

การศึกษาผลของออกซิเจนที่ละลายต่อการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริกด้วย  
เทคนิคอิเล็กโทรไลซิส



นางสาววรรณี ตันกิตยานนท์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0263-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DISSOLVED OXYGEN ON THE CONVERSION OF  
SODIUM SULPHATE TO SODIUM HYDROXIDE AND SULPHURIC ACID  
USING ELECTROLYSIS



Miss Voranee Tonkityanon

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0263-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของออกซิเจนที่ละลายต่อการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริกด้วยเทคนิคอิเล็กโทรไลซิส
โดย	นางสาววรรณิ์ ตันกิตยานนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.วิทย์ สุนทรนันท์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤชาพร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.วิทย์ สุนทรนันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤชาพร)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัลสสะบำรุงรัตน์)

วรรณิ์ ตันกิตียนันท์ :การศึกษาผลของออกซิเจนที่ละลายต่อการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริกด้วยเทคนิคอิเล็กโทรไลซิส.(INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DISSOLVED OXYGEN ON THE CONVERSION OF SODIUM SULPHATE TO SODIUM HYDROXIDE AND SULPHURIC ACID USING ELECTROLYSIS) อ. ที่ปรึกษา: อ.ดร.วิทย์ สุนทรนันท์, อ. ที่ปรึกษาร่วม: ผศ.ดร.เก็จวลี พุกษาทร, 74 หน้า. ISBN 974-03-0263-7.

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของออกซิเจนที่ละลายต่อปฏิกิริยาการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตให้เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริก ซึ่งเกิดจากการปรับเปลี่ยนปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วแคโทด โดยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้เป็นแบบ 2 ส่วนชั้นตรงกลางด้วยแคโทดไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองที่ไม่มีการเติมออกซิเจนและเติมออกซิเจนในสารละลายไม่พบว่ามีความแตกต่าง ไม่ว่าจะเป็นในด้านประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า หรือการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ โดยคาดว่าเป็นผลเนื่องมาจากก๊าซออกซิเจนที่ต้องการให้เกิดร่วมในปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดโพลาริเซชันชนิดคัลย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ใกล้เคียงกับการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำอย่างเดียว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## 417 0497021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: ELECTROLYSIS / CATION EXCHANGE MEMBRANE / SODIUM SULPHATE / SODIUM HYDROXIDE / SULPHURIC ACID

VORANEE TONKITIYANON : INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DISSOLVED OXYGEN ON THE CONVERSION OF SODIUM SULPHATE TO SODIUM HYDROXIDE AND SULPHURIC ACID USING ELECTROLYSIS. THESIS ADVISOR : WIT SOONTARANUN,Ph.D., THESIS COADVISOR : KEJVALEE PRUKSATHORN,Ph.D., 74 pp. ISBN 974-03-0263-7.

The objective of this research is to study the effect of dissolved oxygen in catholyte on the electrochemical reactions, which transform sodium sulphate solution into sodium hydroxide and sulphuric acid using an electrolytic cell with cation exchange membrane. The experimental results, obtained with and without dissolved oxygen, indicate no difference in neither the current efficiency nor energy consumption. This is expected to be due to high overpotential for oxygen reduction caused by polarisation.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Chemical Engineering  
Field of study Chemical Engineering  
Academic year 2001

Student's signature .....  
Advisor's signature .....  
Co-advisor's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อ.ดร.วิทย์ สุนทรนันท์ และ อ.ดร.เก็จวดี พฤษชาทร ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและข้อคิดเห็นในด้านวิชาการ ตลอดจนการแก้ปัญหาตลอดมาจนงานวิจัยบรรลุผล และขอขอบคุณ ศ.ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และ ผศ.ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการ และกรรมการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบริษัท ไทยอາซาฮี เคมีภัณฑ์ จำกัด ในการอนุเคราะห์เมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาคิวิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์วิเคราะห์ต่างๆ

นอกจากนี้ขอขอบคุณ อาจารย์วิโรจน์ เรืองประเทืองสุข อาจารย์พัทธา สร้อยสุวรรณ อาจารย์ปฎิภาณ บุญรวม อาจารย์วันแข็ง สิทธิกิจโยธิน มหาวิทยาลัยบูรพา อีกทั้งเพื่อนๆ และน้องๆ ในห้องวิจัยสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย รัตนัน และเพียงพิศ ที่คอยให้กำลังใจและคำปรึกษา

ท้ายที่สุดต้องขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณยาย พี่ น้องๆ และพี่หนุ่ม ซึ่งคอยเป็นกำลังใจ และแรงผลักดันให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฌ
สารบัญภาพ .....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์ .....	ณ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 มวลเหตุจูงใจ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี .....	4
2.1 เซลล์อิเล็กโทรไลติก.....	4
2.2 ทฤษฎีทางเคมีไฟฟ้า.....	9
2.3 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ .....	16
2.4 กฎของฟาราเดย์.....	17
2.5 ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า.....	17
2.6 การใช้พลังงานไฟฟ้า .....	18
2.7 การแยกสลายด้วยไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย	18
2.8 ภัยวิจัยที่ผ่านมา .....	22
บทที่ 3 วิธีวิจัย .....	24
3.1 โครงสร้างของระบบเซลล์เคมีไฟฟ้า .....	24
3.2 โครงสร้างของเซลล์เคมีไฟฟ้า .....	24
3.3 อุปกรณ์เครื่องมือวัด .....	25
3.4 ขั้นตอนการทดลอง .....	25
3.5 วิธีวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	26

	หน้า
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	27
4.1 การศึกษาสภาวะการทำงานของเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	27
4.1.1 ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรนต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต.....	27
4.1.2 ศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต.....	29
4.1.3 ศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต....	32
4.1.4 ศึกษาผลของปริมาณสารละลายหมุนวนต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต.....	35
4.1.5 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟตและประสิทธิภาพเชิงพลังงาน.....	36
4.2 การศึกษาผลการเติมออกซิเจนในสารละลายด้านแคโทด.....	44
4.2.1 ผลการศึกษาที่กระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ.....	44
4.2.2 ศึกษาผลของอัตราการป้อนสารละลายด้านแคโทดต่อปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้านแคโทด.....	48
4.2.3 ศึกษาผลของการกระจายตัวของออกซิเจนในสารละลายป้อนที่ด้านแคโทดต่อปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้านแคโทด.....	49
4.2.4 วิเคราะห์ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทด.....	51
4.2.5 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้อื่น .....	52
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
รายการอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก.....	59
ภาคผนวก ข.....	73
ประวัติผู้เขียน.....	74



## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของก๊าซไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยใช้ขั้วชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 25°C.....	20
4.1	แสดงค่าศักย์รีดักชันของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่อาจเกิดขึ้นในระบบ.....	31
ก.1	การทดลองที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 5 โวลต์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล อัตราการไหลคงที่ 2 ลิตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรน 70 มิลลิเมตร.....	59
ก.2	การทดลองที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล อัตราการไหลคงที่ 2 ลิตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรน 70 มิลลิเมตร.....	59
ก.3	การทดลองที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 15 โวลต์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล อัตราการไหลคงที่ 2 ลิตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรน 70 มิลลิเมตร.....	60
ก.4	การทดลองที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรนเป็น 7 มิลลิเมตร ทำการทดลองที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล การทดลองที่ ศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์.....	60
ก.5	การทดลองที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรนเป็น 7 มิลลิเมตร ทำการทดลองที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล การทดลองที่ ศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์.....	60
ก.6	การทดลองที่ สารละลายหมุนวน 3 ลิตร ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 1.5 แอมแปร์ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรน 7 มิลลิเมตร ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที.....	61
ก.7	การทดลองที่ สารละลายหมุนวน 8 ลิตร ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 1.5 แอมแปร์ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรน 7 มิลลิเมตร ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที.....	61



สารบัญตาราง (ต่อ)

ฎ

ตาราง	หน้า
ก.15	65
การทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 5.0 แอมแปร์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.03 นอร์มัล ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรน 7 มิลลิเมตร ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล อัตราการไหล 2 ลิตร ต่อนาที.....	
ก.16	66
การทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 5.0 แอมแปร์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.04 นอร์มัล ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรน 7 มิลลิเมตร ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล อัตราการไหล 2 ลิตร ต่อนาที.....	
ก.17	66
การทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 5.0 แอมแปร์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรน 7 มิลลิเมตร ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล อัตราการไหล 2 ลิตร ต่อนาที.....	
ก.18	67
การทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 5.0 แอมแปร์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 นอร์มัล ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรน 7 มิลลิเมตร ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล อัตราการไหล 2 ลิตร ต่อนาที.....	
ก.19	67
การทดลองเติมออกซิเจนที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ อัตราการป้อนสารละลายเข้าเซลล์ไฟฟ้าเคมี 2 ลิตร ต่อหน้าที่ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล.....	
ก.20	68
การทดลองเติมออกซิเจนที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ อัตราการป้อนสารละลายเข้าเซลล์ไฟฟ้าเคมี 2 ลิตร ต่อหน้าที่ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล.....	
ก.21	68
การทดลองเติมออกซิเจนที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ อัตราการป้อนสารละลายเข้าเซลล์ไฟฟ้าเคมี 2 ลิตร ต่อหน้าที่ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล.....	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ฎ

ตาราง	หน้า	
ก.22	การทดลองเติมออกซิเจนที่กระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ อัตราการป้อนสารละลายเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี 2 ลิตรต่อเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล.....	69
ก.23	การทดลองเติมออกซิเจนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 นอร์มัล อัตราการป้อนสารละลายเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี 2 ลิตรต่อเวลาที่ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล.....	69
ก.24	การทดลองเติมออกซิเจนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล อัตราการป้อนสารละลายเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี 2 ลิตรต่อเวลาที่ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล.....	70
ก.25	การทดลองเติมออกซิเจนที่อัตราการป้อนสารละลายเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี 1 ลิตรต่อเวลาที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์.....	70
ก.26	การทดลองเติมออกซิเจนที่อัตราการป้อนสารละลายเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี 0.5 ลิตรต่อเวลาที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์.....	71
ก.27	การทดลองเติมออกซิเจนแบบปรับปรุงเซลล์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมทิศทางการไหลของสารละลาย อัตราการป้อนสารละลายเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี 2 ลิตรต่อเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์.....	71
ก.28	การทดลองเติมออกซิเจนแบบปรับปรุงเซลล์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมทิศทางการไหลของสารละลาย อัตราการป้อนสารละลายเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี 0.5 ลิตรต่อเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์.....	72
ข.1	แสดงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	73

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แสดงส่วนประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีเมมเบรน.....	5
2.2 แสดงลักษณะของอิเล็กโทรดที่ใช้ในงานวิจัย.....	6
2.3 แสดงลักษณะโครงสร้างของแคโทดไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน.....	8
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและศักย์ไฟฟ้า เมื่อเกิดโพลาริเซชัน.....	10
2.5 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรด.....	11
2.6 แสดงผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่กระแสรวมเป็นศูนย์บนเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า.....	15
2.7 ผลกระทบของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทบนเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน $n = 1$ และ $j_0 = 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ .....	16
2.8 แสดงการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีการป้อนออกซิเจน.....	19
2.9 แสดงการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีการป้อนออกซิเจน.....	21
2.10 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นร่วมกันระหว่าง A กับ B.....	21
3.1 แสดงแผนภาพของระบบเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	24
3.2 แสดงส่วนประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	25
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับจำนวนโมลของไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นด้านแคโทดที่เวลา 30 นาที เปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรนเท่ากับ 70 มิลลิเมตรและ 7 มิลลิเมตร.....	27
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ และจำนวนโมลของไฮเดียมไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Trivedi, et al.(1996).....	30
4.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์คงที่ 10 และ 15 โวลต์.....	31
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า และจำนวนโมลของสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น สำหรับการทดลองที่ 180 นาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮเดียมซัลเฟต 1.0 นอร์มัล.....	32
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าควบคุมภายในเซลล์ไฟฟ้ากับประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่การทดลองความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไฮเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล.....	34



ภาพประกอบ	หน้า
4.6 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองกระแสไฟฟ้าคงที่ เปรียบเทียบเมื่อสารละลายหุมนวนเป็น 8 ลิตร และ 3 ลิตร.....	35
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการทดลองที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่ใช้สารละลายหุมนวน 3 ลิตร และ 8 ลิตร.....	36
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นด้านแคโทดสำหรับการทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ระยะเวลา 180 นาที.....	37
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ด้านแคโทดที่การทดลองกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ ระยะเวลา 180 นาที.....	38
4.10 แสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 นอร์มัล.....	39
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่างๆกัน.....	40
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆกัน.....	40
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 นอร์มัล กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์.....	41
4.14 แสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบกันที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้นต่างๆ กัน.....	42
4.15 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบกันที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้นต่างๆ กัน.....	43
4.16 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้โดยเฉลี่ยต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้นต่างๆ กัน.....	43

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ผ

### ภาพประกอบ

หน้า

4.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้เซลล์ไฟฟ้ากับปริมาณไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในด้านแคโทด สำหรับการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไฮโดรเจนซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล เปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการเติมออกซิเจนและไม่มีการเติมออกซิเจนเข้าไปในสารละลายด้านแคโทด ทำการทดลองเป็นเวลา 180 นาที.....	45
4.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดกับปริมาณไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในด้านแคโทด สำหรับการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไฮโดรเจนซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล เปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการเติมออกซิเจนและไม่มีการเติมออกซิเจนเข้าไปในสารละลายด้านแคโทด ทำการทดลองเป็นเวลา 180 นาที.....	45
4.19	แสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไฮโดรเจนซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล เปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการเติมออกซิเจนและไม่มีการเติมออกซิเจนเข้าไปในสารละลายด้านแคโทด และที่กระแสไฟฟ้า 0.5, 1, 2 และ 5 แอมแปร์ ทำการทดลองเป็นเวลา 180 นาที.....	46
4.20	แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่เวลาต่างๆ โดยเปรียบเทียบการทดลองที่อัตราการไหลเข้าของสารละลายด้านแคโทดต่างกัน โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนซัลเฟต 1 นอร์มัล ไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล ที่ 5 แอมแปร์.....	48
4.21	แสดงเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบที่ใช้ทดลอง.....	49
4.22	แสดงเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบปรับปรุงเพื่อควบคุมทิศทางการไหลของสารละลายด้านแคโทด.....	50
4.23	แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่เวลาต่างๆ โดยเปรียบเทียบการทดลองระหว่างเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบเก่าและแบบใหม่ซึ่งพัฒนาให้สารละลายที่ไหลเข้าภายในเซลล์ทิศทางการไหลจะผ่านช่องว่างระหว่างขั้วแคโทดและเมมเบรน โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนซัลเฟต 1 นอร์มัล ไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล ที่ 5 แอมแปร์.....	50
4.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายด้านแคโทดเมื่อมีการเติมออกซิเจนเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการเติมออกซิเจนที่เวลาต่างๆ.....	52

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$C_o$	=	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (โมลต่อลิตร)
$C_R$	=	ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ (โมลต่อลิตร)
$E$	=	ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของปฏิกิริยา (โวลต์)
$E_e^C$	=	ศักย์รีดักชันของปฏิกิริยาด้านแคโทดที่สภาวะสมดุล (โวลต์)
$E_e^A$	=	ศักย์รีดักชันของปฏิกิริยาด้านแอโนดที่สภาวะสมดุล (โวลต์)
$E^o$	=	ศักย์รีดักชันมาตรฐานของปฏิกิริยา (โวลต์)
$E_r$	=	ความต่างศักย์อิเล็กโตรไลต์ (โวลต์)
$F$	=	ค่าคงที่ฟาราเดย์ 96,485 (แอมแปร์ วินาที ต่อ อิกวิวาเลนซ์)
$I$	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
$I_o$	=	exchange current (แอมแปร์) เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ด้านแคโทดหรือแอโนดเมื่อกระแสไฟฟ้ารวมของระบบเป็นศูนย์
$i$	=	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
$k$	=	ค่าคงที่ (ไร้หน่วย)
$M$	=	น้ำหนักโมเลกุล (กิโลกรัมต่อกิโลโมล)
$[M^{n+}]_E$	=	ความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย (โมลต่อลิตร)
$[M^{n+}]_S$	=	ความเข้มข้นของไอออนที่ขั้วอิเล็กโตรด (โมลต่อลิตร)
$m$	=	ปริมาณของไอออนที่เกิดปฏิกิริยา (โมล)
$m_{act}$	=	ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น หรือสารตั้งต้นที่ถูกใช้ไป (โมล)
$n$	=	จำนวนอิเล็กตรอน (อิกวิวาเลนซ์ต่อโมล)
$R$	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (จูลต่อโมล เคลวิน)
$R_{CELL}$	=	ความต้านทานทางไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ (โอห์ม)
$R_{CIRCUIT}$	=	ความต้านทานทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ เซลล์เคมีไฟฟ้า (โอห์ม)
$T$	=	อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)
$t$	=	ระยะเวลา (วินาที)
$U$	=	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ใช้ในกระบวนการ (โวลต์)
$v$	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาบริเวณขั้วอิเล็กโตรด (โมลต่อวินาที)
$x_A$	=	ระยะห่างจากขั้วแอโนดถึงเมมเบรน (เซนติเมตร)
$x_C$	=	ระยะห่างจากขั้วแคโทดถึงเมมเบรน (เซนติเมตร)



## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

ด

$\alpha$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทอิเล็กทรอนิกส์ (ไร้หน่วย)
$\eta$	=	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (โวลต์)
$ \eta_A $	=	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนด (โวลต์)
$ \eta_C $	=	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแคโทด (โวลต์)
$\phi^e$	=	ประจุที่ต้องการตามทฤษฎีสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น/ประจุทั้งหมดที่ใช้จริง หรือ ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า (ไร้หน่วย)
$\Lambda_A$	=	ค่าการนำกระแสไฟฟ้าของสารละลายด้านแอโนด (โอห์ม <sup>-1</sup> เซนติเมตร <sup>-1</sup> )
$\Lambda_C$	=	ค่าการนำกระแสไฟฟ้าของสารละลายด้านแคโทด (โอห์ม <sup>-1</sup> เซนติเมตร <sup>-1</sup> )



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 มूलเหตุจูงใจ

น้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับโลหะ เช่น การผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ และการชุบเคลือบโลหะ เป็นต้น มักจะประกอบด้วยเกลือของไอออนโลหะ ซึ่งเมื่อผ่านการบำบัดด้วยวิธีการทางเคมีแล้ว น้ำเสียดังกล่าวมักจะมีค่าที่ดีเอส (TDS, Total dissolved solid) ที่สูงอันเป็นผลมาจากเกลือของโซเดียมที่ละลายอยู่ ปัญหาเกลือของโซเดียมนี้มิได้พบเพียงในอุตสาหกรรมที่กล่าวข้างต้นเท่านั้น แต่ยังพบในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ และอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการปรับสภาพกรดต่างด้วย แนวทางดั้งเดิมในการจัดการกับปัญหาดังกล่าวก็คือการแยกน้ำและเกลือของโซเดียมออกจากกันด้วยการระเหย แต่วิธีการนี้จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงมาก ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีเมมเบรนได้รับการพัฒนาขึ้น เทคนิครีเวิร์สออสโมซิส จึงถูกนำมาใช้งาน หากแต่เทคนิคนี้ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในกรณีความเข้มข้นของเกลือโซเดียมในสารละลายที่มีค่าสูง เนื่องจากเมมเบรนอาจเกิดการอุดตันและแรงดันที่ใช้จะมีค่าสูงมาก (Porter, 1990) ดังนั้นเมมเบรนที่ใช้จะต้องมีความแข็งแรงและทนต่อความดันสูงมาก ทำให้ยากต่อการออกแบบและใช้งาน อีกทั้งผลิตภัณฑ์เกลือโซเดียมซัลเฟตที่ได้มีมูลค่าต่ำมาก จึงมีการนำเทคนิคทางไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสมาใช้ร่วมกับเมมเบรนชนิดที่คัดแยกสารตามชนิดของประจุไอออนที่ผ่าน (Ion exchange membrane) ซึ่งเมมเบรนที่ใช้เกิดการอุดตันได้ยาก ไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อยๆ และระบบไม่จำเป็นต้องใช้แรงดันที่สูงเหมือนเทคนิครีเวิร์สออสโมซิส

การแยกเกลือด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสซึ่งใช้ร่วมกับเมมเบรน ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยมุ่งเน้นที่โครงสร้างของเซลล์และตัวเมมเบรนเป็นหลัก แต่อีกปัจจัยหนึ่งซึ่งมีผลต่อการแยกทางไฟฟ้าคือ ปฏิริยาที่เกิดขึ้นในแต่ละด้านของขั้วไฟฟ้า หากเปลี่ยนให้เกิดปฏิริยาที่เหมาะสมโดยการเพิ่มการละลายของออกซิเจนในสารละลายด้านขั้วแคโทด ซึ่งตามทฤษฎีจะมีผลให้ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของออกซิเจนที่ละลายต่อการเกิดปฏิริยาเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตให้เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดซัลฟูริก

## 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาภาวะที่เหมาะสมและผลของออกซิเจนที่ละลายต่อการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตให้เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริกด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส

## 1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อทราบผลของออกซิเจนที่ละลายต่อการเปลี่ยนปฏิกิริยาโซเดียมซัลเฟต เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดซัลฟูริก ในเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กโทรไลซิสแบบมีเมมเบรน เพื่อใช้เปลี่ยนสารละลายที่มีโซเดียมซัลเฟตเป็นองค์ประกอบในอนาคต

## 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดซัลฟูริก ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสแบบมีเมมเบรนชนิดแคตไอออนิก และเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

1.4.2 ศึกษาการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดซัลฟูริก ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสแบบมีเมมเบรนชนิดแคตไอออนิก ที่มีการเปลี่ยนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทางด้านขั้วแคโทดโดยการเปลี่ยนปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายด้านขั้วแคโทด

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. สํารวจและคํานวณค่าเอกสารอ้างอิงเพื่อใช้ประกอบการออกแบบสร้างเซลล์ไฟฟ้า
2. จัดซื้อวัสดุที่ใช้สร้างเซลล์เคมีไฟฟ้า ระบบหมุนเวียนสารละลาย และจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็นในการวิเคราะห์ตัวอย่างในงานวิจัย
3. จัดสร้างอุปกรณ์ทดลองอันประกอบด้วย เซลล์เคมีไฟฟ้า และระบบหมุนเวียนสารละลาย
4. ดำเนินการทดลอง

5. วิเคราะห์ผลในเชิงประสิทธิภาพของการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริก โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากเทคนิคอื่นๆ ในงานวิจัยที่ผ่านมา
6. สรุปผลการทดลองและเสนอแนะผลการวิจัย
7. จัดทำวิทยานิพนธ์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2 ทฤษฎี

กระบวนการเซลล์เคมีไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า และปฏิกิริยาเคมี โดยเซลล์เคมีไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

1. เซลล์อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic cell) เป็นเซลล์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเคมี โดยจะเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยไฟฟ้าที่ต่อเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า ที่มีพลังงานเพียงพอในสารละลายที่ต้องการ หรือทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชัน ที่เกิดขึ้นไม่ได้เองตามธรรมชาติ

2. เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) เป็นเซลล์ที่เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชันที่เกิดขึ้นได้เองตามสภาวะธรรมชาติในสารละลายนั้น

ในงานวิจัยนี้ศึกษาถึงการแยกสลายโซเดียมซัลเฟตด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลติกจึงขอกกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะเซลล์อิเล็กโทรไลติกเท่านั้น

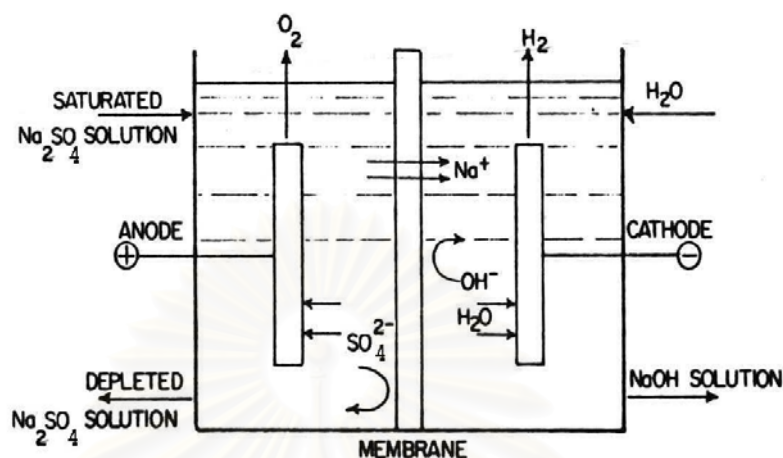
### 2.1 เซลล์อิเล็กโทรไลติก

ปฏิกิริยาเคมีในเซลล์อิเล็กโทรไลติกเกิดขึ้นเมื่อไอออนของของเหลวมาสัมผัสกับขั้วไฟฟ้า โดยไอออนที่มีประจุลบ จะเคลื่อนที่เข้าหาด้วยแรงขับของความต่างศักย์และจ่ายอิเล็กตรอนให้แก่ขั้วไฟฟ้าบวกหรือแอนอด (ซึ่งขาดอิเล็กตรอน) นั่นคือ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ขึ้น ในขณะที่เดียวกันที่ขั้วไฟฟ้านลบ หรือแคโทด (ซึ่งมีอิเล็กตรอนมากเกินไป) ไอออนที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่เข้ามาหาและรับอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้า นั่นคือเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอนอด และปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด ของเหลวหรือสารอิเล็กโทรไลต์จะทำหน้าที่เป็นตัวนำอิเล็กตรอนและไอออนไปยังขั้วไฟฟ้าทั้งสองโดยปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่ป้อนกระแสไฟฟ้า

ส่วนประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้าชนิดเซลล์อิเล็กโทรไลติก

เซลล์เคมีไฟฟ้าโดยทั่วไปมักมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ อิเล็กโทรด (Electrode), สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และ เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (D.C. power supply) แต่ได้มีการพัฒนาเซลล์ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพในการแยกสารได้ดีขึ้นจึงเพิ่มส่วนที่สำคัญอีกส่วนเข้ามาคือตัวแบ่งแยกเซลล์ (Cell separator) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็น

อุปกรณ์สำหรับใช้จ่ายไฟฟ้าให้แก่เซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งจะใช้เป็นเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าตรง โดยเครื่องจะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับมาเป็นกระแสไฟฟ้าตรงเพื่อป้อนให้แก่เซลล์เคมีไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีเมมเบรน (ดัดแปลงจาก

Caldwell, 1981)

### 2.1.1 อิเล็กโทรด (Electrode)

อิเล็กโทรด ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า สำหรับแลกเปลี่ยนถ่ายเทอิเล็กตรอนกับไอออนในสารละลายโดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจึงมีผลต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ปฏิกิริยาบางชนิดจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ไม่เท่ากันบนขั้วไฟฟ้าต่างชนิดกัน เช่นปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออนเป็นก๊าซไฮโดรเจนบนทองแดงที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 0.001 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน 0.479 โวลท์ แต่เมื่อใช้อิเล็กโทรดเป็นแพลตตินัมจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเป็น 0.015 โวลท์ ดังนั้นการเลือกใช้อิเล็กโทรดให้เหมาะสมกับการใช้งานจึงมีความสำคัญมาก หลักทั่วไปที่ใช้พิจารณาในการเลือกอิเล็กโทรดมีดังนี้คือ (Scott, 1995)

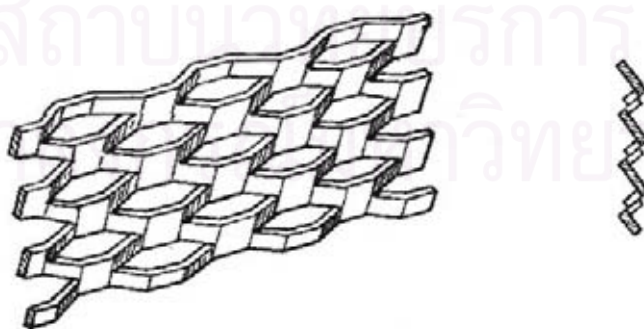
- มีความทนทานทางเคมี ในการเลือกอิเล็กโทรดที่เหมาะสมควรพิจารณาจากสารละลายที่ใช้เป็นสารตั้งต้น อิเล็กโทรไลต์ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา โดยอิเล็กโทรดที่นำมาใช้ควรมีความทนทาน ไม่เกิดการกัดกร่อนเมื่อสัมผัสกับสารเคมีดังกล่าว
- มีความสามารถทนความร้อนได้ดี เนื่องจากในกระบวนการเคมีไฟฟ้าบางครั้งในระบบอาจมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือจาก



พลังงานไฟฟ้าภายนอกที่จ่ายให้กับระบบ ดังนั้นอิเล็กโทรดที่ใช้ควรมีคุณสมบัติในทางกล และการนำไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อน

- มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสม อิเล็กโทรดจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เช่น ความหนาแน่น ความต้านทานไฟฟ้า การนำไฟฟ้า การขยายตัวเชิงเส้น และการขยายตัวเชิงความร้อน
- มีค่าการนำไฟฟ้าสูง เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้กระแสไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานให้เกิดปฏิกิริยา ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดควรนำไฟฟ้าได้ดี เพื่อให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการอิเล็กโทรไลติกสูงขึ้น
- มีความเหมาะสมทางด้านสิ่งแวดล้อม (ไม่เป็นวัสดุซึ่งก่อให้เกิดมลพิษ หรือ เป็นวัสดุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์)

สำหรับในงานวิจัยนี้อิเล็กโทรดที่เลือกใช้ทางด้านขั้วแคโทดทำจากวัสดุ निकเกิล เนื่องจากเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคมีไฟฟ้าโดยทั่วไปเพราะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี และทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง แต่สำหรับอิเล็กโทรดที่นำมาใช้ในด้านแอโนด จะต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาทางด้านแอโนดด้วย เนื่องจากทางด้านขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาจ่ายอิเล็กตรอน หากใช้อิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุโลหะธรรมดาจะเกิดการกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันอุตสาหกรรมเคมีไฟฟ้านิยมใช้ DSA (Dimensionally stable anode) ซึ่งทำจากโลหะแพลทินัมเคลือบด้วย  $\text{RuO}_2\text{-TiO}_2$  เพราะมีความทนทานในการใช้งานทางไฟฟ้า และทนทานต่อการกัดกร่อนทางเคมีอีกด้วย นอกจากนี้พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดที่ใช้อย่างมีลักษณะเป็นตะแกรงเพื่อลดการอุดตันของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีอันเป็นผลให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าต่ำลง ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของอิเล็กโทรดที่ใช้ในงานวิจัย (Creamer, 1979)

### 2.1.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้อิออนสามารถเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งได้ ซึ่งจะต้องเป็นของเหลวที่นำไฟฟ้าได้ อาจเป็นเกลือที่หลอมเหลว หรือที่เป็นสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย

เนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบ โดยการเคลื่อนที่ของไอออนเป็นผลมาจากศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสารละลาย ในที่นี้จะพิจารณาเพียงการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือการนำไฟฟ้าของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะแตกต่างกันตามชนิดและปริมาณของไอออนในสารละลาย ถ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยไอออนที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงอยู่ในปริมาณมาก จะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงหรือมีค่าความต้านทานต่ำนั่นเอง

### 2.1.3 ตัวแบ่งแยกเซลล์ (Cell separator)

ในกระบวนการเคมีไฟฟ้า บ่อยครั้งที่มีความจำเป็นต้องแยกสารที่เกิดจากกระบวนการที่ขั้วแอโนด และแคโทดออกจากกัน เนื่องจากต้องการให้ได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่สูงขึ้น มีค่าการเลือกสูงขึ้น หรือในกรณีต้องการแยกผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาด้านแคโทดและแอโนดออกจากกัน เพื่อความปลอดภัยในการดำเนินการ

วัสดุที่ใช้เป็นตัวแบ่งแยกเซลล์ที่นิยมใช้มี 2 ประเภทคือ ไดอะแฟรม (Diaphragm) และเยื่อแผ่น (Membrane) ตัวไดอะแฟรมเป็นตัวแยกซึ่งทำหน้าที่กั้นมิให้สารละลายในด้านแอโนดและแคโทดมาผสมกัน แต่ยอมให้อิออนทุกชนิดเคลื่อนที่ผ่านได้ สำหรับเยื่อแผ่นจะเป็นตัวกั้นซึ่งยอมให้อนุภาคบางชนิดผ่านได้ ขึ้นกับชนิดและขนาดของอนุภาค และชนิดของเยื่อแผ่น ซึ่งจะมีด้วยกันหลายชนิด เช่น ไมโครพอร์รัส เมมเบรน (Microporous membrane) ลิกวิด เมมเบรน (Liquid membrane) ไอออนเอ็กซ์เชนจ์ เมมเบรน (Ion-exchange membrane) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะใช้ ไอออนเอ็กซ์เชนจ์ เมมเบรน (Ion-exchange membrane) เป็นตัวแบ่งแยกเซลล์ โดยทำหน้าที่คัดเลือกอนุภาคที่เคลื่อนผ่านตามชนิดของประจุในสารละลาย

เยื่อแผ่นชนิดที่แยกสารตามชนิดของประจุของไอออนที่ผ่าน (Ion Exchange membrane) ควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ (Scott, 1995)

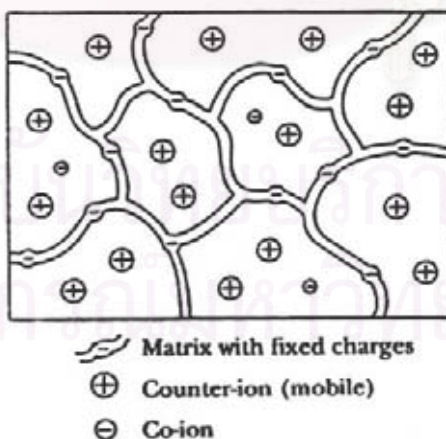
- ความต้านทานไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากความสามารถในการผ่านของไอออนชนิดตรงกันข้ามกับแผ่นเยื่อขึ้นกับแรงขับซึ่งมาจากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งควรมีค่าที่สูงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นแผ่นเยื่อควรมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำที่สุด



- ความสามารถในการเลือกผ่านสูง แผ่นเยื่อต้องให้อิออนประจุชนิดตรงกันข้ามผ่านได้ดี แต่ไม่ยอมให้อิออนประจุชนิดเดียวกันผ่านไป
- มีความทนทานเชิงกลดี
- มีความสามารถในการทนสารเคมีสูง สามารถทนสารละลายได้ในช่วงความเป็นกรด-เบส ที่กว้าง เนื่องจากในงานวิจัยนี้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้านแคโทด ส่งผลให้สารละลายทางด้านแคโทดของเซลล์ไฟฟ้ามีสภาพเป็นด่างในขณะที่สารละลายด้านแอโนดมีสภาพเป็นกรด
- สามารถใช้งานได้ในช่วงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากว้าง และทนทานภายใต้สภาวะของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

ไอออนเอ็กเชนจ์เมมเบรน (Ion Exchange membrane) แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ (Porter, 1990)

- แคทไอออนเอ็กเชนจ์เมมเบรน (Cation exchange membrane) เป็นแผ่นเยื่อซึ่งมีไอออนประจุลบติดอยู่บนโครงร่างตาข่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยแผ่นเยื่อชนิดนี้จะยอมให้อิออนประจุบวกผ่านได้ แต่ยอมให้อิออนประจุลบผ่านได้น้อยมาก อันเนื่องมาจากแรงทางไฟฟ้าคือ ประจุชนิดเดียวกันจะผลักกัน และประจุต่างชนิดกันจะดึงดูดกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นเยื่อชนิดนี้
- แอนไอออนเอ็กเชนจ์เมมเบรน (Anion exchange membrane) เป็นแผ่นเยื่อซึ่งมีไอออนประจุบวกติดอยู่บนโครงร่างตาข่าย จึงมีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับแคทไอออนเอ็กเชนจ์เมมเบรน



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะโครงสร้างของแคทไอออนเอ็กเชนจ์เมมเบรน (Porter, 1990)

## 2.2 ทฤษฎีทางเคมีไฟฟ้า

จากที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่าเซลล์เคมีไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยารับและจ่ายอิเล็กตรอนที่ด้านแคโทดและด้านแอโนดตามลำดับ และก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในเซลล์เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกซึ่งจะพบว่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ( $U$ )

$$U = E_e^C - E_e^A \quad 2.1$$

โดย  $U$  คือ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ใช้ในกระบวนการ (โวลท์)

$E_e^C$  และ  $E_e^A$  คือ ศักย์รีดักชันของปฏิกิริยาที่ด้านแคโทด และแอโนดที่สภาวะสมดุล (โวลท์)

ในทางปฏิบัติจริงๆ เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าครบวงจรแล้วมีกระแสไฟฟ้าไหลเกิดขึ้น จะเกิดปรากฏการณ์ขึ้น 2 อย่าง คือ ศักย์ไฟฟ้าของโอห์มหรือศักย์ไฟฟาลดลง (Ohmic Potential หรือ IR drop) และผลของการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarisation effect) ปรากฏการณ์ 2 ชนิดนี้จะมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (ธวัชชัย ศรีวิบูลย์, 2539)

### 1. ศักย์ไฟฟ้าของโอห์มหรือศักย์ไฟฟาลดลง (Ohmic Potential หรือ IR drop)

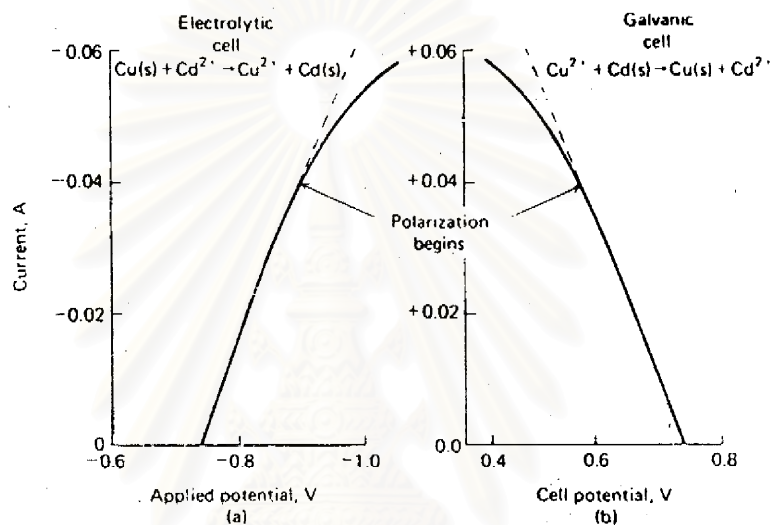
กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านในวงจรไฟฟ้าของเซลล์ได้เมื่อมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือความต่างศักย์เกิดขึ้น ทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ไปยังขั้วเพื่อถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ แรงนี้เป็นไปตามกฎของโอห์ม คือมีค่าเท่ากับกระแสคูณกับความต้านทาน (IR) ซึ่งเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าของโอห์ม หรือ ศักย์ไฟฟาลดลง โดยความต้านทานดังกล่าวคือความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ กล่าวคือถ้าหากสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าการนำไฟฟ้ามาก ความต้านทานนี้จะมีค่าลดลง ซึ่งหมายความว่าในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นลบมากขึ้น กล่าวคือต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากกว่าปกติ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสได้

$$U = E_e^C - E_e^A - IR \quad 2.2$$

### 2. ผลของการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarisation effect)

โพลาไรเซชัน คือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด แล้วมีผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เปลี่ยนไปมีค่าไม่เท่ากับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี การเกิดโพลาไรเซชันสามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ โพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarisation) และโพลาไรเซชันเนื่องจาก

ศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (Kinetic polarisation or overvoltage) ในช่วงที่กระแสภายในเซลล์ยังมีค่าน้อยๆ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้ายังคงเป็นเส้นตรง แต่เมื่อกระแสมีค่ามากขึ้นจะมีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ของโพลาไรเซชันขึ้น ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไม่สัมพันธ์กับกระแสแบบเป็นเส้นตรง ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.4 ตรงส่วนบนของเส้นกราฟ ศักย์ไฟฟ้าจะเบนออกจากเส้นตรงเมื่อมีกระแสมากขึ้น ถ้าเป็นเซลล์ชนิดอิเล็กโทรไลติกที่มีการเกิดโพลาไรเซชันเส้นกราฟจะเบนออกจากแกนของกระแส คือต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากกว่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี

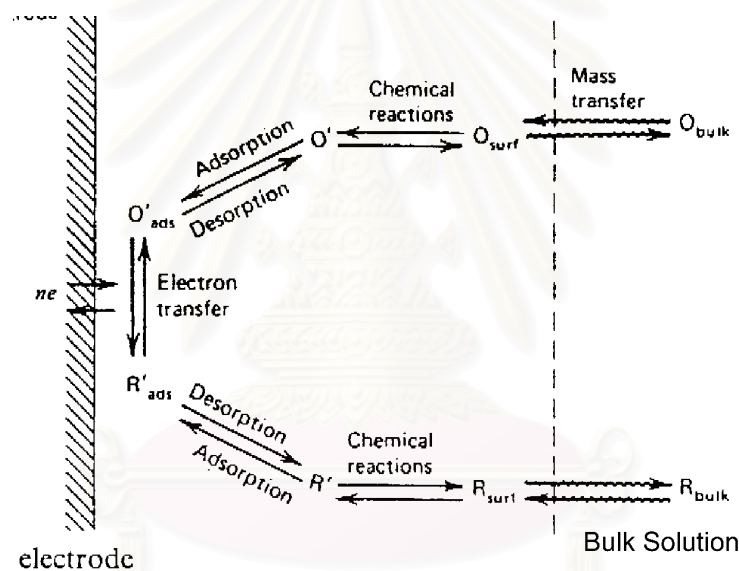


รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและศักย์ไฟฟ้า เมื่อเกิดโพลาไรเซชัน (ธวัชชัย ศรีวิบูลย์, 2539)

ในสภาวะของการเกิดโพลาไรเซชันที่มีค่ามากจนทำให้กระแสไม่มีความสัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้าเลย สภาวะแบบนี้เรียกว่า มีการเกิดโพลาไรเซชันขึ้นอย่างสมบูรณ์ ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพลาไรเซชัน คือขนาด รูปร่าง ส่วนประกอบของขั้ว ส่วนประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิ อัตราเร็วของการขนส่งสารละลาย ขนาดของกระแส และสถานะทางกายภาพของไอออนชนิดต่างๆ ในสารละลาย อิทธิพลของปัจจัยเหล่านี้ยากที่จะเข้าใจในการวิเคราะห์ทางปริมาณ แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีการควบคุมสภาวะต่างๆ ให้คงที่ในการทดลอง การวิเคราะห์ทางปริมาณก็สามารถทำได้เมื่อวิเคราะห์เทียบกับสารมาตรฐาน

ในการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาหลายขั้นตอน เช่นปฏิกิริยา  $o + ne \rightleftharpoons R$  เพื่อเปลี่ยนสารที่เป็นของตัวออกซิไดซ์  $O$  ให้อยู่ในรูปของตัวรีดิวซ์  $R$  มีขั้นตอนทั้งหมดดังรูปที่ 2.5 โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดถูกกำหนดด้วยอัตราการเกิดของกระบวนการต่อไปนี้

1. การถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer)
2. การถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าอิเล็กโทรด (Electron transfer)
3. ปฏิกิริยาเคมีซึ่งเป็นผลตามมาจากการถ่ายเทอิเล็กตรอน
4. อื่นๆ เช่น การดูดซับ (Adsorption) การคาย (Desorption) หรือการตกผลึก (Crystallization)



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรด (Bard, 1980)

ในปฏิกิริยาที่ธรรมดาที่สุดจะเกี่ยวข้องเพียงการถ่ายเทมวลสารของสารตั้งต้นไปยังขั้วอิเล็กโทรด การถ่ายเทอิเล็กตรอน และการถ่ายเทมวลสารของผลิตภัณฑ์ไปยังสารละลายเท่านั้น เมื่อกระแสไฟฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัว อัตราการเกิดปฏิกิริยาของทุกขั้นตอนมีค่าเท่ากัน ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะถูกจำกัดที่ขั้นตอนที่ช้าที่สุดที่เรียกว่าขั้นตอนกำหนดปฏิกิริยา (Rate-determining step)

1. การเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarisation) เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ขั้วอย่างรวดเร็วและผันกลับได้ ความเข้มข้นของไอออนที่เกิดปฏิกิริยาที่ขั้วจะสัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้าตามสมการของเนินสต์

$$E = E^o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_o}{C_R} \quad 2.3$$

โดย	$E$	คือ ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของปฏิกิริยา (โวลท์)
	$E^o$	คือ ศักย์รีดักชันมาตรฐานของปฏิกิริยาที่สมดุล (โวลท์)
	$C_o, C_R$	คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ตามลำดับ (โมลต่อลิตร)
	$R$	คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (จุลต่อโมล เคลวิน)
	$T$	คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)
	$n$	คือ จำนวนอิเล็กตรอน (อิเล็กวาเลนซ์ต่อโมล)
	$F$	คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ 96,485 (แอมแปร์ วินาที ต่อ อิควิวาเลนซ์)

ศักย์ไฟฟ้า ( $E$ ) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ในสารละลาย ถ้าศักย์ไฟฟ้าของขั้วทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน และอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากับอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้ว จะทำให้ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้น นั่นคือไม่เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า โพลาไรเซชัน แต่โดยมากแล้วปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วเกิดขึ้นรวดเร็วมาก เร็วกว่าการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้ว จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าและในสารละลาย ไอออนในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่าจะเคลื่อนที่สู่ผิวของขั้วซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่า แต่อัตราการเคลื่อนที่นั้นช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วจึงเป็นเหตุให้ศักย์ไฟฟ้าของขั้วเกิดการเปลี่ยนแปลงจากค่าทางทฤษฎี วิธีการลดการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นสามารถทำได้โดยทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเข้าสู่ผิวของขั้วเพิ่มขึ้น หรือลดความแตกต่างของความเข้มข้นที่ผิวของขั้วในสารละลายซึ่งอาจทำได้โดยการกวนสารละลาย ถ้าพิจารณาการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้วอิเล็กโทรด พบว่าสามารถเกิดขึ้นได้ 3 แบบคือ (Bard, 1980)

ก. เกิดจากการแพร่กระจาย (Diffusion) เมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนแต่ละแห่งในสารละลาย จะเกิดการแพร่กระจายของไอออนจากความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ อัตราเร็วของการแพร่กระจายขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นทั้งสองแห่ง

$$\text{อัตราเร็วของการแพร่กระจาย} = k \left( [M^{n+}]_S - [M^{n+}]_E \right)$$

$[M^{n+}]_S$  คือ ความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย (โมลต่อลิตร)

$[M^{n+}]_E$  คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ขั้วอิเล็กโทรด (โมลต่อลิตร)

$k$  คือ ค่าคงที่



ข. แรงดึงดูดและแรงผลักกันระหว่างประจุ (Electrostatic force or repulsion) แรงดึงดูดระหว่างประจุมีผลทำให้ไอออนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วได้ เช่นในกรณีของสารละลายแคดเมียมซัลเฟตเมื่อ  $\text{Cd}^{2+}$  ถูกรีดิวซ์กลายเป็นโลหะแคดเมียมเกาะที่ขั้วจะทำให้บริเวณรอบขั้วอิเล็กโทรดมีประจุลบมากกว่าประจุบวก ประจุลบของซัลเฟตจึงสามารถดึงประจุบวกเข้ามายังขั้วอิเล็กโทรดได้ ในทางตรงกันข้ามถ้าขั้วแคดเมียมเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะทำให้ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีประจุบวกของแคดเมียมมากขึ้น จึงเกิดการผลักกันระหว่างประจุ ทำให้แคดเมียมไอออนไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าหาขั้วอิเล็กโทรดได้ แรงดึงดูดและแรงผลักกันระหว่างไอออนที่สนใจในสารละลายที่บริเวณผิวของขั้วอิเล็กโทรดจะมีค่าน้อยเข้าใกล้ศูนย์เมื่อมีอิเล็กโทรไลต์อยู่ในสารละลายมากๆ คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์มีอยู่ในสารละลายน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ที่มีอยู่ในสารละลายทั้งหมด

ค. การกวนสารละลาย (Mechanical force or convection force) การกวนสารละลายเป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้ไอออนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วได้เร็วขึ้น ดังนั้น การกวนสารละลายจึงเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยลดการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น

สิ่งที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้วทั้ง 3 แบบนี้คือ อุณหภูมิ ความหนาแน่นของสารละลาย และความแรงของไอออน

ดังนั้นสรุปได้ว่าโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ (หรือที่เกิดปฏิกิริยา) ถ้าความเข้มข้นของไอออนมีค่าน้อยจะทำให้ผลที่เกิดจากโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นมีค่าน้อยด้วย
- ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ทั้งหมดในสารละลาย ถ้ามีค่ามากจะช่วยป้องกันการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น เพราะอิเล็กโทรไลต์ช่วยทำให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้วเนื่องจากแรงดึงดูดของประจุ
- การกวนสารละลาย จะช่วยลดการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้ เพราะทำให้ไอออนที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดและในสารละลายไม่แตกต่างกัน
- ขนาดของขั้ว ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว ถ้าขั้วมีพื้นที่ผิวมาก การเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้วมีค่ามากทำให้ลดการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้

2. การเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (Kinetic polarisation or overvoltage) ในบางครั้งศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ชนิดอิเล็กโทรไลติกมีค่ามากกว่าค่าที่ควรให้ทาง

ทฤษฎีเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ค่าที่แตกต่างกันระหว่างค่าที่ได้ตามทฤษฎี และค่าที่ได้ตามความจริงนี้ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเกินตัว การเกิดศักย์ไฟฟ้าเกินตัวนี้เป็นผลเนื่องมาจากอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองของเซลล์เคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้ต้องเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้มากกว่าปกติ เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จึงถูกควบคุมด้วยกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วซึ่งแตกต่างจากโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นที่กระแสจะถูกควบคุมโดยอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาขั้ว ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เคมีไฟฟ้าจะมีค่ามากน้อยอย่างไรขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเซลล์และสิ่งต่างๆ ต่อไปนี้คือ (ธวัชชัย ศรีวิบูลย์, 2539)

- ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้น
- ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจะแปรผันตามส่วนประกอบทางเคมีของขั้วอิเล็กโทรด
- ขนาดของศักย์ไฟฟ้าเกินตัวขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้หลายชนิดจึงไม่สามารถระบุขนาดของศักย์ไฟฟ้าเกินตัวได้แน่นอน ทราบแต่เพียงค่าประมาณจากข้อมูลที่ได้มีการทดลองตามเอกสารอ้างอิงต่างๆ

ในการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่มีศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเกิดขึ้น ต้องนำค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวนี้ไปลบออกจากค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ตามทฤษฎีด้วย นั่นคือ

$$U = E_e^C - E_e^A - IR - E_{\text{overvoltage}} \quad 2.4$$

ทฤษฎีที่นำมาอธิบายศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการถ่ายเทอิเล็กตรอน ซึ่งต้องศึกษาถึงจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดโดย

$$v = \frac{I}{nF} \quad 2.5$$

โดย  $v$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาบริเวณขั้วอิเล็กโทรด (โมลต่อวินาที)  
 $I$  คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

ซึ่งมักจะอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดจากกระแสไฟฟ้าในรูปฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้า หรือศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน ( $\eta$ ) เรียกว่าโพลาริเซชัน (Polarisation) สำหรับกรณีที่ไม่มีผล

กระทบจากการถ่ายเทมวลสาร นั่นคือสารละลายมีการผสมที่ดี ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินจะเป็นไปตามสมการ บัทเลอร์ โวลต์เมอร์ (Butler-Volmer equation)

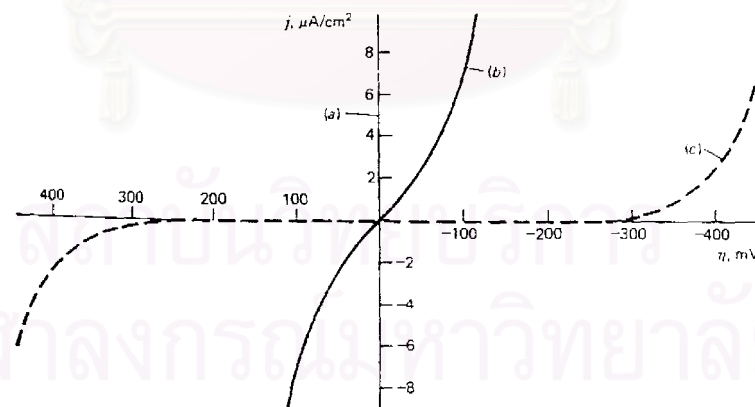
$$I = I_o \left[ e^{\frac{\alpha n F}{RT} \eta} - e^{-(1-\alpha) \frac{n F}{RT} \eta} \right] \quad 2.6$$

- โดย  $I_o$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ด้านแคโทดหรือแอโนดเมื่อกระแสไฟฟ้ารวมของระบบเป็นศูนย์ (แอมแปร์)
- $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทอิเล็กตรอน
- $\eta$  คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (โวลท์)

เมื่อศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน ( $\eta$ ) มีค่าสูงมาก จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันหรือออกซิเดชันอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว ดังนั้น สามารถใช้สมการความสัมพันธ์ของทาเฟล (Tafel) ได้คือ

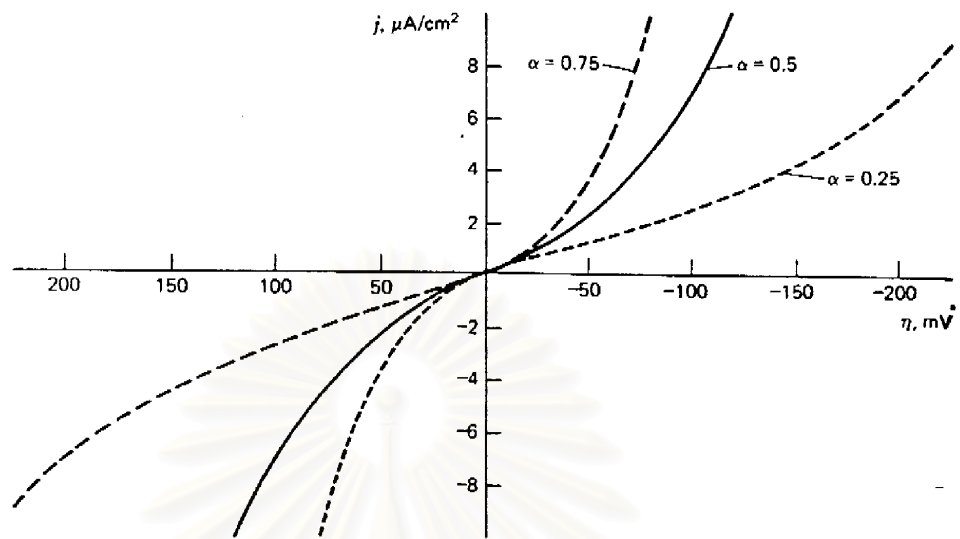
$$I = I_o e^{\frac{\alpha n F}{RT} \eta} \quad 2.7$$

ตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน แสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



**รูปที่ 2.6** แสดงผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่กระแสรวมเป็นศูนย์บนเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า โดย (a)  $j_0 = 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ , (b)  $j_0 = 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ , (c)  $j_0 = 10^{-9} \text{ A/cm}^2$  ที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน เมื่อ  $\alpha = 0.5$  และ  $n = 1$  (Bard, 1980)





**รูปที่ 2.7** ผลกระทบของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทบนเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน  $n = 1$  และ  $j_0 = 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  (Bard, 1980)

จากรูปที่ 2.6 และ 2.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าหรือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้าซึ่งมีแนวโน้มของความสัมพันธ์เป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และปฏิกิริยาที่มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทอิเล็กตรอนต่ำการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน ( $\eta$ ) จะสูงกว่าที่ค่า  $\alpha$  สูงเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงที่กระแสไฟฟ้าเท่ากัน

### 2.3 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ( $U$ )

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะขึ้นอยู่กับค่าศักย์รีดักชันของปฏิกิริยา ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน และศักย์ของโอมห์ ดังกล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ยังมีผลเนื่องจากความต้านทานอื่นๆ เช่น ความต้านทานภายในวงจรไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับเซลล์ ความต้านทานไฟฟ้าของเมมเบรนเป็นต้น เหล่านี้รวมเรียกว่า  $R_{CIRCUIT}$  ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าวรวมของเซลล์จะมีค่าเป็นไปตามสมการข้างล่างนี้

$$U = E_e^C - E_e^A - |\eta_A| - |\eta_C| - IR_{CELL} - IR_{CIRCUIT} \quad 2.8$$

โดย  $|\eta_c|$  และ  $|\eta_A|$  คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแคโทดและแอโนด (โวลท์)

$R_{CELL}$  คือ ความต้านทานทางไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (โอห์ม)

$R_{CIRCUIT}$  คือ ความต้านทานทางไฟฟ้าของวงจรไฟฟ้าที่เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับเซลล์ไฟฟ้า (โอห์ม)

## 2.4 กฎของฟาราเดย์

ฟาราเดย์ได้เสนอความคิดเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่เคลื่อนที่ผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าหรือปริมาณไฟฟ้ากับปริมาณสารที่ออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งสรุปได้เป็นกฎ 2 ข้อ คือ (ปริญา อรุณวิสุทธิ, 2537)

- ปริมาณสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไป
- ปริมาณสารแต่ละชนิดที่เกิดที่ขั้วไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูล (Equivalent weight) ของสารนั้น

จากกฎของฟาราเดย์ทั้งสองข้อ สรุปได้เป็นสมการดังนี้

$$m = \frac{It}{Fn} \quad 2.9$$

โดย  $t$  คือ ระยะเวลา (วินาที)

$m$  คือ ปริมาณของไอออนที่เกิดปฏิกิริยา (โมล)

## 2.5 ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า (Current efficiency , $\phi^e$ )

เมื่อเราพิจารณากระบวนการเคมีไฟฟ้า ในระบบทั่วไปมักมีสารตั้งต้นมากกว่าหนึ่งชนิดของไอออนทำให้เกิดปฏิกิริยาบริเวณขั้วของอิเล็กโทรดสามารถเกิดได้หลายปฏิกิริยาพร้อมกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น และเป็นปฏิกิริยาที่เราสนใจจึงวัดค่าออกมาในรูปของประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าโดยค่าดังกล่าวจะหมายถึง

$\phi^e$  = ประจุที่ต้องการตามทฤษฎีสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นต่อประจุทั้งหมดที่ใช้จริงกรณีกระแสไฟฟ้าคงที่

$$\phi^e = \frac{m_{act} nF}{It} \quad 2.10$$

กรณีกระแสไฟฟ้าไม่คงที่

$$\phi^e = \frac{m_{act} nF}{\int I dt} \quad 2.11$$

โดย  $m_{act}$  คือ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น หรือสารตั้งต้นที่ถูกใช้ไป (โมล)

นอกจากนี้หากตั้งสมมุติฐานว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าสูญเสียให้กับสภาพแวดล้อมภายนอกจะถือว่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าเท่ากับทรานสปอร์ตนิมเบอร์ ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงถึงอัตราส่วนของไอออนที่ต้องการให้เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนสำหรับในงานวิจัยนี้คือ โซเดียมไอออน ต่อจำนวนไอออนทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน

## 2.6 การใช้พลังงาน (Energy consumption)

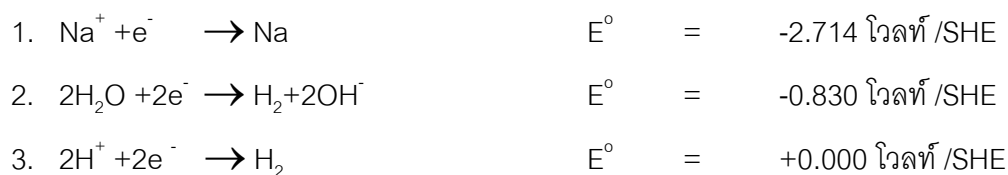
$$\text{Energy consumption} = \frac{nFU}{3600 M(\phi^e)} \quad \text{kW hr kg}^{-1} \quad 2.12$$

โดย  $M$  คือ น้ำหนักโมเลกุล (กิโลกรัมต่อกิโลโมล)

## 2.7 การแยกสลายด้วยไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (วิโรจน์ ปิยวัชรพันธุ์, 2540)

เมื่อแยกสลายสารละลายโซเดียมซัลเฟตโดยป้อนสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้าไปในเซลล์ไฟฟ้าด้านขั้วแอโนด และป้อนน้ำเข้าไปทางด้านขั้วแคโทด ปฏิกริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้มีดังนี้

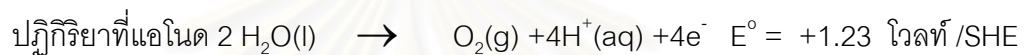
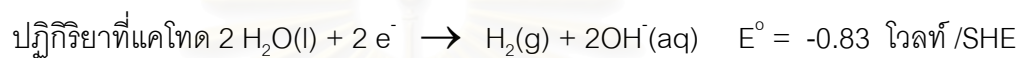
ปฏิกิริยาทางด้านแคโทด เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (รับอิเล็กตรอน)



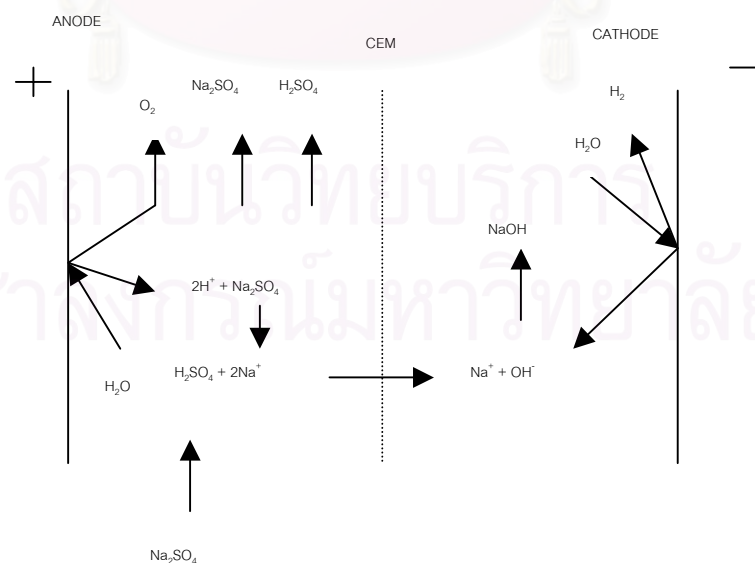
ปฏิกิริยาด้านแอโนด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (จ่ายอิเล็กตรอน)



เนื่องจากปฏิกิริยาทางด้านแคโทดเป็นปฏิกิริยารับอิเล็กตรอน นั่นคือปฏิกิริยาที่มีค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานเป็นบวกมากจะเกิดปฏิกิริยานั้นได้ดีกว่า และปฏิกิริยาทางด้านแอโนดเป็นปฏิกิริยาจ่ายอิเล็กตรอน ค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานเป็นลบมากจะเกิดปฏิกิริยานั้นได้ดีเช่นกัน จากปฏิกิริยาทั้งหมดเมื่อป้อนน้ำเข้าทางด้านแคโทดเพียงอย่างเดียวปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



นั่นคือป้อนสารละลาย โซเดียมซัลเฟตเข้าทางด้านขั้วแอโนด ซึ่งน้ำจะแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน และก๊าซออกซิเจน ไฮโดรเจนไอออนที่ได้จะรวมตัวกับโซเดียมซัลเฟต เกิดเป็นกรดซัลฟูริก และโซเดียมไอออน ซึ่งโซเดียมไอออนและไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้นนี้จะเคลื่อนที่ผ่านแคโทดไอออนเอ็กซ์เชนจ์เมมเบรนไปยังขั้วแคโทด และในด้านแคโทดนี้ น้ำจะแตกตัวได้ ก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนนี้จะรวมตัวกับโซเดียมไอออนและไฮโดรเจนไอออนที่ผ่านเข้ามาจากด้านแอโนด เกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



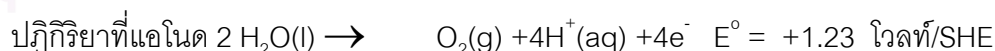
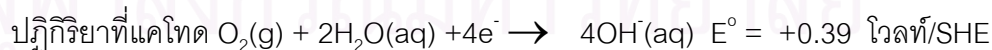
**รูปที่ 2.8** แสดงการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีการป้อนออกซิเจน (Martin, 1992)

จากปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นที่ด้านแคโทดและแอโนดเป็นปฏิกิริยาการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen evolution) และปฏิกิริยาการเกิดก๊าซออกซิเจน (Oxygen evolution) ซึ่งจะมีค่าศักย์ส่วนเกินเปลี่ยนแปลงตามชนิดของขั้วอิเล็กโทรดดังตารางที่ 2.1

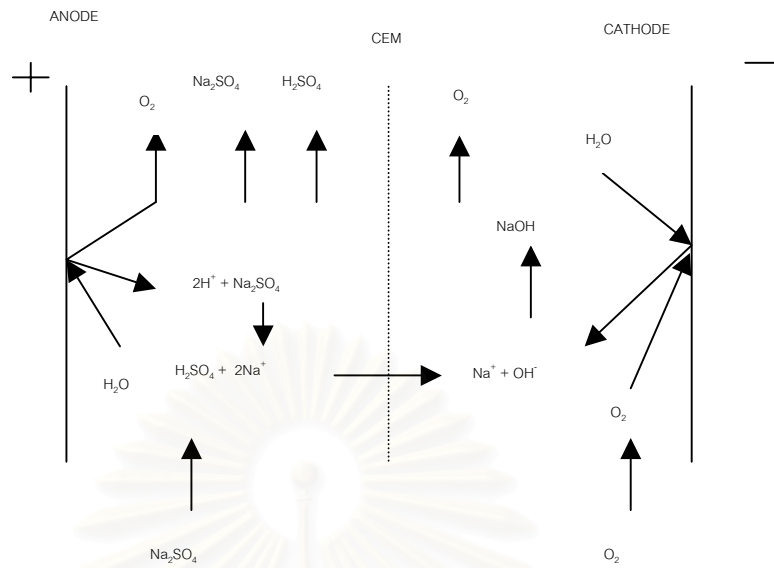
**ตารางที่ 2.1** ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของก๊าซไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยใช้ขั้วชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25°C (รัวซซ์ย ศรีวิบูลย์, 2539)

ชนิดของ อิเล็กโทรด	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (โวลต์) (ที่ความหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้า 0.001 A/cm <sup>2</sup> )		ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (โวลต์) (ที่ความหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้า 0.01 A/cm <sup>2</sup> )		ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (โวลต์) (ที่ความหนาแน่น ของกระแสไฟฟ้า 1 A/cm <sup>2</sup> )	
	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
	Pt	0.024	0.721	0.068	0.85	0.676
Au	0.241	0.673	0.391	0.963	0.798	1.63
Cu	0.479	0.422	0.584	0.580	1.269	0.793
Ni	0.563	0.353	0.747	0.591	1.241	0.853
Hg	0.9		1.1		1.1	
Zn	0.716		0.746		1.229	
Sn	0.856		1.077		1.231	
Pb	0.52		1.090		1.262	
Bi	0.78		1.05		1.23	

แต่ในงานวิจัยนี้เลือกให้เกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างออกไปในด้านแคโทดโดยการเติมก๊าซออกซิเจนเข้าไปในระบบเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาแบบใหม่ที่ด้านแคโทด ซึ่งปฏิกิริยาแบบใหม่ทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออนมากขึ้นในปริมาณของน้ำที่ใช้เท่ากัน นอกจากนี้ยังต้องการพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาลดลงอีกด้วย ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

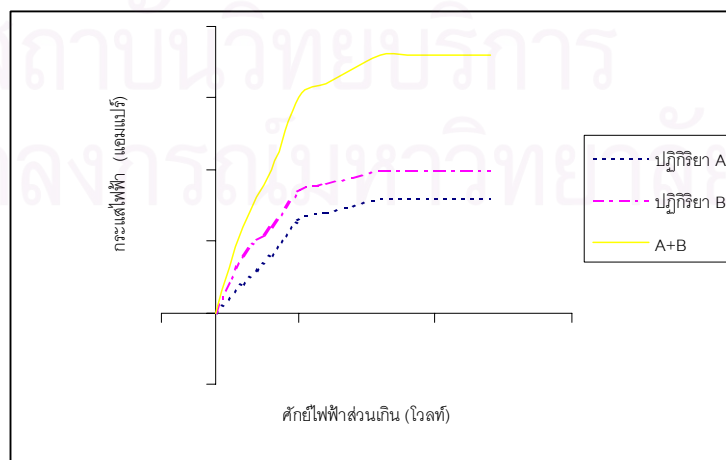


ดังนั้นปฏิกิริยาดังกล่าวจากด้านแคโทด น้ำจะแตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์ไอออนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะเกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ โดยที่ไม่เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคือก๊าซไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีการบ่อนออกซิเจน

ปฏิกิริยาใหม่ที่เกิดขึ้นในด้านแคโทดเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ก๊าซออกซิเจน (Oxygen reduction) ในการหาค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของปฏิกิริยาดังกล่าวไม่พบว่ามีการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินสำหรับปฏิกิริยานี้ที่ชั่ววिल็กโทรดชนิดต่างๆ มาก่อน ดังนั้นจึงไม่มีข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินสำหรับปฏิกิริยาที่ต้องการมาแสดง นอกจากนี้หากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดร่วมกันของปฏิกิริยา  $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$  และปฏิกิริยา  $\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{aq}) + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-(\text{aq})$  ค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่พิจารณาจะต้องเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินรวมของทั้งสอง (เส้นทึบในรูป) ปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของปฏิกิริยาที่เกิดร่วมกันระหว่าง A กับ B



## 2.8 งานวิจัยที่ผ่านมา

ที่ผ่านมาได้มีการใช้เทคนิคอิเล็กทรอนิกส์แบบมีเมมเบรนในการแยกเกลือ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้ ดังจะเห็นได้จากสถิติบัตรเลขที่ 5,230,779 ของประเทศสหรัฐอเมริกา (1993) และงานวิจัยของ Martin (1992) ซึ่งทำการวิจัยผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริกจากเกลือโซเดียมซัลเฟตด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์แบบมีเมมเบรนชนิดแคโทดไอออนเอกเซนจ์ และทำการแยกกรดซัลฟูริกจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตด้วยกระบวนการตกผลึก พบว่ากระบวนการดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพที่ดีในภาวะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเกลือโซเดียมซัลเฟตมากกว่า 30% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส และควรมีกรดซัลฟูริกเป็นส่วนประกอบรวมในสารตั้งต้นอย่างน้อย 0.5% โดยน้ำหนัก เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 19.2 แอมแปร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟต 33% โดยน้ำหนัก และมีซัลฟูริกร่วมอยู่ด้วย 7% สามารถเปลี่ยนเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนักจากปฏิกิริยารีดักชันด้านแคโทด และนอกจากนี้ยังได้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 18% โดยน้ำหนักจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทางด้านแอโนด

นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาในด้านอื่น ๆ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการแยก และในด้านการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาขั้วอิเล็กโทรด หรือพัฒนาที่ตัวเยื่อแผ่นเมมเบรน ดังจะเห็นได้จากสถิติบัตรเลขที่ 4,142,950 ของประเทศสหรัฐอเมริกา (1979) โดยได้ออกแบบขั้วอิเล็กโทรดให้ลดการอุดตันของฟองอากาศที่ขั้วอิเล็กโทรด โดยปรับปรุงอิเล็กโทรดให้มีลักษณะเป็นตะแกรง รูปร่างหลายเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.3 เพื่อให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นนี้เคลื่อนตัวออกไปด้านหลังอิเล็กโทรดเพื่อกันไม่ให้เกิดการอุดตัน ส่งผลให้ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงขึ้น หรือจากงานวิจัยของ Trivedi และคณะ (1996) ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับการแยกเกลือด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสโดยเมมเบรนที่ใช้ได้พัฒนาเป็นแบบไบโพลาร์ ซึ่งเกิดจากการนำเอาเยื่อแผ่นชนิดแอนไอออนมาประกบกับชนิดแคโทดไอออน โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เยื่อแผ่นแบบไบโพลาร์หลายแบบเพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกเกลือ ซึ่งเยื่อแผ่นไบโพลาร์ซึ่งให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในการแยกเกลือโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.5 นอร์มัล เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.75 นอร์มัล และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2.73 นอร์มัล ที่ปริมาตรของสารละลายต่างๆกัน และในทำนองเดียวกันเมื่อนำมาใช้แยกเกลือโซเดียมอะซิเตด ให้เปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเกลือโซเดียมอะซิเตด 1.5 นอร์มัล สามารถเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกได้ถึง 1.62 นอร์มัล และโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ 2.26 นอร์มัล ที่ปริมาตรของสารละลายต่างๆกัน

นอกจากนี้งานวิจัยของ Paleologou, Wong และ Berry (1992) เกี่ยวกับการแยกเกลือโซเดียมซัลเฟตโดยใช้ไบโพลาร์เมมเบรนเช่นเดียวกัน โดยป้อนสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้น

ประมาณ 1.44 ไมลาร์ ความหนาแน่นของกระแสที่ใช้เป็น 137 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ถึง 4% โดยน้ำหนัก และมีประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 73.5%

และ Raucq, Pourcelly และ Gavach (1993) ได้ศึกษาเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าในการแยกโซเดียมซัลเฟตเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริกระหว่างการใช้อิเล็กโทรไลต์-อิเล็กโทรไลต์ไดอะไลซิส (EED) กับอิเล็กโทรไลต์ไดอะไลซิสแบบมี โปโพลาร์เมมเบรน (ED) พบว่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้เครื่อง EED จะสูงกว่า ED เนื่องจากงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อใช้โปโพลาร์เมมเบรนจะมีการรั่วไหลของไอออนที่ไม่ต้องการให้ผ่านเยื่อเมมเบรนมากกว่าเมมเบรนแบบแคตไอออนเอ็กเชนจ์ และแอนไอออนเอ็กเชนจ์ที่ความเข้มข้นของกรดและด่างในทั้งสองด้านของเมมเบรนมีค่าสูง ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ EED ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าสูงเกือบถึง 100%

และยังมีงานวิจัยอื่นๆที่ศึกษาการแยกโซเดียมซัลเฟต ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรไลต์แบบมีเมมเบรน คือ งานวิจัยของ Jorissen และ Simmrock (1991) กับ Rakib และคณะ (1993) แต่ทั้งสองงานวิจัยนี้เน้นถึงการศึกษาตัวเมมเบรนโดยศึกษาถึงความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านเมมเบรน โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าหรือโซเดียมทรานสปอร์ตน์เมเบอร์ สำหรับงานวิจัยของ Jorissen (1991) นั้น ทำการศึกษาเมมเบรนทั้งชนิดแคตไอออนเอ็กเชนจ์และแอนไอออนเอ็กเชนจ์ โดยแคตไอออนเอ็กเชนจ์เมมเบรนคือ นาฟิออน 390 (Nafion 390) พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็น 10% โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คือที่ 20% โดยน้ำหนัก ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าจะคงที่ประมาณ 77% ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกต่ำกว่า 12% โดยน้ำหนัก และจะลดลงตามความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก และเมื่อทดสอบกับแอนไอออนเอ็กเชนจ์เมมเบรน (MA 3475) ทดลองที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็น 10% โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกคือที่ 17% โดยน้ำหนัก ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าจะคงที่ประมาณ 43% ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำกว่า 3% โดยน้ำหนัก และจะลดลงเรื่อยๆ ตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสำหรับงานวิจัยของ Rakib ได้ศึกษาในทำนองเดียวกันแต่ใช้แคตไอออนเอ็กเชนจ์ต่างชนิดกันโดยใช้นาฟิออน (Nafion 350) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jorissen

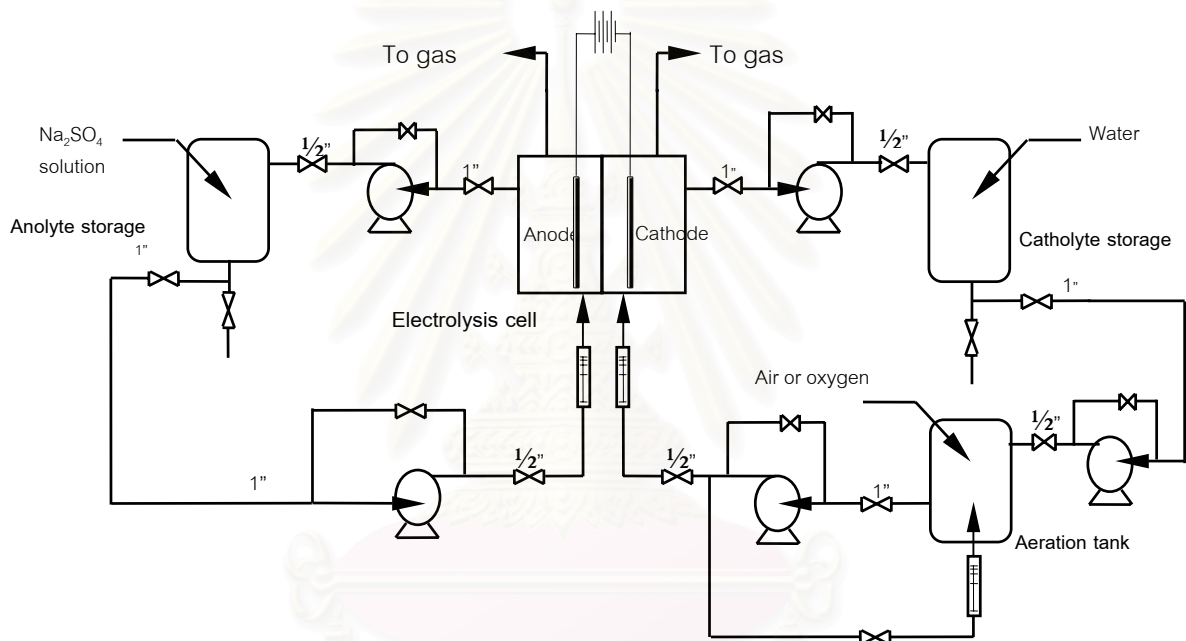


### บทที่ 3

### วิธีวิจัย

#### 3.1 โครงสร้างของระบบเซลล์เคมีไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ได้จัดสร้างเซลล์เคมีไฟฟ้าพร้อมทั้งระบบหมุนเวียนต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยปั๊ม ถังพัก และ อุปกรณ์ย่อย ดังรูปที่ 3.1

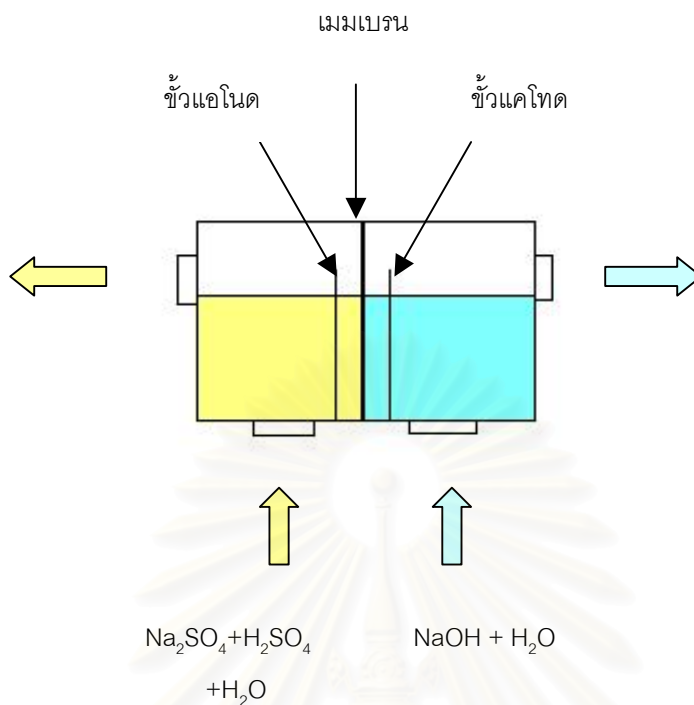


รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพของระบบเซลล์เคมีไฟฟ้า

#### 3.2 โครงสร้างของเซลล์เคมีไฟฟ้า

ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังต่อไปนี้ (รูปที่ 3.2)

1. ตัวเซลล์เคมีไฟฟ้าทำจากวัสดุอะคริลิก
2. เมมเบรนชนิดแคตไอออนเอ็กซ์เชนจ์ได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยอາซาฮีเคมีภัณฑ์ จำกัด
3. ขั้วอิเล็กโทรดด้านแอโนดทำจากวัสดุ DSA (dimension stable anode)
4. ขั้วอิเล็กโทรดด้านแคโทดทำจากวัสดุ นิกเกิล (Ni)



รูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า

### 3.3 อุปกรณ์เครื่องมือวัด

1. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
2. เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลาย (Dissolved oxygen meter)
3. เครื่องมือวัดปริมาณทางไฟฟ้า (Multimeter)

### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

- 3.4.1 ศึกษาการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดซัลฟูริก ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสแบบมีเมมเบรนชนิดแคตไอออนิก และไม่มีการเติมออกซิเจน ซึ่งประกอบด้วย

- 3.4.1.1 ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรนต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต

- 3.4.1.2 ศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต
- 3.4.1.3 ศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต
- 3.4.1.4 ศึกษาผลของปริมาณสารละลายหมุนวนต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต
- 3.4.1.5 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟตและประสิทธิภาพเชิงพลังงาน
- 3.4.2 ศึกษาการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดซัลฟูริก ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสแบบมีเมมเบรนชนิดแคตไอออนิก ที่มีการเปลี่ยนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทางด้านขั้วแคโทดโดยการเปลี่ยนปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายด้านขั้วแคโทด
- 3.4.2.1 ศึกษาผลของกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ
- 3.4.2.2 ศึกษาผลของอัตราการป้อนสารละลายด้านแคโทดต่อปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าด้านแคโทด
- 3.4.2.3 ศึกษาผลของการกระจายตัวของออกซิเจนในสารละลายป้อนที่ด้านแคโทดต่อปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าด้านแคโทด

### 3.5 วิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์

- 3.5.1 วิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก  
ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก วิเคราะห์ด้วยวิธีไทเทรตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาไลน์เป็นอินดิเคเตอร์
- 3.5.2 วิเคราะห์ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์  
ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิเคราะห์ด้วยวิธีไทเทรตด้วยกรดซัลฟูริก โดยใช้ฟีนอล์ฟทาไลน์เป็นอินดิเคเตอร์

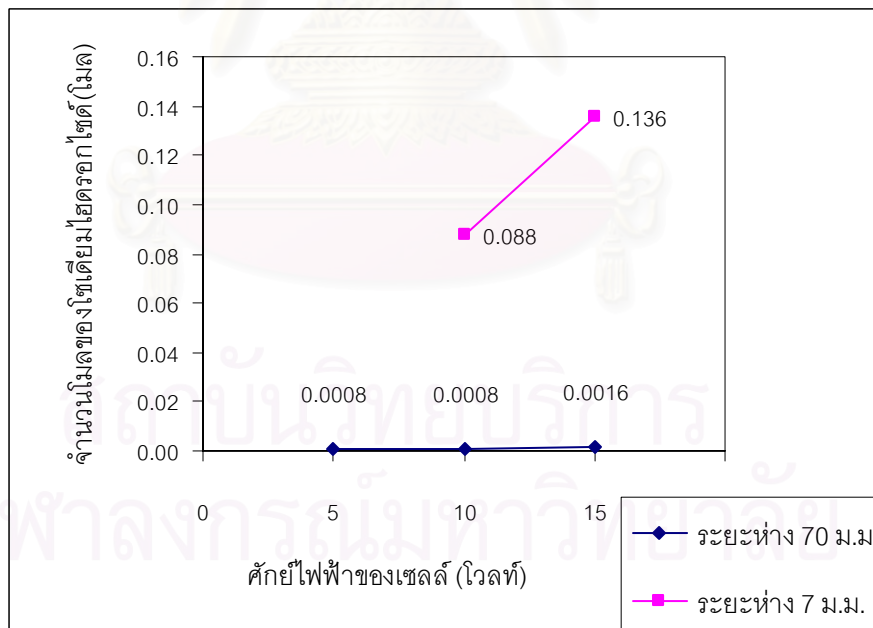
## บทที่ 4

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาสภาวะการทำงานของเซลล์เคมีไฟฟ้า

##### 4.1.1 ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรนต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต

งานวิจัยนี้ในส่วแรกได้ศึกษาสภาวะการทำงานของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรนต่างกัน คือ ที่ระยะห่าง 70 มิลลิเมตรและที่ 7 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์คงที่เท่ากับ 5, 10, 15 โวลต์ตามลำดับ สารละลายที่ป้อนเข้าทางด้านแอนโอดเป็นสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้น 1 นอร์มัล และป้อนน้ำเข้าทางด้านแคโทด ทำการทดลองเป็นเวลา 30 นาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กับจำนวนโมลของโซเดียมซัลเฟตที่แยกขึ้นด้านแคโทดเป็นเวลา 30 นาที เปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรนเท่ากับ 70 มิลลิเมตรและ 7 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.1 พบว่าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เดียวกัน การทดลองที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรนที่ 7 มิลลิเมตร จะเกิดไฮเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดในปริมาณที่มากกว่าในกรณีที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรนเป็น 70 มิลลิเมตรมาก เช่นที่ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากับ 15 โวลต์พบว่าที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และเมมเบรนเท่ากับ 7 มิลลิเมตรจะเกิดไฮเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่ากรณีที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรนเป็น 70 มิลลิเมตรถึง 85 เท่า แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการแยกสารละลายไฮเดียมซัลเฟตให้เป็นไฮเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริกสูงขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรนลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจาก ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ใช้เป็นผลรวมของศักย์ไฟฟ้าย่อย จากสมการที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วย ความต่างศักย์เนื่องจากปฏิกิริยาที่ภาวะสมดุล ความต่างศักย์ส่วนเกิน และความต่างศักย์ของเซลล์ ซึ่งรวมความต่างศักย์ของตัวเมมเบรนและความต่างศักย์ของอิเล็กโทรไลต์ (Pletcher, 1982)

เมื่อพิจารณาที่ความต่างศักย์ของอิเล็กโทรไลต์ ( $E_r$ ) ที่อยู่ในเทอมของ  $IR_{cell}$  จะได้

$$E_r = i \left[ \frac{x_A}{\Lambda_A} + \frac{x_C}{\Lambda_C} \right] \quad (4.1)$$

โดย  $E_r$  คือ ความต่างศักย์อิเล็กโทรไลต์ (โวลต์)

$i$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

$x_A$  คือ ระยะห่างจากขั้วแอโนดถึงเมมเบรน (เซนติเมตร)

$x_C$  คือ ระยะห่างจากขั้วแคโทดถึงเมมเบรน (เซนติเมตร)

$\Lambda_A$  คือ ค่าการนำกระแสไฟฟ้าของสารละลายด้านแอโนด (โอห์ม<sup>-1</sup> เซนติเมตร<sup>-1</sup>)

$\Lambda_C$  คือ ค่าการนำกระแสไฟฟ้าของสารละลายด้านแคโทด (โอห์ม<sup>-1</sup> เซนติเมตร<sup>-1</sup>)

จากการทดลองในส่วนนี้ได้เปรียบเทียบที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรนที่แตกต่างกันคือลดลงจาก 70 มิลลิเมตร เป็น 7 มิลลิเมตร มีผลให้ค่า  $x_C, x_A$  เปลี่ยนแปลงลดลง ทำให้ค่าความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลงด้วย ดังนั้นที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรนน้อยจะมีค่ากระแสของระบบมากกว่าที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรนมาก ทำให้เพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์และศักย์ส่วนเกิน เพื่อจะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เท่ากัน เมื่อกระแสของระบบสูงขึ้นปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำเป็นไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดได้ดีขึ้น และไฮเดียมไอออนเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ปริมาณของไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้มากขึ้น ดังนั้นในการออกแบบเซลล์เคมีไฟฟ้านิยมให้ระยะห่างระหว่าง

อิเล็กโทรดน้อยที่สุด เพื่อลดค่าความต้านทานดังกล่าว (Scott, 1995: Kuhn, 1971) โดยทั่วไปอยู่ที่ 0.1-10 มิลลิเมตร (Scott, 1995) ดังนั้นเพื่อให้ระบบการแยกโซเดียมซัลเฟตทำงานได้ดี การทดลองทั้งหมดหลังจากนี้จึงกำหนดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรนเป็น 7 มิลลิเมตร

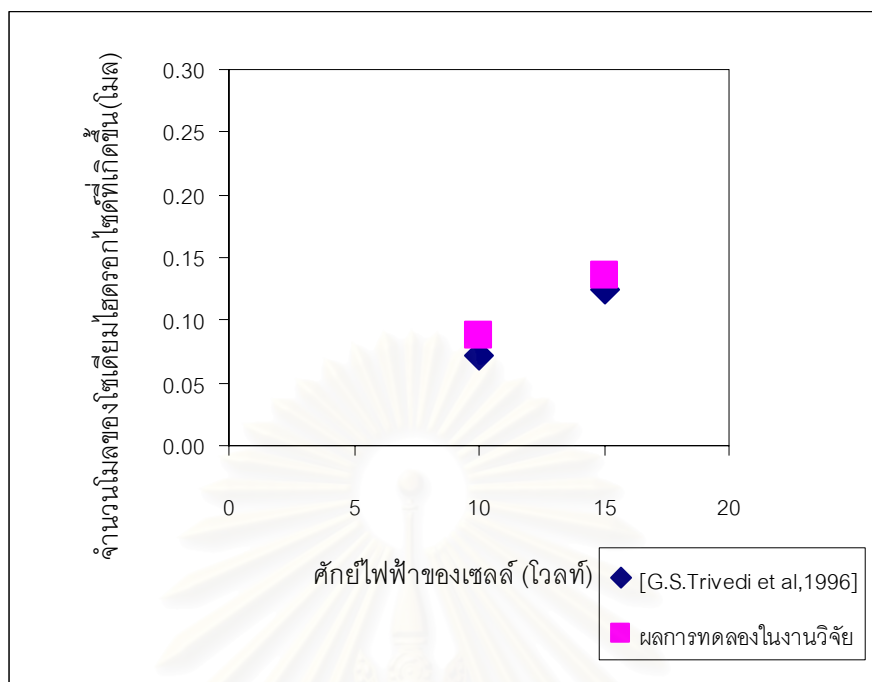
#### 4.1.2 ศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต

สำหรับการศึกษาค่าผลของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต โดยทำการทดลองที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเป็น 7 มิลลิเมตร และศักย์ไฟฟ้าของเซลล์คงที่เท่ากับ 10 และ 15 โวลต์ ทำการป้อนสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้น 1 โมลาร์เข้าในด้านแอโนด และป้อนน้ำเข้าทางด้านแคโทด หลังจากดำเนินการทดลองเป็นเวลา 30 นาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าที่ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ 10 โวลต์ จะเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 0.088 โมล และที่ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ 15 โวลต์ จะเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 0.136 โมล นั่นคือเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับเซลล์ไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้กระแสและศักย์ส่วนเกินเพิ่มขึ้น ปฏิกริยาจึงเกิดขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกโซเดียมซัลเฟตเพิ่มขึ้นด้วย

จากรูปที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับงานวิจัยของ Trivedi, et. al. (1996) พบว่าในการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์คงที่ เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะได้ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ อีกทั้งประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต หรือจำนวนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยของ Trivedi, et. al. มีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

นอกจากนี้เมื่อทำการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่แล้ว ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา คือ เมื่อเวลาที่ใช้ในการทดลองนานขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นปฏิกริยาเคมีไฟฟ้าเกิดมากขึ้น ปริมาณของไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้การนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มขึ้น หรือความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลง ดังนั้นเพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์คงที่ตามที่ต้องการควบคุม ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบจึงเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสในสมการที่ 2.12 การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้างกล่าวเป็นข้อจำกัดทางการทดลอง เนื่องจากเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าจะตัดการจ่ายเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเกินขีดจำกัดของเครื่อง อีกทั้งการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงการเกิดปฏิกริยาเคมีไฟฟ้าของสารละลายในแต่ละด้านของขั้วไฟฟ้า จะมีปฏิกริยาข้างเคียงเกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1



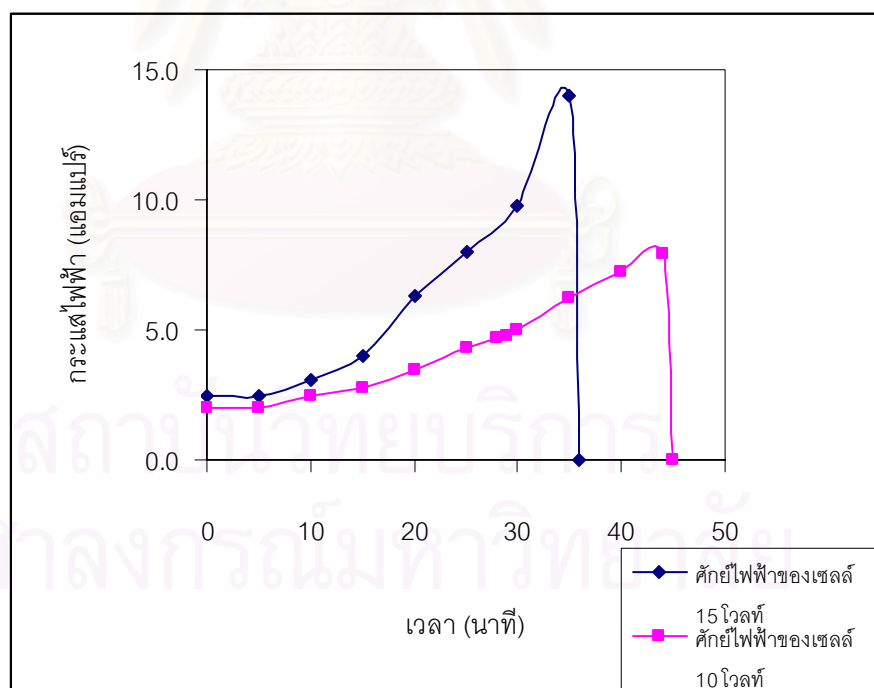


รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ และจำนวนโมลของไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้ในงานวิจัยนี้ กับงานวิจัยของ Trivedi, et. al.(1996)

การเพิ่มขึ้นของกระแสในเซลล์เคมีไฟฟ้ามากเกินไปจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการมากขึ้น ดังนั้นในขั้นตอนวิจัยต่อมาจึงทำการทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่ สำหรับการทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่ เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน คือทำให้ความต้านทานของสารละลายลดลง ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ลดลงตามเวลา

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าศักย์รีดักชันของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่อาจจะเกิดขึ้นในระบบ

ปฏิกิริยา	ศักย์รีดักชัน (โวลต์)
ด้านแคโทด	
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.776
$\text{HO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	1.5
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.229
$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	2.07
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{SO}_4^{2-}$	2.0
ด้านแอโนด	
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2$	0.0000
$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	-0.8277
$\text{Na}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Na}$	-2.7109

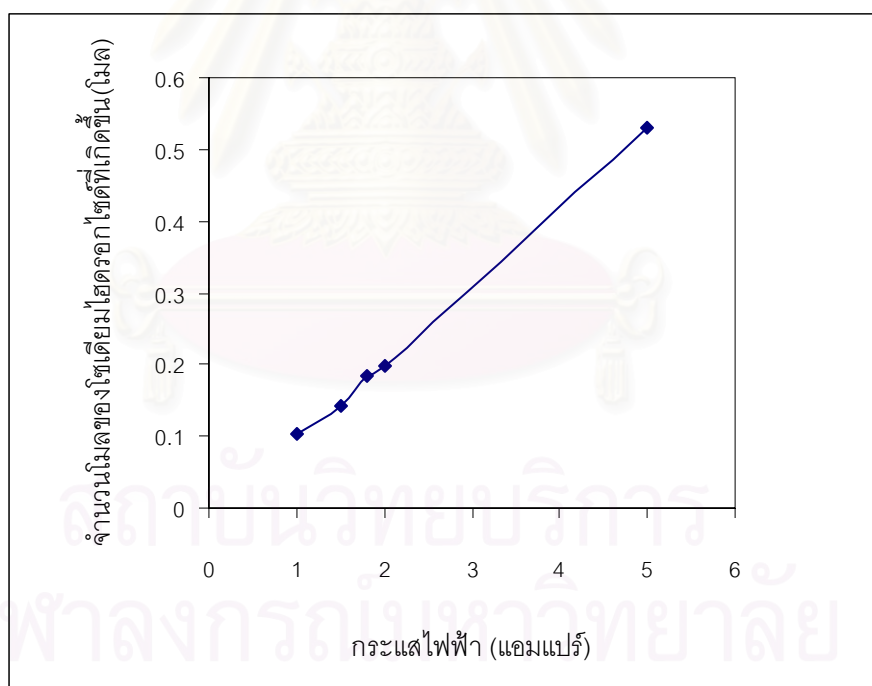


รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์คงที่ 10 และ 15 โวลต์

#### 4.1.3 ศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต

สำหรับการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองควบคุมค่าให้กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1 – 5 แอมแปร์ โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟต 1.0 นอร์มัล หลังจากดำเนินการทดลองเป็นเวลา 180 นาที พบว่าเกิดสารละลายไฮดรอกไซด์ขึ้นทางด้านแคโทดดังแสดงในรูปที่ 4.4 นั่นคือที่กระแสไฟฟ้า 1.0, 1.5, 1.8, 2.0 และ 5.0 แอมแปร์ เกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.103, 0.141, 0.184, 0.199 และ 0.53 โมล ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.4 พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ควบคุม มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟตอย่างมาก ดังจะเห็นได้ว่า เมื่อควบคุมให้ค่ากระแสไฟฟ้าภายในเซลล์เคมีไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้จำนวนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสไฟฟ้า



**รูปที่ 4.4** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า และจำนวนโมลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น สำหรับการทดลองที่ 180 นาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1.0 นอร์มัล

ทั้งนี้เนื่องจากในเซลล์ไฟฟ้าหนึ่ง ๆ หากกระแสไฟฟ้าสามารถวิ่งครบวงจร นั้นหมายถึงจะต้องมีไอออนเคลื่อนผ่านเมมเบรนโดยมีจำนวนประจุรวมเทียบเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งภายในวงจร ยกตัวอย่างเช่น กระแสไฟฟ้าหนึ่งแอมแปร์มีความหมายอีกนัยหนึ่งคือ การส่งถ่ายประจุไฟฟ้าหนึ่งคูลอมบ์ (Coulomb) ต่อวินาที ซึ่งเทียบเท่ากับการส่งถ่ายอิเล็กตรอนจำนวน  $1/96,485$  โมลต่อวินาที ( $96,485$  คูลอมบ์ = 1 โมลอิเล็กตรอน) ดังนั้น ในกรณีที่ทราบกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) และระยะเวลา ( $t$ ) เราจะสามารถคำนวณปริมาณของไอออน ( $m$ ) ที่เกิดปฏิกิริยาได้จากกฎของฟาราเดย์ดังสมการที่ 2.8 โดย  $n$  คือจำนวนโมลอิเล็กตรอน ซึ่งในที่นี้เท่ากับหนึ่ง

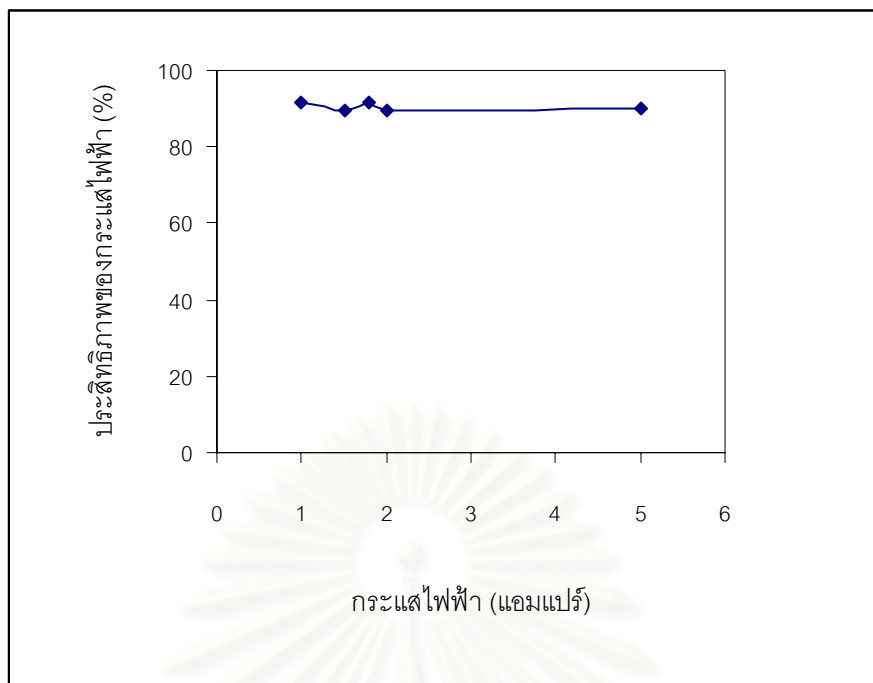
โดยงานวิจัยนี้จะตั้งสมมติฐานให้กระแสไฟฟ้าทั้งหมดใช้ในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำ ไม่มีการสูญเสียไปในปฏิกิริยาข้างเคียง หรือสูญเสียในระบบเนื่องจากสาเหตุอื่นๆ ดังนั้นจึงถือว่าค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่คำนวณจากปริมาณไฮเดียมไฮดรอกไซด์จะเท่ากับไฮเดียมทรานสปอร์ตันัมเบอร์ที่ผ่านตัวเมมเบรน ในงานวิจัยนี้ ไอออนบวกที่เคลื่อนผ่านเมมเบรนโดยแรงขับเคลื่อนไฟฟ้ามีเพียงสองชนิดคือ ไฮเดียมไอออนและโปรตอน

$$m = \frac{It}{96,485n} \quad (2.8)$$

จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนมีมากขึ้น โดยไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนประกอบด้วย ไฮเดียมไอออน และโปรตอน เมื่อไอออนทั้งหมดเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้เกิดเป็นไฮเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้นในด้านแคโทดนั่นเอง แต่ทั้งนี้จะทราบได้ว่าไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนส่วนใหญ่เป็นไฮเดียมไอออนหรือโปรตอนจากการคำนวณประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า ( $\phi^e$ ) ดังสมการที่ 2.9

$$\phi^e = \frac{m_{act}}{m} \times 100 \quad (2.9)$$

โดย  $m_{act}$  และ  $m$  คือ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจริง และปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นตามกฎของฟาราเดย์ ตามลำดับ ถ้าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าสำหรับการเกิดไฮเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าสูงหมายความว่าไอออนส่วนใหญ่ที่เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนเป็นไฮเดียมไอออนซึ่งจากการทดลองได้ผลของประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าง่ายที่ 4.5



**รูปที่ 4.5** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าควบคุมภายในเซลล์ไฟฟ้ากับประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่การทดลองความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล

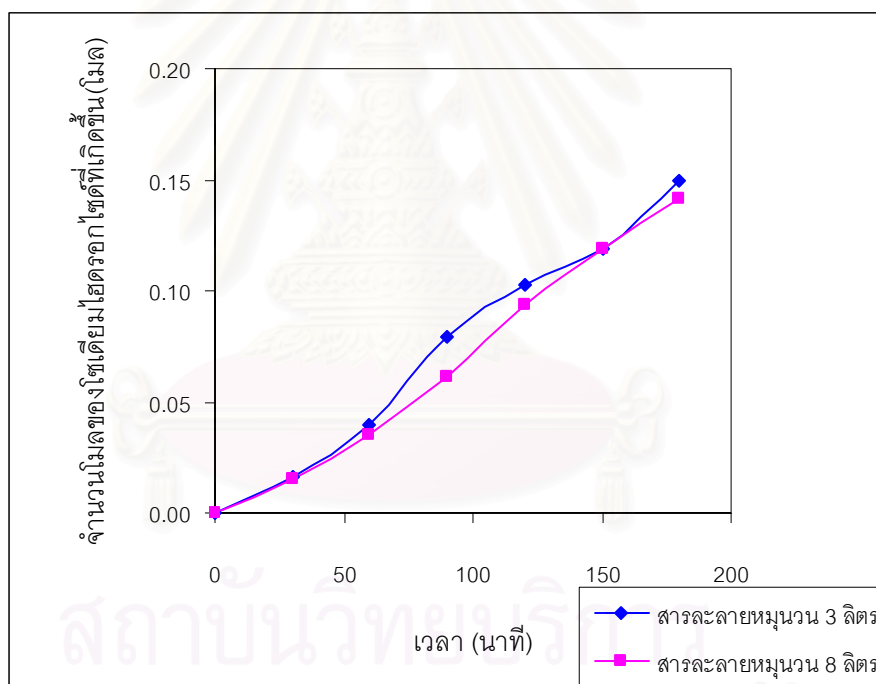
จากรูปที่ 4.5 พบว่าที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 0.32% โดยน้ำหนัก หรือสัดส่วนจำนวนโมลเป็น 0.033 ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าคงที่อยู่ที่ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ หรือมีค่าโซเดียมทรานสปอร์ตนิมเบอร์ผ่านตัวเมมเบรนเป็น 0.9 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rakib (1999) และ Jorissen (1991) โดยงานวิจัยของ Rakib พบว่าโซเดียมทรานสปอร์ตนิมเบอร์จะมีค่าคงที่อยู่ที่ 0.87 และจะเริ่มลดลงเมื่อสัดส่วนจำนวนโมลของกรดในสารละลายด้านแอโนดมากกว่า 0.2 และเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Jorissen ซึ่งพบว่าค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าจะคงที่อยู่ที่ 75% และจะเริ่มลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดมากกว่า 12% โดยน้ำหนัก

จากการทดลองดังกล่าวทำการทดลองที่ความเข้มข้นของกรดต่ำมากเพียง 0.32% โดยน้ำหนักจึงทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าหรือโซเดียมทรานสปอร์ตนิมเบอร์มีค่าสูงและคงที่ นั่นคือไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนส่วนใหญ่เป็นโซเดียมไอออนเมื่อความเข้มข้นของกรดด้านแอโนดมีค่าต่ำ สรุปได้ว่าที่ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าหรือโซเดียมทรานสปอร์ตนิมเบอร์มีค่าคงที่ในช่วงกระแสไฟฟ้าที่ทำการทดลอง ดังนั้นเมื่อกระแสไฟฟ้าควบคุมภายในเซลล์เคมีไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจึงส่งผลให้โซเดียมไอออนเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนในปริมาณที่มากขึ้นเกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้นในด้านแคโทด

#### 4.1.4 ศึกษาผลของปริมาณสารละลายหมუნวนต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต

การศึกษาผลของปริมาณสารละลายหมუნวนต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟตนี้ จะทำการทดลองที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ที่ 1.5 แอมแปร์ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล โดยจะเปรียบเทียบที่ปริมาณสารละลายหมუნวนในด้านแคโทด และแอโนด ด้านละ 8 ลิตรและ 3 ลิตร เมื่อทำการทดลองเป็นเวลา 180 นาทีได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในด้านแคโทดของการทดลองที่สารละลายหมუნวน 8 ลิตร และ 3 ลิตร มีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก นั่นคือปริมาณสารละลายหมუნวนไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต

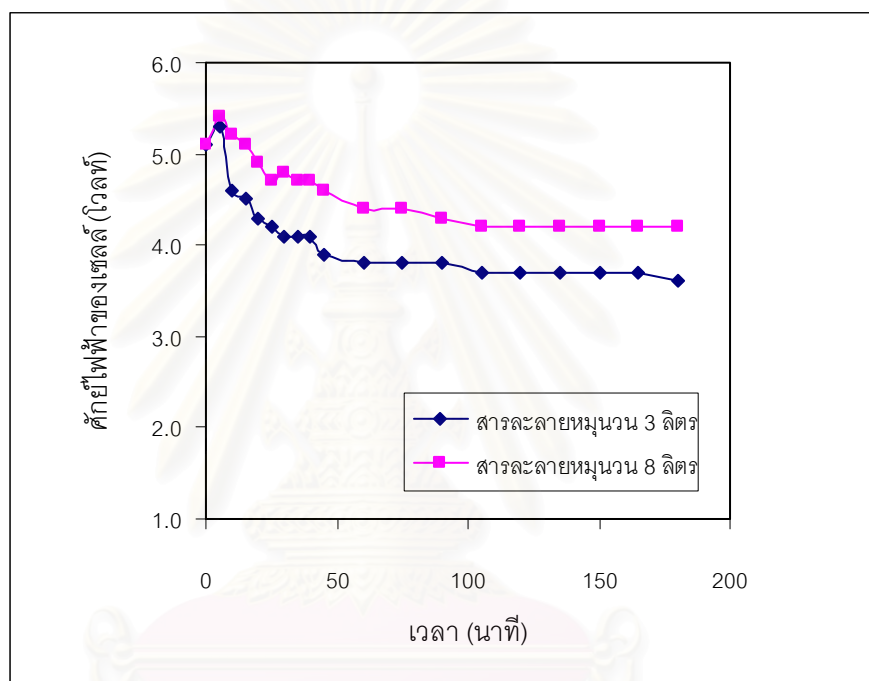


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ เปรียบเทียบเมื่อสารละลายหมუნวนเป็น 8 ลิตร และ 3 ลิตร

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าคงที่ คือการที่ประจุเคลื่อนที่จากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งในปริมาณที่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อทำการทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่ แต่ลดปริมาณของสารละลายหมუნวน จึงเป็นผลให้ปริมาณประจุที่ส่งผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าผ่านเมมเบรนยังคงมีปริมาณเท่าเดิม ทำให้จำนวนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการแยกโซเดียมซัลเฟตมีปริมาณเท่าเดิม แต่เมื่อพิจารณา



เป็นความเข้มข้นของสารละลาย เนื่องจากการลดปริมาตรหมุนวนของสารละลายลงแต่จำนวนโมลของไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเท่ากัน จึงทำให้มีความเข้มข้นไม่เท่ากัน คือที่ปริมาตรหมุนวน 3 ลิตรมีความเข้มข้นของไฮเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าโดยความเข้มข้นของสารละลายเป็นอัตราส่วนกับปริมาณสารละลายหมุนวน เช่นที่ไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมล ที่ปริมาณสารละลายหมุนวน 3 ลิตรจะมีค่าความเข้มข้นของไฮเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.33 โมลต่อลิตร ส่งผลให้สารละลายมีการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงในอัตราที่สูงขึ้น ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองสำหรับที่สารละลายหมุนวน 3 ลิตร มีค่าต่ำกว่าที่ 8 ลิตร ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการทดลองที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่ใช้สารละลายหมุนวน 3 ลิตร และ 8 ลิตร

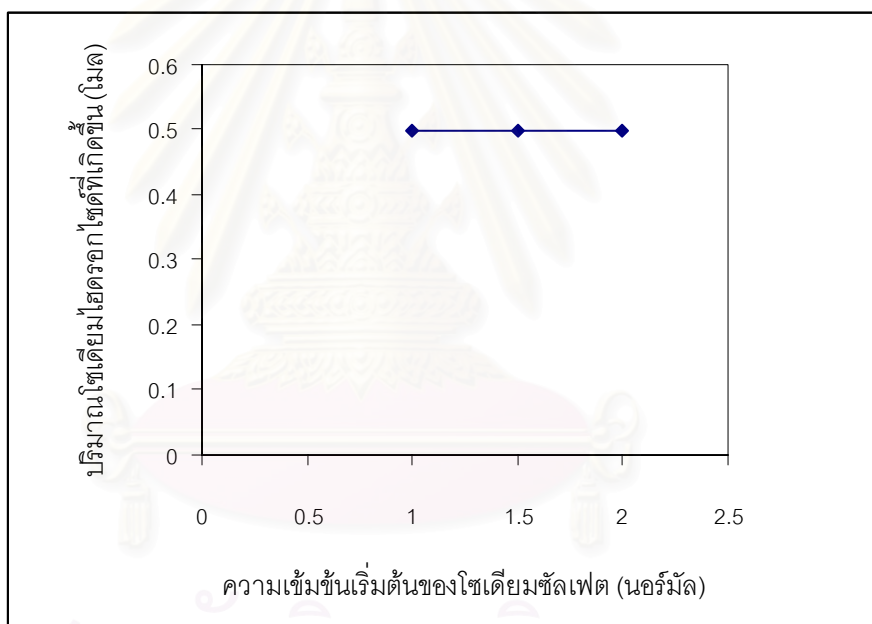
#### 4.1.5 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพการแยกไฮเดียมและประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

##### 1. ประสิทธิภาพเชิงการแยก

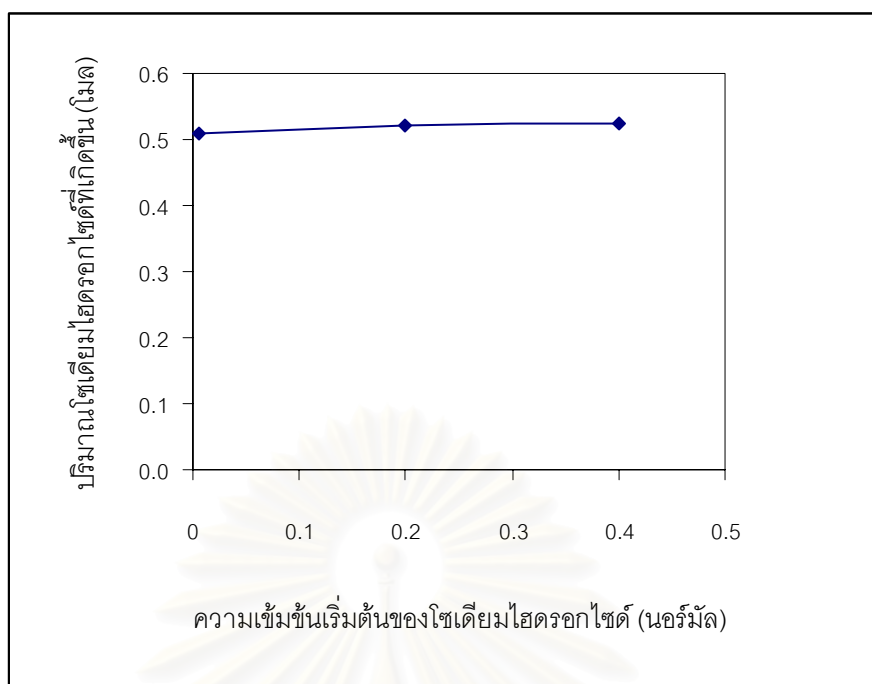
สำหรับการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการแยกไฮเดียมซัลเฟต เป็นไฮเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริก โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ดังกล่าวคือ สารละลายผสมระหว่างไฮเดียมซัลเฟต และกรดซัลฟูริกในด้านแอนไอออน และ สารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ในด้านแคโทด เมื่อศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย

โซเดียมซัลเฟตค่าต่างๆอันได้แก่ 1.0, 1.5, 2.0 นอร์มัล โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริกเริ่มต้น 0.005 นอร์มัล และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 นอร์มัล ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ พบว่าหลังจากเวลาผ่านไป 180 นาที จะได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในเซลล์ด้านแคโทดอันเป็นผลจากการแยกเท่ากับ 0.520 โมล, 0.528 โมล และ 0.522 โมล ตามลำดับ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.8

เช่นเดียวกันเมื่อศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้านแคโทด ซึ่งคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆกัน คือ 0.005, 0.1, 0.2, 0.4 นอร์มัล ที่ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1.0 นอร์มัล กรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.005 นอร์มัล ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ หลังจากเวลาผ่านไป 180 นาที ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการแยกมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 0.5 โมล ดังกราฟรูปที่ 4.9



**รูปที่ 4.8** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นด้านแคโทดสำหรับการทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ ระยะเวลา 180 นาที



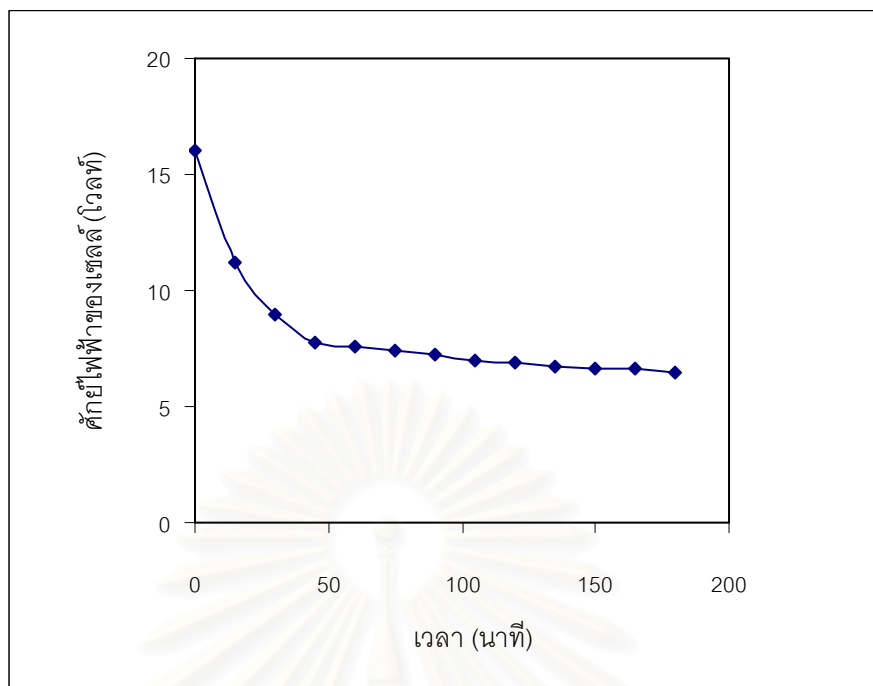
**รูปที่ 4.9** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ด้านแคโทดที่การทดลองกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 5 แอมแปร์ ระยะเวลา 180 นาที

จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีผลน้อยมาก ต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ ความเข้มข้นของสารละลายด้านแคโทดสำหรับงานวิจัยนี้ส่งผลน้อยมากต่อประสิทธิภาพทาง ไฟฟ้าหรือโซเดียมทรานสปอร์ตนิมเบอร์ จึงทำให้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นตาม ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้กระแสไฟฟ้าและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ เคมีไฟฟ้าเท่านั้น ซึ่งจะส่งผลต่อปฏิกิริยาการรีดักชันของน้ำเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน เมื่อควบคุม เวลาและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในการทดลองคงที่ จึงทำให้ประสิทธิภาพการแยกคงที่ด้วย

## สถาบันวิทยบริการ

### 2. ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

สำหรับการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพ เชิงพลังงาน ในการทดลองนี้จะเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์คือ โซเดียม ไฮดรอกไซด์เริ่มต้นต่างกัน จากการทดลองที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่ม ต้นที่ 0.005 นอร์มัล พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังกราฟรูปที่ 4.10

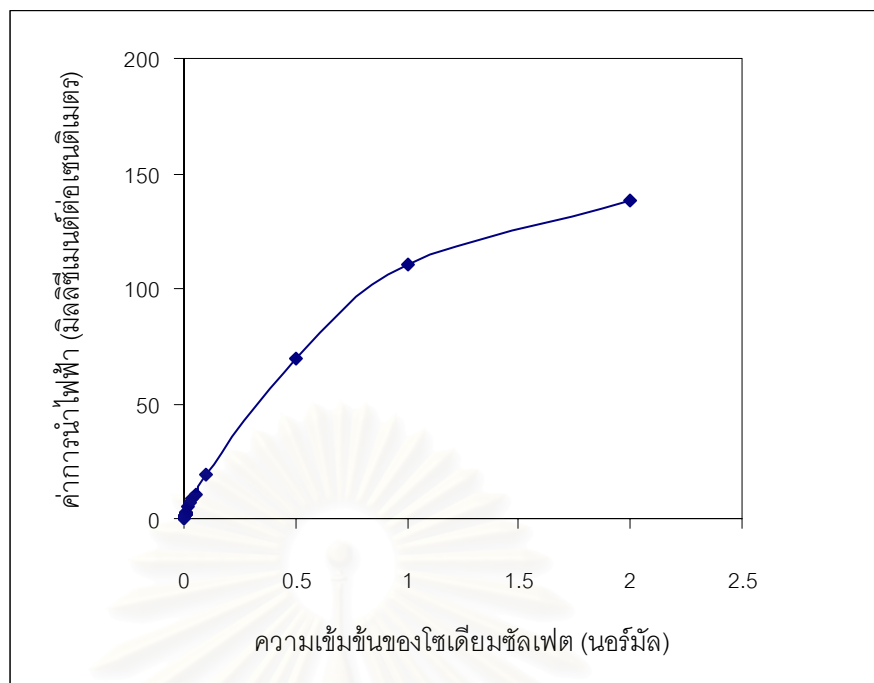


**รูปที่ 4.10** แสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 นอร์มัล

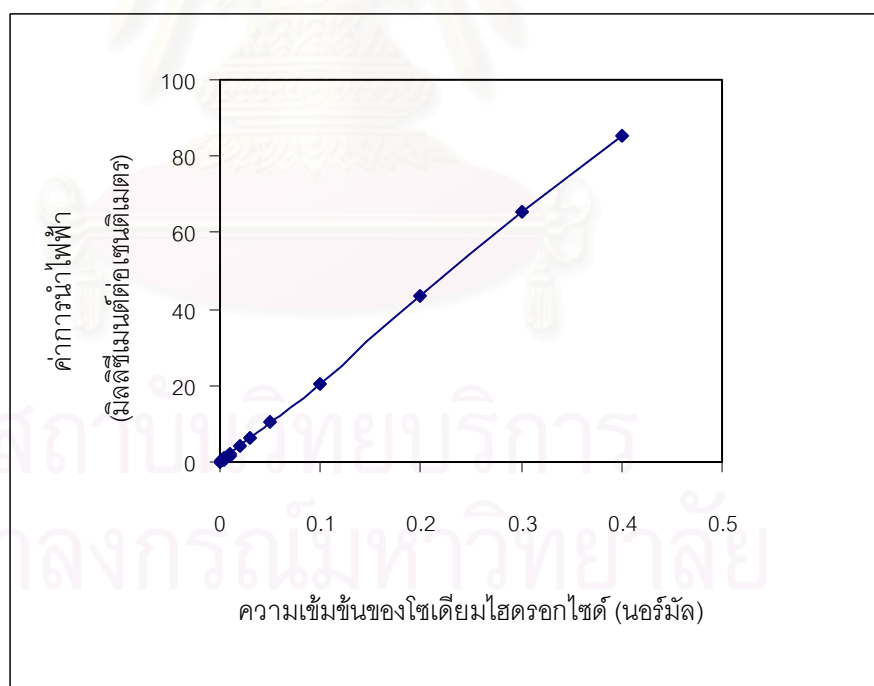
จากกราฟพบว่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าลดลงตามเวลาอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเมื่อเวลาผ่านไปจะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อเริ่มทดลองโดยควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า จะเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดไฮดรอกไซด์ไอออนด้านแคโทด ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทางด้านนี้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (จากกราฟรูปที่ 4.11 และ 4.12) และความต้านทานทางไฟฟ้าลดลง เป็นผลให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ลดลง

และเมื่อพิจารณาในรูปของพลังงานที่ถูกใช้ (Energy consumption) พบว่าที่กระแสไฟฟ้าภายในเซลล์คงที่ เมื่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ลดลง พลังงานที่ถูกใช้ลดลงดังรูปที่ 4.13

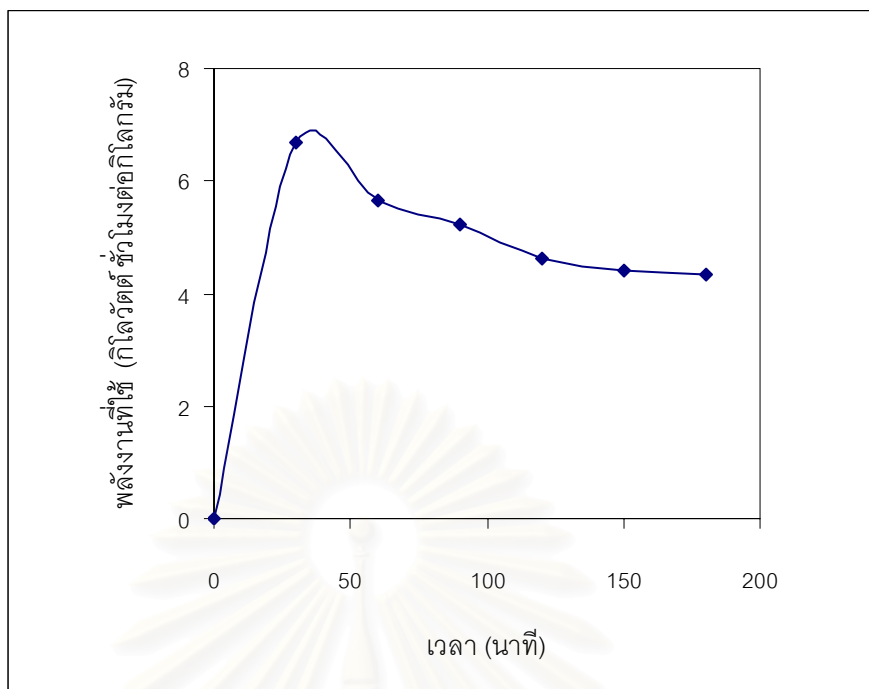
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่างๆกัน



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆกัน



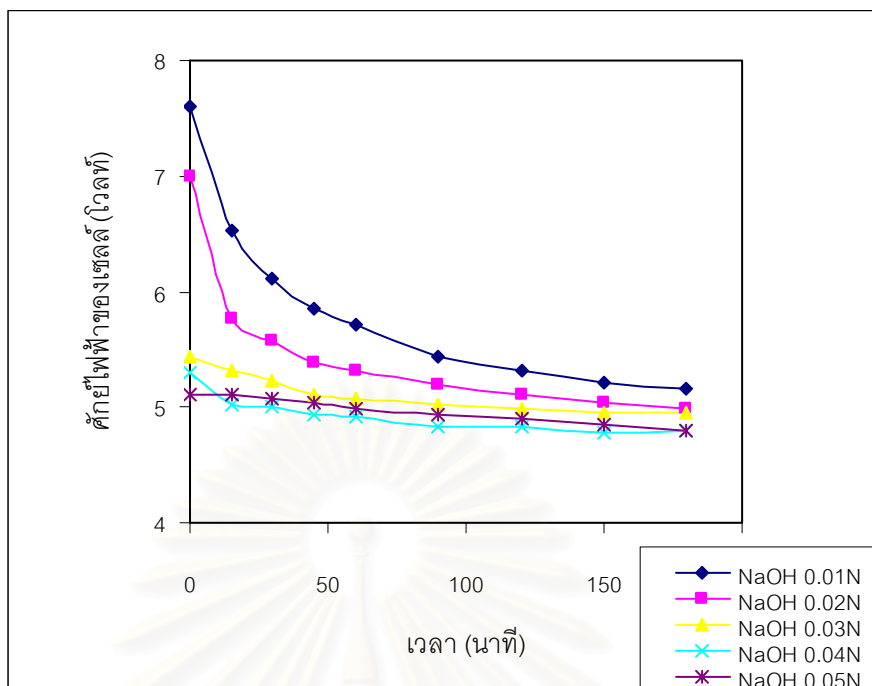
**รูปที่ 4.13** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 นอร์มัล กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์

ถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูง จะต้องให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาหรือพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำที่สุด เมื่อควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าภายในเซลล์ให้เท่ากัน

เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 นอร์มัล โดยให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟตคงที่ที่ 1 นอร์มัล และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.005 นอร์มัล ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ เป็นเวลา 180 นาที ได้ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.14

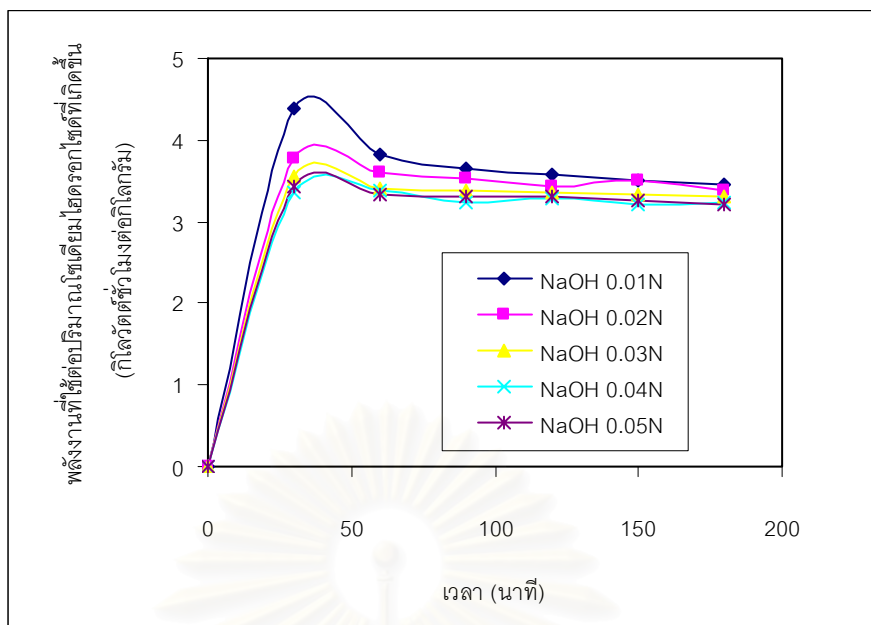
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



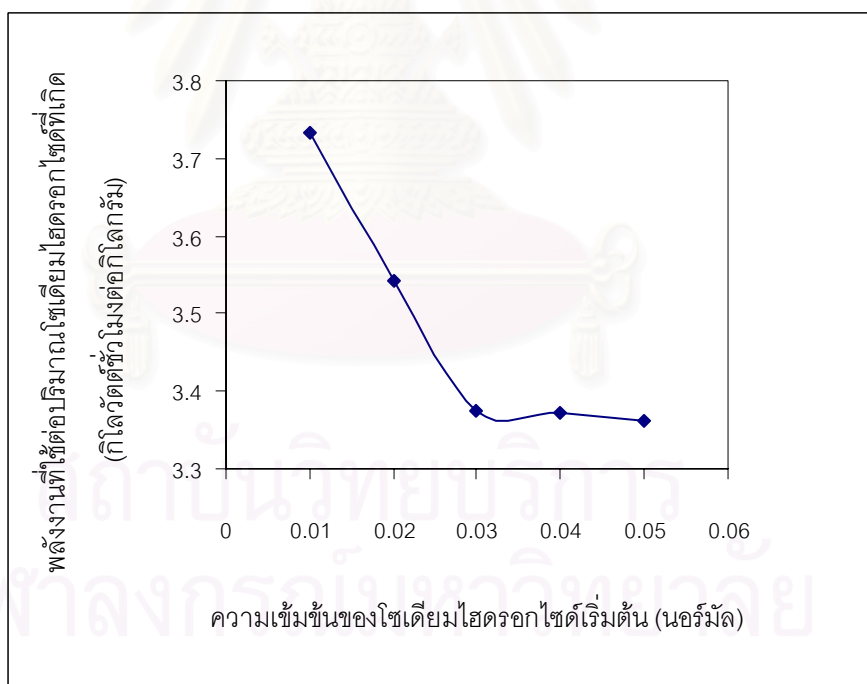


**รูปที่ 4.14** แสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบกันที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮดรอกไซด์เริ่มต้นต่างๆ กัน

จากกราฟพบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไฮดรอกไซด์ 0.03 นอร์มัล มีค่าการนำไฟฟ้า 6.19 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร จะเป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไฮดรอกไซด์ที่ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ประมาณ 5 โวลต์ และพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณการเกิดไฮดรอกไซด์ประมาณ 3.35 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ซึ่งในงานวิจัยของ Trivedi, (1996) ทำการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้า 15-50 โวลต์ และไบโพลาร์เมมเบรนชนิดต่างๆ พบว่าใช้พลังงานประมาณ 1.2-7.1 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัมทั้งนี้ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองและชนิดของเมมเบรน ดังนั้นในการทดลองในส่วนของการเติมออกซิเจนจึงทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮดรอกไซด์มากกว่า 0.03 นอร์มัล เพื่อให้ค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เริ่มต้นไม่ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ในปฏิกิริยา เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เมื่อมีการเติมออกซิเจนได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบกันที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้นต่างๆ กัน



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้โดยเฉลี่ยต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้นต่างๆ กัน

เมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้านแอโนด ซึ่งประกอบด้วย โซเดียมซัลเฟต และกรดซัลฟูริก เมื่อต้องการให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าต่ำที่สุด เพราะฉะนั้นค่าการนำไฟฟ้าที่ด้านแอโนดควรมีค่ามากกว่า 6.19 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร หรือมีค่าความต้านทานของสารละลายด้านแอโนดต่ำกว่านี้ด้วย ซึ่งในการทดลองทั้งหมดนี้ใช้โซเดียมซัลเฟต 1.0-2.0 นอร์มัล มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 110 – 145 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เป็นค่าการนำไฟฟ้าที่สูงมาก (หรือค่าความต้านทานในสารละลายด้านแอโนดต่ำมาก) เป็นผลให้ในช่วงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ใช้ในการทดลองจะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

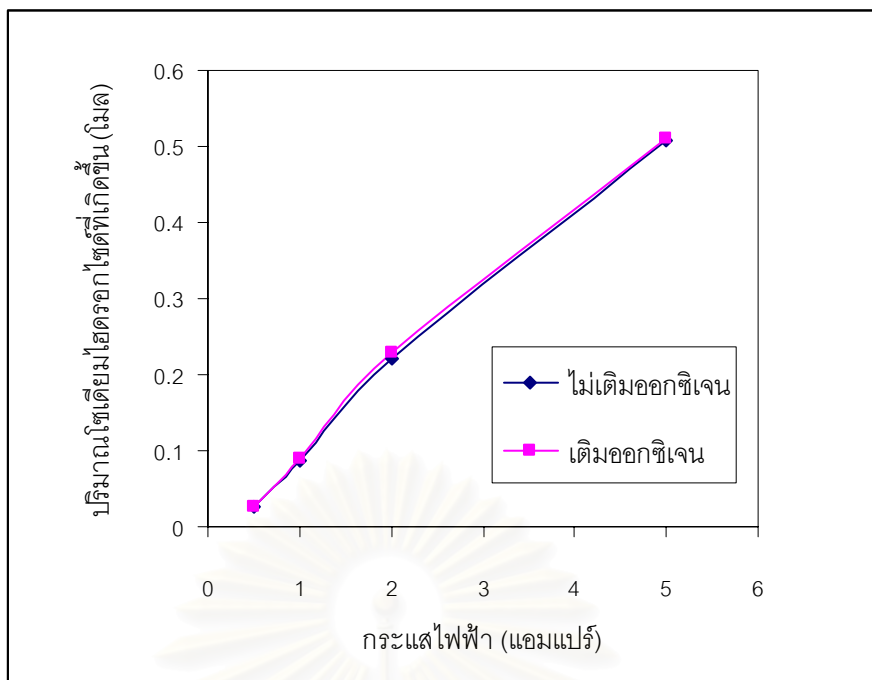
และเนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตด้านแอโนดมีค่าสูง ดังนั้นความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เปลี่ยนแปลงไปอันเป็นผลมาจากการแยกที่เกิดขึ้นจึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

## 4.2 การศึกษาผลการเติมออกซิเจนในสารละลายด้านแคโทด

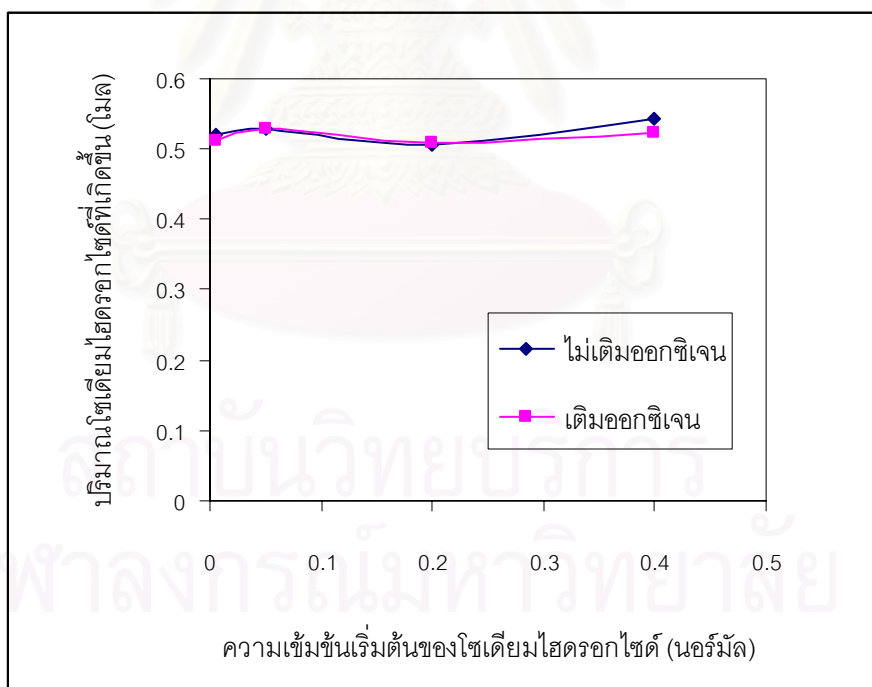
### 4.2.1 ผลการศึกษาที่กระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ

สำหรับการศึกษาผลการเติมออกซิเจนในสารละลายด้านแคโทด ที่กระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ค่าต่างๆ (ศึกษาเฉพาะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดแตกต่างกัน) เปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการเติมออกซิเจน โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล และควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าต่างกัน

จากรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อเติมออกซิเจนในสารละลายด้านแคโทดผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองที่ไม่มีการเติมออกซิเจนในสารละลาย ถึงแม้จะเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้เพิ่มขึ้นจาก 0.2 แอมแปร์ จนถึง 5 แอมแปร์



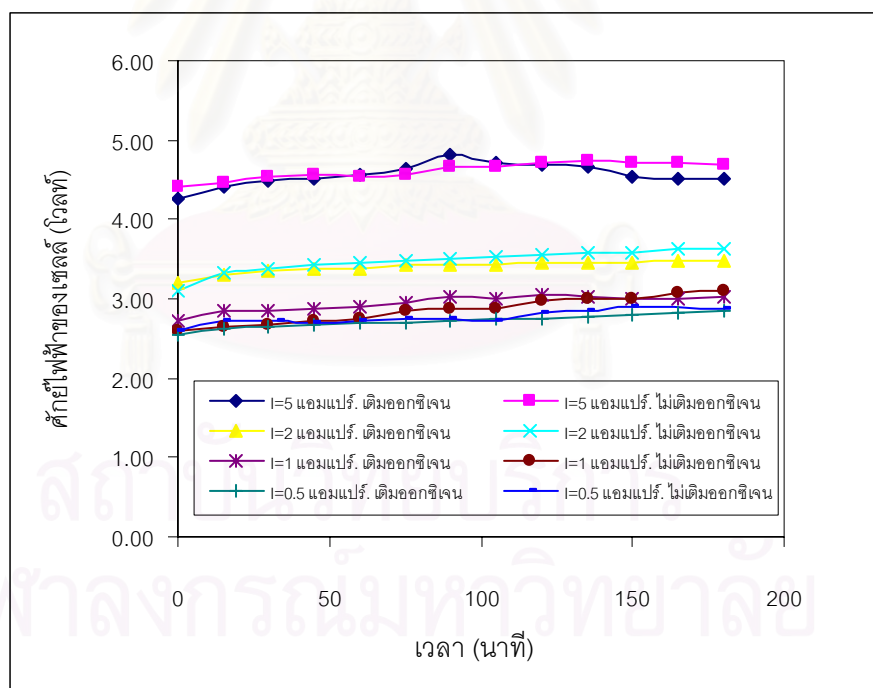
**รูปที่ 4.17** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่ควบคุมกับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในด้านแคโทด สำหรับการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล เปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการเติมออกซิเจน และไม่มีการเติมออกซิเจนเข้าไปในสารละลายด้านแคโทด ทำการทดลองเป็นเวลา 180 นาที



**รูปที่ 4.18** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดกับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในด้านแคโทด สำหรับการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล เปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการเติมออกซิเจน และไม่มีการเติมออกซิเจนเข้าไปในสารละลายด้านแคโทด ทำการทดลองเป็นเวลา 180 นาที

และจากรูปที่ 4.18 พบว่าการเติมออกซิเจนไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกไฮเดียมซัลเฟต ไม่ว่าจะความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์เท่าใดก็ตามจากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นด้านแคโทด (โดยการวัดกัมมันต์ของออกซิเจนที่ละลาย) ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการอิเล็กโทรไลซิส ทั้งนี้อาจเนื่องจากสาเหตุหลักคือ ไฮเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ตัวหนึ่งของระบบเกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนของไฮเดียมไอออนจากเซลล์ด้านแอโนดไปยังเซลล์ด้านแคโทด อัตราการถ่ายเทมวลสารข้ามเมมเบรนดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยแรงขับเคลื่อนไฟฟ้ามากกว่าแรงขับเคลื่อนจากความเข้มข้น การเปลี่ยนแปลงของโมลของไฮเดียมไฮดรอกไซด์ในเซลล์ด้านแคโทดจึงถูกควบคุมโดยค่ากระแสที่ใช้มากกว่าที่จะเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

จากข้อสรุปข้างต้นเมื่อเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทางด้านแคโทด กรณีมีการเติมออกซิเจนและไม่เติมออกซิเจน คือ  $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$  และ  $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ สำหรับการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไฮเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล เปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการเติมออกซิเจน และไม่มีการเติมออกซิเจนเข้าไปในสารละลายด้านแคโทด และที่กระแสไฟฟ้า 0.5, 1, 2 และ 5 แอมแปร์ ทำการทดลองเป็นเวลา 180 นาที

สังเกตว่าเมื่อควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าภายในเซลล์ให้เท่ากัน ปริมาณอิเล็กตรอนที่ใช้ในปฏิกิริยาเท่ากัน ปฏิกิริยาทั้งสองเกิดไฮดรอกไซด์ในจำนวนโมลที่เท่ากันด้วย ในทางทฤษฎีหากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำเกิดโดยสมบูรณ์ทั้งสองกรณีศักย์รีดักชันที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่มีออกซิเจนร่วมจะสูงกว่า ( $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$  ศักย์รีดักชัน = -0.83 โวลต์ และ  $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$  ศักย์รีดักชัน = +0.39 โวลต์) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า

อย่างไรก็ดี เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าสำหรับการทดลองที่มีการเติมออกซิเจนและไม่เติมออกซิเจนในสารละลายด้านแคโทดกลับพบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วมีค่าใกล้เคียง หรือแตกต่างกันน้อยมากดังแสดงในรูปที่ 4.19 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก 2 กรณี คือ

1. ไม่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำร่วมกับออกซิเจนที่ด้านแคโทดดังที่ต้องการหรือเกิดปฏิกิริยาในอัตราที่ต่ำมากๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก

1.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ใช้ออกซิเจนช้ากว่าเวลาที่ออกซิเจนในสารละลายเคลื่อนที่ผ่านภายในเซลล์ไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลที่ป้อนสารละลายด้านแคโทดอาจสูงเกินไป (2 ลิตรต่อนาที) ทำให้ระยะเวลาที่ออกซิเจนในสารละลายมีโอกาสทำปฏิกิริยาน้อยเมื่อเทียบกับการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำ

1.2 การกระจายตัวของออกซิเจนในสารละลายด้านแคโทดไม่สม่ำเสมอภายในเซลล์ไฟฟ้า ทำให้โอกาสที่สารละลายที่มีออกซิเจนละลายอยู่มาก (ส่วนที่ป้อนเข้ามาใหม่) จะไม่ไหลผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างแผ่นเมมเบรนและขั้วอิเล็กโทรด (ไหลเข้าเซลล์แล้วไหลออกจากเซลล์โดยไม่เข้าทำปฏิกิริยา) มีความเป็นไปได้

1.3 ความเข้มข้นของออกซิเจนที่เติมลงไปนสารละลายมีค่าน้อย จนทำให้ปฏิกิริยาที่ต้องการเกิดมีน้อยมากเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาเดิม

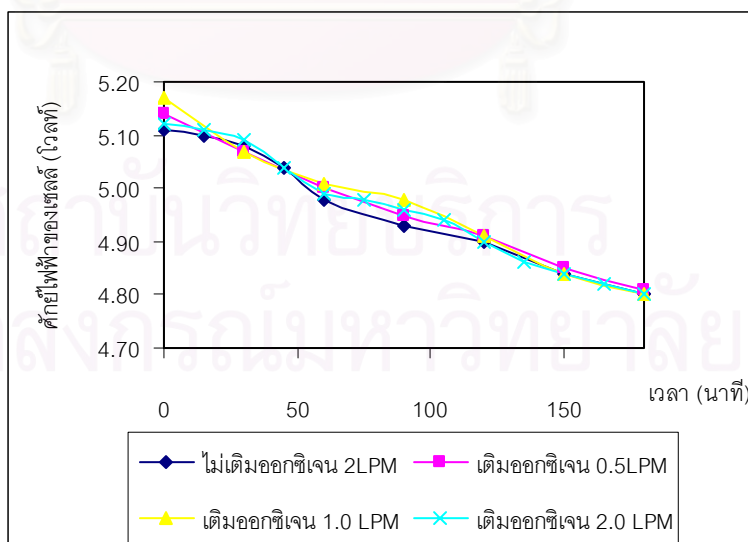
2. การทดลองเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำร่วมกับออกซิเจนในด้านแคโทดตามที่ต้องการ แต่ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไม่ลดลงตามที่คาดหมาย อาจเนื่องมาจากลักษณะของปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าเกิดโพลาไรเซชัน ทำให้มีศักย์ส่วนเกินช่วงหนึ่งที่ต้องการโดยที่ปฏิกิริยายังไม่เกิด จึงทำให้ค่าศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าไม่ลดลงตามที่คาดไว้



#### 4.2.2 ศึกษาผลของอัตราการป้อนสารละลายด้านแคโทดต่อปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าด้านแคโทด

จากการทดลองที่ผ่านมาไม่พบความแตกต่างของผลการทดลองระหว่างปฏิกิริยาที่มีการเติมออกซิเจนและไม่เติมออกซิเจน โดยเฉพาะความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้า โดยคาดว่าเนื่องจากจากอัตราการไหลที่สูงเกินไปของสารละลายที่ป้อนเข้าในด้านแคโทด ดังนั้นจึงทำการทดลองด้วยอัตราการไหลต่างๆ คือ 0.5, 1.0 และ 2.0 ลิตรต่อนาที โดยทดลองที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเริ่มต้นเข้มข้น 1 นอร์มัล สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้นที่ 0.05 นอร์มัล และที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ จากกราฟรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อลดอัตราการไหลของสารละลายด้านแคโทดที่ป้อนเข้าภายในเซลล์เคมีไฟฟ้าเป็น 0.5 และ 1.0 ลิตรต่อนาที ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่อัตราการไหล 2.0 ลิตรต่อนาที รวมทั้งยังคงให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับการทดลองที่ไม่มีการเติมออกซิเจนในสารละลายด้วย จากผลการทดลองดังกล่าว สรุปได้ว่าอัตราการหมุนเวียนสารละลายไม่มีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นด้านแคโทด

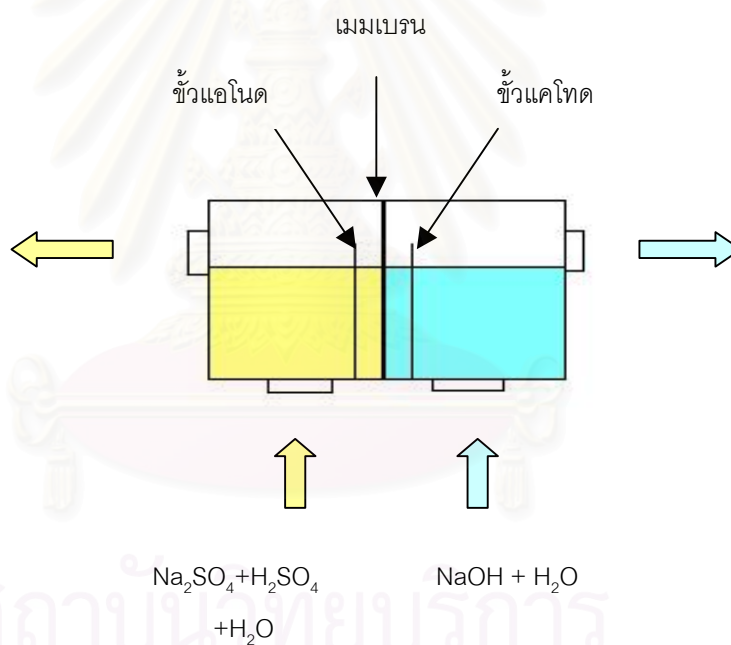
ทั้งนี้เนื่องจากการป้อนสารละลายเข้าสู่เซลล์เคมีไฟฟ้าจะกระทำบริเวณด้านหลังของแผ่นอิเล็กโทรด และด้วยลักษณะของตัวแผ่นอิเล็กโทรดซึ่งมีรูปร่างคล้ายตาข่าย จึงยากต่อการคำนวณได้ว่ารูปแบบการไหลของสารละลายระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรนในแต่ละด้านของเซลล์เคมีไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารละลาย อย่างไรก็ตามในการทดลองต่อไปนี้ (หัวข้อ 4.2.3) ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลของสารละลายระหว่างอิเล็กโทรด และเมมเบรนไม่ส่งผลต่อการแยกแต่อย่างใด



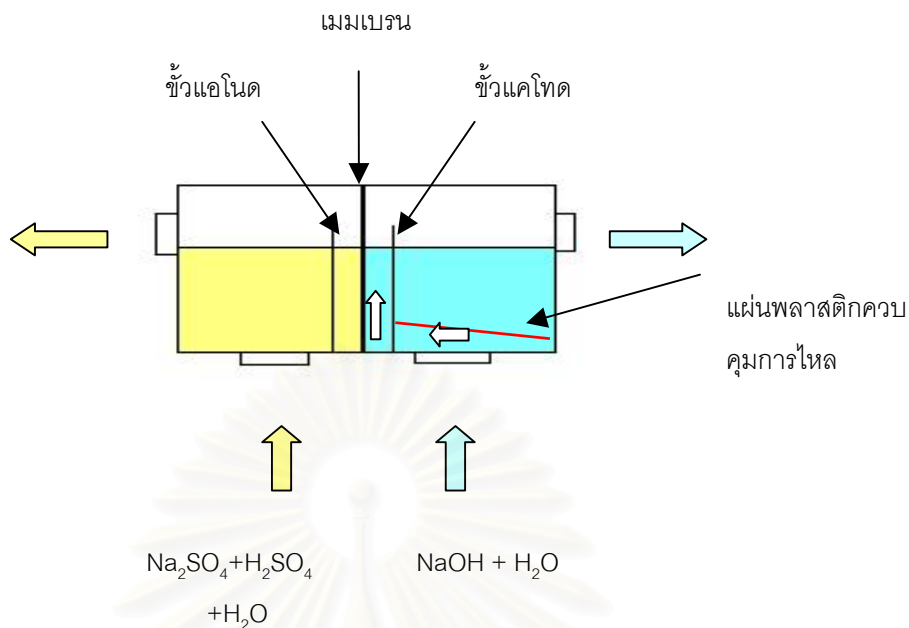
**รูปที่ 4.20** แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่เวลาต่างๆ โดยเปรียบเทียบการทดลองที่อัตราการไหลเข้าของสารละลายด้านแคโทดต่างกัน โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล ที่ 5 แอมแปร์

### 4.2.3 ศึกษาผลของการกระจายตัวของออกซิเจนในสารละลายป้อนที่ด้านแคโทดต่อปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าด้านแคโทด

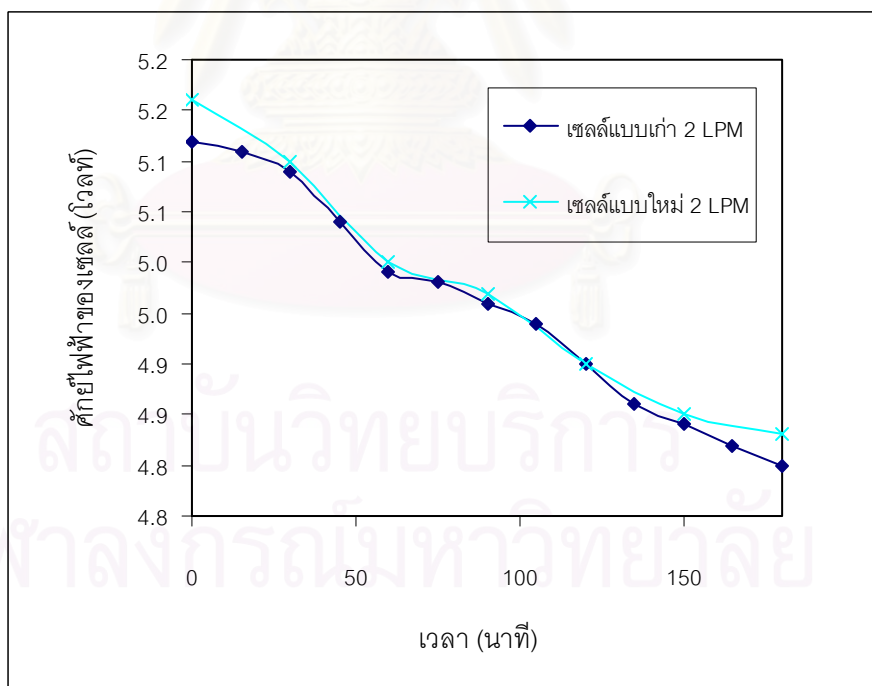
การทดลองที่ผ่านมาเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 4.21 จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่าสารละลายจะถูกป้อนเข้ามาด้านล่าง และออกไปทางด้านหลังของเซลล์ไฟฟ้า อาจทำให้การกระจายตัวของออกซิเจนในสารละลายด้านแคโทดไม่เท่ากัน เป็นผลให้ออกซิเจนที่ละลายในสารละลายบางส่วนไม่ผ่านเข้าทำปฏิกิริยาที่ระหว่างขั้วไฟฟ้าและเมมเบรน จึงทำการปรับปรุงเซลล์เคมีไฟฟ้าขึ้นมาใหม่ ดังรูปที่ 4.22 คือทำแผ่นพลาสติก (เส้นสีแดง) มากั้นเส้นทางการไหลของสารละลายที่ป้อนเข้ามาด้านแคโทด เพื่อบังคับให้สารละลายที่ถูกป้อนทั้งหมดไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรน เพื่อออกซิเจนที่ละลายในสารละลายมีโอกาสทำปฏิกิริยาก่อนที่จะไหลออกจากเซลล์เคมีไฟฟ้า



รูปที่ 4.21 แสดงเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบที่ใช้ทดลอง



รูปที่ 4.22 แสดงเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบปรับปรุงเพื่อควบคุมทิศทางการไหลของสารละลายด้านแคโทด



รูปที่ 4.23 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่เวลาต่างๆ โดยเปรียบเทียบการทดลองระหว่างเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบเก่าและแบบใหม่ซึ่งพัฒนาให้สารละลายที่ไหลเข้าภายในเซลล์ทิศทางการไหลจะผ่านช่องว่างระหว่างขั้วแคโทดและเมมเบรน โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล ที่ 5 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.23 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่มีการเติมออกซิเจนของเซลล์เคมีไฟฟ้าระหว่างรูปที่ 4.21 และ 4.22 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า เซลล์ไฟฟ้าแบบเดิมมีการกระจายตัวของออกซิเจนในสารละลายได้ดีอยู่แล้ว นั่นคือ การกระจายตัวของออกซิเจนในสารละลายสำหรับงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในด้านแคโทด

#### 4.2.4 วิเคราะห์ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทด

ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำสูงที่สุดเมื่อความดันย่อยของออกซิเจนเท่ากับ 760 ทอรร จากกฎของเฮนรีที่ค่าคงที่เฮนรีของออกซิเจนเท่ากับ  $3.3 \times 10^7$  ทอรร ดังนั้นสัดส่วนโมลของออกซิเจนเท่ากับ

$$x(O_2) = \frac{p(O_2)}{K(O_2)} = \frac{760}{3.3 \times 10^7} = 2.3 \times 10^{-5}$$

ในน้ำหนึ่งลิตรจะมีออกซิเจนละลายอยู่เท่ากับ 0.00128 โมลต่อลิตร

สำหรับในงานวิจัยนี้วัดออกซิเจนได้ประมาณ 75% ของปริมาณออกซิเจนสูงสุดที่ละลายได้ในน้ำ ดังนั้นออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำเท่ากับ  $9.6 \times 10^{-4}$  โมลต่อลิตร อัตราการป้อนสารละลายอยู่ที่ 2 ลิตรต่อนาที่ดังนั้นจะมีออกซิเจนถูกป้อนเข้ามาในเซลล์เคมีไฟฟ้า  $1.92 \times 10^{-3}$  โมลต่อนาที่

ที่เวลาหนึ่งนาที่ ในการทดลองซึ่งควบคุมค่ากระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ จะเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนในระบบเซลล์ไฟฟ้าเท่ากับ  $3.11 \times 10^{-3}$  โมลอิเล็กตรอนต่อนาที่ สมมติว่าออกซิเจนที่เข้ามาทำปฏิกิริยาทั้งหมด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการสำหรับปฏิกิริยาดังกล่าวซึ่งสอดคล้องกับค่ากระแส 5 แอมแปร์คือ  $7.78 \times 10^{-4}$  โมลต่อนาที่ ซึ่งนั่นหมายความว่าออกซิเจนที่ป้อนเข้ามาในเซลล์เคมีไฟฟ้ามีปริมาณเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้ สรุปได้ว่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายมีเพียงพอในการเกิดปฏิกิริยา แต่ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไม่ลดลงนั้น อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยานี้เกิดได้ช้าและมีช่วงของโพราไรเซชันเกิดขึ้นทำให้ศักย์ของปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากค่าศักย์ที่ภาวะสมดุล

#### 4.2.5 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้อื่น

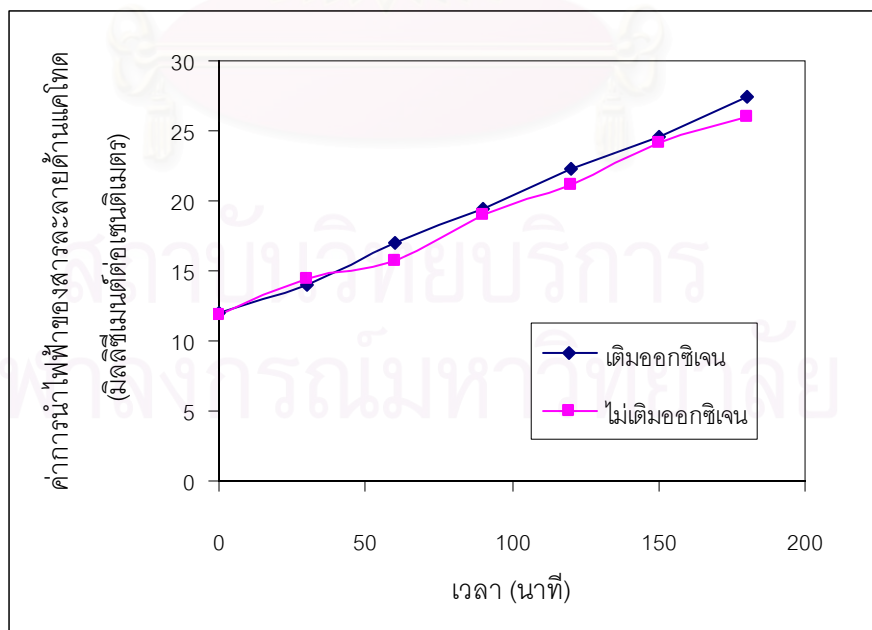
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ผ่านมาของกระบวนการที่มีการเติมก๊าซออกซิเจนเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ไม่เติมก๊าซออกซิเจนไม่พบความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อาจเนื่องมาจากสาเหตุอื่นๆ ดังนี้ เมื่อพิจารณาที่สมการรวมของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

$$U = E_e^C - E_e^A - |\eta_A| - |\eta_C| - IR_{CELL} - IR_{CIRCUIT} \quad 2.8$$

จะเห็นว่าหาก  $E_e^C$  มีค่าลดลงเมื่อปฏิกิริยาด้านแคโทดเปลี่ยนจาก  $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$  เป็น  $O_2(g) + 2H_2O(aq) + 4e^- \rightarrow 4OH^-(aq)$  แต่จากการทดลองค่า  $U$  ของทั้งสองกระบวนการมีค่าเท่ากัน ดังนั้นอาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก  $IR_{CELL}$  หรือ  $\eta_C$  (ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินอันเนื่องมาจากโพลาริเซชัน) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีออกซิเจนร่วมในปฏิกิริยา

##### 1. พิจารณาที่ความต้านทานของเซลล์ ( $IR_{CELL}$ )

ความต้านทานของเซลล์ส่วนที่มีผลมากที่สุดอยู่ที่ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจากการทดลองเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าที่กระบวนการไม่เติมออกซิเจนและเติมออกซิเจน จะมีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกันตลอดการทดลองดังรูปที่ 4.24 นั้นหมายความว่า การที่ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไม่แตกต่างกันระหว่างสองการทดลองไม่ได้เป็นผลมาจากค่าการนำไฟฟ้า หรือค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าแต่อย่างใด



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายด้านแคโทดเมื่อมีการเติมออกซิเจนเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการเติมออกซิเจนที่เวลาต่างๆ

## 2. พิจารณาที่ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินอันเนื่องมาจากโพลาริเซชัน ( $\eta_c$ )

นอกจากความเป็นไปได้ต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นยังมีความเป็นไปได้ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของปฏิกิริยาต่างๆ บนอิเล็กโทรดที่ใช้มีค่าไม่เท่ากัน เช่นจากตารางที่ 2.1 เมื่อพิจารณาที่อิเล็กโทรดชนิดนิกเกิล ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 0.001 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเท่ากัน ค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของปฏิกิริยาที่เกิดก๊าซไฮโดรเจนจะมีค่า 0.563 โวลต์ แต่ปฏิกิริยาที่เกิดก๊าซออกซิเจนจะมีค่า 0.353 โวลต์ ซึ่งที่ปฏิกิริยาต่างชนิดกันจะเห็นว่ามีค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินแตกต่างกันด้วย หากว่าปฏิกิริยา  $O_2(g) + 2H_2O(aq) + 4e^- \rightarrow 4OH^-(aq)$  มีค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของปฏิกิริยา  $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$  ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและชนิดของอิเล็กโทรดเดียวกัน นั้นหมายความว่าเราต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากกว่าเดิมเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา  $O_2(g) + 2H_2O(aq) + 4e^- \rightarrow 4OH^-(aq)$  แทนปฏิกิริยา  $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$  ซึ่งเมื่อศักย์ที่อิเล็กโทรดสูงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเป็นก๊าซไฮโดรเจนได้ ปฏิกิริยานี้จะเกิดร่วมไปกับปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซออกซิเจนและน้ำเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน จึงทำให้ค่าศักย์ที่อิเล็กโทรดไม่แตกต่างจากกรณีที่ไม่เติมออกซิเจน อีกทั้งเมื่อจำนวนโมลของอิเล็กตรอนที่ให้กับระบบคงที่ (กระแสคงที่) จึงสามารถได้ไฮดรอกไซด์ไอออนเท่าเดิม ดังนั้นจึงไม่เห็นความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ระหว่างการทดลองที่ไม่มีการเติมออกซิเจนและเติมออกซิเจนในสารละลายด้านแคโทด



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาผลของออกซิเจนที่ละลายต่อการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริก ซึ่งเกิดจากการปรับเปลี่ยนปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดของเซลล์อิเล็กโทรไลซิส จากการทดลองในขั้นต้นเป็นการทดสอบเมื่อไม่มีการเติมออกซิเจนในสารละลายด้านแคโทดเพื่อใช้เปรียบเทียบกับ การทดลองที่มีการเติมออกซิเจนละลาย พบว่าเกิดการแยกสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็นกรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะแปรตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ควบคุม และเวลาที่ใช้ในการทดลอง ปริมาณพลังงานที่ใช้จะแปรตามความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ควบคุม ซึ่งทั้งหมดสอดคล้องกับทฤษฎีทางเคมีไฟฟ้า

และเมื่อทำการทดลองป้อนออกซิเจนเข้าในสารละลายด้านแคโทดพบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นและการใช้พลังงานไม่แตกต่างจากการทดลองที่ไม่มีการเติมออกซิเจนในสารละลาย ซึ่งผลที่ได้แตกต่างจากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีเกี่ยวกับค่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ซึ่งคาดว่าจะมีการใช้พลังงานลดน้อยลง จากการทดลองเพื่อตัดปัจจัยอื่นๆที่อาจส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ดังกล่าว อาทิเช่น ปริมาณของออกซิเจนที่ละลาย รูปแบบและการกระจายตัวของสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้าและอัตราการหมุนเวียนของสารละลาย ทำให้สามารถสรุปได้ว่าสาเหตุของการที่ผลการทดลองในทั้งสองกรณีไม่มีความแตกต่างกันเกิดจากการเกิดโพลาไรเซชัน เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของปฏิกิริยาที่ใช้ออกซิเจนร่วมเป็นสำคัญ โดยการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ออกซิเจนร่วมที่ขั้วอิเล็กโทรดซึ่งทำจากวัสดุ निकเกิล มีความเชิงขั้วมาก ทำให้ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของปฏิกิริยาระหว่างปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำ กับปฏิกิริยาที่มีออกซิเจนร่วมด้วยมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าหรือพลังงานที่ใช้มีค่าไม่แตกต่างกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาลักษณะของการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น และโพลาไรเซชันเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในด้านแคโทด คือ  $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$  และปฏิกิริยา  $\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{aq}) + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-(\text{aq})$  ที่เกิดบนอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุ निकิล เพื่อนำมาใช้สนับสนุนการวิเคราะห์ผลการศึกษาที่คาดว่า การเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากศักย์ไฟฟ้ามีผลทำให้การทดลองไม่เป็นไปตามคาดหมาย
2. ควรมีการศึกษาโพลาไรเซชันของปฏิกิริยาดังกล่าว ที่เกิดบนอิเล็กโทรดชนิดอื่นๆ และศึกษาผลของออกซิเจนที่ละลายต่อการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริก เมื่อทดลองโดยการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ใช้ในด้านแคโทด
3. ควรมีการเก็บตัวอย่างของก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าทั้งด้านแคโทดและด้านแอโนด พร้อมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบ และอัตราการไหลของก๊าซดังกล่าว เพื่อนำมาสนับสนุนการวิเคราะห์ผลการทดลอง

## รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

รัชชชัย ศรีวิบูลย์. *เคมีวิเคราะห์* 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2539.

ปริญญา อำนวยวิสุทธิ. *เทอร์โมไดนามิกส์เคมี*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสไตร์, 2537.

วิโรจน์ ปิยวัชรพันธุ์. *เคมีเชิงฟิสิกส์*. เล่มที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสไตร์, 2540.

ศุภชัย ไข่เทียมวงศ์. *เคมีวิเคราะห์*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

ภาษาอังกฤษ

Bard, A.J., and Faulkner, L.R. *Electrochemical methods fundamental and applications*. New York: John Wiley & Sons, 1980.

Caldwell, D.L. Production of Chlorine. In *Comprehensive treatise of electrochemistry volume 2 electrochemical processing*, 105-165. New York: Plenum, 1981.

Creamer, E.D., and Krumpelf, B.M. Apparatus and process for electrolysis using a cation permselective membrane and turbulence inducing means, *United States Patent No. 4,142,950* (Mar 6, 1979).

Foller, P.C., and Bombard, R.T. Processes for the production of mixture of caustic soda and hydrogen peroxide via the reduction of oxygen. *Journal of applied electrochemistry* 25 (1995): 613-627.

Jorissen, J., and Simmrock, K.M. The behaviour of ion exchange membranes in electrolysis and electrodialysis of sodium sulphate. *Journal of applied electrochemistry* 21 (1991): 869-876.

Kuhn, A.T., and Wright, P.M. Electrodes for Industrial Process. In *Industrial electrochemical process*, 525-574. Amsterdam: Elsevier, 1971.

Martin, A.D. Sodium hydroxide production by the electrohydrolysis of aqueous effluent streams containing sodium salts. In *Electrochemical engineering and the environment*. 153-162. London: Institute of chemical engineers, 1992.

- Martin, A.D. Electrochemical production of sodium hydroxide and sulfuric acid from acidified sodium sulfate solutions, *United States Patent No.5,230,779* (Jul. 27,1993).
- Paleologou, M., Wong P-Y., and Berry, R.M. A solution to caustic/chlorine imbalance on bipolar membrane electrodialysis. *Journal of pulp and paper science* 18 (July 1992): J138-J145.
- Pletcher, D. *Industrial Electrochemistry*. London: Chapman and Hall, 1982.
- Plentice, G. *Electrochemical Engineering Principles*. Singapore: Prentice-Hall, 1991.
- Porter, M.C. *Handbook of industrial membrane technology*. New Jersey: Noyes, 1990.
- Pourcelly, G., Tugas, I., Gavach, C. Electrotransport of sulphuric acid in special anion exchange membranes for the recovery of acids. *Journal of membrane science* 97 (1994): 99-107.
- Rakib, M., et al. Behaviour of Nafion 350 membrane in sodium sulfate electrochemical splitting continuous process modelling and pilot scale tests. *Journal of applied electrochemistry* 29 (1999): 1439-1448.
- Raucq, D., Pourcelly, G., and Gavach, C. Production of sulphuric acid and caustic soda from sodium sulphate by electromembrane processed comparison between electro-electrodialysis and electrodialysis on bipolar membrane. *Desalination* 91 (1993): 163-175.
- Scott, K. *Electrochemical processes for clean technology*. London: Royal society of chemistry, 1995.
- Trivedi, G.S., et. al. Studies on bipolar membranes. *Reactive & Functional Polymers* 28 (1996): 243-251.
- Trivedi, G.S., et. al. Studies on bipolar membrane part II conversion of sodium acetate to acetic acid and sodium hydroxide. *Reactive & Functional Polymers* 32 (1997): 209-215.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### 1. ผลการทดลอง

1.1 การทดลองที่ศึกษาไฟฟ้าคงที่ให้อัตราการไหลคงที่ 2 ลิตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างอิเล็คโทรดกับเมมเบรน 70 มิลลิเมตรและความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล

**ตารางที่ ก.1** การทดลองที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล  
ศึกษาไฟฟ้าของเซลล์ 5 โวลท์

เวลา (นาท)	โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.05
30	0.0001	0.0008	0.0000	0.0000	0.05
60	0.0001	0.0008	0.0000	0.0000	0.05
90	0.0001	0.0008	0.0000	0.0000	0.05
120	0.0002	0.0016	0.0000	0.0000	0.05
150	0.0002	0.0016	0.0001	0.0004	0.05
180	0.0002	0.0016	0.0001	0.0004	0.05

**ตารางที่ ก.2** การทดลองที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล  
ศึกษาไฟฟ้าของเซลล์ 10 โวลท์

เวลา (นาท)	โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	0.00000	0.0000	0.00000	0.0000	0.05
30	0.00010	0.0008	0.00005	0.0002	0.05
60	0.00020	0.0016	0.00005	0.0002	0.05
90	0.00025	0.0020	0.00015	0.0006	0.05
120	0.00030	0.0024	0.00010	0.0004	0.05
150	0.00040	0.0032	0.00015	0.0006	0.05
180	0.00040	0.0032	0.00015	0.0006	0.05



ตารางที่ ก.3 การทดลองที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ 15 โวลท์

เวลา (นาทีก)	โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.05
30	0.00020	0.0016	0.0002	0.0008	0.05
60	0.00025	0.0020	0.0002	0.0008	0.05
90	0.00047	0.0038	0.0003	0.0012	0.05
120	0.00050	0.0040	0.0003	0.0012	0.05
150	0.00060	0.0048	0.0003	0.0012	0.05
180	0.00080	0.0064	0.0003	0.0012	0.05

1.2 การทดลองที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับเมมเบรนเป็น 7 มิลลิเมตร ทำการทดลองที่ อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟตเป็น 1 นอร์มัล

ตารางที่ ก.4 การทดลองที่ ศักย์ไฟฟ้า 10 โวลท์

เวลา (นาทีก)	โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลท์)
	(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	0.002	0.016	0.0005	0.002	2.00
15	0.006	0.048	0.0030	0.012	2.80
30	0.011	0.088	0.0090	0.036	4.80
45	0.016	0.128	0.0170	0.068	10.13

ตารางที่ ก.5 การทดลองที่ ศักย์ไฟฟ้า 15 โวลท์

เวลา (นาทีก)	โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลท์)
	(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	0.002	0.016	0.0005	0.002	2.90
15	0.008	0.064	0.0060	0.024	6.50
30	0.017	0.136	0.0160	0.064	14.00

- 1.3 การทดลองที่ปริมาตรสารละลายหมูนวนต่างๆ การทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 1.5 แอมแปร์ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรน 7 มิลลิเมตร ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ ก.6 การทดลองที่ สารละลายหมูนวน 3 ลิตร

เวลา (นาที)	โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
	(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)		
0	0.0010	0.0030	0.0010	0.0015	5.10	-
30	0.0060	0.0179	0.0010	0.0015	4.10	53.25
60	0.0130	0.0385	0.0105	0.0155	3.80	63.89
90	0.0220	0.0647	0.0185	0.0272	3.80	74.54
120	0.0330	0.0964	0.0280	0.0409	3.80	85.19
150	0.0420	0.1218	0.0370	0.0537	3.70	87.32
180	0.0500	0.1440	0.0450	0.0648	3.70	85.19

ตารางที่ ก.7 การทดลองที่ สารละลายหมูนวน 8 ลิตร

เวลา (นาที)	โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
	(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)		
0	0.002	0.0160	0.001	0.0040	5.10	-
30	0.004	0.0320	0.005	0.0200	4.80	57.18
60	0.007	0.0559	0.008	0.0319	4.40	71.29
90	0.012	0.0955	0.012	0.0478	4.30	94.82
120	0.015	0.1191	0.015	0.0596	4.20	92.21
150	0.018	0.1346	0.019	0.0684	4.20	90.57
180	0.021	0.1659	0.021	0.0830	4.20	89.40

1.4 การทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและเมมเบรน 7 มิลลิเมตร  
ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที

**ตารางที่ ก.8** การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 0.2 แอมแปร์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์  
0.05 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
			โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
			(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	2.35	30.2	0.0447	0.3577	0.0536	0.2144	-
60	2.34	32.6	0.0458	0.3665	0.0544	0.2176	90.31
120	2.35	34.3	0.0470	0.3756	0.0552	0.2208	92.19
180	2.36	35.2	0.0480	0.3840	0.0056	0.2290	90.31

**ตารางที่ ก.9** การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
			โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
			(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	2.60	29.9	0.1996	1.5971	0.0020	0.0080	-
30	2.73	30.4	0.2006	1.6045	0.0030	0.0120	67.63
60	2.72	30.7	0.2015	1.6118	0.0035	0.0140	78.90
90	2.74	31.0	0.2024	1.6192	0.0050	0.0200	78.90
120	2.82	31.1	0.2033	1.6266	0.0050	0.0200	78.90
150	2.9	31.2	0.2033	1.6266	0.0060	0.0240	63.12
180	2.88	31.3	0.2042	1.6339	0.0065	0.0260	65.75

ตารางที่ ก.10 การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 1.0 แอมแปร์ความเข้มข้นเริ่มต้นของ  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
			โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
			(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	2.60	30.5	0.1978	1.5824	0.0250	0.1000	-
30	2.68	30.9	0.1987	1.5896	0.0270	0.1080	38.59
60	2.75	31.2	0.2006	1.6048	0.0290	0.1160	60.04
90	2.87	31.4	0.2024	1.6192	0.0310	0.1240	65.75
120	2.97	31.5	0.2042	1.6336	0.0330	0.1320	68.61
150	3.01	31.6	0.2061	1.6488	0.0350	0.1400	71.18
180	3.09	31.6	0.2079	1.6632	0.0370	0.1480	72.19

ตารางที่ ก.11 การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 2.0 แอมแปร์ความเข้มข้นเริ่มต้นของ  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
			โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
			(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	3.10	29.4	0.1849	1.4792	0.0050	0.0200	-
30	3.39	30.3	0.1895	1.5160	0.0100	0.0400	98.63
60	3.46	30.8	0.1923	1.5384	0.0140	0.0560	79.33
90	3.51	31.3	0.1969	1.5752	0.0180	0.0720	85.76
120	3.55	31.6	0.2006	1.6048	0.0230	0.0920	84.16
150	3.59	31.8	0.2061	1.6488	0.0280	0.1120	90.91
180	3.62	31.9	0.2098	1.6784	0.0315	0.1260	88.98

ตารางที่ ก.12 การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 5.0 แอมแปร์ความเข้มข้นเริ่มต้นของ  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลท์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
			โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
			(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	4.41	31.4	0.1914	1.5312	0.0070	0.0280	-
30	4.54	32.4	0.2042	1.6336	0.0190	0.0760	109.78
60	4.55	32.9	0.2153	1.7224	0.0300	0.1200	102.49
90	4.67	33.1	0.2245	1.7960	0.0410	0.1640	94.63
120	4.73	33.2	0.2374	1.8992	0.0530	0.2120	98.63
150	4.71	33.2	0.2466	1.9728	0.0640	0.2560	94.68
180	4.7	33.3	0.2594	2.0752	0.0760	0.3040	97.20

\* ค่าผิดพลาดเนื่องจากการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ ก.13 การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 5.0 แอมแปร์ความเข้มข้นเริ่มต้นของ  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลท์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
			โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
			(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	7.60	32.0	0.0120	0.0960	0.0060	0.0240	-
30	6.12	32.4	0.0236	0.1888	0.0250	0.1000	99.49
60	5.71	32.5	0.0353	0.2824	0.0330	0.1320	99.92
90	5.44	32.7	0.0470	0.3756	0.0480	0.1920	99.92
120	5.31	32.9	0.0585	0.4680	0.0630	0.2520	99.70
150	5.22	33.1	0.0702	0.5616	0.0770	0.3080	99.83
180	5.16	33.4	0.0819	0.6554	0.0800	0.3200	99.96

ตารางที่ ก.14 การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 5.0 แอมแปร์ความเข้มข้นเริ่มต้นของ  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.02 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
			โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
			(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	7.00	31.5	0.0218	0.1742	0.0055	0.0218	-
30	5.57	31.7	0.0344	0.2754	0.0199	0.0794	98.69
60	5.32	31.9	0.0471	0.3767	0.0318	0.1271	98.69
90	5.19	32.1	0.0597	0.4779	0.0457	0.1827	98.69
120	5.11	32.3	0.0729	0.5833	0.0576	0.2303	99.67
150	5.04	32.5	0.0835	0.6683	0.0705	0.2819	96.32
180	4.99	32.7	0.0977	0.7817	0.0844	0.3375	98.69

ตารางที่ ก.15 การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 5.0 แอมแปร์ความเข้มข้นเริ่มต้นของ  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.03 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
			โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
			(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	5.44	31.4	0.0299	0.2390	0.0050	0.0199	-
30	5.23	31.6	0.0425	0.3402	0.0179	0.0715	98.69
60	5.07	31.7	0.0555	0.4437	0.0318	0.1271	99.74
90	5.03	32.0	0.0681	0.5449	0.0457	0.1827	99.37
120	4.99	32.1	0.0810	0.6477	0.0606	0.2422	99.58
150	4.96	32.2	0.0936	0.7489	0.0735	0.2939	99.39
180	4.95	32.4	0.1068	0.8541	0.0874	0.3494	99.92



ตารางที่ ก.16 การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 5.0 แอมแปร์ความเข้มข้นเริ่มต้นของ  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.04 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
			โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
			(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	5.30	30.0	0.0420	0.3362	0.0055	0.0218	-
30	5.01	30.5	0.0537	0.4293	0.0184	0.0735	99.87
60	4.92	30.7	0.0648	0.5185	0.0298	0.1191	97.70
90	4.83	31.0	0.0770	0.6157	0.0427	0.1708	99.87
120	4.83	31.2	0.0881	0.7048	0.0556	0.2224	98.79
150	4.78	31.3	0.1002	0.8020	0.0695	0.2780	99.87
180	4.79	31.5	0.1114	0.8911	0.0794	0.3177	99.15

ตารางที่ ก.17 การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 5.0 แอมแปร์ความเข้มข้นเริ่มต้นของ  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
			โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
			(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	5.11	32.0	0.0487	0.3894	0.0050	0.0198	-
30	5.08	32.4	0.0603	0.4820	0.0199	0.0794	99.32
60	4.98	32.7	0.0719	0.5752	0.0318	0.1271	99.92
90	4.93	33.0	0.0835	0.6680	0.0447	0.1787	99.49
120	4.90	33.1	0.0951	0.7608	0.0576	0.2303	99.49
150	4.84	33.3	0.1067	0.8536	0.0705	0.2820	99.49
180	4.80	33.4	0.1184	0.9468	0.0864	0.3455	99.92

**ตารางที่ ก.18** การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 5.0 แอมแปร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 นอร์มัล

เวลา (นาท)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลท์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
			โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
			(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	5.10	32.1	0.4300	3.4400	0.0050	0.0200	-
30	4.65	32.6	0.4400	3.5200	0.0170	0.0680	85.76
60	4.79	32.8	0.4520	3.6160	0.0275	0.1100	94.34
90	4.86	33.1	0.4640	3.7120	0.0390	0.1560	97.20
120	4.80	33.3	0.4760	3.8080	0.0495	0.1980	98.63
150	4.74	33.6	0.4880	3.9040	0.0610	0.2440	99.49
180	4.77	33.7	0.4980	3.9840	0.0730	0.2920	97.20

1.5 การทดลองเติมออกซิเจนที่กระแสไฟฟ้าต่างๆ อัตราการป้อนสารละลายเข้าเซลล์ไฟฟ้า  
เคมี 2 ลิตรต่อนาท

**ตารางที่ ก.19** การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1  
นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล

เวลา (นาท)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลท์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ออกซิเจนที่ละลาย ในสารละลาย (%)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
				โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
				(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	4.76	31.4	62.0	0.1886	1.5088	0.0070	0.0280	-
30	5.32	32.3	50.0	0.2006	1.6045	0.0180	0.0720	102.57
60	4.55	32.5	49.0	0.2098	1.6784	0.0270	0.1080	90.91
90	4.56	32.7	48.0	0.2190	1.7520	0.0370	0.1480	86.91
120	4.59	32.8	49.0	0.2318	1.8544	0.0480	0.1920	92.63
150	4.62	33.0	47.0	0.2392	1.9136	0.0590	0.2360	86.79
180	4.64	33.1	48.0	0.2521	2.0168	0.0710	0.2840	90.77

\* ค่าผิดพลาดเนื่องจากการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์

**ตารางที่ ก.20** การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลท์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ออกซิเจนที่ละลาย ในสารละลาย (%)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
				โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
				(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	3.19	31.6	52.0	0.1840	1.4720	0.0020	0.0080	-
30	3.35	32.2	56.0	0.1878	1.5024	0.0060	0.0240	81.48
60	3.39	32.4	55.0	0.1932	1.5456	0.0110	0.0440	98.63
90	3.43	32.5	53.0	0.1987	1.5896	0.0150	0.0600	105.06
120	3.45	32.6	52.0	0.2042	1.6336	0.0200	0.0800	108.28
150	3.46	32.6	52.0	0.2079	1.6632	0.0250	0.1000	102.49
180	3.49	32.3	49.0	0.2116	1.6928	0.0290	0.1160	98.63

\* ค่าผิดพลาดเนื่องจากการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์

**ตารางที่ ก.21** การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลท์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ออกซิเจนที่ละลาย ในสารละลาย (%)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
				โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
				(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	2.73	30.7	60.0	0.2024	1.6192	0.0050	0.0200	-
30	2.84	31.2	53.0	0.2042	1.6336	0.0070	0.0280	77.19
60	2.89	31.3	54.0	0.2061	1.6488	0.0090	0.0360	79.33
90	3.03	31.4	54.0	0.2079	1.6632	0.0105	0.0420	78.62
120	3.04	31.5	54.0	0.2098	1.6784	0.0120	0.0480	79.33
150	3.01	31.7	54.0	0.2116	1.6928	0.0150	0.0600	78.90
180	3.02	31.9	54.0	0.2134	1.7072	0.0170	0.0680	78.62

ตารางที่ ก.22 การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอร์มัล

เวลา (นาทีก)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ออกซิเจนที่ละลาย ในสารละลาย (%)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
				โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
				(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	2.54	30.7	50.0	0.2015	1.6118	0.0060	0.0240	-
30	2.65	31.5	59.0	0.2024	1.6192	0.0065	0.0260	78.90
60	2.70	31.7	57.0	0.2024	1.6192	0.0070	0.0280	39.45
90	2.73	32.1	63.0	0.2024	1.6192	0.0075	0.0300	26.30
120	2.75	32.3	64.0	0.2024	1.6192	0.0080	0.0320	19.73
150	2.8	32.3	58.0	0.2033	1.6266	0.0085	0.0340	31.56
180	2.85	32.3	60.0	0.2047	1.6376	0.0090	0.0360	46.03

1.6 การทดลองเติมออกซิเจนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ อัตราการ  
ป้อนสารละลายเข้าเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ตารางที่ ก.23 การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 นอร์มัล

เวลา (นาทีก)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ออกซิเจนที่ละลาย ในสารละลาย (%)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
				โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
				(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	4.27	30.6	50.0	0.4048	3.2384	0.0050	0.0200	-
30	4.49	31.3	49.0	0.4140	3.3120	0.0185	0.0740	78.90
60	4.56	31.8	48.0	0.4250	3.4000	0.0030	0.0120	86.62
90	4.82	32.1	47.0	0.4361	3.4888	0.0410	0.1640	89.48
120	4.69	32.4	45.0	0.4453	3.5624	0.0530	0.2120	86.84
150	4.53	32.6	45.0	0.4526	3.6208	0.0650	0.2600	81.99
180	4.51	32.8	50.0	0.4655	3.7240	0.0750	0.3000	86.77

ตารางที่ ก.24 การทดลองที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ออกซิเจนที่ละลาย ในสารละลาย (%)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
				โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
				(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	5.12	31.6	52.0	0.0511	0.4088	0.0050	0.0200	-
30	5.09	32.2	56.0	0.0616	0.4928	0.0160	0.0640	90.05
60	4.99	32.4	55.0	0.0729	0.5832	0.0270	0.1080	93.48
90	4.96	32.5	53.0	0.0826	0.6608	0.0380	0.1520	90.05
120	4.90	32.6	52.0	0.0948	0.7584	0.0490	0.1960	93.70
150	4.84	32.6	52.0	0.1093	0.8744	0.0600	0.2400	99.83
180	4.80	32.3	49.0	0.1206	0.9648	0.0730	0.2920	99.34

1.7 การทดลองเติมออกซิเจนที่อัตราการป้อนต่างๆ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์

ตารางที่ ก.25 อัตราการป้อนสารละลายเข้าเซลล์เคมีไฟฟ้า 1 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ออกซิเจนที่ละลาย ในสารละลาย (%)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
				โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
				(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	5.17	33.2	59.0	0.0512	0.4094	0.0051	0.0204	-
30	5.07	35.1	33.0	0.0622	0.4976	0.0162	0.0648	94.60
60	5.01	36.2	32.0	0.0711	0.5690	0.0273	0.1092	85.55
90	4.98	37.0	30.0	0.0853	0.6826	0.0384	0.1536	97.63
120	4.91	36.9	29.0	0.0974	0.7789	0.0495	0.1980	99.04
150	4.84	37.9	27.0	0.1093	0.8743	0.0606	0.2424	99.69
180	4.80	38.3	28.0	0.1200	0.9601	0.0737	0.2948	98.40

ตารางที่ ก. 26 อัตราการป้อนสารละลายเข้าเซลล์เคมีไฟฟ้า 0.5 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ออกซิเจนที่ละลาย ในสารละลาย (%)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
				โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
				(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	5.14	32.9	66.0	0.0547	0.4374	0.0005	0.0020	-
30	5.07	35.2	12.0	0.0643	0.5146	0.0112	0.0446	82.76
60	5.00	36.1	14.0	0.0780	0.6240	0.0230	0.0918	100.00
90	4.95	37.0	10.0	0.0858	0.6862	0.0367	0.1469	88.89
120	4.91	37.6	12.0	0.1005	0.8041	0.0477	0.1906	98.28
150	4.85	38.1	13.0	0.1126	0.9006	0.0606	0.2422	99.31
180	4.81	38.2	14.0	0.1238	0.9907	0.0715	0.2859	98.85

1.8 การทดลองเติมออกซิเจนแบบปรับปรุงเซลล์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมทิศทางการไหลของสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมซัลเฟต 1 นอร์มัล ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์

ตารางที่ ก.27 อัตราการป้อนสารละลายเข้าเซลล์เคมีไฟฟ้า 2 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ออกซิเจนที่ละลาย ในสารละลาย (%)	ความเข้มข้น/ ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
				โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
				(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	5.16	33.3	47.0	0.0426	0.3410	0.0010	0.0040	-
30	5.10	34.7	38.0	0.0539	0.4310	0.0099	0.0397	96.55
60	5.00	35.6	40.0	0.0635	0.5082	0.0199	0.0794	89.66
90	4.97	36.2	38.0	0.0697	0.5575	0.0328	0.1310	77.39
120	4.90	34.3	37.0	0.0836	0.6690	0.0407	0.1628	87.93
150	4.85	37.0	34.0	0.0949	0.7591	0.0526	0.2105	89.66
180	4.83	37.3	34.0	0.1102	0.8813	0.0635	0.2541	96.55



ตารางที่ ก.28 อัตราการปล่อยสารละลายเข้าเซลล์เคมีไฟฟ้า 0.5 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ออกซิเจนที่ละลาย ในสารละลาย (%)	ความเข้มข้น ปริมาณ				ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)
				โซเดียมไฮดรอกไซด์		กรดซัลฟูริก		
				(นอร์มัล)	(โมล)	(นอร์มัล)	(โมล)	
0	5.17	32.3	50.0	0.0516	0.4130	0.0050	0.0200	-
30	5.09	33.6	40.0	0.0629	0.5030	0.0156	0.0625	96.54
60	5.10	34.5	33.0	0.0735	0.5882	0.0261	0.1045	93.94
90	4.99	35.3	28.0	0.0827	0.6615	0.0368	0.1470	88.83
120	4.92	36.4	22.0	0.0936	0.7490	0.0477	0.1908	90.07
150	4.84	37.0	21.0	0.1059	0.8471	0.0586	0.2345	93.08
180	4.84	37.5	18.0	0.1212	0.9693	0.0695	0.2782	99.41

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมซัลเฟต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่  
ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น (นอร์มัล)	ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaOH
0.0005	0.332	0.237
0.0010	0.469	0.288
0.0020	0.727	0.431
0.0030	0.981	0.602
0.0040	1.236	0.800
0.0050	1.484	0.940
0.0060	1.736	1.161
0.0070	1.980	1.310
0.0080	2.230	1.607
0.0090	2.450	1.832
0.0100	2.670	2.100
0.0200	4.830	4.250
0.0300	6.820	6.190
0.0500	10.530	10.390
0.1000	18.900	20.500

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

วรรณิ์ ตันกิตติยานนท์ เกิดที่จังหวัดอุดรธานี วันที่ 13 สิงหาคม พ.ศ. 2518 จบการศึกษาระดับปริญญาตรีที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี เมื่อปี พ.ศ. 2540 ขณะนี้รับราชการเป็นอาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย