

การประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์



นาย บรรยง นาครำไพ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

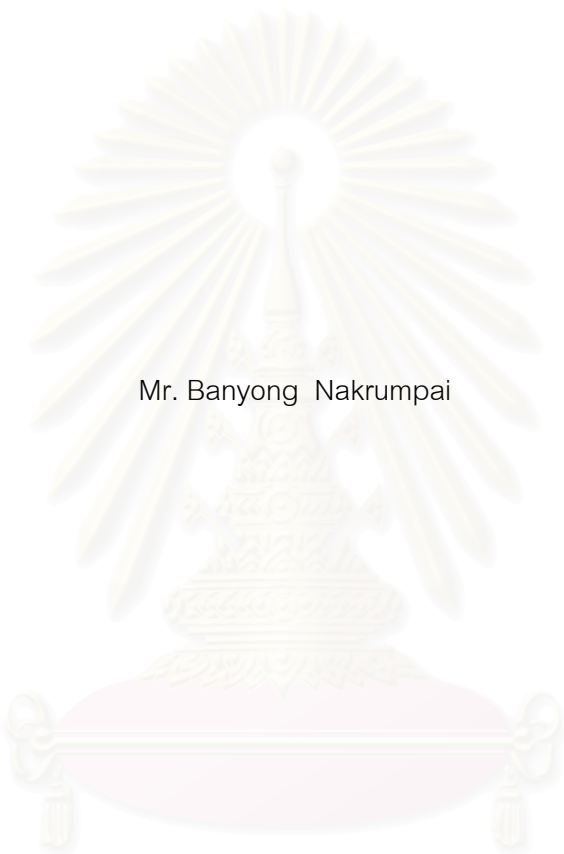
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6789-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY FOR PEM FUEL CELL



Mr. Banyong Nakrumpai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6789-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์
โดย	นาย บรรยง นาครำไพ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญรณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญรณ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สงบทิพย์ พงศ์สถาปตี)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. มะลิ หนู่นสม)

บรรยง นาคจำเริญ : การประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.
(MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY FOR PEM FUEL CELL) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พิทยาทรร, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.
พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ 115 หน้า. ISBN 974-17-6789-7.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า (MEA) ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบพรุน ขนาดพื้นที่ผิว 5 ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีปริมาณแพลทินัมอยู่ 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเยื่อแผ่น Nafion จากบริษัท Electrochem Ltd. ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิในช่วง 130-150 องศาเซลเซียส ความดันของการอัดในช่วง 50-100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เวลาที่ใช้ในการอัดแผ่น 1-5 นาที โดยออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^k factorial นำ MEA ที่เตรียมได้มาประกอบเป็นเซลล์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้หน่วยทดสอบเซลล์ ผลการทดลองพบว่า ความดัน อุณหภูมิ สหสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอุณหภูมิและอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่ภาวะความดันต่ำแต่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดเพิ่มขึ้นจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และในการหาภาวะที่เหมาะสมในการประกอบ MEA จะใช้ 2 วิธี คือ วิธีการเปลี่ยนค่าตัวแปรและวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง จากผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการประกอบ MEA คือ ที่ความดันเท่ากับ 65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิเท่ากับ 137 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้ในการอัดเท่ากับ 5.5 นาที และพบว่าเมื่อโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์เท่ากับ 60 ปอนด์แรง-นิ้ว และการยึดติดกันที่ดีของเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้านั้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงดีที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2547

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

4572350023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: PEM fuel cell / Membrane Electrode Assembly

BANYONG NAKRUMPAI : MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY FOR PEM FUEL CELL. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D. 115 pp. ISBN 974-17-6789-7.

This research is to study the parameters affected on the preparation of MEA for PEM fuel cell. The MEA was prepared by using 5 cm^2 of porous electrodes with Pt loading 1 mg/cm^2 and Nafion membrane from Electrochem company. The studied parameters were temperature, pressure and time of compression in the range of $130\text{-}150 \text{ }^\circ\text{C}$, $50\text{-}100 \text{ kg/cm}^2$ and 1-5 minutes respectively. 2^k factorial of experimental design was used in this work. To test the efficiency, PEM single cell was fabricated by using the prepared MEA. The results showed that pressure, temperature, interaction between pressure and temperature and interaction between temperature and time of compression have significant effects on the performance of the MEA. When low pressure, but high temperature and long time of compression, current density is increased. To determine the optimum condition for MEA fabrication two methods were used; Varying the values of parameters and Response Surface Method (RSM). The results showed that the optimum condition for MEA fabrication was 65 kg/cm^2 , $137 \text{ }^\circ\text{C}$ and 5.5 min of compression time. It was also found that the single cell of PEM fuel cell fabricated with good contact between membrane and electrode the force of 60 lb_f in gave the best performance.

Department Chemical Technology

Field of study Chemical Technology

Academic year 2004

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พงกษาทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญรณ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ, ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	3
2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.1.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC).....	6
2.2.1 หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (Membrane Electrode Assembly, MEA).....	8
2.2.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode).....	10
2.2.3 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte).....	15
2.2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst).....	18
2.3 อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้า.....	19
2.3.1 ชนิดของตัวรองรับ.....	20
2.3.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	20
2.3.3 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ.....	21

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.3.4 ปริมาณสารละลายเตฟลอน (polytetrafluoroethylene, PTFE).....	21
2.3.5 ปริมาณสารละลายเนฟลอน (Nafion).....	21
2.3.6 คุณหมุมิที่ใช้ในตัวเร่งปฏิกิริยา.....	22
2.3.7 การสัมผัสกันของตัวเร่งปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์ในชั้นปฏิกิริยา.....	22
2.3.8 วิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้า.....	23
2.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้า.....	23
2.4.1 การสเปรย์ (Spray).....	23
2.4.2 การพิมพ์หรือการระบาย (Painting or brushing).....	24
2.4.3 การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition).....	24
2.5 วิธีการเตรียมน้ำหมึก (ink) ของขั้วไฟฟ้า.....	25
2.6 ความพรุนและความชื้นของโครงสร้างของขั้วไฟฟ้า.....	26
2.7 การวัดด้วยความร้อนในการประกอบ MEA.....	27
2.8 การประกอบเซลล์เดี่ยว (single cell) ของเซลล์เชื้อเพลิง.....	28
2.9 โพลาริเซชัน (Polarization).....	29
2.10 วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM).....	32
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	37
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิเคราะห์.....	37
3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.4 ตัวแปรที่ศึกษา.....	38
3.5 ขั้นตอนการทำวิจัย.....	38
3.5.1 การปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่น.....	38
3.5.2 การประกอบแผ่น MEA.....	39
3.5.3 การประกอบเป็นเซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิง.....	40
3.5.4 ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์.....	40

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.5.5 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง.....	42
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	44
4.1 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design).....	44
4.2 ผลของความดัน.....	52
4.3 ผลของอุณหภูมิ.....	56
4.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการอัด.....	61
4.5 ผลของวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM).....	66
4.6 ลักษณะการสัมผัสกันของเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า.....	75
4.7 ผลของโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์.....	78
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 ผลของตัวแปรต่าง ๆ.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง	89
ภาคผนวก	92
ภาคผนวก ก.....	93
ภาคผนวก ข.....	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	115

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	การออกแบบการทดลองจำนวน 11 การทดลอง.....	45
4.2	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA).....	46
4.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลองกำลังหนึ่ง.....	67
4.4	การออกแบบการทดลองตาม Response Surface Method.....	69
4.5	การเปรียบเทียบค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการหาสภาวะที่เหมาะสมทั้ง 2 วิธี	75
4.6	ความหนาของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ MEA-commercial.....	83
4.7	การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	84
ก.1	ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง (Experimental Design).....	93
ก.2	การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงความดัน) ครั้งที่1.....	94
ก.3	การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงความดัน) ครั้งที่2.....	95
ก.4	การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงความดัน) เฉลี่ย.....	96
ก.5	การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) ครั้งที่1.....	97
ก.6	การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) ครั้งที่2.....	98
ก.7	การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) เฉลี่ย.....	99
ก.8	การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการอัด) ครั้งที่1.....	100
ก.9	การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการอัด) ครั้งที่2	101
ก.10	การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการอัด) เฉลี่ย.....	102
ก.11	การออกแบบการทดลอง (Response Surface Method) ครั้งที่1.....	103
ก.12	การออกแบบการทดลอง (Response Surface Method) ครั้งที่2.....	104
ก.13	การออกแบบการทดลอง (Response Surface Method) เฉลี่ย.....	105
ก.14	การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์) ครั้งที่1	106
ก.15	การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์) ครั้งที่ 2.....	107

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.16 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์) เฉลี่ย.....	108
4.17 ผลของการออกแบบการทดลองตามวิธี Response Surface Method โดยเพิ่มการทดลองเพื่อหาแบบจำลองอันดับสอง.....	109



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	หลักการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	6
2.2	เซลล์เดี่ยว (single cell) ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	7
2.3	การถ่ายโอนแก๊สโปรตอนและอิเล็กตรอนภายในขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	9
2.4	รูปแบบเริ่มแรกของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนกับรูปแบบใหม่ของขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำให้ปริมาณความต้องการของแพลทินัมลดลง 10 เท่า.....	15
2.5	โครงสร้างของเอทิลีนและเตตระฟลูออโรเอทิลีน.....	16
2.6	โครงสร้างของซัลโฟเนต ฟลูออโรเอทิลีน.....	16
2.7	โครงสร้างของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีการดูดซึมน้ำเอาไว้.....	17
2.8	กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการสเปรย์.....	23
2.9	กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์.....	24
2.10	องค์ประกอบของเซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	28
2.11	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	30
4.1	Normal Probability Plot ของค่าความหนาแน่นกระแส.....	47
4.2	ผลตอบสนองที่มาจาก การคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง.....	48
4.3	ผลตอบสนองของความดัน (A).....	48
4.4	ผลตอบสนองของอุณหภูมิ (B).....	49
4.5	ผลตอบสนองของเวลาที่ใช้ในการอัด (C).....	49
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ระหว่างความดัน (A) กับอุณหภูมิ (B).....	50
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ระหว่างความดัน (A) กับเวลาที่ใช้ในการอัด (C).....	50
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ระหว่างอุณหภูมิ (B) กับเวลาที่ใช้ในการอัด (C).....	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการประกอบ MEA ที่ความดันต่าง ๆ โดยที่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดคงที่ คือที่ 150°C และ 1 นาที่ ตามลำดับ.....	54
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของการประกอบ MEA ที่ความดันแตกต่างกัน.....	55
4.11 Normal Probability Plot ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่ความดันแตกต่างกัน.....	55
4.12 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่ความดันแตกต่างกัน.....	56
4.13 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าศักย์ของเซลล์เดียวกันของ MEA ที่เตรียมที่ความดันต่าง ๆ และช่วงความผิดพลาดในการทดลอง.....	56
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการประกอบ MEA ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยที่ความดันและเวลาที่ใช้ในการอัดคงที่ คือที่ 100 kg/cm ² และ 1 นาที่ ตามลำดับ.....	58
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของการประกอบ MEA ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	59
4.16 Normal Probability Plot ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	59
4.17 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	60
4.18 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เดียวกันของ MEA ที่เตรียมที่อุณหภูมิต่าง ๆ และช่วงความผิดพลาดในการทดลอง.....	60
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการประกอบ MEA ที่เวลาที่ใช้ในการอัดต่าง ๆ โดยที่ความดันและอุณหภูมิคงที่ คือที่ 100 kg/cm ² และ 150°C ตามลำดับ.....	63
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของการประกอบ MEA ที่เวลาที่ใช้ในการอัดแตกต่างกัน.....	63

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21	Normal Probability Plot ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่เวลาที่ใช้ในการอัดแตกต่างกัน..... 64
4.22	การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่เวลาที่ใช้ในการอัดแตกต่างกัน..... 64
4.23	กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าศักย์ของเซลล์เดียวกันของ MEA ที่เตรียมที่เวลาที่ใช้ในการอัดต่าง ๆ และช่วงความผิดพลาดในการทดลอง..... 65
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการประกอบ MEA ที่ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดต่าง ๆ ตามการออกแบบการทดลองตามวิธี Response Surface Method..... 71
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของการประกอบ MEA ที่ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดแตกต่างกัน..... 71
4.26	Normal Probability Plot ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะแตกต่างกัน..... 72
4.27	การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะแตกต่างกัน..... 72
4.28	กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าศักย์ของเซลล์เดียวกันของ MEA ที่เตรียมที่ชั้นของการก้าวอย่างต่าง ๆ และช่วงความผิดพลาดในการทดลอง..... 73
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนอง (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า) กับชั้นของการก้าวอย่าง (step)..... 73
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการประกอบ MEA จากภาวะที่ดีที่สุดของทั้ง 2 วิธี..... 74
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของการประกอบ MEA ที่ภาวะที่ดีที่สุดของทั้ง 2 วิธี..... 75
4.32	ลักษณะการยึดติดกันของขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นที่ดีของแผ่น MEA ที่ประกอบขึ้นจากภาวะที่ให้สมรรถนะการทำงานดีที่สุดใน (A) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 70 kg/cm ² อุณหภูมิ 150 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 5 นาที (B) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 65 kg/cm ² อุณหภูมิ 137 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 5.5 นาที..... 76

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33	77
ลักษณะการยึดติดกันของขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นที่ไม่ดีของแผ่น MEA ที่ประกอบขึ้นจากภาวะที่ให้สมรรถนะการทำงานต่ำที่สุดของวิธีเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร (A) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 90 kg/cm ² อุณหภูมิ 150 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 1 นาที (B) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 100 kg/cm ² อุณหภูมิ 130 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 1 นาที.....	
4.34	77
ลักษณะการยึดติดกันของขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นที่ไม่ดีของแผ่น MEA ที่ประกอบขึ้นจากภาวะที่ให้สมรรถนะการทำงานต่ำที่สุดของวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (A) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 55 kg/cm ² อุณหภูมิ 144 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 10 นาที (ขั้นที่ 5) (B) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 50 kg/cm ² อุณหภูมิ 148 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 12 นาที (ขั้นที่ 6).....	
4.35	79
ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของ MEA-commercial ขนาด 5 cm ² ที่โมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์ต่างๆ กัน.....	
4.36	80
ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของ MEA-commercial ขนาด 5 cm ² ที่โมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์แตกต่างกัน.....	
4.37	80
ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของ MEA-commercial ขนาด 5 cm ² เปรียบเทียบกับ MEA ที่ประกอบขึ้นเองโดยใช้ภาวะที่ดีที่สุด.....	
4.38	81
ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของ MEA-commercial ขนาด 5 cm ² เปรียบเทียบกับ MEA ที่ประกอบขึ้นเองโดยใช้ภาวะที่ดีที่สุด.....	
4.39	82
ลักษณะการยึดติดกันของขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นของแผ่น MEA-commercial เปรียบเทียบกับ MEA ที่ประกอบขึ้นเอง (A) MEA-commercial (B) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 65 kg/cm ² อุณหภูมิ 137°C เวลาที่ใช้ในการอัด 5.5 นาที.....	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในสภาวะการณ์ปัจจุบัน ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในด้านต่าง ๆ มีการพัฒนาอย่างมาก โดยเฉพาะด้านโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้มีการใช้พลังงานในปริมาณมากขึ้น ความต้องการพลังงานจึงสูงตามไปด้วย ดังนั้นปัญหาที่ตามมาคือปัญหาการขาดแคลนพลังงาน ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งโดยเฉพาะในบางประเทศ เช่น ประเทศไทย ที่ไม่สามารถผลิตเชื้อเพลิงให้ใช้ได้เพียงพอภายในประเทศจึงต้องมีการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ทำให้ต้องสูญเสียเงินตราในส่วนนี้เป็นจำนวนมากในแต่ละปี การใช้เชื้อเพลิงมากขึ้นยังส่งผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงสำรองที่มีอยู่ในธรรมชาติลดลง เนื่องจากการผลิตเชื้อเพลิงขึ้นมาใหม่ต้องใช้เวลานาน และอีกปัญหาหนึ่งที่ตามมาจากการใช้พลังงานคือ ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์และเครื่องจักรต่าง ๆ ทำให้เกิดมลพิษขึ้น ไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางอากาศหรือกากของเสียที่ได้จากกระบวนการ เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดภาวะปรากฏการณ์เรือนกระจก (Green house effect) ส่งผลให้เกิดปัญหาโลกมีอุณหภูมิสูงและร้อนขึ้นในปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพิจารณาและศึกษาเพื่อหาแนวทางแก้ไขปัญหา การประหยัดพลังงานโดยการใช้พลังงานที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเป็นวิธีแก้ไขปัญหอย่างหนึ่ง หรือการหาแหล่งพลังงานใหม่ทดแทนที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือดีกว่าแหล่งพลังงานเดิม ก็เป็นวิธีเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานอีกทางหนึ่งด้วย

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) เป็นกระบวนการผลิตพลังงานรูปแบบใหม่อีกแบบหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานเคมี (Chemical energy) เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrochemical process) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการให้พลังงานสูงและเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด นอกจากนี้การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงยังไม่ก่อปัญหาทางด้านมลภาวะอีกด้วย ตลอดการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่มีเสียงดังรบกวนเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ ลดปัญหาอันเนื่องจากแรงเสียดทานรวมถึงปัญหาของการซ่อมบำรุงรักษา ปัจจุบันมีการค้นคว้าและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นมาหลายประเภทแตกต่างกันไป โดยความแตกต่างอยู่ที่ส่วนของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมของงานที่จะนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาในส่วนหนึ่งของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้มีสมบัติพิเศษที่

เหมาะกับการใช้งานกับรถยนต์ ขี่ได้เปรียบของเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้ คือ ภาวะการทำงานเกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันต่ำ จึงสะดวกในการทำงานไม่ยุ่งยากในการเตรียมภาวะสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง สามารถเข้าใจถึงส่วนต่าง ๆ และการทำงานได้ง่าย สามารถสร้างให้มีขนาดกะทัดรัดได้ ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการกักความร้อน เริ่มทำงานได้รวดเร็วและเหมาะกับการทำงานที่ภาวะแบบไม่คงตัว (Transient operation) ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานของรถยนต์ ด้วยเหตุผลของสภาพที่ง่ายและการออกแบบที่ดีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้จึงทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งาน

ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนนี้ คือ หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (Membrane and Electrode Assembly, MEA) ซึ่งจะประกอบด้วยเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนกับขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทด (Cathode) และ ขั้วแอโนด (Anode) สร้างพันธะกับเยื่อแผ่นทั้ง 2 ด้านโดยใช้วิธีการอัดด้วยความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด เช่น อุณหภูมิ, ความดันและเวลาที่ใช้ในการทดลอง เป็นต้น ในปัจจุบันมีการผลิตหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดเพื่อการค้ากันมากและมีราคาแพง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาถึงผลของตัวแปรในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เพื่อเป็นแนวทางในการประกอบ MEA ขึ้นใช้เอง และลดค่าใช้จ่ายในการที่จะสร้างเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนได้ทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิง
2. หาภาวะที่เหมาะสมในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้ความเข้าใจในหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน
2. สามารถประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดได้เอง ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงได้
3. เป็นแนวทางเพื่อนำไปผลิตและพัฒนาให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพดีขึ้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิธีการทดลองและวิธีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ
3. เตรียมสารเคมีและอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการเตรียมหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด
4. ทำการทดลองโดยศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดประกอบด้วย

- ความดัน
- อุณหภูมิ
- เวลา

ซึ่งทำการออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^n factorial

5. หาภาวะที่เหมาะสมในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด โดยจะนำหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดแต่ละภาวะในการทดลอง ไปประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่โมเมนต์การหมุน (Torque) ต่าง ๆ เพื่อทำการทดสอบสมรรถนะการทำงาน
6. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วารสารปริทัศน์

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง หมายถึง เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าตลอดเวลาเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงแบตเตอรี่ (Battery) กล่าวอีกนัยหนึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง

2.1.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีความพรุน 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode) จุ่มหรือสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งอาจเป็นของเหลวและ/หรือของแข็ง เซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สธรรมชาติหรือแก๊สไฮโดรเจนถูกป้อนเข้าไปยังขั้วแอโนด ในขณะที่ตัวออกซิไดซ์ (Oxidant) ถูกป้อนไปยังขั้วแคโทด จากนั้นแก๊สไฮโดรเจนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยจะมีการให้หรือปล่อยอิเล็กตรอน (Electron) ที่ขั้วแอโนด ในขณะที่ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของแก๊สออกซิไดซ์ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยา คือ น้ำ ความร้อนและไฟฟ้ากระแสตรง (DC)

แรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ผลิตขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานอิสระกิบส์ (Gibb's free energy) ของเชื้อเพลิง ค่าแอกติวิตี (Activity) ของสารตั้งต้น ตลอดจนกระแสไฟฟ้าที่ถูกต้องออก การประยุกต์การใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงส่วนใหญ่มักต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าเป็นแบบกระแสสลับ (Alternating current power หรือ AC) ดังนั้นไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง จึงต้องถูกนำมาเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เครื่องผกผันหรืออินเวอร์เตอร์ (Inverter)

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ แก๊สมีเทน (CH_4) หรือเมทานอล (CH_3OH) จะถูกเรียกว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบตรง (Direct fuel cells) ส่วนในเซลล์เชื้อเพลิงแบบอ้อม (Indirect fuel cells) เซลล์เชื้อเพลิงจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สผสมที่มีองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนอยู่สูง ได้จากกระบวนการแตกโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Cracking of hydrocarbons) หรือได้จากกระบวนการปฏิรูป (Reforming) ของแอลกอฮอล์แบบไฮดรอน้ำ ในกระบวนการเหล่านี้จะสามารถทำให้สำเร็จได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่ำจะ

ต้องนำเครื่องปฏิรูป (Reformer) มาติดตั้งในเซลล์เชื้อเพลิง โดยปฏิริยาปฏิรูปจะเป็นปฏิริยาดูดความร้อนในขณะที่ปฏิริยาจากเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นปฏิริยาคายความร้อน ดังนั้นความร้อนที่ผลิตขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกใช้ไปกับปฏิริยาปฏิรูป

ปัจจุบันถึงแม้เซลล์เชื้อเพลิงจะได้รับ ความสนใจในการศึกษาค้นคว้าอย่างแพร่หลาย แต่ด้วยข้อจำกัดต่าง ๆ อาทิเช่น ต้องใช้แก๊สบริสุทธิ์หรือปนเปื้อนน้อย แพลทินัมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิริยาบนขั้วไฟฟ้าที่มีราคาสูง อีกทั้งแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในแก๊สออกซิเจนหรือไฮโดรเจนแม้แต่ในปริมาณน้อยจะส่งผลเสียต่อการทำงานของตัวเร่งปฏิริยาแพลทินัม ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ข้อจำกัดดังกล่าวเป็นอุปสรรคที่เกิดขึ้นในการใช้งานและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาทางแก้ไขปัญหาดังกล่าวเพื่อให้ได้เซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด และมีราคาเหมาะสม

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายประเภท สามารถจัดแบ่งตามประเภทอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ คือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline fuel cells, AFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cells, PEMFC) หรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง (Solid polymer fuel cells, SPFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cells, PAFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเนตหลอม (Molten carbonate fuel cells, MCFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cells, SOFC) หรือจัดแบ่งตามอุณหภูมิการทำงานได้ดังนี้ เซลล์เชื้อเพลิงแบบอุณหภูมิต่ำจะทำงานที่อุณหภูมิ 80-200 องศาเซลเซียส เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นต้น ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับยานอวกาศและรถยนต์ ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงแบบอุณหภูมิสูงจะทำงานที่อุณหภูมิ 600-1000 องศาเซลเซียส เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเนตหลอม เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง เป็นต้น ซึ่งเหมาะในกรณีที่ต้องการผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนในปริมาณมาก ที่ภาวะอุณหภูมิสูงพบว่าอัตราการเกิดปฏิริยาที่ขั้วไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก จึงไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิริยาที่เป็นโลหะตระกูลสูง เช่น แพลทินัม

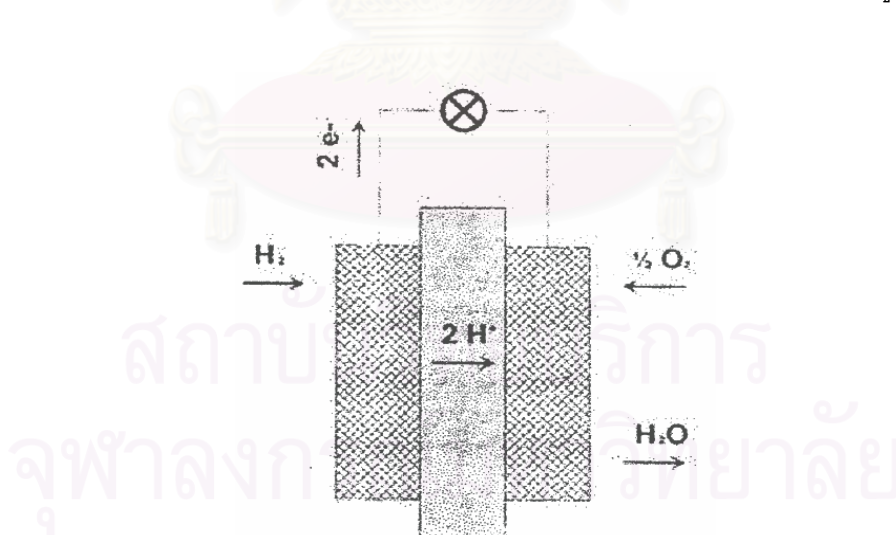
แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาวิจัยในส่วนของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ดังนั้นจึงขอเลือกกล่าวถึงรายละเอียดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเท่านั้น

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งต้องการเคลื่อนที่ เช่น รถยนต์ เพราะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง แต่มีภาวะการทำงานที่อุณหภูมิและความดันต่ำ คือ อยู่ในช่วง $60-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1-2\text{ atm}$

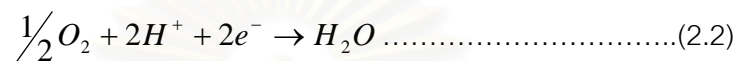
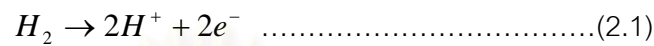
เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนประกอบด้วยแผ่นพอลิเมอร์ของแข็ง (ซัลโฟเนตพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน) ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ คือ เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยจะถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความพรุนและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัมเกาะอยู่ น้ำที่เกิดจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าจะถูกกำจัดออกจากเซลล์มากับแก๊สทางด้านแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดจะถูกดึงออกโดยระบบหล่อเย็น ประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งถ่ายไอออนไฮโดรเจน ดังนั้นแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ใช้ต้องทำให้มีความชื้น เพราะกระบวนการนำไอออนของเยื่อแผ่นจะเกิดขึ้นไม่ได้หากเยื่อแผ่นไม่มีน้ำ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนไม่สามารถทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ เพราะจะมีความเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลทินัม

หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนแสดงในรูปที่ 2.1

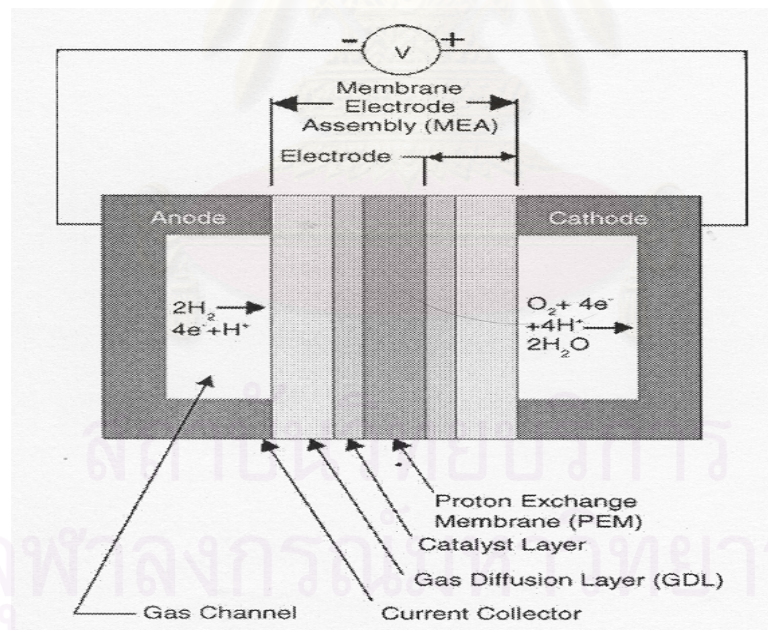


รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [Mennola, 2000]

หลักการทํางาน คือ เมื่อทำการป้อนแก๊สไฮโดรเจนเข้าที่ขั้วแอโนดแก๊สไฮโดรเจนก็จะถูกออกซิไดซ์ดังสมการที่ 2.1 และที่ขั้วแคโทดเมื่อป้อนแก๊สออกซิเจนก็จะถูกรีดิวซ์ดังสมการที่ 2.2 เช่นเดียวกัน และโปรตอนที่ได้จากการเกิดออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจนจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นไปยังขั้วแคโทด ส่วนอิเล็กตรอนนั้นก็จะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดผ่านทางวงจรภายนอกไปยังขั้วแคโทด และจะได้กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น



จะเห็นว่าส่วนประกอบที่ถือเป็นหัวใจสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน คือ หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (Membrane Electrode Assembly, MEA) โดยมีส่วนประกอบหลัก คือ ขั้วไฟฟ้าที่ประกอบอยู่ระหว่างสารอิเล็กโทรไลต์ ในเซลล์เดี่ยวจะมี MEA 1 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เซลล์เดี่ยว (Single cell) ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน
[Litster, 2004]

2.2.1 หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (Membrane Electrode Assembly, MEA)

MEA ประกอบด้วยเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) และชั้นแก๊สแพร่ (Gas diffusion layer) นั่นคือ การนำขั้วไฟฟ้าที่มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบเข้ากับเยื่อแผ่น โดยใช้วิธีการกดอัดด้วยความร้อน ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ และมีประสิทธิภาพสูง ประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับตำแหน่งการเรียงตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้อย่างสมบูรณ์ จะต้องมีส่วนที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวทำปฏิกิริยาและเยื่อแผ่นหรืออิเล็กโทรไลต์ หรือมีการจัดเรียงตัวแบบ Three-phase boundary โดยพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาใน Three-phase boundary ต้องมีค่ามากกว่าพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า [Terrance, 2000]

โดยส่วนใหญ่ขั้วไฟฟ้าที่นำมาประกอบเป็น MEA จะทำมาจากกระดาษหรือผ้าคาร์บอน (Carbon paper or carbon cloth) โดยผ่านกระบวนการทำให้ผิวหน้าของกระดาษคาร์บอนอิมมัตว (Impregnation) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบของน้ำหมึก (Ink) ซึ่งประกอบไปด้วยแพลทินัมบนอนุภาคคาร์บอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงผสมกับสารละลาย Nafion กระดาษคาร์บอนที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทำให้อิมมัตวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเรียกว่า Gas diffusion layer และเมื่อผ่านกระบวนการทำให้อิมมัตวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วเรียกว่า Gas diffusion electrode จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้นี้มาประกอบเข้ากับเยื่อแผ่น ด้วยวิธีการอัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำใกล้จุดเปลี่ยนสถานะของเยื่อแผ่น เพื่อให้ได้ MEA ตามต้องการ สำหรับนำไปใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิง

ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์จะประกอบด้วยแผ่นช่องทางไหลของแก๊ส (Flow field plate) 2 อันประกบกับ MEA เพื่อให้เป็นช่องทางนำแก๊สในการเกิดปฏิกิริยา เซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่า 1.2 โวลต์ ถ้าต้องการค่าศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น จะต้องนำเซลล์หลาย ๆ เซลล์มาต่ออนุกรมกัน ซึ่งเรียกเซลล์ที่ต่ออนุกรมนี้ว่า ห่อเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell stack) ส่วนแผ่น flow field plate ที่เชื่อมแต่ละเซลล์เข้าด้วยกันทำหน้าที่นำแก๊สและเป็นขั้วบวกและลบในแผ่นเดียวกัน เรียกใหม่ว่า Bipolar plate

คุณสมบัติที่ดีขององค์ประกอบใน MEA มีดังนี้ [Wolf, 2003]

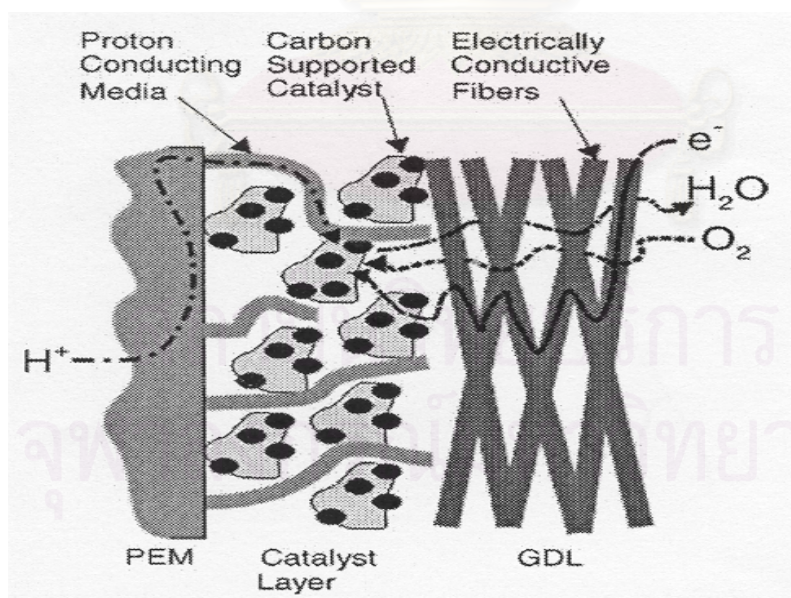
- ชั้นแก๊สแพร่
 - ต้องมีความสามารถในการแพร่แก๊สสูง
 - มีความพรุนสูง
 - มีค่าการนำไฟฟ้าสูง

- ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา
 - ต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)
 - ต้องเป็นชั้นบาง ๆ
- เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน
 - มีค่าการนำโปรตอนสูง
 - มีความต้านทานในการบวมน้ำ
 - ไม่เกิดการแพร่ของแก๊ส

เมื่อประกอบเป็น MEA แล้วควรมีคุณสมบัติดังนี้

- มีค่าความต้านทานในการสัมผัสผิวน้อย (Low contact resistance)
- มีค่าความต้านทานทางขนาดน้อย (Low bulk resistance)
- ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี

จากคุณสมบัติที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าขั้วไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบสำคัญของ MEA ขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพดี ควรจะมีกระบวนการถ่ายโอนมวลและประจุที่ดีในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงกำลังทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การถ่ายโอนแก๊ส โปรตอนและอิเล็กตรอนภายในขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [Litster, 2004]

กระบวนการถ่ายโอนทั้ง 3 ส่วนที่เกิดขึ้นในขั้วไฟฟ้ามีดังนี้

1. โปรตอนเคลื่อนที่จากเยื่อแผ่นไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา
2. อิเล็กตรอนจากตัวสะสมกระแสเคลื่อนที่ไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านทางชั้นแก๊สแพร่
3. แก๊สตั้งต้นและแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเคลื่อนที่เข้าและออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาและช่องทางเดินของแก๊ส

โปรตอน อิเล็กตรอนและแก๊สจะเป็น 3 เฟสที่จะพบในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ในส่วนของการออกแบบขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม คือ พยายามให้การกระจายตัวของปริมาณต่าง ๆ ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างส่วนที่มีการถ่ายโอนของแต่ละเฟสเป็นไปด้วยดี เพื่อที่จะลดการสูญเสียในการถ่ายโอน โดยกระบวนการถ่ายโอนที่อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะส่งผลต่อการทำงานที่มีประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

MEA มีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ อิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้า ซึ่งต้องมีคุณสมบัติและลักษณะพิเศษเฉพาะ ดังนั้นจะขอกล่าวรายละเอียดที่เกี่ยวข้องของทั้ง 2 ส่วนต่อไป

2.2.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode) [สุภาภรณ์, 2543]

ขั้วไฟฟ้าเป็นบริเวณที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า คือ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด และปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด ลักษณะโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าที่ดี ควรจะมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาต่อหน่วยมวลของ electrocatalyst และต่อพื้นที่ของขั้วไฟฟ้ามากที่สุด มีความต้านทานในการถ่ายโอนของสารที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้น้อยที่สุด คือ ควรจะมีความสามารถในการกระจายแก๊สตั้งต้นไปยังอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา และจัดการสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาซึ่งในที่นี้ คือ น้ำออกไปให้มากที่สุดเพื่อป้องกันการเกิดน้ำท่วมเซลล์ ให้สมรรถนะการทำงานคงเดิมตลอดการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง หรือให้ค่าความต่างศักย์คงที่เมื่อป้อนค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ มีความแข็งแรงเชิงกลและมีขนาดคงที่ ดังนั้นที่โครงสร้างชั้นแก๊สแพร่ของขั้วไฟฟ้าควรมีตัวรองรับเชิงกลและการสัมผัสกันทางไฟฟ้าที่ดี มีความพรุนสูง เพื่อช่วยในการแพร่ของแก๊สตั้งต้นและการจัดการน้ำที่เกิดขึ้น และอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นควรมีเส้นทางถ่ายโอนโปรตอนที่ดี คือ มีความต้านทานในการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนน้อย มีค่าการนำไฟฟ้าสูง มีความสามารถในการจัดการน้ำ และมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากับวงจรภายนอก

โดยการเคลื่อนที่ของสารที่เกิดขึ้นภายในขั้วไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ [Appleby, 1989]

- 1) โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่จากชั้นแก๊สแพร่ (Gas diffusion layer) ไปยังบริเวณผิวหน้าระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและอิเล็กโทรไลต์
- 2) แก๊สเกิดการดูดซับบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า การดูดซับของแก๊สขึ้นกับพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (Specific surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนขั้วไฟฟ้า
- 3) โมเลกุลของแก๊สเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นไฮดรอกเจนหรือโปรตอนและน้ำ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าสู่หรือออกจากขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะของปฏิกิริยา และอิเล็กโทรไลต์ไม่ควรให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านด้วย

ส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้าจะมีดังนี้ [Litster, 2004]

- ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer)

ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นส่วนที่สัมผัสกับเยื่อแผ่นและชั้นแก๊สแพร่โดยตรง บางครั้งเรียกส่วนนี้ว่า ชั้นที่เกิดปฏิกิริยา ทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดนั้นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะป้อนลงไปบนเยื่อแผ่นหรือชั้นแก๊สแพร่

ในช่วงแรกเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะสร้างขั้วไฟฟ้าขึ้น โดยใช้วิธี electrocatalyst ของเทฟลอนสร้างพันธะกับอนุภาคแพลทินัมดำ (PTFE-bound Pt black) ซึ่งจะเห็นว่าจะมีสมรรถนะที่ดี มีอายุการใช้งานนานและราคาไม่แพง โดยปกติชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีปริมาณแพลทินัมอยู่ 4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีปริมาณมาก จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยที่จะทำการลดปริมาณการใช้แพลทินัมลงให้มีปริมาณต่ำกว่า 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งประสบผลสำเร็จโดย Kumar และคณะ (1995) ทำการพัฒนาวิธีที่จะช่วยให้ปริมาณการใช้แพลทินัมได้มากขึ้นจากวิธีการพอกพูน (Deposited method) และต่อมา Cha และคณะ (1999) ได้ทำการพัฒนาวิธีที่ทำให้ปริมาณการใช้แพลทินัมลดลงอีกอยู่ที่ประมาณ 0.014 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้ทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนด้วย

- ชั้นแก๊สแพร่ (Gas diffusion layer)

ชั้นแก๊สแพร่ที่ใช้ต้องแน่ใจว่า สามารถให้แก๊สตั้งต้นแพร่ผ่านไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพและหน้าที่ของชั้นแก๊สแพร่ยังรวมไปถึงการจัดการน้ำ การสะสมกระแส เป็นตัวรองรับทางกลและการนำความร้อน นอกจากนี้ชั้นแก๊สแพร่ยังมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนเข้าและออกจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปกติชั้นแก๊สแพร่จะสร้างขึ้นมาจากกระดาษคาร์บอนที่มีรูพรุน (Porous carbon paper or carbon cloth) โดยจะมีความหนาแตกต่างกันอยู่ในช่วงระหว่าง 100-300 ไมโครเมตร โดยคาร์บอนเหล่านี้จะถูกปรับปรุงให้มีคุณสมบัติในการชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะถูกออกแบบให้ทำงานได้กับเซลล์เชื้อเพลิงและระบบจัดการน้ำได้โดยเฉพาะ โดยชั้นคาร์บอนที่มีรูพรุนซึ่งมีสมบัติชอบและไม่ชอบน้ำนั้นจะใช้ในชั้นแก๊สแพร่บนด้านชั้นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งภายในชั้นแก๊สแพร่ก็ยังประกอบไปด้วยเทฟลอนทาอยู่ เพื่อให้แน่ใจว่าที่รูพรุนของชั้นนี้จะไม่เกิดน้ำท่วม (Flooding) ในบริเวณนี้ คือ ถ้าชั้นแพร่มีความหนามากจะมีผลต่อการแพร่ของเชื้อเพลิงและการสะสมน้ำที่ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดปัญหาน้ำท่วมเซลล์ เป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้ามูลค่าลดลง ในขณะที่ถ้าชั้นแพร่มีความบางมาก ๆ ความหนาจะมีผลต่อความต้านทานและการแพร่ของแก๊ส การที่ชั้นแพร่บางช่วยในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ไอออนและแก๊สให้ดีขึ้นเพราะตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับตัวนำไฟฟ้าได้โดยตรง

ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงมีด้วยกันหลายประเภทดังนี้ [Appleby, 1989]

1. ขั้วไฟฟ้าแบบพรุน (Porous Electrode)

โดยทั่วไปในขั้วไฟฟ้าแบบแก๊สแพร่ (Gas diffusion electrode) จะบาง มีรูพรุนและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีพื้นที่ผิวสูงซึ่งเชื่อมติดกับวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าต้องมีตำแหน่งเกิดปฏิกิริยา (Active site) สูงและเชื่อมต่อกับสารตั้งต้นและสารอิเล็กโทรไลต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของไอออน โมเลกุลของแก๊สที่บริเวณผิวหน้าระหว่างบริเวณเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์ แต่ถึงอย่างไรขั้วไฟฟ้าจะต้องเป็นตัวนำไฟฟ้า เนื่องจากต้องพาอิเล็กตรอนไปยังอีกฝั่งของปฏิกิริยา ขั้วไฟฟ้าแบบแก๊สแพร่ (Gas diffusion electrode) ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงรุ่นแรก ๆ จะประกอบด้วยแพลทินัมแบบที่ไม่มีตัวรองรับ และแพลทินัมแบบที่มีตัวรองรับ (Support platinum) คือ แพลทินัมที่เกาะอยู่บนคาร์บอน โดยมีตัวเสริมความแข็งแรงที่ทำจากผ้าหรือกระดาษคาร์บอน (Carbon backing) และใช้สารละลายอิมัลชันเทฟลอน (Teflon emulsion) เป็นตัวยึดอนุภาคแพลทินัมให้ติดอยู่บนกระดาษคาร์บอน

ข้อดีของขั้วไฟฟ้าแบบพรุน คือ สามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และจะเกิดได้ดีมากขึ้นหากอิเล็กโทรไลต์บาง ความหนาของอิเล็กโทรไลต์จะอยู่ในช่วง 10-100 mm ทั้งนี้ยังขึ้นกับความเรียบ การกระจายตัวและความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา การทำให้ความหนาแน่นกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นทำได้โดยเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst loading) และบริเวณเกิดปฏิกิริยา (Active site) ของตัวเร่งปฏิกิริยา

2. ขั้วไฟฟ้าแบบโลหะพรุน (Porous Metal Electrode)

ขั้วไฟฟ้าแบบโลหะพรุนเกิดจากการเผาผงโลหะ โดยผงโลหะเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ นำผงที่ได้ไปขึ้นรูป ความแข็งแรงของขั้วไฟฟ้าขึ้นกับกระบวนการผลิต ขนาดรูพรุนของขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่ได้จะต้องยอมให้แก๊สหรืออิเล็กโทรไลต์ผ่านรวมถึงรักษาสมดุลภายในระบบ

3. Porous Screen Electrode

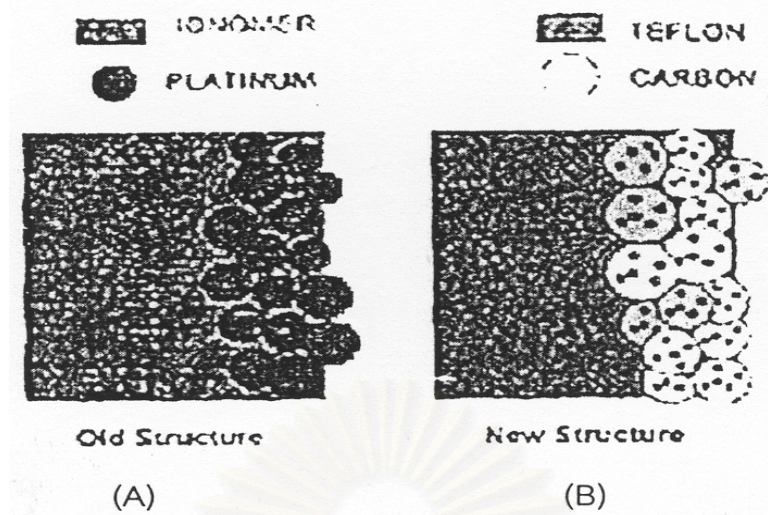
ขั้วไฟฟ้าแบบ Porous screen จะอยู่ในกลุ่มขั้วไฟฟ้าแบบพรุนและใช้โดยตรงในเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (PAFC) และอัลคาไลน์ (AFC) ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ใช้ตัวรองรับที่นำไฟฟ้าโดยผสมรวมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชอบน้ำ เช่น แพลทินัมดำ โลหะอัลลอย โลหะเหล่านี้จะไปเป็นตัวนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยายังผสมองค์ประกอบที่ไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) การเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบ Porous screen เริ่มจากการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาและพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน เมื่อผสมกันดีแล้วนำไปอัดขึ้นทั้งสองข้างตัวรองรับ โดยใช้ความดัน 70-210 kg/cm² ต่อมานำขั้วไฟฟ้าที่ได้ไปอัดร้อนที่ความดัน 300-700 kg/cm² ที่อุณหภูมิ 315 °C ใช้เวลา 7.5 นาที ในขั้นสุดท้ายนำขั้วไฟฟ้าที่ได้ไปประกบแผ่น Teflon เพื่อป้องกันการรั่วของแก๊สและเพิ่มความไม่ชอบน้ำ ในการอัดจะเป็นตัวกำหนดรูพรุนของขั้วไฟฟ้าและความหนาของขั้วไฟฟ้า ซึ่งส่งผลต่อความต้านทานและการเคลื่อนที่ของแก๊ส อิเล็กตรอนและน้ำ

ในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด ในบางครั้งอาจมีขั้วที่ 3 คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) เช่น ในการวัดแบบครึ่งเซลล์ ขั้วไฟฟ้านี้จะเป็นแหล่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยอาศัยหลักการทางจลนพลศาสตร์ และการถ่ายเทมวลมาอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนผิวขั้วไฟฟ้า เช่น ค่า

จำกัดศักย์ส่วนเกินค่าต่ำและค่าสูง (Low and high overpotential limits) โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization) ปฏิริยาเคมีและความต้านทาน ความสัมพันธ์ของ Butler-Volmer-equation และอัตราการถ่ายเทประจุ ขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวก (Cathode) ไอออนลบ (Anion) จะเคลื่อนที่เข้ามาและให้อิเล็กตรอนแก่ขั้วบวก ส่วนขั้วที่ทำหน้าที่เป็นขั้วลบ (Anode) ไอออนบวก (Cation) จะเคลื่อนที่เข้ามาและรับอิเล็กตรอนจากขั้วลบ โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าที่ใช้ต้องมีสมบัติดังนี้ คือ นำไฟฟ้าได้ดี ความพรุนสูง ทนต่อการกัดกร่อน เช่น แพลทินัม หรือโลหะอื่นที่เคลือบด้วยแพลทินัม แกรไฟต์ ซึ่งพยายามให้ผิวขั้วไฟฟ้าสัมผัสกับสารละลายมากที่สุด เพื่อให้ไอออนมีโอกาสเกิดปฏิกิริยามากที่สุด ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในเซลล์เชื้อเพลิงโดยส่วนมากจะใช้ผงแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า เนื่องจากผงแกรไฟต์มีจุดหลอมเหลวสูงและเป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี และมีอิเล็กตรอนอิสระซึ่งสามารถเคลื่อนที่ภายในผลึกได้ทำหน้าที่เป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้า

ต่อมาภายหลังได้มีการผลิตขั้วไฟฟ้า โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยามายึดติดบนเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยตรงซึ่งสามารถทำได้ 2 แบบ คือ

1. การใช้แพลทินัมดำ (Black Platinum) มาอัดโดยใช้ความร้อน (Hot processing) ให้ติดลงไปโดยตรงบนเยื่อแผ่น แสดงดังรูปที่ 2.4 (A) โดยค่าอุณหภูมิที่ใช้อัดมีค่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว และอุณหภูมิที่เกิดการเสื่อมสภาพ (Degradation temperature) ของเยื่อแผ่น ขั้วไฟฟ้าแบบนี้มีสมรรถนะการทำงานปานกลาง ต้องการแพลทินัมประมาณ 2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร
2. การทำขั้วไฟฟ้าแบบชั้นฟิล์มบาง (มีความหนา 4-5 ไมโครเมตร) โดยนำแพลทินัมมาเกาะบนตัวรองรับก่อน จากนั้นนำไปเกาะบนเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ดังรูปที่ 2.4 (B) สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีการฝังโดยตรง (Direct impregnation method) และการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) วิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบนี้จะให้สมรรถนะการทำงานที่ดีกว่าวิธีแรก เนื่องจากใช้แพลทินัมในปริมาณที่น้อยกว่าถึง 10 เท่า แต่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสที่มากกว่าถึง 3 เท่า วิธีการนี้เป็นวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีการกระจายตัวของแพลทินัมสูง จึงเป็นการลดปริมาณการใช้แพลทินัม



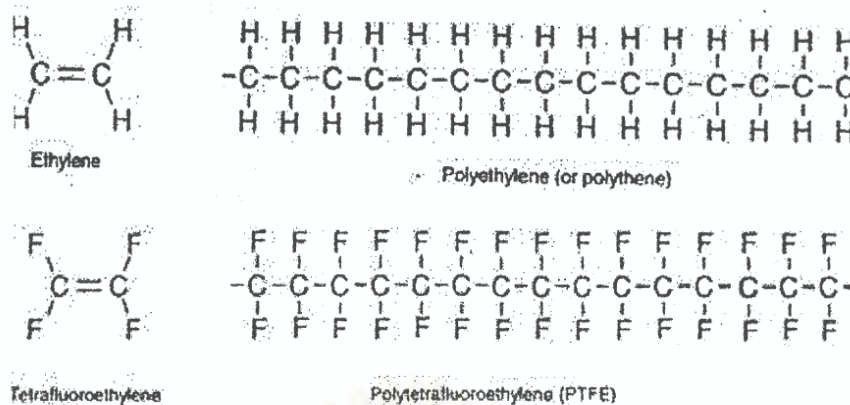
รูปที่ 2.4 รูปแบบเริ่มแรกของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่น แลกเปลี่ยนโปรตอนกับรูปแบบใหม่ของขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำให้ปริมาณความต้องการของแพลทินัมลดลง 10 เท่า [Norbeck, 1996]

ขั้วไฟฟ้าแบบชั้นฟิล์มบางนั้นจะให้สมรรถนะการทำงานที่ดี และให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าประมาณ 1 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนและอากาศเป็นสารตั้งต้น และใช้แพลทินัมเพียง 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร หากเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าแบบเก่า จะให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียง 0.3 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และมีปริมาณแพลทินัมมากกว่าถึง 10 เท่า [Srinivasan, 1993]

2.2.3 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) [Larminie, 2000]

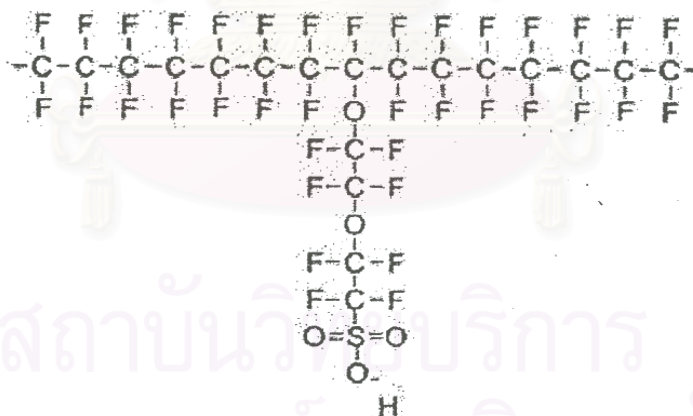
เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน มีโครงสร้างหลักเป็นสารพอลิเมอร์ จำพวกซัลโฟเนต ฟลูออโรพอลิเมอร์ (Sulphonated fluoropolymers) หรือ ฟลูออโรเอทิลีน (Fluoroethylene)

การเตรียมพอลิเมอร์ทำได้โดย การให้ฟลูออรีนแทนที่ตำแหน่งของไฮโดรเจนในโมเลกุลของเอทิลีนเรียกกระบวนการนี้ว่า เพอร์ฟลูออรีเนชัน (Perfluorination) ได้โครงสร้างที่เรียกว่า เตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene) เมื่อโมเลกุลเรียงต่อกันจะได้พอลิเมอร์ที่เรียกว่า พอลิตเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene) หรือ PTFE ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ความแข็งแรงของพันธะระหว่างฟลูออรีนกับคาร์บอนทำให้พอลิเมอร์มีความทนทาน



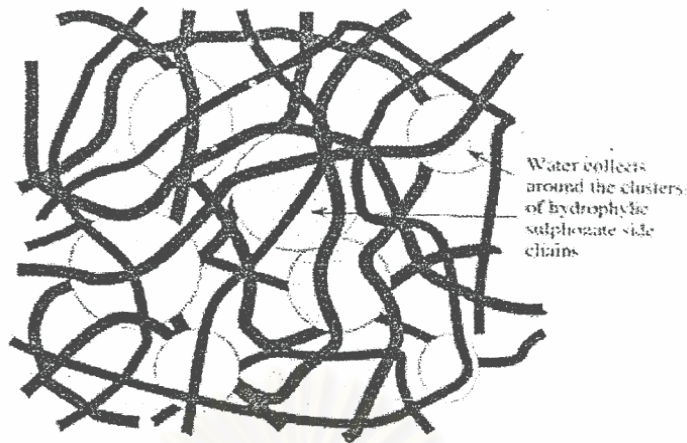
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเอทิลีนและเตตระฟลูออโรเอทิลีน [Larminie, 2000]

นอกจากนี้การเตรียมอิเล็กโทรไลต์ จะทำโดยการเพิ่มส่วนของซัลโฟเนต (Sulfonate) ซึ่งได้มาจากกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 กระบวนการนี้เป็นที่นิยมในกระบวนการทางเคมีเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น กระบวนการทำผลิตภัณฑ์เพื่อทำความสะอาดโมเลกุลของกรดซัลโฟนิกจะสร้างพันธะที่ปลายของพอลิเมอร์กลายเป็นหมู่ SO_3^- ในส่วนปลายช่วงนี้เป็นช่วงที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของน้ำไว้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของซัลโฟเนต ฟลูออโรเอทิลีน [Larminie, 2000]

ในส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic regions) จะทำหน้าที่ดูดซับน้ำไว้ในอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยส่วนนี้จะมีแรงพันธะในการยึดกันระหว่างหมู่ SO_3^- กับ H^+ อ่อนลง ทำให้ H^+ สามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีการดูดซึมน้ำเอาไว้ [Larminie, 2000]

เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ทำหน้าที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์จะต้องมีสมบัติดังต่อไปนี้ [สุภาภรณ์, 2543]

- 1) มีค่าการนำไอออนสูง แต่มีค่าการนำอิเล็กตรอนต่ำ
- 2) มีค่าการแพร่ของแก๊สต่ำ
- 3) มีขนาดที่แน่นอน (ไม่มีการบวม)
- 4) มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง
- 5) มีค่าการแพร่ของน้ำต่ำ
- 6) มีค่าความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำหรือมีความต้านทานต่อการเกิดดีไฮเดรชัน (Dehydration)
- 7) มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน รีดักชันและไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
- 8) มีค่าการถ่ายเทไอออนบวกสูง
- 9) พื้นผิวของเยื่อแผ่นต้องสามารถเชื่อมตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกาะบนพื้นผิวได้ดี
- 10) มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity)

เยื่อแผ่น Nafion ก่อนที่จะนำมาทำการประกอบเป็นหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดจะนำมาทำการปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่นตามกระบวนการทำความสะอาด คุณสมบัติของเยื่อแผ่น Nafion นั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการทำนายโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าได้ เช่น ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ ความหนาแน่น ความสามารถในการซึมผ่านได้ของแก๊สไฮโดรเจน แก๊สออกซิเจน และน้ำและความหนาที่เปลี่ยนไป เป็นต้น ค่าการนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันจาก 1 mS/cm ที่ 20 % relative humidity (RH) และที่ 100 %RH มีค่าการนำ

ไฟฟ้า 100 mS/cm โดยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 45-80 °C และค่าการนำไฟฟ้านี้ยังขึ้นอยู่กับกระบวนการอัดพิมพ์ (Casting procedure) และอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่นด้วย [Wolf, 2003]

2.2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) [วิทยา, 2534]

จากการศึกษาพลังงานเคมี หมายถึง ผลรวมของพลังงานในรูปแบบของความร้อนหรืองานในรูปแบบต่าง ๆ เมื่อมีสารเคมีตั้งต้นตั้งแต่ 2 สารขึ้นไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารใหม่ขึ้นมาเช่นกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน ตัวเร่งปฏิกิริยา คือสารที่ช่วยเร่งอัตราการเกิดของปฏิกิริยา ซึ่งก็คือถ้านำแก๊สทั้งสองมาผสมกันในอุณหภูมิปกติจะไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นเนื่องจากโมเลกุลมีความเสถียรมาก ยกเว้นว่าจะมีบางสิ่งมาทำเป็นตัวกระตุ้นจึงจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ อย่างเช่น ให้ความร้อนระหว่างที่แก๊สไฮโดรเจนผสมกับแก๊สออกซิเจนหรือเติมสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นโดยสารที่เติมลงไปนั้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงเป็นสารอื่นและปริมาณคงเดิมเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด เรียกสารนั้นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระดับพลังงานกระตุ้น (Activation energy) จะต่ำกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ระดับพลังงานกระตุ้นจะแสดงอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ถ้าระดับพลังงานกระตุ้นต่ำ ปฏิกิริยาจะเกิดได้ง่ายและเร็ว ในทางตรงกันข้ามถ้าระดับพลังงานสูงปฏิกิริยาจะเกิดได้ยากและช้า นั่นแสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกจำแนกได้ 3 ชนิดโดยพิจารณาจากเฟส (Phase) ของตัวเร่งปฏิกิริยากับเฟสของสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่หนึ่ง ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเฟสแตกต่างจากสารตั้งต้นหรือไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเรียกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเฮเทอโรจีเนียส (Heterogeneous catalyst) ชนิดที่สอง คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีขอบเขตของเฟสโดยเฟสของตัวเร่งปฏิกิริยากับเฟสของสารตั้งต้นสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน เรียกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโฮโมจีเนียส (Homogeneous catalyst) และชนิดที่สาม คือ เอนไซม์ (Enzyme) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกี่ยวกับปฏิกิริยาทางชีวเคมี

ในงานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเฮเทอโรจีเนียส โดยส่วนใหญ่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะเป็นของแข็ง ในขณะที่สารตั้งต้นเป็นแก๊สหรือของเหลว หรือแก๊สอยู่ร่วมกับของเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง มีคุณสมบัติทางเคมีของผิวจึงเกิดปฏิกิริยาจำเพาะตามธรรมชาติทางเคมีของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็ง ในการเกิดปฏิกิริยาคะตะไลซิส (Catalysis) นั้น ปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและระบบของสารตั้งต้นกับสารผลิตภัณฑ์ต้องไม่เปลี่ยนแปลงธรรมชาติทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา ยกเว้นบริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น

การเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่ผิว (Surface interaction) จึงต้องไม่เกิดปฏิกิริยาทะลุเข้าไปในเนื้อชั้นในของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังนั้นปฏิกิริยาที่ผิวจะเป็นปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption) เท่านั้น โดยสิ่งจำเป็นพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาอะตอมละติคิตที่พื้น ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีคุณสมบัติดังนี้ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาให้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และมีอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่สูงเพียงพอที่ยอมรับได้ ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและความดันขณะทำการทดลอง โดยให้ปฏิกิริยาข้างเคียง (Side-reaction) เกิดขึ้นน้อยที่สุดหรือไม่เกิดเลย และตัวเร่งปฏิกิริยาต้องคงทนต่อปฏิกิริยา สามารถใช้งานได้ในช่วงเวลานาน สำหรับโลหะที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ โลหะโนเบิล ซึ่งมีราคาแพงมากแต่มีความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสูง เช่น แพลทินัม พาลาเดียม เป็นต้น

ในเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยามีหน้าที่ 3 อย่าง คือ ดูดซับแก๊ส (Adsorption) ส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transfer) และที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นที่เกิดปฏิกิริยา (Surface reaction) ทั้งนี้การดูดซับแก๊สเป็นการยึดเหนี่ยวแบบโควาเลนต์ (Covalent bond) ระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับและผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3 อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้า

ตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติพื้นฐานของขั้วไฟฟ้า เช่น ความต้านทาน การนำไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของประจุ ไอออน อิเล็กตรอน รวมถึงสารตั้งต้น ซึ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของมวลมีผลต่อความต่างศักย์รวมของระบบ ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ๆ ควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวสูงจะทำให้ค่าความต่างศักย์ส่วนเกินในการเกิดปฏิกิริยามีค่าต่ำ ในเซลล์เชื้อเพลิงแก๊สจะสะสมที่บริเวณเกิดปฏิกิริยา (Active site) ซึ่งก็คือบริเวณตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าแบบรูพรุน ดังนั้นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อโครงสร้างและองค์ประกอบในชั้นปฏิกิริยา (Active layer) มีบทบาทต่อการควบคุมการแพร่มวลสารและความต้านทานในระบบ โดยเฉพาะเมื่อใช้อากาศเป็นสารตั้งต้นทางด้านแคโทด โดยทั่วไปการควบคุมปฏิกิริยาด้วยการเคลื่อนที่ของมวลสาร (Mass transport limitation) นั้นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาว่ามีความพรุนและขนาดของรูพรุนมากน้อยเท่าไร ในขณะที่การควบคุมปฏิกิริยาด้วยความต้านทาน (Ohmic limitation) นั้นหมายถึง ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออนในอิเล็กโทรไลต์

2.3.1 ชนิดของตัวรองรับ

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะใช้พวกคาร์บอนเป็นตัวรองรับให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพวกคาร์บอนจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อน มีโครงสร้างที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวมาก ช่วยในการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงและโปรตอนได้ง่าย และยังช่วยดูดซับน้ำภายในระบบเพื่อป้องกันการเกิดชั้นฟิล์มของน้ำที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ความต้านทานในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การแพร่ของเชื้อเพลิงไปยังบริเวณเกิดปฏิกิริยายากยิ่งขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง ดังนั้นการเลือกชนิดของตัวรองรับควรเลือกให้เหมาะสมกับข้อไฟฟ้าที่ต้องการ เพราะตัวรองรับมีหน้าที่สำคัญ คือ

- 1) ช่วยในการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 2) ช่วยในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากับอนุภาคตัวรองรับใกล้เคียง
- 3) เพิ่มความแข็งแรงของขั้วไฟฟ้า

2.3.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่นิยมใช้ คือ แพลทินัม ซึ่งทนต่อการกัดกร่อนและทำให้สมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้าเสถียรมากกว่า และว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนได้ดีกว่าพลาตินัม หรือโลหะอีกหลายชนิดในโลหะมีสกุล (Noble metal) นอกจากชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา สิ่งที่ต้องพิจารณาที่สำคัญคือ สมบัติต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา อันได้แก่ พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (Active surface area) ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา การกระจายตัว เพราะคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าและสมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้า นอกจากการใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วยังมีการใช้อัลลอยของแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าเพราะอัลลอยของแพลทินัมทนต่อความเป็นพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีกว่าแพลทินัม แต่ทั้งนี้การเลือกชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องพิจารณาถึงสารตั้งต้นที่ใช้ เพื่อให้อายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยานาน

2.3.3 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับเป็นอีกตัวแปรหนึ่ง ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับมีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขนาด พื้นที่เกิดปฏิกิริยา (Active site) คือ ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลง

2.3.4 ปริมาณสารละลายเทฟลอน (polytetrafluoroethylene, PTFE) [Giorgi, 1998]

สารละลายเทฟลอนผสมอยู่ในชั้นแพร่ (Diffusion layer) และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยในการยึดเกาะของอนุภาคคาร์บอน และช่วยในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำไปยังชั้นนั้น ๆ พบว่าปริมาณของเทฟลอนมีผลต่อความพรุนและความหนาของขั้วไฟฟ้า ความพรุนจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเทฟลอนมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากความพรุนของชั้นมีผลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณเทฟลอนมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า เนื่องจากปริมาณของเทฟลอนมีผลต่อค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้า

2.3.5 ปริมาณสารละลายเนฟลอน (Nafion) [Wolf, 2003]

สารละลายเนฟลอนเป็นส่วนผสมอีกตัวหนึ่ง ที่มีความสำคัญในการเตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เนื่องจากเนฟลอนช่วยในการเคลื่อนที่ของโปรตอนและจะเห็นว่าสารละลายเนฟลอนเป็นสารชนิดเดียวกับสารที่ใช้ทำเยื่อแผ่น ซึ่งมีคุณสมบัติในการนำไอออนได้ดี ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเนฟลอนทำให้สมบัติของขั้วไฟฟ้าดีขึ้น เนื่องจากเนฟลอนช่วยลดความต้านทานของขั้วไฟฟ้า ทำให้ขั้วไฟฟ้ามีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและยังเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของแพลทินัม (Pt active area) แต่ถ้ามีการใส่สารเนฟลอนมากเกินไปจะทำให้แก๊สเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นและทำให้ขั้วไฟฟ้ามีความหนามากขึ้น เนื่องจากปริมาณเนฟลอนที่เพิ่มขึ้นจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของแก๊สเชื้อเพลิงไปยังพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยา

2.3.6 อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความพรุนและขนาดของรูพรุนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้วไฟฟ้า คือ ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไปมีส่วนทำให้อนุภาคเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว อนุภาคที่ได้จะมีขนาดใหญ่และมีความพรุนน้อย และอาจมีส่วนทำให้สารประกอบบางตัวสลายได้ จึงควรใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของสารประกอบที่ต้องการ แต่ถ้าใช้อุณหภูมิในการเตรียมต่ำเกินไป ขนาดของอนุภาคที่ได้จะมีขนาดเล็ก ความพรุนจะมาก แต่อาจต้องใช้เวลาในการทำงานนานเกินไป นอกจากนี้อุณหภูมิจึงเป็นตัวแปรหนึ่งแล้วสิ่งที่ควบคู่ไปกับอุณหภูมิ คือ มีผลต่อขนาดของรูพรุนและความหนา เป็นที่ทราบกันดีว่าความพรุนมีผลต่อการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในขั้วไฟฟ้า ดังนั้นควรพยายามทำให้ขั้วไฟฟ้ามีความพรุนที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า

2.3.7 การสัมผัสกันของตัวเร่งปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์ในชั้นปฏิกิริยา

โครงสร้างและองค์ประกอบของชั้นปฏิกิริยามีผลต่อความต้านทานและการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิง ดังนั้นในการเตรียมขั้วไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึง

- 1) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องมีขนาดเล็กประมาณ 2.4 นาโนเมตร
- 2) คาร์บอนที่ใช้เป็นตัวรองรับจะต้องมีพื้นที่ผิวและความพรุนสูง
- 3) ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องเข้าไปเกาะบนตัวรองรับได้ง่าย
- 4) ตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องสัมผัสกับอนุภาคของตัวรองรับใกล้เคียง เพื่อช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าในชั้นปฏิกิริยา
- 5) มีการเชื่อมต่อกันระหว่างชั้นปฏิกิริยากับชั้นอิเล็กโทรไลต์
- 6) มีช่องว่างการไหลของแก๊สไปยังบริเวณตัวเร่งปฏิกิริยาและบริเวณอิเล็กโทรไลต์
- 7) มีเทพลอนเป็นองค์ประกอบหากชั้นปฏิกิริยาไม่บาง เพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของแก๊สและนำน้ำออกจากระบบ

2.3.8 วิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้า

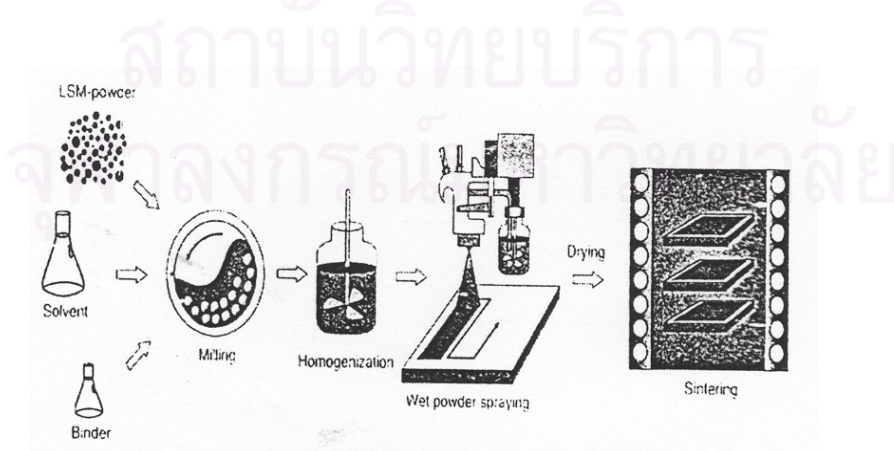
การเตรียมขั้วไฟฟ้ามักมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การพิมพ์หรือการระบาย (Printing or brushing) การสเปรย์ (Spray) และการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีการเตรียมและองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไป โดยการเตรียมและองค์ประกอบของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมมีผลต่อคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่ได้ เช่น ความหนา ความพรุน การนำไฟฟ้า และความต้านทาน ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้า

2.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้า [Wolf, 2003]

การเตรียมขั้วไฟฟ้ามักมีด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่ต้องการ และความยากง่ายในการเตรียมดังนี้

2.4.1 การสเปรย์ (Spray)

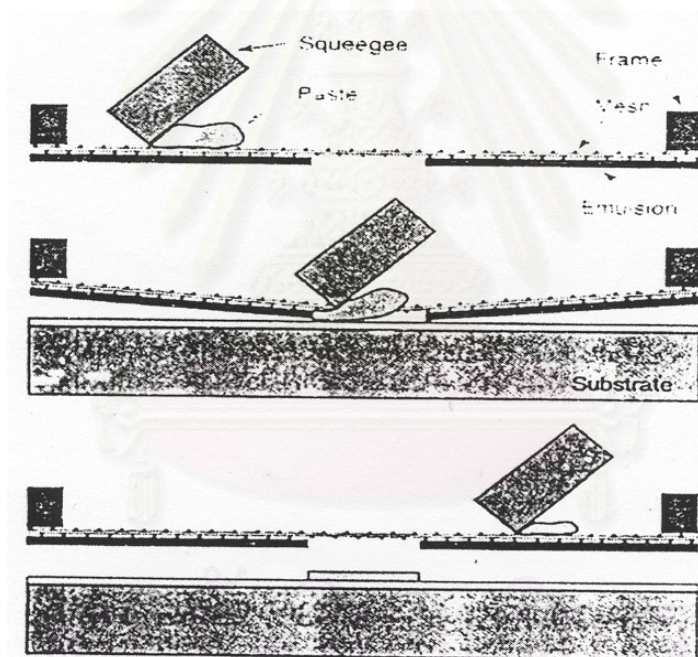
กระบวนการสเปรย์สารละลายที่ใช้จะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความละเอียดสูง ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำไปสเปรย์ลงไปยังแผ่นรองรับ แผ่นรองรับที่ใช้อาจมีรูพรุนหรือไม่ก็ได้ โดยทั่วไปมักจะใช้กระดาษคาร์บอน ขั้นตอนการทำแสดงดังรูปที่ 2.8 เริ่มจากนำผงตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับตัวทำละลายและส่วนผสมอื่น ผสมให้เข้ากัน สมบัติที่สำคัญของสารผสมคือ ความหนืด (Viscosity) และระยะเวลาในการแห้ง (Drying rate) เกิดการระเหยระหว่างการสเปรย์ทำให้ผงตัวเร่งปฏิกิริยาจับกับแผ่นรองรับ ความชื้นที่เหลือในสารผสมจะต้องมีความหนืดต่ำ เพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนแผ่นรองรับ หลังจากนั้นนำไปประเหยให้แห้ง



รูปที่ 2.8 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการสเปรย์ [Wolf, 2003]

2.4.2 การพิมพ์หรือการระบาย (Painting or brushing)

กระบวนการพิมพ์ สารละลายที่ใช้มีส่วนผสมเหมือนกับการสเปรย์แต่สารผสมจะมีความหนืดสูงกว่าการสเปรย์ และต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง แล้วนำสารผสมไประบายลงบนแผ่นรองรับด้วยแปรงหรือแม่พิมพ์ แผ่นรองรับที่ใช้อาจมีรูพรุนหรือไม่ก็ได้ แผ่นรองรับที่มีความพรุนที่นิยมใช้ได้แก่ กระดาษคาร์บอน (Carbon paper) ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) เป็นต้น ถ้ามีการใช้แผ่นรองรับ ขั้วไฟฟ้าจะมีชั้นแพร่ (Diffusion layer) เพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงและรักษาระดับน้ำในเซลล์ แต่ถ้าไม่ใช้แผ่นรองรับหรือใช้แผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุน เมื่อทำการอัดขั้วไฟฟ้าเข้ากับเยื่อแผ่นจะต้องนำแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนออก โดยทั่วไปแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าจะเป็นพวกพลาสติกที่ทนความร้อน เช่น เทฟลอน โดยมีขั้นตอนการทำแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์ [Wolf, 2003]

2.4.3 การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) [เพ็ญศรี, 2542]

การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า อาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมี คือ การทำให้โลหะไปเกาะบนผิวหน้าชิ้นงาน ในที่นี้คือ กระดาษคาร์บอน จุ่มกระดาษคาร์บอนลงในสารละลายซึ่งมักจะเป็นโลหะที่ต้องการให้เกิดการพอกพูน โลหะที่ต้องการพอกพูนควรจับบนขั้วไฟฟ้าได้แน่น

เรียบ สม่าเสมอ เพื่อให้สามารถนำขั้วไฟฟ้าที่มีผลปฏิกิริยาพอกพูนอยู่ไปล้างให้ปราศจากไอออนต่าง ๆ ทำให้แห้งและชั่งน้ำหนัก

เมื่อการพอกพูนของโลหะบนขั้วไฟฟ้าเกิดอย่างสมบูรณ์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะลดลงจนเป็นศูนย์หรือมีค่าคงที่ที่น้อยมาก แม้ยังคงให้พลังงานแก่เซลล์ ปฏิกิริยาหรือการไหลของกระแสไฟฟ้าย่อมไม่เกิดขึ้นอีก ซึ่งควรต้องนำขั้วไฟฟ้าที่มีการพอกพูนของโลหะออกจากวงจรของเซลล์ก่อนนำแหล่งพลังงานไฟฟ้าออกเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการผันกลับของปฏิกิริยา ซึ่งทำให้สารที่จับกับขั้วไฟฟ้ากลับละลายไปในสารละลาย

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะการพอกพูน ได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการพอกพูน โดยทั่วไปพลังงานศักย์ที่ให้แก่เซลล์ไม่ควรมากจนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามากเกินไป จึงเหมือนเป็นการเร่งการพอกพูนของสาร การเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายด้วยแรงกวนสารละลายหรือการหมุนของขั้วไฟฟ้า มีส่วนช่วยให้การพอกพูนของสารเป็นไปได้ดี สม่าเสมอ การเพิ่มอุณหภูมิในสารละลายในระหว่างการพอกพูน มีส่วนช่วยต่อการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเร่งการพอกพูนสารที่ขั้วไฟฟ้า แต่ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะและภาวะในการเกิดปฏิกิริยาของสาร

สาเหตุหนึ่งของการทำให้การพอกพูนของสารไม่เรียบ หลุดง่าย เพราะเกิดแก๊สขึ้นระหว่างการพอกพูน การเกิดรีดักชันให้แก่ไฮโดรเจนหรือการเกิดออกซิเดชันของน้ำให้แก่สออกซิเจนในระหว่างการพอกพูนแม้ฟองแก๊สทำให้เกิดการพาไอออนได้ดีขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็สกัดกั้นการพอกพูนของสารบนขั้วไฟฟ้าทำให้การเกาะตัวของสารไม่เรียบและหลุดออกได้ง่าย

2.5 วิธีการเตรียมน้ำหมึก (Ink) ของขั้วไฟฟ้า [Wolf, 2003]

สำหรับการประกอบ MEA ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนนี้ เริ่มต้นจะสร้างขึ้นจากการใช้เทพลอนสร้างพันธะกับขั้วไฟฟ้า ที่พัฒนามาจากเซลล์เชื้อเพลิงแบบที่มีกรดฟอสฟอริกเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะแทรกผ่านเยื่อแผ่นไปได้บางส่วนด้วยการใช้ความดันและอุณหภูมิสูงและการใช้แพลทินัมที่มีปริมาณสูง การพัฒนาเยื่อแผ่นที่มีความสามารถในการละลายจะทำให้สามารถนำขั้วไฟฟ้ามาทาหรือระบายด้วยสาร ionomer เป็นผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกใช้เพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง เทพลอนในโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าจะทำให้มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดน้ำท่วมเซลล์และการแพร่ของแก๊สดังต้นจะดีขึ้น แต่ข้อเสียก็คือจะส่งผลต่อค่าความต่างศักย์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีการใช้ลดลงในภาวะที่ไม่มี ความชื้น Wilson และคณะ (1992) ได้คิดค้นน้ำหมึกซึ่งประกอบไปด้วยของผสมของ ionomer, glycol และแพลทินัมบนคาร์บอนและใช้เทคนิคการอัดพิมพ์ (Decal technique) ที่จะป้อนลงไปบนเยื่อแผ่นซึ่งเป็นผลให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเกินไป MEA ที่มีสมรรถนะสูงนั้นจะเห็นว่าขั้ว

ไฟฟ้าจะมีความต้านทานไอออนต่ำ และเขาได้ปรับปรุงเทคนิคต่าง ๆ โดยเริ่มตั้งแต่การปรับปรุงคุณภาพของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและต่อมาใช้กระบวนการอัดที่อุณหภูมิสูง

Wilson และคณะ (1992) พบว่าชั้นขั้วไฟฟ้าที่สร้างจากสารละลายผสมของ Nafion 5 % โดยน้ำหนัก แพลทินัมบนคาร์บอน 20 % และอัตราส่วนระหว่าง (Pt+C) ต่อ ionomer จะเท่ากับ 3 น้ำและกลีเซอรอล ทาลงบนเทพลอนแล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 135 °C และอัดด้วยความร้อนทันทีลงบนเยื่อแผ่นจะเกิดเป็น CCM (Catalyst Coated Membrane) และทั้ง 2 ด้านของเยื่อแผ่นจะประกบด้วยชั้นแก๊สแพร่ ซึ่งจะเกิดเป็น MEA

ในกระบวนการเตรียมน้ำหมึกทั่วไปจะทำการเตรียมส่วนประกอบออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระจายตัวอยู่ในตัวด้วย ionomer ส่วนที่ 2 จะให้คาร์บอนรวมตัวกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ จากนั้นจึงนำส่วนประกอบทั้งสองมาผสมกันในอัตราส่วนที่ได้ทำการคำนวณแล้วและบดเข้าด้วยกันและจะได้เป็นตัวทำละลายเกิดขึ้น

มีเทคนิคต่าง ๆ กันมากมายที่จะบ่อน้ำหมึกลงไปบนเยื่อแผ่นหรือชั้นแก๊สแพร่ เช่น การทาหรือการระบาย (Painting) การสเปรย์ (Spraying) การ coating เป็นต้น นอกจากกระบวนการเหล่านี้และองค์ประกอบต่าง ๆ คือ แพลทินัม คาร์บอน ionomer และเยื่อแผ่นแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีก คือ อัตราส่วนระหว่าง ionomer กับคาร์บอน (I/C) การกระจายตัวและปริมาณที่เหมาะสมของ ionomer ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาต้องสมดุลกันทั้งระหว่างความต้องการของความต้านทานขั้วไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด การสัมผัสกันของ ionomer กับอนุภาคแพลทินัมให้มากที่สุดและแก๊สตั้งต้นสามารถเข้าไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านรูพรุนได้มากที่สุด โดยปกติอัตราส่วนที่ต้องการก็ขึ้นอยู่กับสูตรและกระบวนการประกอบโดยเฉพาะ และอัตราส่วนที่เหมาะสมนี้จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของคาร์บอน ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราส่วนของ I/C ที่เปลี่ยนไปมากกว่าอัตราส่วนของ I/(Pt + C) สำหรับคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวปานกลาง เช่น Vulcan ปริมาณ ionomer ที่เหมาะสมในขั้วไฟฟ้า คือ ที่ประมาณ 30 % โดยน้ำหนัก

2.6 ความพรุนและความชื้นของโครงสร้างของขั้วไฟฟ้า [Wolf, 2003]

ตัวแปรที่สำคัญที่อธิบายโครงสร้างของขั้วไฟฟ้า คือ ความพรุนของขั้วไฟฟ้า ซึ่งตรวจสอบได้โดยวิธี mercury porosimetry, flow porometry, capillary condensation ร่วมกับ SEM ของส่วน MEA ที่แตก råวและ TEM ถ้าความพรุนมากจะช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากการแพร่ของแก๊ส แต่ที่ความพรุนมากนี้ก็อาจส่งผลให้ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยปกติความพรุนของ MEA ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนนี้ คือ 30-60 % สมบัติที่ชอบและไม่ชอบน้ำในโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าจะรวมไปถึงความพรุนและถูกควบคุมโดยคาร์บอนที่ใช้ อัตราส่วนของ

ionomer กับคาร์บอน Zawodzinski และคณะ (1993) ได้แสดงให้เห็นว่าภาวะที่เหมาะสมของขั้วไฟฟ้าและชั้นแก๊สแพร่ของเซลล์เชื้อเพลิงที่สัมผัสกับ ionomer ที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีนั้น คือ จุดที่เชื่อมต่อกับส่วนรูพรุนที่มีความชื้นของโครงสร้างของขั้วไฟฟ้า

2.7 การอัดด้วยความร้อนในการประกอบ MEA [Wolf, 2003]

ขั้วไฟฟ้าหรือชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะสร้างขึ้นโดยวิธีเทคนิคทางการอัดพิมพ์ (Decal method) หรือการเคลือบ (Coating) โดยตรงลงไปบนเยื่อแผ่นหรือชั้นแก๊สแพร่ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้วของ Nafion คือ ประมาณ 150°C (อุณหภูมิที่เยื่อแผ่น Nafion เริ่มเสื่อมสภาพ) ซึ่งจะเป็นสิ่งที่ค้ำยันถึงในการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้การอัดด้วยความร้อนของขั้วไฟฟ้าง่ายไปยังชั้นแก๊สแพร่หรือเยื่อแผ่น ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้วของเยื่อแผ่น Nafion จะมีการแลกเปลี่ยนโปรตอนและการสัมผัสทางไอออนกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี จะส่งผลให้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาลดน้อยลง อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปของฟิล์มที่อุณหภูมิสูง ๆ นี้ อาจส่งผลให้ความสามารถในการถูกละลายของ ionomer ลดลงแต่ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิสูงกว่า 150°C อาจส่งผลให้คุณสมบัติในการรักษาน้ำของเยื่อแผ่น Nafion ลดลง กรดจะไปเร่งให้สมบัติของ ionomer แยกและขั้วไฟฟ้าจะเกิดการแยกชั้นกับเยื่อแผ่น เพราะฉะนั้นการอัดด้วยความร้อนจะใช้ความดันอยู่ในช่วง 5,000-15,000 KPa อุณหภูมิที่ $120-150^{\circ}\text{C}$ และเวลาอยู่ที่ 1-5 นาที ในการอัดขั้วไฟฟ้าง่ายไปบนเยื่อแผ่นต้องแน่ใจว่าขั้วไฟฟ้านั้นยึดกับเยื่อแผ่นอย่างแข็งแรง เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เยื่อแผ่นแห้งเกินไป จึงมีกระบวนการที่เรียกว่า การอัดด้วยไอน้ำ ซึ่งบางครั้งจะทำให้เยื่อแผ่นชุ่มไปด้วยน้ำและไม่รู้ว่าไหลจนกระทั่งการอัดด้วยความร้อนนี้สามารถอัดที่ความดันไอได้ ในการที่จะป้อนเทพลอนลงไปในขั้วไฟฟ้าหรือน้ำหมึกกับเทพลอนลงไปในชั้นแก๊สแพร่ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 300°C นั้นต่อมา ionomer ต้องถูกเติมลงไปภายหลังที่อุณหภูมิต่ำในขั้นตอนต่อไปเพื่อที่จะป้องกันการสลายตัวของ ionomer

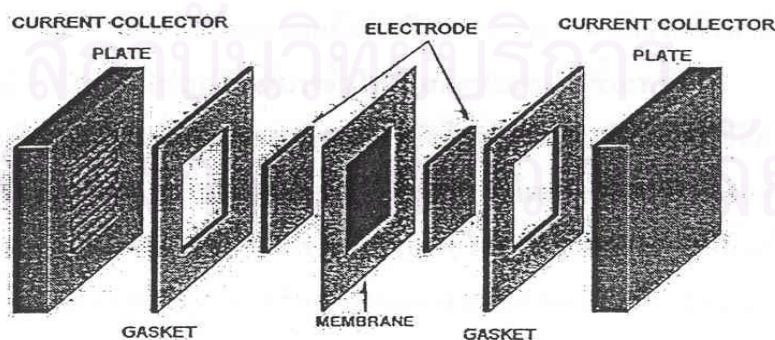
Grot และคณะ (1996) ได้แสดงถึงวิธีการที่จะลดการแยกเป็นชั้น (Delamination) การลอกหลุด (Peeling) หรือการแตกหักของขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากการทำการอัดด้วยความร้อน โดยมีสาเหตุมาจากการพองตัว (Swelling) ของเยื่อแผ่น ในกระบวนการนี้จะเติมน้ำลงไปบนเยื่อแผ่นซึ่งพื้นผิวไม่มีไอออน เพื่อให้เปลี่ยนรูปไปมีไอออนเกิดขึ้นและได้น้ำหมึกที่เป็นสารอินทรีย์และต่อมาจึงนำไปป้อนหรือสร้างพันธะกับเยื่อแผ่นต่อไป โดยเยื่อแผ่นและโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าจะถูกเติมน้ำลงไปหลังจากการทาหรือการระบายน้ำหมึกลงไปแล้ว

Hulett และคณะ (2000) ได้แสดงวิธีการลดการลอกหลุด (Peeling) ของเยื่อแผ่นกับขั้วไฟฟ้าโดยใช้เยื่อแผ่นที่มีการพองตัว (ประมาณ 25 %) ซึ่งเกิดจากกระบวนการหล่อ (Casting) ของสารอินทรีย์เพื่อที่จะลดความดันและอุณหภูมิที่สูง ซึ่งผลที่ได้ประสบความสำเร็จโดยเยื่อแผ่นยังคงรูปโดยเพื่อที่จะป้องกันการหดตัวของเยื่อแผ่นนั้น กระบวนการทั้งหมดของก่อนการเกิดการพองตัวของเยื่อแผ่นจะทำให้เกิดการหลุดออกลงไปในสารอินทรีย์ การเคลือบของส่วนผสมและการระเหยของสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 60-90 °C หลังจากทำการประกอบ MEA แล้วในเซลล์ กระบวนการ hydration จะช่วยให้เยื่อแผ่นขยายตัวตามความหนา ทำให้การสัมผัสกันทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

จะเห็นว่าการสัมผัสกันที่ดีของเยื่อแผ่นกับขั้วไฟฟ้านี้จะส่งผลทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนเป็นไปอย่างต่อเนื่องกัน ดังนั้นจุดที่สำคัญก็คือ ผิวหน้าที่สัมผัสกัน (Interface) ของเยื่อแผ่นกับขั้วไฟฟ้าไม่ใช่ที่ผิวหน้าที่สัมผัสกันของขั้วไฟฟ้ากับชั้นแก๊สแพร่ แต่จุดนี้ถ้าพันธะไม่แข็งแรงก็อาจจะก่อให้เกิดปัญหาการเกิดน้ำท่วมบริเวณนี้ได้

2.8 การประกอบเซลล์เดี่ยว (Single cell) ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนนี้ จะมีส่วนประกอบ คือ แผ่น MEA ที่ถูกประกบด้วยแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าโดยในแต่ละด้านของแผ่น MEA จะป้องกันการรั่วของแก๊สโดยใช้ประเก็น (Gasket) [Pozio, 2002] ซึ่งแก๊สที่ให้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะกระจายไปทั่วผิวหน้าของ MEA โดยผ่านช่องทางเดินแก๊สบนผิวหน้าของแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า ซึ่งแผ่นประเก็นจะประกบในแต่ละด้านของ MEA โดยจะเว้นช่องไว้สำหรับขั้วไฟฟ้าหรือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (Active area) โดยองค์ประกอบของเซลล์เดี่ยว แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบของเซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [Mikkola, 2002]

การป้องกันการรั่วของแก๊สที่มีประสิทธิภาพ จะต้องมียูนิทของเมมเบรนตรงบริเวณขอบของแผ่น MEA เหลือพอสำหรับการประกบกับแผ่นประกั้นพร้อมกับการยึดตรึงที่แน่นอนด้วย โดยจะมีผลโดยตรงต่อความต้านทานในการสัมผัส (Contact resistance) ขององค์ประกอบภายในเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าการสัมผัสกันไม่แน่นสนิทจะมีผลให้เกิดการลดลงของความต่างศักย์ (Voltage drop) อย่างรวดเร็วขณะเกิดการดึงกระแสจากตัวต้านทานภายนอก [Mikkola, 2000] และถัดจากแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้านี้จะมีแผ่นปิดท้าย (End plate) ในแต่ละด้านของตัวเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงอีกชั้นหนึ่ง

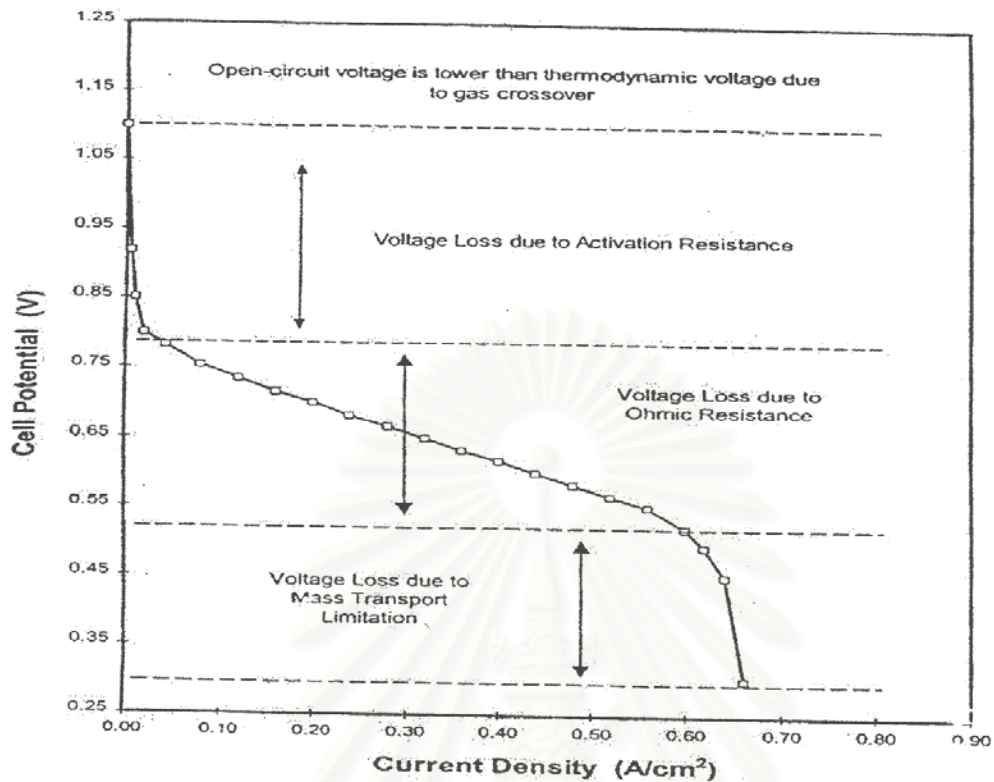
2.9 โพล่าไรเซชัน (Polarization)

เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงถูกต่อเข้ากับวงจรภายนอกและมีการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ แต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าที่ลดลงไม่เท่ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีหรือที่ได้จากกระบวนการที่ผันกลับได้ (Reversible process) ซึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจน จะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีจะประมาณ 1.229 โวลต์ ผลต่างระหว่างค่าความต่างศักย์จริงที่จ่ายให้กับวงจรภายนอกกับค่าความต่างศักย์ตามกระบวนการผันกลับได้ตามหลักของอุณหพลศาสตร์ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (Overpotential) การลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากค่าจริงเกิดในกระบวนการที่เรียกว่า โพล่าไรเซชัน (Polarization) โดยการเกิดโพล่าไรเซชันนั้นจะเกิดขึ้นทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (E_{cell}) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$E_{cell} = E_{cell}^O - |\mathcal{E}_c| - |\mathcal{E}_a| - IR \dots \dots \dots (2.3)$$

โดยที่	E_{cell}^O	คือ	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (V)
	\mathcal{E}_c	คือ	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแคโทด (V)
	\mathcal{E}_a	คือ	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนด (V)
	IR	คือ	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดจากความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง (V)

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง มาเขียนกราฟ โพล่าไรเซชันแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [Wood, 1998]

จากกราฟรูปที่ 2.11 แสดงการเกิดโพลาริเซชันจะพบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ ศูนย์ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี โดยเรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open-circuit potential) ซึ่งเกิดจากการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (Cross over) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เมื่อแก๊สข้ามไปยังอีกฝั่งหนึ่งจะมีการเกิดปฏิกิริยากับผิวขั้วไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น เมื่อแก๊สไฮโดรเจนแพร่ข้ามไปยังขั้วแคโทดผ่านทางเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนประกอบกับฝั่งขั้วแคโทดมีแก๊สออกซิเจน แก๊สทั้งสองจึงเกิดการทำปฏิกิริยาภายในขั้วแคโทดเดียวกัน ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าภายใน (Internal current) [Larminie, 2000] ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด เช่นเดียวกับฝั่งแอโนดที่มีการแพร่ข้ามของออกซิเจน ก็จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนดเช่นเดียวกัน จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง

เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.11 จะพบว่ามี การลดลงของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการเกิดโพลาริเซชัน โดยเมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่าสามารถแบ่งช่วงการเกิดโพลาริเซชันออกได้เป็น 3 ช่วง คือ โพลาริเซชันทางเคมี (Chemical polarization) โพลาริเซชัน

เนื่องจากความต้านทาน (Resistance polarization) และโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarization)

โดยโพลาริเซชันทางเคมีเกิดเนื่องจากผลของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงไปเนื่องมาจากอัตราเร็วของปฏิกิริยา ส่วนจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำจะเกิดโพลาริเซชันในทางเคมีมาก วิธีแก้ไข คือ เพิ่มพลังงานโมเลกุลของสารตั้งต้นให้มากขึ้น เช่น เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น แต่วิธีดังกล่าวไม่สามารถใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนได้ เพราะเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงมาก ๆ ได้ วิธีที่เหมาะสม คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง

โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานเกิดขึ้นจากความต้านทานที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละส่วน เช่น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่บริเวณขั้วไฟฟ้า และที่บริเวณแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่น วิธีในการลดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน ในส่วนของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวสะสมกระแสไฟฟ้าให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูง ๆ เพื่อลดแรงต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ส่วนของอิเล็กโทรไลต์ควรออกแบบให้มีขนาดบาง เพื่อลดระยะทางในการเคลื่อนที่ของโปรตอน หรือเพิ่มความชื้นในอิเล็กโทรไลต์ จะทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนเป็นไปได้ง่ายขึ้น

โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นเกิดจากเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดซ์ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ทำให้ความเข้มข้นหรือความดันของสารตั้งต้นลดลงเนื่องจากสารไม่สามารถแพร่ผ่านชั้นต่าง ๆ เข้าไปที่ผิวขั้วไฟฟ้าเพียงพอต่อความต้องการในการเกิดปฏิกิริยา เป็นผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามสมการของเนินสต์ ในกรณีที่ใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์มักจะไม่พบปัญหานี้เกิดขึ้น แต่เมื่อใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์จะเกิดปัญหานี้ขึ้นเนื่องจากในอากาศมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยกว่า ดังนั้นเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดซ์จำเป็นจะต้องมีการออกแบบช่องทางเดินแก๊สให้อากาศสามารถสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่ เพื่อให้ออกซิเจนที่อยู่ในอากาศสามารถแพร่เข้าไปยังบริเวณขั้วไฟฟ้าให้มากที่สุด ส่วนทางด้านไฮโดรเจนก็มีโอกาสที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้เช่นกัน เกิดจากในกรณีที่ไฮโดรเจนที่ใช้เป็นไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิง (Reforming) ที่ไม่สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนให้กับระบบได้อย่างต่อเนื่องทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าลดลงทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินมากขึ้น

2.10 วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) [ปารเมศ, 2545]

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เป็นวิธีการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจขึ้นอยู่กับตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนองนี้ ซึ่งจะแสดงดังสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon \dots \dots \dots (2.4)$$

$$E(y) = \eta = f(x_1, x_2) \dots \dots \dots (2.5)$$

โดย

y คือ ผลตอบสนองที่สนใจ

x คือ ตัวแปรที่ศึกษา

ϵ คือ ความผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง

η คือ ค่าคาดหวังของการทดลอง ในที่นี้คือ พื้นผิวผลตอบสนอง

สมการของพื้นผิวสมการที่ 2.5 จะเรียกสมการนี้ว่า “พื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface)”

โดยวิธีการศึกษา RSM วิธีหนึ่ง คือ วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent) เป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างเป็นอันดับบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุด กล่าวคือ ในทิศทางที่มีการเพิ่มขึ้นของผลตอบสูงที่สุด บ่อยครั้งที่การประมาณค่าเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดเบื้องต้นสำหรับระบบที่กำลังศึกษานั้นจะอยู่ห่างไกลจากจุดที่ดีที่สุดจริง ในกรณีเช่นนี้วัตถุประสงค์ก็คือ การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจากจุดตั้งต้นไปสู่บริเวณใกล้กับจุดที่ดีที่สุด โดยวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ ซึ่งขั้นตอนของวิธีนี้มีดังนี้

1. หาแบบจำลองที่เหมาะสมและทำการวิเคราะห์ โดยมากจะสมมติว่าเป็นแบบจำลองกำลังหนึ่ง ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุด
2. สมมติจุดเริ่มต้นการทดลองของตัวแปรต่าง ๆ (x_1, x_2, \dots, x ใด ๆ) จากนั้นเลือกขนาดของการก้าวอย่าง ซึ่งจะเป็นตัวแปรหนึ่งของกระบวนการ ในที่นี้ให้เป็น Δx_i

3. เลือกตัวแปรที่มีค่ามากที่สุดหรือมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย β_j มากที่สุด
4. ขนาดการก้าวอย่างของตัวแปรอื่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 ดังนี้

$$\Delta x_i = \frac{\hat{\beta}_i}{\hat{\beta}_j / \Delta x_j} \dots\dots\dots(2.6)$$

5. จากนั้นจึงตัดสินใจเลือกช่วงเวลาหนึ่งเป็นขนาดของการก้าวอย่าง
6. สุดท้ายจึงทำการเปลี่ยนตัวแปรรหัส (Coded variable) ไปเป็นตัวแปรธรรมชาติ (Natural variable)

ทิศทางของการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด คือ ทิศทางที่ค่า \hat{y} มีค่าเพิ่มขึ้นรวดเร็วที่สุด ทิศทางนี้ คือ เส้นที่ขนานกับเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นมา เราจะใช้เส้นทางเส้นที่ผ่านจุดศูนย์กลางของอาณาเขตที่กำลังสนใจและตั้งฉากกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นมา นี้เป็นเส้นทางในการป็นขึ้นที่มีความชันสูงสุด ดังนั้นการก้าวอย่าง (Step) บนเส้นทางเดินนี้จะเป็นส่วนสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การถดถอย β_j ขนาดที่แท้จริงของการก้าวอย่างจะหาได้จากประสบการณ์เกี่ยวกับกระบวนการของผู้ทำการทดลอง

การทดลองจะมีการทำขึ้นบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุด จนกระทั่งค่าของผลตอบไม่สามารที่จะเพิ่มขึ้นอีกต่อไปได้ หลังจากนั้นแบบจำลองกำลังหนึ่งจะถูกสร้างขึ้นมาใหม่ จะต้องมีการหาเส้นทางที่มีความชันสูงสุดขึ้นมาใหม่ และกระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะเกิดขึ้นอีกครั้ง ในที่สุดก็จะมาสู่จุดที่อยู่ใกล้กับจุดที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งจะถูบ่งชี้โดยดูจาก Lack of Fit ของแบบจำลองกำลังหนึ่ง

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Iyuke และคณะ (2003) ได้ทำการเตรียมข้าวอิเล็กทรอนิกส์ 2 แบบ คือ แบบที่มีและไม่มีชั้นแก๊สแพร์ โดยให้ข้าวไฟฟ้าอันที่ 1 มีปริมาณแพลทินัมเท่ากับ 0.18 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรและข้าวที่ 2 มีปริมาณแพลทินัมเท่ากับ 0.38 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรซึ่งประกอบเป็นหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีชั้นแก๊สแพร์ ส่วนข้าวอันที่ 3 มีปริมาณแพลทินัมเท่ากับ 0.40 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรประกอบเป็นหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กทรอนิกส์โดยไม่มีชั้นแก๊สแพร์ และนำมาทดสอบสมรรถนะเปรียบเทียบกับข้าวไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการค้า โดยในการเตรียมข้าวไฟฟ้านั้น ส่วนที่

เป็นชั้นแก๊สแพร์จะเตรียมจากคาร์บอนแบล็ค 30 % และเทฟลอน 60 % โดยน้ำหนัก ส่วนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเตรียมจากแพลทินัมบนคาร์บอน 10 % และเทฟลอน 30 % โดยน้ำหนัก ส่วนเยื่อแผ่นจะใช้ Nafion 117 ก่อนจะทำการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดนั้นจะทำความสะอาดเยื่อแผ่นก่อนโดยนำไปจุ่มในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส ต่อมาก็จะใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 5 % โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียสและตามด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียสและสุดท้ายล้างด้วยน้ำกลั่นที่เดือด โดยทุกขั้นตอนจะใช้เวลา 1 ชั่วโมง ส่วนการอัดด้วยความร้อนจะใช้ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นเวลา 90 วินาที ซึ่งจากการทดลองพบว่าสมรรถนะของเซลล์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแพลทินัมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และเซลล์ที่มีชั้นแก๊สแพร์จะให้ประสิทธิภาพดีกว่า โดยจะพบว่าเซลล์ E2 จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด และยังพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น และค่าความหนาแน่นกำลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแพลทินัมเพิ่มขึ้น

Gamburzev และคณะ (2002) ได้ศึกษาถึงความก้าวหน้าในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงที่มีเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งเซลล์จะใช้แพลทินัมบนคาร์บอน 20 % โดยน้ำหนักและเทฟลอนซึ่งมีความหนา 125 ไมโครเมตร ส่วนสารอิเล็กโทรไลต์จะใช้เยื่อแผ่นที่เป็น Nafion 112 และความหนาทั้งหมดของหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร โดยในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดนี้ จะใช้การอัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ 155 องศาเซลเซียส ความดัน 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลา 5 นาที โดยการวัดค่าทางเคมีไฟฟ้าจะทำที่อุณหภูมิของเซลล์เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนหรืออากาศที่ขึ้นที่ความดันบรรยากาศ พบว่าหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดที่มีความพรุนมากกว่าจะมีประสิทธิภาพดีกว่า ในการลดความต้านทานในการถ่ายโอนต่าง ๆ ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจะส่งผลต่อการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ความพรุนของชั้นที่เกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด จะส่งผลต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด เมื่อพิจารณาเยื่อแผ่นที่มีน้ำหนักสมมูลเท่ากัน เยื่อแผ่นที่บางกว่าจะให้ประสิทธิภาพดีกว่า ในขณะที่เยื่อแผ่นมีความหนาเท่ากัน เยื่อแผ่นที่มีน้ำหนักสมมูลน้อยกว่าจะมีประสิทธิภาพดีกว่า อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพจะดีที่สุดเมื่อเยื่อแผ่นมีความหนามากที่สุดแต่น้ำหนักสมมูลน้อย และในการที่อนุภาคของแพลทินัมมีขนาดเล็กนั้นทำให้ต้องใช้ปริมาณแพลทินัมเพิ่มขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของเซลล์เพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้นอีกด้วย

Antolini และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาถึงผลของปริมาณ Nafion ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าที่มีชั้นแก๊สแพร่ของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีพอลิเมอร์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ โดยขั้วไฟฟ้าเตรียมจากเทฟลอนและกระดาษคาร์บอนเป็นชั้นแก๊สแพร่ ซึ่งจะใช้เทฟลอน 20 % โดยน้ำหนัก ส่วนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้แพลทินัมปริมาณ 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนการวัดค่าทางเคมีไฟฟ้าจะใช้เครื่อง Galvanostatic polarization (GP), Cyclic voltammetry (CV) และ Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) ซึ่งจะทำกรวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยขั้วไฟฟ้าจะมีปริมาณ Nafion ต่าง ๆ กัน พบว่าถ้าปริมาณของ Nafion เพิ่มขึ้นไปจนถึง 0.67 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรแล้ว จะทำให้สมรรถนะของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเพราะพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณของ Nafion น้อย ๆ นั้นจะทำให้ขั้วไฟฟ้ามีค่าการนำไฟฟ้าที่ไม่ดี ทำให้สมรรถนะของขั้วไฟฟาลดลงไปด้วย ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นถ้าปริมาณ Nafion เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณของ Nafion เท่ากับ 0.67 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรจะทำให้ได้สมรรถนะดีที่สุด ซึ่งจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินต่ำที่สุดและค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนจะมีความมากที่สุดและจะมีพื้นที่ผิวที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ามากที่สุด

Giorgi และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาถึงผลของโครงสร้างและองค์ประกอบของชั้นแก๊สแพร่ของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีพอลิเมอร์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ โดยขั้วไฟฟ้าจะเตรียมจากเทฟลอนที่อยู่ในชั้นแก๊สแพร่ที่ปริมาณต่าง ๆ และในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะรักษาให้ปริมาณแพลทินัมคงที่อยู่ที่ 0.11 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งพบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง สมรรถนะของขั้วไฟฟ้าจะลดลงเมื่อปริมาณเทฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่ามากขึ้น ขณะที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ สมรรถนะของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าต่ำที่สุดที่ปริมาณเทฟลอนเท่ากับ 20 % โดยน้ำหนัก นอกจากนี้เมื่อปริมาณเทฟลอนเพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ความต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความพรุนของชั้นแก๊สแพร่จะมีค่าลดลง แสดงว่าความพรุนจะส่งผลต่อสมรรถนะของขั้วไฟฟ้า เช่น อัตราการถ่ายโอนมวลของแก๊สตั้งต้นในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น และถ้าชั้นการแพร่ของแก๊สมีความพรุนมากก็จะมีพื้นที่ของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะเกิดปฏิกิริยาได้มาก ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของขั้วไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความต้านทานในการถ่ายโอนประจุลดลง ขณะที่ความต้านทานในการแพร่เพิ่มขึ้น

Wang และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาถึงผลของปริมาณพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำที่อยู่ในชั้นแก๊สแพร่ที่ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (MEA) นั้น ขั้วไฟฟ้าและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเตรียมขึ้นมาจากกระดาษคาร์บอนที่ผสมกับปริมาณฟลูออรีเนต เอทิลีน โพรพิลีน (Fluorinated

ethylene propylene) ที่แตกต่างกัน อยู่ในช่วงระหว่าง 10 ถึง 40 % โดยน้ำหนัก ส่วนสารอีเล็กโทรไลต์จะใช้เยื่อแผ่นที่เป็น Nafion 112 แล้วทำการอัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ความดัน 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 3 นาที ซึ่งพบว่าปริมาณฟลูออรีน เอทิลีน โพรพิลีน (Fluorinated ethylene propylene) ที่ 10 % โดยน้ำหนักนั้นจะให้ค่ากำลังไฟฟ้ามากกว่าปริมาณอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าในการที่จะสร้างขั้วไฟฟ้าให้มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำเพื่อประโยชน์ในการจัดการน้ำนั้นควรจะใช้ฟลูออรีน เอทิลีน โพรพิลีน (Fluorinated ethylene propylene) ในชั้นแก๊สแพร่ในปริมาณที่เหมาะสม คือ ที่ 10 % โดยน้ำหนัก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเซลล์เชื้อเพลิงของบริษัท ElectroChem, Inc. จากประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น FC05-01SP-REF
2. หน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ประกอบด้วย
 - ระบบให้ความชื้นกับแก๊ส (Humidifier)
 - เครื่องควบคุมอัตราไหลของแก๊ส (Mass flow controller) ของบริษัท MKS Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น MKS Type M100B
 - ชุดวาล์วขาเข้า (Intake Valve) และวาล์วขาออก (Relieve Valve) โดยวาล์วทั้งหมดเป็นวาล์วแบบ Ball Valve ขนาดท่อ ¼ นิ้ว
 - เครื่องควบคุมความดันแก๊ส (Pressure Regulator) ของบริษัท Harris, ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น 01-12804
 - หน่วยควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) ของบริษัท Shimaden รุ่น SR17 ซึ่งทำหน้าที่ร่วมกับแผงรับสัญญาณ (Board Lab PC) ของบริษัท National Instrument, ประเทศสหรัฐอเมริกา และมีแผงสวิตช์ควบคุมกระแสไฟฟ้าซึ่งมีการติดตั้ง Solid State Relay ของบริษัท Carlo Gavazzi รุ่น RS1A23D10
3. เครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen Detector) ของบริษัท Oldham รุ่น TX2000
4. โถดูดความชื้น
5. อ่างให้ความร้อน (water bath)
6. เครื่องแก้วอื่น ๆ ในห้องปฏิบัติการ

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท AUTOLAB
2. เครื่อง Scanning Electron Microscope รุ่น JSM 6400 ของบริษัท Jeol
3. เครื่อง Compression Model รุ่น LP 20 ของบริษัท LABTECH ENGINEERING COMPANY LTD.

3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อสาร	บริษัท
แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen 99.99 %)	Praxair
แก๊สออกซิเจน (Oxygen 99.99 %)	Praxair
แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen 99.99 %)	Praxair
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)	Merck
กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid)	BDH
แนฟิออน (5 %wt Nafion)	Fluka
Nafion membrane 115	Electrochem
ขั้วไฟฟ้า (Pt/C 1 mg/cm ²)	Electrochem

3.4 ตัวแปรที่ศึกษา

1. ความดัน (50-100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
2. อุณหภูมิ (130-150 องศาเซลเซียส)
3. เวลาที่ใช้ในการอัด (1-5 นาที)

3.5 ขั้นตอนการทำวิจัย

3.5.1 การปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่น

1. ตัดแผ่นเมมเบรนให้ได้ขนาด 6 cm x 6 cm
2. จากนั้นนำแผ่นเมมเบรนมาแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80-90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. แล้วนำเมมเบรนไปจุ่มในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 3 % ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. จากนั้นนำเมมเบรนไปต้มในกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. แล้วนำเมมเบรนไปแช่ในน้ำกลั่นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 80-90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. ทำซ้ำตามข้อ 4 อีก 2 ครั้ง โดยทำการเปลี่ยนน้ำกลั่นใหม่ทุกครั้ง

- เสร็จแล้วนำเมมเบรนไปเก็บไว้ในถุงที่สะอาดแล้วนำไปไว้ในหม้อดูดความชื้น ก่อนทำการอัดต่อไป

3.5.2 การประกอบแผ่น MEA

- หากกระดาษหรือพลาสติกที่ทนความร้อน เช่น เทฟลอนหรือยูรีเทนที่มีความหนาไม่มากนัก มาตัดตรงกลางให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 2.25 cm x 2.25 cm
- นำกาวสองหน้ามาแปะที่มุมทั้ง 4 ของแผ่นยูรีเทน 1 แผ่น แล้วนำไปแปะลงบนแผ่นสแตนเลสอันหนึ่ง
- จากนั้นตัดแผ่นขั้วไฟฟ้าขนาด 2.25 cm x 2.25 cm จำนวน 2 แผ่น
- ทาสารละลาย Nafion 5 % ลงบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าแผ่นหนึ่ง ด้านที่มี Pt เคลือบอยู่ให้ชุ่ม
- แล้วนำแผ่นขั้วไฟฟ้าไปวางที่แผ่นยูรีเทนที่ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม
- จากนั้นนำเมมเบรนที่เตรียมไว้แล้วจากการทำ Pre-treatment มาประกบกับขั้วไฟฟ้าที่ทาสารละลาย Nafion 5 % โดยกะให้ขั้วไฟฟ้าอยู่ตรงกึ่งกลางของแผ่นเมมเบรน
- จากนั้นจึงนำแผ่นขั้วไฟฟ้าอีกอันมาทำตามขั้นตอนที่ 4
- แล้วจึงนำมาประกบอีกด้านของเมมเบรน โดยวางให้ตรงกับแผ่นขั้วไฟฟ้าที่ประกบกับเมมเบรนก่อนหน้าแล้วใช้มือกดแผ่นขั้วไฟฟ้าทั้งสองกับเมมเบรนเป็นเวลา 10 วินาที
- จากนั้นจึงนำแผ่นยูรีเทนที่แปะกาวสองหน้าอีกอันมาวางให้ตรงกับแผ่นขั้วไฟฟ้าอีกด้าน
- แล้วจึงนำแผ่นสแตนเลสอีกอันมาประกบกับเมมเบรนกับขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่ง ก่อนกดอัดด้วยเครื่อง Compression mold
- วางแผ่นสแตนเลสทั้งสองลงบนแท่นกดอัดของเครื่อง Compression mold
- แล้วทำการตั้งค่าต่าง ๆ ของเครื่อง คือ ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดตามที่ทำการออกแบบการทดลอง
- ทำการกดอัดตามเวลาที่ตั้งไว้ โดยจะต้องทำการอัดทั้งในส่วนที่เป็น Hot plate และ Cold plate โดยเวลาที่ใช้ในแต่ละส่วนจะใช้เป็นครึ่งหนึ่งของเวลาที่ใช้ในการทดลอง

14. เมื่อครบตามเวลาที่ตั้งไว้แล้วนำแผ่นสแตนเลสออกมาจากเครื่อง จากนั้นนำแผ่น MEA ออกมา
15. ปลดปล่อยให้แผ่น MEA เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง
16. นำคีมคีบแผ่น MEA ไปเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่สะอาดและมิดชิด ไม่ให้อากาศเข้า
17. นำไปเก็บไว้ในหม้อดูดความชื้นก่อนนำไปทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์

3.5.3 การประกอบเป็นเซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิง

1. ประกอบแผ่น MEA ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 cm^2 เข้ากับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าทั้ง 2 ด้าน
2. ใช้แผ่นยางซิลิโคนบางเพื่อป้องกันการรั่วของแก๊ส โดยนำมาวางไว้ระหว่างเมมเบรนกับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าทั้ง 2 ด้าน
3. ยึดตรึงแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าที่ประกบกับแผ่น MEA ทั้งสองด้านเข้าด้วยกันโดยใช้หนีต และถัดจากแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าก็จะมีแผ่นปิดท้ายประกบอยู่ทั้ง 2 ด้าน จากนั้นจึงใช้ประแจปอนด์เพื่อทำการอัดส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันโดยใช้โมเมนต์การหมุนที่ 40 ปอนด์แรง-นิ้ว สำหรับศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ และเปลี่ยนค่าโมเมนต์การหมุน สำหรับศึกษาผลของโมเมนต์การหมุนที่มีต่อการประกอบเซลล์
4. นำเซลล์เดี่ยวที่ได้ไปติดตั้งในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง และทำการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

3.5.4 ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์

1. ตรวจสอบวาล์วขาเข้า (Intake Valve) ของแก๊สแต่ละชนิดให้เปิดปิดอยู่ในทิศทางตามต้องการ เพื่อป้องกันการไหลปนกันของแก๊สต่างชนิด และวาล์วขาออก (Relieve Valve) ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
2. ตรวจสอบความเรียบร้อยของข้อต่อต่าง ๆ ในหน่วยทดสอบให้อยู่ในสภาพที่พร้อมทำการทดลอง

3. ตรวจสอบระดับน้ำภายในส่วนระเหยน้ำภายในระบบให้มีความชื้น โดยดูจากส่วนจัดหาน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม (ให้ปริมาณน้ำภายในส่วนจัดหาน้ำท่วมท่อที่เชื่อมต่อกับด้านล่างของส่วนระเหยน้ำ แต่สูงไม่ถึงท่อที่เชื่อมต่อกับด้านข้างของส่วนระเหยน้ำ)
4. ตรวจสอบเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังแก๊สทุกถังให้อยู่ในตำแหน่งปิด
5. ตรวจสอบวาล์วควบคุมความดันกลับให้อยู่ในตำแหน่งปิด
6. ตรวจสอบสายไฟที่ต่อจากขั้วไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 2 ขั้วที่ต่อมายังเครื่อง Potentiostat/Galvanostat ว่าให้อยู่ในสภาพที่ต่อเรียบร้อยแล้ว
7. ตรวจสอบเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในช่องวัดอุณหภูมิ
8. เปิดเครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนเพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สในกรณีที่เกิดการรั่วของแก๊สไฮโดรเจน
9. เปิดสวิตช์หลักของเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 15 นาทีก่อนทำการทดลอง
10. เปิดสวิตช์เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 30 นาทีก่อนทำการทดลอง พร้อมเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับทำหน้าที่บันทึกข้อมูลจากเครื่อง Potentiostat/Galvanostat กดปุ่ม Cell Enable ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
11. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมอุณหภูมิภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง เปิดโปรแกรม Lab-view เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในส่วนระเหยน้ำ ตั้งค่าอุณหภูมิตามต้องการ (60 องศาเซลเซียส) และกดปุ่ม start ที่โปรแกรม
12. เปิดสวิตช์ที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้าที่สวิตช์หลัก (Main Switch) แล้วจึงเปิดสวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง แล้วจึงตั้งค่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงตามต้องการ (60 องศาเซลเซียส) และเปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง รอจนกระทั่งอุณหภูมิได้ตามค่าที่ตั้งไว้
13. ตั้งค่าอัตราการไหลตามต้องการที่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส (100 sccm) ซึ่ง Channel 1 คือ แก๊สออกซิเจนหรืออากาศ และ Channel 2 คือ แก๊สไฮโดรเจน ส่วนของแก๊สไฮโดรเจนจะใช้ทั้งสอง Channel โดยสับทางเดินของแก๊ส โดยใช้วาล์วขาเข้าเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของแก๊ส

14. เมื่อต้องการจะป้อนแก๊สให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ให้เปิดแก๊สที่ต้องการใช้ที่วาล์วหัวถังของแก๊ส แล้วจึงเปิดเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังให้ได้ความดันขาออกตามต้องการ ซึ่งโดยปกติเท่ากับ 20 psi แล้วจึงมาเปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหลแต่ละ Channel เพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่หน่วยทดสอบ
15. ก่อนจะทำการทดลองควรผ่านแก๊สไนโตรเจนกับหน่วยทดสอบประมาณ 20 นาที โดยตั้งอัตราการไหลของแก๊สทั้ง 2 Channel ไว้ที่ 200 sccm ก่อนด้วยสาเหตุดังนี้
 - เพื่อเป็นการไล่สิ่งสกปรกค้างอยู่ในหน่วยทดสอบออกก่อน
 - เพื่อตรวจสอบการรั่วของแก๊สโดยใช้น้ำยาในการตรวจสอบการรั่วภายในหน่วยทดสอบ
 - เพื่อใช้วัดค่าความชื้นภายในแก๊สก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ส่วนวัดความชื้น
16. ทำการตั้งค่าเพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยใช้โปรแกรม GPES เลือกวิธีแบบ Chrono methods (interval time > 0.1 sec) และเลือกวิธีแบบ Amperometry แล้วจึงตั้งค่าความต่างศักย์เพื่อให้เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง
17. เมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงรอจนกระทั่งค่าความต่างศักย์ในขณะที่ยังไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าคงที่ กดปุ่ม Cell Enable ให้อยู่ในตำแหน่งเปิดที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat จึงกดปุ่ม start ที่โปรแกรม GPES เพื่อเริ่มบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ ณ ที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ที่ตั้งไว้

3.5.5 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง

1. เมื่อเสร็จสิ้นการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้ และปิดปุ่ม Cell Enable
2. ปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหล แล้วจึงปิดวาล์วที่หัวถังแก๊สทุกถัง

3. ปิดวาล์วขาเข้าทุกตัว และค่อย ๆ เปิดวาล์วขาออกทีละตัวเพื่อลดความดันจากแก๊สที่ค้างอยู่ในท่อระหว่างถังแก๊สกับเครื่องวัดอัตราการไหล โดยที่วาล์วขาออกจะต่อท่อลงไปยังขวดที่มีน้ำอยู่ เพื่อลดการแพร่กระจายของแก๊ส รอจนกระทั่งเกจที่วัดความดันที่เครื่องควบคุมความดันที่ถังแก๊สลดลงจนถึง 0 ทั้งขาเข้าและขาออกแล้วจึงเปิดวาล์วขาออกของแก๊สอีกถังหนึ่ง ทำในลักษณะเดียวกัน
4. เมื่อลดความดันในท่อแก๊สหมด จึงทำการปิดวาล์วขาออกของแก๊สทุกตัว
5. ปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า
6. ปิดสวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งไฟฟ้า และจึงปิดสวิตช์หลัก
7. กดปุ่ม stop ที่โปรแกรม Lab-view ที่ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิในส่วนระเหยน้ำแล้วจึงปิดโปรแกรม
8. ปิดโปรแกรม GPES แล้วจึงปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ต่อจากนั้นจึงปิดสวิตช์ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (MEA) ตลอดจนหาภาวะที่เหมาะสมในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (MEA) ที่จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัด ดังนั้นเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัว จึงได้ทำการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองก่อนเพื่อหาผลและความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด

4.1 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design) [Montgomery, 1997]

การประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดขึ้นกับตัวแปรต่าง ๆ หลายตัวที่มีผลกระทบต่อ การประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด เช่น ความดัน อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการอัด เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมและผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการประกอบ หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร โดยทำการออกแบบการทดลอง (Experimental Design) โดยเลือก ตัวแปรที่นำมาทำการออกแบบการทดลอง 3 ตัวด้วยกัน คือ ความดัน อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการอัด และทำการออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^n แฟกทอเรียล (2^n Factorial Design) เพื่อกำหนด ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การประกอบหน่วยเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เพื่อหาความสัมพันธ์ของ ตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์

การออกแบบการทดลองแบบ 2^n แฟกทอเรียล (2^n factorial design)

การออกแบบการทดลองแบบ 2^n แฟกทอเรียลเป็นการออกแบบการทดลองที่ต้องการศึกษา ผลของตัวแปรหลายตัวที่มีต่อค่าการตอบสนองของปัจจัยที่ต้องการศึกษา ซึ่งในการทดลองนี้คือค่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ตัวแปรที่ศึกษามี 3 ตัวแปร คือ ความดัน อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการอัด ดังนั้นการออกแบบการทดลองจะเป็นแบบ 2^3 แฟกทอเรียล โดยกำหนดให้

A คือ ความดันต่ำสุดที่ 50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (-) และสูงสุดที่ 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (+)

B คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่ 130 องศาเซลเซียส (-) และสูงสุดที่ 150 องศาเซลเซียส (+)

C คือ เวลาที่ใช้ในการอัดต่ำสุดที่ 1 นาที (-) และสูงสุดที่ 5 นาที (+)

จากการออกแบบการทดลองจะทำการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง และได้ทำการทดลองที่ค่ากลาง (0) ของตัวแปร (A = 75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, B = 140 องศาเซลเซียส และ C = 3 นาที) อีก 3 ครั้ง เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดในการทดลองและความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูล ทำให้การทดลองทั้งหมดเป็น 11 การทดลอง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การออกแบบการทดลองจำนวน 11 การทดลอง

ลำดับที่	การทดลอง	A	B	C	Current density (mA/cm ²)	
					Rep.1	Rep.2
1	(1)	-	-	-	151.21	105.26
2	a	+	-	-	56.08	82.07
3	b	-	+	-	169.54	168.83
4	ab	+	+	-	206.33	213.09
5	c	-	-	+	198.32	220.33
6	ac	+	-	+	138.62	182.04
7	bc	-	+	+	123.00	106.17
8	abc	+	+	+	142.36	96.24
9	center	0	0	0	124.13	158.22
10	center	0	0	0	124.13	158.22
11	center	0	0	0	124.13	158.22

ทำการทดลองตามตารางที่ 4.1 โดยทำซ้ำการทดลองละ 2 ครั้ง แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาผลกระทบและค่าความแปรปรวนของตัวแปร (ผลตอบสนองของแต่ละการทดลองแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรจะแสดงในตารางที่ 4.2 โดยมีการคำนวณค่าแจกแจงทางสถิติแบบ F (F_0) ซึ่งจะแสดงผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัว โดยพิจารณาค่า F_0 ของแต่ละตัวแปรเทียบกับค่า F ณ จุดวิกฤต หรือ F_{α, v_1, v_2} ซึ่งหาได้จากเอกสารอ้างอิง [Montgomery, 1997] โดยค่า α คือระดับความเชื่อมั่นที่พิจารณา v_1 คือ degree of freedom ของตัวแปรที่ศึกษา และ v_2 คือ degree of freedom ของความคลาดเคลื่อน ตัวแปรที่ศึกษาจะสร้างผลกระทบอย่างมีนัย

สำคัญต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจ เมื่อค่า $F_{0(i)}$ มีค่ามากกว่า F_{α, v_1, v_2} จะสรุปได้ว่าตัวแปร i มีผลทำให้การตอบสนองเบี่ยงเบนจากสมมติฐานที่กำหนดข้างต้น พฤติกรรมของการทดลองไม่เป็นไปตามข้อสมมติฐานหลัก ดังนั้นตัวแปร i จึงเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจ

ตารางที่ 4.2 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA)

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A	989.57	1	989.57	24.53
B	524.75	1	524.75	13.01
C	186.80	1	186.80	4.63
AB	5882.51	1	5882.51	145.81
AC	164.42	1	164.42	4.08
BC	25178.55	1	25178.55	624.08
Pure quadratic	84.63	1	84.63	2.10
Error	443.79	11	40.34	
Total	34120.75	18		

การทดลองครั้งนี้พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % หรือระดับความสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ซึ่งค่าวิกฤต ($F_{\text{circuit}} = F_{0.05, 1, 11}$) เท่ากับ 4.84 จากผลการทดลองพบว่าค่า F_0 ของตัวแปร A, B, AB และ BC มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต แต่ F_0 ของ Pure quadratic มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤต แสดงว่าความไม่เป็นเชิงเส้นไม่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าความดัน (A), อุณหภูมิ (B), สหสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอุณหภูมิ (AB) และสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอัด (BC) มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ จากผลที่ได้จากตาราง ANOVA นำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression Model) ได้ต่อไป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression Model)

จากการทำ 2^3 factorial design เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์ผลจึงนำผลที่ได้จากตารางการวิเคราะห์ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อผลการทดลองมาจัดในเทอมของสมการเชิงคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_{AB} AB + \beta_{BC} BC \dots \dots \dots (4.1)$$

จากผลการทดลองจะได้แบบจำลองดังนี้

$$\hat{y} = 147.468 - 7.864A + 5.728B + 19.174AB - 39.669BC \dots \dots \dots (4.2)$$

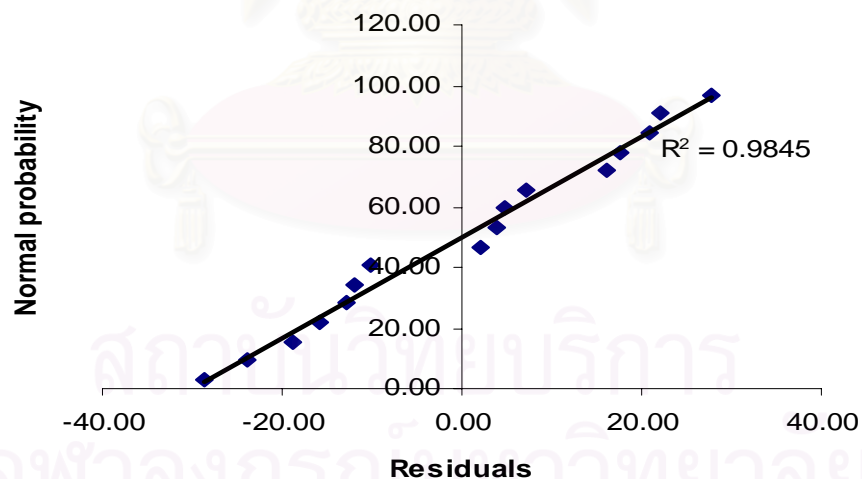
โดยที่

\hat{y} คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

β_0 คือ ค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของข้อมูลทั้งหมด

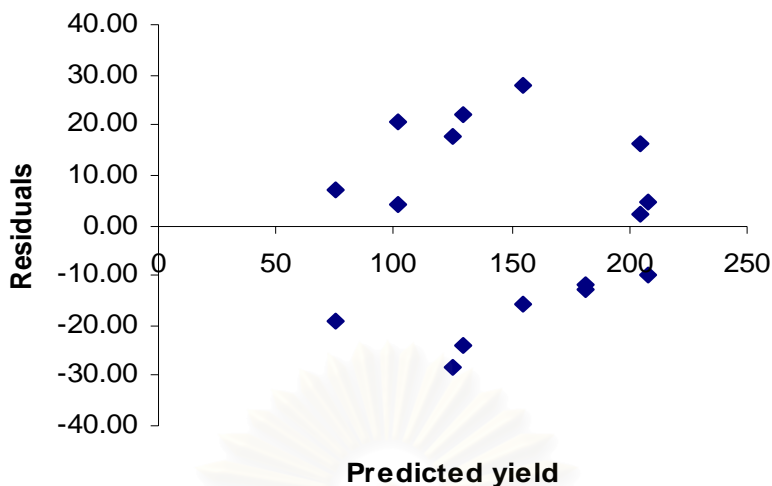
β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร i ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจ

จากสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำไปเขียนกราฟศึกษาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 Normal Probability Plot ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

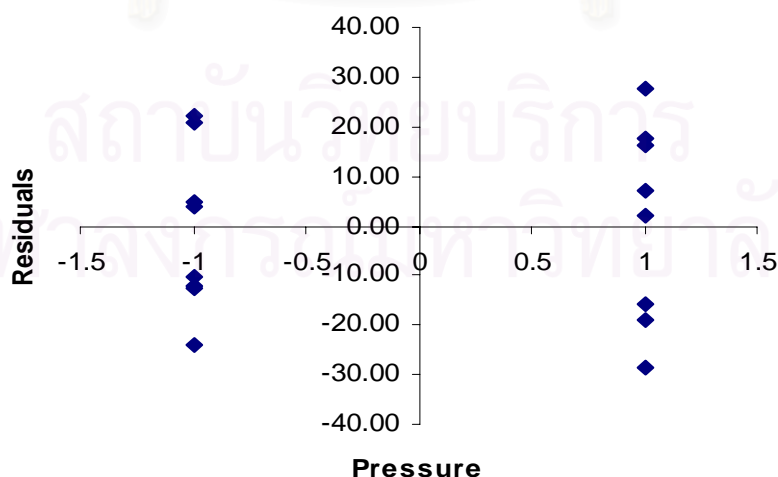
จากรูปที่ 4.1 พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9845 แสดงว่าค่า residual จากสมการมีการกระจายเป็นแบบ Normal และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ศูนย์



รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองที่มาจาก การคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

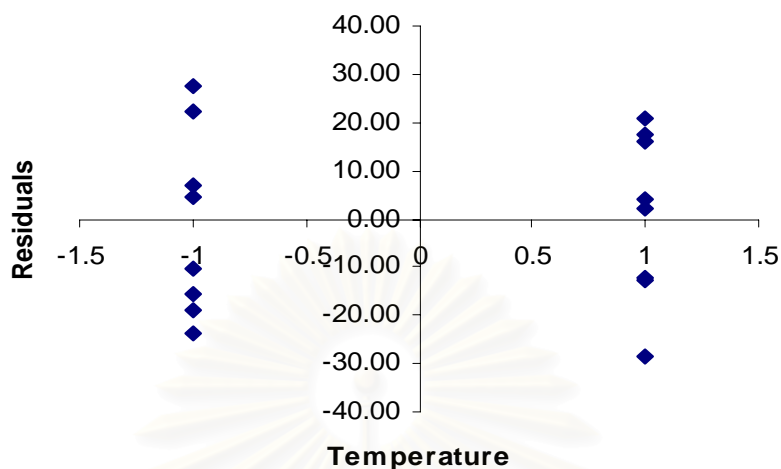
การกระจายตัวของ residual แสดงในกราฟรูปที่ 4.2 ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนและการกระจายตัวมีค่าคงที่ ดังนั้นความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ สรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม กล่าวคือ ตัวแปรที่มีบทบาททำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐาน คือ ความดัน (A), อุณหภูมิ (B), สหสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอุณหภูมิ (AB) และสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอัด (BC)

การพิจารณาความคลาดเคลื่อนและค่าเฉลี่ยของตัวแปรหลักทำได้โดยการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของระดับของตัวแปรกับค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.3 - 4.5



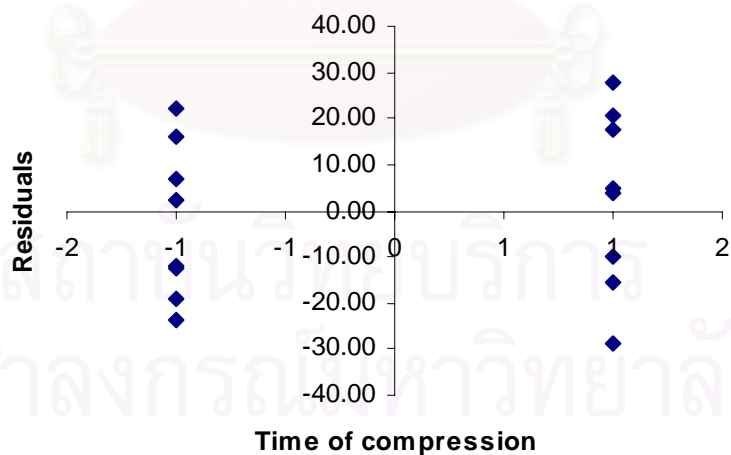
รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองของความดัน (A)

จากรูปที่ 4.3 จะพบว่า residual มีขนาดการกระจายตัวที่คงที่และการกระจายผ่านค่าศูนย์ จึงสรุปว่า ค่าเฉลี่ยของ residual เป็นศูนย์และค่าความแปรปรวนของความดัน (A) มีค่าคงที่



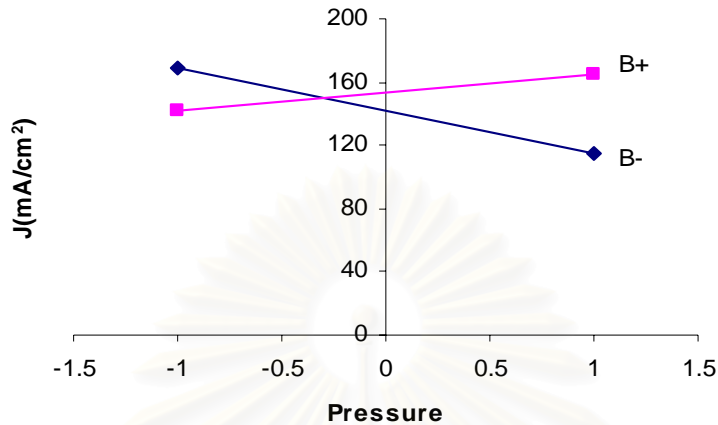
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของอุณหภูมิ (B)

กราฟในรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงผลลักษณะเดียวกับรูปที่ 4.3 จึงสรุปว่า ค่าเฉลี่ยของ residual เป็นศูนย์ ค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิ (B) และเวลาที่ใช้ในการอัด (C) มีค่าคงที่ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งกำหนดให้ใช้ได้กับกระบวนการที่ความแปรปรวนมีค่าคงที่



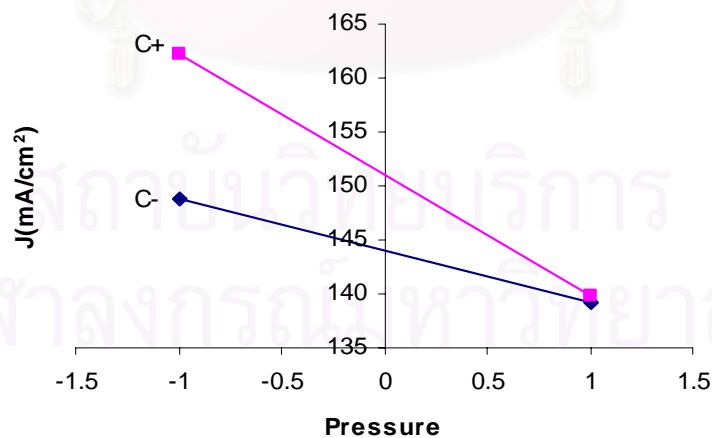
รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองของเวลาที่ใช้ในการอัด (C)

ในส่วนของคุณภาพสัมพัทธ์ของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (interaction) แต่ละคู่ จะแสดงด้วยกราฟของคุณภาพสัมพัทธ์ระหว่างผลกระทบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ที่ระดับต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.8



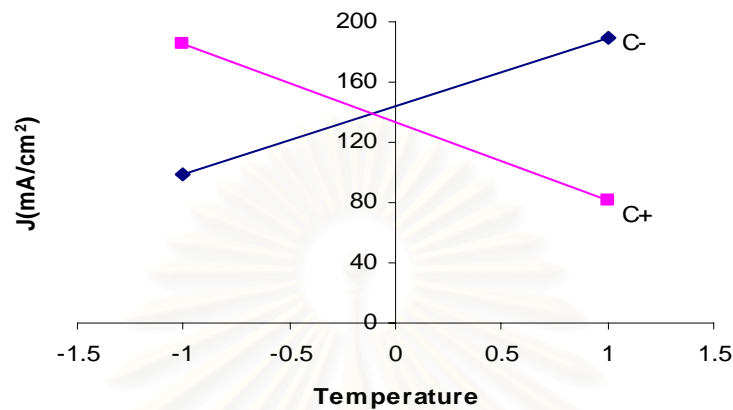
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ระหว่างความดัน (A) กับ อุณหภูมิ (B)

จากกราฟในรูปที่ 4.6 แสดงถึงผลกระทบร่วมระหว่างความดันกับอุณหภูมิต่อความหนาแน่นกระแส พบว่าที่ค่าอุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงเมื่อความดันมีค่าต่ำ และที่ค่าความดันและอุณหภูมิสูงก็ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ระหว่างความดัน (A) กับ เวลาที่ใช้ในการอัด (C)

จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงผลกระทบร่วมระหว่างความดันกับเวลาที่ใช้ในการอัดต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการอัดมากจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงโดยเฉพาะเมื่อความดันต่ำ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ระหว่างอุณหภูมิ (B) กับเวลาที่ใช้ในการอัด (C)

จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอัดต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า พบว่าที่ค่าอุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงเมื่อเวลาที่ใช้ในการอัดมากขึ้น แต่ที่ค่าอุณหภูมิสูงเวลาที่ใช้ในการอัดต้องน้อยลงจึงให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง

จากการศึกษาความแปรปรวนของตัวแปรและการทำ Regression Model พบว่าตัวแปรทุกตัวมีค่าความแปรปรวนคงที่ แต่เนื่องจากมีผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรมาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นในการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (MEA) นั้นจะทำ 2 วิธี คือ วิธีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรและวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Method) แล้วจะนำภาวะที่เหมาะสมที่ได้ของแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน และเลือกภาวะที่ให้ผลการทดลองที่ถูกต้องและดีที่สุดจากทั้ง 2 วิธีนี้ซึ่งจะได้ทำการทดลองต่อไป โดยผลการทดลองของวิธีที่ 1 จะแสดงรายละเอียดดังนี้

4.2 ผลของความดัน

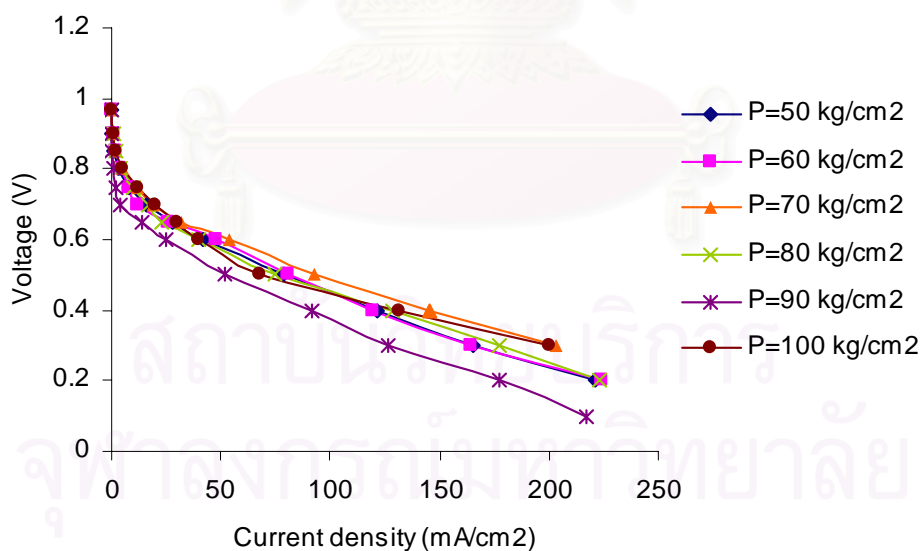
การศึกษาถึงผลของความดันที่ใช้ในการประกอบ MEA โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 100 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm เช่นเดียวกัน แก๊สทั้งสองชนิดผ่านระบบให้ความชื้นก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง โดยมีค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60°C และความดันบรรยากาศ จากกราฟรูปที่ 4.9 และ 4.10 จะพบว่า ค่าความต่างศักย์ที่ได้จะน้อยกว่าค่าตามทฤษฎีซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.23 โวลต์ โดยได้ค่าความต่างศักย์เริ่มต้นเพียง 0.97 โวลต์เท่านั้น เนื่องจากเกิดการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (Crossover) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเกิดขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจนขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง เช่น เมื่อแก๊สไฮโดรเจนแพร่ข้ามไปยังขั้วแคโทดผ่านทางเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ประกอบกับฝั่งขั้วแคโทดมีแก๊สออกซิเจน แก๊สทั้งสองจึงเกิดการทำปฏิกิริยาภายในขั้วแคโทดเดียวกัน ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าภายใน (Internal current) [Larminie, 2000] ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด เช่นเดียวกับฝั่งแอโนดที่มีการแพร่ข้ามของออกซิเจน ก็จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนดเช่นเดียวกัน จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง

ลักษณะของกราฟโพลาริเซชันที่ได้ในช่วงที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ คือ ในช่วงไม่เกิน 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร กราฟจะมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรก เนื่องมาจากการเกิดโพลาริเซชันทางเคมี (Activation polarization) ซึ่งเป็นผลของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ถ้าปฏิกิริยาเกิดได้ช้าหรือมีค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาสูงจะทำให้เกิดโพลาริเซชันทางเคมีสูงด้วย จากผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าความดันที่ใช้ในการอัดด้วยความร้อนของการประกอบ MEA พบว่าโพลาริเซชันทางเคมีจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยแต่ไม่มากนัก (รูปที่ 4.9) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าค่าความดันมีผลต่อโพลาริเซชันทางเคมีด้วย

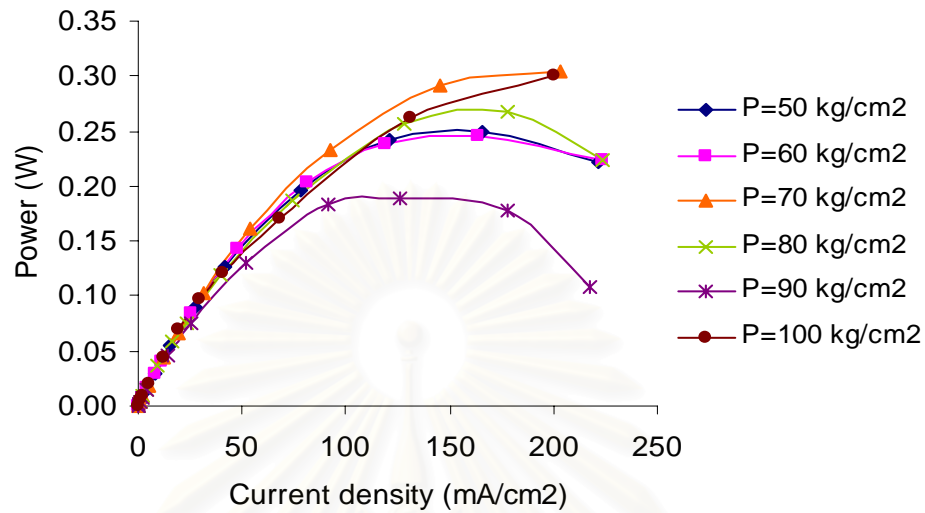
ในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ประมาณ 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรจะเป็นช่วงที่เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานของขั้วไฟฟ้าและเยื่อแผ่น (Resistance polarization) ซึ่งเกิดจากความต้านทานในขั้วไฟฟ้าและเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนขึ้น ที่ค่าความดันแตกต่างกันในขณะที่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดมีค่าคงที่ คือ ที่ 150°C และ 1 นาที ตามลำดับ พบว่าได้โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานที่แตกต่างกันเล็กน้อย ตัวอย่างเช่นในกราฟรูปที่ 4.9 และ 4.10 ที่ค่าความต่างศักย์ที่ 0.4 โวลต์ ความดันเท่ากับ 50 kg/cm^2 ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 120 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.24 วัตต์ และมีค่าความชัน (Ohmic resistance) เท่ากับ 0.0033 กิโลโอห์ม.ตารางเซนติเมตร เมื่อเพิ่มค่าความดันเป็น 70 kg/cm^2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเป็น 145 มิลลิแอมป์ต่อตา

รางเซนติเมตร ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.29 วัตต์ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับที่ค่าความดันเท่ากับ 50 kg/cm² และมีค่าความชันเท่ากับ 0.0028 กิโลโอห์ม-ตารางเซนติเมตร จะเห็นว่าการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานของขั้วไฟฟ้าและสารอิเล็กโทรไลต์ลดลง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากค่าความต้านทานในการสัมผัส (Contact resistance) ที่เกิดจากการประกอบ MEA นั้นมีค่าน้อย ทำให้ขั้วไฟฟ้าและเยื่อแผ่นสามารถยึดติดกันได้ดี เป็นผลให้แก๊สตั้งต้นที่ผ่านเข้ามาในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าได้ดี ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจึงดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มค่าความดันในการอัดเพื่อประกอบ MEA เป็น 80 และ 90 kg/cm² จะเห็นว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มจะลดลง โดยที่ความดัน 80 และ 90 kg/cm² จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 128 และ 92 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.26 และ 0.18 วัตต์ และมีค่าความชันเท่ากับ 0.0031 และ 0.0043 กิโลโอห์ม-ตารางเซนติเมตรตามลำดับ จะเห็นว่าการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมากขึ้น แสดงว่าค่าความต้านทานในการสัมผัสที่เกิดจากการประกอบ MEA นั้นมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลที่ได้จะเห็นว่าเมื่อความดันเปลี่ยนแปลงค่าความชันจะมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าความดันไม่มีผลต่อโพลาริเซชันทางความต้านทานมากนักแต่จะมีผลของโพลาริเซชันทางเคมีมากกว่า ในส่วนผลที่ได้ตามความเป็นจริงแล้วการให้ความดันที่ใช้ในการประกอบ MEA ที่เพิ่มขึ้นนั้นควรจะทำให้ขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นยึดติดกันได้ดี แต่อาจจะมีส่วนมาจากบริเวณชั้นแก๊สแพร่ของขั้วไฟฟ้า ที่จะเป็นช่องทางผ่านของแก๊สตั้งต้นไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีความพรุนลดลง โดยมีสาเหตุมาจากการใช้ความดันที่มากเกินไป และยังทำให้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยานั้นมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา (Surface area) ลดลง ทำให้แก๊สตั้งต้นที่จะผ่านไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเกิดปฏิกิริยานั้นเป็นไปได้อย่างลำบาก โดยสังเกตได้จากกราฟโพลาริเซชันซึ่งค่าความต่างศักย์จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มความดันขึ้นไปอีกเท่ากับ 100 kg/cm² ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากลับมีค่าเพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ 130 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.26 วัตต์ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 44 เมื่อเทียบกับที่ความดันเท่ากับ 90 kg/cm² และค่าความชันเท่ากับ 0.0031 กิโลโอห์ม-ตารางเซนติเมตร แสดงว่าการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานกลับมามีค่าลดลงอีก อาจเป็นเพราะผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอุณหภูมิ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอัดก็ได้ จะเห็นได้จากกราฟรูปที่ 4.6-4.8 ที่ผ่านมา พบว่าการประกอบ MEA ที่ภาวะความดันและอุณหภูมิสูงในขณะที่เวลาที่ใช้ในการอัดน้อยนั้น ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นนั้นอาจเป็นเพราะในการประกอบ MEA ถ้าใช้ความดันที่มีค่าสูงจะทำให้มีแรงอัดที่มากพอที่จะทำให้ขั้วไฟฟ้าและเยื่อแผ่นจะยึดติดกันดี รวมไปถึงการใช้อุณหภูมิสูงก็จะเป็นปัจจัยเสริมที่ช่วยให้ขั้วไฟฟ้าและเยื่อแผ่นจะยึดติดกันได้ดีด้วย จึงอาจเป็นผลทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่า

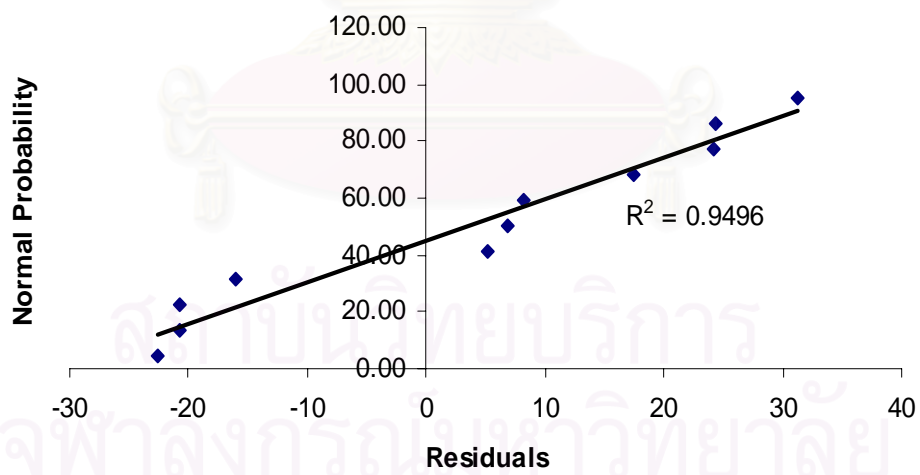
เพิ่มขึ้น และถ้าพิจารณาจากแบบจำลองที่ได้จากสมการที่ 4.2 พบว่าความดันที่ใช้ควรจะมีค่าลดลง จึงจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทำนายดังกล่าว และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่ได้จากสมการที่ 4.2 ผลที่ได้แสดงดังกราฟรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบว่า ค่า R^2 มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง (0.9496) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองและจากการทดลองนั้นมีค่าแตกต่างกันแต่ไม่มากนัก แสดงว่าแบบจำลองนี้ยังเป็นตัวแทนของข้อมูลได้ไม่ค่อยดี แต่ก็ยังเป็นข้อยืนยันว่าความดันมีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ จากกราฟในรูปที่ 4.9 และ 4.10 นี้จะเห็นว่าที่ความดันเท่ากับ 70 kg/cm^2 จะให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสูงที่สุด ดังนั้นค่าความดันของการประกอบ MEA ที่ให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสูงที่สุดและเป็นภาวะที่เหมาะสมในการประกอบ MEA คือ ที่ความดันเท่ากับ 70 kg/cm^2 ส่วนสาเหตุที่กราฟในรูปที่ 4.9 นี้ไม่เห็นการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ๆ อาจเนื่องมาจากปริมาณแก๊สที่ใช้มีมากเพียงพอที่จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าตามที่วัดได้ จึงทำให้กราฟไม่แสดงผลของโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น ในส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ($\text{Power}_{\text{max}}$) ที่ค่าศักย์ของเซลล์เดียวกันที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ในแต่ละความดันที่ใช้ในการประกอบ MEA และช่วงความผิดพลาดในการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 4.13



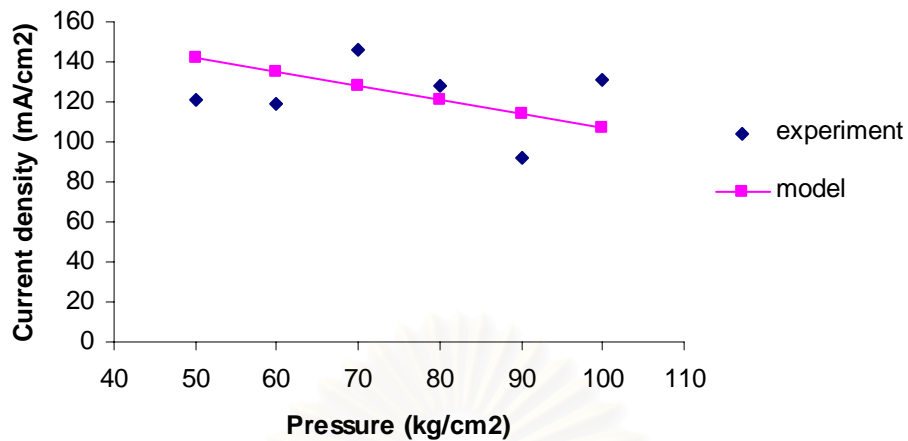
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการประกอบ MEA ที่ความดันต่าง ๆ โดยที่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดคงที่ คือ ที่ 150°C และ 1 นาที ตามลำดับ



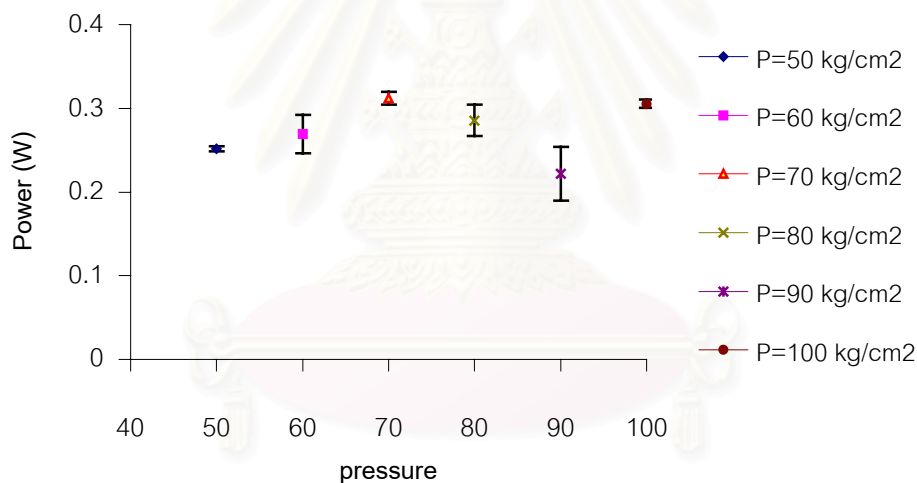
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของการประกอบ MEA ที่ความดันแตกต่างกัน



รูปที่ 4.11 Normal Probability Plot ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่ความดันแตกต่างกัน



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่ความดันแตกต่างกัน



รูปที่ 4.13 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าศักย์ของเซลล์เดียวกันของ MEA ที่เตรียมที่ความดันต่าง ๆ และช่วงความผิดพลาดในการทดลอง

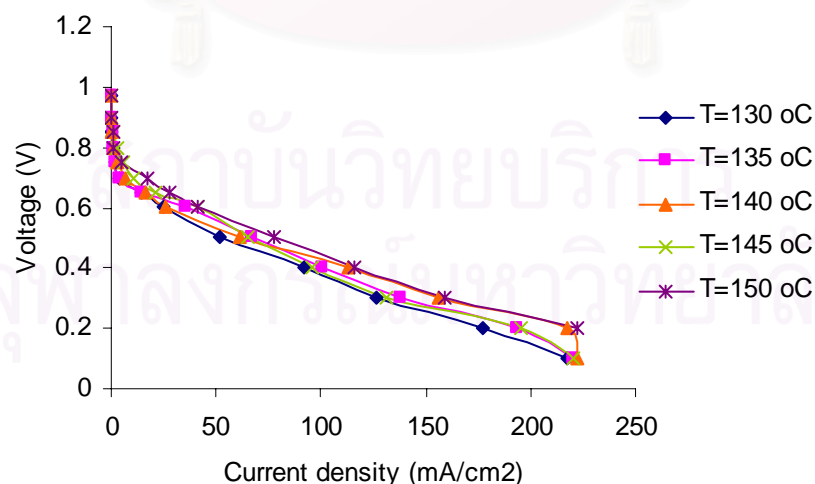
4.3 ผลของอุณหภูมิ

การศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการประกอบ MEA โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 100 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm แก๊สทั้งสองชนิดผ่านระบบให้ความชื้นก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง โดยมีค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60°C และความดันบรรยากาศ ผลการทดลองแสดง

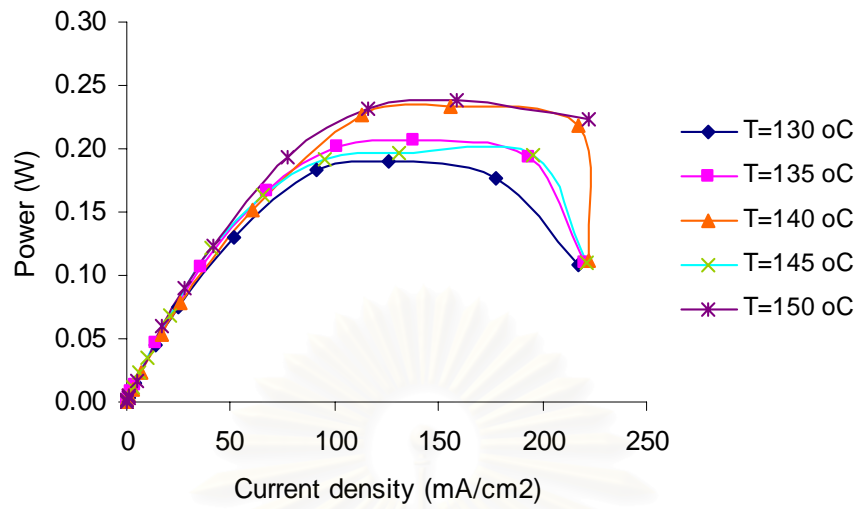
ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 ลักษณะของกราฟโพลาริเซชันที่ได้ในช่วงโพลาริเซชันทางเคมี แสดงให้เห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงอย่างมากโดยที่ยังไม่เกิดกระแสไฟฟ้าในระบบ โดยค่าที่ลดลงจะแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อโพลาริเซชันทางเคมีด้วยเช่นเดียวกัน

ในช่วงโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานของขั้วไฟฟ้าและเยื่อแผ่น (Resistance Polarization) ซึ่งที่ค่าอุณหภูมิแตกต่างกันจะพบว่ามีการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานที่แตกต่างกันเล็กน้อย สังเกตได้จากความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าแตกต่างกันแต่ไม่มากนัก โดยเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นไปจนถึง 150°C จะเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานลดลง โดยที่ค่าความต่างศักย์ที่ 0.4 โวลต์ อุณหภูมิเท่ากับ 130°C ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 90 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.18 วัตต์ และมีค่าความชัน (ohmic resistance) เท่ากับ 0.0044 กิโลโห์ม-ตารางเซนติเมตร แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 135, 140, 145 และ 150°C ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นโดยมีค่าประมาณ 101, 113, 96 และ 116 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กำลังไฟฟ้า 0.20, 0.23, 0.19 และ 0.23 วัตต์ และมีค่าความชันเท่ากับ 0.004, 0.0035, 0.0042 และ 0.0034 กิโลโห์ม-ตารางเซนติเมตรตามลำดับ จะเห็นว่าอุณหภูมิจะมีค่าความชันที่แตกต่างกัน เป็นผลให้อุณหภูมิส่งผลต่อการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน แต่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 145°C ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ามีค่าลดลงอาจจะเกิดจากความผิดพลาดในการทดลอง จากผลที่ได้จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิใกล้เคียงกันค่าความชันมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก แสดงว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อโพลาริเซชันทางความต้านทาน แต่ถ้าพิจารณาที่ค่าอุณหภูมิจาก 130°C เป็น 150°C ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 28 และมีค่าความชันจาก 0.0044 กิโลโห์ม-ตารางเซนติเมตรลดลงเหลือเท่ากับ 0.0034 กิโลโห์ม-ตารางเซนติเมตร จะเห็นว่าการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมีค่าลดลงมาก ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิที่ใช้มีค่าแตกต่างกันมากทำให้เห็นว่าการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมีค่าลดลง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากค่าความต้านทานในการสัมผัสที่เกิดจากการประกอบ MEA นั้นมีค่าน้อยลง ซึ่งเกิดจากการที่อุณหภูมิที่ใช้ในการประกอบ MEA เพิ่มขึ้นทำให้เยื่อแผ่นสามารถยึดติดกับขั้วไฟฟ้าได้ดี แก๊สสามารถผ่านเข้าไปเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น หรืออาจเป็นเพราะผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอุณหภูมิ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอัดก็ได้ จะเห็นได้จากกราฟรูปที่ 4.6-4.8 ที่ผ่านมา พบว่าที่การประกอบ MEA ที่สภาวะความดันและอุณหภูมิสูง ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการอัดน้อยนั้นจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องจากผลการทดลองที่ได้ และถ้าพิจารณาจากแบบจำลองที่ได้จากสมการที่ 4.2 จะเห็นว่าอุณหภูมิควรจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือมีค่าสูง จึงจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับแบบจำลองที่ได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการ

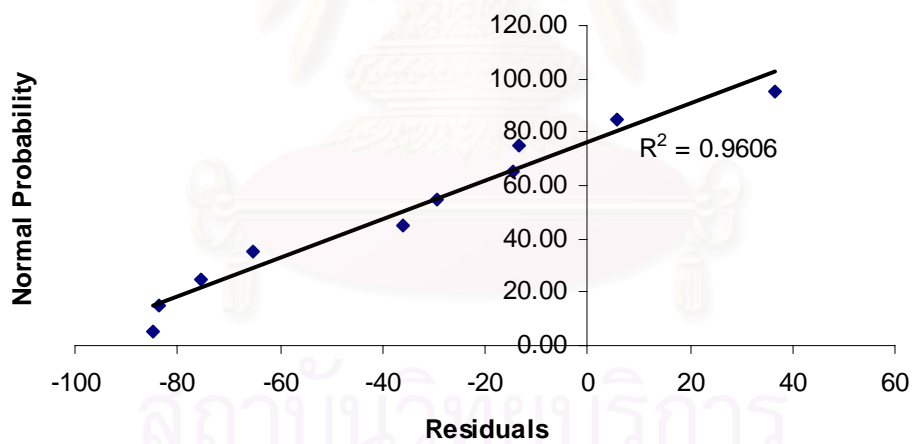
ทดลองจริง กับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่ได้จากสมการที่ 4.2 ผลที่ได้แสดงในกราฟรูปที่ 4.16 และ 4.17 พบว่าค่า R^2 มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง (0.9606) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองและจากการทดลองนั้น ในช่วงอุณหภูมิต่ำมีค่าใกล้เคียงกันแต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าที่ได้จะแตกต่างกันมาก แสดงว่าแบบจำลองนี้ยังเป็นตัวแทนของข้อมูลได้ไม่ค่อยดี แต่ก็ยืนยันข้อสันนิษฐานว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้เช่นเดียวกัน จากกราฟรูปที่ 4.14 และ 4.15 นี้จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้แนวโน้มจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากเยื่อแผ่น Nafion นี้มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้วเท่ากับ 150°C [Wolf, 2003] ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่เยื่อแผ่นจะเริ่มเสื่อมสภาพ คือ ทำให้ความสามารถในการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นลดลง ดังนั้นจึงไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองขึ้นไปได้อีก แต่จะเห็นว่าที่อุณหภูมิเท่ากับ 140°C และ 150°C นั้นค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ดังนั้นจึงใช้ค่าอุณหภูมิของการประกอบ MEA ที่ให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุดซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมในการประกอบ MEA คือ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 140°C ที่เลือกค่าอุณหภูมินี้ เพราะเป็นอุณหภูมิที่ไม่สูงมากแต่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิเท่ากับ 150°C ส่วนสาเหตุที่กราฟในรูปที่ 4.14 นี้เห็นการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ๆ เนื่องมาจากได้ทำการเพิ่มขนาดของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat จะวัดได้จึงทำให้กราฟแสดงผลของโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นด้วย และในส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าศักย์ของเซลล์เดียวกันที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการประกอบ MEA และช่วงความผิดพลาดในการทดลอง แสดงดังกราฟรูปที่ 4.18



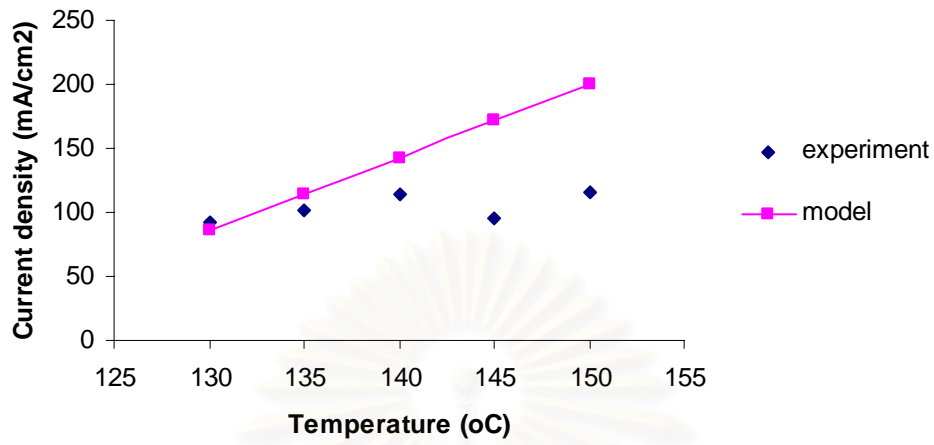
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการประกอบ MEA ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่ความดันและเวลาที่ใช้ในการอัดคงที่ คือ ที่ 100 kg/cm^2 และ 1 นาที ตามลำดับ



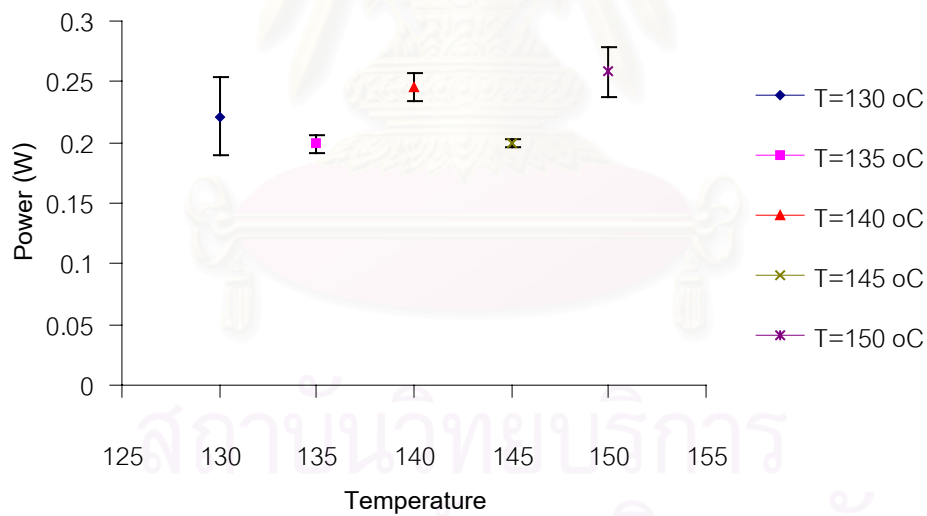
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของการประกอบ MEA ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน



รูปที่ 4.16 Normal Probability Plot ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน



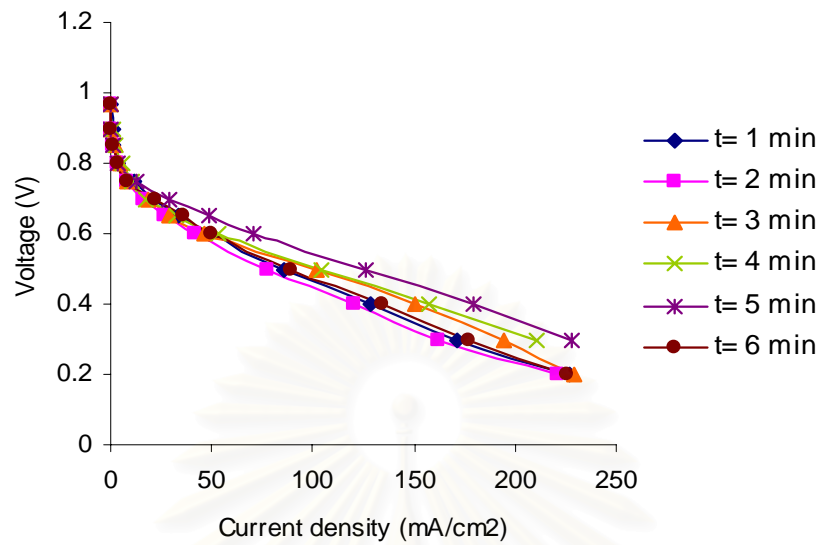
รูปที่ 4.18 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เดียวกันของ MEA ที่เตรียมที่อุณหภูมิต่าง ๆ และช่วงความผิดพลาดในการทดลอง

4.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการอัด

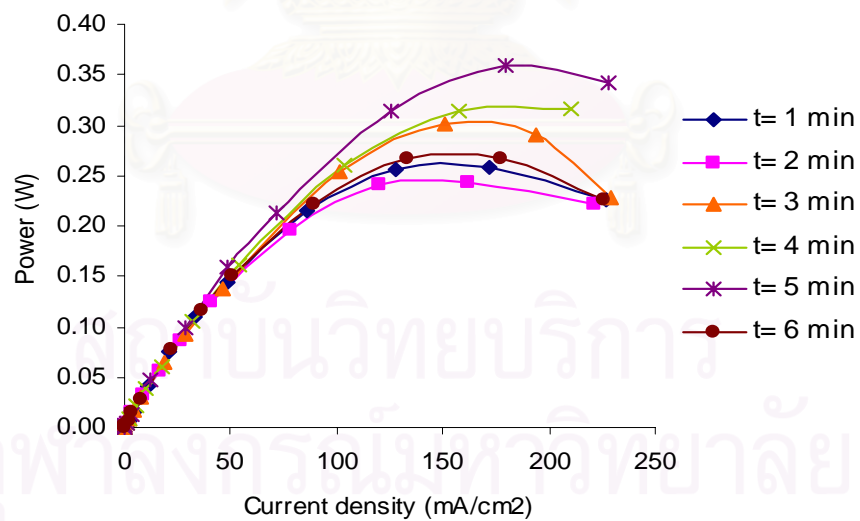
การศึกษาถึงผลของเวลาที่ใช้ในการประกอบ MEA โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 100 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm แก๊สทั้งสองชนิดผ่านระบบให้ความชื้นก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง โดยมีค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60°C และความดันบรรยากาศ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ในช่วงโพลาริเซชันทางเคมี พบว่ากราฟโพลาริเซชันมีลักษณะเดียวกันเมื่อเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการอัดที่ใช้ในการประกอบ MEA ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเวลาที่ใช้ในการอัดไม่มีผลต่อโพลาริเซชันทางเคมี

ในช่วงที่เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานของขั้วไฟฟ้าและเยื่อแผ่น พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการอัดแตกต่างกัน จะส่งผลให้โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานแตกต่างกัน สังเกตได้จากความชันของกราฟที่ได้ โดยเมื่อเวลาที่ใช้ในการอัดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1 นาทีไปจนถึง 5 นาทีการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมีแนวโน้มจะมีค่าลดลง ตัวอย่างเช่นในกราฟรูปที่ 4.19 และ 4.20 ที่ค่าความต่างศักย์ที่ 0.4 โวลต์ เวลาที่ใช้ในการอัดเท่ากับ 1 นาที ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 128 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.26 วัตต์ และมีค่าความชันเท่ากับ 0.0031 กิโลโห์ม-ตารางเซนติเมตร และเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการอัดเป็น 2, 3, 4 และ 5 นาที ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 120, 150, 157 และ 180 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.24, 0.30, 0.31 และ 0.36 วัตต์ และมีค่าความชันเท่ากับ 0.0033, 0.0027, 0.0025 และ 0.0022 กิโลโห์ม-ตารางเซนติเมตรตามลำดับ จะเห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อเวลาที่ใช้ในการอัดเพิ่มขึ้นจาก 1 นาทีเป็น 5 นาทีจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.26 วัตต์เป็น 0.36 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 38 และค่าความชันมีค่าลดลงจาก 0.0031 กิโลโห์ม-ตารางเซนติเมตร ลดลงเหลือ 0.0022 กิโลโห์ม-ตารางเซนติเมตร แสดงว่าโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานจะมีค่าลดลง ดังนั้นจึงทำการทดลองเพิ่มอีกโดยเพิ่มเวลาที่ใช้ในการอัดเป็น 6 นาที ผลที่ได้พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือประมาณ 134 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.27 วัตต์ ซึ่งมีค่าลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ และค่าความชันเท่ากับ 0.003 กิโลโห์ม-ตารางเซนติเมตร จะเห็นว่าโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานกลับมีค่าเพิ่มขึ้นอีก ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อใช้เวลาในการอัดเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานในการสัมผัสที่เกิดจากการประกอบ MEA นั้นมีค่าน้อย แต่เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นไปอีก อาจเป็นสาเหตุทำให้บริเวณชั้นแก๊สแพร่ของขั้วไฟฟ้า ที่เป็นช่องทางผ่านของแก๊สดังตั้งไปยั้งชั้นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีความพรุนลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากในการทดลองนี้ใช้ค่าความดันที่คงที่ซึ่งมีค่า

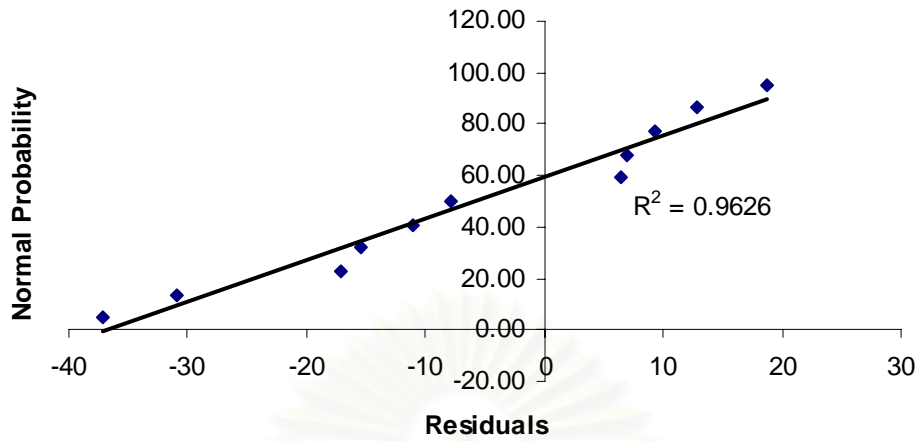
สูงรวมไปถึงใช้เวลาที่ใช้ในการอัดนานเกินไปด้วย ทำให้แก๊สตั้งต้นไม่สามารถแพร่ผ่านไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงพอต่อความต้องการในการเกิดปฏิกิริยานั้น ทำให้ศักย์ไฟฟ้ามีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น แต่ในรูปที่ 4.19 ไม่เห็นการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ๆ อาจเนื่องมาจากปริมาณแก๊สที่ใช้มีมากเพียงพอที่จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าตามที่วัดได้ จึงทำให้กราฟไม่แสดงผลของโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น แสดงว่าเวลาที่ใช้ในการอัดมีผลต่อการประกอบ MEA ด้วย ทำให้ขัดแย้งกับสิ่งที่ได้จากการทำ 2^k factorial แต่ในกรณีนี้อาจจะเป็นผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรก็ได้ จะเห็นได้จากสมการที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของพจน์ปฏิสัมพันธ์มีค่ามาก แสดงว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนี้จะเป็ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ จากนั้นยังได้ทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่ได้จากสมการที่ 4.2 ผลที่ได้แสดงในกราฟรูปที่ 4.21 และ 4.22 พบว่าค่า R^2 มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง (0.9626) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองส่วนใหญ่จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะมีบางค่าแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงว่าแบบจำลองนี้สามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง จึงสรุปว่าผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้อง และเป็นข้อยืนยันว่าเวลาที่ใช้ในการอัดไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้มากนัก จากกราฟรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการอัดของการประกอบ MEA ที่ให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุด คือ ที่เวลาที่ใช้ในการอัดเท่ากับ 5 นาที ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมในการประกอบ MEA ด้วย และในส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าศักย์ของเซลล์เดียวกัน ที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ในแต่ละเวลาที่ใช้ในการอัดของการประกอบ MEA และช่วงความผิดพลาดในการทดลอง แสดงดังกราฟรูปที่ 4.23



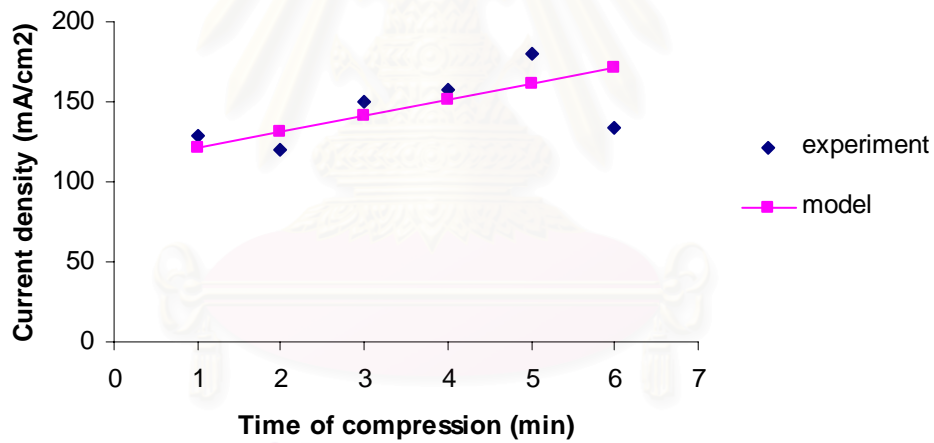
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการประกอบ MEA ที่เวลาที่ใช้ในการอัดต่าง ๆ โดยที่ความดันและอุณหภูมิคงที่ คือ ที่ 100 kg/cm² และ 150°C ตามลำดับ



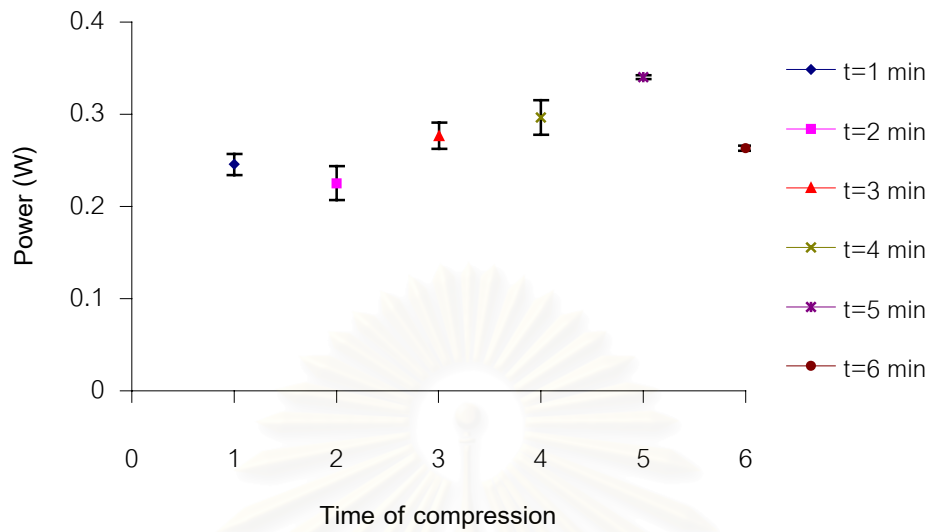
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของการประกอบ MEA ที่เวลาที่ใช้ในการอัดแตกต่างกัน



รูปที่ 4.21 Normal Probability Plot ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่เวลาที่ใช้ในการอัดแตกต่างกัน



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่เวลาที่ใช้ในการอัดแตกต่างกัน



รูปที่ 4.23 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าศักย์ของเซลล์เดียวกันของ MEA ที่เตรียมที่เวลาที่ใช้ในการอัดต่าง ๆ และช่วงความผิดพลาดในการทดลอง

จะเห็นว่าผลที่ได้ในการหาภาวะที่เหมาะสมในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (MEA) โดยการใช้ค่าตัวแปร คือ ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดที่แตกต่างกัน โดยการให้ตัวแปรหนึ่งเปลี่ยนไปในขณะที่อีกสองตัวแปรคงที่นั้น อาจจะได้ภาวะที่เหมาะสมไม่ถูกต้องและแม่นยำมากนัก เนื่องจากการประกอบ MEA นั้นมีผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอุณหภูมิ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอัดมาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีในการหาภาวะที่เหมาะสมในการประกอบ MEA อีกวิธี คือ วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Method) ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.10

4.5 ผลของวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

ซึ่งในการทดลองตามวิธีนี้จะทำการหาแบบจำลองโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square) โดยในการหาแบบจำลองส่วนใหญ่จะเลือกแบบจำลองพหุนามกำลังต่ำ เช่น แบบจำลองกำลังหนึ่งหรือเรียกว่าแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression) แสดงดังสมการที่ 4.3

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \dots \dots \dots (4.3)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง แสดงดังสมการที่ 4.4

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \dots \dots \dots (4.4)$$

แต่หลังจากทำการคำนวณโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square) จากข้อมูลการทดลองที่ได้ (แสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.17) จะได้แบบจำลองดังสมการ

$$\hat{y} = 147.468 - 7.961x_1 + 5.631x_2 + 3.513x_3 + 19.174x_1x_2 - 39.669x_2x_3 \dots \dots (4.5)$$

โดย	\hat{y}	คือ	ผลตอบสนอง ในที่นี้คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์เดียวกัน
	x_1	คือ	ความดัน
	x_2	คือ	อุณหภูมิ
	x_3	คือ	เวลาที่ใช้ในการอัด
	ε	คือ	ความผิดพลาดขณะทำการทดลอง

จะเห็นว่าแบบจำลองที่คำนวณได้ในสมการที่ 4.5 นี้ (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) จะอยู่ในรูปของแบบจำลองกำลังหนึ่งและยังมีพจน์ของปฏิสัมพันธ์ ซึ่งเป็นพจน์ของแบบจำลองกำลังสอง จะเห็นว่าแบบจำลองที่ได้นี้จะคล้ายกับแบบจำลองที่ได้จากการคำนวณจากการทำ Experimental design (แสดงในสมการที่ 4.2) ดังนั้นจึงเป็นข้อยืนยันว่าแบบจำลองที่คำนวณได้นี้มีความถูกต้อง

ในการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองที่ได้นี้จะแสดงการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลองกำลังหนึ่ง

Source of Variation	Sum of Square	Degree of freedom	Mean Square	F_0
Regression (β_1, β_2)	1521.371	2	760.6855	17.01788
Residual	31726.07	16		
(Interaction)	31060.35	2	15530.17	347.4375
(Pure quadratic)	84.63173	1	84.63173	1.893362
(Pure error)	581.0894	13	44.69918	
Total	33444.9	18		

การทดลองครั้งนี้พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % หรือระดับความสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ซึ่งค่าวิกฤต ($F_{\text{critical}} = F_{0.05, 1, 13}$) เท่ากับ 4.67 จากผลการทดลองพบว่าค่า F_0 ของสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรและปฏิสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรมีค่ามากกว่าค่าวิกฤต แต่ F_0 ของ Pure quadratic มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤต แสดงว่าตัวแปรหลัก คือ ความดัน อุณหภูมิรวมไปถึงปฏิสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรนั้น มีผลต่อค่าการตอบสนอง ซึ่งในที่นี้คือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แต่พจน์กำลังสองไม่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในการออกแบบการทดลอง (แสดงในตารางที่ 4.2) ดังนั้นจึงเป็นข้อยืนยันว่าผลสรุปที่ได้นี้มีความถูกต้อง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองกำลังหนึ่งที่ได้มีความเหมาะสม และสามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองอันดับสอง แต่ถ้าผลการวิเคราะห์พบว่าจำเป็นต้องใช้แบบจำลองกำลังสอง พบว่าไม่สามารถทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบการทดลองได้ (การออกแบบการทดลองแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.17) เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นจึงใช้แบบจำลองกำลังหนึ่งที่ได้นี้ทำการออกแบบการทดลองตามวิธี Response Surface Method ต่อไป

หมายเหตุ ในส่วนของพจน์ของปฏิสัมพันธ์นั้นรูปแบบของแบบจำลองควรจะเป็นพหุนามกำลังสอง แต่เนื่องจากผลการวิเคราะห์แสดงว่า Pure quadratic ไม่มีผล แสดงว่าผลตอบสนองนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้ง และแบบจำลองกำลังหนึ่งเพียงพอในการสร้างแบบจำลอง ดังนั้นจะถือว่าพจน์ของ interaction อยู่ในรูปของพหุนามกำลังหนึ่งด้วย โดยถ้ากำหนดให้ $x_1x_2 = x_4$, $\beta_{12} = \beta_4$, $x_2x_3 = x_5$ และ $\beta_{23} = \beta_5$ แล้วนำไปแทนค่าในสมการที่ 4.5 จะเห็นว่าแบบจำลองก็จะอยู่ในรูปแบบจำลองกำลังหนึ่งเช่นเดียวกัน

จากสมการที่ได้เมื่อเทียบกับสมการที่ 4.3 จะได้ค่า β_1 , β_2 , β_3 , β_{12} และ β_{23} เท่ากับ -7.961, 5.631, 3.513, 19.174 และ -39.669 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความดัน (β_1) มีค่ามากที่สุดเมื่อพิจารณาเฉพาะปริมาณของตัวแปรที่เป็นตัวแปรหลัก ดังนั้นจะใช้ตัวแปร x_1 เป็นตัวเปรียบเทียบ ซึ่งในการก้าวออกไปหาจุดที่ให้ค่าตอบสนองมากที่สุดจะใช้ทิศทางและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_1) เป็นตัวเทียบ ดังนั้น เมื่อเรากำหนดให้ Δx_1 เท่ากับ -1 คำนวณค่า Δx_2 จากสูตรในสมการที่ 2.6 จะได้เท่ากับ 0.71 และคำนวณค่า Δx_3 จะได้เท่ากับ 0.44 (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) จากนั้นทำการกำหนดขนาดของการก้าวอย่าง ในการทดลองนี้ กำหนดให้เท่ากับ 5 นาที ดังนั้นจากจุดเริ่มต้นจะไปยังขั้นต่อไป ความดันจะมีค่าลดลง 5 หน่วยไปอยู่ที่ 70 kg/cm² ส่วนอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดจะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 3.55 (0.71*5) หน่วยและ 2.2 (0.44*5) หน่วยไปอยู่ที่ 134°C และ 3 นาที ตามลำดับและขั้นต่อไปความดันก็จะลดลงทุก ๆ 5 kg/cm² ในส่วนอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอัดก็จะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 3.55°C และ 2.2 นาที ตามลำดับ เป็นแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนภาวะการทดลองไม่สามารถที่จะทำได้แล้ว ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเยื่อแผ่น และข้อจำกัดของเครื่อง Compression mold ที่จะใช้ในการประกอบ MEA โดยผลของการออกแบบการทดลองในแต่ละขั้นตามวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การออกแบบการทดลองตาม Response Surface Method

Steps	Coded Variables			Natural Variables			Response
	x_1	x_2	x_3	ξ_1	ξ_2	ξ_3	
origin	0	0	0	75	130	1	85.37
Δ	-1	0.71	0.44	5	3.55	2.2	
Origin+ Δ	-1	0.71	0.44	70	133.55	3.2	121.75
Origin+2 Δ	-2	1.42	0.88	65	137.1	5.4	182.56
Origin+3 Δ	-3	2.13	1.32	60	140.65	7.6	39.75
Origin+4 Δ	-4	2.84	1.76	55	144.2	9.8	28.42
Origin+5 Δ	-5	3.55	2.2	50	147.75	12	22.45

$$x_1 = \frac{\text{Pressure} - 75}{5} \quad x_2 = \frac{\text{Temp} - 130}{5} \quad x_3 = \frac{\text{Time} - 1}{5}$$

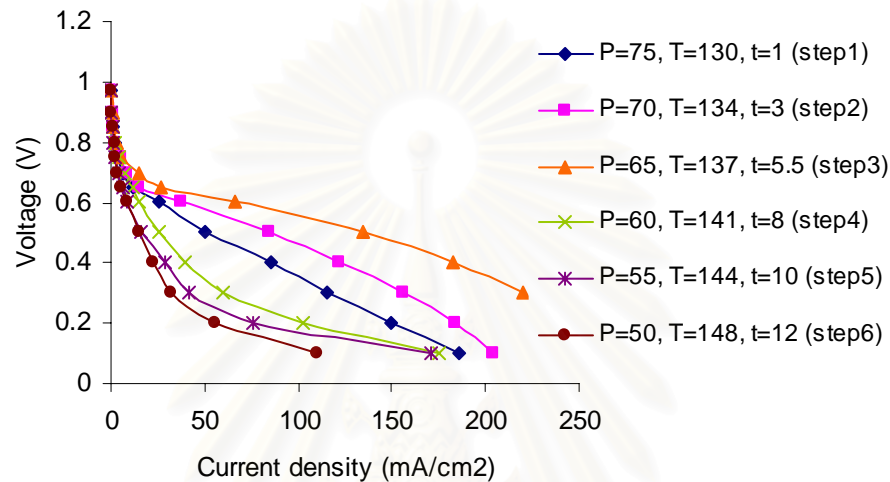
จากผลการวิเคราะห์ที่ความแปรปรวนที่พบว่า ความดัน อุณหภูมิมีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการอัดนั้นไม่มีผล แต่เนื่องจากสหสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอุณหภูมิ และสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอัดมีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญด้วย ดังนั้นในการออกแบบการทดลองตามวิธีนี้จึงต้องนำเวลาที่ใช้ในการอัดมาใช้ในการออกแบบการทดลองด้วย

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลของการออกแบบการทดลองตามวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Method) โดยที่จุดเริ่มต้นจะทำให้ภาวะการทดลอง คือ ความดัน อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการอัดเท่ากับ 75 kg/cm^2 , $130 \text{ }^\circ\text{C}$ และ 1 นาที ตามลำดับ สาเหตุที่ให้ภาวะการทดลองเริ่มต้นเป็นภาวะดังกล่าว ไม่ใช่ภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากวิธีการเปลี่ยนค่าตัวแปรจากผลการทดลองที่ผ่านมา เนื่องมาจากความเหมาะสมและความสะดวกในการออกแบบทดลองรวมถึงคุณสมบัติของเยื่อแผ่นด้วย โดยที่จุดเริ่มต้นจะให้ป็นขั้นของการก้าว่าง (step) ที่ 1 และภาวะถัดมาก็จะเป็นขั้นของการก้าว่าง (step) ที่ 2 และเรียงลำดับไปเรื่อย ๆ

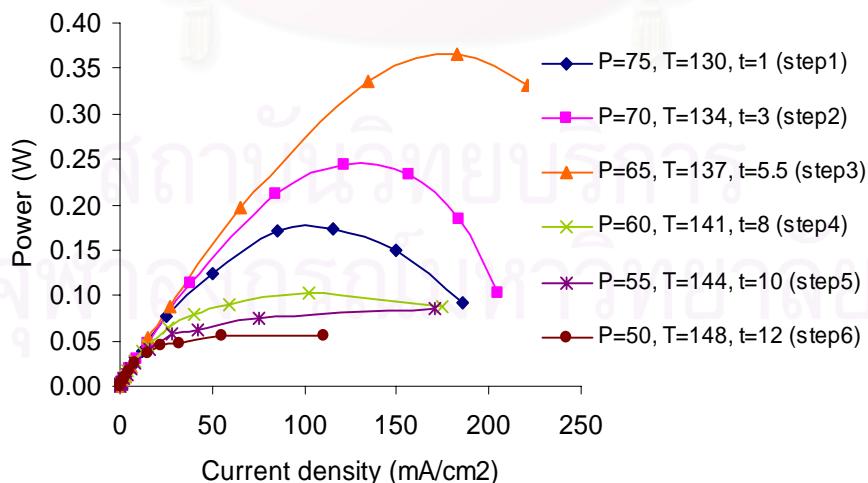
การหาภาวะที่เหมาะสมของความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการประกอบ MEA โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Method) นี้จะใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 100 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm แก๊สทั้งสองชนิดผ่านระบบให้ความชื้นก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง โดยมีค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100

คุณสมบัติการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60°C และความดันบรรยากาศ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 ในช่วงโพลาริเซชันทางเคมี (Activation Polarization) พบว่าเมื่อเปลี่ยนภาวะที่ใช้ในการประกอบ MEA ในแต่ละขั้นการก้าวอย่าง (step) พบว่าโพลาริเซชันทางเคมีจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าภาวะที่ใช้ในการประกอบ MEA นี้มีผลต่อโพลาริเซชันทางเคมีด้วย ในช่วงโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานของขั้วไฟฟ้าและเยื่อแผ่น (Resistance polarization) พบว่าที่ภาวะที่ใช้ในการประกอบ MEA ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานแตกต่างกัน สังเกตได้จากความชันของกราฟที่ได้ โดยที่เมื่อเปลี่ยนภาวะที่ใช้ในการประกอบ MEA จากขั้นของการก้าวอย่างขั้นที่ 1 ไปเป็นขั้นที่ 3 การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมีแนวโน้มลดลง ตัวอย่างเช่นในกราฟรูปที่ 4.24 และ 4.25 ที่ค่าความต่างศักย์ที่ 0.4 โวลต์ ภาวะที่ใช้ในการประกอบ MEA ขั้นที่ 1 ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 85 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.17 วัตต์ และมีค่าความชันเท่ากับ 0.0047 กิโลโอห์ม-ตารางเซนติเมตร และเมื่อเปลี่ยนภาวะที่ใช้ในการประกอบ MEA เป็นขั้นที่ 2 และ 3 จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 122 และ 183 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและได้กำลังไฟฟ้า 0.24 และ 0.37 วัตต์ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 111 (1 เท่า) จากค่าฐานและความชันมีค่าเท่ากับ 0.0033 และ 0.0022 กิโลโอห์ม-ตารางเซนติเมตรตามลำดับ จะเห็นว่าโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมีค่าลดลง แต่เมื่อเปลี่ยนภาวะที่ใช้ในการประกอบ MEA เป็นขั้นที่ 4, 5 และ 6 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มจะลดลงเหลือประมาณ 40, 28 และ 22 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.08, 0.06 และ 0.04 วัตต์ (ค่าลดลงถึงร้อยละ 83) และค่าความชันเท่ากับ 0.01, 0.014 และ 0.018 กิโลโอห์ม-ตารางเซนติเมตรตามลำดับ จะเห็นว่าโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากค่าความต้านทานในการสัมผัสที่เกิดจากการประกอบ MEA ในขั้นที่ 3 นั้นมีค่าน้อยที่สุด แสดงว่าการประกอบ MEA นั้นสามารถทำการประกอบได้อย่างดี แต่ที่ภาวะอื่นที่ใช้ในการประกอบ MEA อาจทำให้การยึดติดกันของขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นนั้นยังไม่ได้ดีเท่าที่ควร และยังได้ทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองจริง กับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่ได้จากสมการที่ 4.2 ผลที่ได้แสดงในกราฟรูปที่ 4.26 และ 4.27 พบว่าค่า R^2 มีค่าไม่ใกล้เคียงกับหนึ่งมากนัก (0.8911) และค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองและจากการทดลองจะแตกต่างกันมาก จากกราฟจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบด้วย แสดงว่าแบบจำลองนี้ไม่สามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแบบจำลองมีพจน์ของเวลาที่ใช้ในการอัดเข้ามาด้วย ทำให้แบบจำลองที่ได้อาจจะไม่ถูกต้อง แต่ในการคำนวณตามวิธีพื้นผิวตอบสนองนั้นจะใช้เวลาที่ใช้ในการอัดเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงอาจจะไม่ถูกต้อง แต่ในการหาภาวะที่เหมาะสมของการประกอบ MEA ก็

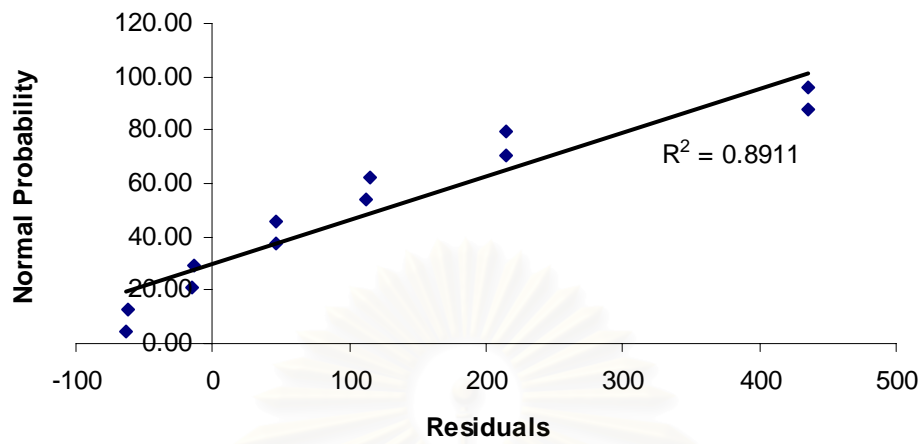
พิจารณาจากการทดลองที่ได้ออกแบบตามวิธีพื้นผิวผลตอบสนองนี้ ดังนั้นภาวะที่ใช้ในการประกอบ MEA ที่ให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุดและเป็นภาวะที่เหมาะสมในการประกอบ MEA คือ ที่ภาวะความดันเท่ากับ 65 kg/cm^2 อุณหภูมิเท่ากับ 137°C และเวลาที่ใช้ในการอัดเท่ากับ 5.5 นาที และในส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าศักย์ของเซลล์เดียวกัน ที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ในแต่ละขั้นการก้าวอย่างของภาวะในการประกอบ MEA ของทั้ง 2 การทดลองและค่าเฉลี่ยแสดงดังกราฟรูปที่ 4.28



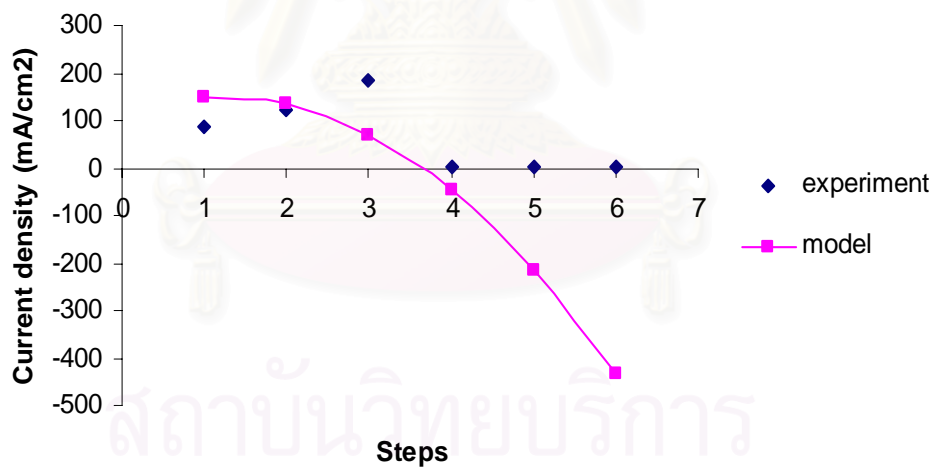
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการประกอบ MEA ที่ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดต่าง ๆ ตามการออกแบบการทดลองตามวิธี Response Surface Method



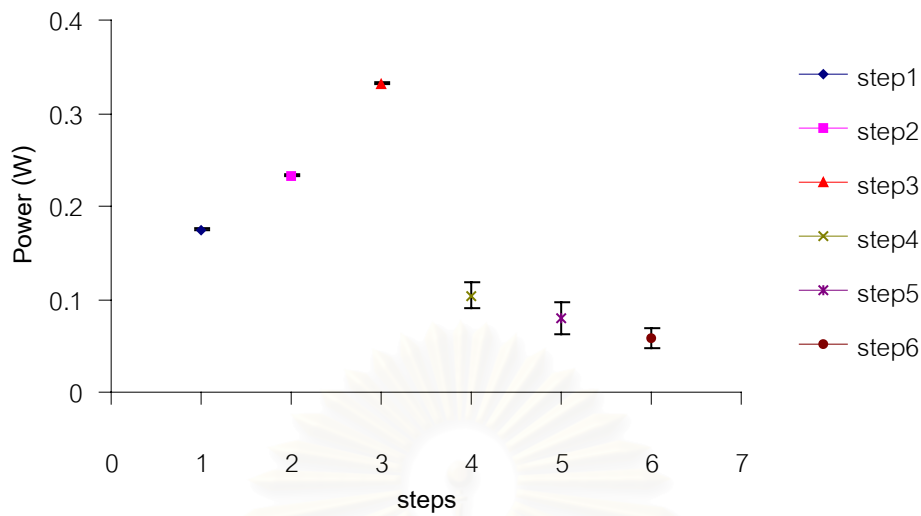
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของการประกอบ MEA ที่ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดแตกต่างกัน



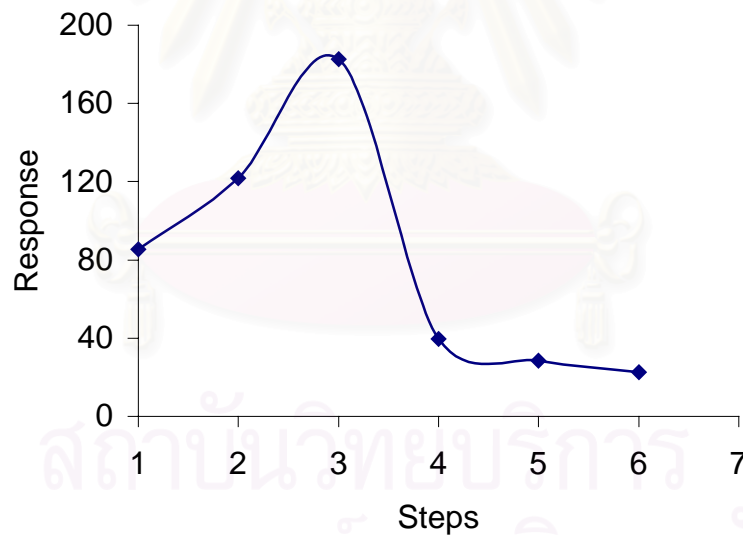
รูปที่ 4.26 Normal Probability Plot ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะแตกต่างกัน



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะแตกต่างกัน



รูปที่ 4.28 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าศักย์ของเซลล์เดียวกันของ MEA ที่เตรียมที่ชั้นของการก้าวต่าง ๆ และช่วงความผิดพลาดในการทดลอง

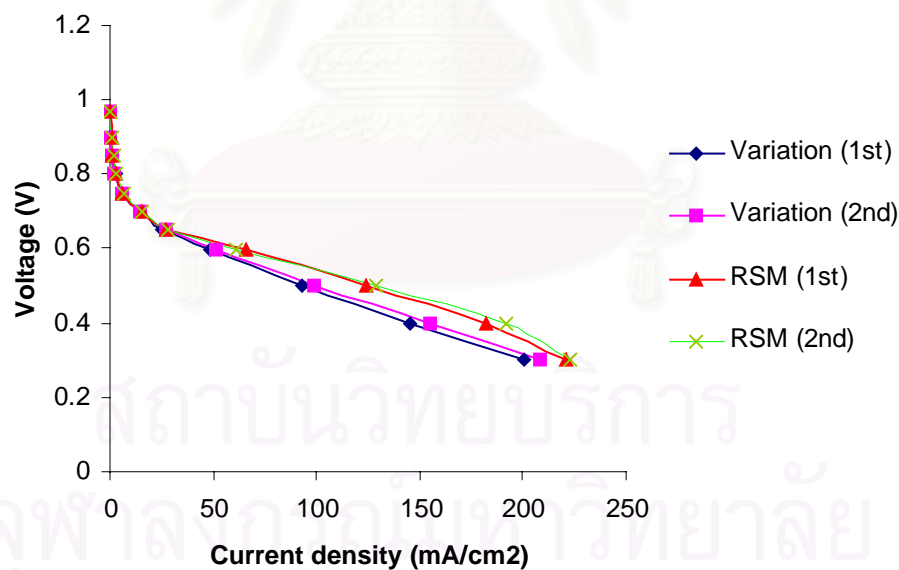


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนอง (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า) กับชั้นของการก้าวต่าง (step)

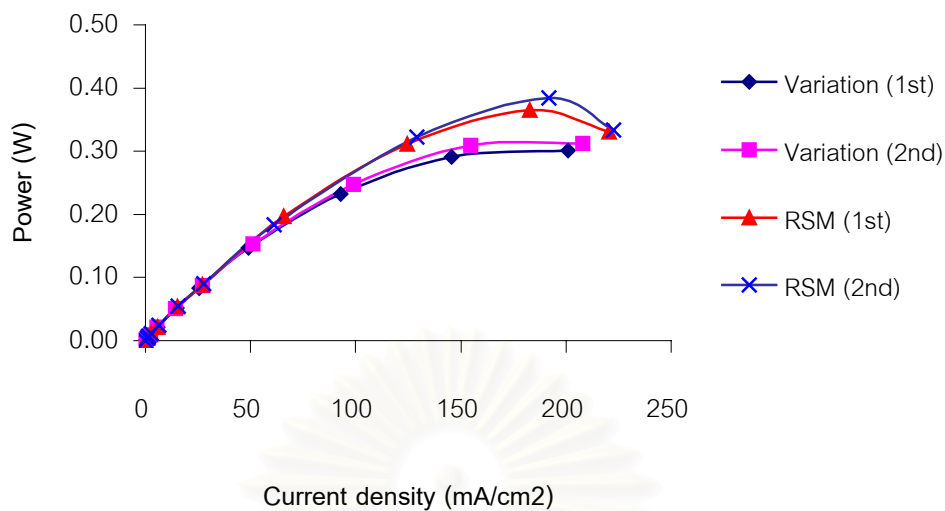
จากรูปที่ 4.29 ใช้สำหรับการหาภาวะที่เหมาะสมในการประกอบ MEA เพื่ออธิบายผลจากกราฟรูปที่ 4.24 และ 4.25 เพื่อให้เข้าใจง่าย โดยจากกราฟในแต่ละชั้นของการก้าวต่างก็จะเป็นภาวะต่าง ๆ ที่ได้ทำการออกแบบการทดลองดังตารางที่ 4.4 ซึ่งในการหาภาวะที่เหมาะสมนั้น

จะดูจากกราฟตรงจุดที่ให้ค่าการตอบสนองมากที่สุด ในที่นี้คือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์เดียวกัน โดยตรงจุดที่ให้ค่าการตอบสนองมากที่สุดนี้อยู่ตรงขั้นตอน (ภาวะการทดลอง) ไต ขั้นตอนนั้นก็จะเป็นภาวะที่เหมาะสมในการประกอบ MEA ซึ่งผลที่ได้จะถูกต้องมากกว่าการใช้วิธีเปลี่ยนค่าตัวแปรหนึ่งโดยอีก 2 ตัวแปรคงที่ จากกราฟรูปที่ 4.29 จะเห็นว่าขั้นที่ 3 ซึ่งมีภาวะการทดลอง คือ ที่ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดเท่ากับ 65 kg/cm^2 137°C และ 5.5 นาที ตามลำดับ จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากที่สุด แสดงว่าที่ภาวะนี้จะเป็นภาวะที่เหมาะสมในการประกอบ MEA ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนนี้

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการประกอบ MEA จากทั้งสองวิธีแล้วนำมาทำการเปรียบเทียบกัน ผลที่ได้แสดงดังกราฟรูปที่ 4.30 และ 4.31 จะเห็นว่าวิธีพื้นผิวผลตอบสนองจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่าง ๆ ของภาวะที่เหมาะสมที่ได้พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก (ไม่เกิน 10 %) [ตารางที่ 4.5] แสดงว่าผลการทดลองที่ได้นี้มีความถูกต้อง แต่ตามทฤษฎีภาวะที่ดีที่สุดควรจะเป็นภาวะที่ได้จากการหาภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวผลตอบสนองมากกว่าผลของการเปรียบเทียบค่าของตัวแปรต่าง ๆ



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการประกอบ MEA จากภาวะที่ดีที่สุดของทั้ง 2 วิธี



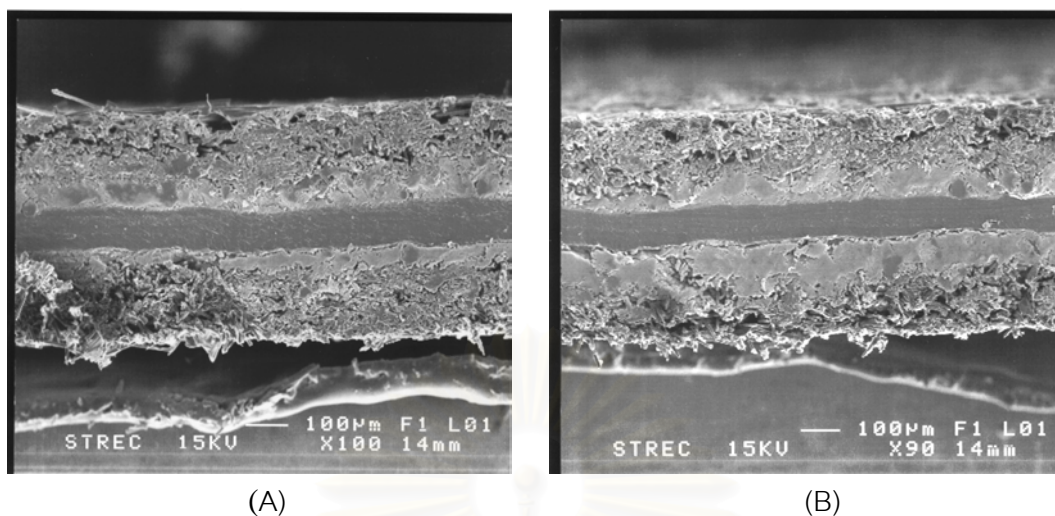
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของการประกอบ MEA ที่ภาวะที่ดีที่สุดของทั้ง 2 วิธี

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการหาภาวะที่เหมาะสมทั้ง 2 วิธี

ตัวแปร	วิธีเปลี่ยนค่าตัวแปร	วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง	ผลแตกต่างของ 2 วิธี (%)
ความดัน (kg/cm ²)	70	65	7.14
อุณหภูมิ (°C)	140	137	2.14
เวลาที่ใช้อัด (นาท)	5	5.5	10.00

4.6 ลักษณะการสัมผัสกันของเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า

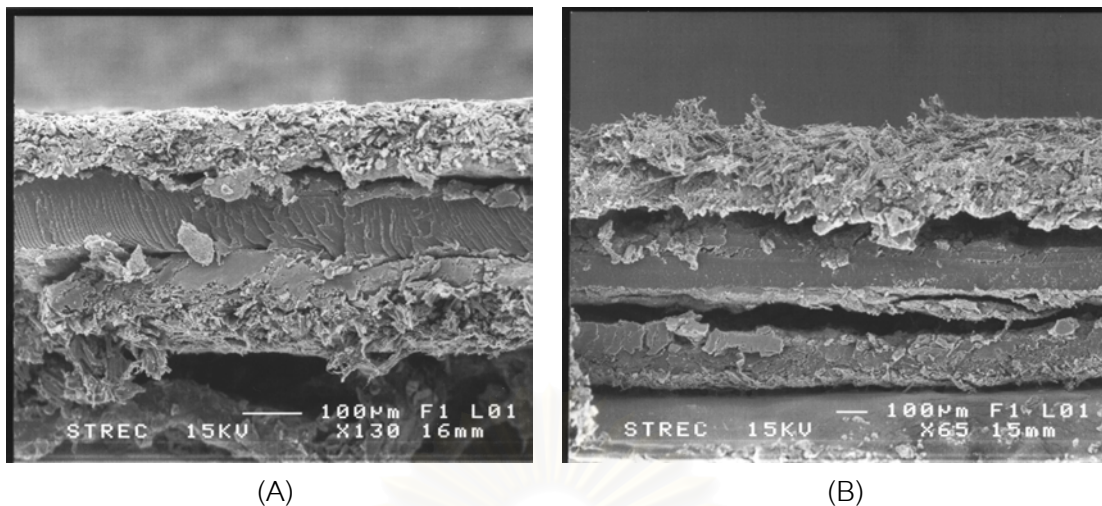
การสัมผัสกันที่ดีระหว่างเยื่อแผ่นกับขั้วไฟฟ้าหลังจากทำการประกอบเป็นหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (MEA) จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าเป็นไปได้ด้วยดีทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการมีค่าความต้านทานในการสัมผัสน้อย โดยในการจะดูลักษณะการยึดติดกันของเยื่อแผ่นกับขั้วไฟฟ้าจะนำเอาแผ่น MEA ที่ได้ก็นำไปส่องดูด้วยเครื่อง SEM ผลการศึกษาลักษณะของการติดกันของเยื่อแผ่นกับขั้วไฟฟ้าที่ดีของการประกอบ MEA ที่ภาวะความดัน 70 kg/cm² อุณหภูมิ 150 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 5 นาที และที่ภาวะความดัน 65 kg/cm² อุณหภูมิ 137 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 5.5 นาที แสดงดังรูปที่ 4.32 (A) และ 4.32 (B) ตามลำดับ



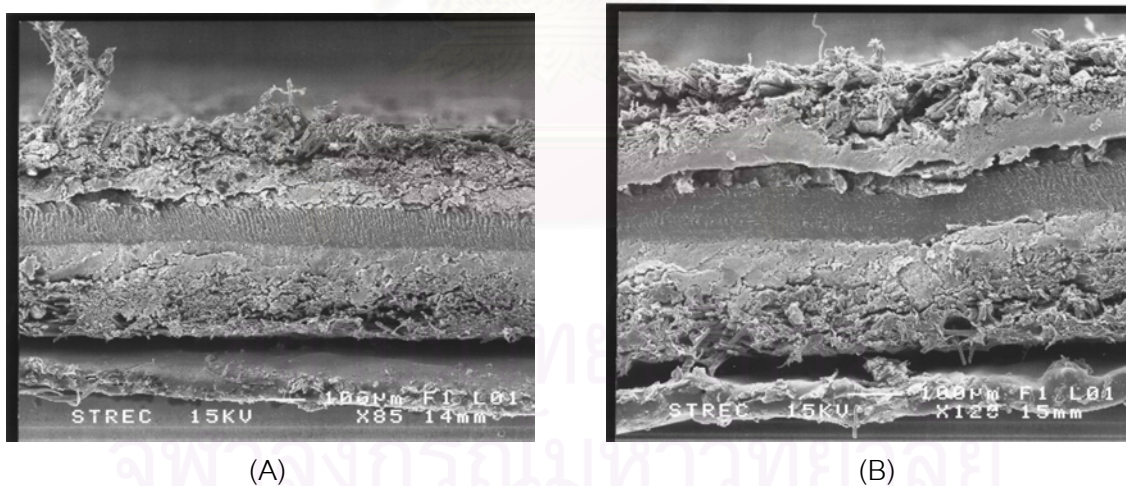
รูปที่ 4.32 ลักษณะการยึดติดกันของขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นที่ดีของแผ่น MEA ที่ประกอบขึ้นจาก ภาวะที่ให้สมรรถนะการทำงานดีที่สุด (A) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 70 kg/cm² อุณหภูมิ 150 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 5 นาที (B) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะ ความดัน 65 kg/cm² อุณหภูมิ 137 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 5.5 นาที

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.32 (A) และ (B) จะเห็นว่าขั้วไฟฟ้าและเยื่อแผ่นสามารถยึดติดกันได้อย่างดี มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้ภาวะการ ประกอบ MEA คือ ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดที่เหมาะสม ส่งผลให้ค่าความต้านทานในการสัมผัสมีค่าน้อยทำให้เกิดตั้งต้นสามารถผ่านชั้นแก๊สแพร่ของขั้วไฟฟ้าเข้าไปทำปฏิกิริยา ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้นและเยื่อแผ่นสามารถถ่ายโอนโปรตอนได้ดี ทำให้การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าเป็นไปได้ด้วยดีเป็นผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น โดยภาวะทั้งสองให้ค่า กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.31 และ 0.38 วัตต์ ตามลำดับ

ส่วนการยึดติดกันที่ไม่ดีของแผ่น MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 90 kg/cm² อุณหภูมิ 150 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 1 นาที และที่ภาวะความดัน 100 kg/cm² อุณหภูมิ 130 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 1 นาที และที่ภาวะที่ภาวะความดัน 55 kg/cm² อุณหภูมิ 144 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 10 นาที (ขั้นที่ 5) และที่ภาวะความดัน 50 kg/cm² อุณหภูมิ 148 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 12 นาที (ขั้นที่ 6) จะแสดงดังรูปที่ 4.33 (A), 4.33 (B), 4.34 (A) และ 4.34 (B) ตามลำดับ



รูปที่ 4.33 ลักษณะการยึดติดกันของขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นที่ไม่ดีของแผ่น MEA ที่ประกอบขึ้นจากภาวะที่ให้สมรรถนะการทำงานต่ำที่สุดของวิธีเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร (A) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 90 kg/cm² อุณหภูมิ 150 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 1 นาที (B) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 100 kg/cm² อุณหภูมิ 130 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 1 นาที



รูปที่ 4.34 ลักษณะการยึดติดกันของขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นที่ไม่ดีของแผ่น MEA ที่ประกอบขึ้นจากภาวะที่ให้สมรรถนะการทำงานต่ำที่สุดของวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (A) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 55 kg/cm² อุณหภูมิ 144 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 10 นาที (ขั้นที่ 5) (B) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 50 kg/cm² อุณหภูมิ 148 °C เวลาที่ใช้ในการอัด 12 นาที (ขั้นที่ 6)

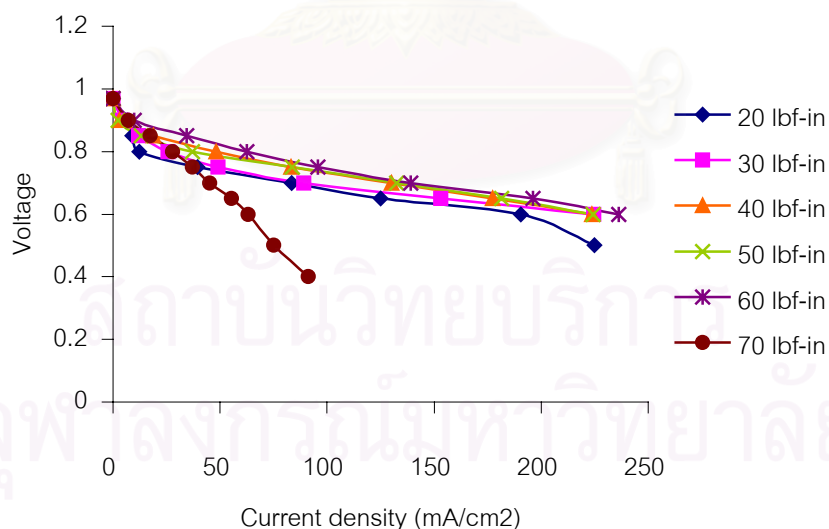
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.33 และ 4.34 จะเห็นว่าขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นนั้นยึดติดกันได้ไม่ค่อยดี จะสังเกตเห็นว่ายังมีช่องว่างอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่น แสดงว่ายังไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากภาวะที่ใช้ในการประกอบ MEA คือ ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดที่น้อยเกินไปทำให้ขั้วไฟฟ้ายึดติดกับเยื่อแผ่นไม่ดี ส่งผลให้เมื่อแก๊สตั้งต้นผ่านไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว ไม่สามารถส่งผ่านโปรตอนไปยังเยื่อแผ่นเพื่อให้นำไปยังอีกด้านของขั้วไฟฟ้าได้ ทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าเกิดได้ไม่สมบูรณ์ เซลล์เชื้อเพลิงจึงมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นจึงผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้น้อย

4.7 ผลของโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์

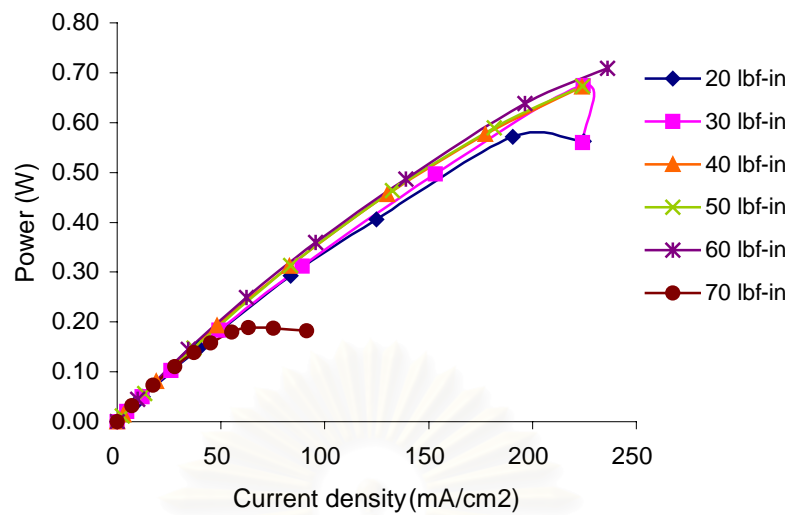
การศึกษาถึงผลของโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์โดยใช้ MEA ที่ซื้อมาจากบริษัท ElectroChem Ltd. ขนาด 5 ตารางเซนติเมตร และใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 100 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm แก๊สทั้งสองชนิดผ่านระบบให้ความชื้นก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง โดยมีค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60°C และความดันบรรยากาศ โดยโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์จะมีค่าตั้งแต่ 20 ถึง 70 ปอนด์แรง-นิ้ว ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.35 และ 4.36 ลักษณะของกราฟโพลาริเซชันที่ได้ในช่วงโพลาริเซชันทางเคมี จากผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์ พบว่าโพลาริเซชันทางเคมีจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์มีผลต่อโพลาริเซชันทางเคมีด้วย

ในช่วงโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานของขั้วไฟฟ้าและสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์แตกต่างกัน จะพบว่ามีเกิดการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานของสารอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน สังเกตได้จากความชันของกราฟที่ได้ โดยที่เมื่อโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นไปจนถึง 60 ปอนด์แรง-นิ้ว จะเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานของสารอิเล็กโทรไลต์ลดลง ในรูปที่ 4.35 ที่ค่าความต่างศักย์ที่ 0.7 โวลต์ ที่โมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์เท่ากับ 20 ปอนด์แรง-นิ้ว ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 84 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.29 วัตต์ และมีค่าความชันเท่ากับ 0.0083 กิโลโอห์ม-ตารางเซนติเมตร และเมื่อเพิ่มค่าโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์เป็น 30, 40, 50 และ 60 ปอนด์แรง-นิ้ว ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเป็น 89, 130, 133 และ 139 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ได้ค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.31, 0.45, 0.46

และ 0.49 วัตต์ และมีค่าความชันเท่ากับ 0.008, 0.0054, 0.0053 และ 0.005 กิโลโหมม-ตารางเซนติเมตรตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์จาก 20 เป็น 60 ปอนด์แรง-นิ้ว ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.29 วัตต์เป็น 0.49 วัตต์ (เพิ่มขึ้นร้อยละ 69) ค่าความชันมีค่าลดลงจาก 0.0083 กิโลโหมม-ตารางเซนติเมตรเป็น 0.005 กิโลโหมม-ตารางเซนติเมตร แสดงว่าโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานของสารอิเล็กโทรไลต์จะมีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์เป็น 70 ปอนด์แรง-นิ้ว ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงเหลือประมาณ 45 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.16 วัตต์ (ลดลงถึงร้อยละ 45) และค่าความชันมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.016 กิโลโหมม-ตารางเซนติเมตร ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่ค่าโมเมนต์การหมุนในการอัดมากขึ้น ค่าความต้านทานสัมผัสระหว่าง MEA กับแผ่นช่องทางการไหลของแก๊ส 2 อันมีค่าน้อยลง แต่ที่ค่าโมเมนต์การหมุนสูงมากเกินไปเกินกว่า 60 ปอนด์แรง-นิ้ว อาจทำให้ขั้วไฟฟ้าของ MEA มีความพรุนลดลงในบริเวณที่สัมผัสกับแผ่นช่องทางการไหลของแก๊ส ทำให้แก๊สแพร่ผ่านขั้วไฟฟ้าไปได้ลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าก็ลดลงไปด้วย ดังนั้นแสดงว่าค่าโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์ที่เหมาะสมและให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุด คือ ที่โมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์เท่ากับ 60 ปอนด์แรง-นิ้ว

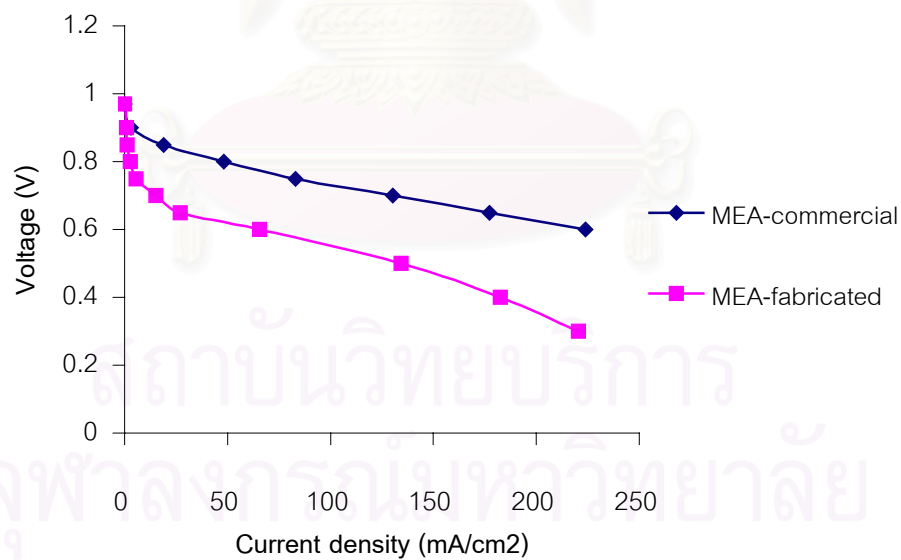


รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของ MEA-commercial ขนาด 5 cm^2 ที่โมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์ต่าง ๆ กัน

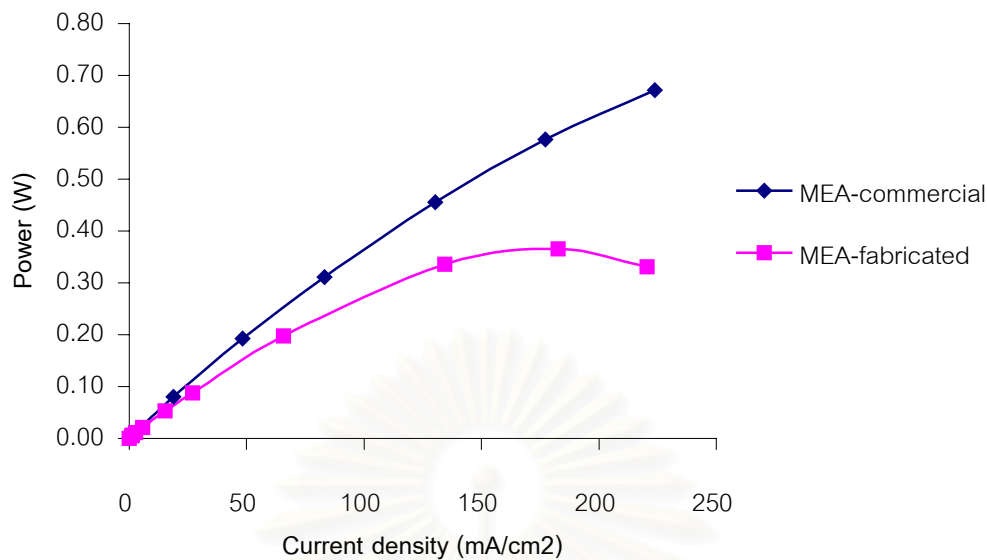


รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของ MEA-commercial ขนาด 5 cm² ที่โมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์แตกต่างกัน

จากงานวิจัยที่ได้ทำมาเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ MEA-commercial พบว่ายังได้ประสิทธิภาพไม่เท่ากับ MEA-commercial แสดงในรูปที่ 4.37 และ 4.38



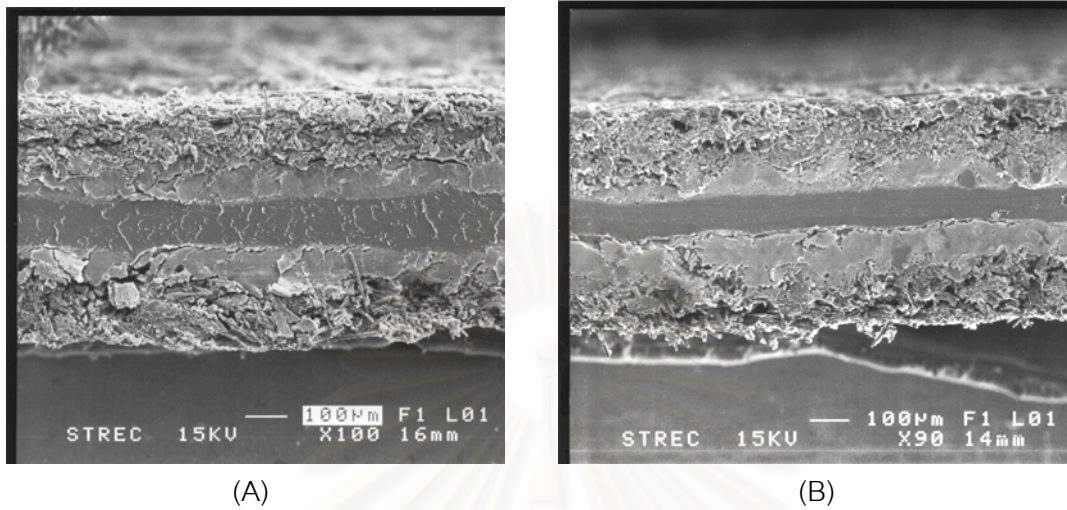
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของ MEA-commercial ขนาด 5 cm² เปรียบเทียบกับ MEA ที่ประกอบขึ้นเองโดยใช้ภาวะที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของ MEA-commercial ขนาด 5 cm² เปรียบเทียบกับ MEA ที่ประกอบขึ้นเองโดยใช้ภาวะที่ดีที่สุด

จากรูปที่ 4.37 และ 4.38 จะเห็นว่าสมรรถนะการทำงานของ MEA ที่เตรียมขึ้นเองเปรียบเทียบกับ MEA-commercial ยังให้สมรรถนะการทำงานที่ด้อยกว่า MEA-commercial โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์เดียวกัน และค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ประกอบด้วย MEA ที่เตรียมขึ้นเองนั้นให้ค่าที่น้อยกว่า MEA-commercial เช่น ที่ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0.7 โวลต์ MEA-commercial จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 220 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.70 วัตต์ ในขณะที่ MEA ที่เตรียมขึ้นเองให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพียง 30 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.38 วัตต์ ถ้าสังเกตจากกราฟจะเห็นว่าในช่วงของการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีของ MEA ที่เตรียมเองนั้นยังมีค่ามาก แสดงว่าอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาตรงบริเวณที่ผิวของขั้วไฟฟ้ายังเกิดขึ้นได้ไม่ดี ที่เป็นเช่นนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากขั้นตอนการประกอบ MEA ในบางขั้นตอน เช่น ขั้นตอนการปรับปรุงสภาพของเยื่อแผ่น อาจจะใช้สารเคมีต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นที่ยังไม่เหมาะสมทำให้เยื่อแผ่นยังมีความสามารถในการนำโปรตอนที่ไม่ดี หรืออาจจะเป็นในส่วนของขั้นตอนการประกอบ MEA ในขั้นตอนที่ทาสารละลาย Nafion solution โดยใช้วิธีการ brushing นั้น ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา ในที่นี้คือ แพลทินัมหลุดออกจากกระดาษคาร์บอน ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณลดลง พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาจึงลดลง การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าจึงลดลงไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพ

ภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาการยึดติดกันของขั้วไฟฟ้าและเยื่อแผ่นของ MEA-commercial กับ MEA ที่ได้ประกอบขึ้นเอง แสดงดังรูปที่ 4.39 (A) และ (B)



รูปที่ 4.39 ลักษณะการยึดติดกันของขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นของแผ่น MEA-commercial เปรียบเทียบกับ MEA ที่ประกอบขึ้นเอง (A) MEA-commercial (B) MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะความดัน 65 kg/cm² อุณหภูมิ 137°C เวลาที่ใช้ในการอัด 5.5 นาที

ผลที่ได้จะเห็นว่า MEA-commercial และ MEA ที่ประกอบขึ้นเองนั้นมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ ขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นสามารถยึดติดกันได้ดี มีความเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงว่าวิธีการประกอบ MEA ที่ใช้ในงานวิจัยสามารถใช้ได้ แต่เหตุที่เมื่อนำ MEA ที่ประกอบขึ้นเองไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแล้วยังให้ประสิทธิภาพการทำงานที่น้อยกว่า MEA-commercial โดยเฉพาะในช่วงโพลารไรเซชันทางเคมี ซึ่งอาจเนื่องมาจากการสูญเสียปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนการประกอบ MEA ที่ใช้การทาสารละลาย Nafion solution

จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบความหนาของ MEA-commercial กับ MEA ที่ทำการประกอบขึ้นเอง แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความหนาของ MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ MEA-commercial

MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะ ความดัน, อุณหภูมิ, เวลา (kg/cm ² , °C, นาที)	ความหนา (มิลลิเมตร)		
	การทดลองที่		เฉลี่ย
	1	2	
70, 150, 5	0.50	0.49	0.495
65, 137, 5.5	0.46	0.47	0.465
50, 148, 12	0.53	0.54	0.535
55, 144, 10	0.55	0.57	0.56
70, 134, 3	0.50	0.50	0.50
75, 130, 1	0.54	0.56	0.55
75, 140, 3	0.49	0.48	0.485
90, 140, 3	0.50	0.49	0.495
50, 130, 1	0.80	0.82	0.81
100, 130, 1	0.66	0.68	0.67
MEA-commercial	0.51	0.53	0.52

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าในการประกอบ MEA เมื่อใช้ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดที่มีค่าน้อย MEA ที่ได้จะมีความหนามาก แสดงว่าขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นนั้นยังยึดติดกันได้ไม่ค่อยดี แต่เมื่อเพิ่มค่าความดันขึ้นไป ความหนาของ MEA มีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่าขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นนั้นสามารถยึดติดกันได้ดีขึ้น และในส่วนของ MEA ที่ประกอบขึ้นจากภาวะความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดที่ค่าสูงขึ้นไป พบว่าความหนาที่ได้จะไม่แตกต่างกันมากนัก คือ ที่ 0.50 มิลลิเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับ MEA-commercial จะเห็นว่ามีความหนาที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าการประกอบ MEA ตามวิธีที่ได้ทำมามีความถูกต้องแล้ว

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าในงานวิจัยนี้ยังให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้น้อยกว่างานวิจัยที่ผ่านมา ทั้งนี้เนื่องมาจากส่วนต่าง ๆ เช่น ขั้วไฟฟ้ามีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน รวมไปถึงใช้เยื่อแผ่นต่างชนิดกันและขนาดพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยานั้นก็ไม่เท่ากันด้วย

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัย	ขั้วไฟฟ้า	เมมเบรน	ภาวะที่ใช้ในการประกอบ MEA	Power _{max} (W/cm ²)
lyuke และคณะ (2003)	เตรียมจาก Pt/C 70% โดยน้ำหนัก และเทฟลอน (Teflon) 30 % โดยน้ำหนักและมีปริมาณ Pt ที่แตกต่างกัน	Nafion 117 membrane ขนาดของพื้นที่ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 25 ตารางเซนติเมตร	ความดันเท่ากับ 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 120 °C และเวลาเท่ากับ 90 วินาที	0.024
Gamburzev และคณะ (2002)	เตรียมจาก Pt/C 20% โดยน้ำหนัก และเทฟลอน (Teflon) 35 % โดยน้ำหนักและมีปริมาณ Pt อยู่ 0.05 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และใช้ GDL ที่แตกต่างกัน	Nafion membrane ที่แตกต่างกัน ขนาดของพื้นที่ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 50 ตารางเซนติเมตร	ความดันเท่ากับ 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 155 °C และเวลาเท่ากับ 5 นาที	0.42

งานวิจัย	ขั้วไฟฟ้า	เมมเบรน	ภาวะที่ใช้ในการประกอบ MEA	Power _{max} (W/cm ²)
Wang และคณะ (2004)	ใช้กระดาษคาร์บอน (carbon paper) ที่มีปริมาณของ fluorinated ethylene propylene (FEP) ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10-30 % โดยน้ำหนัก และใช้ Pt/C 20 % โดยน้ำหนัก	Nafion 112 membrane ขนาดของพื้นที่ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 25 ตารางเซนติเมตร	ความดันเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 125 °C และเวลาเท่ากับ 3 นาที	0.70
งานวิจัยนี้	เตรียมจาก Pt/C 20% โดยน้ำหนัก และเทฟลอน (Teflon) 60 % โดยน้ำหนักและมีปริมาณ Pt อยู่ 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร	Nafion 115 membrane ขนาดของพื้นที่ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 5 ตารางเซนติเมตร	ความดันเท่ากับ 65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 137 °C และเวลาเท่ากับ 5.5 นาที	0.08

สรุปข้อเสียของการประกอบ MEA ตามวิธีที่ได้ทำงานวิจัยนี้พบว่า MEA ยังให้สมรรถนะการทำงานไม่ดี ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมีสาเหตุมาจากขั้นตอนการประกอบ MEA ในบางขั้นตอน เช่น ขั้นตอนการปรับปรุงสภาพของเยื่อแผ่น อาจจะใช้สารเคมีต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นที่ยังไม่เหมาะสม ทำให้เยื่อแผ่นยังมีความสามารถในการนำโปรตอนที่ไม่ดี หรืออาจจะเป็นในส่วนของ การประกอบ MEA ในขั้นตอนที่ทาสารละลาย Nafion solution 5 % โดยใช้วิธีการ brushing นั้น ทำให้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยา ในที่นี้คือ แพลทินัมหลุดออกจากกระดาษคาร์บอน ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณลดลง พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาจึงลดลง การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าจึงเกิดขึ้นได้น้อย ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าลดลงไปด้วย ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาและวิจัยถึงวิธีแก้ไขปัญหานี้เพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 การประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด

จากการศึกษาถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (MEA) ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการอัด และหาภาวะที่เหมาะสมในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด รวมไปถึงความดันที่ใช้ในการประกอบเซลล์ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนด้วย ซึ่งในการทดลองจะออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^n แฟกทอเรียล (2^n factorial design) โดยจะมี 3 ตัวแปรตั้งที่กล่าวมาข้างต้น โดยความดันจะมีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 50 และ 100 kg/cm² ตามลำดับ อุณหภูมิจะมีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 130 และ 150 °C ตามลำดับและเวลาที่ใช้ในการอัดจะมีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 1 และ 5 นาทีตามลำดับ และจากผลการทดลองในการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าตัวแปรที่มีผลในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดนี้ คือ ความดัน อุณหภูมิ สหสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอุณหภูมิและสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอัด และพบว่าภาวะในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด เมื่อความดันมีค่าลดลงในขณะที่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์เดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น และในการหาภาวะที่เหมาะสมในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดนี้จะใช้วิธีการหา 2 วิธี คือ วิธีการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ และวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง โดยวิธีแรกจะได้ภาวะที่เหมาะสม คือ ที่ความดันเท่ากับ 70 kg/cm² อุณหภูมิ 140 °C และเวลาที่ใช้ในการอัดเท่ากับ 5 นาที ในขณะที่วิธีพื้นผิวผลตอบสนองจะได้ภาวะที่เหมาะสม คือ ที่ความดันเท่ากับ 65 kg/cm² อุณหภูมิ 137 °C และเวลาที่ใช้ในการอัดเท่ากับ 5.5 นาที ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่ได้ของทั้ง 2 วิธีจะแตกต่างกันไม่มากนัก โดยค่าความดันจะแตกต่างกันอยู่ 7.14 % อุณหภูมิจะแตกต่างกันอยู่ 2.14 % และเวลาที่ใช้ในการอัดจะแตกต่างกันอยู่ 10 % แต่ถ้าจะพิจารณาถึงความถูกต้องแล้ว วิธีพื้นผิวผลตอบสนองจะให้ผลที่ถูกต้องกว่า เพราะวิธีการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ นั้นจะเป็นการเปลี่ยนค่าตัวแปรหนึ่ง โดยให้ตัวแปรอีก 2 ตัวคงที่นั้น อาจจะไม่ใช่วิธีการที่ถูกต้อง โดยผลที่ได้นี้อาจจะมาจากผลของสหสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสาม ทำให้ค่าที่ได้นี้อาจจะไม่ใช่ว่าที่ถูกต้อง หลังจากทำการหาภาวะที่เหมาะสมในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดแล้ว ได้นำ MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์เดียวกันสูงที่สุด กับแผ่น MEA ที่ประกอบขึ้นที่ภาวะที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่า

ความต่างศักย์เดียวกัน มาพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของการยึดติดกันของเยื่อแผ่นกับขั้วไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ผลที่ได้พบว่าเมื่อทำการประกอบ MEA ที่ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดที่เหมาะสมขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นจะมีการยึดติดกันดี ไม่มีช่องว่างระหว่างเยื่อแผ่นกับขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการนำโปรตอนและอิเล็กตรอนที่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น ในขณะที่ถ้าทำการประกอบ MEA ที่ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอัดที่ไม่เหมาะสม จะสังเกตได้ว่าขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นยึดติดกันไม่ได้ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำ จากผลการทดลองดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าภาวะที่ใช้ในการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (MEA) นี้มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง จากนั้นจึงทำการหาค่าโมเมนต์การหมุนที่เหมาะสมที่ใช้ในการประกอบเซลล์เชื้อเพลิง โดยได้ทำการเปลี่ยนค่าโมเมนต์การหมุนตั้งแต่ 20 ถึง 70 ปอนด์แรง-นิ้ว พบว่าเมื่อใช้โมเมนต์การหมุนในการประกอบเซลล์เท่ากับ 60 ปอนด์แรง-นิ้วจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์เดียวกันสูงสุด ดังนั้นโมเมนต์การหมุนที่เหมาะสมในการประกอบเซลล์เชื้อเพลิง คือ ที่โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 60 ปอนด์แรง-นิ้ว และสุดท้ายได้ทำการเปรียบเทียบ MEA ที่ประกอบขึ้นเองกับ MEA-commercial พบว่ายังให้ประสิทธิภาพการทำงานที่น้อยกว่า MEA-commercial อยู่มาก ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาและวิจัยถึงวิธีแก้ไขปัญหานี้เพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่น ในการใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกรดซัลฟูริกนั้น ความเข้มข้นของสารทั้งสองที่ใช้อาจจะไม่ใช่ความเข้มข้นที่ทำให้เยื่อแผ่นมีความสามารถในการนำโปรตอนที่ดีที่สุด จึงควรทำการค้นคว้าวิจัยต่อไป
2. ในการทาสารละลาย Nafion 5 % ลงไปบนขั้วไฟฟ้าโดยวิธี brushing นั้นมีข้อเสีย คือ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนขั้วไฟฟ้าหลุดติดมากับอุปกรณ์ที่ใช้ทาด้วย ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จึงไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงควรคิดค้นหาวิธีอื่นที่จะแก้ไขปัญหานี้ในโอกาสต่อไป
3. ในการประกอบ MEA ในขั้นตอนการทาสารละลาย Nafion 5 % ที่ขั้วไฟฟ้านั้นเนื่องจากสารละลายนี้จะระเหยเร็ว ดังนั้นเมื่อทาสารละลายนี้ลงบนขั้วไฟฟ้าแล้วต้องทำการประกบกับเยื่อแผ่นให้เร็วที่สุดเพื่อให้ทั้ง 2 ส่วนนี้ยึดติดกันได้ดี
4. เมื่อทำการทดลองเสร็จครั้งหนึ่ง หลังจากแกะเซลล์ออกมาแล้ว ที่ช่องทางไหลของแก๊ส ควรจะเข้ดน้ำออกให้แห้ง เพื่อป้องกันการเกิดน้ำท่วมเซลล์ที่จะทำในการทดลองต่อไป

รายการอ้างอิง

- ทรงวุฒิ นิรัญศิริ, การสร้างชั้นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.
- ปารเมศ ชุตินา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- พัฒน์พงษ์ สงวนรักษา, การออกแบบหน่วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- สุกัญญา ทองคำ, ผลของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
- วิทยา เรืองพรวิสุทธิ, คะตะไลซิสแบบเฮเทอโรจีเนียส – หลักทฤษฎีและการประยุกต์, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- Antolini, E., Giorgi, L., Pozio, A., and Passalacqua, E., Influence of Nafion loading in the catalyst layer of gas-diffusion electrode for PEFC, Journal of Power Sources 77 (1999): 136-142.
- Appleby, A.J., and Foulkes, F.R. Fuel cell handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- Cha, S.W., Lee, S.J., Prinz, F.B., A sharp peak in the performance of sputtered platinum fuel cells at ultra-low platinum loading, Journal of Power Sources 109 (2002): 483-493.
- Cha, S.Y., Lee, W.M., Performance of proton exchange membrane fuel cell electrodes prepared by direct decomposition of ultrathin platinum on the membrane surface, Journal of Electrochemistry Society 146 (1999): 4055-4060.

- Giorgi, L., Antolini, E., Pozio, A., and Passalacqua, E., Influence of the PTFE content in the diffusion layer of low-Pt loading electrodes for polymer electrolyte fuel cells, Electrochimica Acta 43 (1998): 3675-3680.
- Grot, W.G., US Patent, 5,547,911 (1996).
- Hulett, J.S., US Patent, 6,074,692 (2000).
- Kordesch, K., and Simader, G. Fuel cell and their applications. New York: VCH Publishers, 1996.
- Kumar, G.S., Raja, M., and Parthasarathy, S., High performance electrodes with very low platinum loading for polymer electrolyte fuel cells, Electrochimica Acta 40 (1995): 285-290.
- Larminie, J., and Simader, G. Fuel cell systems explained. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.
- Litster, S., and McLean, G., PEM fuel cell electrode, Journal of Power Sources 130 (2004): 61-76.
- Mennola, T. Design and experimental characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells, Master's Thesis, Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University of Technology, 2000.
- Mikkola, M. Modification to A PEM Fuel Cell Stack, Special assignment, Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University of Technology, 2000.
- Montgomery, D.C. Design and analysis of experiments. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- Norbeck, M., Heffel, J.W., Durbin, T.D., Tabbara, B., Bosden, J.M. and Montano, M.C., Hydrogen Fuel for Surface Transportation, Society of Automotive Engineers, Inc., 1996.
- Pozio, A., Giorgi, L., De Francesco, M., Silva, R.F., Lo Presti, R., and Danzi, A. Membrane Electrode Gasket Assembly (MEGA) technology for polymer electrolyte fuel cells, Journal of Power Sources 112 (2002): 491-496.
- Srinivasan, S. and et al. Fuel cell system. New York: Plenum Press, 1993.

- Terrance, W. Dynamic Electrochemistry Transport, and Mechanistic Insight, Proceedings of the Fuel Cell Technology Workshop, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2000.
- Wang, C.Y., Lim, C., Effects of hydrophobic polymer content in GDL on power performance of a PEM fuel cell, Electrochimica Acta 49 (2004): 4149-4156.
- Wilson, M.S. and Gottesfeld, S. Thin-film catalyst layers for polymer electrolyte fuel cell electrodes, Journal of Applied Electrochemistry 22 (1992): 1-7.
- Wolf Vielstich, Hubert A. Gasteiger, Arnold Lamm. Handbook of fuel cells-Fundamentals, Technology and Applications, Vol. 2: Fuel cell technology and applications, New York: John Wiley & Sons LTD., 2003.
- Wolf Vielstich, Hubert A. Gasteiger, Arnold Lamm. Handbook of fuel cells-Fundamentals, Technology and Applications, Vol. 3: Fuel cell technology and applications, New York: John Wiley & Sons LTD., 2003.
- Zawodzinski, T.A., Gottesfeld, S., Springer, T.E. and Uribe, F. Characterization of polymer electrolytes for fuel cell applications, Solid State Ionics 60 (1993): 199-211.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง (Experimental Design)

พิจารณาที่ค่าความต่างศักย์ 0.4 โวลต์

Run	A	B	C	Current density (mA/cm ²)	
				Rep.1	Rep.2
[1]	-1	-1	-1	151.21	105.26
a	1	-1	-1	56.08	82.07
b	-1	1	-1	169.54	168.83
ab	1	1	-1	206.33	213.09
c	-1	-1	1	198.32	220.33
ac	1	-1	1	138.62	182.04
bc	-1	1	1	123.00	106.17
abc	1	1	1	142.36	96.24
Center1	0	0	0	124.13	158.22
Center2	0	0	0	124.13	158.22
Center3	0	0	0	124.13	158.22

โดยที่ A = Pressure , B = Temperature , C = Time of compression

ตารางที่ ก.2 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงความดัน) ครั้งที่ 1

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (V)	Pressure = 50 kg/cm ²			Pressure = 60 kg/cm ²			Pressure = 70 kg/cm ²			Pressure = 80 kg/cm ²			Pressure = 90 kg/cm ²			Pressure = 100 kg/cm ²		
	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	0.0016	0.32	0.0014	0.0028	0.55	0.0025	0.0046	0.92	0.0041	0.0037	0.74	0.0033	6E-04	0.12	0.0005	6E-03	1.14	0.0051
0.85	0.0053	1.06	0.0045	0.0095	1.89	0.0080	0.0114	2.28	0.0097	0.0104	2.08	0.0088	0.0021	0.41	0.0017	1E-02	2.22	0.0094
0.8	0.0168	3.35	0.0134	0.0209	4.17	0.0167	0.023	4.60	0.0184	0.0183	3.66	0.0146	0.005	0.99	0.0040	2E-02	4.95	0.0198
0.75	0.04	7.99	0.0300	0.0382	7.63	0.0286	0.0587	11.73	0.0440	0.0481	9.61	0.0360	0.0108	2.16	0.0081	6E-02	11.97	0.0449
0.7	0.0781	15.61	0.0546	0.0582	11.63	0.0407	0.0942	18.84	0.0659	0.0838	16.75	0.0586	0.0213	4.25	0.0149	1E-01	19.77	0.0692
0.65	0.1373	27.46	0.0892	0.1292	25.83	0.0839	0.1577	31.53	0.1025	0.1148	22.95	0.0746	0.0704	14.07	0.0457	1E-01	29.83	0.0969
0.6	0.2106	42.12	0.1264	0.2392	47.83	0.1435	0.2694	53.88	0.1616	0.1998	39.96	0.1199	0.1249	24.97	0.0749	2E-01	40.20	0.1206
0.5	0.3935	78.70	0.1968	0.4054	81.08	0.2027	0.4637	92.74	0.2319	0.3726	74.52	0.1863	0.2602	52.04	0.1301	3E-01	67.89	0.1697
0.4	0.6066	121.32	0.2426	0.596	119.20	0.2384	0.7284	145.68	0.2914	0.6408	128.16	0.2563	0.4586	91.72	0.1834	7E-01	131.47	0.2629
0.3	0.8277	165.54	0.2483	0.8199	163.98	0.2460	1.0145	202.90	0.3044	0.8889	177.78	0.2667	0.6314	126.28	0.1894	1E+00	200.10	0.3002
0.2	1.1066	221.32	0.2213	1.1202	224.04	0.2240				1.1154	223.07	0.2231	0.8875	177.50	0.1775			
0.1													1.0852	217.03	0.1085			

ตารางที่ ก.3 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงความดัน) ครั้งที่2

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (V)	Pressure = 50 kg/cm ²			Pressure = 60 kg/cm ²			Pressure = 70 kg/cm ²			Pressure = 80 kg/cm ²			Pressure = 90 kg/cm ²			Pressure = 100 kg/cm ²		
	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	0.001	0.26	0.0012	0.0021	0.42	0.0019	0.0046	0.91	0.0041	0.0046	0.92	0.0041	3E-03	0.53	0.0024	9E-03	1.72	0.0077
0.85	0.004	0.86	0.0037	0.008	1.59	0.0068	0.0123	2.45	0.0104	0.0114	2.28	0.0097	0.0064	1.27	0.0054	2E-02	4.89	0.0208
0.8	0.013	2.69	0.0108	0.0234	4.68	0.0187	0.0315	6.30	0.0252	0.023	4.60	0.0184	0.012	2.40	0.0096	6E-02	11.65	0.0466
0.75	0.037	7.41	0.0278	0.0569	11.38	0.0427	0.0678	13.56	0.0509	0.0587	11.73	0.0440	0.018	3.60	0.0135	1E-01	20.27	0.0760
0.7	0.079	15.71	0.0550	0.1113	22.26	0.0779	0.1197	23.94	0.0838	0.0942	18.84	0.0659	0.0672	13.44	0.0470	1E-01	28.05	0.0982
0.65	0.135	26.97	0.0877	0.1831	36.62	0.1190	0.1853	37.05	0.1204	0.1577	31.53	0.1025	0.1272	25.43	0.0826	3E-01	50.35	0.1636
0.6	0.202	40.41	0.1212	0.2674	53.48	0.1604	0.2778	55.56	0.1667	0.2694	53.88	0.1616	0.1841	36.82	0.1105	4E-01	71.10	0.2133
0.5	0.378	75.69	0.1892	0.4682	93.63	0.2341	0.5518	110.35	0.2759	0.4637	92.74	0.2319	0.3907	78.13	0.1953	6E-01	113.18	0.2830
0.4	0.608	121.51	0.2430	0.7017	140.34	0.2807	0.7975	159.50	0.3190	0.7284	145.68	0.2914	0.6127	122.54	0.2451	8E-01	160.80	0.3216
0.3	0.85	170.02	0.2550	0.9739	194.77	0.2922	1.0654	213.07	0.3196	1.0145	202.90	0.3044	0.8464	169.28	0.2539	1E+00	206.91	0.3104
0.2	1.113	222.66	0.2227	1.1157	223.13	0.2231	1.1142	222.83	0.2228				1.1218	224.35	0.2244			
0.1																		

ตารางที่ ก.4 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงความดัน) เฉลี่ย

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (V)	Pressure = 50 kg/cm ²			Pressure = 60 kg/cm ²			Pressure = 70 kg/cm ²			Pressure = 80 kg/cm ²			Pressure = 90 kg/cm ²			Pressure = 100 kg/cm ²		
	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	0	0.29	0.0000	0.002	0.49	0.0022	0.005	0.92	0.0041	0.004	0.83	0.0037	2E-03	0.33	0.0015	6E-03	1.43	0.0064
0.85	0.005	0.96	0.0041	0.009	1.74	0.0074	0.012	2.37	0.0101	0.011	2.18	0.0093	0.004	0.84	0.0036	2E-02	3.56	0.0151
0.8	0.015	3.02	0.0121	0.022	4.43	0.0177	0.027	5.45	0.0218	0.021	4.13	0.0165	0.008	1.70	0.0068	4E-02	8.30	0.0332
0.75	0.039	7.70	0.0289	0.048	9.51	0.0356	0.063	12.65	0.0474	0.053	10.67	0.0400	0.014	2.88	0.0108	8E-02	16.12	0.0605
0.7	0.078	15.66	0.0548	0.085	16.95	0.0593	0.107	21.39	0.0749	0.089	17.80	0.0623	0.044	8.85	0.0310	1E-01	23.91	0.0837
0.65	0.136	27.22	0.0884	0.156	31.23	0.1015	0.171	34.29	0.1114	0.136	27.24	0.0885	0.099	19.75	0.0642	2E-01	40.09	0.1303
0.6	0.206	41.27	0.1238	0.253	50.66	0.1520	0.274	54.72	0.1642	0.235	46.92	0.1408	0.154	30.90	0.0927	3E-01	55.65	0.1670
0.5	0.386	77.20	0.1930	0.437	87.36	0.2184	0.508	101.55	0.2539	0.418	83.63	0.2091	0.325	65.09	0.1627	5E-01	90.54	0.2263
0.4	0.607	121.42	0.2428	0.649	129.77	0.2595	0.763	152.59	0.3052	0.685	136.92	0.2738	0.536	107.13	0.2143	7E-01	146.14	0.2923
0.3	0.839	167.78	0.2517	0.897	179.38	0.2691	1.04	207.99	0.3120	0.952	190.34	0.2855	0.739	147.78	0.2217	1E+00	203.51	0.3053
0.2	1.11	221.99	0.2220	1.118	223.59	0.2236							1.005	200.93	0.2009			
0.1																		

ตารางที่ ก.5 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) ครั้งที่ 1

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Hydrogen = 60 °C

Oxygen = 60 °C

Pressure

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (v)	Temperature = 130 °C			Temperature = 135 °C			Temperature = 140 °C			Temperature = 145 °C			Temperature = 150 °C		
	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	0.0006	0.12	0.0005	0.00065	0.13	0.0006	0.00035	0.07	0.0003	0.00135	0.27	0.0012	2E-03	0.33	0.0015
0.85	0.00205	0.41	0.0017	0.00285	0.57	0.0024	0.0021	0.42	0.0018	0.0067	1.34	0.0057	0.00355	0.71	0.0030
0.8	0.00495	0.99	0.0040	0.0062	1.24	0.0050	0.0062	1.24	0.0050	0.0154	3.08	0.0123	0.0067	1.34	0.0054
0.75	0.0108	2.16	0.0081	0.0112	2.24	0.0084	0.0135	2.70	0.0101	0.0303	6.06	0.0227	0.02295	4.59	0.0172
0.7	0.02125	4.25	0.0149	0.0185	3.70	0.0130	0.0325	6.50	0.0228	0.05105	10.21	0.0357	0.0847	16.94	0.0593
0.65	0.07035	14.07	0.0457	0.07065	14.13	0.0459	0.08185	16.37	0.0532	0.10625	21.25	0.0691	0.13885	27.77	0.0903
0.6	0.12485	24.97	0.0749	0.17745	35.49	0.1065	0.13135	26.27	0.0788	0.2036	40.72	0.1222	0.20625	41.25	0.1238
0.5	0.2602	52.04	0.1301	0.33495	66.99	0.1675	0.305	61.00	0.1525	0.3269	65.38	0.1635	0.3869	77.38	0.1935
0.4	0.4586	91.72	0.1834	0.50515	101.03	0.2021	0.5673	113.46	0.2269	0.47825	95.65	0.1913	0.5798	115.96	0.2319
0.3	0.6314	126.28	0.1894	0.6889	137.78	0.2067	0.78005	156.01	0.2340	0.656	131.20	0.1968	0.79375	158.75	0.2381
0.2	0.8875	177.50	0.1775	0.96505	193.01	0.1930	1.0878	217.56	0.2176	0.97765	195.53	0.1955	1.11335	222.67	0.2227
0.1	1.08515	217.03	0.1085	1.10205	220.41	0.1102	1.10875	221.75	0.1109	1.10375	220.75	0.1104			

ตารางที่ ก.6 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) ครั้งที่2

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Hydrogen = 60 °C

Oxygen = 60 °C

Pressure

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (v)	Temperature = 130 °C			Temperature = 135 °C			Temperature = 140 °C			Temperature = 145 °C			Temperature = 150 °C		
	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	0.00265	0.53	0.0024	0.0029	0.58	0.0026	0.0034	0.68	0.0031	0.00245	0.49	0.0022	3E-03	0.69	0.0031
0.85	0.00635	1.27	0.0054	0.006	1.20	0.0051	0.0085	1.70	0.0072	0.0059	1.18	0.0050	0.00695	1.39	0.0059
0.8	0.012	2.40	0.0096	0.0101	2.02	0.0081	0.01995	3.99	0.0160	0.0175	3.50	0.0140	0.01305	2.61	0.0104
0.75	0.018	3.60	0.0135	0.0293	5.86	0.0220	0.05515	11.03	0.0414	0.0376	7.52	0.0282	0.031	6.20	0.0233
0.7	0.0672	13.44	0.0470	0.08785	17.57	0.0615	0.1065	21.30	0.0746	0.06645	13.29	0.0465	0.10945	21.89	0.0766
0.65	0.12715	25.43	0.0826	0.1402	28.04	0.0911	0.1679	33.58	0.1091	0.10345	20.69	0.0672	0.17725	35.45	0.1152
0.6	0.1841	36.82	0.1105	0.1944	38.88	0.1166	0.2413	48.26	0.1448	0.14795	29.59	0.0888	0.25715	51.43	0.1543
0.5	0.39065	78.13	0.1953	0.2913	58.26	0.1457	0.42875	85.75	0.2144	0.257	51.40	0.1285	0.4498	89.96	0.2249
0.4	0.6127	122.54	0.2451	0.3911	78.22	0.1564	0.64135	128.27	0.2565	0.4326	86.52	0.1730	0.67185	134.37	0.2687
0.3	0.8464	169.28	0.2539	0.6355	127.10	0.1907	0.857	171.40	0.2571	0.67395	134.79	0.2022	0.92985	185.97	0.2790
0.2	1.12175	224.35	0.2244	0.90175	180.35	0.1804	1.13165	226.33	0.2263	0.9379	187.58	0.1876	1.12645	225.29	0.2253
0.1	1.11935	223.87	0.1119	1.10085	220.17	0.1101	0.9965	199.30	0.0997	1.0795	215.90	0.1080			

ตารางที่ ก.7 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) เฉลี่ย

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Hydrogen = 60 °C

Oxygen = 60 °C

Pressure

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (v)	Temperature = 130 °C			Temperature = 135 °C			Temperature = 140 °C			Temperature = 145 °C			Temperature = 150 °C		
	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	0.001625	0.33	0.0015	0.001775	0.36	0.0016	0.001875	0.38	0.0017	0.0019	0.38	0.0017	3E-03	0.51	0.0023
0.85	0.0042	0.84	0.0036	0.004425	0.89	0.0038	0.0053	1.06	0.0045	0.0063	1.26	0.0054	0.00525	1.05	0.0045
0.8	0.008475	1.70	0.0068	0.00815	1.63	0.0065	0.013075	2.62	0.0105	0.01645	3.29	0.0132	0.009875	1.98	0.0079
0.75	0.0144	2.88	0.0108	0.02025	4.05	0.0152	0.034325	6.87	0.0257	0.03395	6.79	0.0255	0.026975	5.40	0.0202
0.7	0.044225	8.85	0.0310	0.053175	10.64	0.0372	0.0695	13.90	0.0487	0.05875	11.75	0.0411	0.097075	19.42	0.0680
0.65	0.09875	19.75	0.0642	0.105425	21.09	0.0685	0.124875	24.98	0.0812	0.10485	20.97	0.0682	0.15805	31.61	0.1027
0.6	0.154475	30.90	0.0927	0.185925	37.19	0.1116	0.186325	37.27	0.1118	0.175775	35.16	0.1055	0.2317	46.34	0.1390
0.5	0.325425	65.09	0.1627	0.313125	62.63	0.1566	0.366875	73.38	0.1834	0.29195	58.39	0.1460	0.41835	83.67	0.2092
0.4	0.53565	107.13	0.2143	0.448125	89.63	0.1793	0.604325	120.87	0.2417	0.455425	91.09	0.1822	0.625825	125.17	0.2503
0.3	0.7389	147.78	0.2217	0.6622	132.44	0.1987	0.818525	163.71	0.2456	0.664975	133.00	0.1995	0.8618	172.36	0.2585
0.2	1.004625	200.93	0.2009	0.9334	186.68	0.1867	1.109725	221.95	0.2219	0.957775	191.56	0.1916	1.1199	223.98	0.2240
0.1	1.10225	220.45	0.1102	1.10145	220.29	0.1101	1.052625	210.53	0.1053	1.091625	218.33	0.1092			

ตารางที่ ก.8 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการอัด) ครั้งที่ 1

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (v)	Time of compression = 1 min			Time of compression = 2 min			Time of compression = 3 min			Time of compression = 4 min			Time of compression = 5 min			Time of compression = 6 min		
	I (A)	I (mA/cm2)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm2)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm2)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm2)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm2)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm2)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	4E-04	0.07	0.0003	0.003	0.50	0.0023	0.003	0.51	0.0023	0.005	0.99	0.0045	2E-03	0.37	0.0017	2E-03	0.33	0.0015
0.85	0.002	0.42	0.0018	0.005	0.97	0.0041	0.006	1.11	0.0047	0.009	1.83	0.0078	0.006	1.22	0.0052	0.003	0.55	0.0023
0.8	0.006	1.24	0.0050	0.008	1.62	0.0065	0.018	3.51	0.0140	0.021	4.18	0.0167	0.015	3.02	0.0121	0.011	2.22	0.0089
0.75	0.014	2.70	0.0101	0.028	5.55	0.0208	0.031	6.15	0.0231	0.046	9.27	0.0348	0.041	8.24	0.0309	0.02	4.04	0.0152
0.7	0.033	6.50	0.0228	0.052	10.34	0.0362	0.046	9.28	0.0325	0.072	14.37	0.0503	0.117	23.39	0.0819	0.066	13.29	0.0465
0.65	0.082	16.37	0.0532	0.08	16.02	0.0521	0.094	18.78	0.0610	0.103	20.57	0.0669	0.202	40.39	0.1313	0.102	20.39	0.0663
0.6	0.131	26.27	0.0788	0.112	22.30	0.0669	0.163	32.53	0.0976	0.189	37.73	0.1132	0.306	61.14	0.1834	0.156	31.14	0.0934
0.5	0.305	61.00	0.1525	0.333	66.62	0.1666	0.37	74.08	0.1852	0.454	90.83	0.2271	0.578	115.58	0.2890	0.378	75.58	0.1890
0.4	0.567	113.46	0.2269	0.502	100.36	0.2007	0.62	123.98	0.2480	0.678	135.65	0.2713	0.869	173.86	0.3477	0.594	118.86	0.2377
0.3	0.78	156.01	0.2340	0.69	137.95	0.2069	0.875	174.96	0.2624	0.927	185.42	0.2781	1.128	225.52	0.3383	0.868	173.52	0.2603
0.2	0.958	191.56	0.1916	0.866	173.18	0.1732	1.066	213.11	0.2131	1.128	225.69	0.2257				1.116	223.14	0.2231
0.1	1.079	215.75	0.1079	1.019	203.81	0.1019												

ตารางที่ ก.9 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการอัด) ครั้งที่ 2

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (v)	Time of compression = 1 min			Time of compression = 2 min			Time of compression = 3 min			Time of compression = 4 min			Time of compression = 5 min			Time of compression = 6 min		
	I (A)	I (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	0.003	0.68	0.0031	0.001	0.26	0.0012	0.003	0.55	0.0025	0.004	0.83	0.0037	2E-03	0.30	0.0014	3E-03	0.50	0.0023
0.85	0.009	1.70	0.0072	0.006	1.21	0.0051	0.009	1.78	0.0076	0.011	2.25	0.0096	6E-03	1.22	0.0052	9E-03	1.72	0.0073
0.8	0.02	3.99	0.0160	0.018	3.64	0.0146	0.022	4.42	0.0177	0.027	5.34	0.0214	2E-02	3.06	0.0122	2E-02	3.66	0.0146
0.75	0.055	11.03	0.0414	0.042	8.39	0.0315	0.04	8.07	0.0303	0.052	10.34	0.0388	6E-02	12.57	0.0471	4E-02	7.57	0.0284
0.7	0.107	21.30	0.0746	0.08	16.09	0.0563	0.093	18.60	0.0651	0.085	17.08	0.0598	1E-01	28.41	0.0994	1E-01	22.41	0.0784
0.65	0.168	33.58	0.1091	0.134	26.74	0.0869	0.142	28.39	0.0923	0.161	32.11	0.1044	2E-01	48.95	0.1591	2E-01	35.95	0.1168
0.6	0.241	48.26	0.1448	0.206	41.23	0.1237	0.231	46.10	0.1383	0.268	53.68	0.1610	4E-01	71.17	0.2135	3E-01	50.17	0.1505
0.5	0.429	85.75	0.2144	0.39	78.01	0.1950	0.507	101.34	0.2534	0.52	104.06	0.2602	6E-01	125.97	0.3149	4E-01	88.97	0.2224
0.4	0.641	128.27	0.2565	0.601	120.22	0.2404	0.752	150.37	0.3007	0.787	157.44	0.3149	9E-01	179.75	0.3595	7E-01	133.75	0.2675
0.3	0.857	171.40	0.2571	0.812	162.40	0.2436	0.97	194.03	0.2910	1.051	210.10	0.3152	1E+00	228.13	0.3422	9E-01	177.13	0.2657
0.2	1.132	226.33	0.2263	1.106	221.16	0.2212	1.143	228.63	0.2286							1E+00	225.36	0.2254
0.1	0.997	199.30	0.0997	1.094	218.84	0.1094												

ตารางที่ ก.10 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการอัด) เจลลี่

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (v)	Time of compression = 1 min			Time of compression = 2 min			Time of compression = 3 min			Time of compression = 4 min			Time of compression = 5 min			Time of compression = 6 min		
	I (A)	I (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	I (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0.000	0.00	0.0000	0.000	0.00	0.0000
0.9	0.002	0.38	0.0017	0.002	0.38	0.0017	0.003	0.53	0.0024	0.005	0.91	0.0041	0.002	0.34	0.0015	0.002	0.42	0.0019
0.85	0.005	1.06	0.0045	0.005	1.09	0.0046	0.007	1.45	0.0061	0.01	2.04	0.0087	0.006	1.22	0.0052	0.006	1.135	0.0048
0.8	0.013	2.62	0.0105	0.013	2.63	0.0105	0.02	3.97	0.0159	0.024	4.76	0.0190	0.015	3.04	0.0122	0.015	2.94	0.0118
0.75	0.034	6.87	0.0257	0.035	6.97	0.0261	0.036	7.11	0.0267	0.049	9.81	0.0368	0.052	10.41	0.0390	0.029	5.81	0.0218
0.7	0.07	13.90	0.0487	0.066	13.22	0.0463	0.07	13.94	0.0488	0.079	15.73	0.0550	0.130	25.90	0.0907	0.089	17.85	0.0625
0.65	0.125	24.98	0.0812	0.107	21.38	0.0695	0.118	23.59	0.0767	0.132	26.34	0.0856	0.223	44.67	0.1452	0.141	28.17	0.0916
0.6	0.186	37.27	0.1118	0.159	31.77	0.0953	0.197	39.32	0.1179	0.229	45.71	0.1371	0.331	66.16	0.1985	0.203	40.66	0.1220
0.5	0.367	73.38	0.1834	0.362	72.32	0.1808	0.439	87.71	0.2193	0.487	97.45	0.2436	0.604	120.78	0.3019	0.411	82.28	0.2057
0.4	0.604	120.87	0.2417	0.551	110.29	0.2206	0.686	137.18	0.2744	0.733	146.55	0.2931	0.884	176.81	0.3536	0.632	126.31	0.2526
0.3	0.819	163.71	0.2456	0.751	150.18	0.2253	0.922	184.50	0.2767	0.989	197.76	0.2966	1.134	226.83	0.3402	0.877	175.33	0.2630
0.2	1.045	208.95	0.2089	0.986	197.17	0.1972	1.104	220.87	0.2209							1.121	224.25	0.2243
0.1	1.038	207.53	0.1038	1.057	211.33	0.1057												

ตารางที่ ก.11 การออกแบบการทดลอง (Response Surface Method) ครั้งที่ 1

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (v)	P = 75 , T = 130 , t = 1			P = 70 , T = 134 , t = 3			P = 65 , T = 137 , t = 5.5			P = 60 , T = 141 , t = 8			P = 55 , T = 144 , t = 10			P = 50 , T = 148 , t = 12		
	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	0.001	0.25	0.0011	0.003	0.54	0.0024	0.005	0.99	0.0045	0.002	0.41	0.0018	2E-03	0.31	0.0014	2E-03	0.31	0.0014
0.85	0.005	1.00	0.0043	0.006	1.12	0.0048	0.007	1.37	0.0058	0.006	1.21	0.0051	3E-03	0.63	0.0027	4E-03	0.78	0.0033
0.8	0.009	1.81	0.0072	0.012	2.35	0.0094	0.014	2.79	0.0112	0.013	2.57	0.0103	6E-03	1.18	0.0047	8E-03	1.61	0.0064
0.75	0.015	2.99	0.0112	0.026	5.26	0.0197	0.028	5.65	0.0212	0.022	4.46	0.0167	1E-02	2.26	0.0085	1E-02	2.40	0.0090
0.7	0.032	6.38	0.0223	0.044	8.76	0.0307	0.077	15.33	0.0537	0.039	7.72	0.0270	2E-02	3.94	0.0138	2E-02	3.12	0.0109
0.65	0.06	11.97	0.0389	0.073	14.69	0.0477	0.136	27.11	0.0881	0.059	11.73	0.0381	3E-02	5.98	0.0194	3E-02	5.14	0.0167
0.6	0.128	25.53	0.0766	0.189	37.75	0.1133	0.329	65.72	0.1972	0.076	15.23	0.0457	4E-02	8.38	0.0251	4E-02	8.31	0.0249
0.5	0.249	49.85	0.1246	0.422	84.39	0.2110	0.672	134.47	0.3362	0.128	25.63	0.0641	8E-02	16.37	0.0409	7E-02	14.68	0.0367
0.4	0.427	85.37	0.1707	0.609	121.75	0.2435	0.672	182.56	0.3651	0.199	39.75	0.0795	1E-01	28.42	0.0568	1E-01	22.45	0.0449
0.3	0.578	115.53	0.1733	0.781	156.14	0.2342	0.913	220.45	0.3307	0.299	59.73	0.0896	2E-01	41.83	0.0627	2E-01	31.83	0.0477
0.2	0.749	149.85	0.1499	0.92	184.08	0.1841				0.511	102.23	0.1022	4E-01	75.38	0.0754	3E-01	55.38	0.0554
0.1	0.927	185.37	0.0927	1.022	204.39	0.1022				0.876	175.12	0.0876	9E-01	170.54	0.0853	6E-01	110.54	0.0553

ตารางที่ ก.12 การออกแบบการทดลอง (Response Surface Method) ครั้งที่2

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (v)	P = 75 , T = 130 , t = 1			P = 70 , T = 134 , t = 3			P = 65 , T = 137 , t = 5.5			P = 60 , T = 141 , t = 8			P = 55 , T = 144 , t = 10			P = 50 , T = 148 , t = 12		
	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	0.002	0.31	0.0014	0.003	0.68	0.0031	0.004	0.85	0.0038	3E-04	0.06	0.0003	4E-03	0.78	0.0035	2E-03	0.37	0.0017
0.85	0.006	1.15	0.0049	0.008	1.53	0.0065	0.008	1.61	0.0068	0.002	0.33	0.0014	8E-03	1.61	0.0068	3E-03	0.51	0.0022
0.8	0.009	1.78	0.0071	0.013	2.67	0.0107	0.014	2.71	0.0108	0.005	1.05	0.0042	1E-02	2.40	0.0096	8E-03	1.52	0.0061
0.75	0.014	2.89	0.0108	0.029	5.83	0.0219	0.032	6.41	0.0240	0.016	3.23	0.0121	2E-02	3.36	0.0126	1E-02	2.69	0.0101
0.7	0.032	6.49	0.0227	0.042	8.47	0.0296	0.078	15.59	0.0546	0.033	6.57	0.0230	2E-02	4.69	0.0164	2E-02	4.57	0.0160
0.65	0.059	11.84	0.0385	0.075	14.95	0.0486	0.139	27.84	0.0905	0.046	9.14	0.0297	3E-02	6.45	0.0210	3E-02	6.48	0.0211
0.6	0.132	26.38	0.0791	0.192	38.47	0.1154	0.306	61.13	0.1834	0.092	18.39	0.0552	5E-02	9.87	0.0296	5E-02	9.89	0.0297
0.5	0.25	49.97	0.1249	0.416	83.22	0.2081	0.645	129.02	0.3226	0.167	33.37	0.0834	1E-01	24.26	0.0607	9E-02	18.64	0.0466
0.4	0.424	84.71	0.1694	0.6	120.03	0.2401	0.925	184.98	0.3700	0.267	53.43	0.1069	2E-01	40.14	0.0803	2E-01	31.81	0.0636
0.3	0.586	117.16	0.1757	0.771	154.11	0.2312	1.108	221.53	0.3323	0.397	79.37	0.1191	3E-01	64.80	0.0972	2E-01	45.91	0.0689
0.2	0.757	151.35	0.1514	0.936	187.22	0.1872				0.594	118.81	0.1188	5E-01	92.31	0.0923	4E-01	70.63	0.0706
0.1	0.951	190.23	0.0951	1.009	201.73	0.1009				0.815	162.92	0.0815	7E-01	140.68	0.0703	5E-01	105.31	0.0527

ตารางที่ ก.13 การออกแบบการทดลอง (Response Surface Method) เฉลี่ย

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (v)	P = 75 , T = 130 , t = 1			P = 70 , T = 134 , t = 3			P = 65 , T = 137 , t = 5.5			P = 60 , T = 141 , t = 8			P = 55 , T = 144 , t = 10			P = 50 , T = 148 , t = 12		
	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	0.001	0.28	0.0013	0.003	0.61	0.0027	0.005	0.92	0.0041	0.001	0.24	0.0011	3E-03	0.55	0.0025	2E-03	0.34	0.0015
0.85	0.005	1.08	0.0046	0.007	1.33	0.0056	0.007	1.49	0.0063	0.004	0.77	0.0033	6E-03	1.12	0.0048	3E-03	0.65	0.0027
0.8	0.009	1.80	0.0072	0.013	2.51	0.0100	0.014	2.75	0.0110	0.009	1.81	0.0072	9E-03	1.79	0.0072	8E-03	1.57	0.0063
0.75	0.015	2.94	0.0110	0.028	5.55	0.0208	0.03	6.03	0.0226	0.019	3.85	0.0144	1E-02	2.81	0.0105	1E-02	2.55	0.0095
0.7	0.032	6.44	0.0225	0.043	8.62	0.0302	0.077	15.46	0.0541	0.036	7.15	0.0250	2E-02	4.32	0.0151	2E-02	3.85	0.0135
0.65	0.06	11.91	0.0387	0.074	14.82	0.0482	0.137	27.48	0.0893	0.052	10.44	0.0339	3E-02	6.22	0.0202	3E-02	5.81	0.0189
0.6	0.13	25.96	0.0779	0.191	38.11	0.1143	0.317	63.43	0.1903	0.084	16.81	0.0504	5E-02	9.13	0.0274	5E-02	9.10	0.0273
0.5	0.25	49.91	0.1248	0.419	83.81	0.2095	0.659	131.75	0.3294	0.148	29.50	0.0738	1E-01	20.32	0.0508	8E-02	16.66	0.0417
0.4	0.425	85.04	0.1701	0.604	120.89	0.2418	0.919	183.77	0.3675	0.233	46.59	0.0932	2E-01	34.28	0.0686	1E-01	27.13	0.0543
0.3	0.582	116.35	0.1745	0.776	155.13	0.2327	1.105	220.99	0.3315	0.348	69.55	0.1043	3E-01	53.32	0.0800	2E-01	38.87	0.0583
0.2	0.753	150.60	0.1506	0.928	185.65	0.1857				0.553	110.52	0.1105	4E-01	83.85	0.0838	3E-01	63.01	0.0630
0.1	0.939	187.80	0.0939	1.015	203.06	0.1015				0.845	169.02	0.0845	8E-01	155.61	0.0778	5E-01	107.93	0.0540

ตารางที่ ก.14 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์) ครั้งที่ 1

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

0.01556

V (V)	Pressure = 20 lb _f -in			Pressure = 30 lb _f -in			Pressure = 40 lb _f -in			Pressure = 50 lb _f -in			Pressure = 60 lb _f -in			Pressure = 70 lb _f -in			
	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	
0.9	0.03	6.00	0.0270	0.022	4.48	0.0202	0.015	3.00	0.0135	0.0127	2.53	0.0114	5E-02	9.92	0.0446	4E-02	7.05	0.0317	
0.85	0.0456	9.12	0.0388	0.059	11.88	0.0505	0.0946	18.91	0.0804	0.0658	13.16	0.0559	2E-01	34.27	0.1456	9E-02	17.25	0.0733	
0.8	0.062	12.40	0.0496	0.129	25.83	0.1033	0.2408	48.15	0.1926	0.185	36.99	0.1480	3E-01	62.39	0.2496	1E-01	27.72	0.1109	
0.75	0.1975	39.49	0.1481	0.245	49.02	0.1838	0.4153	83.05	0.3114	0.418	83.60	0.3135	5E-01	95.71	0.3589	2E-01	37.10	0.1391	
0.7	0.4179	83.57	0.2925	0.445	89.02	0.3116	0.651	130.19	0.4557	0.6626	132.52	0.4638	7E-01	139.04	0.4866	2E-01	45.07	0.1577	
0.65	0.6243	124.86	0.4058	0.765	153.07	0.4975	0.8862	177.23	0.5760	0.9078	181.55	0.5900	1E+00	196.26	0.6378	3E-01	55.29	0.1797	
0.6	0.9519	190.37	0.5711	1.123	224.51	0.6735	1.119	223.80	0.6714	1.1208	224.15	0.6725	1E+00	236.14	0.7084	3E-01	63.10	0.1893	
0.5	1.1241	224.81	0.5620	1.121	224.13	0.5603										4E-01	75.17	0.1879	
0.4																	5E-01	91.27	0.1825
0.3																			
0.2																			
0.1																			

ตารางที่ ก.15 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์) ครั้งที่2

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (V)	Pressure = 20 lb _f -in			Pressure = 30 lb _f -in			Pressure = 40 lb _f -in			Pressure = 50 lb _f -in			Pressure = 60 lb _f -in			Pressure = 70 lb _f -in		
	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	0.0105	2.09	0.0094	0.0125	2.49	0.0112	0.0155	3.09	0.0139	0.0162	3.23	0.0145	2E-02	4.56	0.0205	5E-02	10.37	0.0467
0.85	0.0401	8.01	0.0340	0.0451	9.01	0.0383	0.0501	10.01	0.0425	0.0395	7.89	0.0335	1E-01	19.26	0.0819	1E-01	21.08	0.0896
0.8	0.0722	14.43	0.0577	0.0922	18.43	0.0737	0.1322	26.43	0.1057	0.1162	23.24	0.0930	2E-01	41.61	0.1664	2E-01	30.29	0.1212
0.75	0.1407	28.13	0.1055	0.1807	36.13	0.1355	0.2407	48.13	0.1805	0.1885	37.70	0.1414	3E-01	65.33	0.2450	2E-01	41.54	0.1558
0.7	0.205	40.99	0.1435	0.245	48.99	0.1715	0.365	72.99	0.2555	0.2825	56.50	0.1978	5E-01	98.00	0.3430	3E-01	51.09	0.1788
0.65	0.2932	58.63	0.1905	0.3332	66.63	0.2165	0.453	90.60	0.2945	0.4283	85.66	0.2784	6E-01	122.25	0.3973	3E-01	59.62	0.1938
0.6	0.3684	73.68	0.2210	0.4184	83.68	0.2510	0.5484	109.68	0.3290	0.5538	110.76	0.3323	7E-01	147.75	0.4433	3E-01	66.51	0.1995
0.5	0.5521	110.41	0.2760	0.6111	122.21	0.3055	0.7411	148.21	0.3705	0.797	159.40	0.3985	1E+00	213.92	0.5348	4E-01	73.35	0.1834
0.4	0.7445	148.90	0.2978	0.8645	172.90	0.3458	0.941	188.20	0.3764	0.9827	196.53	0.3931				4E-01	80.38	0.1608
0.3	0.9608	192.15	0.2882	1.0208	204.15	0.3062	1.1108	222.15	0.3332	1.075	215.00	0.3225				4E-01	87.02	0.1305
0.2																		
0.1																		

ตารางที่ ก.16 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการประกอบเซลล์) เฉลี่ย

Flow Rate of Oxygen = 100 sccm

Flow Rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 60 °C

V (V)	Pressure = 20 lb _f -in			Pressure = 30 lb _f -in			Pressure = 40 lb _f -in			Pressure = 50 lb _f -in			Pressure = 60 lb _f -in			Pressure = 70 lb _f -in		
	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)	I (A)	J (mA/cm ²)	Power (W)
0.97	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.9	0.0202	4.05	0.0182	0.0174	3.49	0.0157	0.0152	3.05	0.0137	0.0144	2.88	0.0130	4E-02	7.24	0.0326	4E-02	8.71	0.0392
0.85	0.0428	8.57	0.0364	0.0522	10.45	0.0444	0.0723	14.46	0.0615	0.0526	10.53	0.0447	1E-01	26.77	0.1138	1E-01	19.17	0.0815
0.8	0.0671	13.42	0.0537	0.1107	22.13	0.0885	0.1865	37.29	0.1492	0.1506	30.12	0.1205	3E-01	52.00	0.2080	1E-01	29.01	0.1160
0.75	0.1691	33.81	0.1268	0.2129	42.58	0.1597	0.328	65.59	0.2460	0.3033	60.65	0.2274	4E-01	80.52	0.3020	2E-01	39.32	0.1475
0.7	0.3114	62.28	0.2180	0.345	69.01	0.2415	0.508	101.59	0.3556	0.4726	94.51	0.3308	6E-01	118.52	0.4148	2E-01	48.08	0.1683
0.65	0.4587	91.75	0.2982	0.5493	109.85	0.3570	0.6696	133.92	0.4352	0.668	133.61	0.4342	8E-01	159.26	0.5176	3E-01	57.46	0.1867
0.6	0.6601	132.03	0.3961	0.7705	154.10	0.4623	0.8337	166.74	0.5002	0.8373	167.46	0.5024	1E+00	191.95	0.5758	3E-01	64.81	0.1944
0.5	0.8381	167.61	0.4190	0.8659	173.17	0.4329	0.3705	74.11	0.1853	0.3985	79.70	0.1993	5E-01	106.96	0.2674	4E-01	74.26	0.1857
0.4	0.3723	74.45	0.1489	0.4323	86.45	0.1729	0.4705	94.10	0.1882	0.4913	98.27	0.1965				4E-01	85.83	0.1717
0.3	0.4804	96.08	0.1441	0.5104	102.08	0.1531	0.5554	111.08	0.1666	0.5375	107.50	0.1613				2E-01	43.51	0.0653
0.2																		
0.1																		

ตารางที่ ก.17 ผลของการออกแบบการทดลองตามวิธี Response Surface Method
โดยเพิ่มการทดลองเพื่อหาแบบจำลองอันดับสอง

Run NO.	Process Variables			Coded Variables			yield, y
	Pressure (kg/cm ²)	Temp (°C)	Time (min)	x ₁	x ₂	x ₃	
1	50	130	1	-1	-1	-1	151.21
2	100	130	1	1	-1	-1	56.08
3	50	150	1	-1	1	-1	169.54
4	100	150	1	1	1	-1	198.32
5	50	130	5	-1	-1	1	206.33
6	100	130	5	1	-1	1	138.62
7	50	150	5	-1	1	1	123
8	100	150	5	1	1	1	142.36
9	50	130	1	-1	-1	-1	105.26
10	100	130	1	1	-1	-1	82.07
11	50	150	1	-1	1	-1	168.83
12	100	150	1	1	1	-1	220.33
13	50	130	5	-1	-1	1	213.09
14	100	130	5	1	-1	1	182.04
15	50	150	5	-1	1	1	106.17
16	100	150	5	1	1	1	96.24
17	75	140	3	0	0	0	141.37
18	75	140	3	0	0	0	124.13
19	75	140	3	0	0	0	158.22
20	110.35	140	3	1.414	0	0	
21	39.65	140	3	-1.414	0	0	
22	75	154.14	3	0	1.414	0	
23	75	125.86	3	0	-1.414	0	
24	75	140	5.828	0	0	1.414	
25	75	140	0.172	0	0	-1.414	

$$x_1 = \frac{\text{Pressure} - 75}{25} \quad x_2 = \frac{\text{Temp} - 140}{10} \quad x_3 = \frac{\text{Time} - 3}{2}$$

ภาคผนวก ข

การคำนวณทางคณิตศาสตร์

การคำนวณในวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Method, RSM)

การคำนวณเพื่อหาแบบจำลองของข้อมูลการทดลองจะเป็นดังนี้

จากที่แบบจำลองกำลังหนึ่งจะอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

ดังนั้นจะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β) ต่างๆ จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square) โดยที่สูตรที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β) แสดงดังนี้

$$\beta = (X'X)^{-1} * (X'Y)$$

จากข้อมูลการทดลองที่ทำในส่วนของ Experimental design นำมาใช้ในการคำนวณ โดยที่จากการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง ทำซ้ำอีก 1 ครั้งรวมทั้งทำการทดลองที่จุดกึ่งกลางอีก 3 ครั้ง จะได้การทดลองทั้งหมด 19 การทดลอง แล้วนำมาคำนวณหาแบบจำลองจะได้ดังนี้

โดย

X คือ ตัวแปรรหัส (coded variable)

Y คือ ค่าผลตอบสนอง ในที่นี้คือ ค่าความหนาแน่นกระแสที่

ค่าความต่างศักย์เดียวกัน

ค่า x ของคอลัมน์ที่ 1 แทนเมตริกซ์ I

ค่า x ของคอลัมน์ที่ 2 แทนตัวแปรรหัสของ x_1

ค่า x ของคอลัมน์ที่ 3 แทนตัวแปรรหัสของ x_2

ค่า x ของคอลัมน์ที่ 4 แทนตัวแปรรหัสของ x_3

ค่า x ของคอลัมน์ที่ 5 แทนตัวแปรรหัสของ x_{12}

ค่า x ของคอลัมน์ที่ 6 แทนตัวแปรรหัสของ x_{23}

$$X = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad Y = \begin{vmatrix} 151.21 \\ 56.08 \\ 169.54 \\ 198.32 \\ 206.33 \\ 138.62 \\ 123 \\ 142.36 \\ 105.26 \\ 82.07 \\ 168.83 \\ 220.33 \\ 213.09 \\ 182.04 \\ 106.17 \\ 96.24 \\ 141.37 \\ 124.13 \\ 158.22 \end{vmatrix}$$

$$X' = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$X'X = \begin{vmatrix} 16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 16 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 16 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 16 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 16 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 16 \end{vmatrix} \quad X'Y = \begin{vmatrix} 2359.49 \\ -127.37 \\ 90.09 \\ 56.21 \\ 306.79 \\ -634.71 \end{vmatrix}$$

$$(X'X)^{-1} = \begin{vmatrix} 0.0625 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0625 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0625 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0625 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0625 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0625 \end{vmatrix} \quad \beta = \begin{vmatrix} 147.4681 \\ -7.96063 \\ 5.630625 \\ 3.513125 \\ 19.17438 \\ -39.6694 \end{vmatrix}$$

เพราะฉะนั้นจะได้แบบจำลองดังสมการ

$$\hat{y} = 147.468 - 7.961x_1 + 5.631x_2 + 3.513x_3 + 19.174x_1x_2 - 39.669x_2x_3$$

ในการคำนวณขนาดของการก้าวย่างของตัวแปรอื่น

จากสูตร

$$\Delta x_i = \frac{\hat{\beta}_i}{\hat{\beta}_j / \Delta x_j}$$

ข้อมูลจากการทดลอง

$$\beta_1 = -7.961$$

$$\beta_2 = 5.631$$

$$\beta_3 = 3.513$$

จากสูตร จะคำนวณค่า Δx_2 ได้ดังนี้

$$\Delta x_2 = \frac{\beta_2}{\beta_1 / \Delta x_1}$$

กำหนดให้ $\Delta x_1 = -1$ แทนค่าต่าง ๆ ลงในสูตรจะได้

$$\Delta x_2 = \frac{5.631}{(-7.961/-1)}$$

$$\Delta x_2 = 0.71$$

และจะคำนวณค่า Δx_3 ได้ดังนี้

$$\Delta x_3 = \frac{\beta_3}{\beta_1/\Delta x_1}$$

กำหนดให้ $\Delta x_1 = -1$ แทนค่าต่าง ๆ ลงในสูตรจะได้

$$\Delta x_3 = \frac{3.513}{(-7.961/-1)}$$

$$\Delta x_3 = 0.44$$

เมื่อทำการกำหนดขนาดของการก้าว่าง ในการทดลองนี้กำหนดให้เท่ากับ 5 นาที ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนตัวแปรรหัส (coded variable) ไปเป็นตัวแปรธรรมชาติ (natural variable) จะได้ดังนี้

$$\Delta x_2 = 0.71(\Delta x_1)$$

จากข้อมูลการทดลอง

เมื่อขนาดของตัวแปร x_1 ลดลง 5 หน่วยแล้วตัวแปร x_2 จะมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็น

$$\Delta x_2 = 0.71(5)$$

$$\Delta x_2 = 3.55$$

ดังนั้นตัวแปร x_2 จะมีค่าเพิ่มขึ้น 3.55 หน่วย

และคำนวณค่าตัวแปร x_3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็น

$$\Delta x_3 = 0.44(\Delta x_1)$$

$$\Delta x_3 = 0.44(5)$$

$$\Delta x_3 = 2.2$$

ดังนั้นตัวแปร x_3 จะมีค่าเพิ่มขึ้น 2.2 หน่วย

หลังจากคำนวณค่าต่าง ๆ ได้แล้วจึงนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองตามวิธีพื้นผิว
ผลตอบสนอง (Response Surface Method, RSM) ต่อไปตามตารางที่ 4.7



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบรรยง นาครำไพ เกิดวันที่ 5 กรกฎาคม 2524 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย