

การกำจัดเกลือจากน้ำเสียในกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน  
ด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์



นางสาวศศิวิมล นามกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2562

**DESALINATION OF WASTE BRINE FROM RESIN  
REGENERATION PROCESS USING  
ELECTROLYTIC CELL**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2019**

## การกำจัดเกลือจากน้ำเสียในกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์

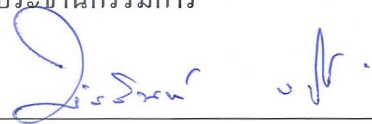
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อ. ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.พัชรินทร์ ราโช)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.นิตร์เพชร ยศพล)

กรรมการ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศศิวิมล นามกุล : การกำจัดเกลือจากน้ำเสียในกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยวิธีเซลล์  
อิเล็กโทรไลต์ (DESALINATION OF WASTE BRINE FROM RESIN

REGENERATION PROCESS USING ELECTROLYTIC CELL)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรินทร์ ราโช, 135 หน้า.

น้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินจากการผลิตน้ำอ่อนมีการปนเปื้อนของค่าของแข็ง  
ละลายน้ำสูง แต่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ต่ำ น้ำเสียจากกระบวนการนี้มีค่าของแข็งละลายน้ำ  
ประมาณ 40,000 - 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีความเค็มสูงส่งผลกระทบต่อเกิดการยับยั้ง  
การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดทางชีวภาพและอาจทำให้เกิดสภาวะดินเค็ม  
ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์  
อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน โดยทำการศึกษาเป็น 2 ช่วง  
การศึกษาหลักประกอบด้วย 1) การเดินระบบแบบต่อเนื่อง 12 ชั่วโมงต่อชุดการทดลอง  
เพื่อทำการศึกษาสภาวะการเดินระบบที่มีความเหมาะสม จากผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาสัมผัส  
25 นาที พื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตารางเซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ มีความเหมาะสมใน  
การเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์พบประสิทธิภาพการกำจัดเกลือของคลอไรด์คือร้อยละ  
 $67.55 \pm 1.02$  ค่าของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ  $67.63 \pm 1.05$  ค่าความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  
 $97.56 \pm 0.68$  และ 2) การเดินระบบแบบต่อเนื่อง 7 วัน ในสภาวะที่มีความเหมาะสมจำนวน 1 ชุด  
การทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเกลือของคลอไรด์คือร้อยละ  $74.45 \pm 4.78$  ของแข็งละลาย  
น้ำคือร้อยละ  $74.39 \pm 4.79$  ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  $96.31 \pm 0.21$  เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลแล้ว  
ระยะหนึ่งประสิทธิภาพการกำจัดของระบบลดลง เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านภายในระบบ  
ลดลงจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าลดลง ซึ่งเกิดจากการอิมตัวของ  
ไอออนภายในระบบและบริเวณขั้วไฟฟ้าบางส่วนมีตะกอนเกาะ และเกิดการฟูก่อนจากการใช้งาน  
จึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในระบบลดลงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดและเสถียรภาพใน  
การเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา ศศิวิมล นามกุล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Dr. P. Raju

SASIWIMON NAMGOOL : DESALINATION OF WASTE BRINE FROM  
RESIN REGENERATION PROCESS USING ELECTROLYTIC CELL.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PATCHARIN RACHO, 135 PP.

DESALINATION OF WASTE BRINE FROM RESIN REGENERATION PROCESS  
USING ELECTROLYTIC CELL

Waste brine from resin regeneration process contains low organic concentration whilst there is massive dissolved solid in the range of 40,000 - 50,000 mg/l, causing high salinity and saline conditions which lead to inhabitation of microorganism activities for biological treatment in wastewater. Electrolytic cell has been expected for high efficiency in the wastewater treatment. Therefore, this study on electrolytic cell aims to evaluate the efficacy and factors affecting wastewater treatment from the resin regeneration process, and study the feasibility of electrolytic cell in a long-term usage. The study was divided into two main parts. Firstly, a continuous system in 12 hours to discover the optimal condition which was found at the contact time of 25 minutes, the surface area of 200 square centimeter and voltage of 10 V for an effective chloride elimination of  $67.55 \pm 1.02 \%$ , total dissolved solid of  $67.63 \pm 1.05 \%$  and total hardness of  $97.56 \pm 0.68 \%$ . Secondly, a continuous system in 7 days with 1 optimal condition test was found to have the average effectiveness of chloride removal of  $74.45 \pm 4.78 \%$ , total dissolved solid of  $74.39 \pm 4.79 \%$  and total hardness of  $96.31 \pm 0.21 \%$ . After allowing the removing system to achieve equilibrium point, the performance was degrading due to fewer electric current flowing through the system from ion saturation within the system in the area of the electrode, and consequently decreasing the oxidation-reduction reaction. Additionally, scale deposition and corrosion at electrodes

resulted in inefficient electrical flow in the system that further reduced removal efficiency and stability in the electrolytic cell.



School of Environmental Engineering

Academic year 2019

Student's Signature ศศวรรษ งามกุล

Advisor's Signature [Handwritten Signature]



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรินทร์ ราโช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์พร้อมทางด้านวิชาการ

อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ฉัตรเพชร ยศพล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำและความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณมานพ จร โลกกรวด ที่ให้การช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยภายในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ขอขอบคุณ คุณนารี กลิ่นกลาง ที่ให้คำแนะนำในการดำเนินการด้านเอกสารต่าง ๆ

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษา และน้อง ๆ นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยและให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีอุปการะทุกท่านที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและคอยเป็นกำลังใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ศศิวิมล นามกุล

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 กรอบแนวคิดงานวิจัย.....	3
<b>2 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 ความต้องการน้ำอ่อนในอุตสาหกรรม.....	5
2.1.1 ความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม.....	5
2.2 การผลิตน้ำอ่อนด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน.....	9
2.2.1 หลักการ.....	9
2.3 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน.....	10
2.4 วิธีการบำบัดน้ำเค็ม.....	12
2.4.1 วิธีการใช้ความร้อน.....	12
2.4.1.1 MSF-Multi-Stage Flash Distillation.....	13
2.4.1.2 MED-Multi-Effect Distillation.....	13
2.4.1.3 VC-Vapor Compression Distillation.....	14
2.4.2 วิธีแลกเปลี่ยนประจุ.....	15



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3	วิธีเชื่อมกรอง.....	17
2.4.4	วิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	19
2.4.4.1	Diaphragm cell process.....	19
2.4.4.2	Mercury cell process.....	20
2.4.4.3	Membrane cell Process.....	21
2.5	ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell).....	23
2.5.1	หลักการ.....	23
2.5.2	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์.....	24
2.5.2.1	ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า.....	24
2.5.2.2	ความเข้มข้นสารละลาย.....	24
2.5.2.3	ระยะเวลาสัมผัส.....	24
2.5.2.4	พลังงานที่ใช้.....	24
2.5.2.5	กลไกการไหล.....	25
2.5.3	รูปแบบถังปฏิกริยา.....	25
2.5.3.1	Bio-electrochemically assisted microbial reactor (BEAMR).....	25
2.5.3.2	Microbial electrolysis cell (MEC).....	25
2.5.3.3	Single chamber MEC.....	25
2.5.3.4	A Cathode on top single chamber MEC.....	26
2.5.3.5	Microbial reverse-electrodialysis electrolysis cells (MRECs).....	26
2.5.3.6	Microbial electrodialysis cell (MEDC).....	26
2.5.4	ขั้วไฟฟ้า.....	26
2.5.4.1	การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้า.....	26
2.5.5	การคัดกรองของขั้วไฟฟ้า.....	30

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.5.1	หลักการ.....	30
2.5.5.2	การพิจารณาการกักกร่อน.....	30
<b>3</b>	<b>วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>31</b>
3.1	การเก็บข้อมูลเบื้องต้น.....	32
3.2	การเตรียมตัวอย่างน้ำเสีย.....	34
3.3	ชุดทดลองระบบเซลล์อเล็กโทรไลต์.....	34
3.3.1	ส่วนประกอบระบบเซลล์อเล็กโทรไลต์.....	34
3.3.2	การจัดรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยา.....	35
3.3.3	เมมเบรน.....	37
3.4	การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อเล็กโทรไลต์.....	38
3.4.1	เวลาสัมผัส.....	38
3.4.2	ความต่างศักย์ไฟฟ้า.....	38
3.4.3	พื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า.....	38
3.5	การประเมินสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อเล็กโทรไลต์.....	39
3.5.1	การประเมินประสิทธิภาพ.....	40
3.6	การศึกษาการเดินระบบเซลล์อเล็กโทรไลต์ในระยะยาว.....	40
3.6.1	การประเมินเสถียรภาพ.....	41
3.6.2	แนวโน้มการเกิดก๊าซ.....	41
3.6.2.1	การเกิดก๊าซคลอรีน.....	41
3.6.2.2	การเกิดก๊าซไฮโดรเจน.....	42
3.7	การบำรุงและรักษาระบบระบบเซลล์อเล็กโทรไลต์.....	42
3.7.1	การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า.....	42
3.7.2	การทำความสะอาดเยื่อกรอง.....	42
3.8	วิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	43
3.8.1	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	43
3.8.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	44

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.8.2.1	การเตรียมตัวอย่าง.....	44
3.8.3	วิธีวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน.....	44
<b>4</b>	<b>ผลการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>45</b>
4.1	การเก็บข้อมูลเบื้องต้น.....	45
4.2	ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา.....	47
4.3	ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์.....	47
4.3.1	ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัส.....	47
4.3.2	ผลกระทบของความต่างศักย์.....	53
4.3.3	ผลกระทบของพื้นที่ผิวสัมผัส.....	58
4.3.4	ผลกระทบของรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาต่อประสิทธิภาพ ของระบบ.....	63
4.3.5	การประเมินปัจจัยการเดินระบบที่มีความเหมาะสม.....	66
4.4	การเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง.....	67
4.4.1	ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ.....	67
4.4.2	สัณฐานวิทยา.....	70
4.4.3	การศึกษากลไกการบำบัดของระบบด้วยสมดุลมวล.....	74
4.4.4	ผลพลอยได้จากระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์.....	76
<b>5</b>	<b>สรุปผลการวิจัย.....</b>	<b>77</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	77
5.1.1	ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์.....	77
5.1.1.1	ระยะเวลาสัมผัส.....	77
5.1.1.2	ความต่างศักย์.....	78
5.1.1.3	พื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า.....	78
5.1.1.4	ผลกระทบของรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาต่อ ประสิทธิภาพของระบบ.....	78
5.1.1.5	การประเมินปัจจัยการเดินระบบที่มีความเหมาะสม.....	79

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.2	ผลการศึกษาความเป็นไปได้การใช้วิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์.....	79
5.1.2.1	ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ.....	79
5.1.2.2	ต้นทุนวิทยา.....	80
5.1.2.3	การศึกษากลไกการบำบัดของระบบด้วยสมมูลมวล.....	80
5.1.2.4	ผลพลอยได้จากระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์.....	81
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	81
	รายการอ้างอิง.....	82
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของระบบแบบกะ.....	85
	ภาคผนวก ข. ข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของระบบแบบต่อเนื่อง.....	114
	ภาคผนวก ค. ข้อมูลการศึกษาต้นทุนวิทยา.....	119
	ภาคผนวก ง. ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้า.....	126
	ภาคผนวก จ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	129
	ประวัติผู้วิจัย.....	135

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	อัตราการใช้ น้ำตามประเภทของโรงงาน .....6
2.2	อัตราการใช้ น้ำต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ.....6
2.3	ปริมาณการใช้ น้ำในกระบวนการผลิตปลากระป๋อง.....8
2.4	ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟุ้งฟูสภาพเรซิน ..... 12
2.5	ข้อดีและข้อเสียระบบ MSF-Multi-Stage Flash Distillation ..... 13
2.6	ข้อดีและข้อเสียระบบ MED-Multi-Effect Distillation ..... 14
2.7	ข้อดีและข้อเสียระบบ VC-Vapor Compression Distillation..... 14
2.8	ข้อดีและข้อเสียวิธีแลกเปลี่ยนประจุ (Ion - Exchange)..... 14
2.9	ข้อดีและข้อเสียวิธีเยื่อกรอง (Membrane technology)..... 18
2.10	เปรียบเทียบชนิดเยื่อกรองเมมเบรน ..... 18
2.11	ข้อมูลเปรียบเทียบการทำงานของทั้ง 3 ระบบ ..... 22
2.12	แรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่มาตรฐานของโลหะต่าง ๆ..... 27
2.13	แกลวานิกซีรีส์ (Galvanic series) ของโลหะบางชนิดในน้ำทะเล..... 28
3.1	ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟุ้งฟูสภาพเรซิน ..... 33
3.2	ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์จากการฟุ้งฟูสภาพเรซิน ..... 34
3.3	ลักษณะเยื่อกรองที่ใช้ในระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์..... 37
3.4	การศึกษาสภาวะการด้วยระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ..... 39
3.5	ขั้นตอนการทำความสะอาดเยื่อกรอง ..... 43
3.6	วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการทดลอง..... 43
4.1	ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟุ้งฟูสภาพเรซิน ..... 46
4.2	ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์และปริมาณสารเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์..... 47
4.3	ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส..... 51
4.4	ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนความต่างศักย์..... 56
4.5	ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนพื้นที่ผิวสัมผัส..... 61
4.6	ลักษณะน้ำเข้าและออกของรูปแบบการเดินระบบแบบที่ 2..... 65

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 ประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้า .....	67
4.8 ลักษณะน้ำเข้าและออกของการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง .....	69
4.9 วิเคราะห์ปริมาณธาตุของขั้วไฟฟ้าผิวก่อนและหลังทำปฏิกิริยา.....	71
4.10 ประเมินสมดุลมวล .....	75
4.11 วิเคราะห์ปริมาณก๊าซ .....	76
ก.6 ผลการทดลองด้วยวิธีการทำบุญเสิร์ชของโรงพยาบาล โนนสูงเมื่อความต้องการ .....	89
ก.7 ผลการทดลองด้วยวิธีการทำบุญเสิร์ชของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี .....	90
ก.8 ผลการทดลองด้วยวิธีการทำบุญเสิร์ชของโรงพยาบาล โนนสูงเมื่อความต้องการ .....	91



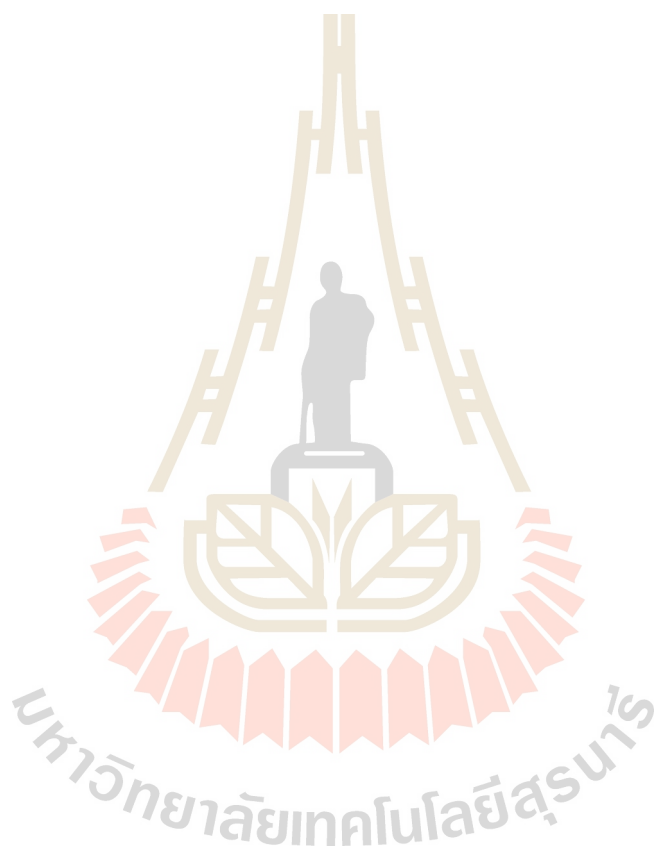


## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย.....31
3.2	การติดตั้งถังปฏิกรณ์.....35
3.3	แบบถังปฏิกรณ์แบบที่ 1.....36
3.4	แบบถังปฏิกรณ์แบบที่ 2.....36
3.5	แผนผังการประเมินสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์.....40
3.6	แผนผังการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในระยะยาว.....41
4.1	ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ.....49
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์กับระยะเวลาสัมผัส.....49
4.3	ผลกระทบการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสกับประสิทธิภาพการกำจัด.....50
4.4	ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ.....54
4.5	ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ.....54
4.6	ผลกระทบการแปรเปลี่ยนความต่างศักย์กับประสิทธิภาพการกำจัด.....55
4.7	ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ที่พื้นที่ผิวสัมผัสต่าง ๆ.....59
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์กับพื้นที่ผิวสัมผัส.....60
4.9	ผลกระทบของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัด.....60
4.10	ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัด.....64
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด.....68
4.12	ภาพถ่ายขั้วแกรไฟต์ก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM.....73
4.13	ภาพถ่ายขั้วแกรไฟต์หลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM.....73
4.14	ภาพถ่ายขั้วไทเทเนียมก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM.....74
4.15	ภาพถ่ายขั้วไทเทเนียมหลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM.....74
4.16	ประเมินกลไกการบำบัดของระบบแบบต่อเนื่องด้วยสมดุลมวล.....75
4.16	ประเมินกลไกการบำบัดของระบบแบบต่อเนื่องด้วยสมดุลมวล.....75
ข.1	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนวิเคราะห์ด้วยวิธี GC.....118
ค.1	ภาพถ่ายขั้วแกรไฟต์ก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM.....120
ค.2	ภาพถ่ายขั้วแกรไฟต์หลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM.....121

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.3	ภาพถ่ายขั้วไทเทเนียมก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM.....122
ค.4	ภาพถ่ายขั้วไทเทเนียมหลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM .....124



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันมีการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นทำให้มีความต้องการใช้น้ำที่ปราศจาก ความกระด้างหรือน้ำอ่อน (Soft water) ในงานกระบวนการผลิต งานหม้อต้มน้ำ (Boiler) งานระบบ ปรับอากาศแบบใช้เครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) และน้ำอ่อนอาจเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ เช่น อุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง ผลไม้กระป๋อง แป้งมันสำปะหลัง และอาหารแช่แข็ง ประโยชน์ การใช้น้ำอ่อนในงานหม้อต้มน้ำ เพื่อป้องกันการชำรุดหรือตะกรันในเส้นท่อหรือหม้อต้มน้ำ และ ใช้ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งต้องใช้ไอน้ำในการฆ่าเชื้อโรค และระบบหล่อเย็น ในระบบปรับอากาศแบบใช้เครื่องทำน้ำเย็นของห้างสรรพสินค้าหรือโรงแรมขนาดใหญ่ เป็นต้น การผลิตน้ำอ่อนด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ด้วยเรซินได้รับความนิยมใน ภาคอุตสาหกรรมและพาณิชย์กรรมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบน้อย ดูแลระบบง่ายสามารถควบคุมการทำงานของระบบให้เป็นอัตโนมัติ และสามารถกำจัดค่า ความกระด้างให้หมดไปจากน้ำหรือให้ความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้ ในกระบวนการทำน้ำอ่อน ซึ่งใน หอหล่อเย็นจะมีการใช้เกลือแกง (NaCl) ความเข้มข้น 8 - 15% เป็นสารเคมีในการฟื้นฟูเรซินทำให้น้ำ เสียที่ออกมาจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินมีการปนเปื้อนของไอออนที่ละลายอยู่จำนวนมาก แต่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ต่ำมาก โดยทั่วไปน้ำเสียจากกระบวนการนี้จะมีค่าของแข็ง ละลายน้ำ (Total dissolved solids, TDS) อยู่ประมาณ 40,000 - 50,000 mg/L หรือมีค่าคลอไรด์ ปนเปื้อนน้ำเสีย 40,000 - 50,000 mg/L (Ksayer et al., 2012) จึงทำให้น้ำเสียมีความเค็มสูงส่ง ผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดทางชีวภาพ สภาพแวดล้อมอาจทำให้เกิดสถานะดินเค็ม และน้ำทิ้งมีค่าของแข็งละลายน้ำไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงาน

การกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำที่มีความเค็มสูงในปัจจุบันมีด้วยหลายวิธี ได้แก่ การใช้ ความร้อนสามารถรองรับอัตราการไหลได้สูง ปริมาณความเข้มข้นของเกลือในน้ำไม่มีผลต่อ ค่าใช้จ่ายและกระบวนการกำจัดน้ำเสียที่บำบัดแล้วมีความบริสุทธิ์สูง แต่การก่อสร้างมีค่าใช้จ่าย และใช้พลังงานสูง จำเป็นต้องใช้ผู้มีความรู้ในการดูแลระบบ การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถ แยกสารละลายออกจากน้ำได้ ใช้งานได้ดีในน้ำเสียความเข้มข้นสูง แต่ต้องหยุดระบบเพื่อฟื้นฟู

สภาพเรซินทำให้มีน้ำเสียเกิดจากการฟื้นฟูสภาพเรซินและต้องนำไปบำบัดต่อ ระบบออสโมซิสผันกลับสามารถรองรับอัตราการไหลได้สูง มีประสิทธิภาพในการกำจัดโซเดียมคลอไรด์สูง แต่เมมเบรนที่ใช้มีราคาสูงและอายุการใช้งานต่ำอาจต้องหยุดการเดินระบบเมื่อน้ำเกลือมีความขุ่นสูง (Binglun Chen et al., 2018) น้ำที่จะเข้าระบบต้องบำบัดขั้นต้นเพื่อกำจัดอนุภาคแขวนลอย และอนุภาคละลายน้ำเพื่อยืดอายุการใช้งานระบบ การเติมลงในใช้ได้ดินวิธีนี้ประหยัดค่าใช้จ่าย แต่น้ำเกลือที่สูบลงใต้ดินอาจปนเปื้อนแหล่งน้ำใต้ดินทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเซลล์อิเล็กโทรไลต์ใช้หลักการทางไฟฟ้าเคมีในการบำบัดทำให้ใช้พื้นที่น้อยและเกิดผลพลอยได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Fernandez-Gonzalez C. et al., 2015) ซึ่งแต่ละแนวทางในการกำจัดมีความยุ่งยากและมีการใช้งานจริงในปัจจุบันค่อนข้างน้อย ทำให้ภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบันส่วนใหญ่มีการลักลอบปล่อยน้ำเสียลงสู่ท่อระบายน้ำ หรือออกไปพร้อมกับน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและสภาพดินเค็มได้ (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 มีประโยชน์ทางอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นเบสที่แรงจึงนำไปใช้ในการควบคุมมลภาวะที่เกิดจากกรดหรือใช้ปรับสภาวะกรดเบส เช่น ในปฏิบัติการปรับภาวะกรดของของเสียที่ได้จากโรงงานผลิตโลหะ โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังใช้ในการผลิตอะลูมิเนียม และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดประเภทต่าง ๆ

การศึกษาครั้งนี้จึงสนใจใช้ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน และการประเมินประสิทธิภาพเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยปัจจัยที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพได้แก่ การกำจัดคลอไรด์ การกำจัดของแข็งละลายในน้ำ แนวโน้มการเกิดก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจน และปัจจัยที่ประเมินเสถียรภาพของระบบคือ การสะสมของตะกอนที่ขั้วไฟฟ้า สุดท้ายระบบนี้สามารถนำก๊าซคลอรีนฆ่าเชื้อโรคในระบบประปา ก๊าซไฮโดรเจนเป็นพลังงานหมุนเวียนในโรงงานอุตสาหกรรม และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ในการปรับพีเอช สามารถลดต้นทุนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้การใช้วิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) ซึ่งมีขอบเขตการศึกษาดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นตัวแทนจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินในระบบผลิตน้ำอ่อนของภาคอุตสาหกรรม

1.3.2 การศึกษาสภาวะการเดินระบบและการออกแบบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่มีความเหมาะสม โดยแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ดังนี้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาสัมผัส และพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้า

1.3.3 ประเมินประสิทธิภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยพิจารณาจากค่าการกำจัดคลอไรด์ การกำจัดของแข็งละลายน้ำ ปริมาณการเกิดก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจน

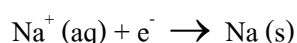
1.3.4 ประเมินความเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยพิจารณาจากคราบสะสมและการสุกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้า และการอุดตันของเยื่อกรอง

1.3.5 การเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ระยะยาวเป็นเวลา 7 วัน

## 1.4 กรอบแนวคิดงานวิจัย

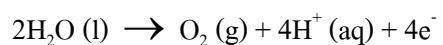
การนำน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินบำบัดด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งน้ำเสียมีองค์ประกอบหลักคือ โซเดียมคลอไรด์ เมื่อถูกบำบัดด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 1.1 ถึงสมการที่ 1.3 ซึ่งสามารถลดปริมาณของคลอไรด์และของแข็งละลาย เนื่องจากกลายเป็นก๊าซคลอรีนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นการเปลี่ยนรูปของโซเดียมคลอไรด์ตามกลไกของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

ขั้วแคโทด (ขั้วลบ) ; ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

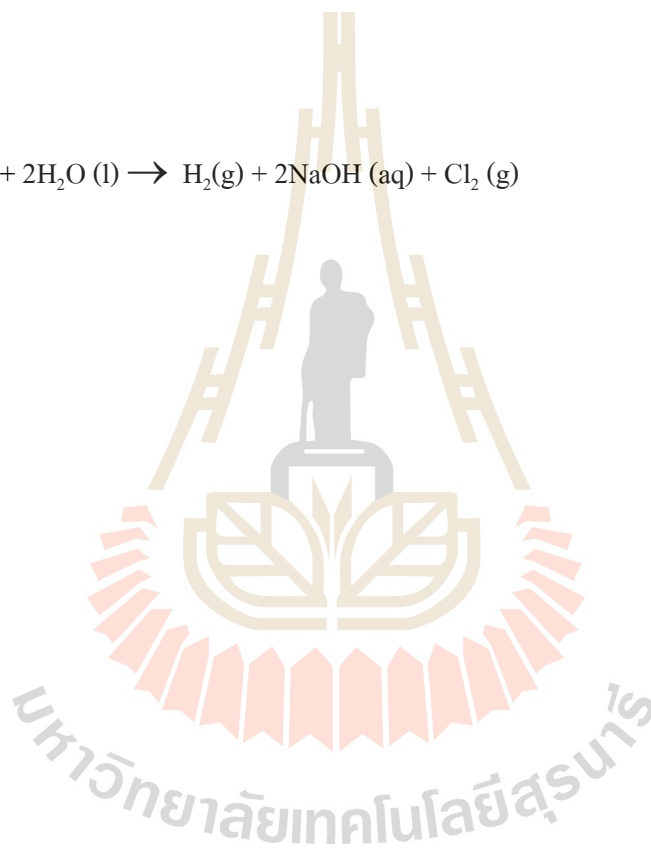
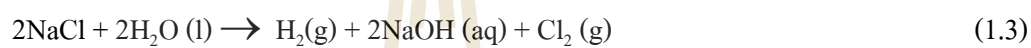




ขั้วแอโนด (ขั้วบวก); ปฏิกริยารีดักชัน



ปฏิกริยารวม





## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความต้องการน้ำอ่อนในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันน้ำอ่อนมีความจำเป็นในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ในภาคอุตสาหกรรมและเป็นส่วนหนึ่งในผลิตภัณฑ์ การใช้น้ำอ่อนในงานหม้อต้มน้ำ (Boiler) เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งต้องใช้ไอน้ำในการฆ่าเชื้อโรค เช่น น้ำตาล อาหารกระป๋อง แป้งมันสำปะหลัง อาหารกึ่งสำเร็จรูป อาหารแช่แข็ง อุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าใช้ในหม้อต้มน้ำ เพื่อนำพลังงานความร้อนมาผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในโรงงาน อุตสาหกรรมสิ่งทอใช้ในกระบวนการฟอกย้อม ผสมสีย้อม และล้างทำความสะอาดของหนัง ฝ้าย หรือผ้าทอ และห้างสรรพสินค้าหรือโรงแรมขนาดใหญ่มีความต้องการใช้น้ำอ่อนในระบบหล่อเย็นของระบบปรับอากาศแบบใช้ Chiller

##### 2.1.1 ความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม

ความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรมเป็นการหาความต้องการน้ำ เพื่อการอุตสาหกรรมของโรงงานประเภทต่าง ๆ ซึ่งมีความต้องการใช้น้ำที่แตกต่างกัน กำหนดอัตราการใช้น้ำตามประเภทของโรงงานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกเอาไว้เป็น 10 ประเภท โดยแสดงรายละเอียดอัตราการใช้น้ำของโรงงานแต่ละประเภท ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งความต้องการน้ำในอุตสาหกรรมนั้นแสดงถึงความต้องการใช้น้ำอ่อนด้วยเช่นกัน เนื่องจากในกระบวนการผลิตของแต่ละอุตสาหกรรมมีความจำเป็นต้องใช้หม้อต้มน้ำ (Boiler) และในอุตสาหกรรมอาหารน้ำอ่อนสามารถเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่ามีความต้องการใช้น้ำสูงสุด

การประเมินอัตราการใช้น้ำอุตสาหกรรมสามารถประเมินโดยใช้หน่วยผลิตภัณฑ์ที่โรงงานทำการผลิต ซึ่งจำแนกตามประเภทกิจการรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งจากตารางพบว่าน้ำอ่อนมีความจำเป็นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตของแต่ละอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหารมาก โดยใช้ในกิจกรรมการทำความสะอาดวัตถุดิบ ส่วนผสมของอาหารและในกระบวนการผลิตของเครื่องจักรอุตสาหกรรมหล่อเหล็กต้องใช้น้ำอ่อนในการทำมาสะอาดชิ้นงาน เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 อัตราการใช้ไฟฟ้าตามประเภทของโรงงาน (สำนักนโยบายสาธารณะ, 2547)

ประเภท	รายละเอียดประเภทอุตสาหกรรมหลัก	ปริมาณความต้องการ (ลบ.ม./ไร่/วัน)
Accessory	อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์ต่าง ๆ	6.00
Chemical	อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์	8.00
Food	อุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม	12.00
Other	อุตสาหกรรมทั่วไป	7.00
Outside	อุตสาหกรรมกลางแจ้ง เช่น โม่-บดหิน คูตทราย เผล่า่าน หีบฝ้าย อบเมล็ดพืช ฯลฯ	4.00
Paper	อุตสาหกรรมกระดาษ เช่น ผลิตเยื่อกระดาษ ภาชนะ กระดาษ	4.00
Textile	อุตสาหกรรมสิ่งทอ ฟอกหนัง ย้อมสี	5.00
Unmetal	ผลิตภัณฑ์โลหะ เช่น แก้ว ระเบิดเกลืออบ ปูน ฯลฯ	8.00
Wood	ผลิตภัณฑ์ไม้ เครื่องเรือน	3.00

ตารางที่ 2.2 อัตราการใช้ไฟฟ้าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ

(กรมควบคุมมลพิษ, 2540; บริษัท ซีเอ็มเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์ แมเนจเมนท์ จำกัด)

กิจการ	อัตราการใช้ไฟฟ้าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ (ลบ.ม./ตัน)
ไก่อัดแช่แข็ง	17.73
ไส้กรอง, เนื้อปลาหมัก	157
กุนเชียง, แหนม, ไส้กรอง, หมูขย, ลูกชิ้น	16.75
ผักหรือผลไม้กระป๋องปิดสนิท	19.46
ผลิตภัณฑ์นมพร้อมดื่ม	3.38
ผลิตภัณฑ์นมผง	9.87
ไอศกรีมที่เกี่ยวกับนมหรือน้ำนม	46.95

ตารางที่ 2.2 อัตราการใช้ไฟฟ้าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ (ต่อ)

(กรมควบคุมมลพิษ, 2540; บริษัท ซีเอ็มเอส เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด)

กิจการ	อัตราการใช้ไฟฟ้าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ (ลบ.ม./ตัน)
ผัก, ผลไม้แช่แข็ง	28.95
ผัก, ผลไม้กระป๋อง	5.98
ผลิตแป้งมันสำปะหลัง	15.81
แป้งข้าวโพด, ข้าวเจ้า, ข้าวเหนียว	1.19
ผลิตวุ้นเส้น, แป้งถั่วเขียว	36.19
ข้าวเกรียบ	33.33
ขนมปังกรอบ	11.89
น้ำตาลทราย	8.65
ผลิตเครื่องดื่ม (ชา, กาแฟ, น้ำบ๊วย)	0.52
ซีอิ๊ว, เต้าเจี้ยว, ซอสปรุงรส	1.69
น้ำปลา	1.56
ผลิตสุราจากกากน้ำตาล	21.20
ผลิตเบียร์	3.33
เครื่องดื่มบรรจุขวด	6.99
ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด	534.67
ทอผ้าขนสัตว์	1.76
ผลิตเยื่อกระดาษฟอกขาว	18.04
รีด หล่อ และหลอมโลหะ	3.63

### อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีความต้องการใช้น้ำอ่อนปริมาณมากกว่า 200 ลบ.ม ต่อวัน สำหรับป้อนเข้าหอผึ่งเย็น (Make-up water) โดยน้ำจะหมุนเวียนอยู่ในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (Condenser) ของเครื่องทำความเย็น (Chiller) ที่ใช้ในระบบปรับอากาศของโรงงานได้ 3 - 5 รอบ โดยน้ำอ่อนจะต้องมีคุณสมบัติไม่ก่อให้เกิดตะกรันและการกัดกร่อนภายในเส้นท่อน้ำมากเกินไป เพื่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี (โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง ตั้งอยู่ที่ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี)

### อุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร

การใช้น้ำอ่อนในกระบวนการผลิตมีหลายขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 2.3 และจากการศึกษาในโรงงานตัวอย่างที่มีกำลังการผลิต 8.66 ตันต่อวัน พบว่ามีการใช้น้ำสูงในการล้างวัตถุดิบ กระจกเปล่าและบริเวณพื้นที่ปฏิบัติงาน การใช้พลังงานความร้อนในการปรุงอาหารและการฆ่าเชื้อโรคนั้นเป็นหัวใจสำคัญของกระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง โดยพลังงานความร้อนที่ใช้จะอยู่ในรูปไอน้ำ ปริมาณไอน้ำที่ใช้ในการนึ่งฆ่าเชื้อประมาณ 290 กิโลกรัมต่อตัน ปลากระป๋อง (UNEP, 2000; กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิตปลากระป๋อง

(UNEP, 2000; กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

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

### อุตสาหกรรมฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมมีความต้องการใช้น้ำอ่อนในการผสมสีที่ใช้ย้อมและล้างหลังการย้อม น้ำที่ใช้ในหม้อน้ำหรือน้ำที่ใช้ในระบบหล่อเย็นปริมาณ 1,000 ลบ.ม ต่อวัน โดยน้ำอ่อนใน แต่ละโรงงานจะมีค่ามาตรฐานต่างกันขึ้นอยู่กับนำไปใช้งานในแต่ละกระบวนการผลิต ส่วนของกระบวนการฟอกย้อมผ้าสามารถมีความกระด้างได้ไม่เกิน 10 mg/l as CaCO<sub>3</sub> แต่ในกระบวนการหม้อต้มน้ำไม่ต้องการความกระด้างอยู่ในน้ำ (สำนักเทคโนโลยีน้ำและสิ่งแวดล้อม, 2553)

## 2.2 การผลิตน้ำอ่อนด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน

### 2.2.1 หลักการ

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยกโลหะออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกจับโดยสารแลกเปลี่ยนไอออนหรือเรซิน (Resin) ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์เรซินมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามเป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย การแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า “แคตไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation exchanger)” ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ เรียกว่า “แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion exchanger)” กระบวนการผลิตน้ำอ่อน (Soft water) อีออนในน้ำทำการแลกเปลี่ยนประจุกับเรซินที่ใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยน โดยโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) 2 ไอออน จะแลกเปลี่ยนประจุกับ 1 ไอออนของ แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) หรือ 1 ไอออนของแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) น้ำที่ผ่านเรซินสำหรับทำน้ำอ่อนจะมี โซเดียมซัลเฟต โซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมคลอไรด์ และความกระด้างอีกเล็กน้อยปนออกมา เมื่อมีการฟื้นฟูสภาพด้วยเกลือแกงจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ โดย 2 ไอออนของโซเดียมจะเข้าไปจับกับเรซินและเรซินจะปลดปล่อยไอออนของแคลเซียม ออกมา 1 ไอออน น้ำทิ้งที่ออกมาจากการฟื้นฟูสภาพเรซินจะมีส่วนประกอบของเกลือแกง ( $\text{NaCl}$ ), แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) และแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ ) เรซินประเภทโซเดียมฟอร์ม (Sodium form) จะไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ครบ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2 เป็นกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนของน้ำกระด้างกับตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออน ฉะนั้นการผลิตน้ำอ่อนด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนนี้ น้ำกระด้างจะไหลผ่านถึงที่บรรจุด้วยสารแลกเปลี่ยนไอออน ส่วนไอออนที่ทำให้เกิดความกระด้างในน้ำจะแลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่บนสารแลกเปลี่ยนไอออน

สมการการฟื้นฟูสภาพเรซิน



วิธีนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในภาคอุตสาหกรรมและพาณิชย์กรรม เนื่องจากใช้พื้นที่ติดตั้งระบบต่ำ ควบคุมง่าย และสามารถกำจัดน้ำกระด้างให้หมดไปหรือมีค่าต่ำ ๆ ได้ เรซินธรรมชาติที่นิยมใช้งานคือ ซีโอไลต์ ซึ่งเป็นเรซินแบบกรดอ่อน นิยมใช้ตัวแลกเปลี่ยนไอออนในรูป

ของโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) โดยโซเดียมไอออนจะถูกแทนที่ด้วยแคลเซียมหรือแมกนีเซียมไอออนในเรซิน เมื่อใช้งานเรซินไปสักระยะก็จะมีแต่ไอออนของแคลเซียมหรือแมกนีเซียมเกาะอยู่บนผิวของซีโอไลต์จึงทำให้ประสิทธิภาพของเรซินลดลงและต้องมีการฟื้นฟูสภาพเรซินโดยใช้เกลือแกง ( $\text{NaCl}$ ) เข้มข้น 8 - 15% ซึ่งในกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินจะทำให้เกิดน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์สูงถึง 40,000 - 150,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Ksayer et al., 2012) ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องใช้จ่ายเงินจำนวนหนึ่งเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการนี้ ด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนมีความสามารถในการกำจัดสารเจือปนต่าง ๆ รวมถึงโลหะหนักที่อยู่ในรูปละลายน้ำ แต่ไม่เหมาะสมกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงมาก ๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายอีกทั้งก่อนที่น้ำเสียจะเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจำเป็นต้องมีการกำจัดสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันในถังปฏิกิริยา จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การใช้การแลกเปลี่ยนไอออนเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างมากกว่า 50% ซึ่งน้ำกระด้างเป็นสาเหตุของปัญหาการอุดตัน เนื่องจากตะกอนเกิดขึ้นในระบบท่อทำให้เกิดปัญหาในเรื่องอายุการใช้งานของอุปกรณ์และเครื่องจักรลดลง จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์และเครื่องจักรเหล่านั้นมากขึ้นและส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำลดลง นอกจากนี้คราบตะกอนที่เกิดขึ้นยังสามารถส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่ใช้ในระบบอีกด้วย ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้มากขึ้น

จากกรณีศึกษาการผลิตของโรงงานฟอกย้อมแห่งหนึ่ง พบว่ามีปริมาณน้ำทิ้งจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินทั้งหมด 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 ในการฟื้นฟูสภาพเรซินนั้นพบว่าเกิดน้ำเกลือ 1,452 แกลลอน และมีความกระด้าง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 2.3 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน

ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินมีการการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ของแข็งละลายน้ำ โดยเฉพาะโซเดียมไอออนที่เกิดจากขั้นตอนการล้างเรซิน เนื่องจากใช้สารเคมีที่นิยมใช้สำหรับการฟื้นฟูสภาพเรซินจะมีคลอไรด์ความเข้มข้นสูงออกมากับน้ำเสีย รวมถึงไอออนต่าง ๆ ที่เป็นเหตุทำให้น้ำเกิดความกระด้างรวมอยู่ด้วย ดังตารางที่ 2.4 แสดงลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินทำให้ทราบลักษณะทางเคมีของน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการผลิตน้ำอ่อนด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน ลักษณะของน้ำเสียที่ออกมามีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูงเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง



ของกรมควบคุมมลพิษคือ ค่าของแข็งละลายน้ำต้องไม่เกิน 3,000 mg/l (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) จึงจำเป็นต้องบำบัดเพื่อลดค่าของแข็งละลายน้ำเพิ่มเพื่อลดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากของแข็งละลายน้ำมีโซเดียมไอออน คลอไรด์ไอออนปนเปื้อนอยู่ค่าเหล่านี้มีฤทธิ์ของความเค็มส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ และส่งผลต่อสภาพของดินเมื่อปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอาจเกิดภาวะดินเค็ม ทำให้ไม่สามารถใช้ดินในการเพาะปลูกพืชอาหารได้ จึงสนใจในการลดค่าของแข็งละลายน้ำด้วยระบบอิเล็กโทรไลติกเป็นวิธีการทางเคมีไฟฟ้า โดยมีส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเครื่องจ่ายไฟฟ้าไอออนประจุบวก พวกแคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม ควรบำบัดก่อนเข้าระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากไอออนบวกของน้ำเสียอาจทำปฏิกิริยากับขั้วแคโทด ในระบบจนเกิดคราบตะกอนเกาะอยู่ที่ขั้วทำให้ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดจะทำกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลง

น้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินจากการผลิตน้ำอ่อนมีลักษณะเป็นน้ำเค็มมีความเข้มข้น 241 กรัมต่อลิตร ความกระด้างประมาณ 47 กรัมต่อลิตร เมื่อปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำการสำรวจเก็บน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดนครราชสีมาพบว่า ลักษณะน้ำเสียมีความเค็มสูงเช่นกันดังตารางที่ 2.4 และมีค่าความกระด้างสูงเพราะฉะนั้นจึงควรบำบัดน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซิน จากการศึกษาของ (A.Hayani et al, 2016) เป็นลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินจากการผลิตน้ำอ่อน โดยใช้น้ำกร่อยสังเคราะห์จากการทดลองการผลิตน้ำอ่อนโดยใช้เรซินชนิด Duolite 206A สามารถกำจัดแคลเซียม ไอออนได้ร้อยละ 63 - 70 และกำจัดแมกนีเซียมได้ร้อยละ 54-5 ในการฟื้นฟูสภาพเรซินจะใช้น้ำเกลือเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

จากการสำรวจและทบทวนวรรณกรรมลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินพบว่า โรงงานอุตสาหกรรมทั้ง 3 แห่ง ในจังหวัดนครราชสีมา และ EPA 1974 มีค่าของแข็งละลายน้ำสูงซึ่งเกิดจากการใช้น้ำเกลือเข้มข้นในกระบวนการล้างเรซินโดยความเข้มข้นประมาณร้อยละ 8 - 10 ซึ่งจากค่าคลอไรด์แสดงถึงความเข้มข้นของน้ำเกลือที่ใช้ในแต่ละโรงงาน พบว่า โรงงานแปรรูปอาหารมีค่าคลอไรด์ต่ำกว่าโรงงานอื่น และต่ำกว่าค่าน้ำเกลือเข้มข้นของโรงงานที่กำหนดใช้งานคือน้ำเกลือเข้มข้นร้อยละ 8 ซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากผู้ดูแลระบบเนื่องจากขั้นตอนการเตรียมน้ำเกลือไม่ได้เป็นระบบอัตโนมัติใช้ผู้ดูแลระบบเตรียมน้ำเกลือ ส่วนค่าความกระด้างของโรงงานอุตสาหกรรมทั้ง 3 แห่ง ในจังหวัดนครราชสีมา แตกต่างกับ EPA 1974 เนื่องจากนำน้ำเสียชุมชนที่มีค่าความกระด้างสูงมาบำบัดด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออนและใช้น้ำเกลือเข้มข้นร้อยละ 10 - 16 ในการฟื้นฟูสภาพเรซินจึงทำให้น้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินมีค่าความกระด้างสูง จากการศึกษา (Hayani A. et al., 2016) ผลิตน้ำอ่อนโดยใช้น้ำกร่อยที่มีค่าความกระด้างเริ่มต้น 810 mg/l as CaCO<sub>3</sub> และใช้น้ำเกลือเข้มข้นร้อยละ 10 ในการฟื้นฟูสภาพเรซินโดยใช้เรซินกรดแก่ชนิด Duolite 206A

จึงทำให้น้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินมีค่าความกระด้างสูง จากคุณลักษณะน้ำที่นำมาใช้ผลิตน้ำอ่อน และประเภทการนำน้ำอ่อนไปใช้งาน เมื่อทำการฟื้นฟูสภาพเรซินน้ำเสียที่ออกมาจึงมีค่าความกระด้างที่ต่างกัน จึงเลือกใช้ลักษณะน้ำเสียของโรงงานน้ำดื่มบรรจุขวดเป็นตัวแทนลักษณะน้ำเสียในการทดลอง เนื่องจากค่าคลอไรด์ใกล้เคียงกับโรงงานอื่นและน้ำเกลือเข้มข้นอยู่ในช่วง 8 - 10

ตารางที่ 2.4 ลักษณะน้ำเสียจากระบวนการการฟื้นฟูสภาพเรซิน

พารามิเตอร์	EPA, 1974	A. Hayani et al., 2016
	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน
Total dissolved solids (mg/l)	-	-
NaCl (mg/l)	241,000	10,000
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	147,853	6,135
Total hardness (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	4,700	2,885
Ca <sup>2+</sup> (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	43,000	2,048
Mg <sup>2+</sup> (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	4,000	837
pH	-	-

## 2.4 วิธีการบำบัดน้ำเค็ม

น้ำเกลือที่ออกจากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเกิดขึ้นในขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพเรซิน ซึ่งเป็นตัวกลางที่ใช้สำหรับปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ เมื่อเรซินถูกใช้งานไประยะเวลาหนึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างลดลงจึงจำเป็นต้องได้รับการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยน้ำเกลือ ความเข้มข้นร้อยละ 8 - 15 ทำให้เกิดน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์สูงถึง 40,000 - 150,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (U.S Department of the Interior, 2002) ทำให้น้ำเสียที่ออกจากระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินมีความเค็มสูง ดังนั้นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีความเค็มสูงจึงมีความจำเป็น ในปัจจุบันวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อน การกรองผ่านเยื่อ และเซลล์ไฟฟ้า เป็นต้น

### 2.4.1 วิธีการใช้ความร้อน

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)” ซึ่งมีความดันอากาศต่ำกว่าความดันบรรยากาศเป็นผลให้น้ำเกิดการเดือดอย่างรวดเร็ว และเกิดเป็นไอน้ำและหยดลงมาที่ถาดรองรับ วิธีกำจัดเกลือออกจากน้ำโดยเทคนิคการใช้ความร้อนแบบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตน้ำดื่มและใช้สำหรับการแยกเกลือจากน้ำทะเลในขั้นต้น โดยมีการใช้มาแล้วกว่า 30 ปี (Garcia-Rodriguez and Gomez-Camacho, 1999)

#### 2.4.1.2 MED-Multi-Effect Distillation

ระบบกำจัดน้ำเกลือแบบ MED เป็นระบบใหญ่ที่ใช้กระบวนการระเหย มีความคุ้มค่าและประหยัดกว่าระบบกำจัดน้ำเกลือในระบบใช้ความร้อนแบบอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของระบบคาดว่าระบบนี้ได้รับความนิยมในอนาคตมากกว่าระบบ 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	การก่อสร้างระบบมีค่าใช้จ่ายสูงต้องใช้พลังงานสูง และเกิดการกัดกร่อนในระบบ
ต้องการระบบบำบัดน้ำก่อนเข้าระบบน้อยใช้สารเคมีต่ำ	น้ำที่ออกจากระบบมีอุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบลดอุณหภูมิก่อนที่จะใช้เป็นน้ำดื่ม
สามารถใช้ร่วมกับระบบอื่นได้ ระบบใช้ผู้ควบคุมน้อย	ประสิทธิภาพต่ำ แต่สูงกว่าระบบ MSF

#### 2.4.1.3 VC-Vapor Compression Distillation

วิธีการกำจัดเกลือออกจากน้ำด้วยกระบวนการนี้ โดยปกติแล้วจะใช้ร่วมกับกระบวนการอื่น ๆ (เหมือนกับ MED) ระบบมีขนาดตั้งแต่เล็ก - ขนาดกลาง ความร้อนที่ใช้สำหรับการระเหยน้ำออกจากน้ำเกลือ โดยส่วนใหญ่ได้มาจากไอน้ำมากกว่าไอน้ำที่มาจากหม้อต้มน้ำ ระบบกำจัดเกลือด้วยวิธีนี้ได้รับการออกแบบเพื่อลดจุดเดือดของน้ำโดยการลดความดันของระบบให้ต่ำกว่าบรรยากาศ (Reali, 2007)

ตารางที่ 2.7 ข้อดีและข้อเสียระบบ VC-Vapor Compression Distillation

ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบมีขนาดเล็กใช้ปริมาณสารเคมีในการบำบัดขั้นต้นน้อย	การเดินระบบเริ่มต้นมีความยุ่งยาก
ค่าใช้จ่ายต่ำในการเดินระบบ และบำรุงรักษาต่ำ	ระบบจำเป็นต้องใช้คอมเพรสเซอร์ขนาดใหญ่ และมีราคาแพง
ประสิทธิภาพระบบดีกว่าระบบ MSF และ MED	-
น้ำที่ออกจากระบบมีความบริสุทธิ์สูงและใช้พลังงานต่ำ	-

ซึ่งวิธีการใช้ความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานแสดงดังตารางที่ 2.5 - 2.7 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูงและพลังงานที่ใช้ในระบบสูง ประสิทธิภาพในการกำจัดปานกลาง จึงไม่เหมาะกับอุตสาหกรรมที่มีต้นทุนต่ำในการสร้างระบบบำบัด

#### 2.4.2 วิธีแลกเปลี่ยนประจุ

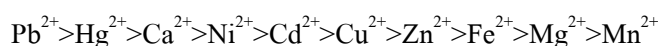
วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) เป็นกระบวนการที่ไอออนในสารละลายดูดติดที่ผิวของของแข็ง โดยมีการแลกเปลี่ยนกับไอออนต่างชนิดกันแต่มีขั้วเดียวกัน เช่น การแลกเปลี่ยนระหว่างแคลเซียมไอออนกับโซเดียมไอออน เป็นต้น หรืออาจนิยามความหมายอีกอย่างคือ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน หมายถึง การที่ไอออนหนึ่งแทนที่โดยไอออนต่างชนิดกันที่มีอยู่ก่อนเดิมที่ผิวของของแข็ง (Qasim et al., 2000) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจะใช้ในกระบวนการทำน้ำอ่อน (Soft water) และน้ำปราศจากไอออน (Demineralized water) โดยน้ำอ่อนหมายถึง น้ำที่ความกระด้าง (Hardness) ต่ำกว่า 10 mg/l as CaCO<sub>3</sub> ซึ่งเกิดจากไควาเลนซ์ไอออนที่ปนอยู่ในน้ำ เช่น แคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออน เป็นต้น ส่วนน้ำปราศจากไอออน หมายถึง น้ำบริสุทธิ์ที่ถูกล้างไอออนทั้งหมดที่อยู่ในน้ำทั้งไอออนบวกและลบออกหมดแล้ว

ตัวกลางที่ใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ได้แก่ เรซิน (Resin) ซึ่งเป็นโพลิเมอร์สังเคราะห์ เรซินที่ใช้ในปัจจุบันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น เรซินประจุบวกหรือแคทไอออนเรซิน (Cation resin) จะใช้งานในการดึงไอออนประจุบวกออกจากน้ำ เรซินประจุลบหรือแอนไอออน (Anion resin) จะใช้ดึงไอออนลบออกจากน้ำ เช่น การผลิตน้ำปราศจากไอออน (Demineralized water) จึงจำเป็นต้องใช้ทั้งเรซินประจุบวกและลบ เพื่อทำการดึงไอออนทั้งหมดออกจากน้ำ นอกจากนี้การใช้งานเรซินแต่ละประเภทเราต้องพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของไอออนที่เราต้องการกำจัดอีกด้วย เนื่องจากความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแต่ละชนิดจะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับประจุที่ติดอยู่บนผิวของตัวกลางก็คือที่เรียกว่า “ความชอบการจับประจุของเรซิน” โดยสามารถจำแนกความชอบในการจับติดผิวเรซินของไอออนชนิดต่าง ๆ ดังนี้

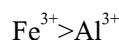
##### Monovalent Cation



##### Divalent Cation

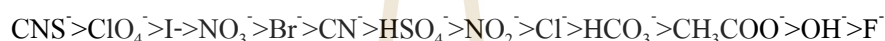


### Trivalent Cation



จากคุณสมบัติของการเลือกจับไอออนพบว่า หากเราต้องการกำจัดหรือดึงโซเดียมไอออนออกจากน้ำ การเลือกเรซินที่เหมาะสมจึงเป็นเรื่องสำคัญสำหรับการจับคลอไรด์ที่อยู่ในน้ำ จำเป็นต้องพิจารณาถึงความชอบในการดักจับเรซินประกอบด้วยเช่นเดียวกัน

### Anion Resin



ตารางที่ 2.8 ข้อดีและข้อเสียวิธีแลกเปลี่ยนประจุ (Ion - Exchange)

ข้อดี	ข้อเสีย
สามารถแยกสารละลายออกจากน้ำได้ จึงสามารถดึงไอออนโลหะราคาแพงออกจากน้ำได้	เกิดน้ำเสียที่มีความเค็มสูงและต้องนำไปกำจัดต่อ
ใช้งานในความเข้มข้นสูง	มีไอออนบางส่วนไม่สามารถกำจัดได้
ระบบสามารถนำตัวกลางกลับมาใช้ใหม่	ต้องหยุดระบบเพื่อฟื้นฟูสภาพตัวกลางและมีน้ำเสียเกิดจากการฟื้นฟูสภาพเรซิน
ใช้งานในน้ำความเข้มข้นสูง	-

การใช้วิธีแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัดความเค็มออกจากน้ำนั้นถือเป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากกระบวนการนี้ใช้เพียงการดึงคลอไรด์และโซเดียมออกจากน้ำดื่มที่ผิวของตัวกลางคือ เรซิน ซึ่งจำเป็นต้องมีการบำบัดคลอไรด์และโซเดียมอีกเช่นเดิม เมื่อเรซินที่ใช้หมดสภาพ (Exhausted) เหมือนกับกระบวนการกำจัดไดวาเลนซ์ไอออนออกจากน้ำ ในกระบวนการผลิตน้ำอ่อนที่จะมีน้ำเสียปนเปื้อนคลอไรด์ออกมาจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วย



### 2.4.3 วิธีเยื่อกรอง

เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane technology) เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อกรองเพื่อแยกสารทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น กระบวนการนี้ถูกค้นพบมานานกว่า 30 ปี และได้พัฒนาขึ้นตามลำดับสำหรับในประเทศไทยในปัจจุบันยังมีการประยุกต์ใช้กระบวนการเยื่อกรองไม่มากนัก ส่วนมากเป็นกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse osmosis) ในการผลิตน้ำสะอาดจากน้ำบาดาล เพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น สำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam generator) และในกระบวนการผลิตบางอย่างที่ต้องการน้ำที่มีความบริสุทธิ์ เช่น อุตสาหกรรมยา และการเตรียมสารเคมี เป็นต้น ปัจจุบันเริ่มมีการใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งตลอดจนมีการใช้กระบวนการบำบัดควบคู่กับเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration membrane) และเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration membrane) ในกระบวนการกรองผ่านเยื่อกรองจะมีบทบาทที่สำคัญในด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น เพราะนอกจากจะสามารถใช้บำบัดน้ำเสียเพื่อลดมลพิษแล้ว ยังมีศักยภาพสำหรับการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ซึ่งเป็นสิ่งที่น่าสนใจ สำหรับกระบวนการกรองที่ใช้เยื่อกรองเพื่อแยกสารหรือเพิ่มความเข้มข้นหรือทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น หลักกระบวนการนี้จำเป็นจะต้องมีแรงดันหรือการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าที่ทำให้ของผสมหรือสารละลายไหลผ่านเยื่อกรอง โดยเยื่อกรองจะมีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารหนึ่งมากกว่าอีกสารหนึ่ง (Semi-permeable/Permeable selective) เยื่อกรองจะมีทั้งที่ผลิตจากสารอินทรีย์ โดยส่วนใหญ่จะเป็นโพลีเมอร์และสารอนินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเซรามิก เช่น Polyvinylidenedifluoride (PVDF), Polysulfone (PSC), Cellulose Acetate (CA), 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) ในการประยุกต์ใช้เยื่อกรองสำหรับแยกอนุภาคและโมเลกุลนั้นจะต้องมีการพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสมและตรงตามคุณสมบัติ ดังตารางที่ 2.10 ซึ่งพบว่า การจะกำจัดค่าคลอไรด์นั้นต้องใช้เมมเบรนในระดับออสโมซิสผันกลับเท่านั้น



ตารางที่ 2.9 ข้อดีและข้อเสียวิธีเยื่อกรอง (Membrane technology)

ข้อดี	ข้อเสีย
การก่อสร้างระบบรวดเร็วและราคาไม่สูง มีองค์ประกอบของระบบน้อย วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นพลาสติก เติมน้ำไม่ยุ่งยาก	เมมเบรนที่ใช้ในระบบมีราคาสูง และอายุการใช้งานต่ำประมาณ 2 - 5 ปี
รองรับอัตราการไหลได้สูงประมาณ 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 เปรียบเทียบชนิดเยื่อกรองเมมเบรน

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

วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro - Chemical techniques) เป็นกระบวนการแยกสารอิเล็กโทรไลต์โดยการผ่านไฟฟ้ากระแสตรงลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์นั้น โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ผ่านลงไปในเซลล์ต้องเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (D.C.) คือ กระแสอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ ส่วนขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์นี้นิยมใช้ขั้วเฉื่อยเพราะถ้าใช้ขั้วว่องไวขั้วอาจจะมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีก็ได้ โดยส่วนประกอบที่สำคัญของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) ประกอบด้วย 1) แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก 2) ขั้วไฟฟ้า และ 3) สารละลายอิเล็กโทรไลต์

แนวทางการกำจัดน้ำปนเปื้อนคลอรีนความเข้มข้นสูงของโรงงานเพื่อให้สามารถลดค่าคลอรีนในน้ำได้อย่างแท้จริง และสามารถนำผลพลอยได้จากกำจัดคลอรีนในน้ำมาใช้ประโยชน์ ซึ่งวิธีทางไฟฟ้าเคมีเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ ในปัจจุบันมีการผลิตแก๊สคลอรีนและโซเดียมคลอรีนในเชิงอุตสาหกรรม โดยใช้น้ำเกลือเข้มข้นหรือน้ำทะเลเป็นวัตถุดิบ เช่น อุตสาหกรรมผลิตก๊าซคลอรีน และ โซดาไฟ (Chlor - Alkali Industry) การผลิตคลอรีน - แอลคาไล โดยระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ หมายถึงการผลิตคลอรีน และ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟ โดยใช้ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์วิธีใช้ในอุตสาหกรรมมากกว่าร้อยละ 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)

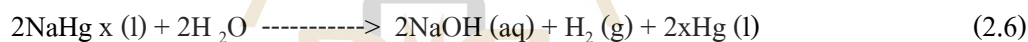
##### 2.4.4.1 Diaphragm cell process

Diaphragm cell process เป็นเซลล์ไฟฟ้าที่มีไดอะแฟรมที่ทำจากแร่ใยหิน (Asbestos) กั้นระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด โดยไดอะแฟรมนี้ยอมให้สารละลายเกลือไหลผ่านจากแอโนดไปยังขั้วแคโทดและป้องกัน Side reaction โดยเมื่อใส่เกลือลงในด้านของขั้วแอโนดแล้วก็มีกระบวนการระเหยเพื่อให้ได้แก๊สคลอรีนที่ขั้วแอโนด ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเคลื่อนไปที่ขั้วแคโทดเกิดขึ้นเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดย Diaphragm cell จะสร้าง Cell liquor ที่ประกอบด้วย NaOH 12 - 14% โดยน้ำหนัก และ NaCl ความเข้มข้นใกล้เคียงกันจากนั้น Cell liquor นี้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการระเหยคลอรีนอีก 3 - 4 กระบวนการ จนความเข้มข้นของ NaOH ประมาณ 50% โดยน้ำหนัก ส่วนเกลือที่เหลือจะถูกทำให้ตกตะกอนและกรองเก็บไว้เพื่อนำมาใช้ใหม่ กระบวนการนี้ผลิตโซดาไฟที่มีคุณภาพต่ำที่สุดในทั้ง 3 วิธีที่ใช้วิธีการแยกทางไฟฟ้า โดยปกติจะเรียกว่า

“Diaphragm cell grade” รวมทั้ง “Commercial grade” หรือ “Technical grade” ซึ่งจะมีสิ่งเจือปนอยู่ก่อนข้างมากทั้งเกลือ, คลอเรต, คาร์บอเนต, ซัลเฟต เช่น มี NaCl เจือปน 1 - 1.3% โดยน้ำหนัก แต่เรายังสามารถเพิ่มคุณภาพของ Diaphragm cell grade ด้วยการนำไปตกตะกอนเกลือเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์เรียกว่า “Purified grade”

#### 2.4.4.2 Mercury cell process

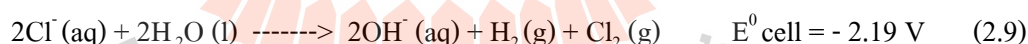
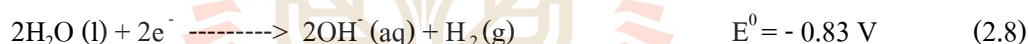
เซลล์ปรอท (Mercury cell) เซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบ Chlor - Alkali ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยขั้วแอโนด ซึ่งทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบออกไซด์ของธาตุบางชนิดและใช้ปรอทเป็นแคโทด เซลล์ปรอทเป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง วิธีผลิตโดยผ่านสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัวและบริสุทธิ์เข้าไปในเซลล์นี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขั้วแคโทดซึ่งเป็นขั้วปรอทเกิด Over voltage ของปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเป็นไฮดรอกไซด์ไอออนและแก๊สไฮโดรเจนดังนั้นปฏิกิริยารีดักชันจึงเกิดเป็น  $\text{Na}^+$  ไปเป็น Na แทน ซึ่งละลายปรอทเป็นโซเดียมอะมัลกัมที่มีความเข้มข้นประมาณ 5% โดยมวล สมการที่ 2.6 เมื่อโซเดียมอะมัลกัมถูกแยกออกจากกัน โดยผ่านน้ำบริสุทธิ์เข้าไปโซเดียมจะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 2.6



ปรอทเหลวสามารถถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในเซลล์อิเล็กโทรไลต์นี้ได้ ส่วนแก๊สไฮโดรเจนลอยออกสู่ด้านบนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้มีความเข้มข้นประมาณ 50% โดยมวล และปรอทที่ใช้บางส่วนปนกับน้ำซึ่งจากกระบวนการผลิตลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้เกิดมลภาวะทางน้ำจากกระบวนการผลิตพบว่า ปรอทสูญหายไป 200 กรัมต่อ  $\text{Cl}_2$  1 เมตริกตันที่ผลิตได้ ปรอทถูกปะปนกับน้ำซึ่งจะอยู่ในรูป  $\text{HgCl}_2$  ซึ่งจุลินทรีย์ในน้ำสามารถเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์ได้คือ ไดเมทิลเมอร์คิวรี  $((\text{CH}_3)_2\text{Hg})$  สารนี้จะสะสมในสัตว์น้ำถ้าเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ปรอทจะไปสะสมตามเนื้อเยื่อที่มีไขมันมาก ๆ เช่น ไขสมอง ส่งผลต่อการทำงานของระบบประสาทส่วนกลางทำให้เกิดความผิดปกติของระบบประสาท เช่น นอนไม่หลับ ประสาทหลอน ความจำเสื่อม และเนื่องจากร่างกายไม่สามารถทำลายหรือกำจัดปรอทได้ ปรอทที่สะสมในร่างกายจึงทำให้พิษร้ายแรง ถ้ามีสะสมในร่างกายเพียง 50 มิลลิกรัม อาจถึงตายได้ เนื่องจากการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 2 วิธีต่างก็เกิดปัญหาในด้านค่าใช้จ่ายสำหรับการทำโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้บริสุทธิ์ และการปนเปื้อนของสารพวกปรอททำให้เกิดมลภาวะจึงได้มีการพัฒนาเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบ Chlor - Alkali ใหม่เพื่อใช้ผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่บริสุทธิ์มากขึ้น

### 2.4.4.3 Membrane cell Process

เซลล์เยื่อแลกเปลี่ยนไอออน (Membrane cell) เป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบ Chlor - Alkali ชนิดหนึ่ง มีลักษณะคล้ายเซลล์ไดอะแฟรมต่างกันที่ใช้เยื่อแลกเปลี่ยนไอออนแทนไดอะแฟรมเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนทำจากฟลูออโรคาร์บอนพอลิเมอร์ มีสมบัติยอมให้เฉพาะไอออนบวก เช่น  $\text{Na}^+$  ซึ่งมีขนาดเล็กผ่านได้ ซึ่งแตกต่างจากไดอะแฟรมที่ยอมให้ทั้งไอออนบวกและไอออนลบผ่านได้ สารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัวและบริสุทธิ์ในภาชนะที่ด้านแอนโอดผ่านกระแสไฟฟ้าลงในสารละลายนี้  $\text{Na}^+$  เป็นไอออนขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนเข้าไปยังแคโทด ส่วนคลอไรด์ไอออนผ่านเยื่อและเปลี่ยนไอออนไม่ได้จะเสียดีเล็กตรอนเกิดก๊าซคลอรีนที่ขั้วแอนโอด ดังสมการที่ 2.7 ถึงสมการที่ 2.9 พบว่าไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นที่แคโทดรวมกับโซเดียมไอออนเกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจนไม่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนออกจากระบบที่ขั้วแอนโอดและแคโทด ตามลำดับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้มีความเข้มข้น 30 - 35% โดยมวล ถ้าปรับปรุงเซลล์นี้ให้มีคุณภาพดีขึ้นก็จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 40% โดยมวล



การแยกสลายสารละลายโซเดียมคลอไรด์หรือน้ำเกลือเข้มข้น (Brine) ด้วยกระแสไฟฟ้าในระดับอุตสาหกรรมนั้น มีกระบวนการผลิตหลักอยู่ 3 ชนิด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบการผลิตด้วยกระบวนการทั้งสามได้ดังตารางที่ 2.11 จะเห็นว่าการผลิตโดยใช้เซลล์ไดอะแฟรมนั้นให้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต่ำที่สุดและมีโซเดียมคลอไรด์เจือปนมากที่สุดอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การใช้ประโยชน์ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ขึ้นกับความเข้มข้นของสาร เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเซลล์ไดอะแฟรมแล้วจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการความบริสุทธิ์สูงมากได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเซลล์ไดอะแฟรมมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ปนอยู่จึงต้องนำมาระเหยตัวทำละลายออก เพื่อให้โซเดียมคลอไรด์ตกตะกอนลงมา และเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เป็น 50% การผลิตโดยใช้เซลล์ไดอะแฟรมอาจทำให้มีคลอเรตสูงถึง 0.1%

เมื่อเทียบกับเซลล์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนไอออน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเซลล์ปรอท นั้นมีความเข้มข้นอยู่ที่ 50% และสูงได้ถึง 73% เมื่อได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ออกมาแล้วต้องนำมาทำให้เย็นแล้วกรองผ่าน Activated carbon 1 - 2 ครั้ง เพื่อลดปริมาณของปรอทจนอยู่ในระดับน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเซลล์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนไอออน นั้นมีค่าความเข้มข้นประมาณ 30% และมีโซเดียมคลอไรด์ปนอยู่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และโซเดียมคลอไรด์ 5 - 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2.11 ข้อมูลเปรียบเทียบการทำงานของทั้ง 3 ระบบ

	เซลล์ไดอะแฟรม	เซลล์ปรอท	เซลล์เมมเบรน
ขั้วแคโทด	เหล็กกล้าไร้สนิม	ปรอท	เหล็กกล้าไร้สนิม, ไทเทเนียม, แพลทินัมผสม ไทเทเนียม
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 °C นั้นอิมตัวด้วยน้ำ ซึ่งสามารถลดความชื้นลงได้ด้วยการลดอุณหภูมิลงจนเหลือ 16 °C แล้วผ่านไปยัง Demisters ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กเพื่อกำจัดโมเลกุลของน้ำและเกลือออกไปผ่านแก๊สคลอรีนลงในกรดซัลฟิวริกทำการกำจัดความชื้นจากนั้นทำให้อุณหภูมิกลายเป็นของเหลว โดยการลดอุณหภูมิลงจน

เกิดเป็นคลอรีนเหลว นำไปบรรจุและขนส่งต่อไปได้สำหรับแก๊สที่ไม่เกิดการควบแน่นนั้นสามารถนำไปผลิตเป็นกรดไฮโปคลอไรต์ (HCIO) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ หรืออาจนำมาทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือหินปูน เพื่อเปลี่ยนเป็นโซเดียมไฮโปคลอไรต์ หรือแคลเซียมไฮโปคลอไรต์

Sirivedhin et al. (2010) การบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนน้ำมันและก๊าซด้วย Electrodialysis (ED) วัตถุประสงค์คือ ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของ Cation/Anion - exchange membranes ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนน้ำมันและก๊าซโดยมีความเข้มข้นน้ำเกลือ ค่าของแข็งละลายน้ำและค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน นอกจากนี้การบำบัดน้ำมีเป้าหมายให้ผ่านมาตรฐานน้ำดื่ม น้ำชลประทานและมาตรฐานการรดน้ำปศุสัตว์ พบว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้ามีผลกระทบต่อ การลดค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำที่มีความเข้มข้นค่าของแข็งละลายน้ำสูงขึ้นในขณะเดียวกัน การเพิ่มขึ้นมีผลกระทบมากขึ้นในการลดค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำเช่นกัน ในน้ำที่มีความเข้มข้นค่าของแข็งละลายน้ำคล้ายกัน เวลาของการกระจายไอออนแตกต่างกัน และในการบำบัดน้ำเสียต้องใช้เวลาในการกำจัดไอออนเป็น 50% ของการแลกเปลี่ยนประจุที่แรงดันไฟฟ้า 3.0, 6.5 และ 9.8 โวลต์ มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

## 2.5 ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell)

### 2.5.1 หลักการ

ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์เป็นกระบวนการแยกสารอิเล็กโทรไลต์ โดยการผ่านไฟฟ้ากระแสตรงลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์นั้น โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ผ่านลงไปเซลล์ต้องเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (D.C.) คือ กระแสอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ ส่วนขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์นี้ นิยมใช้ขั้วเฉื่อยเพราะถ้าใช้ขั้วว่องไว ขั้วอาจจะมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ จากการศึกษา ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเช่นกัน จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าสามารถกำจัดคลอไรด์ได้ร้อยละ 98 จากเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะความต่างศักย์ไฟฟ้า 9 โวลต์ และอุณหภูมิ 55 °C (M. Sadrzadeh et al., 2008) และที่สภาวะค่าความต่างศักย์ 15 โวลต์ สามารถกำจัดค่าของแข็งละลายได้ร้อยละ 62.2 (Jie Liu et al., 2016) โดยน้ำเสียมีความเข้มข้นคลอไรด์เท่ากับ 33,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 66,800 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 20 °C จากการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาสัมผัส ซึ่งเป็นระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนในสารละลายกับอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซคลอรีน และก๊าซ



ไฮโดรเจนที่ขั้วทั้งสองในระยะเวลาสัมผัสที่ 20 นาที สามารถกำจัดโซเดียมคลอไรด์ได้ร้อยละ 98.3 (Wei Tan et al., 2016) จากน้ำเกลือเข้มข้น 33,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้าเวลาสัมผัสมากเกินไปอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้ามากเกินไปจนเกิดอันตรายถึงส่งผลกระทบต่อระบบบำบัดน้ำเสีย

## 2.5.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลติก

### 2.5.2.1 ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบทำให้เกิดปฏิกิริยาการรับหรือให้อิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้าเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือ โดยขั้วไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาลักษณะของขั้วไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพในการจ่ายกระแสไฟฟ้าและการขนส่งมวลสารมาทำปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้านั้นมีผลต่อกระแสไฟฟ้าเช่นกัน เนื่องจากไอออนของสารละลายบริเวณขั้วไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนขั้วไฟฟ้าทำให้ความเข้มข้นสารละลายลดลง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารละลายในบริเวณอื่นในเซลล์มายังบริเวณขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่ ทำให้บางช่วงเวลาบริเวณขั้วใช้กระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนที่เกิดปฏิกิริยา

### 2.5.2.2 ความเข้มข้นสารละลาย

ความเข้มข้นของสารละลายหรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถบอกถึงความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในระบบซึ่งส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือเนื่องจากทำให้ความสามารถแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือ

### 2.5.2.3 ระยะเวลาสัมผัส

เป็นเวลาในการเดินระบบโดยบริเวณขั้วไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนในสารละลายกับอิเล็กตรอน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าเมื่อมีพื้นที่ผิวมากจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น ส่วนเวลาในการเกิดปฏิกิริยามากเกินไปจะเกิดการกัดกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้าหรือภายในถังปฏิกิริยาได้ และอาจทำให้ใช้กระแสไฟฟ้ามากขึ้น อุณหภูมิในถังสูงขึ้น

### 2.5.2.4 พลังงานที่ใช้

เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินระบบทั้งหมด โดยมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์โดยตรง การทำงานของขั้วไฟฟ้าคือศักย์ภาพในการเกิดปฏิกิริยาชนิดขั้ว ระยะห่างระหว่างขั้ว การนำไฟฟ้าของสารละลาย และศักย์ภาพในการเลือกผ่านประจุของเยื่อเลือกผ่าน



### 2.5.2.5 กลไกการไหล

การไหลของสารละลายภายในเซลล์เพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยาบริเวณขั้วไฟฟ้า ต้องไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านประจุจึงเข้าไปถึงบริเวณ โดยแรงของการเคลื่อนที่ประกอบไปด้วย แรงดันน้ำ แรงเฉื่อย แรงหนืด ซึ่งมีผลต่อการขนส่งมวลสารหรือการไหลของสารละลายไปทำปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าเพื่อทำปฏิกิริยาการกำจัดเกลือ

### 2.5.3 รูปแบบถังปฏิกิริยา

กระบวนการอิเล็กโทรไลต์ เป็นการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์นั้น โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ผ่านลงไปในเซลล์ต้องเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (D.C.) คือ กระแสอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ ส่วนขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์นี้นิยมใช้ขั้วเฉื่อยเพราะถ้าใช้ขั้วว่องไว ขั้วอาจจะมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีก็ได้ โดยส่วนประกอบที่สำคัญของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) ประกอบด้วย 1) แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก 2) ขั้วไฟฟ้า และ 3) สารละลายอิเล็กโทรไลต์

#### 2.5.3.1 Bio-electrochemically assisted microbial reactor (BEAMR)

เป็นการนำจุลินทรีย์เข้ามาช่วยในการบำบัดเสียโดยช่วยย่อยสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำให้เกิดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ถึงปฏิกิริยามีปริมาตร 0.31 ลิตร จำนวน 2 ถึงมาต่อดัดกัน โดยมี Proton exchange membrane (PEM) ขนาด 3.5 ตร.ซม มาขึ้นกลางระหว่างสองถัง เพื่อช่วยในการเลือกประจุผ่านทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าดีขึ้น ลดการไหลลัดวงจรของระบบ และช่วยกันไอออนลบไม่ให้ไหลไปฝั่งขั้วแคโทด ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด มีขนาด 12 ตร.ซม และมีระยะห่างกัน 15 ซม. (Liu et al., 2005)

#### 2.5.3.2 Microbial electrolysis cell (MEC)

การบำบัดมีลักษณะเดียวกันกับแบบ BEAMR แต่ระบบ MEC จะมียลอคแก้วขนาด 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

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

#### 2.5.3.4 A Cathode on top single chamber MEC

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

#### 2.5.3.5 Microbial reverse-electrodialysis electrolysis cells (MRECs)

ถังปฏิกริยาขนาด 76.3 มล. โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนแอโนด 36 มล. ขั้วคือ Carbon brush ขนาด 2.5 ซม. ยาว 3 ซม. ส่วนแคโทด 36 มล. ขั้วคือ Titanium plated ขนาด กว้าง 3.5 ซม. ยาว 2.0 ซม. หนา 0.2 ซม. โดยมีแพลทินัมขนาด 2 ไมครอน ช่วยเร่งการเกิดปฏิกริยาที่ ผังแคโทด ส่วนตรงกลางระหว่างสองขั้วมีขนาด 4.3 มล. บริเวณนี้มีการวาง Anion and cation exchange membranes สลับกันจำนวน 10 คู่ เมมเบรนมีพื้นที่หน้าตัด 12 ตร.ซม และวางห่างกัน 0.18 มม. (Young-Hyun Songet al., 2016)

#### 2.5.3.6 Microbial electro dialysis cell (MEDC)

ถังปฏิกริยามีเมมเบรน Anion and cation exchange membranes วางกั้น ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด เพื่อแยกสารละลายที่ทำปฏิกริยาขั้วทั้งสองทำให้เกิดผลิตภัณฑ์และ ผลพลอยได้ที่สูงและระบบสามารถเดินระบบได้ประสิทธิภาพคือ 98.8% โดยขั้วแอโนดใช้ Carbon cloth (type A;E-TEK) ขั้วแคโทดใช้ Carbon cloth (type B-1B; E-TEK) มีพื้นที่ผิว 7 ตร.ซม (Mehanna et al., 2010)

### 2.5.4 ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่นำส่งอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลาย โดยมีขั้วแคโทดมีค่าเป็นลบทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกริยารีดักชัน และแอโนดมีค่าเป็นบวกทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนเกิดปฏิกริยาออกซิเดชัน ประสิทธิภาพการทำงานของขั้วทั้งสองขึ้นอยู่กับ การนำไฟฟ้าการทนการกัดกร่อนและการตกค้างของสารอื่นเมื่อทำปฏิกริยาที่ขั้วไฟฟ้า

#### 2.5.4.1 การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้า

การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าในการรับอิเล็กตรอนสามารถจากคูความแรงในการรับอิเล็กตรอนของธาตุหรือสารประกอบได้ดังตารางที่ 2.12 และตารางที่ 2.13 แสดงค่า ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแต่ละตัวในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแอโนดและไทเทเนียมเป็น ขั้วแคโทด เนื่องจากมีความสามารถในการรับอิเล็กที่ดีและการทำงานของธาตุมีความเสถียรภาพสูง สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดี นำไฟฟ้าได้ดี มีจุดเดือดจุดหลอมเหลวสูง มีราคาไม่แพง และ

ขั้วแกรไฟต์ไม่ทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าของแข็งละลายน้ำปนเปื้อนเพิ่มขึ้นจากการกัดกร่อนของขั้วเนื่องจากเป็นคาร์บอน

ตารางที่ 2.12 แรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่มาตรฐานของโลหะต่าง ๆ

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

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

ตารางที่ 2.13 แกลเวนิกซีรีส์ (Galvanic series) ของโลหะบางชนิดในน้ำทะเล

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

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

ตารางที่ 2.13 แกลแวนิกซีรีส์ (Galvanic series) ของโลหะบางชนิดในน้ำทะเล (ต่อ)

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

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

การบำบัดน้ำเกลือด้วยระบบอิเล็กโทรไลต์มีองค์ประกอบของระบบอยู่ 4 ส่วนคือ ขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เชื้อกรองเลือกผ่าน และเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จากตารางที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพทำงานของระบบมีปัจจัยในการเดินระบบขึ้นกับทางกลและทางเคมี ปัจจัยที่สำคัญคือ กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ ความเข้มข้นสารละลาย ระยะเวลาสัมผัส ขั้วไฟฟ้า จากการทบทวนวรรณกรรมในการเดินระบบเมื่อความต่างศักย์ในระบบมีแนวโน้มสูงขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งละลายน้ำสูงขึ้นเช่นกัน โดยที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์สามารถกำจัดของแข็งละลายน้ำได้ร้อยละ 82.4 โดยใช้แพทตินัมเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งแอโนดและแคโทด (Mohtada el at., 2008) แต่เมื่อใช้แพทตินัมเป็นขั้วแอโนด สแตนเลสเป็นแคโทดใช้เวลาในการเดินระบบ 5.5 ชั่วโมง สามารถกำจัดของแข็งละลายน้ำได้ร้อยละ 98.3 (V.M.Aponte el at., 2001) เนื่องจากเกิดกระบวนการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าเมื่อสารละลายโซเดียมคลอไรด์ไหลเข้าระบบ โดยมีเชื้อเลือกประจุบวกและประจุลบวางคั่นกลางระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด เมื่อโซเดียมไอออนจะไหลผ่านเชื้อเลือกผ่านประจุบวกไปฝั่งขั้วแคโทดที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันให้อิเล็กตรอนกับไฮโดรเจนไอออนของน้ำที่แตกตัวบริเวณขั้วจึงเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจน ส่วนโซเดียมไอออนไหลมาทำปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ไอออนที่แตกตัวออกจากน้ำเกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงและเข้มข้น 30 - 40 โดยมวล ส่วนที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้อิเล็กตรอนกับคลอไรด์ไอออนบริเวณขั้วจึงเกิดก๊าซคลอรีนขึ้น ไอออนในสารละลายขับเคลื่อนด้วยศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนที่ขั้วมากขึ้นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบในการกำจัดของแข็งละลายน้ำได้เช่นกัน

## 2.5.5 การกักกร่อนของขั้วไฟฟ้า

### 2.5.5.1 หลักการ

การกักกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้าโดยทำปฏิกิริยากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จึงเกิดการถ่ายเทประจุถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย โดยขั้วไฟฟ้าให้อิเล็กตรอน ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์รับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณขั้วไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดการกักกร่อนสูญเสียเนื้อโลหะของขั้วไฟฟ้า ทำให้ความต้านทานการกักกร่อนหรือความต้านทานออกซิเดชันลดลงและขั้วไฟฟ้าเสื่อมสภาพการทำงาน ซึ่งกลไกการเกิดการกักกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้าแอโนดเกิดคู่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่บริเวณต่างกับสารละลาย โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์แคโทดิก) บริเวณหนึ่งที่ขั้วแอโนดให้อิเล็กตรอนออกมาแล้วถูกใช้ที่ตำแหน่งอื่นบนพื้นผิวขั้วแอโนดเพื่อรีดิวซ์ไฮโดรเจนไอออนกลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยาครึ่งเซลล์แคโทดิก ส่วนปฏิกิริยารีดักชัน (ปฏิกิริยาแคโทดิก) ไม่ได้เกี่ยวข้องกับโดยตรงกับการกักกร่อนเนื่องจากการกักกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาแอโนดิกอย่างเดียว

### 2.5.5.2 การพิจารณาการกักกร่อน

การพิจารณาการกักกร่อนสามารถพิจารณาเบื้องต้นได้จากแรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าคือ หากมีโลหะสองชนิดสัมผัสกันและมีองค์ประกอบของเซลล์การกักกร่อนครบ คือ ขั้วไฟฟ้าแอโนด ขั้วไฟฟ้าแคโทด สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า ให้พิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าหมายถึงสามารถในการแข่งขันอิเล็กตรอน (รับ) ได้ดีจะไม่เกิดการกักกร่อน โดยปกติโลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ยากง่ายไม่เท่ากัน เมื่อสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดการถ่ายเท - รับอิเล็กตรอนเกิดขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้าที่เสียอิเล็กตรอนได้ง่าย (แอโนด)

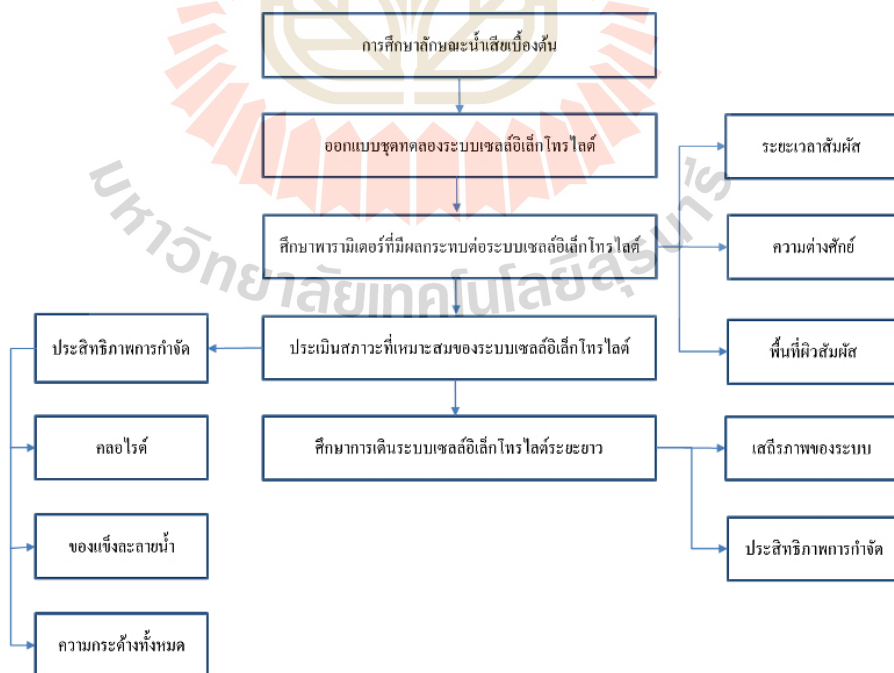
โดยพิจารณาการกักกร่อนของขั้วแอโนดดังนี้

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของสารละลาย สามารถวิเคราะห์ได้จากปริมาณไอออนที่เพิ่มขึ้นในระบบ เนื่องจากการกักกร่อนของโลหะในสารละลายที่มีการควบคุมปริมาณของสารละลายให้คงที่ไอออนบวกของโลหะที่ถูกกักกร่อนจะละลายสะสมอยู่ในสารละลายเมื่อเวลาผ่านไปและเกิดการกักกร่อนต่อเนื่องไอออนบวกของโลหะจะถูกละลายสะสมอยู่ในสารละลายมากขึ้นในสารละลาย

2) วัดความต้านทานไฟฟ้า ใช้วัดความเสียหายจากการกักกร่อนของโลหะเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเมื่อเกิดการกักกร่อนขึ้นทำให้พื้นที่หน้าตัดขั้วลดลงส่งผลให้ความต้านไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) เพื่อบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการล้างพื้นฟูสภาพเรซิน ในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินแนวทางในการเดินระบบที่มีความเหมาะสมของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เพื่อลดค่าของแข็งละลายน้ำ ค่าคลอไรด์ และแนวโน้มการเกิดก๊าซคลอรีน และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์ โดยการแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาสัมผัส และพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า ทำการประเมินประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยปัจจัยที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพ ได้แก่ การกำจัดคลอไรด์ การกำจัดของแข็งละลายน้ำ การเกิดก๊าซคลอรีน และก๊าซไฮโดรเจน และปัจจัยที่ประเมินเสถียรภาพของระบบประกอบด้วย การสะสมของตะกอนที่ขั้วไฟฟ้า และการอุดตันของเยื่อกรอง ดำเนินการวิจัยที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานตามแผนผังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย



### 3.1 การเก็บข้อมูลเบื้องต้น

การเก็บข้อมูลเบื้องต้นของลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินของโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดนครราชสีมา เพื่อศึกษาแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในน้ำเสีย โดยปกติแล้วน้ำเสียชนิดนี้ในแต่ละโรงงานมีลักษณะไม่ต่างกันมาก เนื่องจากกระบวนการล้างเรซินมีขั้นตอนเหมือนกัน ซึ่งน้ำเสียมีการปนเปื้อนของของแข็งละลายน้ำ โดยเฉพาะโซเดียมไอออน และคลอไรด์ไอออนที่เกิดจากขั้นตอนการล้างเรซิน เนื่องจากใช้สารเคมีที่นิยมใช้สำหรับการฟื้นฟูสภาพเรซินเป็นเกลือแกง (NaCl) เข้มข้น 8 - 10% จึงมีคลอไรด์ความเข้มข้นสูงปนเปื้อนออกมากับน้ำเสียรวมถึงไอออนต่าง ๆ เป็นเหตุทำให้น้ำเค็มและมีความกระด้างรวมอยู่ด้วย จากตารางที่ 3.1 ลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินจากการสำรวจเก็บข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดนครราชสีมา ทำให้ทราบลักษณะทางเคมีของน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการผลิตน้ำอ่อนด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าน้ำเสียจากขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพเรซินของโรงงานแปรรูปอาหารมีค่าของแข็งละลายน้ำและค่าคลอไรด์ต่ำกว่าโรงงานชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และโรงงานน้ำดื่มบรรจุขวด ซึ่งโรงงานทั้งสองแห่งนี้มีค่าของแข็งละลายน้ำและค่าคลอไรด์ใกล้เคียงกันคือ มีค่าของแข็งละลายน้ำมีความเข้มข้น 127,000 - 136,000 mg/l และค่าคลอไรด์มีความเข้มข้น 77,000 - 83,000 mg/l ซึ่งเกิดจากการกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันและลักษณะน้ำดิบเนื่องจากตั้งอยู่บริเวณต่างกัน และความเข้มข้นของเกลือที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซินอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากผู้ดูแลระบบ เนื่องจากขั้นตอนการเตรียมน้ำเกลือ เนื่องจากไม่ได้เป็นระบบอัตโนมัติใช้ผู้ดูแลระบบเตรียมน้ำเกลือ

ตารางที่ 3.1 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการการฟื้นฟูสภาพเรซิน

พารามิเตอร์	โรงงานชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์			โรงงานน้ำดื่มบรรจุขวด			โรงงานแปรรูปอาหาร		
	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียล้างไต้กำเนิด	น้ำเสียรวม	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียล้างไต้กำเนิด	น้ำเสียรวม	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียล้างไต้กำเนิด	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 <sub>3</sub> )	384	319	236	376	250	326	435	309	388
Ca <sup>2+</sup> (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	295	253	204	300	204	275	281	200	259
Mg <sup>2+</sup> (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	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

การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ทำการเลือกน้ำเสียสังเคราะห์จากลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซิน โดยมีค่าความเค็มเท่ากับ 82,094 mg/l ค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 136,000 mg/l ค่าความกระด้างเท่ากับ 374 mg/l ซึ่งเป็นลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินของโรงงานน้ำดื่มบรรจุขวด โดยมีวิธีเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ดังตารางที่ 3.2 โดยใช้น้ำประปาที่มีค่าความกระด้างรวมเท่ากับ 100 - 120 mg/l as CaCO<sub>3</sub> ในการเตรียมน้ำเสีย

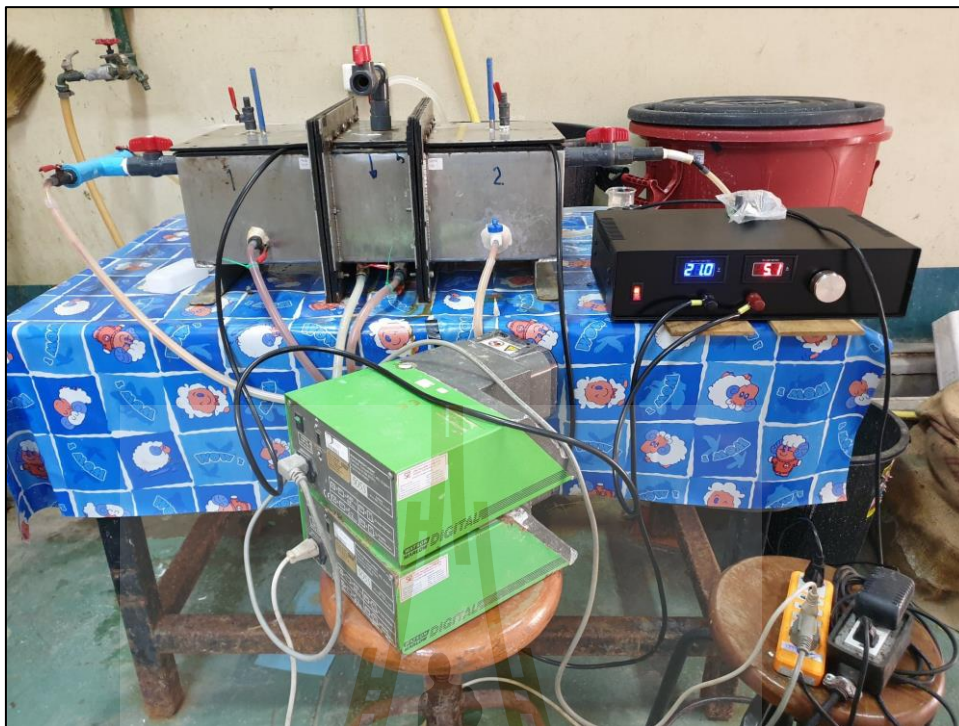
ตารางที่ 3.2 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์จากการฟื้นฟูสภาพเรซิน

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

### 3.3 ชุดทดลองระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

#### 3.3.1 ส่วนประกอบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

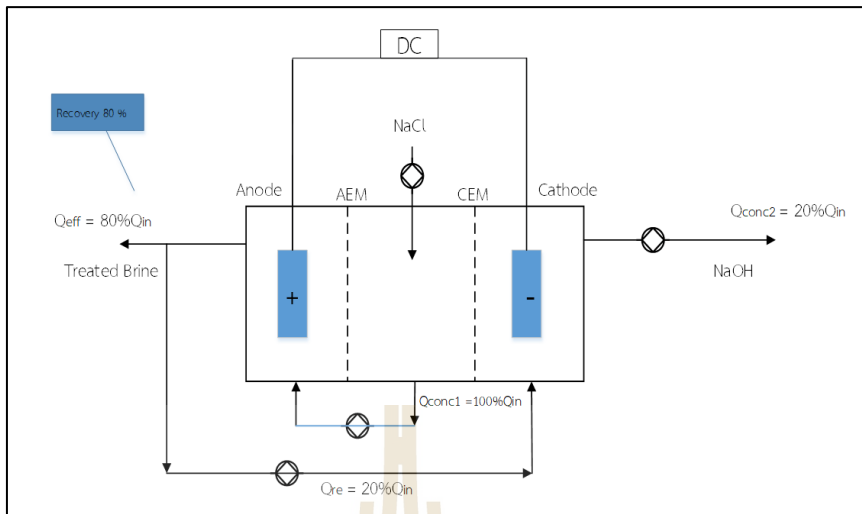
ชุดการทดลองระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์เป็นการทดลองเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous process) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ถึงปฏิกิริยาทำด้วยแผ่นสแตนเลส 314 ภายในถังเคลื่อนขางมีขนาดกว้าง 25.5 เซนติเมตร สูง 15.5 เซนติเมตร ยาว 53.5 เซนติเมตร ความจุ 21 ลิตร ภายในถังแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่อง โดยช่องแรกคือแคโทด ช่องสองคือช่องรับน้ำเสียเข้าระบบ และช่องสามคือช่องแอโนด โดยจ่ายน้ำเสียเข้าระบบควบคุมแรงดันอยู่ในช่วง 1 - 2 บาร์ (Tsiplakides et al., 2007) ชุดทดลองนี้เลือกใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนบวก ขนาด 20 × 30 ตารางเซนติเมตร รุ่น fumasep® F - 10150 - PF และเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนลบ ขนาด 20 × 30 ตารางเซนติเมตร รุ่น fumasep® FAPQ - 375 - PP ของบริษัท Fumatech และแผ่นขั้วไฟฟ้ามี 2 ชนิด ประกอบด้วยแผ่นไทเทเนียมทำหน้าที่เป็นขั้วลบและแผ่นแกรไฟต์ทำหน้าที่เป็นขั้วบวก เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 - 30 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าขนาด 0 - 24 โวลต์ (ชาติชาย ชายตระกูล, 2548) โดยติดตั้งถึงปฏิกิริยา ดังรูปที่ 3.2



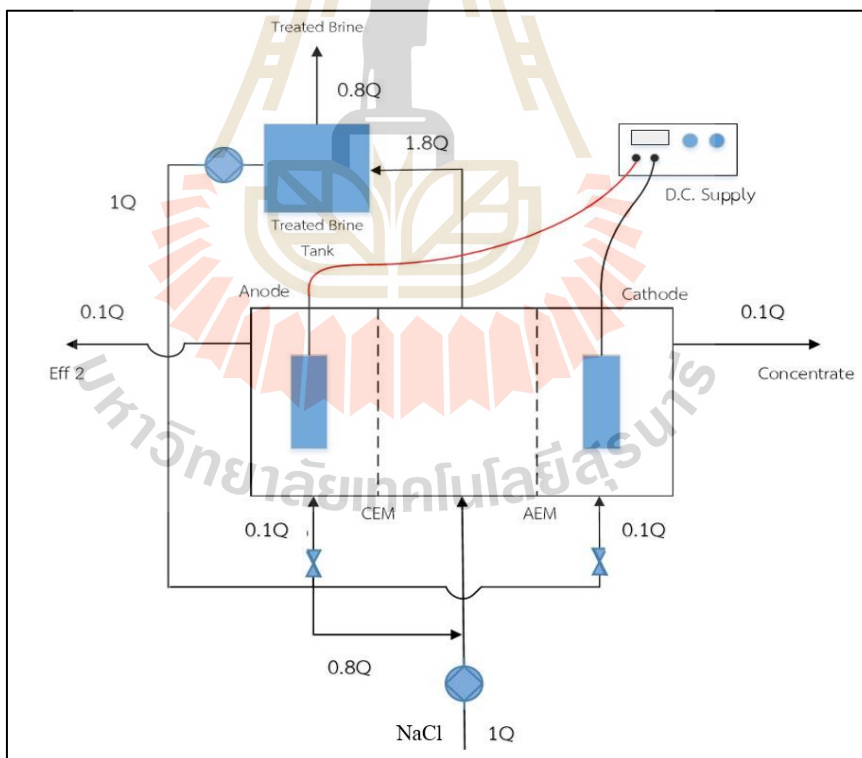
รูปที่ 3.2 การติดตั้งถังปฏิกรณ์

### 3.3.2 การจัดรูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์

การติดตั้งชุดการทดลองระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์มีรูปแบบการไหล 2 แบบ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดและลักษณะน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 โดยมีอัตราการเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ร้อยละ 80 ซึ่งรูปแบบการไหลแบบที่ 1 มีอัตราน้ำทิ้งร้อยละ 80 น้ำเสียฝั่งิ้วแควโทดร้อยละ 20 ซึ่งลักษณะน้ำเสียมมีการปนเปื้อนของคลอรีนจากน้ำทิ้งทำให้สารละลายไฮดรอกไซด์ตกตะกอนเร็วขึ้น โดยใช้ในการเดินระบบของชุดทดลองที่ 1 - 11 เพื่อหาสถานะที่เหมาะสม ส่วนรูปแบบการไหลแบบที่ 2 ใช้ในการเดินระบบของชุดการทดลองที่ 12 เมื่อมีสถานะการเดินระบบที่เหมาะสม มีอัตราน้ำทิ้งร้อยละ 80 น้ำเสียฝั่งิ้วแควโทดร้อยละ 10 น้ำเสียฝั่งิ้วแควโนดร้อยละ 10 ลักษณะน้ำเสียฝั่งิ้วแควโทดไม่มีการปนเปื้อนของคลอรีนและน้ำเสียฝั่งิ้วแควโนดเกิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริก



รูปที่ 3.3 แบบดั่งปฏิบัติการแบบที่ 1



รูปที่ 3.4 แบบดั่งปฏิบัติการแบบที่ 2

### 3.3.3 เมมเบรน

เมมเบรนที่เลือกใช้ในการเดินระบบมี 2 ชนิด คือ เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนบวก รุ่น fumasep® F - 10150 - PF และเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนลบ รุ่น fumasep® FAPQ - 375 - PP ขนาด 20 × 30 ตารางเซนติเมตร ของบริษัท Fumatech เยื่อกรองทั้งสองชนิดเป็นพอลิเมอร์ชนิด Polyethylene terephthalate (PET) เหมาะสมกับการใช้งานในระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้สูง และทนแรงดันได้ดี โดยมีคุณสมบัติแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ลักษณะเยื่อกรองที่ใช้ในระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

(บริษัท FUMATECH BWT GmbH, 2016)

	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 <sup>2</sup>	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 <sub>2</sub> O at T = 25 °C	wt %	20	15 - 25
Dimensional swelling in H <sub>2</sub> O at T = 25 °C	%	0	0 - 1
Hydroxyl ion transfer rate	µmol min <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	-	10 - 30
Proton transfer rate	µmol min <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>	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



### 3.4 การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

การศึกษาพารามิเตอร์ในการเดินระบบที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วย การแปรเปลี่ยน ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาสัมผัส และพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า ดังรายละเอียดชุดการทดลองในตารางที่ 3.4 ด้วยระยะเวลาในการเดินระบบต่อเนื่อง 12 ชั่วโมง

#### 3.4.1 ระยะเวลาสัมผัส

การศึกษการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาสัมผัส ซึ่งเป็นระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนในสารละลายกับอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซคลอรีน และก๊าซไฮโดรเจนที่บริเวณขั้วทั้งสอง แต่ถ้าเวลาสัมผัสมากเกินไปจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้ามากเกินไปจนพองกัน จึงส่งผลกระทบต่อให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้า การทดลองเดินระบบจึงเลือกช่วงระยะเวลาสัมผัสที่ 15, 20, 25 และ 30 นาที

#### 3.4.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้า

การศึกษการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งความต่างศักย์จ่ายเข้าระบบทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลขั้วไฟฟ้าทั้งสองจึงทำให้เกิดการถ่ายเทของอิเล็กตรอนในน้ำเสียขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือ โดยความต่างศักย์สูงอาจมีผลต่ออุณหภูมิ น้ำเสีย การทำงานของเยื่อกรองเลือกผ่านประจุ ประสิทธิภาพการกำจัดเกลือ และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ จึงทดลองเดินระบบที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5, 10, 15 และ 20 โวลต์ เพื่อเป็นการศึกษาเพื่อดูแนวโน้มของประสิทธิภาพ

#### 3.4.3 พื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า

การศึกษการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารละลายในระบบทำให้เกิดการกำจัดเกลือ เกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจน ถ้ามีพื้นที่มากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากเช่นกัน จึงได้แนวทางการทดลองเดินระบบที่ค่าพื้นที่ผิวสัมผัส 100, 200 และ 300 ตารางเซนติเมตร

การศึกษาสภาวะการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบ่งออกเป็น 12 ชุดการทดลอง ในแต่ละชุดการทดลองใช้เวลาในการเดินระบบ 12 ชั่วโมง เพื่อหาช่วงที่เหมาะสมในการเดินระบบ และตอบจุดประสงค์ของงานวิจัย โดยชุดการทดลองที่ 1 - 11 เดินระบบด้วยรูปแบบการไหลแบบที่ 1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยชุดการทดลองที่ 1 - 4 ทำการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ชุดการทดลองที่ 5 - 8 ศึกษาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม และชุดการทดลองที่ 9 - 11 ศึกษาพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อได้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองในชุด 1 - 4 จึงเริ่มทดลองหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในชุดทดลอง 5 - 8 หลังจากชุดทดลอง 1 - 8 จะได้ค่า



ระยะเวลาสัมผัสและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม จึงเริ่มชุดทดลอง 9 - 12 เพื่อหาพื้นที่ผิวสัมผัส ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยแปรเปลี่ยนค่าทั้งสามดังแสดงในตารางที่ 3.4 เมื่อได้สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของระยะเวลาสัมผัส ความต่างศักย์ และพื้นที่ผิวสัมผัส จึงเดินระบบด้วยรูปแบบการไหลแบบที่ 2 ในชุดทดลองที่ 12 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเกลือและลักษณะน้ำเสียจากระบบบำบัดเพื่อนำไปสู่การประเมินรูปแบบการไหลในการทดลองเดินระบบแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 7 วัน

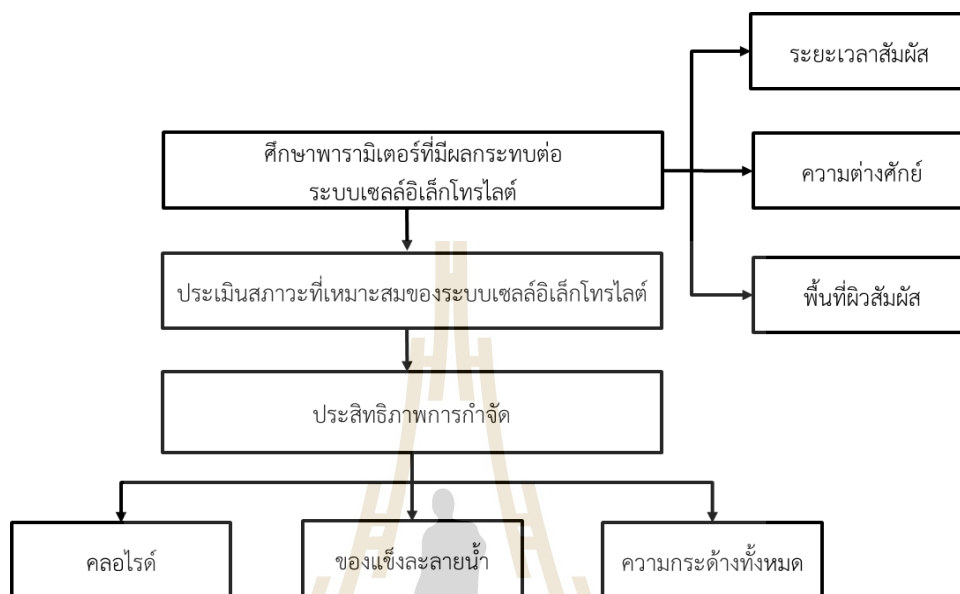
ตารางที่ 3.4 การศึกษาสภาวะการด้วยระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

ชุดการทดลองที่	ระยะเวลาสัมผัส (min)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (volt)	พื้นที่ผิวสัมผัส (cm <sup>2</sup> )	
1	15	10	64	
2	20	10	64	
3	25	10	64	
4	30	10	64	
5	ค่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากชุดทดลองที่ 1 - 4	5	64	
6		10	64	
7		15	64	
8		20	64	
9		ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมจากชุดทดลองที่ 5 - 8	100	64
10			200	64
11			300	64
12			ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่เหมาะสมจากชุดทดลองที่ 9 - 12	64

### 3.5 การประเมินสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

การประเมินสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เพื่อเลือกสภาวะในการเดินระบบที่เหมาะสมจากชุดทดลองที่ 1 - 12 มาเดินระบบในระยะเวลาเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยประเมินจากประสิทธิภาพของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยปัจจัยที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพ

ได้แก่ การกำจัดคลอรีน การกำจัดของแข็งละลายน้ำ การกำจัดความกระด้างทั้งหมด โดยแสดงแผนผังปัจจัยการประเมินสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนผังการประเมินสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

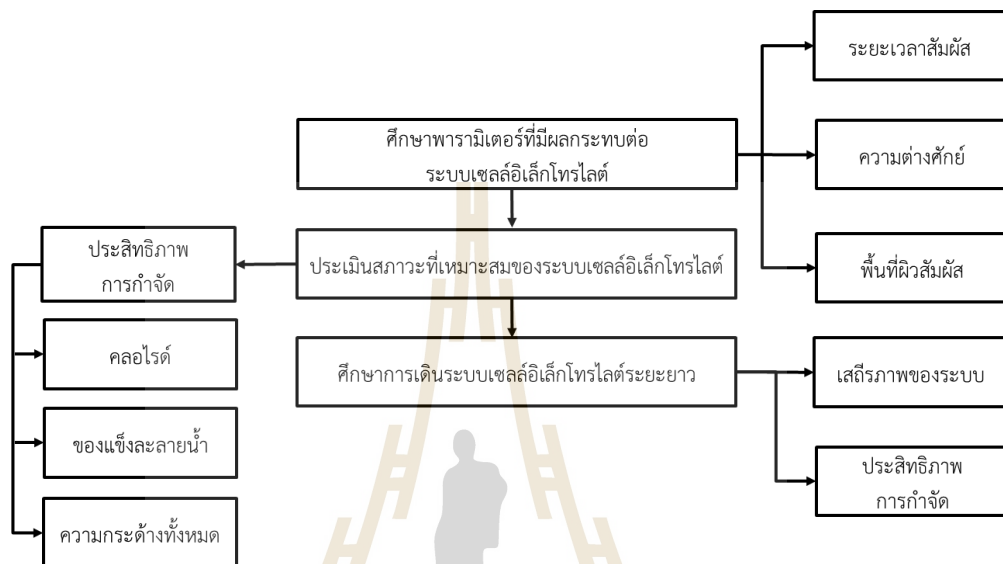
### 3.5.1 การประเมินประสิทธิภาพ

การประเมินประสิทธิภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชุดการทดลองที่ 1 - 12 ปัจจัยในการศึกษา คือ การกำจัดคลอรีน การกำจัดของแข็งละลายน้ำ และการกำจัดความกระด้างทั้งหมด เนื่องจากสามารถแสดงถึงศักยภาพในการทำงานของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเกลือ เมื่อทดลองเดินระบบจะเก็บน้ำตัวอย่างทุก 1 ชั่วโมง จนครบ 12 ชั่วโมง ค่ากระแสไฟฟ้าจะทำการวิเคราะห์ค่า ณ เวลาที่เก็บน้ำตัวอย่าง ส่วนน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าคลอรีน ค่าของแข็งละลายน้ำ จะบรรจุใส่ภาชนะปิด (ไพทอริ่ง หมายถึงมันผสม, 2555)

### 3.6 การศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในระยะยาว

การศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในระยะยาว จะทำการเลือกสถานะการเดินระบบที่เหมาะสมจากชุดการทดลองที่ 1 - 12 จะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาสัมผัสและพื้นที่ผิวสัมผัสชั่วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ จึงเริ่มทดลองเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในสถานะที่เหมาะสมเป็นเวลา 7 วัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและความเสถียรภาพใน

การเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากการเดินระบบเป็นระยะเวลานานจึงทำการบำรุงและดูแลระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ โดยแสดงปัจจัยในการศึกษาการเดินระบบ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนผังการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในระยะยาว

### 3.6.1 การประเมินเสถียรภาพ

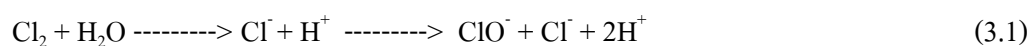
การประเมินเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์จากชุดการทดลองที่ 1 - 12 ประเมินการฟูก่อนของขั้วไฟฟ้า

### 3.6.2 แนวโน้มการเกิดก๊าซ

การประเมินการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม ประเมินการแนวโน้มการเกิดก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจนในเชิงคุณภาพ

#### 3.6.2.1 การเกิดก๊าซคลอรีน

วิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซคลอรีนในรูปสารละลายคลอรีนอิสระ เนื่องจากก๊าซคลอรีนสัมผัสกับน้ำกลายเป็นคลอรีนอิสระเมื่อน้ำมีค่าพีเอช 4 (N. Melian-Martel et al., 2011) แสดงดังสมการที่ 3.2 และดังสมการที่ 3.3 เพื่อประเมินการเกิดก๊าซตามสมการที่ 3.1





### 3.6.2.2 การเกิดก๊าซไฮโดรเจน

การเกิดก๊าซไฮโดรเจนทำโดยการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) เพื่อประเมินการเกิดก๊าซตามสมการที่ 2.6

## 3.7 การบำรุงและรักษาระบบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

การบำรุงและรักษาระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่สภาวะเหมาะสมเป็นระยะเวลา 3 เดือน ภายในดังปฏิกิริยามีวัตถุประสงค์ต้องการบำรุงและรักษาคือ ขั้วไฟฟ้าและเยื่อกรอง เพื่อไม่ให้เกิดการชำรุดขณะเดินระบบ โดยขั้วไฟฟ้าเมื่อเริ่มเสื่อมสภาพจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคลอรีนและการกำจัดของแข็งละลายน้ำลดลงจากเดิม เนื่องจากบริเวณขั้วไฟฟ้าเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีในการกำจัดมลทินในน้ำเสีย และเยื่อกรองเมื่อเริ่มเสื่อมสภาพจะส่งผลต่อแรงดันตกค่อมบริเวณเยื่อกรองมีค่าลดลงจากเดิมที่กำหนดไว้ให้อยู่ในช่วง 1 - 2 บาร์ และสามารถสังเกตได้จากอัตราการไหลของน้ำเสียที่ออกจากระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าลดลงจากเดิม

### 3.7.1 การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า

การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า ทำโดยล้างด้วยน้ำเปล่า หรือน้ำ DI แล้วนำไปแช่ในกรดไนตริก( $\text{HNO}_3$ ) 5 N ประมาณ 20 นาที เพื่อทำความสะอาดสิ่งสกปรกหรือคราบตะกอนบริเวณขั้วไฟฟ้า หากเกิดคราบน้ำมันขึ้นจะใช้สารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) เป็นสารทำความสะอาดโดยแช่ประมาณ 15 นาที หลังจากนั้นใช้กระดาษ A4 เช็ดดูที่บริเวณขั้วไฟฟ้า โดยทำความสะอาดต่อชุดการทดลอง

### 3.7.2 การทำความสะอาดเยื่อกรอง

การทำความสะอาดเยื่อกรองประกอบด้วยวิธีทางเคมีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่เกาะติดบริเวณหน้าเยื่อกรอง โดยทำความสะอาดมี 2 ขั้นตอน คือ การแช่สารเคมีและล้างด้วยสารเคมีพร้อมอัดแรงดัน (Wang et al., 2011) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.5 โดยทำความสะอาดเมื่อครบ 11 ชุดการทดลอง

ตารางที่ 3.5 ขั้นตอนการทำความสะอาดเชื้อกรอง

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

### 3.8 วิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง

พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์น้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูเรซินในระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte cell) ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการทดลอง (กรมควบคุมมลพิษ, 2557)

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ค่าคลอไรด์	Argentometric method
ค่าของแข็งละลายน้ำ	Gravimetric method
ค่าความกระด้าง	ไทเตรตด้วย EDTA
ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน	Gas chromatograph
ลักษณะผิวขั้วไฟฟ้า	Scanning electron microscope (SEM)

#### 3.8.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับแยกตัวอย่างที่เป็นสารผสมที่ระเหยได้ โดยเปลี่ยนสารผสมให้เป็นไอที่อุณหภูมิหนึ่ง ไอที่เกิดขึ้นจะถูกนำเข้าสู่คอลัมน์โดยอาศัยการพาไปของเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) หรือ “Carrier gas” ตามอัตราการไหลที่ต้องการภายในคอลัมน์บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่ในการแยกเรียกว่า “เฟสคงที่ (Stationary phase)” สารผสมจะถูกแยกออกเป็น ส่วน ๆ ที่คอลัมน์นี้ ด้วยความแตกต่างของสมบัติทางเคมี โครงสร้างน้ำหนักโมเลกุลจุดเดือด สารที่แยกได้ผ่านออกไปสู่ส่วนตรวจวัด (Detector) ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยังระบบประมวลผล (Data system) ซึ่งสามารถคำนวณและรายงานผลออกมาเป็นโครมาโทแกรมให้ทราบถึงองค์ประกอบหรือเทียบปริมาณของสารตัวอย่างได้กล่าวคือ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ

### 3.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) เป็นจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุด 10 นาโนเมตร กล้องชนิดนี้มีไว้เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัตถุ การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM ไม่จำเป็นที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดเท่าเครื่อง TEM เพราะตรวจวัดด้วยอิเล็กตรอน การสร้างภาพของ SEM เกิดจากการตรวจวัดด้วยอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จะมีลักษณะเป็น 3 มิติ เครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

#### 3.8.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

1) เตรียมโดยตัดชิ้นงานให้มีขนาดพอเหมาะที่จะเอาเข้าเครื่องได้ นำไปขัดผิว (Grinding) ให้เรียบด้วยกระดาษทรายขัดเหล็ก (Silicon carbide) หล่อลื่นด้วยน้ำในขณะที่ขัด โดยเริ่มขัดจากหยาบไปหาละเอียด เริ่มจากกระดาษทรายเบอร์ 220, 320, 400, 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ ในบางกรณีอาจใช้ถึงเบอร์ 3,000 การขัดแต่ละครั้งจะต้องขัดให้เกิดรอยกระดาษทรายในทิศทางเดียวตลอดผิวงานแล้วจึงหมุนชิ้นงานไป 90 องศา ขัดต่อจนรอยเดิมหายไป

2) จากนั้นนำไปขัดเงา (Polishing) ด้วยผงอะลูมินา (Alumina) บนผ้าสักหลาด ด้วยเครื่องขัดแบบจานหมุน ปกติจะนิยมใช้ผงอะลูมินาที่มีเม็ดขนาด 1  $\mu\text{m}$ , 0.25  $\mu\text{m}$ , และ 0.05  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ล้างน้ำทุกครั้งที่เปลี่ยนผงขัดกรณีที่ชิ้นงานมีความแข็งมากจะใช้ผงเพชร (Diamond paste) แทนผงอะลูมินา การขัดเป็นการขัดผิวตัวอย่างส่วนที่เสียรูปไปเนื่องจากการตัด ซึ่งจะต้องพยายามขัดให้ผิวที่แปรรูปออกไปให้หมด จนถึงบริเวณที่เป็นโครงสร้างที่แท้จริง

3) หลังจากขัดผิวแล้วจะต้องนำชิ้นงานมากัดผิว (Etching) เพื่อให้เห็นโครงสร้างและลักษณะการจัดเรียงตัวของ Grain การกัดผิว มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดตัวอย่าง

### 3.8.3 วิธีวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน

วิธีวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy dispersive x-ray spectrometer, EDS) เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโตรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งมีบทบาทสำคัญในปัจจุบันในการวิเคราะห์ธาตุทั้งทางด้านวัสดุศาสตร์ ด้านชีวภาพ กายภาพ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชิ้นส่วนขนาดเล็กสามารถวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพ (Qualitative element analysis) และวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณ (Quantitative element analysis) โดยใช้วิธี Mapping analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นภาพแสดงลักษณะการกระจายของธาตุนบนพื้นที่นั้น ๆ

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินการวิจัย

การศึกษาระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) เพื่อนำบัติน้ำเกลือจากกระบวนการล้างพื้นฟูสภาพเรซินในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบไปด้วย 1) การศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในชุดทดลองแบบกะ 2) การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในชุดทดลองแบบต่อเนื่อง โดยปัจจัยที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพ ได้แก่ การกำจัดคลอไรด์ การกำจัดของแข็งละลายน้ำ การเกิดก๊าซคลอรีน ก๊าซไฮโดรเจน และปัจจัยที่ประเมินเสถียรภาพของระบบคือ การสะสมของตะกอนที่ขั้วไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดของการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 4.1 การเก็บข้อมูลเบื้องต้น

ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินมีการปนเปื้อนของของแข็งละลายน้ำ โดยเฉพาะโซเดียมไฮดรอกไซด์และคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากขั้นตอนการล้างเรซิน เนื่องจากใช้สารเคมีที่นิยมใช้สำหรับการฟื้นฟูสภาพเรซินเป็นเกลือแกง (NaCl) เข้มข้น 8 - 10% จึงมีคลอไรด์ ความเข้มข้นสูงปนเปื้อนออกมากับน้ำเสยวมถึงไฮดรอกไซด์ต่าง ๆ เป็นเหตุทำให้น้ำเค็มและมีความกระด้างรวมอยู่ด้วย จากตารางที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซินจากการสำรวจเก็บข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดนครราชสีมา ทำให้ทราบลักษณะทางเคมีของน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการผลิตน้ำอ่อนด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าโรงงานแปรรูปอาหารมีค่าของแข็งละลายน้ำและค่าคลอไรด์ต่ำกว่าโรงงานชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และโรงงานน้ำดื่มบรรจุขวด ซึ่งโรงงานทั้งสองแห่งนี้มีค่าของแข็งละลายน้ำและค่าคลอไรด์ใกล้เคียงกัน โดยเกิดจากกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันและลักษณะน้ำดิบเนื่องจากตั้งอยู่บริเวณต่างกันและความเข้มข้นของเกลือที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซินอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากผู้ดูแลระบบจากขั้นตอนการเตรียมน้ำเกลือ เนื่องจากไม่ได้เป็นระบบอัตโนมัติใช้ผู้ดูแลระบบเตรียมน้ำเกลือ



ตารางที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการการฟื้นฟูสภาพเรซิน

พารามิเตอร์	โรงงานชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์			โรงงานน้ำดื่มบรรจุขวด			โรงงานแปรรูปอาหาร		
	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียล้างไล่น้ำเกลือ	น้ำเสียรวม	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียล้างไล่น้ำเกลือ	น้ำเสียรวม	น้ำเสียฟื้นฟูสภาพเรซิน	น้ำเสียล้างไล่น้ำเกลือ	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 <sub>3</sub> )	384	319	236	376	250	326	435	309	388
Ca <sup>2+</sup> (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	295	253	204	300	204	275	281	200	259
Mg <sup>2+</sup> (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	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

การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียเข้าระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ทำการเลือกน้ำเสียสังเคราะห์จากลักษณะน้ำเสียจากการฟื้นฟูสภาพเรซิน โดยทำการสำรวจเบื้องต้นดังตารางที่ 4.1 จึงเลือกใช้ลักษณะน้ำเสียของโรงงานน้ำดื่มบรรจุขวดโดยมีค่าความเค็มเท่ากับ 82,094 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 136,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความกระด้างเท่ากับ 374 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีวิธีเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ดังตารางที่ 4.2 โดยใช้น้ำประปาที่มีค่าความกระด้างรวมเท่ากับ 100 - 120 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตในการเตรียมน้ำเสีย

ตารางที่ 4.2 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์และปริมาณสารเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์

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

## 4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

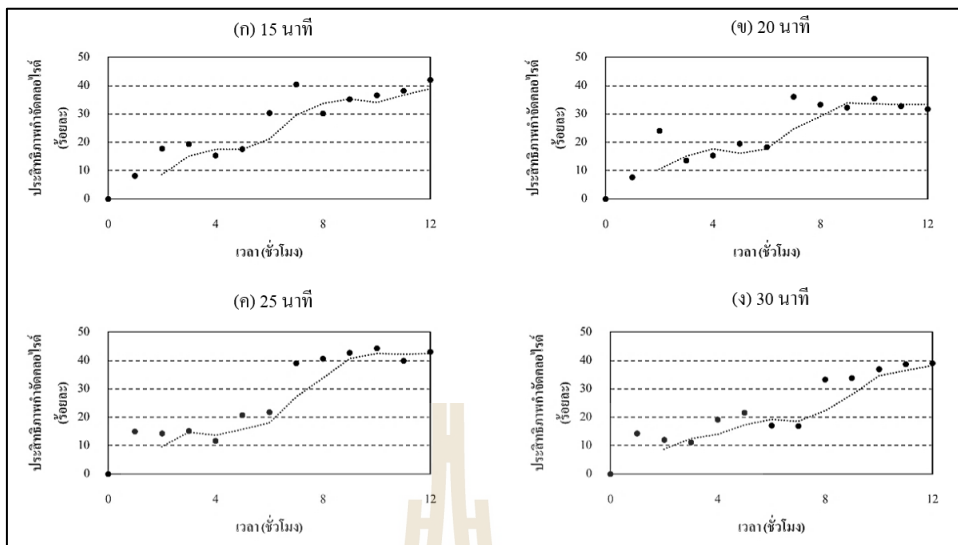
การศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินในชุดการทดลองแบบกะเดินระบบเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงต่อชุดการทดลอง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบดังนี้ 1) ระยะเวลาสัมผัส 2) ความต่างศักย์ และ 3) พื้นที่ผิวสัมผัสที่มีผลกระทบต่อความสามารถในกำจัดคลอไรด์ของแข็งละลายน้ำและค่าความกระด้างทั้งหมด

### 4.3.1 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัส

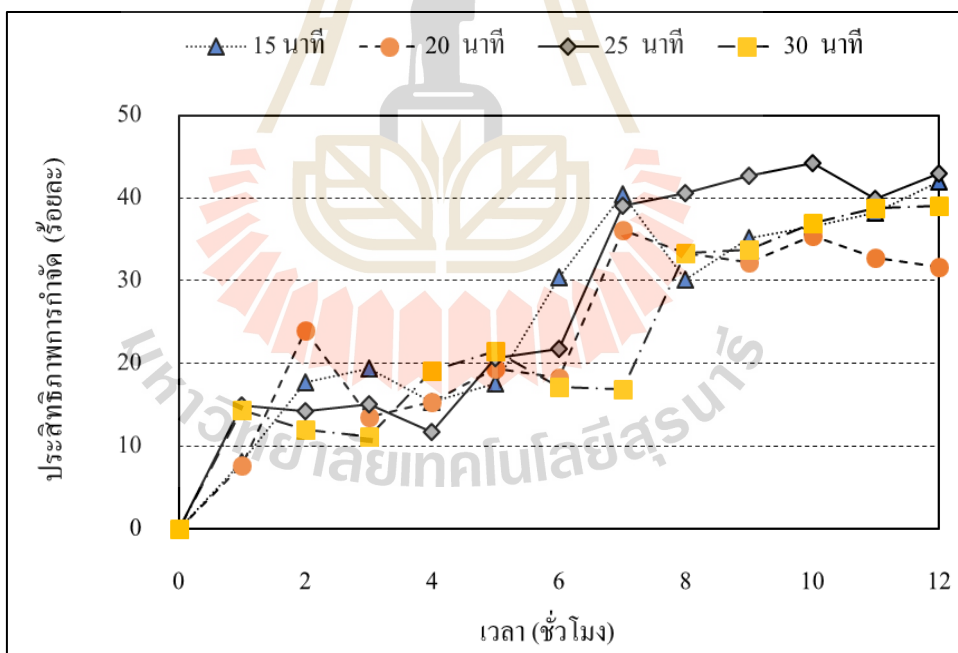
ทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสที่สภาวะคงที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ พื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้า 64 ตารางเซนติเมตร โดยแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสที่ 15, 20, 25 และ 30 นาที พบว่าที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 25 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด โดยมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดของทุกระยะเวลาสัมผัส ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 เมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่า การทดลองเข้าสู่สมดุลในเวลา 10 ชั่วโมง เนื่องจากค่าแปรปรวนของข้อมูลอยู่ที่ร้อยละ 2.27 ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอไรด์คือร้อยละ  $42.36 \pm 2.27$  ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ  $42.89 \pm 1.77$  ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  $99.90 \pm 0.17$  และเมื่อนำผลการศึกษา

ประสิทธิภาพการกำจัดของทุกระยะเวลาสัมผัสไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Tukey's multiple comparison test พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคลอรีน ของแข็งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $\alpha$ -value > 0.05) ทำให้ระยะเวลาสัมผัสที่ 25 นาที เป็นค่าที่เหมาะสมในการทดลอง เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดคลอรีนของแข็งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมดสูงสุด ซึ่งมีแนวโน้มการกำจัด ดังรูปที่ 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 ลิตรต่อชั่วโมง และตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าของระบบชุดทดลองคือ 0.1 ลิตรต่อชั่วโมงและตารางเซนติเมตร จึงทำให้ทราบว่าขนาดถังและระยะห่างระหว่างขั้วน้อยกว่าและระยะเวลาสัมผัสเป็นระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนในสารละลายกับอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดสารละลายไฮดรอกไซด์ ก๊าซคลอรีน และก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วทั้งสองจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคลอรีนของแข็งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมด แต่ถ้าเวลาสัมผัสมากเกินไปอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้ามากเกินไปเช่นกัน จึงส่งผลกระทบต่อเกิดการกัดกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้าจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง

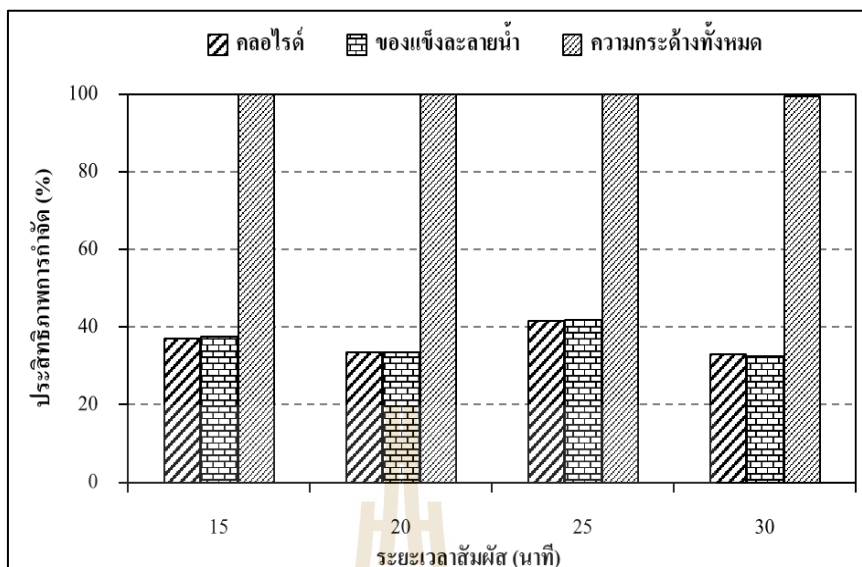
ทั้งนี้การออกแบบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัสแล้วยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีกด้วย เช่น ขนาดถังปฏิกิริยา พื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองถ้ามีพื้นที่ผิวสัมผัสมากสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากเช่นกัน แต่ระยะห่างระหว่างขั้วมากจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระแสไฟฟ้า ถ้าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามากทำให้ประสิทธิภาพการไหลของกระแสไฟฟ้าลดลงเนื่องจากความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น และความต่างศักย์ส่งผลโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าถ้าความต่างศักย์สูงกระแสไฟฟ้าสูงเช่นกัน เป็นต้น (A. Campione et al. 2018) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินแนวทางในการเดินระบบที่มีความเหมาะสมของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์สำหรับน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินที่มีความเค็มเข้มข้น 82,094 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 136,000 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่านั้นซึ่งมีระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 25 นาที โดยน้ำเสียมีอัตราการไหล 0.65 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์กับระยะเวลาสัมผัส



รูปที่ 4.3 ผลกระทบการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสกับประสิทธิภาพการกำจัด

ผลการเก็บข้อมูลวิเคราะห์ลักษณะน้ำเข้าและออกของระบบทั้ง 4 จุด จากแบบระบบการติดตั้งระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 3.2 โดยมีลักษณะน้ำดังตารางที่ 4.3 พบว่าที่สภาวะเหมาะสม เมื่อน้ำเสียเข้าสู่ระบบผ่านช่องกลางที่มีเยื่อกรองเลือกผ่านประจุบวกและเยื่อกรองเลือกผ่านประจุลบไหลออกทางด้านล่างของถังปฏิกิริยาออกมายังเรียกว่าน้ำเจือจาง มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 6.7 และไม่พบค่าอัลคาไลน์นิตี เนื่องจากพีเอชเป็นกลางและเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าทำให้มีการแยกประจุในน้ำเสีย โดยประจุลบจะไหลไปทางช่องแอโนด ส่วนประจุบวกจะไหลไปทางช่องแคโทด เพื่อมาทำปฏิกิริยาไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองฝั่งจึงทำให้น้ำทั้งมีค่าพีเอชและค่าอัลคาไลน์ต่ำลง เนื่องจากคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับขั้วแอโนดจึงเกิดก๊าซคลอรีนตามสมการที่ 1.2 โดยมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 4.61 จากนั้นระบบได้นำน้ำทั้งหมดมาหมุนเวียนเข้าถังปฏิกิริยาทางช่องแคโทดอีกครั้ง เพื่อให้มีการไหลเวียนไอออนในถังปฏิกิริยาทั้งสามช่องและทำให้น้ำเสียจากฝั่งแคโทดยังมีความเข้มข้นของไอออนอยู่ในระบบ เนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าทำให้เกิดผลพลอยคือ ก๊าซไฮโดรเจนและโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามสมการที่ 1.3 น้ำเสียที่ออกจากฝั่งขั้วแคโทดมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 11 ค่าอัลคาไลน์นิตีเฉลี่ยเท่ากับ 8,055 mg/l as CaCO<sub>3</sub> ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากประจุบวกในน้ำเสียทำปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดทำให้เกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์และเกิดการแตกตัวของน้ำส่งผลให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน ซึ่งมีความเป็นด่างและส่งผลให้เกิดตะกอนจากประจุบวกสอง ส่วนค่าความกระด้างทั้งหมดของน้ำทั้งจะมีค่าลดลงเนื่องจากไอออนประจุบวกสองได้เคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดจึงทำให้น้ำเสียเข้มข้นทำให้มีค่าความกระด้างสูงขึ้น

ตารางที่ 4.3 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาสัมผัส

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 <sub>3</sub> )	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 <sub>3</sub> )	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 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาสัมผัส (ต่อ)

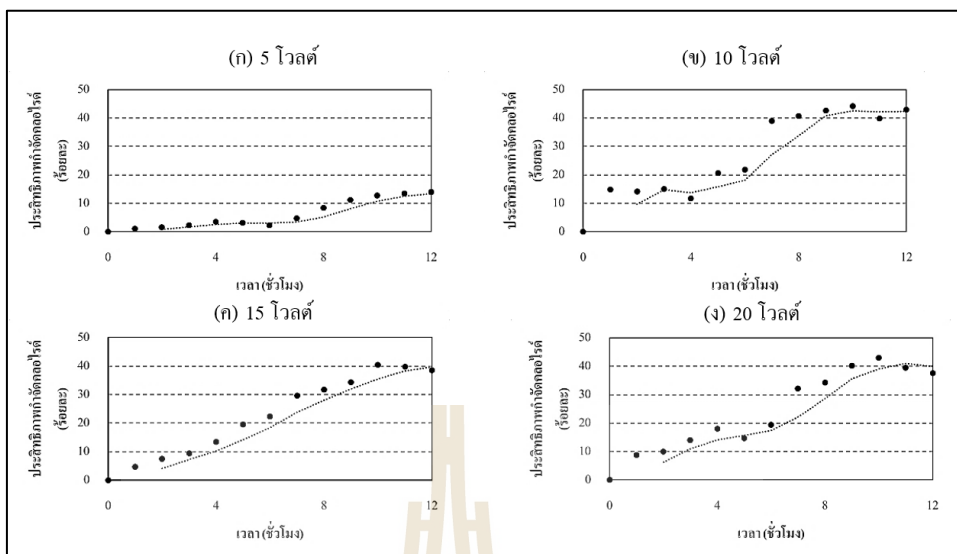
ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
25	พีเอช	7.2 ± 0.12	11.5 ± 0.18	4.8 ± 0.12	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	194	4,444	0	-	-
	ของแข็งละลายน้ำ (mg/l)	137,160	85,107	84,307	42.89	1.77
	คลอไรด์ (mg/l)	83,418	49,651	51,095	42.36	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 <sub>3</sub> )	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	-	-



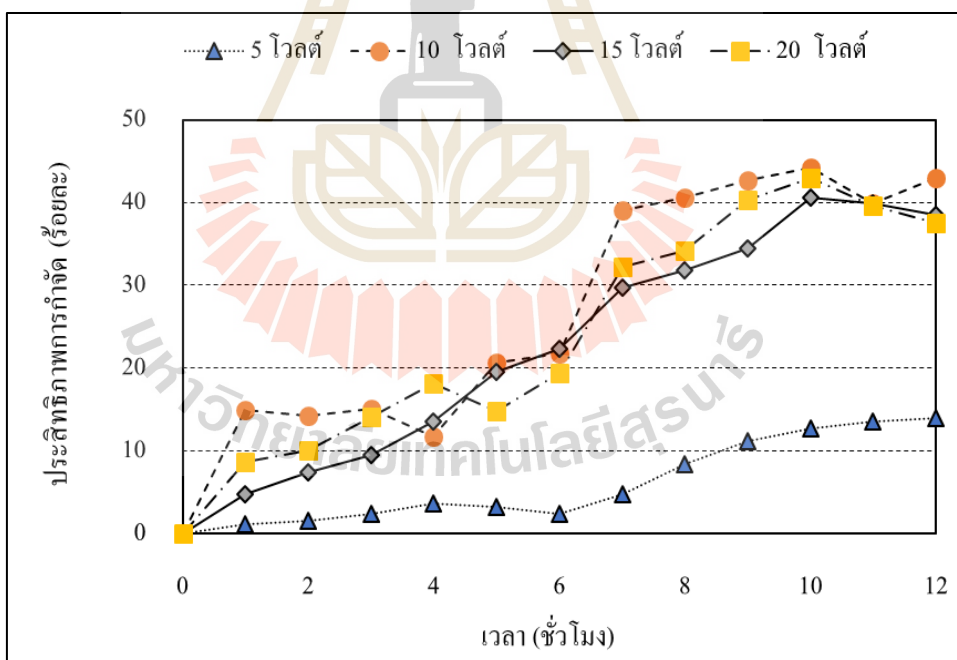
#### 4.3.2 ผลกระทบของความต่างศักย์

การศึกษาผลกระทบของความต่างศักย์ที่สภาวะคงที่ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที พื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้า 64 ตารางเซนติเมตร โดยแปรเปลี่ยนความต่างศักย์ที่ 5, 10, 15 และ 20 โวลต์ พบว่า ที่ความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด โดยมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดของทุกความต่างศักย์ ดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 เมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่า การทดลองเข้าสู่สมดุลในเวลา 9 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอไรด์คือร้อยละ  $42.50 \pm 1.80$  ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ  $43.35 \pm 2.67$  ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  $98.96 \pm 0.01$  และเมื่อนำผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของทุกความต่างศักย์ไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Tukey's multiple comparison test พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $\alpha$ -value < 0.05) จึงทำให้ความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ เป็นค่าที่เหมาะสมในการทดลองเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดกำจัดคลอไรด์ของแข็งละลายน้ำและความกระด้างทั้งหมดค้ำสูงซึ่งมีแนวโน้มการกำจัด ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wei Tan et al. (2016) สามารถกำจัดโซเดียมคลอไรด์ได้ร้อยละ 98.3 ที่ความต่างศักย์ 10 โวลต์ และเมื่อเพิ่มความต่างศักย์สูงที่ 15 โวลต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายได้ลดลงคือร้อยละ 39.80 มีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับ Jie Liu et al. (2016) ที่ค่าความต่างศักย์ 15 โวลต์ สามารถกำจัดค่าของแข็งละลายได้ร้อยละ 62.2 โดยน้ำเสียมีค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 66,800 มิลลิกรัมต่อลิตรที่อุณหภูมิ 20 °C เนื่องจากมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันค่าคลอไรด์ และเมื่อความต่างศักย์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนของไอออนมากขึ้นเช่นกัน แต่ทำให้กระแสไหลผ่านในระบบสูงขึ้นจึงทำให้เกิดการอิมตัวของไอออนในระบบและอุณหภูมิสูง ทำให้การทำงานของเยื่อกรองแลกเปลี่ยนไอออนและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่สูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าน้ำทิ้งมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 4.6 และไม่พบค่าอัลคาไลน์นี้ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่ขั้วไฟฟ้า แอโนดเกิดสายละลายไฮโดรคลอริกและก๊าซคลอรีน ส่วนขั้วแคโทดเกิดสารละลายไฮดรอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนทำให้น้ำเข้มข้นมีค่าพีเอชและอัลคาไลน์สูงขึ้น ส่วนน้ำเจือจางมีค่าพีเอชและอัลคาไลน์ที่ลดลง โดยสรุปลักษณะน้ำเข้าและออกกระบวนดังตารางที่ 4.4

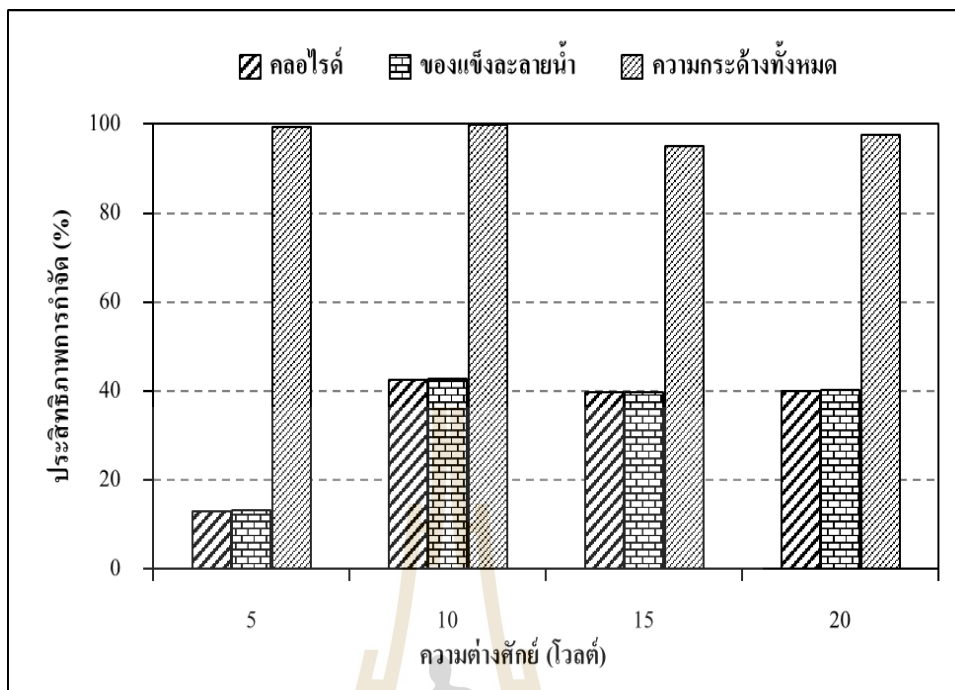
การออกแบบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อประเมินแนวทางในการเดินระบบที่มีความเหมาะสมของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์สำหรับน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินที่มีค่าความเค็มเข้มข้น 82,094 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 136,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้นซึ่งมีความต่างศักย์ที่เหมาะสมคือ 10 โวลต์ โดยน้ำเสียมีอัตราการไหล 0.65 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดคลอรีนที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอรีนกับความต่างศักย์



รูปที่ 4.6 ผลกระทบการแปรเปลี่ยนความต่างศักย์กับประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 4.4 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนความต่างศักย์

ความต่างศักย์ (V)	พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5	พีเอช	7.3 ± 0.09	10.3 ± 0.18	6.1 ± 0.10	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	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 <sub>3</sub> )	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	-	-

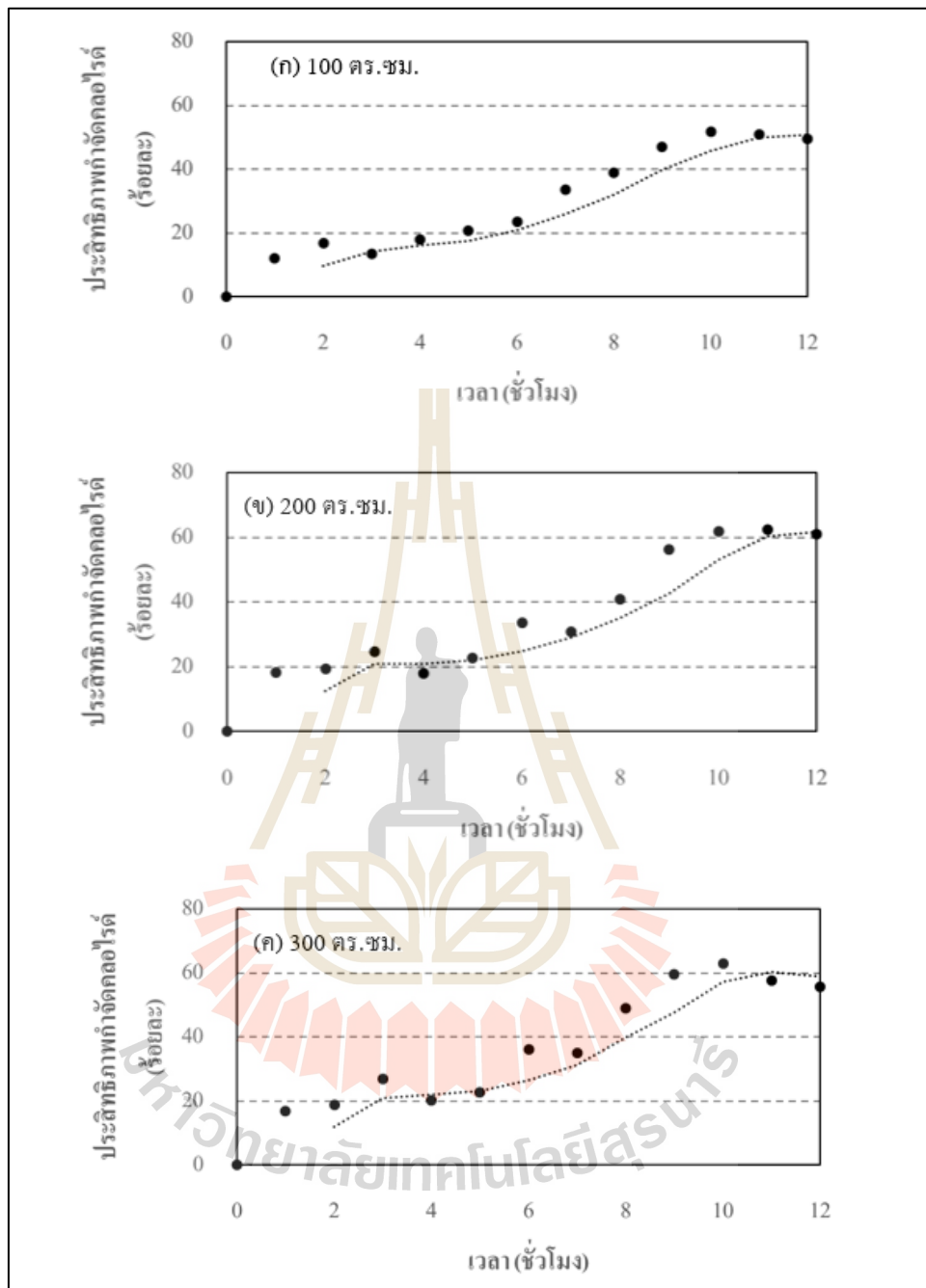
ตารางที่ 4.4 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนความต่างศักย์ (ต่อ)

ความต่างศักย์ (V)	พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
15	พีเอช	7.7 ± 0.08	12.2 ± 0.03	3.5 ± 0.04	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	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 <sub>3</sub> )	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

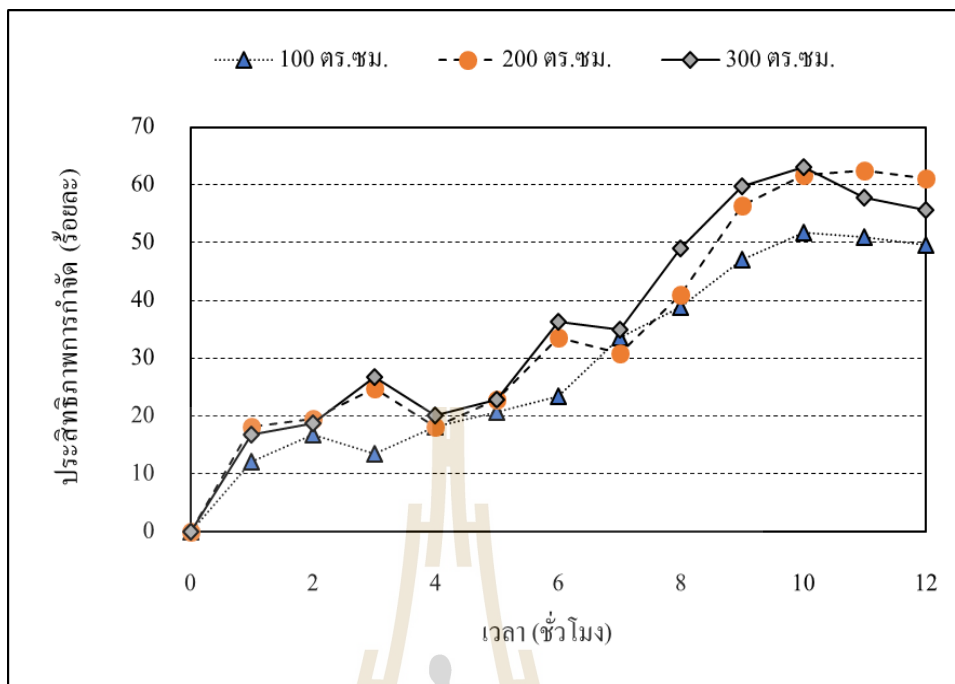
การศึกษาผลกระทบของพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือ โดยอาศัยกระแสไฟฟ้าเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนในน้ำเสียดกับอิเล็กตรอน บริเวณขั้วไฟฟ้าให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน - ออกซิเดชัน จึงได้ทำการทดลองแปรเปลี่ยนพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นเป็น 100, 200 และ 300 ตร.ซม เพื่อศึกษาแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัด ดังรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์กับพื้นที่ผิวสัมผัสพบว่าพื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตร.ซม มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด เมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่า การทดลองเข้าสู่สมดุล ในเวลาที่ 11 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอไรด์คือร้อยละ  $61.74 \pm 0.67$  ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ  $62.19 \pm 0.67$  ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  $98.14 \pm 0.17$  และเมื่อนำผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของทุกพื้นที่ผิวสัมผัสไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Tukey's multiple comparison test พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $\alpha$ -value > 0.05) จึงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตร.ซม เป็นค่าที่เหมาะสมในการทดลองเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดกำจัดคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมดสูงสุดซึ่งมีแนวโน้มการกำจัดแสดง ดังรูปที่ 4.8 และดังรูปที่ 4.9 จากการศึกษา Younggy Kim et al. (2013) น้ำเสียดมีความเค็มเข้มข้น 41,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้าต่อถังปฏิกิริยา คือ 500 ต่อ 1 ตร.ซม สามารถกำจัดความเค็มได้ร้อยละ 84 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้าต่อถังปฏิกิริยา คือ 1,000 ต่อ 1 ตร.ซม ของการศึกษา Y. Qu et al. (2013) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความเค็มเหลือร้อยละ 55 ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้าต่อถังปฏิกิริยา เนื่องจากความต้านทานในระบบเพิ่มขึ้นจากจำนวนพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้าจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง ทำให้มีลักษณะของน้ำทิ้ง และน้ำเข้มข้น ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งมีค่าพีเอชและค่าอัลคาไลน์นิตีแนวโน้มเช่นเดียวกับชุดทดลองการแปรเปลี่ยนความต่างศักย์และการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสเนื่องจากมีรูปแบบการไหลและการติดตั้งระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่เหมือนกัน

การออกแบบระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อประเมินแนวทางในการเดินระบบที่มีความเหมาะสมของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์สำหรับน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินที่มีค่าความเค็มเข้มข้น 82,094 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 136,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้นซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่เหมาะสมคือ 200 ตร.ซม โดยน้ำเสียดอัตราการไหล 0.65 ลิตรต่อนาที

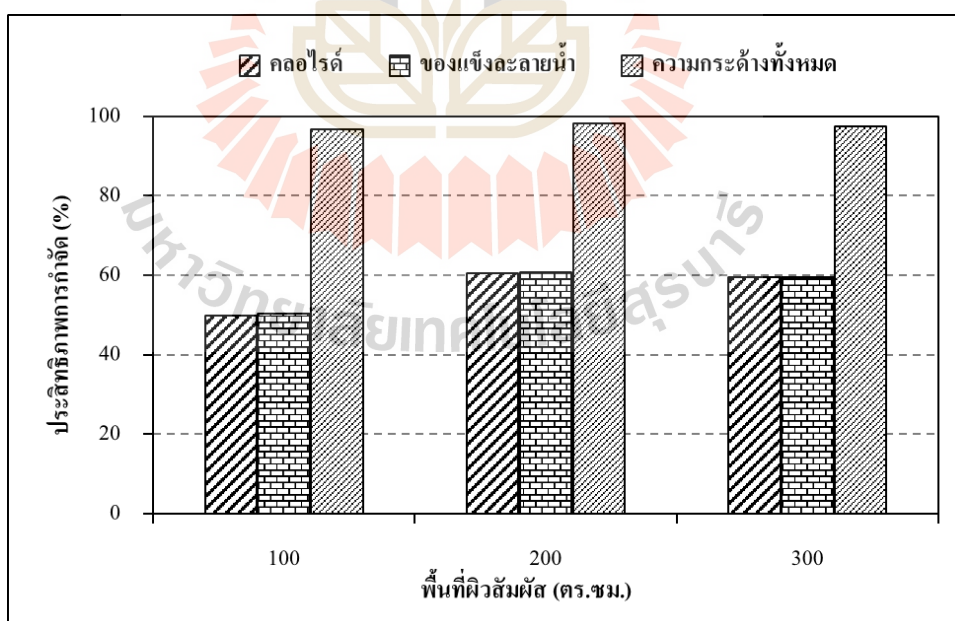


รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ที่พื้นที่ผิวสัมผัสต่าง ๆ





รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์กับพื้นที่ผิวสัมผัส



รูปที่ 4.9 ผลกระทบของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 4.5 ลักษณะน้ำเข้าและออกระบบของการแปรเปลี่ยนพื้นที่ผิวสัมผัส

พื้นที่ผิวสัมผัส (cm <sup>2</sup> )	พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100	พีเอช	7.0 ± 0.01	12.2 ± 0.09	3.6 ± 0.07	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	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 <sub>3</sub> )	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)

พื้นที่ผิวสัมผัส (cm <sup>2</sup> )	พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น	น้ำทิ้ง	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
300	พีเอช	7.1 ± 0.00	12.3 ± 0.06	3.5 ± 0.04	-	-
	อัลคาไลน์ตี (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	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	-	-

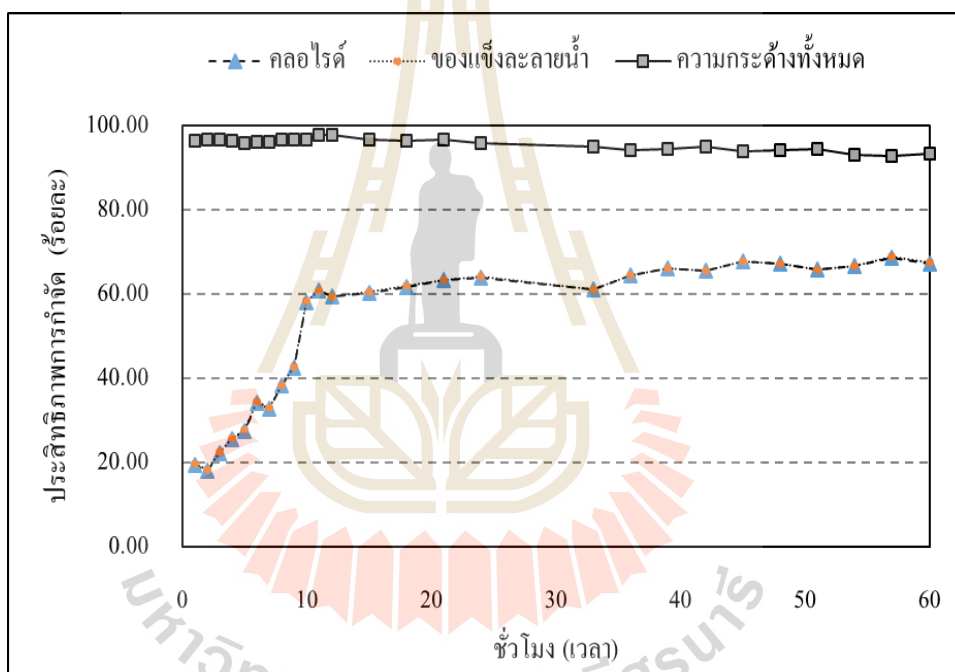
#### 4.3.4 ผลกระทบของรูปแบบการไหลในถังปฏิริยาต่อประสิทธิภาพของระบบ

การศึกษาผลกระทบของรูปแบบการเดินระบบที่สภาวะที่เหมาะสม คือ ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที พื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตารางเซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ โดยกลไกรูปแบบการไหลแบบที่ 1 ดังรูปที่ 3.2 เดินระบบเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง มีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัด จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดพบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอรีนคือร้อยละ  $61.74 \pm 0.67$  ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ  $62.19 \pm 0.67$  ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  $98.14 \pm 0.17$  ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด  $2.68 \text{ kWh/m}^3$  โดยมีปริมาณน้ำทิ้งเป็นร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำเสียที่เข้าบำบัดและเกิดน้ำทิ้งฝั่งซ้ายแคโทดเป็นร้อยละ 20 ของปริมาณน้ำเสีย ซึ่งมีความเข้มข้นค่าของแข็งละลายน้ำและค่าคลอรีนสูง ดังตารางที่ 4.5 เมื่อปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ

จากการศึกษาผลกระทบของรูปแบบกลไกรูปแบบการไหลแบบที่ 2 ที่สภาวะที่เหมาะสมเช่นกันโดยมีการติดตั้งระบบ ดังรูปที่ 3.3 เมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่าการทดลองเข้าสู่สมดุลในเวลา 12 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอรีนคือร้อยละ  $67.55 \pm 1.02$  ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ  $67.63 \pm 1.05$  ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  $97.56 \pm 0.68$  ซึ่งมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดดังรูปที่ 4.10 จากรูปแบบระบบการติดตั้งระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบที่ 2 พบว่าเมื่อน้ำเสียเข้าระบบทางช่องกลางทำให้ไอออนในน้ำเสียเคลื่อนตัวผ่านเยื่อกรองเลือกผ่านประจุและน้ำทิ้งไหลออกทางด้านบนของระบบถึงปฏิริยาเป็นน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีปริมาณน้ำทิ้งเป็นร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำเสียที่เข้าบำบัด ซึ่งมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.04 และค่าอัลคาไลน์ดีเฉลี่ยเท่ากับ 76 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร และได้นำน้ำทิ้งกลับมาหมุนเวียนในถังปฏิริยาโดยไหลเข้าช่องแอโนดและแคโทดร้อยละ 10 และนำมารวมกับน้ำเสียอีกร้อยละ 80 จึงทำให้น้ำออกทางช่องแอโนดมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 2.55 เนื่องจากน้ำเสียมีความเค็มลดลงแต่มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นจากปฏิริยารีดักชันทำให้เกิดก๊าซคลอรีนและกรดไฮโดรคลอริก ส่วนน้ำออกทางช่องแคโทดมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 12.2 และค่าอัลคาไลน์ดีเฉลี่ยเท่ากับ 7,708 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร เนื่องจากมีความเป็นด่างเพิ่มขึ้นจากปฏิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยลักษณะน้ำเข้าและออกของรูปแบบการเดินระบบแบบใหม่แสดงดังตารางที่ 4.6 และใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด  $2.67 \text{ kWh/m}^3$

จากการศึกษาผลกระทบของรูปแบบการไหลในถังปฏิริยาทั้ง 2 แบบ พบว่ารูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำและคลอรีนสูงกว่าแบบที่ 1 และมีปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากระบบเท่ากันคือร้อยละ 20 ของน้ำเสียเข้าระบบบำบัดแต่รูปแบบ

การไหลแบบที่ 2 สามารถแยกชนิดน้ำเสียได้ชัดเจนกว่ารูปแบบการไหลแบบที่ 1 เนื่องจากกลไกการไหลเวียนของน้ำทิ้งในระบบ ดังรูปที่ 3.3 ทำให้น้ำเสียฝั่งซ้ายแอนโอดเกิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ส่วนบริเวณฝั่งขวาแคโทดเกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อในภาคอุตสาหกรรมได้และง่ายต่อการกำจัด รูปแบบการไหลทั้งสองใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกันแต่รูปแบบที่ 2 ใช้เวลาในการเดินระบบนานกว่ารูปแบบที่ 1 จึงได้เลือกรูปแบบการไหลแบบที่ 2 ในการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่องเป็นระยะ 7 วัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดคลอรีน ของแฉังละลายน้ำ ความกระด้างทั้งหมด และความเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัด

ตารางที่ 4.6 ลักษณะน้ำเข้าและออกของรูปแบบการเดินระบบแบบที่ 2

พารามิเตอร์	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น ขั้วแกโทด	น้ำเข้มข้น ขั้วแอนโนด	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 <sub>3</sub> )	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 และรูปที่ 3.3 พบว่า รูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่ารูปแบบที่ 1 มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอรีนคือร้อยละ  $67.55 \pm 1.02$  ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ  $67.63 \pm 1.05$  ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  $97.56 \pm 0.68$  ซึ่งมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดดังรูปที่ 4.10 โดยรูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีปริมาณน้ำทิ้งน้อยกว่ารูปแบบที่ 1 เนื่องจากได้นำน้ำที่กลับมาหมุนเวียนในทั้งปฏิกิริยาโดยไหลเข้าช่องแอโนดและแคโทดของร้อยละ 10 และนำมาพร้อมกับน้ำเสียอีกร้อยละ 80 จึงทำให้ผลพลอยได้ที่เกิดจากปฏิกิริยาแบ่งเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ชัดเจนการศึกษานี้ได้ประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการศึกษาชุดการทดลองทั้ง 13 ชุด โดยคิดต่อ 1 ลบ.ม. น้ำเสีย พบว่าพลังงานที่ใช้ทั้งหมดและค่าไฟฟ้าแปรผัน โดยตรงกับระยะเวลาสัมผัส ความต่างศักย์ และพื้นที่ผิวสัมผัส การประเมินค่าไฟฟ้าเบื้องต้นสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะแบ่งเป็น 2 ส่วน นั่นคือ 1) ค่าไฟฟ้าพื้นฐาน ซึ่งประกอบด้วย ค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าบริการ ส่วนที่ 2) คือ ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7% ซึ่งการประเมินค่าไฟฟ้าเบื้องต้นดังตารางที่ 4.7 เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบสามารถบำบัดน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร โดยตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข. เป็นรายการคำนวณค่าไฟฟ้าเบื้องต้น (Y.-M. Chao, T.M. Liang et al., 2008; การไฟฟ้านครหลวง, 2563) จากการคำนวณค่าไฟฟ้าพบว่า ที่สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของรูปแบบการไหลแบบที่ 1 คือ ชุดการทดลองที่ 10 ใช้พลังงานในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลบ.ม. เท่ากับ  $0.36 \text{ kWh/m}^3$  ประเมินเป็นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 41 บาท และรูปแบบการไหลแบบที่ 2 คือ ชุดการทดลองที่ 12 ใช้พลังงานในการบำบัดน้ำเสียและค่าไฟฟ้าเท่ากับชุดการทดลองที่ 10 แต่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าจึงเลือกการใช้รูปแบบการไหลแบบที่ 2 ในการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 7 วัน



ตารางที่ 4.7 ประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้า

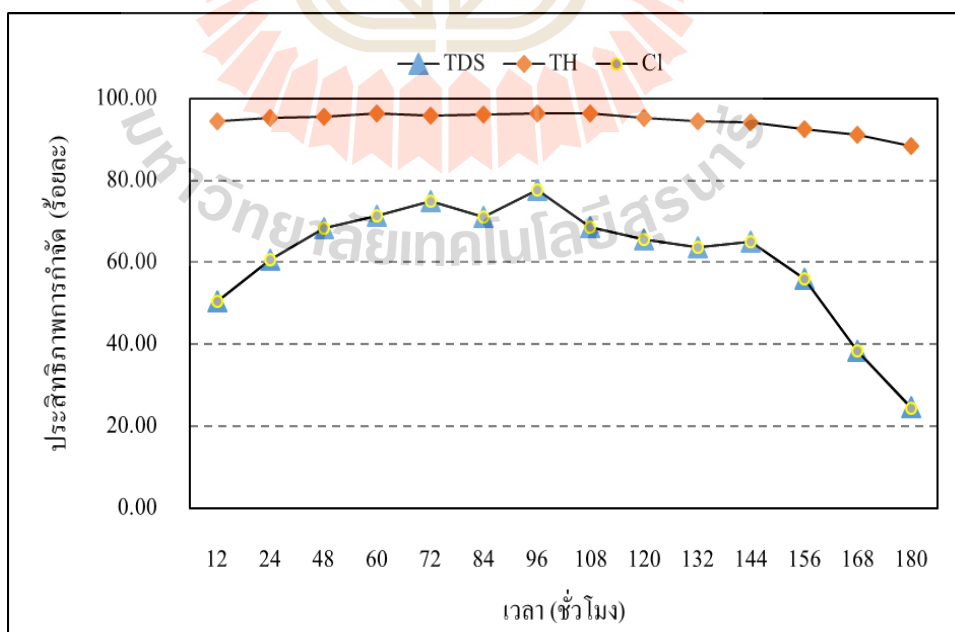
ชุดการทดลองที่	รูปแบบการไหล	ค่าการใช้พลังงาน (kWh/m <sup>3</sup> )	ค่าไฟฟ้า (บาท/ลบ.ม)
1	แบบที่ 1	0.09	41
2		0.12	41
3		0.17	41
4		0.20	41
5		0.02	41
6		0.14	41
7		0.42	41
8		0.90	42
9		0.25	41
10		0.36	41
11		0.40	41
12	แบบที่ 2	0.36	41
13	แบบที่ 2 ต่อเนื่อง 7 วัน	0.23	41

#### 4.4 การเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง

##### 4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ

การศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยสถานะที่เหมาะสมคือความต่างศักย์ 10 โวลต์ ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที และพื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตร.ซม. เป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำ ความกระด้างทั้งหมด และความเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ จากการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่าการทดลองเข้าสู่สมดุลในเวลา 60 ถึง 96 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอไรด์คือร้อยละ  $74.45 \pm 4.78$  ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ  $74.39 \pm 4.79$  ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  $96.31 \pm 0.21$  ซึ่งมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดดังรูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด จากกราฟมีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดลดลงช่วงเวลาที่ 144 ชั่วโมง เนื่องจากกระแสไฟฟ้าภายในระบบลดลงจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชันที่ขั้วไฟฟ้า

ลดลงและเกิดการอ้อมตัวของไอออนภายในระบบ เนื่องจากน้ำเสียในช่องแอคโตนมีความเป็นกรด เนื่องจากเกิดสารละลายกรดไฮดรอกซิดริกเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงอยู่ที่ 1.7 ส่วนช่องแคโทดมีความเป็นเบสสูง เนื่องจากเกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้มีแนวโน้มค่าพีเอชสูงขึ้นอยู่ที่ 13.8 จากเดิมน้ำเสียดังเคราะห์มีค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ที่  $7.54 \pm 0.07$  ตามตารางที่ 4.8 ลักษณะน้ำเข้าและออกของการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มลดลง (A. Campione et al., 2018) จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าสามารถกำจัดคลอไรด์ได้ร้อยละ 98 โดยความเข้มข้นคลอไรด์เริ่มต้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสถานะความต่างศักย์ไฟฟ้า 9 โวลต์ มีอุณหภูมิ  $55^{\circ}\text{C}$  (M. Sadrzadeh et al., 2008) และในสถานะค่าความต่างศักย์ 15 โวลต์ สามารถกำจัดค่าของแข็งละลายได้ร้อยละ 62.2 (Jie Liu et al., 2016) โดยน้ำเสียมีความเข้มข้นคลอไรด์เท่ากับ 33,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 66,800 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  จากการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาสัมผัสซึ่งเป็นระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนในสารละลายกับอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซคลอรีน และก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วทั้งสองในระยะเวลาสัมผัสที่ 20 นาที สามารถกำจัดโซเดียมคลอไรด์ได้ร้อยละ 98.3 (Wei Tan et al., 2016) จากน้ำเกลือเข้มข้น 33,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อระยะเวลาสัมผัสมากเกินไปจนทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้ามากเกินไปจนเกินพอเช่นกันจึงส่งผลกระทบต่อให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด

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 <sub>3</sub> )	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  $6.56 \pm 2.12$  โดยใช้เวลาในการเดินระบบ 7 วัน ตรวจสอบสัณฐานวิทยาขั้วไฟฟ้า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) จากศึกษาพบว่าเมื่อเริ่มทำการทดลองโดยจ่ายความต่างศักย์ 10 โวลต์ เข้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันในการบำบัดน้ำเสียดังสมการที่ 4.1 ถึงสมการที่ 4.4 เมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้นนำขั้วไฟฟ้าตรวจสอบสัณฐานวิทยาพบว่า บริเวณขั้วแอโนดมีคราบตะกอนเกาะอยู่บริเวณขั้วแกรไฟต์ ซึ่งต่างจากภาพก่อนเริ่มทำการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12 และภาพถ่ายหลังทำการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13 สังเกตได้ว่ามีตะกอนสีขาวมาเกาะกระจายบริเวณแผ่นขั้วแกรไฟต์ เนื่องจากการแช่อยู่ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูงจึงทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบเป็นรูเข็ม (Pitting) เป็นรูลักษณะเล็กเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณผิวหน้าขั้วแกรไฟต์ทำให้เกิดรูพรุนทำให้คลอไรด์ไอออนเข้ามาอุดและเกาะภายในหลุมของขั้วแกรไฟต์ ซึ่งภายในหลุมมีไฮโดรเจนไอออนจึงรวมตัวกับคลอไรด์ไอออนจึงเกิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกทำให้ค่าพีเอชภายในหลุมเหลือเพียง 2 - 3 ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนต่อเนื่องอย่างรุนแรง (McCafferty E. et al., 2009) บริเวณผิวขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยามีนตะกอนเกาะเป็นผงเล็กเล็ก ๆ ส่วนแผ่นไทเทเนียมมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนสูงกว่าแกรไฟต์ซึ่งพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ดังตารางที่ 2.11 จึงทำให้เกิดการผุกร่อนของโลหะมากกว่าแกรไฟต์ดังรูปที่ 4.15 เป็นการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic corrosion) โดยอิเล็กตรอนขั้วไทเทเนียมวัดคู่ทั้งสองสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับน้ำเสียได้ดีกว่าขั้วแกรไฟต์จึงผุกร่อนมากกว่า ซึ่งทำให้เกิดความต้านทานภายในขั้วไฟฟ้าสูงขึ้นจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของระบบมีแนวโน้มลดลง (Gabrielli C. et al., 2006)

ที่ขั้วแคโทด (ขั้วลบ) : Oxidation ให้อิเล็กตรอนกับสารละลาย



ที่ขั้วแอโนด (ขั้วบวก) : Reduction รับผิดชอบต่ออิเล็กตรอนจากสารละลาย



จากการศึกษาสัณฐานวิทยาขั้วไฟฟ้าได้วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เกาะติดบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าเพื่อยืนยันการเกิดคราบตะกอนเกาะติดบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเกลือลดลงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับไอออนลดลงโดยใช้วิธีวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy dispersive x-ray spectrometer, EDS) แสดงดังการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของขั้วไฟฟ้าผิวก่อนและหลังทำปฏิกิริยาดังตารางที่ 4.9 พบว่าขั้วแกรไฟต์มีปริมาณคาร์บอนลดลงแต่มีคลอไรด์เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่เกิดบริเวณขั้วแกรไฟต์ ส่วนขั้วไทเทเนียมมีปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมเพิ่มขึ้นเกิดจากความกระด้างในน้ำเสียมาทำปฏิกิริยาที่ขั้วไทเทเนียมจึงเกาะติดเป็นตะกอนทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเกลือลดลง และมีปริมาณธาตุไทเทเนียมลดลงซึ่งสอดคล้องกับการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ที่กล่าวข้างต้น

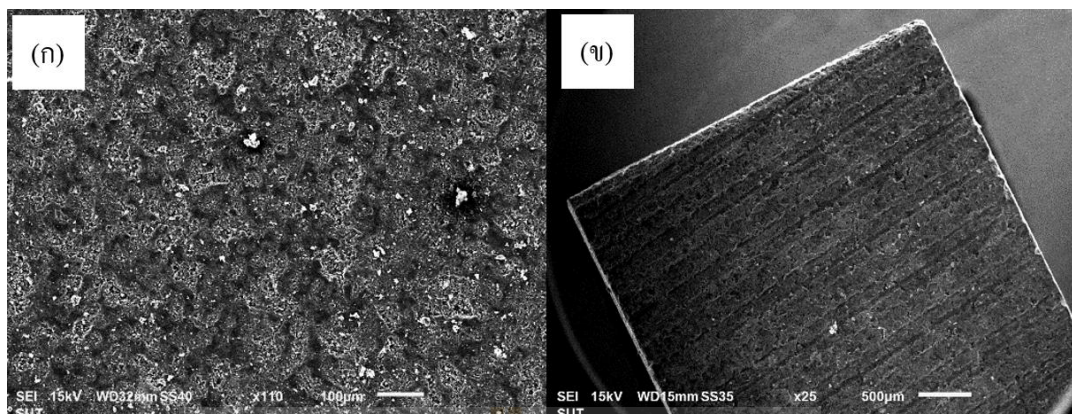
ตารางที่ 4.9 วิเคราะห์ปริมาณธาตุของขั้วไฟฟ้าผิวก่อนและหลังทำปฏิกิริยา

ขั้วไฟฟ้า	ธาตุ	ก่อนทำปฏิกิริยา		หลังทำปฏิกิริยา	
		น้ำหนัก (ร้อยละ)	อะตอม (ร้อยละ)	น้ำหนัก (ร้อยละ)	อะตอม (ร้อยละ)
แกรไฟต์ ผิวหน้า	C	100	100	74.49	84.90
	O	-	-	8.32	7.12
	Na	-	-	6.40	3.81
	Cl	-	-	10.79	4.17
แกรไฟต์ ผิวข้าง	C	100	100	70.58	81.49
	O	-	-	10.48	9.13
	Na	-	-	7.20	4.36
	Cl	-	-	11.74	4.62

ตารางที่ 4.9 วิเคราะห์ปริมาณธาตุของข้าวไฟฟ้าผิวก่อนและหลังทำปฏิกิริยา (ต่อ)

ข้าวไฟฟ้า	ธาตุ	ก่อนทำปฏิกิริยา		หลังทำปฏิกิริยา	
		น้ำหนัก (ร้อยละ)	อะตอม (ร้อยละ)	น้ำหนัก (ร้อยละ)	อะตอม (ร้อยละ)
ไทเทเนียม ผิวน้ำ	C	-	-	12.05	19.61
	O	34.25	64.67	50.16	61.29
	Na	1.90	2.50	-	-
	Al	3.55	3.98	-	-
	P	2.17	2.11	-	-
	Cl	1.46	1.24	-	-
	Mg	-	-	7.20	5.79
ไทเทเนียม ผิวแห้ง	Ca	1.45	1.09	12.37	6.04
	Ti	57.33	36.15	15.41	6.29
	Fe	-	-	2.80	0.98
	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	-	-

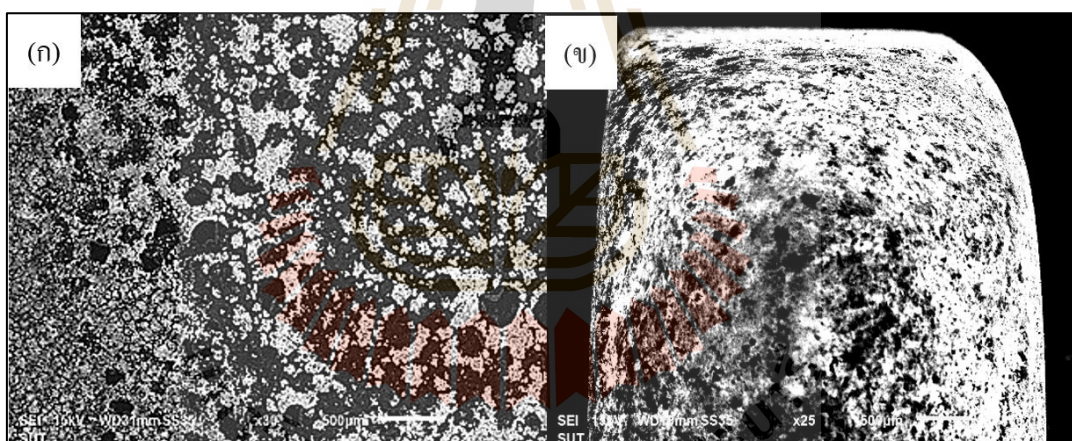




รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายชิ้นแกรไฟต์ก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM

(ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน

(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน

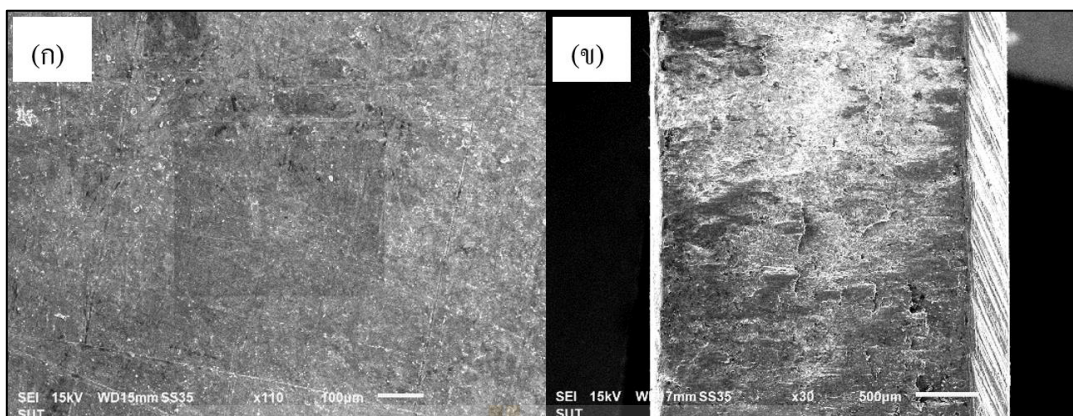


รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายชิ้นแกรไฟต์หลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM

(ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน

(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน

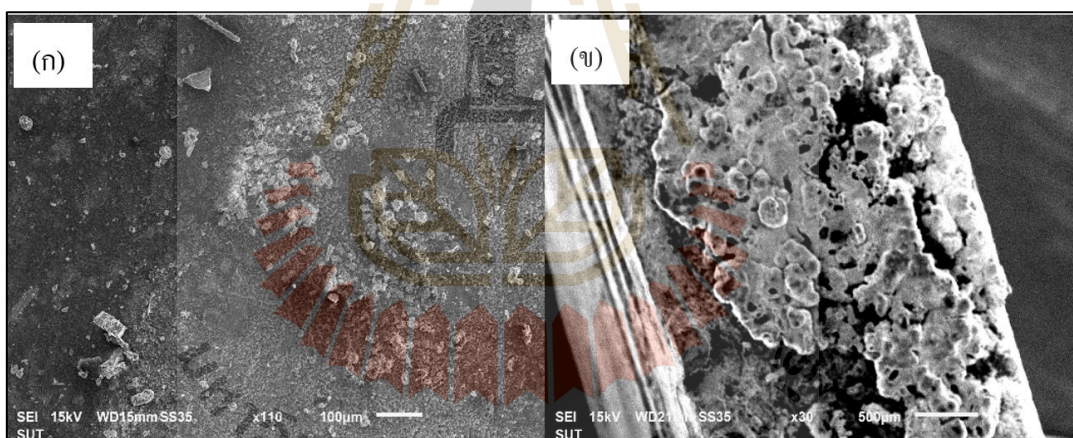




รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายขั้วไทเทเนียมก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM

(ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน

(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายขั้วไทเทเนียมหลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM

(ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน

(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน

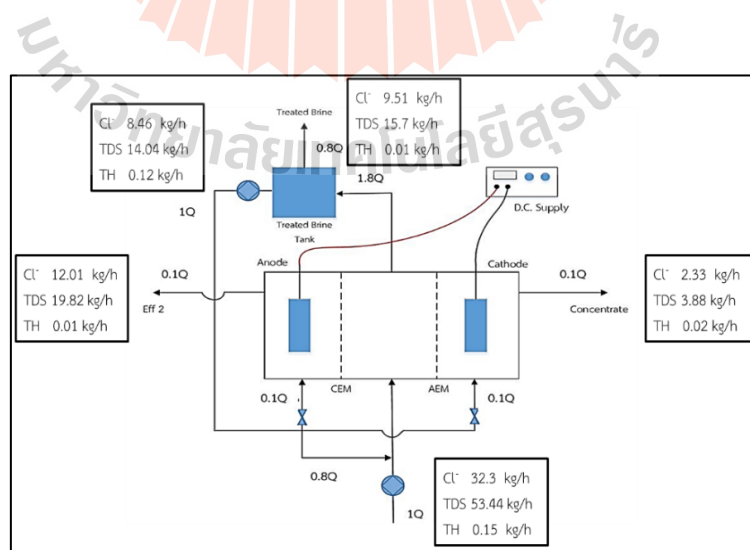
#### 4.4.3 การศึกษากลไกการบำบัดของระบบด้วยสมดุลมวล

ผลการศึกษการประเมินสมดุลของการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง ดังตารางที่ 4.8 พบว่าระบบมีปริมาณคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำ และความกระด้างทั้งหมดหายไปจากระบบบำบัด ซึ่งเกิดจากกลไกการกำจัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าจึงทำให้คลอไรด์น้ำทิ้ง

มีปริมาณลดลงและบางส่วนกลายเป็นก๊าซคลอรีนจำนวนหนึ่งจากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแอโนด เมื่อก๊าซคลอรีนอยู่ในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้กรดไฮโปคลอรัส และกรดไฮโดรคลอริก โดยทำการศึกษาปริมาณคลอรีนอิสระที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดดังตารางที่ 4.3 ในภาคผนวก ข ซึ่งมีปริมาณคลอรีนอิสระอยู่ในช่วง 40 - 566 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่ากระบวนการบำบัด เกิดก๊าซคลอรีนได้จริงดังสมการที่ 4 - 3 การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแอโนดเนื่องจากเมื่อก๊าซ คลอรีนละลายลงในน้ำจะเปลี่ยนรูปเป็นคลอรีนอิสระ ส่วนความกระด้างทั้งหมดที่หายไปเกิดจาก ผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากพีเอชในช่องแคโทด สูงกว่า 10 จึงทำให้เกิดผลึกในถังปฏิกิริยา และบางส่วนไปเกาะที่ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดคราบตะกรัน ของแคลเซียมและแมกนีเซียมได้เช่นกัน จึงทำให้ของแข็งละลายน้ำในระบบลดลงด้วยเช่นกัน โดยประเมินกลไกการบำบัดของระบบแบบต่อเนื่องด้วยสมดุลมวลดังรูปที่ 4.16 พบว่ามีคลอไรด์ หายไปจากระบบ 8.4 kg/hr กลายเป็นก๊าซคลอรีน และความกระด้างทั้งหมดหายไป 0.12 kg/hr มาเกาะติดบริเวณขั้วไทเทเนียมซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลฐานฐานวิทยาข้างต้น

ตารางที่ 4.10 ประเมินสมดุลมวล

พารามิเตอร์ (kg/hr)	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเข้มข้นขั้วแอโนด	น้ำเข้มข้นขั้วแคโทด
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 ผลพลอยได้จากระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์มีผลพลอยได้ที่เกิดจากการบำบัด คือ ก๊าซคลอรีน ก๊าซไฮโดรเจน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังสมการที่ 4.7 สามารถนำผลพลอยได้ทั้งหมดกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมได้ โดยสามารถนำก๊าซคลอรีนมาเชื้อโรคในระบบประปา ก๊าซไฮโดรเจนเป็นพลังงานหมุนเวียนในโรงงานอุตสาหกรรม และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ในการปรับพีเอชสามารถลดต้นทุนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป โดยจากการศึกษาพบปริมาณก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นระบบคือ 8.45 kg/hr จากการวิเคราะห์สมดุลมวลของระบบตามตารางที่ 4.9 และทางทฤษฎีสมการออกซิเดชันรีดักชันของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้นำก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นละลายลงในน้ำ เพื่อวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เกิดขึ้นเพื่อยืนยันการเกิดก๊าซคลอรีนในระบบ โดยพบค่าคลอรีนอิสระแสดงดังตารางที่ ข.3 ในภาคผนวก ข ส่วนก๊าซไฮโดรเจนได้ทำการเก็บและวิเคราะห์ปริมาณโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) พบว่ามีปริมาณร้อยละ 100 ของน้ำหนักก๊าซต่อปริมาตร และมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นจากระบบโดยไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นที่บริเวณแคโทดรวมกับโซเดียมไอออนเกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงพิจารณาจากค่าพีเอชพบว่าน้ำเสียทางช่องแคโทดมีค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ที่ 12.9 จึงยืนยันได้ว่าเกิดสารละลายไฮดรอกไซด์จริง

สมการรวมการเกิดปฏิกิริยา



ตารางที่ 4.11 วิเคราะห์ปริมาณก๊าซ

ก๊าซ	น้ำหนัก (ร้อยละ)	อะตอม (ร้อยละ)
H <sub>2</sub>	100	100

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและศึกษาความเป็นไปได้การใช้วิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในการบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน ซึ่งในการศึกษาในชุดการทดลองที่ 1 - 12 ชุดการทดลองแบบกะเดินระบบเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงต่อชุดการทดลอง จะทำการแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาสัมผัส และพื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า เพื่อเลือกค่าการเดินระบบที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาความเป็นไปได้การใช้วิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์เดินระบบระยะยาว จากการศึกษพบว่าประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยสรุปดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

###### 5.1.1.1 ระยะเวลาสัมผัส

จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาสัมผัสที่ 25 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดเมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่าการทดลองเข้าสู่สมดุลในเวลา 10 ชั่วโมง เนื่องจากค่าแปรปรวนของข้อมูลอยู่ที่ร้อยละ 2.27 ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอรีนคือ ร้อยละ  $42.36 \pm 2.27$  ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ  $42.89 \pm 1.77$  ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  $99.90 \pm 0.17$  โดยระยะเวลาสัมผัสเป็นระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนในสารละลายกับอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซคลอรีน และก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วทั้งสองจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคลอรีนของแข็งละลายน้ำและความกระด้างทั้งหมด แต่ถ้าเวลาสัมผัสมากเกินไปอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้ามากเกินไปเช่นกัน จึงส่งผลกระทบต่อเกิดการกัดกร่อนบริเวณขั้วไฟฟ้าจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง

### 5.1.1.2 ความต่างศักย์

จากการศึกษาพบว่าที่ความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด เมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่าการทดลองเข้าสู่สมดุลในเวลา 9 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอไรด์คือร้อยละ  $42.50 \pm 1.80$  ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ  $43.35 \pm 2.67$  ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  $98.96 \pm 0.01$  เมื่อความต่างศักย์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนของไอออนมากขึ้นเช่นกันแต่ทำให้กระแสไหลผ่านในระบบสูงขึ้นจึงทำให้เกิดการอึดตัวของไอออนในระบบและอุณหภูมิสูงทำให้การทำงานของเยื่อกรองแลกเปลี่ยนไอออนและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่สูงขึ้น

### 5.1.1.3 พื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า

จากการศึกษาผลกระทบของพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาการกำจัดเกลือ โดยอาศัยกระแสไฟฟ้าเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนในน้ำเสียกับอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้าให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน - ออกซิเดชัน พบว่าพื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตร.ซม มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด เมื่อนำผลการศึกษาไปทดสอบทางสถิติโดยใช้ Moving average test โดยกำหนดค่าความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 5 พบว่าการทดลองเข้าสู่สมดุลในเวลา 11 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอไรด์คือร้อยละ  $61.74 \pm 0.67$  ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ  $62.19 \pm 0.67$  ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  $98.14 \pm 0.17$

### 5.1.1.4 ผลกระทบของรูปแบบการไหลในถังปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพของระบบ

จากการศึกษาผลกระทบของรูปแบบการไหลในถังปฏิกิริยาทั้ง 2 แบบ พบว่ารูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำและคลอไรด์สูงกว่าแบบที่ 1 และมีปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากระบบเท่ากันคือร้อยละ 20 ของน้ำเสียเข้าระบบบำบัด แต่รูปแบบการไหลแบบที่ 2 สามารถแยกชนิดน้ำเสียได้ชัดเจนกว่ารูปแบบการไหลแบบที่ 1 เนื่องจากกลไกการไหลเวียนของน้ำทั้งในระบบดังรูปที่ 3.3 ทำให้น้ำเสียฝังขั้วแอโนดเกิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกส่วนบริเวณฝังขั้วแคโทดเกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อในภาคอุตสาหกรรมได้และง่ายต่อการกำจัด รูปแบบการไหลทั้งสองใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกันแต่รูปแบบที่ 2 ใช้เวลาในการเดินระบบนานกว่ารูปแบบที่ 1 จึงได้เลือกรูปแบบการไหลแบบที่ 2 ในการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่องเป็นระยะ 7 วัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ ของแข็งละลายน้ำ ความกระด้างทั้งหมด และความเสถียรภาพในการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์



### 5.1.1.5 การประเมินปัจจัยการเดินระบบที่มีความเหมาะสม

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่สภาวะที่เหมาะสม คือ ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที พื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตารางเซนติเมตร และความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ โดยทำการเปรียบเทียบรูปแบบการไหลแบบที่ 1 และรูปแบบการไหลแบบที่ 2 ซึ่งการติดตั้งระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ทั้งสองแสดงดังรูปที่ 3.2 และดังรูปที่ 3.3 พบว่า รูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพกำจัดสูงกว่ารูปแบบที่ 1 โดยรูปแบบการไหลแบบที่ 2 มีปริมาณน้ำทิ้งน้อยกว่ารูปแบบที่ 1 เนื่องจากได้นำน้ำทิ้งกลับมาหมุนเวียนในทั้งปฏิกิริยาโดยไหลเข้าช่องแอโนดและแคโทดช่องร้อยละ 10 และนำมาผสมกับน้ำเสียอีกร้อยละ 80 จึงทำให้ผลพลอยได้ที่เกิดจากปฏิกิริยาแบ่งเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ชัดเจน การศึกษานี้ได้ประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการศึกษาชุดการทดลองทั้ง 13 ชุด โดยคิดต่อ 1 ลบ.ม. น้ำเสีย พบว่าพลังงานที่ใช้ทั้งหมดและค่าไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับระยะเวลาสัมผัส ความต่างศักย์ และพื้นที่ผิวสัมผัส จากการคำนวณค่าไฟฟ้าพบว่าที่สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของรูปแบบการไหลแบบที่ 1 คือชุดการทดลองที่ 10 ใช้พลังงานในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลบ.ม. เท่ากับ 0.36 kWh/m<sup>3</sup> ประเมินเป็นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 41 บาท และรูปแบบการไหลแบบที่ 2 คือชุดการทดลองที่ 12 ใช้พลังงานในการบำบัดน้ำเสียและค่าไฟฟ้าเท่ากับชุดการทดลองที่ 10 แต่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าจึงเลือกการใช้รูปแบบการไหลแบบที่ 2 ในการศึกษาการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 7 วัน

### 5.1.2 ผลการศึกษาความเป็นไปได้การใช้วิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์

#### 5.1.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ

จากการศึกษาความเป็นไปได้การใช้วิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยสภาวะที่เหมาะสมคือความต่างศักย์ 10 โวลต์ ระยะเวลาสัมผัส 25 นาที และพื้นที่ผิวสัมผัส 200 ตร.ซม. เป็นระยะเวลา 7 วัน เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของคลอไรด์คือร้อยละ  $74.45 \pm 4.78$  ของแข็งละลายน้ำคือร้อยละ  $74.38 \pm 4.79$  ความกระด้างทั้งหมดคือร้อยละ  $96.31 \pm 0.21$  เมื่อเข้าสู่ช่วงเวลาที่ 144 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าภายในระบบลดลงจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าลดลง และเกิดการอึดตัวของไอออนและขั้วไฟฟ้าเกิดการสุกก่อนจากการใช้งานเป็นระยะเวลานาน จึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในระบบลดลงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ทั้งนี้ประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัส พื้นที่ผิวสัมผัสขั้วไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

ถ้ามีพื้นที่ผิวสัมผัสมากสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากเช่นกัน แต่ระยะห่างระหว่างขั้วมากจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระแสไฟฟ้า ถ้าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามากทำให้ประสิทธิภาพการไหลของกระแสไฟฟ้าลดลง เนื่องจากความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น และความต่างศักย์ส่งผลโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าถ้าความต่างศักย์สูงกระแสไฟฟ้าสูงเช่นกัน

### 5.1.2.2 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าบริเวณขั้วแอโนดมีคราบตะกอนเกาะอยู่บริเวณขั้วแกรไฟต์ ซึ่งต่างจากภาพก่อนเริ่มทำการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 และดังรูปที่ 4.8 สังเกตได้ว่ามีตะกอนสีขาวมาเกาะกระจายบริเวณแผ่นขั้วแกรไฟต์ เนื่องจากการแช่อยู่ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นคลอรีนสูงจึงทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting) เป็นรูลักษณะเล็กเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณผิวหน้าขั้วแกรไฟต์ทำให้เกิดครุพุนทำให้โซเดียมไอออนเข้ามาอุดและเกาะในบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาจนเป็นตะกอนเกาะบริเวณขั้วแกรไฟต์ ส่วนแผ่นไทเทเนียมมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนสูงกว่าแกรไฟต์ ซึ่งพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตามตารางที่ 2.11 จึงทำให้เกิดการผุกร่อนของโลหะมากกว่าแกรไฟต์ดูจากรูปที่ 4.10 (ก) เป็นการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic corrosion) โดยอิเล็กตรอนขั้วไทเทเนียมวัสดุทั้งสองสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับน้ำเสียได้ดีกว่าขั้วแกรไฟต์จึงผุกร่อนมากกว่า ซึ่งทำให้เกิดความต้านทานภายในขั้วไฟฟ้าสูงขึ้นจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของระบบมีแนวโน้มลดลง

### 5.1.2.3 การศึกษากลไกการบำบัดของระบบด้วยสมดุลมวล

ผลการศึกษาการประเมินสมดุลของการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์แบบต่อเนื่องดังตารางที่ 4.6 พบว่าระบบมีปริมาณคลอรีนของแข็งละลายน้ำและความกระด้างทั้งหมดหายไปจากระบบบำบัด ซึ่งเกิดจากกลไกการกำจัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าจึงทำให้คลอรีนน้ำทิ้งมีปริมาณลดลงและบางส่วนกลายเป็นก๊าซคลอรีนจำนวนหนึ่งจากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแอโนด เมื่อก๊าซคลอรีนอยู่ในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้กรดไฮโปคลอรัส และกรดไฮโดรคลอริก โดยทำการศึกษาปริมาณคลอรีนอิสระที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดดังตารางที่ 4.7 พบว่ามีปริมาณคลอรีนอิสระอยู่ในช่วง 40 - 566 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่ากระบวนการบำบัดเกิดก๊าซคลอรีนได้จริงดังสมการที่ 4 - 5 การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแอโนด เนื่องจากเมื่อก๊าซคลอรีนละลายลงในน้ำจะเปลี่ยนรูปเป็นคลอรีนอิสระส่วนความกระด้างทั้งหมดที่หายไปเกิดจากผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากพีเอชในช่องแคโทดสูงกว่า 10 จึงทำให้เกิดผลึกในถังปฏิกิริยา และบางส่วนไปเกาะที่ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดคราบ



ตะกอนของแคลเซียมและแมกนีเซียมได้เช่นกัน จึงทำให้ของแข็งละลายน้ำในระบบลดลงด้วยเช่นกัน

#### 5.1.2.4 ผลพลอยได้จากระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์

ระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์มีผลพลอยได้ที่เกิดจากการบำบัดคือ ก๊าซคลอรีน ก๊าซไฮโดรเจน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังสมการที่ 4.7 สามารถนำผลพลอยได้ทั้งตัวกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมได้ ซึ่งปริมาณก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นระบบคือ 8.45 kg/hr จากการประเมินสมดุลของการเดินระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ และทฤษฎีสมการออกซิเดชันรีดักชันของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และได้นำก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นละลายลงในน้ำและวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เกิดขึ้นเพื่อยืนยันการเกิดก๊าซคลอรีนในระบบโดยมีค่าคลอรีนอิสระแสดงดังตารางที่ 4.7 ส่วนก๊าซไฮโดรเจนได้ทำการเก็บและวิเคราะห์ปริมาณโดยใช้เครื่องมือเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) พบว่ามีปริมาณร้อยละ 100 ของน้ำหนักก๊าซต่อปริมาตร และมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นจากระบบโดยไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นที่บริเวณแคโทดรวมกับโซเดียมไอออนเกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงพิจารณาจากค่าพีเอชพบว่า น้ำเสียทางช่องแคโทดมีค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ที่ 12.9 จึงยืนยันได้ว่าเกิดสารละลายไฮดรอกไซด์จริง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ควรมีการติดตั้งเครื่องวัดอัตราการเกิดก๊าซคลอรีนและก๊าซไฮโดรเจน เพื่อประเมินอัตราการเกิดก๊าซนำสู่การนำไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรม
2. การศึกษาการทำความบริสุทธิ์ของผลพลอยได้ที่เกิดจากระบบบำบัด ซึ่งประกอบด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
3. การเพิ่มขนาดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงควรมีขนาดใหญ่มากกว่า 30 แอมแปร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคลอรีนเนื่องจากน้ำเสียมีความเข้มข้นคลอรีนสูงจึงทำให้ปริมาณไอออนในระบบสูงเช่นกันเมื่อเพิ่มความต่างศักย์มากขึ้นทำให้กระแสไหลเข้าระบบมากขึ้นเช่นกัน
4. ควรศึกษาการนำน้ำเสียจากระบบการฟื้นฟูสภาพเรซินร่วมกับน้ำเสียจากระบบการชะล้างน้ำเกลือมาบำบัดด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์อาจมีประสิทธิผลการกำจัดสูงและไม่จำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้ามากกว่างานวิจัยครั้งนี้

## รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2540). รายงานการจัดการคุณภาพน้ำและจัดทำแผนปฏิบัติการในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.
- เกษตรสุชา พูลคำ. (2537). การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขานอ้อยและผักตบชวา : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กลุ่มงานเคมี ส่วนวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์ สำนักวิจัยและพัฒนา. (2550). คู่มือการปฏิบัติงานการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ : สำนักพิมพ์กรมชลประทาน. 152 หน้า.
- ชาติชาย ชายตระกูล. (2548). การศึกษาประสิทธิภาพของถังบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 79 หน้า.
- สำนักนโยบายสาธารณะ สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2547) โครงการศึกษาการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของชาติอย่างมีประสิทธิภาพ และการจัดการ 25 ลุ่มน้ำสำคัญของประเทศ
- บริษัท ซีเอ็มเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด. โครงการศึกษาเพื่อประเมินปริมาณสารมลพิษอุตสาหกรรมทางน้ำจากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย.
- บริษัท FUMATECH BWT GmbH. **Functional Membranes and Plant Technology.**
- ณรงค์ศักดิ์ ชุนรักษา และเสาวรักษ์ เพ็ญสวัสดิ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2552). วิชาเคมีในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ตามหนังสือสาระการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติมเคมี เล่ม 4 .พิมพ์ครั้งที่ 6, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 38 หน้า.
- ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. (2555). การเก็บและการรักษาสภาพตัวอย่างน้ำ (**Sampling and Preservation**) : สำนักพิมพ์กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 16 หน้า.
- Abudukeremu, K., Yibatihan, S., Peyman, A. Nadia, F. A. Chandrasekhar, K. and 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, C. (2018). Electrodialysis 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 electrodialysis 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, B. and 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, L. and Junsheng, Y. (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, T. (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, W. Pengbo, Y. and Wei, C. (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 inter stage calcium precipitation. ***Desalination***. 295: 43-52.
- Tsiplakides. (2014). PEM water electrolysis fundamentals. [Online]. Available: <http://research.ncl.ac.uk>.
- Tsuyoshi, H. (2013). Development of technology for recovering lithium from seawater by Electrodesalination using ionic liquid membrane. ***Fusion Engineering and Design***. 88: 2956-2959.



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของระบบแบบกะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 1

ตัวอย่าง ที่เวลา	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)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (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

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเค็มจาก	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเค็มจาก	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเค็มจาก	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 ก.2 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 2 (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
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 ก.3 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 3

ตัวอย่าง ที่เวลา	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	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 ก.3 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 3 (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (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 ก.4 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 4

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำผสมขึ้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำผสมขึ้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำผสมขึ้น
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 ก.4 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 4 (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (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 ก.5 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 5

ตัวอย่าง ที่เวลา	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	7.04	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 ก.5 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 5 (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
1 hr	0.65	139806	137457	144700	135857	84307	83307	84973	82307
2 hr		139806	136907	144500	135827	84307	82974	84973	82307
3 hr		139806	135807	140900	134748	84307	82307	84640	81641
4 hr		138707	133058	149800	133158	83640	80641	83973	80641
5 hr		138707	133608	148800	133158	83640	80974	83973	80641
6 hr		138707	134708	138800	133048	83640	81641	84307	80641
7 hr		138707	131409	136900	13085429	83640	79641	83973	79308
8 hr		138707	126460	135700	124814	83640	76642	84307	75643
9 hr		138707	122611	134800	119311	83640	74310	83973	72310
10 hr		138707	120412	134500	118212	83640	72977	83640	71644
11 hr		138707	119313	133100	117111	83640	72310	83640	70977
12 hr		138707	118763	132800	115424	83640	71977	83973	69978

ตารางที่ ก.6 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 6

ตัวอย่าง ที่เวลา	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	5.13	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)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	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

ตัวอย่าง ที่เวลา	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	7.80	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)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (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

ตัวอย่าง ที่เวลา	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	7.18	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 ก.8 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 8 (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (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 ก.9 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 9

ตัวอย่าง ที่เวลา	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	7.04	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 ก.9 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 9 (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (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 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 10

ตัวอย่าง ที่เวลา	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	7.11	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 ก.10 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 10 (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	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 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 11

ตัวอย่าง ที่เวลา	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 ผลวิเคราะห์น้ำของชุดการทดลองที่ 11 (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (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 ผลวิเคราะห์น้ำซุ้ดการทดลองที่ 12 กลไกการเดินระบบแบบที่ 2

ตัวอย่าง ที่เวลา	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	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



ตารางที่ ก.12 ผลวิเคราะห์น้ำซุ้ดการทดลองที่ 12 กลไกการเดินระบบแบบที่ 2 (ต่อ)

ตัวอย่างที่ เวลา	อัตราการไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
18 hr	0.65	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 ก.12 ผลวิเคราะห์น้ำชุดการทดลองที่ 12 กลไกการเดินระบบแบบที่ 2 (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น
18 hr	0.65	136920	54078	48916	87538	82752	32767	20549	31656
21 hr		136920	52247	62585	86620	82752	31656	22770	31101
24 hr		137837	50413	65331	84787	83307	30546	24436	29990
27 hr		137837	49500	72667	74787	83307	29990	28879	29990
30 hr		137837	69677	91928	104955	83307	42209	40542	42209
33 hr		136920	57754	80006	92125	82752	34989	33323	34433
36 hr		136920	53169	77252	89374	82752	32212	31656	32767
39 hr		136920	48590	72673	82965	82752	29435	28879	28879
42 hr		136004	45840	69007	80213	82196	27769	26658	27213
45 hr		136004	46754	67172	81128	82196	28324	25547	27769
48 hr		136920	44009	66260	77451	82752	26658	24992	25547
51 hr		136920	44924	68091	78368	82752	27213	26103	26103
54 hr		136920	46756	73589	81113	82752	28324	29435	27769
57 hr		137837	43096	67179	78356	83307	26103	25547	26103
60 hr		137837	44928	69927	78363	83307	27213	27213	26103

ตารางที่ ก.12 ผลวิเคราะห์น้ำชุดการทดลองที่ 12 กลไกการเดินระบบแบบที่ 2 (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำทิ้ง	น้ำเจือจาง	น้ำเข้มข้น	น้ำเสีย	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

ตารางที่ ก.13 สรุปค่าพีเอชและอัลคาไลน์ิตี้ของชุดการทดลองที่ 1 - 13

ชุดการทดลองที่	ระยะเวลาสัมผัส (นาท)	ความต่างศักย์ (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.14 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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลวิเคราะห์น้ำของการเดินระบบแบบต่อเนื่อง 7 วัน

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการ ไหล (l/min)	pH				Alk (mg/l)				TH (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น ชีวแคโทด	น้ำเข้มข้น ชีวแอโนด	น้ำทิ้ง	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น ชีวแคโทด	น้ำเข้มข้น ชีวแอโนด	น้ำทิ้ง	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น ชีวแคโทด	น้ำเข้มข้น ชีวแอโนด	น้ำทิ้ง
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

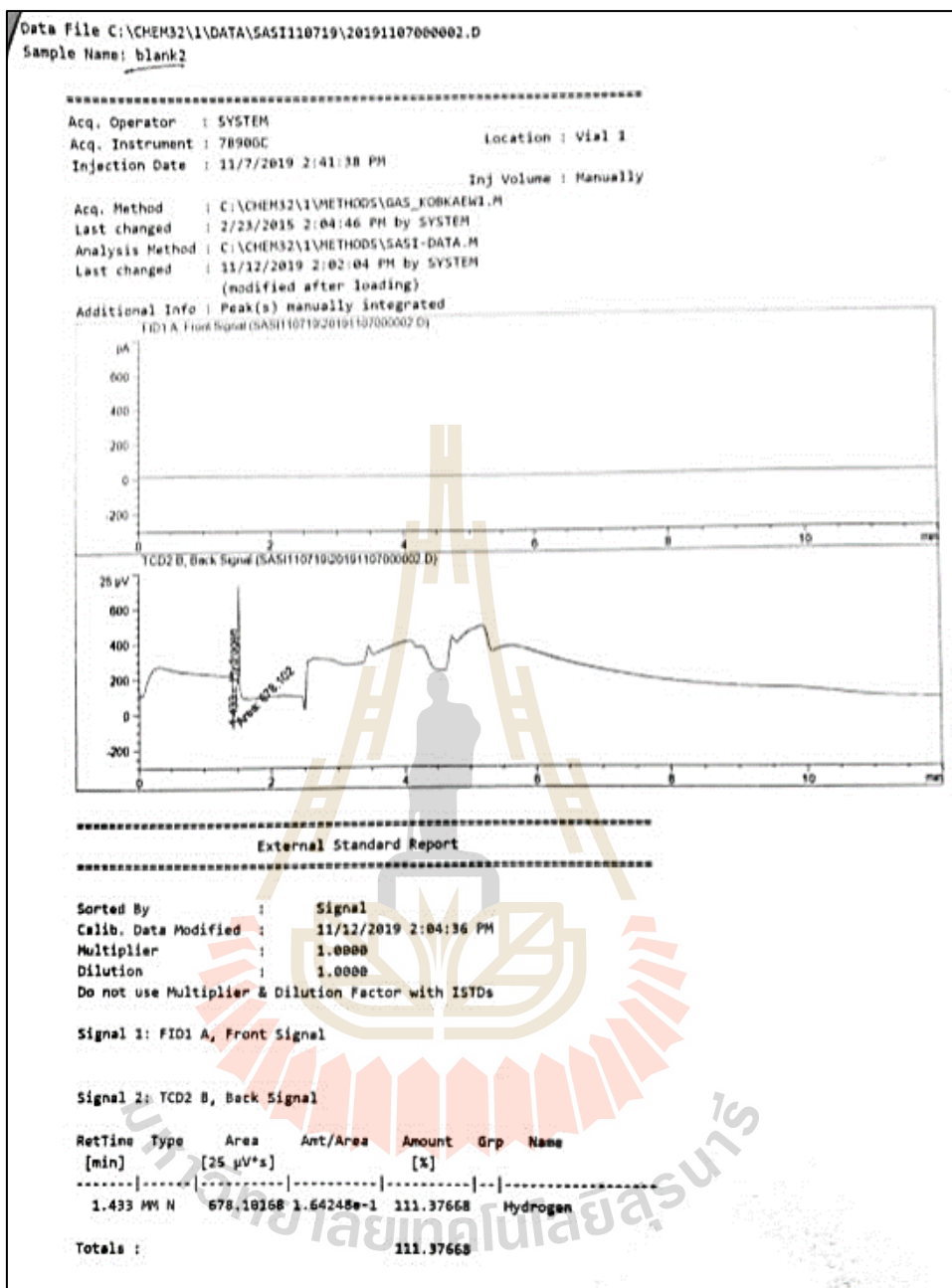


ตารางที่ ข.1 ผลวิเคราะห์น้ำของการเดินระบบแบบต่อเนื่อง 7 วัน (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่เวลา	อัตราการ ไหล (l/min)	TDS (mg/l)				Cl <sup>-</sup> (mg/l)			
		น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น ชีวเคมีโทด	น้ำเข้มข้น ชีวเอโนด	น้ำทิ้ง	น้ำเสีย	น้ำเข้มข้น ชีวเคมีโทด	น้ำเข้มข้น ชีวเอโนด	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



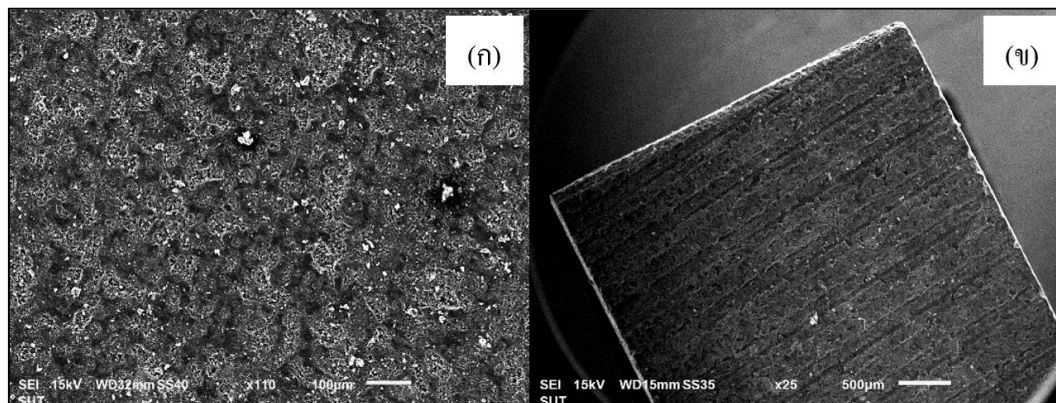
รูปที่ ข.1 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนวิเคราะห์ด้วยวิธี GC



ภาคผนวก ค

ข้อมูลการศึกษาชั้นฐานวิทยา

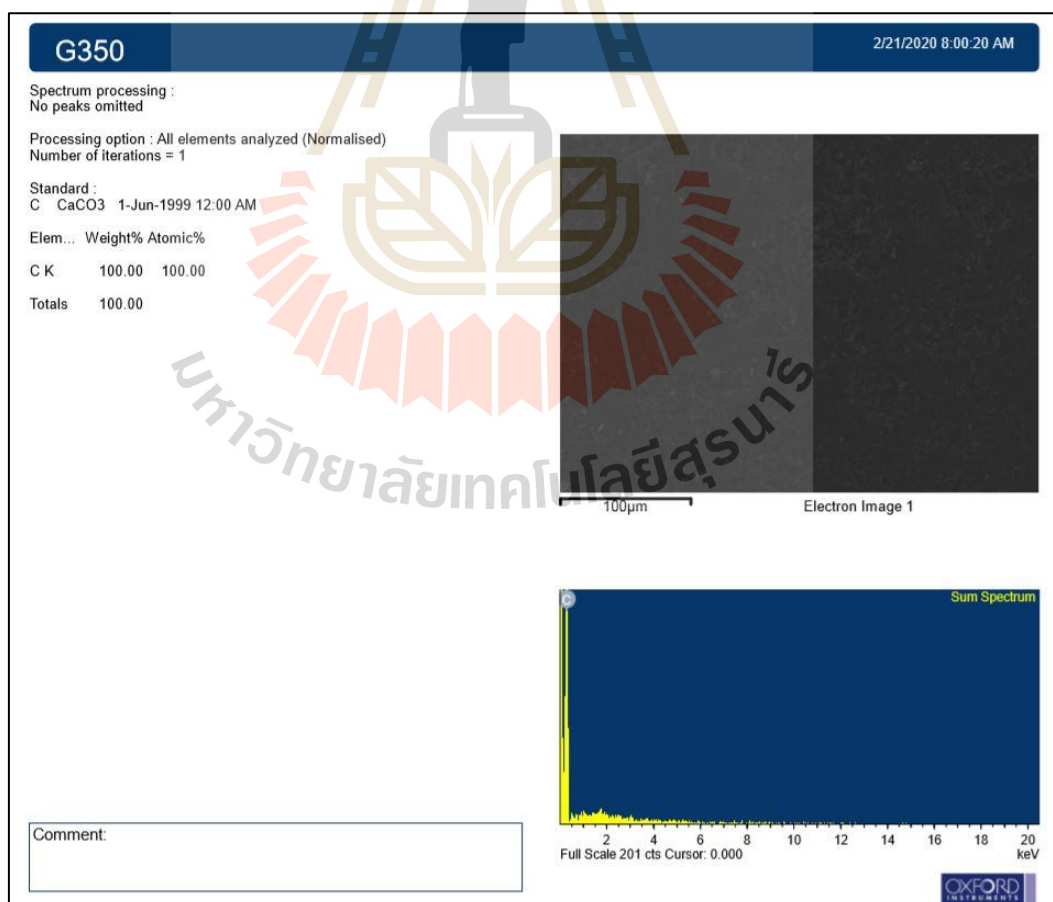
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

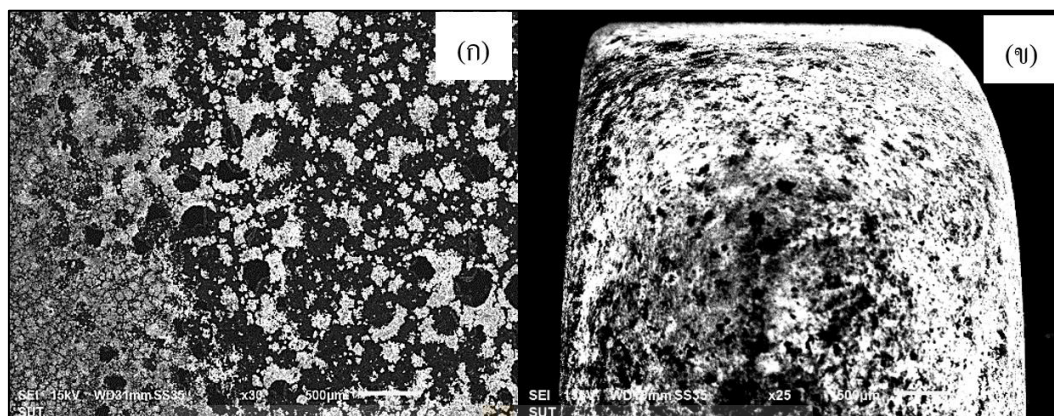


รูปที่ ก.1 ภาพถ่ายขั้วเกรไฟต์ก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM

(ก) ภาพด้านบนผิวขั้วงาน

(ข) ภาพด้านข้างผิวขั้วงาน

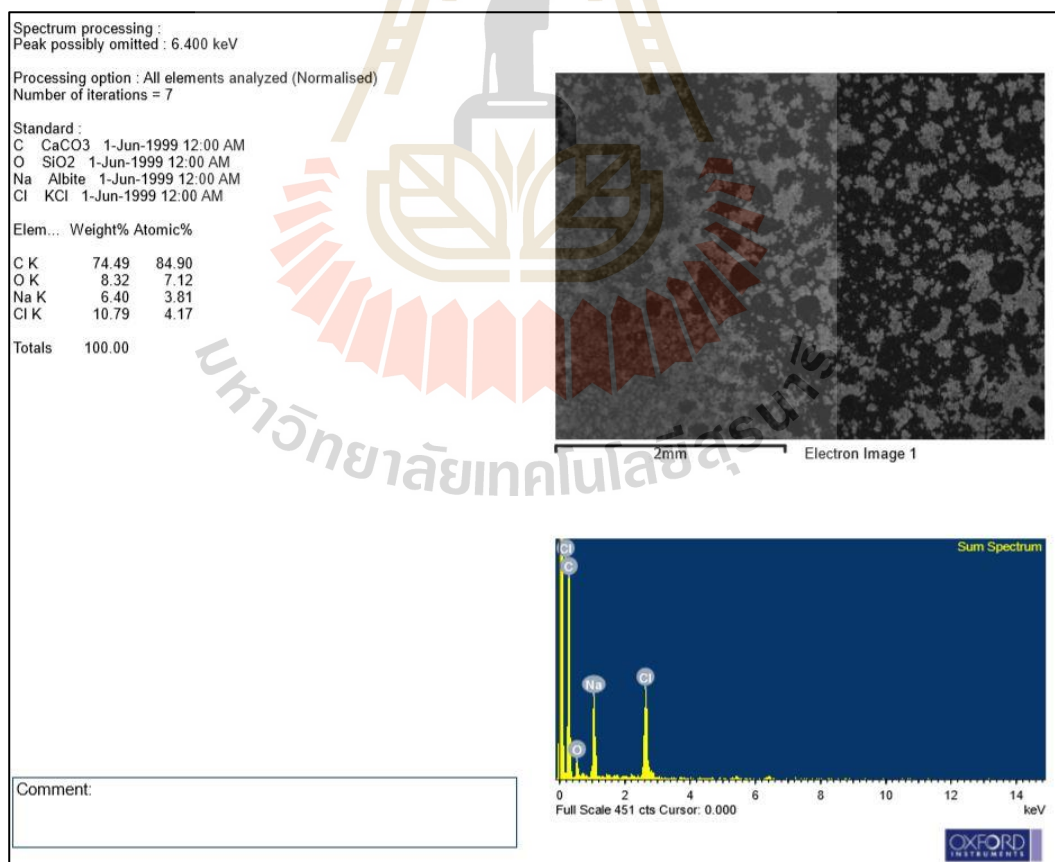




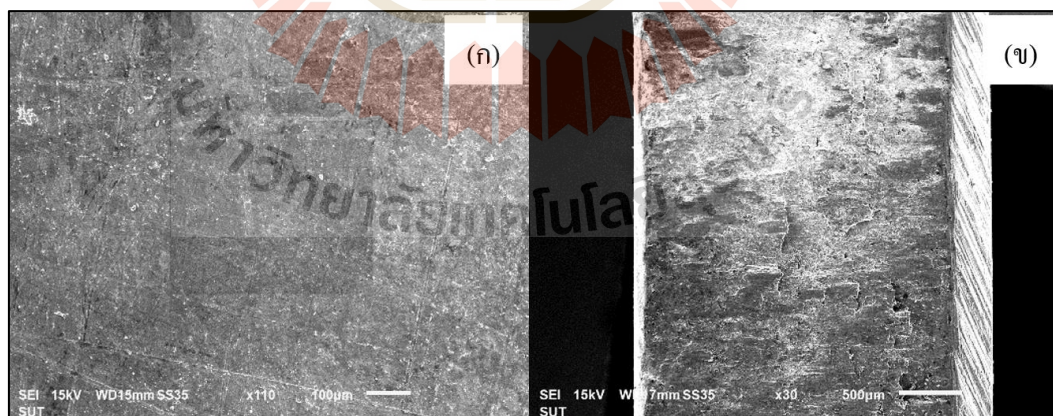
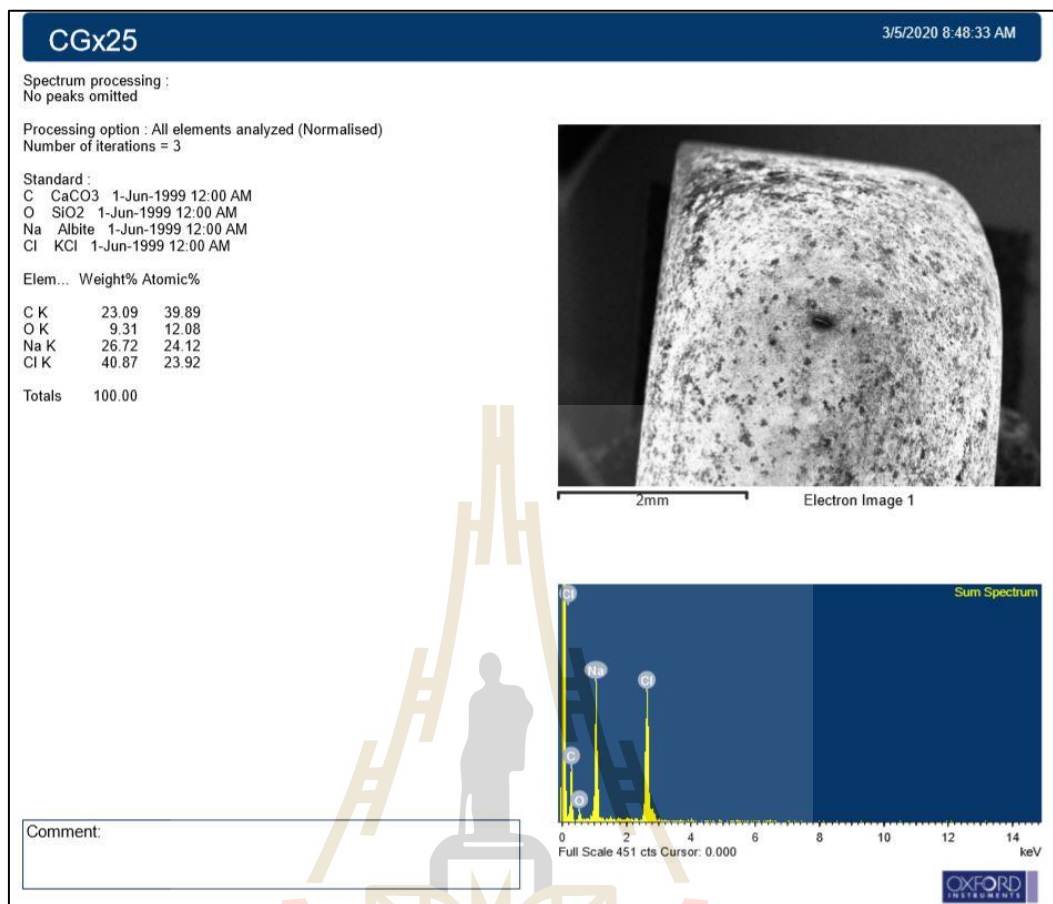
รูปที่ ค.2 ภาพถ่ายขั้วแกรไฟต์หลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM

(ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน

(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน





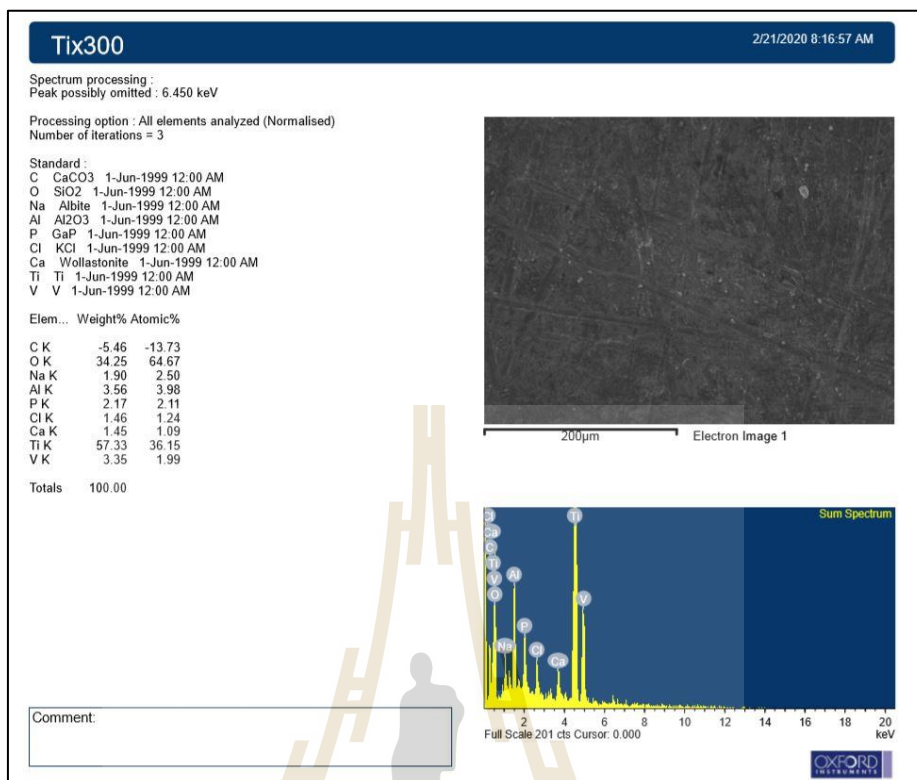


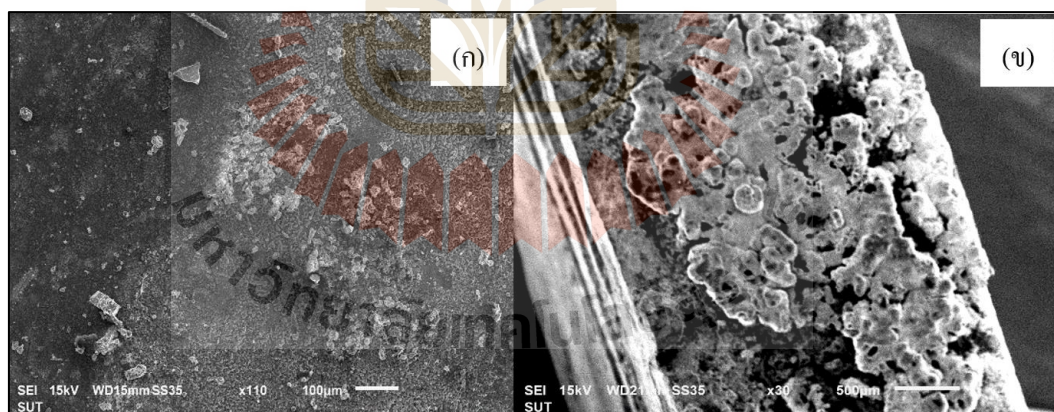
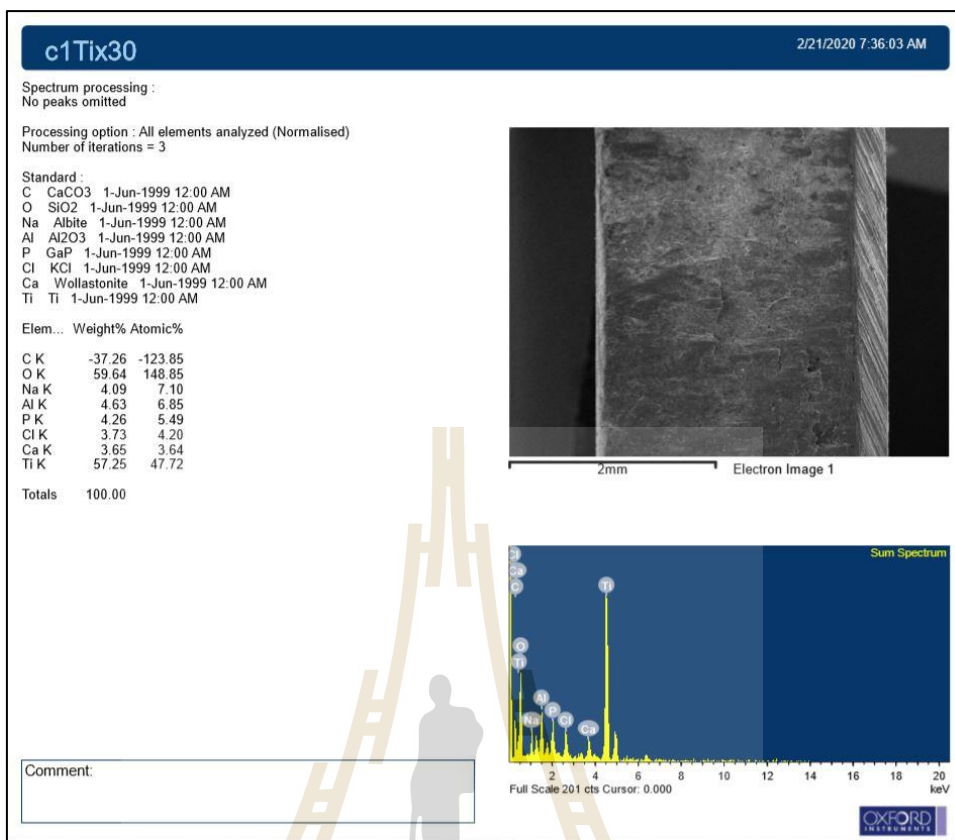
รูปที่ ก.3 ภาพถ่ายจุลทรรศน์ก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM

(ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน

(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน



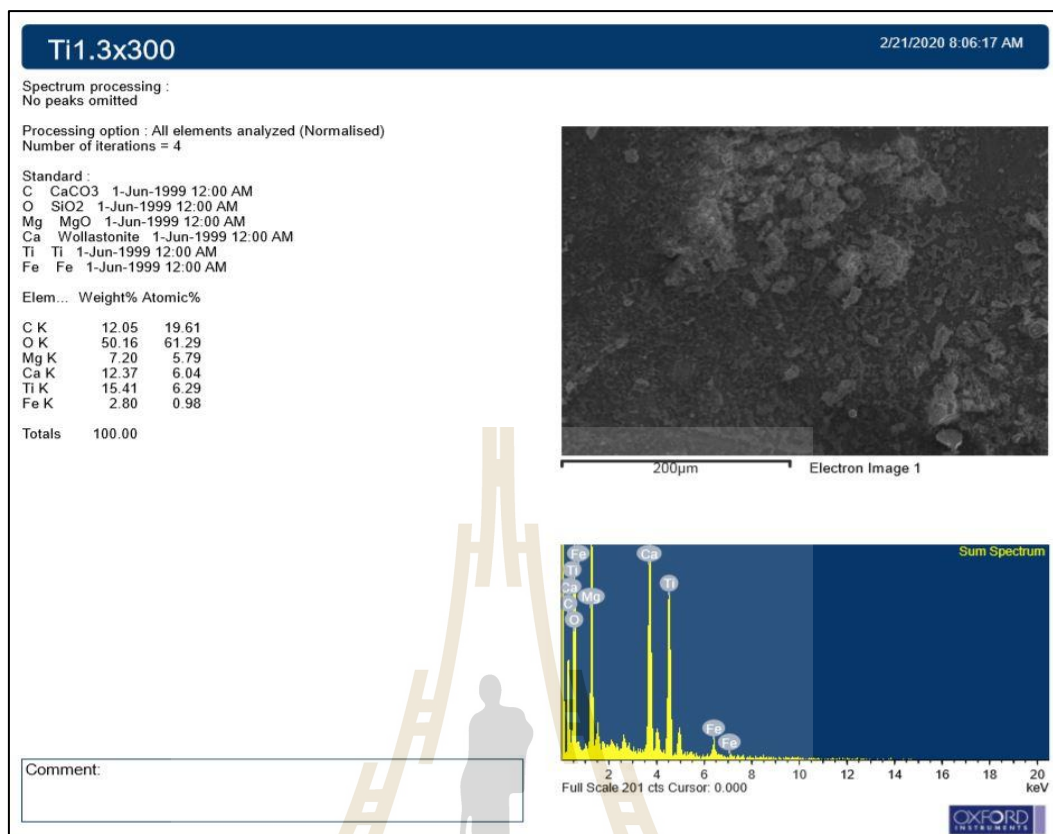




รูปที่ ค.4 ภาพถ่ายขั้วไทเทเนียมหลังทำการทดลองด้วยเทคนิค SEM

(ก) ภาพด้านบนผิวชิ้นงาน

(ข) ภาพด้านข้างผิวชิ้นงาน



Spectrum processing :  
No peaks omitted

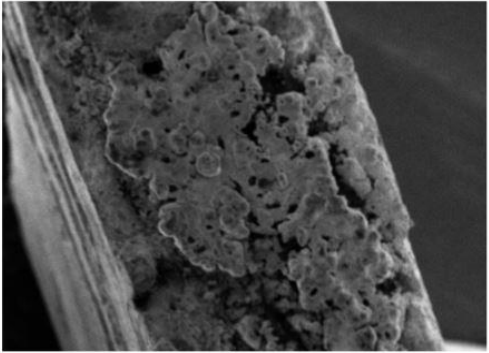
Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
Number of iterations = 4

Standard :

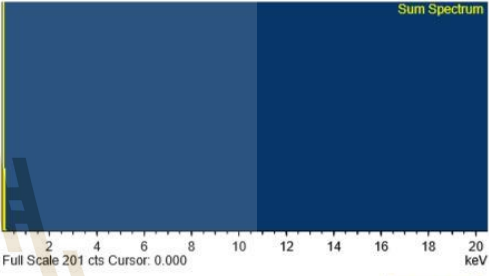
Elem... Weight% Atomic%

Totals .00

Comment:



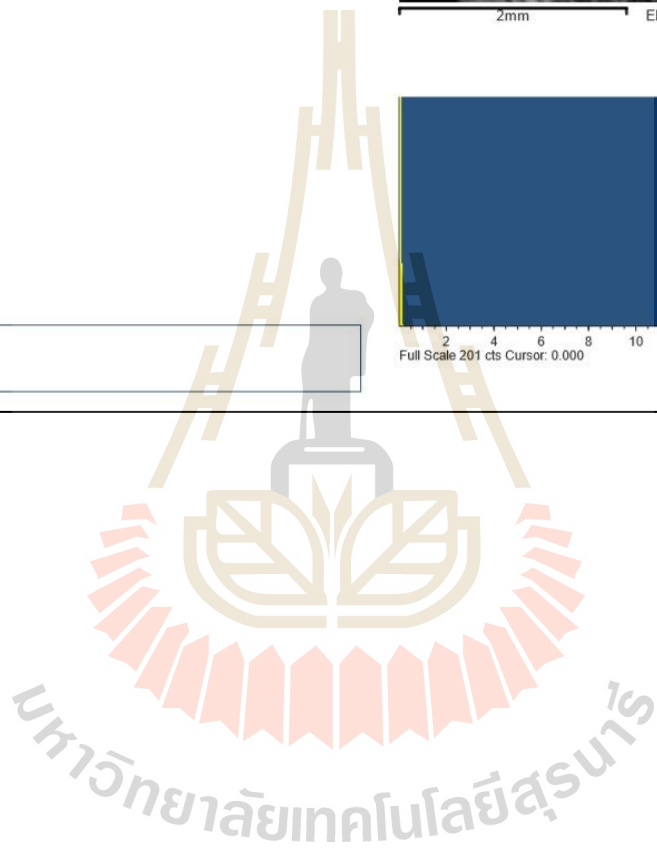
2mm Electron Image 1



Sum Spectrum

Full Scale 201 cts Cursor: 0.000

OXFORD INSTRUMENTS





### ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าของชุดการทดลองที่ 1

#### คำนวณกำลังไฟฟ้าสำหรับการบำบัด

โดยใช้สูตร  $P = VI/Q$

แทนค่า  $P = (9.93V) \times (4.5A)/(1.09 \text{ l/min})$

$$P = 2.46 \text{ W/m}^3$$

#### คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

โดยใช้สูตร  $W = Pt$

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

$$W = 0.037 \text{ kWh/m}^3$$

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 =  $(0.037 \text{ kWh}) \times (3.1258 \text{ บาท/หน่วย})$

$$\text{ค่าพลังงานไฟฟ้า} = 0.09 \text{ บาท}$$

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% =  $(\text{ค่าบริการ ไฟฟ้า} + \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} + F) \times (7/100)$

แทนค่า  $= (38.22 + 0.09 + (-0.16)) \times (7/100)$

$$\text{ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7\%} = 2.67 \text{ บาท}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = \text{ค่าไฟฟ้าพื้นฐาน} + \text{ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7\%}$$

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

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 40.67 \text{ บาท}$$

สรุป ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์คือ 40.87 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ ง.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 <sup>3</sup> )	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 จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Patcharin Racho, Sasiwimon Namgool and Warutai Dejitanon, " Preliminary Study of Electrolytic Cell a Treatment for Wasted Brine from Resin Regeneration," The 3 rd International Conference on Biomedical and Bioinformatics Engineering (ICBBE), Taipei, Taiwan, 2016, pp. 94-97.



## 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

Sasiwimon 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 (Cl<sub>2</sub>) about 19.9 kg per 1 m<sup>3</sup> 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<sup>+</sup> ion exchange contaminated with hard water such as calcium ion (Ca<sup>2+</sup>) and magnesium ions (Mg<sup>2+</sup>) 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

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](mailto: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>

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, electrodialysis, 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

metabolism in wastewater produced chlorine and hydrogen gas from electromechanical separation process which can be reused to disinfect the water supply system and renewable energy industry for reduction cost of product and decrease environment effects that will lead to sustain development of industry [3].

This is a preliminary study of wasted brine from resin regeneration process by electrolytic cell. The influencing parameters of electrolytic cell were investigated in this study. That included of the voltage and contact time. As well as the chlorine gas generation was evaluated.

## 2. METHODS

### 2.1 Water Brine

The wasted brine was collected from a softener in biomass power plant with the initial concentration was shown in Table 1.

### 2.2 Experimental Set-up

A laboratory scale of electrolytic cell was set up of 1 L of treatment volume following the experimental design [4]. Fig. 1 shows a diagram of the electrolysis cell. The experiment using water with a concentration of sodium chloride is 445,000 mg /l, anode use titanium plate and the cathode use steel rods.

Table 1. Initial concentration of wasted brine

Parameters	Concentrations (g/L)
Total dissolved solids	2.9
Total hardness	5.4
Chloride	4.4

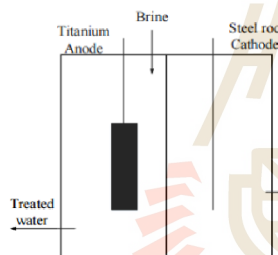


Figure 1. A schematic diagram of an electrolysis cell

### 2.3 Operating Conditions

The study was evaluation the influence of the voltage (DC) and contact time as details shown in Table 2. With started changing the voltage in the range of 1.0 to 6.0 volts, the voltage on the appropriate selection in the trial for a period of exposure by varying the exposure time in the last 5 to 30 minutes. Then, the effluents were analyzed total hardness (TH) and total dissolved solids (TDS) concentration. The potential of hydrogen and chlorine regeneration were calculated by theoretical reaction.

Table 2. Experimental Conditions.

Run	Electrical potential difference (V)	Contact time (min)
1	1	10
2	2	10
3	3	10
4	4	10
5	5	10
6	6	10
7	The optimum voltage	5
8		10
9		15
10		20
11		25
12		30

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Influencing of Dc Voltages

Overall results showed that DC voltage increased the chloride removed were increasing until the voltage is 5 volt with 38.64% removal. Then, it was reducing as the detail in Fig 2. These caused of the accumulation of slag on the surface of the cathode in water, plus other charges.

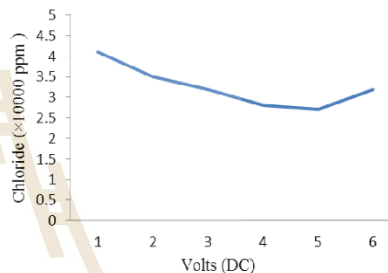


Figure 2. Effect of chloride on variation of voltages

The separation of ionic bonding of sodium chloride is low. As a result, the surface area exposed to the chloride ions in the water with electrons from a metal surface, resulting in greatly reduced the amount of chloride being eliminated. The problem of fouling deposits in the system due to precipitation. Overall TDS removal increased when DC voltages were increase as shown in Fig 3-4. As the TDS is indicative of soluble solids. And mineral water in the affected immobilize the water contains salt (NaCl), calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) and sodium ( $\text{Na}^+$ ). These aqueous solutions, which are exposed to concentrations of chloride concentration and hardness tends to eliminate that corresponds to the same treatment by the sea. Tends to decrease the intensity of the concentration of chloride and dissolved solids increase when higher voltages [5,6]. It was found that the removal of chloride and hardness of more than 80%. Direct current (DC) is the unidirectional flow of electric charge. Direct current is produced by sources such as batteries, power supplies, thermocouples, solar cells, or dynamos. Direct current may flow in a conductor such as a wire, but can also flow through semiconductors, insulators, or

even through a vacuum as in electron or ion beams. Generally used to charge batteries and as power supply for electronic systems. Very large quantities of direct-current power are used in production of aluminum and other electrochemical processes.

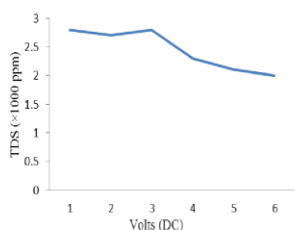


Figure 3. Effect of TDS on variation of voltages.

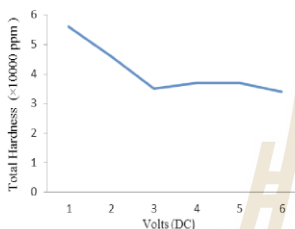


Figure 4. Effect of TH on variation of voltages.

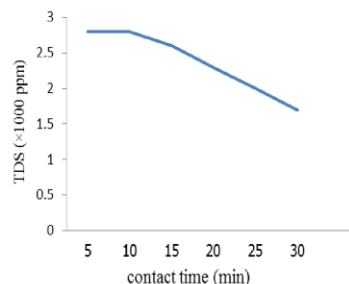


Figure 6. Effect of TDS on variation of contact time.

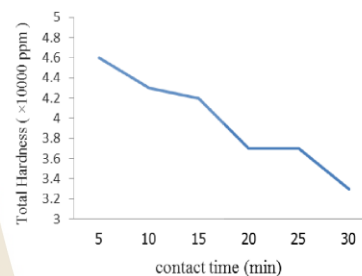


Figure 7. Effect of TH on variation of contact time.

### 3.2 Influencing of Contacts Time

Overall results shown chloride, TH and TDS removal were increased when contact time increase as results in Fig 5-7. The highest removal efficiency was found at 30 minutes. Because of an increase in the breakdown of wasted brine (NaCl). The anode an oxidation reaction with a solution of chloride ions (Cl<sup>-</sup>) cause chlorine gas (Cl<sub>2</sub>) while the cathode reaction reduction solution with hydrogen ions (H<sup>+</sup>) incur hydrogen gas (H<sub>2</sub>). This allows effective removal of chloride and hardness more than 80%.

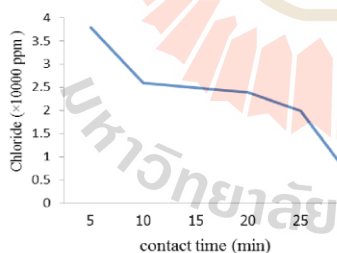
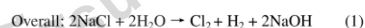
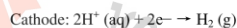


Figure 5. Effect of chloride on variation of contact time.

In industry, elemental chlorine is usually produced by the electrolysis of sodium chloride dissolved in water. This method, the chloralkali process industrialized in 1892, now provides most industrial chlorine gas. Along with chlorine, the method yields hydrogen gas and sodium hydroxide, which is the most valuable product. The amount of chlorine gas occurred in the calculation of the theoretical assumption that it is used. The amount of chloride and hydrogen in the water will be converted into a chlorine and hydrogen gas by a reaction in the acid electrolyte (electrolysis) that takes place at the anode. The chlorine gas is formed by oxidation (Oxidation Reaction) on the surface of titanium metal as Eq 1. This material is used as the anode. The hydrogen gas is formed by reduction on the surface of steel rod metal.



The balance of the equation, then the reaction mechanism of chlorine gas and hydrogen gas was found. Quantity of chloride and hydrogen ions in the water to the status of a chlorine gas and hydrogen gas in a ratio equal if the reaction occurs completely.

The experimental conditions were conducted using chloride brine at approximately 50,000 mg/L and volume 1,000 ml.

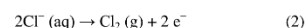
The results show that conditions for the optimum of the system is 15 minutes of contact time and 5.0 volt. Because of to lower the chloride in wastewater and high removal efficiency of more than 50%. Accordingly the experiments found that removal of hardness of up to about 91% at 6.0 volt and 30 minutes of contact time also the effective removal of chloride of approximately 93% at 5.0 volt and 25 minutes of contact time. However, recommend the operating conditions of the system, including water quality such total hardness, should not exceed 50 mg/l as CaCO<sub>3</sub>. The wasted brine has to high total hardness concentration with above 50,000 mg/l as CaCO<sub>3</sub>. Thus, the slag was arrested at the metal surface, which affects the area of the electrode, and electrons. Therefore, in conditions of actual use should have a primarily wastewater treatment to reduce the hardness of the water to less than 50 mg/l as CaCO<sub>3</sub>. This helps to optimize system performance and extend the useful life of the equipment used in the system.

The benefits to be derived from chlorine in the system can be used in industry. It is a very powerful disinfectant, and may remain in water as free residual for good enough time; the operation of the plant does not require much skilled supervision. And hydrogen gas may be used in fuel cells for local electricity generation, making it possible for hydrogen to be used as a transportation fuel for an electric vehicle. Hydrogen is also produced as a by-product of industrial chlorine production by electrolysis. Although requiring expensive technologies, hydrogen can be cooled, compressed and purified for use in other processes on site or sold to a customer via pipeline, cylinders or trucks. The discovery and development of less expensive methods of production of bulk hydrogen is relevant to the establishment of a hydrogen economy.

### 3.3 Potential of Chlorine Gas

Most chlorine is manufactured by the electrolysis of sodium chloride solutions. A solution of sodium chloride contains Na<sup>+</sup>(aq) and Cl<sup>-</sup>(aq) ions and, from the dissociation of water, very low concentrations of H<sup>+</sup>(aq) and OH<sup>-</sup>(aq) ions. During the electrolysis of solution, chlorine and hydrogen gases are produced. The chlorine gas occurred by to oxidation reaction on the surface of titanium metal as Eq 2. This material is used as the anode the

concentration of salt used test 44,900 mg/l. The volume of the brine system was 1,000 ml.



The results of the performance tests of the system voltage of 5.0 volts and 15 minutes of contact time, the amount of chloride equal to 25,000 mg/l. That such a time to calculate the amount of chlorine gas occurred theoretically equal to 19,900 mg/l.

### 4. CONCLUSION

Effects of operating conditions like voltage and contact time on the electrolytic cell performance have been studied. As a result, higher concentrations 44,900 mg/l, voltages 5.0 V and 15 minute of contact time are recommended as operating conditions for an electrolytic cell using platinum and steel rods as electrodes. The treatment can reduce the chloride concentration in wasted brine with efficiency above 50%. That seen to be increase voltages and contact time the removal efficiencies were increase too. However, electrodes can be fouling by scale forming when the voltages were higher than 5.0 volts. The highest removal efficiency was found at 5.0 V and 30 minutes of contact time that above 80% removal of chloride, total hardness and total dissolved solids concentration in effluent. Meanwhile, the potential of chlorine gas (Cl<sub>2</sub>) production about 19.9 kg per 1 m<sup>3</sup> of wastewater. This sufficient to uses as disinfectant in water supply treatment plant.

### 5. REFERENCES

- [1] Ed. Kreuzsch, Jim Burton, *Industrial water softener waste brine reclamation*, EPA-660/2-74-007, 1-8(1974)
- [2] E.B.L. Ksayer, M. Younes, D. Clodic, *Int. J. Refrig* , **35** (2012)
- [3] K. Abudukeremu, S. Yibadatihan, A. Peyman, F. A. Nadia, K. Chandrasekhar, S. K. Mohd, *Alexa. Eng. J.* **55**, 1(2015)
- [4] M. Peraki, E. Ghazanfari, G. F. Pinder, T. L. Harrington, *Sep. Purif. Technol.* **161**(2016)
- [5] M. Toraj, K. Anita, *Desalination. J.* **158**, 1-3(2015)
- [6] S. Mohtada, Toraj Mohammadi, *Desalination. J.* **221**, 1-3 (2008)



## ประวัติผู้วิจัย

นางสาวศศิวิมล นามกุล เกิดเมื่อวันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2536 ณ จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิบูลวิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ในปีการศึกษา 2553 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2557 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท ในปีการศึกษา 2557 โดยได้รับทุนการศึกษาจากแหล่งทุนภายนอก (OROG) เมื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ “การบำบัดน้ำเกลือจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยวิธีเซลล์อิเล็กโทรไลต์” ในระหว่างกำลังศึกษาได้เผยแพร่และนำเสนอผลงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง “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)



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี