



การศึกษาเทคนิคใหม่ในการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริกด้วยเทคนิคอิเล็กโตรไลซิส

โดย  
วิทย์ สุนทรนันท์

โครงการวิจัยเลขที่ 154-CHEM-2541

ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

สิงหาคม 2543

ขฟ  
7ค 15  
010304



สถาบันวิจัยและพัฒนาของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ไม่รับผิดชอบ  
ต่อผลเสียใด ๆ อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสาร  
ฉบับนี้ไปใช้ ความคิดเห็นที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็น  
ของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความคิดเห็นของสถาบันฯ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาเทคนิคใหม่ในการเปลี่ยนโซเดียมซัลเฟตเป็นโซเดียม  
ไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริกด้วยเทคนิคอิเล็กโตรไลซิส



โดย

วิทย์ สุนทรนนท์  
Ph.D. (London)

โครงการวิจัยเลขที่ 154-CHEM-2541  
ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันวิทยบริการ

สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

สิงหาคม 2543

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ทำการศึกษาแนวทางในการปรับปรุงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์ไฟฟ้าด้านแคโทดเพื่อลดศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกโซเดียมซัลเฟตโดยเทคนิคอิเล็กโทรไลซิสที่ใช้เยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์ ด้วยการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่สารละลายด้านแคโทดในรูปของออกซิเจนที่ละลายเพื่อเปลี่ยนปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำให้เป็นปฏิกิริยาการรวมตัวของน้ำและก๊าซออกซิเจน เซลล์ไฟฟ้าได้ถูกจัดสร้างขึ้นและทำการทดลองหาสภาวะการดำเนินการแยกที่เหมาะสม โดยพิจารณาความเข้มข้นของสารละลายทั้งด้านแอโนดและแคโทด และค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของสารละลายด้านแอโนดไม่ควรต่ำกว่า 1 นอร์มัลและความเข้มข้นของสารละลายด้านแคโทดไม่ควรต่ำกว่า 0.2 นอร์มัล ในขณะที่กระแสไฟฟ้าไม่ควรต่ำกว่า 1 แอมแปร์ ผลการศึกษาในส่วนของ การเติมก๊าซออกซิเจนเข้าสู่สารละลายด้านแคโทดที่ค่าต่าง ๆ คือ 10.5, 13.3 และ 16.0 มก./ล. ซึ่งไม่พบการลดลงที่ชัดเจนของค่าความต่างศักย์แต่อย่างใด ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลจากการที่ปริมาณของออกซิเจนที่ละลายนั้นน้อยเกินกว่าที่ปฏิกิริยาการรวมตัวของก๊าซออกซิเจนกับน้ำจะมีผลที่เด่นชัดเหนือปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำตามปกติ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่	จท
	๐๕๑๕
เลขทะเบียน	๐๑๐๓๐๔
วัน,เดือน,ปี	12 ม.ค. 44

## **Abstract**

This research concerns the study of the improvement of the electrochemical reactions at the cathode via an addition of oxygen in the form of dissolved oxygen into the solution at the cathodic side in achieving lower cell voltage for the separation of sodium sulphate solution using electrolysis technique with cation-exchange membrane. The purpose of oxygen addition is to replace the decomposition reaction of water by the combination of water and oxygen. The electrolysis cell was constructed and proper separating conditions were determined upon considering the concentrations of anodic and cathodic solutions and the current level employed. It was found that the concentration of anodic and cathodic solutions should not be lower than 1 and 0.2 N respectively while the current level should not fall below 1 A. The results of the experiments involving added oxygen at 10.5, 13.3 and 16.0 mg/l do not show any significant reduction of the cell voltage. This is probably because the amount of dissolved oxygen is too low to yield a significant proportion of the combination reaction of water and oxygen in comparison to the decomposition reaction of water.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้รับการสนับสนุน  
ด้านสถานที่และสาธารณูปโภคจากภาควิชาวิศวกรรมเคมี นอกจากนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบริษัท ไทยอາซียี  
เคมีภัณฑ์ จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เยื่อแผ่นที่ใช้ตลอดการวิจัยนี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
รายชื่อตาราง	ง
รายชื่อรูป	จ
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 งานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง	1
1.3 วัตถุประสงค์	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
2. ทฤษฎี	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแยกโซเดียมซัลเฟตด้วยเยื่อแผ่น	6
2.3 การปรับปรุงปฏิกิริยาด้านแคโทดด้วยการเติมก๊าซออกซิเจน	8
3. วิธีการทำวิจัย	10
4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	12
4.1 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	12
4.2 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมเซลล์	14
4.3 อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อการแยกโซเดียมซัลเฟต	18
4.4 หมายเหตุสำหรับการทดลองป้อนสารละลายโซเดียมซัลเฟตแบบต่อเนื่อง	24
4.5 อิทธิพลของการเติมออกซิเจนต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมเซลล์	24
5. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ	28
6. เอกสารอ้างอิง	29

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายชื่อตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
ตารางที่ 1	จำนวนโมลของโปรตอนและอิเล็กตรอนเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 180 นาที	13
ตารางที่ 2	อัตราการใช้พลังงานในการแยกที่กระแสไฟฟ้าค่าต่าง ๆ	22



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายชื่อรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 1	โครงสร้างของเยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์	5
รูปที่ 2	ลักษณะโครงสร้างของอิเล็กโทรดที่ช่วยในการถ่ายเทฟองก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	6
รูปที่ 3	ปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมีในการแยกโซเดียมซัลเฟตโดยใช้เยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์	7
รูปที่ 4	ปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการเติมก๊าซออกซิเจนในการแยกโซเดียมซัลเฟตโดยใช้เยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์	8
รูปที่ 5	โครงสร้างของอุปกรณ์แยกสารละลายโซเดียมซัลเฟต	11
รูปที่ 6	เซลล์ไฟฟ้า	11
รูปที่ 7	ผลของความเข้มข้นของสารละลายต่อค่าความต่างศักย์คร่อมเซลล์ไฟฟ้า	14
รูปที่ 8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ของสารละลายด้านแคโทด	15
รูปที่ 9	การเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายด้านแคโทด	16
รูปที่ 10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายด้านแคโทดในกรณีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายด้านแคโทดต่ำมาก ๆ	16
รูปที่ 11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายด้านแคโทดในกรณีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายด้านแคโทดสูง ๆ	17
รูปที่ 12	อัตราการเพิ่มของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดที่กระแสไฟฟ้าค่าต่าง ๆ	18
รูปที่ 13	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่แคโทด ณ เวลา 180 นาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ	19
รูปที่ 14	อัตราการเพิ่มของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดที่กระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 5 แอมแปร์ แต่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายด้านแอโนด	19
รูปที่ 15	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่เวลาและค่ากระแสต่าง ๆ	20
รูปที่ 16	ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า ณ เวลา 180 นาทีที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ	21
รูปที่ 17	อัตราการใช้พลังงานในการแยกที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ	23
รูปที่ 18	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า	24
รูปที่ 19	ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดลองที่กระแสคงที่ 5 แอมแปร์ และในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายด้านแคโทดต่าง ๆ กัน	25
รูปที่ 20	ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดลองที่กระแสคงที่ 2 แอมแปร์ และในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายด้านแคโทดต่าง ๆ กัน	25
รูปที่ 21	ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดลองที่กระแสคงที่ 1 แอมแปร์ และในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายด้านแคโทดต่าง ๆ กัน	26
รูปที่ 22	ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดลองที่กระแสคงที่ 0.5 แอมแปร์ และในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายด้านแคโทดต่าง ๆ กัน	26



## 1. บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

สารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการใช้สารละลายกรดซัลฟูริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ อุตสาหกรรมกระดาษเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมทำแบตเตอรี่รถยนต์ เป็นต้น ถึงแม้ว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วดังกล่าวจะมีสภาพที่เป็นกลาง แต่ปริมาณความเข้มข้นที่สูงของโซเดียมซัลเฟตอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะระบบนิเวศทางน้ำที่เป็นแหล่งน้ำจืด ปัจจุบันปัญหาของเกลือไม่ว่าจะอยู่ในรูปของโซเดียมซัลเฟตหรือโซเดียมคลอไรด์จัดเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการอุตสาหกรรม ซึ่งแนวทางดั้งเดิมในการจัดการคือการแยกน้ำและเกลือโซเดียมออกจากกันด้วยการระเหย แต่วิธีการดังกล่าวจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงมาก ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีเยื่อแผ่นได้รับการพัฒนาขึ้น เทคนิครีเวอร์สออสโมซิสได้ถูกนำมาใช้งาน หากแต่เทคนิคดังกล่าวมีข้อจำกัดในการใช้กับระบบที่มีความเข้มข้นของเกลือสูง เนื่องจากเยื่อแผ่นอาจเกิดการอุดตันและแรงดันที่ใช้อาจสูงมาก<sup>1</sup> เยื่อแผ่นที่ใช้จึงต้องมีความแข็งแรงและทนความดันสูงซึ่งยากต่อการออกแบบและบำรุงรักษา เทคนิคการแยกเกลือโซเดียมด้วยไฟฟ้าใช้เยื่อแผ่นร่วมด้วยจึงได้รับการพัฒนาโดยมีต้นแบบจากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสที่ใช้ในการแยกเกลือโซเดียมคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเพื่อผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์และก๊าซคลอรีน โดยมีข้อได้เปรียบเหนือวิธีรีเวอร์สออสโมซิสในด้านการอุดตันของเยื่อแผ่นเกิดขึ้นน้อย ไม่ต้องทำการบำรุงรักษาบ่อย และสามารถใช้เยื่อแผ่นที่มีความแข็งแรงต่ำได้ อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายในส่วนของพลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักในการดำเนินการของเซลล์อิเล็กโทรไลซิส งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งทำการศึกษาเทคนิคใหม่ในการลดพลังงานที่จำเป็นในการแยกสารละลายโซเดียมซัลเฟตด้วยการปรับปรุงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทางด้านแคโทดเพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ต่ำลง

### 1.2 การวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ในการแยกสารละลายโซเดียมซัลเฟตด้วยเทคนิคอิเล็กโทรไลซิสโดยใช้เยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนเอกซ์เชนจ์<sup>2</sup> ได้ถูกศึกษาโดย A.D.Martin<sup>2</sup> ในความพยายามที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้กระแส ซึ่งในการศึกษาก่อนหน้า<sup>3</sup> พบว่าความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้านแอโนดมีผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพการใช้กระแส โดยในงานวิจัยดังกล่าวของ A.D.Martin สารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ป้อนเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าในส่วนแอโนดจะมีความเข้มข้นสูงกว่าค่าการละลายสูงสุดของโซเดียมซัลเฟตในน้ำ (ในระดับ 30 ถึง 32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ทั้งนี้โดยการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายดังกล่าวในปริมาณ 5 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพื่อเพิ่มค่าการละลายของโซเดียมซัลเฟต<sup>4</sup> ซึ่งได้พบว่าการแยกโซเดียมซัลเฟตในสภาวะดังกล่าวและใช้อุณหภูมิสูงเป็นผลให้สามารถคงประสิทธิภาพการใช้กระแสไม่ให้อ่อนตัวลงตามความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เพิ่มขึ้นได้

J. Jorissen และ K. H. Simmrock<sup>5</sup> ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้กระแสสำหรับการอิเล็กโทรไลซิสของสารละลายโซเดียมซัลเฟต และพบว่าในสภาวะที่รักษาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ด้านแคโทดให้คงที่ จะมีความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในด้านแอโนดค่าหนึ่งซึ่งประสิทธิภาพการใช้กระแสจะเริ่มลดต่ำลง และในทางกลับกันหากคงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกทางด้านแอโนดไว้ที่ค่า ๆ หนึ่ง จะมีความเข้มข้นวิกฤติของโซเดียมไฮดรอกไซด์ค่าหนึ่งซึ่งหากความเข้มข้นสูงกว่าค่าดังกล่าวแล้ว ประสิทธิภาพการใช้

กระแสจะเริ่มลดต่ำลง โดยผู้วิจัยได้เสนอแนวคิดในการอธิบายโดยพิจารณาสมมูลของโปรตอน (ประจุบวก) และไฮดรอกไซด์ไอออน (ประจุลบ) ทางด้านแอนโอดและแคโทดตามลำดับ กล่าวคือในสถานะที่ประจุในเซลล์ด้านใดมากกว่าอีกด้านหนึ่งมาก ๆ โอกาสที่ประจุด้านที่มีปริมาณมากกว่าจะถ่ายเทข้ามเยื่อแผ่นจะมีมาก และนำมาซึ่งการลดลงของประสิทธิภาพการใช้กระแส

การแยกสารละลายโซเดียมซัลเฟตด้วยไฟฟ้าสามารถกระทำได้โดยใช้อีกเทคนิคหนึ่งที่คล้ายคลึงกับอิเล็กโทรไลซิสคือ เทคนิคอิเล็กโทรไดอะไลซิสซึ่งแบ่งเซลล์ไฟฟ้าออกเป็นสามส่วนที่คั่นกลางด้วยเยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนและแอนไอออนเอ็กซ์เชนจ์ สารละลายโซเดียมซัลเฟตถูกป้อนเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าในส่วนตรงกลาง โซเดียมไอออนและซัลเฟตไอออนจะถูกแรงขับทางไฟฟ้าส่งให้เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นแคทไอออนและแอนไอออนเอ็กซ์เชนจ์เข้าสู่ส่วนแคโทดและแอนโอดตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริกที่มีความบริสุทธิ์สูง G. S. Trivedi และคณะ<sup>6</sup> พบว่าความบริสุทธิ์ของกรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้อาจสูงถึง 96 และ 81.9 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับโดยมีประสิทธิภาพการใช้กระแสเฉลี่ยประมาณ 75.8 เปอร์เซ็นต์

ในส่วนของการประยุกต์หลักการที่กล่าวมาข้างต้นในเชิงอุตสาหกรรม R. Thompson และคณะ<sup>7</sup> ได้ทำการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเทคนิคอิเล็กโทรไลซิสในการแยกสารละลายโซเดียมซัลเฟตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของการผลิตคลอรีนไดออกไซด์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เพื่อผลิตเป็นกรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคอิเล็กโทรไลซิสกับอิเล็กโทรไดอะไลซิส พบว่าระยะเวลาคืนทุนของเทคนิคอิเล็กโทรไลซิสจะสั้นกว่าเทคนิคอิเล็กโทรไดอะไลซิส ซึ่งในการคำนวณดังกล่าวได้พิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้คือ ราคาของโซเดียมไฮดรอกไซด์ กำลังการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ อายุการใช้งานของเยื่อแผ่น ประสิทธิภาพการใช้กระแส ต้นทุนด้านพลังงาน และการใช้ประโยชน์ที่ได้จากสารละลายกรดเจือจาง

และเพื่อให้การใช้งานมีความสะดวกยิ่งขึ้นในการหาสถานะการดำเนินงานที่เหมาะสม S. J. Parulekar<sup>8</sup> ได้นำเสนอโมเดลที่ใช้คำนวณกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการอิเล็กโทรไลซิสแบบกะ โดยพิจารณาอัตราการใช้พลังงานเป็นหลักสำหรับการดำเนินงานในหารูปแบบคือ กระแสคงที่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ กระแสคงที่ตามด้วยความต่างศักย์คงที่ ความต่างศักย์คงที่ตามด้วยกระแสคงที่ และกระแสและความต่างศักย์เปลี่ยนไปตามเวลา

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมด ปัจจัยหลักที่เป็นอุปสรรคต่อการใช้งานของเทคนิคอิเล็กโทรไลซิสยังคงอยู่ที่ปริมาณพลังงานที่ใช้ต่อหน่วยการแยกซึ่งอาจทำให้ไม่เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ H. Von Plessen และคณะ<sup>9</sup> พบว่าอัตราการใช้พลังงานที่สูงนั้น มีสาเหตุประการหนึ่งจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นทั้งด้านแอนโอดและแคโทดซึ่งได้ก๊าซออกซิเจนและไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่ไม่ต้องการ H. Von Plessen และคณะได้เสนอแนวทางในการลดพลังงานที่ไม่จำเป็นดังกล่าวโดยการใช้ออกซิเจนแคโทดเพื่อเปลี่ยนปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้านแคโทดจากการแตกตัวของน้ำให้ก๊าซออกซิเจน เป็นการรวมตัวของก๊าซออกซิเจนและน้ำแทน อย่างไรก็ตาม การใช้ออกซิเจนแคโทดมีข้อจำกัดอยู่ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในเรื่องของการกัดกร่อนของวัสดุในเซลล์ไฟฟ้าด้านแคโทดอันมีสาเหตุจากการออกซิเดชัน ดังเช่นที่พบในการใช้เทคนิคอิเล็กโทรไลซิสเพื่อผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์<sup>10</sup> การออกซิเดชันดังกล่าวไม่ได้เกิดจากก๊าซออกซิเจนที่ป้อนเข้าสู่ขั้วแคโทดเพียงอย่างเดียว แต่เป็นผลจากผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาร่วมคือ เปอร์ไฮดรอกซิลไอออนด้วย งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาหลักการลดพลังงานที่ใช้โดยปรับปรุงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้านแคโทดโดยอาศัยหลักการที่นำเสนอโดย H. Von Plessen และคณะ<sup>9</sup> แต่จะใช้ก๊าซออกซิเจนใน

ปริมาณต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการกัดกร่อนของวัสดุภายในเซลล์ด้านแคโทด โดยการป้อนออกซิเจนสู่เซลล์ด้านแคโทด ในรูปของออกซิเจนที่ละลายแทนการป้อนก๊าซเข้าสู่เซลล์โดยตรง

### 1.3 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการวิจัยคือ การปรับปรุงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสารละลายโซเดียมซัลเฟตให้เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟูริกด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิสที่ใช้เยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์ โดยลดพลังงานที่ใช้ต่อหน่วยโซเดียมซัลเฟตที่แยกได้ด้วยการปรับเปลี่ยนปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วแคโทดด้วยการเติมก๊าซออกซิเจนเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าด้านแคโทดในรูปของออกซิเจนที่ละลาย (Dissolved oxygen)

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. จัดสร้างเซลล์ไฟฟ้าสำหรับการแยกสารละลายโซเดียมซัลเฟตด้วยเทคนิคอิเล็กโทรไลซิสที่ใช้เยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์
2. ศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเซลล์ไฟฟ้าที่จัดสร้าง
3. ศึกษาผลของออกซิเจนที่ละลายในสารละลายด้านแคโทดต่อพลังงานที่ใช้ในการแยกโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่กระแสคงที่

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2. ทฤษฎี

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคอิเล็กโทรไลซิส

การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะเกิดจากการจ่ายและรับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าของสารละลายที่ล้อมรอบขั้วไฟฟ้านั้น ๆ โดยไอออนที่มีประจุลบในสารละลายจะถูกขับเคลื่อนด้วยแรงขับเคลื่อนไฟฟ้าให้เคลื่อนเข้าหาขั้วไฟฟ้าบวกหรือแอโนด (Anode) ซึ่งที่ขั้วแอโนดนี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยไอออนดังกล่าวจะถ่ายเทอิเล็กตรอนแก่ขั้วแอโนด ในขณะเดียวกัน ที่ขั้วไฟฟ้านลบหรือแคโทด (Cathode) ไอออนที่มีประจุบวกจะเคลื่อนเข้าหาและรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด อันเป็นปฏิกิริยารีดักชัน จากปรากฏการณ์ดังกล่าว กระแสไฟฟ้าจะวิ่งครบวงจรโดยอิเล็กตรอนจะวิ่งในวงจรไฟฟ้าจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด และการเคลื่อนที่ของไอออนบวกและลบในสารละลายจะเป็นการเชื่อมวงจรของอิเล็กตรอนในส่วนของเซลล์ไฟฟ้า

อย่างไรก็ดี ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันอาจไม่จำเป็นต้องเกิดการจากจ่ายอิเล็กตรอนและการรับอิเล็กตรอนของไอออนเท่านั้น แต่ยังสามารถเกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ไอออน เช่น น้ำ ก๊าซออกซิเจน ก๊าซไฮโดรเจน โลหะต่าง ๆ เช่น ทองแดง ตะกั่ว เหล็ก ฯลฯ โดยที่ปฏิกิริยาต่าง ๆ เหล่านี้มีศักย์ไฟฟ้าในการเกิดขึ้นแตกต่างกันออกไปตามชนิดขององค์ประกอบ การเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าง่าย ๆ จะใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการรีดักชันของโปรตอน (ดูสมการ (1) ประกอบ) เป็นเกณฑ์ โดยกำหนดให้ปฏิกิริยารีดักชันของโปรตอนมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์



เซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วน ได้แก่ ตัวแบ่งแยกเซลล์ (Cell separator) และอิเล็กโทรด (Electrode)

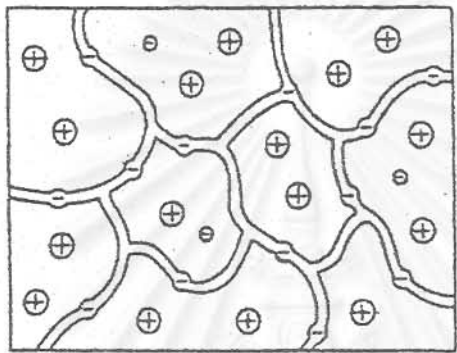
#### (1) ตัวแบ่งแยกเซลล์

ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี บ่อยครั้งที่มีความจำเป็นต้องแยกเอาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้านแอโนดและแคโทดออกจากกัน เพื่อให้ได้สัดส่วนหรือความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น หรืออาจจะด้วยเหตุผลด้านความปลอดภัยในการดำเนินการ

วัสดุที่ใช้เป็นตัวแบ่งแยกเซลล์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 2 ประเภทด้วยกัน คือ ไดอะแฟรม (Diaphragm) และเยื่อแผ่น (Membrane) โดยไดอะแฟรมจะทำหน้าที่กั้นมิให้สารละลายและก๊าซที่เกิดขึ้นทางด้านแอโนดและแคโทดมาผสมกัน แต่มีสมบัติในการยอมให้ไอออนทุกชนิดเคลื่อนผ่านได้ (เพื่อรักษาสภาพการนำไฟฟ้าของเซลล์) แต่สำหรับเยื่อแผ่น นอกจากจะทำหน้าที่เหมือนกับไดอะแฟรมในการแยกสารละลายทั้งสองด้านออกจากกันเช่นเดียวกับไดอะแฟรมแล้ว เยื่อแผ่นยังทำหน้าที่คัดเลือกชนิดของสารที่จะเคลื่อนที่ผ่านได้อีกด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อแผ่น

เยื่อแผ่นมีด้วยกันหลายชนิดได้แก่ เยื่อแผ่นชนิดไมโครพอร์ัส (Microporous membrane) เยื่อแผ่นชนิดที่เป็นของเหลว (Liquid membrane) และเยื่อแผ่นชนิดไอออนเอ็กซ์เชนจ์ (Ion-exchange membrane)

เป็นต้น สำหรับกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสจะใช้เยื่อแผ่นชนิดไอออนเอ็กซ์เชนจ์เป็นตัวแบ่งแยกเซลล์ และทำหน้าที่คัดเลือกสารที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นตามชนิดของประจุในสารละลาย เยื่อแผ่นที่ยอมให้ไอออนที่มีประจุบวกเคลื่อนผ่านเรียกว่า เยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์ (Cation exchange membrane) โดยความสามารถในการกีดกันไอออนที่มีประจุลบมิให้เคลื่อนผ่านเยื่อแผ่นเกิดขึ้นจากประจุลบถาวรบนโครงสร้างของเยื่อแผ่น (ดูรูปที่ 1 ประกอบ) ซึ่งประจุลบบนโครงสร้างของเยื่อแผ่นนี้จะทำหน้าที่ผลักดันไอออนที่มีประจุลบในสารละลาย และดึงดูดไอออนที่มีประจุบวก ในทางกลับกัน เยื่อแผ่นที่ยอมให้ไอออนที่มีประจุลบเคลื่อนผ่านเรียกว่า เยื่อแผ่นชนิดแอนไอออนเอ็กซ์เชนจ์ (Anion exchange membrane) ซึ่งมีประจุบวกถาวรอยู่บนโครงสร้างของเยื่อแผ่นทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนผ่านของไอออนที่มีประจุบวกในสารละลาย



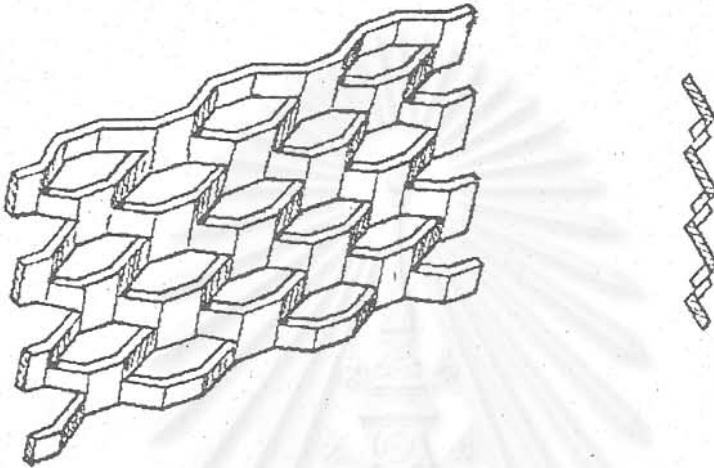
รูปที่ 1 โครงสร้างของเยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์<sup>11</sup>

เนื่องจากเยื่อแผ่นเป็นส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้าซึ่งคั่นกลางวงจรการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า สมบัติที่จำเป็นสำหรับการคัดเลือกเยื่อแผ่นจึงได้แก่ ความต้านทานไฟฟ้าต่ำ (เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียของกำลังงานไฟฟ้าจากความต้านทานของเยื่อแผ่นเอง) ความสามารถในการเลือกผ่านสูง (ยอมให้ไอออนที่ต้องการเคลื่อนผ่านไปได้โดยมีแรงต้านการเคลื่อนผ่านน้อยที่สุด ในขณะที่ก่อกำเนิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดที่ไม่ต้องการสูงสุด) ความทนทานเชิงกล ความทนทานต่อสารเคมี (ควรทนทั้งสภาวะที่เป็นกรดและเบส เนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นอาจทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดในเซลล์ด้านหนึ่ง และมีความเป็นเบสในเซลล์อีกด้านหนึ่ง) และทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

### (2) อิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์ไฟฟ้าตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องมีสมบัติต่างๆ ดังนี้คือ ความทนทานต่อสารเคมี ความสามารถทนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (เนื่องจากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสอาจก่อให้เกิดความร้อนหรือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอันมีสาเหตุจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ) ความต้านทานต่ำ และที่สำคัญที่สุดคือความเฉื่อยต่อปฏิกิริยา โดยเฉพาะอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นขั้วแอโนด (เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แอโนดคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงเป็นการง่ายที่โลหะที่ใช้ทำอิเล็กโทรดจะถูกออกซิไดซ์และเปลี่ยนสภาพเป็นไอออนละลายเข้าสู่สารละลาย) ในปัจจุบัน อิเล็กโทรดที่ใช้เป็นแอโนดมักทำจากโลหะแพลตินัมเคลือบด้วย RuO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> หรือที่เรียกว่า DSA (Dimensionally Stable Anode) ซึ่งได้รับการยอมรับในด้านความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง

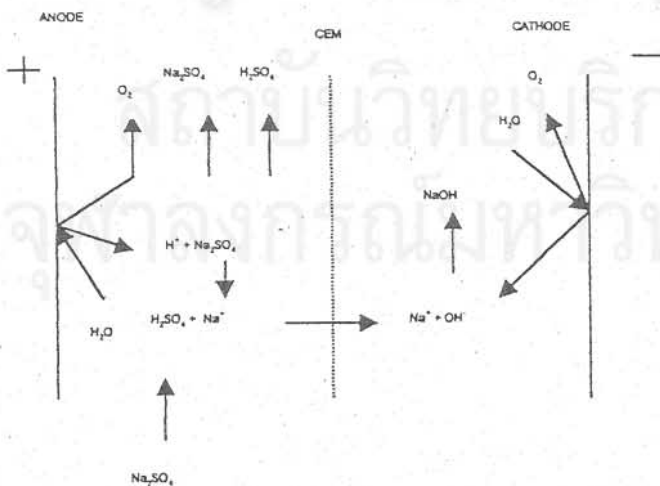
โครงสร้างของแผ่นอิเล็กโทรดเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณา โดยเฉพาะในกรณีที่เกิดชั้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่อิเล็กโทรดนั้น ๆ อยู่ในรูปของก๊าซ เนื่องจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายและลดพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่อิเล็กโทรดลดลง รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างของลักษณะโครงสร้างของแผ่นอิเล็กโทรดที่ช่วยให้เกิดการถ่ายเทฟองก๊าซออกจากอิเล็กโทรดได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างของอิเล็กโทรดที่ช่วยในการถ่ายเทฟองก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี<sup>12</sup>

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแยกโซเดียมซัลเฟตด้วยเยื่อแผ่น

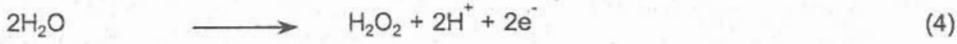
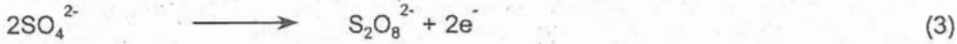
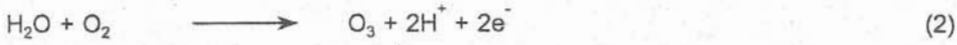
สำหรับเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้เยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์ สารละลายโซเดียมซัลเฟตจะถูกป้อนเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าทางด้านแอโนด และด้วยแรงขับทางไฟฟ้า โซเดียมไอออนจะเคลื่อนผ่านเยื่อแผ่นไปยังสารละลายด้านแคโทดซึ่งคือน้ำ เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบในสารละลายด้านแคโทดและแอโนดแล้วจะพบว่าปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่อาจเกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าทั้งสองส่วนมีดังนี้ (ดูรูปที่ 3 ประกอบ)



รูปที่ 3 ปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมีในการแยกโซเดียมซัลเฟตโดยใช้เยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์

## (1) ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีด้านแอโนด

เป็นปฏิกริยาออกซิเดชัน



ซึ่งมีศักย์รีดักชันมาตรฐานเท่ากับ +2.07 โวลต์, +2.05 โวลต์, +1.78 โวลต์ และ +1.23 โวลต์ตามลำดับ (หมายเหตุ สำหรับปฏิกริยาออกซิเดชัน ศักย์รีดักชันมาตรฐานที่เป็นบวกน้อยกว่าจะมีแนวโน้มการเกิดปฏิกริยาได้ง่ายกว่า) ดังนั้นปฏิกริยาที่จะพบเป็นลำดับแรกที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำคือปฏิกริยาตามสมการที่ (5) ซึ่งเป็นการแตกตัวของน้ำ โดยมีผลิตภัณฑ์ของปฏิกริยา คือ ก๊าซออกซิเจน และโปรตอน

ที่ศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น เราอาจพบปฏิกริยาที่ (4), (3) และ (2) ตามลำดับ โดยต่างเป็นปฏิกริยาจ่ายอิเล็กตรอนแก่แอโนดและให้โปรตอนเป็นผลิตภัณฑ์ยกเว้นสมการ (3) ซึ่งอิเล็กตรอนที่จ่ายออกเกิดจากการเปลี่ยนรูปของซัลเฟตไอออนเป็นไฮโอซัลเฟตไอออน ส่วนปฏิกริยาที่ (2) ต้องอาศัยก๊าซออกซิเจนที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกริยาที่ (5) ร่วมในปฏิกริยาด้วย (ปฏิกริยา (5) ย่อมเกิดก่อนปฏิกริยา (2) ไม่ว่าจะในกรณีใดก็ตาม)

เมื่อจ่ายกระแสไฟแก่เซลล์ไฟฟ้า ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นที่แอโนดจะก่อให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารละลายด้านแอโนดเข้าสู่วงจรไฟฟ้า ในเวลาเดียวกัน จะเกิดการถ่ายเทไอออนที่มีประจุบวกข้ามเยื่อแผ่นไปยังเซลล์ด้านแคโทดโดยมีจำนวนประจุที่ถ่ายเทข้ามเยื่อแผ่นเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทจากสารละลายเข้าสู่วงจรไฟฟ้าเนื่องจากปฏิกริยา ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่โซเดียมซัลเฟตแตกตัว และโซเดียมไอออนจำนวน 1 โมลเคลื่อนผ่านเยื่อแผ่น ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นก็จะเป็นการจ่ายอิเล็กตรอน 1 โมลจากสารละลายแก่แอโนด หากปฏิกริยาที่เกิดขึ้นคือปฏิกริยาที่ (5) ผลิตภัณฑ์ของปฏิกริยา คือ โปรตอนจะรวมตัวกับซัลเฟตไอออน (ส่วนที่โซเดียมแตกตัวออกไป) เกิดเป็นกรดซัลฟูริกในจำนวนโมลที่เท่ากับโซเดียมซัลเฟตที่แตกตัวไป หากประจุที่เคลื่อนผ่านเยื่อแผ่นมีโปรตอนร่วมด้วย ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีจะจ่ายอิเล็กตรอนเท่ากับจำนวนประจุของโซเดียมและโปรตอนที่เคลื่อนผ่านเยื่อแผ่น ซึ่งหมายความว่ากระแสที่เกิดขึ้นจะมากกว่าในกรณีแรก (ที่มีเพียงโซเดียมไอออนเคลื่อนผ่านเยื่อแผ่น) สำหรับการผลิตกรดซัลฟูริกในปริมาณที่เท่ากัน ประสิทธิภาพของการใช้กระแสในกรณีหลังจึงต่ำกว่าในกรณีแรก

## (2) ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีด้านแคโทด

เป็นปฏิกริยารีดักชัน



ซึ่งมีศักย์รีดักชันมาตรฐานเท่ากับ -0.83 โวลต์ และ -2.71 โวลต์ตามลำดับ (หมายเหตุ สำหรับปฏิกริยารีดักชัน ศักย์รีดักชันมาตรฐานที่เป็นลบน้อยกว่าจะมีแนวโน้มการเกิดปฏิกริยาได้ง่ายกว่า) ดังนั้นปฏิกริยาที่จะพบเป็น

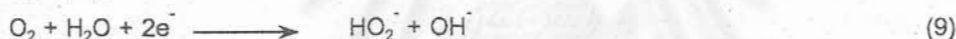


ลำดับแรกที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำคือปฏิกิริยาตามสมการที่ (6) ซึ่งเป็นการแตกตัวของน้ำ โดยมีผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาคือ ก๊าซไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ไอออน ส่วนปฏิกิริยาที่ (7) จะมีโอกาสในการเกิดขึ้นได้น้อยมาก ดังนั้นโซเดียมไอออนที่ถูกถ่ายเทข้ามเยื่อแผ่นจากเซลล์ด้านแอโนดจะเกิดการรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนในเซลล์ด้านแคโทดนี้เกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นสามารถถูกแรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าให้เคลื่อนผ่านเยื่อแผ่นสวนทางกับการเคลื่อนที่ของโปรตอนและโซเดียมไอออนไปยังด้านแอโนด ผลที่เกิดขึ้นก็คือประสิทธิภาพการใช้กระแสจะต่ำลง เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนเมื่อเข้าไปอยู่ในเซลล์ด้านแอโนดแล้ว จะรวมตัวกับโปรตอนเกิดเป็นน้ำ และเกิดการสูญเสียของกระแสไปกับทั้งปฏิกิริยาเกิดโปรตอนด้านแอโนดและปฏิกิริยาเกิดไฮดรอกไซด์ไอออนด้านแคโทด

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยารวมทั้งเซลล์ไฟฟ้าแล้วจะพบว่า ศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดที่จะทำให้เกิดการแยกโซเดียมซัลเฟตคือ 2.06 โวลต์ โดยเกิดปฏิกิริยาที่ (5) ด้านแอโนดและปฏิกิริยาที่ (6) ด้านแคโทด

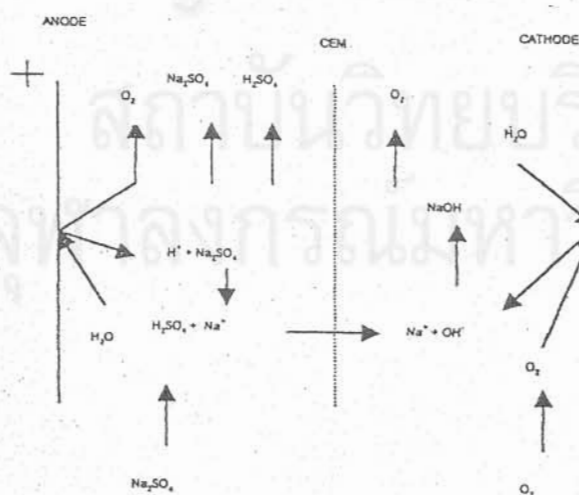
### 2.3 การปรับปรุงปฏิกิริยาด้านแคโทดด้วยการเติมก๊าซออกซิเจน

หากทำการเติมก๊าซออกซิเจนเข้าที่เซลล์ด้านแคโทด ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่อาจเกิดขึ้นเพิ่มเติมจากสมการที่ (6) และ (7) มีดังนี้ (ดูรูปที่ 4 ประกอบ)



ซึ่งมีศักย์รีดักชันมาตรฐานเท่ากับ +0.40 โวลต์และ -0.08 โวลต์ตามลำดับ

จะพบว่าทั้งปฏิกิริยาที่ (8) และ (9) ต่างต้องการศักย์ไฟฟ้าในการเกิดต่ำกว่าปฏิกิริยาการเกิดก๊าซไฮโดรเจนตามสมการที่ (6) ดังนั้น โดยการปรับปรุงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้านแคโทดให้เปลี่ยนจากปฏิกิริยาตามสมการที่ (6) เป็นสมการที่ (8) จะลดความต่างศักย์ต่ำสุดในการแยกโซเดียมซัลเฟตลงให้เหลือเพียง 0.83 โวลต์



รูปที่ 4 ปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการเติมก๊าซออกซิเจนในการแยกโซเดียมซัลเฟตโดยใช้เยื่อแผ่นชนิดแคโทดไอออนเอ็กซ์เชนจ์

นอกจากการปรับเปลี่ยนปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาตามสมการที่ (8) จะลดศักย์ไฟฟ้าที่ใช้แล้ว ยังเป็นการลดการเกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของก๊าซด้วย ซึ่งจะช่วยให้การนำไฟฟ้าในสารละลายบริเวณของอิเล็กโทรดดีขึ้น

อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถดำเนินการแยกโซเดียมซัลเฟตโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดได้ เนื่องจากมีความต้านทานกระแสไฟฟ้าในหลายจุด เช่น ในวงจรไฟฟ้า ที่อิเล็กโทรด ในสารละลาย และที่เยื่อแผ่น ซึ่งทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่จำเป็นต้องใช้ในการแยกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังเป็นการง่ายที่จะเกิดปฏิกิริยา (8) และ (9) ร่วมกัน ทำให้ผลิตภัณฑ์ร่วมที่เกิดจากสมการ (9) คือเปอร์ไฮดรอกซิลไอออนซึ่งมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ทำการกัดกร่อนวัสดุในเซลล์ด้านแคโทด

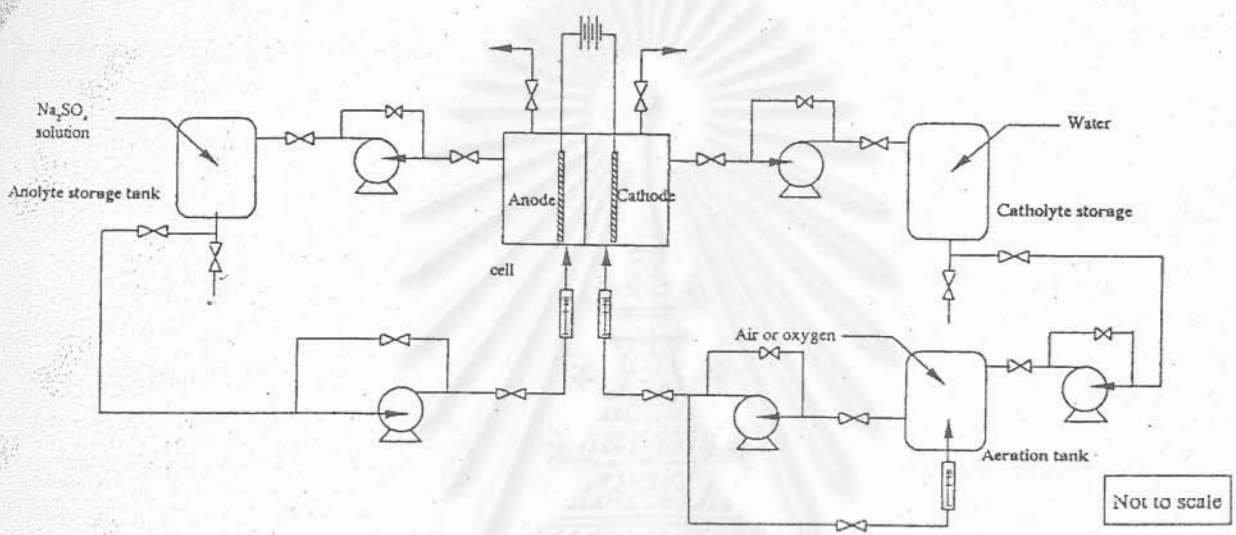


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

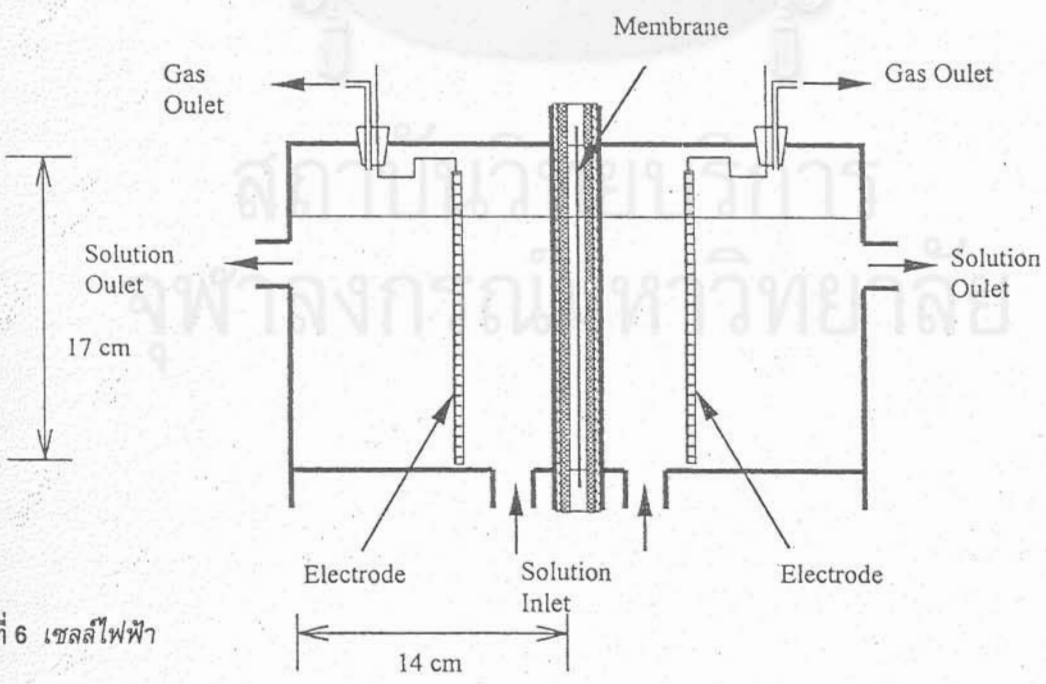
### 3. วิธีการทำวิจัย

1. จัดสร้างอุปกรณ์สำหรับการแยกสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ดูโครงสร้างในรูปที่ 5) ที่ประกอบด้วย
  - 1.1 เซลล์ไฟฟ้า (ดังแสดงในรูปที่ 6 ประกอบ)
    - 1.1.1 กอล่งไฟฟ้าเคมีทำจากวัสดุอะคริลิกหนา 8 มม. แบ่งออกเป็นสองส่วน แต่ละส่วนมีขนาด 17 ซม. x 14 ซม. x 10 ซม. ทั้งสองส่วนถูกประกบเข้าด้วยกันโดยมีเยื่อแผ่นคั่นกลางและใช้ประเก็นที่ทำจากวัสดุ Teflon มีช่องป้อนสารละลายเข้าสู่เซลล์ทางด้านล่างของกอล่ง และช่องสำหรับถ่ายสารละลายออกจากเซลล์ทางด้านหลัง
    - 1.1.2 อิเล็กโทรดที่ประกอบด้วยแอโนดชนิด DSA (Dimensional Stable Anode) ทำจากวัสดุ RuO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> มีพื้นที่หน้าตัด 10 ซม. x 13 ซม. และแคโทดทำจากวัสดุเงินเคลือบขนาดพื้นที่หน้าตัด 10 ซม. x 13 ซม.
    - 1.1.3 เยื่อแผ่นชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์หมายเลข 795 ขนาดพื้นที่หน้าตัด 10 ซม. x 13 ซม. โดยได้รับคำแนะนำจากบริษัท ไทยอาซาฮีเคมีภัณฑ์ จำกัด
  - 1.2 ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ที่สามารถควบคุมความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 15 โวลต์และแอมแปร์ตามลำดับ
  - 1.3 ระบบเติมออกซิเจนที่ประกอบด้วยถังเติมอากาศซึ่งรับสารละลายด้านแคโทดจากถังพักก่อนส่งถ่ายสารละลายด้วยการบีบเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าด้านแคโทด หัวจ่ายออกซิเจน และท่อสายยางเชื่อมต่อหัวจ่ายกับท่อก๊าซออกซิเจน 99.8% ขนาดความจุ 7 ลบ.ม. โดยมี Gas Regulator ควบคุมแรงดันในการจ่ายก๊าซ
  - 1.4 ระบบท่อและถังพักสารละลายที่ประกอบด้วย
    - 1.4.1 ถังพักขนาดความจุ 10 ลิตรสำหรับสารละลายด้านแคโทด 1 ถัง และด้านแอโนด 1 ถัง รวม 2 ถัง
    - 1.4.2 บีมชนิดทนสารเคมี ใช้ไฟกระแสสลับ ขนาด 1/20 แรงม้า จำนวนด้านละ 2 ตัวสำหรับขับสารละลายเข้าสู่ถังพัก และออกจากถังพักเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าในด้านแอโนด และจากถังพักเข้าสู่ถังเติมออกซิเจนในด้านแคโทด รวม 4 ตัว
    - 1.4.3 ระบบท่อเป็นสายยางทำจากวัสดุไนลัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว และ 1 นิ้ว
    - 1.4.4 มิเตอร์วัดอัตราการไหลสำหรับการป้อนสารละลายเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าทั้งด้านแคโทดและแอโนด โดยสามารถวัดอัตราการไหลในช่วง 0.1-1.0 แกลลอนต่อนาที
    - 1.4.5 วาล์วสำหรับควบคุมอัตราการไหลทำจากวัสดุทนสารเคมี
2. ทำการทดลองแยกสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตเริ่มต้นเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 นอร์มัล โดยป้อนสารละลายดังกล่าวเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าด้านแอโนดในอัตรา 2 ลิตรต่อนาที และกำหนดให้สารละลายด้านแคโทดมีความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 นอร์มัล โดยหมุนเวียนสารละลายผ่านเซลล์ไฟฟ้าในอัตรา 2 ลิตรต่อนาทีเช่นกัน และทำการทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 1.8, 2.0, 5.0, 10.0 และ 15.0 แอมแปร์ตามลำดับ (ซึ่งเทียบเท่ากับความหนาแน่นของกระแส 43.5, 87.0, 130.4, 156.5, 173.9, 434.8, 869.6 และ 1304.3 แอมแปร์ต่อตร.ม. ตามลำดับ)
3. ในแต่ละการทดลอง (ระยะเวลาการทดลอง 180 นาที) ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์คร่อมเซลล์, ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายด้านแคโทดและแอโนดทุก ๆ 15 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายด้านแคโทด ปริมาณของโปรตอนและซัลเฟตไอออนในสารละลายด้านแอโนด

4. ทำการทดลองแยกสารละลายโซเดียมซัลเฟตโดยป้อนออกซิเจนแก่สารละลายด้านแคโทด โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายอยู่มีค่าเท่ากับ 10.5, 13.3 และ 16 มก.ต่อลิตรตามลำดับ
5. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยพิจารณา
  - 5.1 ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น
  - 5.2 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมเซลล์
  - 5.3 อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อการแยกโซเดียมซัลเฟต
  - 5.4 อิทธิพลของการเติมออกซิเจนต่อประสิทธิภาพการแยกโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 5 โครงสร้างของอุปกรณ์แยกสารละลายโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 6 เซลล์ไฟฟ้า

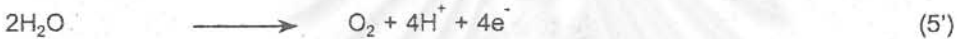
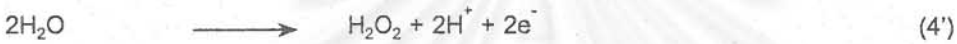
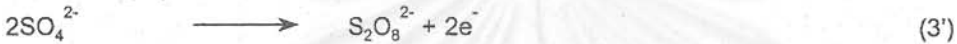
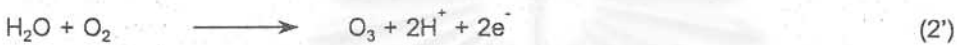
## 4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

### 4.1 ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมี

การวิเคราะห์ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นที่แอโนดและแคโทดสามารถกระทำได้โดยพิจารณาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาและผลที่เกิดขึ้นจากการถ่ายเทไอออนข้ามเยื่อแผ่น โดยแบ่งออกเป็น

#### ก) ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีด้านแอโนด

ดังที่กล่าวแล้วในส่วนของทฤษฎี ปฏิกริยาที่อาจเกิดขึ้นที่แอโนดประกอบด้วยสี่ปฏิกริยา คือ



การใช้กระแสคงที่ เราสามารถคำนวณจำนวนโมลของอิเล็กตรอนที่แอโนดได้รับจากสารละลายได้ และจากสมการ (2') ถึง (5') จะสังเกตได้ว่ามีเพียงปฏิกริยาตามสมการที่ (3') เท่านั้นที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกริยาไม่ใช่โปรตอน ในปฏิกริยาที่เหลือ จำนวนโมลของโปรตอนที่เกิดขึ้นจะเท่ากับกับจำนวนโมลของอิเล็กตรอนที่สารละลายจ่ายแก่ขั้วแอโนด

ในการหาปริมาณโปรตอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาด้านแอโนดจะตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า โปรตอนส่วนหนึ่งจะยังคงอยู่ในสารละลายด้านแอโนดโดยรวมตัวกับซัลเฟตไอออนอยู่ในรูปของกรดซัลฟูริกซึ่งสามารถถูกไตเตรทด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโปรตอนอีกส่วนหนึ่งจะเคลื่อนผ่านเยื่อแผ่นไปยังเซลล์ด้านแคโทด ซึ่งในการหาปริมาณของโปรตอนสำหรับกรณีหลังนี้สามารถกระทำได้โดยหลักที่ว่า กระแสจำนวนเท่ากับที่วิ่งในวงจรได้วิ่งผ่านเยื่อแผ่นเช่นกัน ดังนั้นจำนวนโมลของประจุที่เคลื่อนผ่านเยื่อแผ่นจะต้องเท่ากับกับจำนวนโมลของอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทจากปฏิกริยาด้านแอโนด (แต่เนื่องประจุที่เคลื่อนผ่านเยื่อแผ่นในกรณีนี้มีสองชนิดคือ โปรตอนและโซเดียมไอออน ซึ่งต่างมีประจุเท่ากับกับอิเล็กตรอน จำนวนโมลของไอออนที่เคลื่อนผ่านจึงเท่ากับกับจำนวนโมลของอิเล็กตรอน) จากค่ากระแสดังกล่าว เราสามารถคำนวณจำนวนโมลรวมของโปรตอนและโซเดียมไอออนที่วิ่งผ่านเยื่อแผ่นได้ จากนั้นทำการหาปริมาณของโซเดียมไอออนจากการไตเตรทสารละลายด้านแคโทดด้วยกรดซัลฟูริก (เนื่องจากโซเดียมไอออนจะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์) เมื่อทำการลบจำนวนโมลของโซเดียมไอออนออกจากจำนวนโมลรวมของไอออนที่เคลื่อนผ่านเยื่อแผ่น เราจะทราบจำนวนโมลของโปรตอนที่เคลื่อนผ่านเยื่อแผ่น

จากผลการคำนวณจำนวนโปรตอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาด้านแอโนด และจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 180 นาทีที่ค่ากระแสต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าในทุกกรณี ปริมาณของโปรตอนที่เกิดขึ้นจะใกล้เคียงกับจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทมาก แสดงให้เห็นว่าปฏิกริยาด้านแอโนดนั้น ไม่น่าจะมีปฏิกริยาที่ (3') เกิดขึ้น เนื่องจากเป็นเพียงปฏิกริยาเดียวที่จะทำให้จำนวนของโปรตอนที่เกิดขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทไม่เท่ากัน เมื่อเป็นเช่นนั้น ปฏิกริยาตามสมการที่ (2') ก็จะไม่เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่จำเป็นในการเกิด

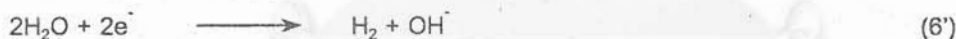
ปฏิกิริยาดังกล่าวจะสูงกว่าปฏิกิริยาที่ (3') ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยา (3') ไม่เกิดขึ้น ปฏิกิริยา (2') ก็จะไม่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ก็น่าจะไม่น่าจะสรุปได้ว่าปฏิกิริยา (4') เกิดขึ้นด้วยหรือไม่ และหากเกิดขึ้นจะมีสัดส่วนระหว่างการเกิดปฏิกิริยา (4') กับ (5') อย่างไร

ตารางที่ 1 จำนวนโมลของโปรตอนและอิเล็กตรอนเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 180 นาที

กระแส (แอมแปร์)	โปรตอน (โมล)			อิเล็กตรอน (โมล)
	ด้านแอโนด	วิ่งผ่านเยื่อแผ่น	รวม	
0.5	0.036	0.019	0.055	0.056
1.0	0.102	0.009	0.111	0.112
1.5	0.158	0.018	0.176	0.168
1.8	0.190	0.017	0.207	0.201
2.0	0.212	0.027	0.239	0.224
5.0	0.536	0.040	0.576	0.560
10.0	1.016	0.087	1.103	1.119
15.0	1.616	0.135	1.751	1.679

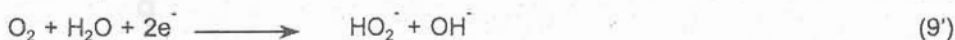
#### ข) ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้านแคโทด

ในกรณีที่ไม่มีสารเติมออกซิเจน ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีซึ่งเกิดขึ้นด้านแคโทดจะมีเพียงการแตกตัวของน้ำได้ผลิตภัณฑ์คือ ก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน ตามสมการ (6')



ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้วว่า ศักย์ไฟฟ้าที่จำเป็นในการเกิดรีดักชันของไฮดรอกไซด์ไอออนนั้นสูงมากจนไม่เกิดขึ้นในการทดลองนี้

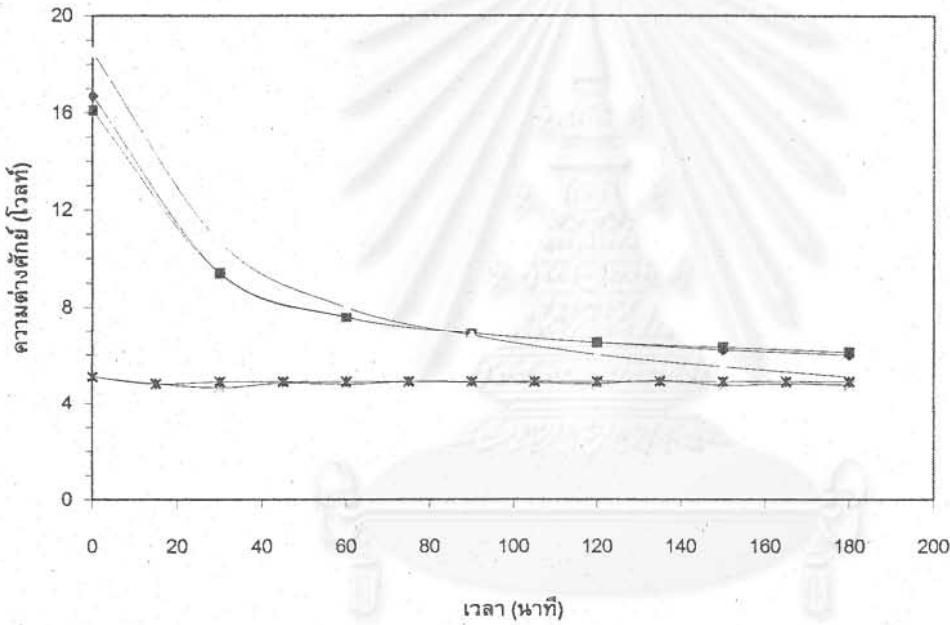
สำหรับกรณีที่ต้องการเติมก๊าซออกซิเจนในรูปออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลาย ปฏิกิริยาตามสมการที่ (8') และ (9') จะเกิดขึ้นร่วมกัน



ที่กล่าวเช่นนี้เนื่องมาจากว่า ตลอดทุกการทดลองที่มีการเติมออกซิเจน เราสังเกตเห็นฟองก๊าซผุดขึ้นที่แผ่นแคโทด ซึ่งก็คือก๊าซไฮโดรเจนที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา (6') นั่นเอง และเนื่องจากปฏิกิริยา (6') มีศักย์รีดักชันมาตรฐานที่มีค่าติดลบมากกว่าปฏิกิริยา (8') และ (9') (เกิดขึ้นได้ยากกว่า) จึงอาจสรุปได้ว่าเมื่อปฏิกิริยา (6') เกิดขึ้น ปฏิกิริยาตามสมการ (8') และ (9') ก็จะต้องเกิดขึ้นเช่นกัน หากแต่ไม่อาจทราบถึงสัดส่วนของปฏิกิริยาเหล่านี้ได้

4.2 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ ของการทดลองที่กระแสไฟฟ้าคงที่ แต่ทำการทดลองในสภาวะที่แตกต่างกันคือ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นด้านแอโนดและแคโทดค่าต่าง ๆ พบว่า ในกรณีที่สารละลายด้านแคโทดไม่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่เลย ณ เวลาเริ่มต้นการทดลอง ค่าความต่างศักย์จะสูงมาก และจะมีค่าลดลงตามเวลา ในขณะที่เมื่อให้สารละลายด้านแคโทดมีสารอิเล็กโทรไลต์เข้มข้น 0.2 และ 0.4 นอร์มัลตามลำดับ ค่าศักย์ไฟฟ้าจะค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาที่ทดลอง (หมายเหตุ สารอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายด้านแคโทดคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารอิเล็กโทรไลต์สำหรับสารละลายด้านแอโนดคือ โซเดียมซัลเฟต และกรดซัลฟูริก)



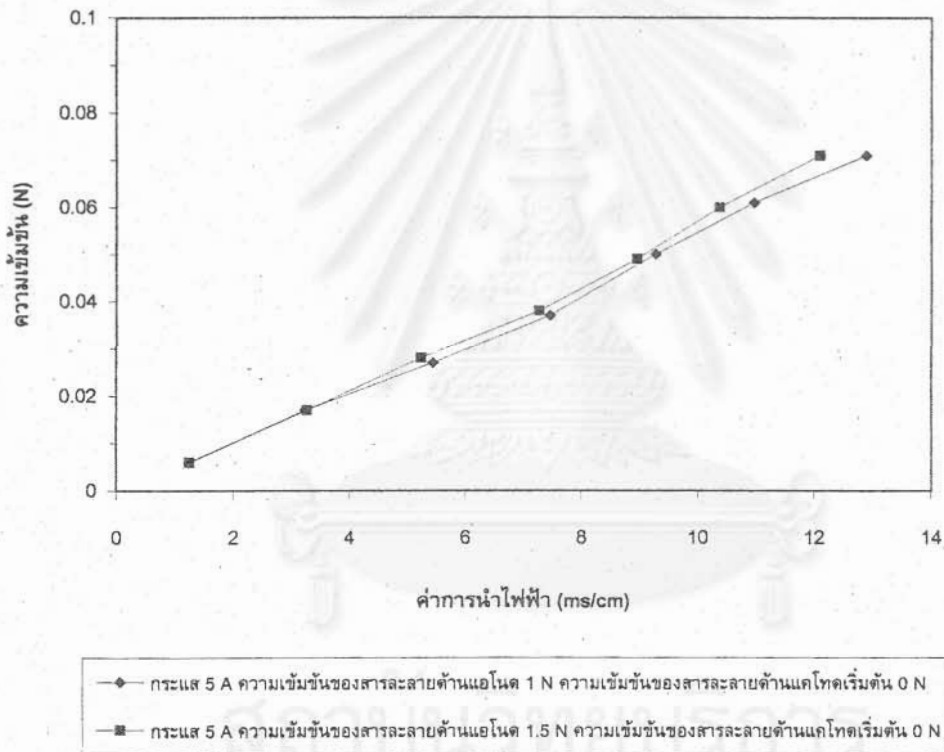
- ◆ กระแส 5 A ความเข้มข้นสารละลายด้านแอโนด 1 N ความเข้มข้นสารละลายด้านแคโทดเริ่มต้น 0 N
- กระแส 5 A ความเข้มข้นสารละลายด้านแอโนด 1.5 N ความเข้มข้นสารละลายด้านแคโทดเริ่มต้น 0 N
- ▲ กระแส 2 A ความเข้มข้นสารละลายด้านแอโนด 0.5 N ความเข้มข้นสารละลายด้านแคโทดเริ่มต้น 0 N
- × กระแส 5 A ความเข้มข้นสารละลายด้านแอโนด 1 N ความเข้มข้นสารละลายด้านแคโทดเริ่มต้น 0.4 N
- \* กระแส 5 A ความเข้มข้นสารละลายด้านแอโนด 1 N ความเข้มข้นสารละลายด้านแคโทดเริ่มต้น 0.2 N

รูปที่ 7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายต่อค่าความต่างศักย์ครึ่งเซลล์ไฟฟ้า

ทั้งนี้เนื่องจากความต่างศักย์ของเซลล์ ( $E_{cell}$ ) ขึ้นอยู่กับกระแส ( $I$ ) และความต้านทานของเซลล์ไฟฟ้า ( $R_{cell}$ ) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_{cell} = IR_{cell} \quad (10)$$

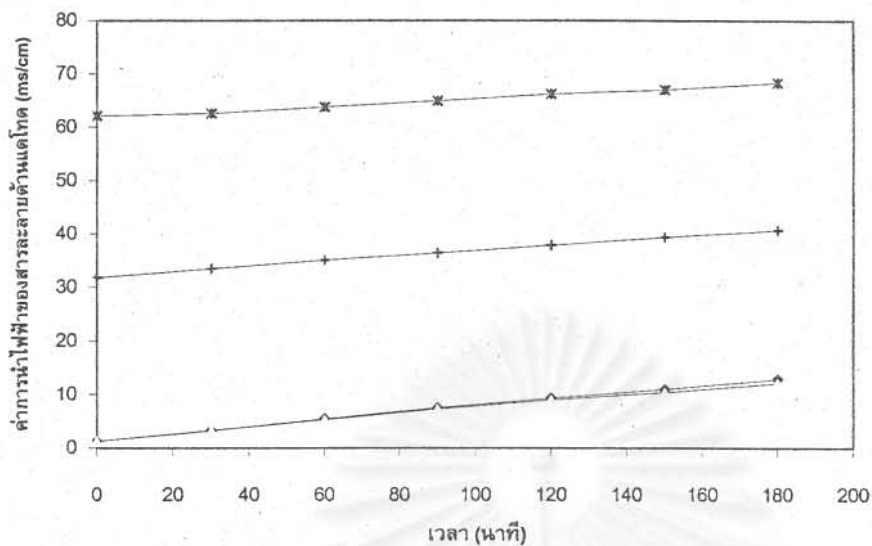
โดยที่ความต้านทานของเซลล์ไฟฟ้า ( $R_{cell}$ ) ประกอบด้วย ความต้านทานของสายไฟและอิเล็กโทรดทั้งด้านแคโทดและแอโนด (ซึ่งคงที่) ความต้านทานของสารละลายด้านแคโทดและแอโนด (แปรผกผันกับความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์หรือค่าการนำไฟฟ้า) ความต้านทานของเยื่อแผ่น (คงที่) โดยทั่วไปความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์และค่าการนำไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (โดยความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์และค่าการนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 8) เนื่องจากการถ่ายเทมวลสารข้ามเยื่อแผ่น ซึ่งในกรณีนี้ค่าการนำไฟฟ้าทางด้านแคโทดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจากการที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกถ่ายเทจากเซลล์ด้านแอโนดผ่านเยื่อแผ่นไปยังเซลล์ด้านแคโทด (ดูรูปที่ 9) โดยการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้างกล่าวจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันไม่ว่าสารละลายด้านแคโทดนั้นจะมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่าใดก็ตาม



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ของสารละลายด้านแคโทด

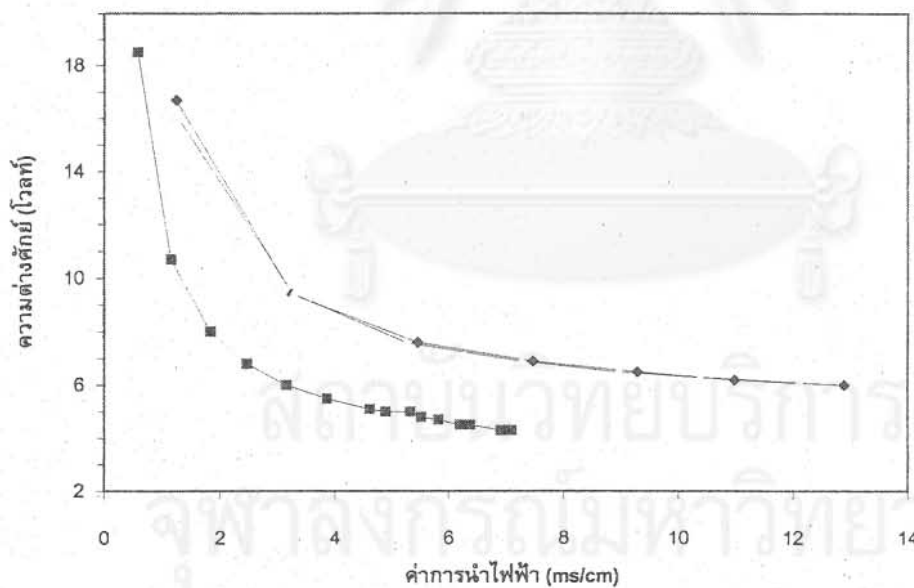
ผลที่ตามมาก็คือ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานของสารละลายด้านแคโทด และค่าความต่างศักย์ในที่สุด ดังพิจารณาได้จากรูปที่ 10





- ◆— กระแส 5 A ความเข้มข้นสารละลายด้านแอโนด 1 N ความเข้มข้นสารละลายด้านแคโทดเริ่มต้น 0 N
- — กระแส 5 A ความเข้มข้นสารละลายด้านแอโนด 1.5 N ความเข้มข้นสารละลายด้านแคโทดเริ่มต้น 0 N
- \*— กระแส 5 A ความเข้มข้นสารละลายด้านแอโนด 1 N ความเข้มข้นสารละลายด้านแคโทดเริ่มต้น 0.4 N
- +— กระแส 5 A ความเข้มข้นสารละลายด้านแอโนด 1 N ความเข้มข้นสารละลายด้านแคโทดเริ่มต้น 0.2 N

รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายด้านแคโทด

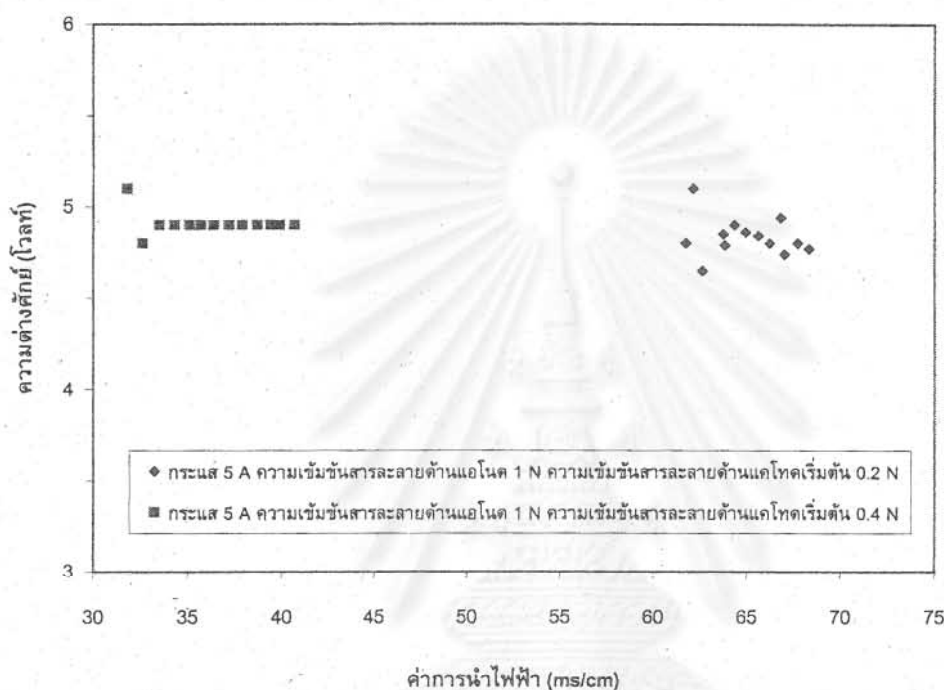


- ◆— กระแส 5 A ความเข้มข้นของสารละลายด้านแอโนด 1 N ความเข้มข้นของสารละลายด้านแคโทดเริ่มต้น 0 N
- — กระแส 5 A ความเข้มข้นของสารละลายด้านแอโนด 1.5 N ความเข้มข้นของสารละลายด้านแคโทดเริ่มต้น 0 N
- กระแส 2 A ความเข้มข้นของสารละลายด้านแอโนด 1 N ความเข้มข้นของสารละลายด้านแคโทดเริ่มต้น 0 N

รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายด้านแคโทดในกรณีที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายด้านแคโทดต่ำมาก ๆ



อย่างไรก็ดี การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงของความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ต่ำ ๆ เท่านั้น (หรือในช่วงของค่าการนำไฟฟ้าต่ำดังแสดงในรูปที่ 10) ส่วนในช่วงที่ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูง ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าจะสูงตามไปด้วยนั้น จะเห็นได้จากรูปที่ 11 ว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเลย



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายด้านแคโทดในกรณีที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายด้านแคโทดสูง ๆ

จากผลดังกล่าวจึงอาจสรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายด้านแคโทดจะมีอิทธิพลต่อค่าความต่างศักย์เฉพาะที่ค่าความเข้มข้นต่ำ ๆ โดยในการทดลองนี้พบว่าที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายด้านแคโทดสูงกว่า 0.2 นอร์มัลความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปมากกว่านี้จะไม่ส่งผลต่อค่าความต่างศักย์แต่อย่างใด ในกรณีของความเข้มข้นของสารละลายด้านแอโนดก็เช่นกัน จากกราฟรูปที่ 10 พอจะสรุปได้ว่าในการทดลองนี้ ค่าความเข้มข้นของสารละลายด้านแอโนดที่สูงกว่า 1 นอร์มัลจะไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ดังนั้น ในการใช้งานจริง จำเป็นต้องนำค่าความเข้มข้นของสารละลายทั้งสองด้านมาพิจารณาด้วย โดยให้ทำการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายไม่ให้ต่ำเกินไป หากค่าความเข้มข้นต่ำถึงจุดซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ (โดยความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นลดลง) ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานจะตกลงทันที

### 4.3 อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อการแยกโซเดียมซัลเฟต

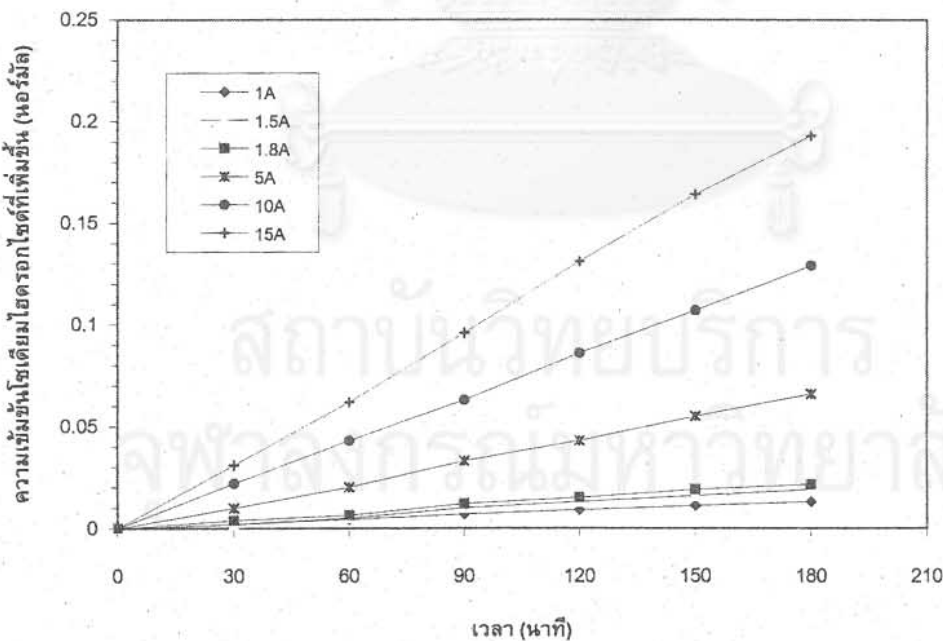
ในเซลล์ไฟฟ้าหนึ่ง ๆ หากกระแสไฟฟ้าสามารถวิ่งครบวงจร นั้นหมายถึงจะต้องมีไอออนเคลื่อนผ่านเยื่อแผ่นโดยมีจำนวนประจุรวมเทียบเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งภายในวงจร ยกตัวอย่างเช่น กระแสไฟฟ้าหนึ่งแอมแปร์มีความหมายอีกนัยหนึ่งคือ การส่งถ่ายประจุไฟฟ้าหนึ่งคูลอมบ์ (Coulomb) ต่อวินาที ซึ่งเทียบเท่ากับการส่งถ่ายอิเล็กตรอนจำนวน  $1/96,485$  โมลต่อวินาที ( $96,485$  คูลอมบ์ = 1 โมลอิเล็กตรอน) ดังนั้น ในกรณีที่ทราบกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) และระยะเวลา ( $t$ ) เราจะสามารถคำนวณโมลของไอออน ( $N$ ) ที่เคลื่อนผ่านเยื่อแผ่นได้ดังนี้

$$N = (It)/(96,485m) \quad (11)$$

โดยที่  $m$  คือจำนวนประจุของไอออนที่พิจารณา เช่น  $m = 1$  สำหรับโซเดียมไอออนและโปรตอน ในขณะที่  $m = 2$  สำหรับแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน เป็นต้น

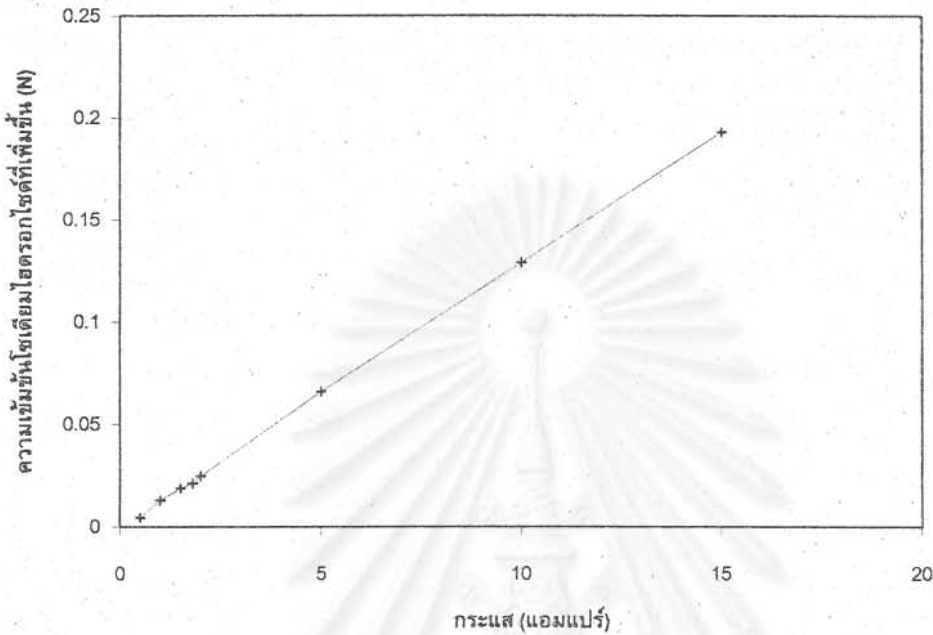
ในงานวิจัยนี้ ไอออนที่เคลื่อนผ่านเยื่อแผ่นโดยแรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามีเพียงสองชนิดคือ โซเดียมไอออนและโปรตอน ดังนั้น เราสามารถพิจารณาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการแยกโซเดียมซัลเฟตได้ออกเป็นสองประเด็นคือ อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่ออัตราการส่งผ่านโซเดียมไอออน อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพของการใช้กระแส (Current Efficiency) และอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการแยกสาร

#### ก) อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่ออัตราการส่งผ่านโซเดียมไอออน

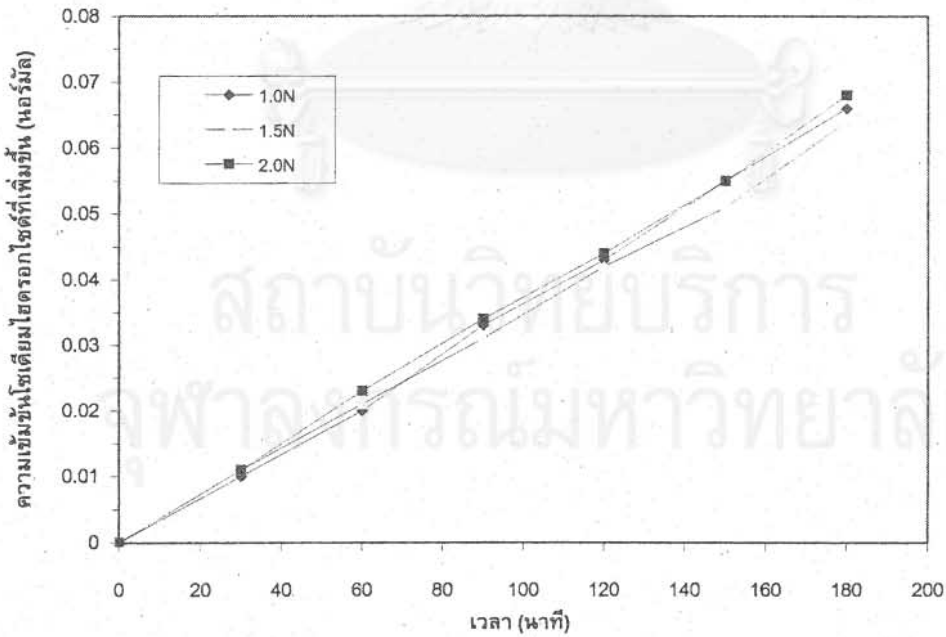


รูปที่ 12 อัตราการเพิ่มของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดที่กระแสไฟฟ้าค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ทางด้านแคโทด (อันเป็นผลจากการถ่ายเทโซเดียมไอออนผ่านเยื่อแผ่น) จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นกับเวลา และความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น



รูปที่ 13 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่แคโทด ณ เวลา 180 นาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ



รูปที่ 14 อัตราการเพิ่มของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดที่กระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 5 แอมป์ แต่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายด้านแอโนด

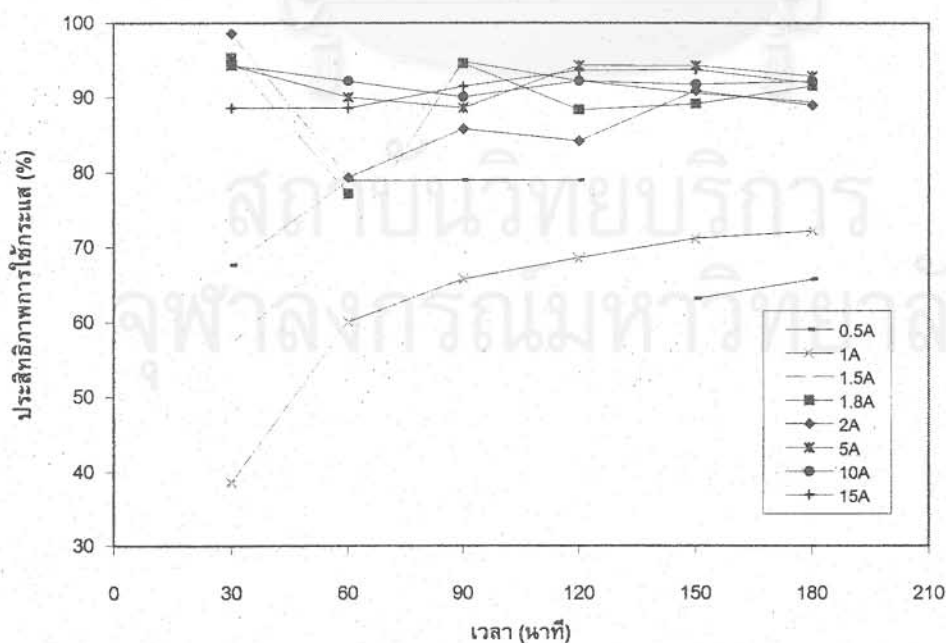
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของกระแสต่ออัตราการเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ ณ เวลาสิ้นสุดการทดลอง 180 นาที (ดังรูปที่ 13) จะพบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการแยกด้วยไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ทั้งนี้ความเข้มข้นของสารละลายทางด้านแอโนดจะไม่มีผลต่อการส่งถ่ายโซเดียมไอออนผ่านเยื่อแผ่นแต่อย่างใด (ดูรูปที่ 14 ประกอบ) ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่า อัตราการเคลื่อนที่ของโซเดียมไอออนผ่านเยื่อแผ่นขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ใช้เพียงอย่างเดียว และไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ ทั้งนี้อาจพิจารณาได้ว่ากระแสไฟฟ้าวิ่งครบวงจรในระบบได้นั้น เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนในด้านวงจร และการถ่ายเทประจุ (ไอออน) ด้านเซลล์ไฟฟ้า แต่เนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองนี้มีเยื่อแผ่นกั้นกลางซึ่งยอมให้ไอออนที่มีประจุบวกเท่านั้นวิ่งผ่าน ซึ่งก็จะมีเพียงโซเดียมไอออนและโปรตอนเท่านั้นที่จะสามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าวิ่งครบวงจรได้ จึงไม่น่าแปลกใจที่อัตราการถ่ายโอนโซเดียมไอออนผ่านเยื่อแผ่นจึงเป็นสัดส่วนกับกระแสไฟฟ้าเท่านั้น โดยไม่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์

### ข) อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพของการใช้กระแส (Current Efficiency)

ประสิทธิภาพของการใช้กระแสหมายถึงอัตราส่วนร้อยละระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ถูกใช้ในการส่งถ่ายโซเดียมไอออนผ่านเยื่อแผ่นกับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด ดังที่กล่าวมาแล้วว่า ไอออนที่ถูกส่งถ่ายผ่านเยื่อแผ่นจากอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าประกอบด้วยโซเดียมไอออนและโปรตอน โดยวัตถุประสงค์ของการแยกโซเดียมซัลเฟตด้วยไฟฟ้า ประสิทธิภาพของการแยกที่ดีย่อมหมายถึงพลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบ (ในรูปของไฟฟ้า) ถูกใช้ไปในการส่งถ่ายโซเดียมไอออน การส่งถ่ายโปรตอนที่เกิดร่วมกันนั้นจัดเป็นความสูญเสียเชิงพลังงาน ดังนั้น เราสามารถคำนวณประสิทธิภาพของการใช้กระแส (CE) จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (12)

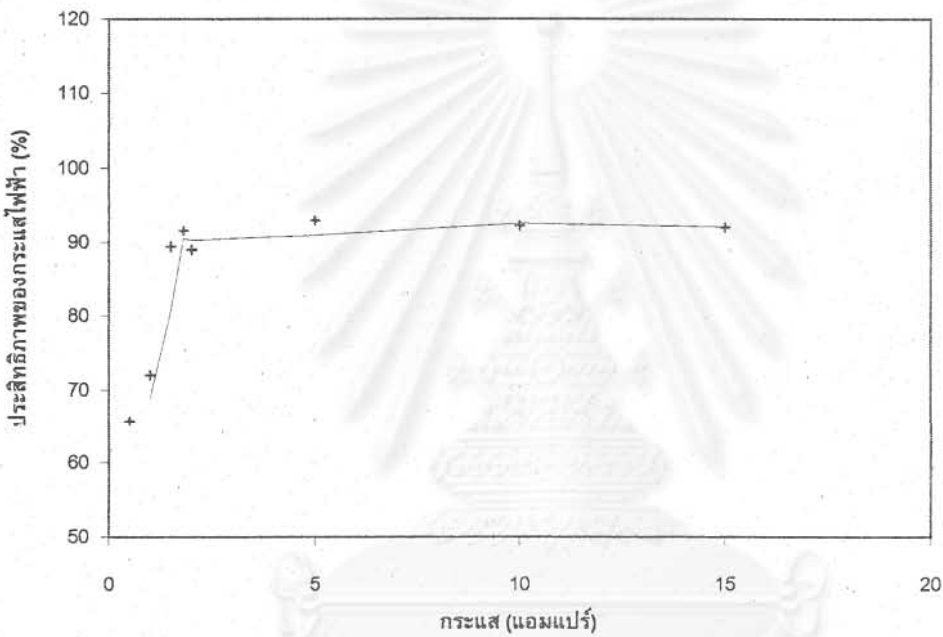
$$CE (\%) = (96,485 \Delta N_{NaOH}) / (It) \times 100 \quad (12)$$

เมื่อ  $\Delta N_{NaOH}$  คือจำนวนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงด้านแคโทด



รูปที่ 15 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าที่เวลาและค่ากระแสต่าง ๆ

รูปที่ 15 และ 16 แสดงประสิทธิภาพของการใช้กระแสไฟฟ้าที่เวลาและที่กระแสค่าต่าง ๆ ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพของการใช้กระแสไฟฟ้าจะค่อนข้างคงที่และไม่แสดงความสัมพันธ์ใด ๆ ที่ชัดเจนไม่ว่าจะกับเวลาในการแยกหรือค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับช่วงของกระแสไฟฟ้าที่ใช้สูงกว่า 1.5 แอมแปร์ แต่ที่ค่ากระแสต่ำกว่า 1.5 แอมแปร์ ประสิทธิภาพการใช้กระแสจะมีแนวโน้มถดถอยลงตามค่ากระแสที่ลดลง ซึ่งให้เห็นว่าค่าการเลือกของเยื่อแผ่น (Selectivity) ขึ้นอยู่กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ โดยจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหรือกระแสไฟฟ้าที่ต่อเมื่อค่ากระแสที่ใช้เกินค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งในการทดลองนี้พบว่าค่าดังกล่าวคือ 1.5 แอมแปร์ นั่นคือสัดส่วนของการยอมให้อีออนบวกผ่านเยื่อแผ่นระหว่างโปรตอนกับโซเดียมอีออนจะคงที่ในกรณีที่ใช้กระแสไฟฟ้าเกิน 1.5 แอมแปร์



รูปที่ 16 ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้า ณ เวลา 180 นาทีที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ

ทั้งนี้ค่าการเลือกของเยื่อแผ่นเชื่อกันว่าขึ้นอยู่กับสมดุลของความเข้มข้นของโปรตอนทางด้านแอโนดและไฮดรอกไซด์อีออนทางด้านแคโทด ซึ่งสามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ตามรูปที่ 16 ได้คือ การทดลองได้เริ่มต้นโดยกำหนดให้มีความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ฝั่งด้านแคโทดในระดับหนึ่ง ในขณะที่ด้านแอโนดนั้น ไม่มีสภาพความเป็นกรดเลย (มีโปรตอนในปริมาณที่น้อยมาก) ด้วยความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ที่มากนี้เอง ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของไฮดรอกไซด์ผ่านเมมเบรน (จากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้า) แต่การเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนของไฮดรอกไซด์อีออนดังกล่าวจะถูกหน่วงหรือขัดขวางจากโปรตอนที่พยายามเคลื่อนที่สวนทางกัน ดังนั้น ในกรณีที่กระแสต่ำ อัตราการเกิดของโปรตอนเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทางด้านแอโนดจะต่ำเช่นกัน ทำให้ปริมาณโปรตอนที่จะหน่วงการเคลื่อนที่ของไฮดรอกไซด์อีออนมีน้อย การสูญเสียกระแสไปกับการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นของไฮดรอกไซด์อีออนจึงเกิดขึ้นมาก ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้กระแส (หมายเหตุ การสูญเสียกระแสอาจเกิดขึ้นได้จากการเคลื่อนที่ของโปรตอนและไฮดรอกไซด์อีออนผ่านเยื่อแผ่น เนื่องจากประสิทธิภาพการใช้กระแสที่เต็มร้อยเปอร์เซ็นต์หมายความว่ากระแสทั้งหมดถูกใช้ในการขับเคลื่อนโซเดียมอีออนผ่านเยื่อแผ่น)

ค) อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานของการแยกสาร

ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของการแยกสารกำหนดโดยอัตราการใช้พลังงาน ( $PC$ ) ซึ่งนิยามโดยพลังงานที่ใช้ต่อการแยกโซเดียมซัลเฟตหนึ่งโมล โดยในที่นี้ พลังงานที่ใช้ในการแยก ( $P$ ) คำนวณได้จาก

$$P = IE_{cell} \quad (13)$$

ดังนั้น อัตราการใช้พลังงาน ( $PC$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (14)

$$PC = (2Pt)/\Delta N_{NaOH} = (2tIE_{cell})/\Delta N_{NaOH} \quad (14)$$

หรือเขียนในรูปของประสิทธิภาพการใช้กระแส ( $CE$ ) โดยรวมสมการ (12) และ (14) เข้าด้วยกันเป็น

$$PC = (1.93 \times 10^7 E_{cell})/CE \quad (15)$$

โดยมีหน่วยของอัตราการใช้พลังงานคือ จูลต่อโมลโซเดียมซัลเฟต

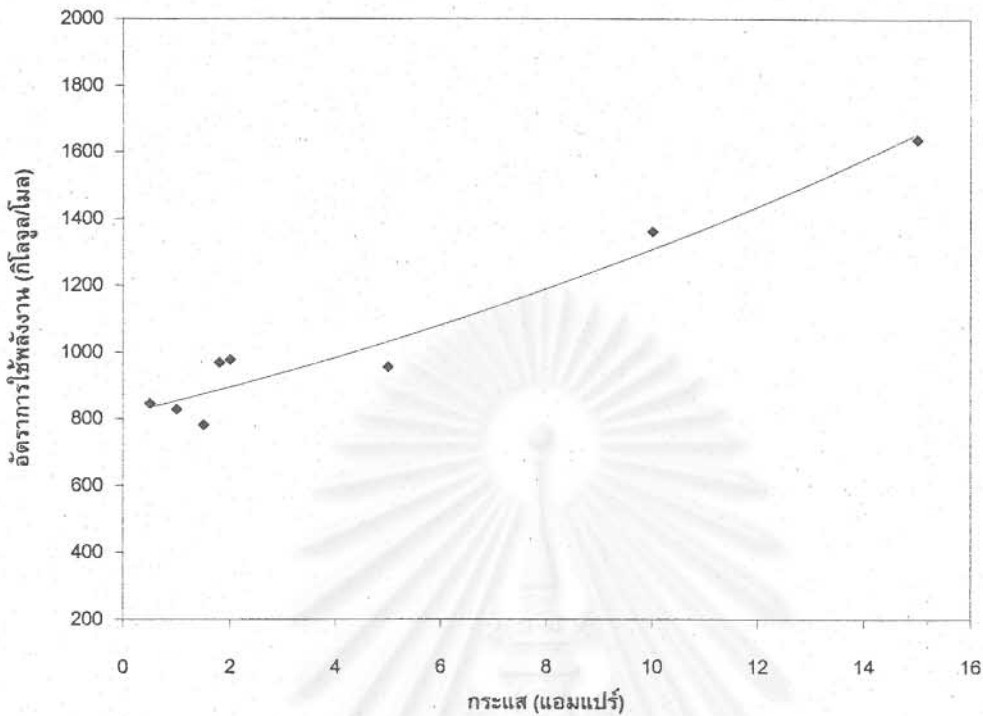
ในกรณีที่ความต่างศักย์มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา การคำนวณอัตราการใช้พลังงานสามารถกระทำได้โดยอินทิเกรตสมการ (15) เทียบกับเวลา ซึ่งจะได้ว่า

$$PC = (1.93 \times 10^7 / T) (E_{cell}/CE) dt \quad (16)$$

เมื่อ  $T$  คือเวลาสุดท้ายของการทดลอง

ตารางที่ 2 อัตราการใช้พลังงานในการแยกที่กระแสไฟฟ้าค่าต่าง ๆ

กระแส (แอมแปร์)	อัตราการใช้พลังงาน (กิโลจูล/โมล)
0.5	845
1.0	828
1.5	781
1.8	969
2.0	978
5.0	955
10.0	1360
15.0	1637



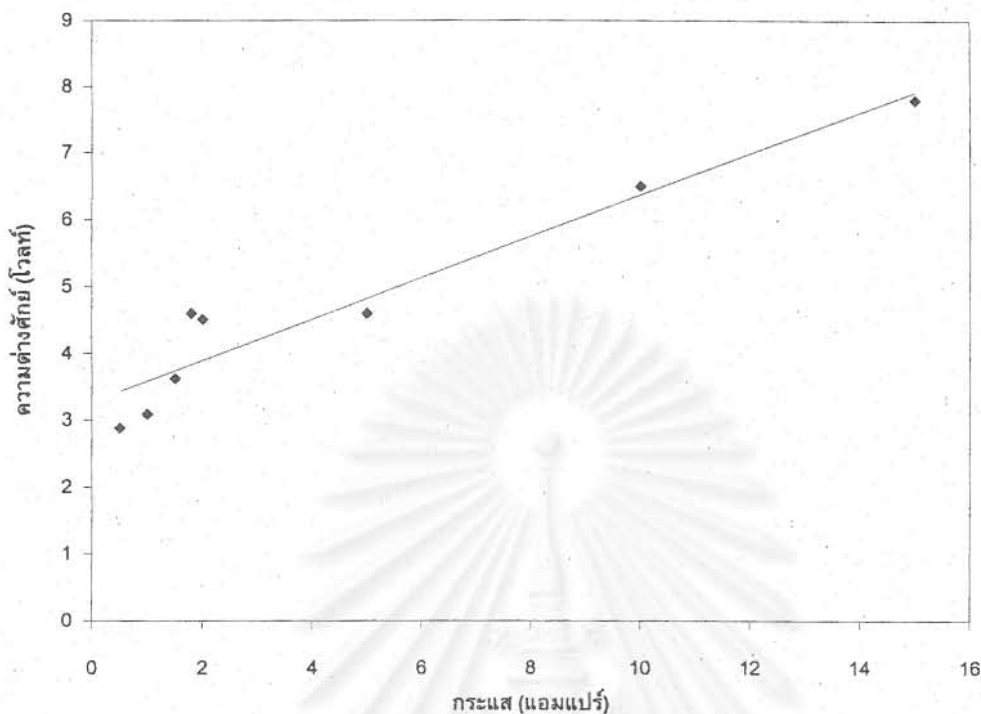
รูปที่ 17 อัตราการใช้พลังงานในการแยกที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ

จากค่าอัตราการใช้พลังงานในการแยก ณ กระแสไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่แสดงในรูปที่ 17 พบว่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานในการแยกโซเดียมซัลเฟตมีแนวโน้มถดถอยลงเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า ถึงแม้ว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพการใช้กระแสดีขึ้น แต่ก็ส่งผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 10 (ดูกราฟรูปที่ 18 ประกอบ) ดังนั้นเมื่อความต่างศักย์สูงขึ้นย่อมทำให้อัตราการใช้พลังงานสูงขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานด้อยลง หรืออาจอธิบายได้อีกนัยหนึ่งว่า กระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นย่อมนำมาซึ่งการสูญเสียพลังงานในเซลล์ไฟฟ้ามากขึ้น โดยอาจแบ่งได้เป็น

- 1) การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานภายในวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
- 2) การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในสารละลายทั้งด้านแอโนดและแคโทด
- 3) การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของเยื่อแผ่น

ดังนั้น ถ้ากล่าวโดยสรุปก็คือ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่สูง กระแสไฟฟ้าที่ใช้จะต้องน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามก็ยังต้องมีข้อจำกัดในด้านของกระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะลดต่ำลงถึงจุดที่น้อยเกินกว่าจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง การแยกจะไม่เกิดขึ้นในกรณีดังกล่าว ในการทดลองนี้ เราพบว่าค่ากระแสต่ำสุดที่เป็นไปได้คือ 0.5 แอมแปร์ (ซึ่งให้ค่าความต่างศักย์ของเซลล์ประมาณ 2.6 ถึง 2.8 โวลท์)





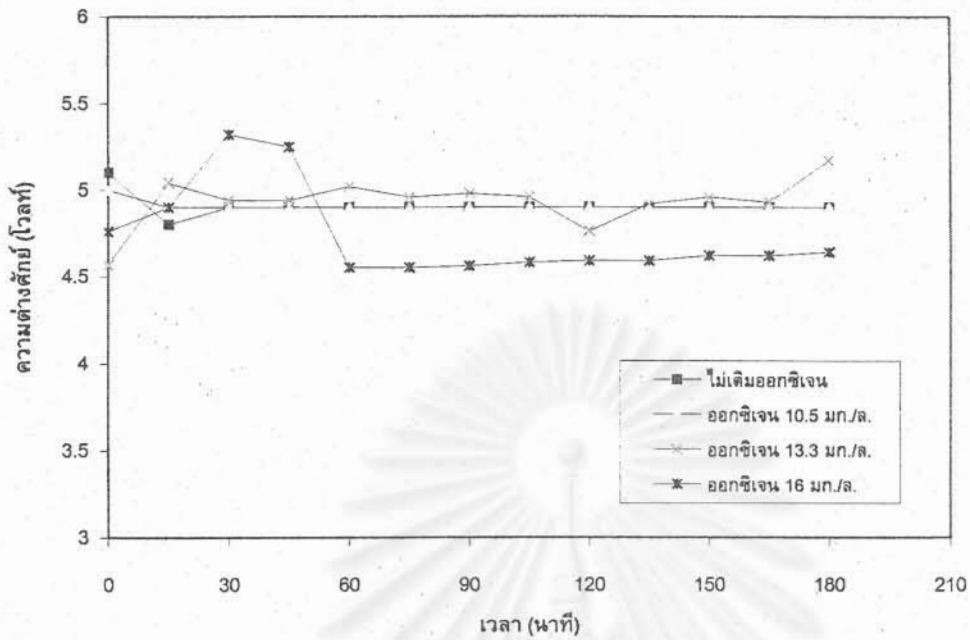
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า

#### 4.4 หมายเหตุสำหรับการทดลองป้อนสารละลายโซเดียมซัลเฟตแบบต่อเนื่อง

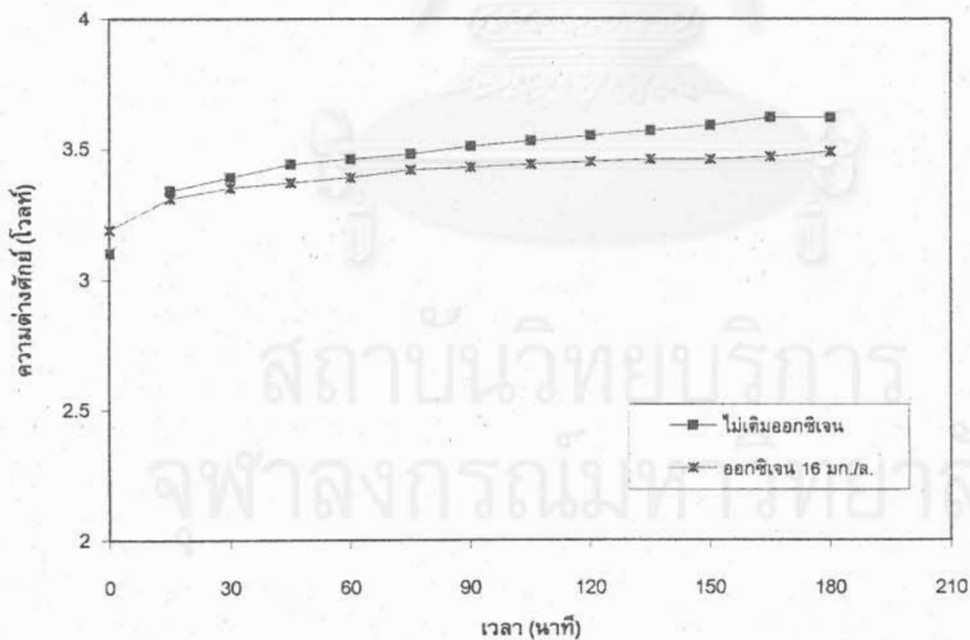
จากผลการวิจัยข้างต้นซึ่งพบว่า ณ ค่าความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตในเซลล์ด้านแอโนดที่สูงกว่า 1.0 นอร์มัลจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ของเซลล์ ทำให้สามารถประมาณการได้ว่าเมื่อทำการทดลองป้อนสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าด้านแอโนดอย่างต่อเนื่องนั้น ซึ่งเป็นการควบคุมความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตในด้านแอโนดให้คงที่ตลอดเวลาที่ทำการทดลองจะไม่ให้ผลการทดลองที่แตกต่างจากการทดลองแบบกะเนื่องจากปริมาณของโซเดียมไอออนที่ถ่ายเทข้ามเยื่อแผ่นจะแปรผันตามค่ากระแสที่ใช้เพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นกับค่าความต่างศักย์ หรือความเข้มข้นของสารละลายทั้งสองฝั่งของเซลล์ไฟฟ้าแต่อย่างใด

#### 4.5 อิทธิพลของการเติมออกซิเจนต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมเซลล์

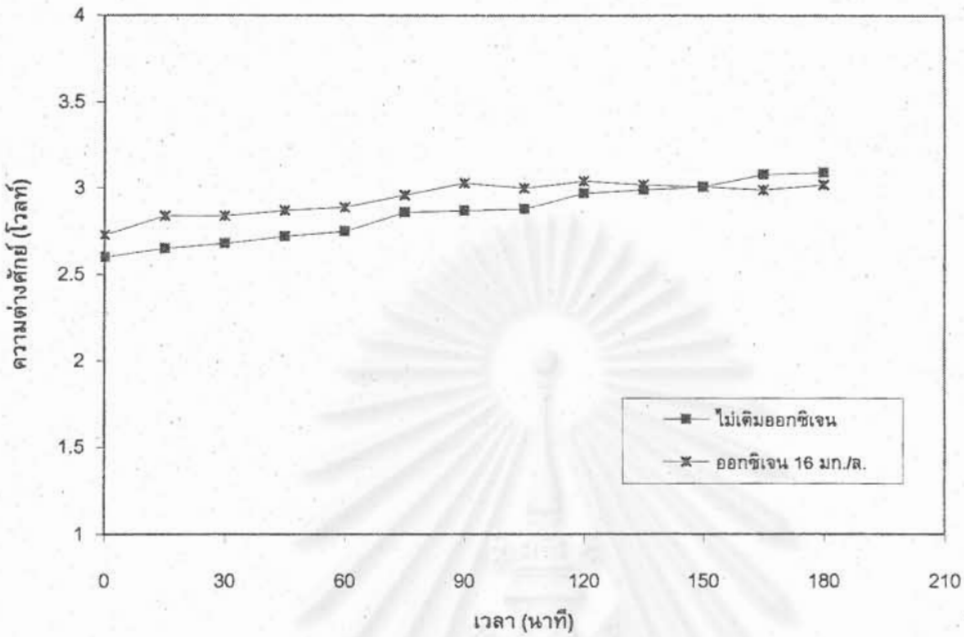
จากรูปที่ 19 ถึง 22 ซึ่งแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่เติมออกซิเจนและกรณีที่มีการเติมออกซิเจนเข้าในสารละลายด้านแคโทดที่ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายอยู่แตกต่างกัน พบว่าการเติมออกซิเจนเข้าสู่เซลล์ด้านแคโทดไม่ส่งผลใด ๆ ที่ชัดเจนต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และจากการสังเกตขั้วแคโทดในระหว่างการทดลองพบว่ายังคงมีก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำอยู่ (สมการที่ 6) ซึ่งบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาการรวมตัวของออกซิเจนและน้ำตามสมการที่ 8 นั้นเกิดขึ้นในระดับที่น้อยกว่าปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายดังกล่าวมีอยู่น้อยเกินไป อย่างไรก็ตามในตอนนี้คงต้องมาในตอนนี้แล้ว ว่างานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงปฏิกิริยาโดยใช้ออกซิเจนที่ละลายแทนการใช้ออกซิเจนอิเล็กโทรด (การป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่ขั้วอิเล็กโทรดโดยตรง) เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาร่วมคือ การเกิดเปอร์ไฮดรอกไซด์ไอออน (ตามสมการ 9) ซึ่งเป็นผลให้เกิดการกัดกร่อนวัสดุเซลล์ไฟฟ้าอย่างสูง



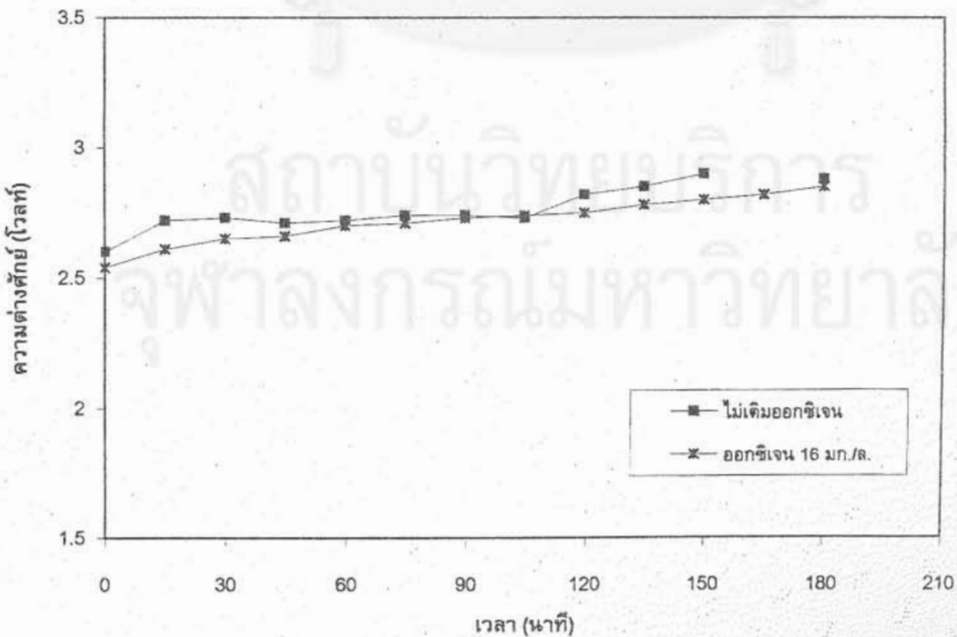
รูปที่ 19 ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดลองที่กระแสคงที่ 5 แอมแปร์ และในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายด้านแคโทดต่าง ๆ กัน



รูปที่ 20 ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดลองที่กระแสคงที่ 2 แอมแปร์ และในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายด้านแคโทดต่าง ๆ กัน



รูปที่ 21 ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดลองที่กระแสคงที่ 1 แอมแปร์ และในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายด้านแคโทดต่าง ๆ กัน



รูปที่ 22 ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดลองที่กระแสคงที่ 0.5 แอมแปร์ และในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ในสารละลายด้านแคโทดต่าง ๆ กัน

หมายเหตุ ความเข้มข้นสูงสุดของออกซิเจนที่ละลายในสารละลายด้านแคโทดที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ 16 มก./ล. ในขณะที่ค่าการละลายสูงสุดของออกซิเจนที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้องอยู่ที่ประมาณ 32 มก./ล. หรือประมาณสองเท่าของค่าสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์วิจัย (ในส่วนของถังเติมออกซิเจน) ซึ่งไม่อาจรับแรงดันได้สูงและมีระยะเวลาของการสัมผัสระหว่างก๊าซกับสารละลายที่จำกัด ทำให้ไม่สามารถทำการเติมก๊าซออกซิเจนลงในสารละลายให้มีความเข้มข้นสูงเกินกว่า 16 มก./ล. ได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์ไฟฟ้าด้านแคโทดเพื่อลดศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกโซเดียมซัลเฟต โดยเปลี่ยนปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำให้เป็นปฏิกิริยาการรวมตัวของน้ำและก๊าซออกซิเจน ด้วยการป้องกันก๊าซออกซิเจนเข้าสู่สารละลายด้านแคโทดในรูปของออกซิเจนที่ละลาย ทั้งนี้เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาของการกัดกร่อนวัสดุที่เกิดจากการเติมก๊าซออกซิเจนเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าโดยตรง

ส่วนแรกของการวิจัยเกี่ยวข้องกับการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมของการดำเนินการสำหรับการแยกโซเดียมซัลเฟต ซึ่งพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกประกอบด้วย

- (1) ความเข้มข้นของสารละลายด้านแอโนด โดยที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเริ่มต้นต่ำกว่า 1 นอร์มัลจะมีผลต่อค่าความต่างศักย์ที่สูงขึ้น อันเป็นผลมาจากค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ แต่ที่ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตเริ่มต้นสูงกว่า 1 นอร์มัล ความต่างศักย์จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้น
- (2) ความเข้มข้นของสารละลายด้านแคโทด โดยที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต่ำกว่า 0.2 นอร์มัลจะส่งผลให้ความต่างศักย์ของเซลล์สูงขึ้น ในขณะที่ความต่างศักย์จะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นในกรณีที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.2 นอร์มัล
- (3) ค่ากระแสที่ใช้ โดยที่ค่าความต่างศักย์จะแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้า ทำให้ค่าพลังงานในการแยกเพิ่มขึ้นตามกระแสด้วยเช่นกัน ทั้งนี้อัตราการถ่ายเทมวลข้ามเยื่อแผ่นหรืออัตราการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้านแคโทดจะเพิ่มขึ้นตามกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปริมาณพลังงานที่ใช้ต่อหน่วยการแยกพบว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงสุดจะอยู่ในช่วงของการใช้กระแสที่ต่ำ
- (4) ประสิทธิภาพของการใช้กระแสจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ค่ากระแสที่ใช้ต่ำกว่า 1 แอมแปร์ ในขณะที่ประสิทธิภาพการใช้กระแสดังกล่าวจะค่อนข้างคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงไปตามกระแสที่สูงกว่า 1 แอมแปร์ โดยสามารถอธิบายด้วยสมดุลของโปรตอนและไฮดรอกไซด์ไอออนระหว่างสารละลายสองด้านของเยื่อแผ่น

ส่วนที่สองของการวิจัยเกี่ยวข้องกับการทดลองเติมออกซิเจนเข้าสู่สารละลายด้านแคโทดที่ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายค่าต่าง ๆ คือ 10.5, 13.3 และ 16.0 มก./ล. ซึ่งไม่พบการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่ชัดเจนของค่าความต่างศักย์ จึงอาจเป็นไปได้ว่าปริมาณของออกซิเจนที่ละลายนั้นน้อยเกินกว่าที่ปฏิกิริยาการรวมตัวของก๊าซออกซิเจนกับน้ำจะมีผลที่เด่นชัดเหนือปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำตามปกติ

เพื่อประโยชน์สำหรับการวิจัยในขั้นต่อไป ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในส่วนของถังเติมก๊าซออกซิเจน ซึ่งควรได้รับการออกแบบให้สามารถรับแรงดันและให้มีระยะเวลาการสัมผัสกันระหว่างสารละลายกับก๊าซออกซิเจนมากยิ่งขึ้น อันจะเป็นการเพิ่มค่าการละลายของออกซิเจน เพื่อให้สามารถขยายผลการศึกษาค้นคว้าครอบคลุมความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายที่สูงกว่า 16 มก./ล. ได้



## 6. เอกสารอ้างอิง

1. M. C. Porter, *Handbook of Industrial Membrane Technology*, Noyes Publication, New Jersey, 1990.
2. A. D. Martin, "Sodium Hydroxide Production by the Electrohydrolysis of Aqueous Effluent Streams Containing Sodium Salts", *Electrochemical Engineering and the Environment 1992*, pp.153-163, 1992.
3. J. P. Millington, "An Electrochemical Unit for the Recovery of Sodium Hydroxide and Sulphuric Acid from Waste Streams.", *Ion Exchange Membranes*, D. S. Flett (ed.), Ellis Horwood, 1983.
4. A. D. Martin, "Electrochemical Process", *EP0532188*, 1993.
5. J. Jörisen and K. H. Simmrock, "The Behaviour of Ion Exchange Membranes in Electrolysis and Electrodialysis of Sodium Sulphate", *J. Appl. Elec. Chem.*, **21** (1991) 869-876.
6. G. S. Trivedi, B. G. Shah, S. K. Adhidary, V. K. Indusekhar, and R. Rangarajan, "Studies on Bipolar Membranes", *React. Func. Polym.*, **28** (1996) 243-251.
7. R. Thompson, M. Paleologou, and R. M. Berry, "Caustic Soda and Sulfuric Acid Production from Sodium Sulfate by-product of Chlorine Dioxide Generation-Economics", *Tappi J.*, **78** (1995) 127-134.
8. S. J. Parulekar, "Optimal Current and Voltage Trajectories for Minimum Energy Consumption in Batch Electrodialysis", *J. Membr. Sci.*, **148** (1998) 91-103.
9. H. Von Plessen, H. Kau, G. Münster, and W. Scheibitz, "Utilization of Sodium-Sulfate", *Chem. Ing. Tech.*, **61** (1989) 933-940.
10. P. C. Foller and R. T. Bombard, "Process for the Production of Mixtures of Caustic Soda and Hydrogen Peroxide via the Reduction of Oxygen", *J. Appl. Elec.*, **25** (1995) 613-627.
11. K. Scott, *Electrochemical Processes for Clean Technology*, Royal Society of Chemistry, pp.1-167, 1995.
12. E. D. Creamer and B. M. Krumpelf, "Apparatus and Process for Electrolysis Using a Cation Permselective Membrane and Turbulence Inducing Means", *US4142950*, 1979.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย