเข้มงวดในการเดินระบบและบำรุง เป็นระบบที่ใช้มานานและมีความน่าเชื่อถือ	-

ตารางที่ 2.6 ข้อดีและข้อเสียระบบ MED-Multi-Effect Distillation

ข้อดี	ข้อเสีย
น้ำผ่านกระบวนการนี้มีความบริสุทธิ์สูง ระบบยังคงทำงานปกติแม้จะมีการปนเปื้อนของแบคทีเรีย หรืออนุภาคของแข็งในน้ำ	การก่อสร้างระบบมีค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้พลังงานสูง และเกิดการกัดกร่อนในระบบ
ต้องการระบบบำบัดน้ำก่อนเข้าระบบน้อยใช้สารเคมีต่ำ	น้ำที่ออกจากระบบมีอุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบลดอุณหภูมิก่อนที่จะใช้เป็นน้ำดื่ม
สามารถใช้ร่วมกับระบบอื่นได้ ระบบใช้ผู้ควบคุมน้อย	ประสิทธิภาพต่ำ แต่สูงกว่าระบบ MSF

2.3.1.3 VC-Vapor Compression Distillation

วิธีการกำจัดเกลือออกจากน้ำด้วยกระบวนการนี้โดยปกติแล้วจะใช้ร่วมกับกระบวนการอื่นๆ (เหมือนกับ MED) ระบบมีขนาดตั้งแต่เล็ก-ขนาดกลาง ความร้อนที่ใช้สำหรับการระเหยน้ำออกจากน้ำเกลือโดยส่วนใหญ่ได้มาจากไอน้ำมากกว่าไอน้ำที่มาจากหม้อต้มน้ำ ระบบกำจัดเกลือด้วยวิธีนี้ได้รับการออกแบบเพื่อลดจุดเดือดของน้ำโดยการลดความดันของระบบให้ต่ำกว่าบรรยากาศ (Reali, 2007)

ตารางที่ 2.7 ข้อดีและข้อเสียระบบ VC-Vapor Compression Distillation

ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบมีขนาดเล็กใช้ปริมาณสารเคมีในการบำบัดขั้นต้นน้อย	การเดินระบบเริ่มต้นมีความยุ่งยาก
ค่าใช้จ่ายต่ำในการเดินระบบ และบำรุงรักษาต่ำ	ระบบจำเป็นต้องใช้คอมเพรสเซอร์ขนาดใหญ่ และมีราคาแพง

ตารางที่ 2.7 ข้อดีและข้อเสียระบบ VC-Vapor Compression Distillation (ต่อ)

ข้อดี	ข้อเสีย
ประสิทธิภาพระบบดีกว่าระบบ MSF และ MED	-
น้ำที่ออกจากระบบมีความบริสุทธิ์สูงและใช้พลังงานต่ำ	-

ซึ่งวิธีการใช้ความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานดังตารางที่ 2.5-2.7 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูงและพลังงานที่ใช้ในระบบสูง ประสิทธิภาพในการกำจัดปานกลาง จึงไม่เหมาะสมอุตสาหกรรมที่มีต้นทุนต่ำในการสร้างระบบบำบัด

2.4.2 วิธีแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-Exchange)

วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นกระบวนการที่ไอออนในสารละลายดูดติดที่ผิวของของแข็งโดยมีการแลกเปลี่ยนกับ ไอออนต่างชนิดกันแต่มีขั้วเดียวกัน เช่น การแลกเปลี่ยนระหว่างแคลเซียมไอออนกับ โซเดียมไอออน เป็นต้น หรืออาจนิยามความหมายอีกอย่างคือ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน หมายถึงการที่ไอออนหนึ่งแทนที่โดยไอออนต่างชนิดกันที่มีอยู่ก่อนเดิมที่ผิวของของแข็ง (Qasim et al., 2000) กระบวนการแลกเปลี่ยน ไอออนจะใช้น้ำประปาทำน้ำอ่อน (Soft Water) และน้ำปราศจากไอออน (Demineralized Water) โดยน้ำอ่อนหมายถึง น้ำที่ความกระด้าง (Hardness) ต่ำกว่า 10 mg/l as CaCO₃ ซึ่งเกิดจากไควาเลนซ์ไอออนที่ปนอยู่ในน้ำ เช่น แคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออน เป็นต้น ส่วนน้ำปราศจากไอออน หมายถึงน้ำบริสุทธิ์ที่ถูกดึงไอออนทั้งหมดที่อยู่ในน้ำทั้ง ไอออนบวกและลบออกหมดแล้ว

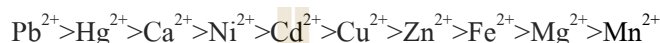
ตัวกลางที่ใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยน ไอออน ได้แก่ เรซิน (Resin) ซึ่งเป็น โพลิเมอร์สังเคราะห์ เรซินที่ใช้ในปัจจุบันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น เรซินประจุบวก หรือแคทไอออนเรซิน (Cation Resin) จะใช้งานในการดึงไอออนประจุบวกออกจากน้ำ เรซินประจุลบ หรือแอนไอออนเรซิน (Anion Resin) จะใช้ดึงไอออนลบออกจากน้ำเช่น การผลิตน้ำปราศจากไอออน (Demineralized Water) จึงจำเป็นต้องใช้ทั้งเรซินประจุบวกและลบ เพื่อทำการดึงไอออนทั้งหมดออกจากน้ำ นอกจากนี้การใช้งานเรซินแต่ละประเภทเราต้องพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของ ไอออนที่เราต้องการกำจัดอีกด้วย

เนื่องจากความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแต่ละชนิดจะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับประจุที่ติดอยู่บนผิวของตัวกลางกลือที่เรียกว่า ความชอบการจับประจุของเรซิน โดยสามารถจำแนกความชอบในการจับติดผิวเรซินของไอออนชนิดต่างๆ ดังนี้

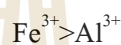
Monovalent Cation



Divalent Cation

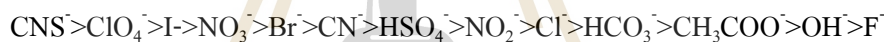


Trivalent Cation



จากคุณสมบัติของการเลือกจับไอออนพบว่า หากเราต้องการกำจัดหรือดึงโซเดียมไอออนออกจากรน้ำการเลือกเรซินที่เหมาะสมจึงเป็นเรื่องสำคัญ สำหรับการจับคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำจำเป็นต้องพิจารณาถึงความชอบในการดักจับเรซินประกอบด้วยเช่นเดียวกัน

Anion Resin



ตารางที่ 2.8 ข้อดีและข้อเสียวิธีแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-Exchange)

ข้อดี	ข้อเสีย
สามารถแยกสารละลายออกจากน้ำได้ จึงสามารถดึงไอออนโลหะราคาแพงออกจากน้ำได้	เกิดน้ำเสียที่มีความเค็มสูงและต้องนำไปกำจัดต่อ
ใช้งานในความเข้มข้นสูง	มีไอออนบางส่วนไม่สามารถกำจัดได้
ระบบสามารถนำตัวกลางกลับมาใช้ใหม่	ต้องหยุดระบบเพื่อฟื้นฟูสภาพตัวกลางและมึน้ำเสียเกิดจากการฟื้นฟูสภาพเรซิน
ใช้งานในน้ำความเข้มข้นสูง	-

การใช้วิธีแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัดความเค็มออกจากรน้ำนั้น ถือเป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติเนื่องจากกระบวนการนี้ใช้เงินเพียงการดึงคลอไรด์และโซเดียมออกจากรน้ำติดที่ผิวของตัวกลาง คือ เรซิน ซึ่งจำเป็นต้องมีการบำบัดคลอไรด์และโซเดียมอีกเช่นเดิมเมื่อเรซินที่ใช้หมดสภาพ

(Exhausted) เหมือนกับกระบวนการกำจัดไควาเลนซ์ไอออนออกจากน้ำในกระบวนการผลิตน้ำอ่อนที่จะมีน้ำเสียปนเปื้อนคลอไรด์ออกมาจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วย

2.4.3 วิธีเยื่อกรอง (Membrane techniques)

เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane Technology) เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อกรองเพื่อแยกสารทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น กระบวนการนี้ถูกค้นพบมานานกว่า 30 ปี และได้พัฒนาขึ้นตามลำดับสำหรับในประเทศไทยในปัจจุบันยังมีการประยุกต์ใช้กระบวนการเยื่อกรองไม่มากนัก ส่วนมากเป็นกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse Osmosis) ในการผลิตน้ำสะอาดจากน้ำบาดาลเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น สำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam generator) และในกระบวนการผลิตบางอย่างที่ต้องการน้ำที่มีความบริสุทธิ์ เช่น อุตสาหกรรมยา และการเตรียมสารเคมี เป็นต้น ปัจจุบันเริ่มมีการใช้ในการบำบัดน้ำที่ตลอดจนมีการใช้กระบวนการบำบัดควบคู่กับเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane) และเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Membrane) ในกระบวนการกรองผ่านเยื่อกรองจะมีบทบาทที่สำคัญในด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นเพราะนอกจากจะสามารถใช้บำบัดน้ำเสียเพื่อลดมลพิษแล้ว ยังมีศักยภาพสำหรับการนำน้ำที่กลับมาใช้ใหม่ซึ่งเป็นสิ่งที่น่าสนใจ สำหรับกระบวนการกรองที่ใช้เยื่อกรองเพื่อแยกสารหรือเพิ่มความเข้มข้นหรือทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น หลักกระบวนการนี้จำเป็นจะต้องมีแรงดันหรือการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าที่ทำให้ของผสมหรือสารละลายไหลผ่านเยื่อกรอง โดยเยื่อกรองจะมีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารหนึ่งมากกว่าอีกสารหนึ่ง (Semi-permeable/Permeable Selective) เยื่อกรองจะมีทั้งที่ผลิตจากสารอินทรีย์ โดยส่วนใหญ่จะเป็นโพลีเมอร์และสารอนินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเซรามิก เช่น Cellulose Acetate (CA) , Polysulfone (PSC) , Polyvinylidenedifluoride (PVDF) , Hollow System , Hollow Fine Fibers เป็นต้น (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

กระบวนการเยื่อกรองแบ่งได้เป็น 4 กระบวนการ โดยอาศัยหลักการแยกด้วยแรงขับและการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า ในการแยกสารโมเลกุลขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ตามลำดับ (1) ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) (2) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) (3) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) (4) ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) ในการประยุกต์ใช้เยื่อกรองสำหรับแยกอนุภาคและโมเลกุลนั้น จะต้องมีการพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสมและตรงตามคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.10 ซึ่งพบว่า การจะกำจัดค่าคลอไรด์นั้นต้องใช้เมมเบรนในระดับออสโมซิสผันกลับเท่านั้น

ตารางที่ 2.9 ข้อดีและข้อเสียวิธีเยื่อกรอง (Membrane Technology)

ข้อดี	ข้อเสีย
การก่อสร้างระบบรวดเร็วและราคาไม่สูง มีองค์ประกอบของระบบน้อย วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นพลาสติก เดินระบบไม่ยุ่งยาก	เมมเบรนที่ใช้ในระบบมีราคาสูง และอายุการใช้งานต่ำประมาณ 2-5 ปี
รองรับอัตราการไหลได้สูง ประมาณ 400 ลบ.ม./วัน สำหรับน้ำทะเล และ 750 ลบ.ม./วัน สำหรับน้ำกร่อย	ถ้าระบบมีการใช้น้ำทะเล อาจต้องหยุดระบบในช่วงฤดูฝนเนื่องจากความขุ่นสูง
มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโมโนวาเลนซ์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	ต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่มีมาตรฐานคุณภาพสูงสำหรับเดินระบบ
เมมเบรนที่ใช้มีประสิทธิภาพสูง ประมาณ 25-60 ลบ.ม./วัน	น้ำที่เข้าระบบต้องผ่านการบำบัดขั้นต้นก่อนเพื่อกำจัดอนุภาคทั้งแขวนลอยและละลายน้ำ

ตารางที่ 2.10 แสดงเปรียบเทียบชนิดเยื่อกรองเมมเบรน

กระบวนการ	ขนาดรูพรุน (nm)	ขนาดน้ำหนักโมเลกุล (Da)	แรงดัน (Unit*100 kPa.)	ความสามารถในการกำจัด
Microfiltration	50-5,000	>300,000	Suction Pressure > 0.6 Press Pressure < 2	- แบคทีเรีย - คอลลอยด์
Ultrafiltration	5-100	1,000-300,000	Suction Pressure > 0.6 Press Pressure < 3	- ไวรัส - สารที่ละลายน้ำ ขนาด 10-500 kDa
Nanofiltration	~1	100-1,000	Press Pressure 2-5	- สารที่มีขนาด 200-300 Da - เกลือประจุ +2
RO	<1	10-100	Press Pressure > 15	- ไอออนละลายน้ำ

2.4.4 วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro-Chemical techniques)

เป็นกระบวนการแยกสารอิเล็กโทรไลต์โดยการผ่านไฟฟ้ากระแสตรงลงไป สารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์นั้น โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ผ่านลงไป เซลล์ต้องเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (D.C.) คือ กระแสอิเล็กทรอนิกส์ เกิดปฏิกิริยาเคมีที่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ ส่วนขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์นี้ นิยมใช้ขั้วเฉื่อย เพราะถ้าใช้ขั้วว่องไว ขั้วอาจจะมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีก็ได้ โดยส่วนประกอบที่สำคัญของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell) ประกอบด้วย 1. แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก 2. ขั้วไฟฟ้า และ 3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์

แนวทางการกำจัดน้ำปนเปื้อนคลอรีนความเข้มข้นสูงของโรงงานเพื่อให้สามารถลดค่าคลอรีนในน้ำได้อย่างแท้จริง และสามารถนำผลพลอยได้จากการกำจัดคลอรีนในน้ำมาใช้ประโยชน์ซึ่งวิธีทางไฟฟ้าเคมี เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ ในปัจจุบันมีการผลิตแก๊สคลอรีนและโซเดียมคลอรีนในเชิงอุตสาหกรรม โดยใช้น้ำเกลือเข้มข้นหรือน้ำทะเลเป็นวัตถุดิบ เช่น อุตสาหกรรมผลิตก๊าซคลอรีน และ โซดาไฟ (Chlor-Alkali Industry) การผลิตคลอรีน-แอลคาไล โดยระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ หมายถึงการผลิตคลอรีน และ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟ โดยใช้ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ วิธีใช้ในอุตสาหกรรมมากกว่าร้อยละ 95 ของการผลิตแก๊สคลอรีนและโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมด โดยสารละลายเกลือที่ป้อนเข้าระบบมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 300-315 กรัมต่อลิตร (Melian-Martel et al., 2011) ปัจจุบันนิยม 3 วิธี ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนจากน้ำเกลือเข้มข้น (brine) ไปเป็นก๊าซคลอรีนและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Caustic Soda) คือ กระบวนการเซลล์ไดอะแฟรม (Diaphragm Cell Process) กระบวนการเซลล์ปรอท (Mercury Cell Process) และกระบวนการเซลล์เมมเบรน (Membrane cell Process)

2.4.4.1 Diaphragm Cell Process

เป็นเซลล์ไฟฟ้าที่มี diaphragm ที่ทำจากแร่ใยหิน (asbestos) กั้นระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด โดย diaphragm นี้ยอมให้สารละลายเกลือไหลผ่านจากแอโนดไปยังขั้วแคโทด และป้องกัน side reaction โดยเมื่อใส่เกลือลงในด้านของขั้วแอโนดแล้วก็มีกระบวนการระเหยเพื่อให้ได้แก๊สคลอรีนที่ขั้วแอโนด ส่วนโซเดียมไอออนจะเคลื่อนไปที่ขั้วแคโทด เกิดขึ้นเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดย diaphragm cell จะสร้าง cell liquor ที่ประกอบด้วย NaOH 12-14 % โดยน้ำหนัก และ NaCl ความเข้มข้นใกล้เคียงกันจากนั้น cell liquor นี้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการระเหยคลอรีนอีก 3-4 กระบวนการจนความเข้มข้นของ NaOH ประมาณ 50 % by weight ส่วนเกลือที่เหลือจะถูกทำให้ตกตะกอนและกรอง

เก็บไว้เพื่อนำมาใช้ใหม่ กระบวนการนี้ผลิตโซดาไฟที่มีคุณภาพต่ำที่สุดในทั้ง 3 วิธีที่ใช้วิธีการแยกทางไฟฟ้า โดยปกติจะเรียกว่า Diaphragm Cell Grade รวมทั้ง Commercial Grade หรือ Technical Grade ซึ่งจะมีสิ่งเจือปนอยู่ค่อนข้างมากทั้ง เกลือ, คลอเรต, คาร์บอเนต, ซัลเฟต เช่นมี NaCl เจือปน 1-1.3 % by weight แต่เรายังสามารถเพิ่มคุณภาพของ Diaphragm Cell Grade ด้วยการนำไปตกตะกอนเกลือเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์เรียกว่า Purified Grade

2.4.4.2 Mercury Cell Process

เซลล์ปรอท (Mercury cell) เซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบ Chlor – Alkali ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยขั้วแอโนดซึ่งทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบออกไซด์ของธาตุบางชนิดและใช้ปรอทเป็นแคโทด เซลล์ปรอทเป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง วิธีผลิตโดยผ่านสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัวและบริสุทธิ์เข้าไปในเซลล์นี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขั้วแคโทดซึ่งเป็นขั้วปรอทเกิด Over voltage ของปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเป็นไฮดรอกไซด์ไอออนและแก๊สไฮโดรเจน ดังนั้นปฏิกิริยารีดักชันจึงเกิดเป็น Na^+ ไปเป็น Na แทน ซึ่งละลายปรอทเป็นโซเดียมอะมัลกัมที่มีความเข้มข้นประมาณ 5% โดยมวล สมการที่ 2-3 เมื่อโซเดียมอะมัลกัมถูกแยกออกจากกัน โดยผ่านน้ำบริสุทธิ์เข้าไป โซเดียมจะทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการ

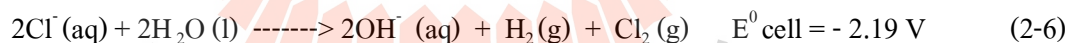
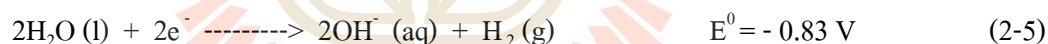


ปรอทเหลวสามารถถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในเซลล์อิเล็กโทรไลต์นี้ได้ ส่วนแก๊สไฮโดรเจนลอยออกสู่ด้านบนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้มีความเข้มข้นประมาณ 50% โดยมวล และปรอทที่ใช้บางส่วนปนกับน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตลงสู่แหล่งน้ำทำให้เกิดมลภาวะทางน้ำจากกระบวนการผลิตพบว่า ปรอทสูญหายไป 200 กรัมต่อ Cl_2 1 เมตริกตันที่ผลิตได้ ปรอทถูกปะปนกับน้ำทิ้งจะอยู่ในรูป HgCl_2 ซึ่งจุลินทรีย์ในน้ำสามารถเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์ได้คือ ไดเมทิลเมอร์คิวรี $((\text{CH}_3)_2\text{Hg})$ สารนี้จะสะสมในสัตว์น้ำถ้าเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ปรอทจะไปสะสมตามเนื้อเยื่อที่มีไขมันมากๆ เช่น ไขสมอง ส่งผลต่อการทำงานของระบบประสาทส่วนกลางทำให้เกิดความผิดปกติของระบบประสาท เช่น นอนไม่หลับ ประสาทหลอน ความจำเสื่อม และเนื่องจากร่างกายไม่สามารถทำลายหรือกำจัดปรอทได้ ปรอทที่สะสมในร่างกายจึงทำให้พิษร้ายแรง ถ้ามีสะสมในร่างกายเพียง 50 มิลลิกรัม อาจถึงตายได้

เนื่องจากการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 2 วิธีต่างก็เกิดปัญหาในด้านค่าใช้จ่ายสำหรับการทำโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้บริสุทธิ์และการปนเปื้อนของสารพวกปรอททำให้เกิดมลภาวะ จึงได้มีการพัฒนาเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบ Chlor – Alkali ใหม่ เพื่อใช้ผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่บริสุทธิ์มากขึ้น

2.4.4.3 Membrane cell Process

เซลล์เยื่อแลกเปลี่ยนไอออน (Membrane cell) เป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบ Chlor – Alkali ชนิดหนึ่ง มีลักษณะคล้ายเซลล์ไดอะแฟรมต่างกันที่ใช้เยื่อแลกเปลี่ยนไอออนแทนไดอะแฟรมเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนทำจากฟลูออโรคาร์บอนพอลิเมอร์ มีสมบัติยอมให้เฉพาะไอออนบวก เช่น Na^+ ซึ่งมีขนาดเล็กผ่านได้ ซึ่งแตกต่างจากไดอะแฟรมที่ยอมให้ทั้งไอออนบวกและไอออนลบผ่านได้ สารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัวและบริสุทธิ์ในภาชนะที่ด้านแอนโอดผ่านกระแสไฟฟ้าลงในสารละลายนี้ Na^+ เป็นไอออนขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนเข้าไปยังแคโทดส่วนคลอไรด์ไอออนผ่านเยื่อและเปลี่ยนไอออนไม่ได้จะเสียอิเล็กตรอนเกิดก๊าซคลอรีนที่ขั้วแอนโอด ดังสมการที่ 2-4 ถึง 2-6 พบว่าไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นที่แคโทดรวมกับโซเดียมไอออนเกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจนไม่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนออกจากระบบที่ขั้วแอนโอดและแคโทดตามลำดับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้มีความเข้มข้น 30 -35% โดยมวล ถ้าปรับปรุงเซลล์นี้ให้มีคุณภาพดีขึ้นก็จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 40% โดยมวล



การแยกสลายสารละลายโซเดียมคลอไรด์หรือน้ำเกลือเข้มข้น (brine) ด้วยกระแสไฟฟ้าในระดับอุตสาหกรรมนั้น มีกระบวนการผลิตหลักอยู่ 3 ชนิด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบการผลิตด้วยกระบวนการทั้งสามได้ดังตาราง 2.11 จะเห็นว่ากรผลิตโดยใช้เซลล์ไดอะแฟรมนั้นให้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต่ำที่สุด และมีโซเดียมคลอไรด์เจือปนมากที่สุดอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การใช้ประโยชน์ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ขึ้นกับความเข้มข้นของสาร เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเซลล์ไดอะแฟรม แล้วจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการความบริสุทธิ์สูงมากได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเซลล์ไดอะแฟรมมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ปนอยู่ จึงต้องนำมาระเหยตัวทำละลายออกเพื่อทำให้โซเดียมคลอไรด์ตกตะกอนลงมาและเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เป็น 50% การผลิตโดยใช้เซลล์ไดอะแฟรม

อาจทำให้มีคลอเรตสูงถึง 0.1% เมื่อเทียบกับเซลล์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนไอออน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเซลล์ปรอทนั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ 50% และสูงได้ถึง 73% เมื่อได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ออกมาแล้ว ต้องนำมาทำให้เย็นแล้วกรองผ่าน activated carbon 1-2 ครั้ง เพื่อลดปริมาณของปรอทจนอยู่ในระดับน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเซลล์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนนั้นมีความเข้มข้นประมาณ 30% และมีโซเดียมคลอไรด์ปนอยู่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และโซเดียมคลอเรต 5-10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2.11 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบการทำงานของทั้ง 3 ระบบ

	เซลล์ไดอะแฟรม	เซลล์ปรอท	เซลล์เมมเบรน
ขั้วแคโทด	เหล็กกล้าไร้สนิม	ปรอท	เหล็กกล้าไร้สนิม ไทเทเนียม แพลทินัม ผสมไทเทเนียม
ขั้วแอโนด	แกรไฟต์ ไทเทเนียม	แกรไฟต์ ไทเทเนียม	โลหะออกไซด์
ปริมาณการใช้แคโทด	ใช้งานได้นาน	0.15-0.2 kg/ ton NaOH	ใช้งานได้นาน
ปริมาณการใช้แอโนด	8 kg/ ton NaOH	4 kg/ ton NaOH	ใช้งานได้นาน
ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (V)	3.7-3.8	4.2-4.5	3.3-3.4
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (kw-h/ton NaOH)	2700	3600-3800	200-2400
ประสิทธิภาพของไฟฟ้า (current efficiency)	94-95	95-96	95-97
ความเข้มข้นของ NaOH ที่ได้ (%)	10	50	30-35
ปริมาณ NaCl ที่ปนใน NaOH (%)	15	0.002-0.003	0.001-0.002

ก๊าซคลอรีนที่ออกมาจากเซลล์การผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 93 องศาเซลเซียส นั้นอึดตัวด้วยน้ำ ซึ่งสามารถลดความชื้นลงได้ด้วยการลดอุณหภูมิลงจนเหลือ 16 องศาเซลเซียส แล้วผ่านไปยัง demisters ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กเพื่อกำจัด โมเลกุลของน้ำและเกลือออกไปผ่านแก๊สคลอรีนลงในกรด ซัลฟิวริกทำการกำจัดความชื้นจากนั้นทำให้ก๊าซกลายเป็นของเหลวโดยการลดอุณหภูมิลงจนเกิดเป็น คลอรีนเหลว นำไปบรรจุและขนส่งต่อไปได้สำหรับแก๊สที่ไม่เกิดการควบแน่นนั้นสามารถนำไปผลิต เป็นกรดไฮโปคลอไรต์ (HClO) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โดยการทำปฏิกิริยากับน้ำหรืออาจนำมา ทำปฏิกิริยากับ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือหินปูน เพื่อเปลี่ยนเป็น โซเดียมไฮโปคลอไรต์หรือ แคลเซียมไฮโปคลอไรต์

(Sirivedhin et al, 2010) การบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนน้ำมันและก๊าซด้วย electro dialysis (ED) วัตถุประสงค์คือศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของ cation/anion-exchange membranes ในการบำบัดน้ำที่ ปนเปื้อนน้ำมันและก๊าซโดยมีความเข้มข้นน้ำเกลือ ค่าของแข็งละลายน้ำและค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน นอกจากนี้การบำบัดน้ำมีเป้าหมายให้ผ่านมาตรฐานน้ำดื่ม น้ำชลประทานและมาตรฐานการรดน้ำ ปศุสัตว์ พบว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้ามีผลกระทบต่อค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำที่มีความ เข้มข้นค่าของแข็งละลายน้ำสูงขึ้นในขณะที่เดียวกันการเพิ่มขึ้นมีผลกระทบมากขึ้นในการลดค่าของแข็ง ละลายน้ำในน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำเช่นกัน ในน้ำที่มีความเข้มข้นค่าของแข็งละลายน้ำคล้ายกัน เวลาของ การกระจายไอออนแตกต่างกัน และในการบำบัดน้ำเสียต้องใช้เวลาในการกำจัด ไอออนเป็น 50% ของ การแลกเปลี่ยนประจุ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0, 6.5 และ 9.8 โวลต์ มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

2.5 ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell)

2.5.1 หลักการ

เป็นกระบวนการแยกสารอิเล็กโทรไลต์โดยการผ่านไฟฟ้ากระแสตรงลงไปในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์นั้น โดย กระแสไฟฟ้าที่ใช้ผ่านลงไปในเซลล์ ต้องเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (D.C.) คือ กระแสอิเล็กตรอน เกิดปฏิกิริยาเคมีที่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ส่วนขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์นั้นนิยมใช้ขั้วเฉื่อยเพราะถ้าใช้ขั้ววงไว ขั้วอาจจะมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ จากการศึกษาในระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์พบว่าการ เปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเช่นกัน จากการทบทวน วรรณกรรมพบว่าสามารถกำจัดคลอไรด์ได้ร้อยละ 98 จากเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 9 โวลต์ และอุณหภูมิ 55 °C (M. Sadrzadeh et al., 2008) และที่สภาวะค่าความต่าง

ศักย์ 15 โวลต์ สามารถกำจัดค่าของแข็งละลายได้ร้อยละ 62.2 (Jie Liu et al., 2016) โดยน้ำเสียมีความเข้มข้นคลอไรด์เท่ากับ 33,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 66,800 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 20 °C จากการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาสัมผัส ซึ่งเป็นระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนในสารละลายกับอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วทั้งสองในระยะเวลาสัมผัสที่ 20 นาที สามารถกำจัดโซเดียมคลอไรด์ได้ร้อยละ 98.3 (Wei Tan et al., 2016) จากน้ำเกลือเข้มข้น 33,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้าเวลาสัมผัสมากเกินไปจนอาจทำให้การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้ามากเกินไปจนพอกันจึงส่งผลกระทบต่อให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้า

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลติก

2.5.2.1 ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบทำให้เกิดปฏิกิริยาการรับหรือให้อิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้าเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือ โดยขั้วไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาลักษณะของขั้วไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพในการจ่ายกระแสไฟฟ้าและการขนส่งมวลสารมาทำปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้านั้นมีผลต่อกระแสไฟฟ้าเช่นกันเนื่องจากไอออนของสารละลายบริเวณขั้วไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนขั้วไฟฟ้าทำให้ความเข้มข้นสารละลายลดลงจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารละลายในบริเวณอื่นในเซลล์มายังบริเวณขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่ ทำให้บางช่วงเวลาบริเวณขั้วใช้กระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนที่เกิดปฏิกิริยา

2.5.2.2 ความเข้มข้นสารละลาย

ความเข้มข้นของสารละลายหรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถบอกถึงความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในระบบซึ่งส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือเนื่องจาก ทำให้ความสามารถแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือ

2.5.2.3 ระยะเวลาสัมผัส

เป็นเวลาในการเดินระบบ โดยบริเวณขั้วไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนในสารละลายกับอิเล็กตรอน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าเมื่อมีพื้นที่ผิวมากจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น ส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยามากเกินไปจะเกิดการกัดกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้าหรือภายในถังปฏิกิริยาได้ และอาจทำให้ใช้กระแสไฟฟ้ามากขึ้น อุณหภูมิในถังสูงขึ้น

2.5.2.4 พลังงานที่ใช้

เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินระบบทั้งหมด โดยมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์โดยตรง การทำงานของขั้วไฟฟ้าคือศักย์ภาพในการเกิดปฏิกิริยา ชนิดขั้ว ระยะห่างระหว่างขั้ว การนำไฟฟ้าของสารละลาย และศักย์ภาพในการเลือกผ่านประจุของเยื่อเลือกผ่าน

2.5.2.5 กลไกการไหล

การไหลของสารละลายภายในเซลล์เพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยาบริเวณขั้วไฟฟ้าต้องไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านประจุจึงเข้าไปถึงบริเวณ โดยแรงของการเคลื่อนที่ประกอบไปด้วย แรงดันน้ำ แรงเฉื่อย แรงหนืด ซึ่งมีผลต่อการขนส่งมวลสารหรือการไหลของสารละลายไปทำปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าเพื่อทำปฏิกิริยาการกำจัดเกลือ

2.5.3 รูปแบบถังปฏิกิริยา

กระบวนการอิเล็กโทรไลต์ เป็นการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์นั้น โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ผ่านลงในเซลล์ ต้องเป็นไฟฟ้ากระแสตรง(D.C.) คือ กระแสอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เป็นปฏิกิริยรีดอกซ์ส่วนขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์นี้นิยมใช้ขั้วเฉื่อยเพราะถ้าใช้ขั้วว่องไว ขั้วอาจจะมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีก็ได้ โดยส่วนประกอบที่สำคัญของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell) ประกอบด้วย 1. แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก 2. ขั้วไฟฟ้า และ 3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์

2.5.3.1 Bio-electrochemically assisted microbial reactor (BEAMR)

เป็นการนำจุลินทรีย์เข้ามาช่วยในการบำบัดเสียโดยช่วยย่อยสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำให้เกิดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ถังปฏิกริยามีปริมาตร 0.31 ลิตร จำนวน 2 ถังมาต่อดัดกัน โดยมี Proton exchange membrane (PEM) ขนาด 3.5 ตร.ซม มาขึ้นกลางระหว่างสองถังเพื่อช่วยในการเลือกประจุผ่านทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าดีขึ้น ลดการไหลล้นของระบบและช่วยกันไอออนลบไม่ให้ไหลไปฝั่งขั้วแคโทด ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด มีขนาด 12 ตร.ซม และมีระยะห่างกัน 15 ซม. (Liu et al., 2005)

2.5.3.2 Microbial electrolysis cell (MEC)

การบำบัดมีลักษณะเดียวกับแบบ BEAMR แต่ระบบ MEC จะมีหลอดแก้วขนาด 80 มม. ยาว 16.8 มม. ต่อขึ้นด้านบนฝั่งขั้วแคโทด ส่วนขั้วแอโนดและแคโทดเป็นเม็ดแกรไฟต์ขนาด 2-6 มม. มีพื้นที่ผิว $1,320 \text{ m}^2/\text{m}^3$ โดยมีขดลวดไทเทเนียมเชื่อมต่อระหว่างสองขั้ว (Cheng et al., 2007)

2.5.3.3 Single chamber MEC

เป็นถังปฏิกริยาเดี่ยวภายในมีขั้วแอโนดเป็น Graphite brush ขนาด 25 mm. มีพื้นที่ผิว $18,200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ และมีความพรุน 95% ส่วนขั้วแคโทดเป็น Carbon cloth มีพื้นที่ผิว 7 ตร.ซม และตัวเร่งปฏิกริยาเป็นแท่งแพลทินัม (Pt) ขนาด $0.5 \text{ mg}/\text{cm}^2$ อยู่ฝั่งขั้วแอโนด ถึงแบบนี้มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและลดค่าใช้จ่าย (Call and Logan et al., 2008)

2.5.3.4 A Cathode on top single chamber MEC

เป็นถังปฏิกริยาเดี่ยวขนาด 0.3 ลิตร โดยมีขั้วแอโนดเป็น Graphite granules ขนาด 3-5 mm. วางไว้ด้านล่างของถัง ส่วนขั้วแคโทดเป็น Titanium tube เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ยาว 50 mm เคลือบด้วยทองคำขาว วางไว้ด้านบนของถังมีระยะห่างกับขั้วแอโนด 30 mm โดยน้ำจะไหลเข้าทางด้านล่างของระบบ (Guo et al., 2010)

2.5.3.5 Microbial reverse-electrodialysis electrolysis cells (MRECs)

ถังปฏิกริยาขนาด 76.3 ml โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนแอโนด 36 ml ขั้วคือ Carbon brush ขนาด 2.5 cm ยาว 3 cm ส่วนแคโทด 36 ml ขั้วคือ Titanium plated ขนาด กว้าง 3.5 cm ยาว 2 cmหนา 0.2 cm โดยมีแพลทินัมขนาด 2 ไมคอน ช่วยเร่งการเกิดปฏิกริยาที่ฝั่งแคโทด ส่วนตรงกลางระหว่างสองขั้วมีขนาด 4.3 ml บริเวณนี้มีการวาง anion and cation exchange membranes สลับกันจำนวน 10 คู่ เมมเบรนมีพื้นที่หน้าตัด 12 cm^2 และวางห่างกัน 0.18 mm (Young-Hyun Songet al., 2016)

2.5.3.6 Microbial Electrodialysis Cell (MEDC)

ถังปฏิกริยามีเมมเบรน anion and cation exchange membranes วางกันระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดเพื่อแยกสารละลายที่ทำปฏิกริยาขั้วทั้งสองทำให้เกิดผลิตภัณฑ์และผลพลอยได้ที่สูงและระบบสามารถเดินระบบได้ประสิทธิภาพคือ 98.8 % โดยขั้วแอโนดใช้ carbon cloth (type A;E-TEK) ขั้วแคโทดใช้ carbon cloth (type B-1B; E-TEK) มีพื้นที่ผิว 7 cm^2 (Mehanna et al., 2010)

2.5.4 ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่นำส่งอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลาย โดยมีขั้วแคโทดมีค่าเป็นลบทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยารีดักชันและแอโนดมีค่าเป็นบวกทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ประสิทธิภาพการทำงานของขั้วทั้งสองขึ้นอยู่กับ การนำไฟฟ้า การทนการกัดกร่อน และการตกค้างของสารอื่นเมื่อทำปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า

2.5.4.1 การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้า

การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าในการรับอิเล็กตรอนสามารถจากดูความแรงในการรับอิเล็กตรอนของธาตุหรือสารประกอบได้ดังตารางที่ 2.12 และ 2.13 โดยแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแต่ละตัวในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแอโนดและไทเทเนียมเป็นขั้วแคโทด เนื่องจากมีความสามารถในการรับอิเล็กที่ดีและการทำงานของธาตุมีความเสถียรภาพสูงสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดี นำไฟฟ้าได้ดี มีจุดเดือดจุดหลอมเหลวสูง มีราคาไม่แพง และขั้วแกรไฟต์ไม่ทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าของแข็งละลายน้ำปนเปื้อนเพิ่มขึ้นจากการกัดกร่อนของขั้วเนื่องจากเป็นคาร์บอน

ตารางที่ 2.12 แรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่มาตรฐานของโลหะต่างๆ

ธาตุ.	ศักย์ไฟฟ้า E° (โวลต์)	สถานะ
Au-Au ³⁺	+1.498	Noble / Cathodic
Pt-Pt ²⁺	+1.200	ความสามารถในการรับอิเล็กตรอน จากมากไปน้อยในทิศบนลงล่าง
Pd-Pd ²⁺	+0.987	
Ag-Ag ⁺	+0.799	
Hg-Hg ⁺	+0.788	
Cu-Cu ⁺	+0.337	
H ₂ -H ⁺	0.000	
Pb-Pb ²⁺	-0.126	
Sn-Sn ²⁺	-0.136	
Ni-Ni ²⁺	-0.250	
Co-Co ²⁺	-0.277	
Cd-Cd ²⁺	-0.403	
Fe-Fe ²⁺	-0.440	
Cr-Cr ³⁺	-0.744	
Zn-Zn ²⁺	-0.763	
Al-Al ³⁺	-1.662	
Mg-Mg ²⁺	-2.363	
K-K ⁺	-2.925	Active / Anodic

(Fontana, M.G., 1987, p. 42; Jones, D.A., 1996, p. 43)

ตารางที่ 2.13 แกลแวนิกซีรีย์(Galvanic series) ของโลหะบางชนิดในน้ำทะเล

ธาตุหรือสารประกอบ	สถานะ
Platinum	Noble / Cathodic
Gold	ความสามารถในการรับอิเล็กตรอนจาก มากไปน้อยในทิศบนลงล่าง
Graphite	
Titanium	
Silver	
Hastelloy C (62 Ni, 17 Cr, 15 Mo)	
18-8 Mo stainless steel (passive)	
18-8 stainless steel (passive)	
Chromium stainless steel 11-30% Cr (passive)	
Inconel (passive) (80 Ni, 13 Cr, 7 Fe)	
Nickel (passive)	
Silver solder	
Monel (70 Ni, 30 Cu)	
Cupronickels (60-90 Cu, 40-10 Ni)	
Bronzes (Cu-Sn)	
Copper	
Brasses (Cu-Sn)	
Chlorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)	
Hastelloy B (60 Ni, 30 Mo, 6 Fe, 1 Mn)	
Inconel (active)	
Nickel (active)	
Tin	
Lead	Active / Anodic

(Fontana, M.G., 1987, p. 43; Jones, D.A., 1996, p. 14)

ตารางที่ 2.13 แกลแวนิกซีรี่ส์(Galvanic series) ของโลหะบางชนิดในน้ำทะเล (ต่อ)

ธาตุหรือสารประกอบ	สถานะ
18-8 Mo stainless steel (active)	Noble / Cathodic
18-8 stainless steel (active)	ความสามารถในการรับอิเล็กตรอนจากมากไปน้อยในทิศบนลงล่าง
Chromium stainless steel 30% Cr (active)	
Cast iron	
Steel	
2024 Aluminium (4.5 Cu, 105 Mg, 0.6 Mn)	
Zinc	Active / Anodic

(Fontana, M.G., 1987, p. 43; Jones, D.A., 1996, p. 14)

การบำบัดน้ำเกลือด้วยระบบอิเล็กโทรไลต์มีองค์ประกอบของระบบอยู่ 4 ส่วนคือ ขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เยื่อกรองเลือกผ่าน และเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จากตารางที่ 2.16 จะเห็นว่าประสิทธิภาพทำงานของระบบมีปัจจัยในการเดินระบบขึ้นกับทางกลและทางเคมี ปัจจัยที่สำคัญคือ กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ ความเข้มข้นสารละลาย ระยะเวลาสัมผัส ขั้วไฟฟ้า จากการทบทวนวรรณกรรมในการเดินระบบเมื่อความต่างศักย์ในระบบมีแนวโน้มสูงขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งละลายน้ำสูงขึ้นเช่นกัน โดยที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ สามารถกำจัดของแข็งละลายน้ำได้ร้อยละ 82.4 โดยใช้เพปติโนมเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งแอโนดและแคโทด(Mohtada et al., 2008) แต่เมื่อใช้เพปติโนมเป็นขั้วแอโนด สแตนเลสเป็นแคโทดใช้เวลาในการเดินระบบ 5.5 ชั่วโมง สามารถกำจัดของแข็งละลายน้ำได้ร้อยละ 98.3 (V.M.Aponte et al., 2001) เนื่องจากเกิดกระบวนการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าเมื่อสารละลายโซเดียมคลอไรด์ไหลเข้าระบบโดยมีเยื่อเลือกประจุบวกและประจุลบวางคั่นกลางระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด เมื่อโซเดียมไอออนจะไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านประจุบวกไปฝั่งขั้วแคโทดที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันให้อิเล็กตรอนกับไฮโดรเจนไอออนของน้ำที่แตกตัวบริเวณขั้วจึงเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจน ส่วนโซเดียมไอออนไหลมาทำปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ไอออนที่แตกตัวออกจากน้ำเกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงและเข้มข้น 30-40 โดยมวล ส่วนที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้อิเล็กตรอนกับคลอไรด์ไอออนบริเวณขั้วจึงเกิดก๊าซคลอรีนขึ้น ไอออนในสารละลายขับเคลื่อนด้วยศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนที่ขั้ว

มากขึ้นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบในการกำจัดของแข็งละลายน้ำได้เช่นกัน

2.5.5 การกักตรอนของขั้วไฟฟ้า

2.5.5.1 หลักการ

การกักตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้าโดยทำปฏิกิริยากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์จึงเกิดการถ่ายเทประจุ ถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย โดยขั้วไฟฟ้าให้อิเล็กตรอนส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์รับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณขั้วไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดการกักตรอนสูญเสียเนื้อโลหะของขั้วไฟฟ้าทำให้ความต้านทานการกักตรอนหรือความต้านทานออกซิเดชันลดลงและขั้วไฟฟ้าเสื่อมสภาพการทำงาน ซึ่งกลไกการเกิดการกักตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้าแอโนดเกิดคู่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่บริเวณต่างกับกับสารละลายโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน(ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์แคโทดิก) บริเวณหนึ่งที่ขั้วแอโนดให้อิเล็กตรอนออกมาแล้วถูกใช้ที่ตำแหน่งอื่นบนพื้นผิวขั้วแอโนดเพื่อรีดิวซ์ไฮโดรเจนไอออนกลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยาครึ่งเซลล์แคโทดิก ส่วนปฏิกิริยารีดักชัน(ปฏิกิริยาแคโทดิก)ไม่ได้เกี่ยวข้องโดยตรงกับการกักตรอนเนื่องจากการกักตรอนเกิดจากปฏิกิริยาแอโนดิกอย่างเดียว

2.5.5.1 การพิจารณาการกักตรอน

การพิจารณาการกักตรอนสามารถพิจารณาเบื้องต้นได้จากแรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าคือหากมีโลหะสองชนิดสัมผัสกันและมีองค์ประกอบของเซลล์การกักตรอนครบ คือ ขั้วไฟฟ้าแอโนด ขั้วไฟฟ้าแคโทด สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า ให้พิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าหมายถึงสามารถในการแย่งชิงอิเล็กตรอน(รับ)ได้ดีจะไม่เกิดการกักตรอน โดยปกติโลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ยากง่ายไม่เท่ากันเมื่อสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดการถ่ายเท-รับอิเล็กตรอนเกิดขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้าที่เสียอิเล็กตรอนได้ง่าย(แอโนด)

โดยพิจารณาการกักตรอนของขั้วแอโนดดังนี้

1). การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของสารละลาย สามารถวิเคราะห์ได้จากปริมาณไอออนที่เพิ่มขึ้นในระบบเนื่องจากการกักตรอนของโลหะในสารละลายที่มีการควบคุมปริมาตรของสารละลายให้คงที่ไอออนบวกของโลหะที่ถูกกักตรอนจะละลายสะสมอยู่ในสารละลาย เมื่อเวลาผ่านไปและเกิดการกักตรอนต่อเนื่องไอออนบวกของโลหะจะถูกละลายสะสมอยู่ในสารละลายมากขึ้นในสารละลาย

2). วัดความต้านทานไฟฟ้า ใช้วัดความเสียหายจากการกัดกร่อนของโลหะเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้นทำให้พื้นที่หน้าตัดขั้วลดลง ส่งผลให้ความต้านไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

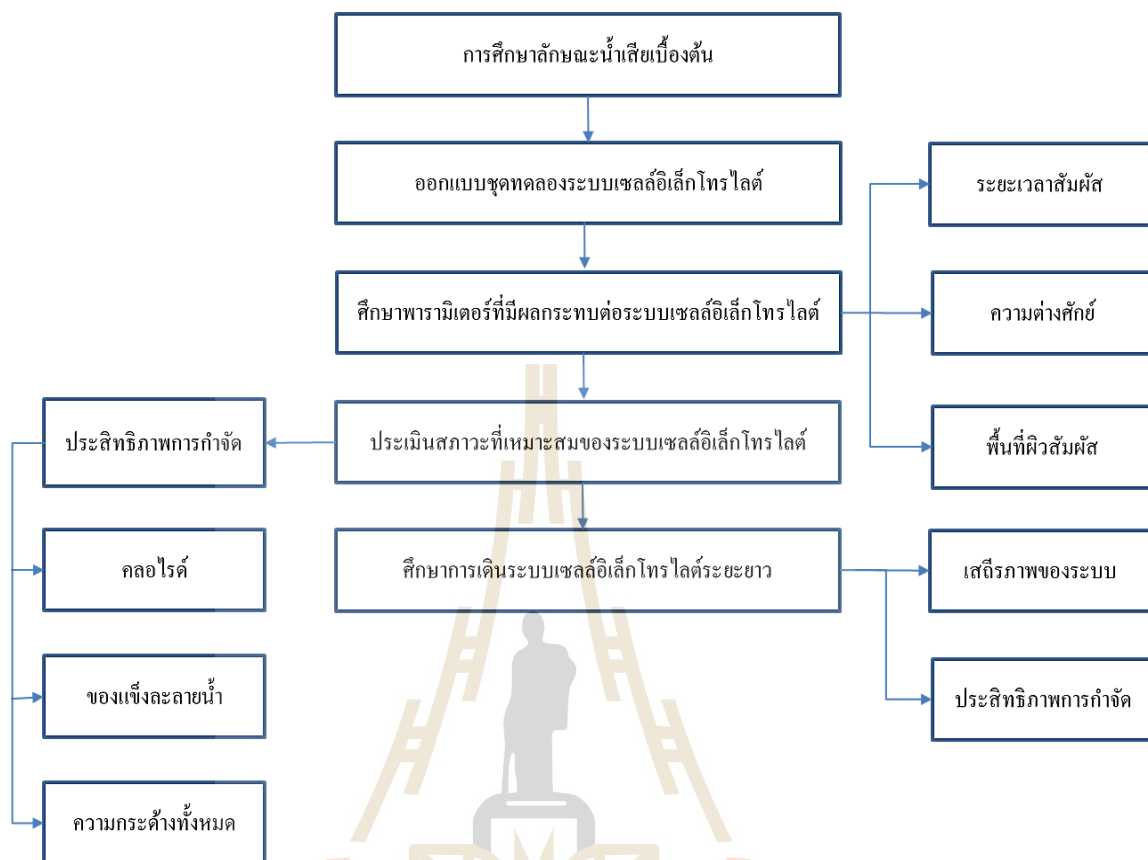


บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) เพื่อบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการล้างพื้นฟูสภาพเรซิน ในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินแนวทางในการเดินระบบที่มีความเหมาะสมของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เพื่อลดค่าของแข็งละลายน้ำ ค่าคลอไรด์ และแนวโน้มการเกิดก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์ โดยการแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาสัมผัส และพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า การศึกษาทำการประเมินประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยปัจจัยที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพได้แก่ การกำจัดคลอไรด์ การกำจัดของแข็งละลายน้ำ การเกิดก๊าซคลอรีน และก๊าซไฮโดรเจน และปัจจัยที่ประเมินเสถียรภาพของระบบประกอบด้วย การสะสมของตะกอนที่ขั้วไฟฟ้า และการอุดตันของเยื่อกรอง ดำเนินการวิจัยที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานตามแผนผังในรูปที่ 3.1





รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเก็บข้อมูลเบื้องต้น

ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินมีการการปนเปื้อนของของแข็งละลายน้ำ โดยเฉพาะ โซเดียม ไออน และคลอไรด์ ไออน ที่เกิดจากขั้นตอนการล้างเรซิน เนื่องจากใช้ สารเคมีที่นิยมใช้สำหรับการฟื้นฟูสภาพเรซินเป็นเกลือแกง (NaCl) เข้มข้น 8-10% จึงมีคลอไรด์ ความเข้มข้นสูงปนเปื้อนออกมากับน้ำเสียรวมถึง ไออนต่างๆ เป็นเหตุทำให้น้ำเค็มและมีความ กระด้างรวมอยู่ด้วย จากตารางที่ 3.1 ลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินจากการสำรวจเก็บ ข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดนครราชสีมาทำให้ทราบลักษณะทางเคมีของน้ำเสียที่ออกมา จากกระบวนการผลิตน้ำอ่อนด้วยวิธีแลกเปลี่ยน ไออน พบว่าน้ำเสียจากขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพ เรซินของ โรงงานแปรรูปอาหารมีค่าของแข็งละลายน้ำและค่าคลอไรด์ต่ำกว่า โรงงาน โรงงาน ขึ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และ โรงงานน้ำดื่มบรรจุขวดซึ่ง โรงงานทั้งสองแห่งนี้มีค่าของแข็งละลายน้ำ และค่าคลอไรด์ใกล้เคียงกันคือ มีค่าของแข็งละลายน้ำมีความเข้มข้น 127,000 – 136,000 mg/l และ ค่าคลอไรด์มีความเข้มข้น 77,000 – 83,000 mg/l ซึ่งเกิดจากการกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันและ ลักษณะน้ำดิบเนื่องจากตั้งอยู่บริเวณต่างกันและความเข้มข้นของเกลือที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซิน อาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากผู้ดูแลระบบเนื่องจากขั้นตอนการเตรียมน้ำเกลือเนื่องจากไม่ได้เป็น ระบบอัตโนมัติใช้ผู้ดูแลระบบเตรียมน้ำเกลือ

ตารางที่ 3.1 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการการฟื้นฟูสภาพเรซิน

พารามิเตอร์	โรงงานชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์			โรงงานน้ำดื่มบรรจุขวด			โรงงานแปรรูปอาหาร		
	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียล้างได้น้ำเกลือ	น้ำเสียรวม	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียล้างได้น้ำเกลือ	น้ำเสียรวม	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียล้างได้น้ำเกลือ	น้ำเสียรวม
TDS (mg/l)	127,500	59,694	78,200	136,000	67,250	116,422	86,700	51,684	81,368
NaCl (mg/l)	127,100	59,275	77,963	133,814	66,869	115,816	86,260	50,390	79,990
Cl (mg/l)	77,976	36,362	47,829	82,094	41,022	71,053	52,920	30,905	49,068
TH (mg/l as CaCO ₃)	384	319	236	376	250	326	435	309	388
Ca ²⁺ (mg/l as CaCO ₃)	295	253	204	300	204	275	281	200	259
Mg ²⁺ (mg/l as CaCO ₃)	89	66	32	74	46	51	154	109	129
pH	6.29	6.71	8.58	8.51	9.52	9.81	7.56	8.14	9.24

3.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสีย

การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ทำการเลือกน้ำเสียสังเคราะห์จากลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินโดยมีค่าความเค็มเท่ากับ 82,094 mg/l ค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 136,000 mg/l ค่าความกระด้างเท่ากับ 374 mg/l ซึ่งเป็นลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินของโรงงานน้ำดื่มบรรจุขวด โดยมีวิธีเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ดังตารางที่ 3.2 โดยใช้น้ำประปาที่มีค่าความกระด้างรวมเท่ากับ 100-120 mg/l as CaCO₃ ในการเตรียมน้ำเสีย

ตารางที่ 3.2 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์จากการฟื้นฟูสภาพเรซิน

พารามิเตอร์	ปริมาณ	สารเคมี	ปริมาณ
Cl ⁻ (mg/l)	1,000 - 84,000	NaCl (mg/l)	133,814
Ca ²⁺ (mg/l as CaCO ₃)	250 - 320	CaCl ₂ (mg/l)	300
Mg ²⁺ (mg/l as CaCO ₃)	60 - 80	MgCl ₂ (mg/l)	76

3.3 ชุดทดลองระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

3.3.1 ส่วนประกอบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

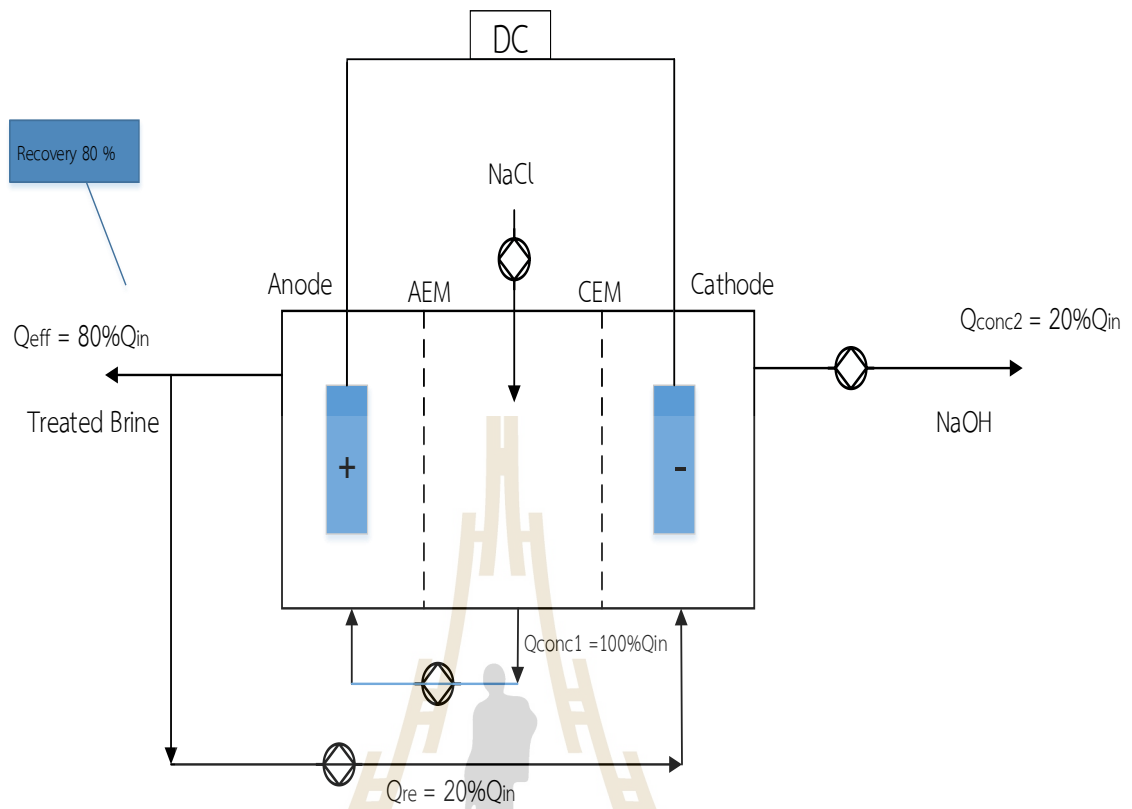
ชุดการทดลองระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เป็นการทดลองเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous process) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ถึงปฏิกิริยาทำด้วยแผ่นสแตนเลส 314 ภายในถังเคลือบยาง มีขนาดกว้าง 25.5 เซนติเมตร สูง 15.5 เซนติเมตร ยาว 53.5 เซนติเมตร ความจุ 21 ลิตร ภายในถังแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่อง โดยช่องแรกคือแคโทด ช่องสองคือช่องรับน้ำเสียเข้าระบบ และช่องสามคือช่องแอโนด โดยจ่ายน้ำเสียเข้าระบบควบคุมแรงดันอยู่ในช่วง 1.00 – 2.00 บาร์ (Tsiplakides et al., 2007) ชุดทดลองนี้เลือกใช้ไมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนบวก ขนาด 20 x 30 ตารางเซนติเมตร รุ่น fumasep® F-10150-PF และเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนลบ ขนาด 20 x 30 ตารางเซนติเมตร รุ่น fumasep® FAPQ-375-PP ของบริษัท Fumatech และแผ่นขั้วไฟฟ้ามี 2 ชนิด ประกอบด้วยแผ่นไทเทเนียมทำหน้าที่เป็นขั้วลบ และแผ่นแกรไฟต์ทำหน้าที่เป็นขั้วบวก เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 – 30 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าขนาด 0 - 24 โวลต์ (ชาติชาย ชาติตระกูล, 2548) โดยติดตั้งถึงปฏิกิริยาดังรูปที่ 3.2



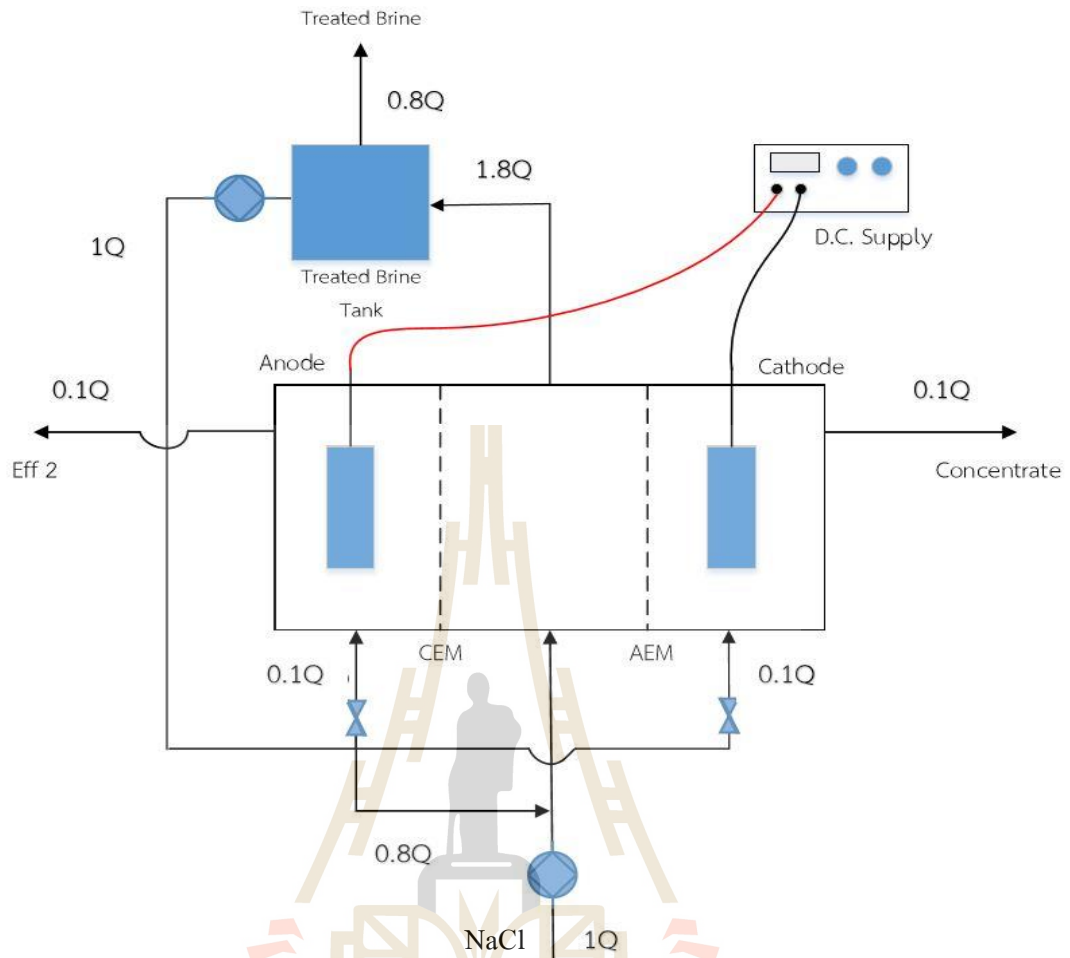
รูปที่ 3.2 การติดตั้งถังปฏิบัติการ

3.3.2 การจัดรูปแบบการไหลในถังปฏิบัติการ

การติดตั้งชุดการทดลองระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์มีรูปแบบการไหล 2 แบบ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดและลักษณะน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 โดยมีอัตราการเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ร้อยละ 80 ซึ่งรูปแบบการไหลแบบที่ 1 มีอัตราน้ำทิ้งร้อยละ 80 น้ำเสียฝังหัวแคโทดร้อยละ 20 ซึ่งลักษณะน้ำเสียมีการปนเปื้อนคลอไรด์จากน้ำทิ้งทำให้สารละลายไฮดรอกไซด์ถูกคลอไรด์ปนเปื้อน ส่วนรูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีอัตราน้ำทิ้งร้อยละ 80 น้ำเสียฝังหัวแคโทดร้อยละ 10 น้ำเสียฝังหัวแอโนดร้อยละ 10 ลักษณะน้ำเสียฝังหัวแคโทดไม่มีการปนเปื้อนของคลอไรด์และน้ำเสียฝังหัวแอโนดเกิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริก



รูปที่ 3.3 แบบถังปฏิบัติการแบบที่ 1



รูปที่ 3.4 แบบถังปฏิบัติการแบบที่ 2

3.3.3 เมมเบรน

เมมเบรนที่เลือกใช้ในการเดินระบบมี 2 ชนิด คือ เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนบวก รุ่น fumasep® F-10150-PF และเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนลบ รุ่น fumasep® FAPQ-375-PP ขนาด 20 x 30 ตารางเซนติเมตร ของบริษัท Fumatech เอื้อกรองทั้งสองชนิดเป็นพอลิเมอร์ชนิด Polyethylene terephthalate (PET) เหมาะสมกับการใช้งานในระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้สูง และทนแรงดันได้ดี โดยมีคุณสมบัติแสดงรายละเอียดดังตารางที่

3.3

ตารางที่ 3.3 ลักษณะเยื่อกรองที่ใช้ในระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

	Unit	Anion-exchange membrane	Cation exchange membrane
Thickness	μm	130	110 – 130
Ion exchange capacity	mmol/g	1.07	0.75 – 0.85
Area resistance	Ωcm^2	2.9	2.6 – 4.6
Specific conductivity	mS/cm	4.3	2.5 – 4.5
Selectivity 0.1 / 0.5 mol/kg KCl at T = 25 °C	%	95	96 – 99
Uptake in H ₂ O at T = 25 °C	wt %	20	15 – 25
Dimensional swelling in H ₂ O at T = 25 °C	%	0	0 – 1
Hydroxyl ion transfer rate	$\mu\text{mol min}^{-1} \text{cm}^{-2}$	-	10 – 30
Proton transfer rate	$\mu\text{mol min}^{-1} \text{cm}^{-2}$	1000 - 2000	-
Yield strength at 23 °C / 50 % r.h.	MPa	-	20 – 25
Tensile strength at 23 °C / 50 % r.h.	MPa	-	60 – 80
pH stability range at 25 °C	pH	1-8	0-8

ที่มา : บริษัท Fumatech

3.4 การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

การศึกษาพารามิเตอร์ในการเดินระบบที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วย การแปรเปลี่ยน ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาสัมผัส และพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า ดังรายละเอียดชุดการทดลองในตารางที่ 3.4 ด้วยระยะเวลาในการเดินระบบต่อเนื่อง 12 ชั่วโมง

3.4.1 ระยะเวลาสัมผัส

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาสัมผัส ซึ่งเป็นระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนในสารละลายกับอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจนที่บริเวณขั้วทั้งสอง แต่ถ้าวเวลาสัมผัสมากเกินไปอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้ามากเกินไปจนเกิดการกัดกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้า การทดลองเดินระบบจึงเลือกช่วงระยะเวลาสัมผัสที่ 15, 20, 25 และ 30 นาที

3.4.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้า

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งความต่างศักย์จ่ายเข้าระบบทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลชั่วไฟฟ้าทั้งสองจึงทำให้เกิดการถ่ายเทของอิเล็กตรอนในน้ำเสียบกับชั่วไฟฟ้าทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือ โดยความต่างศักย์สูงอาจมีผลต่ออุณหภูมิน้ำเสียบ การทำงานของเยื่อกรองเลือกผ่านประจุ ประสิทธิภาพการกำจัดเกลือและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ จึงทดลองเดินระบบที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5, 10, 15 และ 20 โวลต์ เพื่อเป็นการศึกษาเพื่อดูแนวโน้มของประสิทธิภาพ

3.4.3 พื้นที่ผิวสัมผัสชั่วไฟฟ้า

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวสัมผัสชั่วไฟฟ้า ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารละลายในระบบทำให้เกิดการกำจัดเกลือ เกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซคลอรีน และก๊าซไฮโดรเจน ถ้ามีพื้นที่มากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากเช่นกัน จึงได้แนวทางการทดลองเดินระบบที่ค่าพื้นที่ผิวสัมผัส 100, 200 และ 300 ตารางเซนติเมตร

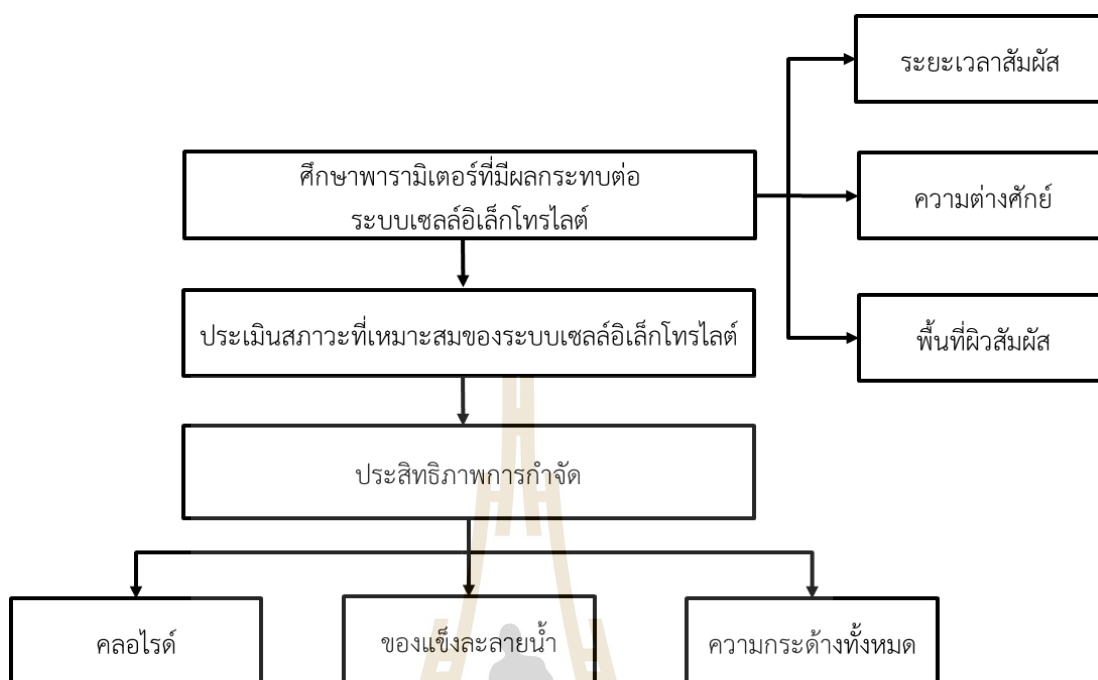
การศึกษาสภาวะการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบ่งออกเป็น 12 ชุดการทดลอง ในแต่ละชุดการทดลองใช้เวลาในการเดินระบบ 12 ชั่วโมง เพื่อหาช่วงที่เหมาะสมในการเดินระบบและตอบจุดประสงค์ของงานวิจัย โดยชุดการทดลองที่ 1-11 เดินระบบด้วยรูปแบบการไหลแบบที่ 1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยชุดการทดลองที่ 1-4 ทำการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ชุดการทดลองที่ 5-8 ศึกษาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม และชุดการทดลองที่ 9-11 ศึกษาพื้นที่ผิวสัมผัสชั่วไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อได้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองในชุด 1-4 จึงเริ่มทดลองหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในชุดทดลอง 5-8 หลังจากชุดทดลอง 1-8 จะได้ค่าระยะเวลาสัมผัสและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม จึงเริ่มชุดทดลอง 9-12 เพื่อหาพื้นที่ผิวสัมผัสชั่วไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยแปรเปลี่ยนค่าทั้งสามดังแสดงในตารางที่ 3.4 เมื่อได้สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของระยะเวลาสัมผัส ความต่างศักย์ และพื้นที่ผิวสัมผัส จึงเดินระบบด้วยรูปแบบการไหลแบบที่ 2 ในชุดทดลองที่ 12 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเกลือและลักษณะน้ำเสียบจากระบบบำบัดเพื่อนำไปสู่การประเมินรูปแบบการไหลในการทดลองเดินระบบแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 7 วัน

ตารางที่ 3.4 การศึกษาสภาวะการด้วยระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

ชุดการทดลองที่	ระยะเวลาสัมผัส (min)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (volt)	พื้นที่ผิวสัมผัส (cm ²)	
1	15	10	64	
2	20	10	64	
3	25	10	64	
4	30	10	64	
5	ค่าระยะเวลาสัมผัส ที่เหมาะสมจากชุด ทดลองที่ 1-4	5	64	
6		10	64	
7		15	64	
8		20	64	
9		ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่เหมาะสมจากชุด ทดลองที่ 5-8		100
10				200
11				300
12				ค่าพื้นที่ผิวสัมผัส ที่เหมาะสมจากชุด ทดลองที่ 9-12

3.5 การประเมินสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

การประเมินสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์เพื่อเลือกสภาวะในการเดินระบบที่เหมาะสมจากชุดทดลองที่ 1-12 มาเดินระบบในระยะยาวเป็นเวลา 7 วัน โดยประเมินจากประสิทธิภาพของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยปัจจัยที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพได้แก่ การกำจัดคลอรีน การกำจัดของแข็งละลายน้ำ การกำจัดความกระด้างทั้งหมด โดยแสดงแผนผังปัจจัยการประเมินสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนผังการประเมินสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

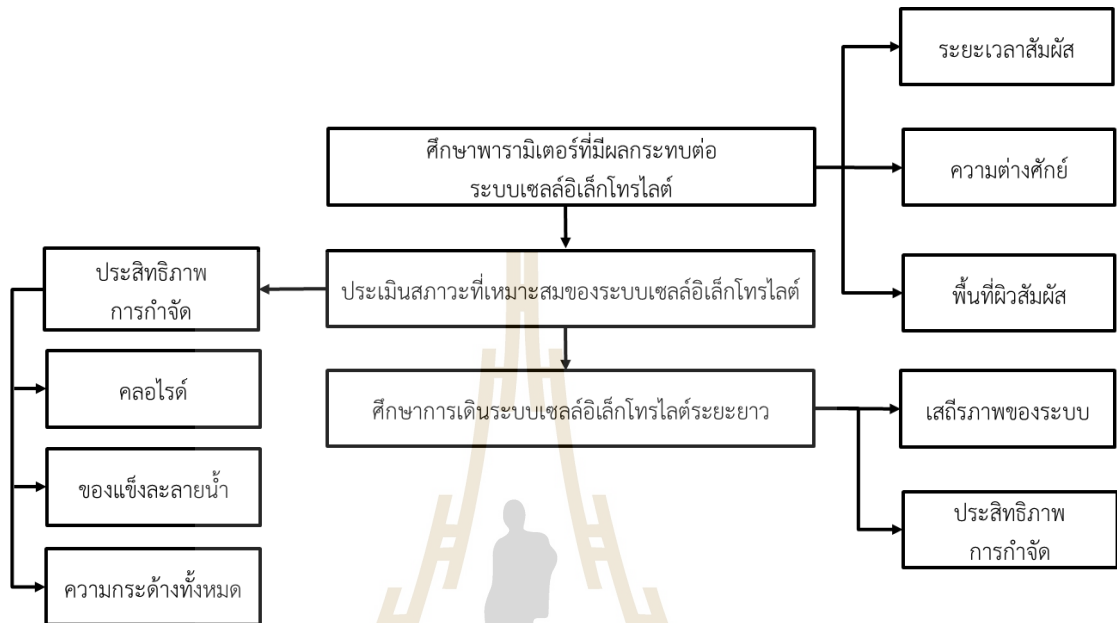
3.5.1 การประเมินประสิทธิภาพ

การประเมินประสิทธิภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชุดการทดลองที่ 1-12 ปีจ้ยในการศึกษา คือ การกำจัดคลอรีน การกำจัดของแข็งละลายน้ำ และการกำจัดความกระด้างทั้งหมด เนื่องจากสามารถแสดงถึงศักยภาพในการทำงานของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเกลือ เมื่อทดลองเดินระบบจะเก็บน้ำตัวอย่างทุก 1 ชั่วโมง จนครบ 12 ชั่วโมง ค่ากระแสไฟฟ้าจะทำการวิเคราะห์ค่า ณ เวลาที่เก็บน้ำตัวอย่าง ส่วนน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าคลอรีน ค่าของแข็งละลายน้ำ จะบรรจุใส่ภาชนะปิด (ไพทิวรี หมายถึงมันผสมสุก กรมโรงงานอุตสาหกรรม)

3.6 การศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในระยะยาว

การศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในระยะยาว จะทำการเลือกสถานะการเดินระบบที่เหมาะสมจากชุดการทดลองที่ 1-12 จะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาสัมผัสและพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ จึงเริ่มทดลองเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในสถานะที่เหมาะสมเป็นเวลา 7 วัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและความเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากการเดินระบบเป็นระยะเวลานานจึงทำการบำรุงและดูแล

ระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ โดยแสดงปัจจัยในการศึกษาการเดินระบบดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนผังการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในระยะยาว

3.6.1 การประเมินเสถียรภาพ

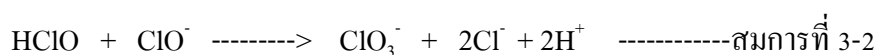
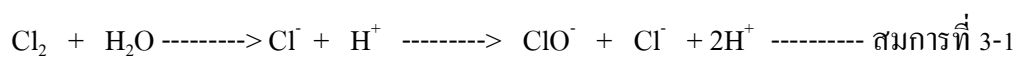
การประเมินเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์จากชุดการทดลองที่ 1-12 ประเมินการฟูก่อนของขั้วไฟฟ้า

3.6.2 แนวโน้มการเกิดก๊าซ

การประเมินการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม ประเมินการแนวโน้มการเกิดก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจนในเชิงคุณภาพ

3.6.2.1 การเกิดก๊าซคลอรีน

วิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซคลอรีนในรูปสารละลายคลอรีนอิสระเนื่องจากก๊าซคลอรีนสัมผัสกับน้ำกลายเป็นคลอรีนอิสระเมื่อน้ำมีค่าพีเอช 4 (N. Melian-Martel et al., 2011) แสดงดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 เพื่อประเมินการเกิดก๊าซตามสมการที่ 3.1



3.6.2.2 การเกิดก๊าซไฮโดรเจน

การเกิดก๊าซไฮโดรเจน ทำโดยการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) เพื่อประเมินการเกิดก๊าซตามสมการที่ 2-6

3.7 การบำรุงและรักษาระบบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

การบำรุงและรักษาระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่สภาวะเหมาะสมเป็นระยะเวลา 3 เดือน ภายในถังปฏิกริยามีวัสดุต้องทำการบำรุงและรักษาคือ ขั้วไฟฟ้าและเยื่อกรอง เพื่อไม่ให้เกิดการชำรุดขณะเดินระบบโดยขั้วไฟฟ้าเมื่อเริ่มเสื่อมสภาพจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์และการกำจัดของแข็งละลายน้ำลดลงจากเดิมเนื่องจากบริเวณขั้วไฟฟ้าเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีในการกำจัดมลทินในน้ำเสีย และเยื่อกรองเมื่อเริ่มเสื่อมสภาพจะส่งผลต่อแรงดันตกค่อมบริเวณเยื่อกรองมีค่าลดลงจากเดิมที่กำหนดไว้ให้อยู่ในช่วง 1.00-2.00 บาร์ และสามารถสังเกตจากอัตราการไหลของน้ำเสียที่ออกจากระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าลดลงจากเดิม

3.7.1 การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า

การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า ทำโดยล้างด้วยน้ำเปล่าหรือน้ำ DI แล้วนำไปแช่ในกรดไนตริก(HNO_3) ประมาณ 20 นาที เพื่อทำความสะอาดสิ่งสกปรกหรือคราบตะกอนบริเวณขั้วไฟฟ้า หากเกิดคราบน้ำมันขึ้นจะใช้สารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) เป็นสารทำความสะอาด โดยแช่ประมาณ 15 นาที หลังจากนั้นใช้กระดาษ A4 เช็ดถูที่บริเวณขั้วไฟฟ้า

3.7.2 การทำความสะอาดเยื่อกรอง

การทำความสะอาดเยื่อกรองประกอบด้วยวิธีทางเคมีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่เกาะติดบริเวณหน้าเยื่อกรอง โดยทำความสะอาดมี 2 ขั้นตอน คือ การแช่สารเคมี และล้างด้วยสารเคมีพร้อมอัดแรงดัน (Wang et al., 2011) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ขั้นตอนการทำความสะอาดเยื่อกรอง

ขั้นตอน	การเดินระบบ
การแช่สารเคมี	ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก 5 % เป็นเวลา 30-40 นาที
การแช่สารเคมี	ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 % เป็นเวลา 30-40 นาที

3.8 วิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง

พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์น้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูเรซิน ในระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte Cell) ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการทดลอง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ค่าคลอไรด์	Argentometric Method
ค่าของแข็งละลายน้ำ	Gravimetric method
ค่าความกระด้าง	ไทเทรต ด้วย EDTA
ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน	Gas Chromatograph
ลักษณะผิวขรุขระไฟฟ้า	Scanning Electron Microscope (SEM)

ที่มา (กรมควบคุมมลพิษ 2557)

3.8.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)

แก๊สโครมาโทกราฟี เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับแยกตัวอย่างที่เป็นสารผสมที่ระเหยได้ โดยเปลี่ยนสารผสมให้เป็นไอที่อุณหภูมิหนึ่ง ไอที่เกิดขึ้นจะถูกนำเข้าสู่คอลัมน์โดยอาศัยการพาไปของเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) หรือ carrier gas ตาม flow rate ที่ต้องการภายในคอลัมน์บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่ในการแยก เรียกว่าเฟสคงที่ (stationary phase) สารผสมจะถูกแยกออกเป็นส่วนๆ ที่คอลัมน์นี้ ด้วยความแตกต่างของสมบัติทางเคมี โครงสร้างน้ำหนักโมเลกุล จุดเดือด สารที่แยกได้ ผ่านออกไปสู่ส่วนตรวจวัด (detector) ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยังระบบประมวลผล (Data system) ซึ่งสามารถคำนวณและรายงานผลออกมาเป็นโครมาโทแกรม ให้ทราบถึงองค์ประกอบหรือเทียบปริมาณของสารตัวอย่างได้ กล่าวคือสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ

3.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุด 10 นาโนเมตร กล้องชนิดนี้มีไว้เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัตถุ การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM ไม่จำเป็นที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่าเครื่อง TEM เพราะตรวจวัดด้วยอิเล็กตรอน การสร้างภาพของ SEM เกิดจากการตรวจวัดด้วยอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จะมีลักษณะเป็น 3 มิติ เครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

3.8.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

1). เตรียมโดยตัดชิ้นงานให้มีขนาดพอเหมาะที่จะเอาเข้าเครื่องได้ นำไปขัดผิว (Grinding) ให้เรียบ ด้วยกระดาษทรายขัดเหล็ก (Silicon carbide) หดอืดด้วยน้ำในขณะขัด โดยเริ่มขัดจากหยาบไปหาละเอียด เริ่มจากกระดาษทรายเบอร์ 220, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ในบางกรณีอาจใช้ถึงเบอร์ 3000 การขัดแต่ละครั้งจะต้องขัดให้เกิดรอยกระดาษทรายในทิศทางเดียวตลอดผิวงานแล้วจึงหมุนชิ้นงานไป 90 องศา ขัดต่อจนรอยเดิมหายไป

2). จากนั้นนำไปขัดเงา (Polishing) ด้วยผงอะลูมินา (Alumina) บนผ้าสักหลาด ด้วยเครื่องขัดแบบจานหมุน ปกติจะนิยมใช้ผงอะลูมินา ที่มีเม็ดขนาด 1 Um, 0.25 Um, และ 0.05 Um ตามลำดับ ล้างน้ำทุกครั้งที่เปลี่ยนผงขัดกรณีที่ชิ้นงานมีความแข็งมากจะใช้ผงเพชร (Diamond paste) แทนผงอะลูมินา การขัดเป็นการขัดผิวตัวอย่างส่วนที่เสียรูปไปเนื่องจากการตัดซึ่งจะต้องพยายามขัดให้ผิวที่แปรรูปออกไปให้หมด จนถึงบริเวณที่เป็นโครงสร้างที่แท้จริง

3). หลังจากขัดผิวแล้วจะต้องนำชิ้นงานมากัดผิว (Etching) เพื่อให้เห็น โครงสร้าง และลักษณะการจัดเรียงตัวของ grain การกัดผิว มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดตัวอย่าง

บทที่ 4

ผลการศึกษา

การศึกษาระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) เพื่อบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการล้างพื้นฟูสภาพเรซินในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบไปด้วย 1). การศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในชุดทดลองแบบกะ 2). การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในชุดทดลองแบบต่อเนื่อง โดยปัจจัยที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพได้แก่ การกำจัดคลอไรด์ การกำจัดของแข็งละลายน้ำ การเกิดก๊าซคลอรีน ก๊าซไฮโดรเจน และปัจจัยที่ประเมินเสถียรภาพของระบบคือ การสะสมของตะกอนที่ขั้วไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดของการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 การเก็บข้อมูลเบื้องต้น

ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินมีการปนเปื้อนของของแข็งละลายน้ำ โดยเฉพาะ โซเดียมไอออน และคลอไรด์ไอออนที่เกิดจากขั้นตอนการล้างเรซิน เนื่องจากใช้สารเคมีที่นิยมใช้สำหรับการฟื้นฟูสภาพเรซินเป็นเกลือแกง (NaCl) เข้มข้น 8-10% จึงมีคลอไรด์ความเข้มข้นสูงปนเปื้อนออกมากับน้ำเสยวมถึงไอออนต่างๆ เป็นเหตุทำให้น้ำเค็มและมีความกระด้างรวมอยู่ด้วย จากตารางที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินจากการสำรวจเก็บข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดนครราชสีมาทำให้ทราบลักษณะทางเคมีของน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการผลิตน้ำอ่อนด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าโรงงานแปรรูปอาหารมีค่าของแข็งละลายน้ำและค่าคลอไรด์ต่ำกว่าโรงงานชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และโรงงานน้ำดื่มบรรจุขวดซึ่งโรงงานทั้งสองแห่งนี้มีค่าของแข็งละลายน้ำและค่าคลอไรด์ใกล้เคียงกัน ซึ่งเกิดจากการกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันและลักษณะน้ำดิบเนื่องจากตั้งอยู่บริเวณต่างกันและความเข้มข้นของเกลือที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซินอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากผู้ดูแลระบบเนื่องจากขั้นตอนการเตรียมน้ำเกลือเนื่องจากไม่ได้เป็นระบบอัตโนมัติใช้ผู้ดูแลระบบเตรียมน้ำเกลือ

ตารางที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการการฟื้นฟูสภาพเรซิน

พารามิเตอร์	โรงงานชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์			โรงงานน้ำดื่มบรรจุขวด			โรงงานแปรรูปอาหาร		
	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียล้างได้น้ำเกลือ	น้ำเสียรวม	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียล้างได้น้ำเกลือ	น้ำเสียรวม	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียล้างได้น้ำเกลือ	น้ำเสียรวม
TDS (mg/l)	127,500	59,694	78,200	136,000	67,250	116,422	86,700	51,684	81,368
NaCl (mg/l)	127,100	59,275	77,963	133,814	66,869	115,816	86,260	50,390	79,990
Cl (mg/l)	77,976	36,362	47,829	82,094	41,022	71,053	52,920	30,905	49,068
TH (mg/l as CaCO ₃)	384	319	236	376	250	326	435	309	388
Ca ²⁺ (mg/l as CaCO ₃)	295	253	204	300	204	275	281	200	259
Mg ²⁺ (mg/l as CaCO ₃)	89	66	32	74	46	51	154	109	129
pH	6.3	6.7	8.6	8.6	9.5	9.8	7.6	8.1	9.2

4.2 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา

การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ทำการเลือกน้ำเสียสังเคราะห์จากลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซิน โดยทำการสำรวจเบื้องต้นดังตารางที่ 4.1 จึงเลือกใช้ลักษณะน้ำเสียของโรงงานน้ำดื่มบรรจุขวดโดยมีค่าความเค็มเท่ากับ 82,094 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 136,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความกระด้างเท่ากับ 374 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีวิธีเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ดังตารางที่ 4.2 โดยใช้น้ำประปาที่มีค่าความกระด้างรวมเท่ากับ 100-120 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ในการเตรียมน้ำเสีย

ตารางที่ 4.2 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์และปริมาณสารเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์

ลักษณะน้ำเสีย	ความเข้มข้น	ปริมาณสารเคมี	ความเข้มข้น
Cl ⁻ (mg/l)	81,000 - 84,000	NaCl (mg/l)	133,814
Ca ²⁺ (mg/l as CaCO ₃)	250 - 320	CaCl ₂ (mg/l)	300
Mg ²⁺ (mg/l as CaCO ₃)	60 - 80	MgCl ₂ (mg/l)	76

4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

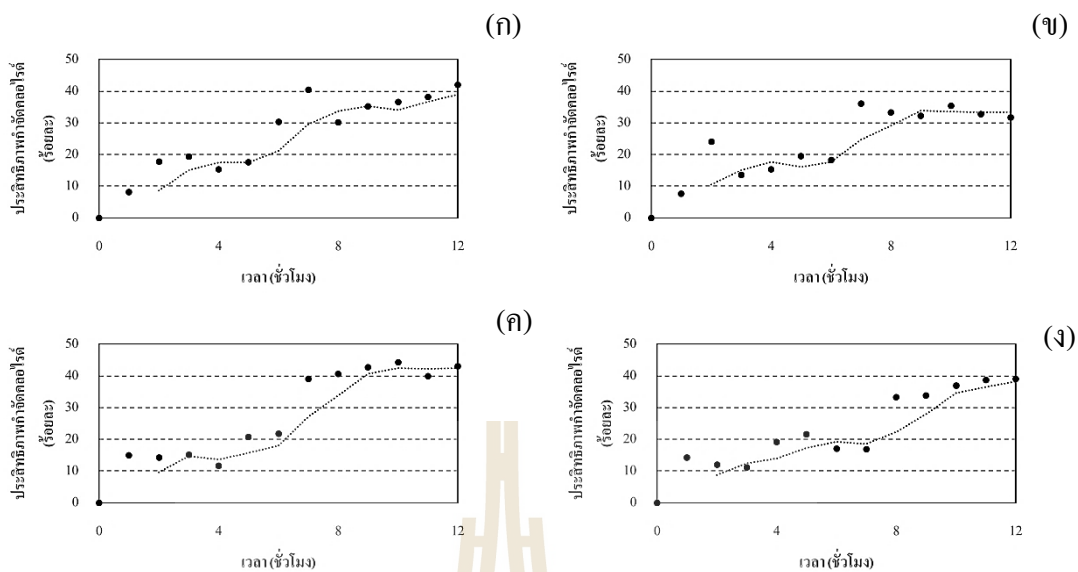
การศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน ในชุดการทดลองแบบกะเดินระบบเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ต่อชุดการทดลอง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบดังนี้ (1) ระยะเวลาสัมผัส (2) ความต่างศักย์ และ (3) พื้นที่ผิวสัมผัส ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในกำจัดคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำ และค่าความกระด้างทั้งหมด

4.3.1 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัส

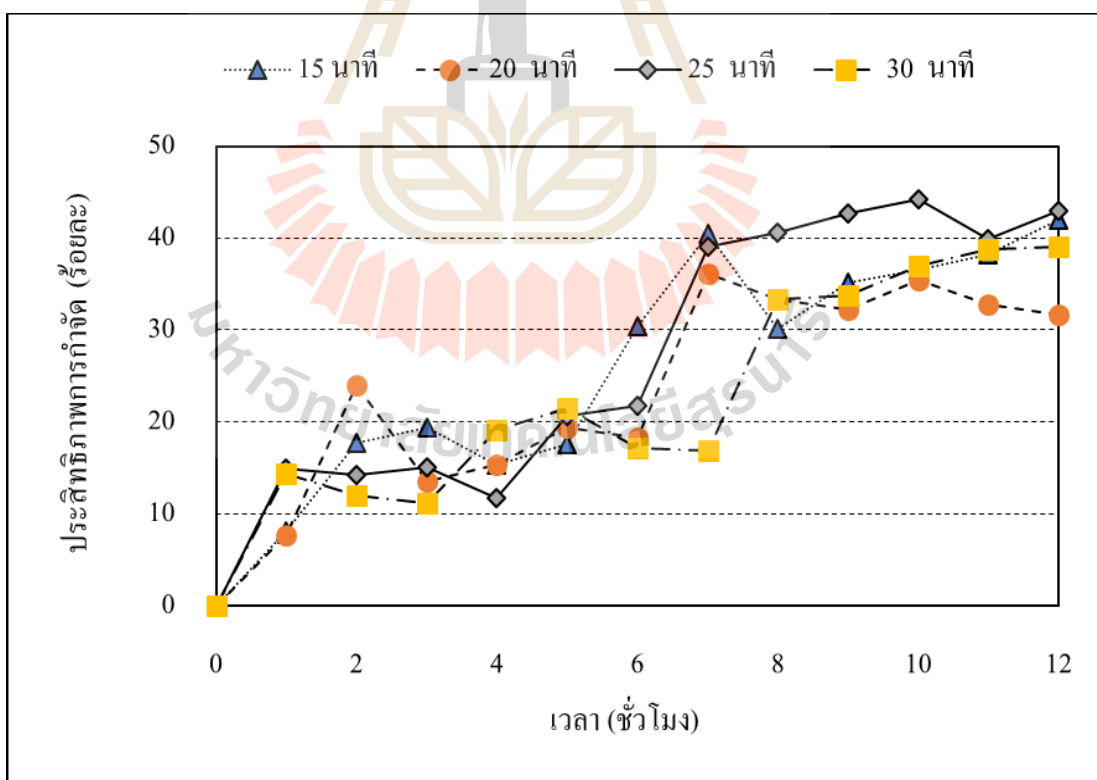
ทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสที่สภาวะคงที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ พื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้า 64 ตารางเซนติเมตร โดยแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสที่ 15 , 20 , 25 และ 30 นาที พบว่าที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 25 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด โดยมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดของทุกระยะเวลาสัมผัสดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving Average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่าการทดลองเข้าสู่สมดุลในเวลา 10 ชั่วโมง เนื่องจากค่าแปรปรวนของข้อมูลอยู่ที่ร้อยละ 2.27 ซึ่งมี

ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอรีนคือร้อยละ 42.36 ± 2.27 ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ 42.89 ± 1.77 ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ 99.90 ± 0.17 และเมื่อนำผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของทุกระยะเวลาสัมผัสไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Tukey's Multiple Comparison test พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคลอรีนของแข็งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (α -value > 0.05) ทำให้ระยะเวลาสัมผัสที่ 25 นาที เป็นค่าที่เหมาะสมในการทดลองเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดกำจัดคลอรีนของแข็งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมดสูงสุดซึ่งมีแนวโน้มการกำจัดดังรูปที่ 4.3 จากการศึกษาของ [Aponte and Colon et al \(2001\)](#) สามารถกำจัดคลอรีนได้ร้อยละ 98.3 ที่ระยะเวลาสัมผัส 20 นาที และ ([Wei Tan et al. 2016](#)) ที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 30 นาที โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดคลอรีนคือร้อยละ 36.37 ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ 39.18 และความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ 99.53 เนื่องจากมีอัตราการรับสารเคมีเป็น 0.51 ลิตรต่อชั่วโมงและตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าของระบบชุดทดลองคือ 0.1 ลิตรต่อชั่วโมงและตารางเซนติเมตร จึงทำให้ทราบว่าขนาดถังและระยะห่างระหว่างขั้วน้อยกว่าและระยะเวลาสัมผัสเป็นระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนในสารละลายกับอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วทั้งสองจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคลอรีนของแข็งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมด แต่ถ้าเวลาสัมผัสมากเกินไปอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้ามากเกินไปจนเกินไปจนส่งผลทำให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้าจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง

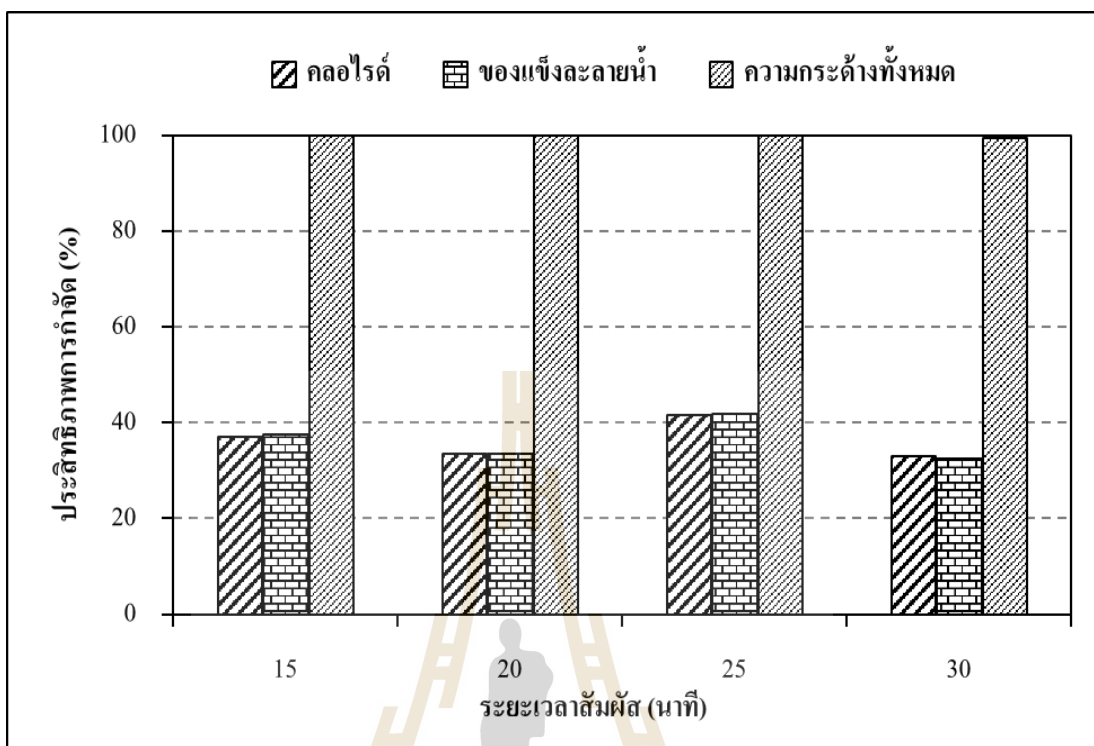
ทั้งนี้การออกแบบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัสแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีกด้วย เช่น ขนาดถังปฏิกิริยา พื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองถ้ามีพื้นที่ผิวสัมผัสมากสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากเช่นกันแต่ระยะห่างระหว่างขั้วมากจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระแสไฟฟ้าถ้าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามากทำให้ประสิทธิภาพการไหลของกระแสไฟฟ้าน้อยลงเนื่องจากความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น และความต่างศักย์ส่งผลโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าถ้าความต่างศักย์สูงกระแสไฟฟ้าสูงเช่นกัน เป็นต้น ([A. Campione et al. 2018](#)) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินแนวทางในการเดินระบบที่มีความเหมาะสมของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์สำหรับน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินที่มีค่าความเข้มข้น 82,094 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 136,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้นซึ่งมีระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 25 นาที โดยน้ำเสียมีอัตราการไหล 0.65 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ (ก) 15 นาที (ข) 20 นาที (ค) 25 นาที (ง) 30 นาที



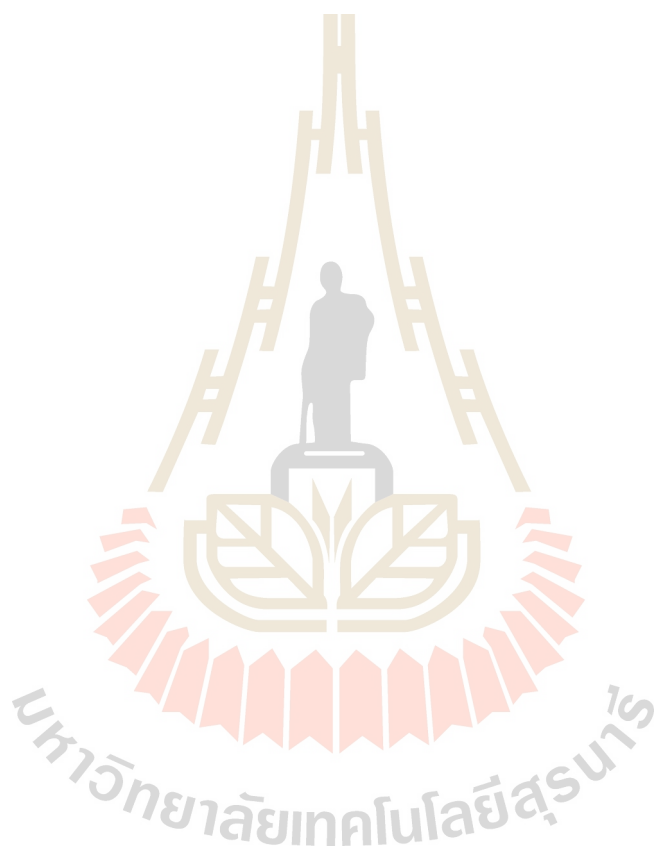
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์กับระยะเวลาสัมผัส



รูปที่ 4.3 ผลกระทบการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสกับประสิทธิภาพการกำจัด

การศึกษานี้ได้เก็บข้อมูลวิเคราะห์ลักษณะน้ำเข้าและออกของระบบทั้ง 4 จุด จากแบบระบบการติดตั้งระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์รูปที่ 3.2 โดยมีลักษณะน้ำดังตารางที่ 4.3 พบว่าที่สภาวะเหมาะสมเมื่อน้ำเสียเข้าสู่ระบบผ่านช่องกลางที่มีเยื่อกรองเลือกผ่านประจุบวกและเยื่อกรองเลือกผ่านประจุลบไหลออกทางด้านล่างของถังปฏิกริยาออกมาจึงเรียกว่าน้ำเจือจาง มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 6.7 และไม่พบค่าอัลคาไลน์ดีเนื่องจากพีเอชเป็นกลางและเกิดปฏิกริยาไฟฟ้าทำให้มีการแยกประจุในน้ำเสียโดยประจุลบจะไหลไปทางช่องแอโนดส่วนประจุบวกจะไหลไปทางช่องแคโทดเพื่อมาทำปฏิกริยาไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองฝั่งจึงทำให้น้ำทิ้งมีค่าพีเอชและค่าอัลคาไลน์ดีลดลงเนื่องจากคลอรีนทำปฏิกริยากับขั้วแอโนดจึงเกิดก๊าซคลอรีนตามสมการที่ 1-2 โดยมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 4.61 จากนั้นระบบได้นำน้ำทิ้งมาหมุนเวียนเข้าถังปฏิกริยาทางช่องแคโทดอีกครั้งเพื่อให้เกิดการไหลเวียนไอออนในถังปฏิกริยาทั้งสามช่องและทำให้น้ำเสียจากฝั่งแคโทดยังมีความเข้มข้นของไอออนอยู่ในระบบเนื่องจากปฏิกริยาไฟฟ้าทำให้เกิดผลพลอยคือก๊าซไฮโดรเจนและโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามสมการที่ 1-3 น้ำเสียที่ออกจากฝั่งขั้วแคโทดมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 11 ค่าอัลคาไลน์ดีเฉลี่ยเท่ากับ 8,055 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากประจุบวกใน

น้ำเสียทำปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดทำให้เกิดไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์และเกิดการแตกตัวของน้ำส่งผลให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งมีความเป็นด่างและส่งผลให้เกิดตะกอนจากประจุบวกสอง ส่วนค่าความกระด้างทั้งหมดของน้ำทิ้งจะมีค่าลดลงเนื่องจากไอออนประจุบวกสองได้เคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดจึงทำให้น้ำเสียเข้มข้นทำให้มีค่าความกระด้างสูงขึ้น



ตารางที่ 4.3 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
15	พีเอช	7.1 ± 0.44	11.2 ± 0.12	5.8 ± 0.17	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	131	7,777	0	-	-
	ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	135,625	82,824	82,840	37.54	4.37
	คลอไรด์ (mg/l)	82,243	49,540	50,206	37.10	4.31
	ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	444	208	0	100.00	0.00
	อัตราการไหล (l/min)	1.09	0.22	0.87	-	-
20	พีเอช	7.3 ± 0.22	11.2 ± 0.21	6.1 ± 0.32	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	184	8,111	0	-	-
	ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	137,207	86,424	95,853	33.56	1.33
	คลอไรด์ (mg/l)	82,243	59,648	58,093	33.58	1.44
	ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	386	242	0	100.00	0.00
	อัตราการไหล (l/min)	0.81	0.16	0.65	-	-

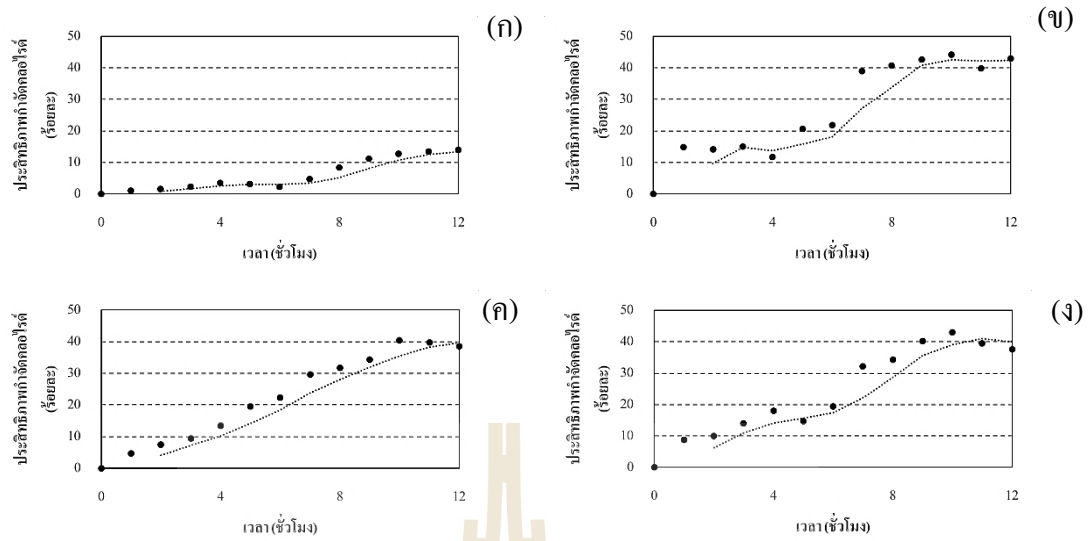
ตารางที่ 4.3 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมพัทธ์ (ต่อ)

ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาที)	พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
25	พีเอช	7.2 ± 0.12	11.5 ± 0.18	4.8 ± 0.12	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	194	4,444	0	-	-
	ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	137,160	85,107	84,307	42.89	1.77
	คลอไรด์ (mg/l)	83,418	49,651	51,095	42.36	2.27
	ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	383	226	2	99.90	0.17
	อัตราการไหล (l/min)	0.65	0.13	0.52	-	-
30	พีเอช	7.2 ± 0.20	10.3 ± 0.24	6.1 ± 0.26	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	126	8,333	0	-	-
	ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	138,123	116,916	119,496	32.59	2.71
	คลอไรด์ (mg/l)	83,529	70,866	72,421	33.12	2.72
	ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	376	260	3	99.41	0.00
	อัตราการไหล (l/min)	0.54	0.11	0.43	-	-

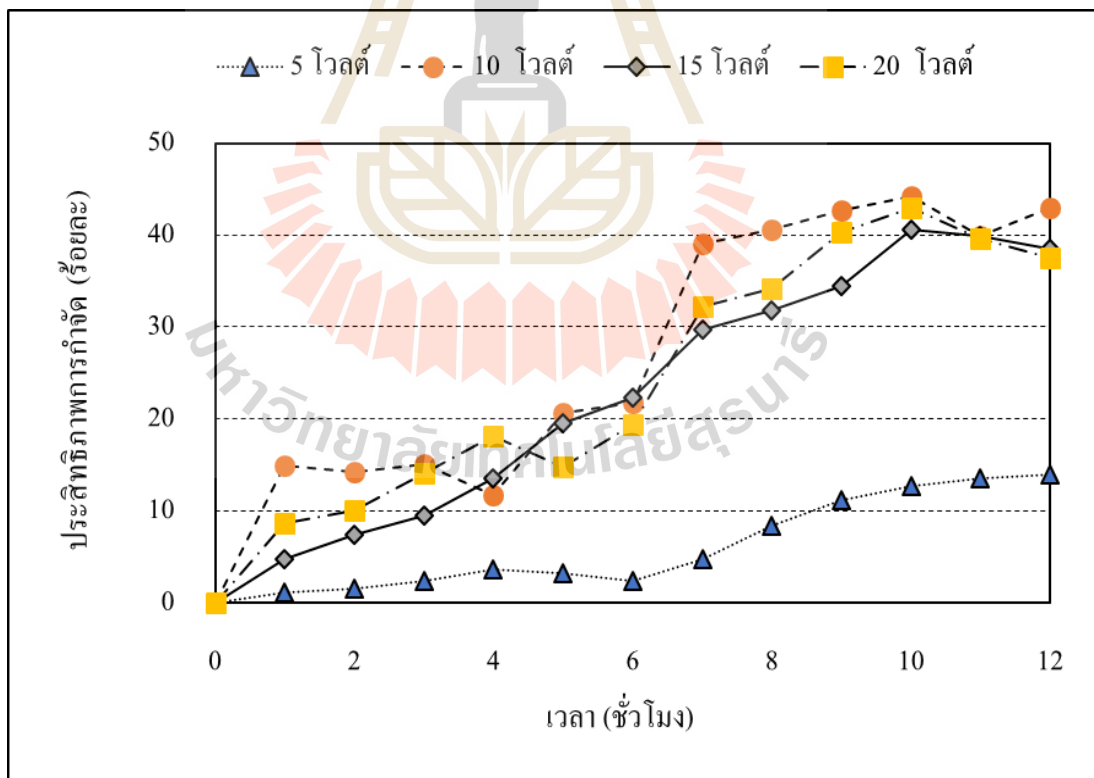
4.3.2 ผลกระทบของความต่างศักย์

การศึกษาผลกระทบของความต่างศักย์ที่สภาวะคงที่ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที พื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้า 64 ตารางเซนติเมตร โดยแปรเปลี่ยนความต่างศักย์ที่ 5 , 10 , 15 และ 20 โวลต์ พบว่าที่ความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดโดยมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดของทุกความต่างศักย์ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 เมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving Average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่าการทดลองเข้าสู่สมดุลในเวลา 9 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอรีนคือร้อยละ 42.50 ± 1.80 ของแฉ่งละลายน้ำคือร้อยละ 43.35 ± 2.67 ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ 98.96 ± 0.01 และเมื่อนำผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของทุกความต่างศักย์ไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Tukey's Multiple Comparison test พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคลอรีนของแฉ่งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (α -value < 0.05) จึงทำให้ความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ เป็นค่าที่เหมาะสมในการทดลองเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดกำจัดคลอรีนของแฉ่งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมดสูงซึ่งมีแนวโน้มการกำจัดดังรูปที่ 4.6 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ [Wei Tan et al. \(2016\)](#) สามารถกำจัดโซเดียมคลอไรด์ได้ร้อยละ 98.3 ที่ความต่างศักย์ 10 โวลต์ และเมื่อเพิ่มความต่างศักย์สูงที่ 15 โวลต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดของแฉ่งละลายน้ำได้ลดลงคือร้อยละ 39.80 มีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับ [Jie Liu et al. \(2016\)](#) ที่ค่าความต่างศักย์ 15 โวลต์ สามารถกำจัดค่าของแฉ่งละลายน้ำได้ร้อยละ 62.2 โดยน้ำเสียมีค่าของแฉ่งละลายน้ำเท่ากับ 66,800 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 20 °C เนื่องจากมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันค่าคลอรีน และเมื่อความต่างศักย์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนของไอออนมากขึ้นเช่นกันแต่ทำให้กระแสไหลผ่านในระบบสูงขึ้นจึงทำให้เกิดการอิมตัวของไอออนในระบบและอุณหภูมิสูงทำให้การทำงานของเยื่อกรองแลกเปลี่ยนไอออนและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่สูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าน้ำทิ้งมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 4.6 และไม่พบค่าอัลคาไลน์นี้เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดเกิดสายละลายไฮโดรคลอริกและก๊าซคลอรีนส่วนขั้วแคโทดเกิดสารละลายไฮดรอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนทำให้น้ำเข้มข้นมีค่าพีเอชและอัลคาไลน์สูงขึ้น ส่วนน้ำเจือจางมีค่าพีเอชและอัลคาไลน์ลดลงโดยสรุปลักษณะน้ำเข้าและออกกระบบตามตารางที่ 4.4

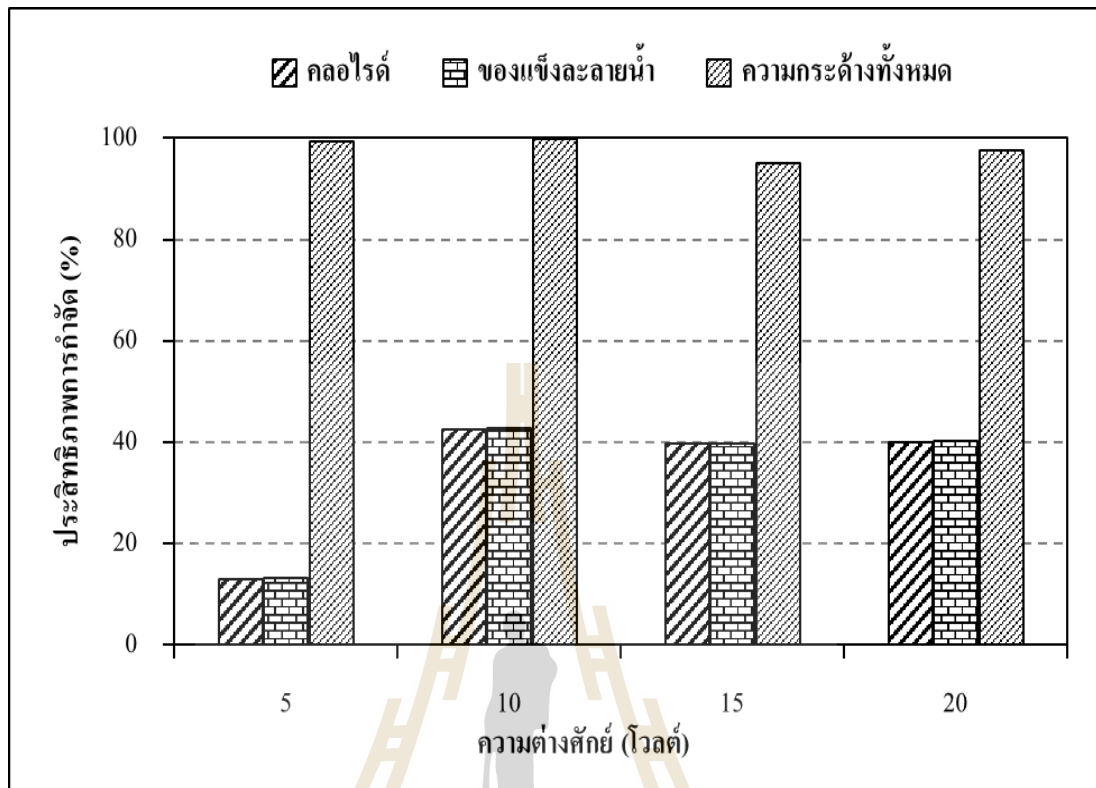
การออกแบบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินแนวทางในการเดินระบบที่มีความเหมาะสมของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์สำหรับน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินที่มีค่าความเค็มเข้มข้น 82,094 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแฉ่งละลายน้ำเท่ากับ 136,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้นซึ่งมีความต่างศักย์ที่เหมาะสมคือ 10 โวลต์ โดยน้ำเสียมีอัตราการไหล 0.65 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ที่ความต่างศักย์ต่างๆ (ก) 5 โวลต์ (ข) 10 โวลต์ (ค) 15 โวลต์ (ง) 20 โวลต์



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์กับความต่างศักย์



รูปที่ 4.6 ผลกระทบการแปรเปลี่ยนความต่างศักย์กับประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 4.4 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนความต่างศักย์

ความต่าง ศักย์ (V)	พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5	พีเอช	7.3 ± 0.09	10.3 ± 0.18	6.1 ± 0.10	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	126	8,333	0	-	-
	ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	138,982	116,916	119,496	12.40	2.26
	คลอไรด์ (mg/l)	83,807	70,866	72,421	11.95	2.27
	ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	377	260	3	99.32	0.21
	อัตราการไหล (l/min)	0.65	0.13	0.52	-	-
10	พีเอช	7.1 ± 0.03	11.5 ± 0.06	4.9 ± 0.11	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	194	9,814	0	-	-
	ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	137,165	98,052	79,042	43.35	2.67
	คลอไรด์ (mg/l)	83,418	59,426	48,207	42.50	1.80
	ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	383	208	10	98.96	0.01
	อัตราการไหล (l/min)	0.65	0.13	0.52	-	-

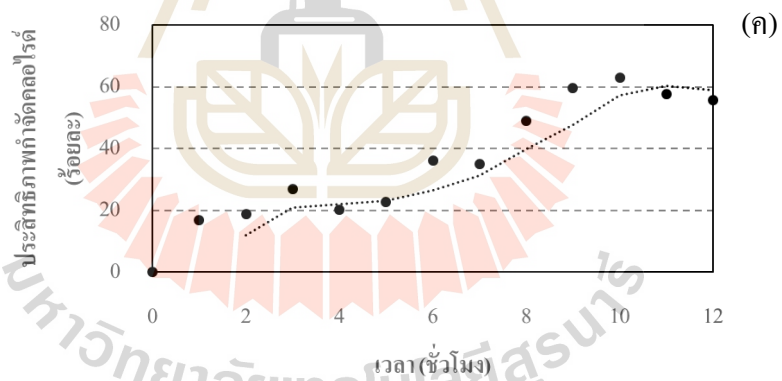
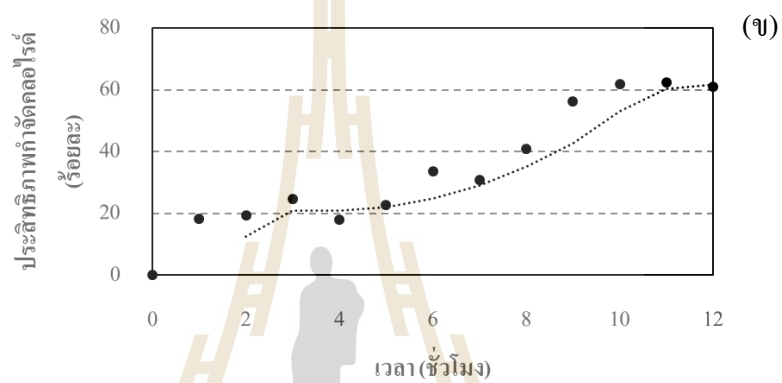
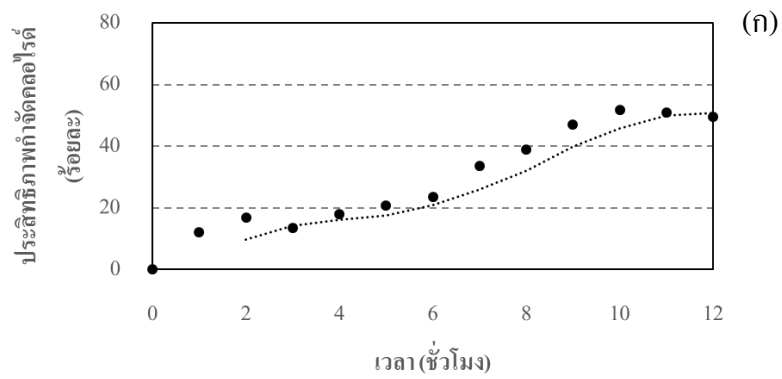
ตารางที่ 4.4 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนความต่างศักย์ (ต่อ)

ความต่าง ศักย์ (V)	พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
15	พีเอช	7.7 ± 0.08	12.2 ± 0.03	3.5 ± 0.04	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	194	8,888	0	-	-
	ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	135,994	86,279	81,873	37.19	3.77
	คลอไรด์ (mg/l)	82,196	50,169	49,614	37.03	3.77
	ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	377	285	18	95.01	0.00
	อัตราการไหล (l/min)	0.65	0.13	0.52	-	-
20	พีเอช	7.2 ± 0.05	11.5 ± 0.10	3.7 ± 0.06	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	191	8,148	0	-	-
	ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	136,920	80,656	81,863	39.10	3.24
	คลอไรด์ (mg/l)	82,752	48,688	49,614	38.93	3.25
	ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	377	283	8	97.42	0.52
	อัตราการไหล (l/min)	0.65	0.13	0.52	-	-

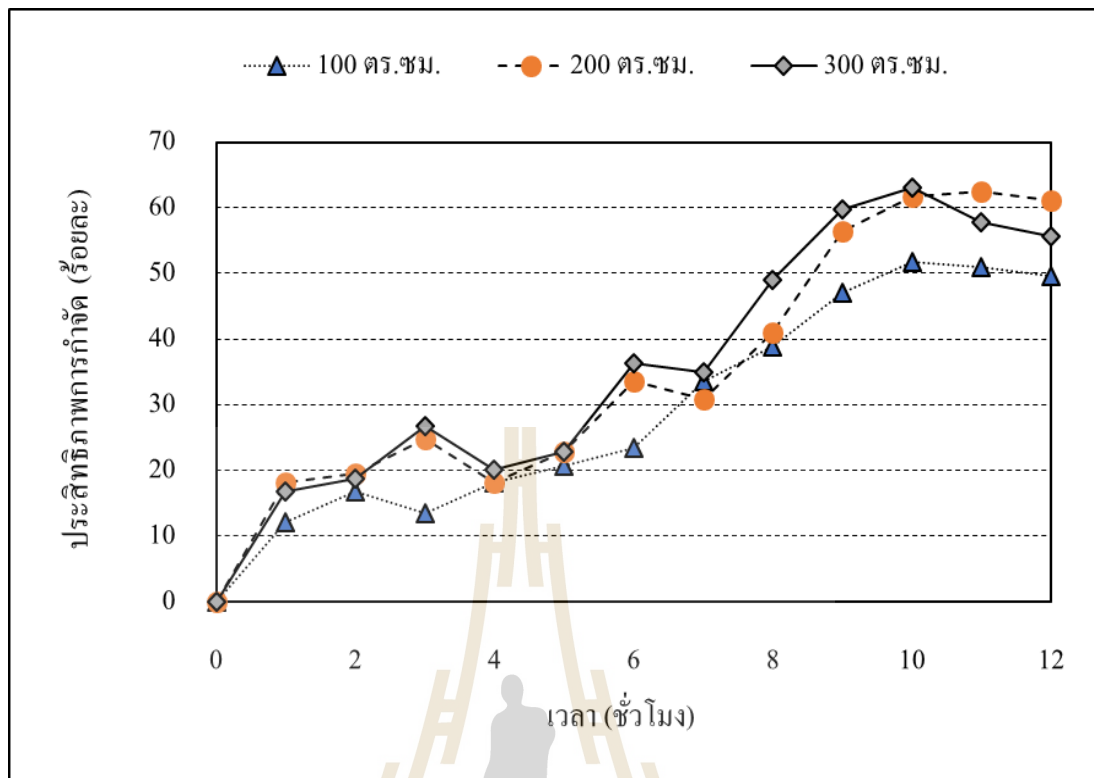
4.3.3 ผลกระทบของพื้นที่ผิวสัมผัส

การศึกษาผลกระทบของพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือโดยอาศัยกระแสไฟฟ้าเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนในน้ำเสียน้ำกับอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้าให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน จึงได้ทำการทดลองแปรเปลี่ยนพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นเป็น 100, 200 และ 300 ตร.ซม เพื่อศึกษาแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดจากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์กับพื้นที่ผิวสัมผัสพบว่าพื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตร.ซม มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด เมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving Average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่าการทดลองเข้าสู่สมดุลในเวลา 11 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอไรด์คือร้อยละ 61.74 ± 0.67 ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ 62.19 ± 0.67 ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ 98.14 ± 0.17 และเมื่อนำผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของทุกพื้นที่ผิวสัมผัสไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Tukey's Multiple Comparison test พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (α -value > 0.05) จึงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตร.ซม เป็นค่าที่เหมาะสมในการทดลองเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดกำจัดคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมดสูงสุดซึ่งมีแนวโน้มการกำจัดจากรูปที่ 4.8 และ 4.9 จากการศึกษา Younggy Kim et al. (2013) น้ำเสียน้ำมีความเค็มเข้มข้น 41,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้าต่อถังปฏิกิริยา คือ 500 ต่อ 1 ตร.ซม สามารถกำจัดความเค็มได้ร้อยละ 84 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้าต่อถังปฏิกิริยา คือ 1000 ต่อ 1 ตร.ซม ของการศึกษา Y. Qu et al. (2013) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความเค็มเหลือร้อยละ 55 ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้าต่อถังปฏิกิริยา เนื่องจากความต้านทานในระบบเพิ่มขึ้นจากจำนวนพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้าจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง ทำให้มีลักษณะของน้ำทิ้ง และน้ำเข้มข้น ตามตารางที่ 4.5 ซึ่งมีค่าพีเอชและค่าอัลคาไลน์นิตีแนวโน้มเช่นเดียวกับชุดทดลองการแปรเปลี่ยนความต่างศักย์และการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสเนื่องจากมีรูปแบบการไหลและการติดตั้งระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่เหมือนกัน

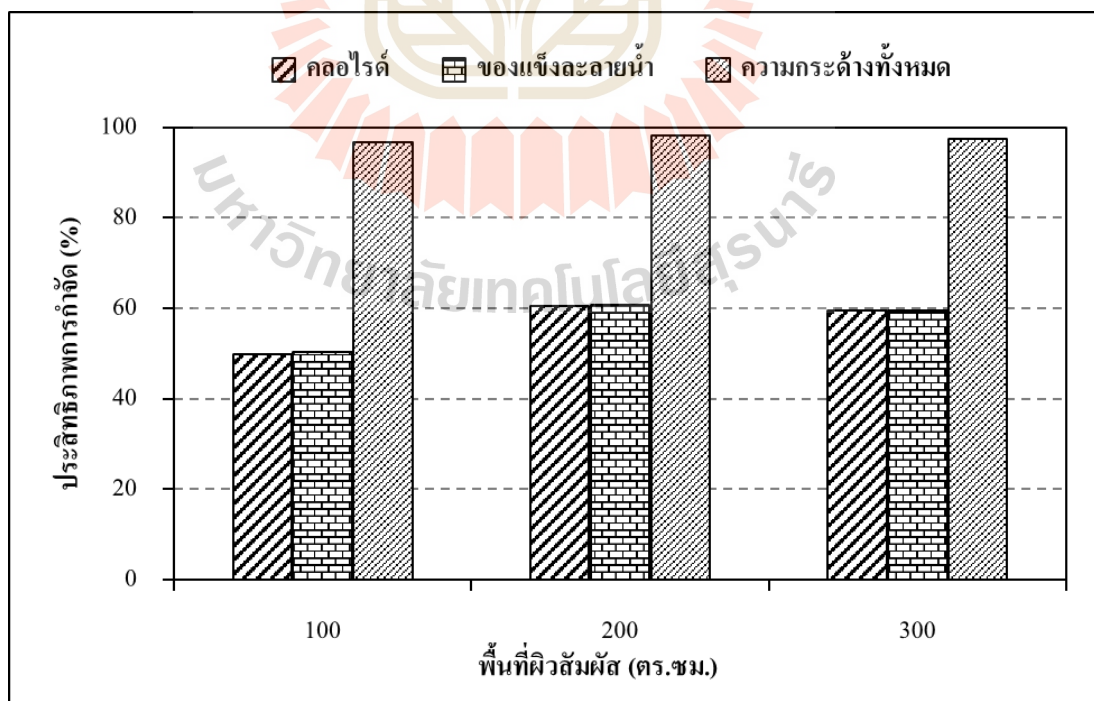
การออกแบบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินแนวทางในการเดินระบบที่มีความเหมาะสมของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์สำหรับน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินที่มีค่าความเค็มเข้มข้น 82,094 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 136,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้นซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่เหมาะสมคือ 200 ตร.ซม โดยน้ำเสียน้ำอัตราการไหล 0.65 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ที่พื้นที่ผิวสัมผัสต่างๆ (ก) 100 ตร.ซม. (ข) 200 ตร.ซม.
(ค) 300 ตร.ซม.



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์กับพื้นที่ผิวสัมผัส



รูปที่ 4.9 ผลกระทบของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 4.5 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนพื้นที่ผิวสัมผัส

พื้นที่ ผิวสัมผัส (cm ²)	พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
100	พีเอช	7.0 ± 0.01	12.2 ± 0.09	3.6 ± 0.07	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	138	7,500	0	-	-
	ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	136,46	83,390	66,862	50.40	2.23
	คลอไรด์ (mg/l)	82,705	50,539	41,098	49.83	2.08
	ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	380	258	12	96.63	0.17
	อัตราการไหล (l/min)	0.65	0.13	0.52	-	-
200	พีเอช	7.1 ± 0.01	12.2 ± 0.02	3.5 ± 0.02	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	133	7,083	0	-	-
	ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	136,464	73,310	51,933	62.19	0.91
	คลอไรด์ (mg/l)	82,705	44,430	31,656	61.74	0.67
	ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	380	280	6	98.14	0.17
	อัตราการไหล (l/min)	0.65	0.13	0.52	-	-

ตารางที่ 4.5 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนพื้นที่ผิวสัมผัส (ต่อ)

พื้นที่ ผิวสัมผัส (cm ²)	พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
300	พีเอช	7.1 ± 0.00	12.3 ± 0.06	3.5 ± 0.04	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	133	7,916	0	-	-
	ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	136,844	77,434	58,606	59.59	3.15
	คลอไรด์ (mg/l)	82,705	46,929	35,822	59.60	3.15
	ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	380	278	6	97.51	0.85
	อัตราการไหล (l/min)	0.65	0.13	0.52	-	-

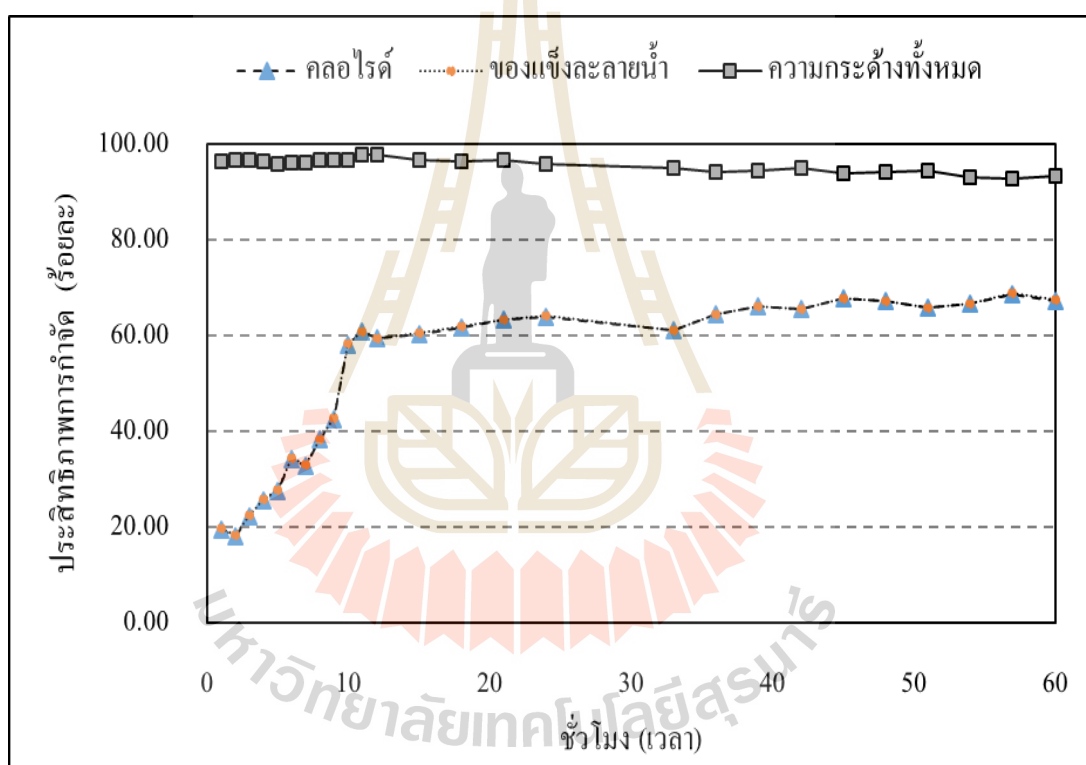
4.3.4 ผลกระทบของรูปแบบการไหลในถังปฏิริยาต่อประสิทธิภาพของระบบ

การศึกษาผลกระทบของรูปแบบการเดินระบบที่สภาวะที่เหมาะสม คือ ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที พื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตารางเซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ โดยกลไกการไหลแบบที่ 1 ดังรูปที่ 3.2 เดินระบบเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง มีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัด จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดพบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอรีนคือร้อยละ 61.74 ± 0.67 ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ 62.19 ± 0.67 ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ 98.14 ± 0.17 ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 2.68 KWh/m^3 โดยมีปริมาณน้ำทิ้งเป็นร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำเสียที่เข้าบำบัดและเกิดน้ำทิ้งฝั่งชั่วคราวเป็นร้อยละ 20 ของปริมาณน้ำเสีย ซึ่งมีความเข้มข้นค่าของแข็งละลายน้ำและค่าคลอรีนสูง ดังตารางที่ 4.5 เมื่อปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ

จากการศึกษาผลกระทบของรูปแบบการไหลแบบที่ 2 ที่สภาวะที่เหมาะสมเช่นกัน โดยมีการติดตั้งระบบดังรูปที่ 3.3 เมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving Average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่าการทดลองเข้าสู่สมดุลในเวลา 12 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอรีนคือร้อยละ 67.55 ± 1.02 ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ 67.63 ± 1.05 ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ 97.56 ± 0.68 ซึ่งมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดดังรูปที่ 4.10 จากรูปแบบระบบการติดตั้งระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบที่ 2 พบว่าเมื่อน้ำเสียเข้าระบบทางช่องกลางทำให้ไอออนในน้ำเสียเคลื่อนตัวผ่านเยื่อกรองเลือกผ่านประจุและน้ำทิ้งไหลออกทางด้านบนของระบบถึงปฏิริยาเป็นน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีปริมาณน้ำทิ้งเป็นร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำเสียที่เข้าบำบัด ซึ่งมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.04 และค่าอัลคาไลน์นิตีเฉลี่ยเท่ากับ 76 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร และได้นำน้ำทิ้งกลับมาหมุนเวียนในถังปฏิริยาโดยไหลเข้าช่องแอโนดและแคโทดร้อยละ 10 และนำมารวมกับน้ำเสียอีกร้อยละ 80 จึงทำให้น้ำออกทางช่องแอโนดมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 2.55 เนื่องจากน้ำเสียมีความเค็มลดลงแต่มีความกรดเพิ่มขึ้นจากปฏิริยารีดักชันทำให้เกิดก๊าซคลอรีนและกรดไฮโดรคลอริก ส่วนน้ำออกทางช่องแคโทดมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 12.2 และค่าอัลคาไลน์นิตีเฉลี่ยเท่ากับ 7,708 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร เนื่องจากมีความเป็นด่างเพิ่มขึ้นจากปฏิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยลักษณะน้ำเข้าและออกของรูปแบบการเดินระบบแบบใหม่แสดงดังตารางที่ 4.6 และใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 2.67 KWh/m^3

จากการศึกษาผลกระทบของรูปแบบการไหลในถังปฏิริยาทั้ง 2 แบบ พบว่ารูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำและคลอรีนสูงกว่าแบบที่ 1 และมีปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากระบบเท่ากันคือร้อยละ 20 ของน้ำเสียเข้าระบบบำบัดแต่รูปแบบ

การไหลแบบที่ 2 สามารถแยกชนิดน้ำเสียได้ชัดเจนกว่ารูปแบบการไหลแบบที่ 1 เนื่องจากกลไกการไหลเวียนของน้ำทั้งในระบบดังรูปที่ 3.3 ทำให้น้ำเสียฝั่งซ้ายแอโนดเกิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกส่วนบริเวณฝั่งขวาแคโทดเกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อในภาคอุตสาหกรรมได้และง่ายต่อการกำจัด รูปแบบการไหลทั้งสองใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกันแต่รูปแบบที่ 2 ใช้เวลาในการเดินระบบนานกว่ารูปแบบที่ 1 จึงได้เลือกรูปแบบการไหลแบบที่ 2 ในการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่องเป็นระยะ 7 วัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำ ความกระด้างทั้งหมด และความเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 4.6 ลักษณะน้ำเข้าและออกของรูปแบบการเดินระบบแบบที่ 2

พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น ชีวแคโทด	น้ำเข้มข้น ชีวแอโนด	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
พีเอช	7.12 ± 0.02	12.29 ± 0.04	2.55 ± 0.57	7.04 ± 0.04	-	-
อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	134.98	7,708.33	0.00	76.91	-	-
ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	136,887.05	82,672.62	67,812.45	48,931.22	67.63	1.05
คลอไรด์ (mg/l)	82,731.55	29,088.20	26,693.11	29,643.59	67.55	1.02
ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	379.14	302.08	18.82	19.31	97.56	0.68
อัตราการไหล (l/min)	0.65	0.065	0.065	0.52	-	-

4.3.5 การประเมินปัจจัยการเดินระบบที่มีความเหมาะสม

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่สภาวะที่เหมาะสม คือ ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที พื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตารางเซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ โดยทำการเปรียบเทียบรูปแบบการไหลแบบที่ 1 และรูปแบบการไหลแบบที่ 2 ซึ่งการติดตั้งระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ทั้งสองแสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 พบว่ารูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่ารูปแบบที่ 1 มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอรีนคือร้อยละ 67.55 ± 1.02 ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ 67.63 ± 1.05 ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ 97.56 ± 0.68 ซึ่งมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดดังรูปที่ 4.10 โดยรูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีปริมาณน้ำที่น้อยกว่ารูปแบบที่ 1 เนื่องจากได้นำน้ำที่กลับมาหมุนเวียนในทั้งปฏิกิริยาโดยไหลเข้าช่องแอโนดและแคโทดช่องร้อยละ 10 และนำมาพร้อมกับน้ำเสียอีกร้อยละ 80 จึงทำให้ผลพลอยได้ที่เกิดจากปฏิกิริยาแบ่งเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ชัดเจน การศึกษานี้ได้ประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการศึกษาชุดการทดลองทั้ง 13 ชุด โดยคิดต่อ 1 ลบ.ม. น้ำเสีย พบว่าพลังงานที่ใช้ทั้งหมดและค่าไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับระยะเวลาสัมผัส ความต่างศักย์ และพื้นที่ผิวสัมผัส การประเมินค่าไฟฟ้าเบื้องต้นสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะแบ่งเป็น 2 ส่วน นั่นคือ 1. ค่าไฟฟ้าพื้นฐาน ซึ่งประกอบด้วย ค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าบริการ ส่วนที่ 2 คือ ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7% ซึ่งการประเมินค่าไฟฟ้าเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 4.7 เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบสามารถบำบัดน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร โดยตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข. แสดงรายการคำนวณค่าไฟฟ้าเบื้องต้น (Y.-M. Chao, T.M. Liang et al., 2008 ; การไฟฟ้านครหลวง 2563) จากการคำนวณค่าไฟฟ้าพบว่าที่สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของรูปแบบการไหลแบบที่ 1 คือชุดการทดลองที่ 10 ใช้พลังงานในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลบ.ม. เท่ากับ 0.36 kWh/m^3 ประเมินเป็นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 41 บาท และรูปแบบการไหลแบบที่ 2 คือชุดการทดลองที่ 12 ใช้พลังงานในการบำบัดน้ำเสียและค่าไฟฟ้าเท่ากับชุดการทดลองที่ 10 แต่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าจึงเลือกการใช้รูปแบบการไหลแบบที่ 2 ในการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 7 วัน

ตารางที่ 4.7 ประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้า

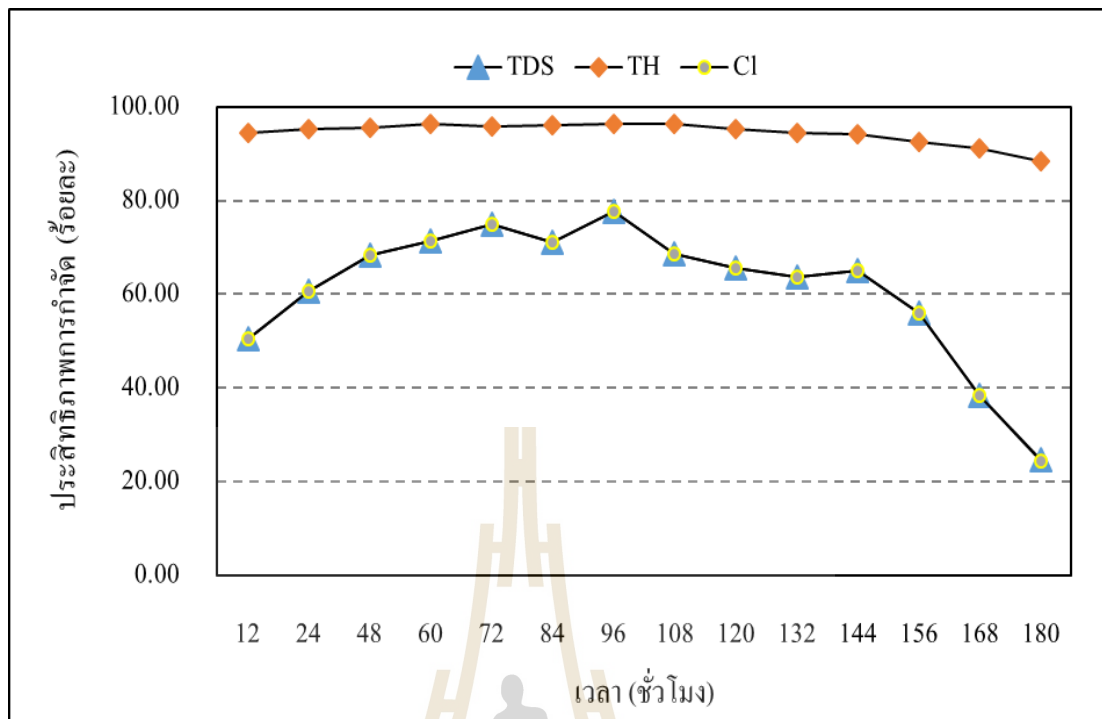
ชุดการทดลอง ที่	รูปแบบการไหล	ค่าการใช้พลังงาน (KWh/m ³)	ค่าไฟฟ้า (บาท/ลบ.ม)
1	แบบที่ 1	0.09	41
2		0.12	41
3		0.17	41
4		0.20	41
5		0.02	41
6		0.14	41
7		0.42	41
8		0.90	42
9		0.25	41
10		0.36	41
11		0.40	41
12	แบบที่ 2	0.36	41
13	แบบที่ 2 ต่อเนื่อง 7 วัน	0.23	41

4.4 การเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง

4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ

การศึกษาระบบแบบต่อเนื่องด้วยสถานะที่เหมาะสมคือความต่างศักย์ 10 โวลต์ ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที และพื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตร.ซม. เป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำ ความกระด้างทั้งหมด และความเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving Average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่าการทดลองเข้าสู่สมดุลในเวลา 60 ถึง 96 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอไรด์คือร้อยละ 74.45 ± 4.78 ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ 74.39 ± 4.79 ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ 96.31 ± 0.21 ซึ่งมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดดังรูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด จากกราฟมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดลดลงช่วงเวลาที่ 144

ชั่วโมงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าภายในระบบลดลงจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าลดลงและเกิดการอิมพัลส์ของไอออนภายในระบบเนื่องจากน้ำเสียในช่องแอคโนดมีความเป็นกรดเนื่องจากเกิดสารละลายกรดไฮดรอกซิดริกเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงอยู่ที่ 1.7 ส่วนช่องแคโทดมีความเป็นเบสสูงเนื่องจากเกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้มีแนวโน้มค่าพีเอชสูงขึ้นอยู่ที่ 13.8 จากเดิมน้ำเสียดังเคราะห์มีค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ที่ 7.54 ± 0.07 ตามตารางที่ 4.8 ลักษณะน้ำเข้าและออกของการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มลดลง (A. Campione et al. 2018) จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าสามารถกำจัดคลอรีนได้ร้อยละ 98 โดยความเข้มข้นคลอรีนเริ่มต้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสถานะความต่างศักย์ไฟฟ้า 9 โวลต์ มีอุณหภูมิ $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (M. Sadrzadeh et al. 2008) และในสถานะค่าความต่างศักย์ 15 โวลต์ สามารถกำจัดค่าของแข็งละลายได้ร้อยละ 62.2 (Jie Liu et al. 2016) โดยน้ำเสียมีความเข้มข้นคลอรีนเท่ากับ 33,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 66,800 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาสัมผัส ซึ่งเป็นระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนในสารละลายกับอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วทั้งสองในระยะเวลาสัมผัสที่ 20 นาที สามารถกำจัดโซเดียมคลอรีนได้ร้อยละ 98.3 (Wei Tan et al. 2016) จากน้ำเกลือเข้มข้น 33,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อระยะเวลาสัมผัสมากเกินไปอาจทำให้การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้ามากเกินไปจนเกิดการกัดกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 4.8 ลักษณะน้ำเข้าและออกของการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง

พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น ขั้วแคโทด	น้ำเข้มข้น ขั้วแอโนด	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
พีเอช	7.5 ± 0.04	13.4 ± 0.18	1.7 ± 0.13	7.5 ± 0.23	-	-
อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO ₃)	147	7,291	0	170	-	-
ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	136,556	63,760	39,020	41,253	74.39	4.79
คลอไรด์ (mg/l)	82,533	24,783	23,638	24,992	74.45	4.78
ความกระด้างทั้งหมด (mg/l)	376	318	16	16	96.31	0.21
อัตราการไหล (l/min)	0.65	0.065	0.065	0.52	-	-

4.4.2 สัณฐานวิทยา

การศึกษาระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) เพื่อบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการล้างพื้นฟูสภาพเรซิน น้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินโดยมีค่าความเค็มเท่ากับ 82,094 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 136,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความกระด้างเท่ากับ 374 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด ประกอบด้วยแผ่นไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนดทำหน้าที่เป็นขั้วบวก และแผ่นแกรไฟต์เป็นขั้วแคโทดทำหน้าที่เป็นขั้วลบ การศึกษานี้มีกระแสไหลภายในระบบเฉลี่ย 6.56 ± 2.12 โดยใช้เวลาในการเดินระบบ 7 วัน ตรวจสอบสัณฐานวิทยาขั้วไฟฟ้าโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) จากศึกษาพบว่าเมื่อเริ่มทำการทดลองโดยจ่ายความต่างศักย์ 10 โวลต์ เข้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันในการบำบัดน้ำเสียดังสมการที่ 4-1 ถึง 4-4 เมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้นนำขั้วไฟฟ้าตรวจสอบสัณฐานวิทยาพบว่าบริเวณขั้วแอโนดมีคราบตะกอนเกาะอยู่บริเวณขั้วแกรไฟต์ซึ่งต่างจากภาพก่อนเริ่มทำการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12 และภาพถ่ายหลังทำการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13 สังเกตได้ว่ามีตะกอนสีขาวมาเกาะกระจายบริเวณแผ่นขั้วแกรไฟต์เนื่องการแช่อยู่ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูงจึงทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบเป็นรูเข็ม (Pitting) เป็นรูลักษณะเล็กเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณผิวหน้าขั้วแกรไฟต์ทำให้เกิดรูพรุนทำให้คลอไรด์ไอออนเข้ามาอุดและเกาะภายในหลุมของขั้วแกรไฟต์ซึ่งภายในหลุมมีไฮโดรเจนไอออนจึงรวมตัวกับคลอไรด์ไอออนจึงเกิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกทำให้ค่าพีเอชภายในหลุมเหลือเพียง 2-3 ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนต่อเนื่องอย่างรุนแรง (McCafferty E. et al. 2009) บริเวณผิวขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยามีนตะกอนเกาะเป็นผงเล็กเล็กๆ ส่วนแผ่นไทเทเนียมมีค่าความสามารถในการให้อิเล็กตรอนสูงกว่าแกรไฟต์ซึ่งพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามตารางที่ 2.11 จึงทำให้เกิดการผุกร่อนของโลหะมากกว่าแกรไฟต์ดูจากรูปที่ 4.15 เป็นการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic Corrosion) โดยอิเล็กตรอนขั้วไทเทเนียมวัดดูทั้งสองสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับน้ำเสียได้ดีกว่าขั้วแกรไฟต์จึงผุกร่อนมากกว่า ซึ่งทำให้เกิดความต้านทานภายในขั้วไฟฟ้าสูงขึ้นจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของระบบมีแนวโน้มลดลง (Gabrielli C. et al. 2006)

ที่ขั้วแคโทด (ขั้วลบ) : Oxidation ให้อิเล็กตรอนกับสารละลาย



ที่ขั้วแอโนด (ขั้วบวก) : reduction รับอิเล็กตรอนจากสารละลาย





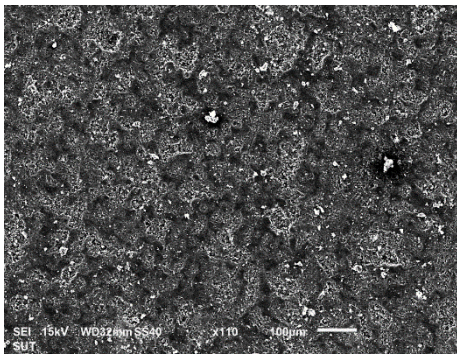
จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของไฟฟ้าได้วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เกาะติดบริเวณผิวขั้วไฟฟ้า เพื่อยืนยันการเกิดคราบตะกอนเกาะติดบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเกลือลดลงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับไอออนลดลงโดยใช้วิธีวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของขั้วไฟฟ้าผิวก่อนและหลังทำปฏิกิริยาดังตารางที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าขั้วแกรไฟต์มีปริมาณคาร์บอนลดลงแต่มีคลอไรด์เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่เกิดบริเวณขั้วแกรไฟต์ ส่วนขั้วไทเทเนียมมีปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมเพิ่มขึ้นเกิดจากความกระด้างในน้ำเสียมาทำปฏิกิริยาที่ขั้วไทเทเนียม จึงเกาะติดเป็นตะกอนทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเกลือลดลง และมีปริมาณธาตุไทเทเนียมลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ที่กล่าวข้างต้น

ตารางที่ 4.9 วิเคราะห์ปริมาณธาตุของขั้วไฟฟ้าผิวก่อนทำปฏิกิริยา

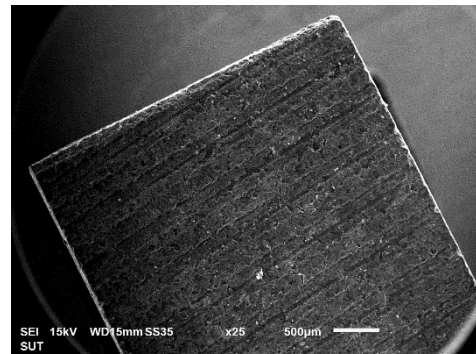
ขั้วไฟฟ้า	ธาตุ	น้ำหนัก (ร้อยละ)	อะตอม (ร้อยละ)
แกรไฟต์	C	100	100
ไทเทเนียม ผิวหน้า	O	34.25	64.67
	Na	1.90	2.50
	Al	3.55	3.98
	P	2.17	2.11
	Cl	1.46	1.24
	Ca	1.45	1.09
	Ti	57.33	36.15
	V	3.35	1.99
ไทเทเนียม ผิวข้าง	O	22.39	25.00
	Na	4.09	7.10
	Al	4.63	6.85
	P	4.26	5.49
	Cl	3.73	4.20
	Ca	3.65	3.64
	Ti	57.25	47.72

ตารางที่ 4.10 วิเคราะห์ปริมาณธาตุของขี้ไฟฟ้าผิวหลังทำปฏิกิริยา

ขี้ไฟฟ้า	ธาตุ	น้ำหนัก (ร้อยละ)	อะตอม (ร้อยละ)
แกรไฟต์ ผิวหน้า	C	74.49	84.90
	O	8.32	7.12
	Na	6.40	3.81
	Cl	10.79	4.17
แกรไฟต์ผิวข้าง	C	70.58	81.49
	O	10.48	9.13
	Na	7.20	4.36
	Cl	11.74	4.62
ไทเทเนียม ผิวหน้า	C	12.05	19.61
	O	50.16	61.29
	Mg	7.20	5.79
	Ca	12.37	6.04
	Ti	15.41	6.29
	Fe	2.80	0.98
	Ti	57.33	36.15
	V	-	-
ไทเทเนียม ผิวข้าง	ไม่พบธาตุ		

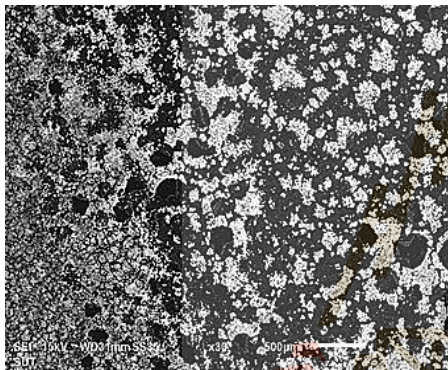


(ก)

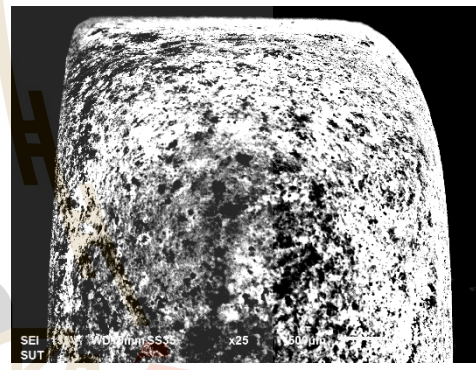


(ข)

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายขั้วแกรไฟต์ก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM (ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน
(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน

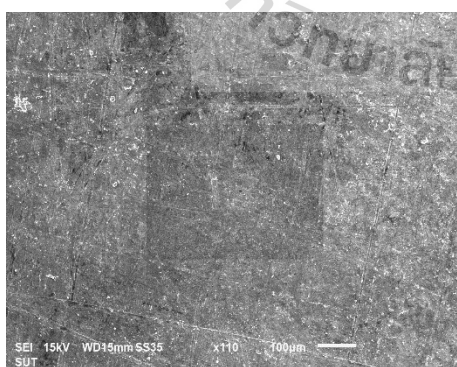


(ก)

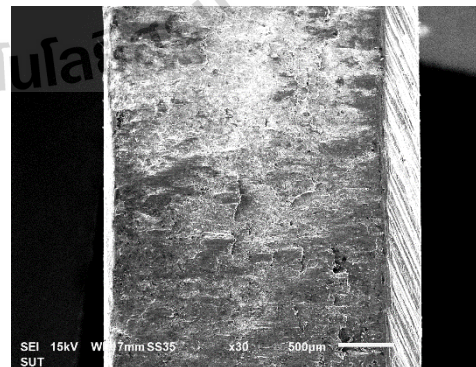


(ข)

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายขั้วแกรไฟต์หลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM (ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน
(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน

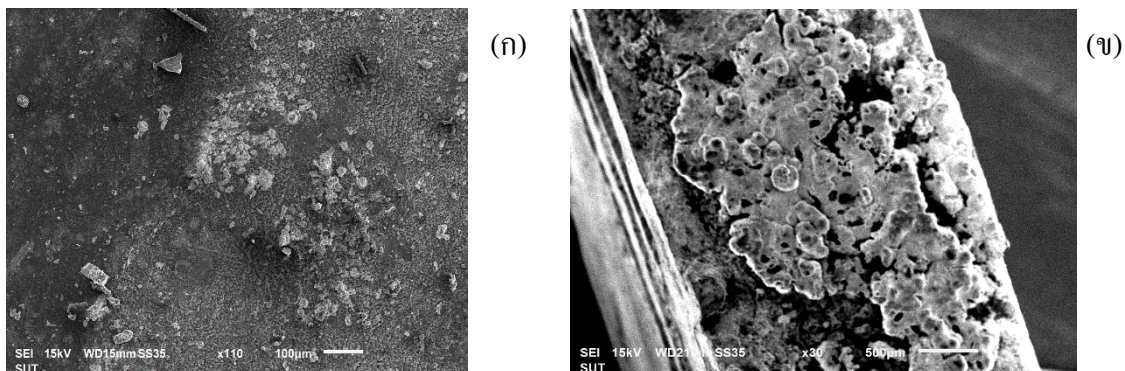


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายขั้วไทเทเนียมก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM (ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน
(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน



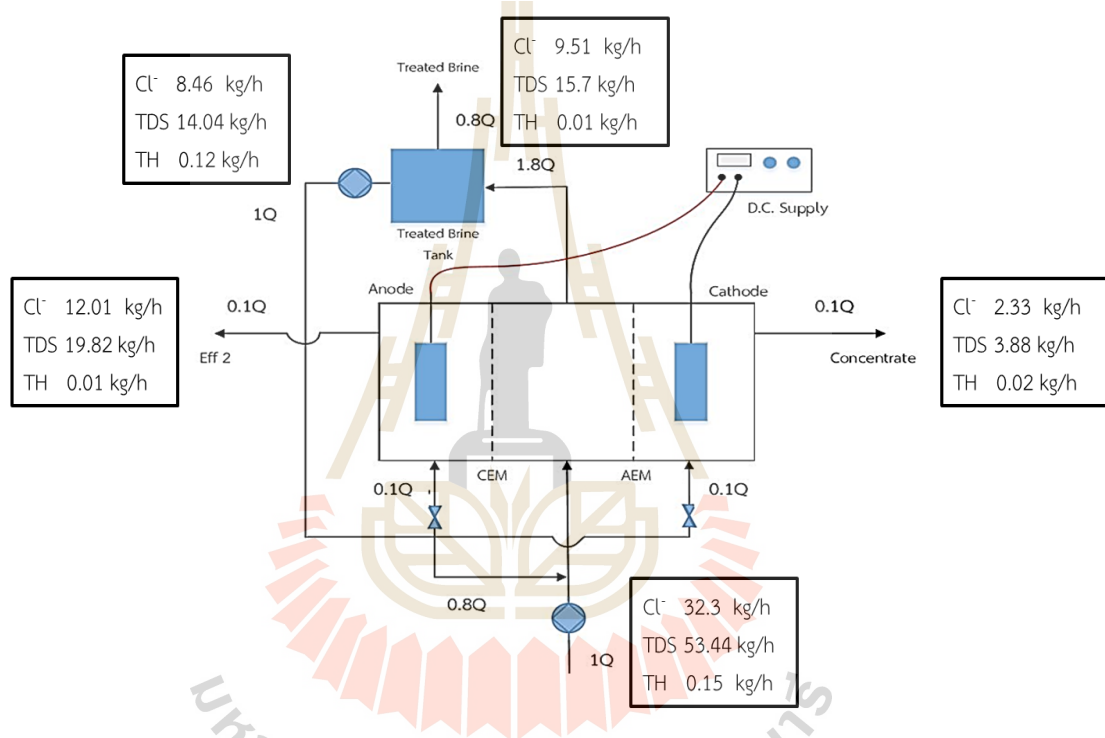
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายขั้วไทเทเนียมหลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM (ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน
(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน

4.4.3 การศึกษากลไกการบำบัดของระบบด้วยสมดุลมวล

ผลการศึกษาการประเมินสมดุลของการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่องดังตารางที่ 4.8 พบว่าระบบมีปริมาณคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำและความกระด้างทั้งหมดหายไปจากระบบบำบัดซึ่งเกิดจากกลไกการกำจัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าจึงทำให้คลอไรด์น้ำทิ้งมีปริมาณลดลงและบางส่วนกลายเป็นก๊าซคลอรีนจำนวนหนึ่งจากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแอโนด เมื่อก๊าซคลอรีนอยู่ในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้กรดไฮโปคลอรัส และกรดไฮโดรคลอริก โดยทำการศึกษาปริมาณคลอรีนอิสระที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดแสดงดังตารางที่ ข.3 ในภาคผนวก ข ซึ่งมีปริมาณคลอรีนอิสระอยู่ในช่วง 40 – 566 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่ากระบวนการบำบัดเกิดก๊าซคลอรีนได้จริงดังสมการที่ 4-3 การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแอโนดเนื่องจากเมื่อก๊าซคลอรีนละลายลงในน้ำจะเปลี่ยนรูปเป็นคลอรีนอิสระส่วนความกระด้างทั้งหมดที่หายไปเกิดจากผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากพีเอชในช่องแคโทดสูงกว่า 10 จึงทำให้เกิดผลึกในถังปฏิกิริยา และบางส่วนไปเกาะที่ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดคราบตะกอนของแคลเซียมและแมกนีเซียมได้เช่นกัน จึงทำให้ของแข็งละลายน้ำในระบบลดลงด้วยเช่นกัน โดยประเมินกลไกการบำบัดของระบบแบบต่อเนื่องด้วยสมดุลมวลดังรูปที่ 4.16 พบว่ามีคลอไรด์หายไปจากระบบ 8.4 kg/hr กลายเป็นก๊าซคลอรีน และความกระด้างทั้งหมดหายไป 0.12 kg/hr มาเกาะติดบริเวณขั้วไทเทเนียมซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลฐานฐานวิทยาข้างต้น

ตารางที่ 4.11 ประเมินสมดุลมวล

พารามิเตอร์ (kg/hr)	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเข้มข้น ขั้วแอโนด	น้ำเข้มข้นขั้ว แคโทด
คลอไรด์	32.30	9.51	12.01	2.33
ของแข็งละลายน้ำ	53.44	15.70	19.82	3.88
ความกระด้างทั้งหมด	0.15	0.01	0.01	0.02



รูปที่ 4.16 ประเมินกลไกการบำบัดของระบบแบบต่อเนื่องด้วยสมดุลมวล

4.4.4 ผลพลอยได้

ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์มีผลพลอยได้ที่เกิดจากการบำบัด คือ ก๊าซคลอรีน ก๊าซไฮโดรเจน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังสมการที่ 4-7 สามารถนำผลพลอยได้ทั้งหมดกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมได้ โดยสามารถนำก๊าซคลอรีนมาเชื้อโรคในระบบประปา ก๊าซไฮโดรเจนเป็นพลังงานหมุนเวียนในโรงงานอุตสาหกรรม และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ในการปรับพีเอช สามารถลดต้นทุนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป ซึ่งจากการศึกษาพบปริมาณก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นระบบคือ 8.45

kg/hr จากการวิเคราะห์สมดุลมวลของระบบตามตารางที่ 4.9 และทางทฤษฎีสมการออกซิเดชันรีดักชันของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ได้นำก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นละลายลงในน้ำเพื่อวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เกิดขึ้นเพื่อยืนยันการเกิดก๊าซคลอรีนในระบบโดยพบค่าคลอรีนอิสระแสดงดังตารางที่ ข.3 ในภาคผนวก ข ส่วนก๊าซไฮโดรเจนได้ทำการเก็บและวิเคราะห์ปริมาณโดยใช้เครื่องมือเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) พบว่ามีปริมาณร้อยละ 100 ของน้ำหนักก๊าซต่อปริมาตร และมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นจากระบบโดยไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นที่บริเวณแคโทดรวมกับโซเดียมไอออนเกิดเป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงพิจารณาจากค่าพีเอชพบว่าน้ำเสียทางช่องแคโทดมีค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ที่ 12.9 จึงยืนยันได้ว่าเกิดสารละลายไฮดรอกไซด์จริง

สมการรวมการเกิดปฏิกิริยา



ตารางที่ 4.12 วิเคราะห์ปริมาณก๊าซ

ก๊าซ	น้ำหนัก (ร้อยละ)	อะตอม (ร้อยละ)
H ₂	100	100

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและศึกษาความเป็นไปได้การใช้วิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน ซึ่งในการศึกษาในชุดการทดลองที่ 1 – 12 ชุดการทดลองแบบกะเดินระบบเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงต่อชุดการทดลอง จะทำการแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาสัมผัส และพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า เพื่อเลือกค่าการเดินระบบที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาความเป็นไปได้การใช้วิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์เดินระบบระยะยาว จากการศึกษาพบประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการเดินระบบ เซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยสรุปดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

5.1.1.1 ผลกระทบของการแปรเปลี่ยน

จากการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ทั้งชุดการทดลองที่ 1 – 12 ชุดการทดลอง พบสภาวะที่เหมาะสม คือ ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที พื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตารางเซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอรีนคือร้อยละ 67.55 ± 1.02 ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ 67.63 ± 1.05 ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ 97.56 ± 0.68 ทั้งนี้ประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัส พื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองถ้ามีพื้นที่ผิวสัมผัสมากสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากเช่นกัน แต่ระยะห่างระหว่างขั้วมากจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระแสไฟฟ้าถ้าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามักทำให้ประสิทธิภาพการไหลของกระแสไฟฟ้าลดลงเนื่องจากความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น และความต่างศักย์ส่งผลโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าถ้าความต่างศักย์สูงกระแสไฟฟ้าสูงเช่นกัน

5.1.1.2 ผลกระทบของรูปแบบการไหลในถังปฏิริยาต่อประสิทธิภาพของระบบ

จากการศึกษาผลกระทบของรูปแบบการไหลในถังปฏิริยาทั้ง 2 แบบ พบว่ารูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำและคลอรีนสูงกว่าแบบที่ 1 และมีปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากระบบเท่ากันคือร้อยละ 20 ของน้ำเสียเข้าระบบบำบัดแต่รูปแบบการไหลแบบที่ 2 สามารถแยกชนิดน้ำเสียได้ชัดเจนกว่ารูปแบบการไหลแบบที่ 1 เนื่องจากกลไกการไหลเวียนของน้ำทั้งในระบบดังรูปที่ 3.3 ทำให้น้ำเสียฝังขั้วแอนโอดเกิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกส่วนบริเวณฝังขั้วแคโทดเกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อในภาคอุตสาหกรรมได้และง่ายต่อการกำจัด รูปแบบการไหลทั้งสองใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกันแต่รูปแบบที่ 2 ใช้เวลาในการเดินระบบนานกว่ารูปแบบที่ 1 จึงได้เลือกรูปแบบการไหลแบบที่ 2 ในการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่องเป็นระยะ 7 วัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดคลอรีนของแข็งละลายน้ำ ความกระด้างทั้งหมด และความเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

5.1.1.3 การประเมินปัจจัยการเดินระบบที่มีความเหมาะสม

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่สภาวะที่เหมาะสม คือ ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที พื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตารางเซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ โดยทำการเปรียบเทียบรูปแบบการไหลแบบที่ 1 และรูปแบบการไหลแบบที่ 2 ซึ่งการติดตั้งระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ทั้งสองแสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 พบว่ารูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่ารูปแบบที่ 1 โดยรูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีปริมาณน้ำทิ้งน้อยกว่ารูปแบบที่ 1 เนื่องจากได้นำน้ำที่กลับมาหมุนเวียนในถังปฏิริยาโดยไหลเข้าช่องแอนโอดและแคโทดของร้อยละ 10 และนำมาพร้อมกับน้ำเสียอีกร้อยละ 80 จึงทำให้ผลพลอยได้ที่ได้จากปฏิริยาแบ่งเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ชัดเจนการศึกษานี้ได้ประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการศึกษาชุดการทดลองทั้ง 13 ชุด โดยคิดต่อ 1 ลบ.ม. น้ำเสีย พบว่าพลังงานที่ใช้ทั้งหมดและค่าไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับระยะเวลาสัมผัส ความต่างศักย์ และพื้นที่ผิวสัมผัส จากการคำนวณค่าไฟฟ้าพบว่าที่สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของรูปแบบการไหลแบบที่ 1 คือชุดการทดลองที่ 10 ใช้พลังงานในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลบ.ม. เท่ากับ 0.36 kWh/m^3 ประเมินเป็นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 41 บาท และรูปแบบการไหลแบบที่ 2 คือชุดการทดลองที่ 12 ใช้พลังงานในการบำบัดน้ำเสียและค่าไฟฟ้าเท่ากับชุดการทดลองที่ 10 แต่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าจึงเลือกการใช้รูปแบบการไหลแบบที่ 2 ในการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 7 วัน

5.1.2 ผลการศึกษาความเป็นไปได้การใช้วิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์

5.1.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ

จากการศึกษาความเป็นไปได้การใช้วิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยสถานะที่เหมาะสมคือความต่างศักย์ 10 โวลต์ ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที และพื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตร.ซม. เป็นระยะเวลา 7 วัน เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอไรด์คือร้อยละ 74.45 ± 4.78 ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ 74.39 ± 4.79 ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ 96.31 ± 0.21 เมื่อเข้าสู่ช่วงเวลาที่ 144 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าภายในระบบลดลงจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าลดลงและเกิดการอิมตัวของไอออนและขั้วไฟฟ้าเกิดการผุกร่อนจากการใช้งานเป็นระยะเวลานานจึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในระบบลดลงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด

5.1.2.2 สันฐานวิทยา

การศึกษาสันฐานวิทยาพบว่าบริเวณขั้วแอโนดมีคราบตะกอนเกาะอยู่บริเวณขั้วแกรไฟต์ซึ่งต่างจากภาพก่อนเริ่มทำการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 สังเกตได้ว่ามีตะกอนสีขาวมาเกาะกระจายบริเวณแผ่นขั้วแกรไฟต์เนื่องการเชื่อมอยู่ในน้ำเสียที่มีขบวนการเข้มข้นคลอไรด์สูงจึงทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting) เป็นรูลักษณะเล็กเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณผิวหน้าขั้วแกรไฟต์ทำให้เกิดรูพรุนทำให้โซเดียมไอออนเข้ามาอุดและเกาะในบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาจนเป็นตะกอนเกาะบริเวณขั้วแกรไฟต์ ส่วนแผ่นไทเทเนียมมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนสูงกว่าแกรไฟต์ซึ่งพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามตารางที่ 2.11 จึงทำให้เกิดการผุกร่อนของโลหะมากกว่าแกรไฟต์ดูจากรูปที่ 4.10 (ก) เป็นการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic Corrosion) โดยอิเล็กตรอนขั้วไทเทเนียมวัตถุทั้งสองสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับน้ำเสียได้ดีกว่าขั้วแกรไฟต์จึงผุกร่อนมากกว่า ซึ่งทำให้เกิดความต้านทานภายในขั้วไฟฟ้าสูงขึ้นจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของระบบมีแนวโน้มลดลง

5.1.2.3 การศึกษากลไกการบำบัดของระบบด้วยสมดุลมวล

ผลการศึกษาการประเมินสมดุลของการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่องดังตารางที่ 4.6 พบว่าระบบมีปริมาณคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำและความกระด้างทั้งหมดหายไปจากระบบบำบัดซึ่งเกิดจากกลไกการกำจัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าจึงทำให้คลอไรด์น้ำทิ้งมีปริมาณลดลงและบางส่วนกลายเป็นก๊าซคลอรีนจำนวนหนึ่งจากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแอโนด เมื่อก๊าซคลอรีนอยู่ในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้กรดไฮโปคลอรัส และกรดไฮโดรคลอริก โดยทำการศึกษาปริมาณคลอรีนอิสระที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดแสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่ามี

ปริมาณคลอรีนอิสระอยู่ในช่วง 40 – 566 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่ากระบวนการบำบัดเกิดก๊าซคลอรีนได้จริงดังสมการที่ 4-5 การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแอโนดเนื่องจากเมื่อก๊าซคลอรีนละลายลงในน้ำจะเปลี่ยนรูปเป็นคลอรีนอิสระส่วนความกระด้างทั้งหมดที่หายไปเกิดจากผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากพีเอชในช่องแคโทดสูงกว่า 10 จึงทำให้เกิดผลึกในถังปฏิกิริยา และบางส่วนไปเกาะที่ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดคราบตะกรันของแคลเซียมและแมกนีเซียมได้เช่นกัน จึงทำให้ของแข็งละลายน้ำในระบบลดลงด้วยเช่นกัน

5.1.2.4 ผลพลอยได้

ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์มีผลพลอยได้ที่เกิดจากการบำบัด คือ ก๊าซคลอรีน ก๊าซไฮโดรเจน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังสมการที่ 4-7 สามารถนำผลพลอยได้ทั้งตัวกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมได้ ซึ่งปริมาณก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นระบบคือ 8.45 kg/hr จากการประเมินสมดุลของการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ และทฤษฎีสมการออกซิเดชันรีดักชันของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และได้นำก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นละลายลงในน้ำและวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เกิดขึ้นเพื่อยืนยันการเกิดก๊าซคลอรีนในระบบ โดยมีค่าคลอรีนอิสระแสดงดังตารางที่ 4.7 ส่วนก๊าซไฮโดรเจนได้ทำการเก็บและวิเคราะห์ปริมาณโดยใช้เครื่องมือเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) พบว่ามีปริมาณร้อยละ 100 ของน้ำหนักก๊าซต่อปริมาตร และมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นจากระบบโดยไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นที่บริเวณแคโทดรวมกับโซเดียมไอออนเกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงพิจารณาจากค่าพีเอชพบว่าน้ำเสียทางช่องแคโทดมีค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ที่ 12.9 จึงยืนยันได้ว่าเกิดสารละลายไฮดรอกไซด์จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 การศึกษาระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ควรมีการติดตั้งเครื่องวัดอัตราการเกิดก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจนเพื่อประเมินอัตราการเกิดก๊าซนำสู่การนำไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรม
- 5.2.2 การศึกษาการทำความเข้าใจของผลพลอยได้ที่เกิดจากระบบบำบัด ซึ่งประกอบด้วย สารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 5.2.3 การเพิ่มขนาดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควรมีขนาดใหญ่มากกว่า 30 แอมแปร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคลอรีนเนื่องจากน้ำเสียมีความเข้มข้นคลอรีนสูงจึงทำให้ปริมาณไอออนในระบบสูงเช่นกันเมื่อเพิ่มความต่างศักย์มากขึ้นทำให้กระแสไหลเข้าระบบมากขึ้นเช่นกัน
- 5.2.4 ควรศึกษาการนำน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินร่วมกับน้ำเสียจากกระบวนการชะล้างน้ำเกลือมาบำบัดด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์อาจมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงและไม่จำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้ามากกว่างานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2540) รายงานการจัดการคุณภาพน้ำและจัดทำแผนปฏิบัติการในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
- เกศสุชา พูลคำ. (2537) การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขานอ้อยและผักตบชวา : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กลุ่มงานเคมี ส่วนวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์ สำนักวิจัยและพัฒนา. (2550). คู่มือการปฏิบัติงาน การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ : สำนักพิมพ์กรมชลประทาน. 152 หน้า.
- ชาติชาย ชัยตระกูล. (2548) การศึกษาประสิทธิภาพของถังบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 79 หน้า.
- สำนักนโยบายสาธารณะ สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2547) โครงการศึกษา การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของชาติอย่างมีประสิทธิภาพ และการจัดการ 25 ลุ่มน้ำสำคัญของประเทศ
- บริษัท ซีเอ็มเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด. โครงการศึกษาเพื่อประเมินปริมาณสารมลพิษอุตสาหกรรมทางน้ำจากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย
- ณรงค์ศักดิ์ ขุนรักษา และเสาวรักษ์ เพ็ญสวัสดิ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2552) วิชาเคมีในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ตามหนังสือสาระการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติมเคมี เล่ม 4 .พิมพ์ครั้งที่ 6 , กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 38 หน้า.
- ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. การเก็บและการรักษาตัวอย่างน้ำ (Sampling and Preservation) : สำนักพิมพ์กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 16 หน้า.
- Abudukeremu, K., Yibatihan, S., Peyman, A., Nadia, F. A., Chandrasekhar, K., Mohd, S. K. (2015). REVIEWA comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production. **REVIEWA**.
- Alarcon-Pandilla, D.C., Garcia-Rodriguez, L. and Blanco-Galvez, J. (2010). Design recommendations for a multi-effect distillation plant connected to a double effect absorption heat pump: A solar desalination case study. **Desalination**. 262: 11-14

- Aponte, V.M., Colón, G. (2001). Sodium chloride removal from urine via a six-compartment ED cell for use in Advanced Life Support Systems (Part 1: salt removal as a function of applied voltage and fluid velocity). **Desalination**. 140: 121–132.
- Aponte, V.M., Colón, G. (2001). Sodium chloride removal from urine via a six-compartment ED cell for use in Advanced Life Support Systems (Part 2: Limiting current density behavior). **Desalination**. 140: 133–144.
- Balasubramanian, P. (2013). A brief review on best available technologies for reject water (brine) management in industries. **International journal of Environmental Science**. 3: 0976 – 4402
- Binglun Chen (2018). Selectrodialysis with bipolar membrane for the reclamation of concentrated brine from RO plant **Desalination**. 442: 8–15
- Fernandez-Gonzalez C. (2017). Valorization of desalination brines by electro dialysis with bipolar membranes using nanocomposite anion exchange membranes. **Desalination**. 406: 16–24.
- Gabrielli C. (2006). Electrochemical water softening: principle and application. **Desalination**. 206: 150–163.
- Jim Burton., Kreusch Ed. (1974) Industrial water softener waste brine reclamation. EPA-660/2-74-007: p. 1-8.
- Ksayer, E.B.L., Younes, M. and Clodic, D. (2012). Concentration of brine solution used for low-temperature air cooling. **International journal of Refrigeration**. 35: 418-423.
- Lie Liu., Junsheng Yuan. (2016). Concentrating brine from seawater desalination process by Nanofiltration-electrodialysis integrated membrane technology. **Desalination**. 390: 53–61.
- McCafferty E. (2009). **Introduction to corrosion science**, Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, USA, ISBN 978-1-4419-0454-6, 2009
- Marian Turek. (2002). Dual-purpose desalination-salt production Electrodialysis. **Desalination**. 153 : 377–281.

- Melián-Martel, N., Sadhwani, J.J., Ovidio Pérez Báez, S. (2011). Saline waste disposal reuse for desalination plants for the chlor-alkali industry The particular case of pozo izquierdo SWRO desalination plant. **Desalination**. 281: 35–41.
- Mohtada, S., Toraj Mohammadi. (2007). Sea water desalination using Electrodialysis. **Desalination**. 221: 440–447
- Peraki, M., Ghazanfari, E., Pinder, G. F. Harrington, T. L. (2016). Electrodialysis: An application for the environmental protection in shale-gas extraction, Separation and Purification Technology. [Online]. Available: <http://www.dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.01.040>
- Qian Wang., Pengbo Yang., Wei Cong. (2011). Cation-exchange membrane fouling and cleaning in bipolar membrane Electrodialysis of industrial glutamate production wastewater. **Separation and Purification Technology**. 79: 103-113
- Rahardianto, A., Rahardianto, J., Gao, C.J., Gabelich, M.D., Williams, Y., Cohen. (2007). High recovery membrane desalting of low-salinity brackish water: integration of accelerated precipitation softening with membrane. **Science**. 289: 123–137.
- Sanciolo, P., Ostarcevic, E., Atherton, P., Leslie, G., Fane, T., Cohen, Y. (2012). Enhancement of reverse osmosis water recovery using interstage calcium precipitation. **Desalination**. 295: 43–52.
- Tsiplakides. (2014). PEM water electrolysis fundamentals. [Online]. Available: http://research.ncl.ac.uk/sushgen/docs/summerschool_2012/PEM_water_electrolysis-Fundamentals_Prof._Tsiplakides.pdf
- Tsuyoshi Hoshino. (2013). Development of technology for recovering lithium from seawater by Electrodialysis using ionic liquid membrane. **Fusion Engineering and Design**. 88: 2956-2959

ภาคผนวก ก. ข้อมูลการศึกษาประติบัติภาพการกำจัดของระบบแบบกะ



ตารางที่ ก.1 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 1

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	1.09	6.3	5.6	5.8	10.8	150	0	183	4333	465	0	5	306
2 hr		7.0	5.7	5.7	11.3	150	0	133	4666	465	0	3	307
3 hr		6.4	5.6	5.4	11.0	166	0	66	5333	462	0	1	254
4 hr		6.4	5.3	4.6	11.1	166	0	50	5666	462	0	1	238
5 hr		7.0	5.5	4.2	11.1	100	0	83	10333	440	0	2	208
6 hr		7.1	5.5	4.0	11.0	100	0	133	4666	440	0	1	245
7 hr		7.4	5.9	4.0	11.0	100	0	83	8666	452	0	2	257
8 hr		7.4	5.4	4.4	11.0	150	0	83	8333	477	0	2	251
9 hr		7.5	5.8	5.8	11.0	150	0	100	11333	477	0	3	254
10 hr		7.3	5.7	5.8	11.2	100	0	116	8333	371	0	1	224
11 hr		7.3	5.8	5.7	11.2	100	0	83	7666	371	0	1	201
12 hr		7.4	5.6	5.7	11.1	150	0	83	7333	451	0	1	198

ตารางที่ ก.1 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	1.09	135994	122062	139656	113065	80530	73977	85973	73310
2 hr		135994	122062	139656	115264	89972	73977	91971	72644
3 hr		135994	109965	125258	118563	82641	66646	62647	66979
4 hr		135994	115464	123058	119663	82641	69978	61314	66312
5 hr		135994	113264	123058	114715	83307	68645	65313	65313
6 hr		135994	95670	125258	113615	83307	57982	58648	59648
7 hr		135994	75876	115258	86673	77309	45985	48651	47651
8 hr		135108	89072	110859	83374	77309	53983	48651	54316
9 hr		135108	89072	106460	81175	83307	53983	43986	54649
10 hr		135108	85773	105361	80075	81974	51983	44652	51650
11 hr		135108	83574	106460	86673	81974	50650	46652	49984
12 hr		135108.23	79175	103161	81725	82641	47985	44652	46985

ตารางที่ ก.2 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 2

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเดือดาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเดือดาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเดือดาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.81	6.8	5.8	7.5	11.5	200	0	183	5000	384	0	4	305
2 hr		6.8	5.6	7.6	11.4	183	0	150	4666	384	0	3	307
3 hr		7.2	5.7	6.4	11.4	166	0	100	5333	385	0	3	254
4 hr		7.2	5.6	6.6	11.2	183	0	83	5666	385	0	2	244
5 hr		7.3	5.5	6.2	11.2	166	0	83	11000	388	0	3	244
6 hr		7.3	5.7	6.0	11.6	183	0	133	6666	388	0	2	248
7 hr		7.4	6.4	6.0	11.5	183	0	116	8666	387	0	1	257
8 hr		7.4	6.1	6.4	11.6	216	0	83	8333	387	0	2	250
9 hr		7.2	6.3	6.8	11.7	183	0	100	9333	383	0	2	255
10 hr		7.2	6.3	6.8	11.3	183	0	116	8333	383	0	1	257
11 hr		7.3	6.1	6.7	11.2	183	0	133	8000	371	0	1	237
12 hr		7.3	5.8	6.7	11.0	183	0	116.	8000	372	0	1	233

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 2 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำเลีย	น้ำทิ้ง	น้ำเดือดาง	น้ำซึมขึ้น	น้ำเลีย	น้ำทิ้ง	น้ำเดือดาง	น้ำซึมขึ้น
1 hr	0.81	136657	125910	134657	120514	82641	76309	74643	71644
2 hr		135558	102818	133558	122163	81974	62314	71977	72644
3 hr		138857	119862	136853	125462	83973	72644	78642	76976
4 hr		136657	115464	134651	117215	82641	69978	77975	76642
5 hr		136657	111615	134957	111716	82641	67645	77309	65979
6 hr		136657	113264	134056	113366	82641	68645	77309	65979
7 hr		136657	88522	134252	112266	82641	53650	66979	53650
8 hr		137757	92371	135757	98520	83307	55982	66646	48651
9 hr		137757	95120	135157	96871	83307	57648	83640	47318
10 hr		137757	92371	134757	89723	83307	55982	84640	58648
11 hr		137757	96769	135751	85874	83307	58648	91305	60314
12 hr		137757	98419	134758	83675	83307	59648	90971	59981

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 3

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเลีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเลีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเลีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	6.5	5.1	6.8	11.5	166	0	183	5333	384	1	4	306
2 hr		6.5	4.5	6.7	11.4	116	0	133	5666	384	1	3	307
3 hr		6.8	4.5	6.9	11.4	100	0	116	5333	385	1	3	254
4 hr		6.8	4.5	6.9	11.3	133	0	150	6333	385	1	2	238
5 hr		7.0	4.1	6.5	11.5	166	0	183	8333	388	1	3	208
6 hr		7.0	4.1	6.5	11.5	183	0	200	7666	388	2	2	245
7 hr		7.0	4.1	6.8	11.4	183	0	200	8666	387	2	1	257
8 hr		7.0	4.7	6.8	11.4	183	0	200	9333	387	0	2	251
9 hr		7.1	4.7	6.7	11.4	250	0	266	9666	383	0	3	254
10 hr		7.1	4.8	6.7	11.5	250	0	266	10333	383	1	1	224
11 hr		7.1	4.8	6.7	11.5	300	0	316	10000	371	1	1	201
12 hr		7.1	4.9	6.2	11.5	300	0	316	10000	372	0	1	198

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 3 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	136657	116014	137508	106117	82641	70311	80308	64313
2 hr		136657	116014	139759	106117	82641	70311	78642	64313
3 hr		136657	117663	139851	79725	82641	71311	78642	48318
4 hr		136657	120412	131660	104467	82641	72977	77975	63313
5 hr		137207	109965	132560	96220	82974	66646	77309	58315
6 hr		137207	108316	132110	96220	82974	65646	77309	58315
7 hr		137207	84123	131560	97869	82974	50984	77309	59314
8 hr		137207	81924	135550	96769	82974	49651	77309	58648
9 hr		137207	79175	135230	96220	82974	47985	77309	58315
10 hr		137207	76976	134750	97319	82974	46652	77309	58981
11 hr		137207	83024	136560	97319	82974	50317	77309	58981
12 hr		138907	78625	127560	99519	83640	47651	77309	60314

ตารางที่ 4 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 4

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการ ไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเสียด่าง	น้ำเซมซัน	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเสียด่าง	น้ำเซมซัน	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเสียด่าง	น้ำเซมซัน
1 hr	0.65	7.12	5.64	6.91	11.18	133.33	0.00	125.00	6111.11	373.33	1.11	5.56	305.56
2 hr		7.12	5.58	6.89	11.15	133.33	0.00	125.00	6111.11	373.33	1.11	6.67	307.78
3 hr		7.12	5.49	6.79	11.11	133.33	0.00	125.00	6111.11	373.33	1.11	5.56	305.56
4 hr		7.12	4.71	7.35	11.17	133.33	0.00	125.00	6666.67	373.33	1.11	4.44	271.11
5 hr		7.12	4.96	7.29	11.15	133.33	0.00	116.67	6666.67	381.11	1.11	6.67	274.44
6 hr		7.24	6.07	6.43	11.12	116.67	0.00	125.00	6666.67	381.11	2.22	5.56	267.78
7 hr		7.24	4.79	6.51	11.22	116.67	0.00	113.89	4444.44	381.11	2.22	3.33	251.11
8 hr		7.24	4.66	6.76	11.16	116.67	0.00	108.33	4444.44	381.11	2.22	2.22	247.78
9 hr		7.24	4.67	6.80	11.17	116.67	0.00	108.33	4444.44	375.56	2.22	3.33	238.89
10 hr		7.40	5.08	6.21	11.63	116.67	0.00	100.00	3888.89	375.56	2.22	4.44	225.56
11 hr		7.40	4.81	6.02	11.62	133.33	0.00	97.22	4444.44	375.56	2.22	3.33	217.78
12 hr		7.40	4.54	5.46	11.32	133.33	0.00	97.22	5000.00	375.56	2.22	4.44	235.56

ตารางที่ 4 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 4 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	138857.03	118213.34	139106.86	118813.34	83973.96	71644.45	80308.43	64313.39
2 hr		138857.03	121512.32	139106.86	122012.32	83973.96	73643.83	78642.28	64313.39
3 hr		138857.03	122611.98	139319.15	123411.98	83973.96	74310.29	78642.28	48318.35
4 hr		138857.03	111615.39	139959.40	112215.39	83973.96	67645.69	77975.82	63313.70
5 hr		138307.20	108316.41	142112.78	109116.41	83640.73	65646.31	77309.36	58315.25
6 hr		138307.20	114364.54	141656.21	115364.54	83640.73	69311.84	77309.36	58315.25
7 hr		138307.20	113814.71	139871.63	114414.71	83640.73	68978.61	77309.36	59314.94
8 hr		138307.20	91271.70	132309.98	91871.70	83640.73	55316.18	77309.36	58648.48
9 hr		137207.55	90721.87	133389.15	91421.87	82974.27	54982.95	77309.36	58315.25
10 hr		137207.55	86323.23	135759.76	87123.23	82974.27	52317.11	77309.36	58981.71
11 hr		137207.55	83574.08	134209.93	84374.08	82974.27	50650.96	77309.36	58981.71
12 hr		137207.55	83024.25	134729.25	83824.25	82974.27	50317.73	77309.36	60314.63

ตารางที่ 5 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 5

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสียบ	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสียบ	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสียบ	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	7.04	6.51	6.78	10.33	133.33	0.00	125.00	6111.11	373.33	1.11	5.56	320.00
2 hr		7.04	6.53	6.81	10.35	133.33	0.00	125.00	6111.11	373.33	1.11	5.56	311.11
3 hr		7.04	6.52	6.76	9.98	133.33	0.00	125.00	6111.11	373.33	1.11	4.44	305.56
4 hr		7.54	6.61	7.24	10.05	133.33	0.00	125.00	6666.67	373.33	1.11	2.22	271.11
5 hr		7.54	6.68	7.21	10.10	133.33	0.00	116.67	6666.67	378.89	1.11	5.56	274.44
6 hr		7.54	6.71	7.25	10.16	116.67	0.00	125.00	6666.67	378.89	1.11	2.22	272.22
7 hr		7.54	6.75	7.26	10.37	116.67	0.00	113.89	6666.67	378.89	0.00	3.33	268.89
8 hr		7.26	6.45	6.98	10.45	116.67	0.00	108.33	6666.67	378.89	0.00	2.22	267.78
9 hr		7.26	6.49	6.95	10.51	116.67	0.00	108.33	6666.67	378.89	2.22	3.33	266.67
10 hr		7.26	6.43	6.87	10.53	116.67	0.00	25.00	6666.67	378.89	2.22	3.33	263.33
11 hr		7.21	5.91	6.79	10.59	133.33	0.00	33.33	8888.89	378.89	2.22	2.22	261.11
12 hr		7.21	6.03	6.71	9.85	133.33	0.00	16.67	9444.44	378.89	2.22	2.22	255.56

ตารางที่ 5 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 5 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	139806.86	137457.38	144700.00	135857.89	84307.19	83307.50	84973.65	82307.81
2 hr		139806.86	136907.55	144500.00	135827.89	84307.19	82974.27	84973.65	82307.81
3 hr		139806.86	135807.89	140900.00	134748.23	84307.19	82307.81	84640.42	81641.35
4 hr		138707.20	133058.74	149800.00	133158.74	83640.73	80641.66	83973.96	80641.66
5 hr		138707.20	133608.57	148800.00	133158.74	83640.73	80974.89	83973.96	80641.66
6 hr		138707.20	134708.23	138800.00	133048.74	83640.73	81641.35	84307.19	80641.66
7 hr		138707.20	131409.25	136900.00	13085429.42	83640.73	79641.97	83973.96	79308.74
8 hr		138707.20	126460.79	135700.00	124814.30	83640.73	76642.90	84307.19	75643.21
9 hr		138707.20	122611.98	134800.00	119311.00	83640.73	74310.29	83973.96	72310.91
10 hr		138707.20	120412.66	134500.00	118212.34	83640.73	72977.37	83640.73	71644.45
11 hr		138707.20	119313.00	133100.00	117111.68	83640.73	72310.91	83640.73	70977.99
12 hr		138707.20	118763.17	132800.00	115424.20	83640.73	71977.68	83973.96	69978.30

ตารางที่ 6 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 6

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเสียด่าง	น้ำซึมขึ้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเสียด่าง	น้ำซึมขึ้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเสียด่าง	น้ำซึมขึ้น
1 hr	0.65	7.12	5.13	6.99	11.51	166.67	0.00	183.33	6666.67	384.44	1.11	4.44	306.67
2 hr		7.12	4.59	6.98	11.42	116.67	0.00	133.33	6666.67	384.44	1.11	3.33	307.78
3 hr		7.12	4.52	6.92	11.43	100.00	0.00	116.67	7222.22	385.56	1.11	3.33	254.44
4 hr		7.12	4.50	6.98	11.38	133.33	0.00	150.00	7222.22	385.56	1.11	2.22	238.89
5 hr		7.03	4.11	6.58	11.53	166.67	0.00	183.33	7777.78	388.89	1.11	3.33	208.89
6 hr		7.03	4.13	6.54	11.53	183.33	0.00	200.00	7222.22	388.89	2.22	2.22	245.56
7 hr		7.08	4.15	6.88	11.41	183.33	0.00	200.00	8888.89	387.78	2.22	1.11	257.78
8 hr		7.08	4.73	6.81	11.45	183.33	0.00	200.00	8888.89	387.78	0.00	2.22	251.11
9 hr		7.11	4.79	6.78	11.48	250.00	0.00	266.67	8888.89	383.33	0.00	3.33	254.44
10 hr		7.11	4.89	6.71	11.51	250.00	0.00	266.67	9444.44	383.33	1.11	1.11	224.44
11 hr		7.12	4.87	6.75	11.52	300.00	0.00	316.67	10000.00	371.11	1.11	1.11	201.11
12 hr		7.12	4.91	6.23	11.59	300.00	0.00	316.67	10000.00	372.22	0.00	1.11	198.89

ตารางที่ ก.6 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 6 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำดิบ	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำดิบ	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	136657.72	116014.02	137508.91	106117.09	82641.04	70311.53	80308.43	64313.39
2 hr		136657.72	116014.02	139759.76	106117.09	81974.58	70311.53	78642.28	64313.39
3 hr		136657.72	117663.51	139851.23	79725.28	83973.96	71311.22	78642.28	48318.35
4 hr		136657.72	120412.66	131660.10	104467.61	82641.04	72977.37	77975.82	63313.70
5 hr		137207.55	109965.90	132560.44	96220.16	83973.96	66646.00	77309.36	58315.25
6 hr		137207.55	108316.41	132110.04	96220.16	83973.96	65646.31	77309.36	58315.25
7 hr		137207.55	84123.91	131560.28	97869.65	83640.73	50984.19	77309.36	59314.94
8 hr		137207.55	81924.60	135550.74	96769.99	83640.73	49651.27	77309.36	58648.48
9 hr		137207.55	79175.45	135230.48	96220.16	83640.73	47985.12	77309.36	58315.25
10 hr		137207.55	76976.13	134750.96	97319.82	83640.73	46652.20	77309.36	58981.71
11 hr		137207.55	83024.25	136560.41	97319.82	83640.73	50317.73	77309.36	58981.71
12 hr		138907.20	78625.62	127560.44	99519.14	83640.73	47651.89	77309.36	60314.63

ตารางที่ ก.7 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 7

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเลีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเลีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเลีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	7.80	5.23	7.75	11.12	197.22	0.00	191.67	8333.33	373.33	16.67	16.67	294.44
2 hr		7.80	5.06	7.72	11.14	194.44	0.00	191.67	7777.78	373.33	17.78	18.89	292.22
3 hr		7.80	4.78	7.56	11.27	194.44	0.00	194.44	7222.22	373.33	15.56	23.33	305.56
4 hr		7.80	4.65	7.45	11.27	194.44	0.00	186.11	8333.33	373.33	14.44	15.56	291.11
5 hr		7.80	4.71	7.48	11.81	194.44	0.00	186.11	9444.44	378.89	14.44	12.22	287.78
6 hr		7.80	4.73	7.56	11.80	194.44	0.00	186.11	10000.00	378.89	14.44	7.78	291.11
7 hr		7.80	4.12	7.42	11.78	194.44	0.00	191.67	8888.89	378.89	14.44	8.89	291.11
8 hr		7.75	3.28	7.26	12.41	194.44	0.00	191.67	8333.33	378.89	18.89	5.56	287.78
9 hr		7.75	3.21	7.14	12.35	194.44	0.00	188.89	7777.78	378.89	18.89	6.67	287.78
10 hr		7.75	3.55	7.06	12.22	194.44	0.00	191.67	8333.33	378.89	18.89	4.44	287.78
11 hr		7.75	3.51	7.00	12.28	194.44	0.00	194.44	8333.33	378.89	18.89	10.00	284.44
12 hr		7.75	3.48	6.97	12.25	194.44	0.00	188.89	10000.00	378.89	18.89	8.89	283.33

ตารางที่ ก.7 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 7 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	135994.61	129219.93	136940.99	129128.02	82196.73	78309.05	82752.12	75532.13
2 hr		135994.61	125564.40	134998.23	127295.26	82196.73	76087.52	81641.35	74421.37
3 hr		135994.61	122795.26	133275.46	126378.87	82196.73	74421.37	80530.58	73865.98
4 hr		135994.61	117296.96	132159.08	123629.73	82196.73	71089.07	79975.20	72199.83
5 hr		135994.61	109099.52	133175.46	117215.05	82196.73	66090.62	80530.58	68312.15
6 hr		135994.61	105393.99	132975.46	109883.99	82196.73	63869.08	80530.58	63869.08
7 hr		135994.61	95323.78	133075.43	101552.93	82196.73	57759.87	80530.58	59426.02
8 hr		135994.61	92574.63	133105.46	98803.78	82196.73	56093.72	80530.58	57759.87
9 hr		135994.61	88889.10	133270.25	91472.72	82196.73	53872.18	80530.58	53316.80
10 hr		135994.61	80651.66	132875.46	86890.81	82196.73	48873.73	80530.58	50539.88
11 hr		135994.61	81568.04	133791.85	85974.43	82196.73	49429.12	81085.97	49984.50
12 hr		135994.61	83399.81	136540.99	85974.43	82196.73	50539.88	82752.12	49984.50

ตารางที่ ก.8 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 8

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเลี้ยง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเลี้ยง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเลี้ยง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	7.18	5.08	5.63	12.18	191.67	0.00	161.11	8333.33	373.33	16.67	13.33	300.00
2 hr		7.18	4.65	5.62	12.24	191.67	0.00	163.89	7777.78	373.33	18.89	11.11	295.56
3 hr		7.18	4.20	5.81	12.22	191.67	0.00	163.89	7222.22	373.33	18.89	11.11	306.67
4 hr		7.20	4.24	5.01	12.16	191.67	0.00	161.11	6111.11	373.33	17.78	8.89	291.11
5 hr		7.20	3.98	5.18	12.16	191.67	0.00	138.89	6666.67	378.89	17.78	7.78	287.78
6 hr		7.20	4.14	5.19	12.06	191.67	0.00	136.11	6111.11	378.89	14.44	5.56	292.22
7 hr		7.14	4.02	5.09	12.00	191.67	0.00	136.11	5833.33	378.89	11.11	6.67	291.11
8 hr		7.14	3.99	4.98	11.92	191.67	0.00	127.78	5833.33	378.89	12.22	7.78	287.78
9 hr		7.14	3.95	5.21	11.79	191.67	0.00	127.78	5833.33	378.89	11.11	5.56	286.67
10 hr		7.26	3.87	5.28	11.74	191.67	0.00	127.78	5833.33	378.89	10.00	5.56	286.67
11 hr		7.26	3.64	5.19	11.62	191.67	0.00	127.78	6666.67	378.89	7.78	3.33	281.11
12 hr		7.26	3.59	5.14	11.32	191.67	0.00	127.78	6666.67	378.89	7.78	4.44	283.33

ตารางที่ 8 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 8 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	136920.99	124628.02	136840.99	123135.26	82752.12	75532.13	82752.12	74421.37
2 hr		136920.99	122795.26	135008.23	122218.87	82752.12	74421.37	81641.35	73865.98
3 hr		136920.99	117296.96	133175.46	118553.34	82752.12	71089.07	80530.58	71644.45
4 hr		136920.99	111798.67	133175.46	107556.75	82752.12	67756.77	80530.58	64979.85
5 hr		136920.99	116380.58	136840.99	114887.81	82752.12	70533.68	82752.12	69422.92
6 hr		136920.99	109965.90	132890.46	108443.14	82752.12	66646.00	80530.58	65535.23
7 hr		136920.99	92554.63	132890.46	91948.25	82752.12	56093.72	80530.58	55538.33
8 hr		136920.99	89805.49	130141.32	88282.72	82752.12	54427.57	78864.43	53316.80
9 hr		136920.99	81558.04	131057.70	80035.28	82752.12	49429.12	79419.82	48318.35
10 hr		136920.99	77892.51	132890.46	77286.13	82752.12	47207.58	80530.58	46652.20
11 hr		136920.99	82474.43	134723.23	80951.66	82752.12	49984.50	81641.35	48873.73
12 hr		136920.99	85223.57	132890.46	83730.81	82752.12	51650.65	80530.58	50539.88

ตารางที่ 9 ตารางที่ 8 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 9

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการ ไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเสียด่าง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเสียด่าง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเสียด่าง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	7.04	5.02	6.99	12.02	141.67	0.00	133.33	10000.00	381.11	11.11	16.67	274.44
2 hr		7.04	4.57	6.97	12.15	141.67	0.00	136.11	11111.11	381.11	12.22	18.89	252.22
3 hr		7.04	4.11	6.85	12.23	141.67	0.00	138.89	10555.56	381.11	12.22	23.33	300.56
4 hr		7.07	4.24	6.88	12.11	141.67	0.00	130.56	10555.56	381.11	13.33	15.56	291.11
5 hr		7.07	3.54	6.84	12.13	141.67	0.00	136.11	10000.00	381.11	14.44	12.22	287.78
6 hr		7.07	3.25	6.85	12.22	141.67	0.00	138.89	9444.44	381.11	14.44	7.78	291.11
7 hr		7.07	3.41	6.81	12.21	141.67	0.00	138.89	10000.00	378.89	13.33	8.89	291.11
8 hr		7.07	3.57	6.89	11.97	133.33	0.00	127.78	9444.44	378.89	12.22	5.56	287.78
9 hr		7.07	3.78	6.78	11.74	133.33	0.00	125.00	7222.22	378.89	12.22	6.67	285.18
10 hr		7.07	3.71	6.72	11.77	133.33	0.00	122.22	7777.78	378.89	13.33	4.44	287.72
11 hr		7.07	3.68	6.79	12.14	133.33	0.00	119.44	8333.33	378.89	13.33	10.00	264.54
12 hr		7.07	3.61	6.70	12.35	133.33	0.00	116.67	8333.33	378.89	12.22	8.89	253.21

ตารางที่ 9 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 9 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	135624.61	119129.73	135624.61	131959.08	82196.73	72199.83	82196.73	79975.20
2 hr		136540.99	113631.43	134708.23	132875.46	82752.12	68867.53	81641.35	80530.58
3 hr		136540.99	118213.34	136540.99	133791.85	82752.12	71644.45	82752.12	81085.97
4 hr		136540.99	111798.67	136540.99	130126.32	82752.12	67756.77	82752.12	78864.43
5 hr		136540.99	108133.14	136540.99	126460.79	82752.12	65535.23	82752.12	76642.90
6 hr		136540.99	104467.61	138373.76	123711.64	82752.12	63313.70	83862.88	74976.75
7 hr		136540.99	90721.87	139290.14	107216.75	82752.12	54982.95	84418.27	64979.85
8 hr		136540.99	83390.81	136540.99	98969.31	82752.12	50539.88	82752.12	59981.40
9 hr		136540.99	72394.22	135624.61	96220.16	82752.12	43875.28	82196.73	58315.25
10 hr		136540.99	65979.54	134708.23	83390.81	82752.12	39987.60	81641.35	50539.88
11 hr		136540.99	66895.92	138373.76	84307.19	82752.12	40542.98	83862.88	51095.27
12 hr		136540.99	68728.69	137457.38	82474.43	82752.12	41653.75	83307.50	49984.50

ตารางที่ ก.10 ผลวิเคราะห์น้ำชุดการทดลองที่ 10

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการ ไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสียบ	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสียบ	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสียบ	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	7.11	4.91	7.01	12.16	133.33	13.89	125.00	5000.00	381.11	11.11	16.67	286.67
2 hr		7.11	4.95	6.95	12.21	133.33	13.89	122.22	7777.78	381.11	12.22	18.89	288.89
3 hr		7.11	4.98	6.91	12.27	133.33	11.11	122.22	7222.22	381.11	12.22	21.11	295.56
4 hr		7.11	4.90	6.93	12.12	133.33	8.33	122.22	5555.56	381.11	13.33	15.56	286.67
5 hr		7.11	3.98	6.81	12.19	133.33	0.00	122.22	6111.11	381.11	14.44	12.22	285.56
6 hr		7.11	4.03	6.85	12.05	133.33	0.00	125.00	5555.56	381.11	14.44	7.78	284.44
7 hr		7.11	4.21	6.92	12.21	133.33	0.00	125.00	7500.00	378.89	14.44	8.89	287.78
8 hr		7.13	3.89	6.87	12.25	133.33	0.00	125.00	6666.67	378.89	7.78	7.78	287.78
9 hr		7.13	3.72	6.82	12.24	133.33	0.00	125.00	6666.67	378.89	7.78	15.56	287.78
10 hr		7.13	3.87	5.97	12.26	133.33	0.00	113.89	5833.33	378.89	7.78	13.33	282.22
11 hr		7.13	3.52	5.95	12.25	133.33	0.00	111.11	7500.00	378.89	6.67	15.56	281.11
12 hr		7.13	3.49	5.91	12.27	133.33	0.00	111.11	6666.67	378.89	6.67	16.67	280.00

ตารางที่ 10 ผลวิเคราะห์น้ำชุดการทดลองที่ 10 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำดิบ	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำดิบ	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	135624.61	110882.28	133791.85	121878.87	82196.73	67201.38	81085.97	73865.98
2 hr		136540.99	109965.90	136540.99	118213.34	82752.12	66646.00	82752.12	71644.45
3 hr		136540.99	102634.84	137457.38	120962.49	82752.12	62202.93	83307.50	73310.60
4 hr		136540.99	111798.67	137457.38	113631.43	82752.12	67756.77	83307.50	68867.53
5 hr		136540.99	105383.99	136540.99	107216.75	82752.12	63869.08	82752.12	64979.85
6 hr		136540.99	90721.87	138373.76	102634.84	82752.12	54982.95	83862.88	62202.93
7 hr		136540.99	94387.40	139290.14	98969.31	82752.12	57204.48	84418.27	59981.40
8 hr		136540.99	80641.66	136540.99	99885.69	82752.12	48873.73	82752.12	60536.78
9 hr		136540.99	59564.86	133791.85	76976.13	82752.12	36099.92	81085.97	46652.20
10 hr		136540.99	52233.80	132875.46	74226.98	82752.12	31656.85	80530.58	44986.05
11 hr		136540.99	51317.42	135624.61	75143.37	82752.12	31101.47	82196.73	45541.43
12 hr		136540.99	53150.19	135624.61	71477.84	82752.12	32212.23	82196.73	43319.90

ตารางที่ ก.11 ผลวิเคราะห์น้ำชุดการทดลองที่ 11

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	7.12	5.89	6.85	12.14	133.33	25.00	108.33	6666.67	381.11	13.33	15.56	280.00
2 hr		7.12	5.81	6.71	12.15	133.33	19.44	111.11	7222.22	381.11	12.22	18.89	284.44
3 hr		7.12	4.76	6.79	12.23	133.33	0.00	111.11	6666.67	381.11	12.22	18.89	286.67
4 hr		7.12	4.65	6.82	12.24	133.33	0.00	108.33	6111.11	381.11	12.22	14.44	286.67
5 hr		7.12	4.25	6.73	12.26	133.33	0.00	111.11	6666.67	381.11	13.33	12.22	285.56
6 hr		7.12	4.17	6.70	12.24	133.33	0.00	108.33	6111.11	381.11	14.44	7.78	284.44
7 hr		7.10	3.97	6.59	12.21	133.33	0.00	108.33	8333.33	378.89	14.44	8.89	285.56
8 hr		7.10	3.82	6.24	12.25	133.33	0.00	108.33	8333.33	378.89	12.22	8.89	285.56
9 hr		7.10	3.78	6.29	12.21	133.33	0.00	102.78	7500.00	378.89	12.22	15.56	287.78
10 hr		7.10	3.64	6.13	12.24	133.33	0.00	88.89	7500.00	378.89	12.22	13.33	282.22
11 hr		7.10	3.52	6.11	12.28	133.33	0.00	88.89	8333.33	378.89	6.67	14.44	278.89
12 hr		7.10	3.49	6.09	12.35	133.33	0.00	91.67	7500.00	378.89	6.67	14.44	278.89

ตารางที่ ก.11 ผลวิเคราะห์น้ำชุดการทดลองที่ 11 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	136004.61	112715.05	132875.46	131042.70	82196.73	68312.15	80530.58	79419.82
2 hr		136920.99	110882.28	135624.61	130126.32	82752.12	67201.38	82196.73	78864.43
3 hr		136920.99	99885.69	136540.99	115464.20	82752.12	60536.78	82752.12	69978.30
4 hr		136920.99	109049.52	136540.99	123711.64	82752.12	66090.62	82752.12	74976.75
5 hr		136920.99	105383.99	135624.61	117296.96	82752.12	63869.08	82196.73	71089.07
6 hr		136920.99	87056.34	137457.38	101718.46	82752.12	52761.42	83307.50	61647.55
7 hr		136920.99	88889.10	136540.99	98969.31	82752.12	53872.18	82752.12	59981.40
8 hr		136920.99	69645.07	136540.99	83390.81	82752.12	42209.13	82752.12	50539.88
9 hr		136920.99	54982.95	132875.46	74226.98	82752.12	33323.00	80530.58	44986.05
10 hr		136920.99	50401.04	132875.46	74226.98	82752.12	30546.08	80530.58	44986.05
11 hr		136920.99	57732.10	132875.46	76976.13	82752.12	34989.15	80530.58	46652.20
12 hr		136920.99	60481.25	131959.08	77892.51	82752.12	36655.30	79975.20	47207.58

ตารางที่ ก.12 ผลวิเคราะห์น้ำชุดการทดลองที่ 12 กลไกการเดินระบบแบบที่ 2

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการ ไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	7.12	7.09	5.91	12.14	133.33	116.67	0.00	6666.67	381.11	13.33	13.33	306.67
2 hr		7.12	7.09	5.81	12.15	133.33	122.22	0.00	7222.22	381.11	12.22	11.11	300.00
3 hr		7.12	7.10	4.76	12.23	133.33	122.22	0.00	6666.67	381.11	12.22	11.11	297.78
4 hr		7.12	7.11	4.65	12.24	133.33	111.11	0.00	6111.11	381.11	13.33	13.33	297.78
5 hr		7.12	7.07	4.25	12.26	133.33	111.11	0.00	6666.67	381.11	15.56	16.67	295.56
6 hr		7.12	7.08	4.17	12.24	133.33	108.33	0.00	6111.11	381.11	14.44	14.44	295.56
7 hr		7.10	7.09	3.97	12.21	133.33	105.56	0.00	8333.33	378.89	14.44	15.56	295.56
8 hr		7.10	7.02	3.82	12.25	133.33	105.56	0.00	8333.33	378.89	12.22	12.22	295.56
9 hr		7.10	7.02	3.78	12.21	133.33	108.33	0.00	7500.00	378.89	12.22	11.11	295.56
10 hr		7.10	7.01	3.64	12.24	133.33	108.33	0.00	7500.00	378.89	12.22	11.11	305.56

11 hr	7.10	7.01	3.52	12.28	133.33	108.33	0.00	8333.33	378.89	7.78	7.78	304.44
12 hr	7.10	7.01	3.49	12.31	133.33	105.56	0.00	7500.00	378.89	7.78	7.78	304.44
15 hr	7.10	7.01	3.41	12.28	133.33	102.78	0.00	7500.00	378.89	12.22	10.00	304.44
18 hr	7.10	7.01	3.20	12.28	133.33	102.78	0.00	7500.00	378.89	13.33	13.33	303.33
21 hr	7.14	7.01	3.24	12.24	133.33	97.22	0.00	9166.67	377.78	12.22	11.11	303.33
24 hr	7.14	7.05	3.21	12.25	133.33	97.22	0.00	8333.33	377.78	15.56	15.56	303.33
27 hr	7.14	7.10	3.20	12.25	133.33	97.22	0.00	8333.33	377.78	32.22	32.22	310.00
30 hr	7.14	7.10	2.51	12.29	133.33	83.33	0.00	9166.67	378.89	22.22	23.33	310.00
33 hr	7.14	7.09	2.56	12.33	133.33	75.00	0.00	8333.33	378.89	18.89	18.89	307.78
36 hr	7.14	7.09	2.59	12.33	133.33	69.44	0.00	8333.33	378.89	22.22	21.11	313.33
39 hr	7.14	7.05	2.21	12.31	138.89	69.44	0.00	7500.00	378.89	21.11	21.11	311.11
42 hr	7.14	7.05	2.23	12.31	138.89	69.44	0.00	7500.00	378.89	18.89	18.89	308.89
45 hr	7.12	7.08	2.01	12.26	138.89	69.44	0.00	7500.00	378.89	23.33	23.33	297.78
48 hr	7.12	7.08	1.97	12.24	138.89	63.89	0.00	6666.67	377.78	22.22	21.11	298.89
51 hr	7.12	7.08	1.87	12.24	138.89	61.11	0.00	7500.00	377.78	21.11	21.11	294.44
54 hr	7.12	7.00	2.27	12.33	138.89	58.33	0.00	6666.67	377.78	25.56	24.44	292.22
57 hr	7.12	6.97	1.97	12.33	138.89	55.56	0.00	7500.00	377.78	26.67	25.56	286.67
60 hr	7.12	6.98	2.07	12.34	138.89	50.00	0.00	6666.67	378.89	25.56	24.44	293.33

ตารางที่ 12 ผลวิเคราะห์น้ำชุดการทดลองที่ 12 กลไกการเดินระบบแบบที่ 2 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำเลีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเลีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	136920	109979	119480	124356	82752	66646	63313	66090
2 hr		136920	111810	116729	127098	82752	67756	61647	67756
3 hr		136920	106312	114896	121598	82752	64424	60536	64424
4 hr		136920	101731	113066	117016	82752	61647	59426	61647
5 hr		136920	98984	108487	115181	82752	59981	56649	60536
6 hr		136920	89819	102070	104184	82752	54427	52761	53872
7 hr		136920	91652	94740	106933	82752	55538	48318	55538
8 hr		136920	84319	93821	99602	82752	51095	47762	51095
9 hr		136004	77904	89238	94104	82196	47207	44986	47762
10 hr		136004	56827	67244	73954	82196	34433	31656	35544

11 hr	136004	53157	56244	86621	82196	32212	24992	31101
12 hr	136004	54990	55328	89371	82196	33323	24436	32767
15 hr	136920	54078	48916	87538	82752	32767	20549	31656
18 hr	136920	52247	62585	86620	82752	31656	22770	31101
21 hr	137837	50413	65331	84787	83307	30546	24436	29990
24 hr	137837	49500	72667	74787	83307	29990	28879	29990
27 hr	137837	69677	91928	104955	83307	42209	40542	42209
30 hr	136920	57754	80006	92125	82752	34989	33323	34433
33 hr	136920	53169	77252	89374	82752	32212	31656	32767
36 hr	136920	48590	72673	82965	82752	29435	28879	28879
39 hr	136004	45840	69007	80213	82196	27769	26658	27213
42 hr	136004	46754	67172	81128	82196	28324	25547	27769
45 hr	136920	44009	66260	77451	82752	26658	24992	25547
48 hr	136920	44924	68091	78368	82752	27213	26103	26103
51 hr	136920	46756	73589	81113	82752	28324	29435	27769
54 hr	137837	45844	69010	80194	83307	27769	26658	27218
57 hr	137837	43096	67179	78356	83307	26103	25547	26103
60 hr	137837	44928	69927	78363	83307	27213	27213	26103

ตารางที่ ก. สรุปค่าพีเอชและอัลคาไลน์ิตี้ของชุดการทดลอง 1-13

ชุดการทดลอง ที่	ระยะเวลา สัมผัส (นาที)	ความต่าง ศักย์ (โวลต์)	พื้นที่ผิวสัมผัส (ตร.ซม.)	ค่าเฉลี่ยน้ำจืดในระบบ		ค่าเฉลี่ยน้ำบำบัด		ค่าเฉลี่ยน้ำเจือจาง		ค่าเฉลี่ยน้ำเข้มข้น		
				พีเอช	อัลคาไลน์ิตี้ (มก./ล)	พีเอช	อัลคาไลน์ิตี้ (มก./ล)	พีเอช	อัลคาไลน์ิตี้ (มก./ล)	พีเอช	อัลคาไลน์ิตี้ (มก./ล)	
1	15	10	64	7.0	131	5.6	0	5.1	100	11.1	7,222	
2	20			7.2	184	5.9	0	6.6	116	11.4	7,416	
3	25			6.9	194	4.6	0	6.7	211	11.4	8,055	
4	30			7.2	126	5.0	0	6.6	113	11.2	5,416	
5	25	5		7.2	126	6.4	0	6.9	95	10.2	6,944	
6		10		7.1	194	4.6	0	6.7	211	11.4	8,240	
7		15		7.7	194	4.1	0	7.3	190	11.8	8,564	
8		20		7.2	191	4.1	0	5.2	141	11.9	9,398	
9		10		100	7.0	138	3.8	0	6.8	130	12.0	6,921
10				200	7.1	133	4.2	3	6.6	120	12.2	6,504
11				400	7.1	133	4.3	3	6.5	103	12.2	7,245
12				200	7.1	134	7.0	91	3.3	0	12.2	7,539
13	25	10		200	7.5	147	8.0	194	1.8	0	12.3	7,103

ตารางที่ ก. สรุปผลประสิทธิภาพการกำจัด

ชุดการทดลองที่	ตัวแปรเปลี่ยน	คลอไรด์ (ร้อยละ)	ของแข็งละลายน้ำ (ร้อยละ)	ความกระด้างทั้งหมด (ร้อยละ)
1	15 (นาที)	36.42	36.86	100
2	20 (นาที)	33.58	33.56	100
3	25 (นาที)	42.36	42.89	99.90
4	30 (นาที)	36.37	39.18	99.53
5	5 (โวลต์)	12.85	13.29	99.41
6	10 (โวลต์)	42.50	43.35	98.96
7	15 (โวลต์)	39.64	39.8	95.01
8	20 (โวลต์)	40.1	40.27	97.58
9	100 (ตร.ชม.)	49.83	50.54	99.41
10	200 (ตร.ชม.)**	61.74	62.19	98.14
11	300 (ตร.ชม.)	59.60	60.13	95.01
12	ต่อเนื่อง 7 วัน	67.55	67.63	97.56

ภาคผนวก ข. ข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของระบบแบบต่อเนื่อง



ตารางที่ ข.1 ผลวิเคราะห์น้ำของการเดินระบบแบบต่อเนื่อง 7 วัน

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตรา การไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำ เข้มข้น	น้ำ เข้มข้น	น้ำ ทิ้ง	น้ำเสีย	น้ำ เข้มข้น	น้ำ เข้มข้น	น้ำ ทิ้ง	น้ำเสีย	น้ำ เข้มข้น	น้ำ เข้มข้น	น้ำ ทิ้ง
12 hr	0.65	7.4	7.4	1.9	13.4	150	150	0	7777	376	21	22	370
24 hr		7.5	7.4	1.8	13.4	150	150	0	9444	376	17	18	368
48 hr		7.4	7.4	1.4	13.7	150	150	0	8888	376	16	15	371
60 hr		7.5	7.5	1.8	13.7	150	152	0	8333	376	13	14	371
72 hr		7.5	7.4	1.7	13.6	150	150	0	7777	376	15	15	367
84 hr		7.4	7.4	2.0	13.4	147	150	0	7222	376	14	14	367
96 hr		7.4	7.5	1.7	13.3	147	155	0	8333	376	13	13	367
108 hr		7.5	7.6	1.7	13.2	147	158	0	7500	375	13	13	366
120 hr		7.6	7.8	1.6	13.4	147	166	0	6666	375	17	18	365
132 hr		7.6	7.9	2.0	13.4	144	177	0	6666	375	21	22	363
144 hr		7.5	8.2	1.7	13.2	144	250	0	5833	375	22	23	364
156 hr		7.6	8.9	2.2	12.6	144	263	0	6666	375	27	27	364
168 hr		7	9	2	10	144	291	0	5000	375	33	34	361
180 hr		7	10	2	9	144	361	0	3333	375	43	44	362

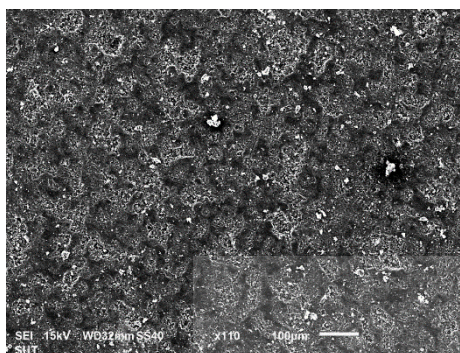
ตารางที่ ข.2 ผลวิเคราะห์น้ำของการเดินระบบแบบต่อเนื่อง 7 วัน (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl ⁻ (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น ชีวแคโทด	น้ำเข้มข้น ชีวแอโนด	น้ำทิ้ง	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น ชีวแคโทด	น้ำเข้มข้น ชีวแอโนด	น้ำทิ้ง
12 hr	0.65	136458	67375	63252	79974	82474	40820	38321	39154
24 hr		136458	53626	52252	67602	82474	32489	31656	31656
48 hr		135084	42628	39878	56608	81641	25825	24159	24992
60 hr		135084	38501	35753	51110	81641	23326	21659	21659
72 hr		137833	34379	33005	51106	83307	20826	19993	21659
84 hr		137833	39877	35753	63855	83307	24159	21659	23326
96 hr		136458	30253	28879	56982	82474	18327	17494	19160
108 hr		136458	42625	39875	66603	82474	25825	24159	24992
120 hr		136458	46753	45379	73475	82474	28324	27491	29157
132 hr		136458	49505	46757	73473	82474	29990	28324	29157
144 hr		137833	48132	46758	73474	83307	29157	28324	29157
156 hr		137833	60509	59134	79471	83307	36655	35822	35822
168 hr		136458	83882	82508	102835	82474	50817	49984	49984
180 hr		135084	101761	100388	119331	81641	61647	60814	59981

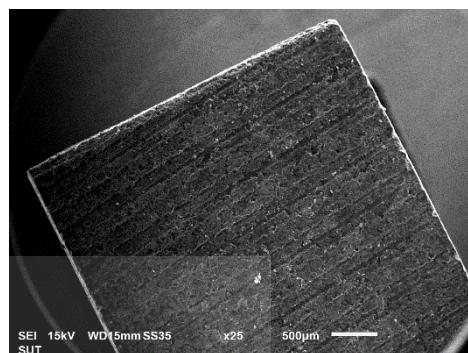
ตารางที่ ข.3 ปริมาณคลอรีนละลายน้ำ

ตัวอย่างที่เวลา	V (V)	I (A)	คลอรีนละลายน้ำ (mg/l)
12	10	7.9	491
24	10	7.9	500
48	10.2	8.9	550
60	10.2	8.9	591
72	10.2	8.8	566
84	10.2	7.8	458
96	10.2	7.8	475
108	10	7.6	444
120	10	5.2	200
132	10	5.2	191
144	10	5.1	191
156	10	4.4	191
168	10	3.8	108
180	10	2.5	41



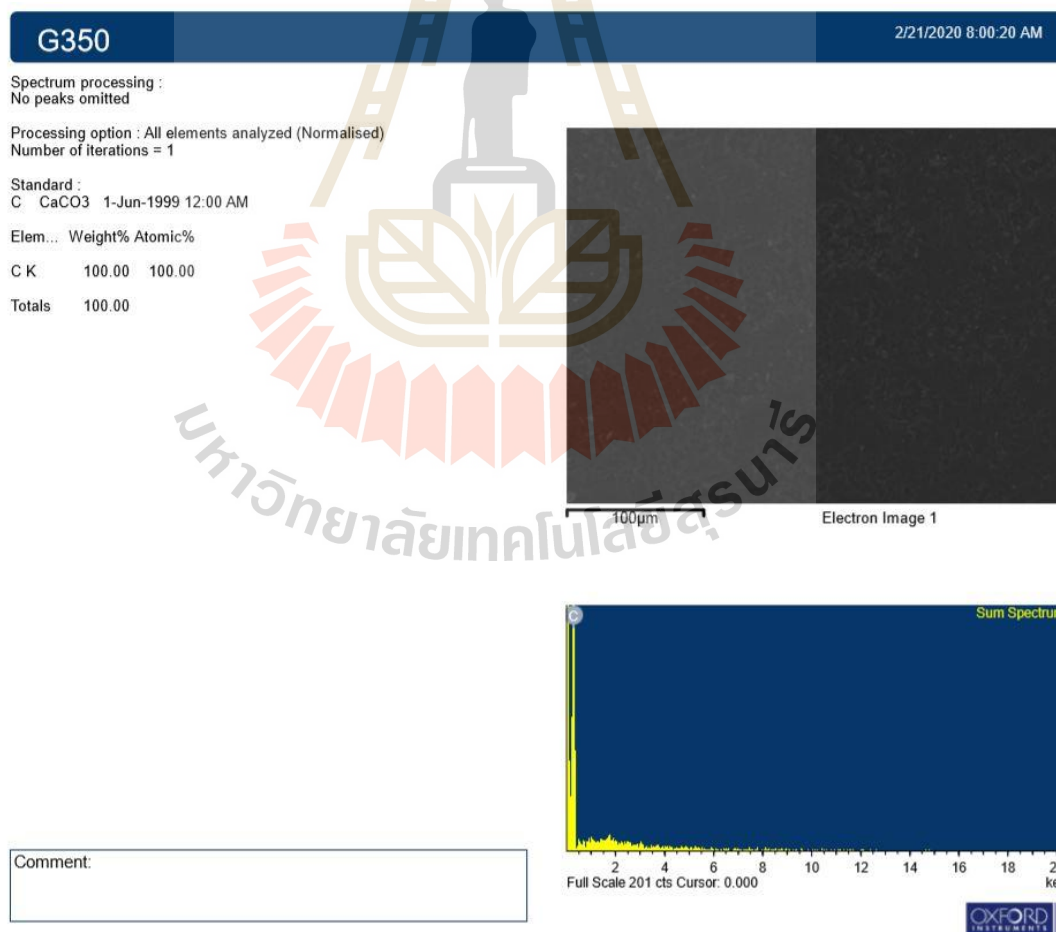


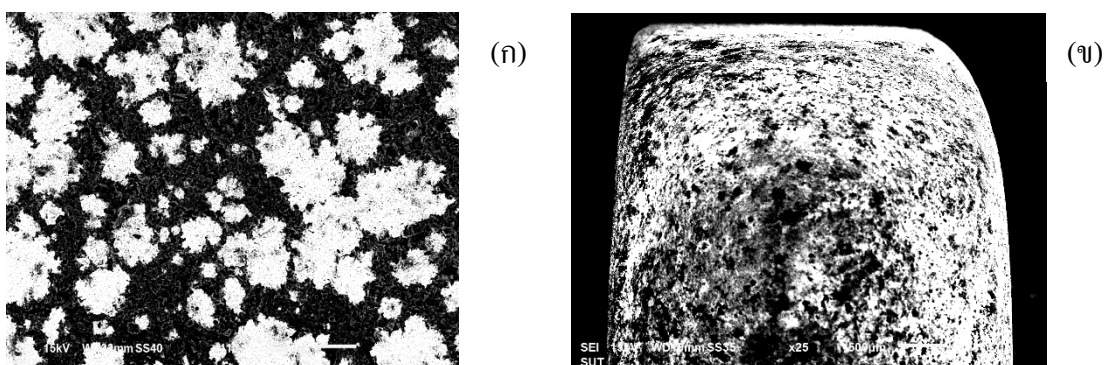
(ก)



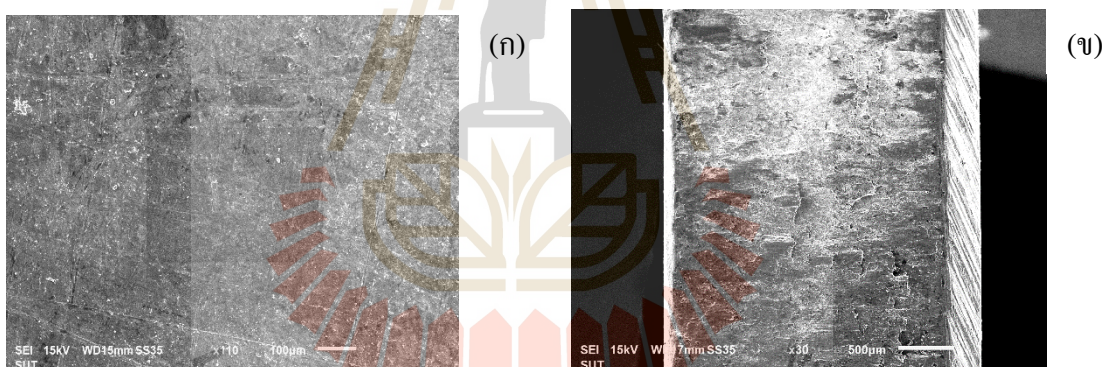
(ข)

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายขั้วแกรไฟต์ก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM (ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน
(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน





รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายขั้วแกรไฟต์หลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM (ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน
(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายขั้วไทเทเนียมก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM (ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน
(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน

Tix300

2/21/2020 8:16:57 AM

Spectrum processing :
Peak possibly omitted : 6.450 keV

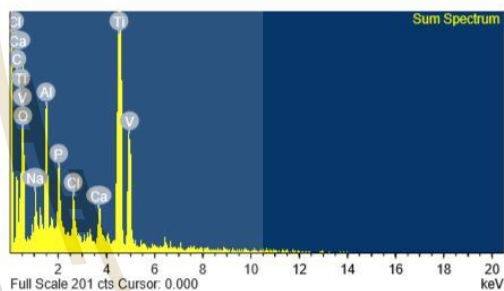
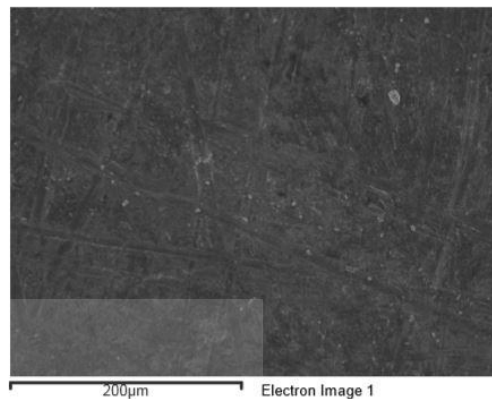
Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 3

Standard :
C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
P GaP 1-Jun-1999 12:00 AM
Cl KCl 1-Jun-1999 12:00 AM
Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM
V V 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem... Weight% Atomic%

C K	-5.46	-13.73
O K	34.25	64.67
Na K	1.90	2.50
Al K	3.56	3.98
P K	2.17	2.11
Cl K	1.46	1.24
Ca K	1.45	1.09
Ti K	57.33	36.15
V K	3.35	1.99

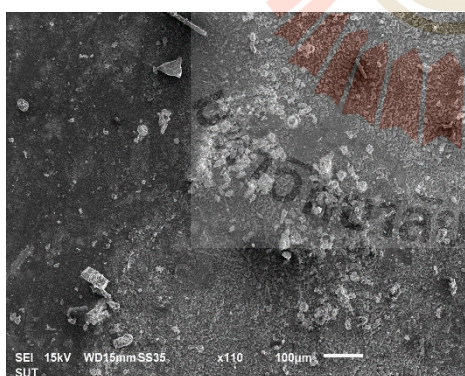
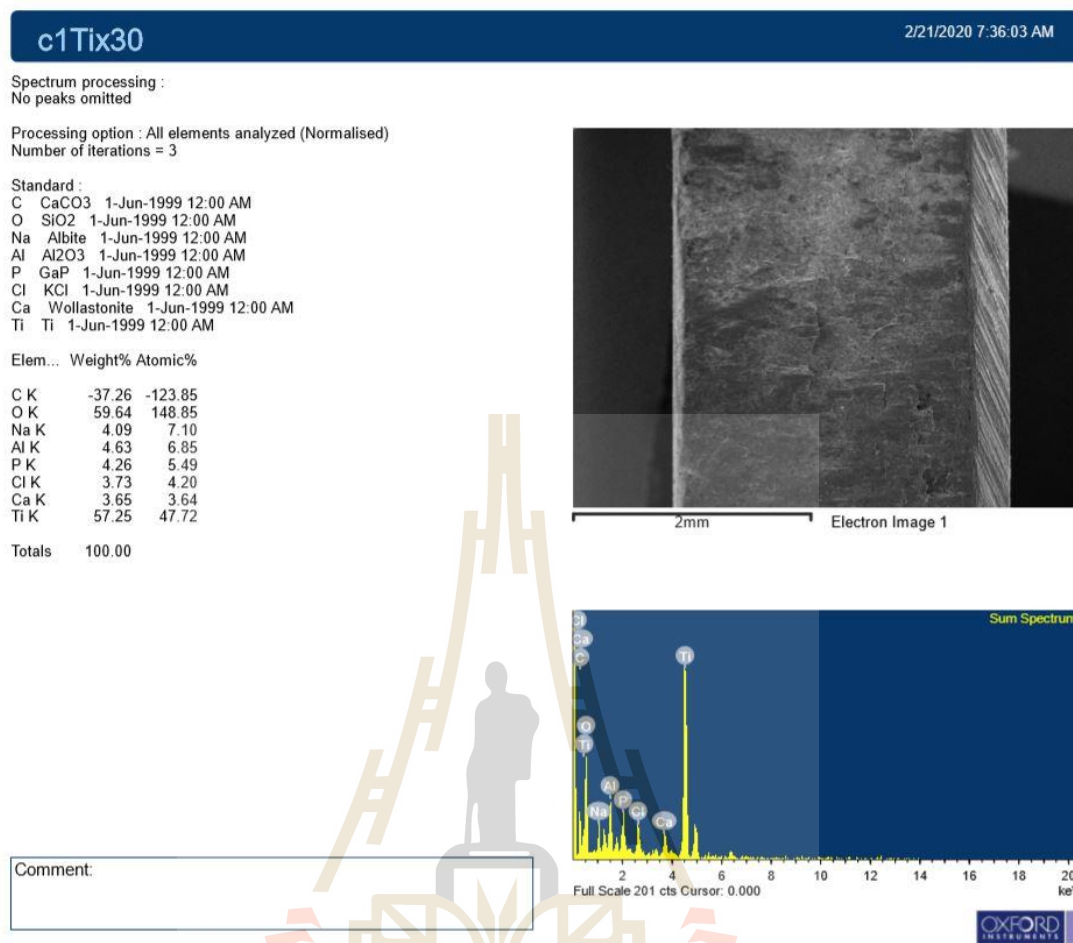
Totals 100.00



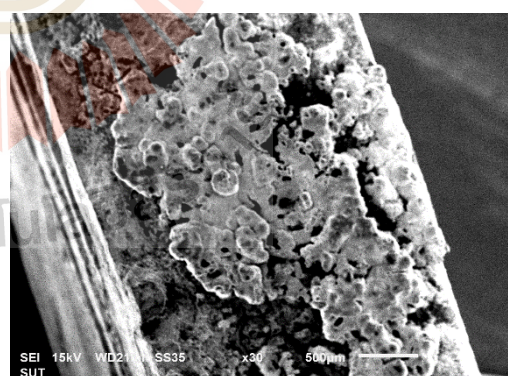
Comment:

OXFORD
INSTRUMENTS

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายชิ้นไทเทเนียมหลังทำการทดสอบด้วยเทคนิค SEM (ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน
(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน

Ti1.3x300

2/21/2020 8:06:17 AM

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

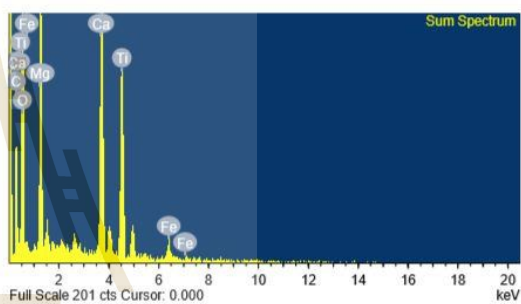
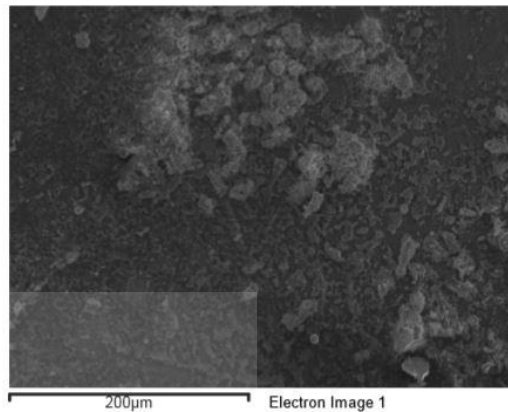
Standard :

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM
Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem... Weight% Atomic%

C K	12.05	19.61
O K	50.16	61.29
Mg K	7.20	5.79
Ca K	12.37	6.04
Ti K	15.41	6.29
Fe K	2.80	0.98

Totals 100.00



Comment:

OXFORD
INSTRUMENTS

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง. ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้า



ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าของชุดการทดลองที่ 1

คำนวณกำลังไฟฟ้าสำหรับการบำบัด

โดยใช้สูตร	$P = VI/Q$
แทนค่า	$P = (9.93V) \times (4.5A)/(1.09 \text{ l/min})$ $= 2.46 \text{ W/m}^3$

คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

โดยใช้สูตร	$W = Pt$
แทนค่า	$W = (0.00246 \text{ kW/m}^3) \times 12 \text{ h}$ $= 0.037 \text{ kWh/m}^3$

ดังนั้น ใช้พลังงานไฟฟ้า 0.037 kWh ในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

คำนวณค่าไฟฟ้า

ส่วนที่ 1 ค่าไฟฟ้าพื้นฐาน

1.1 ค่าพลังงานไฟฟ้า

ค่าไฟฟ้านครหลวง 3.1258 บาท/หน่วย (1 มกราคม พ.ศ.2563)

โดยใช้สูตร ค่าพลังงานไฟฟ้า = จำนวนหน่วยที่ใช้ \times ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย

แทนค่า	ค่าพลังงานไฟฟ้า = $(0.037 \text{ kWh}) \times (3.1258 \text{ บาท/หน่วย})$ $= 0.09 \text{ บาท}$
--------	---

ดังนั้น ค่าใช้จ่ายของค่าไฟในการบำบัดน้ำเสียต่อหน่วย = 0.09 บาท/ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

1.2 ค่าบริการ

ค่าบริการไฟฟ้านครหลวง 38.22 บาท (1 มกราคม พ.ศ.2563)

ส่วนที่ 2 ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%

โดยใช้สูตร	ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7% = $(\text{ค่าบริการไฟฟ้า} + \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} + F_p) \times (7/100)$
------------	--

แทนค่า	$= (38.22 + 0.09 + (-0.16)) \times (7/100)$ $= 2.67 \text{ บาท}$
--------	---

ค่าไฟฟ้า = ค่าไฟฟ้าพื้นฐาน + ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%

$$= (0.09 \text{ บาท} + 38.22 \text{ บาท}) + (2.67 \text{ บาท})$$

$$= 40.87 \text{ บาท}$$

สรุป ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์คือ 40.87 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ จ.1 สรุปการคำนวณค่าไฟฟ้า

	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7	Run8	Run9	Run10	Run11	Run12	Run13
I (A)	4.50	4.44	4.87	4.91	1.11	3.97	8.10	13.08	7.16	10.15	11.38	10.32	6.56
V (volt)	9.93	9.99	10.33	10.00	5.00	10.10	14.96	19.97	10.16	10.30	10.07	10.08	10.07
Q (l/min)	1.09	0.81	0.65	0.54	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Power (Wh)	2.46	3.29	4.64	5.45	0.51	3.70	11.18	24.11	6.71	9.65	10.58	9.60	6.10
Time (h)	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	60.00	180.00
Energy consumption (KWh/m ³)	0.03	0.04	0.06	0.07	0.01	0.04	0.13	0.29	0.08	0.12	0.13	0.12	0.07
ค่าไฟฟ้า(บาท)	40.87	40.90	40.96	40.99	40.79	40.92	41.22	41.74	41.04	41.16	41.20	41.16	41.02

ภาคผนวก ฉ. ข้อมูลการนำเสนอผลงาน



บทความนำเสนอในงานประชุมระดับนานาชาติ

Preliminary Study of Electrolytic Cell a Treatment for Wasted Brine from Resin Regeneration

Publication: ICBBE '16: Proceedings of the 3rd International Conference on Biomedical andBioinformatics Engineering November 2016 Pages 94–<https://doi.org/10.1145/3022702.3022724>

Preliminary Study of Electrolytic Cell a Treatment for Wasted Brine from Resin Regeneration

Patcharin Racho
School of Environmental
Engineering, Institute of
Engineering, Suranaree University
of Technology, Nakhon
Ratchasima, Thailand 30000
patcha@sut.ac.th

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

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

ABSTRACT

Wasted brine have many trace solution such as sodium, calcium magnesium, chloride, sodium chloride and other chemicals as a result, the wastewater from a resin regeneration contaminated receiving water and environments is a lot. This study was evaluated the potential of electrolytic cell a treatment for wasted brine from resin regeneration. These were demonstrated on parameters that effect on the treatment including of voltage (DC) and contact time. Overall results shown at 15 minute of contact time and voltage 5.0 volts was achieved above 80% of chloride and hardness removal. That was potential to produce chlorine gas (Cl₂) about 19.9 kg per 1 m³ of wastewater. That quantity is sufficient to use as disinfectant in water supply treatment plant.

CCS Concepts

Information systems → Applied computing → Physical sciences and engineering → Engineering → Computer-aided design.

Keywords

Electrolytic cell, Wasted Brine, Desalination, Resin regeneration

1. INTRODUCTION

At present, the water soften process by ion exchange has been popular in the industry and commerce such as shopping malls and hotels is quite high because space in the installation system, administrators can easily control the operation of the automated system and to eliminate the hardness of the water is gone or has a lower concentration. The function of the resin a cationic functional group acts independently as Na⁺ ion exchange contaminated with hard water such as calcium ion (Ca²⁺) and magnesium ions (Mg²⁺) and so on; when the resin to time breaking down resin in the ion removal require restore the resin in the process. That used table salt (NaCl) concentration was 30% as

chemical resin regeneration. When enter the tank, the concentration is reduced to about 8-15% due to dilution by the water. That caused of very high salinity wastewater usually strength of 40-60 degrees salometer (S) with corresponding to 10-16% sodium chloride by weight [1]. Wasted brine from resin regeneration process the system is contaminated with dissolved ions, but there is a lot of organic contamination is very low. y wastewater from this process with the TDS is 40,000 - 50,000 mg / L or a chloride-contaminated wastewater 40,000 - 50,000 mg / L [2] as wastewater with high salinity when released into the sewage system will affect the growth of microorganisms in the sewage system because septic systems mainly use bioremediation and may result. Making industry today, most of the illegal discharge brine into the drain or go out with the effluent from the wastewater treatment plant, which has an effect on organisms in the water and saline soil.

Several reviews of common brine disposals methods and a consideration of some of their pros and cons. Technologies were identified as feasible for application to concentrate disposal or reduction of concentrate were solar evaporation, surface water discharge, land application, deep well injection, sewer discharge, electro dialysis, enhanced membrane systems, brine crystallizer, blending with wastewater effluent and mechanical evaporation and crystallizer. Another way to meet the clean technology the resources recovery could be considered. However, all of these are only ability on brine removal and reducing the wasted volume before the final disposal. During the trend of sustainable development the reuse and recovery will be concerning. The electrolysis of brine has a source of hydrogen gas, chlorine gas and sodium hydroxide (NaOH) also including of desalination efficiency. That make it has an attractive for wasted brine treatment from resin regeneration process. The electrolysis process of brine is commonly useful in the world of industry because of a lot of products. These are including of chlorine gas uses of the disinfectant and purifier manufacture of hydrochloric acid making plastics, hydrogen gas uses of the manufacture of hydrochloric acid potential as a pollution-free fuel, sodium hydroxide uses of the processing food products removing pollutants from water manufacture of paper. Also, this process has been widely used for production of drinking water from brackish water and seawater, treatment of industrial effluents, recovery of useful materials from effluents and salt production. Therefore, this study attended to apply the electrochemistry principles (electrolysis) because this method was high effectively to wastewater treatment, approximate 85-90% can work well even in the wastewater with high amounts of suspended solids, less cost and unnecessary required an expert for system. Electrolyte

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for components of this work owned by others than ACM must be honored. Abstracting with credit is permitted. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee. Request permissions from Permissions@acm.org.

ICBBE 2016, November 12-14, 2016, Taipei, Taiwan
© 2016 ACM. ISBN 978-1-4503-4824-9/16/11... \$15.00
DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3022702.3022724>

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศศิวิมล นามกุล เกิดเมื่อวันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2536 ณ จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิบูลวิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ในปีการศึกษา 2553 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2557 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปีการศึกษา 2557 โดยได้รับทุนการศึกษาจากแหล่งทุนภายนอก (OROG)

เมื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ “การบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์” ในระหว่างกำลังศึกษาได้เผยแพร่และนำเสนอผลงานวิจัย ในหัวข้อเรื่อง “Preliminary Study of Electrolytic Cell a Treatment for Wasted Brine from Resin Regeneration” ในงานสัมมนาวิชาการระดับนานาชาติ 2016 5th International Conference on Material Science and Engineering Technology (ICMSET 2016)

