

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการแยกสลายด้วยไฟฟ้าที่ใช้ไอออนเอกเซนจ์  
เมมเบรนในอุตสาหกรรมคลอไรด์-อัลคาไล



นายธนเทพ วาสนาเพียรพงศ์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

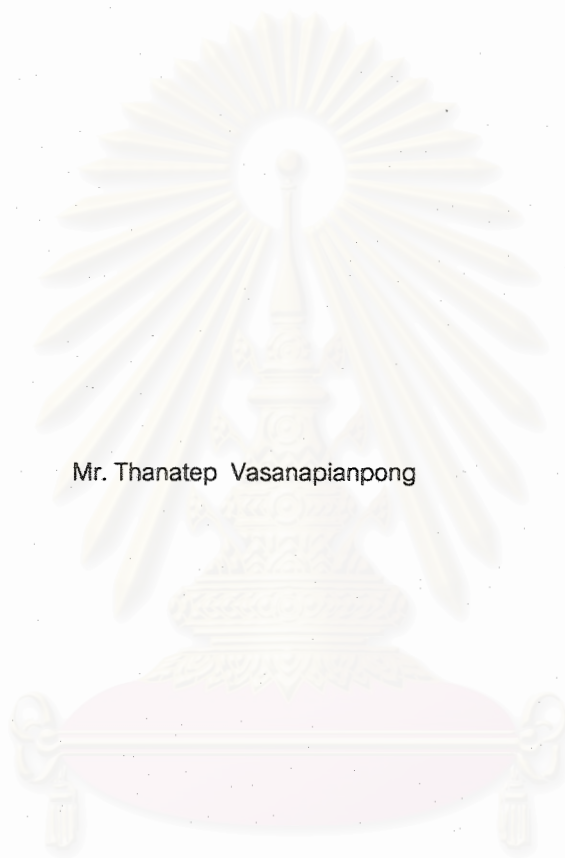
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1532-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MATHEMATICAL MODELING OF AN ELECTROLYSIS PROCESS USING ION EXCHANGE MEMBRANE IN  
THE CHLOR-ALKALI INDUSTRY

Mr. Thanatep Vasanapianpong



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 974-03-1532-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการแยกสลายด้วยไฟฟ้า  
 ที่ใช้ไอออนเอกเซนจ์เมมเบรนในอุตสาหกรรมคลอร์-อัลคาไล

โดย                            นายธนเทพ วาสนาเพียรพงศ์

สาขาวิชา                    วิศวกรรมเคมี


อาจารย์ที่ปรึกษา            ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสนะบำรุงรัตน์


ที่ปรึกษาร่วม                นายภานุ พรรณรักษ์

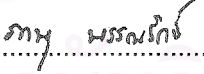
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน  
 หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
 ..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
 (ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
 ..... ประธานกรรมการ  
 (ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะसार ประเสริฐธรรม)

  
 ..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสนะบำรุงรัตน์)

  
 ..... ที่ปรึกษาร่วม  
 (นายภานุ พรรณรักษ์)

  
 ..... กรรมการ  
 (อาจารย์ ดร.วิทย์ สุนทรนันท์)

ฉันทพ วาสนาเพียรพงศ์: การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการแยกสลายด้วยไฟฟ้าที่ใช้  
ไอออนเอกเซนจ์เมมเบรนในอุตสาหกรรมคลอไรด์-อัลคาไล (MATHEMATICAL MODELING OF AN  
ELECTROLYSIS PROCESS USING ION EXCHANGE MEMBRANE IN THE CHLOR-ALKALI  
INDUSTRY) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์, ที่ปรึกษาร่วม: นายภาณุ พรรณรักษ์,  
60 หน้า. ISBN 974-03-1532-1.

กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสโดยใช้เมมเบรน แยกโซเดียมคลอไรด์ให้เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และแก๊ส  
คลอรีน เซลล์ที่ใช้เป็น AZEC อิเล็กโทรไลเซอร์ จากบริษัท อาซาฮิกากาส จำกัด ประเทศญี่ปุ่น เมมเบรนที่ใช้เป็นแบบพอลิ  
เมอร์ผสม ซึ่งมีคุณสมบัติในการถ่ายเทโซเดียมไอออน จากการศึกษาหาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแสจาก  
กระบวนการผลิต โดยการเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในด้านแอนโนด และความ  
เข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในด้านคาโทด ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทผ่าน  
เมมเบรนของโซเดียมไอออน กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ได้สภาวะที่  
ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอนโนด มากกว่า 220 กรัมต่อลิตร และอุณหภูมิของการอิเล็กโทร  
ไลซิสคงที่ ที่ 90 องศาเซลเซียส พบว่าเมมเบรนมีการเลือกจำเพาะต่อโซเดียมไอออน ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูง  
มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การวิเคราะห์ผลจากอิเล็กโทรออสโมซิสที่ทำให้เกิดการถ่ายเทของน้ำผ่านเมมเบรน  
จากด้านแอนโนดไปด้านคาโทด ทราบว่าถ่ายเทของน้ำผ่านเมมเบรนจะเป็น 3.5 โมล ต่อโซเดียมไอออน ซึ่งได้จากการทดลอง  
การหาอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน

การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องภายใต้สภาวะทรงตัวที่อุณหภูมิคงที่ ที่ 90  
องศาเซลเซียส ได้มาจากการทำสมดุลมวลของระบบ ข้อมูลประสิทธิภาพกระแสเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์  
ขาออกด้านคาโทดเปลี่ยนไป และข้อมูลการถ่ายเทของน้ำผ่านเมมเบรน ที่ได้จากข้อมูลการผลิต สมการทางคณิตศาสตร์  
ได้ทำนายผลด้านขาออก ได้ใกล้เคียงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลจากการเดินการผลิตจริง โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน  
3.7 เปอร์เซ็นต์

การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มาศึกษาการอิเล็กโทรไลซิส ที่ต่อแบบอนุกรม พบว่าช่วงที่ทำการศึกษานั้นไม่  
สามารถช่วยลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ เมื่อเทียบกับการต่อแบบขั้นตอนเดียว

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิติ.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่อที่ปรึกษาร่วม.....

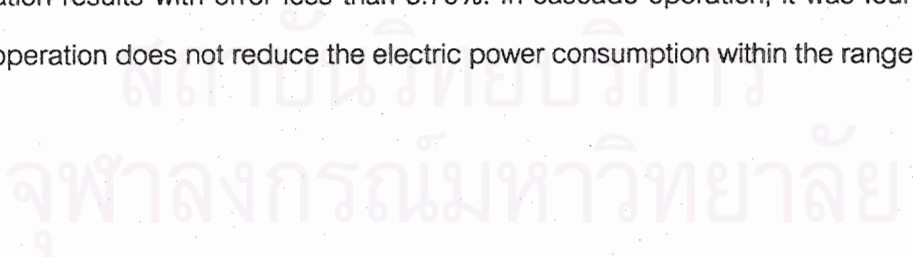


## 4171432321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: MEMBRANE / CHLOR-ALKALI INDUSTRY / ELECTROLYSIS / SODIUM CHLORIDE / SODIUM HYDROXIDE

THANATEP VASANAPIANPONG: MATHEMATICAL MODELING OF AN ELECTROLYSIS PROCESS USING ION EXCHANGE MEMBRANE IN THE CHLOR-ALKALI INDUSTRY THESIS ADVISOR: ASSISTANT PROFESSOR SUTTICHA ASSABUMRUNGRAT, Ph.D., THESIS COADVISOR: PANU PANARAK, 60 pp. ISBN 974-03-1532-1.

A two-compartment membrane electrolysis cell is used to convert sodium chloride into sodium hydroxide and chlorine gas. The cells are equipped with AZEC membranes from Asahi Glass Co., Ltd. (Japan). Due to the transfer of sodium ion through the membrane, This transfer decreases current efficiency. The study of current efficiency varies either sodium hydroxide concentration or sodium chloride at each temperature. Correlation of sodium transport can relate with sodium hydroxide concentration under sodium chloride concentration above 220-g/lit and constant temperature at 90 °C. Water transfer through membrane is due to electroosmosis. It appears that sodium transport ion migrates through the membrane with about 3.5 moles of water per mole of sodium ion. Using material balance, current efficiency data and water transfer data obtained in process develops modeling of a continuous feed process in the steady state mode at 90°C. The model predictions agree well with operation results with error less than 3.70%. In cascade operation, it was found that the cascade operation does not reduce the electric power consumption within the range of study.



Department of Chemical Engineering  
Field of study Chemical Engineering  
Academic year 2001

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

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ ผู้ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ และที่สำคัญที่สุดให้โอกาส แก่ผู้เขียนในการทำวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณ ที่ปรึกษาร่วม คุณภาณุ พรรณรักษ์ ที่ได้ให้ข้อมูลต่างๆ เพื่อที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความรู้ แนวความคิด ตลอดจนความเป็นวิศวกร ให้กับผู้เขียนได้ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณพ่อ แม่ พี่ น้อง และเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจ ให้ความเห็นอกเห็นใจตลอดการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมเคมีนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
ตัวย่อ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำและมูลเหตุจูงใจในการดำเนินงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	7
2.2 การอิเล็กทรอนิกส์ โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเมมเบรน.....	9
2.3 pH และค่าการนำกระแสไฟฟ้าของผนังเซลล์.....	15
2.4 สมการดุลมวลแบบต่อเนื่องในสภาวะทรงตัว.....	19
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 การทดลอง.....	21
3.1 การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับตัวแปรอื่นๆ.....	21
3.1.1 การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	22

## สารบัญ

๗

หน้า

3.1.2 การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับอุณหภูมิของ กระบวน การอิเล็กทรอนิกส์.....	23
3.2 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าของการอิเล็กทรอนิกส์ กับค่าตัวแปรอื่นๆ.	24
3.2.1 การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ค่าศักย์ไฟฟ้า กับความเข้มข้นของสารละลายที่ ความ เข้มข้นต่างๆ.....	24
3.2.3 การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับอุณหภูมิของ กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์.....	25
3.3 การทดลองศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรด้านแอโนด.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	27
4.1 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับค่าประสิทธิภาพกระแส.....	27
4.1.1 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแสกับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ ขาออกด้านแอโนด.....	27
4.1.2 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโซเดียม ไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด.....	29
4.1.3 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแสกับอุณหภูมิ.....	31
4.2 ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์.....	33
4.2.1 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ กับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ขาออก ด้านแอโนด.....	33
4.2.2 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ขาออกด้านคาโธด.....	35
4.2.3 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ กับอุณหภูมิของการอิเล็กทรอนิกส์.....	36
4.3 การศึกษาการถ่ายเทของน้ำโดยมวล ผ่านเมมเบรน.....	38
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลากับความความหนาแน่นกระแส.	38
4.3.2 การศึกษาค่าถ่ายเทของน้ำ ผ่านเมมเบรน (Water transport).....	41
4.3 การทำนายกระบวนการผลิตจากแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์.....	42
4.4 การศึกษากระบวนการในแบบ Cascade จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	46

## สารบัญ

ณ

หน้า

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผล.....	48
ภาคผนวก ก ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลาย.....	50
ภาคผนวก ข แบบจำลองในการคำนวณ.....	54
ภาคผนวก ค ข้อมูลจากการทดลอง.....	55
รายการอ้างอิง.....	58
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	60



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1	อุตสาหกรรม คลอริ-อัลคาไล ชนิดของเซลล์ (A) เซลล์ปรอท (B) เซลล์ไดอะแฟรม (C) เมมเบรนเซลล์.....	4
รูปที่ 2	การเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงภายใน อิเล็กโตรไลเซอร์ แบบ ไอออนเอกเซนจ์เมมเบรน.....	10
รูปที่ 3	รูปร่างนอก ของอิเล็กโตรไลเซอร์ แบบแคตไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน.....	12
รูปที่ 4	ลักษณะการไหลของของเหลวและก๊าซในเซลล์.....	14
รูปที่ 5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำกระแสผ่านเมมเบรน กับ pH.....	15
รูปที่ 6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกระแส กับความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอนอด.....	28
รูปที่ 7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกระแส กับความเข้มข้นของโซเดียม ไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโทด.....	30
รูปที่ 8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกระแส กับอุณหภูมิของ อิเล็กโตรไลเซอร์.....	32
รูปที่ 9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า กับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ขาออกด้านแอนอด.....	34
รูปที่ 10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮ ดรอกไซด์ขาออกด้านคาโทด.....	36
รูปที่ 11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า กับอุณหภูมิของ อิเล็กโตรไลซิส.....	37
รูปที่ 12	รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อเวลา กับความหนาแน่นกระแส.....	39
รูปที่ 13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น กับค่าความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส.....	50
รูปที่ 14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น กับค่าความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส.....	52
รูปที่ 15	แสดงการคำนวณสมการดุลมวลของอิเล็กโตรไลเซอร์.....	53



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงค่าความสัมพันธ์ของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ กับประสิทธิภาพกระแส.....	27
ตารางที่ 2 แสดงค่าความสัมพันธ์ของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับ ประสิทธิภาพกระแส.....	29
ตารางที่ 3 แสดงค่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ กับประสิทธิภาพกระแส.....	32
ตารางที่ 4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ขาออกด้านแอนโนด.....	34
ตารางที่ 5 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ขาออกด้านคาโทด.....	35
ตารางที่ 6 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละอุณหภูมิของ อิเล็กโตรไลซิส.....	37
ตารางที่ 7 แสดงค่าความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรด้านแอนโนด ต่อเวลา กับความหนาแน่นของกระแส.....	38
ตารางที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทโซเดียมไอออน และน้ำผ่านเมมเบรน ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	41
ตารางที่ 9 แสดงค่าจากการทำนาย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการปฏิบัติงานโดย ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแส.....	43
ตารางที่ 10 แสดงค่าจากการทำนาย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการปฏิบัติงานโดย ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลขาเข้าด้านแอนโนด.....	44
ตารางที่ 11 แสดงค่าจากการทำนาย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการปฏิบัติงานโดย ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ด้านแอนโนด.....	45
ตารางที่ 12 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยทำการเปรียบเทียบ เทียบระหว่างการต่อ แบบอนุกรม กับการต่อแบบขั้วตอนเดียว.....	46
ตารางที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับความเข้มข้น ที่อุณหภูมิ 25 และ 90 องศาเซลเซียส.....	50
ตารางที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ กับ ความเข้มข้น ที่อุณหภูมิ 25 และ 90 องศาเซลเซียส.....	52
ตารางที่ 15 แสดงผลการทดลองที่ 3.11.....	55
ตารางที่ 16 แสดงผลการทดลองที่ 3.12.....	56
ตารางที่ 17 แสดงผลการทดลองที่ 3.1.2 และการทดลองที่ 3.2.2.....	57
ตารางที่ 18 แสดงผลการทดลองที่ 3.3.....	57

[NaCl]	ความเข้มข้นของสารละลายเกลือ (g/l)
[NaOH]	ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (% weight by volume)
C	ความเข้มข้นของสาร (mol/l)
CE	ประสิทธิภาพกระแส (Current efficiency; %)
F	ค่าคงที่ฟาราเดย์ (26.8 A h mol <sup>-1</sup> or 96,500 A s mol <sup>-1</sup> )
J	ความหนาแน่นกระแส (A m <sup>-2</sup> )
M	ค่ามวลโมเลกุลของสาร (g/mol)
W	อัตราการไหลของน้ำจำเพาะ (kg h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )
W <sub>m</sub>	อัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน (kg h <sup>-1</sup> )
Q	อัตราการไหลโดยปริมาตร (l h <sup>-1</sup> )
s	พื้นที่ของเมมเบรน และขั้วไฟฟ้า (m <sup>2</sup> )
t	ค่าถ่ายโอนไอออน (Transport number)
V	ปริมาตร (l)
V <sub>os</sub>	อัตราการไหลของสารละลายภายใต้อิเล็กโตรออสโมซิส (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
α	ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรด้านแอโนไลต์ เทียบกับความหนาแน่นกระแส (l A m <sup>2</sup> h <sup>-1</sup> )
ε	ค่าเพอร์มิตติวิตี (Permittivity: F m <sup>-1</sup> )
ξ	ค่าอิเล็กโตรไคเนติก โฟเทนเชียล (Electrokinetic potential: V)
κ	ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (Electroconductivity: S m <sup>-1</sup> )
θ	เวลา (h)
ρ	ความหนาแน่น (kg l <sup>-1</sup> )
η	ค่าความหนืดของสารละลาย (kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )
a	ด้านแอโนไลต์
c	ด้านแคโทไลต์
in	ขาเข้า
out	ขาออก
m	เมมเบรน

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำและมูลเหตุจูงใจในการดำเนินงานวิจัย

ปัญหาในวงการอุตสาหกรรมไทยขาดแคลนเคมีภัณฑ์พื้นฐาน (Basic chemicals) ที่จำเป็นในการผลิตอุตสาหกรรมขั้นปลาย (Downstream products) เป็นเหตุในต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เป็นมูลค่าปีละหลายพันล้านบาท และเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ ส่งผลให้ประเทศไทยต้องเสียดุลการค้าต่อต่างประเทศเสมอมา จากการสำรวจพบว่าประเทศไทยมีแหล่งวัตถุดิบมากเพียงพอสำหรับการผลิตเคมีภัณฑ์ต่างๆ จึงได้มีการส่งเสริมการลงทุนให้ประกอบอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์พื้นฐาน และส่งเสริมให้คนไทยได้ใช้วัตถุดิบที่อยู่ในประเทศอย่างมีประสิทธิภาพ

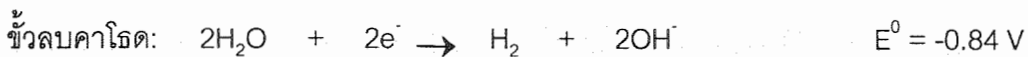
หนึ่งในอุตสาหกรรมเคมีพื้นฐาน นั่นคืออุตสาหกรรมทางด้านเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Industry) อุตสาหกรรมด้านเคมีไฟฟ้าที่ใหญ่ที่สุดในขณะนี้ก็คือ อุตสาหกรรมคลอไรด์-อัลคาไล (Chlor-alkali industry) [1-7] ซึ่งเป็นการแยกเกลือโซเดียมคลอไรด์ด้วยไฟฟ้า ให้เป็น คลอรีน และโซเดียมไฮดรอกไซด์ คลอรีนที่ได้จะใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และใช้เป็นสารฟอกขาวในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ ยังมีคุณสมบัติเป็นสารที่มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้คลอรีนในด้านอื่นๆ อีก โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารสำคัญในกระบวนการทำเหมืองแร่ กระดาษ เส้นใย และแก้ว

อุตสาหกรรมคลอไรด์-อัลคาไล นี้จะเริ่มต้นจากการนำ โซเดียมคลอไรด์ ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ทั้งทางกายภาพ และทางเคมีมาผ่านเครื่องอิเล็กโทรไลเซอร์แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 35% แก๊สคลอรีน และแก๊สไฮโดรเจน ดังสมการ ซึ่งเราจะนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปผลิตเป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูง 98% กรดไฮโดรคลอริก 35% และโซเดียมไฮโปคลอไรด์ หรือสารฟอกขาว ต่อไป



ปฏิกิริยา ที่ขั้ว คือ

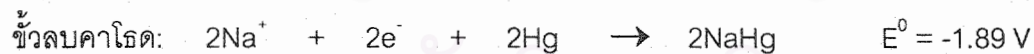




เซลล์ที่ใช้ในการผลิตนั้นมียูด้วยกัน 3 ชนิดคือ เซลล์ที่ใช้ปรอท เซลล์ที่ใช้ไดอะแฟรม และ เมมเบรนเซลล์ (แสดงในรูปที่ 1) ภาวะการกัดกร่อนของตัวคลอรีน และการออกซิเดชันของขั้วไฟฟ้า ทำให้ต้องใช้ ขั้วไฟฟ้าขั้วบวก (แอโนด) เป็นขั้วคาร์บอน หรือแกรไฟต์ ซึ่งขั้วดังกล่าวจะทำให้เกิด ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน 0.5 โวลต์ แก้ปัญหาได้โดยเคลือบด้วยขั้วไฟฟ้าด้วยไทเทเนียม กับ รูทีเนียมออกไซด์ หรือ ออกไซด์ของโลหะทรานซิชันชนิดอื่น เช่น โคบอลท์ออกไซด์ ขั้วที่ได้จะทนต่อการกัดกร่อน และมี ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินลดลงเหลืออยู่ที่ 5-40 มิลลิโวลต์ และมีประโยชน์อื่นๆ อีก คือทำให้การเกิด ปฏิกิริยาข้างเคียงลดต่ำลงมาก

กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสที่ทำการแยกโซเดียมคลอไรด์ หรือเกลือแองคโดยใช้เทคโนโลยีของ เครื่องอิเล็กโทรไลเซอร์ มีหลายแบบดังต่อไปนี้

1. แบบกระบวนการผลิตที่ใช้เซลล์ที่เป็นปรอท เป็นกรรมวิธีการผลิตโดยใช้ปรอทหมุนเวียน อยู่ในเซลล์เป็นขั้วลบด้านคาโธด และใช้แผ่นโลหะเป็นขั้วบวกด้านแอโนด โดยมีกระบวนการผลิตดังนี้คือ ใช้ปรอทเป็นขั้วลบด้านคาโธด และใช้อ่างเหล็กยาว บุด้วยยางเป็นเซลล์ และทำให้อะมาลแกม (NaHg: Sodium Amalgam) ไหลลงสู่ถังแยกอะมาลแกม (Amalgam Decomposer) ซึ่งจะใช้น้ำเป็นตัวแยก โซเดียมไฮดรอกไซด์ในโซเดียมคลอไรด์จะถูกรีดิวซ์ที่ขั้วลบด้านคาโธด ให้เป็นโซเดียม และผสมกับปรอทกลายเป็นอะมาลแกม ในถังแยกอะมาลแกม จะบรรจุเม็ดแกรไฟต์ เพื่อใช้เพิ่มพื้นที่ผิวระหว่างอะมาลแกมกับน้ำ โดยปฏิกิริยา ที่ขั้วลบด้านคาโธด เป็นดังนี้

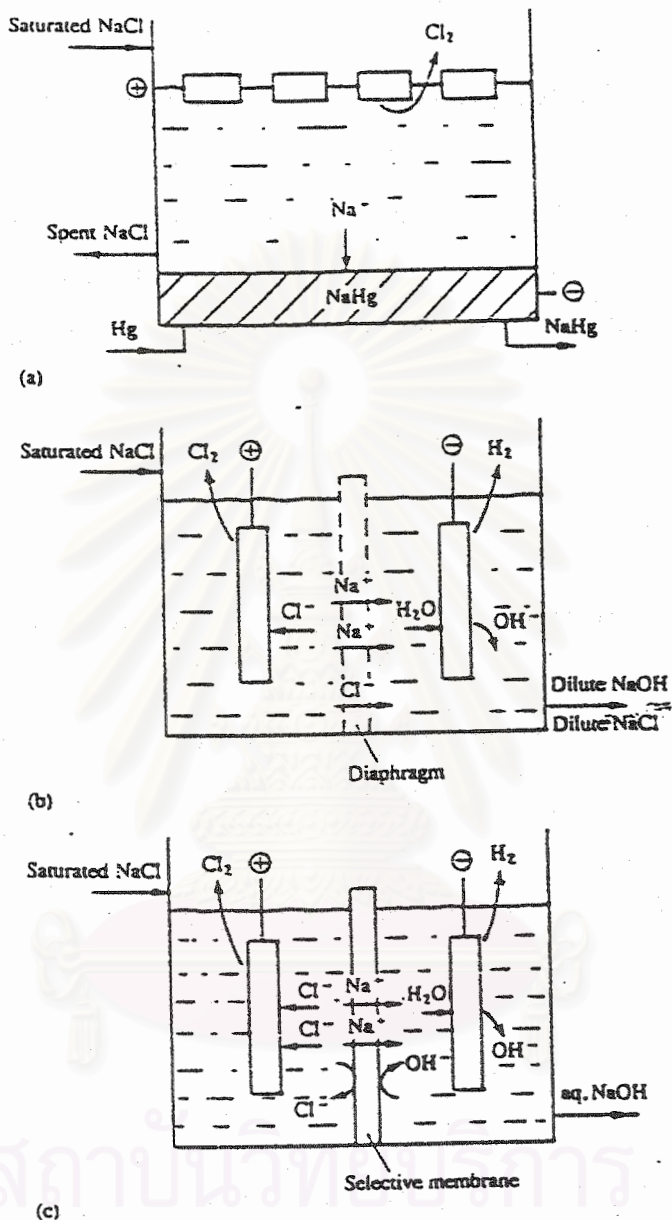


เมื่ออะมาลแกมไหลไปรวมกับน้ำ ในถังแยกแล้วจะได้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน การควบคุมปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปก็เพื่อควบคุมการผลิตให้ได้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 50% ส่วนที่ถูกแยกเอาโซเดียมออกแล้วจะไหลลงสู่ส่วนล่างสุดของถังแยกแล้วใช้ปั๊ม ปั๊มออกไปสู่ด้านหัวอิเล็กโทรไลเซอร์ หมุนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ผลผลิตที่ได้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 50% แก๊สคลอรีน และแก๊สไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีผลการผลิตที่ดี แต่มีปัญหาที่ปรอทเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูง



2. แบบกระบวนการผลิตที่ใช้เซลล์ที่เป็นไดอะแฟรม ในระบบนี้ขั้วลบด้านคาโธด เป็นเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กไร้สนิมที่ทำเป็นตะแกรงให้น้ำเกลือไหลผ่านโดยที่มีแผ่นใยหินปิดหุ้มตะแกรงนี้ไว้ น้ำเกลือที่จะไหลเข้าทางขั้วบวกด้านแอโนด แล้วซึมผ่านแผ่นไดอะแฟรมไปหาขั้วลบ (คาโธด) โซเดียมจะทำปฏิกิริยากับ ไฮดรอกซีไอออน ที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ (คาโธด) กลายเป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์ แผ่นไดอะแฟรมจะแยก แก๊สคลอรีน กับแก๊สไฮโดรเจนออกจากกัน โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นอยู่ที่ 10% ต้องนำไประเหยน้ำและแยกเกลือออกจึงจะได้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ติดมากับโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่าแบบอื่น

3. แบบกระบวนการผลิตที่ใช้ไอออนเอ็กซ์เชนจ์เมมเบรน กระบวนการผลิตนี้จะเหมือนกับกระบวนการผลิตที่ใช้ไดอะแฟรม ต่างกันที่ตัวเมมเบรนที่มีความจำเพาะเจาะจง ซึ่งจะเลือกผ่านไอออนที่ต้องการเท่านั้น เป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัยกว่า 2 แบบแรกมาก โดยสามารถผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 35% มากกว่าที่ได้จาก ไดอะแฟรมเซลล์ เมมเบรนที่ใช้เป็นชนิด Nafion<sup>®</sup> (tetrafluoroethylene copolymer) หรือชนิด Flemion<sup>®</sup> และวัสดุอื่น ที่คล้ายกับ เมมเบรน 2 ชั้น ซึ่งเพิ่มความจำเพาะเจาะจง และป้องกันการแพร่ของไฮดรอกไซด์ไอออนในกระบวนการผลิตดังกล่าว ใช้ ขั้วบวกด้านแอโนด ที่ทำจาก ไทเทเนียมที่เคลือบด้วย รูทีเนียมออกไซด์ และขั้วลบ (คาโธด) เป็นเหล็กคาร์บอนเคลือบด้วยนิกเกิล น้ำเกลือก่อนที่จะเข้าสู่อิเล็กโทรไลเซอร์ จะมีอุณหภูมิช่วง 75-90 องศาเซลเซียส ทางด้านล่างของขั้วบวกด้านแอโนด จะถูกแยกด้วยไฟฟ้ากระแสตรง แยกตัวเป็นโซเดียมไอออน และคลอไรด์ไอออน โดยคลอไรด์ไอออน จะวิ่งเข้าสู่ขั้วบวกด้านแอโนด ถ่ายโอนอิเล็กตรอนออกไปกลายเป็นแก๊สคลอรีน และโซเดียมไอออน จะวิ่งผ่านเมมเบรนไปยังฝั่งทางด้านคาโธดจะนำน้ำเข้าทางด้านล่าง น้ำจะแยกตัวเป็น ไฮโดรเจนไอออน กับไฮดรอกไซด์ไอออน โดยที่ไฮโดรเจนไอออนวิ่งเข้าหาขั้วบวกด้านคาโธด กลายเป็น แก๊สไฮโดรเจน ไฮดรอกไซด์จะเข้าร่วมกับโซเดียมไอออนที่ผ่านเมมเบรนมาเป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีความเข้มข้นประมาณ 35% ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เป็น -2.94 โวลท์ (ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยารวม -2.20 โวลต์) พลังงานที่ใช้จะต่ำที่สุดในกระบวนการผลิตทั้งหมด และผลิตภัณฑ์มีความบริสุทธิ์สูง ความบริสุทธิ์ที่ได้สามารถใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้ จึงมีการเปลี่ยนมาใช้วิธี เมมเบรนเซลล์กันอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 1 ชุดสาหรณม คลอริ-อัลคาไล ชนิดของเซลล์ (a) เซลล์ปรอท (b) เซลล์ไดอะแฟรม (c) เมมเบรนเซลล์

ในการศึกษาเพื่อดำเนินการวิจัยในที่นี่จะมุ่งเน้นไปที่การคำนวณหาการถ่ายโอนมวลสาร โดยผ่านเมมเบรน ด้วยข้อมูลจากการผลิตของไอออนแอ็กเชนจ์เมมเบรนอิเล็กโตรไลเซอร์ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะสามารถศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายโอนมวลสารได้ ในสภาวะที่เป็นแบบสภาวะคงตัวได้



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ชนิดไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรนในอุตสาหกรรม คลอร์-อัลคาไล
2. เพื่อศึกษาการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอกไซด์ ไอออนเอ็กเซนจ์ เมมเบรนมาใช้พิจารณาปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น ที่ส่งผลต่อการดำเนินการผลิต

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. จัดสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ ของสารละลายโซเดียม คลอไรด์ในเครื่องอิเล็กทรอนิกส์
  - 1.1 ข้อสมมติ (Assumption) แบบจำลองในอุดมคติ (Ideal model)
  - 1.2 ทำการทดลองหาสมการแสดงอัตราการถ่ายเทมวลผ่านเมมเบรน
  - 1.3 ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์
2. ทำการศึกษาการต่อแบบอนุกรม (Cascade) ของอิเล็กทรอนิกส์จากแบบจำลอง

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถที่จะนำแบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์ได้มาใช้สำหรับแก้ไขข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในการทำ ปฏิกริยาอิเล็กทรอนิกส์
2. เพื่อที่จะทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกริยาในเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ แบบไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน

### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและหาข้อมูลเกี่ยวกับการอิเล็กทรอนิกส์ในอุตสาหกรรมคลอว์-อัลคาไล ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์เซอร์ที่เป็นแบบไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน
2. จัดสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์แบบไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน
3. ทำการทดลองหาค่าตัวแปรพารามิเตอร์สำหรับนำไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
4. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดำเนินงานของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์แบบไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน
5. ศึกษากระบวนการดำเนินการในแบบอนุกรม (Cascade) จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
6. วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงานที่ได้จากแบบจำลอง
7. จัดพิมพ์ และทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ตามลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis process) คือกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์ แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส และปฏิกิริยาดังกล่าว เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยแยกปฏิกิริยาออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนออกซิเดชัน กับส่วนรีดักชัน ครึ่งที่เป็นออกซิเดชันจะเกิดขึ้นที่ด้านแอโนด ส่วนครึ่งที่เป็นรีดักชันจะเกิดขึ้นที่ด้านคาโทด แอนไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกด้านแอโนด เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากแอนไอออนให้แก่ขั้วบวกด้านแอโนด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนแคตไอออนจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบด้านแคโทด แล้วรับอิเล็กตรอนจากขั้วลบด้านแคโทด เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

กฎของฟาราเดย์ (Faraday law) คือ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส ไฟฟ้าจะผ่านลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วบวกด้านแอโนด และขั้วลบด้านคาโทด เราสามารถวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า ที่ผ่านลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ขั้วทั้งสองได้ โดยค่าทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์กัน เพราะปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวกด้านแอโนด และปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วลบด้านคาโทดเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งโดยเฉพาะในแต่ละปฏิกิริยา ถ้าเราทราบประจุทั้งหมดที่อิเล็กตรอน 1 โมล มีอยู่ เราก็จะวัดปริมาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับปริมาณสารได้

ส่วนปริมาณไฟฟ้าที่ทำการวัดกันเป็นหน่วยคูลอมบ์ (Coulomb, C) โดย ปริมาณไฟฟ้า 1 คูลอมบ์ คือปริมาณไฟฟ้าที่กระแส 1 แอมแปร์ส่งผ่านวัตถุใดๆ ที่สามารถนำไฟฟ้าได้เป็นเวลา 1 วินาที สมการความสัมพันธ์ของปริมาณไฟฟ้าหน่วยคูลอมบ์ กับกระแสไฟฟ้าแอมแปร์สามารถเขียนได้เป็นสมการข้างล่างดังนี้

$$Q = I \cdot t \quad (1)$$

กระแสไฟฟ้าจะผ่านจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้นั้นจะต้องมีความต่างศักย์ไฟฟ้า (Potential difference) หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force) โดยหน่วยของความต่างศักย์ไฟฟ้า หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเรียกว่าโวลต์ (Volt, V) ค่า ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ คือความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดบนตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าขนาด 1 แอมแปร์ ไหลผ่าน ทำให้เกิดมีพลังงาน 1 วัตต์ (Watt) ระหว่างสองจุดนั้น

ใน ค.ศ.1834 Michael Faraday ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ใช้กับปริมาณสารที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส และได้กล่าวว่า

- 1.ปริมาณสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดจะแปรผันตรง กับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านในสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- 2.ปริมาณสารแต่ละชนิดที่เกิดที่ขั้วอิเล็กโทรด โดยการผ่านไฟฟ้าปริมาณเท่ากันจะแปรผันกับน้ำหนักสมมูลของสารที่เกิดปฏิกิริยา อิเล็กโทรด 1 โมล จะมีประจุโดยประมาณ 96,500 คูลอมป์ ปริมาณไฟฟ้า 96,500 คูลอมป์ นี้เรียกว่า 1 ฟาราเดย์ ที่ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 1 สมมูลโดยน้ำหนักที่เท่ากัน

อิเล็กโทรออสโมซิส (Electroosmosis) คือ ปรากฏการณ์ที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การกระทำดังกล่าวจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และยังทำให้เกิดการเคลื่อนที่ถ่ายเทของสารละลายเกิดขึ้น ในภาวะที่ไม่มีมีความแตกต่างของความดัน การเคลื่อนที่ถ่ายเทของสารละลายเกิดจากการที่ไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้เคลื่อนที่ถ่ายเทไปยังด้านขั้วไฟฟ้าที่ต่างประจุกัน การที่ไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่นั้นจะนำพาไปด้วยกัน อัตราการไหลจากการอิเล็กโทรออสโมซิสจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นในภาวะที่ขึ้นตรงกับกระแสไฟฟ้าง่ายๆ ดังสมการข้างล่าง [16]

$$V_{os} = \frac{-\epsilon \xi}{\kappa \eta} I \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 จะเห็นว่าอัตราการไหลที่เกิดจากการอิเล็กโทรออสโมซิสจะขึ้นตรงกับกระแสที่ให้กับสารละลาย และคุณสมบัติของสารละลาย สารละลายที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดการอิเล็กโทรออสโมซิสต่างกัน สมการที่เป็นลบบอกถึงทิศทางของค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลาย



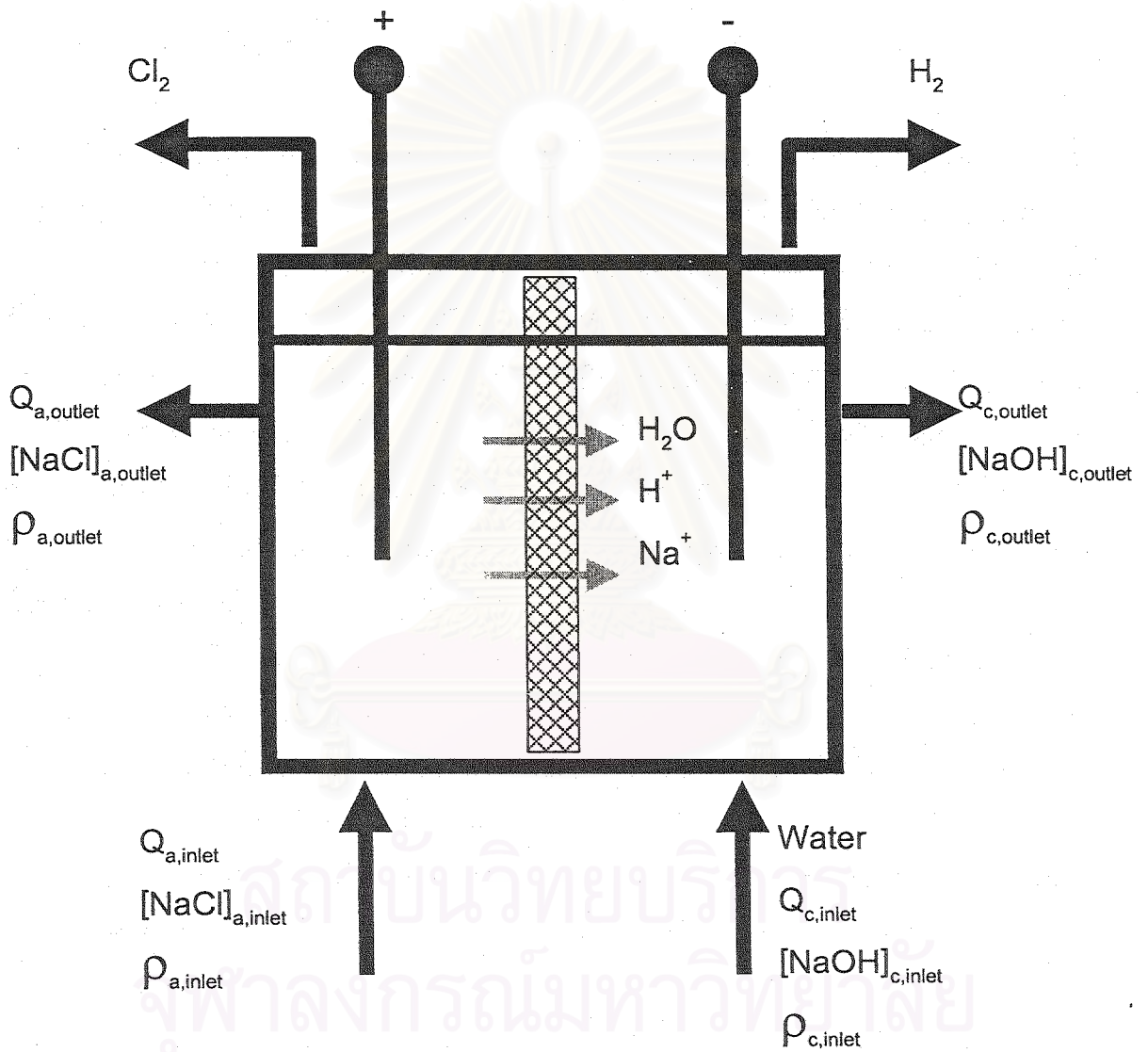
## 2.2 การอิเล็กโทรไลซิส โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเมมเบรน

กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis process) โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนผ่านเมมเบรน จะประกอบด้วยไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรนอิเล็กโทรไลเซอร์ ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ห้อง ห้องด้านแอโนด (Anodic chamber) และห้องด้านคาโทด (Cathodic chamber) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส ในขณะที่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ถูกป้อนเข้าที่ขั้วบวกด้านแอโนด ส่วนในห้องด้านแอโนด และน้ำจะถูกป้อนเข้าที่ขั้วลบ ในห้องด้านคาโทด

การเคลื่อนที่ และปฏิกิริยาของสารที่อยู่ในอิเล็กโทรไลเซอร์ ที่ขั้วบวกในห้องด้านแอโนด (แสดงไว้ในรูปที่ 2) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่อิ่มตัวจะถูกป้อนเข้าไป ส่วนสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เจือจางจะถูกถ่ายออกโดยจะได้ออกคลอรีนจากขั้วบวกด้านแอโนด โซเดียมไอออนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ โดยผ่านเมมเบรน บางส่วนของโซเดียมคลอไรด์ในสารละลายที่ป้อนเข้าขั้วบวก จะถูกใช้ไปตามปฏิกิริยา สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ป้อนเข้าไปที่ขั้วบวก จะเปลี่ยนเป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เจือจาง โดยจะไหลออกจากห้องด้านแอโนด ส่วนในห้องด้านคาโทด อิเล็กโทรไลซิสของน้ำที่เกิดขึ้น จะได้แก๊สไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ไอออน ไฮดรอกไซด์ไอออนจะรวมตัวกับโซเดียมไอออนที่ผ่านผนังมาจะได้เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์

น้ำที่ขั้วบวกด้านแอโนด จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบด้านคาโทด โดยผ่านเมมเบรนด้วยกลไกของอิเล็กโทรออสโมซิส ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านคาโทดสามารถรักษาให้คงที่ได้โดยการเติมน้ำเข้าไปที่ขั้วลบในห้องด้านคาโทด ถึงแม้ว่าไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายคาโธไลต์ (Catholyte) จะช่วยให้ไฟฟ้าส่งผ่านไปยังขั้วบวกได้ แต่เมมเบรนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน มีบทบาทสำคัญในการต่อต้านการส่งผ่านนี้

การส่งผ่านของไฮดรอกไซด์ไอออนไปยังสารละลายในห้องด้านแอโนด โดยผ่านเมมเบรน จะทำให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพทางกระแสไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส แล้วหน้าที่อีกประการหนึ่งที่สำคัญของเมมเบรน ก็คือ การต้านทานกระบวนการที่โซเดียมคลอไรด์ในสารละลายด้านแอโนด ผ่านเมมเบรนไปยังขั้วลบด้านคาโทด โดยวิธีการแพร่ ไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรนที่มีคุณสมบัติที่ดีนั้น จะมีความสามารถสูงในการป้องกันการซึมผ่านของ ไฮดรอกไซด์ไอออน และโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งจะต้องมีความจำเพาะเจาะจงสูง และที่สำคัญต้องทนทานอย่างมากต่อสารเคมีที่มากกระทำ ภายใต้สภาวะที่รุนแรงที่เกิดขึ้นในการทำอิเล็กโทรไลซิส



รูปที่ 2 การเคลื่อนที่ และการเปลี่ยนแปลงภายใน อิเล็กโทรไลเซอร์ แบบไฮออนเอ็กซ์เชนจ์เมมเบรน



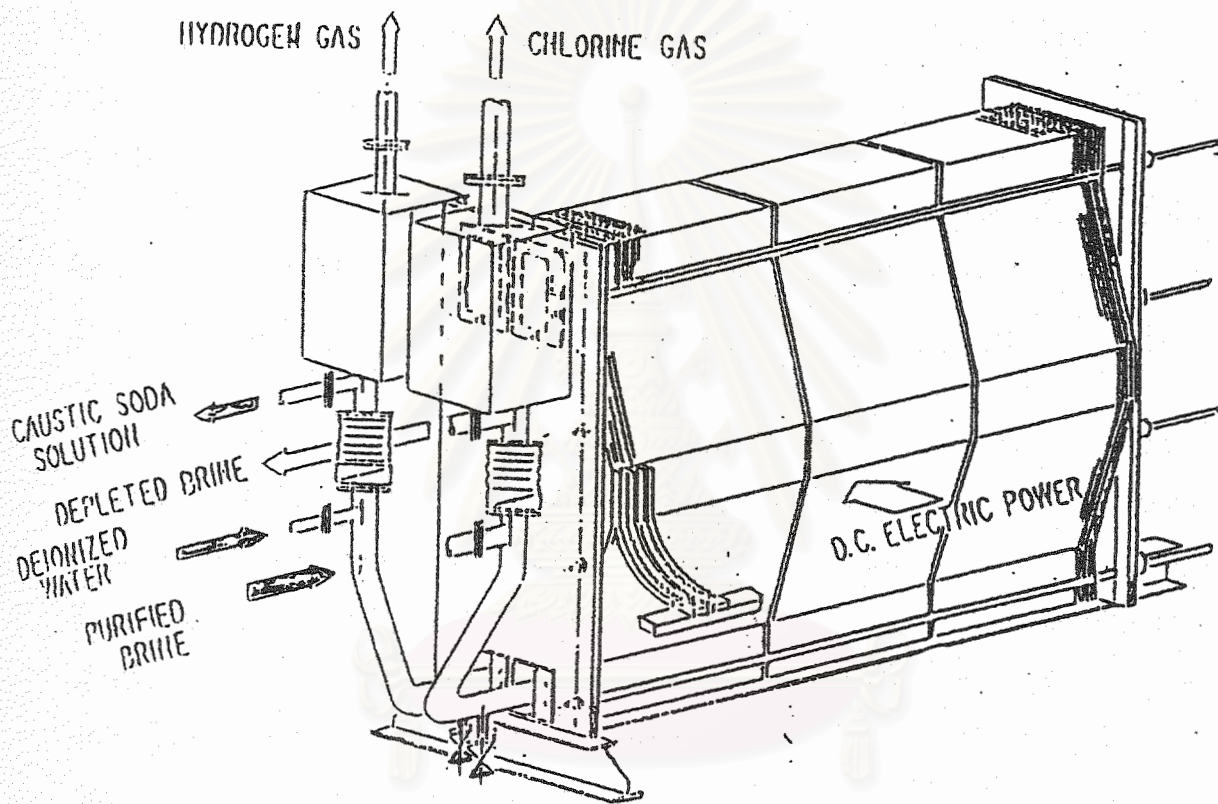
แคตไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับโซเดียมคลอไรด์ จะถูกใช้ภายใต้ภาวะที่รุนแรงมาก คือ มีแก๊สคลอรีนเกิดขึ้นที่ด้านแอโนด และมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูงที่ด้านคาโทด อุณหภูมิโดยรอบจะสูงถึง 90 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามด้วยวิธีของการหาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical characteristics) เราสามารถออกแบบแคตไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรนที่มีประสิทธิภาพสูงในการหยุดยั้งการซึมผ่านของไฮดรอกไซด์ไอออน และคลอไรด์ไอออน ทั้งยังต้องทนทานภายใต้ภาวะที่รุนแรงได้

แคตไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน ทำจากวัสดุพอลิเมอร์แบบผสมรวม (Copolymer) ของ เทตระฟลูออรี เอทิลีน (tetrafluorethylene) และ เพอร์ฟลูออรี แอลคิล ไวนิลอีเทอร์ คาร์บอกซิเลต (Perfluoroalkyl vinyl ether carboxylate) ประกอบกันเป็นเมมเบรน แคตไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน ที่ผลิตขึ้นในอุตสาหกรรมคลอไรด์-อัลคาไลนั้นมียู้อยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยชนิดหนึ่งคือ แคตไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรนแบบ Flemion<sup>®</sup> จะมีลักษณะพิเศษ ก็คือ มีประสิทธิภาพสูงในการแลกเปลี่ยนไอออน ใช้ปริมาณสารละลายในการทำปฏิกิริยาน้อย หรือมีค่าการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์สูง (High conversion) ผลที่ได้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมีความเข้มข้นสูง

การที่เลือกใช้แคตไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรนแบบ Flemion<sup>®</sup> สำหรับกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสโซเดียมคลอไรด์ เพราะเมมเบรนนั้นมีคุณสมบัติพิเศษ ดังนี้

1. ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูง (High current efficiency: CE) สามารถใช้กับการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการให้มีความเข้มข้นสูง
2. ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ป้อนเป็นในโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จะต่ำมาก
3. ความต้านทานไฟฟ้าของผนังเซลล์ต่ำ
4. มีความต้านทานดีเยี่ยมต่อการกัดกร่อนของ กรด ต่าง และทนทานต่อความร้อนที่สูง ผลของการที่มีความต้านทานที่ดีนั้น จะทำให้เมมเบรนมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

อิเล็กโทรไลเซอร์ ที่ใช้ในศึกษา คือ AZM-58.61 อิเล็กโทรไลเซอร์ แบบโมโนโพลาาร์ฟิลเตอร์เพลส อิเล็กโทรไลเซอร์ ของทาง บริษัท อาซาฮิกกลาส จำกัด ประเทศญี่ปุ่น โดยแผ่นขั้วบวกจะประกอบด้วย ขั้วบวก และกรอบของขั้วบวกที่หุ้มประเก็น ส่วนแผ่นของขั้วลบจะประกอบด้วย ขั้วลบ และกรอบของขั้วลบที่หุ้มประเก็น ส่วนประกอบทั้งหมดจะถูกยึดไว้ด้วยแผ่นปิดหัวท้าย และก้านยึดในระบบจะมีส่วนของห้องแยกแก๊สด้านแอโนด (anodic gas separator) ห้องแยกแก๊สด้านคาโทด (cathodic gas separator) และท่อหมุนเวียนสาร (recycle pipe) รวมอยู่ด้วย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3 รูปภายนอก ของอิเล็กโทรไลเซอร์ แบบแคตไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน

ขั้วบวก จะประกอบด้วยขั้วบวกแผ่นกว้าง (Wide anode) และขั้วบวกแผ่นแคบ (Narrow anode) ซึ่งจะต้องต่อกระแสไฟฟ้าเข้าที่แผ่นทองแดง (Flexible copper-plate) ที่อยู่ในส่วนนี้ ดังนั้น จะมีขั้วแอโนดหนึ่งคู่ (ขั้วหนึ่งกว้างอีกขั้วหนึ่งแคบ) ถูกวางบนกรอบของขั้วบวกที่หุ้มด้วยประเก็นทั้งสองข้าง ยิ่งไปกว่านั้น จะต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้วบวกทั้งสองด้วย อีควอลไลซิงบาร์ (Equalizing bar) ที่ทำด้วยทองแดง จะเชื่อมติดกับขั้วบวกแผ่นกว้าง (Wide anode) โดยขั้วจะทำด้วยไทเทเนียม ซึ่งจะถูกเจาะให้เป็นรู และเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์ กระแสไฟฟ้าที่เหลือจาก อีควอลไลซิงบาร์ ไปที่ขั้วบวกทั้งคู่ด้วยแผ่นทองแดงที่เชื่อมต่อกัน ด้านแอโนดจะมีพื้นที่ต่ออิเล็กโตรไลเซอร์หนึ่งตัว 0.2 ตารางเมตรและความหนาแน่นกระแส (Current density) เท่ากับ 3.6 กิโลแอมแปร์ต่อตารางเมตร กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าแอโนดจะเท่ากับ 0.72 กิโลแอมแปร์

การไหลของสารละลายด้านแอโนด ที่ออกมาจากห้องแยกแก๊สด้านแอโนด กับแก๊สคลอรีน ซึ่งอยู่ภายในกรอบของขั้วบวกที่หุ้มด้วยประเก็น จะต้องป้อนสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้าในห้องด้านแอโนด โดยเข้าทางท่อหมุนเวียนด้านแอโนด สารละลายที่เข้าไปจะผสมรวมกับสารละลายที่ออกมาจากห้องแยกแก๊สด้านแอโนด

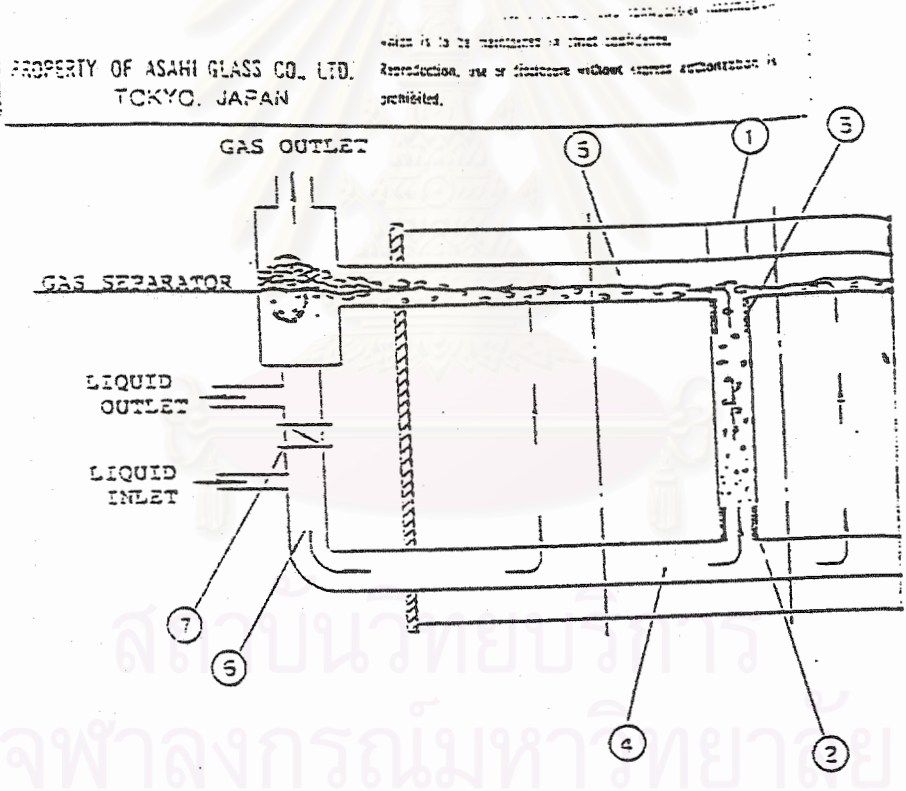
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ป้อนเข้ามาจะถูกผสมกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ออกมาจากห้องแยกแก๊สด้านแอโนด โดยจะเข้าไปในห้องด้านแอโนด ในห้องด้านแอโนดจะประกอบด้วยช่องต่างๆ โดยสารละลายจะไหลเข้าในแต่ละช่องด้วยอัตราเท่ากันผ่านทางท่อขาเข้า ผ่านส่วนที่ใช้สำหรับกระจายการไหลเข้าในกรอบขั้วบวกที่หุ้มด้วยประเก็น เมื่อสารละลายด้านแอโนดถูกป้อนเข้าไปในห้องด้านแอโนด ปฏิกริยาอิเล็กโตรไลซิสจะเกิดขึ้น ดังนั้นคลอไรด์ไอออนจะถูกอิเล็กโตรไลซิสให้เป็นแก๊สคลอรีนที่ขั้วบวกด้านแอโนด ส่วนโซเดียมไอออนจะเคลื่อนที่ไปยังห้องด้านคาโธด ที่อยู่อีกข้างหนึ่ง โดยผ่านผนังแคตไอออนเอ็กซ์เชนจ์เมมเบรนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน แก๊สคลอรีนกับสารละลายด้านแอโนดที่ถูกอิเล็กโตรไลซิสแล้วจะไหลขึ้น เข้าทางท่อทางออก โดยผ่านส่วนที่ใช้สำหรับกระจายการไหลขาออก

แก๊สคลอรีนจะถูกแยกออกจากสารละลายด้านแอโนดที่ทางออกนั้น จะเคลื่อนที่ไปเข้าห้องแยกแก๊สด้านแอโนด ในห้องแยกแก๊สด้านแอโนด แก๊สคลอรีนจะถูกแยกออกจากสารละลายอย่างสมบูรณ์ แก๊สคลอรีนที่แยกแล้วจะถูกถ่ายออกจากทางออกไปยังทางเข้าท่อแก๊สคลอรีนหลัก ในขณะที่ส่วนหนึ่งของสารละลายด้านแอโนด จะล้นออกไปเป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เจือจาง ซึ่งจะไปเข้าท่อสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เจือจางหลัก ส่วนของสารละลายด้านแอโนดจะไหลกลับไปเข้าห้องด้านแอโนด โดยผ่านท่อหมุนเวียนด้านแอโนด



ข้าวลอบ จะประกอบด้วยข้าวอยู่ 2 ส่วนเช่นเดียวกับข้าวบวก โดยส่วนหนึ่งจะประกอบด้วย ข้าวลอบหนึ่งคู่ โดยเชื่อมต่อติดกับแผ่นทองแดง กับอิวควลไคซึ่งบาร์ และกรอบของข้าวลอบที่หุ้มด้วยประเก็นทั้งสองข้าง

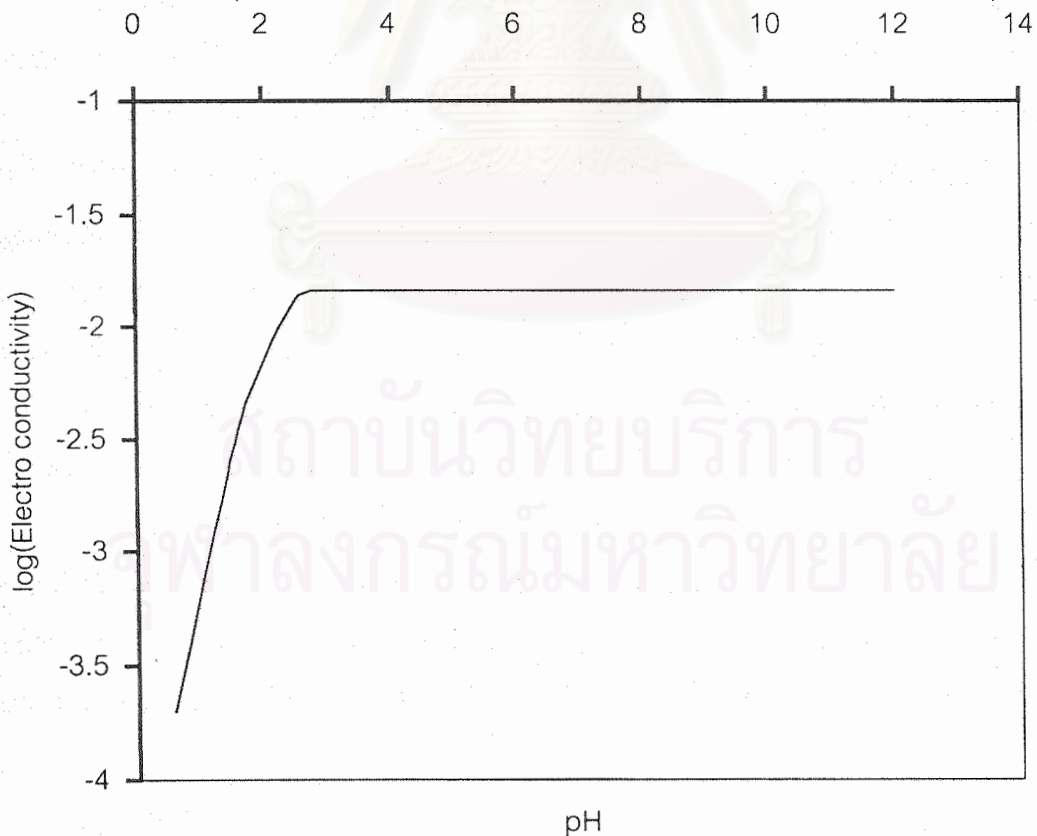
ข้าวลอบทำจากเหล็กคาร์บอนซึ่งเคลือบด้วยแผ่นนิกเกิล โดยในข้าวลอบจะมีแผ่นเรเนียนิกเกิล ที่ถูกเจาะเป็นรูๆ การไหลภายในข้าวลอบด้านคาโรด จะเหมือนกับการไหลภายในข้าวบวกด้านแอนโอด ยกเว้น ก็คือ จะได้แก๊สไฮโดรเจนแทนแก๊สคลอรีน ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แทนสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เจือจาง และใช้น้ำที่ถูกทำการแยกไอออนอื่นออกแล้วป้อนเข้าไปในห้องด้านคาโรด



รูปที่ 4 ลักษณะการไหลของของเหลวและแก๊สในเซลล์

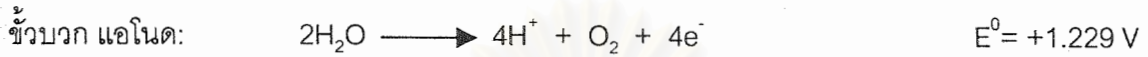
## pH และค่าการนำกระแสไฟฟ้าของผนังเมมเบรน

ข้อมูลอีกส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ก็คือ ค่า pH ของสารละลายกับการนำกระแสไฟฟ้าของเมมเบรน ข้อมูลที่ได้ ได้มาจากข้อมูลการทดลอง ของบริษัทผู้ผลิตเมมเบรน บริษัท อาซาฮี กลาส จำกัด ประเทศญี่ปุ่น จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำกระแสไฟฟ้าของผนังเมมเบรนกับค่า pH โดยจะใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.5 โมลต่อลิตร จากรูปจะเห็นได้ว่า ค่าการนำกระแสไฟฟ้าลดต่ำมากในช่วงที่ pH เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า ซึ่งปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่าที่ผิวหน้าของผนังของเมมเบรนได้มีการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันนอลกรุป (Functional Group) จากโซเดียม (Na) ไปเป็น ไฮโดรเจน (H) พันธะที่เกิดขึ้นเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (Covalence bond) ซึ่งจะทำให้คุณลักษณะในการเป็นแคตไอออนเอ็กเชนจ์เมมเบรนของเมมเบรนลดลง การถ่ายเทของแคตไอออนในสารละลายผ่านเมมเบรนทำได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำกระแสผ่านเมมเบรน กับ pH

ที่ด้านแอนโนดในการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้าไบนั้น เพื่อที่จะทำให้เกิดการอิเล็กโทรไลซิสของคลอไรด์ ให้เกิดเป็นแก๊สคลอรีน ในภาวะดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง โดยน้ำจะเกิดอิเล็กโทรไลซิสที่ขั้วบวกด้านแอนโนดด้วย โดยการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้ว แสดงได้ดังสมการทางเคมี



เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงดังกล่าว ที่ขั้วบวกด้านแอนโนด จำเป็นต้องเติมกรดไฮโดรคลอริกทางด้านแอนโนด แต่ในการเติมกรดดังกล่าวจำเป็นต้องควบคุม pH ไม่ให้ต่ำกว่า 2 โดยปกติแล้วในการเดินการผลิตจะควบคุมให้อยู่ในช่วงค่า pH ระหว่าง 2-4

#### สมการดุลมวลแบบต่อเนื่องในสภาวะทรงตัว (Continuous Feed Steady-State)

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตการอิเล็กโทรไลซิสโซเดียมคลอไรด์ กำหนดให้กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องที่อยู่ภายใต้สภาวะทรงตัว (Steady-state) โดยที่โซเดียมคลอไรด์จะถูกอิเล็กโทรไลซิสได้เป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแก๊สคลอรีน ที่ขั้วบวกด้านแอนโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โซเดียมคลอไรด์จะแตกตัวให้โซเดียมไอออน และแก๊สคลอรีน และที่ขั้วลบด้านคาโทด จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งจะให้ไฮดรอกไซด์ไอออน และแก๊สไฮโดรเจน ผลจากภายใต้สภาวะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรไลเซอร์ นั้นทำให้โซเดียมไอออน วิ่งผ่านแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์เมมเบรน จากทางด้านแอนโนด ไปยังด้านคาโทด

ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของไอออน ผ่านเมมเบรน โดยอยู่ภายใต้สภาวะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ของปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส สามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. ภายใต้สภาวะของเมมเบรนที่มีค่าเป็นกรด (Acidic state) โดยความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านเมมเบรน คือ การที่กระแสไฟฟ้าจะถูกนำพาผ่านเมมเบรนด้วยไอออนในสารละลายที่แพร่ผ่านเมมเบรน ไอออนที่เคลื่อนที่ในสภาวะนี้ ก็คือ โซเดียมไอออน และไฮโดรเนียมไอออน เราสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ดังกล่าวได้ดังนี้

$$t_{\text{m,Na}^+} + t_{\text{m,H}^+} = 1 \quad (3)$$



2. ภายใต้สภาวะของเมมเบรนที่มีค่าเป็นด่าง (Alkaline state) โดยความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านเมมเบรน คือ การที่กระแสไฟฟ้าจะถูกนำพาผ่านเมมเบรนโดยไอออนในสารละลายที่แพร่ผ่านเมมเบรน ไอออนที่เคลื่อนที่ในสภาวะนี้ ก็คือ โซเดียมไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออน เราสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ดังกล่าวได้ดังนี้

$$t_{m,Na^+} + t_{m,OH^-} = 1 \quad (4)$$

สภาวะความสัมพันธ์นี้ หมายถึง การที่กระแสไฟฟ้าถูกนำพาผ่านเมมเบรน โดยโซเดียมไอออน และ ไฮโดรเจนไอออน หรือ โดยโซเดียมไอออน และ ไฮดรอกไซด์ไอออน ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ไม่มีกระแสสูญเสีย (Current loss) จากการผ่านของ ของไหลทางท่อขาเข้า และการไหลทางท่อขาออก ประสิทธิภาพกระแส สามารถแสดงได้โดยตรงด้วย ค่าการถ่ายเทโซเดียมไอออน

ในการศึกษาระบบ (รูปที่ 2) สมมติฐานให้ระบบเป็นแบบต่อเนื่องภายใต้สภาวะทรงตัว ที่สารละลายในด้านแอนอด และสารละลายในด้านคาโทด ให้มีการไหลแบบกวนกันอย่างสมบูรณ์ (Perfectly stirred) และให้ไม่มีการสูญเสียน้ำจากการระเหยภายใต้อุณหภูมิที่สูง และกำหนดให้สมดุลมวลถูกพิจารณาในสภาวะเมมเบรนที่มีค่าเป็นกรด (Acidic state) ตามสมการที่ 1 เพราะเป็นสภาวะที่โซเดียมคลอไรด์มีการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาสูง (High Conversion) จากการที่เมมเบรนที่ใช้เป็นแบบแคตไอออนเอ็กเชนจ์เมมเบรน จึงทำให้ไม่มีการไหลผ่านของไฮดรอกไซด์ไอออน และคลอไรด์ไอออน ผ่านเมมเบรน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### สมการสมดุลมวล

#### สมการดุลมวลของโซเดียมไอออน

$$[\text{Na}^+]_{a,\text{in}} Q_{a,\text{in}} = t_{m,\text{Na}^+} [J s / F] + [\text{Na}^+]_{a,\text{out}} Q_{a,\text{out}} \quad (5)$$

#### สมการดุลมวลรวมของด้านแอโนด

$$\rho_{a,\text{in}} Q_{a,\text{in}} = \rho_{a,\text{out}} Q_{a,\text{out}} + [J s / (2F)] M_{\text{Cl}_2} + W_m + t_{m,\text{Na}^+} [J s / F] M_{\text{Na}} + t_{m,\text{H}^+} [J s / F] M_{\text{H}} \quad (6)$$

#### สมการดุลมวลของไฮดรอกซีไอออน

$$[\text{OH}^-]_{c,\text{in}} Q_{c,\text{in}} + t_{m,\text{Na}^+} [J s / F] = [\text{OH}^-]_{c,\text{out}} Q_{c,\text{out}} \quad (7)$$

#### สมการดุลมวลรวมของด้านคาโทด

$$\rho_{c,\text{in}} Q_{c,\text{in}} + W_m + t_{m,\text{H}^+} [J s / F] M_{\text{H}} + t_{m,\text{Na}^+} [J s / F] M_{\text{Na}} = \rho_{c,\text{out}} Q_{c,\text{out}} + [J s / (2F)] M_{\text{H}_2} \quad (8)$$

จากสมการดุลมวลข้างต้น เทอมที่แตกต่างกันในสมการ และมีสำคัญ ก็คือ อัตราการไหลขาเข้า ( $Q_{\text{in}}$ ) ด้านแอโนด และด้านคาโทด อัตราการไหลขาออก ( $Q_{\text{out}}$ ) ด้านแอโนดและด้านคาโทด การเคลื่อนที่ของไอออน (Ion transport) ผ่านเมมเบรน และ อัตราการไหลของน้ำโดยมวลผ่านเมมเบรน ( $W_m$ : Water mass flow-rate) ปริมาณแก๊สคลอรีนที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกด้านแอโนด และปริมาณแก๊สไฮโดรเจน และไฮดรอกซีไอออนที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบด้านคาโทด

ในการแก้สมการดุลมวลนั้นจำเป็นต้องรู้ ค่าการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนของไอออน (Ion transport) ของโซเดียมไอออน ต้องทราบอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเมมเบรน (Water mass flow-rate) และต้องทราบค่าความหนาแน่นของสารละลายในแต่ละด้านของอิเล็กโทรไลเซอร์ ค่าดังกล่าวจะได้จากการทำการทดลองในภาวะที่กำหนด

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1995 Gerrit K. และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาแบบจำลองการอิเล็กโทรไดอะไลซิส โดยใช้ Maxwell-Stefan description ทำการจำลองระบบโดยใช้เมมเบรนที่เป็นแบบสองไอออนแลกเปลี่ยน (two ion exchange membrane) โดยเริ่มแรกทำการจำลองระบบที่เกี่ยวข้องกับ โซเดียมคลอไรด์ และกรดไฮโดรคลอริก ตัวแปรต่างๆ ได้จากการทำการทดลอง และใช้ความสัมพันธ์กัน ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถอธิบายตัวแปรทั้งหมดได้อย่างเที่ยงตรง แต่ค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่พอรับได้ ส่วนที่สองได้ทำการจำลองระบบของ กรดอะมิโนสองตัว ผลที่ได้ไม่ดีเพราะการทำแบบจำลองเป็นไปได้ยาก ข้อมูลที่ได้ไม่เพียงพอ และขาดความเที่ยงตรงสำหรับจะทำการวิเคราะห์กระบวนการได้อย่างถูกต้อง

การวิเคราะห์ขอบเขตของตัวแปร ที่ใช้ใน เมมเบรน 2 ชั้น เพื่อดูแนวโน้มของแบบจำลอง โดยมีอิทธิพลของขอบเขตของตัวแปรเช่น ความบริสุทธิ์ และระดับของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ผลิตด้วยวิธีอิเล็กโทรไดอะไลซิส โซเดียมคลอไรด์ ที่ใช้ เมมเบรน 2 ชั้น ได้ถูกทำการวิเคราะห์วิจัย (M. Rakib และคณะ 1995) [9]

มีการวิจัยเพื่อที่จะทำนายพฤติกรรมของการอิเล็กโทรไดอะไลซิสการแยกเกลือแบบแบ่งเป็นช่องๆ ใช้ข้อมูลจากการทดลอง และได้แสดงอยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย (V.I. Zabolotsky และคณะ 1995) [10] ได้มีการพัฒนาแบบจำลองในการอิเล็กโทรไดอะไลซิสการแยกเกลือโดยการผ่านแบบหมุนเกลียว (Spiral) เพื่อที่จะทำนายการปฏิบัติการ และการประมาณประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า ในการผ่านอิเล็กโทรไดอะไลซิสแบบหมุนเกลียว (T. Wen และคณะ) [11]

N. Boniardi และคณะ(1996) [12] ได้ทำการวิจัยการจำลองการดั่งกรดแลคติก โดยใช้วิธีอิเล็กโทรไดอะไลซิส จากน้ำที่ใช้แล้วที่ได้จากการหมักเพื่อผลิตโซเดียมแลคเตต การอิเล็กโทรไดอะไลซิสสามารถดั่งกรดแลคติกกลับมาจากสารละลายที่หมักได้ การออกแบบ และการปรับปรุง จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนำข้อมูลมาเปรียบเทียบ จากการทดลองในสารละลายโซเดียมแลคเตต เพื่อดั่งกรดแลคติกออกมา Eun Gyu Lee และคณะ (1997) [13] ได้ทำการจำลองเพื่อดั่งกลับกรดแลคติกโดยใช้วิธีอิเล็กโทรไดอะไลซิส โดยระบบที่ใช้จะใช้การสับเปลี่ยน จากการให้กระแสคงที่ไปเป็นศักย์ไฟฟ้าคงที่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ทำนายถึงความเข้มข้นของกรดแลคติกปริมาณที่เปลี่ยนแปลง และพลังงานที่ใช้รวมถึงความผิดพลาดจากการอิเล็กโทรไดอะไลซิสด้วย



การจำลองเครื่องอิเล็กโตรไลเซอร์โดยใช้เมมเบรนที่เป็นแบบแคตไอออนเอ็กเชนจ์เมมเบรนชนิด Nafion<sup>®</sup> 350 ใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และการทดลองขั้นต้นในกระบวนการผลิตจริง ที่เป็นระบบต่อเนื่อง ทำการแยกโซเดียมซัลเฟต ไปเป็น กรดซัลฟูริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำนํายการเพิ่มลดกระแสที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น และนำแบบจำลองที่ได้มาศึกษาการต่อแบบต่ออนุกรมของอิเล็กโตรไลเซอร์ เปรียบเทียบกับ แบบเดี่ยว (M.Rakib และคณะ 1998) [14]

ส่วนการวิจัยที่เกี่ยวกับการผลิตคลอรีน และโซดาไฟ ได้มีการศึกษาโดยใช้อิเล็กโตรไลเซอร์ที่เป็นแบบไอออนเอ็กเชนจ์เมมเบรน ในอุตสาหกรรม คลอร์-อัลคาไล เมมเบรนที่ใช้ทำมาจาก เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน โพลิเมอร์ กับตัวแคตไอออนเอ็กเชนจ์ เป็น ซัลโฟนิกบนด้านแอนไอต์ และคาร์บอกซิลิกบนด้านคาโทด โดยเครื่องอิเล็กโตรไลเซอร์และเมมเบรนได้พัฒนาการผลิตโซดาไฟ โดยมีการใช้กระแสไฟ ที่ 3 กิโลแอมแปร์ต่อตารางเมตร ศักย์ไฟฟ้าที่ 3 โวลท์ และอุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส ได้ความเข้มข้นของโซดาไฟที่ 35% (Delmas F. 1994) [15]

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### การทดลอง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสนั้น จำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบโดยตรง กับเทอมที่สำคัญในสมการดุลมวล ในการทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ นั้นจะทำการศึกษาจากค่าต่างๆ ที่ได้จากข้อมูลการผลิต โดยจะใช้ AZEC อิเล็กโทรไลเซอร์ ใช้แคตไอออนเอ็กเชนจ์เมมเบรน และขั้วอิเล็กโทรดมาจาก บริษัท อาซาฮิกลาส จำกัด ประเทศญี่ปุ่น พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสเท่ากับ 0.2 ตารางเมตร ในตัวอิเล็กโทรไลเซอร์จะมีส่วนที่สำหรับควบคุมอุณหภูมิ โดยอาศัยหลักการ การแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำ การทดลองโดยการปรับค่าต่างๆ ของเครื่อง เช่น อัตราการไหล อุณหภูมิ หรือค่าความหนาแน่นกระแส และทำการเก็บข้อมูลผลจากการปรับค่าตัวแปรต่างๆ ที่สนใจ และทำการหาค่าความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรเหล่านั้น เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส

#### 3.1 การหาค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับตัวแปรอื่นๆ

การทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับตัวแปรอื่นๆ นั้น จะทำการทดลองภายใต้สมมติฐานที่ว่า กระบวนการผลิตเป็นแบบต่อเนื่องภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) ให้ภายในของตัวอิเล็กโทรไลเซอร์ มีการไหลแบบกวนกันอย่างสมบูรณ์ (Perfect stirred) ให้ไม่มีการสูญเสียกระแส จากการที่ของไหล ไหลเข้าท่อขาเข้า และท่อขาออก จากสมมติฐานดังกล่าวทำให้ค่าประสิทธิภาพกระแส มีค่าเท่ากับค่าถ่ายเทของไฮเดียมไอออนผ่านเมมเบรน ( $CE = t_{m,Na^+}$ ) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งในสมการดุลมวล

### 3.1.1 การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับค่าความเข้มข้นของสารละลาย ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ทำการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับความเข้มข้นของสารละลายที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิคงที่ จากการเก็บข้อมูลการเดินกระบวนการผลิต โดยใช้ขั้นตอนการปฏิบัติการเริ่มต้น ทำการทดลองดังนี้

- ปรับความหนาแน่นกระแสของในการอิเล็กโทรไลซิสที่ 3,600 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
- ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส
- ปรับอัตราการไหลขาเข้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้านแอโนด  
ให้อยู่ที่ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ค่าความเข้มข้น 310 กรัมต่อลิตร
- ปรับอัตราการไหลของน้ำขาเข้าด้านคาโธด ให้อยู่ที่ 1.6 ลิตรต่อชั่วโมง
- เดินกระบวนการจนความเข้มข้นของสารขาออก และ ระดับของสารละลาย ในด้านแอโนด

และด้านคาโธดได้คงที่ (ประมาณ 10 นาที) ทำได้โดยการปรับอัตราการไหลขาเข้าของสารละลาย

ในทำการทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์นั้น จะเริ่มจากการปรับอัตราการไหลขาเข้าด้านแอโนดให้อยู่ในช่วง 27-33 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อให้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอโนดเปลี่ยนไปในช่วง 180-240 กรัมต่อลิตร และปรับอัตราการไหลขาเข้าด้านคาโธดให้อยู่ระหว่าง 1.0-2.0 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อให้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกของด้านคาโธดเปลี่ยนไปในช่วง 25-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

วัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอโนด และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด การวัดความเข้มข้นทำได้โดยการวัดค่าความถ่วงจำเพาะ แล้วนำไปเปรียบเทียบหาความเข้มข้น

ค่าประสิทธิภาพกระแสจะคำนวณได้จากค่าอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธดที่เปลี่ยนไป ที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอโนด และค่าค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด ที่ความเข้มข้นต่างๆ

### สมการการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพกระแส

$$\text{ประสิทธิภาพกระแส} = \frac{[\text{ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผลิตได้}] \times 100}{[\text{ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามทฤษฎี}]}$$

$$\text{CE} = \frac{[\text{NaOH}]_{\text{c.out}} \times 10 \times Q_{\text{c.out}} \times 100}{[J s / F] \times M_{\text{NaOH}}} \quad (9)$$

### 3.1.2 การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับอุณหภูมิของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส

ทำการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับค่าอุณหภูมิของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จากการเก็บข้อมูลการเดินกระบวนการผลิต โดยใช้ขั้นตอนการปฏิบัติการเริ่มต้น ทำการทดลองดังนี้

- ปรับความหนาแน่นกระแสของในการอิเล็กโทรไลซิสที่ 3,600 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
- ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส
- ปรับอัตราการไหลขาเข้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้านแอนโนด  
ให้อยู่ที่ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ค่าความเข้มข้น 310 กรัมต่อลิตร
- ปรับอัตราการไหลของน้ำขาเข้าด้านคาโทด ให้อยู่ที่ 1.6 ลิตรต่อชั่วโมง
- เดินกระบวนการจนความเข้มข้นของสารขาออก และ ระดับของสารละลาย ในด้านแอนโนด

และด้านคาโทดได้คงที่ (ประมาณ 10 นาที) ทำได้โดยการปรับอัตราการไหลขาเข้าของสารละลาย

ในทำการทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์นั้น ทำได้โดยการปรับส่วนควบคุมอุณหภูมิของอิเล็กโทรไลเซอร์ จะทำการปรับให้อยู่ในช่วง 80-94 องศาเซลเซียส ในการปรับอุณหภูมิของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จะทำให้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกของด้านคาโทด และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกของด้านแอนโนดเปลี่ยนไป ต้องทำการควบคุมความเข้มข้นโดยการปรับอัตราการไหลขาเข้าด้านแอนโนด และอัตราการไหลขาเข้าด้านคาโทด เพื่อให้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกของด้านแอนโนดให้คงที่ ที่ 220 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกของด้านคาโทดคงที่ ที่ความเข้มข้น 35% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เพราะค่าความเข้มข้นของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขา



ออกของด้านคาโรต และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกของด้านแอนโด เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพกระแส

ค่าประสิทธิภาพกระแสจะได้จากการคำนวณค่าอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโรตที่เปลี่ยนไป

### 3.2 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าของการอิเล็กโทรไลซิส กับค่าตัวแปรอื่นๆ

การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าของการอิเล็กโทรไลซิส กับค่าตัวแปรอื่นๆ นั้น จะทำการทดลองภายใต้สมมติฐานที่ว่า กระบวนการผลิตเป็นแบบต่อเนื่องภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) ให้ภายในของตัวอิเล็กโทรไลเซอร์ มีการไหลแบบกวนกันอย่างสมบูรณ์ (Perfect stirred) ให้ไม่มีการสูญเสียกระแส จากการที่ของไหล ไหลเข้าท่อขาเข้า และท่อขาออก ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส โดยวัดจากอุปกรณ์เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า

#### 3.2.1 การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ค่าศักย์ไฟฟ้า กับค่าความเข้มข้นของสารละลาย ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ทำการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าของการอิเล็กโทรไลซิส กับความเข้มข้นของสารละลาย ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิคงที่ จากการเก็บข้อมูลการเดินกระบวนการผลิต โดยใช้ขั้นตอนการปฏิบัติการเริ่มต้น ทำการทดลองดังนี้

- ปรับความหนาแน่นกระแสของในการอิเล็กโทรไลซิสที่ 3,600 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

- ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส

- ปรับอัตราการไหลขาเข้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้านแอนโด

ให้อยู่ที่ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ค่าความเข้มข้น 310 กรัมต่อลิตร

- ปรับอัตราการไหลของน้ำขาเข้าด้านคาโรต ให้อยู่ที่ 1.6 ลิตรต่อชั่วโมง

- เดินกระบวนการจนความเข้มข้นของสารขาออก และ ระดับของสารละลาย ในด้านแอนโด และด้านคาโรตได้คงที่ (ประมาณ 10 นาที) ทำได้โดยการปรับอัตราการไหลขาเข้าของสารละลาย

ในทำการทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์นั้น จะเริ่มจากการปรับอัตราการไหลขาเข้าด้านแอนโดให้อยู่ในช่วง 27-33 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อให้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอนโดเปลี่ยนไปในช่วง 180-240 กรัมต่อลิตร และปรับอัตราการไหลขาเข้าด้านคาโรตให้อยู่ระหว่าง 1.0-



2.0 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อให้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกของด้านคาโรตเปลี่ยนไปในช่วง 25-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

วัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอนด และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโรต การวัดความเข้มข้นทำได้โดยการวัดค่าความถ่วงจำเพาะ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับความเข้มข้น เราจะวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของกระบวนการผลิต กับค่าความเข้มข้นของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ

### 3.2.2 การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับอุณหภูมิของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส

ทำการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าของการอิเล็กโทรไลซิส กับค่าอุณหภูมิของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จากการเก็บข้อมูลการเดินกระบวนการผลิต โดยใช้ขั้นตอนการปฏิบัติการเริ่มต้น ทำการทดลองดังนี้

- ปรับความหนาแน่นกระแสของในการอิเล็กโทรไลซิสที่ 3,600 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
- ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส
- ปรับอัตราการไหลขาเข้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้านแอนด  
ให้อยู่ที่ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ค่าความเข้มข้น 310 กรัมต่อลิตร
- ปรับอัตราการไหลของน้ำขาเข้าด้านคาโรต ให้อยู่ที่ 1.6 ลิตรต่อชั่วโมง
- เดินกระบวนการจนความเข้มข้นของสารขาออก และ ระดับของสารละลาย ในด้านแอนด

และด้านคาโรตได้คงที่ (ประมาณ 10 นาที) ทำได้โดยการปรับอัตราการไหลขาเข้าของสารละลาย

ในการทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์นั้น ทำได้โดยการปรับส่วนควบคุมอุณหภูมิของอิเล็กโทรไลเซอร์ จะทำการปรับให้อยู่ในช่วง 80-94 องศาเซลเซียส ในการปรับอุณหภูมิของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จะทำให้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกของด้านคาโรต และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกของด้านแอนดเปลี่ยนไป ต้องทำการควบคุมความเข้มข้นโดยการปรับอัตราการไหลขาเข้าด้านแอนด และอัตราการไหลขาเข้าด้านคาโรต เพื่อให้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกของด้านแอนดให้คงที่ ที่ 220 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกของด้านคาโรตคงที่ ที่ความเข้มข้น 35% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เราจะวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของกระบวนการผลิต กับอุณหภูมิของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส ที่เปลี่ยนไป

### 3.3 การทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของปริมาณด้านแอมไนด์ กับความหนาแน่นกระแส

ทำการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของปริมาณที่เปลี่ยนไปด้านแอมไนด์ กับความหนาแน่นกระแส จากการเก็บข้อมูลการเดินกระบวนการผลิต โดยใช้ขั้นตอนการปฏิบัติการเริ่มต้น ทำการทดลองดังนี้

- ปรับความหนาแน่นกระแสของในการอิเล็กโทรไลซิสที่ 3,600 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
- ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส
- ปรับอัตราการไหลขาเข้าของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้านแอมไนด์

ให้อยู่ที่ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ค่าความเข้มข้น 310 กรัมต่อลิตร

- ปรับอัตราการไหลของน้ำขาเข้าด้านคาโธด ให้อยู่ที่ 1.6 ลิตรต่อชั่วโมง

- เดินกระบวนการจนความเข้มข้นของสารขาออก และ ระดับของสารละลาย ในด้านแอมไนด์ และด้านคาโธดได้คงที่ (ประมาณ 10 นาที) ทำได้โดยการปรับอัตราการไหลขาเข้าของสารละลาย

ในทำการทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์นั้น ทำได้โดยการปรับความหนาแน่นกระแสให้อยู่ระหว่างค่า 3,000-4,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ปรับอัตราการไหลขาออกด้านแอมไนด์ให้เท่ากับขาเข้า วัดระดับของสารละลายในแอมไนด์ที่เปลี่ยนไปเมื่อเวลาผ่านไปครึ่งชั่วโมง (0.5 h)

ในห้องด้านแอมไนด์มีปริมาตรโดยรวมเท่ากับ 50 ลิตร ระดับจะบอกถึงระดับของสารละลาย ตั้งแต่ 1-100 ถ้าวัดการเปลี่ยนแปลงระดับของสารละลาย จะมีค่าเท่ากับ การเปลี่ยนแปลงปริมาตร ในหน่วยลิตรต่อชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับค่าประสิทธิภาพกระแส

##### 4.1.1 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแส กับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ขาออกด้านแอนโนด

จากข้อมูลการทดลองที่ 3.1.1 ใน ภาคผนวก ค ทำการเก็บข้อมูลค่าอัตราการไหลขาออกด้านคาโธด แล้วนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการหาประสิทธิภาพกระแส เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพกระแสในแต่ละความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอนโนด

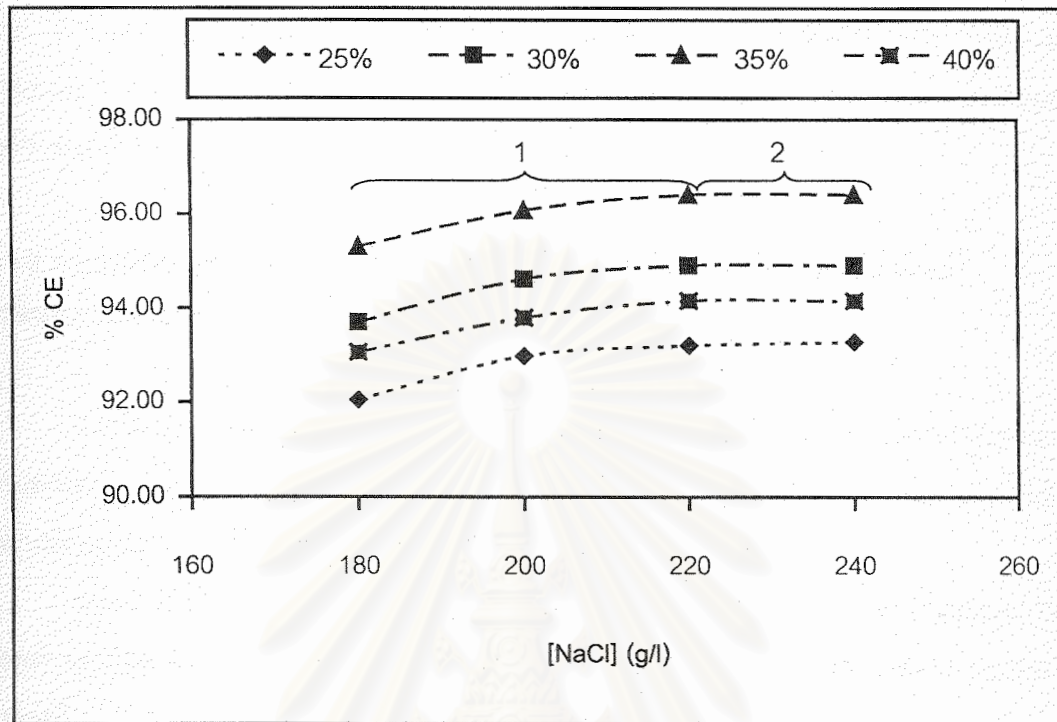
ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด จากข้อมูลในภาคผนวก ค นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพกระแส ค่าดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 1 อุณหภูมิคงที่ 90 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นกระแสที่ 3,600 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาเข้าที่ 310 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 1 แสดงค่าความสัมพันธ์ของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ กับประสิทธิภาพกระแส

[NaCl] <sub>c.out</sub> (g/lit)	CE (%)			
	[NaOH] <sub>c.out</sub> 25%	[NaOH] <sub>c.out</sub> 30%	[NaOH] <sub>c.out</sub> 35%	[NaOH] <sub>c.out</sub> 40%
180	92.05%	93.71%	95.32%	93.06%
200	92.98%	94.64%	96.08%	93.80%
220	93.21%	94.92%	96.41%	94.17%
240	93.29%	94.92%	96.41%	94.17%

จากข้อมูลในตารางที่ 1 นำมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอนโนด กับประสิทธิภาพกระแสที่แต่ละค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด





รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกระแส กับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์  
ขาออกด้านแอนไอออน

จากกราฟในรูปที่ 6 แสดงค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแสเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอนไอออน ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธดที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ช่วงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ระหว่าง 180-220 กรัมต่อลิตร ค่าประสิทธิภาพกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นไปตามหลักการแพร่ของสารละลาย เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นจะเกิดการแพร่ผ่านเมมเบรนมากขึ้น และการแพร่ของโซเดียมไอออนดังกล่าวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าประสิทธิภาพกระแสเพิ่มขึ้นตาม

2. ช่วงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ระหว่าง 220-240 กรัมต่อลิตร ค่าประสิทธิภาพกระแสมีค่าคงที่ เป็นไปได้ว่าที่ภาวะความเข้มข้นดังกล่าว น้ำในเมมเบรนจะลดลง และมีผลทำให้เมมเบรนมีการหดตัว เกิดการต้านการแพร่ ทำให้การแพร่ของโซเดียมไอออนผ่านเมมเบรนไม่เพิ่มขึ้น [19] จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพกระแสที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลง



จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เปลี่ยนไปมาก ค่าประสิทธิภาพกระแสจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเพื่อให้ง่ายในการสร้างแบบจำลองจะกำหนดให้ประสิทธิภาพกระแส ไม่ขึ้นตรงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอนโนด

#### 4.1.2 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแสกับเปอร์เซ็นต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด

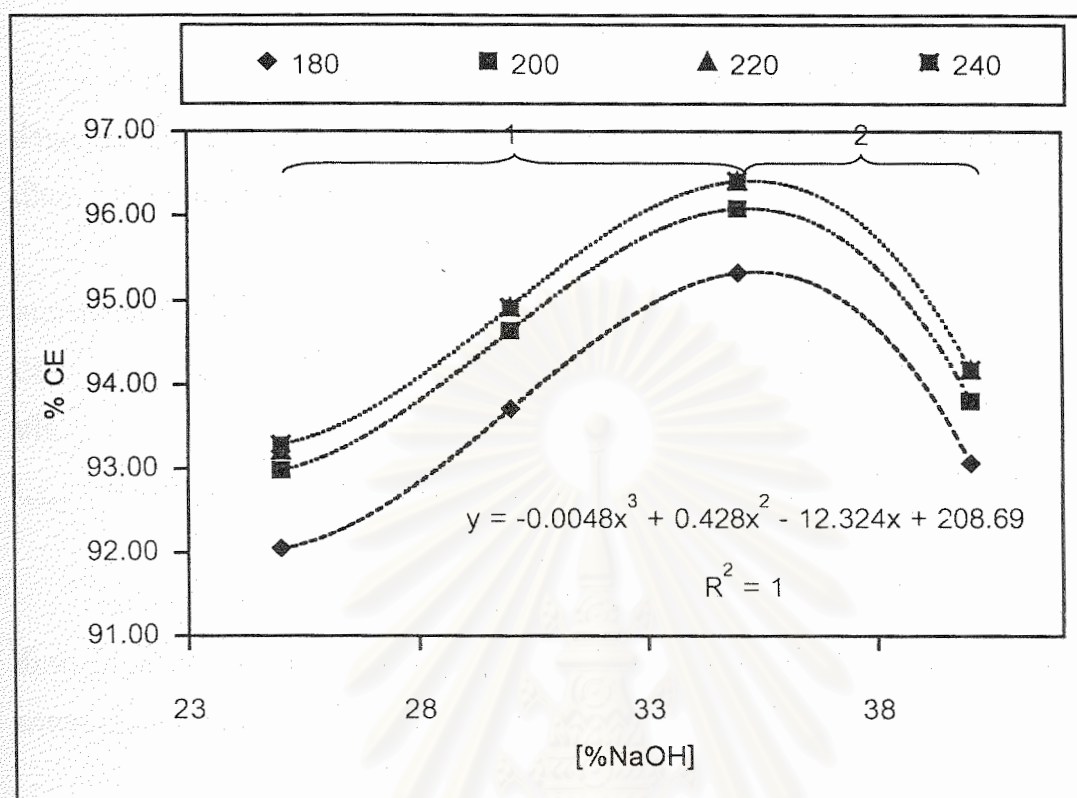
จากข้อมูลการทดลองที่ 3.1.2 ใน ภาคผนวก ค ทำการเก็บข้อมูลค่าอัตราการไหลขาออกด้านคาโธด แล้วนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการหาค่าประสิทธิภาพกระแส เพื่อดำเนินหาประสิทธิภาพกระแสในแต่ละค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด

ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด จากข้อมูลในภาคผนวก ค นำมาคำนวณประสิทธิภาพกระแส ค่าดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 2 อุณหภูมิคงที่ 90 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นกระแสที่ 3,600 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาเข้าที่ 310 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2 แสดงค่าความสัมพันธ์ของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์กับประสิทธิภาพกระแส

[NaOH] <sub>c,out</sub> (%)	CE (%) at [NaCl] <sub>a,out</sub> (g/l)			
	180	200	220	240
25	92.05	92.98	93.21	93.29
30	93.71	94.64	94.92	94.92
35	95.32	96.08	96.41	96.41
40	93.06	93.8	94.17	94.17

จากข้อมูลในตารางที่ 2 นำมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด กับประสิทธิภาพกระแสที่แต่ละค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอนโนด



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกระแส กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโรด

จากกราฟในรูปที่ 7 แสดงค่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแสเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโรด ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอโนดที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ในช่วงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 25-30 เปอร์เซ็นต์ ค่าประสิทธิภาพกระแสเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นผลมาจากการดึงน้ำจากเมมเบรนของสารละลายในภาวะที่สารละลายมีความเข้มข้นสูง [17-18] ซึ่งผลดังกล่าวจะนำพาให้ค่าถ่ายเทของโซเดียมไอออนเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพกระแสจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

2. ในช่วงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 25-30 เปอร์เซ็นต์ ค่าประสิทธิภาพกระแสมีค่าลดลงตามค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อาจเป็นผลมาจากการต้านการแพร่ของโซเดียมไอออนที่ผ่านมาจากด้านคาโรด ในภาวะที่ด้านคาโรดมีโซเดียมไอออนสูง และไฮดรอกไซด์ไอออนอาจแพร่ผ่านเมมเบรนมาด้วย

3. ค่าประสิทธิภาพกระแสจะสูงสุดที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 35 เปอร์เซ็นต์

จากกราฟดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออก ด้านคาโรด นั้นมีผลเป็นอย่างมากกับค่าประสิทธิภาพกระแสจึงได้ใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ดังนี้

สมการความสัมพันธ์

$$CE = -0.0048(\%NaOH)^3 + 0.428(\%NaOH)^2 - 12.324(\%NaOH) + 208.69 \quad (9)$$

หรือ

$$t_{m,Na^+} = -0.0048(\%NaOH)^3 + 0.428(\%NaOH)^2 - 12.324(\%NaOH) + 208.69 \quad (10)$$

สมการที่ 10 เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าถ่ายเทโซเดียมไอออนผ่านเมมเบรนที่สัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโรด ซึ่งจะใช้ในการแก้สมการดุลมวลของอิเล็กโตรไลต์เพื่อหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในแบบจำลองต่อไป

#### 4.1.3 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระแสกับอุณหภูมิ

จากผลการทดลองที่ 3.1.2 ในภาคผนวก ค ทำการเก็บข้อมูลค่าอัตราการไหลขาออกด้านคาโรด แล้วนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการหาค่าประสิทธิภาพกระแส เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพกระแสที่อุณหภูมิจุดต่างๆของกระบวนการอิเล็กโตรไลซิส

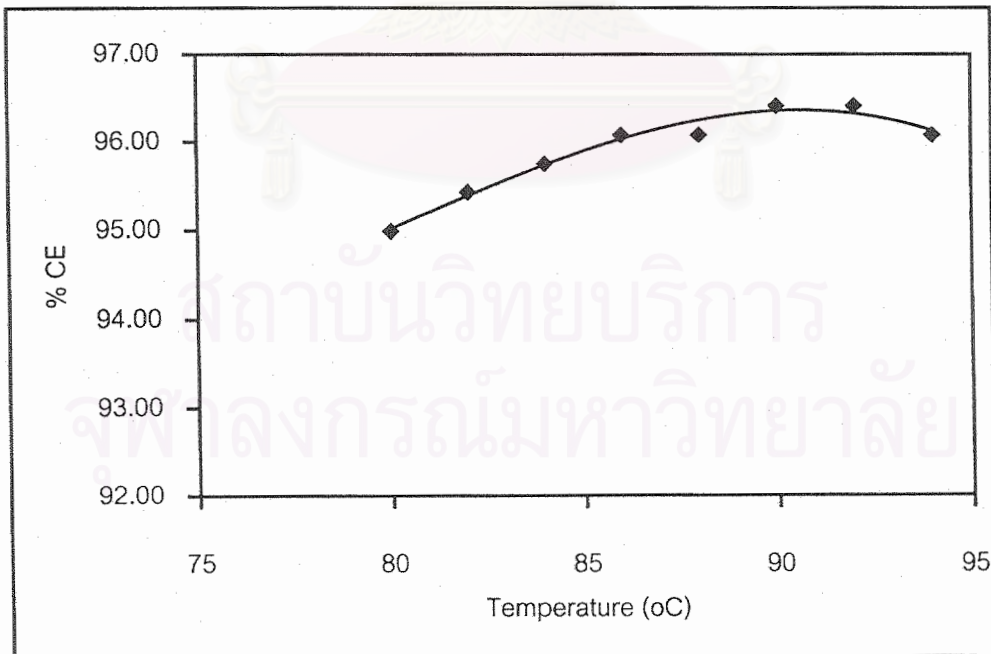
ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโรด ที่นำมาคำนวณประสิทธิภาพกระแส ค่าดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 3 โดยการทดลองดังกล่าวจะควบคุมความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโรดที่ 35% และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอนอดที่ 220 กรัมต่อลิตร การควบคุมค่าความเข้มข้นดังกล่าวสามารถทำได้โดยการปรับอัตราการไหลขาเข้าทั้ง 2 ด้าน



ตารางที่ 3 แสดงค่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ กับประสิทธิภาพกระแสน้ำ

Temperature (°C)	CE (%)
80	94.99
82	95.43
84	95.75
86	96.08
88	96.08
90	96.41
92	96.41
94	96.08

จากข้อมูลในตารางที่ 3 นำมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส กับประสิทธิภาพกระแสน้ำ



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกระแสน้ำ กับอุณหภูมิของการอิเล็กโทรไลซิส



จากกราฟในรูปที่ 8 ที่อุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าประสิทธิภาพกระแสมีค่าสูงสุด และเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพกระแสเปลี่ยนไปน้อยมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หรือขึ้นตรงกับอุณหภูมิน้อยมาก [17-18] ในการปฏิบัติงานจะต้องควบคุมให้อยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิคงที่เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุม ในการเดินกระบวนการผลิตจริง และจะควบคุมอุณหภูมิของการอิเล็กโทรไลซิสให้สูงเพื่อป้องกันการตกผลึกของสารละลาย ไม่ว่าจะเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โซเดียมคลอไรด์ เพราะผลของการตกผลึกของสารละลายจะมีผลให้เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสได้ไม่ดี ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพกระแสมีค่าต่ำลง

ในการทำนายค่าการผลิตด้วยสมการทางคณิตศาสตร์นั้นจะใช้ค่าอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นค่าคงที่ของอุณหภูมิในการอิเล็กโทรไลซิส และในการเปรียบเทียบค่าจากการทำนายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์กับค่าจริงที่ได้จากการเดินกระบวนการผลิตจริงจะควบคุมอุณหภูมิของการอิเล็กโทรไลซิสให้คงที่ด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ที่ 90 องศาเซลเซียส และในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของสารละลายทั้งขาเข้า และขาออก และทั้งด้านแอโนด และคาโทด จะใช้ค่าที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส ตามที่ตั้งอุณหภูมิการผลิตไว้

## 4.2 ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

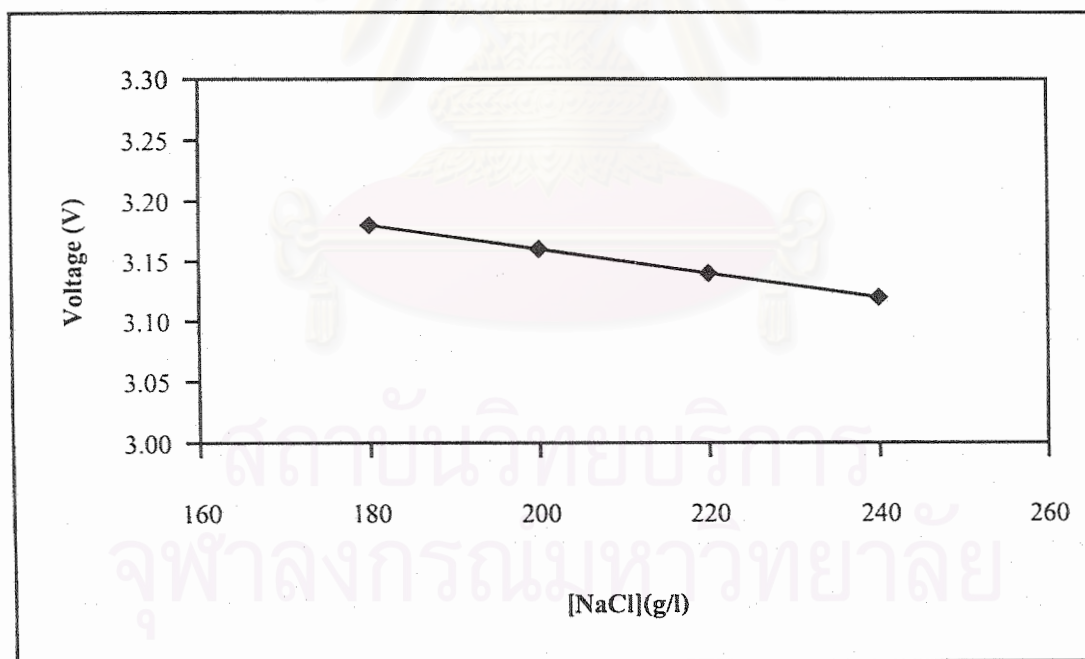
### 4.2.1 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ กับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอโนด

จากการทดลองที่ 3.2.1 ทำการเก็บข้อมูลค่าจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอโนด โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ ในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอโนด แสดงความสัมพันธ์ไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์  
ขาออกด้านแอโนด

$[\text{NaCl}]_{\text{a.out}} \text{ (g/l)}$	$Q_{\text{a.out}} \text{ (l/h)}$	Voltage (V)
180	29.91	3.18
200	30.31	3.16
220	30.71	3.14
240	31.11	3.12

จากข้อมูลในตารางที่ 4 นำมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของ  
โซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอโนด กับค่าศักย์ไฟฟ้าที่แต่ละค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า กับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์  
ขาออกด้านแอโนด

จากกราฟในรูปที่ 9 ค่าศักย์ไฟฟ้าของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จะลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอโนด สามารถอธิบายได้จากการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส เมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายมีค่ามากขึ้น เราจะนำข้อมูลดังกล่าวไปหาค่าพลังงานไฟฟ้า ของแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพื่อเปรียบเทียบในแบบจำลองต่อไป

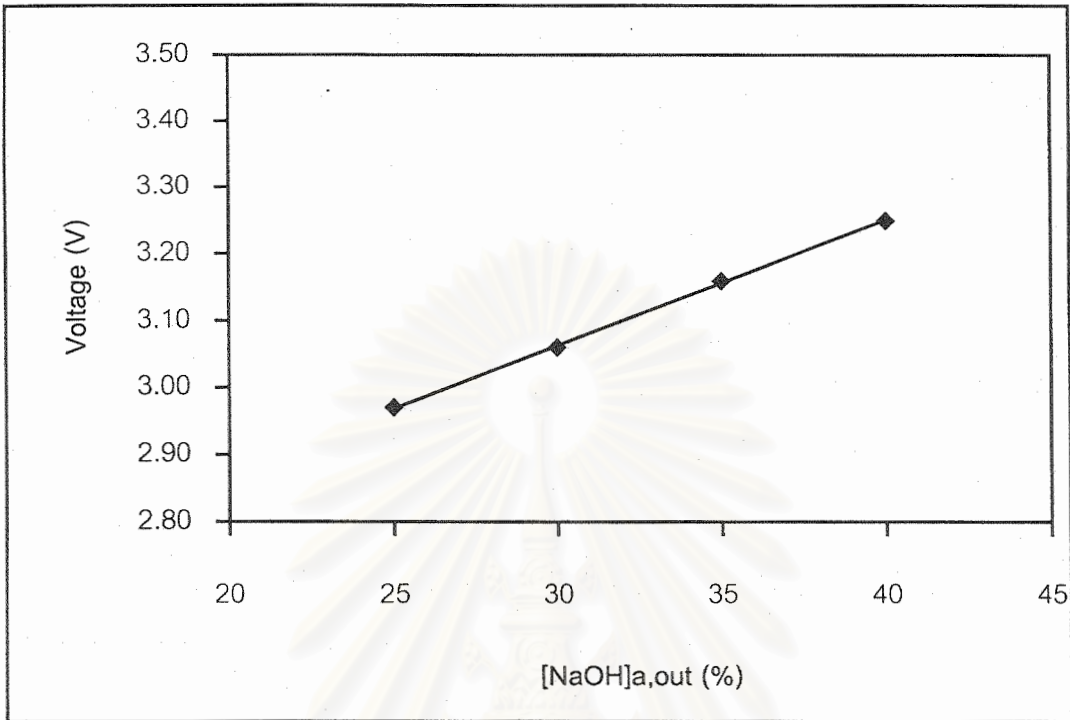
#### 4.2.2 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด

จากการทดลองที่ 3.2.2 ทำการเก็บข้อมูลค่าจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ ในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด แสดงความสัมพันธ์ไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด

$[\text{NaOH}]_{\text{c,out}}$ (% by weight)	$Q_{\text{a,out}}$ (l/h)	Voltage (V)
25	30.70	2.96
30	30.70	3.06
35	30.71	3.16
40	30.70	3.26

จากข้อมูลในตารางที่ 5 นำมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโธด กับค่าศักย์ไฟฟ้าที่แต่ละค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์  
ขาออกด้านคาโธด

จากกราฟในรูปที่ 10 ค่าศักย์ไฟฟ้าของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านคาโธด ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากการเพิ่มขึ้นของไฮดรอกไซด์ไอออนจะไปลดปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเมมเบรน และจะทำให้เกิดการโพลาริเซชันความเข้มข้นของพันธะ ออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H bond) [17-18] เราจะนำข้อมูลดังกล่าวไปหาค่าพลังงานไฟฟ้า ของแต่ละความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อไป

#### 4.2.3 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ กับอุณหภูมิของการอิเล็กโทรไลซิส

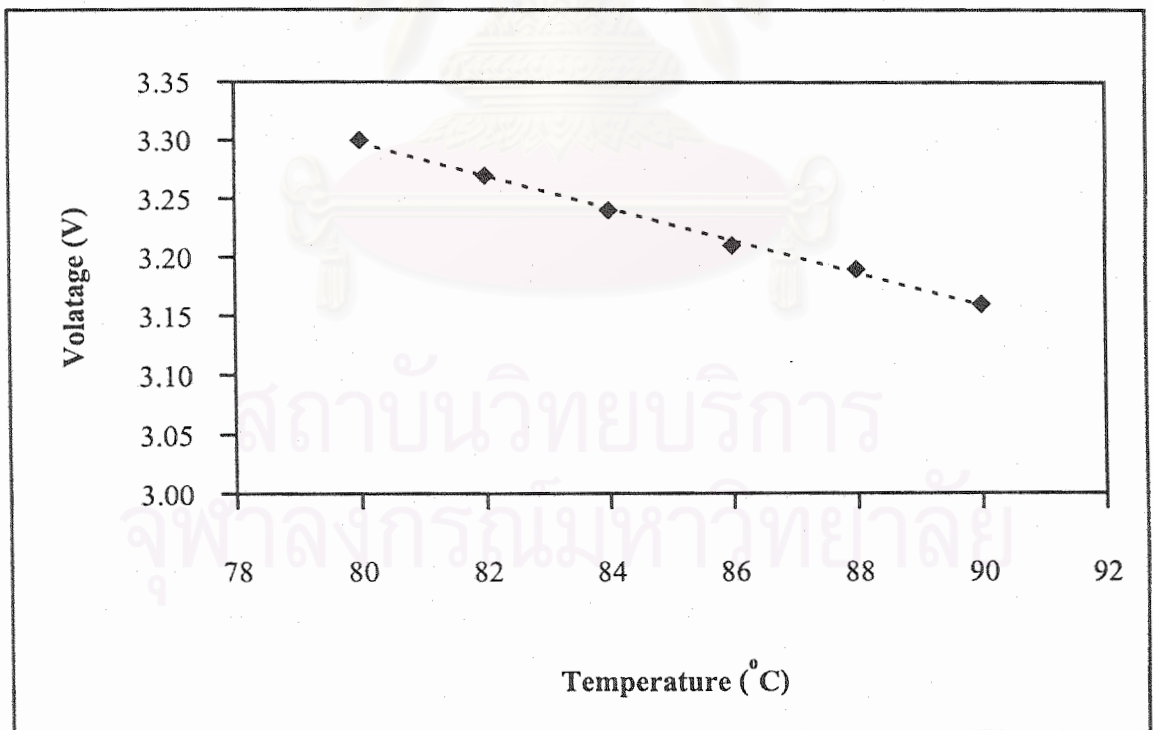
ผลจากการทดลองที่ 3.2.2 ใน ภาคผนวก ค ทำการเก็บข้อมูลค่าจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า ในแต่ละอุณหภูมิของ อิเล็กโทรไลซิส โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ ในแต่ละอุณหภูมิของ อิเล็กโทรไลซิส แสดงความสัมพันธ์ไว้ในตารางที่ 6



ตารางที่ 6 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละอุณหภูมิของ อิเล็กโตรไลซิส

Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Voltage (V)
80	3.30
82	3.27
84	3.24
86	3.21
88	3.19
90	3.16

จากข้อมูลในตารางที่ 6 นำมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิของ อิเล็กโตรไลซิส กับค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละค่าอุณหภูมิของ อิเล็กโตรไลซิส



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า กับอุณหภูมิของ อิเล็กโตรไลซิส

จากกราฟในรูปที่ 11 ค่าศักย์ไฟฟ้าของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จะลดลงขึ้นตามอุณหภูมิของ อิเล็กโทรไลซิส ซึ่งเกิดเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงสารละลายมีการเคลื่อนตัวได้ดี จะทำให้การนำไฟฟ้าของสารละลายดีขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจึงมีค่าลดลง

#### 4.3 การศึกษาการถ่ายโอนของน้ำโดยมวล ผ่านเมมเบรน

##### 4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลากับความหนาแน่นกระแส

จากการทดลองที่ 3.3 ที่ทำการวัดปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงด้านแอโนดในเวลาครึ่งชั่วโมงเมื่อมีการปรับค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลเซอร์ โดยค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรด้านแอโนดมีผลโดยตรงกับค่าความหนาแน่นไฟฟ้า ซึ่งจากการทดลองเป็นปริมาตรการเปลี่ยนแปลงรวมของอิเล็กโทรไลเซอร์ 1 ตัว ข้อมูลจากการทดลองดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงค่าความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรด้านแอโนดต่อเวลากับความหนาแน่นของกระแส

ความหนาแน่นกระแส (A/m <sup>2</sup> )	ปริมาตรที่เปลี่ยนไปต่อชั่วโมง (dV/dt) (l/h)
3,000	2.20
3,200	2.40
3,400	2.50
3,600	2.75
3,800	2.93
4,000	3.02

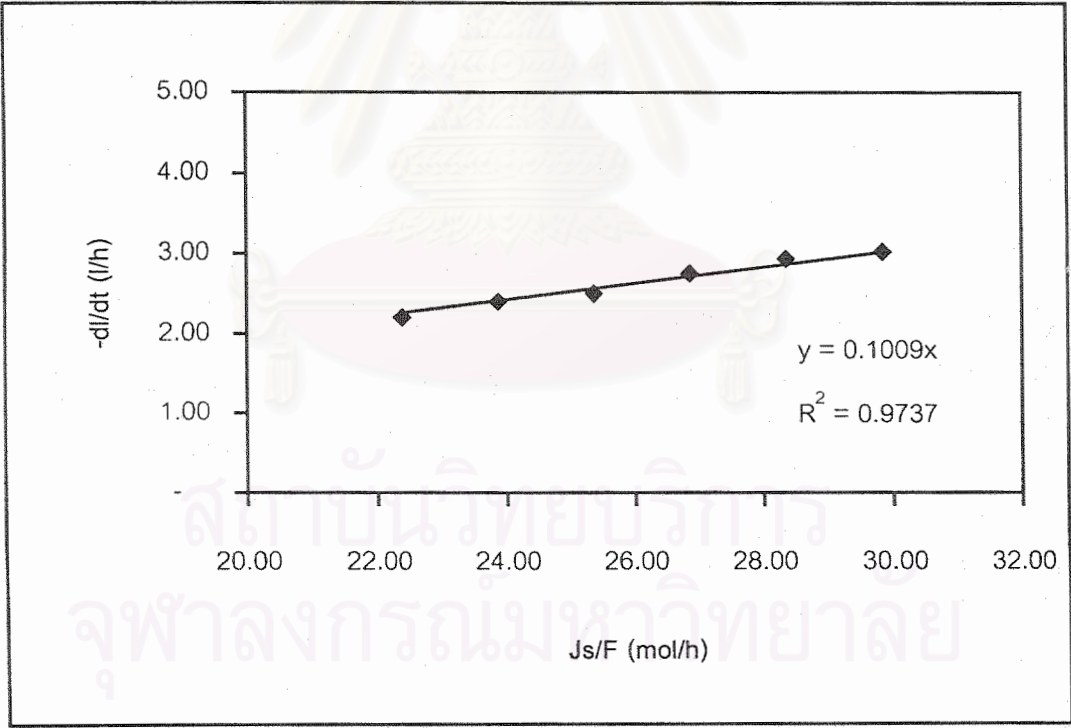
จากข้อมูลในตารางที่ 7 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของด้านแอโนดต่อหนึ่งชั่วโมง เพื่อให้ง่ายแก่การพิจารณา และนำไปใช้ ข้อมูลตามตารางแสดงผลตรงตามสมมติฐานที่ว่า ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปบางส่วนเกิดจากน้ำที่ไหลผ่านเมมเบรนจากห้องด้านแอโนด ไปยังห้องด้านคาโธด

โดยอาศัยหลักการอิเล็กโทรออสโมซิส เพราะเมื่อมีการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรด้านแอโนดจะเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลอง เราสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรด้านแอโนดต่อหนึ่งหน่วยเวลา กับค่าความหนาแน่นกระแส ได้ดังนี้

$$-\Delta v/\Delta \theta = \alpha J_s/F$$

นำผลการทดลองที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแส กับ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของด้านแอโนดเมื่อเทียบกับเวลา ค่าความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ อัลฟา ( $\alpha$ ) ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการแก้สมการหาค่าอัตราการไหลของน้ำโดยมวลผ่าน เมมเบรน



รูปที่ 12 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อเวลา กับความหนาแน่นกระแส



จากกราฟรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าค่าความชันของกราฟคือค่าอัลฟา มีค่าเท่ากับ 0.1009 l/mole เราจะนำค่าดังกล่าวมาใช้ในการแก้สมการหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าต่อไป

จากการทดลองที่ 3.3 สมการการเปลี่ยนแปลงโดยมวลด้านแอโนด โดยจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน กับอัตราการเกิดจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสได้ดังนี้

$$-d(\rho_a V_a) = \{dW_m + [J s/F] \times [M_{Cl_2}/2 + t_{m,Na^+} \times M_{Na} + t_{m,H^+} \times M_H]\} d\theta \quad (11)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรด้านแอโนดจะเปลี่ยนไป เนื่องจากมีอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน มีการเกิดโดยมวลของก๊าซคลอรีน และมีการถ่ายโอนไอออนโดยมวล ของโซเดียมไอออน และไฮโดรเนียมไอออน เกิดขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป จากสมการดังกล่าวเพื่อให้ง่ายต่อการแก้สมการ เราจะสมมติฐานให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของด้านแอโนด (ภายใต้การกวนแบบสมบูรณ์) มีค่าคงที่ ฉะนั้นสมการจะเขียนได้ว่า

$$\frac{-\rho_a d(V_a)}{d\theta} = dW_m + [J s/F] \times [M_{Cl_2}/2 + t_{m,Na^+} \times M_{Na} + t_{m,H^+} \times M_H] \quad (12)$$

เมื่อทำการแทนค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อเทียบกับเวลาแล้ว เราสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ใหม่ โดยค่าอัตราการไหลโดยมวลของน้ำที่ผ่านเมมเบรนภายใต้สภาวะอิเล็กโทรออสโมซิส จะได้อัตราการนี้

$$W_m = \frac{J s (\alpha \rho_a - [M_{Cl_2}/2 + t_{m,Na^+} \times M_{Na} + t_{m,H^+} \times M_H])}{F} \quad (13)$$

จากสมการที่ 13 จะเห็นได้ว่าอัตราการถ่ายเทมวลของน้ำผ่านเมมเบรน นั้นมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นจากการอิเล็กโทรออสโมซิส ของน้ำ โดยเมื่อมีการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสมากขึ้นโดยอ้างอิงกับสมการที่ 2 ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำผ่านเมมเบรน มีมากขึ้นตาม และจะใช้สมการที่ 13 นี้เป็นสมการหนึ่งในการจำลองระบบทางคณิตศาสตร์ เพื่อที่จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการผลิตต่อไป

#### 4.3.2 การศึกษาค่าถ่ายเทของน้ำ ผ่านเมมเบรน (Water transport)

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาด้านแอโนด กับความหนาแน่นกระแสนั้น ทำให้ทราบถึงอัตราการไหลของน้ำโดยมวล ผ่านเมมเบรน ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถนำไปหาค่าการถ่ายเทของน้ำผ่านเมมเบรนได้ ( $t_{m,H_2O}$ ) โดยค่าการถ่ายเทของน้ำผ่านเมมเบรนเป็นสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น กับค่า อัตราการไหลจำเพาะ (Specific flow rate) คืออัตราการไหลของน้ำโดยมวลผ่านเมมเบรน ต่อพื้นที่การไหล โดยเป็นสมการดังนี้

$$W = W_m / s \quad (\text{kg hr}^{-1} \text{m}^{-2}) \quad (14)$$

ค่าการถ่ายโอนของน้ำผ่านเมมเบรนได้ ( $t_{m,H_2O}$ ) คือ ค่าบ่งบอกถึงจำนวนโมเลกุลของน้ำที่ถูกถ่ายโอนผ่านเมมเบรน ด้วยกลไกจากอิเล็กโตรออสโมซิส เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ โดยสมการความสัมพันธ์ของค่าการถ่ายโอนน้ำผ่านเมมเบรน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$t_{m,H_2O} = \frac{F W / M_{H_2O}}{J} \quad (\text{mole F}^{-1}) \quad (15)$$

ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทโซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำผ่านเมมเบรน โดยศึกษาจากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกระแส กับความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ ออกไซด์ ค่าความหนาแน่นค่าการถ่ายโอนของน้ำผ่านเมมเบรน จากสมการความสัมพันธ์ข้างต้น แสดงค่าที่ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทโซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำผ่านเมมเบรน ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์

$[\text{NaOH}]_{c,\text{out}}$	$t_{m,\text{Na}^+}$	$t_{m,\text{H}_2\text{O}}$
25	0.932	3.570
30	0.949	3.521
35	0.964	3.478
40	0.942	3.566

จากการคำนวณจากสมการที่ 13-15 จะได้ค่าการถ่ายเทน้ำผ่านเมมเบรนโดยเฉลี่ยประมาณ 3.5 ซึ่งค่าดังกล่าวโดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทของโซเดียมไอออน กับน้ำผ่านเมมเบรน จะเห็นได้ว่า เมื่อโซเดียมไอออน 1 โมล ถ่ายเทผ่านเมมเบรน จะมีจำนวนโมเลกุลของน้ำโดยเฉลี่ยประมาณ 3.5 โมล ถ่ายเทผ่านเมมเบรนด้วย

ค่าจากตารางแสดงให้เห็นว่าค่าการถ่ายเทน้ำผ่านเมมเบรนจะลดลงเมื่อค่าการถ่ายเทโซเดียมไอออนผ่านเมมเบรนมีค่าเพิ่มขึ้น จากสมการที่ 2 น้ำเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนโดยกลไกของอิลิคโตรออสโมซิสเมื่อมีค่าการถ่ายเทของโซเดียมไอออนมากขึ้นจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายมีค่ามากขึ้นตาม แต่จะส่งผลให้ค่าอัตราการไหลที่เกิดจากกลไกทางอิลิคโตรออสโมซิสลดลง

#### 4.3 การทำนายกระบวนการผลิตจากแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

ทำการทำนายผลของการอิลิคโตรออสโมซิส ในสภาวะคงตัว (Steady state) ใน กระบวนการผลิตใช้โปรแกรมการคำนวณ ใน ภาคผนวก ข โดยใช้สมการที่ 3 สมการที่ 5-8 และสมการที่ 13 คำนวณสมมูลมวล และใช้สมการที่ 16, 17 ในการคำนวณความหนาแน่นของสารละลายในด้านแอโนด และด้านคาโทด ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของสารละลาย สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าหนาแน่นของสารละลาย กับค่าความเข้มข้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แสดงในภาคผนวก ก คำนวณหาค่าตัวแปร ผลจากการผลิตด้านขาออก ของกระบวนการผลิต ค่าตัวแปรดังกล่าวเช่น อัตราการไหลขาออกของด้านคาโทด และแอโนด ค่าความเข้มข้นขาออกของโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโทด และค่าความเข้มข้นขาออกของโซเดียมคลอไรด์ด้านแอโนด ค่าถ่ายโอนผ่านเมมเบรนของโซเดียมไอออน ซึ่งสามารถแสดงเป็นค่าประสิทธิภาพกระแส

ทำการเปรียบจากค่าที่ปฏิบัติจริงที่ภาวะต่างๆ โดยทำการทดสอบแบบจำลองในภาวะความหนาแน่นกระแสอยู่ระหว่าง 3,000-4,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ในภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลขาเข้าด้านแอโนดระหว่าง 28-32 ลิตรต่อชั่วโมง และในภาวะที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ขาเข้าด้านแอโนดมีค่า 300 325 และ 350 กรัมต่อลิตร โดยอุณหภูมิคงที่ที่ 90 องศาเซลเซียส อัตราการไหลขาเข้าด้านคาโทดอยู่ที่ 1.6 ลิตรต่อชั่วโมง



ตารางที่ 9 แสดงค่าจากการทำนาย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการปฏิบัติงานโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแส

ค่าภาวะ	ภาวะขาเข้า	ค่าจากการปฏิบัติงานขาออก	ค่าจากการคำนวณขาออก	% ความผิดพลาด
<b>ภาวะที่ 1</b>				
ความหนาแน่นกระแส 3,000 kA/m <sup>2</sup>				
-ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (g/l)	310	210	211	0.48
-ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)	0	34.50	34.87	1.07
-อัตราการไหลด้านแอนโนด (l/hr)	30	28.00	28.13	0.46
-อัตราการไหลด้านคาโทด (l/hr)	1.6	2.50	2.45	-2.00
<b>ภาวะที่ 2</b>				
ความหนาแน่นกระแส 3,600 kA/m <sup>2</sup>				
-ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (g/l)	310	208	205	-1.44
-ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)	0	36.35	36.30	-0.14
-อัตราการไหลด้านแอนโนด (l/hr)	30	27.50	27.67	0.62
-อัตราการไหลด้านคาโทด (l/hr)	1.6	2.80	2.82	0.71
<b>ภาวะที่ 3</b>				
ความหนาแน่นกระแส 4,000 kA/m <sup>2</sup>				
-ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (g/l)	310	202	201	-0.50
-ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)	0	36.80	37.17	-1.01
-อัตราการไหลด้านแอนโนด (l/hr)	30	27.60	27.36	-0.87
-อัตราการไหลด้านคาโทด (l/hr)	1.6	2.95	3.06	3.73

ตารางที่ 10 แสดงค่าจากการทำนาย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการปฏิบัติงานโดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลขาเข้าของแวนได

ค่าภาวะ	ภาวะขาเข้า	ค่าจากการปฏิบัติงานขาออก	ค่าจากการคำนวณขาออก	% ความผิดพลาด
<b>ภาวะที่ 4</b>				
ความหนาแน่นกระแส 3,600 kA/m <sup>2</sup>				
-ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (g/l)	310	199	197	-1.01
-ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)	0	36.75	36.83	0.22
-อัตราการไหลด้านแอนโนด (l/hr)	28	25.45	25.69	0.94
-อัตราการไหลด้านคาโธด (l/hr)	1.6	2.80	2.78	-0.71
<b>ภาวะที่ 5</b>				
ความหนาแน่นกระแส 3,600 kA/m <sup>2</sup>				
-ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (g/l)	310	208	205	-1.44
-ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)	0	36.35	36.30	-0.14
-อัตราการไหลด้านแอนโนด (l/hr)	30	27.50	27.67	0.62
-อัตราการไหลด้านคาโธด (l/hr)	1.6	2.80	2.82	0.71
<b>ภาวะที่ 6</b>				
ความหนาแน่นกระแส 3,600 kA/m <sup>2</sup>				
-ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (g/l)	310	210	212	0.95
-ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)	0	36.10	36.12	0.06
-อัตราการไหลด้านแอนโนด (l/hr)	32	29.64	29.65	0.03
-อัตราการไหลด้านคาโธด (l/hr)	1.6	2.80	2.84	1.43

ค่าภาวะ	ภาวะขาเข้า	ค่าจากการปฏิบัติงานขาออก	ค่าจากการคำนวณขาออก	% ความผิดพลาด
<b>ภาวะที่ 7</b>				
ความหนาแน่นกระแส 3,500 kA/m <sup>2</sup>				
-ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (g/l)	300	197	195	-1.02
-ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)	0	36.50	36.42	-0.22
-อัตราการไหลด้านแอโนด (l/hr)	30	27.80	27.77	-0.12
-อัตราการไหลด้านคาโธด (l/hr)	1.6	2.79	2.73	-0.73
<b>ภาวะที่ 8</b>				
ความหนาแน่นกระแส 3,500 kA/m <sup>2</sup>				
-ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (g/l)	325	220	223	--2.33
-ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)	0	35.40	35.73	-0.37
-อัตราการไหลด้านแอโนด (l/hr)	30	27.80	27.70	0.18
-อัตราการไหลด้านคาโธด (l/hr)	1.6	2.85	2.78	0.35
<b>ภาวะที่ 9</b>				
ความหนาแน่นกระแส 3,500 kA/m <sup>2</sup>				
-ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (g/l)	350	246	250	1.62
-ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)	0	34.50	34.69	0.55
-อัตราการไหลด้านแอโนด (l/hr)	30	27.80	27.62	-0.65
-อัตราการไหลด้านคาโธด (l/hr)	1.6	2.90	2.87	-1.03



จากตารางที่ 9, 10 และ 11 ได้แสดงผลของการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากกระบวนการผลิตกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในภาวะคงตัว ค่าที่ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับ ค่าที่ได้จากการผลิตมาก มีค่าความผิดพลาดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 3.73%

#### 4.4 การศึกษากระบวนการในแบบอนุกรม (Cascade) จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เพื่อต้องการลดพลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ในการผลิตแบบปกติ (ขั้นตอนเดียว) การใช้กระบวนการผลิตโดยการต่อแบบอนุกรม ได้นำมาพิจารณาเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ในการลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต

ทำการศึกษาระบบการอิเล็กโทรไลซิสในแบบอนุกรม โดยให้ต่ออิเล็กโทรไลเซอร์ 2 ตัวอนุกรมกัน โดยเปรียบเทียบกับการผลิตแบบเดี่ยว ที่ใช้อิเล็กโทรไลเซอร์ตัวเดียว จากการทำการศึกษาดังกล่าว แสดงข้อมูลที่ได้ตามตาราง

ตารางที่ 12 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการต่อ แบบอนุกรม กับการต่อแบบขั้นตอนเดียว

Condition	Input				Output				Current (A)	Voltage(V)	Power (W)
	Qa	[NaCl]	Qc	[NaOH]	Qa	[NaCl]	Qc	[NaOH]			
Temperature 90 °C											
Single state	31.10	310	1.60	0.00	28.48	210	2.93	36.35	720	3.19	2,297
Cascade											
Stage 1	31.10	310	1.60	0.00	30.29	248	2.05	25.40	360	2.96	1,067
Stage 2	29.71	229	2.36	18.63	27.88	180	2.71	38.33	360	3.15	1,162
											2,229
Voltage=0.02x[%NaOH] <sub>c,out</sub> + 2.46											2.97%

จากผลของการคำนวณจากแบบจำลองจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการต่อแบบหลายลำดับขั้นตอน กับแบบขั้นตอนเดียว โดยการให้ข้อมูลเข้าที่เท่ากัน ทั้งค่าความเข้มข้น และความหนาแน่นกระแส แต่ได้แบ่งพื้นที่ในการอิเล็กทรอนิกส์ออกเป็น 2 ส่วนในการต่อแบบ 2 ขั้นตอน

ได้ทำการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์โดยอ้างอิงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ข้างออกด้านคาโทดเพื่อเปรียบเทียบหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของแต่ละแบบ

จากผลจากการทดสอบในตารางที่ 12 จะเห็นได้ว่าการใช้กระบวนการผลิตแบบ 2 ขั้นตอนจะใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 2,229 วัตต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการต่อแบบขั้นตอนเดียวที่ใช้ พลังงานไฟฟ้า 2,297 วัตต์ จะเห็นได้ว่าการต่อแบบ 2 ขั้นตอน ไม่สามารถลดพลังงานไฟฟ้าลงได้มากในกรณีดังกล่าว เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไม่ลดลงเท่าที่ควร

ค่าความเข้มข้นข้างออกในการต่อแบบหลายขั้นตอน มีค่าเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเทียบกับ การต่อแบบขั้นตอนเดียว โดยเฉพาะค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ข้างออกด้านแอโนด มีค่าแตกต่างกันถึง 13%

## บทที่ 5

### สรุป และวิจารณ์ผล

กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เมมเบรน เพื่อแยกไฮเดียมคลอไรด์ให้เป็นไฮเดียมไฮดรอกไซด์ และแก๊สคลอรีน การเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนของไฮเดียมไอออน และไฮโดรเนียมไอออน บ่งบอกถึงค่าประสิทธิภาพกระแสของกระบวนการผลิต เมื่อระบบเป็นแบบต่อเนื่อง ในสภาวะคงตัว ภายใน อิเล็กโตรไลเซอร์ เกิดการกวนกันอย่างสมบูรณ์ การใช้เมมเบรนที่มีค่าจำเพาะเจาะจงในการเลือกผ่าน ของไฮเดียมไอออน กับไฮโดรเนียมไอออน มีส่วนสำคัญมากต่อประสิทธิภาพกระแสของกระบวนการผลิต

ค่าการถ่ายเทไอออนผ่านเมมเบรนของไฮเดียมไอออน และค่าการถ่ายเทโดยมวลของน้ำผ่านเมมเบรน ค่าดังกล่าวหาได้จากการทดลองและเก็บข้อมูลค่าจากกระบวนการผลิต เมมเบรนที่อยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะให้ไฮเดียมไอออน และไฮโดรเนียมไอออนผ่าน แต่ไม่ให้ ไฮดรอกไซด์ไอออนผ่านเมมเบรน เพราะการผ่านของไฮดรอกไซด์ไอออน ทำให้การเปลี่ยนแปลงของไฮเดียมคลอไรด์ลดลง และจะทำให้ค่าประสิทธิภาพกระแสของกระบวนการผลิตลดลงเช่นกัน ค่าการถ่ายเทโดยมวลของน้ำผ่านเมมเบรนที่ได้จากการทำการทดลอง เกิดจากกลไกอิเล็กโตรออสโมซิสของน้ำด้านแอโนด ไปยังด้านคาโธด

ค่าการถ่ายเทไอออนผ่านเมมเบรนของไฮเดียมไอออน ค่าการถ่ายเทโดยมวลของน้ำผ่านเมมเบรน และสมการดุลมวลของระบบ สามารถใช้ทำนายกระบวนการผลิตได้ระดับหนึ่ง โดยค่าอัตราการใช้พลังงานออกจากอิเล็กโตรไลเซอร์ และค่าความเข้มข้น ที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการผลิตจริงโดยค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3.70 เปอร์เซ็นต์

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อศึกษาการต่อแบบหลายขั้นตอน จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าค่า พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ลดลงเพียง 2.97 เปอร์เซ็นต์ อาจจะเป็นเนื่องมาจากค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไม่ได้ลดลงมากในสภาวะดังกล่าว เพราะในแบบจำลองเรหาค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จากค่าความเข้มข้นของไฮเดียมไฮดรอกไซด์เท่านั้น ซึ่งความจริงแล้วค่าศักย์ไฟฟ้าอาจลดลงมากเมื่อค่าความเข้มข้นของไฮเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น

ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ในการทำนายกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ได้ในการต่อแบบขั้นตอนเดียว และในช่วงภาวะที่ทำการศึกษาเท่านั้น ในการต่อแบบหลายขั้นตอนยังไม่ทำนายผลได้ดี อาจเป็นเพราะแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ครอบคลุมในการกระทำดังกล่าว คือ เมื่อมีค่าความเข้มข้นของสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้าที่ต่ำ และความเข้มข้นของไฮเดียมไฮดรอกไซด์เข้าด้านแอโนดที่สูงซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ได้ และในแบบจำลองไม่ได้ครอบคลุมการดุลสมการมวลน้ำ ซึ่งอาจจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการต่อแบบหลายขั้นตอนได้

## ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยดังกล่าว เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งหากต้องการให้มีความครอบคลุมมากขึ้น ควรจะทำการศึกษาในภาวะอื่นๆ เช่น ผลกระทบต่อความเข้มข้น ในช่วงต่างๆ ภาวะการให้กระแสในช่วงต่างๆ ผลกระทบจากค่าความเข้มข้นของสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ซาเข้า และในแบบจำลองควรศึกษาสมการดุลมวลของน้ำของระบบ ผลกระทบจากค่าความเข้มข้นของสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ และไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้า และประสิทธิภาพกระแส การศึกษาภาวะต่างๆ ของเมมเบรนจะช่วยให้การทำนายผลทางคณิตศาสตร์มีความแม่นยำมากขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

### ความหนาแน่นที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

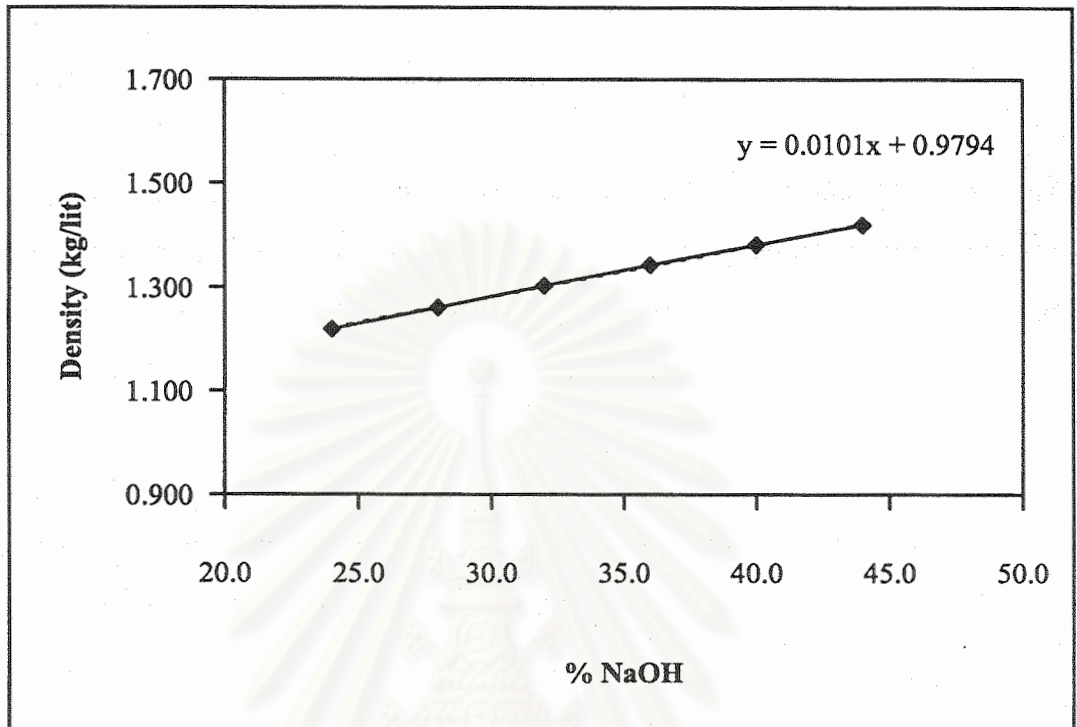
ความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นฟังก์ชัน โดยตรงกับอุณหภูมิ และความเข้มข้น ข้อมูลได้จาก Hand Book of Chemical Engineering โดยสามารถคลอไรด์เขียนความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับความเข้มข้นได้ ณ ที่อุณหภูมิ 25 และ 90 องศาเซลเซียส ได้ตามตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับความเข้มข้น ที่อุณหภูมิ 25 และ 90 องศาเซลเซียส

%NaOH	24	28	32	36	40	44
$\rho$ at 25°C	1.263	1.306	1.349	1.390	1.430	1.469
$\rho$ at 90°C	1.219	1.261	1.303	1.343	1.382	1.420

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น กับค่าความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

จากกราฟในรูปที่ 13 เราสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับความเข้มข้น ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$\rho_a \text{ at } 90^\circ\text{C} = 0.0101[\%\text{NaOH}] + 0.9794 \quad (16)$$

จากสมการที่ 16 เราจำนำไปใช้ในการคำนวณความหนาแน่น ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในด้านคาโรต เพื่อใช้ในการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

### ความหนาแน่นที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์

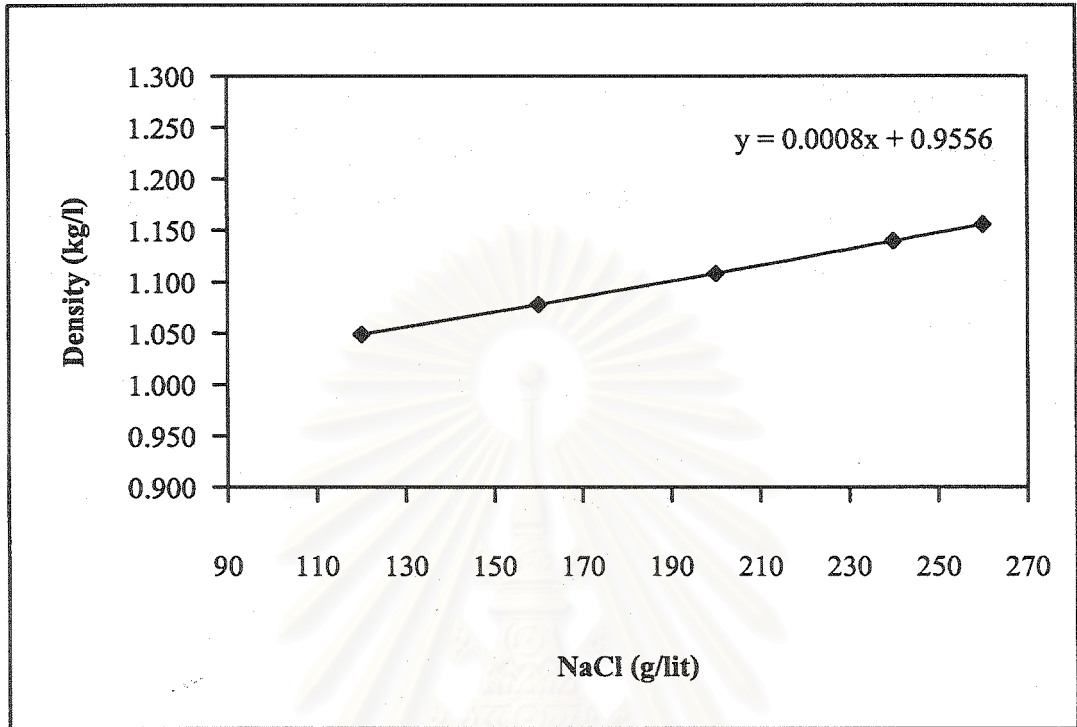
ความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นฟังก์ชัน โดยตรงกับอุณหภูมิ และความเข้มข้น ข้อมูลได้จาก Hand Book of Chemical Engineering โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ กับความเข้มข้นได้ ณ ที่อุณหภูมิ 25 และ 90 องศาเซลเซียส ได้ตามตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ กับความเข้มข้น ที่อุณหภูมิ 25 และ 90 องศาเซลเซียส

NaCl (g/lit)	120	160	200	240	260
$\rho$ at 25°C	1.0837	1.1140	1.1452	1.1778	1.1944
$\rho$ at 90°C	1.0485	1.0778	1.1082	1.1397	1.1559

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น กับค่าความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

จากกราฟในรูปที่ 14 เราสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ กับความเข้มข้น ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ได้ดังสมการข้างล่างนี้

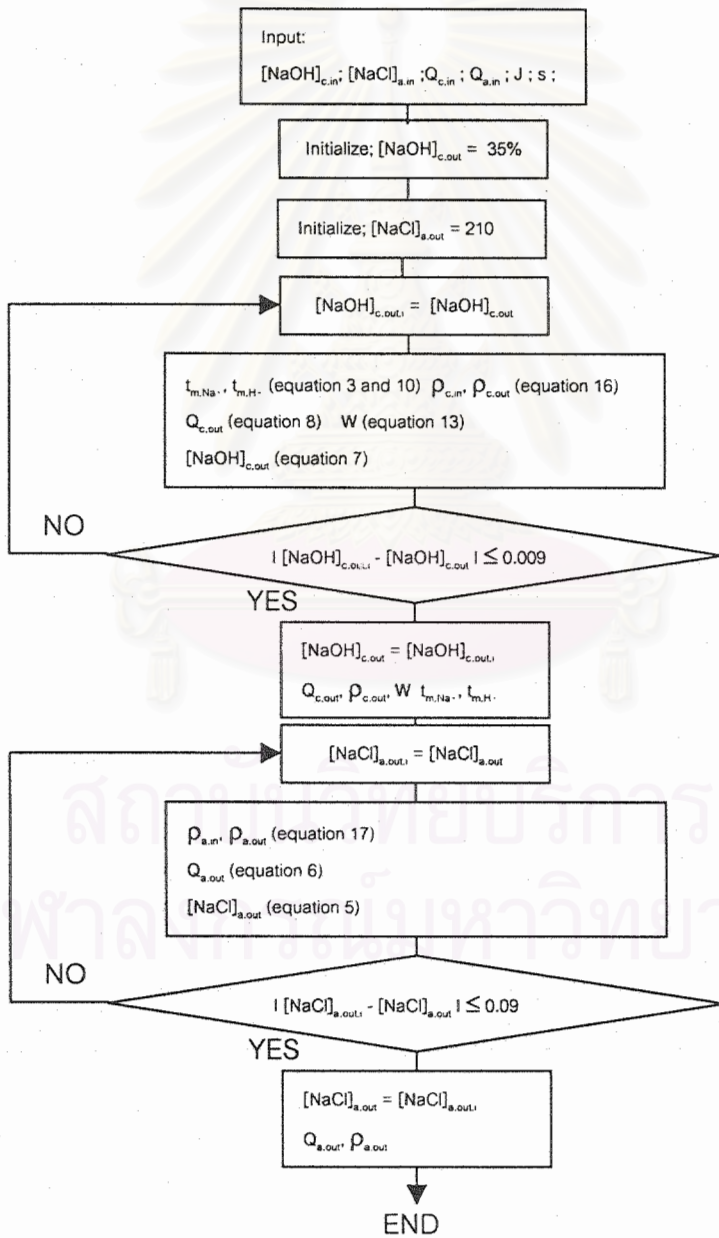
$$\rho_c \text{ at } 90^\circ\text{C} = 0.0008[\text{NaCl}] + 0.9555 \quad (17)$$

จากสมการที่ 9 เราจำนำไปใช้ในการคำนวณความหนาแน่น ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในด้านแอนด เพื่อใช้ในการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ



### ภาคผนวก ข

โปรแกรมการคำนวณของอิเล็กโทรไลเซอร์ ในการแก้สมการดุลมวลภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) ค่าที่ต้องการทราบขาเข้า คือ อัตราการไหลขาเข้า และความเข้มข้น ความหนาแน่น กระแส และพื้นที่ที่ใช้ทำปฏิกิริยา ในที่นี้ คือ 0.2 ตารางเมตร ทำการ Trial and error เพื่อหาค่า ประสิทธิภาพกระแส ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์



รูปที่ 15 แสดงการคำนวณสมการดุลมวลของอิเล็กโทรไลเซอร์

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองที่ 3.1.1 และ 3.2.1 เพื่อศึกษาค่าประสิทธิภาพกระแส และค่าความต่างศักย์ของปฏิกิริยาที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขาออกด้านแอโนด และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออกด้านคาโทด

ตารางที่ 15 แสดงผลการทดลองที่ 3.11

No	Anode			Cathode			Voltage
	$Q_{in}$	$[NaCl]_{a,out}$	$Q_{out}$	$Q_{in}$	$[NaOH]_{c,out}$	$Q_{out}$	
1	29.90	180	27.15	1.69	35	2.93	3.18
2	29.90	180	27.14	1.68	35	2.93	3.18
3	29.91	180	27.16	1.69	35	2.92	3.18
					<b>Average</b>	<b>2.93</b>	
4	30.31	200	27.55	1.72	35	2.95	3.16
5	30.31	200	27.55	1.73	35	2.95	3.16
6	30.30	200	27.56	1.72	35	2.95	3.16
					<b>Average</b>	<b>2.95</b>	
7	30.70	220	27.95	1.73	35	2.96	3.14
8	30.71	220	27.95	1.73	35	2.96	3.14
9	30.70	220	27.95	1.73	35	2.96	3.14
					<b>Average</b>	<b>2.96</b>	
10	31.10	240	28.35	1.73	35	2.96	3.12
11	31.11	240	28.36	1.73	35	2.96	3.12
12	31.11	240	28.35	1.73	35	2.96	3.12
					<b>Average</b>	<b>2.96</b>	

ตารางที่ 16 แสดงผลการทดลองที่ 3.12

No	Anode			Cathode			Voltage
	$Q_{in}$	$[NaCl]_{a,out}$	$Q_{out}$	$Q_{in}$	$[NaOH]_{c,out}$	$Q_{out}$	
1	30.70	220	27.95	2.78	25	4.01	2.96
2	30.70	220	27.95	2.78	25	4.01	2.96
3	30.70	220	27.95	2.77	25	4.00	2.96
					<b>Average</b>	<b>4.01</b>	
4	30.70	220	27.95	2.17	30	3.40	3.06
5	30.70	220	27.95	2.17	30	3.40	3.06
6	30.70	220	27.95	2.17	30	3.40	3.06
					<b>Average</b>	<b>3.40</b>	
7	30.70	220	27.95	1.73	35	2.96	3.16
8	30.71	220	27.95	1.73	35	2.96	3.16
9	30.70	220	27.95	1.73	35	2.96	3.16
					<b>Average</b>	<b>2.96</b>	
10	30.70	220	27.95	1.28	40	2.53	3.26
11	30.70	220	27.95	1.28	40	2.53	3.26
12	30.70	220	27.95	1.28	40	2.53	3.26
					<b>Average</b>	<b>2.53</b>	

ผลการทดลองที่ 3.1.2 และ 3.2.2 เพื่อศึกษาค่าประสิทธิภาพกระแส และค่าความต่างศักย์ของปฏิกิริยาที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 17 แสดงผลการทดลองที่ 3.1.2 และการทดลองที่ 3.2.2

No	Temp	Anode	Cathode	$Q_{out,c}$ (Cathode)				%CE	Voltage
		$Q_{in}$	$Q_{in}$	1	2	3	Average		
1	80	31.02	1.81	2.92	2.92	2.91	2.92	94.99%	3.30
2	82	30.96	1.80	2.93	2.93	2.93	2.93	95.43%	3.27
3	84	30.90	1.78	2.94	2.94	2.94	2.94	95.75%	3.24
4	86	30.85	1.77	2.95	2.95	2.95	2.95	96.08%	3.21
5	88	31.77	1.75	2.95	2.95	2.95	2.95	96.08%	3.19
6	90	30.71	1.73	2.96	2.96	2.96	2.96	96.41%	3.16
7	92	30.68	1.72	2.96	2.96	2.96	2.96	96.41%	3.13
8	94	30.65	1.71	2.95	2.95	2.95	2.95	96.08%	3.10

ผลการทดลองที่ 3.3 เพื่อศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรด้านแอโนด กับความหนาแน่นกระแสที่ค่าต่างๆ

ตารางที่ 18 แสดงผลการทดลองที่ 3.3

No	$I(A/m^2)$	$Q_{in,a}$	$-\Delta i/\Delta \theta$	$J_s/F$
1	3,000	27.69	2.20	22.39
2	3,200	27.78	2.40	23.88
3	3,400	27.85	2.50	25.37
4	3,600	27.96	2.75	26.87
5	3,800	28.05	2.93	28.36
6	4,000	28.17	3.02	29.85



## รายการอ้างอิง

1. J. Newman., W. Tiedemann., H. Gerischer., C. W. Tobias., *Advances in electrochemistry and electrochemical engineering*, ed., Vol. 11, New York, Wiley, 1978.
2. J. O'M. Bockris, B. E. Conway, E. Yeager, and R. E. White (ed.), *Comprehensive treatise of electrochemistry*, Vol. 2, New York, Plenum, 1981, pp. 105-166.
3. D. M. Novak, B. V. Tilak, and B. E. Conway, *Modern aspects of electrochemistry*, Vol. 14, New York, Plenum, 1982, pp. 195-318.
4. W. N. Brooks, *Chem. Brit.*, **22**, 1986, 1095.
5. S. Venkatesh and B. V. Tilak, *J. Chem. Ed.*, **60**, 1983, 276.
6. F. Hine, B. V. Tilak, and K. Viswanathan, *Modern aspects of electrochemistry*, Vol. 18, 1986, ed. R. E. White, J. O'M. Brockris, and B. E. Conway, pp. 249-302.
7. Christopher N. A. Brett and Maria O. Brett, *Electrochemistry Principles Methods and Applications*, 1993, pp. 332-351.
8. G. Kraaijeveld, V. Sumberova, S. Kuindersma, H. Wessling, *Chem. Eng. J.*, **57**, 1995, 163-176.
9. J. L. Gineste, G. Pourcelly, Y. Lorrian, F. Persin, C. Gavach, *J. Membrane Sci.*, **112**, 1996, 199-208.
10. V. I. Zabolotsky, N. D. Pismenskaya, E. V. Laktionov, and V. V. Nikonenko, *Desalination*, **107**, 1996, 245-250.
11. T. Wen, G. S. Solt, Y. F. Sun, *Desalination*, **103**, 1995, 165-176.
12. N. Boniardi, R. Rota, G. Nano, B. Mazza, *J. App. Electrochem.*, **27**, 1997, 135-145.
13. Eun Gyo Lee, S. H. Moon, Y. K. Chang, I. K. Yoo, H. N. Chang, *Journal of Membrane Science*, **145**, 1998, 53-66.
14. M. Rakib, Ph. Mocoteguy, Ph. Viers, E. Petit and G. Durand, *J. App. Electrochem.*, **29**, 1999, 1439-1448.

15. F. Delmas, *Journal de Physique IV* 4, C1, 1994, 223-232.
16. Heith B. Oldham, Jan C. Myland, *Fundamentals of Electrochemical Science*, Academic Press, Inc., New York, 1994.
17. H. L. Yeager, B. O'Dell, Z. Twardowski, *J. Electrochem. Soc.*, 129, 1982, 85-89.
18. H. L. Yeager, B. O'Dell, Z. Twardowski, *J. Electrochem. Soc.*, 129, 1982, 328-332
19. Wesselingh, J. A., Vonk, P., & Kraaileveld, G., *Chem. Engng J.*, 57, 1995, 75-89



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนเทพ วาสนาเพียรพงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2519 เป็นคนจังหวัดสมุทรสาคร หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี จาก ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ ปี 2540 ก็ได้เข้าทำงานในส่วนวิจัยและการตลาดทางด้านเคมี บริษัท เกลีสอเจอร์รี่ อินเตอร์เนชันแนล จำกัด ในกลุ่ม บริษัท อาซาฮี เคมีภัณฑ์ จำกัด ซึ่งเป็นบริษัท ทางด้านอุตสาหกรรม คลอรั-อัลคาไล หลังจากนั้น 1 ปี ได้เข้าทำการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ภาคนอกเวลาราชการ) จนกระทั่งจบการศึกษาในเดือนเมษายน ปี 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย