

การศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน



นายพิษณุ เจริญสัมศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2526

ISBN 974-562-417-9

007771

I1671129

A STUDY ON ION EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL



Mr. Pitsanu Charoensomsak

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

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1983

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน  
โดย                              นายพิษณุ เจริญสัมศักดิ์  
ภาควิชา                              ฟิสิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิฑูร ตริวิจิตรเกษม



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้มหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

*สุประดิษฐ์ ยุกตะ* ..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ ยุกตะ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

*ประธาน ธรรมการ* ..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร เล็งหะพันธุ์)

*อนันต์สิน เตชะกัณฑ์* ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์สิน เตชะกัณฑ์)

*สกล พงศ์กร* ..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สกล พงศ์กร)

*พิฑูร ตริวิจิตรเกษม* ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิฑูร ตริวิจิตรเกษม)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน  
ชื่อนิสิต                                      นายพิษณุ เจริญสมศักดิ์  
อาจารย์ที่ปรึกษา                        ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิฑูร ตรีวิจิตรเกษม  
ภาควิชา                                        ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา                                2525



ในการศึกษาครั้งนี้ได้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีตะแกรงสแตนเลสชุบด้วยพลาตินัมดำเป็นขั้วไฟฟ้า ทั้งนี้ใช้แก๊สไฮโดรเจน และออกซิเจนหรืออากาศที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ เป็นเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดส์ตามลำดับ การทดลองทำโดยการศึกษากิจการงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนภายใต้เงื่อนไขและภาวะการณ์ต่าง ๆ กัน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าความหนาของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนและความเข้มข้นของกรดซัลฟริกที่ใช้ปรับสถานะ ไม่มีผลต่อกิจการงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน การปรับสมดุลแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนด้วยกรดซัลฟริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร, 3.85 โมลต่อลิตร และ 6 โมลต่อลิตร เมื่อนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิง จะทำให้ได้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อปรับสมดุลด้วยกรดซัลฟริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ในกรณีที่เซลล์เชื้อเพลิงใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่ได้จากการปรับสถานะปรากฏว่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 300 K - 350 K ส่วนผลของอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน ไม่มีผลต่อกิจการงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน ยกเว้นกรณีที่ใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์ พบว่าอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมคือ 30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ผลการทดลองต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนเข้าด้วยกัน ทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน แสดงให้เห็นว่าเป็นไปตามกฎการต่อเซลล์ไฟฟ้าทุกประการ ระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานเคมี

ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ในช่วง 37% ถึง 50% เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าใช้งานอยู่ใน  
ช่วง 0.6 โวลต์ ถึง 0.8 โวลต์ และ ค่าประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ของเซลล์  
เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน อออนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 91.89% ส่วนการทดสอบอายุการ  
ใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน พบว่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์ลดลงอย่าง  
รวดเร็ว เพราะแผ่นแลกเปลี่ยนอออนแห้ง เนื่องจากขบวนการอิเล็กโทรออสโมซิส



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Title            A Study on Ion Exchange Membrane Fuel Cell  
Name                     Mr. Pitsanu Charoensomsak  
Thesis Advisor         Assistant Professor Dr. Phietoon Trivijitkasem  
Department             Physics  
Academic Year         1982



In the present work, fuel cells employing commercial cation exchange membranes as the electrolytes with platinized stainless screen electrodes are constructed. Hydrogen and oxygen or air at one atmospheric pressure are used as fuel and oxidizer respectively. The effect of operational variables on the performance of each ion exchange membrane fuel cell has been studied. It is found that cell performance is independent on the type and thickness of membrane and the concentration of sulfuric acid used for conditioning process. Equilibration of the membrane electrolyte with sulfuric acid 1 M, 3.85 M, and 6 M prior to cell assembly results in improved polarization characteristic, especially equilibrating with 1 M sulfuric acid is better than the others. In the case of conditioned membrane, the performance improves with increasing temperature in the range of 300 K - 350 K. The variation of gas flow rate is found no effect upon cell performance except when air is used as oxidizer and its appropriate air flow rate is 30 cm<sup>3</sup>/min. The parallel and series connection of ion exchange membrane fuel cells are also examined and results are in good agreement with the con-

ventional cell connection rule. This fuel cell system can convert 37% - 50% of the chemical energy to electrical energy where the operating voltage is in the range 0.6 volt - 0.8 volt and average faradaic efficiency is 91.98%. Life test indicate that the cell performance decreases rapidly because membrane dries out by electroosmosis.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิรุณ  
ตริวิจิตรเกษม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้แนวความคิดในการวิจัย พร้อมทั้ง  
สนับสนุนการดำเนินการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเป็นอย่างดี

อนึ่ง ระหว่างทำการวิจัยผู้เขียนได้รับอนุญาตให้ใช้ห้องปฏิบัติการ Alexander  
Von Humbolt จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร เล็งหะพันธ์ หัวหน้าภาควิชา  
สิ่งขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย และในการทำการทดลองมีความจำเป็นต้องใช้  
อุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ซึ่งผู้เขียนก็ได้รับความกรุณาจากคณาจารย์ในภาควิชา  
ฟิสิกส์ที่อนุญาตให้ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณในความกรุณาของท่านเป็น  
อย่างสูง

สำหรับความช่วยเหลือของเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่มีต่อผู้เขียนอย่างสม่ำเสมอ  
และตลอดระยะเวลาอันนั้น ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งมาก จึงขอแสดงความขอบคุณด้วย

นอกจากนี้ บัณฑิตวิทยาลัย ยังได้จัดสรรเงินทุนวิจัยจำนวนหนึ่งสำหรับงาน  
วิจัยนี้ ผู้เขียนสิ่งขอขอบคุณที่ให้การสนับสนุน.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ค
สารบัญรูป .....	ท
บทที่	:
1 บทนำ .....	1
2 ทฤษฎี .....	5
2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน .....	5
2.2 คุณสมบัติค่าสัตรีของเซลล์เชื้อเพลิง .....	7
2.3 โพลาริเซชัน .....	17
2.3.1 โพลาริเซชันในทางเคมี .....	17
2.3.2 โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน .....	18
2.3.3 โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น .....	19
2.4 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง .....	19
2.4.1 ประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ .....	19
2.4.2 ประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้า .....	21
2.4.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน .....	21
2.4.4 ประสิทธิภาพรวม .....	23

2.5	แผ่นแลกเปลี่ยนอออน .....	23
2.5.1	ชนิดของแผ่นแลกเปลี่ยนอออน .....	25
2.5.2	สมบัติของแผ่นแลกเปลี่ยนอออนที่ เหมาะสมกับงานเซลล์เชื้อเพลิง .....	26
2.6	คะทาลิสต์ .....	26
3	การทดลอง .....	29
3.1	การเตรียมขั้วไฟฟ้า .....	29
3.2	การเตรียมการใช้งานแผ่นแลกเปลี่ยนอออน ...	33
3.2.1	การปรับสถานะแผ่นแลกเปลี่ยนอออน .	33
3.2.2	การปรับสมดุลแผ่นแลกเปลี่ยนอออน ..	34
3.3	ตัวถังเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนอออน .	34
3.4	การประกอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน อออน .....	37
3.5	แก๊สที่ใช้ในการทดลอง .....	39
3.6	ส่วนควบคุมอุณหภูมิและวัดอุณหภูมิ .....	39
3.7	การวัดโพลาไรเซชัน .....	39
3.8	การวัดประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ .....	44
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล .....	50
4.1	ผลของการทิ้งช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลแต่ละค่า	50
4.2	ผลการทดลองเปลี่ยนพื้นที่ขั้วไฟฟ้า .....	50
4.3	ผลที่เกิดจากแผ่นแลกเปลี่ยนอออน .....	53

4.3.1	ผลของการปรับสถานะแผ่นแลกเปลี่ยน อออน .....	53
4.3.2	ชนิดของแผ่นแลกเปลี่ยนอออน .....	53
4.3.3	ผลการใช้แผ่นแลกเปลี่ยนอออนแบบปรับ ลุ่มดุล .....	57
4.3.4	ผลของชนิดแผ่นแลกเปลี่ยนอออนเมื่อปรับ ลุ่มดุลและความหนาของแผ่นแลกเปลี่ยน อออน .....	57
4.4	ผลของอุณหภูมิต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน อออน .....	61
4.5	ผลของอัตราการใช้ของแก๊ส .....	66
4.6	ผลการใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์ .....	66
4.7	ผลของการต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน อออนเข้าด้วยกันแบบขนาน .....	70
4.7.1	ผลของการต่อแบบขนาน 2 เซลล์ ....	70
4.7.2	ผลของการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อขนาน 3 เซลล์ .....	73
4.8	ผลของการต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน อออนเข้าด้วยกันแบบอนุกรม .....	73
4.8.1	ผลของการต่อแบบอนุกรม 2 เซลล์ ...	73
4.8.2	ผลของการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่ออนุกรมกัน 3 เซลล์ .....	77

4.9	ผลการทดลองหาค่าประสิทธิภาพของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน .....	80
4.9.1	ผลการวัดประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ .....	80
4.9.2	ประสิทธิภาพรวม .....	82
4.10	ผลการทดสอบอายุการใช้งาน .....	83
5	สรุปและวิจารณ์ .....	83
5.1	รูปแบบของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน .....	89
5.2	การเก็บข้อมูล .....	89
5.3	ผลการทดลอง .....	90
5.4	ค่าใช้จ่ายในการใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนผลิตไฟฟ้า .....	91
5.4.1	ค่าใช้จ่ายในการสร้างเซลล์ .....	91
5.4.2	ค่าเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดส์ .....	92
5.4.3	ค่าใช้จ่ายรวม .....	95
	เอกสารอ้างอิง .....	96
	ภาคผนวก .....	99
	ประวัติผู้เขียน .....	115



ตารางที่		หน้า
3.1	ตารางแสดงสารละลายที่ใช้ล้างแผ่นตะแกรงส่เตนเลส ...	32
4.1	ตารางแสดงความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่น แลกเปลี่ยนไอออนเมื่อใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนต่างชนิดกัน ..	56
4.2	ตารางแสดงกระแสไฟฟ้าที่ได้รับจากการต่อเซลล์แบบขนาน 3 เซลล์ เปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าจากแต่ละเซลล์ ...	75
4.3	ตารางแสดงความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการต่อเซลล์แบบอนุกรม 3 เซลล์เปรียบเทียบกับความต่างศักย์ที่ได้จากแต่ละเซลล์ .	79
4.4	ตารางแสดงค่าประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์โดยเฉลี่ย .....	81
4.5	ตารางแสดงผลการวัดอัตราการรั่วซึมของแก๊สไฮโดรเจน ผ่านแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนหนา .....	82
4.6	ตารางแสดงประสิทธิภาพรวมของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่น แลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิและความต่างศักย์ไฟฟ้าใช้งานต่าง ๆ	84
5.1	ตารางแสดงราคาส่วประกอบต่าง ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง แบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน .....	92
5.2	ตารางแสดงอัตราค่าแก๊สที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าใช้งานของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน .....	94
5.3	ตารางแสดงค่าใช้จ่ายในการใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน ไอออนผลิตไฟฟ้า .....	95



รูปที่		หน้า
1.1	กราฟแสดงประสิทธิภาพของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ . . .	2
2.1	แสดง โครงสร้างและการทำงาน ของ เซลล์ เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน โดยมี แก้วไฮโดรเจน เป็น เชื้อเพลิง และ แก๊สออกซิเจน เป็น ตัวออกซิไดส์ . . . . .	6
2.2	ผลของ อุณหภูมิที่มีต่อการ เปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของ กิบส์ . . . .	14
2.3	แสดงผลของ อุณหภูมิที่มีต่อการ เปลี่ยนแปลงของ เอนทัลปี . . . . .	15
2.4	แสดงผลของ อุณหภูมิที่มีต่อแรง เคลื่อนไฟฟ้าของ เซลล์ เชื้อเพลิง . . . . .	16
2.5	แสดงผลของ อุณหภูมิที่มีต่อ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน . . . . .	22
2.6	แสดงการนำไอออนในแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน . . . . .	24
2.7	แสดงผลของ คะทาลีสต์ที่มีต่อปฏิกิริยาเคมี . . . . .	27
3.1	แสดง เปรียบเทียบผิวหน้าตะแกรงสํเตนเลส . . . . .	30
3.2	แสดง ขั้วไฟฟ้าที่ตัดจากแผ่นตะแกรงสํเตนเลส . . . . .	30
3.3	แผนภาพแสดง ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นตะแกรงสํเตนเลส . . . . .	32
3.4	แสดง ส่วนประกอบต่าง ๆ ของ เซลล์ เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน . . . . .	35
3.5	แสดง แผ่นห้องแก๊สที่มีลักษณะตรงกลางกลวง . . . . .	36
3.6	แสดง แผ่นห้องแก๊สที่มีแผ่นฮึดอยู่ตรงกลาง . . . . .	36
3.7	แสดง เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแบบ เซลล์เดี่ยวในตู้ควบคุมอุณหภูมิ . . . . .	38



รูปที่

3.8	แสดงเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแบบ 3 เซลล์ . . . .	38
3.9	แสดงระบบการทำให้แก๊สขึ้นโดยผ่านแก๊สลงในน้ำ . . . . .	40
3.10	แสดงการต่อวงจรเพื่อวัดโพลาริเซชันของ เซลล์ไฟฟ้า . . . . .	41
3.11	แสดงการเขียนกราฟโพลาริเซชัน 1 จุด . . . . .	42
3.12	แสดงระบบควบคุมการเขียนกราฟโพลาริเซชัน . . . . .	43
3.13	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการ เก็บข้อมูลของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน . . . . .	45
3.14	แสดงตัวอย่างกราฟโพลาริเซชันที่ได้จากระบบเก็บข้อมูล . . . . .	46
3.15	แสดงอุปกรณ์ในการ วัดประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ . . . . .	47
4.1	กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อมีการเปลี่ยนระยะเวลาในการ เก็บข้อมูลแต่ละค่า . . . . .	51
4.2	กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ขั้วไฟฟ้า . . . . .	52
4.3	กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อมีการใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนปรับสถานะด้วยกรดซัลฟริก . . . .	54
4.4	กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน . . . . .	55
4.5	กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบาง ซึ่งปรับสมดุลย์กรดซัลฟริกความ เข้มข้นต่าง ๆ กัน . . . . .	58

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน เปรียบเทียบชนิดของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน โดยแผ่นแลกเปลี่ยน ไอออนได้จากการปรับสมดุล .....	59
4.7 กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออน 2 แผ่นซ้อนกัน .....	60
4.8 (ก) กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน ไอออน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิครั้งแรก .....	62
4.8 (ข) กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน ไอออน เมื่อลดอุณหภูมิ .....	63
4.8 (ค) กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน ไอออน ที่อุณหภูมิต่างหลังจากผ่านการเพิ่มอุณหภูมิมาแล้ว .....	64
4.9 กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อล้างแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนด้วยน้ำร้อน 323 เคลวิน .....	65
4.10 กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊ส .....	67
4.11 กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนหนา เมื่อใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์ .....	68
4.12 กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน บาง เมื่อใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์ .....	69
4.13 กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน แบบ 3 เซลล์ ประกอบกัน .....	71
4.14 กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน 2 เซลล์ต่อขนานกัน .....	72



รูปที่		หน้า
4.15	กราฟโพลาริโกราฟีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน จำนวน 3 เซลล์ต่อขนานกัน .....	74
4.16	กราฟโพลาริโกราฟีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน 2 เซลล์ต่ออนุกรมกัน .....	76
4.17	กราฟโพลาริโกราฟีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน จำนวน 3 เซลล์ต่ออนุกรมกัน .....	78
4.18	กราฟแสดงผลการทดสอบอายุเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน ไอออน ซึ่งใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนปรับสถานะด้วยกรดซัลฟริก 3.85 โมลต่อลิตร .....	86
4.19	กราฟแสดงผลการทดสอบอายุเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน ไอออน ซึ่งใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนปรับสมดุล (วัดที่ 0.7 โวลต์)	87
4.20	กราฟแสดงผลการทดสอบอายุเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน ไอออน ซึ่งใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนปรับสมดุล (วัดที่ 0.5 โวลต์)	88