

การออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน



นายพัฒนพงษ์ สงวนรักษา

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ภาควิชา เคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545


ISBN 974-17-0977-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

24 S.A. 2546

T ๑๑๖๔๒๑๙๘

DESIGN OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL TEST STATION



Mr.Patanapong Sanguanrak

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 2002

ISBN 974-17-0977-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยน
โปรตอน
โดย นายพัฒนพงษ์ สงวนรัช
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาท

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาท)

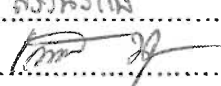
..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... กรรมการ
(ดร. ภาวดี อังค์วัฒนะ)

พัฒนพงษ์ สงวนวัชร : การออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (DESIGN OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL TEST STATION) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษাত্র, 137 หน้า.
ISBN 974-17-0977-3.

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนได้รับความสนใจอย่างมากสำหรับเป็นหน่วยผลิตพลังงานปฐมภูมิ ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงคือให้ประสิทธิภาพสูงในการแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าและเป็นกระบวนการที่สะอาดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตไฟฟ้าแบบเดิม งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลของแก๊ส อุณหภูมิ องค์ประกอบของสารออกซิไดส์ ความชื้น และความดัน มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยส่งผลต่อการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีเนื่องจากความต้านทานและความเข้มข้น ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลงเมื่ออัตราการไหลของแก๊สและอุณหภูมิการทำงานเพิ่มขึ้น สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ออกซิเจนเป็นสารออกซิไดส์จะดีกว่าที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์ ในส่วนของความดันมีผลต่อสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการปรับปรุงส่วนเชื่อมต่อระหว่างระบบให้ความชื้นและเซลล์เชื้อเพลิงแล้วนั้น พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิในระบบให้ความชื้นควรเท่ากับหรือมากกว่าอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เล็กน้อย จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิการทำงานของเซลล์ที่ 70 องศาเซลเซียสจะให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด และสูงกว่ากรณีทีก่อนการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิติ...พัฒนพงษ์ สงวนวัชร
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา...

4372350923 : MAJOR Chemical Technology

KEY WORD: PEMFC / Fuel cell test station / Humidifier / Hydrogen /

Patanapong Sanguanrak : DESIGN OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL TEST STATION. THESIS ADVISOR : Assist. Prof. Kejvalee Pruksathom, Ph.D., 137 pp. ISBN 974-17-0977-3.

Proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) have attracted enormous interest as a primary power source. The advantage of using fuel cells includes their cleanness and high energy efficiency compared with combustion engines. In this research, the fuel cell test station was set up to study the parametric effects on the performance of proton exchange membrane fuel cell. The results showed that gas flow rate, cell temperature, composition of oxidant, humidity, and pressure have effects on the activation, resistance, and concentration polarizations due to the water equilibrium in the cell. The efficiency of fuel cell decreased when gas flow rate and temperature increased. The performance of fuel cell when using oxygen to be oxidant was better than air. The pressure in the fuel cell had an effect on the equilibrium of water in the cell. After that, the test station was modified the part of the connection between humidifier and fuel cell. The humidifier temperature should be operated equally or slightly higher than the cell temperature. The results showed that the fuel cell operated at 70 °C was the most efficient condition compared with the unmodified test station.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Chemical Technology
Field of study Chemical Technology
Academic year 2002

Student's signature.....*Patanapong Sanguanrak*
Advisor's signature.....*Kejvalee Pruksathom*

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธิวัฒน์ วิสัยทอง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่กรุณาให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัย

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี

ขอขอบคุณ คุณทองวุฒิ นิรัญศิลป์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณจิตติกร วาสนาเพียรพงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรม Lab-view สำหรับควบคุมอุณหภูมิของระบบให้มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ, ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่	
1 บทนำ	1
2 วารสารปริทัศน์	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง	4
2.1.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	4
2.1.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง	5
2.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง	7
2.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline fuel cell, AFC)	8
2.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric fuel cells, PAFC) ..	10
2.2.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเนตหลอม (Molten carbonate fuel cells, MCFC)	11
2.2.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cells, SOFC) ..	12
2.2.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel cell, PEMFC)	13
2.3 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	17
2.3.1 อิทธิพลของน้ำที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์	18
2.3.2 อิทธิพลของค่าความดันของแก๊สที่ป้อนเข้าขั้วแอโนดและแคโทด	20
2.3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	20
2.4 อุณหพลศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง (Thermodynamics of fuel cell)	21
2.5 โพล่าไรเซชัน (Polarization)	28

2.5.1	โพลาริเซชันทางเคมี (Activation polarization or chemical polarization)	30
2.5.2	โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance polarization).....	31
2.5.3	โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarization)...	32
2.6	ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง.....	33
2.6.1	ประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ (Faraday efficiency, (η_F)).....	34
2.6.2	ประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้า (Voltage efficiency, (η_V))	35
2.6.3	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency, (η_T)).....	35
2.6.4	ประสิทธิภาพรวม (overall efficiency, ($\eta_{overall}$))	36
2.7	ความชื้น (Humidity).....	36
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
3	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	42
3.1	อุปกรณ์การทดลอง.....	42
3.1.1	เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	42
3.1.2	ระบบให้ความชื้นกับแก๊ส (Humidifier)	44
3.1.3	วาล์วควบคุมความดันกลับ (Back Pressure Valve).....	47
3.1.4	เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Mass Flow Controller).....	49
3.1.5	ชุดของวาล์วขาเข้า (Intake Valve) และวาล์วขาออก (Relieve Valve).....	50
3.1.6	เครื่องควบคุมความดันแก๊ส (Pressure Regulator)	51
3.1.7	เครื่อง Potentiostat/Galvanostat	51
3.1.8	หน่วยควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)	52
3.1.9	เครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen Detector)	54
3.2	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	54
3.3	ตัวแปรที่ศึกษา	55
3.4	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	55
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	59
4.1	การออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง	59

4.1.1	ระบบควบคุมทิศทางการไหลและอัตราการไหลของแก๊ส.....	60
4.1.2	ระบบให้ความชื้น (Humidifier) กับแก๊ส	60
4.1.3	เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cells).....	61
4.1.4	เครื่อง Potentiostat/Galvanostat.....	62
4.1.5	วาล์วควบคุมความดันกลับ (Back Pressure Valve.....	62
4.2	ผลของอัตราการไหลของแก๊ส.....	62
4.3	การออกแบบการทดลอง (Experimental Design)	65
4.4	ผลขององค์ประกอบออกซิไดส์.....	81
4.5	ผลของปริมาณความชื้น.....	87
4.6	ผลของความดัน.....	92
4.7	การปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง.....	97
5	สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	108
	รายการอ้างอิง	111
	ภาคผนวก.....	113
	ภาคผนวก ก อุปกรณ์การทดลอง.....	114
	ภาคผนวก ข ผลการทดลอง.....	118
	ภาคผนวก ค การคำนวณคูลน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง.....	133
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	137

สารบัญตาราง

ฎ

ตารางที่	หน้า
4.1 การออกแบบการทดลองจำนวน 11 การทดลอง.....	67
4.2 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA).....	68
4.3 อัตราการสะสมน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ สำหรับหน่วยทดสอบเซลล์ เชื้อเพลิงที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง	105
4.4 อัตราการสะสมน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ สำหรับหน่วยทดสอบเซลล์ เชื้อเพลิงที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว.....	105
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน และออกซิเจนเท่ากับ 10 และ 80 sccm ตามลำดับ	107
ข1 ผลของอัตราการไหลของแก๊ส	118
ข2 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง (Experimental Design)	119
ข3 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของไฮโดรเจน).....	120
ข4 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของออกซิเจน).....	121
ข5 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง).....	122
ข6 ผลของสารออกซิไดส์	123
ข7 ผลของอัตราการไหลของอากาศ.....	124
ข8 ผลของปริมาณความชื้น (ออกซิเจน).....	125
ข9 ผลของปริมาณความชื้น (อากาศ)	126
ข10 ผลของความดัน	127
ข11 ผลของความดันและปริมาณความชื้น.....	128
ข12 การพัฒนาหน่วยทดสอบ (ผลของอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง).....	129
ข13 การพัฒนาหน่วยทดสอบ (ผลของอุณหภูมิระบบให้ความชื้น, อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง เท่ากับ 30°C)	130
ข14 การพัฒนาหน่วยทดสอบ (ผลของอุณหภูมิระบบให้ความชื้น, อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง เท่ากับ 40°C)	131
ข15 การพัฒนาหน่วยทดสอบ (ผลของอุณหภูมิระบบให้ความชื้น, อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง เท่ากับ 50°C)	132

รูปที่	หน้า
1.1	การทดลองของ Sir William Grove..... 2
2.1	แผ่นสะสมกระแสแบบสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง 7
2.2	หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์..... 9
2.3	หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก 10
2.4	หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอนเนตหลอม..... 12
2.5	หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง..... 13
2.6	หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน 14
2.7	โครงสร้างของเอทิลีนและเตตระฟลูออโรเอทิลีน..... 15
2.8	โครงสร้างของซิลโฟเนต ฟลูออโรเอทิลีน..... 15
2.9	โครงสร้างของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีการดูดซึมน้ำเอาไว้..... 16
2.10	ปรากฏการณ์ของน้ำที่เกิดขึ้นทุกกระบวนการในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยน โปรตอน..... 19
2.11	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน 29
2.12	ค่าพลังงานเสรีกิ๊บส์ของการเกิดปฏิกิริยา..... 30
2.13	ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่บริเวณผิวขั้วไฟฟ้า 33
2.14	กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงในงานวิจัยของ Watanabe..... 39
2.15	ระบบการหมุนเวียนน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง 39
2.16	ลักษณะช่องการไหลของแก๊สที่ใช้ในงานวิจัยของ Wood 40
3.1	เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนของบริษัท ElectroChem, Inc. 42
3.2	หน่วยแผ่นเยื่อและอิเล็กโทรด (Membrane Electrode Assemblies, MEAs) 43
3.3	ทางเดินของแก๊สภายในเซลล์เชื้อเพลิง 44
3.4	ระบบให้ความชื้นกับแก๊ส (Humidifier) 44
3.5	ส่วนระเหยน้ำ (Evaporation Chamber)..... 45
3.6	ส่วนวัดความชื้น (Sensor Chamber)..... 47
3.7	วาล์วควบคุมความดันกลับ (Back Pressure Valve) 48
3.8	เครื่องควบคุมอัตราการไหลอัตราการไหล (Mass Flow Controller) 49
3.9	เครื่องควบคุมอัตราการไหลแบบ 4 ช่องควบคุม..... 49
3.10	ชุดของวาล์วเข้า (Intake Valve) และวาล์วขาออก (Relieve Valve)..... 50

รูปที่	หน้า
3.11 Ball Valve ที่ใช้ในชุดของวาล์วขาเข้า (Intake Valve) และวาล์วขาออก (Relieve Valve)	51
3.12 เครื่องควบคุมความดันแก๊ส (Pressure Regulator)	51
3.13 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat	52
3.14 เครื่องควบคุมอุณหภูมิของบริษัท Shimaden รุ่น SR17	53
3.15 แผงรับสัญญาณ (Board LabPC) ของบริษัท National Instrument	53
3.16 แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า	53
3.17 Solid State Relay ของ Carlo Gavazzi รุ่น RS1A23D10	54
3.18 เครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen Detector)	54
4.1 หน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	59
4.2 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สต่าง ๆ โดยที่อุณหภูมิการทำงาน 30 องศาเซลเซียส แก๊สอัดตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ	63
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สต่าง ๆ โดยที่อุณหภูมิการทำงาน 30 องศาเซลเซียส แก๊สอัดตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ	63
4.4 Nomal Probability Plot ของค่าความหนาแน่นกระแส	69
4.5 กราฟแสดงผลตอบสนองที่มาจาก การคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง	70
4.6 ผลตอบสนองของอัตราการไหลของไฮโดรเจน	71
4.7 ผลตอบสนองของอัตราการไหลของออกซิเจน	71
4.8 ผลตอบสนองของอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	72
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ระหว่างอัตราการไหลของไฮโดรเจนกับอัตราการไหลของออกซิเจน	73
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ระหว่างอัตราการไหลของไฮโดรเจนกับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	73
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ระหว่างอัตราการไหลของออกซิเจนกับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	74

รูปที่	หน้า
4.12	ผลจากการทำการออกแบบการทดลอง (Experimental Design) เพื่อหาภาวะที่ดีที่สุดของ เซลล์เชื้อเพลิง 75
4.13	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของ ออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ..... 76
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการ ไหลของไฮโดรเจนต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และ ความดันบรรยากาศ 77
4.15	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของออกซิเจนต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของ ไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศา เซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ..... 78
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการ ไหลของออกซิเจนต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และ ความดันบรรยากาศ 78
4.17	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิการทำงานต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของ ไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ 79
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ การทำงานต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อ นาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที แก๊สอิ่มตัว ด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ 79
4.19	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารออกซิไดส์ต่างกัน ที่อัตราการไหลเดียวกันที่ 80 sccm โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ 82

รูปที่	หน้า	
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารออกซิไดส์ต่างกัน ที่อัตราการไหลเดียวกันที่ 80 sccm โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ.....	82
4.21	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ.....	84
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ.....	85
4.23	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษาผลของปริมาณความชื้น ที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจน 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ.....	87
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสเพื่อศึกษาผลของปริมาณความชื้น ที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจน 80 sccm หรือ 0.004 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ.....	88
4.25	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษาผลของปริมาณความชื้น ที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 200 sccm หรือ 0.0089 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ.....	90
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสเพื่อศึกษาผลของปริมาณความชื้น ที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 200 sccm หรือ 0.0089 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ.....	90

รูปที่	หน้า
4.27	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษาผลของความดันที่ 1 และ 2 บรรยากาศ อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 และ 70 องศาเซลเซียส และแก๊สอัดตัวด้วยความชื้น 92
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษาผลของความดันที่ 1 และ 2 บรรยากาศ อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 และ 70 องศาเซลเซียส และแก๊สอัดตัวด้วยความชื้น 93
4.29	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความดัน โดยทำการทดลองที่ความดัน 2 บรรยากาศ อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส 95
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความดัน โดยทำการทดลองที่ความดัน 2 บรรยากาศ อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส 95
4.31	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิการทำงานต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที แก๊สอัดตัวด้วยความชื้นและความดันบรรยากาศ ภายหลังจากการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง..... 99
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิการทำงานต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที แก๊สอัดตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ ภายหลังจากการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง 99
4.33	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงก่อนและหลังการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง โดยอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที และความดันบรรยากาศ 101
4.34	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงก่อนและหลังการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง โดยอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที และความดันบรรยากาศ 101

รูปที่	หน้า
4.35	โพลาริแกรมของเซลล์เชื้อเพลิงก่อนและหลังการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง โดยอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที และความดันบรรยากาศ 102
ก1	ภาพตัดด้านข้างของส่วนระเหยน้ำ (Evaporation Chamber) อัตราส่วน 1:1 114
ก2	ภาพตัดด้านข้างของส่วนจัดหาน้ำ (Water Supply Chamber) อัตราส่วน 1:1 115
ก3	ภาพตัดด้านข้างของส่วนวัดความชื้น (Sensor Chamber) อัตราส่วน 1:1 116
ก4	แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า..... 117



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

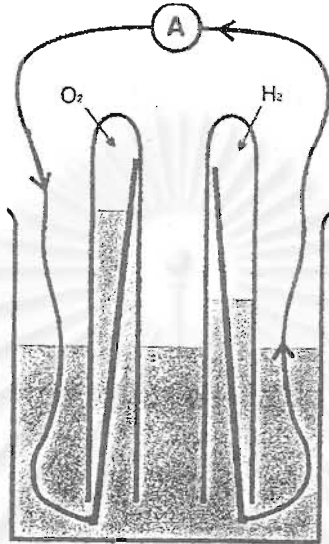


ในสภาวะการณ์ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในด้านต่าง ๆ มีการพัฒนาอย่างมาก โดยเฉพาะด้านโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้มีการใช้พลังงานในปริมาณมากขึ้น ความต้องการพลังงานจึงมีสูงตามไปด้วย ดังนั้นปัญหาที่ตามมาคือปัญหาการขาดแคลนพลังงาน ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญอันหนึ่ง โดยเฉพาะในประเทศบางประเทศ ตัวอย่างเช่นในประเทศไทย ที่ไม่สามารถผลิตเชื้อเพลิงขึ้นให้ได้เพียงพอภายในประเทศ ยังต้องมีการนำเข้าของเชื้อเพลิงจากประเทศอื่นอยู่ ทำให้ต้องสูญเสียเงินตราในส่วนนี้เป็นจำนวนมาก การใช้เชื้อเพลิงมากขึ้นมีผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่มีสำรองอยู่ในธรรมชาติลดลงเนื่องจากการสร้างเชื้อเพลิงขึ้นใหม่ต้องใช้เวลานาน และอีกปัญหาหนึ่งก็ตามมาจากการใช้พลังงานนั้นคือ ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทำให้เกิดมลพิษขึ้น ไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางอากาศหรือทางของเสียที่ได้จากกระบวนการ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพิจารณาและหาแนวทางแก้ไขปัญหา การประหยัดพลังงานโดยการใช้พลังงานที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเป็นหนึ่งในแนวทางแก้ไข หรือการหาแหล่งพลังงานใหม่ทดแทนที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือดีกว่าแหล่งพลังงานเดิม

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) เป็นหน่วยผลิตพลังงานใหม่อีกชนิดหนึ่งที่มีความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงคือการเปลี่ยนพลังงานเคมี (Chemical energy) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrochemical process) ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่ (battery) ทำให้ได้ไฟฟ้า และความร้อนโดยไม่ใช้เส้นทางของกระบวนการเผาไหม้ (combustion) เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะที่คล้ายกับแบตเตอรี่อีกประการคือการใช้เซลล์เชื้อเพลิงหน่วยเล็ก ๆ หลายหน่วยนำมาต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรมในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า สำหรับลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงที่แตกต่างจากแบตเตอรี่ คือ เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงในรูปของเหลวหรือแก๊สเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้า (electrode) ในเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ถูกใช้หมดไป

เซลล์เชื้อเพลิงถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกโดย Sir William Grove ในปี ค.ศ. 1893 [Larminie, 2000] โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง และแก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 แต่ไม่เป็นที่สนใจกันจนกระทั่งร้อยปีต่อมาจึงเริ่มมีการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงอย่างจริงจัง และได้รับการพัฒนาขึ้นมาอีกหลายรูปแบบ ในปี ค.ศ. 1957 Grubb [Larminie, 2000] ได้ทดลองใช้แผ่นแลกเปลี่ยนอิออน (ion

exchange membrane) เป็นอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นครั้งแรก และได้รับความสนใจจากชุมชนนักวิทยาศาสตร์อย่างมากจนมีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนอิออนถึงขั้นสามารถใช้งานได้ดี ในปัจจุบันมีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องทั้งในสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น รวมทั้งในยุโรป



รูปที่ 1.1 การทดลองของ Sir William Grove [Larminie, 2000]

จนกระทั่งในศตวรรษที่ 20 เรื่องของเซลล์เชื้อเพลิงได้รับความสนใจมากขึ้น ประกอบกับปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้ทวีความรุนแรงมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิของโลกที่สูงขึ้น และปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาและค้นคว้าเพื่อหาวิธีการผลิตพลังงานในรูปแบบใหม่ที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวและมีประสิทธิภาพสูง ระบบพลังงานแบบเดิมจำเป็นจะต้องสิ้นเปลืองในการหาระบบกำจัดที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อช่วยลดมลภาวะที่ปล่อยออกมา ด้วยเหตุนี้เซลล์เชื้อเพลิงจึงได้รับความสนใจศึกษาและพัฒนาเพื่อใช้เป็นระบบผลิตพลังงานปฐมภูมิในอนาคต

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ผลิตพลังงานปฐมภูมิที่มีประสิทธิภาพสูง และเป็นหน่วยผลิตพลังงานที่สะอาด ไม่ทำลายสภาพแวดล้อม เนื่องจากสิ่งที่ถูกปล่อยออกจากเซลล์เชื้อเพลิง มีเพียงน้ำและความร้อนปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น ตลอดการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่มีเสียงดังรบกวนเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ ลดปัญหาอันเนื่องมาจากแรงเสียดทาน รวมถึงปัญหาของการซ่อมบำรุงรักษาลดลง ปัจจุบันได้มีการค้นคว้าและพัฒนาจนมีเซลล์เชื้อเพลิงหลายประเภทแตกต่างกันไป โดยความแตกต่างอยู่ที่ส่วนของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้แล้วแต่ความเหมาะสมของงานที่จะนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้มีสมบัติพิเศษที่เหมาะสมกับการใช้งานกับรถยนต์ ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้ คือสภาวะการทำงานเกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันต่ำ จึงสะดวกในการทำงานไม่ต้องยุ่งยากในการเตรียมสภาวะสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง มีส่วนประกอบที่ไม่ยุ่งยากสามารถเข้าใจถึงส่วนต่าง ๆ และการทำงานได้ง่าย สามารถสร้างให้มีขนาดกะทัดรัดได้ ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการกัดกร่อน เริ่มทำงานได้รวดเร็วและเหมาะกับการทำงานที่สภาวะแบบไม่คงตัว (transient operation) ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานของรถยนต์ ด้วยเหตุผลของสภาพที่ง่ายและการออกแบบที่ดีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้จึงทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งาน แต่กระนั้นในการออกแบบหรือสร้างเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมีสิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญและคำนึงถึงอันได้แก่

- ระบบการจัดการน้ำ (water management)
- การควบคุมอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิง
- กระบวนการเชื่อมต่อเซลล์เชื้อเพลิง ในกรณีที่จะต่อเซลล์หลาย ๆ ตัวเข้าด้วยกัน
- การควบคุมความดันภายในเซลล์เชื้อเพลิง
- เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้และภาวะการทำงาน

วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและสร้างหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell test station)
2. ศึกษากลไกการทำงานและลักษณะการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน
3. ศึกษาผลของตัวแปร เช่น อัตราการไหลของเชื้อเพลิง ปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิง และองค์ประกอบของตัวออกซิไดส์ (oxidant) ที่มีผลต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจหลักการการทำงานและกลไกการเกิดปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน
2. ทราบถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เพื่อนำไปประยุกต์และปรับปรุงในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนต่อไป

บทที่ 2

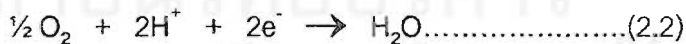
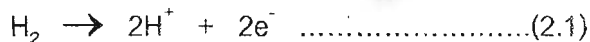
วารสารปริทัศน์

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง หมายถึง เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical reaction) ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงแบตเตอรี่ (battery) กล่าวอีกนัยหนึ่ง เซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง

2.1.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ในเซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีความพรุน 2 ขั้ว (ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด) จุ่มหรือสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเหลวและ/หรือของแข็ง เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สธรรมชาติหรือไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าไปยังขั้วแอโนด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดตามปฏิกิริยาที่ (2.1) โดยที่แก๊สเชื้อเพลิงจะปล่อยอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งถ่ายไปที่ขั้วแคโทดผ่านตัวนำจากภายนอก และ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิไดส์ไฮโดรเจน (ซึ่งก็คือไฮโดรเจนไอออน) จะแพร่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดกับแก๊สออกซิเจนตามปฏิกิริยาที่ (2.2) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ



จากปฏิกิริยาทั้งสองข้างต้น จะก่อให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง (direct current, DC) โดยที่ขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่เสมือนแหล่งปฏิกิริยา (reaction sites) เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไฟฟ้าของเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดส์ขึ้น

ขั้วแอโนดและแคโทดที่ใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงต้องมีสมบัติในการยอมให้แก๊สซึมผ่าน (permeable) และจะต้องนำกระแสไฟฟ้าได้ดี ในทางตรงกันข้ามอิเล็กโทรไลต์จะต้องไม่ยอมให้

แก๊สซึมผ่านและสามารถถ่ายเทโปรตอนได้ดี ในกรณีที่ต้องการให้ความต่างศักย์มีค่าสูงขึ้นสามารถทำได้โดยการต่อเซลล์เชื้อเพลิงหลาย ๆ เซลล์เข้าด้วยกันในลักษณะอนุกรม

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์จะถูกเรียกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบตรง (direct fuel cells) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบอ้อม (indirect fuel cells) เชื้อเพลิงจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สผสมที่มีองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนอยู่สูง โดยผ่านกระบวนการแตกโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (cracking of hydrocarbons) หรือผ่านกระบวนการปฏิรูปของแอลกอฮอล์แบบใช้ไอน้ำ กระบวนการเหล่านี้จะสำเร็จได้ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นในเครื่องปฏิรูป (reformer) ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนในขณะที่ปฏิกิริยาจากเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแบบคายความร้อน ดังนั้นความร้อนที่ผลิตขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกนำมาใช้กับปฏิกิริยาปฏิรูป

ปัจจุบันถึงแม้เซลล์เชื้อเพลิงจะได้รับความสนใจในการศึกษาค้นคว้าอย่างแพร่หลาย แต่ด้วยข้อจำกัดต่าง ๆ อาทิเช่น แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์และแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ รวมทั้งแพลทินัมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าที่มีราคาสูง อีกทั้งแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในแก๊สออกซิเจนหรือไฮโดรเจนแม้แต่ในปริมาณน้อยจะส่งผลเสียต่อความสามารถของแพลทินัม ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ข้อจำกัดดังกล่าวจึงเป็นอุปสรรคที่เกิดขึ้นในการใช้งานและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาทางแก้ไขปัญหาดังกล่าวเพื่อให้ได้เซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด และมีราคาเหมาะสม

2.1.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงโดยทั่วไปมีองค์ประกอบดังนี้

2.1.2.1 ขั้วไฟฟ้าหรือขั้วอิเล็กโทรด

ประกอบด้วยอย่างน้อย 2 ขั้วคือ ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด ในบางกรณีอาจมี 3 ขั้วคือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) เช่น ในการวัดแบบครึ่งเซลล์ ขั้วไฟฟ้านี้จะเป็นแหล่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน โดยอาศัยหลักการทางจลนพลศาสตร์ และการถ่ายเทมวลมาอธิบาย ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนผิวขั้วไฟฟ้า เช่น ค่าจำกัดศักย์ส่วนเกินค่าต่ำและค่าสูง (low and high overpotential limits), โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization), ปฏิกิริยาเคมีและความต้านทาน, ความสัมพันธ์ของ Butler-Volmer equation และ

อัตราการถ่ายเทประจุ ขั้วไฟฟ้าที่เลือกใช้ในปัจจุบันจะเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดที่ยอมให้แก๊สแพร่ผ่านได้ (gas diffusion electrode)

ขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวก อีออนลบ (anion) จะเคลื่อนที่เข้ามาและให้อิเล็กตรอนแก่ขั้วบวก ส่วนขั้วที่ทำหน้าที่เป็นขั้วลบ อีออนบวก (cation) จะเคลื่อนที่เข้ามาและรับอิเล็กตรอนจากขั้วลบ โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส ต้องมีสมบัติทนต่อการกัดกร่อน เช่น แพลทินัม หรือโลหะอื่นที่เคลือบด้วยแพลทินัม, แกรไฟต์ ซึ่งพยายามให้ผิวขั้วไฟฟ้าสัมผัสกับสารละลายมากที่สุด เพื่อให้ไอออนมีโอกาสเกิดปฏิกิริยามากที่สุด ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในเซลล์เชื้อเพลิงโดยส่วนมากจะใช้ผงแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าเนื่องจากผงแกรไฟต์มีจุดหลอมเหลวสูงและเป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี และมีอิเล็กตรอนอิสระซึ่งสามารถเคลื่อนที่ภายในผลึกได้ ทำหน้าที่เป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้า

2.1.2.2 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีบทบาทในเรื่องการถ่ายเทโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะมีทั้งแบบที่มีสถานะเป็นของแข็งและเป็นของเหลว ตัวอย่างเช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง ลักษณะจะเป็นเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก จะมีอิเล็กโทรไลต์เป็นกรด ได้แก่กรดฟอสฟอริก เป็นต้น คุณสมบัติสำคัญของอิเล็กโทรไลต์คือ ต้องมีความสามารถในการถ่ายโอนประจุได้ดี และจะต้องไม่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า

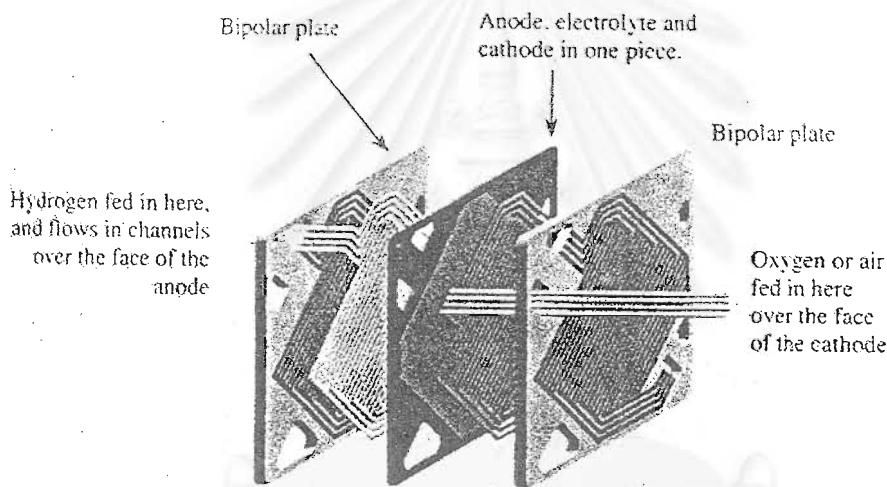
2.1.2.3 แผ่นสะสมกระแสแบบสองขั้ว (bi-polar current collector plates) [Larminie, 2000]

เซลล์เชื้อเพลิงเพียงหนึ่งเซลล์จะไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์จริง ๆ ได้มากนัก เนื่องจากค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงเพียงเซลล์เดียวมีค่าน้อยประมาณ (0.5-1.0 โวลต์) ดังนั้นในการใช้งานจริงเซลล์เชื้อเพลิงหลาย ๆ เซลล์จะถูกนำมาต่อกันแบบอนุกรม หรือเรียกว่า ห่อเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell stack) จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่ต้องการในห่อเซลล์เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่ต้องการ หรือกำลังไฟฟ้า (power) ซึ่งก็คือผลคูณของค่าความต่างศักย์กับกระแสจะเป็นตัวกำหนดขนาดของเซลล์ เช่น พื้นที่หน้าตัดที่ต้องการของเซลล์

เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์จะต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรมโดยคั่นหรือแยกด้วยแผ่นสะสมกระแสแบบสองขั้ว (bi-polar current collector plates) แผ่นสะสมกระแสอาจทำขึ้นจาก

แกรไฟต์ที่มีพอลิเมอร์เป็นตัวเชื่อม ซึ่งทำให้มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อน นอกจากนี้ในแผ่นสะสมกระแสยังมีโลหะอยู่ ได้แก่ ไทเทเนียม (titanium) เซอร์โคเนียม (zirconium) และนियोเบียม (niobium) ภายในแผ่นสะสมกระแสดังกล่าวจะถูกเจาะเป็นช่องเพื่อให้แก๊สไหลผ่าน และทำหน้าที่ช่วยกระจายแก๊สให้สัมผัสขั้วไฟฟ้าโดยใช้ช่องทางการไหลของแก๊สเป็นตัวกำหนดลักษณะการไหลของแก๊ส

แผ่นสะสมกระแสดังกล่าวข้างต้นยังมีหน้าที่ที่สำคัญอีก 2 อย่าง กล่าวคือ ทำหน้าที่เชื่อมต่อเซลล์ทางไฟฟ้าเป็นลักษณะการต่ออย่างอนุกรม อิเล็กตรอนที่ผลิตจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเซลล์จะถูกส่งต่อไปยังเซลล์ถัดไปโดยไหลผ่านแผ่นสะสมกระแส นอกจากนี้แผ่นสะสมกระแสยังทำหน้าที่แยกเซลล์ออกจากกัน นั่นคือ กันไม่ให้แก๊สที่ไหลผ่านขั้วแคโทดของเซลล์หนึ่งผสมเข้ากับแก๊สที่ป้อนเข้าขั้วแอโนดของเซลล์ที่อยู่ติดกัน



รูปที่ 2.1 แผ่นสะสมกระแสแบบสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง [Larminie, 2000]

2.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง [เอกสารประกอบการประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, 2543]

เซลล์เชื้อเพลิงจัดแบ่งตามประเภทอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ คือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline fuel cells, AFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตรอน (Proton exchange membrane fuel cells, PEMFC) หรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง (Solid polymer fuel cells, SPFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cells, PAFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม (Molten carbonate fuel cells, MCFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์

ของแข็ง (Solid oxide fuel cells, SOFC) นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงยังสามารถแบ่งตามอุณหภูมิการทำงานได้ดังนี้ เซลล์เชื้อเพลิงแบบอุณหภูมิต่ำจะทำงานที่อุณหภูมิ 80-200 องศาเซลเซียส เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นต้น ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับยานอวกาศและรถยนต์ ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงแบบอุณหภูมิสูงจะทำงานที่อุณหภูมิ 600-1000 องศาเซลเซียส เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเนตหลอม เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง เป็นต้น ซึ่งเหมาะในกรณีที่ต้องการผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนในปริมาณมาก ที่สภาวะอุณหภูมิสูง พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก จึงไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะตระกูลสูง เช่น แพลทินัม

เพื่อความเข้าใจเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละชนิด จึงได้มีการอธิบายเกี่ยวกับรายละเอียดคร่าว ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้เกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ดังนั้นจึงให้ความสำคัญกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยมีรายละเอียดเพื่อความเข้าใจของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline fuel cell, AFC)

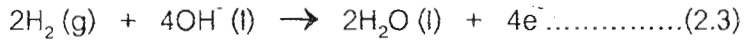
เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ จะเลือกใช้อิเล็กโทรไลต์แบบต่างมาทำการสร้างเซลล์เชื้อเพลิง เพราะเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้สามารถใช้โลหะที่ไม่ใช่พวกโลหะตระกูลสูง (non-noble metal) มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า และมีสมรรถนะการทำงานที่สูงอีกด้วย

สำหรับอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ คือ โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพราะสารละลายนี้มีคุณสมบัตินำไอออนได้สูงที่สุดในบรรดาไฮดรอกไซด์ของธาตุกลุ่มอัลคาไลน์ โดยที่สารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 30% จะให้ค่าการนำไอออนที่เหมาะสม ซึ่งจะให้ค่าความต่างศักย์สูงที่สุดที่ค่าความหนาแน่นกระแส (current density) เดียวกัน อุณหภูมิการทำงานของเซลล์จะอยู่ที่ประมาณ 5-240 °C นอกจากนี้โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ควรมีความบริสุทธิ์สูง เพราะสิ่งเจือปนอาจมีความเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ไม่ควรใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพราะหากมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เข้าไปในระบบ โซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดเป็นโซเดียมคาร์บอเนตซึ่งไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้น โซเดียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจะไปอุดรูพรุนของขั้วไฟฟ้าและทำให้ประสิทธิภาพของขั้วลดลง สามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากอากาศโดยการดูดซับกับน้ำโซดา

หลักการทํางานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดัง

นี้:

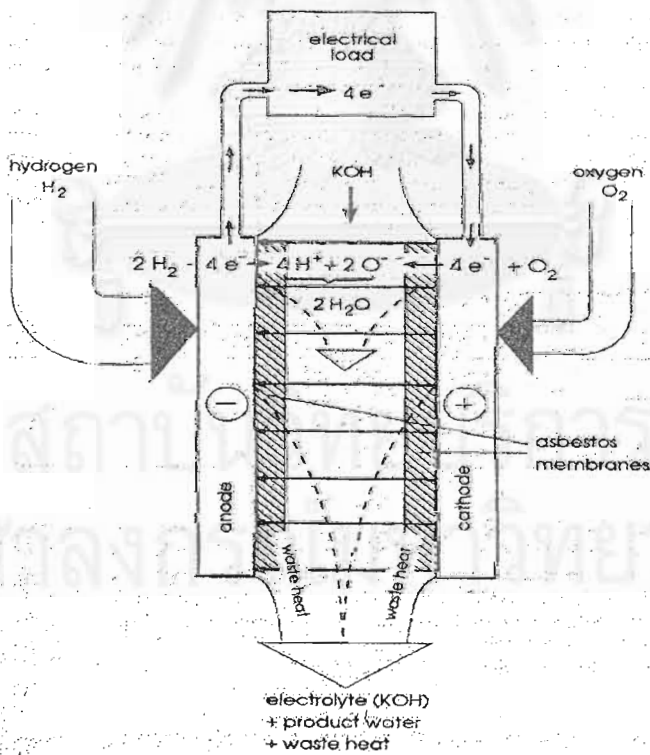
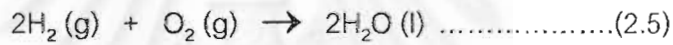
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยารวม



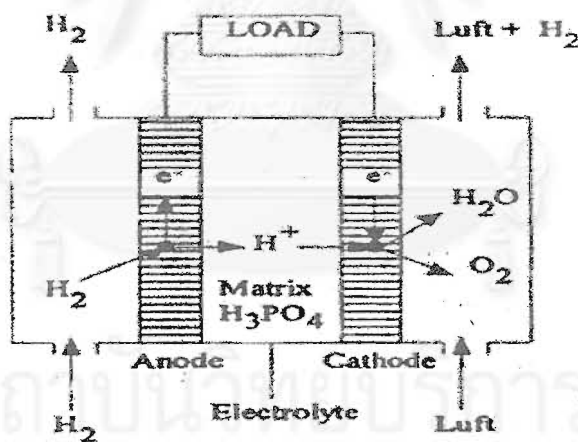
รูปที่ 2.2 หลักการทํางานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ [Kordesch, 1996]

2.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric fuel cells, PAFC)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริกจะใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยที่กรดฟอสฟอริกถูกบรรจุในเมทริกซ์ของซิลิคอนคาร์ไบด์ (silicon carbide) ซึ่งถูกประกบด้วยอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองด้าน โดยแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ขั้วแอโนด คือ แก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการปฏิรูป ส่วนแก๊สออกซิเจนคือ ออกซิเจนจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้วแคโทด และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ โลหะแพลทินัม ซึ่งกระจายตัวเกาะอยู่บนคาร์บอนแบล็ค โดยมีสารที่ไม่ชอบน้ำ คือ PTFE (เทฟลอน) เป็นตัวประสาน

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริกแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจนดังสมการที่ 2.1 และเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดดังสมการที่ 2.2 โดยปฏิกิริยารวมเป็นดังสมการที่ 2.5

อุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีค่าอยู่ในช่วง $170-200^{\circ}\text{C}$ ซึ่งที่สภาวะนี้ สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีความเสถียร เซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้สามารถใช้อากาศที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปนอยู่ได้เนื่องจากสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูงปานกลางนี้ จะช่วยลดความเป็นพิษของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้



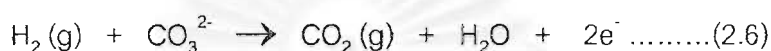
รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก [Kordesch, 1996]

2.2.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม (Molten carbonate fuel cells, MCFC)

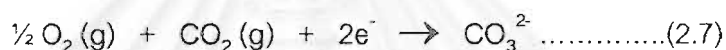
เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม จะใช้ของผสมของเกลือลิเทียมคาร์บอเนตกับเกลือโบรอนคาร์บอเนตที่เกาะอยู่บนตัวกลาง LiAlO_2 ใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์

หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้

ปฏิริยาที่ขั้วแอโนด

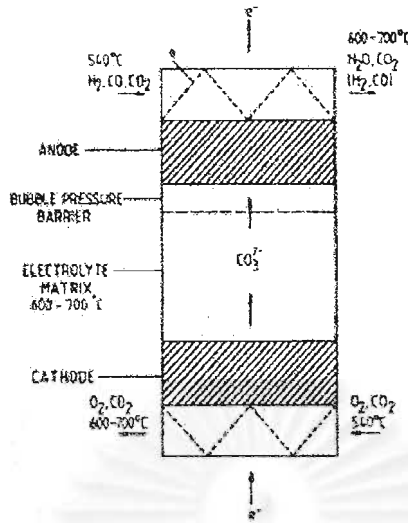


ปฏิริยาที่ขั้วแคโทด



ปฏิริยารวมเป็นดังสมการที่ 2.5 และได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์

จากปฏิริยาที่ขั้วไฟฟ้า แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากขั้วแอโนดจะถูกใช้ที่ขั้วแคโทด ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อการทำงานของเซลล์ โดยมีอุณหภูมิการทำงานในช่วง $500-700^\circ\text{C}$ ด้วยสถานะอุณหภูมิที่สูงนี้ จึงไม่จำเป็นต้องมีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิริยา นอกเหนือจากแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงแล้ว ยังสามารถใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนป้อนเข้าสู่เซลล์โดยตรง โดยจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนด้วยกระบวนการปฏิรูป (reforming process) ส่วนเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปคาร์บอนแข็งจะต้องผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) ก่อน สำหรับแก๊สที่ได้จากการเผาถ่านโค้ก (ถ่านหิน) และอากาศ จะถูกใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์ตามลำดับ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะไม่เป็นพิษต่อขั้วแอโนด ในขณะที่ H_2S ที่ติดปนมากับเชื้อเพลิงจะก่อให้เกิดปัญหาต่อพื้นผิวขั้วไฟฟ้า



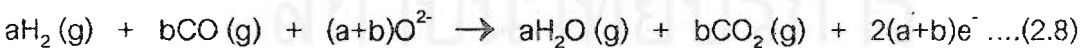
รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม [Kordesch, 1996]

2.2.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cells, SOFC)

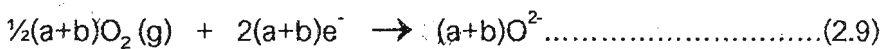
เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งได้รับความสนใจที่จะนำมาพัฒนาในการผลิตไฟฟ้าเชิงอุตสาหกรรมเนื่องจากมีสภาวะการทำงานที่สูง และทนต่อสิ่งเจือปนในสารตั้งต้น ทำให้สามารถใช้กับแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดจากกระบวนการปฏิรูป (reforming) ได้

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้

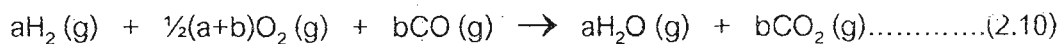
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



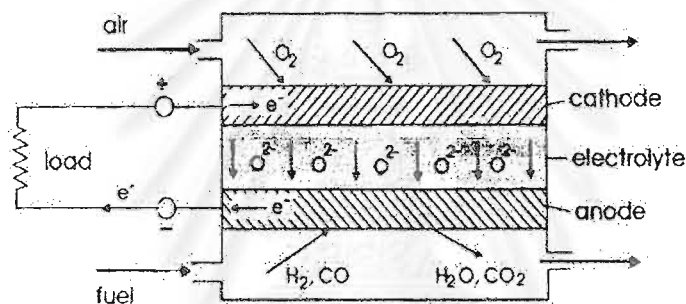
ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยารวม



ในระบบ SOFC ทั้งขั้วไฟฟ้าและสารอิเล็กโทรไลต์ ทำมาจากวัสดุเซรามิกพวกออกไซด์ของแข็ง เช่น yttria หรือ เซอโคเนีย (zirconia) โดยจะมีความสามารถเป็นตัวนำไอออน O^{2-} ที่อุณหภูมิสูงกว่า 800°C การไหลเวียนกลับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากทางออกขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น แก๊สธรรมชาติ แก๊สจากถ่านหินหรือเชื้อเพลิงที่สามารถระเหยได้จะถูกปฏิรูปให้กลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนในตัวเซลล์เชื้อเพลิง และความร้อนที่เกิดจากกระบวนการสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง [Kordesch, 1996]

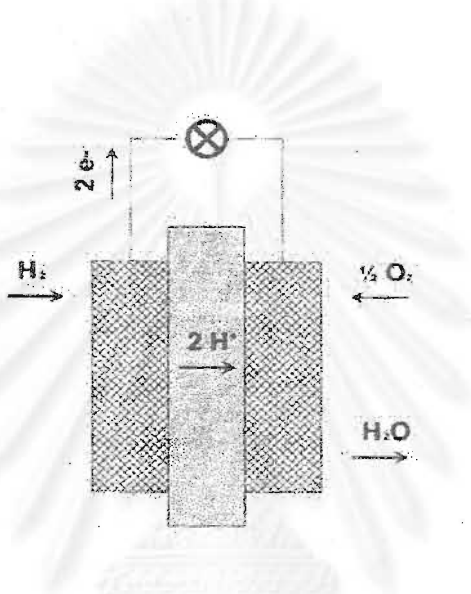
2.2.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel cell, PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน หรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งต้องมีการเคลื่อนที่ เช่น รถยนต์ เพราะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง แต่มีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิและความดันต่ำ คืออยู่ในช่วง $60-100^\circ\text{C}$

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนประกอบด้วยแผ่นโพลิเมอร์ของแข็ง (ซัลโฟเนตโพลีเอทเธอร์ซัลโฟเนต) ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ คือเป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยจะถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัมเกาะอยู่ น้ำที่เกิดจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าจะถูกกำจัดออกจากเซลล์มากับแก๊สทางด้านแคโทด

ส่วนความร้อนที่เกิดจะถูกดึงออกโดยระบบหล่อเย็น ประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งถ่ายไอออนของไฮโดรเจน ดังนั้นแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ใช้ต้องทำให้มีความชื้น เพราะกระบวนการนำไอออนของเยื่อแผ่นจะเกิดขึ้นไม่ได้หากเยื่อแผ่นไม่มีน้ำ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนไม่สามารถทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ เพราะจะมีความเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลทินัม

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนแสดงในรูป 2.6 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาเดียวกับที่เกิดในเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก



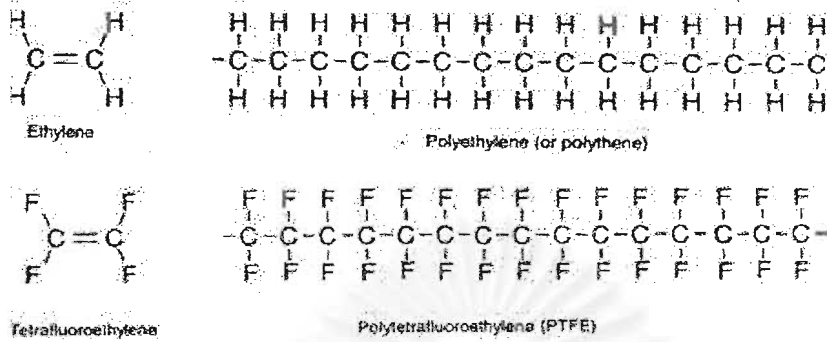
รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [Mennola, 2000]

จะพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีอิเล็กทรอนิกส์และขั้วไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญและมีลักษณะพิเศษเฉพาะ ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.2.5.1 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) [Larminie, 2000]

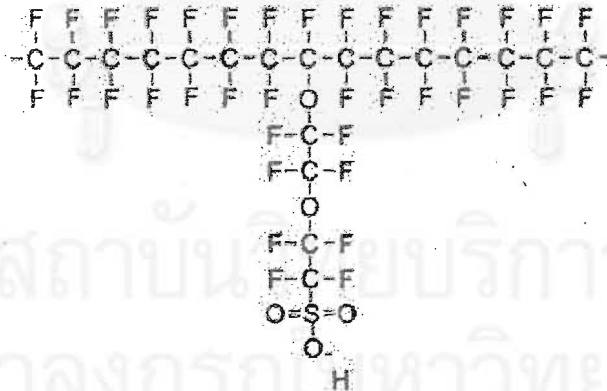
เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมีโครงสร้างหลักเป็นสารพอลิเมอร์จำพวกซัลโฟเนต ฟลูออโรพอลิเมอร์ (sulphonated fluoropolymers) หรือ ฟลูออโรเอทิลีน (fluoroethylene) การเตรียมพอลิเมอร์ทำได้โดยการให้ฟลูออรีนแทนที่ตำแหน่งของไฮโดรเจนในโมเลกุลของเอทิลีนเรียกกระบวนการนี้ว่า เปอร์ฟลูออรีนชัน (perfluorination) ได้โครงสร้างที่เรียกว่า เตตระ ฟลูออโรเอทิลีน (tetrafluoroethylene) เมื่อโมเลกุลเรียงต่อกันจะได้พอลิเมอร์ที่เรียกว่า

พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene) หรือ PTFE ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ความแข็งแรงของพันธะระหว่างฟลูออรีนกับคาร์บอนทำให้พอลิเมอร์มีความทนทาน



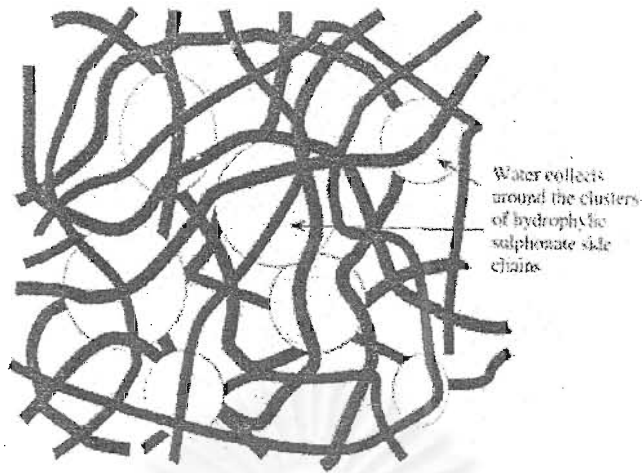
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเอทิลีนและเตตระฟลูออโรเอทิลีน [Larmine, 2000]

นอกจากนี้การเตรียมอิเล็กโทรไลต์จะทำโดยการเพิ่มส่วนของซัลโฟเนต (sulfonate) ซึ่งได้มาจากกรดซัลโฟนิก (sulfonic acid) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 กระบวนการนี้เป็นที่นิยมในกระบวนการทางเคมีเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่นในกระบวนการทำลิตกัณฑ์เพื่อทำความสะอาด โมเลกุลของกรดซัลโฟนิกจะสร้างพันธะที่ปลายของพอลิเมอร์กลายเป็นหมู่ SO_3^- ในส่วนปลายช่วงนี้เป็นช่วงที่ชอบน้ำ (hydrophilic) มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของซัลโฟเนต ฟลูออโรเอทิลีน [Larmine, 2000]

ในส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic regions) จะทำหน้าที่ในการดูดซึมน้ำไว้ในอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยส่วนนี้จะมีแรงพันธะในการยึดกันระหว่างหมู่ SO_3^- กับ H^+ ชอนลง ทำให้ H^+ สามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีการดูดซึมน้ำเอาไว้ [Larminie, 2000]

เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์จะต้องมีสมบัติดังต่อไปนี้ [เอกสารประกอบการประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, 2543]

- 1) มีค่าการนำไอออนสูงแต่มีค่าการนำอิเล็กตรอนต่ำ
- 2) มีค่าการแพร่ของแก๊สต่ำ
- 3) มีขนาดที่แน่นอน (ไม่มีการบวม)
- 4) มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง
- 5) มีค่าการแพร่ของน้ำต่ำ
- 6) มีความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำหรือมีความต้านทานต่อการเกิดดีไฮเดรชัน (hydration)
- 7) มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน รีดักชัน และไฮโดรไลซิส (hydrolysis)
- 8) มีค่าการถ่ายเทแคตไอออน (cation) สูง
- 9) พื้นผิวของเยื่อแผ่นต้องสามารถเชื่อมตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกาะบนพื้นผิวได้ดี มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity)

2.2.5.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode) [เอกสารประกอบการประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, 2543]

ขั้วไฟฟ้าชนิดที่ยอมให้แก๊สแพร่ผ่าน (gas diffusion electrodes) ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงรุ่นแรกๆ ประกอบด้วยแพลทินัมแบบที่ไม่มีตัวรองรับ และแพลทินัมแบบที่มีตัวรองรับ (supported platinum) คือ แพลทินัมที่เกาะอยู่บนคาร์บอน โดยมีตัวเสริมความแข็งแรงที่มาจากผ้าหรือกระดาษคาร์บอน (carbon backing) และใช้สารละลายอิมัลชันของเทฟลอน (teflon emulsion) เป็นตัวยึดอนุภาคของแพลทินัมให้ติดอยู่บนกระดาษคาร์บอน ต่อมาภายหลังได้ทำการผลิตขั้วไฟฟ้าโดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยามายึดติดบนเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนโดยตรงซึ่งทำได้ 2 แบบคือ

1. การใช้แพลทินัมดำ (platinum black) มาอัดด้วยความร้อน (hot pressing) ให้ติดโดยตรงบนเยื่อแผ่นโดยค่าอุณหภูมิที่ใช้มีค่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงสถานะแก้วและอุณหภูมิที่เกิดการเชื่อม
2. การทำขั้วไฟฟ้าแบบชั้นฟิล์มบาง โดยนำแพลทินัมมาเกาะบนตัวรองรับก่อน จากนั้นนำไปเกาะบนเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีการการฝังโดยตรง (direct impregnation method) และการแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange) วิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบนี้จะให้สมรรถนะการทำงานที่ดีกว่าวิธีแรก เนื่องจากใช้แพลทินัมในปริมาณที่น้อยกว่าถึง 10 เท่า แต่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสที่มากกว่าถึง 3 เท่า วิธีการนี้เป็นวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีการกระจายตัวของแพลทินัมสูง จึงเป็นการลดปริมาณการใช้แพลทินัม

2.3 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

ตัวแปรต่าง ๆ เช่น ปริมาณน้ำในเซลล์ อุณหภูมิ ความดัน จะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด จึงควรที่จะทราบว่าตัวแปรต่าง ๆ มีอิทธิพลต่อการทำงานของเซลล์อย่างไร จากการรวบรวมผลงานที่ผ่านมาพอจะกล่าวถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังนี้

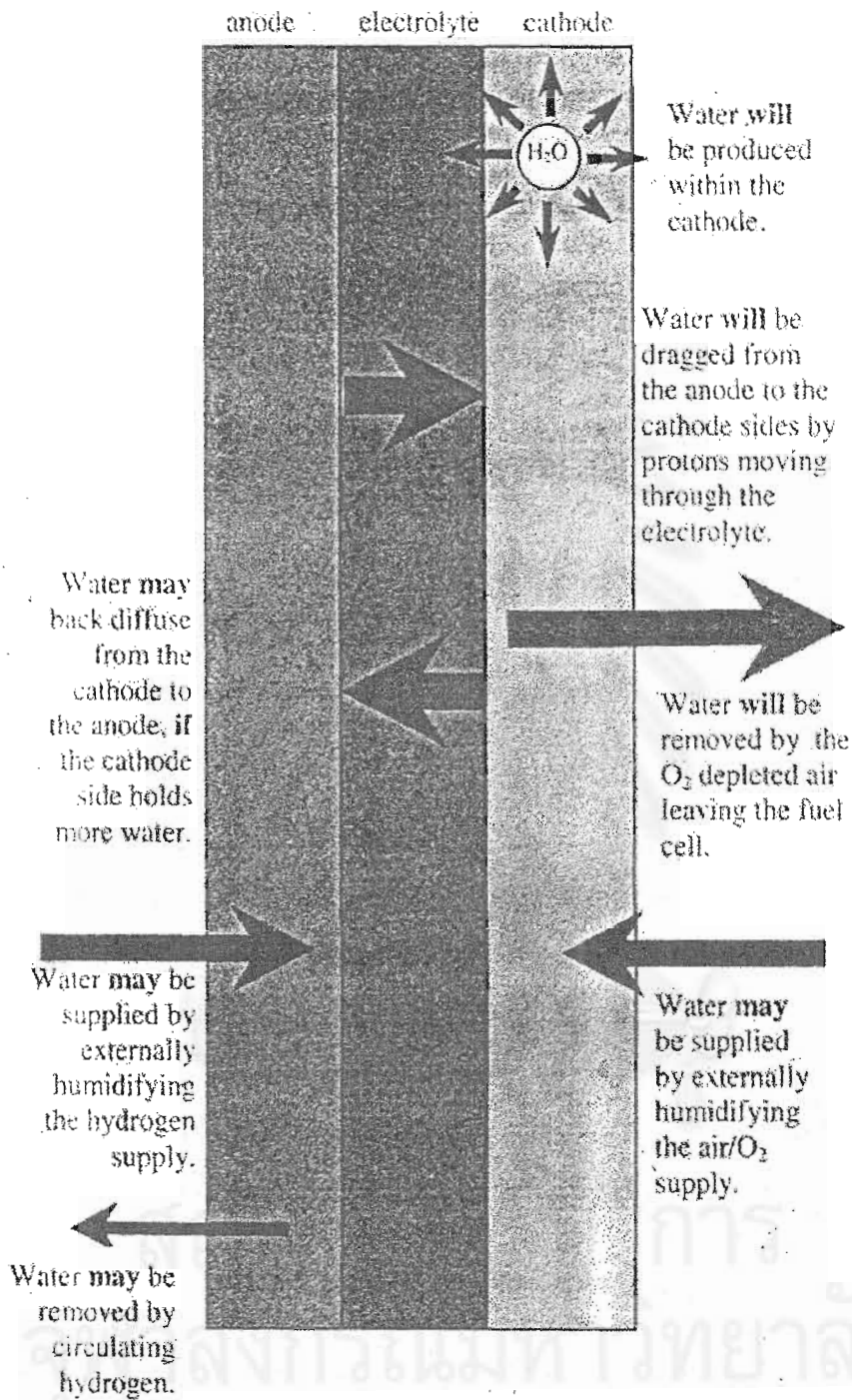
2.3.1 อิทธิพลของน้ำที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ [Larminie, 2000]

ประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งถ่ายไอออนของไฮโดรเจนและกระบวนการนำไอออนของเยื่อแผ่นจะไม่เกิดขึ้นหากในเยื่อแผ่นไม่มีความชื้นอยู่ ดังนั้นปริมาณน้ำในเยื่อแผ่นจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อค่าการนำไอออน ถ้าในเยื่อแผ่นมีปริมาณน้ำน้อยจะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านไอออนของเยื่อแผ่นลดลง แต่ถ้าปริมาณน้ำในเยื่อแผ่นมีมากเกินไป น้ำจะไปอุดตันรูพรุนบนขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดแก๊สแพร่ผ่านเข้าทำปฏิกิริยาได้ยาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง

ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ไฮโดรเจนไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจากแอโนดไปแคโทด โดยมีโมเลกุลของน้ำเป็นตัวพาไปประมาณ 1-2.5 โมเลกุลน้ำต่อไอออน [Zawodzinski, 1993] เรียกกระบวนการนี้ว่า electro-osmotic drag สำหรับการดำเนินการที่ค่าความหนาแน่นกระแสสูง ๆ กระบวนการดังกล่าวอาจจะทำให้เยื่อแผ่นฝั่งแอโนดแห้งได้ อีกกรณีหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาการแห้งของเยื่อแผ่นคือ ใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์ที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป [Larminie, 2000] อากาศจะทำให้ขั้วไฟฟ้าแห้งได้เร็วกว่าปริมาณน้ำที่ผลิตได้จากปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด วิธีที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวคือการเพิ่มความชื้นให้กับอากาศและไฮโดรเจนก่อนที่ผ่านแก๊สเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง

รูปที่ 2.10 แสดงปรากฏการณ์การเกิดน้ำจากทุกกระบวนการภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ด้านบนสุดของรูปที่ 2.10 เป็นน้ำที่ผลิตขึ้นได้จากปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด ส่วนการแพร่ของน้ำภายในเซลล์ระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน และสมดุลย์ของปริมาณความชื้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว ดังนั้นการมีระบบเพิ่มความชื้นให้กับแก๊สเชื้อเพลิงก่อนที่จะป้อนเข้าเซลล์จะช่วยลดปัญหาความสมดุลย์ของความชื้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาการเกิดน้ำที่เกิดขึ้นทุกกระบวนการในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [Larminie, 2000]

2.3.2 อิทธิพลของค่าความดันของแก๊สที่ป้อนเข้าขั้วแอโนดและแคโทด

[Larminie, 2000]

การเพิ่มความดันแก๊สโดยเฉพาะอย่างยิ่งแก๊สที่เป็นสารออกซิไดส์ จะมีผลทำให้ค่าความต่างศักย์ของเซลล์มีค่ามากขึ้น และมีค่าโดยประมาณคือ

$$\Delta E_{cell} = \left(\frac{RT}{2F} \right) \ln \left(\frac{P''}{P'} \right) \dots \dots \dots (2.11)$$

เมื่อ	ΔE_{cell}	คือ	ค่าความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้น (volt)
	R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant) มีค่า 8.314 J/mol K
	T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
	F	คือ	ค่าคงที่ฟาราเดย์ (faraday 's constant) มีค่า 96,489 A s/mol
	P''	คือ	ค่าความดันสุดท้าย (atm)
	P'	คือ	ค่าความดันเริ่มต้น (atm)

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ควรทำงานที่ค่าความดันสูง ค่าความดันในการทำงานโดยปกติมีค่าอยู่ในช่วง 300-500 kPa ทั้งแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน แต่กรณีที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์ เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ความดันสูงช่วยลดปัญหาการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้ เนื่องจากเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์โอกาสที่ความเข้มข้นของออกซิเจนบริเวณขั้วไฟฟ้าจะลดลงเร็วกว่าการใช้ออกซิเจน ทำให้ความแตกต่างของความดันระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดกับแคโทดมีมากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ดังนั้นการเพิ่มความดันให้กับระบบจะเป็นการช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้

2.3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [เอกสารประกอบการประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1; 2542]

ในกรณีอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูง โพลาริเซชันในทางเคมีจะลดลง เพราะเมื่ออุณหภูมิสูง อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์ดีขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิการทำงานมีค่าสูงมากเกินไป ค่าความต่างศักย์จะลดลงอย่างรวดเร็ว

เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสูง โอกาสที่เยื่อแผ่นภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะเกิดการสูญเสียน้ำออกไปจะเป็นไปได้สูง ทำให้ขาดความสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง และค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉพาะกรณีที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จึงต้องมีการเพิ่มระบบให้ความชื้นกับแก๊สก่อนที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง

2.4 อุณหพลศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง (Thermodynamics of fuel cell) [McDougall, 1976; Kordesch, 1996]

เซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการของกระบวนการเคมีไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในกระบวนการสามารถอธิบายด้วยหลักการทางอุณหพลศาสตร์ได้ดังนี้

จากความสัมพันธ์ทางอุณหพลศาสตร์ในกฎข้อที่ 1 และงานที่ได้จากกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า จะอยู่ในรูปของพลังงานเสรีกิบส์ (Gibbs Free Energy, G) จะได้ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานดังสมการที่ 2.12

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta PV + \Delta G \dots \dots \dots (2.12)$$

- โดยที่ ΔU คือ พลังงานภายในระบบที่เปลี่ยนแปลง (J)
- ΔQ คือ พลังงานความร้อนแลกเปลี่ยนกับสิ่งแวดล้อม (J)
- ΔP คือ ความดันของระบบที่เปลี่ยนแปลง (Pa)
- ΔV คือ ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง (m^3)
- ΔG คือ พลังงานเสรีกิบส์ (J)

เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากจุดสมดุลเล็กน้อย เนื่องจากระบบเป็นกระบวนการแบบผันกลับได้ (reversible processes) ดังนั้นสามารถใช้กฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์ แทนเทอมของพลังงานความร้อนในรูปของเอนโทรปี ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบเมื่อเซลล์ทำงานที่ภาวะอุณหภูมิและความดันคงที่ จะแสดงได้ดังสมการที่ 2.13

$$dU = TdS - PdV + \Delta G \dots \dots \dots (2.13)$$

เนื่องจากพลังงานเสรีของกิบส์เป็นปริมาณที่ขึ้นกับจำนวนโมลของสาร (extensive factor) ทำให้ไม่สะดวกในการระบุสมบัติของสาร ดังนั้นจึงนิยามในเทอมของศักย์เคมี (chemical potential, μ) ที่ไม่ขึ้นกับจำนวนโมลของสาร (intensive factor) เพื่อระบุสมบัติของสารดังสมการที่ 2.14 เมื่ออุณหภูมิและความดันคงที่

$$dG = \mu_1 dn_1 + \dots + \mu_j dn_j = \sum_{i=1}^j \mu_i dn_i \dots \dots \dots (2.14)$$

เมื่อ $n_{j \neq i}$ หมายถึงสารทุกตัวที่เกี่ยวข้องยกเว้นสารตัวที่ i

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, P, n_{j \neq i}} \dots \dots \dots (2.15)$$

ในทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะวัดค่าศักย์เคมีได้โดยตรง แต่จะวัดค่าความดันแก๊สหรือความเข้มข้นของสารละลาย และอุณหภูมิ แล้วนำมาคำนวณค่าศักย์เคมี ดังนั้นจึงต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างศักย์เคมีกับความดันแก๊ส เมื่อแทนค่าพลังงานเสรีของกิบส์สมการที่ 2.14 ในสมการ 2.13 จะได้การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบเป็นดังสมการที่ 2.16

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^j \mu_i dn_i \dots \dots \dots (2.16)$$

จากสมการที่ 2.12 เมื่อระบบทำงานที่สภาวะที่ค่าอุณหภูมิและความดันไม่คงที่ จะได้ว่า

$$dG = dU + PdV + VdP - TdS - SdT \dots \dots \dots (2.17)$$

แทนค่า dU จากสมการ 2.16 ลงในสมการ 2.17 จะได้

$$dG = VdP - SdT + \sum_{i=1}^j \mu_i dn_i \dots \dots \dots (2.18)$$

พิจารณาเปรียบเทียบกับสมการ 2.14 จะเห็นว่า มีเทอมหน้า 2 เทอมเพิ่มเข้ามา เพราะว่าไม่ได้ใช้เงื่อนไขที่อุณหภูมิ และความดันคงที่นั่นเอง ในกรณีนี้ที่อุณหภูมิและจำนวนโมลของสารคงที่ และพิจารณาผลของความดันต่อการเปลี่ยนแปลงของพลังงานเสรีของกิบส์ จะได้ว่า

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{T,n_i} = V \dots \dots \dots (2.19)$$

สำหรับแก๊สอุดมคติ สมการที่ 2.19 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.20

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{T,n_i} = \frac{nRT}{P} \dots \dots \dots (2.20)$$

เมื่ออินทิเกรตจากความดัน P° ถึง P ใด ๆ ทำให้สมการที่ 2.20 เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$G - G^\circ = nRT \ln \frac{P}{P^\circ} \dots \dots \dots (2.21)$$

เมื่อ P° เป็นความดันมาตรฐาน 1 บรรยากาศ และ G° เป็นพลังงานเสรีของ กิบส์ที่ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 298 เคลวิน ในกรณีที่มีแก๊สอุดมคติหลายชนิดผสมกันอยู่และแก๊สแต่ละชนิดจะประพฤติแบบแก๊สเดี่ยว ดังนั้นจึงคิดเฉพาะความดันย่อยของแต่ละแก๊ส เช่น แก๊ส i ทำให้เกิดความดันย่อย P_i ก็จะได้ว่า

$$G_i - G_i^\circ = n_i RT \ln \frac{P_i}{P_i^\circ} \dots \dots \dots (2.22)$$

โดยนิยามของศักย์เคมีในสมการที่ 2.14 แล้วจะได้ว่าค่าศักย์เคมีของแก๊สอุดมคติที่อุณหภูมิ T , ความดัน P_i ของสาร i ดังสมการ

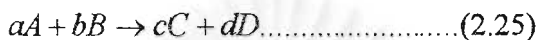
$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln \frac{P_i}{P_i^\circ} \dots \dots \dots (2.23)$$

สำหรับกรณีทั่วไปแล้วจะใช้ค่าแอกทิวิตี (activity) แทนความดันหรือความเข้มข้นดังนั้น

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln a_i \dots \dots \dots (2.24)$$

โดย $a_i = P_i/P_i^\circ$ เมื่อเป็นแก๊ส และ $a_i = r_i C_i/C_i^\circ$ เมื่อเป็นสารละลาย ทั้งนี้ P_i° และ C_i° เป็นความดันมาตรฐานและความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นตามลำดับ ส่วน r_i เป็นสัมประสิทธิ์ของแอกทิวิตี (activity coefficient) จะมีค่าเป็น 1 ในกรณีของสารละลายอุดมคติ โดยทั่วไปแล้ว r_i มีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

ในกรณีของปฏิกิริยาทั่วไป คือ



จะได้พลังงานเสรีกิบส์ คือ

$$\Delta G = c\mu_C + d\mu_D - a\mu_A - b\mu_B \dots \dots \dots (2.26)$$

และที่สภาวะมาตรฐาน คือ

$$\Delta G^\circ = c\mu_C^\circ + d\mu_D^\circ - a\mu_A^\circ - b\mu_B^\circ \dots \dots \dots (2.27)$$

แทนค่าสมการที่ 2.24 และ 2.27 ลงในสมการที่ 2.26 จะได้ว่า

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{a_C^c a_D^d}{a_A^a a_B^b} \dots \dots \dots (2.28)$$

เนื่องจากค่าแอกทิวิตีสามารถแทนได้ด้วยค่าความเข้มข้น ดังนั้นสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \dots \dots \dots (2.29)$$

เมื่อ ΔG° เป็นผลต่างของพลังงานเสรีของกิบส์ระหว่างสารที่ได้กับตัวทำปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐาน คือ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 298 เคลวิน และ [A], [B], [C] และ [D] เป็นความเข้มข้นของสารตามสมการ 2.25 โดยที่ a, b, c, d เป็นตัวเลขแสดงจำนวนโมลของสารที่

เข้าทำปฏิกิริยาและสารที่ได้ จากความสัมพันธ์ของพลังงานเสรีของกิบส์และพลังงานไฟฟ้าดังสมการที่ 2.30 คือ

$$\Delta G = -n_e F \Delta E_{cell} \dots\dots\dots(2.30)$$

โดยที่ n_e คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ (faraday 's constant) มีค่า 96,489 As/mol

ΔE_{cell} คือ ค่าผลต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดและขั้วแอโนด

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 2.28 จะได้ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าตามสมการของเนินสต์ คือ

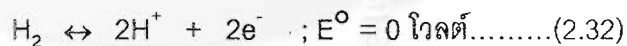
$$E_{cell} = E_{cell}^{\circ} - \frac{RT}{n_e F} \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \dots\dots\dots(2.31)$$

เมื่อ E_{cell} เป็นศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ T และ E_{cell}° เป็นศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะมาตรฐาน

ฐาน

ในเซลล์เชื้อเพลิงจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันได้ดังนี้

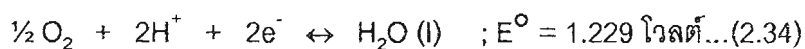
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



สามารถเขียนในรูปสมการของเนินสต์คือ

$$E_{H_2} = E_{H_2}^{\circ} - \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{[H^+]^2}{[H_2]} \right] \dots\dots\dots(2.33)$$

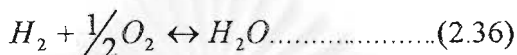
ปฏิกิริยารีดักชัน



สมการความสัมพันธ์ในรูปสมการของเนินสต์คือ

$$E_{O_2} = E_{O_2}^o - \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{[H_2O]}{[O_2]^{1/2} [H^+]^2} \right] \dots \dots \dots (2.35)$$

จากปฏิกิริยารีดอกซ์ในสมการที่ 2.36



ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (E_{cell}) ได้จากผลต่างของศักย์รีดักชัน (reduction potential) ของครึ่งเซลล์ออกซิเจนและครึ่งเซลล์ออกซิเดชัน (oxidation potential) ของครึ่งเซลล์ไฮโดรเจน ดังนี้

$$E_{cell} = 1.229 - \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{[H_2O]}{[O_2]^{1/2} [H_2]} \right] \dots \dots \dots (2.37)$$

โดย $E_{H_2}^o = 0$ โวลต์ และ $E_{O_2}^o = 1.229$ โวลต์ เมื่อเทียบกับครึ่งเซลล์มาตรฐานไฮโดรเจน และ $[H_2O] = 1$ เพราะผลที่ได้จากปฏิกิริยาเป็นน้ำบริสุทธิ์ ส่วน $[O_2]$ สามารถแทนด้วยความดันแก๊สออกซิเจนและ $[H_2]$ สามารถแทนด้วยความดันแก๊สไฮโดรเจน ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$E_{cell} = 1.229 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{1}{P_{O_2}^{1/2} P_{H_2}} \dots \dots \dots (2.38)$$

จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความดันของเชื้อเพลิง และความดันของตัวออกซิไดส์ในรูปลอการิทึม ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันจะมีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์เพียงเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นหาได้จากสมการ 2.18 ที่ P และ η_c คงที่จะได้

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P,n_i} = -S \dots \dots \dots (2.39)$$

จากความสัมพันธ์ของพลังงานเสรีของกิบส์และเอนทัลปีดังสมการ

$$G = H - TS \dots \dots \dots (2.40)$$

แทนในสมการที่ 2.39 จะได้

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P,n_i} = \frac{G - H}{T} \dots \dots \dots (2.41)$$

ในกรณีที่น่ามาใช้กับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจากเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดส์ไปเป็นสารที่ได้ สมการ 2.41 สามารถเขียนได้ว่า

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P,n_i} = \frac{\Delta G - \Delta H}{T} \dots \dots \dots (2.42)$$

และสามารถเขียนในเทอมของศักย์ไฟฟ้า ก็จะได้สมการกิบส์-เฮมโฮลท์ (Gibbs - Helmholtz equation)

$$E = -\frac{\Delta H}{n_e F} + T \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_P \dots \dots \dots (2.43)$$

จะเห็นว่าพลังงานเสรีของกิบส์และศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ตามสมการ 2.42 และสมการ 2.43

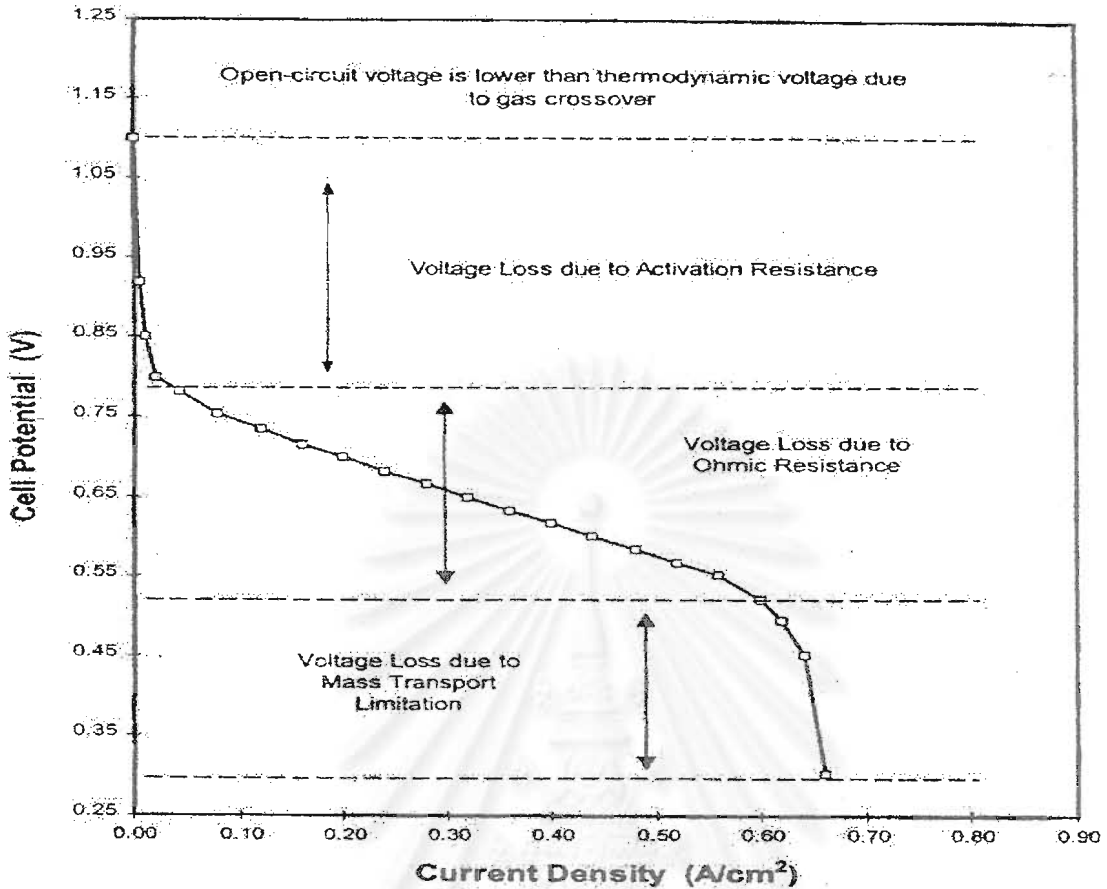
2.5 โพล่าไรเซชัน (Polarization)

เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงถูกต่อเข้ากับวงจรภายนอกและมีการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ แต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าที่ลดลงไม่เท่ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี หรือที่ได้จากกระบวนการผันกลับได้ (reversible process) ซึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนจะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีจะประมาณ 1.229 โวลต์ ซึ่งผลต่างระหว่างค่าความต่างศักย์จริงที่จ่ายให้กับวงจรภายนอกกับค่าความต่างศักย์ตามกระบวนการผันกลับได้ตามหลักของอุณหพลศาสตร์ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (overpotential) การลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากค่าจริงเกิดในกระบวนการที่เรียกว่า โพล่าไรเซชัน (Polarization) โดยการเกิดโพล่าไรเซชันนั้นจะเกิดขึ้นทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (E_{cell}) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$E_{cell} = E_{cell}^{\circ} - |\varepsilon_c| - |\varepsilon_a| - IR \dots \dots \dots (2.44)$$

โดยที่	E_{cell}°	คือ	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน
	ε_c	คือ	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแคโทด
	ε_a	คือ	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนด
	IR	คือ	เทอมของศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดจากความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง มาเขียนกราฟโพล่าไรเซชันแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน [Wood, 1998]

จากกราฟรูปที่ 2.11 แสดงการเกิดโพลาริเซชันจะพบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ ศูนย์ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี โดยเรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (open-circuit potential) ซึ่งเกิดจากการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (cross over) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เมื่อแก๊สข้ามไปยังอีกฝั่งหนึ่งจะเกิดการเกิดปฏิกิริยากับผิวขั้วไฟฟ้า ตัวอย่างเช่นเมื่อแก๊สไฮโดรเจนแพร่ข้ามไปยังขั้วแคโทดก็เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น ประกอบกับฝั่งขั้วแคโทดมีแก๊สออกซิเจน จึงเกิดปฏิกิริยารีดักชันภายในขั้วแคโทดเดียวกัน ส่งผลให้เกิดกระแสภายใน (internal current) [Larminie, 2000] ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแคโทด เช่นเดียวกันกับฝั่งแอโนดที่มีการแพร่ข้ามของออกซิเจน ก็จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนดเช่นเดียวกัน จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง

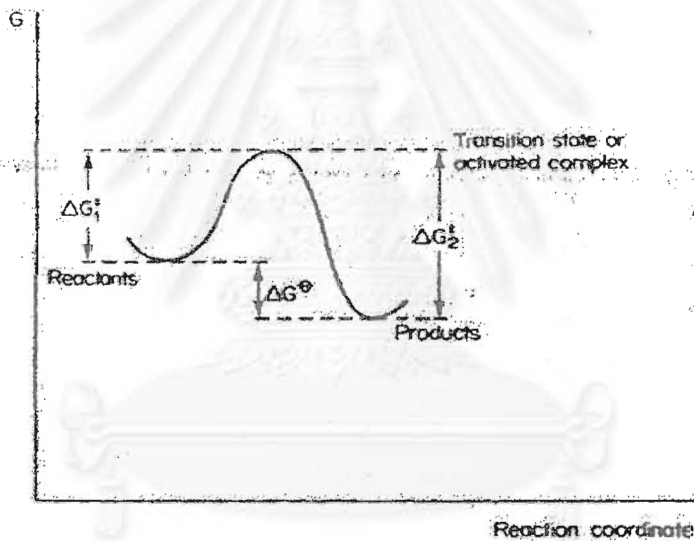
เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.11 จะพบว่ามี การลดลงของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากการเกิดโพลาริเซชัน โดยเมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่าสามารถแบ่งช่วงการเกิดโพลาริเซชันออกได้เป็น 3 ช่วงคือ โพลาริเซชันทางเคมี (Chemical Polarization) โพลาริเซชันเนื่องจาก

ความต้านทาน (Resistance Polarization) และโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization)

2.5.1 โพลาไรเซชันทางเคมี (Activation Polarization or Chemical polarization)

[McDougall, 1976]

โพลาไรเซชันทางเคมีเกิดเนื่องจากผลของปฏิกิริยาทางเคมีและกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ ประกอบกับการที่โมเลกุลหรืออะตอมถูกดูดซับที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถเปรียบได้กับพลังงานกัมมันต์ (activation energy) รูปที่ 2.12 เป็นกราฟที่แสดงถึงกระบวนการที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ พิจารณาในด้านของเอนทาลปีเสรีกิบส์ (Gibbs) ที่จุดสูงสุดของกราฟเป็นจุดที่เมื่อปฏิกิริยามีพลังงานถึงจุดนี้จะสามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ โดยที่ผลต่างระหว่าง ΔG_1^\ddagger กับ ΔG_2^\ddagger คือผลต่างของพลังงานเสรีกิบส์ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.12 ค่าพลังงานเสรีกิบส์ของการเกิดปฏิกิริยา [McDougall, 1976]

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงไปเนื่องมาจากอัตราเร็วของปฏิกิริยามีค่าต่ำ ซึ่งอาจเกิดขึ้นในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง หรือหลายขั้นตอน ในปฏิกิริยาย่อยดังเช่นที่ขั้วแอโนดมีปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็น



ขณะที่วงจรเปิดไม่มีกระแสไหลผ่านเซลล์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการ 2.45 จากซ้ายไปขวา และจากขวาไปซ้ายมีค่าเท่ากัน เพราะอยู่ในภาวะสมดุล เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลออก

จากเซลล์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากซ้ายไปขวาจะมากกว่าปฏิกิริยาจากขวาไปซ้าย และศักย์ไฟฟ้าจะลดลงจนถึงภาวะคงที่ (steady state) ส่วนจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าขึ้นอยู่กับพลังงานกัมมันต์ (activation energy) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยามีพลังงานสูงกว่าพลังงานกัมมันต์ ถ้ากำแพงพลังงานศักย์ (potential energy barrier) มีค่าสูง เมื่อเทียบกับพลังงานของโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาแล้ว อัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีจะมีค่าต่ำ ทำให้เกิดโพลาริเซชันในทางเคมีมาก วิธีแก้ไขคือเพิ่มพลังงานโมเลกุลของสารตั้งต้นให้มากขึ้น เช่น เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น แต่วิธีดังกล่าวไม่สามารถใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนได้ เพราะเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงมาก ๆ ได้ วิธีที่เหมาะสมคือ ลดกำแพงพลังงานศักย์ลงโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง

2.5.2 โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance polarization) [Larminie, 2000]

โพลาริเซชันแบบนี้เกิดจากความต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่บริเวณขั้วไฟฟ้า และที่บริเวณแผ่นสะสมกระแสซึ่งเกิดจากวัสดุที่ใช้มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าที่ไม่ดี หรือความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ซึ่งเกิดจากการที่เยื่อแผ่นมีความชื้นไม่เพียงพอ ทำให้ประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของโปรตอนไม่ดี เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโปรตอนบนเยื่อแผ่นจำเป็นต้องมีน้ำเป็นตัวช่วยในการพาโปรตอน ดังนั้นโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานเกิดขึ้นจากความต้านทานที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละส่วนนั่นเอง

ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดจากความต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความต้านทาน (R) ของอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นกระแส (i) ได้ว่า

$$\varepsilon_R = jAR \dots \dots \dots (2.46)$$

โดยที่ A คือพื้นที่สำหรับทำปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า ความต้านทานนี้สามารถหาความสัมพันธ์กับค่าการนำ (conductivity, k) ได้ โดยที่ x คือความหนาของอิเล็กโทรไลต์

$$R = \frac{x}{kA} \dots \dots \dots (2.47)$$

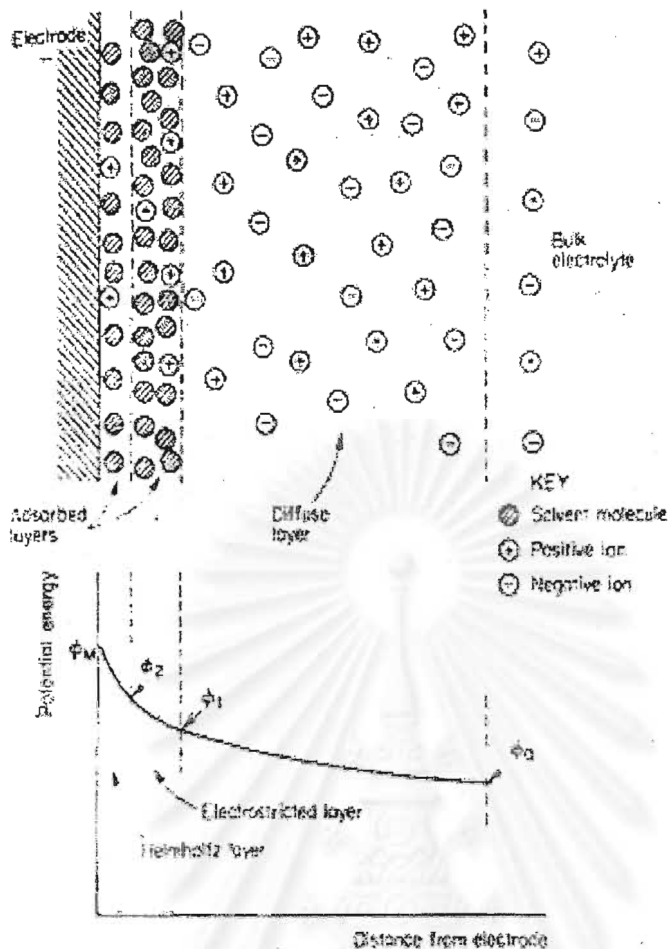
เมื่อนำสมการที่ 2.47 มาแทนในสมการ 2.46 จะได้ว่า

$$\varepsilon_R = \frac{jx}{A} \dots \dots \dots (2.48)$$

วิธีในการลดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน ในส่วนของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวสะสมกระแสให้มีค่าความนำสูง ๆ เพื่อลดแรงต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ส่วนของอิเล็กโทรไลต์ ควรออกแบบให้มีขนาดบาง เพื่อลดระยะทางในการเคลื่อนที่ของโปรตอน หรือเพิ่มความชื้นในอิเล็กโทรไลต์ จะทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนเป็นไปได้ง่ายขึ้น

2.5.3 โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น [McDougall, 1976]

การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น เกิดจากเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดส์ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วในการปฏิกิริยาที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ทำให้ความเข้มข้นหรือความดันของสารตั้งต้นลดลง เนื่องจากสารไม่สามารถแพร่ผ่านชั้นต่าง ๆ เข้าไปที่ผิวขั้วไฟฟ้าเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เป็นผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามสมการของ เนินสต์ ในกรณีที่ใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์มักจะไม่มีปัญหาที่เกิดขึ้น แต่เมื่อใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์จะเกิดปัญหานี้ขึ้นเนื่องจากในอากาศมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยกว่า ดังนั้นเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์จำเป็นจะต้องมีออกแบบช่องทางเดินแก๊สให้อากาศสามารถสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่ เพื่อให้ออกซิเจนที่อยู่ในอากาศสามารถแพร่เข้าไปยังบริเวณขั้วไฟฟ้าให้มากที่สุด ทางด้านไฮโดรเจนก็มีโอกาสที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้เช่นกัน เกิดจากในกรณีที่ไฮโดรเจนที่ใช้เป็นไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิง (reforming) ที่ไม่สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนให้กับระบบได้อย่างต่อเนื่องทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าลดลงทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินมากขึ้น



รูปที่ 2.13 ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่บริเวณผิวขั้วไฟฟ้า [McDougall, 1976]

2.6 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง [Appleby, 1989; พิษณุ, 2525]

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนับว่าเป็นส่วนหนึ่งที่น่าสนใจมาก เพราะเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงกว่าการผลิตไฟฟ้าแบบอื่น โดยเซลล์เชื้อเพลิงทำการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง จึงทำให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าการผลิตไฟฟ้าแบบอื่นๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นก่อน แล้วจึงเปลี่ยนมาเป็นพลังงานไฟฟ้า

ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น สามารถคำนวณโดยทางทฤษฎีได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้วประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะวัดได้ต่ำกว่าในทางทฤษฎี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นหลัก โดยสาเหตุที่ทำให้มีประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงนั้น เกิดจากความต้านทานภายในเซลล์ ดังนั้นถ้าต้องการให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงก็จะต้อง

หาทางลดความต้านทานภายในเซลล์ลง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแบ่งพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

2.6.1 ประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ (Faraday efficiency, η_F)

ในทางปฏิบัติแล้วปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้าอาจมีได้หลายปฏิกิริยา กล่าวคือ ปฏิกิริยาหลักที่ต้องการและปฏิกิริยาข้างเคียง ดังนั้น ปริมาณสารที่เข้าทำปฏิกิริยาจึงไม่สัมพันธ์กับประจุที่ได้รับ ตามกฎของฟาราเดย์

นอกจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงแล้ว การที่แก๊สซึมผ่านข้ามเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนไปทำปฏิกิริยากันโดยตรงเหล่านี้ทำให้ประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ลดลงได้ การวัดประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ทำได้โดยการวัดประจุที่ได้รับต่อโมลของเชื้อเพลิง เปรียบเทียบกับประจุที่ควรจะได้รับในทางทฤษฎีต่อโมลของเชื้อเพลิง ดังต่อไปนี้

$$\eta_F = \frac{\text{ประจุที่ได้รับต่อโมลของเชื้อเพลิง}}{\text{ประจุที่ควรจะได้รับในทางทฤษฎีต่อโมลของเชื้อเพลิง}} \dots\dots\dots (2.49)$$

$$\eta_F = \frac{\text{กระแสไฟฟ้าที่วัดได้}}{\text{กระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้จากอัตราการใช้เชื้อเพลิง}} \dots\dots\dots (2.50)$$

$$\eta_F = \frac{j}{n_e F A \left(\frac{dN}{dt} \right)} \dots\dots\dots (2.51)$$

โดยที่

- j : กระแสที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
- n_e : จำนวนโมลของอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (equivalent/mole)
- A : พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า (ตารางเซนติเมตร)
- F : ค่าคงที่ของฟาราเดย์ เท่ากับ 96,489 A.s / equivalent
- dN/dt : อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง (โมล/วินาที)

ประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์นี้ แสดงถึงเมื่อมีการใช้แก๊สไปด้วยอัตราเท่าใด ควรได้กระแสไฟฟ้าเท่าใด แล้วในทางปฏิบัติจริงจะได้กระแสเท่าใด ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกประสิทธิภาพนี้ว่า ประ

ประสิทธิภาพเชิงกระแส (current efficiency) โดยปกติแล้วเซลล์เชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ค่อนข้างสูงกว่าประสิทธิภาพที่คำนวณแบบอื่น โดยเฉพาะเมื่อใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงและแก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดส์ ทั้งนี้เป็นเพราะปฏิกิริยานี้มีปฏิกิริยาข้างเคียงน้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น

2.6.2 ประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้า (Voltage efficiency, η_v)

ประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้าแสดงถึงการลดลงของศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี (E°_{cell}) เช่น ในทางทฤษฎีสำหรับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าอันหนึ่ง สามารถคำนวณทางทฤษฎีได้ ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ E°_{cell} โวลต์ หมายความว่าเชื้อเพลิง 1 โมลมีพลังงานศักย์เป็น nFE จูลน์ แต่เมื่อใช้งานจริงได้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงเหลือ E_{cell} โวลต์ ทำให้มีการสูญเสียพลังงานศักย์ไป $nF(E^\circ_{cell} - E_{cell})$ จูลน์ ดังนั้นประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้าสามารถเขียนได้เป็น

$$\eta_v = \frac{E_{cell}}{E^\circ_{cell}} \dots \dots \dots (2.52)$$

2.6.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency, η_T)

ปกติแล้วพลังงานที่ได้รับจากปฏิกิริยาเคมีจะเป็นพลังงานความร้อน (ΔH) เมื่อปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจะได้พลังงานไฟฟ้า (ΔG) และมีบางส่วนในรูปพลังงานความร้อน ($T\Delta S$) ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_T) หาได้จาก

$$\eta_T = \frac{\Delta G}{\Delta H} \dots \dots \dots (2.53)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน แสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของปฏิกิริยาและอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง ไม่ขึ้นกับลักษณะอื่นของเซลล์พบว่า η_T จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของเซลล์เพิ่มขึ้น



2.6.4 ประสิทธิภาพรวม (overall efficiency, η_{overall})

ประสิทธิภาพรวมเป็นการคิดประสิทธิภาพทั้งหมดเข้าด้วยกัน เขียนได้เป็น

$$\eta_{\text{overall}} = \eta_F \eta_V \eta_T \dots \dots \dots (2.54)$$

จากสมการ 2.51 และสมการ 2.52 จะเห็นได้ว่าผลคูณของ η_F และ η_V หมายถึง ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานเสรีของกิบส์ (ΔG) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วน η_T ซึ่งหมายถึง ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเอนทาลปี (ΔH) ให้เป็นพลังงานเสรีของกิบส์ของก่อนที่จะเปลี่ยนต่อไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นประสิทธิภาพรวม (η) ซึ่งเป็นผลคูณของทั้งหมดดังสมการ 2.54 หมายถึง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงในการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีเป็นพลังงานไฟฟ้าว่ามีมากน้อยเพียงใด ดังนั้นประสิทธิภาพรวมของเซลล์เชื้อเพลิง จึงสามารถใช้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเครื่องยนต์ความร้อน (heat engine) ได้โดยตรง ซึ่งคำนวณได้จากพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบ แล้วเปรียบเทียบกับพลังงานความร้อนที่ให้แก่ระบบ

2.7 ความชื้น (Humidity) [Larminie, 2000]

อากาศชื้นหรือแก๊สชื้น หมายถึง อากาศหรือแก๊สที่มีส่วนผสมของอากาศ (แก๊ส) แห้งรวมกับไอน้ำ อากาศ (แก๊ส) ที่แห้งมากมีความชื้นแทรกอยู่น้อยและพร้อมที่จะรับความชื้นได้มาก ส่วนอากาศ (แก๊ส) ที่ชื้นมากมีความชื้นอยู่มากและพร้อมที่จะคืนออกมาในรูปของหยดน้ำได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภาวะที่เหมาะสม

ความชื้นจำเพาะ (Specific Humidity) หรือความชื้นสมบูรณ์ (Absolute Humidity) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำในอากาศหรือแก๊สต่อมวลของอากาศหรือแก๊สแห้ง ในหนึ่งหน่วยปริมาตร กำหนดให้ ω แทนค่าความชื้นจำเพาะหรือความชื้นสมบูรณ์ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\omega = \frac{m_w}{m_a} \dots \dots \dots (2.55)$$

เมื่อ

m_w : มวลของไอน้ำ (กรัม)

m_a : มวลของอากาศหรือแก๊สแห้ง (กรัม)

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) คือค่าความชื้นในอากาศหรือแก๊สโดยคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างมวลจริงของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ (แก๊ส) ขณะนั้นกับมวลของไอน้ำมากที่สุด (อิ่มตัว) ที่สามารถเข้าไปอยู่ในอากาศ (แก๊ส) ขณะนั้น ณ ปริมาตรและความดันเดียวกัน ซึ่งสามารถคิดออกมาในรูปของร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้

กำหนดให้ ϕ แทนค่าความชื้นสัมพัทธ์ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\phi = \frac{m_w}{(m_w)_{sat}} \dots \dots \dots (2.56)$$

เมื่อ $(m_w)_{sat}$ เป็นมวลของไอน้ำสูงสุดที่สามารถเข้าไปอยู่ในอากาศ (แก๊ส) นั้นได้ ซึ่งเป็นปริมาณที่ขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ ดังนั้นจึงทำให้ความชื้นสัมพัทธ์เป็นฟังก์ชันของความดันและอุณหภูมิด้วยสามารถเขียนความชื้นสัมพัทธ์ในรูปของความดันไอน้ำได้ดังนี้

$$\phi = \frac{P_w}{P_{sat}} \dots \dots \dots (2.57)$$

โดยที่

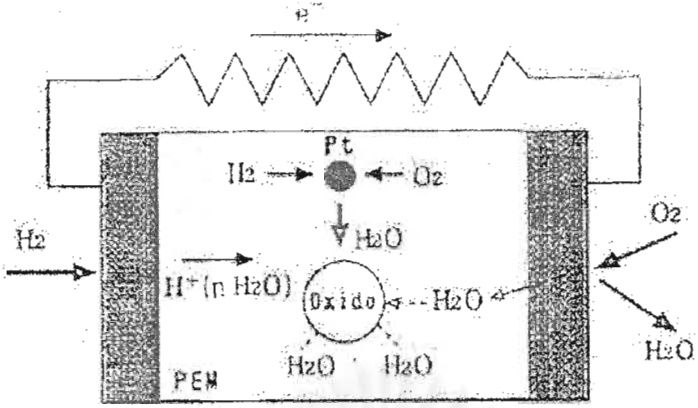
- P_w : ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศหรือแก๊ส (atm)
 P_{sat} : ความดันไออิ่มตัวของไอน้ำ (atm)

ภาวะที่ค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 100 เป็นภาวะที่ค่าความดันย่อยของไอน้ำ (water partial pressure) ในแก๊สมีค่าเท่ากับค่าความดันไออิ่มตัวของไอน้ำ (saturated vapour pressure) ที่ภาวะนี้ไอน้ำไม่สามารถเข้าไปอยู่ในแก๊สได้อีก ซึ่งเรียกว่า แก๊สอิ่มตัวด้วยไอน้ำ ซึ่งเป็นภาวะที่เข้าสู่สมดุล (equilibrium) โดยอัตราเร็วของการระเหยของน้ำจะเท่ากับอัตราเร็วของการควบแน่นของน้ำ แต่เนื่องจากค่าความดันไออิ่มตัวของไอน้ำแปรผันตามอุณหภูมิ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น ค่าความดันไออิ่มตัวของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความดันย่อยของไอน้ำยังคงที่ ทำให้ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์มีค่าลดลง ดังนั้นน้ำสามารถเข้าไปอยู่ในอากาศได้มากขึ้น ซึ่งเกิดจากอัตราเร็วของการระเหยของน้ำมีค่ามากกว่าอัตราเร็วของการควบแน่นของน้ำ และในทางตรงกันข้าม เมื่ออุณหภูมิลดลง ค่าความดันไออิ่มตัวก็จะมีค่าลดลง ทำให้อัตราเร็วของการควบแน่นของน้ำมากกว่าอัตราเร็วของการระเหยของน้ำ [Laminie, 2000]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

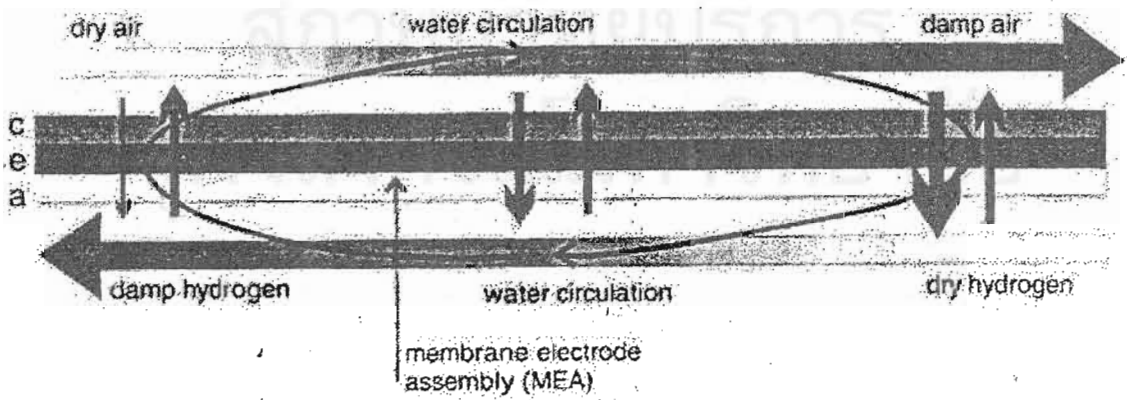
พิชญ์ เจริญสมศักดิ์ (1982) ทำการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้ไฟฟ้าที่ใช้จะเป็นตะแกรงสแตนเลสเคลือบด้วยแพลทินัมดำ (platinum black) ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร และแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนจะใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออน CR 61 AZL 389 (แบบหนา) และ CR 61 AZL 386 (แบบบาง) ปรับสมดุลแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนด้วยการนำแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแช่ไว้ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่างกัน 3 ค่าคือ 6, 3.85 และ 1 โมลต่อลิตร เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลาย แก๊สที่ใช้จะผ่านการเพิ่มความชื้นก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยการผ่านแก๊สลงในน้ำ แล้วทำการศึกษาค่าผลของตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้เซลล์ทำงานได้ดีขึ้น การปรับสมดุลของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรจะทำให้เซลล์ทำงานได้ดีกว่าการปรับสมดุลด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3.85 และ 6 โมลต่อลิตร จากการทดลองใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนหนาและบาง เพื่อทำการเปรียบเทียบกัน ผลการทดลองพบว่าการใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบางให้ผลที่ดีกว่าเล็กน้อย เนื่องจากมีความต้านทานภายในแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนน้อยกว่า สำหรับอัตราการไหลของแก๊สพบว่าไม่มีผลต่อการทำงานของเซลล์ นอกจากกรณีที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิไดซ์เท่านั้น โดยอัตราการไหลของอากาศขนาด 30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีให้ผลดีที่สุด จากการทดลองเปลี่ยนพื้นที่ขั้วไฟฟ้าพบว่ากระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์แปรผันโดยตรงกับพื้นที่ขั้วไฟฟ้า และผลการทดลองต่อเซลล์ทั้งแบบอนุกรมและแบบขนานให้ผลสอดคล้องกับกฎการต่อเซลล์ไฟฟ้าทุกประการ ส่วนประสิทธิภาพรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนนั้นจะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าใช้งานของเซลล์ เพราะประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์และประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าคงที่ในกรณีที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงมาก

Watanabe และคณะ (1996) ได้ทำการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ไม่ต้องใช้ระบบให้ความชื้นกับแก๊สภายนอก โดยทำการเตรียมเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่สามารถผลิตน้ำขึ้นเองและรักษาปริมาณความชื้นภายในเยื่อแผ่นได้ ในการเตรียมเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะมีการเติม SiO_2 และ TiO_2 รวมทั้งมีการเติมแพลทินัมลงในเยื่อแผ่นด้วย เมื่อไฮโดรเจนและออกซิเจนแพร่เข้ามาในเยื่อแผ่น ทำให้เกิดการปฏิกิริยาที่ผิวของแพลทินัมให้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ ส่วนสารประกอบออกไซด์จะทำหน้าที่ในการดูดซับน้ำเอาไว้ภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงในงานวิจัยของ Watanabe [Watanabe, 1996]

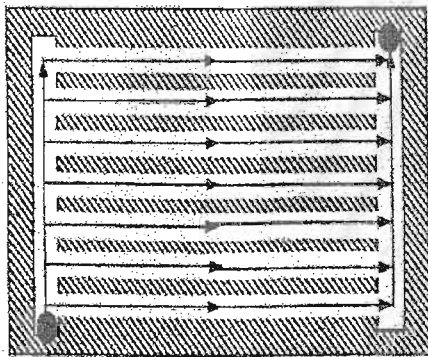
Buchi และ Srinivasan (1997) ได้ทำการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาด 50 ตารางเซนติเมตรโดยทำการเปรียบเทียบผลของความชื้น แก๊สที่ใช้คือแก๊สไฮโดรเจนและอากาศ ทำการทดลองโดยให้แก๊สผ่านระบบให้ความชื้นโดยอุณหภูมิของระบบให้ความชื้นเท่ากับ 60 และ 55 องศาเซลเซียสในกรณีไฮโดรเจนและอากาศตามลำดับ และไม่ใช่ระบบการให้ความชื้นภายนอกกับแก๊ส ในกรณีที่ไม่ให้ความชื้นภายนอกกับแก๊ส มีสมมติฐานเกี่ยวกับสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงคือให้แก๊สทั้งสองชนิดจะไหลสวนทางกันแต่มีหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้ากันไว้ น้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีการเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดด้วยกระบวนการ electro-osmotic drag และในทางตรงกันข้ามน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดจะมีการแพร่กลับไปที่ขั้วแอโนด (back diffuse) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



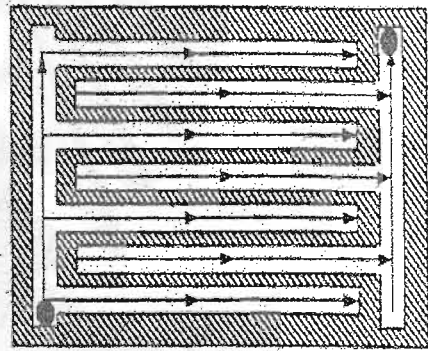
รูปที่ 2.15 ระบบการหมุนเวียนน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง [Laminie, 2000]

จากการเปรียบเทียบระหว่างที่ให้แก๊สผ่านระบบให้ความร้อนกับไม่ผ่านระบบให้ความร้อนพบว่าในกรณีที่ไม่ให้แก๊สผ่านระบบให้ความร้อนจะได้ประสิทธิภาพที่ค่าความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ น้อยกว่าจากกรณีที่ให้แก๊สผ่านระบบให้ความร้อนอยู่ร้อยละ 20 - 40 เปอร์เซ็นต์ ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดปริมาณน้ำที่ออกมาพร้อมแก๊สขาออกทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด โดยใช้เครื่องดักน้ำที่ขาออก พบว่าเมื่อทำการทดลองโดยไม่ให้แก๊สผ่านระบบให้ความร้อน จะมีน้ำที่ขั้วแอโนดออกมามาก ซึ่งเป็นน้ำที่เกิดจากแพร์กลับมาจากขั้วแคโทด ทำให้เยื่อแผ่นไม่เกิดการแห้งและมีปริมาณน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงเพียงพอ แสดงให้เห็นว่าสมมติฐานที่ได้ออกแบบไว้เป็นไปได้จริง

Wood และ คณะ (1998) ได้ศึกษาผลของการให้ความร้อนกับแก๊สโดยการฉีดน้ำโดยตรงให้กับแก๊สก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงทั้งขั้วแอโนดกับขั้วแคโทดและผลของลักษณะช่องการไหลของแก๊สภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีขนาด 100 ตารางเซนติเมตร ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งลักษณะช่องการไหลของแก๊สเป็น 2 แบบ คือ (1) Interdigitated Flow Field (2) Conventional Flow Field ดังแสดงในรูปที่ 2.16



Conventional Flow Field Design



Interdigitated Flow Field Design

รูปที่ 2.16 ลักษณะช่องการไหลของแก๊สที่ใช้ในงานวิจัยของ Wood [Wood, 1998]

ผลการทดลองพบว่าช่องการไหลของแก๊สแบบ Interdigitated ให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมากกว่าแบบ Conventional เนื่องจากทำให้การถ่ายเทมวลบริเวณขั้วไฟฟ้าทำได้ดีกว่า โดยเฉพาะที่ขั้วแคโทดไม่ว่าจะใช้อากาศหรือออกซิเจนทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นและลักษณะช่องการไหลของแก๊สแบบนี้ยังช่วยในการรักษาความชื้นของเยื่อแผ่นให้ชื้นอยู่เสมอ ดังที่ขั้วแอโนดสามารถเก็บกักปริมาณน้ำเพียงพอในการทำปฏิกิริยารวมถึงการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่น และในงานวิจัยยังพบว่าการให้ความร้อนกับแก๊สทางด้านขั้วแอโนดมีความสำคัญมากกว่าด้านขั้วแคโทด ดังนั้นจากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าช่องการไหลของแก๊สมีความสัมพันธ์กับการรักษาความชื้นภายในระบบเซลล์เชื้อเพลิงด้วยเช่นเดียวกัน

Chang และ คณะ (2000) ได้ทำการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กซึ่งมีขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร แต่สามารถให้กำลังไฟฟ้าสูงเพื่อลดจำนวนการใช้เซลล์หลายเซลล์ที่จะนำมาต่อเป็นห่อเซลล์เชื้อเพลิง มีการศึกษาถึงผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาคือแพลทินัม ลงไปในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยเติมแพลทินัมลงในการเตรียมเยื่อแผ่นเท่ากับ 0.2 และ 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรพบว่าเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่เติมแพลทินัม 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเนื่องจากการเติมแพลทินัมลงในเยื่อแผ่นเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาจึงเกิดได้มากขึ้น และทั้งได้ทำการออกแบบลักษณะของช่องการไหลของแก๊สให้มีบริเวณการดูดซึมแก๊สที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous gas diffusion layer) เพื่อช่วยเพิ่มการสัมผัสของแก๊สกับขั้วไฟฟ้าได้ดีมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองพบว่าช่องการไหลของแก๊สดังกล่าวให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีกว่าช่องการไหลแบบเดิม และมีการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยามากขึ้นและแผ่นสะสมกระแสแบบสองขั้วภายในเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้เซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูง จากการทดลองสามารถออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถผลิตความหนาแน่นกระแสได้มากกว่า 900 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงมีน้ำหนักเพียง 150 กรัม และเมื่อนำมาต่อเป็นห่อเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 10 เซลล์สามารถให้กำลังไฟฟ้าถึง 100 วัตต์

Andreas และ คณะ (2002) ได้ศึกษาสมรรถนะที่ลดลงของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาด 28 ตารางเซนติเมตรที่ค่าความหนาแน่นกระแสสูง โดยทดลองตัวแปรคือ ความหนาของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนซึ่งให้ความหนาของเยื่อแผ่นเท่ากับ 51, 89, 127, 178 และ 254 ไมโครเมตรที่สภาวะเยื่อแผ่นแห้ง และปริมาณความชื้นภายในระบบโดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบให้ความชื้นภายนอก ทำการวัดค่าความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงและแสดงผลในรูปของ impedance spectra พบว่าเมื่อความหนาของเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นมีมากขึ้น และส่งผลให้การแพร่ของน้ำจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดทำได้ยาก ซึ่งทำให้เกิดการท่วมของน้ำที่ขั้วแคโทดได้ ในส่วนของปริมาณความชื้นภายในระบบ ถ้าความชื้นไม่เพียงพอนอกจากจะทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนไม่ดีแล้วยังส่งผลให้เกิดโพลาริเซชันทางเคมีได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ขั้วแคโทด เนื่องจากเมื่อที่บริเวณทำปฏิกิริยาบนขั้วแอโนดมีความชื้นน้อย ทำให้ไม่มีปริมาณน้ำเพียงพอในการที่จะพาไฮโดรเจนไอออนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าไปยังเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน และส่งโปรตอนไปยังขั้วแคโทดเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ในส่วนของขั้วแคโทดเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสสูงขึ้น ปริมาณน้ำที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชันจะมีมากขึ้น ทำให้เกิดการท่วมของน้ำที่ผิวขั้วไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดความต้านทานในการแพร่ของออกซิเจนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

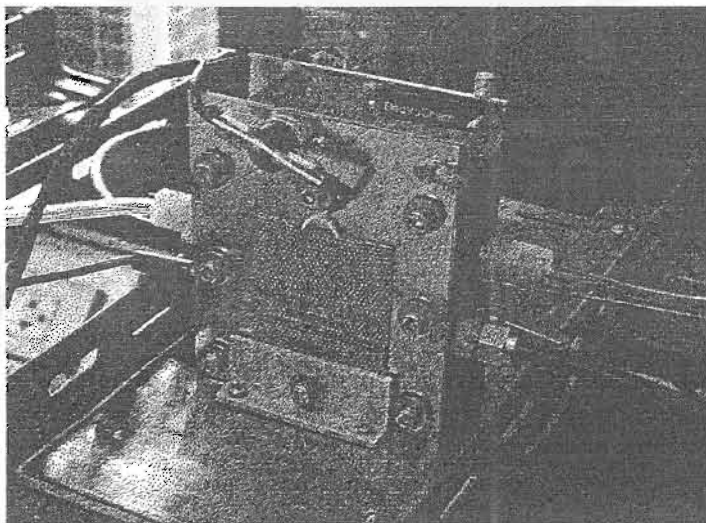
งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน และศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีความจำเป็นต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน และขั้นตอนในงานวิจัยนี้

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

หน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ทำหน้าที่แตกต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

3.1.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

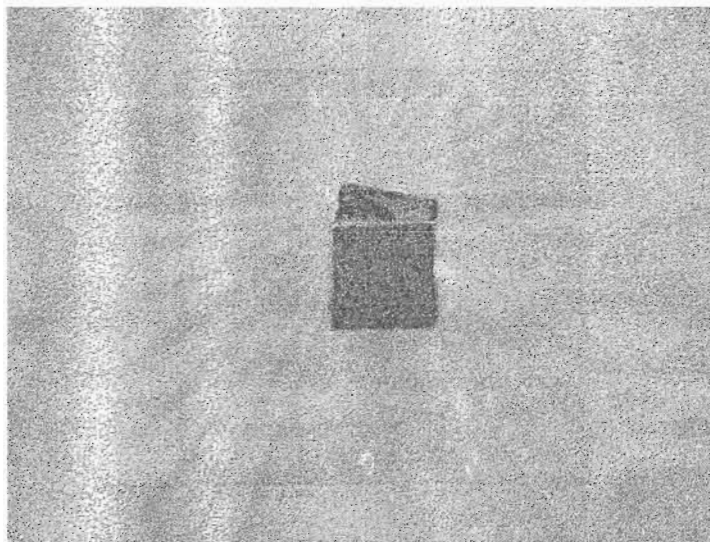
เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเซลล์เชื้อเพลิงของบริษัท ElectroChem, Inc. จากประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น FC05-01SP-REF ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนของบริษัท ElectroChem, Inc.

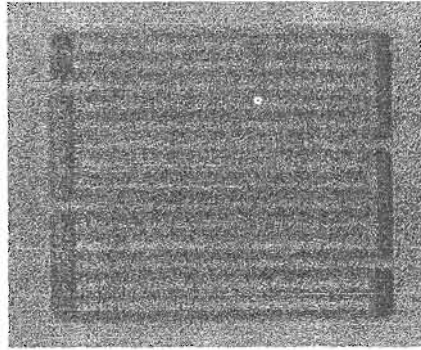
เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะมีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

- หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (Membrane Electrode Assemblies, MEAs) ส่วนของอิเล็กโทรดจะมีแพลทินัม (Platinum) 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร อยู่บนคาร์บอนในอัตราส่วนระหว่างแพลทินัมกับคาร์บอน 20 ร้อยละโดยน้ำหนัก ขั้วอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิว 5 ตารางเซนติเมตร ทั้งสองจะประกบเข้ากับเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นเยื่อแผ่น Nafion 115 ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (Membrane Electrode Assemblies, MEAs)

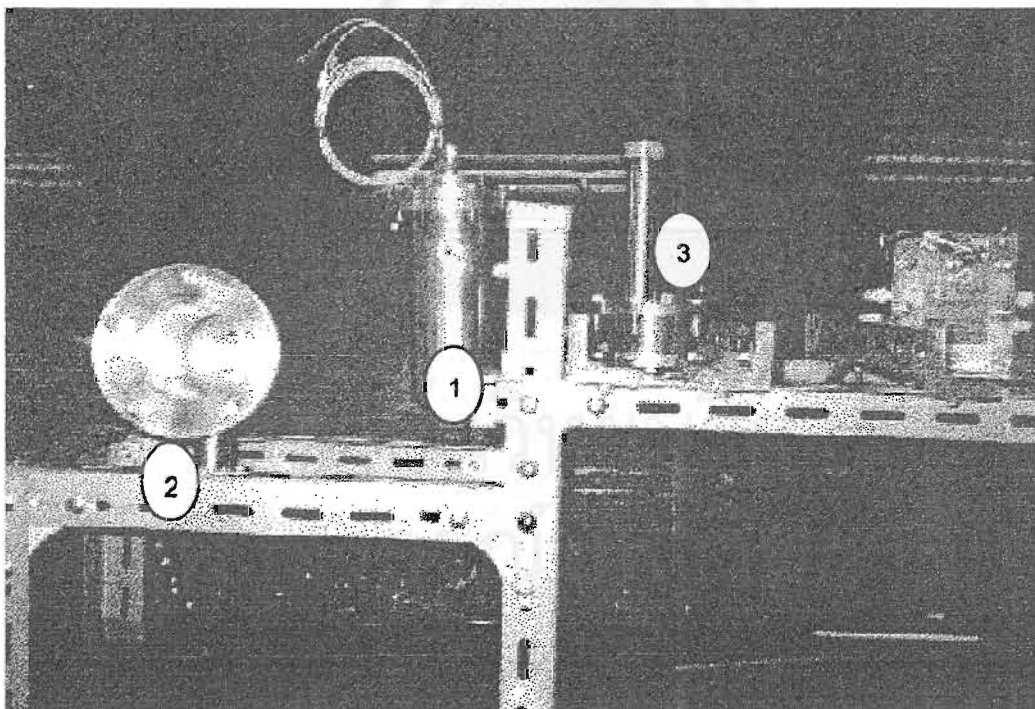
- แผ่นสะสมกระแสและการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิง แผ่นสะสมกระแสทำจากแกรไฟต์ประกบเข้ากับหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด มีช่องทางไหลของแก๊สอยู่บริเวณขั้วไฟฟ้า ลักษณะของช่องทางไหลของแก๊สภายในเซลล์แสดงดังรูปที่ 3.3 ภายนอกจะมีข้อต่อเทฟลอน (Teflon) สำหรับต่อแก๊สเข้าและขาออก มีขั้วต่อสำหรับใช้วัดค่ากระแสและความต่างศักย์ที่ได้ พร้อมช่องสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิลเพื่อใช้วัดอุณหภูมิภายในเซลล์ ในส่วนนอกจะมีแผ่นโลหะประกบอีกชั้นหนึ่ง โดยที่แผ่นโลหะจะมีแผ่นให้ความร้อนติดอยู่ทั้งสองด้าน เพื่อทำหน้าที่ในให้ความร้อนกับเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแผ่นให้ความร้อนจะต่อกับส่วนควบคุมอุณหภูมิเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในเซลล์ตามความต้องการทดลอง



รูปที่ 3.3 ทางเดินของแก๊สภายในเซลล์เชื้อเพลิง

3.1.2 ระบบให้ความชื้นกับแก๊ส (Humidifier)

ระบบให้ความชื้นกับแก๊สจะทำหน้าที่ในการเพิ่มความชื้นให้กับแก๊ส ก่อนที่แก๊สจะถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยระบบให้ความชื้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 3.4 ส่วนรายละเอียดเกี่ยวกับขนาดของแต่ละส่วน ได้แสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก ก



รูปที่ 3.4 ระบบให้ความชื้นกับแก๊ส (Humidifier)มีส่วนประกอบต่าง ๆ คือ

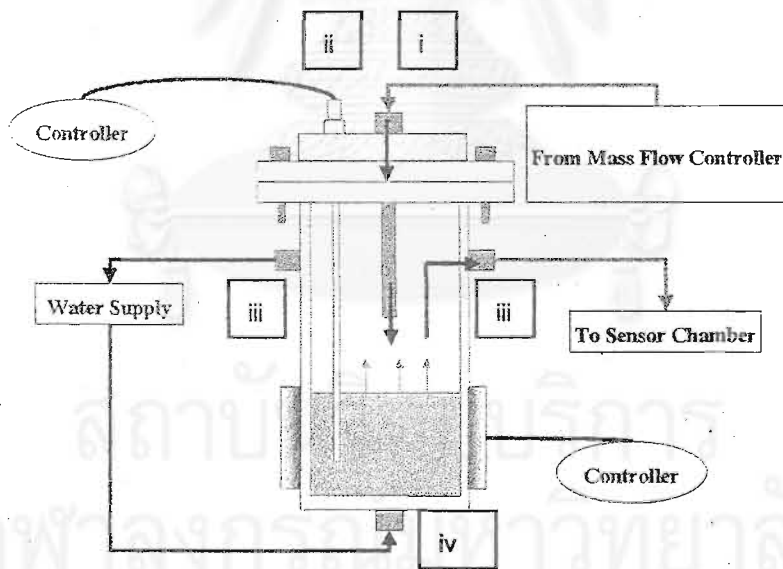
- 1) ส่วนระเหยน้ำ 2) ส่วนจัดหาน้ำ 3) ส่วนวัดค่าความชื้น

รายละเอียดของแต่ละส่วนของระบบให้ความชื้นกับแก๊สมีดังนี้

ส่วนระเหยน้ำ (Evaporation Chamber)

ทำหน้าที่ผลิตไอน้ำให้กับแก๊สที่เข้ามา โดยมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกดังรูปที่ 3.5 โดยออกแบบให้มีช่องเปิดทั้งหมด 5 ช่อง ซึ่งมีตำแหน่งและหน้าที่ของแต่ละช่องบนตัวส่วนระเหยน้ำดังนี้

- i) ช่องด้านบนของฝาเปิด-ปิดตรงกลาง ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของแก๊สจากเครื่องควบคุมอัตราการไหลมายังส่วนระเหยน้ำ
- ii) ช่องด้านบนของฝาเปิด-ปิดด้านข้าง ทำหน้าที่เป็นช่องใส่เทอร์โมคัปเปิล เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำภายในส่วนระเหยน้ำ
- iii) ช่องด้านข้างทั้งสองช่องทำหน้าที่เป็นทางผ่านของแก๊สจากส่วนระเหยน้ำไปยังส่วนจัดหาน้ำและอีกช่องเป็นทางผ่านของแก๊สจากส่วนระเหยน้ำไปยังส่วนวัดความชื้น
- iv) ช่องด้านล่างทำหน้าที่เป็นทางผ่านของน้ำจากส่วนจัดหาน้ำเข้าสู่ส่วนระเหยน้ำ



รูปที่ 3.5 ส่วนระเหยน้ำ (Evaporation Chamber)

แก๊สที่ผ่านมาจากเครื่องควบคุมอัตราการไหลจะผ่านเข้ามาทางรูด้านบนตรงกลางของส่วนระเหยน้ำแล้วผ่านเข้าท่อสแตนเลสสตีล (Stainless Steel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{4}$ นิ้ว ที่ต่อยื่นเข้าไปภายในส่วนระเหยน้ำโดยให้ปลายท่ออยู่เหนือผิวน้ำ แก๊สจะไหลผ่านเหนือผิวน้ำ ซึ่งมี

ไอน้ำอยู่ทำให้แก๊สขึ้นขึ้น โดยไอน้ำที่อยู่ในส่วนระเหยน้ำเกิดจากการให้ความร้อนกับน้ำโดยใช้ตัวทำความร้อนที่พันอยู่รอบตัวส่วนระเหยน้ำ

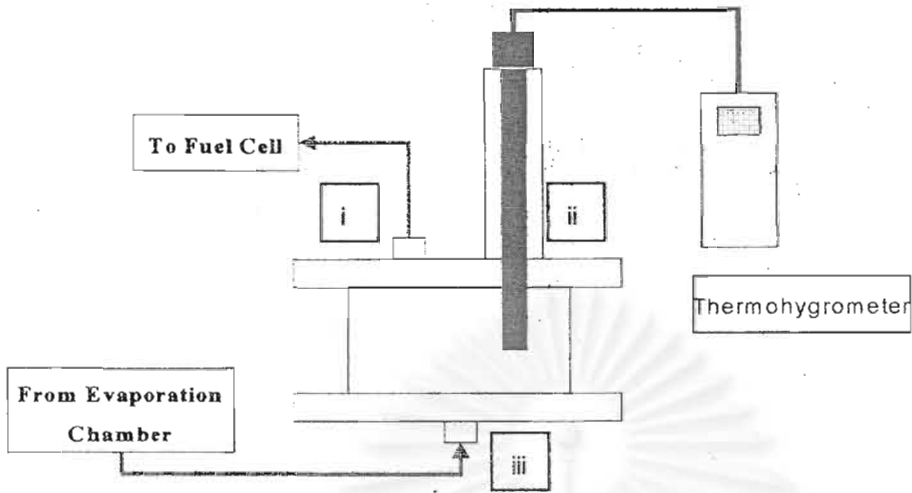
ส่วนจัดหาน้ำ (Water Supply Chamber)

ส่วนจัดหาน้ำเป็นแหล่งจ่ายน้ำให้กับส่วนระเหยน้ำเพื่อใช้ในการผลิตไอน้ำโดยได้ออกแบบให้มีท่อต่อระหว่างส่วนจัดหาน้ำกับส่วนระเหยน้ำ 2 ตำแหน่ง คือตำแหน่งแรกท่อจะอยู่เหนือน้ำ ทำหน้าที่ส่งผ่านแก๊สที่มีความดันจากส่วนระเหยน้ำไปยังส่วนจัดหาน้ำตำแหน่งที่สอง ท่อจะอยู่ใต้ระดับน้ำโดยทำหน้าที่จ่ายน้ำจากส่วนจัดหาน้ำไปยังส่วนระเหยน้ำ ส่วนระดับน้ำภายในส่วนระเหยน้ำสามารถดูได้จากระดับน้ำภายในของส่วนจัดหาน้ำ

ส่วนวัดความชื้น (Sensor Chamber)

ส่วนวัดความชื้นถูกออกแบบมาเพื่อใช้วัดและควบคุมความชื้นก่อนที่แก๊สจะถูกส่งผ่านเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ดังรูปที่ 3.6 โดยที่ตัวส่วนวัดความชื้นจะมีช่องไว้ 3 ช่อง ซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกันไป ดังนี้

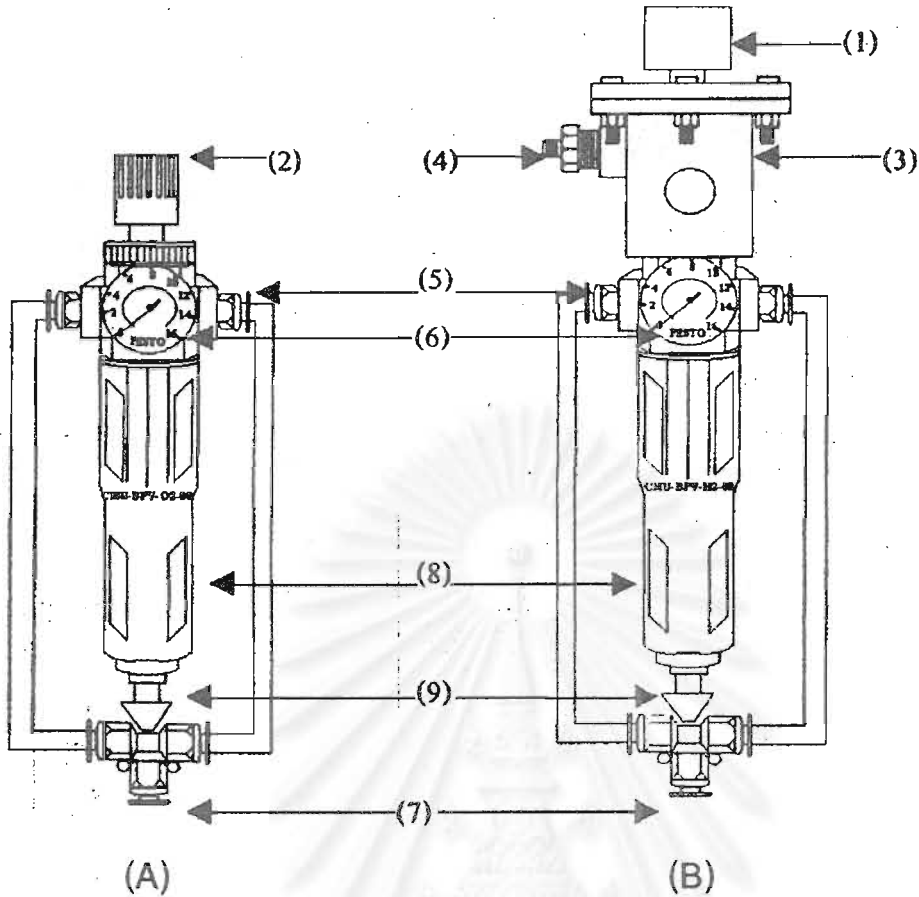
- i) ช่องด้านบนของฝาส่วนวัดความชื้น ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของแก๊สจากส่วนวัดความชื้นไปยังเซลล์เชื้อเพลิง
- ii) ช่องด้านบนของฝาส่วนวัดความชื้นที่มีการต่อท่อขึ้นมา โดยให้ท่อปลายด้านหนึ่งเปิดเข้าสู่ภายในส่วนวัดความชื้น อีกด้านหนึ่งเป็นปลายเปิดสำหรับสอดหัววัดความชื้นของเครื่องวัดความชื้น (Thermohygrometer) โดยภายในได้ออกแบบให้มีการวางโอรังรองอยู่เพื่อป้องกันการรั่วของแก๊ส เมื่อไม่ต้องการวัดความชื้นก็จะมีส่วนของฝาเกลียวปิดไว้
- iii) ช่องด้านล่างของส่วนวัดความชื้น ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของแก๊สที่มาจากส่วนระเหยน้ำเข้าสู่ส่วนวัดความชื้น



รูปที่ 3.6 ส่วนวัดความชื้น (Sensor Chamber)

3.1.3 วาล์วควบคุมความดันกลับ (Back Pressure Valve)

วาล์วควบคุมแรงดันกลับเป็นวาล์วเข็ม (needle valve) ซึ่งดัดแปลงมาจาก Filter Regulator รุ่น LFR-1/4-D-MINI ของบริษัท Festo โดยจะติดตั้งอยู่ที่ท่อนำแก๊สออกจากเซลล์ทั้งด้านแคโทดและแอโนดสำหรับแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจน วาล์วสองตัวนี้จะทำหน้าที่ควบคุมความดันภายในเซลล์ โดยการหมุนปุ่มทวนเข็มนาฬิกาเพื่อลดความดันภายในเซลล์ และหมุนปุ่มตามเข็มนาฬิกาเพื่อเพิ่มความดันภายในเซลล์ แต่ลักษณะภายนอกของวาล์วควบคุมความดันกลับของไฮโดรเจนจะแตกต่างกับของออกซิเจน เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนจำเป็นต้องมีตัวถังสำหรับเก็บแก๊สไฮโดรเจนที่หลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์ก่อนที่จะปล่อยออกสู่อากาศเพื่อป้องกันการสะสมของแก๊สไฮโดรเจนภายในห้องทดลอง สำหรับออกซิเจนสามารถปล่อยออกสู่อากาศได้จึงไม่จำเป็นต้องมีตัวถังในการกักเก็บแก๊ส ดังในรูปที่ 3.17



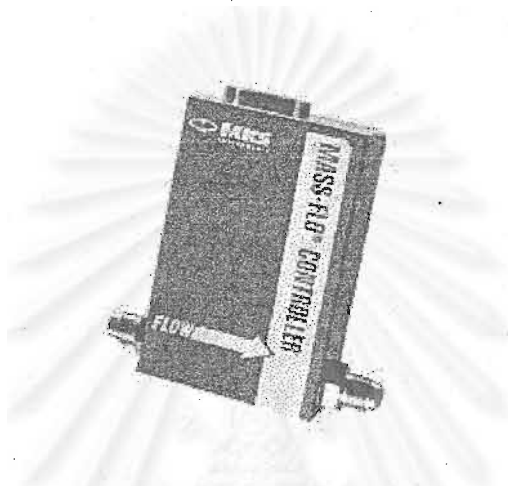
รูปที่ 3.7 วาล์วควบคุมความดันกลับ (Back Pressure Valve) โดย A เป็นของออกซิเจน และ B เป็นของไฮโดรเจน

องค์ประกอบของวาล์วควบคุมความดันกลับ

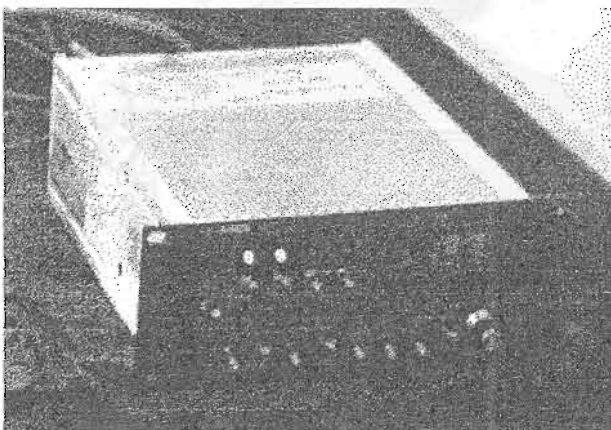
- 1) ลูกบิดปรับความดันสำหรับแก๊สไฮโดรเจน
- 2) ลูกบิดปรับความดันสำหรับแก๊สออกซิเจน
- 3) ถังเก็บแก๊สไฮโดรเจน
- 4) ข้อต่อท่อสำหรับนำแก๊สไฮโดรเจนออกสู่บรรยากาศ
- 5) ข้อต่อท่อสำหรับแก๊สเข้าสู่วาล์วควบคุมความดันกลับ
- 6) เกจวัดความดันในระบบ (manometer)
- 7) ข้อต่อท่อสำหรับแก๊สที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง
- 8) ถังเก็บน้ำที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง
- 9) ข้อต่อท่อสำหรับระบายน้ำที่เกิดจากการกรองแก๊สที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงไปสู่ถังเก็บน้ำของระบบให้ความชื้น

3.1.4 เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Mass Flow Controller)

ในการทดลองใช้เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สของบริษัท MKS Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น MKS Type M100B ดังรูปที่ 3.8 โดยมีช่วงการทำงาน 0-500 sccm โดยจะติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สไว้ตำแหน่งถัดจากวาล์วขาเข้า การตั้งค่าและอ่านค่าอัตราการไหลจะทำที่เครื่องวัดอัตราการไหลแบบ 4 ช่องควบคุมรุ่น MKS Type 247D Four-Channel Readout ที่สามารถควบคุมตัวควบคุมอัตราการไหลได้ 4 ตัวด้วยกัน ดังรูปที่ 3.9



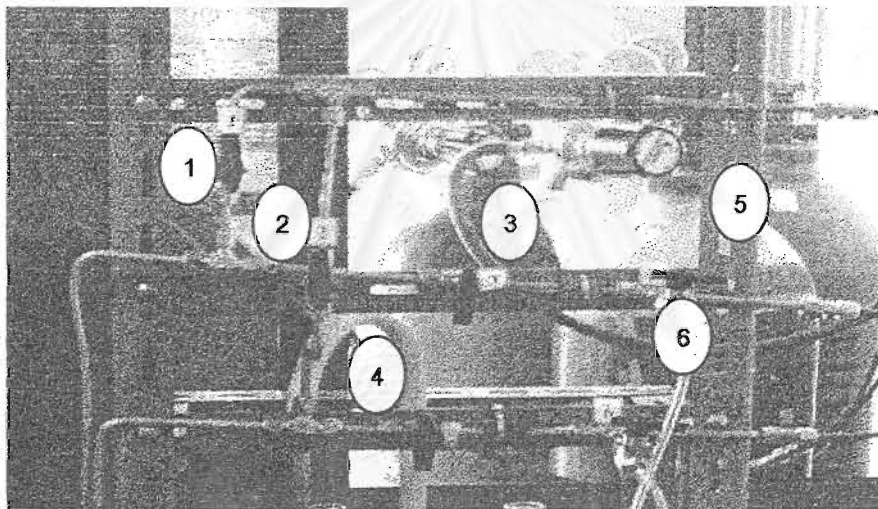
รูปที่ 3.8 เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Mass Flow Controller)



รูปที่ 3.9 เครื่องควบคุมอัตราการไหลแบบ 4 ช่องควบคุม

3.1.5 ชุดของวาล์วขาเข้า (Intake Valve) และวาล์วขาออก (Relieve Valve)

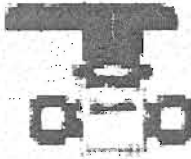
ชุดของวาล์วจะประกอบด้วยวาล์ว 6 ตัวดังรูปที่ 3.10 วาล์วขาเข้าจะมีจำนวน 4 ตัว แบ่งเป็นของแก๊สไนโตรเจน 2 ตัว แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนอย่างละ 1 ตัว จะอยู่ในตำแหน่งระหว่างถังแก๊สกับตัวควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส โดยวาล์วนี้มีหน้าที่ป้องกันการไหลย้อนกลับของแก๊สกรณีที่มีความดันในระบบมากกว่าภายในถังแก๊สและป้องกันการปะปนกันของแก๊สไฮโดรเจน แก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจน ส่วนวาล์วขาออก มี 2 ตัว ซึ่งจะมีหน้าที่ช่วยลดความดันภายในที่ระหว่างถังแก๊สกับตัวควบคุมอัตราการไหล โดยวาล์วทั้งหมดเป็นวาล์วแบบ Ball Valve ขนาดท่อ $\frac{1}{4}$ นิ้วดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 ชุดของวาล์วขาเข้า (Intake Valve) และวาล์วขาออก (Relieve Valve)

ชุดของวาล์วประกอบด้วยวาล์ว 6 ตัวด้วยกันคือ

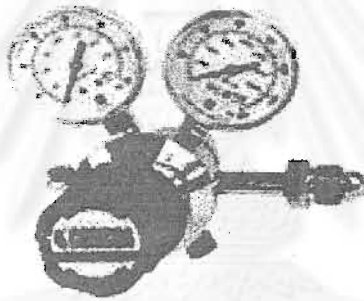
1. วาล์วขาเข้าของแก๊สไนโตรเจน
2. วาล์วขาเข้าของแก๊สไนโตรเจน
3. วาล์วขาเข้าของแก๊สออกซิเจนหรืออากาศ
4. วาล์วขาเข้าของแก๊สไฮโดรเจน
5. วาล์วขาออกของแก๊สออกซิเจนหรืออากาศ
6. วาล์วขาออกของแก๊สไฮโดรเจน



รูปที่ 3.11 Ball Valve ที่ใช้ในชุดของวาล์วขาเข้า (Intake Valve) และวาล์วขาออก (Relieve Valve)

3.1.6 เครื่องควบคุมความดันแก๊ส (Pressure Regulator)

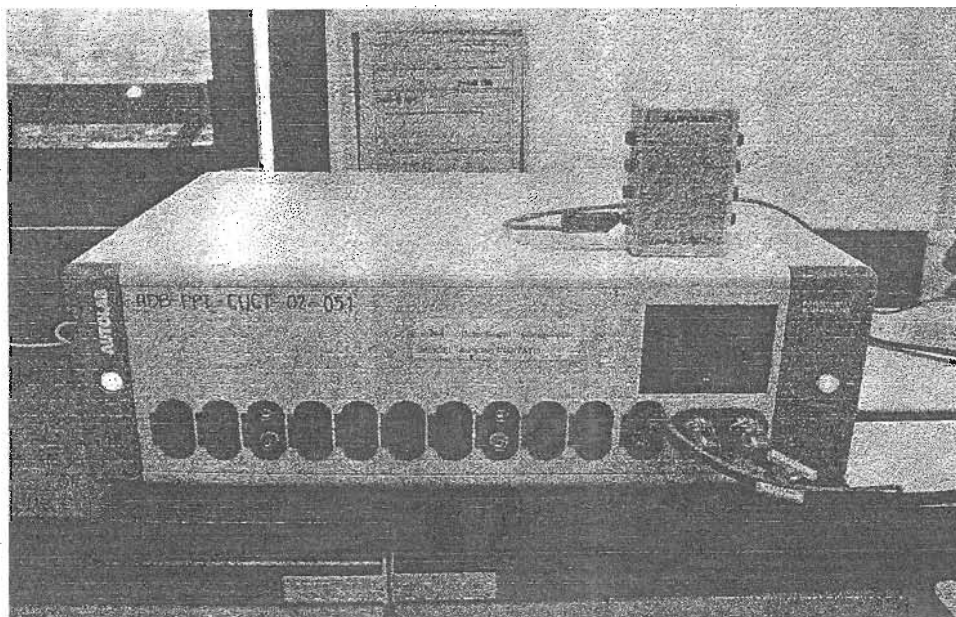
เครื่องควบคุมความดันแก๊สจะถูกติดตั้งอยู่ที่ถังแก๊ส การปรับความดันทำได้โดยการหมุนตัวปรับความดันทวนเข็มนาฬิกาเพื่อลดความดัน และหมุนตามเข็มนาฬิกาเพื่อเพิ่มความดันของแก๊ส ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องควบคุมความดันแก๊ส (Pressure Regulator)

3.1.7 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat

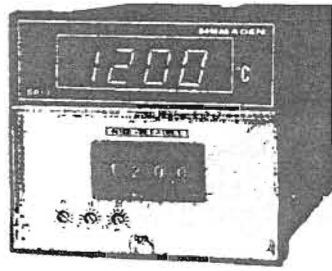
เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับในการศึกษาทางเคมีไฟฟ้า สามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธีตามความต้องการของงานวิจัยในด้านเคมีไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ในการวัดค่าความต่างศักย์และค่ากระแสที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง โดยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat นี้เป็นรุ่น PG STATO 30 ของบริษัท AUTOLAB ควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



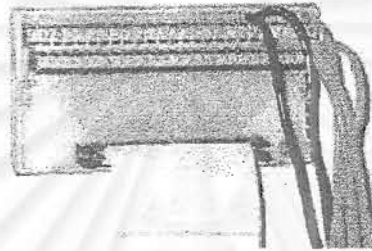
รูปที่ 3.13 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat

3.1.8 หน่วยควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)

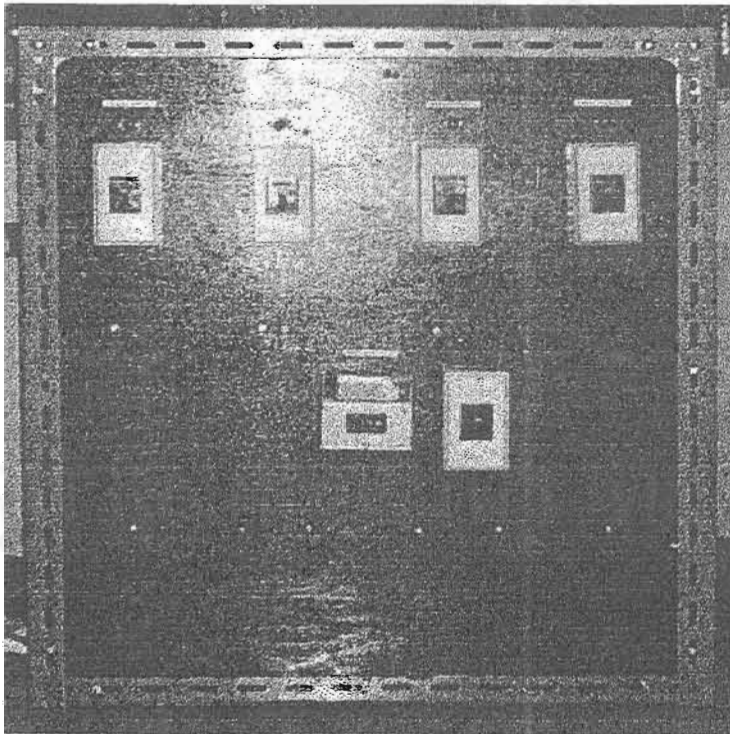
หน่วยควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่ในการควบคุมการจ่ายไฟให้กับตัวทำความร้อน 3 ส่วน คือ ที่เซลล์เชื้อเพลิง และที่ส่วนระเหยน้ำ 2 ตัว โดยในส่วนอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงจะใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิของบริษัท Shimaden รุ่น SR17 เป็นตัวควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ส่วนของระบบให้ความร้อน อุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำ จะใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมโดยใช้โปรแกรม Lab-View version 5.1 ซึ่งทำงานร่วมกับแผงรับสัญญาณ (Board Lab PC) ของบริษัท National Instrument, ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งโปรแกรมหดดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 30 – 80 องศาเซลเซียส โดยจะมีแผงสวิตช์ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ประกอบด้วย สวิตช์ปิดเปิดสำหรับแหล่งของกระแสไฟฟ้าของตัวให้ความร้อนทุกตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และที่แผงสวิตช์จะมีการติดตั้ง Solid State Relay ของบริษัท Carlo Gavazzi รุ่น RS1A23D10 ดังในรูปที่ 3.17 จำนวน 3 ตัว เพื่อทำหน้าที่ในการตัดต่อกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวให้ความร้อนทุกตัวซึ่งทำหน้าที่รับส่งกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิทุกส่วน รายละเอียดเกี่ยวกับแผงสวิตช์จะแสดงอยู่ในส่วนของภาคผนวก ก



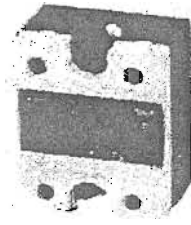
รูปที่ 3.14 เครื่องควบคุมอุณหภูมิของบริษัท Shimaden รุ่น SR17



รูปที่ 3.15 แผงรับสัญญาณ (Board LabPC) ของบริษัท National Instrument



รูปที่ 3.16 แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.17 Solid State Relay ของ Carlo Gavazzi รุ่น RS1A23D10

3.1.9 เครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen Detector)

เครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้เป็นของบริษัท Oldham รุ่น TX2000 ซึ่งใช้ตรวจวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนในบริเวณหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อความปลอดภัยในการทำกาทดลองในกรณีที่มีการรั่วของไฮโดรเจน เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนในบริเวณทำการทดลองเกิน 200 ppm เครื่องจะมีสัญญาณเตือน ซึ่งสามารถตรวจวัดไฮโดรเจนได้ในช่วง 0 – 2000 ppm เครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 เครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen Detector)

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. แก๊สไฮโดรเจน ความบริสุทธิ์ 99.99 % ของบริษัท Praxair (ประเทศไทย) จำกัด
2. แก๊สออกซิเจน ความบริสุทธิ์ 99.99 % ของบริษัท Praxair (ประเทศไทย) จำกัด
3. อากาศแห้ง (Air Zero) ของบริษัท Praxair (ประเทศไทย) จำกัด
4. แก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.5 % ของบริษัท Praxair (ประเทศไทย) จำกัด

3.3 ตัวแปรที่ศึกษา

1. อัตราการไหลของแก๊ส (10 - 200 sccm)
2. อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (30 - 70 องศาเซลเซียส)
3. สารออกซิไดส์ (ออกซิเจนบริสุทธิ์และอากาศ)
4. ปริมาณความชื้นของแก๊ส (แก๊สแห้งและแก๊สที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ)
5. ความดันของเซลล์เชื้อเพลิง (1 - 2 บรรยากาศ)

3.4 ขั้นตอนการทำวิจัย

ในส่วนของการออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเป็นการเชื่อมต่อบางส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ในหัวข้อ 3.1 เพื่อให้สามารถศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ตามต้องการโดยรายละเอียดแสดงไว้ในหัวข้อ 4.1 การออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในบทที่ 4 ในส่วนของการทดลองศึกษามวลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ขั้นตอนการทดลอง และขั้นตอนภายหลังการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ตรวจสอบวาล์วขาเข้า (Intake Valve) ของแก๊สแต่ละชนิดให้เปิดเปิดอยู่ในทิศทางตามต้องการ เพื่อป้องกันการไหลปนกันของแก๊สต่างชนิด และวาล์วขาออก (Relieve Valve) ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
2. ตรวจสอบความเรียบร้อยของข้อต่อต่าง ๆ ในหน่วยทดสอบให้อยู่ในสภาพที่พร้อมทำการทดลอง
3. ตรวจสอบระดับน้ำภายในส่วนระเหยน้ำภายในระบบให้ความชื้น โดยดูจากส่วนจัดหาน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม (ให้ปริมาณน้ำภายในส่วนจัดหาน้ำท่วมท่อที่เชื่อมต่อกับด้านล่างของส่วนระเหยน้ำ แต่สูงไม่ถึงท่อที่เชื่อมต่อกับด้านข้างของส่วนระเหยน้ำ)
4. ตรวจสอบเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังแก๊สทุกถังให้อยู่ในตำแหน่งปิด
5. ตรวจสอบวาล์วควบคุมความดันกลับให้อยู่ในตำแหน่งเปิด ยกเว้นกรณีที่ทำการศึกษาผลของความดันจะต้องให้วาล์วควบคุมความดันกลับอยู่ในตำแหน่งปิด

6. ตรวจสอบสายไฟที่ต่อจากขั้วไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 2 ขั้วที่ต่อมายังเครื่อง Potentiostat/Galvanostat ว่าให้อยู่ในสภาพที่ต่อเรียบร้อยแล้ว
7. ตรวจสอบเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในช่องวัดอุณหภูมิ
8. เปิดเครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนเพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สในกรณีที่เกิดการรั่วของแก๊สไฮโดรเจน
9. เปิดสวิตช์หลักของเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 15 นาทีก่อนทำการทดลอง
10. เปิดสวิตช์เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 30 นาที ก่อนทำการทดลอง พร้อมเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับทำหน้าที่บันทึกข้อมูลจากเครื่อง Potentiostat/Galvanostat กดปุ่ม Cell Enable ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
11. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมอุณหภูมิภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง เปิดโปรแกรม Lab-view เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในส่วนระเหยน้ำ ตั้งค่าอุณหภูมิตามต้องการ (60 – 80 องศาเซลเซียส) และกดปุ่ม start ที่โปรแกรม
12. เปิดสวิตช์ที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้าที่สวิตช์หลัก (Main Switch) แล้วจึงเปิดสวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วจึงตั้งค่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงตามต้องการ (30 – 70 องศาเซลเซียส) และเปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง รอจนกระทั่งอุณหภูมิได้ตามค่าที่ตั้งไว้
13. ตั้งค่าอัตราการไหลตามต้องการที่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส (0 – 500 sccm) ซึ่ง Channel 1 คือ แก๊สออกซิเจนหรืออากาศ และ Channel 2 คือ แก๊สไฮโดรเจน ส่วนของแก๊สไนโตรเจนจะใช้ทั้งสอง Channel โดยสับทางเดินของแก๊สโดยใช้วาล์วเข้าเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของแก๊ส
14. เมื่อต้องการจะป้อนแก๊สให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ให้เปิดแก๊สที่ต้องการใช้ที่วาล์วหัวถังของแก๊ส แล้วจึงเปิดเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังให้ได้ความดันขาออกตามต้องการ ซึ่งโดยปกติเท่ากับ 20 psi ยกเว้นในกรณีที่ศึกษาผลของความดันจะใช้ความดันเท่ากับ 50 psi แล้วจึงมาเปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหลแต่ละ Channel เพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่หน่วยทดสอบ

15. ก่อนจะทำการทดลองควรให้แก๊สไนโตรเจนกับหน่วยทดสอบประมาณ 20 นาที โดยตั้งอัตราการไหลของแก๊สทั้ง 2 Channel ไว้ที่ 200 sccm ก่อนด้วยสาเหตุดังนี้
 - เพื่อเป็นการไล่สิ่งสกปรกข้างอยู่ในหน่วยทดสอบออกก่อน
 - เพื่อตรวจสอบการรั่วของแก๊สโดยใช้น้ำยาในการตรวจสอบรั่วภายในหน่วยทดสอบ
 - เพื่อให้วัดค่าความชื้นภายในแก๊สก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ส่วนวัดความชื้น
16. ทำการตั้งค่าเพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยใช้โปรแกรม GPES เลือกวิธีแบบ Chrono methods (interval time > 0.1 sec) และเลือกวิธีแบบ Amperometry แล้วจึงตั้งค่าความต่างศักย์เพื่อให้เครื่องวัดค่ากระแสจากเซลล์เชื้อเพลิง
17. เมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง รอจนกระทั่งค่าความต่างศักย์ในขณะที่ยังไม่มีการจ่ายกระแสไฟของเซลล์เชื้อเพลิง (open circuit voltage) ที่ได้มีค่าคงที่ กดปุ่ม Cell Enable ให้อยู่ในตำแหน่งเปิดที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat จึงกดปุ่ม start ที่โปรแกรม GPES เพื่อเริ่มบันทึกค่ากระแสที่ได้ ณ ที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ที่ตั้งไว้

3.3.2 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง

1. เมื่อเสร็จการสิ้นการวัดค่ากระแสที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้
2. ปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหล แล้วจึงปิดวาล์วที่หัวถังแก๊สทุกถัง
3. ปิดวาล์วขาเข้าทุกตัว และค้อย ๆ ปิดวาล์วขาออกทีละตัวเพื่อลดความดันจากแก๊สที่ค้างอยู่ในท่อระหว่างถังแก๊สกับเครื่องวัดอัตราการไหล โดยที่วาล์วขาออกจะต่อท่อลงไปยังขวดที่มีน้ำอยู่เพื่อลดการแพร่กระจายของแก๊ส รอจนกระทั่งเกจวัดความดันที่เครื่องควบคุมความดันที่ถังแก๊สลดลงจนถึง 0 ทั้งขาเข้าและขาออก แล้วจึงเปิดวาล์วขาออกของแก๊สอีกถังหนึ่ง ทำในลักษณะเดียวกัน
4. เมื่อลดความดันในถังแก๊สหมด จึงทำการปิดวาล์วขาออกของแก๊สทุกตัว
5. ปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า

6. ปิดสวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งไฟฟ้า และจึงปิดสวิตช์หลัก
7. กดปุ่ม stop ที่โปรแกรม Lab-View ที่ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิในส่วนระเหยน้ำ แล้วจึงปิดโปรแกรม
8. ปิดโปรแกรม GPES แล้วจึงปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ ต่อจากนั้นจึงปิดสวิตช์ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat



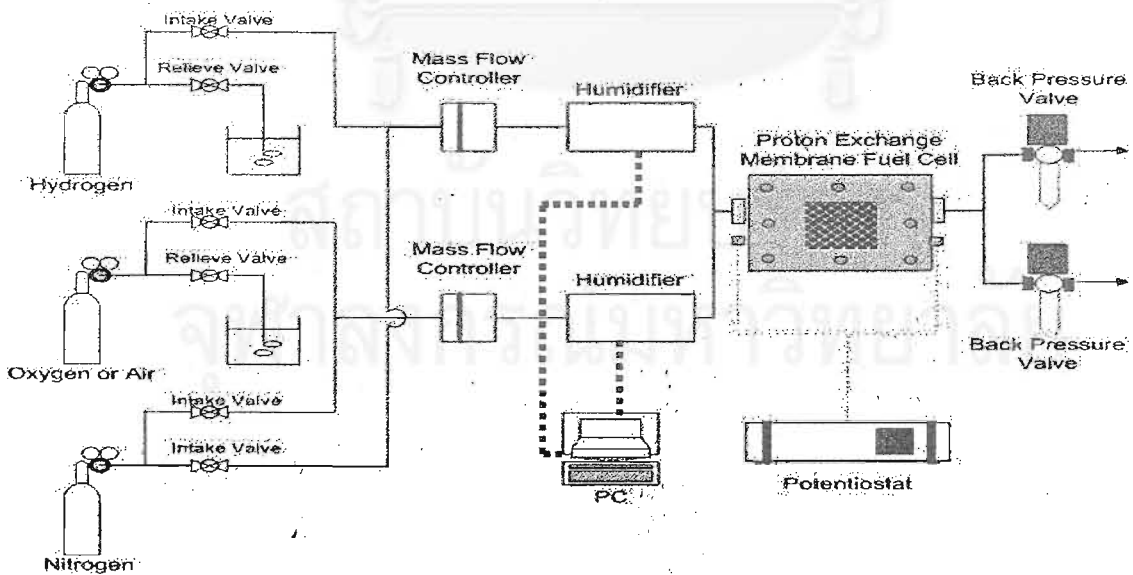
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองนี้เป็นการออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊ส อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง องค์ประกอบของสารออกซิไดส์ และปริมาณความชื้น

4.1 การออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

การออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการศึกษาและทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน จะประกอบด้วยระบบต่าง ๆ ที่มีความจำเป็นในการทำงานและสามารถควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ ในหน่วยทดสอบที่มีความสำคัญต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถแบ่งส่วนประกอบเป็น 5 ส่วนหลัก ๆ คือ ระบบควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของแก๊ส ระบบให้ความชื้น (Humidifier) กับแก๊ส เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เครื่อง Potentiostat/Galvanostat และ วาล์วควบคุมความดันกลับ (Back Pressure Valve) ดังมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังนี้



รูปที่ 4.1 หน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

4.1.1 ระบบควบคุมทิศทางการไหลและอัตราการไหลของแก๊ส

ระบบควบคุมทิศทางการไหลของแก๊สเป็นส่วนแรกของหน่วยทดสอบจะทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของแก๊สโดยใช้วาล์ว เพื่อป้องกันการไหลปนกันของแก๊สต่างชนิดกันภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและอันตรายจากการผสมกันของแก๊ส นอกจากนี้ยังช่วยในด้านความปลอดภัยเมื่อมีการหยุดทำการทดลอง เพราะวาล์วขาออก (relieve valve) จะช่วยในการลดความดันภายในระบบจากแก๊สที่ค้างอยู่ภายในท่อระหว่างถังแก๊สกับหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง โดยจะเปิดเพื่อไล่แก๊สที่ค้างอยู่ออกให้หมด

แก๊สจากถังจะผ่านเข้าสู่ระบบควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส โดยเครื่องควบคุมอัตราการไหล (Mass Flow Controller) ของแก๊ส สามารถควบคุมอัตราการไหลของแก๊สได้ในช่วงไม่เกิน 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีที่สภาวะมาตรฐาน (sccm) และเครื่องวัดอัตราการไหลแบบ 4 ช่องควบคุม แก๊สที่จะเข้าสู่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สจำเป็นต้องมีเฉพาะสารที่มีสถานะแก๊สเท่านั้น เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับเครื่อง ดังนั้นในการทดลองจึงได้ติดตั้งอุปกรณ์กรองแก๊สก่อนที่จะเข้าเครื่องวัดควบคุมอัตราการไหล เพื่อกรองสิ่งเจือปนออกจากแก๊ส ในการใช้เครื่องควบคุมอัตราการไหลจะต้องคำนึงถึง ผลต่างของความดันระหว่างความดันของแก๊สขาเข้าหรือความดันที่หัวถังแก๊สและความดันของแก๊สขาออกหรือความดันภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง จะต้องอยู่ในช่วง 10-40 psi เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของเครื่องควบคุมอัตราการไหล

4.1.2 ระบบให้ความชื้น (Humidifier) กับแก๊ส

เนื่องจากความชื้นของแก๊สมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเฉพาะมีส่วนช่วยในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือกระบวนการที่เรียกว่า electro-osmotic drag จึงจำเป็นต้องมีปริมาณน้ำที่เพียงพอภายในเซลล์ ดังนั้นแก๊สที่ผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหลจะต้องเพิ่มความชื้นก่อนเข้าสู่เซลล์โดยผ่านระบบให้ความชื้น (Humidifier) ระบบให้ความชื้นประกอบด้วย 3 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนระเหยน้ำ (Evaporation Chamber), ส่วนจัดหาน้ำ (Water Supply Chamber) และส่วนวัดค่าความชื้น (Sensor Chamber) โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่ในการทำงานแตกต่างกัน โดยส่วนที่สำคัญคือส่วนระเหยน้ำที่มีหน้าที่เพิ่มปริมาณความชื้นให้กับแก๊สก่อนที่จะเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงการทดลองที่ต้องการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของแก๊สจึงทำการควบคุมอุณหภูมิของน้ำภายในส่วนระเหยน้ำเพื่อให้มีปริมาณน้ำในแก๊สแตกต่างกัน โดยการควบคุมอุณหภูมิของน้ำภายในส่วน

ระเหยน้ำจะควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Lab-view ทำงานร่วมกับแผงรับสัญญาณ (Board Lab PC) เพื่อรับส่งสัญญาณกับเทอร์โมคัปเปิลที่ทำหน้าที่ในการวัดอุณหภูมิของน้ำภายในส่วนระเหยน้ำ โดยมี Solid State Relay ในการตัดต่อกระแสไฟฟ้าที่จะเข้าสู่เครื่องให้ความร้อน แต่เมื่อทำการทดสอบระบบให้ความร้อนแล้วพบว่ายังไม่สามารถปรับค่าความชื้นได้ตามต้องการ โดยจะได้แก๊สที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือมีค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 เท่านั้น ดังนั้นในการทำการวิจัยจึงทำได้แค่เพียงแก๊สที่มีค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 ซึ่งได้จากการผ่านแก๊สเข้าสู่ระบบให้ความร้อนก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง และแก๊สไม่มีความชื้นซึ่งทำได้โดยให้แก๊สจากถังแก๊สเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยไม่ผ่านระบบให้ความร้อนกับแก๊ส

4.1.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตรจะต่อเชื่อมกับส่วนวัดค่าความชื้นในระบบให้ความร้อนเพื่อรับแก๊สที่ผ่านการเพิ่มความชื้นแล้วหรือแก๊สจากถังแก๊สโดยตรงในกรณีที่ทำการทดลองโดยใช้แก๊สที่ไม่มีความชื้น ส่วนอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิโดยรับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลที่ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่เซลล์จะมีช่องสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ ส่วนที่ให้ความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิงคือแผ่นให้ความร้อนที่ติดอยู่บนแผ่นทองเหลืองของเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงจะมีอุปกรณ์ตัดไฟ (Thermostat) ติดอยู่ในกรณีที่อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงสูงเกิน 130 องศาเซลเซียสซึ่งอาจทำความเสียหายให้กับเซลล์เชื้อเพลิงได้ ระบบควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วงการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ 30 – 70 องศาเซลเซียส ในส่วนของแก๊สจะเข้าสู่เซลล์ทางข้อต่อในลอนขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว และออกทางข้อต่อขนาดเดียวกับทางเข้าเพื่อไปยังส่วนวาล์วควบคุมความดันกลับต่อไป ส่วนในการวัดค่ากระแส ที่เซลล์เชื้อเพลิงจะมีช่องสำหรับวัดค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ฝั่งแอโนดและแคโทดเพื่อต่อไปยังเครื่อง Potentiostat/Galvanostat

4.1.4 เครื่อง Potentiostat/Galvanostat

ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่อทำหน้าที่เป็น load สำหรับวัดค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง ในการวัดจะเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์และวัดค่ากระแสที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง ด้วยวิธี Chrono methodes (interval time > 0.1 วินาที) แบบ Amperometry และข้อมูลจะถูกบันทึกด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปแสดงในรูปของกราฟโพลลาไรเซชันต่อไป แต่เนื่องจากเครื่อง Potentiostat/Galvanostat มีข้อจำกัดในการวัดค่ากระแสได้ไม่เกิน 1 แอมแปร์ ทำให้ในการทดลองไม่สามารถวัดค่ากระแสได้เกิน 1 แอมแปร์หรือค่าความหนาแน่นกระแส 200 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

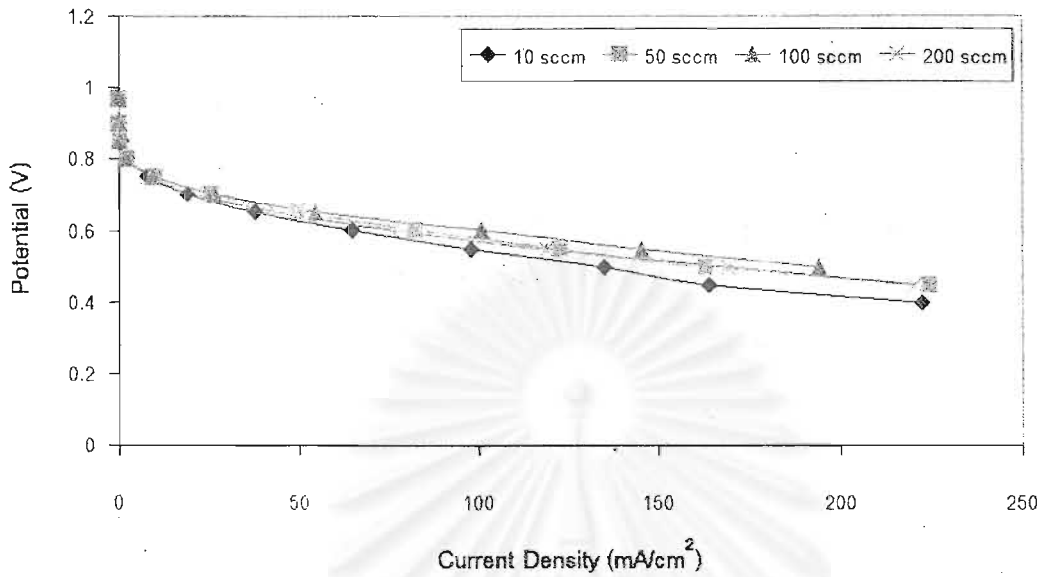
4.1.5 วาล์วควบคุมความดันกลับ (Back Pressure Valve)

วาล์วควบคุมความดันกลับทำหน้าที่ในการปรับความดันภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง โดยการปิดหรือเปิดวาล์ว เพื่อปรับอัตราการไหลของแก๊สออกจากหน่วยทดสอบเพื่อให้ได้ความดันภายในหน่วยทดสอบตามต้องการซึ่งสามารถปรับความดันได้สูงสุดที่ 16 bar แต่ในการปรับค่าความดันภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนนี้ สิ่งที่ต้องคำนึงมากที่สุดคือความดันที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเพราะเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สามารถทนความดันได้ไม่เกิน 3 bar อีกทั้งความดันต่างที่จะเกิดขึ้นที่เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส เพราะเมื่อมีการปรับความดันภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง เท่ากับเป็นการเปลี่ยนแปลงความดันขาออกของเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส อาจจะทำให้ผลต่างความดันของแก๊สเข้าและออกอยู่นอกช่วงที่เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สจะทนรับได้ ทำให้เกิดความเสียหายกับเครื่องได้

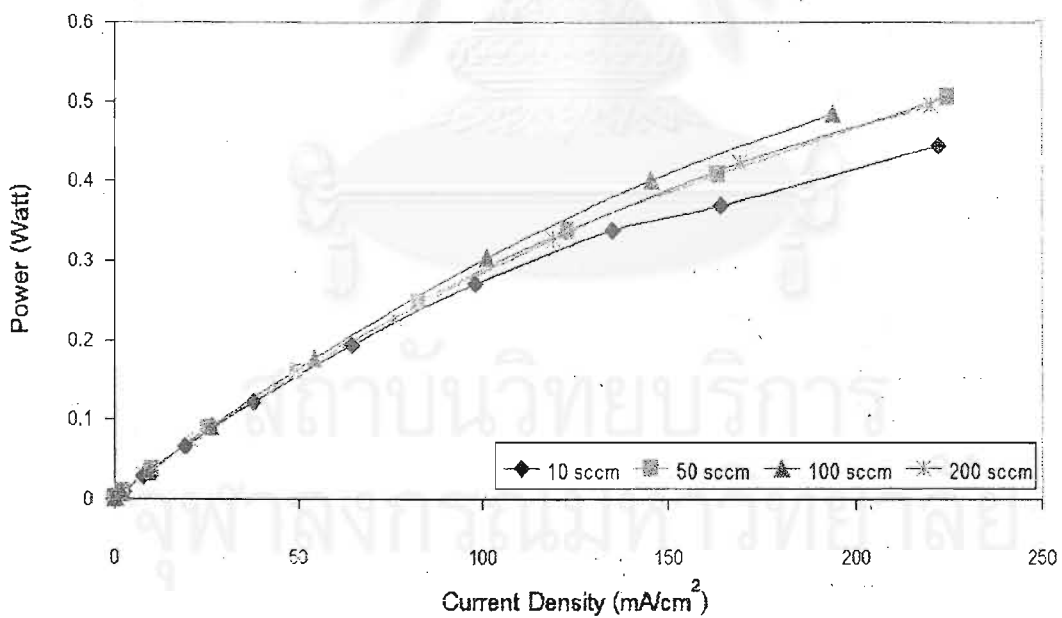
4.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊ส

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนเท่ากันที่ 10, 50, 100 และ 200 sccm แก๊สทั้งสองชนิดผ่านระบบให้ความชื้นก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยให้มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียสและความดันบรรยากาศ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับค่า

ความหนาแน่นกระแส และในรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นกระแส



รูปที่ 4.2 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สต่าง ๆ โดยที่อุณหภูมิการทำงาน 30 องศาเซลเซียส แก๊สอัดด้วย ความชื้น และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สต่าง ๆ โดยที่อุณหภูมิการทำงาน 30 องศาเซลเซียส แก๊สอัดด้วย ความชื้น และความดันบรรยากาศ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความต่างศักย์และค่าความหนาแน่นกระแสจากกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 4.2 และกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลของแก๊ส ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์หรือกำลังไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นกระแสมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงที่ค่าอัตราการไหลมากกว่า 100 sccm ตัวอย่างเช่นที่ค่าความต่างศักย์ที่ 0.5 โวลต์ สำหรับอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 10 sccm ได้ค่าความหนาแน่นประมาณ 135 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ได้กำลังไฟฟ้า 0.34 วัตต์ ส่วนที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 100 sccm จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสประมาณ 194 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ได้กำลังไฟฟ้า 0.49 วัตต์ ซึ่งค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 200 sccm จะได้กระแสและกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 169.3 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และ 0.42 วัตต์ ตามลำดับ

จากกราฟโพลาริเซชันที่ได้จะพบว่าค่าความต่างศักย์ที่ได้จะไม่เท่ากับค่าตามทฤษฎีที่เท่ากับ 1.23 โวลต์ โดยได้ค่าความต่างศักย์เริ่มต้น (open circuit potential) เพียง 0.97 โวลต์เท่านั้น เนื่องจากเกิดการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (cross over) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเกิดขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจนขึ้นภายในเซลล์ เชื้อเพลิงจึงไม่เกิดการไหลของอิเล็กตรอน โดยส่วนใหญ่ไฮโดรเจนจะเคลื่อนที่ไปขั้วแคโทด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแคโทด พร้อมกับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่ขั้วแคโทดขณะเดียวกัน จึงเกิดเป็นกระแสภายใน (internal current) ส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ที่ขั้วแคโทดเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้ค่าความต่างศักย์รวมที่ออกมามีค่าลดลง จึงได้ค่าที่ไม่เท่าตามทฤษฎี [Larminie, 2000]

ลักษณะของกราฟโพลาริเซชันที่ได้ในช่วงที่ค่าความหนาแน่นกระแสต่ำคือในช่วงไม่เกิน 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กราฟจะมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกซึ่งเกิดจากการเกิดโพลาริเซชันทางเคมี (Activation Polarization) ซึ่งเกิดจากผลของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ถ้าปฏิกิริยาเกิดได้ช้าหรือมีค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาสูงจะทำให้เกิดโพลาริเซชันทางเคมีสูงด้วย จากผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สพบว่าโพลาริเซชันทางเคมีจะมีค่าใกล้เคียงกันมากดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าอัตราการไหลของแก๊สไม่มีผลต่อโพลาริเซชันทางเคมี

ในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ประมาณ 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะเป็นช่วงที่เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance Polarization) ซึ่งเกิดจากมีความต้านทานในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน และขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งที่อัตราการไหลของแก๊สแตกต่างกันจะพบว่ามีการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานที่แตกต่างกัน สังเกตได้จากความชันของกราฟที่ได้ โดยที่อัตราการไหลของแก๊สต่ำจะมีการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมาก

กว่าที่อัตราการไหลของแก๊สสูง เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สต่ำปริมาณน้ำที่เข้ามาพร้อมแก๊สที่ผ่านระบบให้ความชื้นภายนอกจะมีปริมาณน้อยกว่าแก๊สที่ไหลเข้าสู่ระบบที่อัตราการไหลสูงกว่า ทำให้ปริมาณความชื้นภายในของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนอาจจะไม่เพียงพอที่จะทำให้การนำโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะการเคลื่อนที่ของโปรตอนจำเป็นจะต้องมีน้ำเป็นตัวช่วยในการเคลื่อนที่ของโปรตอนหรือกระบวนการที่เรียกว่า electro-osmotic drag เมื่อไม่มีน้ำเพียงพอทำให้เพิ่มความต้านทานในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง [Larminie, 2000] แต่จากกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 4.2 จะไม่เกิดการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (concentration polarization) ในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสสูง ๆ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่อง Potentiostat/Galvanostat ที่สามารถวัดค่ากระแสได้เพียง 1 แอมแปร์เท่านั้น

ด้วยเหตุผลดังกล่าวสรุปได้ว่าอัตราการไหลของแก๊สมีผลต่อค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับค่าความหนาแน่นกระแสหรือประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง สังเกตได้จากค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้ที่ค่าความต่างศักย์เดียวกัน ค่าที่ได้จะไม่เท่ากัน เนื่องจากความสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงอันเกิดจากปริมาณน้ำที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงไม่เท่ากัน ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงไม่เท่ากัน เนื่องจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นกับตัวแปรหลายตัวเช่น อัตราการไหลของแก๊ส อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง องค์ประกอบของสารออกซิไดส์ ปริมาณความชื้น และความดัน ดังนั้นในการทดลองต่อไป จะศึกษาการออกแบบการทดลองก่อนเพื่อหาผลของตัวแปรที่ได้ผลจริง

4.3 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design) [Montgomery, 1997]

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นกับตัวแปรต่าง ๆ หลายตัวที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเช่น อัตราการไหลของแก๊ส อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ปริมาณความชื้นของแก๊สที่ใช้ หรือความดันของเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมและผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร โดยการทำการออกแบบการทดลอง (Experimental design) โดยเลือกตัวแปรที่นำมาทำการออกแบบการทดลอง 3 ตัวด้วยกันคือ อัตราการไหลของไฮโดรเจน อัตราการไหลของออกซิเจน และอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อกำหนดภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและสามารถนำภาวะดังกล่าวไปใช้ในการศึกษาผลของตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่น

แลกเปลี่ยนโปรตอน ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบการทดลองเป็นการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของอัตราการไหลของแก๊สทั้งสองชนิดและอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงที่สุด ที่ความต่างศักย์เดียวกัน แล้วนำค่าที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรต่อไป

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

การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเป็นการออกแบบการทดลองที่ต้องการศึกษาผลของตัวแปรหลายตัวที่มีผลต่อค่าการตอบสนองของข้อมูล ซึ่งในการทดลองนี้ค่าการตอบสนองของข้อมูลคือค่าความหนาแน่นกระแส ตัวแปรที่ศึกษามี 3 ตัวแปร คือ อัตราการไหลของไฮโดรเจน อัตราการไหลของออกซิเจน และอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นการออกแบบการทดลองจะเป็นแบบ 2^3 แฟกทอเรียล โดยกำหนดให้

A คือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่ำสุดที่ 10 sccm (-) และสูงสุดที่ 200 sccm (+)

B คือ อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ำสุดที่ 10 sccm (-) และสูงสุดที่ 200 sccm (+)

C คือ อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำสุดที่ 30 องศาเซลเซียส (-) และสูงสุดที่ 70 องศาเซลเซียส (+)

จากการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล จะทำการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง แต่เนื่องจากต้องการตรวจสอบความแม่นยำของข้อมูลจึงทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง นอกจากนี้ได้ทำการทดลองที่ค่ากลาง (0) ของตัวแปร (A = 100 sccm, B = 100 sccm และ C = 50 องศาเซลเซียส) เพื่อยืนยันสมมติฐานที่กำหนดว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรกับผลการทดลองต้องเป็นเส้นตรงในช่วงระดับต่ำสุดและสูงสุดที่ทำการทดลอง ทำให้การทดลองทั้งหมดเป็น 11 การทดลอง ดังตารางที่ 4.1

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 การออกแบบการทดลองจำนวน 11 การทดลอง

ลำดับที่	การทดลอง	A	B	C
1	(1)	-	-	-
2	a	+	-	-
3	b	-	+	-
4	ab	+	+	-
5	c	-	-	+
6	ac	+	-	+
7	bc	-	+	+
8	abc	+	+	+
9	center	0	0	0
10	center	0	0	0
11	center	0	0	0

ทำการทดลองตามตารางที่ 4.1 โดยทำซ้ำการทดลองละ 2 ครั้ง แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาผลกระทบและค่าความแปรปรวนของตัวแปร

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรจะแสดงในตารางที่ 4.2 โดยมีการคำนวณค่า F_0 ซึ่งค่า F_0 จะแสดงผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัว โดยพิจารณาค่า F_0 ของแต่ละตัวแปรเทียบกับ F_0 ณ จุดวิกฤต โดยที่ค่า F_0 ณ จุดวิกฤตจะเท่ากับ F_{α, U_1, U_2} ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้จากเอกสารอ้างอิง [Montgomery, 1997] เมื่อค่า α คือช่วงความเชื่อมั่นที่พิจารณา U_1 คือ degree of freedom ของตัวแปร และ U_2 คือ degree of freedom ของความคลาดเคลื่อน ตัวแปรที่ศึกษาจะมีผลกระทบกับการทดลองเมื่อค่า $F_{0(i)} > F_{\alpha, U_1, U_2}$ เนื่องจากเมื่อค่า $F_{0(i)}$ มีค่ามากกว่า F_{α, U_1, U_2} ทำให้ทราบว่าตัวแปร i มีผลทำให้ผลตอบสนองเบี่ยงเบนจากสมมติฐานที่กำหนดข้างต้น พฤติกรรมของการทดลองไม่เป็นตามข้อสมมติฐานเนื่องจากตัวแปร i ดังนั้นตัวแปร i จึงเป็นตัวแปรที่มีผลกับการทดลอง กล่าวคือถ้า $F_{0(i)} > F_{\alpha, U_1, U_2}$ สามารถปฏิเสธสมมติฐานได้แล้ว ตัวแปรนั้นจะมีผลต่อการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA)

Source of Variation	Sum of Square	Degrees of Freedom	Mean Square	Fo
A	3507.39	1	3507.39	23.49
B	250.18	1	250.18	1.68
C	13385.01	1	13385.01	89.63
AB	8576.94	1	8576.94	57.44
AC	8023.81	1	8023.81	53.73
BC	14714.39	1	14714.39	98.54
ABC	2588.70	1	2588.70	17.34
Pure quadratic	679.99	1	679.99	4.55
Error	298.66	2	149.33	
Total	52025.07	10		

การกระจายของข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงกลางซึ่งโดยประมาณอยู่ที่ 95 % จึงเลือกพิจารณาที่ช่วงความเชื่อมั่น (α) เท่ากับ 0.05 ดังนั้นค่าวิกฤต ($F_{\text{critical}} = F_{0.05,1,2}$) เท่ากับ 18.51 จากตารางพบว่าค่า F_0 ของตัวแปร A, C, AB, AC และ BC มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต แต่ F_0 ของ Pure quadratic มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤต แสดงว่าค่าตรงกลางไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแส ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า อัตราการไหลของไฮโดรเจน (A), อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (C), สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไฮโดรเจนกับอัตราการไหลของออกซิเจน (AB), สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไฮโดรเจนกับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (AC) และ สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของออกซิเจนกับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (BC) มีผลต่อความหนาแน่นกระแสอย่างมีนัยสำคัญ จากผลที่ได้จากตาราง ANOVA นำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression Model) ได้ต่อไป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression model)

ในการทำ 2^3 factorial design เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์ผลจึงนำผลที่ได้จากตารางการวิเคราะห์ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อผลการทดลองมาจัดในเทอมของสมการเชิงคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_A A + \beta_C C + \beta_{AB} AB + \beta_{AC} AC + \beta_{BC} BC \dots \dots \dots (4.1)$$

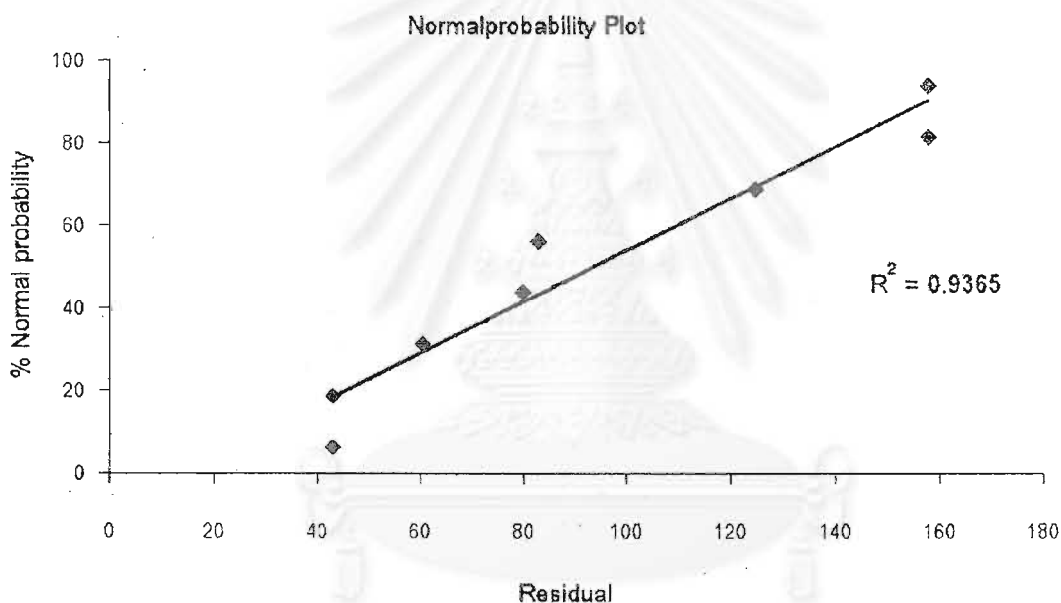
โดยที่

\hat{y} คือ ค่าผลตอบสนองที่คำนวณมาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

β_0 คือ ค่าผลตอบสนองเนื่องจากตัวแปรที่ไม่ได้ทำการทดลองซึ่งสามารถคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของข้อมูลทั้งหมด

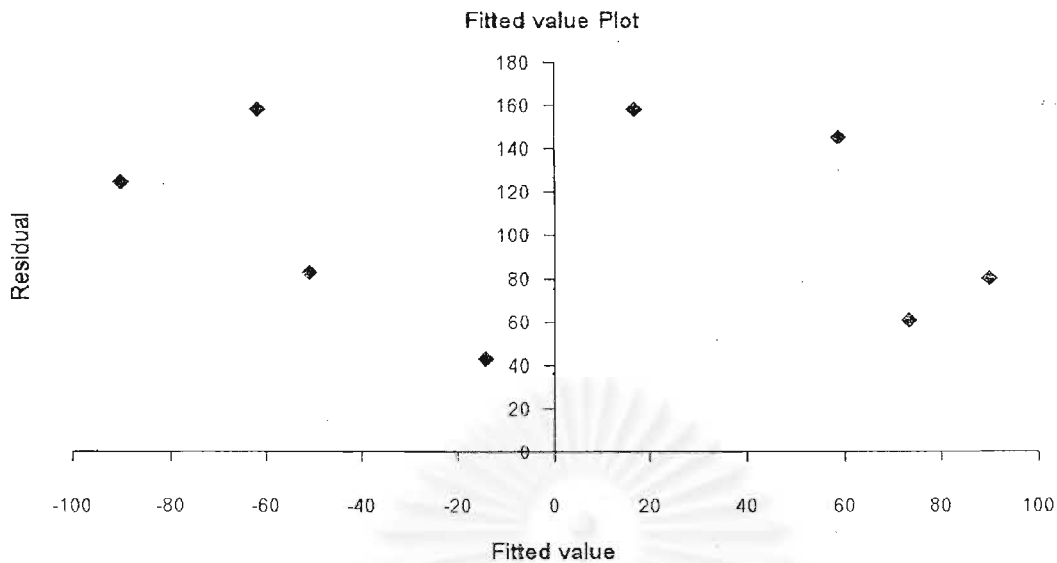
β_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีผลในการทดลองซึ่งคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของตัวแปรนั้น ๆ

จากสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้นำไปเขียนกราฟศึกษาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 Normal Probability Plot ของค่าความหนาแน่นกระแส

จากรูปที่ 4.4 พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9365 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จึงสรุปว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบอิสระ ความแปรปรวนมีค่าคงที่และไม่มีค่าเฉลี่ยของข้อมูล

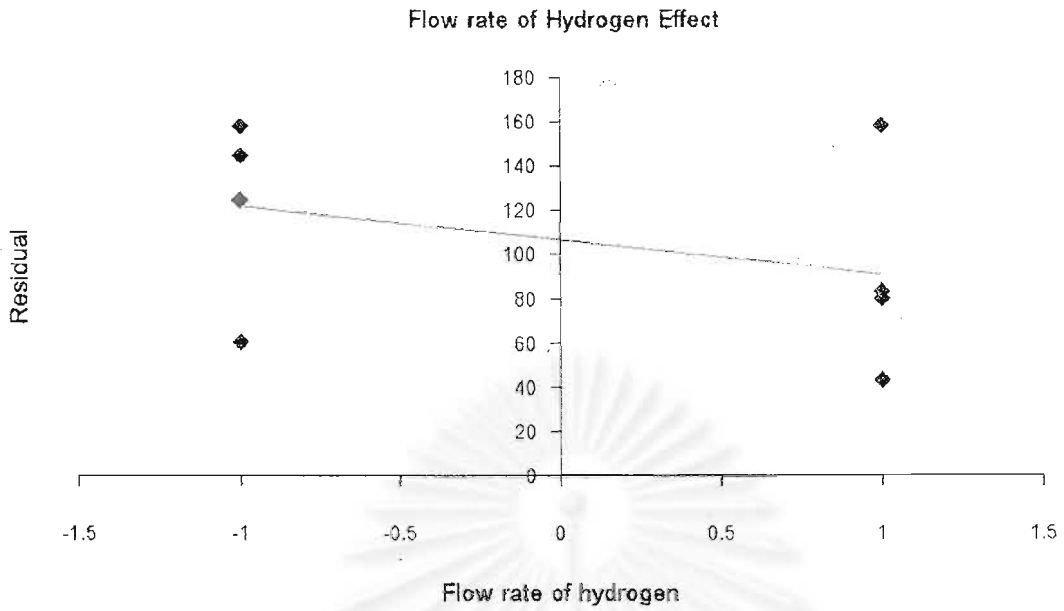


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลตอบสนองที่มาจาก การคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

การกระจายตัวของกราฟในรูปที่ 4.5 ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นแสดงว่าความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ สรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สมมุติขึ้นสามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง กล่าวคือในการทดลองจริงตัวแปรที่มีบทบาททำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเบี่ยงเบนออกจากค่ามาตรฐานคือ อัตราการไหลของไฮโดรเจน (A), อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (C), สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไฮโดรเจนกับอัตราการไหลของออกซิเจน (AB), สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไฮโดรเจนกับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (AC) และสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของออกซิเจนกับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (BC)

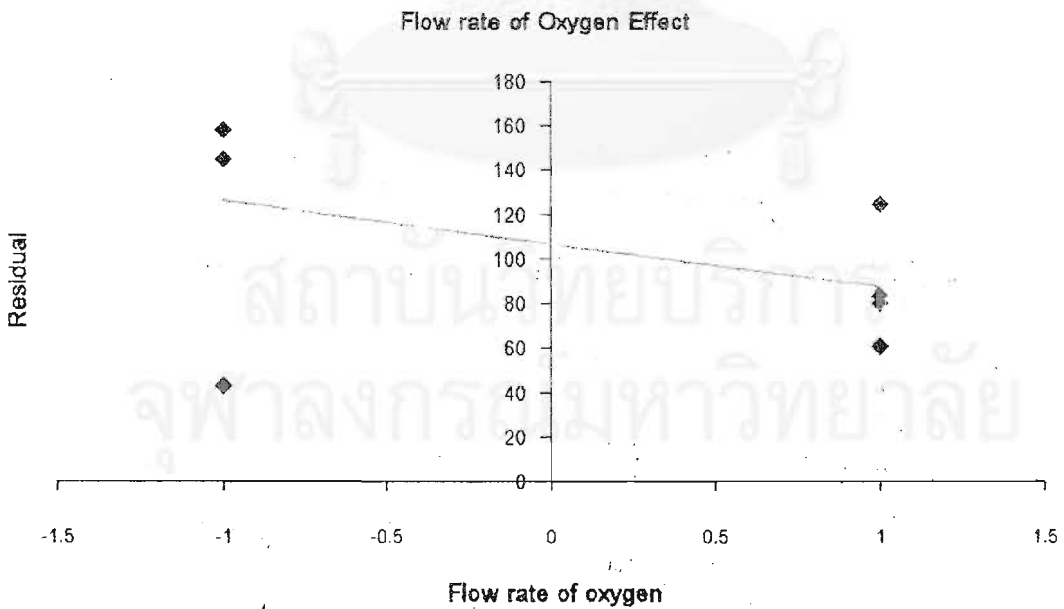
การพิจารณาความคลาดเคลื่อนและค่าเฉลี่ยของตัวแปรหลักทำได้โดยเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของระดับของตัวแปรกับค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



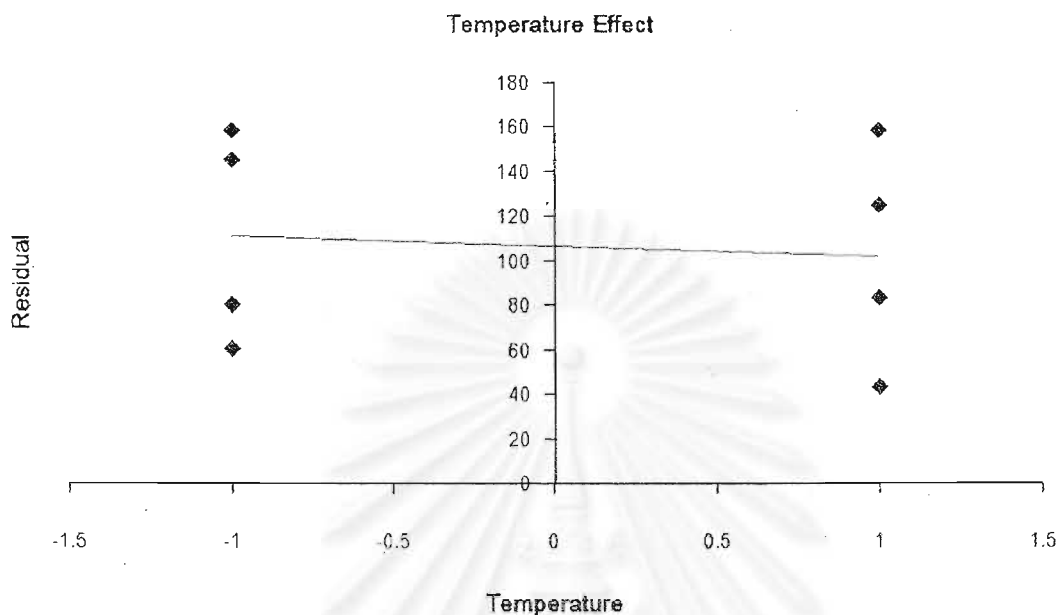
รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของอัตราการไหลของไฮโดรเจน

จากรูปที่ 4.6 มีการกระจายตัวอย่างไร้รูปแบบ จึงสรุปว่า ค่าความแปรปรวนของอัตราการไหลของไฮโดรเจน (A) มีค่าคงที่ แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของไฮโดรเจนไม่ทำให้ค่ากระแสที่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของอัตราการไหลของออกซิเจน

จากกราฟในรูปที่ 4.7 จะพบว่าผลที่ได้มีการกระจายตัวอย่างมีรูปแบบ จึงสรุปว่า ค่าความแปรปรวนของอัตราการไหลของออกซิเจน (B) มีค่าไม่คงที่ ที่อัตราการไหลสูงจะให้ค่าความแปรปรวนน้อยกว่าที่อัตราการไหลต่ำ ดังนั้นในการทดลองควรจะทำให้อัตราการไหลของออกซิเจนสูง

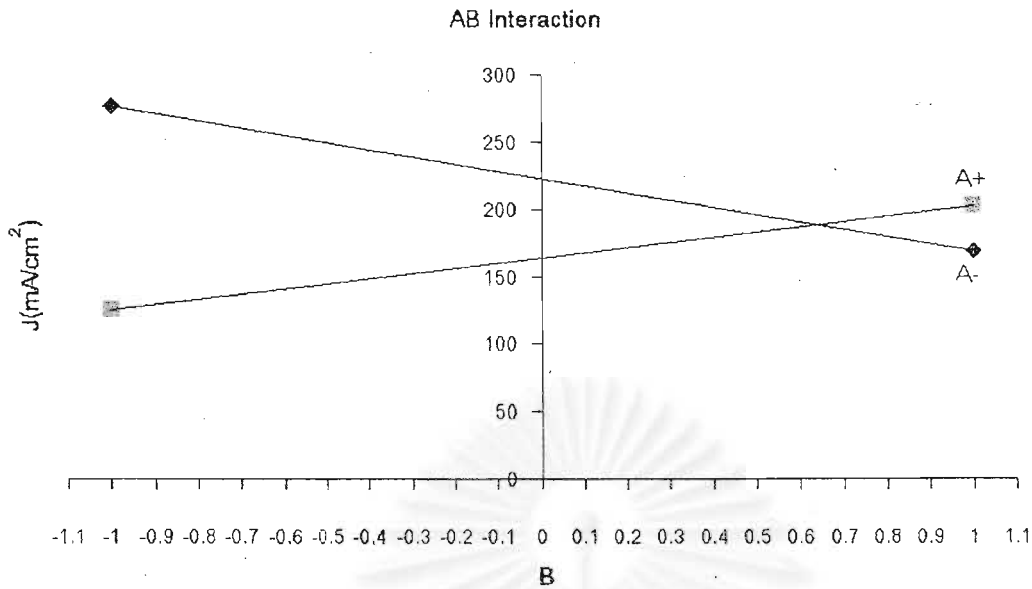


รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองของอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

จากกราฟในรูปที่ 4.8 พบว่าผลที่ได้มีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบ จึงสรุปว่า ค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (C) มีค่าคงที่ แสดงว่าอุณหภูมิของเซลล์ไม่ทำให้ค่ากระแสที่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก

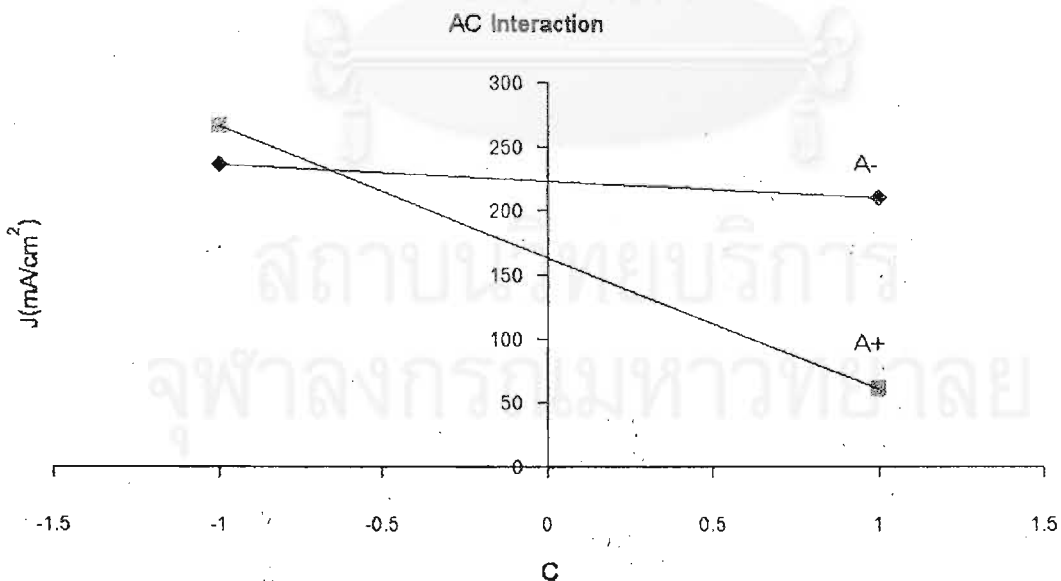
ส่วนต่อมาศึกษาถึงผลของความสัมพันธ์ของผลกระทบ (interaction) แต่ละตัวแปร โดยแสดงด้วยกราฟของความสัมพัทธ์ระหว่างผลกระทบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ที่ระดับต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 – 4.11





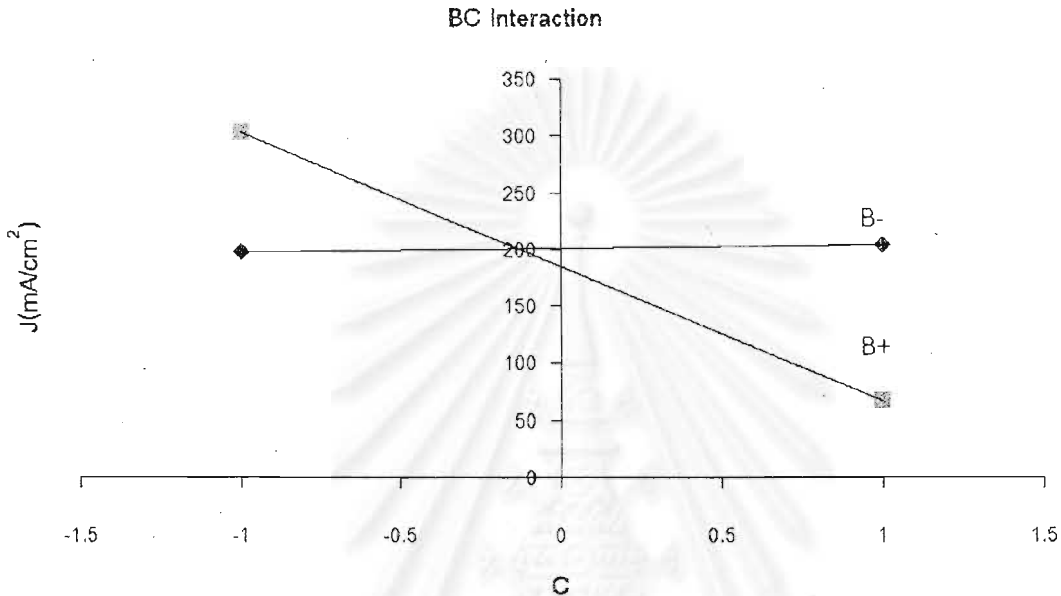
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ระหว่างอัตราการใช้ไฮโดรเจนกับอัตราการใช้ของออกซิเจน

จากรูปที่ 4.9 แสดงถึงผลกระทบบระหว่างอัตราการใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจน พบว่าที่ค่าอัตราการใช้ของออกซิเจนต่ำจะส่งผลให้ค่ากระแสสูงโดยเฉพาะเมื่ออัตราการใช้ไฮโดรเจนต่ำ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ระหว่างอัตราการใช้ไฮโดรเจนกับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

จากรูปที่ 4.10 แสดงถึงผลกระทบระหว่างอัตราการใช้ไฮโดรเจนและอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าที่อุณหภูมิต่ำจะให้ค่ากระแสสูงโดยเฉพาะเมื่อใช้อัตราการใช้ไฮโดรเจนสูง ในการทดลองควรใช้อัตราการใช้ไฮโดรเจนต่ำเพราะค่ากระแสที่เกิดขึ้นจะมีความแปรปรวนน้อยเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ ซึ่งแตกต่างอย่างมากกับกรณีใช้อัตราการใช้ไฮโดรเจนสูง

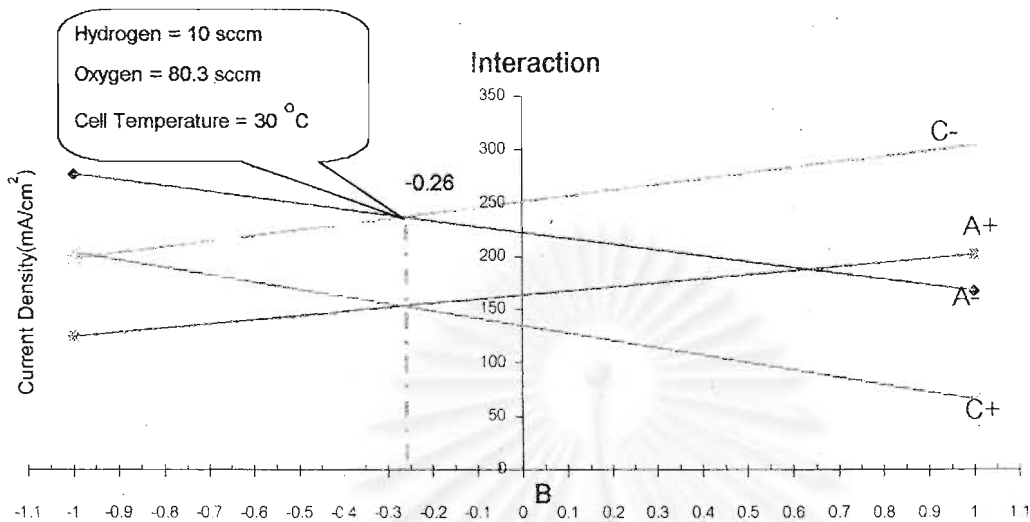


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบกับค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ระหว่างอัตราการใช้ของออกซิเจนกับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลกระทบระหว่างอัตราการใช้ของออกซิเจนและอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าที่อุณหภูมิต่ำจะให้ค่ากระแสสูงโดยเฉพาะเมื่อใช้อัตราการใช้ของออกซิเจนสูง แต่ในการทดลองควรใช้อัตราการใช้ของออกซิเจนต่ำเพราะค่าความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นจากการใช้อัตราการใช้ของออกซิเจนต่ำจะมีความแปรปรวนน้อยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสจะมีความแตกต่างมากเมื่อใช้อัตราการใช้ของออกซิเจนสูง

จากการศึกษาความแปรปรวนของตัวแปรและการทำ Regression Model พบว่าตัวแปรบางตัวมีค่าความแปรปรวนไม่คงที่หรือมีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นในการทดลองจึงไม่สามารถนำภาวะที่ให้ค่ากระแสสูงที่สุดมาเป็นภาวะเริ่มได้ในการทำ univariate หรือการทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตัวหนึ่งแต่ตัวแปรที่เหลือให้คงที่เท่ากับค่าที่ภาวะเหมาะสมเพื่อเป็นการยืนยันภาวะเหมาะสม เพราะไม่สามารถควบคุมภาวะดังกล่าวได้และค่ากระแสที่ได้จะมีค่า

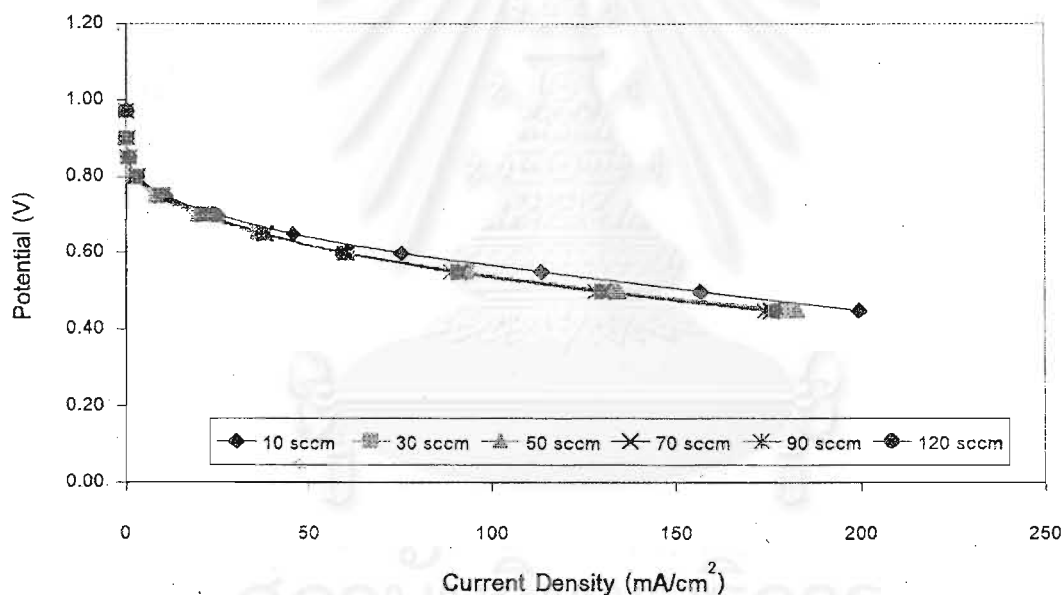
ไม่แน่นอน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาภาวะที่เหมาะสม โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดกับค่าเฉลี่ยที่ระดับต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.12



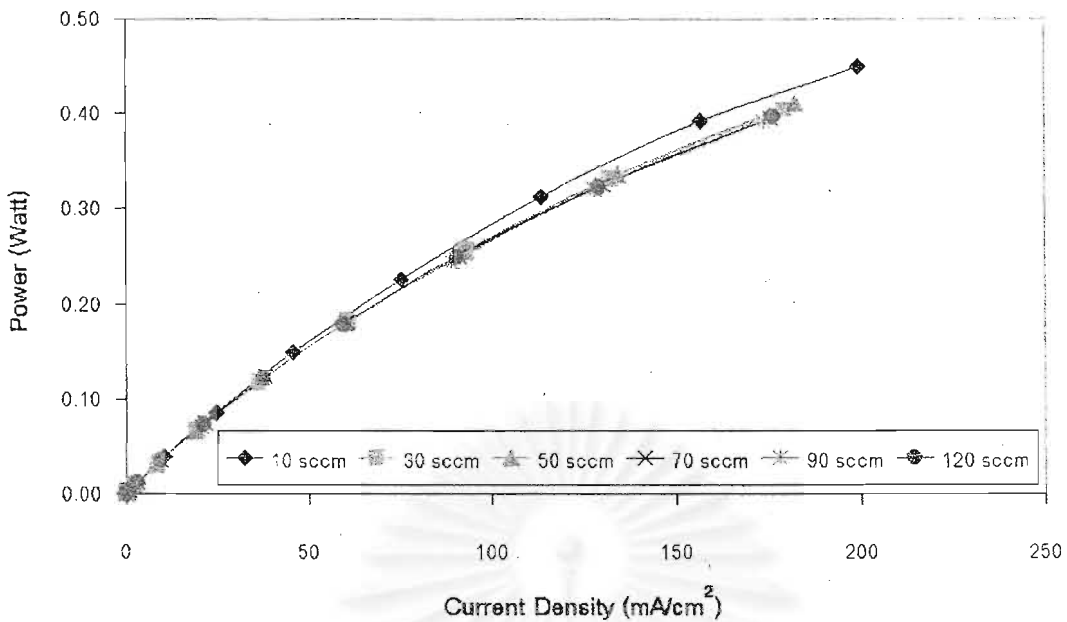
รูปที่ 4.12 ผลจากการทำการออกแบบการทดลอง (Experimental Design) เพื่อหาภาวะที่ดีที่สุดของเซลล์เชื้อเพลิง

การพิจารณากราฟในรูปที่ 4.12 จะต้องพิจารณาที่จุดตัดต่าง ๆ ของกราฟว่าจุดใดให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุดให้นำค่านั้นไปใช้ในการทำ univariate จากกราฟรูปที่ 4.12 พบว่าที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที , อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที หรือค่า Stoichiometry ratio เท่ากับ 1 และ 18 ของไฮโดรเจนและออกซิเจนตามลำดับ ในส่วนอุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จะให้ความหนาแน่นกระแสสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบที่ความต่างศักย์เดียวกัน จึงเลือกภาวะนี้มาทำ univariate เพื่อเป็นการยืนยันว่าภาวะที่ได้ดังกล่าวเป็นภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด โดยทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรทีละตัว แล้วให้ตัวแปรอีกสองตัวคงที่ โดยให้อุณหภูมิของระบบให้ความชื้นคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองดังนี้

การศึกษาถึงผลของอัตราการไหลของไฮโดรเจน ผลการทดลองได้จากการเพิ่มอัตราการไหลของไฮโดรเจนจาก 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที ในรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไม่เกิน 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร อาจเนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่เข้ามาพร้อมกับแก๊สไฮโดรเจนจะมีมากขึ้น เมื่อแก๊สที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของเซลล์จึงมีการควบแน่นของน้ำและน้ำจะไปเกาะอยู่ที่ผิวของขั้วไฟฟ้า ทำให้ไฮโดรเจนที่จะเกิดปฏิกิริยาต้องแพร่ผ่านน้ำที่เกาะอยู่บนผิวขั้วไฟฟ้าเพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนลดลง ส่งผลให้เกิดโพลาริเซชันทางเคมีขึ้น แต่ในส่วนของโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมีความแตกต่างไม่มากนักเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของไฮโดรเจน ดังนั้นอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุดคือที่ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที

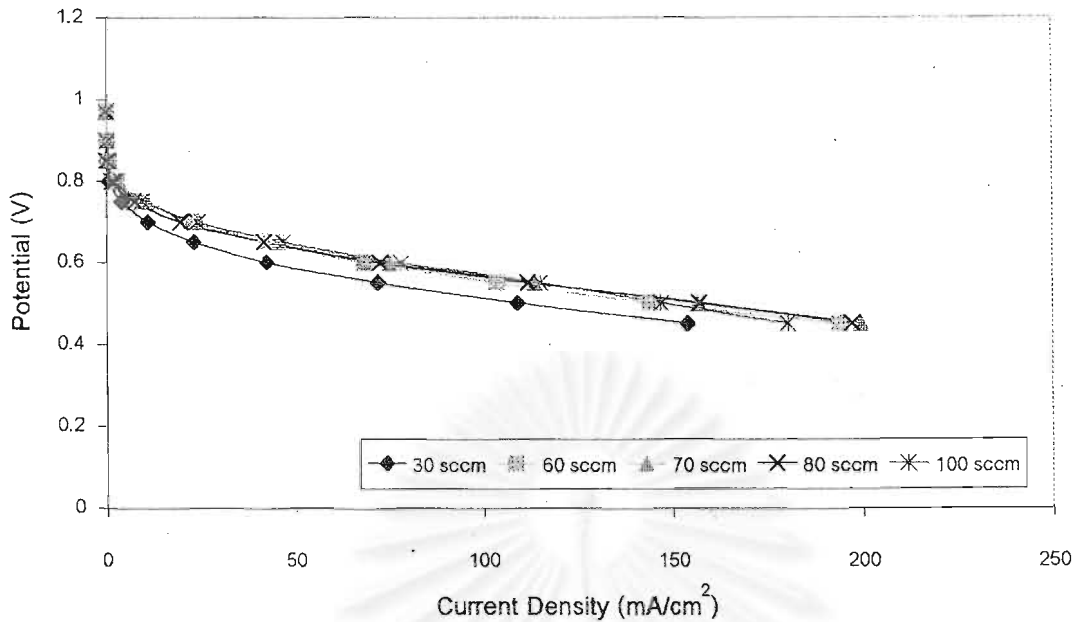


รูปที่ 4.13 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอัดด้วยตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ

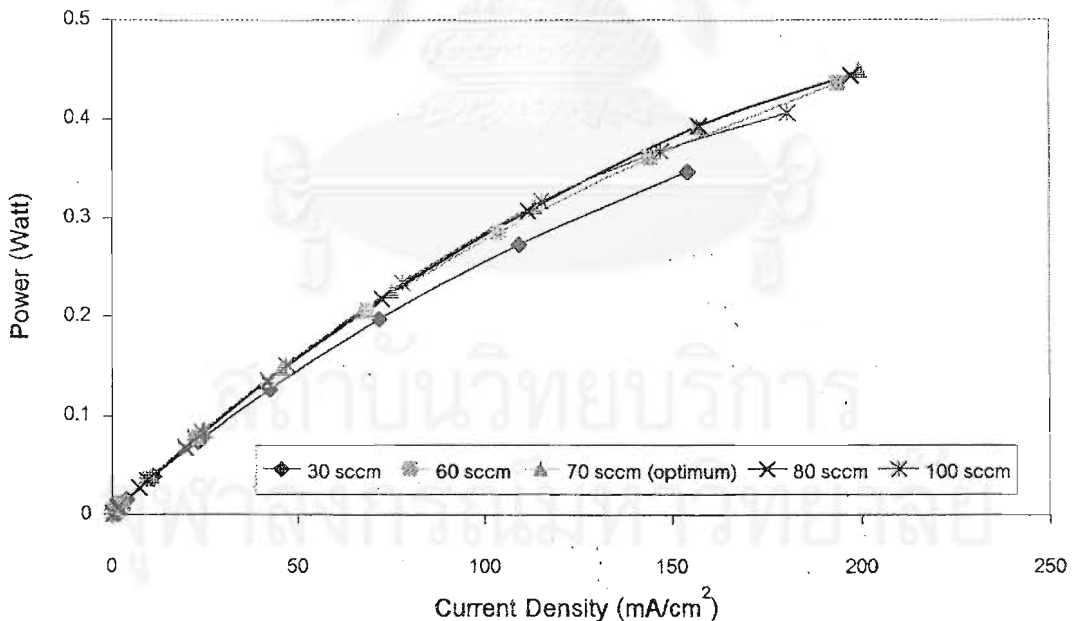


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอัดตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ

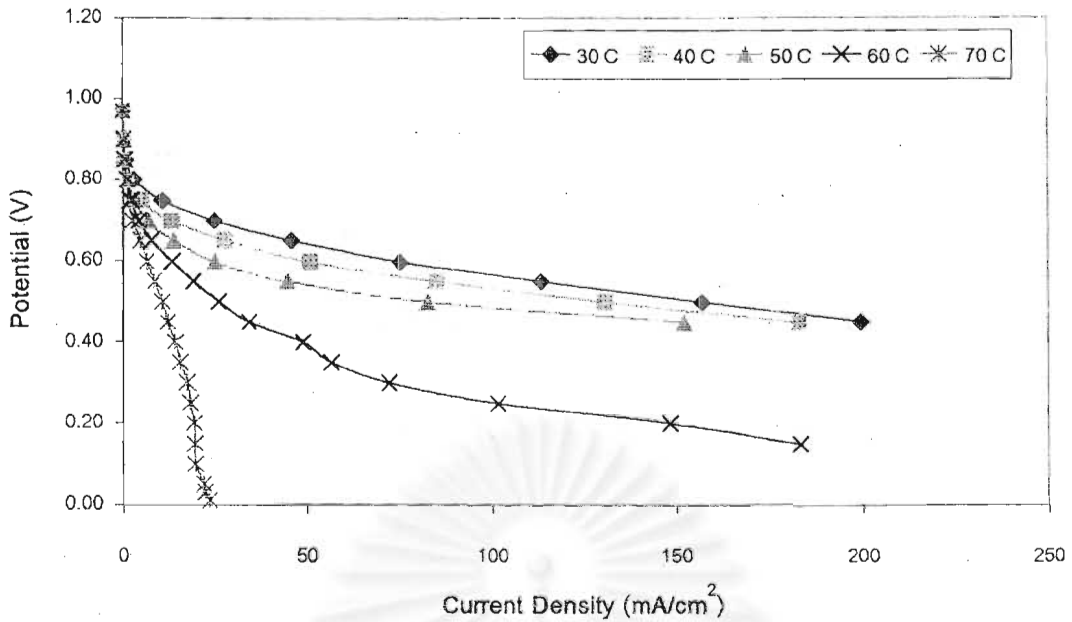
เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของออกซิเจนโดยให้ค่าอัตราการไหลของไฮโดรเจนและอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคงที่ ณ ภาวะที่เหมาะสม ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่าเมื่อลดอัตราการไหลของออกซิเจนลงจากค่าที่ได้จากการออกแบบการทดลองคือ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที มีการเกิดโพลาไรเซชันทางเคมีเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่เท่ากับ 30 sccm หรือ 0.0013 โมลต่อนาที เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนลดลงปริมาณออกซิเจนที่จะแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามีน้อยลงส่งผลให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนลดลง ซึ่งโดยปกติแล้วปฏิกิริยาการรีดักชันของออกซิเจนจะเกิดขึ้นได้ช้าอยู่แล้วจึงทำให้เห็นผลของโพลาไรเซชันทางเคมีมากกว่าเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของไฮโดรเจน ในส่วนโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทานจะมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความชื้นที่เข้าไปกับแก๊สเพียงพอกับความต้องการในการทำงานของเซลล์สำหรับการเคลื่อนที่ของโปรตอนในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เมื่อพิจารณาที่กำลังไฟฟ้าที่ได้พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของออกซิเจน ยกเว้นที่อัตราการไหลที่ 30 sccm จะให้กำลังไฟฟ้าต่ำเนื่องจากผลของโพลาไรเซชันทางเคมี จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าที่อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm เซลล์เชื้อเพลิงจะมีสมรรถนะการทำงานสูง



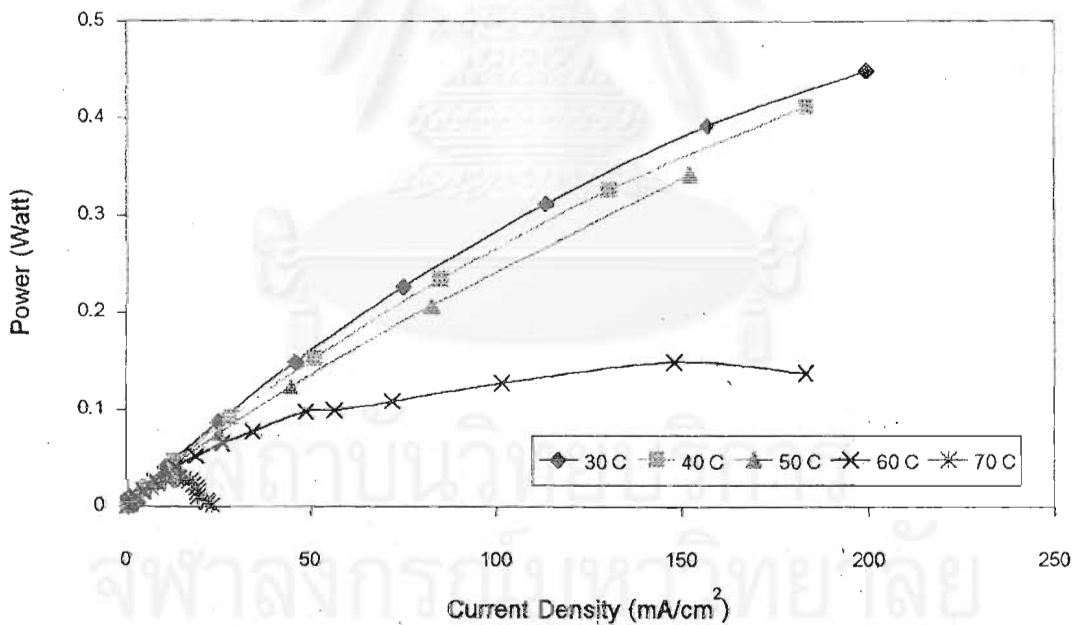
รูปที่ 4.15 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของออกซิเจนต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อวินาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของออกซิเจนต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อวินาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.17 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิการทำงานต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิการทำงานต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ

การศึกษาผลของอุณหภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 30 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mennola (2000) ที่ศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ 70 องศาเซลเซียสให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุด โดยผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่ามีเกิดโพลาริเซชันทางเคมีเช่นเดียวกับการทดลองที่ศึกษาถึงผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ซึ่งเกิดจากกระบวนการในการเกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้เพราะที่อุณหภูมิสูงขึ้น เซลล์จะสูญเสียความชื้นมากขึ้น ปริมาณน้ำในเซลล์ไม่เพียงพอต่อการนำโปรตอนแพร่ผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนไปเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแคโทด อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ส่งผลให้เกิดโพลาริเซชันทางเคมีมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่ค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้นจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับความหนาแน่นกระแสเกิดขึ้นมากในช่วงดังกล่าวมีการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานจะมีมากขึ้น ตัวอย่างเช่นที่ค่าความต่างศักย์ที่ 0.5 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ได้ค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 194 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.49 วัตต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 70 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นกระแสลดลงเหลือเพียงแค่ 22.3 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และได้กำลังไฟฟ้าเพียง 0.06 วัตต์ ซึ่งมีค่าลดลงถึง 88.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียสพบว่าค่าโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานจะลดลงที่ค่าความหนาแน่นกระแสมากกว่า 50 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่ได้จากปฏิกิริยาเพียงพอกับความต้องการของเซลล์เชื้อเพลิงในการนำโปรตอนจึงทำให้ค่าความต้านทานลดลง

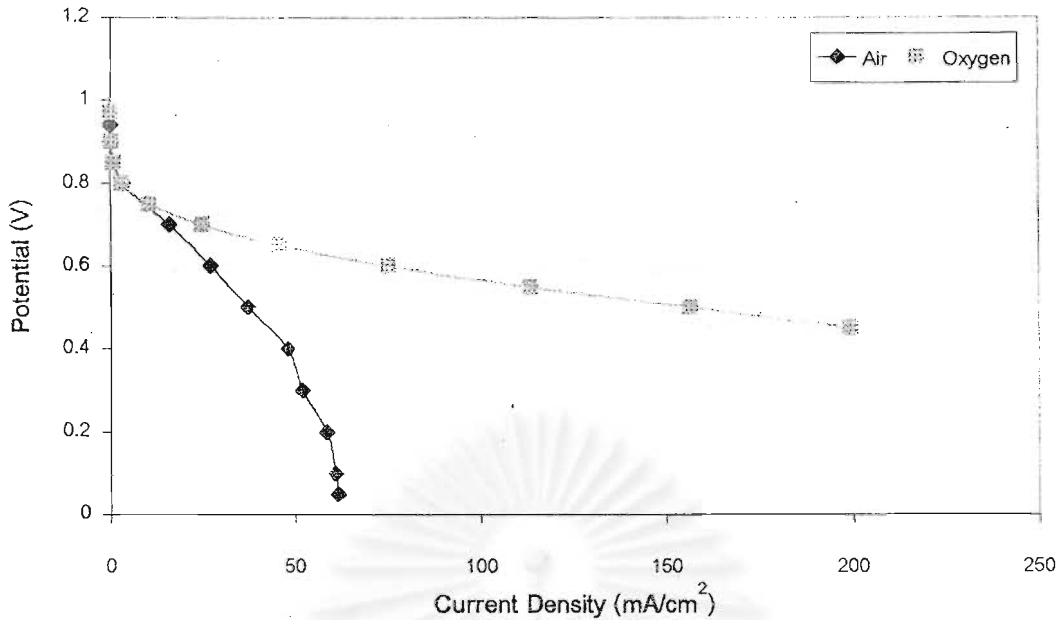
เหตุที่การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมีมากขึ้น เนื่องจากมีความต้านทานภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการสูญเสียน้ำภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เพราะเมื่ออุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น แก๊สที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงมีความสามารถในการพาไอน้ำไปพร้อมกับแก๊สมากขึ้น อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์นี้ไม่ควรเกิดขึ้นเนื่องจากแก๊สที่จะเข้าสู่เซลล์จะได้รับความชื้นอิ่มตัวที่ 60 องศาเซลเซียส จึงน่าจะมีมากขึ้นเพียงพอถ้าอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงไม่เกินค่าอุณหภูมิของระบบให้ความชื้น แต่ผลการทดลองนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความชื้นของแก๊สที่เข้าไม่เพียงพอ ดังนั้นเมื่อพิจารณาหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างระบบให้ความชื้นและส่วนต่อเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง พบว่าแก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้นที่ 60 องศาเซลเซียสในระบบให้ความชื้นจริงแต่ระหว่างทางไหลของแก๊สไปสู่เซลล์ อาจจะมีการ

ควบแน่นของน้ำได้เนื่องจากท่อนำแก๊สเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงมีความยาวมากเกินไปและฉนวนที่หุ้มไว้ไม่เพียงพอ ทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง ส่งผลให้ค่าความดันไออิ่มตัว (saturated vapor pressure) ของน้ำลดลง [Laminie, 2000] จึงเกิดการควบแน่นของน้ำออกจากแก๊สภายในท่อ ก่อนเข้าสู่เซลล์และคงค้างอยู่ในท่อ แต่เมื่อแก๊สที่มีอุณหภูมิลดลงจากเดิมเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิการทำงานสูงกว่า ค่าความดันไออิ่มตัวในเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความดันย่อยของน้ำ (water partial pressure) หรือปริมาณน้ำภายในแก๊สมีค่าคงที่ ทำให้ความสามารถในการพาน้ำของแก๊สเพิ่มขึ้น น้ำที่มีอยู่ภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยเฉพาะที่เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนและขั้วไฟฟ้า จึงถูกแก๊สพาออกไปจากเซลล์เชื้อเพลิง เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนและขั้วไฟฟ้าจึงเกิดการสูญเสียน้ำ ความสามารถในการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นจึงลดลง ส่งผลให้มีความต้านทานเพิ่มขึ้น หรือเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมากขึ้น

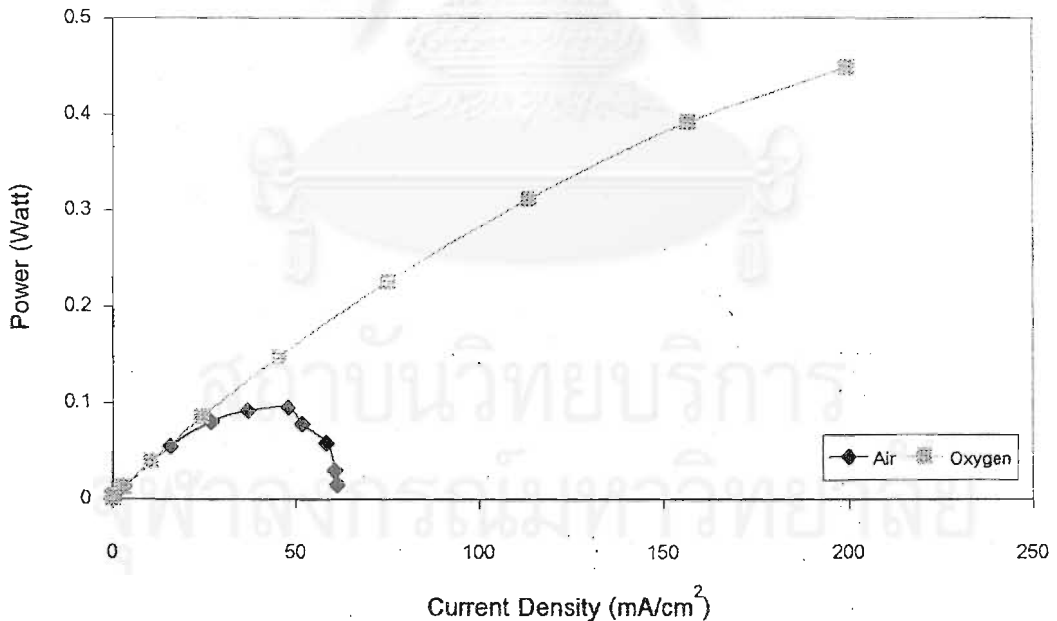
จากการทดลองพบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ละหนึ่งตัว โดยให้ตัวแปรอีกสองตัวคงที่ ค่าที่ภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทำการออกแบบการทดลองให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด ดังนั้น ภาวะที่ได้ดังกล่าวเป็นภาวะที่ดีที่สุด จึงนำภาวะที่ได้นี้ไปทำการทดลองเพื่อศึกษาผลขององค์ประกอบออกซิไดส์และปริมาณความชื้นต่อไป

4.4 ผลขององค์ประกอบออกซิไดส์

จากการทำการออกแบบการทดลองได้ภาวะที่เหมาะสมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงอันได้แก่ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นเท่ากับ 10 sccm หรือเท่ากับ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนอิ่มตัวด้วยความชื้น 80 sccm หรือเท่ากับ 0.004 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ นำภาวะดังกล่าวมาทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวออกซิไดส์โดยเปลี่ยนสารออกซิไดส์ที่ขั้วแคโทดจากแก๊สออกซิเจนเป็นอากาศ ทำการทดลองที่อัตราการไหลเท่ากับ 80 sccm เช่นเดียวกับออกซิเจน หรือถ้าเปลี่ยนให้อยู่ในหน่วยของกิโลโมลต่อนาทีจะเท่ากับ 0.0036 โมลต่อนาที เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ผลการทดลองแสดงในกราฟโพลาริเซชันรูปที่ 4.19 และกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารออกซิไดส์ต่างกัน ที่อัตราการไหลเดียวกันที่ 80 sccm โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารออกซิไดส์ต่างกัน ที่อัตราการไหลเดียวกันที่ 80 sccm โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ

จากกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 4.19 จะพบว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเมื่อเปลี่ยนสารออกซิไดส์จากแก๊สออกซิเจนเป็นอากาศ โดยที่ค่าความต่างศักย์ที่ 0.5 โวลต์ เมื่อใช้ออกซิเจนได้ค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 156.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อใช้อากาศกลับได้ค่าความหนาแน่นกระแสเพียง 37 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเท่านั้น เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าเมื่อใช้อากาศสามารถให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียง 0.1 วัตต์เท่านั้น ในกรณีออกซิเจนให้กำลังไฟฟ้าได้ถึง 0.45 วัตต์ในช่วงที่ทำการศึกษา ทั้งนี้เนื่องจากในอากาศมีแก๊สออกซิเจนซึ่งใช้ในการทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงเพียง 21 เปอร์เซ็นต์ แก๊สที่เหลือเป็นแก๊สไนโตรเจนซึ่งมีสมบัติเป็นแก๊สเฉื่อย ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนที่จะเกิดปฏิกิริยากับโปรตอนที่ผ่านเยื่อแผ่นและอิเล็กโตรอนมีปริมาณลดลงและยังถูกรบกวนด้วยแก๊สไนโตรเจนทำให้แก๊สออกซิเจนแพร่เข้าทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้น [Andreus, 2002]

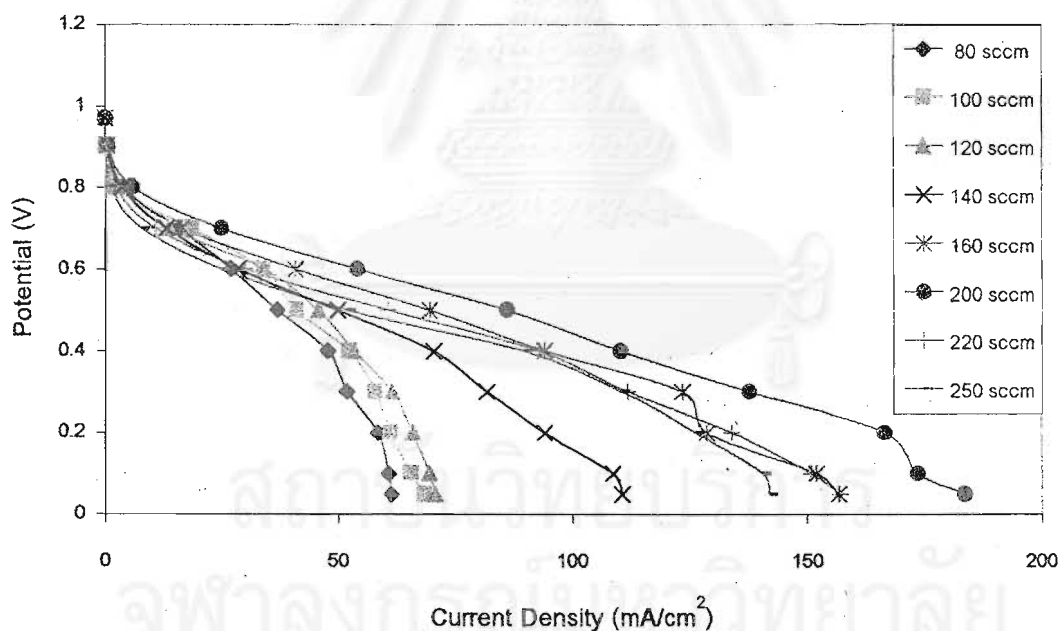
เมื่อเปรียบเทียบการเกิดโพลาริเซชันระหว่างการใช้ออกซิเจนกับอากาศจะพบว่า การเกิดโพลาริเซชันทางเคมีในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสต่ำจะใกล้เคียงกัน แสดงว่าปริมาณออกซิเจนที่เข้าไปกับอากาศยังเพียงพอและไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่เมื่อพิจารณาการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานจะพบว่าในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสประมาณ 10 ถึง 50 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในกรณีที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์ที่ขั้วแคโทดจะมีโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานเกิดขึ้นมากกว่ากรณีที่ใช้ออกซิเจนอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดจะมีน้อยกว่ากรณีที่ใช้ออกซิเจนที่อัตราการไหลเดียวกัน เพราะในอากาศมีปริมาณของออกซิเจนน้อย ดังนั้นน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาจึงไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ในการนำโปรตอนภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ทำให้เกิดความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนภายในเยื่อแผ่นขึ้น จึงส่งผลให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมากขึ้น

ส่วนในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสมากกว่า 50 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าค่าความต่างศักย์มีการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์ ซึ่งเป็นช่วงของการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสสูงขึ้น จะเกิดปฏิกิริยาของแก๊สมากขึ้นดังนั้นจึงต้องใช้สารตั้งต้นมากขึ้นตามไปด้วย โดยกรณีที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์ ปริมาณออกซิเจนในอากาศมีอยู่น้อย ความเข้มข้นของออกซิเจนที่บริเวณพื้นผิวขั้วแคโทดจะน้อยลงจนเป็นศูนย์ ปริมาณออกซิเจนที่จะทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ ประกอบกับแก๊สไนโตรเจนที่มีอยู่ในอากาศเป็นจำนวนมากขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของออกซิเจนที่ขั้วไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า nitrogen barrier effect [Kordesch, 1996] ทำให้การแพร่ของออกซิเจนเป็นไปได้ยากขึ้นที่ผิวขั้วแคโทดจึงขาดออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยา จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นขึ้น แต่ในส่วนของออกซิเจนจากผลการทดลองไม่สามารถสรุปได้ว่ามีเกิดโพลาริ

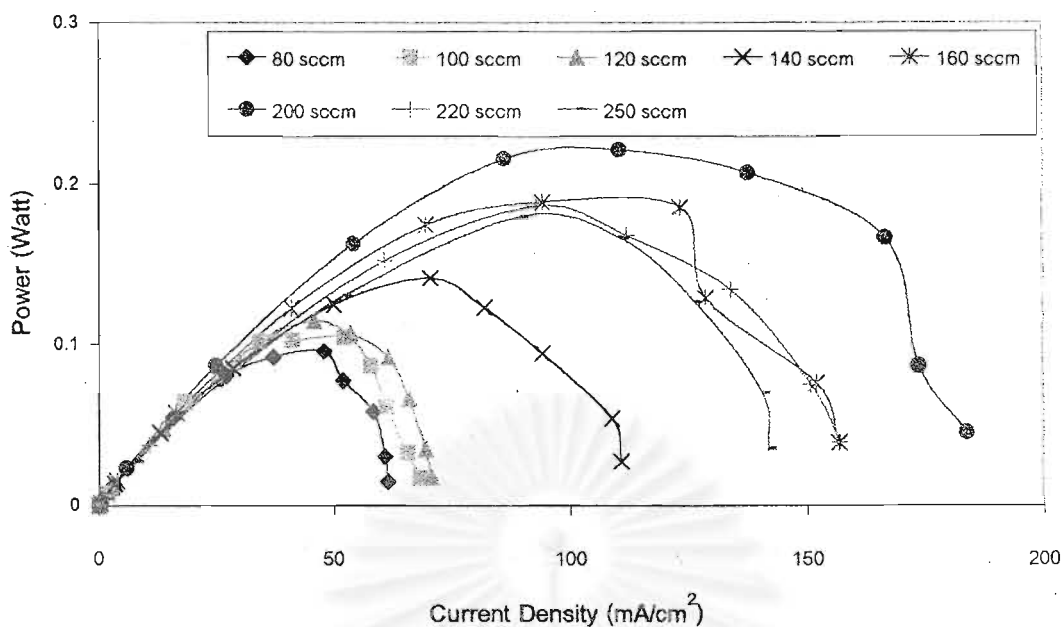
เซชันเนื่องจากความเข้มข้นหรือไม่ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่อง Potentiostat/Galvanostat ที่สามารถวัดค่ากระแสได้ไม่เกิน 1 แอมแปร์

จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Rho และคณะ (1994) จะพบว่าได้ผลการทดลองสอดคล้องกัน คืองานวิจัยดังกล่าวได้ทำการทดลองศึกษาผลของแก๊สที่ป้อนทางขั้วแคโทดโดยเป็นแก๊สผสมระหว่างออกซิเจนกับแก๊สเฉื่อยชนิดต่าง ๆ ซึ่งไนโตรเจนเป็นหนึ่งในแก๊สเฉื่อยที่ทำการศึกษา ผลการทดลองพบว่าเมื่อผสมแก๊สออกซิเจนกับแก๊สไนโตรเจนโดยมีออกซิเจน 20 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สที่ป้อนทั้งหมด เพื่อเป็นสารออกซิไดส์ที่ขั้วแคโทดพบว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ มีการเกิดโพลาไรเซชันมากขึ้นโดยเฉพาะโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทานและโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นเช่นเดียวกัน

จากผลการทดลองดังกล่าวจึงได้ทำการทดลองเพื่อลดสาเหตุการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นลงโดยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่าเดิม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศ



รูปที่ 4.21 โพลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่ออนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ

จากรูปที่ 4.21 จะพบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาที่ค่าความหนาแน่นกระแสต่ำ ๆ ที่ไม่เกิน 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น โพลาริเซชันทางเคมีลดลง เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่เท่ากันอีกทั้งปริมาณน้ำที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงที่มาพร้อมกับอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลก็ไม่เท่ากัน เมื่ออัตราการไหลของอากาศมากขึ้นปริมาณน้ำภายในเซลล์ก็จะมากขึ้น ทำให้ความชื้นภายในเยื่อแผ่นเพียงพอต่อการเคลื่อนที่ของโปรตอนจากแอโนดไปยังแคโทด ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันเกิดได้ดีขึ้น

ส่วนการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานจะมีน้อยลงด้วยเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีเพิ่มมากขึ้น เมื่ออากาศมีอัตราการไหลมากขึ้น ความสามารถของอากาศในการนำความชื้นเข้ามาพร้อมกับอากาศจะมากขึ้นไปด้วย ประกอบกับน้ำที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดก็มีมากขึ้น เพราะเมื่ออัตราการไหลของอากาศมากขึ้นปริมาณของออกซิเจนที่จะเข้าทำปฏิกิริยาย่อมจะมีมากขึ้น ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดี ทำให้มีน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยามากขึ้น จึงทำให้ความต้านทานภายในเยื่อแผ่นลดลงไป การเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นทำได้ดีขึ้น ในส่วนของการเกิดโพลาริเซชัน

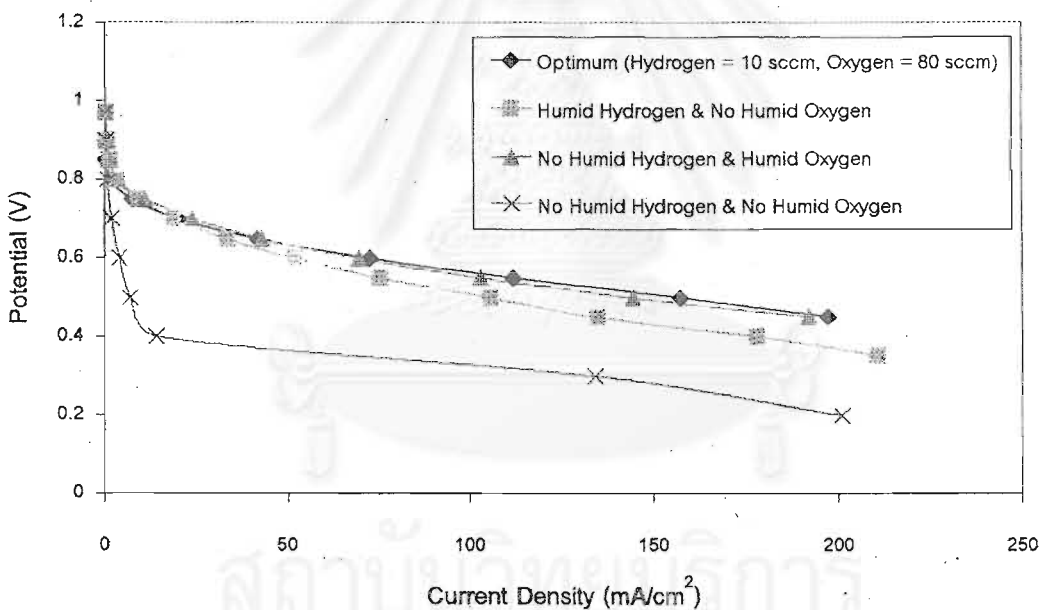
เนื่องจากความเข้มข้นในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสสูงก็ลดน้อยลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่จะเข้าทำปฏิกิริยามากขึ้น และออกซิเจนสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้น ณ ค่าความหนาแน่นสูง ๆ ที่ต้องมีการเกิดปฏิกิริยารีดักชันมากขึ้น ดังนั้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศมากขึ้นทำให้มีออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวขั้วไฟฟ้าเพียงพอ ไม่เกิดการขาดแคลนออกซิเจนที่ผิวขั้วไฟฟ้า ปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและไม่เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น โดยอัตราการไหลของอากาศที่ดีที่สุดเท่ากับ 200 sccm หรือ 0.0089 กิโลโมลต่อนาที ได้กำลังไฟฟ้า 0.2 วัตต์

แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศไปจนกระทั่งอัตราการไหลมากกว่า 200 sccm พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงกลับลดลง การเกิดโพลาริเซชันทางเคมีในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสต่ำมีมากขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่สูงขึ้นทำให้ออกซิเจนที่จะเข้าทำปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าไม่สามารถสัมผัสกับบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าอย่างเต็มที่เพราะด้วยความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนที่บริเวณผิวขั้วไฟฟ้าน้อยลง ปฏิกิริยารีดักชันจึงเกิดได้ไม่ดี ส่งผลให้เกิดโพลาริเซชันทางเคมีขึ้น หรืออาจเกิดเนื่องจากปริมาณน้ำที่เข้าสู่เซลล์มากเกินไปและไปอุดตันรูพรุนที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้แก๊สไม่สามารถแพร่ผ่านไปได้อีกทั้งยังไปลดพื้นที่สัมผัสของแก๊สกับตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นเป็นอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้ความแตกต่างได้อย่างเด่นชัด โดยเฉพาะที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 250 sccm หรือ 0.011 โมลต่อนาที จะสังเกตเห็นว่าเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นขึ้นตั้งแต่ที่ค่าความหนาแน่นกระแสประมาณ 100 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เกิดขึ้นจากการที่เมื่ออากาศที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงมากขึ้นจากการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ อาจทำให้มีปริมาณน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงมากเกินไปจนเกิดการท่วมของน้ำที่บริเวณขั้วไฟฟ้าได้ เพราะอาจจะมีหยดน้ำที่ค้างอยู่ในระบบก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงถูกอากาศที่มีความเร็วเพิ่มขึ้นพาเข้ามาในเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนที่จะเข้าทำปฏิกิริยาที่บริเวณผิวขั้วไฟฟ้าทำได้ยากเพราะมีน้ำมาขวางการเข้าทำปฏิกิริยา ประกอบกับอัตราการไหลที่สูง ออกซิเจนในอากาศอาจจะสูญเสียไปกับแก๊สขาออกมาก เพราะอากาศมีอัตราการไหลที่สูงจนเกินไป ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่บริเวณผิวขั้วไฟฟ้ามีความเข้มข้นลดลง ทำให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น

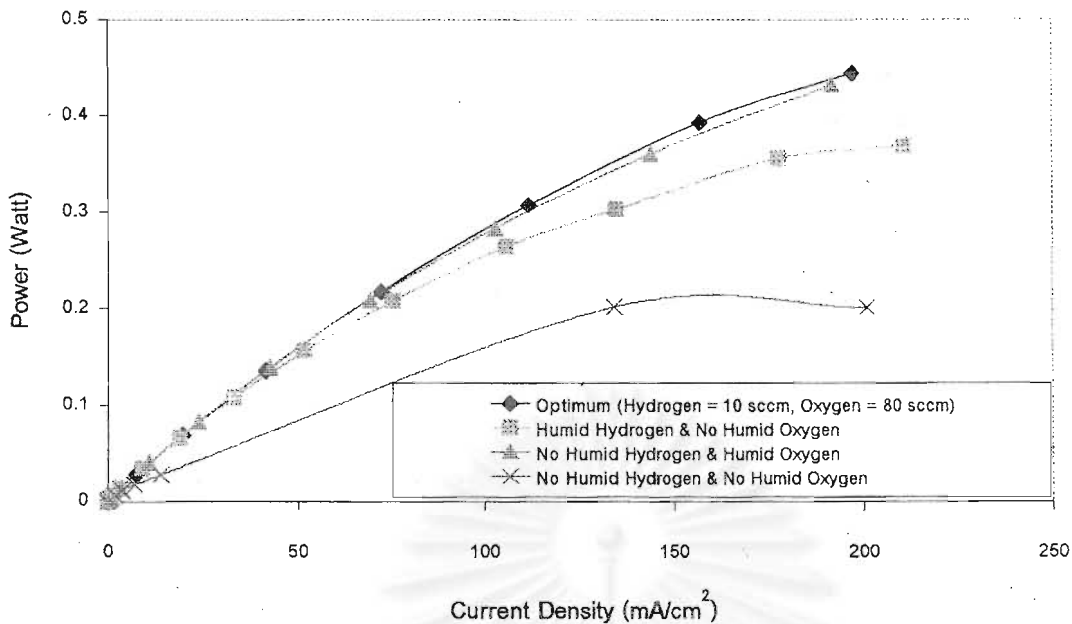
จากการทดลองสรุปได้ว่าภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์คือใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 200 sccm หรือ 0.0089 โมลต่อนาที และอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคือ 30 องศาเซลเซียส

4.5 ผลของปริมาณความชื้น

จากการทดลองทำให้ทราบภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งที่ใช้สารออกซิไดส์เป็นออกซิเจน และอากาศ ในการทดลองนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของปริมาณความชื้นที่ให้กับสารตั้งต้นต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากระบบให้ความชื้นยังไม่สามารถปรับค่าความชื้นของแก๊สได้ ดังนั้นจึงทำการทดลองสำหรับแก๊สอัดตัวด้วยความชื้นโดยผ่านระบบให้ความชื้น และไม่มี ความชื้นโดยใช้แก๊สจากถังแก๊สให้เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง การทดลองจะใช้สารออกซิไดส์ทั้ง 2 ชนิดคือ ออกซิเจน และอากาศ โดยจะใช้ภาวะที่ดีที่สุดของแต่ละกรณี การทดลองเมื่อใช้ออกซิเจนเป็นสารออกซิไดส์มีภาวะการทดลองคือ อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจน 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.23 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษาผลของปริมาณความชื้น ที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจน 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสเพื่อศึกษาผลของปริมาณความชื้น ที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจน 80 sccm หรือ 0.004 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ

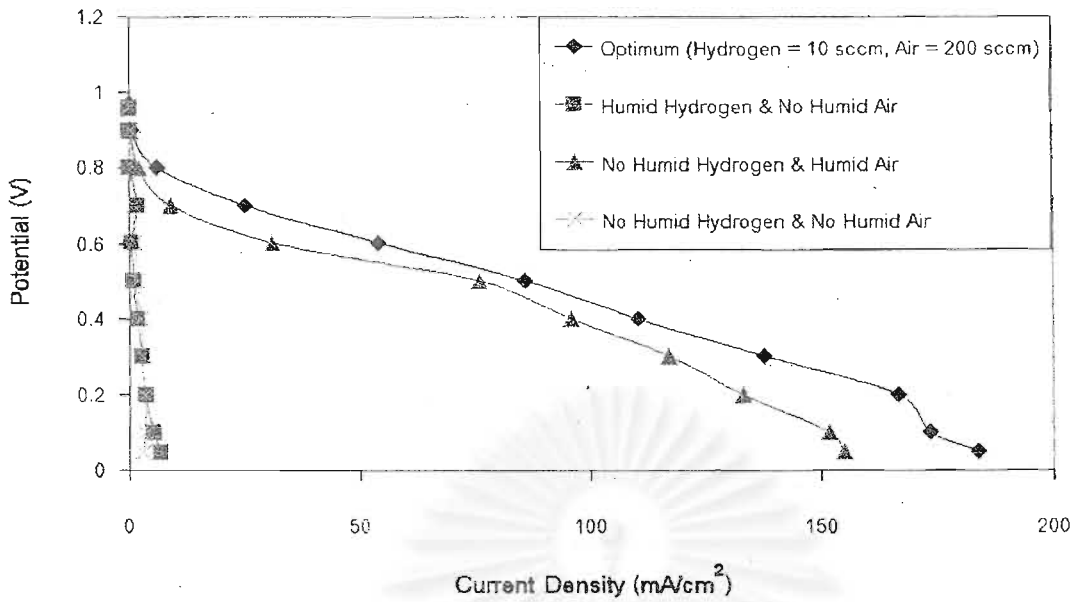
เมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.23 พบว่าเมื่อไม่ให้ความชื้นกับแก๊สทั้งสองชนิด จะเกิดโพลาริเซชันมากในช่วงความหนาแน่นกระแสไม่เกิน 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นส่วนของโพลาริเซชันทางเคมีและเนื่องจากความต้านทาน เนื่องมาจากเมื่อระบบเซลล์เชื้อเพลิงไม่มีความชื้น ผังขั้วแอโนดโพลาริเซชันเกิดขึ้นจากการขาดน้ำที่บริเวณผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้ไม่มีโมเลกุลของน้ำเพียงพอที่จะพาโปรตอนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกาะอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งในที่นี้คือ แพลทินัม ที่บริเวณขั้วไฟฟ้าออกไปเพื่อเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนใช้สำหรับปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดต่อไป ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นด้วย [Andreas, 2002] ดังนั้นถ้ามีน้ำไม่เพียงพอที่ขั้วแอโนดจะทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดเกิดได้ไม่สมบูรณ์ และส่งผลไปยังปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดเกิดได้ไม่เต็มที่ เพราะจำนวนโปรตอนที่เคลื่อนที่มาจากขั้วแอโนดจะทำให้ปฏิกิริยามีจำนวนลดน้อยลง อย่างไรก็ตามในช่วงกระแสไม่เกิน 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อาจเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานควบคู่ไปด้วย เนื่องจากน้ำภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนบางส่วนสูญเสียไปกับแก๊สที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้มีความต้านทานภายในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมากขึ้น แต่เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปจนกระทั่งความหนาแน่นกระแสมากกว่า 15 มิลลิแอมแปร์ การสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานจะ

น้อยลง เพราะเมื่อปฏิกิริยารีดักชันจะผลิตน้ำให้แก่เซลล์ ดังนั้นน้ำที่เกิดขึ้นมีการแพร่ไปยังฝั่งขั้วแอโนดช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดดีขึ้นและช่วยทำให้เยื่อแผ่นมีความชื้นเพิ่มขึ้นเพียงพอที่จะช่วยให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นทำได้ดีขึ้น ดังนั้นการเกิดโพลาริเซชันจึงน้อยลงและได้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น

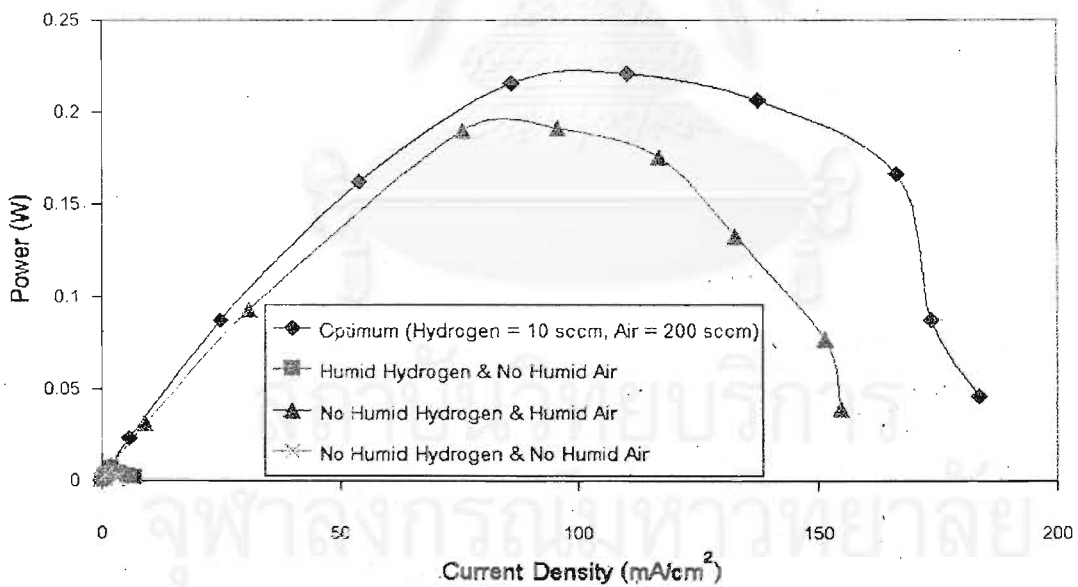
ส่วนในกรณีที่ให้ความชื้นแต่เพียงแก๊สออกซิเจนด้านเดียวพบว่าไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องมาจากปริมาณน้ำที่เข้ามาพร้อมกับออกซิเจนที่มีอัตราการไหล 80 sccm ทางขั้วแคโทดเพียงพอต่อกระบวนการภายในเซลล์เชื้อเพลิง เพราะในเซลล์เชื้อเพลิงจะมีการแพร่ของน้ำผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจากฝั่งแคโทดมายังฝั่งขั้วแอโนด ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของปริมาณน้ำระหว่างสองข้างของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นทำได้ดีขึ้น แต่ในส่วนของกรณีที่ให้ความชื้นแต่เพียงแก๊สไฮโดรเจน จะมีการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานเพิ่มขึ้นมากกว่าในกรณีที่ให้ความชื้นแต่ด้านแก๊สออกซิเจนด้านเดียว เนื่องจากความชื้นที่เข้ามากับแก๊สไฮโดรเจนที่มีอัตราการไหลเพียง 10 sccm จะมีน้อยกว่าในกรณีที่ให้ความชื้นกับแก๊สออกซิเจนที่มีอัตราการไหล 80 sccm จึงทำให้ปริมาณความชื้นที่เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนมีน้อยกว่าเพราะน้ำภายในเยื่อแผ่นต้องสูญเสียไปกับแก๊สออกซิเจนที่ไม่มีความชื้นเลย ทำให้เกิดความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นมากขึ้น ส่งผลให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานเพิ่มขึ้น

เมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนสารออกซิไดส์เป็นอากาศแล้วทำการทดลองที่ภาวะที่ดีที่สุด คือ อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 200 sccm หรือ 0.0089 โมลต่อนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.25 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษามลของปริมาณความชื้น ที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่ออนาที อัตราการไหลของอากาศ 200 sccm หรือ 0.0089 โมลต่ออนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสเพื่อศึกษามลของปริมาณความชื้น ที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่ออนาที อัตราการไหลของอากาศ 200 sccm หรือ 0.0089 โมลต่ออนาที อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ

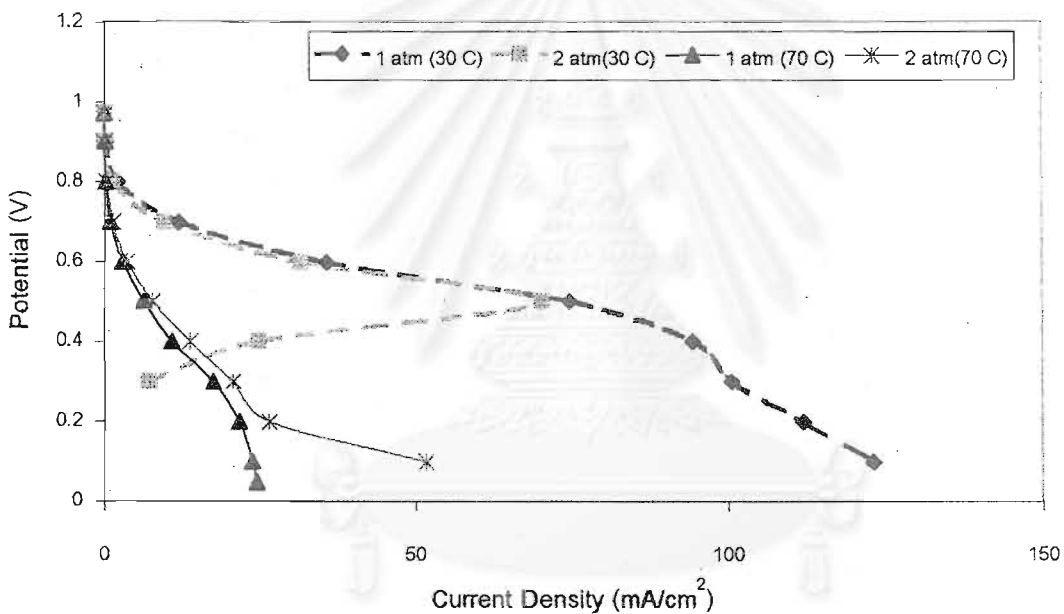
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.25 พบว่าการทดลองที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์ ปริมาณความชื้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมากกว่าการทดลองที่ใช้ออกซิเจนเป็นสารออกซิไดส์ โดยในการทดลองที่ไม่ให้ความชื้นกับแก๊สทั้งสองชนิด และการทดลองที่ให้ความชื้นเฉพาะแก๊สไฮโดรเจน ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ให้ความชื้นกับแก๊สทั้งสองชนิด เนื่องจากปริมาณความชื้นที่มีในระบบไม่เพียงพอ เยื่อแผ่นภายในเซลล์เชื้อเพลิงเกิดการแห้ง และมีการสูญเสียน้ำกับแก๊สขาออก ทำให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน ถึงแม้ในกรณีที่ให้ความชื้นแต่แก๊สไฮโดรเจนด้านเดียว ปริมาณความชื้นก็ยังไม่เพียงพอ เนื่องจากอากาศที่เข้ามาเป็นอากาศแห้งและมีปริมาณมาก ทำให้สามารถพาน้ำที่เข้ามา กับแก๊สไฮโดรเจนและน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดออกไปกับอากาศได้มาก

ส่วนในการทดลองที่ให้ความชื้นแต่เพียงอากาศอย่างเดียว พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ให้ความชื้นทั้งสองฝั่ง มีการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีเพิ่มขึ้น เนื่องจากขั้วแอโนดมีปริมาณความชื้นไม่เพียงพอที่จะผ่านโปรตอนออกจากขั้วแอโนดไปทำปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด จึงส่งผลให้เกิดโพลาริเซชันทางเคมีขึ้น แต่โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานไม่แตกต่างกันนัก เนื่องจากมีปริมาณน้ำที่เข้ามากับอากาศเพียงพอที่พอสำหรับการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นได้

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง เพราะน้ำเป็นตัวช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด และช่วยในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดเพราะปฏิกิริยารีดักชันต้องมีการรับโปรตอนจากเยื่อแผ่น ถ้าการเคลื่อนที่ของโปรตอนในเยื่อแผ่นทำได้ดี ปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดได้ดีขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์ปริมาณความชื้นจะส่งผลกระทบต่อมากกว่า เนื่องจากอากาศมีแก๊สอื่นปะปนมา ประกอบกับค่าความดันย่อยของน้ำในอากาศมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าของออกซิเจน ซึ่งมีผลต่อการสูญเสียไปกับแก๊สขาออก ทำให้เกิดโพลาริเซชันขึ้นได้ ดังนั้นถ้าความสมดุลของปริมาณน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงไม่เหมาะสม จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wood (1998) ที่ได้ทำการศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยศึกษาทั้งที่ใช้ ออกซิเจนบริสุทธิ์และใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์ พบว่าเมื่อไม่ให้ความชื้นกับสารออกซิไดส์ กรณีที่ใช้อากาศจะได้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำกว่ากรณีที่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ โดยเมื่อใช้ อากาศจะมีการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีและโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมากขึ้น เนื่องจากปริมาณความชื้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงไม่เพียงพอ ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง

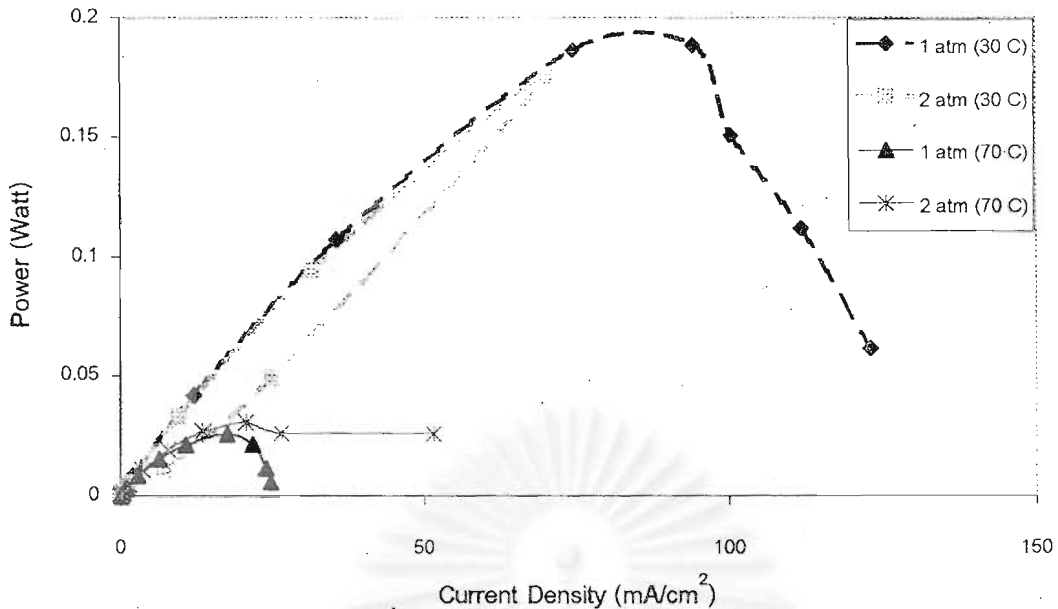
4.6 ผลของความดัน

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของความดันต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง โดยทำการทดลองที่ความดัน 1 บรรยากาศ และ 2 บรรยากาศ โดยใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์ เนื่องจากกรณีที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์จะมีปัญหาเกี่ยวกับการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นมากกว่ากรณีที่ใช้ออกซิเจน การเพิ่มความดันให้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของออกซิเจนไปยังผิวขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยในการทดลองการเพิ่มความดันทำโดยการปิดวาล์วควบคุมความดันกลับ เพื่อให้ความดันภายในของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้แก๊สไฮโดรเจนและอากาศอัดตัวด้วยความดันมีอัตราการไหลเท่ากับ 200 sccm ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.27 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษาผลของความดันที่ 1 และ 2 บรรยากาศ อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 และ 70 องศาเซลเซียส และแก๊สอัดตัวด้วยความดัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อศึกษาผลของความดันที่ 1 และ 2 บรรยากาศ อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 และ 70 องศาเซลเซียส และแก๊สอัดตัวด้วยความชื้น

จากกราฟโพลารไรเซชันในรูปที่ 4.27 เพื่อศึกษาผลของความดัน พบว่าที่อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง 30 องศาเซลเซียส เมื่อมีการเพิ่มความดันให้กับระบบเป็น 2 บรรยากาศ ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะคงเดิมที่ค่ากระแสต่ำกว่า 70 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงอย่างรวดเร็วทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเปิดวาล์วควบคุมความดันกลับเพื่อเพิ่มความดันให้ระบบแก๊สขาออกจึงมีปริมาณน้อยกว่าที่ความดันบรรยากาศ ส่วนแก๊สที่เข้ามาในเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 ดังนั้นแก๊สไม่สามารถรับน้ำได้อีก ทำให้น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดกลายเป็นหยดน้ำ ไปอุดตันบริเวณขั้วไฟฟ้าเพราะไม่สามารถถูกกำจัดออกไปด้วยแก๊สขาออกได้ ทำให้ออกซิเจนในอากาศไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ โดยเฉพาะที่ความดัน 2 บรรยากาศจะพบว่าได้ค่าความหนาแน่นกระแสมากที่สุดที่ประมาณ 70 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความต่างศักย์ 0.5 หลังจากนั้นค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าซึ่งแสดงในรูปที่ 4.28 มีค่าลดลงไปด้วย ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากมีปริมาณน้ำสะสมมากบริเวณขั้วไฟฟ้าภายในเซลล์เชื้อเพลิงขึ้น

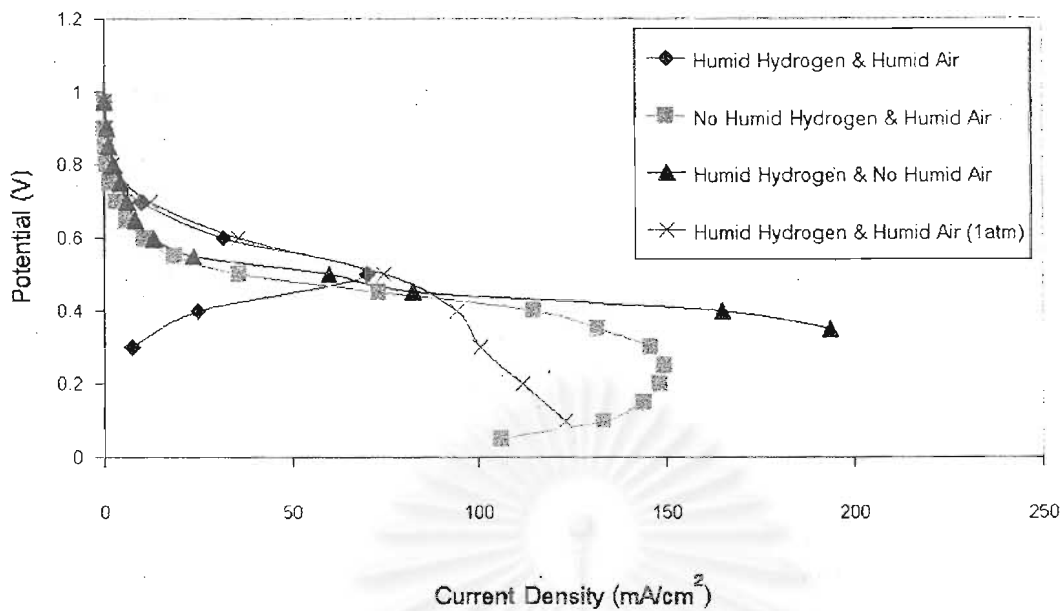
เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 70 องศาเซลเซียส การเพิ่มความดันให้กับเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น โดยเฉพาะโพลารไรเซชันเนื่องจากความต้านทานมีน้อยลง เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มความดันทำให้ค่าความดันย่อยของน้ำภายในแก๊สเพิ่มขึ้นไปด้วย [Larminie, 2000] ประกอบกับมีการเพิ่มอุณหภูมิการทำงานซึ่งเท่ากับ

เป็นการเพิ่มความดันไออิมตัวภายในเซลล์เชื้อเพลิง แก๊สที่เข้ามาจึงสามารถรับน้ำได้เพิ่มขึ้น ทำให้ไม่เกิดหยดน้ำขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง และแก๊สขาออกก็มีปริมาณน้อย จึงทำให้ไม่เกิดการสูญเสียน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงมากนัก ปริมาณน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีเพียงพอ ทำให้ปัญหาการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมีลดน้อยลง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ยังเพิ่มขึ้นไม่มากนักกรณีเพิ่มความดันที่อุณหภูมิการทำงาน 70 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแก๊สที่เข้าเซลล์เป็นแก๊สอิมตัวด้วยความชื้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการทำงานของเซลล์ จึงผ่านความชื้นเข้าสู่เซลล์ได้น้อยกว่าความต้องการของเซลล์

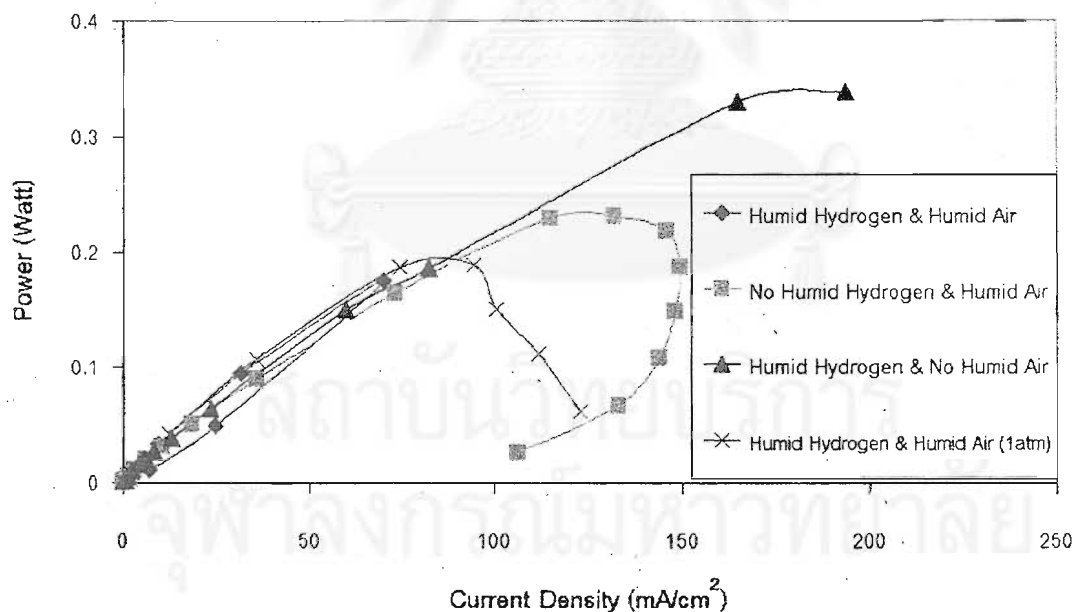
จากการศึกษาผลของความดัน เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Buchi (1997) ที่ได้ทำการศึกษาถึงผลของความดันที่มีต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาด 50 ตารางเซนติเมตร โดยทำการทดลองที่ความดัน 1 และ 3 บรรยากาศ แก๊สที่ใช้ในการทดลองคือ ไฮโดรเจนและอากาศที่ผ่านระบบให้ความชื้นจนเป็นแก๊สที่อิมตัวด้วยความชื้น โดยให้ค่า stoichiometry ของไฮโดรเจนและออกซิเจนเท่ากับ 1.2 และ 2.2 ตามลำดับ อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง 50 องศาเซลเซียส จะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มความดัน ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะดีขึ้น โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานจะลดลงเช่นเดียวกัน

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ความดันภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง แต่จะต้องพิจารณาควบคู่กับผลของอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงด้วย เนื่องจากความดันและอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีผลต่อความสมดุลย์ของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

จากกรณีที่ทำการทดลองที่ความดัน 2 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงสามารถให้ค่าความหนาแน่นกระแสได้สูงสุดเพียง 70 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กำลังไฟฟ้าเพียง 0.2 วัตต์เท่านั้น เมื่อค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นกระแสมีการลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการท่วมของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความดัน โดยทำการทดลองให้แก๊สผ่านระบบให้ความชื้นเพียงด้านใดด้านหนึ่งเท่านั้น เพื่อสังเกตผลการทดลองที่เกิดจากปริมาณความชื้นภายในเซลล์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.29 โพลลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความดัน โดยทำการทดลองที่ความดัน 2 บรรยากาศ อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความดัน โดยทำการทดลองที่ความดัน 2 บรรยากาศ อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.29 พบว่าเมื่อให้แก๊สไฮโดรเจนผ่านระบบให้ความร้อนก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงแต่อากาศไม่ผ่านระบบให้ความร้อนภายนอกพบว่ามีกาเกิดโพลาริเซชันทางเคมีเพิ่มมากกว่ากรณีที่ให้แก๊สทั้งสองผ่านระบบให้ความร้อน เนื่องจากความชื้นทั้งหมดที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงมีเพียงทางด้านไฮโดรเจนเท่านั้น ส่วนทางด้านแคโทดอากาศแห้งสามารถนำพาน้ำจากเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนออกไปได้จำนวนหนึ่ง จึงทำให้เยื่อแผ่นบริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้ามีปริมาณความชื้นต่ำ การนำพาโปรตอนจึงเกิดได้ไม่ดี ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง ส่งผลให้เกิดโพลาริเซชันทางเคมีขึ้น แต่ในกรณีนี้จะไม่เกิดการสะสมของน้ำที่ขั้วไฟฟ้ามากเหมือนในกรณีที่ให้ความร้อนกับแก๊สทั้งสองฝั่ง เนื่องจากปริมาณน้ำที่เข้ามาภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีเพียงแค่ฝั่งขั้วแอโนด จะมีน้ำที่แพร่จากแอโนดไปยังแคโทดที่ไม่มีความชื้นเข้ามาพร้อมอากาศประกอบกับเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสสูงขึ้น การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดมีมากขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้คือน้ำมีมากขึ้น ส่งผลให้ความชื้นในฝั่งขั้วแคโทดเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ดังนั้นจึงสามารถผลิตค่าความหนาแน่นกระแสและกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า

ส่วนในกรณีที่ให้อากาศผ่านระบบให้ความร้อนแต่ไม่ให้ไฮโดรเจนผ่านระบบให้ความร้อน จะพบว่ามีปัญหาของการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีเช่นเดียวกัน เพราะบริเวณขั้วไฟฟ้าด้านแอโนดมีปริมาณความชื้นต่ำเนื่องจากแก๊สที่ป้อนทางด้านแอโนดเป็นแก๊สแห้งทำให้เกิดการสูญเสีย การนำพาโปรตอนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดจึงเกิดได้ไม่ดีในช่วงแรก แต่เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสสูงขึ้นจนเท่ากับ 120 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่ามีการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นเกิดขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของออกซิเจนที่ผิวขั้วไฟฟ้าเริ่มไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในรูปที่ 4.21 จะพบว่าจะเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นที่ค่าอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนในอากาศที่ป้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิงใกล้เคียงกัน ตัวอย่างเช่นที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm และอัตราการไหลของอากาศที่ 80 sccm จะเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นที่ 50 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ต้องใช้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 3.89×10^{-5} โมลต่ออนาที และมีออกซิเจนในอากาศที่ป้อนเท่ากับ 7.5×10^{-4} โมลต่ออนาที จะได้อัตราส่วนดังกล่าวเท่ากับ 0.05 ส่วนในการทดลองที่ใช้อัตราการไหลของไฮโดรเจนและอากาศเท่ากับ 200 sccm จะเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานที่ 120 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ต้องใช้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 9.33×10^{-5} โมลต่ออนาที และมีออกซิเจนในอากาศที่ป้อนเท่ากับ 1.9×10^{-3} จะได้อัตราส่วนดังกล่าวเท่ากับ 0.05 เช่นเดียวกัน แต่เมื่อปฏิกิริยาดำเนินต่อไปพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้จะเป็นผลเนื่องมาจากตัวแปรอื่นร่วมด้วย ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นปริมาณน้ำที่สะสมภายในเซลล์โดยที่ในช่วงเริ่มทำการทดลองมีการป้อนแก๊สเข้าสู่เซลล์

เชื้อเพลิงและทำการปิดวาล์วควบคุมความดันกลับ รอจนกว่าจะได้ความดันตามที่ต้องการ ในช่วงเวลาดังกล่าวอาจมีการควบแน่นของน้ำที่อยู่ภายในแก๊สที่ป้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากแก๊สที่ป้อนมีอุณหภูมิที่สูงว่าอุณหภูมิการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิง ทำให้เกิดหยดน้ำสะสมอยู่ภายในเซลล์เชื้อเพลิง และตลอดเวลาการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิงจะมีการผลิตน้ำ ทำให้ภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีการสะสมของน้ำ ประกอบกับการขาดแคลนออกซิเจนที่จะเข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวขั้วไฟฟ้า จึงทำให้เกิดการลดลงของค่าความหนาแน่นกระแส เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานที่ความดัน 1 บรรยากาศพบว่ากรณีที่ทำให้ความชื้นกับแก๊สเพียงฝั่งใดฝั่งหนึ่งจะมีการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีมากกว่ากรณีการทำงานที่ความดัน 1 บรรยากาศ แต่กรณีที่ความดัน 1 บรรยากาศจะมีการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นขึ้นที่ค่าความหนาแน่นกระแสที่ต่ำกว่ากรณีที่ให้ความชื้นกับแก๊สเพียงฝั่งใดฝั่งหนึ่ง ซึ่งเกิดจากที่ 1 บรรยากาศมีปริมาณออกซิเจนน้อยกว่าจึงทำให้อัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าต่ำกว่า

จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าเมื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ความดันสูง สิ่งที่ต้องคำนึงอย่างหนึ่งคือปริมาณน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่าปัญหาที่เกิดขึ้นจากความไม่สมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อทำการทดลองที่ความดันเพิ่มขึ้น จะเกิดปัญหาการท่วมของน้ำที่ขั้วไฟฟ้า ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นภายในเซลล์กับความดันของเซลล์เชื้อเพลิง มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง

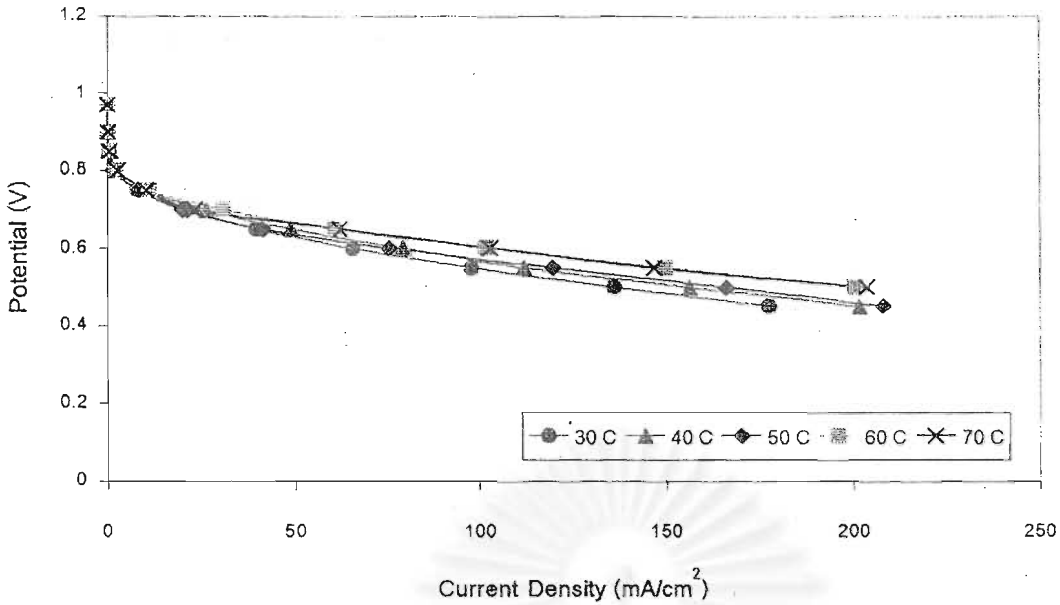
4.7 การปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

จากการทดลองศึกษาถึงผลของอุณหภูมิการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิง (รูปที่ 4.17 และ 4.18) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงกลับลดลงและมีการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ๆ มา ดังนั้นอาจเกิดจากข้อบกพร่องภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่บริเวณส่วนต่อระหว่างระบบให้ความชื้นกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแก๊สที่ผ่านการเพิ่มความชื้นให้เป็นแก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น ณ อุณหภูมิภายในส่วนระเหยน้ำ แต่เมื่อเข้าสู่ท่อนำแก๊สไปยังเซลล์ อุณหภูมิของแก๊สที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำมีการลดลงเนื่องจากฉนวนที่หุ้มท่อไว้ไม่เพียงพอที่จะป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมและระยะทางระหว่างส่วนระเหยน้ำกับเซลล์เชื้อเพลิงยาวเกินไป เมื่ออุณหภูมิของแก๊สอิ่มตัวลดลงจึงมีการควบแน่นของน้ำจากแก๊สเพื่อปรับปริมาณความชื้นภายในแก๊สให้อิ่มตัวในอุณหภูมิที่ต่ำลง ทำให้ปริมาณน้ำที่จะเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงมีน้อยลง เมื่อแก๊สเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิการทำงานสูงกว่า แก๊สมีความสามารถในการรับน้ำเพิ่มขึ้นเพราะค่าความดันไออิ่มตัวเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำที่อยู่ภายใน

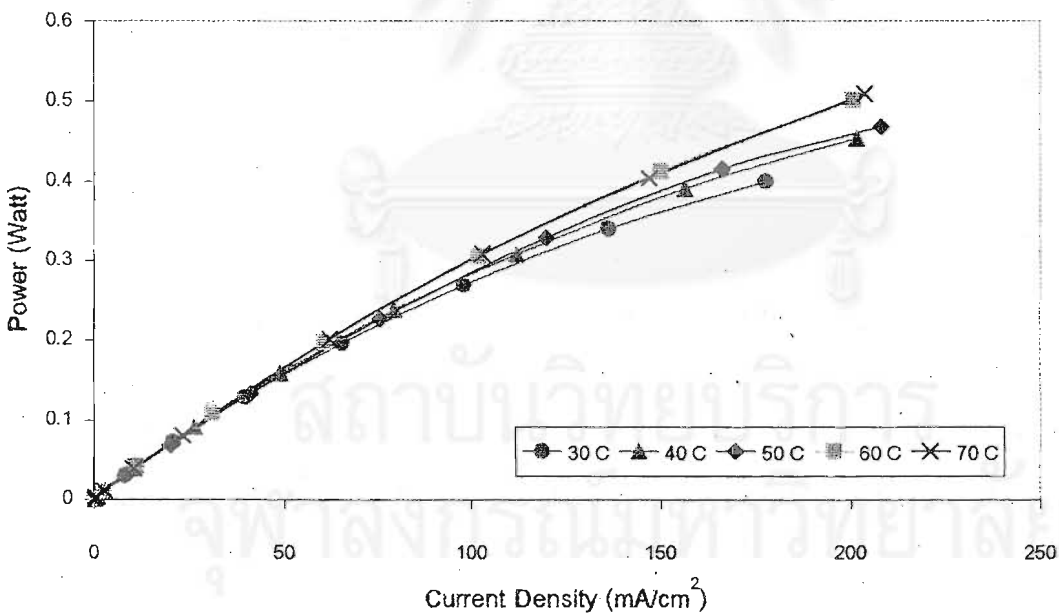
ในเซลล์เชื้อเพลิงถูกพาออกไปกับแก๊สขาออก ส่งผลให้ภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีปริมาณความชื้นไม่เพียงพอกับความต้องการ ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้ทำการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อยืนยันสมมติฐานและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนให้ดีขึ้น การลดระยะทางระหว่างส่วนระเหยน้ำกับเซลล์เชื้อเพลิงโดยการเอาส่วนวัดค่าความชื้นออก ต่อท่อตรงจากส่วนระเหยน้ำเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง และลดระดับของตำแหน่งเซลล์เชื้อเพลิงให้ต่ำกว่าระดับของส่วนระเหยน้ำ เพื่อให้หน้าที่เกิดการควบแน่นภายในท่อก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถไหลเข้าไปยังเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยไม่มีการค้างของน้ำภายในท่อ เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง

เมื่อทำการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเรียบร้อยแล้วจึงได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ณ ที่อุณหภูมิการทำงานต่าง ๆ โดยในการทดลองจะให้อุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำในระบบให้ความชื้นเท่ากับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อให้แก๊สที่เข้าภายในเซลล์เป็นแก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้น ณ อุณหภูมิการทำงานของเซลล์ ถึงแม้จะมีการควบแน่นของน้ำภายในท่อก่อนจะเข้าเซลล์เชื้อเพลิง แต่น้ำที่เกิดการควบแน่นก็จะไหลเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าส่วนระเหยน้ำ เมื่อแก๊สและน้ำที่ไหลเข้ามาในเซลล์ที่อุณหภูมิเดียวกันกับส่วนระเหยน้ำ จะทำให้แก๊สนั้นอิ่มตัวด้วยความชื้นอีกครั้งที่อุณหภูมิเดียวกับส่วนระเหยน้ำ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาทีและอัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที และความดันบรรยากาศ ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.31 และ 4.32

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



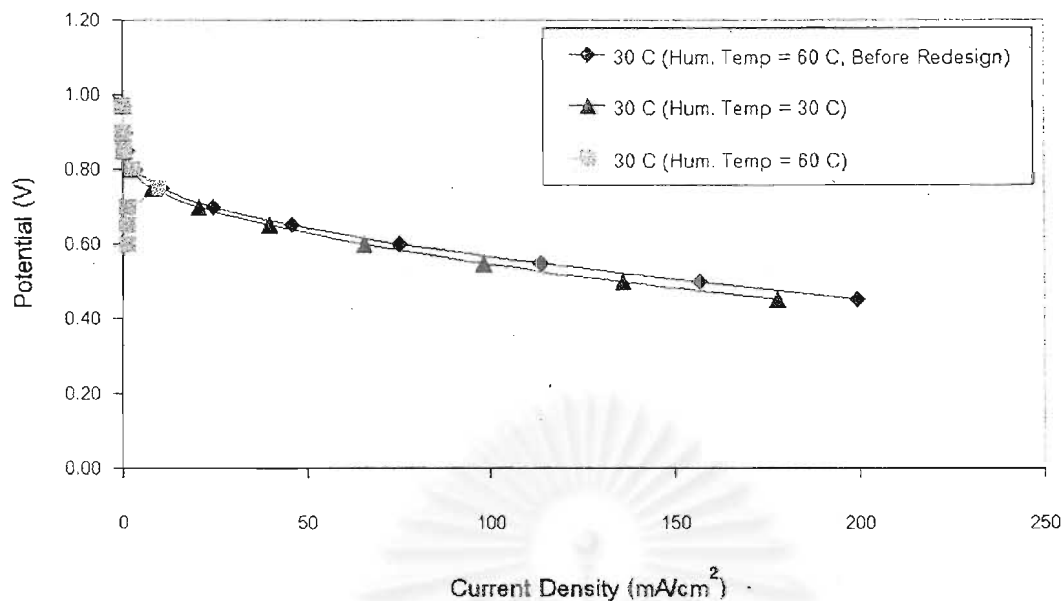
รูปที่ 4.31 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิการทำงานต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที แก๊สอัดตัวด้วยความชื้นและความดันบรรยากาศ ภายหลังจากการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง



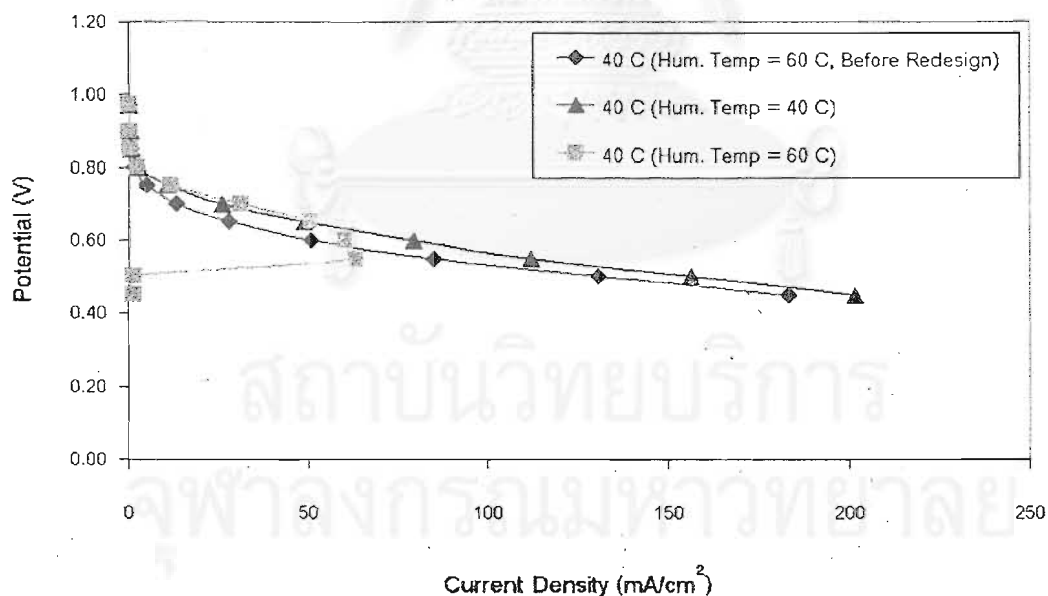
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิการทำงานต่าง ๆ โดยอัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที แก๊สอัดตัวด้วยความชื้น และความดันบรรยากาศ ภายหลังจากการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.31 และ 4.32 พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นหลังจากการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองในรูปที่ 4.17 และ 4.18 เนื่องจากเมื่อมีการลดระยะทางระหว่างส่วนระเหยน้ำกับเซลล์เชื้อเพลิง และให้เซลล์เชื้อเพลิงมีตำแหน่งต่ำกว่าส่วนระเหยน้ำ เป็นการช่วยแก้ปัญหาเรื่องของน้ำในหน่วยทดสอบเซลล์ เพราะการลดระยะทางจะเป็นการช่วยลดการสูญเสียความร้อนของแก๊สให้กับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิจากแก๊สลดลงและเกิดการควบแน่นของน้ำขึ้น แก๊สที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำจากส่วนระเหยน้ำจะเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงเร็วขึ้น แก๊สที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงยังคงปริมาณน้ำเข้าไปสู่เซลล์มากพอ ถึงแม้จะมีการควบแน่นของน้ำภายในท่อบ้าง แต่การที่วางให้เซลล์เชื้อเพลิงมีระดับต่ำกว่าส่วนระเหยก็ช่วยให้ น้ำที่ควบแน่นภายในท่อไหลลงเข้าไปยังเซลล์เชื้อเพลิงได้ เมื่อน้ำที่ควบแน่นภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในเซลล์ เมื่อเข้าไปในเซลล์ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าก็จะสามารถระเหยเข้าไปอยู่ในส่วนของแก๊ส ทำให้แก๊สนั้นกลายเป็นแก๊สที่อิ่มตัวด้วยความชื้นอีกครั้ง ณ อุณหภูมิที่เท่ากับส่วนระเหยน้ำ ทำให้ความชื้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงเพียงพอ ซึ่งเมื่อสังเกตการเกิดโพลาริเซชันจะพบว่า โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานในรูปที่ 4.31 จะลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในรูปที่ 4.17 โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการทำงานของเซลล์ที่ 60 และ 70 องศาเซลเซียส เพราะภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีความชื้นที่เพียงพอในการเคลื่อนที่ของโปรตอนในเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานจึงลดลง และจากผลในรูปที่ 4.31 เมื่อเปรียบเทียบการเกิดโพลาริเซชันที่อุณหภูมิต่างกันพบว่าเมื่ออุณหภูมิจากเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานจะลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง แก๊สสามารถพาไอน้ำไปได้มากขึ้นกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นแก๊สที่ออกจากส่วนระเหยน้ำที่อุณหภูมิสูงจึงมีปริมาณน้ำมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ปริมาณน้ำที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงมีมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานลดลง

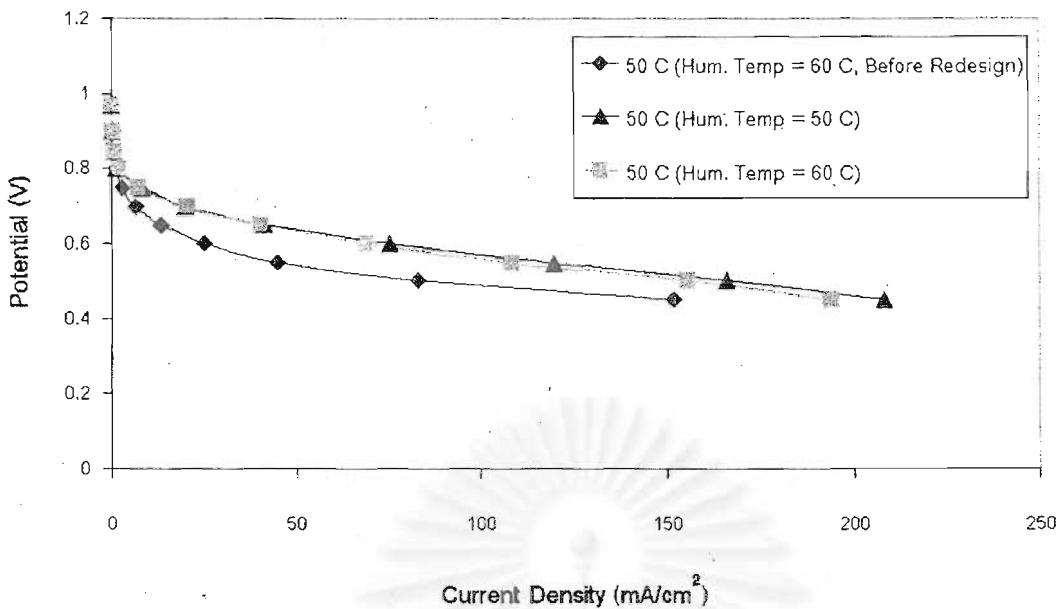
จากผลการทดลองดังกล่าว เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงกับอุณหภูมิของระบบให้ความชื้นที่มีผลต่อปริมาณความชื้นของแก๊สที่ป้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง จึงได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียสแต่ให้อุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำในระบบให้ความชื้นคงที่เท่ากับ 60 องศาเซลเซียสเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นแล้วนำผลดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองก่อนการปรับปรุงหน่วยทดสอบและผลการทดลองที่ใช้อุณหภูมิจากส่วนระเหยน้ำเท่ากับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4.33 - 4.35



รูปที่ 4.33 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงก่อนและหลังการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง โดยอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.34 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงก่อนและหลังการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง โดยอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.35 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงก่อนและหลังการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง โดยอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่ออนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่ออนาที และความดันบรรยากาศ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.33 ซึ่งใช้อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียสพบว่า เมื่อทำการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแล้วทำการทดลองโดยให้อุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำเท่ากับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีและเนื่องจากความต้านทานเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในผลการทดลองก่อนที่จะมีการพัฒนาหน่วยทดสอบใช้อุณหภูมิในส่วนระเหยน้ำ 60 องศาเซลเซียส ถึงแม้จะมีการควบคุมของน้ำภายในท่อแต่ปริมาณน้ำที่เข้าสู่เซลล์อาจมีมากกว่าปริมาณน้ำในแก๊สอิ่มตัวที่ 30 องศาเซลเซียส เพราะอุณหภูมิของแก๊สอาจจะลดลงไม่ถึง 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการหุ้มฉนวนที่ท่อน้ำแก๊ส ทำให้ความชื้นในเยื่อแผ่นมีมากกว่า จึงส่งผลให้มีการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีและเนื่องจากความต้านทานน้อยกว่า ส่วนกรณีที่ใช้อุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำเท่ากับ 60 องศาเซลเซียสภายหลังจากการพัฒนาหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงสามารถให้ค่าความหนาแน่นกระแสเพียง 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่าความต่างศักย์ 0.75 เท่านั้น จากนั้นค่าความหนาแน่นกระแสลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการท่วมขังของน้ำที่ขั้วไฟฟ้า ด้วยเหตุที่อุณหภูมิของแก๊สที่ออกจากส่วนระเหยน้ำมีอุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิการทำงานเพียง 30 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำที่อยู่ในแก๊สที่อิ่มตัวด้วยความชื้น ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เกิดการ

ความแน่นขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้มีน้ำสะสมอยู่ภายในเซลล์เชื้อเพลิงมากและอาจจะขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของแก๊ส ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงอย่างมาก ซึ่งไม่สามารถใช้สภาวะดังกล่าวนี้ใช้ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ เพราะมีความแตกต่างของอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงกับอุณหภูมิของแก๊สที่เข้าสู่เซลล์มาก

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.34 ซึ่งใช้อุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 40 องศาเซลเซียสพบว่าเมื่อทำการทดลองโดยให้อุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำเท่ากับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงภายหลังจากการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง โพลาริเซชันทางเคมีที่เกิดขึ้นจะลดลงจากกรณีก่อนการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งใช้อุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากหน่วยทดสอบแบบเดิม อุณหภูมิของแก๊สก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงมีการลดลงอย่างมากเพราะระยะทางของท่อที่ยาวเกินไปและการหุ้มฉนวนที่ไม่ดีพอทำให้เกิดการควบแน่นของน้ำภายในท่อ ความชื้นของแก๊สมีการลดลง ส่งผลให้ปริมาณความชื้นในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันมีน้อยลง ทำให้เกิดโพลาริเซชันทางเคมีขึ้น แต่เมื่อมีการปรับปรุงหน่วยทดสอบและใช้อุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำเท่ากับอุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง พบว่ามีการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีน้อยกว่า แสดงว่าอุณหภูมิของแก๊สในหน่วยทดสอบแบบเดิมมีค่าต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส จึงส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่เข้ามาพร้อมแก๊สมีน้อยกว่าที่ปริมาณความชื้นอิ่มตัวที่ 40 องศาเซลเซียส และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับกรณีที่ใช้อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียสในรูปที่ 4.33 พบว่าผลการทดลองตรงข้ามกันคือที่อุณหภูมิการทำงาน 30 องศาเซลเซียส หน่วยทดสอบแบบเดิมสามารถให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสูงกว่า แต่ที่อุณหภูมิการทำงาน 40 องศาเซลเซียส หน่วยทดสอบที่มีการพัฒนาและใช้อุณหภูมิส่วนระเหยน้ำและอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากันกลับให้ประสิทธิภาพสูงกว่า จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเดิม แก๊สที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณระหว่าง 30 - 40 องศาเซลเซียสเท่านั้น จึงทำให้เมื่อใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จึงได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ากรณีที่ปรับปรุงหน่วยทดสอบที่ใช้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เมื่อใช้อุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำเท่ากับ 60 องศาเซลเซียสภายหลังจากปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง (รูปที่ 4.34) พบว่าในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสต่ำ ๆ หรือประมาณไม่เกิน 50 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีและเนื่องจากความต้านทานน้อยกว่าอีก 2 กรณี เนื่องจากมีปริมาณน้ำที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงมากกว่า ทำให้กระบวนการภายในเซลล์เชื้อเพลิงเกิดได้ดีกว่า แต่เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสมากกว่า 50 มิลลิแอมแปร์จะมีการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นเกิดขึ้น เนื่องจากมีการควบแน่นของน้ำที่เข้ามากับแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและแก๊สไม่สามารถพาความชื้นออกไป

ได้อย่างเพียงพอ ส่งผลให้เกิดการอุดตันของน้ำบริเวณหัวไฟฟ้า โมเลกุลของแก๊สจึงเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้น และเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสประมาณ 63 มิลลิแอมแปร์ ค่าความหนาแน่นกระแสลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับผลการทดลองของอุณหภูมิการทำงานที่ 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิระบบให้ความชื้น 60 องศาเซลเซียสในรูปที่ 4.33 เนื่องจากเกิดการท่วมของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงอย่างรวดเร็ว

ผลการทดลองเมื่อใช้อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.35) พบว่าภายหลังจากการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงทั้งกรณีที่ใช้อุณหภูมิจากส่วนระเหยน้ำเท่ากับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงและที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีความแตกต่างในการเกิดโพลาริเซชันมากนัก เพราะอุณหภูมิของแก๊สที่เข้าเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ ทำให้ปริมาณน้ำที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงพร้อมแก๊สมีค่าใกล้เคียงกัน และในส่วนที่ใช้อุณหภูมิจากส่วนระเหยน้ำเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ก็ไม่เกิดการท่วมของน้ำที่หัวไฟฟ้าอย่างในกรณีที่ใช้อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 และ 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิของแก๊สที่เข้ามีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง จึงไม่เกิดปัญหาการควบแน่นของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง ในส่วนผลการทดลองของกรณีที่ใช้หน่วยทดสอบแบบเดิม จะมีปัญหาการขาดแคลนน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง เพราะน้ำภายในแก๊สที่ออกจากส่วนระเหยน้ำมีการควบแน่นทำให้ปริมาณความชื้นในแก๊สลดลง เมื่อเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ทำให้น้ำที่อยู่ภายในเซลล์เชื้อเพลิงถูกแก๊สพาออกไปจากเซลล์เชื้อเพลิงทำให้เกิดโพลาริเซชันทางเคมีและเนื่องจากความต้านทานมากขึ้น

เพื่อเป็นการยืนยันผลของสมดุลของน้ำภายในเซลล์ต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะพิจารณาจากเทอมของการสะสมของน้ำภายในเซลล์โดยการทำดูล้ำ ณ สภาวะอุณหภูมิการทำงานของเซลล์ต่าง ๆ ที่ค่าความหนาแน่นกระแสค่าหนึ่ง ๆ (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ค) ผลการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 โดยสมมติฐานให้แก๊สที่เข้าและออกอิมตัวด้วยน้ำที่สภาวะที่เข้าและออก และค่าความหนาแน่นกระแสแสดงที่ในช่วงเวลาการดูลมว



ตารางที่ 4.3 อัตราการระดมน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ สำหรับหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง

อุณหภูมิของเซลล์ (°C)	อุณหภูมิของระบบให้ความชื้น (°C)	อัตราการระดมน้ำ (มิลลิต่อนาที)	
		$j = 20 \text{ mA/cm}^2$	$j = 150 \text{ mA/cm}^2$
30	60	9.17×10^{-5}	3.09×10^{-4}
40	60	-4.7×10^{-5}	1.83×10^{-4}
50	60	-2.87×10^{-4}	-3.64×10^{-5}
60	60	-7.11×10^{-4}	-4.23×10^{-4}
70	70	-1.51×10^{-3}	-

ตารางที่ 4.4 อัตราการระดมน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ สำหรับหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว

อุณหภูมิของเซลล์ (°C)	อุณหภูมิของระบบให้ความชื้น (°C)	อัตราการระดมน้ำ (มิลลิต่อนาที)			
		$j = 10 \text{ mA/cm}^2$	$j = 20 \text{ mA/cm}^2$	$j = 60 \text{ mA/cm}^2$	$j = 150 \text{ mA/cm}^2$
30	30	1.66×10^{-5}	3.31×10^{-5}	9.94×10^{-5}	2.48×10^{-4}
40	40	1.74×10^{-5}	3.48×10^{-5}	1.04×10^{-4}	2.61×10^{-4}
50	50	1.88×10^{-5}	3.76×10^{-5}	1.13×10^{-4}	2.82×10^{-4}
60	60	2.13×10^{-5}	4.25×10^{-5}	1.28×10^{-4}	3.19×10^{-4}
70	70	2.59×10^{-5}	5.18×10^{-5}	1.55×10^{-4}	3.90×10^{-4}
30	60	$8.19 \times 10^{-4*}$	-	-	-
40	60	6.81×10^{-4}	6.99×10^{-4}	$7.68 \times 10^{-4*}$	-
50	60	4.43×10^{-4}	4.61×10^{-4}	5.37×10^{-4}	7.06×10^{-4}

* อัตราการระดมน้ำก่อนเซลล์หยุดการทำงาน

จากค่าของอัตราการระดมของน้ำพบว่าในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงก่อนการปรับปรุงจะมีค่าอัตราการระดมของน้ำในเซลล์ติดลบโดยมีค่าลบมากที่สุดที่อุณหภูมิการทำงานที่ 70 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.3) แสดงว่ามีการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ตลอดเวลา ยกเว้นที่อุณหภูมิการทำงานที่ 30 และ 40 องศาเซลเซียส (ที่ค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 150 มิลลิแอมแปร์ต่อตา

รางเซนติเมตร) ที่จะเกิดการสะสมของน้ำในเซลล์ ดังนั้นผลการคำนวณนี้จึงยืนยันว่ามีการแห้งของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนภายในเซลล์ที่อุณหภูมิสูง ๆ จึงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ลดลง ส่วนในกรณีของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการปรับปรุงแล้วพบว่าค่าอัตราการสะสมน้ำในเซลล์จะมีค่าเป็นบวกทั้งหมด (ตารางที่ 4.4) จึงไม่เกิดปัญหาการขาดน้ำภายในเซลล์ โดยเฉพาะเมื่อใช้อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เท่ากับอุณหภูมิของระบบให้ความชื้น แต่หน่วยทดสอบเซลล์แบบใหม่จะพบปัญหาการท่วมของน้ำในเซลล์ ทำให้เซลล์ไม่สามารถทำงานได้เมื่อใช้อุณหภูมิของระบบให้ความชื้นสูงกว่าอุณหภูมิการทำงานของเซลล์ โดยเฉพาะเมื่อมีค่าอุณหภูมิสูงกว่ามาก เช่นกรณีที่อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของระบบให้ความชื้นเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการสะสมน้ำเท่ากับ 8.19×10^{-4} มิลต่ออนาที เซลล์จะสามารถทำงานได้เพียงแค่ว่าค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเท่านั้น ก็เกิดปัญหาการสะสมน้ำที่มากเกินไปภายในเซลล์ หรือที่อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของระบบให้ความชื้นเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เซลล์จะสามารถทำงานได้ถึงค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 60 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เพราะมีค่าอัตราการสะสมน้ำในเซลล์น้อยกว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียสแต่ที่อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส จะไม่พบปัญหาการท่วมของน้ำในเซลล์ จากค่าอัตราการสะสมน้ำในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ทำให้ทราบพอสังเขปว่า สภาพะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงไม่ควรจะมีอัตราการสะสมน้ำภายในเซลล์สูงเกินไป และไม่ควรให้เกิดการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ด้วยเช่นกัน

จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้สรุปได้ว่า อุณหภูมิของระบบให้ความชื้นของแก๊สจำเป็นจะต้องมีอุณหภูมิที่เท่ากับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงหรือมากกว่าเล็กน้อย เพราะอุณหภูมิของแก๊สอาจจะมีการลดลงจากอุณหภูมิของระบบให้ความชื้นเล็กน้อยระหว่างทางภายในท่อก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง เพื่อที่แก๊สที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงมีปริมาณความชื้นเพียงพอต่อกระบวนการภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งถ้าให้แก๊สที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง จะทำให้น้ำที่อยู่ภายในเซลล์เชื้อเพลิงสูญเสียไปกับแก๊สขาออกได้ ส่งผลให้เยื่อแผ่นภายในเซลล์เชื้อเพลิงเกิดการแห้ง และถ้าป้อนแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงมากก็จะเกิดการควบแน่นของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากแก๊สเมื่อเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้เกิดการท่วมของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสิ่งที่ต้องคำนึงคือความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง และอุณหภูมิของแก๊สที่จะใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงอันได้แก่อุณหภูมิของระบบให้ความชื้น ซึ่งจะส่งผลต่อสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง

จากการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น เมื่ออุณหภูมิการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในรูปประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ 2.52 ที่ค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากันสำหรับการทดลองก่อนและหลังการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนและออกซิเจนเท่ากับ 10 และ 80 sccm ตามลำดับ

J (mA/cm ²)	ภายหลังการพัฒนาหน่วยทดสอบ Temp. Humidifier = Temp Cell					ก่อนการพัฒนาหน่วยทดสอบ Temp. Humidifier = 60 °C				
	Temp. Cell (°C)					Temp. Cell (°C)				
	30	40	50	60	70	30	40	50	60	70
20	0.5655	0.5818	0.5696	0.5899	0.5736	0.5818	0.5492	0.5045	0.4394	0.0692
50	0.5085	0.5289	0.5207	0.5411	0.5411	0.5207	0.4882	0.4394	0.3173	-
100	0.4434	0.4638	0.4557	0.4882	0.4882	0.4597	0.4353	0.3987	0.2034	-
120	0.4231	0.4394	0.4475	0.4719	0.4719	0.4394	0.4150	0.3824	0.1871	-
140	0.3987	0.4231	0.4312	0.4557	0.4557	0.4231	0.3987	0.3743	0.1709	-
160	0.3865	0.4028	0.4150	0.4394	0.4394	0.4028	0.3824	-	0.1465	-

จากตารางที่ 4.5 จะพบว่าเมื่อมีการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มขึ้นทุกค่าความหนาแน่นกระแส ยกเว้นที่อุณหภูมิการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากก่อนการปรับปรุงหน่วยทดสอบนั้น อุณหภูมิของแก๊สที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 30 – 40 องศาเซลเซียส ดังนั้นแก๊สที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิง จึงทำให้มีค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงก่อนการปรับปรุงเซลล์เชื้อเพลิงสูงกว่าภายหลังการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ภายหลังจากการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแล้วได้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นทำให้สรุปได้ว่าการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงโดยการลดระยะทางระหว่างท่อทางเดินแก๊สจากระบบให้ความชื้นกับเซลล์เชื้อเพลิงจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในขั้นต่อไปต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของแก๊สภายในท่อนำแก๊สด้วย

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 การออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

จากการออกแบบหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งหน่วยทดสอบแบ่งออกเป็นส่วนประกอบ 5 ส่วนหลัก ๆ คือ ระบบควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของแก๊ส ระบบให้ความชื้นกับแก๊ส เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เครื่อง Potentiostat/Galvanostat และวาล์วควบคุมความดันกลับ ทำให้หน่วยทดสอบสามารถใช้ศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน และสามารถใช้ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง แต่ในบางส่วนของหน่วยทดสอบยังมีข้อบกพร่องซึ่งไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรได้ตามที่ต้องการ ได้แก่ ระบบให้ความชื้นกับแก๊สที่ไม่สามารถปรับค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้ตามต้องการ ทำให้ในการศึกษาผลของปริมาณความชื้นสามารถทำการทดลองได้เฉพาะภาวะที่แก๊สอิ่มตัวด้วยความชื้นและแก๊สที่ไม่ความชื้น ในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงมีข้อบกพร่องในส่วนของท่านทางเดินแก๊สระหว่างระบบให้ความชื้นกับเซลล์เชื้อเพลิงภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเมื่ออุณหภูมิการทำงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากท่านทางเดินแก๊สไม่สามารถรักษาอุณหภูมิของแก๊สให้คงที่เท่ากับอุณหภูมิภายในส่วนระเหยน้ำได้เพราะการหุ้มฉนวนที่ท่านทางเดินแก๊สไม่ดีพอ ทำให้อุณหภูมิก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงมีการลดลง ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง แต่เมื่อทำการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงโดยการลดระยะท่านทางเดินแก๊สระหว่างระบบให้ความชื้นกับเซลล์เชื้อเพลิงและปรับระดับของเซลล์เพื่อให้ น้ำที่อาจจะควบแน่นเข้าสู่เซลล์ทั้งหมดพบว่าประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น ทำให้ยืนยันได้ว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเนื่องจากข้อบกพร่องในส่วนของท่านทางเดินแก๊ส

5.2 ผลของตัวแปรต่าง ๆ

จากการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊ส อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง องค์ประกอบของสารออกซิไดส์ ปริมาณความชื้น และความดัน โดยเมื่อทำการออกแบบการทดลองโดยศึกษาผลของอัตราการไหลของไฮโดรเจน อัตราการไหลของออกซิเจนและอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงก่อนการปรับปรุงซึ่ง

แก๊สที่เข้าสู่เซลล์จะมีความชื้นต่ำกว่าความชื้นที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิการทำงานของเซลล์ตั้งแต่ 40 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงพบว่าจะได้ภาวะที่ให้อายุประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่น แลกเปลี่ยนโปรตอนคือ อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm หรือ 0.0004 โมลต่อนาที อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm หรือ 0.0036 โมลต่อนาที และอุณหภูมิการทำงาน ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ 30 องศาเซลเซียส นำภาวะดังกล่าวไปศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ จะพบว่าตัวแปรทุกตัวมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวแปรต่าง ๆ จะมีผลกระทบต่อสมดุลของปริมาณน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการทำงานของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เพราะปริมาณน้ำมีความสำคัญต่อการเกิด ปฏิกิริยาทั้งออกซิเดชันของไฮโดรเจนและรีดักชันของออกซิเจน อีกทั้งน้ำเป็นตัวช่วยพาโปรตอนให้ เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด อันเป็นกระบวนการหลัก ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอจะก่อให้เกิด ความต้านทานขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งทำให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน แต่ถ้า ปริมาณน้ำภายในเซลล์มากเกินไปก็จะทำให้เกิดการท่วมของน้ำที่บริเวณขั้วไฟฟ้า ส่งผลให้สารตั้ง ต้นไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าได้ ส่วนในกรณีของความเข้มข้นของสารออกซิไดส์ก็มี ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเช่นกัน พบว่าเมื่อเปลี่ยนสารออกซิไดส์ จากออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นอากาศ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลง และมีการเกิดโพลาริเซชัน เนื่องจากความเข้มข้นเกิดขึ้น ดังนั้นในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องคำนึงถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเฉพาะผลกระทบต่อความสมดุลของปริมาณน้ำภายใน เซลล์เชื้อเพลิงและความเข้มข้นของสารตั้งต้นบริเวณขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพ ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนลดลง

สำหรับหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการปรับปรุงส่วนเชื่อมต่อระหว่างระบบให้ความชื้น และเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อควบคุมให้แก๊สที่เข้าสู่เซลล์มีความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุล ณ อุณหภูมิ การทำงานของเซลล์ พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดย อุณหภูมิในระบบให้ความชื้นควรเท่ากับหรือมากกว่าอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เล็กน้อย จาก การทดลองพบว่าอุณหภูมิการทำงานของเซลล์ที่ 70 องศาเซลเซียสจะให้ประสิทธิภาพการทำงาน สูงที่สุด และสูงกว่ากรณีที่ก่อนการปรับปรุงหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ในส่วนของท่อทางเดินแก๊สที่เป็นสแตนเลสควรมีการเดินสายดิน เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าที่อาจจะมีการรั่วไหลจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง และกระแสไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากการไหลของแก๊ส ซึ่งอาจเกิดอันตรายขึ้นได้
2. ในส่วนของท่อทางเดินแก๊สระหว่างระบบให้ความร้อนกับแก๊สกับเซลล์เชื้อเพลิง ควรจะมีการหุ้มฉนวนให้ดีเพื่อไม่ให้อุณหภูมิของแก๊สที่ออกจากระบบให้ความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยอาจจะนำเอาความร้อนมาพันรอบท่อทางเดินแก๊สตลอดระยะทางระหว่างระบบให้ความร้อนกับเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อรักษาอุณหภูมิของแก๊สให้คงที่ หรือแก้ปัญหาโดยให้ระยะทางระหว่างระบบให้ความร้อนกับแก๊สกับเซลล์เชื้อเพลิงสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งเป็นการลดโอกาสการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของแก๊ส
3. ควรติดตั้งวาล์วและทางเดินขาเข้าของแก๊สโดยแบ่งเป็น 2 ชุดคือชุดทางเดินแก๊สขาเข้าที่สามารถผ่านระบบให้ความร้อน และชุดทางเดินแก๊สขาเข้าที่ไม่ผ่านระบบให้ความร้อน เพื่อให้สามารถศึกษาผลของความชื้นของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิงได้ดียิ่งขึ้น เพราะสามารถปรับคุณสมบัติของแก๊สที่มีความชื้นและไม่มีความชื้นได้ตลอดการทดลอง
4. ควรติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของแก๊สขนาดเล็กในทางเดินของแก๊ส ซึ่งจะช่วยให้ทราบปริมาณความชื้นอุณหภูมิของแก๊สก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงที่แท้จริง
5. ควรมีการวัดและบันทึกปริมาณแก๊สขาออกจากเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่างถูกต้อง

รายการอ้างอิง

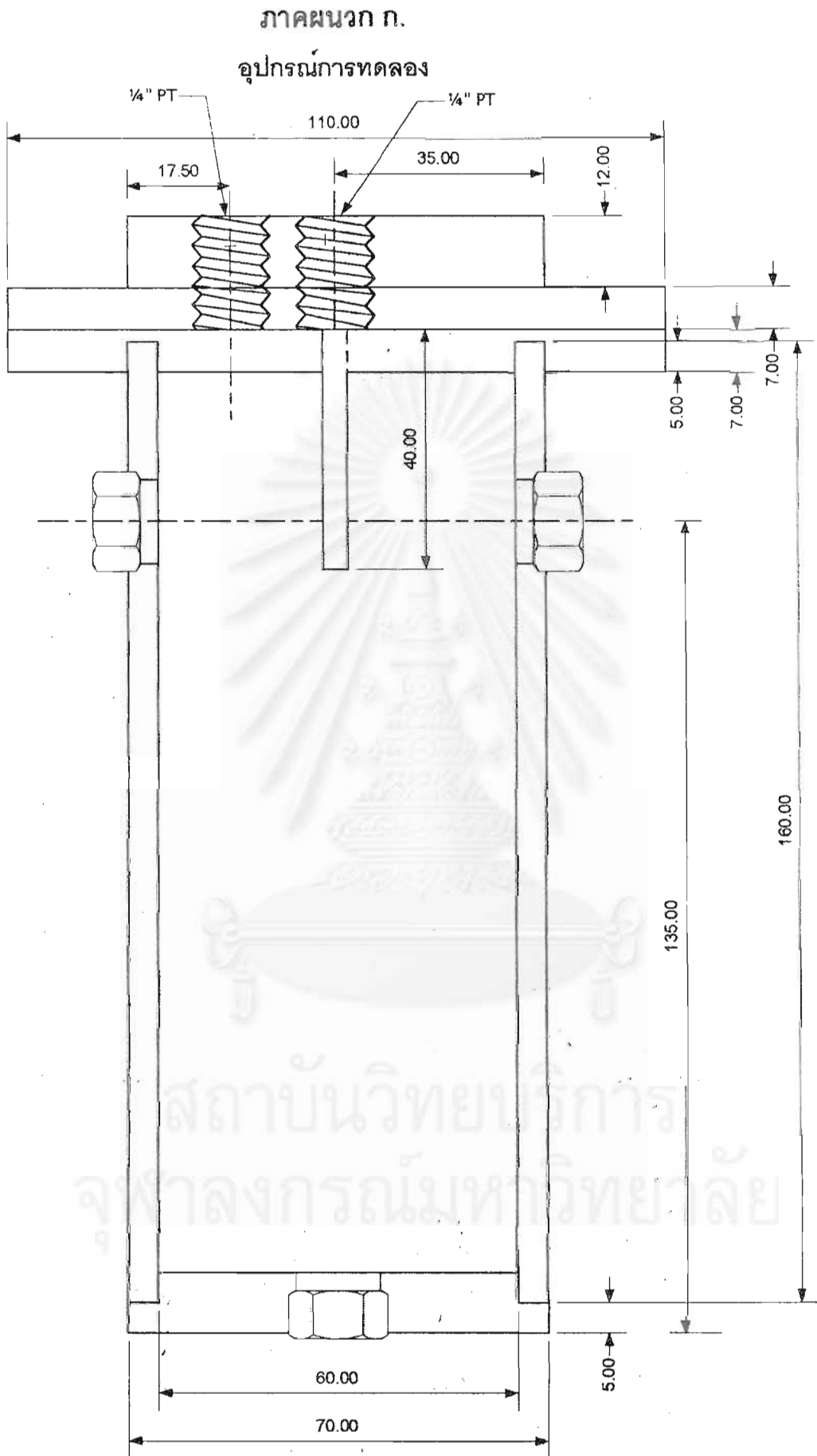
1. Appleby, A.J., and Foulkes, F.R. Fuel cell handbook New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
2. Kordesch, K., and Simader, G. Fuel cells and their applications New York: VCH Publishers, Inc., 1996.
3. Larminie, J., and Dick, A. Fuel cell systems explained Chichester: John Wiley & Sons LTD., 2000.
4. McDougall, A. Fuel cells 1st ed. London: The Macmillan Press LTD., 1976
5. Montgomery, D.C. Design and analysis of experiments. 5th ed. New York: John Wiley & Sons LTD., 2001.
6. Chang, H., Koschany, P., Lim, C., and Kim, J. Materials and processes for light weight and high power density PEM fuel cells. Journal of New Materials for Electrochemical Systems 3 (2000): 55-59
7. Wood, D.L., III, Yi, J.S., and Nguyen, T.V. Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells. Electrochimica Acta 43(1998): 3795-3809
8. Zawodzinski, T.A., Jr., Derouin, C., Radzinski, S., Sherman, R.J., Smith, V.T., Springer, T.E., and Gottesfeld, S. Water uptake by and transport through Nafion 117 membranes. Journal of Electrochemical Society 140(1993): 1041-1047
9. Watanabe, M., Uchida, H., Seki, Y., Emori, M., and Stonehart, P. Self-humidifying polymer electrolyte membranes for fuel cells. Journal of Electrochemical Society 143(1996): 3847-3852
10. Chu, D., Jiang, R., and Walker, C. Analysis of PEM fuel cell stacks using an empirical current-voltage equation. Journal of Applied Electrochemistry 30(2000): 365-370
11. Rho, Y.W., Velev, O.A., Srinivasan, S., and Kho, Y.T. Mass transport phenomena in proton exchange membrane fuel cells using O₂/He, O₂/Ar, and O₂/N₂ mixture. Journal of Electrochemical Society 141(1994): 2084-2088

12. Buchi, F.N., and Srinivasan, S. Operating proton exchange membrane fuel cells without external humidification of the reactant gases. Journal of Electrochemical Society 144(1997): 2767-2772
13. Andraus, B., McEvoy, A.J., and Scherer, G.G. Analysis of performance losses in polymer electrolyte fuel cells at high current densities by impedance spectroscopy. Electrochimica Acta 47(2002): 2223-2229
14. Kim, J., Lee, S.M., Srinivasan, S., and Chamberlin, C. Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation. Journal of Electrochemical Society 142(1995): 2670-2674
15. Costamagna, P. Transport phenomena in polymeric membrane fuel cells. Chemical Engineering Science 56(2001): 323-332
16. 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.
17. Murphy, O.J., Cisar, A., and Clarke, E. Low-cost light weight high power density PEM fuel cell stack. Electrochimica Acta. 43(1998): 3829-3840
18. Springer, T.E., Zawodzinski, T.A., and Gottesfeld, S. Polymer electrolyte fuel cell model. Journal of Electrochemical Society 138(1991): 2334-2341
19. Heinzl, A., Nolte, R., Ledjeff-Hey, K., and Zedda, M. Membrane fuel cells- concepts and system design. Electrochimica Acta. 43(1998): 2817-3820
20. พิษณุ เจริญสมศักดิ์, เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
21. เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, มหาวิทยาลัย และ นโยบายพลังงานแห่งชาติ, สำนักงาน คณะกรรมการ เอกสารประกอบการประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, 21 มีนาคม 2543 ณ มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
22. เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
23. กัญจนา บุญเกียรติ, การคำนวณขั้นต้นในวิชาเคมีวิศวกรรม พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.

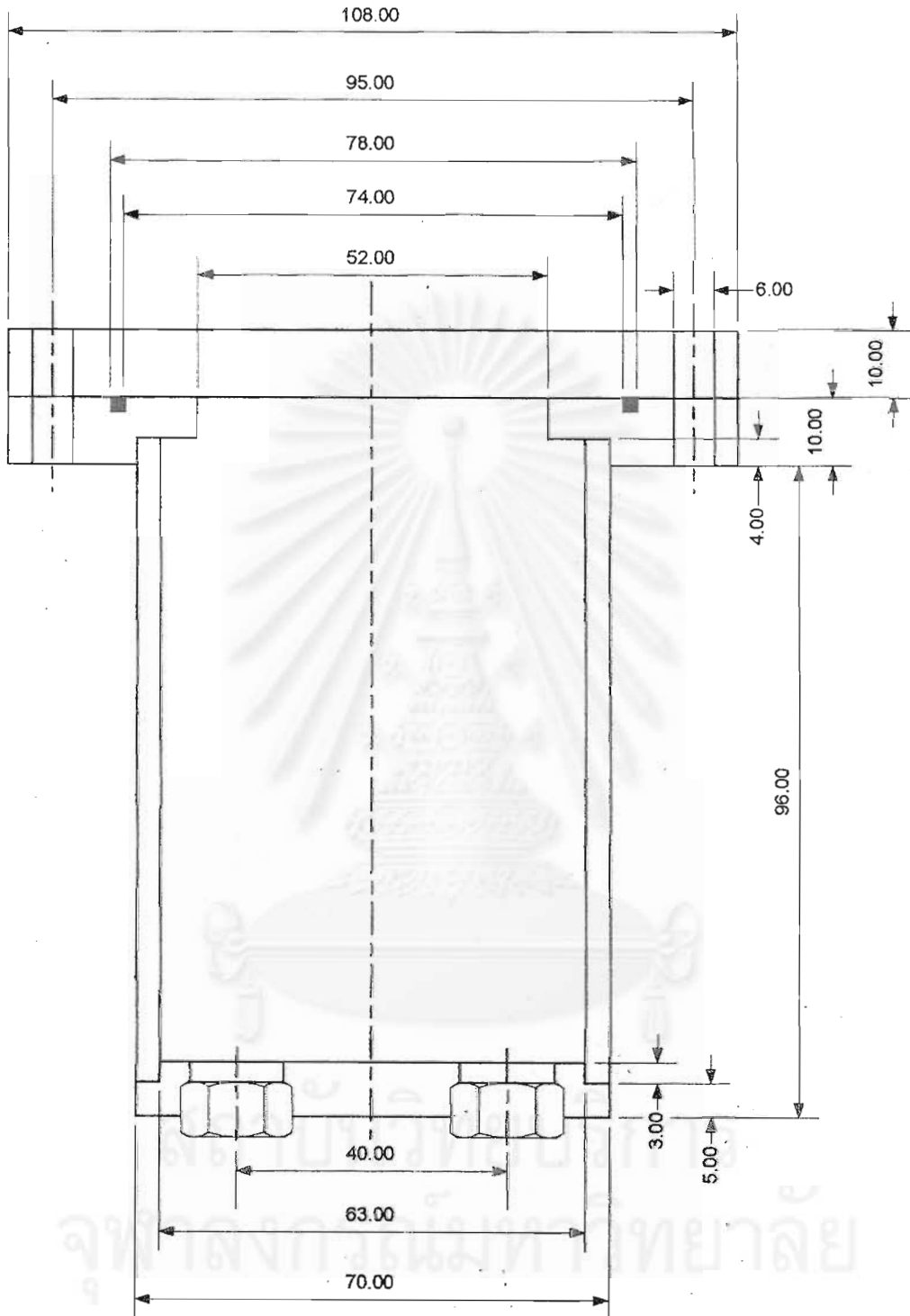


ภาคผนวก

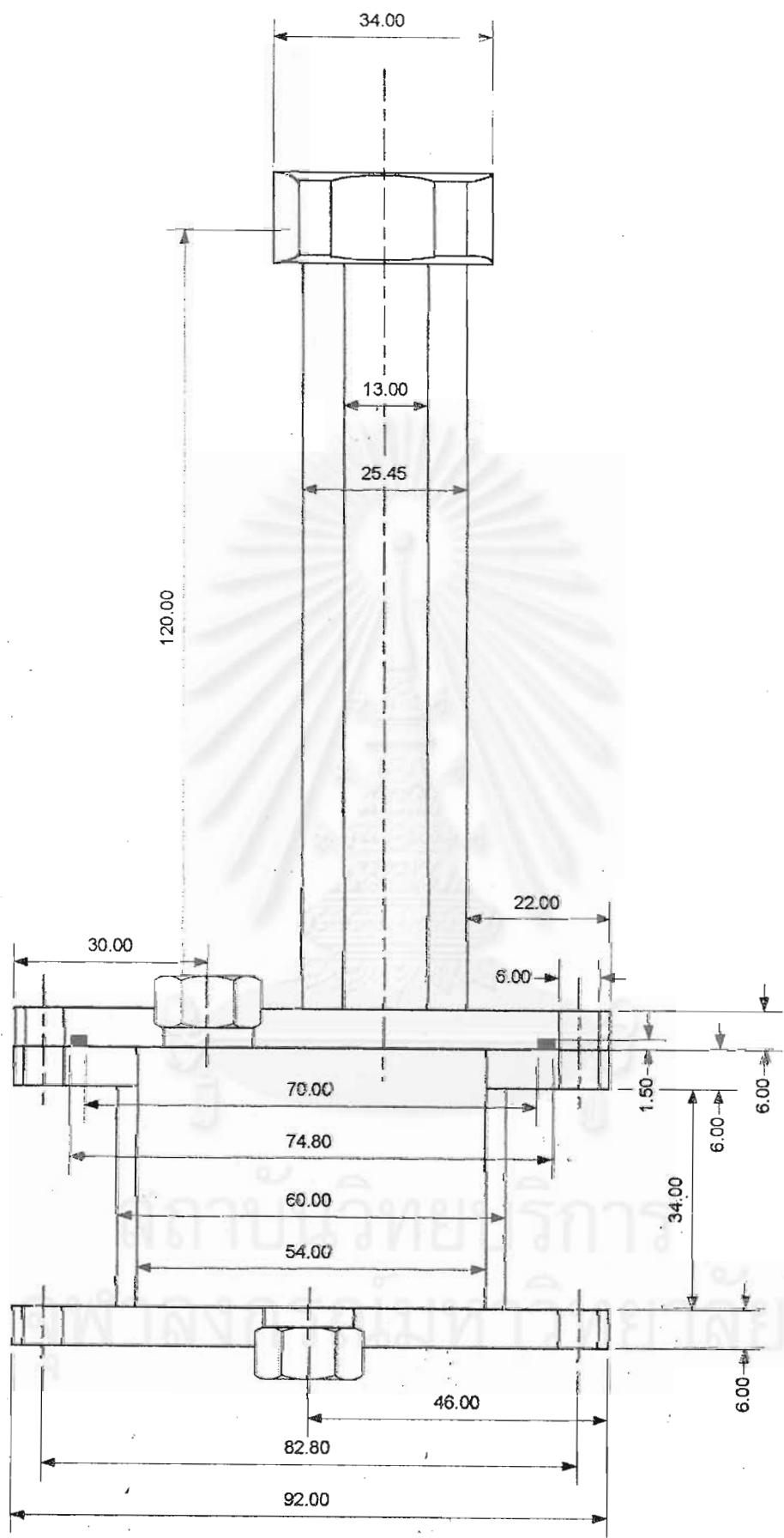
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



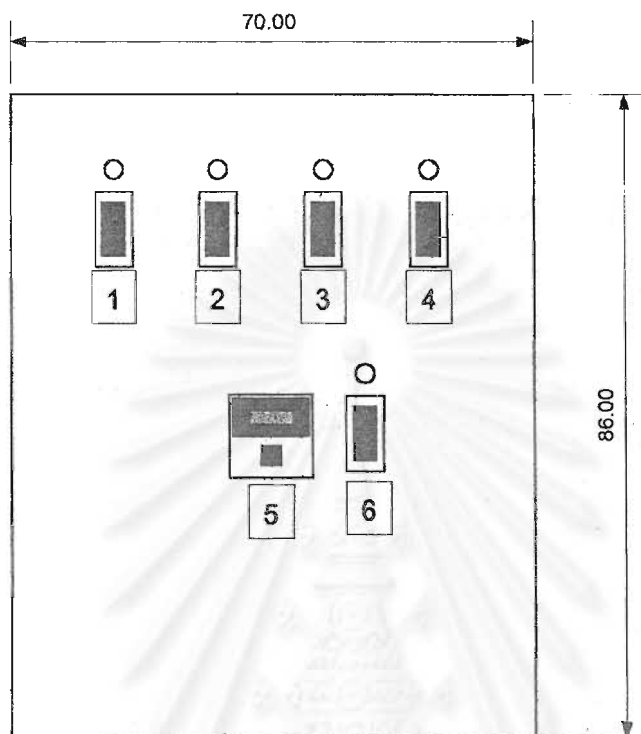
รูปที่ ก1 ภาพตัดด้านข้างของส่วนระเหยน้ำ (Evaporation Chamber) อัตราส่วน 1 : 1



รูปที่ ก2 ภาพตัดด้านข้างของส่วนจัดหาน้ำ (Water Supply Chamber) อัตราส่วน 1 : 1



รูปที่ ก3 ภาพตัดด้านข้างของส่วนวัดความชื้น (Sensor Chamber) อัตราส่วน 1 : 1



รูปที่ ก4 แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า

- 1) สวิตช์หลัก (Main Switch)
- 2) สวิตช์ของแผนทำความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง
- 3) สวิตช์ของส่วนระเหยน้ำของออกซิเจน
- 4) สวิตช์ของส่วนระเหยน้ำของไฮโดรเจน
- 5) เครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง
- 6) สวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ตารางที่ ข1 ผลของอัตราการไหลของแก๊ส

Temperature of Humidifier

Hydrogen = 60 °C

Oxygen = 60 °C

Cell Temperature = 30 °C

Pressure

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 1 atm

Potential (V)	Flow Rate = 10 sccm			Flow Rate = 50 sccm			Flow Rate = 100 sccm			Flow Rate = 200 sccm		
	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
0.90	0.0006	0.13	0.0006	0.0005	0.10	0.0004	0.0001	0.02	0.0001	0.0005	0.10	0.0005
0.85	0.0026	0.53	0.0022	0.0021	0.42	0.0018	0.0013	0.27	0.0011	0.0020	0.40	0.0017
0.80	0.0110	2.20	0.0088	0.0106	2.12	0.0085	0.0088	1.75	0.0070	0.0092	1.84	0.0073
0.75	0.0381	7.62	0.0286	0.0492	9.84	0.0369	0.0468	9.36	0.0351	0.0395	7.90	0.0296
0.70	0.0943	18.86	0.0660	0.1271	25.42	0.0890	0.1315	26.30	0.0921	0.1046	20.92	0.0732
0.65	0.1870	37.40	0.1216	0.2473	49.46	0.1607	0.2723	54.46	0.1770	0.2150	43.00	0.1398
0.60	0.3229	64.58	0.1937	0.4131	82.62	0.2479	0.5057	101.14	0.3034	0.3804	76.08	0.2282
0.55	0.4897	97.94	0.2693	0.6140	122.80	0.3377	0.7270	145.40	0.3999	0.5945	118.90	0.3270
0.50	0.6750	135.00	0.3375	0.8148	162.96	0.4074	0.9700	194.00	0.4850	0.8463	169.26	0.4232
0.45	0.8191	163.82	0.3686	1.1220	224.40	0.5049	-	-	-	1.1010	220.20	0.4955
0.40	1.1110	222.20	0.4444	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข2 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง (Experimental Design)

พิจารณาที่ค่าความต่างศักย์ 0.5 โวลต์

Run	A	B	C	Replicate	
				1	2
[1]	-1	-1	-1	133.42	70.46
a	1	-1	-1	107.59	84.91
b	-1	1	-1	104.06	163.57
ab	1	1	-1	169.26	170.46
c	-1	-1	1	173.58	176.37
ac	1	-1	1	19.96	37.70
bc	-1	1	1	9.85	59.48
abc	1	1	1	15.56	48.47
Center1	0	0	0	52.51	75.18
Center2	0	0	0	45.75	58.12
Center3	0	0	0	54.25	56.78

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข3 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ของไฮโดรเจน)

Flow Rate of Oxygen = 80 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 30 °C

V (V)	Hydrogen Flow Rate = 10 sccm			Hydrogen Flow Rate = 30 sccm			Hydrogen Flow Rate = 50 sccm			Hydrogen Flow Rate = 70 sccm			Hydrogen Flow Rate = 90 sccm			Hydrogen Flow Rate = 120 sccm		
	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
0.90	0.0012	0.23	0.0010	0.0008	0.16	0.0007	0.0010	0.19	0.0009	0.0011	0.22	0.0010	0.0009	0.18	0.0008	0.0012	0.23	0.0010
0.85	0.0041	0.82	0.0035	0.0027	0.55	0.0023	0.0030	0.60	0.0026	0.0039	0.78	0.0033	0.0032	0.64	0.0027	0.0040	0.79	0.0034
0.80	0.0154	3.08	0.0123	0.0111	2.22	0.0089	0.0114	2.28	0.0091	0.0146	2.92	0.0117	0.0129	2.58	0.0103	0.0146	2.92	0.0117
0.75	0.0524	10.49	0.0393	0.0406	8.12	0.0305	0.0404	8.08	0.0303	0.0481	9.62	0.0361	0.0444	8.88	0.0333	0.0474	9.48	0.0356
0.70	0.1224	24.48	0.0857	0.0962	19.24	0.0673	0.0970	19.40	0.0679	0.1079	21.58	0.0755	0.1026	20.52	0.0718	0.1056	21.12	0.0739
0.65	0.2282	45.64	0.1483	0.1802	36.04	0.1171	0.1814	36.28	0.1179	0.1902	38.04	0.1236	0.1870	37.40	0.1216	0.1862	37.24	0.1210
0.60	0.3768	75.36	0.2261	0.3036	60.72	0.1822	0.3003	60.06	0.1802	0.3018	60.36	0.1811	0.2992	59.84	0.1795	0.2969	59.38	0.1781
0.55	0.5673	113.46	0.3120	0.4660	93.20	0.2563	0.4646	92.92	0.2555	0.4560	91.20	0.2508	0.4453	89.06	0.2449	0.4532	90.64	0.2493
0.50	0.7837	156.74	0.3919	0.6620	132.40	0.3310	0.6720	134.40	0.3360	0.6506	130.12	0.3253	0.6409	128.18	0.3205	0.6467	129.34	0.3234
0.45	0.9976	199.52	0.4489	0.8980	179.60	0.4041	0.9131	182.62	0.4109	0.8786	175.72	0.3954	0.8701	174.02	0.3915	0.8817	176.34	0.3968

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๔ การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตของออกซิเจน)

Flow Rate of Hydrogen = 10 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 60 °C

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 30 °C

V (V)	Oxygen Flow Rate = 30 sccm			Oxygen Flow Rate = 60 sccm			Oxygen Flow Rate = 70 sccm			Oxygen Flow Rate = 80 sccm			Oxygen Flow Rate = 100 sccm		
	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
0.90	0.0003	0.06	0.0003	0.0011	0.21	0.0010	0.0012	0.23	0.0010	0.0002	0.05	0.0002	0.0005	0.10	0.0005
0.85	0.0012	0.23	0.0010	0.0037	0.75	0.0032	0.0041	0.82	0.0035	0.0014	0.27	0.0012	0.0022	0.44	0.0019
0.80	0.0049	0.98	0.0039	0.0141	2.81	0.0112	0.0154	3.08	0.0123	0.0082	1.65	0.0066	0.0108	2.16	0.0086
0.75	0.0201	4.01	0.0150	0.0480	9.61	0.0360	0.0524	10.49	0.0393	0.0369	7.38	0.0277	0.0466	9.32	0.0349
0.70	0.0553	11.06	0.0387	0.1118	22.36	0.0783	0.1224	24.48	0.0857	0.0981	19.62	0.0687	0.1201	24.02	0.0841
0.65	0.1151	23.02	0.0748	0.2090	41.80	0.1359	0.2282	45.64	0.1483	0.2078	41.56	0.1351	0.2340	46.80	0.1521
0.60	0.2120	42.40	0.1272	0.3426	68.52	0.2056	0.3768	75.36	0.2261	0.3629	72.58	0.2177	0.3905	78.10	0.2343
0.55	0.3595	71.90	0.1977	0.5188	103.76	0.2853	0.5673	113.46	0.3120	0.5585	111.70	0.3072	0.5759	115.18	0.3167
0.50	0.5457	109.14	0.2729	0.7211	144.22	0.3606	0.7837	156.74	0.3919	0.7858	157.16	0.3929	0.7346	146.92	0.3673
0.45	0.7703	154.06	0.3466	0.9693	193.86	0.4362	0.9976	199.52	0.4489	0.9865	197.30	0.4439	0.9026	180.52	0.4062

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข5 การออกแบบการทดลอง (เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง)

Flow Rate of Hydrogen = 10 sccm

Flow Rate of Oxygen = 80 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

Hydrogen = 60 °C
Oxygen = 60 °C

Hydrogen = 1 atm
Oxygen = 1 atm

V (V)	Cell Temperature = 30 °C			Cell Temperature = 40 °C			Cell Temperature = 50 °C			Cell Temperature = 60 °C			Cell Temperature = 70 °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
0.90	0.0012	0.23	0.0010	0.0003	0.05	0.0002	0.0010	0.19	0.0009	0.0010	0.21	0.0009	0.0005	0.10	0.0004
0.85	0.0041	0.82	0.0035	0.0012	0.24	0.0010	0.0025	0.50	0.0021	0.0024	0.48	0.0020	0.0016	0.31	0.0013
0.80	0.0154	3.08	0.0123	0.0059	1.18	0.0047	0.0063	1.25	0.0050	0.0053	1.07	0.0043	0.0038	0.77	0.0031
0.75	0.0524	10.49	0.0393	0.0242	4.84	0.0182	0.0154	3.08	0.0116	0.0109	2.18	0.0082	0.0078	1.56	0.0059
0.70	0.1224	24.48	0.0857	0.0648	12.96	0.0454	0.0340	6.80	0.0238	0.0216	4.32	0.0151	0.0136	2.72	0.0095
0.65	0.2282	45.64	0.1483	0.1384	27.68	0.0900	0.0667	13.34	0.0434	0.0386	7.72	0.0251	0.0234	4.68	0.0152
0.60	0.3768	75.36	0.2261	0.2539	50.78	0.1523	0.1243	24.86	0.0746	0.0656	13.12	0.0394	0.0324	6.48	0.0194
0.55	0.5673	113.46	0.3120	0.4257	85.14	0.2341	0.2235	44.70	0.1229	0.0937	18.74	0.0515	0.0422	8.44	0.0232
0.50	0.7837	156.74	0.3919	0.6531	130.62	0.3266	0.4140	82.80	0.2070	0.1287	25.74	0.0644	0.0530	10.60	0.0265
0.45	0.9976	199.52	0.4489	0.9149	182.98	0.4117	0.7602	152.04	0.3421	0.1707	34.13	0.0768	0.0605	12.10	0.0272
0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2442	48.84	0.0977	0.0703	14.06	0.0281
0.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2827	56.54	0.0989	0.0772	15.44	0.0270
0.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3619	72.37	0.1086	0.0856	17.12	0.0257
0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5088	101.75	0.1272	0.0902	18.04	0.0226
0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.7416	148.33	0.1483	0.0954	19.08	0.0191
0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.9160	183.20	0.1374	0.0957	19.14	0.0144
0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0969	19.38	0.0097
0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1080	21.60	0.0054
0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1100	22.00	0.0033
0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1160	23.20	0.0012

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๖ ผลของสารออกซิไดส์

Flow Rate of Hydrogen = 10 sccm
 Flow Rate of Oxygen and Air = 80 sccm
 Temperature of Humidifier Pressure
 Hydrogen = 60 °C Hydrogen = 1 atm
 Oxygen = 60 °C Oxygen = 1 atm
 Cell Temperature = 30 °C

Potential (V)	Oxygen			Air		
	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
0.90	0.0012	0.23	0.0010	0.0010	0.19	0.0009
0.85	0.0041	0.82	0.0035	0.0159	3.18	0.0135
0.80	0.0154	3.08	0.0123	0.0783	15.66	0.0626
0.75	0.0524	10.49	0.0393	0.1348	26.96	0.1011
0.70	0.1224	24.48	0.0857	0.1848	36.96	0.1294
0.65	0.2282	45.64	0.1483	0.2395	47.90	0.1557
0.60	0.3768	75.36	0.2261	0.2596	51.92	0.1558
0.55	0.5673	113.46	0.3120	0.2927	58.54	0.1610
0.50	0.7837	156.74	0.3919	0.3044	60.88	0.1522
0.45	0.9976	199.52	0.4489	0.3074	61.48	0.1383

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข7 ผลของอัตราการไหลของอากาศ

Flow Rate of Hydrogen = 10 sccm

Temperature of Humidifier

Hydrogen = 60 °C
Oxygen = 60 °C

Pressure

Hydrogen = 1 atm
Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 30 °C

V (V)	Air Flow Rate = 80 sccm			Air Flow Rate = 100 sccm			Air Flow Rate = 120 sccm			Air Flow Rate = 140 sccm			Air Flow Rate = 160 sccm			Air Flow Rate = 200 sccm			Air Flow Rate = 220 sccm			Air Flow Rate = 250 sccm		
	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)	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	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
0.90	0.0010	0.19	0.0009	0.0008	0.15	0.0007	0.0011	0.22	0.0010	0.0020	0.39	0.0018	0.0020	0.40	0.0018	0.0023	0.45	0.0020	0.0009	0.17	0.0008	0.0004	0.08	0.0004
0.80	0.0159	3.18	0.0127	0.0094	1.88	0.0075	0.0142	2.84	0.0114	0.0167	3.34	0.0134	0.0192	3.84	0.0154	0.0288	5.76	0.0230	0.0099	1.97	0.0079	0.0057	1.14	0.0046
0.70	0.0783	15.66	0.0548	0.0909	18.18	0.0636	0.0678	13.56	0.0475	0.0648	12.96	0.0454	0.0819	16.38	0.0573	0.1241	24.82	0.0869	0.0533	10.66	0.0373	0.0391	7.82	0.0274
0.60	0.1348	26.96	0.0809	0.1696	33.92	0.1018	0.1707	34.14	0.1024	0.1423	28.46	0.0854	0.2043	40.86	0.1226	0.2711	54.22	0.1627	0.1497	29.94	0.0898	0.1244	24.88	0.0746
0.50	0.1848	36.96	0.0924	0.2052	41.04	0.1026	0.2290	45.80	0.1145	0.2501	50.02	0.1251	0.3487	69.74	0.1744	0.4310	86.20	0.2155	0.3043	60.86	0.1522	0.2606	52.12	0.1303
0.40	0.2395	47.90	0.0958	0.2620	52.39	0.1048	0.2675	53.50	0.1070	0.3532	70.64	0.1413	0.4714	94.28	0.1886	0.5521	110.42	0.2208	0.4651	93.02	0.1860	0.4486	89.72	0.1794
0.30	0.2596	51.92	0.0779	0.2900	58.00	0.0870	0.3080	61.60	0.0924	0.4096	81.92	0.1229	0.6177	123.54	0.1853	0.6888	137.76	0.2066	0.5594	111.88	0.1678	0.5536	110.72	0.1661
0.20	0.2927	58.54	0.0585	0.3066	61.32	0.0613	0.3307	66.14	0.0661	0.4711	94.22	0.0942	0.6439	128.78	0.1288	0.8325	166.50	0.1665	0.6702	134.04	0.1340	0.6323	126.46	0.1265
0.10	0.3044	60.88	0.0304	0.3290	65.80	0.0329	0.3485	69.70	0.0349	0.5436	108.72	0.0544	0.7597	151.94	0.0760	0.8676	173.52	0.0868	0.7541	150.82	0.0754	0.7031	140.62	0.0703
0.05	0.3074	61.48	0.0154	0.3428	68.56	0.0171	0.3545	70.90	0.0177	0.5536	110.72	0.0277	0.7836	156.71	0.0392	0.9177	183.54	0.0459	0.7849	156.98	0.0392	0.7098	141.96	0.0355

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗8 ผลของปริมาณความชื้น (ออกซิเจน)

Flow Rate of Hydrogen = 10 sccm

Flow Rate of Oxygen = 80 sccm

Temperature of Humidifier

Hydrogen = 60 °C

Oxygen = 60 °C

Cell Temperature = 30 °C

Pressure

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 1 atm

Potential (V)	Humid H ₂ & Humid O ₂			No Humid H ₂ & Humid O ₂			Humid H ₂ & No Humid O ₂			No Humid H ₂ & No Humid O 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)
0.97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.90	0.0002	0.05	0.0002	0.0018	0.35	0.0016	0.0022	0.43	0.0019	0.0010	0.20	0.0009
0.85	0.0014	0.27	0.0012	0.0052	1.05	0.0044	0.0058	1.16	0.0049	-	-	-
0.80	0.0082	1.65	0.0066	0.0169	3.38	0.0135	0.0166	3.32	0.0133	0.0036	0.72	0.0029
0.75	0.0369	7.38	0.0277	0.0537	10.74	0.0403	0.0447	8.94	0.0335	-	-	-
0.70	0.0981	19.62	0.0687	0.1185	23.70	0.0830	0.0938	18.76	0.0657	0.0092	1.84	0.0064
0.65	0.2078	41.56	0.1351	0.2136	42.72	0.1388	0.1657	33.14	0.1077	-	-	-
0.60	0.3629	72.58	0.2177	0.3479	69.58	0.2087	0.2596	51.92	0.1558	0.0189	3.78	0.0113
0.55	0.5585	111.70	0.3072	0.5148	102.96	0.2831	0.3777	75.54	0.2077	-	-	-
0.50	0.7858	157.16	0.3929	0.7217	144.34	0.3609	0.5283	105.66	0.2642	0.0345	6.90	0.0173
0.45	0.9865	197.30	0.4439	0.9598	191.96	0.4319	0.6744	-	-	-	-	-
0.40	-	-	-	-	-	-	0.8896	-	-	0.0692	13.84	0.0277
0.35	-	-	-	-	-	-	1.054	-	-	-	-	-
0.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.6714	134.28	0.2014
0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0050	201.00	0.2010

ตารางที่ ข9 ผลของปริมาณความชื้น (อากาศ)

Flow Rate of Hydrogen = 10 sccm

Flow Rate of Air = 200 sccm

Temperature of Humidifier

Hydrogen = 60 °C

Oxygen = 60 °C

Pressure

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 30 °C

Potential (V)	Humid H ₂ & Humid Air			No Humid H ₂ & Humid Air			Humid H ₂ & No Humid Air			No Humid H ₂ & No Humid Air		
	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.90	0.0023	0.45	0.0020	0.0013	0.26	0.0012	5.9E-05	0.01	0.0001	0.0008	0.16	0.0007
0.80	0.0288	5.76	0.0230	0.0094	1.88	0.0075	0.0003	0.06	0.0002	0.0032	0.64	0.0026
0.70	0.1241	24.82	0.0869	0.0451	9.02	0.0316	0.0090	1.80	0.0063	0.0046	0.91	0.0032
0.60	0.2711	54.22	0.1627	0.1549	30.98	0.0929	0.0023	0.46	0.0014	0.0058	1.16	0.0035
0.50	0.4310	86.20	0.2155	0.3800	76.00	0.1900	0.0048	0.96	0.0024	0.0089	1.78	0.0044
0.40	0.5521	110.42	0.2208	0.4790	95.80	0.1916	0.0085	1.70	0.0034	0.0121	2.42	0.0048
0.30	0.6888	137.76	0.2066	0.5853	117.06	0.1756	0.0129	2.58	0.0039	0.0145	2.91	0.0044
0.20	0.8325	166.50	0.1665	0.6653	133.06	0.1331	0.0174	3.48	0.0035	0.0164	3.28	0.0033
0.10	0.8676	173.52	0.0868	0.7583	151.65	0.0758	0.0260	5.20	0.0026	0.0169	3.38	0.0017
0.05	0.9177	183.54	0.0459	0.7743	154.85	0.0387	0.0335	6.70	0.0017	0.0152	3.04	0.0008

ตารางที่ 10 ผลของความดัน

Flow Rate of Hydrogen = 200 sccm

Flow Rate of Air = 200 sccm

Temperature of Humidifier

Hydrogen = 60 °C

Oxygen = 60 °C

Cell Temperature = 30 and 70 °C

Potential (V)	1 atm (Cell Temperature = 30 °C)			2 atm (Cell Temperature = 30 °C)			1 atm (Cell Temperature = 70 °C)			2 atm (Cell Temperature = 70 °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)
0.97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.90	0.001	0.22	0.0010	0.0006	0.12	0.0005	0.0002	0.04	0.0002	0.0005	0.09	0.0004
0.80	0.010	2.08	0.0083	0.0067	1.34	0.0054	0.0013	0.25	0.0010	0.0021	0.42	0.0017
0.70	0.060	12.00	0.0420	0.0476	9.52	0.0333	0.0047	0.94	0.0033	0.0067	1.34	0.0047
0.60	0.178	35.66	0.1070	0.1573	31.46	0.0944	0.0140	2.80	0.0084	0.0178	3.56	0.0107
0.50	0.373	74.60	0.1865	0.3508	70.16	0.1754	0.0312	6.24	0.0156	0.0384	7.68	0.0192
0.40	0.471	94.28	0.1886	0.1232	24.64	0.0493	0.0531	10.62	0.0212	0.0678	13.56	0.0271
0.30	0.502	100.46	0.1507	0.03541	7.08	0.0106	0.0866	17.32	0.0260	0.1025	20.50	0.0308
0.20	0.559	111.74	0.1117	-	-	-	0.1076	21.53	0.0215	0.1318	26.36	0.0264
0.10	0.615	122.96	0.0615	-	-	-	0.1184	23.68	0.0118	0.2584	51.68	0.0258
0.05	-	-	-	-	-	-	0.1221	24.42	0.0061	-	-	-

ตารางที่ ข11 ผลของความดันและปริมาณความชื้น

Flow Rate of Hydrogen = 200 sccm

Flow Rate of Air = 200 sccm

Temperature of Humidifier

Hydrogen = 60 °C

Oxygen = 60 °C

Cell Temperature = 30 °C

Pressure

Hydrogen = 2 atm

Oxygen = 2 atm

Potential (V)	Humid H ₂ and Humid Air			No Humid H ₂ and Humid Air			Humid H ₂ and No Humid Air			Humid H ₂ and Humid Air (1 atm)		
	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.90	0.001	0.12	0.0005	0.0004	0.07	0.0003	0.0026	0.51	0.0023	0.001	0.22	0.0010
0.85	-	-	-	0.0010	0.20	0.0009	0.0061	1.22	0.0052	-	-	-
0.80	0.007	1.34	0.0054	0.0028	0.57	0.0023	0.0120	2.40	0.0096	0.010	2.08	0.0083
0.75	-	-	-	0.0073	1.46	0.0055	0.0209	4.18	0.0157	-	-	-
0.70	0.048	9.52	0.0333	0.0158	3.16	0.0111	0.0294	5.88	0.0206	0.060	12.00	0.0420
0.65	-	-	-	0.0297	5.94	0.0193	0.0406	8.12	0.0264	-	-	-
0.60	0.157	31.46	0.0944	0.0519	10.38	0.0311	0.0638	12.76	0.0383	0.1783	35.66	0.1070
0.55	-	-	-	0.0910	18.20	0.0501	0.1166	23.32	0.0641	-	-	-
0.50	0.351	70.16	0.1754	0.1782	35.64	0.0891	0.2999	59.98	0.1500	0.3730	74.60	0.1865
0.45	-	-	-	0.3657	73.14	0.1646	0.4123	82.46	0.1855	-	-	-
0.40	0.1232	24.64	0.0493	0.5728	114.56	0.2291	0.8252	165.04	0.3301	0.4714	94.28	0.1886
0.35	-	-	-	0.6592	131.84	0.2307	0.9686	193.72	0.3390	-	-	-
0.30	0.03541	7.08	0.0106	0.7288	145.76	0.2186	-	-	-	0.5023	100.46	0.1507
0.25	-	-	-	0.7474	149.48	0.1869	-	-	-	-	-	-
0.20	-	-	-	0.7408	148.16	0.1482	-	-	-	0.5587	111.74	0.1117
0.15	-	-	-	0.7201	144.02	0.1080	-	-	-	-	-	-
0.10	-	-	-	0.6662	133.24	0.0666	-	-	-	0.6148	122.96	0.0615
0.05	-	-	-	0.5304	106.09	0.0265	-	-	-	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข12 การพัฒนาหน่วยทดสอบ (ผลของอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง)

Flow Rate of Hydrogen = 10 sccm

Flow Rate of Oxygen = 80 sccm

Temperature of Humidifier

Pressure

อุณหภูมิของระบบให้ความชื้นเท่ากับกับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 1 atm

V (V)	Cell Temperature = 30 °C			Cell Temperature = 40 °C			Cell Temperature = 50 °C			Cell Temperature = 60 °C			Cell Temperature = 70 °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
0.90	0.0006	0.11	0.0005	0.0011	0.22	0.0010	0.0007	0.15	0.0007	0.0004	0.09	0.0004	0.0005	0.10	0.0004
0.85	0.0022	0.43	0.0018	0.0036	0.73	0.0031	0.0023	0.46	0.0019	0.0023	0.46	0.0020	0.0025	0.50	0.0021
0.80	0.0096	1.93	0.0077	0.0138	2.76	0.0110	0.0064	1.28	0.0051	0.0121	2.42	0.0097	0.0134	2.68	0.0107
0.75	0.0397	7.94	0.0298	0.0514	10.28	0.0386	0.0423	8.46	0.0317	0.0550	11.00	0.0413	0.0513	10.26	0.0385
0.70	0.1019	20.38	0.0713	0.1294	25.88	0.0906	0.0982	19.64	0.0687	0.1537	30.74	0.1076	0.1144	22.88	0.0801
0.65	0.1979	39.58	0.1286	0.2438	48.76	0.1585	0.2054	41.08	0.1335	0.3028	60.56	0.1968	0.3098	61.96	0.2014
0.60	0.3271	65.42	0.1963	0.3965	79.30	0.2379	0.3773	75.46	0.2264	0.5090	101.80	0.3054	0.5139	102.78	0.3083
0.55	0.4891	97.82	0.2690	0.5591	111.82	0.3075	0.5981	119.62	0.3290	0.7498	149.96	0.4124	0.7343	146.86	0.4039
0.50	0.6805	136.10	0.3403	0.7816	156.32	0.3908	0.8307	166.14	0.4154	1.0030	200.60	0.5015	1.0190	203.80	0.5095
0.45	0.8887	177.74	0.3999	1.0080	201.60	0.4536	1.0410	208.20	0.4685	-	-	-	-	-	-

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข13 การพัฒนาหน่วยทดสอบ (ผลของอุณหภูมิระบบให้ความชื้น, อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 30 °C)

Flow Rate of Hydrogen = 10 sccm

Flow Rate of Oxygen = 80 sccm

Pressure

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 30 °C

Potential (V)	Before Redesign Test Station			After Redesign Test Station					
	Humidifier Temperature = 60 °C			Humidifier Temperature = 30 °C			Humidifier Temperature = 60 °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)
0.97	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.90	0.0012	0.23	0.0010	0.0006	0.11	0.0005	0.0003	0.07	0.0003
0.85	0.0041	0.82	0.0035	0.0022	0.43	0.0018	0.0020	0.41	0.0017
0.80	0.0154	3.08	0.0123	0.0096	1.93	0.0077	0.0122	2.44	0.0098
0.75	0.0524	10.49	0.0393	0.0397	7.94	0.0298	0.0494	9.88	0.0371
0.70	0.1224	24.48	0.0857	0.1019	20.38	0.0713	0.0056	1.12	0.0039
0.65	0.2282	45.64	0.1483	0.1979	39.58	0.1286	0.0058	1.15	0.0037
0.60	0.3768	75.36	0.2261	0.3271	65.42	0.1963	0.0060	1.20	0.0036
0.55	0.5673	113.46	0.3120	0.4891	97.82	0.2690	-	-	-
0.50	0.7837	156.74	0.3919	0.6805	136.10	0.3403	-	-	-
0.45	0.9976	199.52	0.4489	0.8887	177.74	0.3999	-	-	-

ตารางที่ 14 การพัฒนาหน่วยทดสอบ (ผลของอุณหภูมิระบบให้ความชื้น, อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 40 °C)

Flow Rate of Hydrogen = 10 sccm

Flow Rate of Oxygen = 80 sccm

Pressure

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 1 atm

Cell Temperature = 40 °C

Potential (V)	Before Redesign Test Station			After Redesign Test Station					
	Humidifier Temperature = 60 °C			Humidifier Temperature = 40 °C			Humidifier Temperature = 60 °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)
0.97	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.90	0.0003	0.05	0.0002	0.0011	0.22	0.0010	0.0003	0.06	0.0003
0.85	0.0012	0.24	0.0010	0.0036	0.73	0.0031	0.0017	0.34	0.0015
0.80	0.0059	1.18	0.0047	0.0138	2.76	0.0110	0.0112	2.24	0.0090
0.75	0.0242	4.84	0.0182	0.0514	10.28	0.0386	0.0560	11.20	0.0420
0.70	0.0648	12.96	0.0454	0.1294	25.88	0.0906	0.1563	31.26	0.1094
0.65	0.1384	27.68	0.0900	0.2438	48.76	0.1585	0.2512	50.24	0.1633
0.60	0.2539	50.78	0.1523	0.3965	79.30	0.2379	0.2995	59.90	0.1797
0.55	0.4257	85.14	0.2341	0.5591	111.82	0.3075	0.3164	63.28	0.1740
0.50	0.6531	130.62	0.3266	0.7816	156.32	0.3908	0.0058	1.17	0.0029
0.45	0.9149	182.98	0.4117	1.0080	201.60	0.4536	0.0060	1.19	0.0027

ตารางที่ ข15 การพัฒนาหน่วยทดสอบ (ผลของอุณหภูมิระบบให้ความชื้น, อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 50 °C)

Flow Rate of Hydrogen = 10 sccm

Flow Rate of Oxygen = 80 sccm

Pressure

Hydrogen = 1 atm

Oxygen = 1 atm

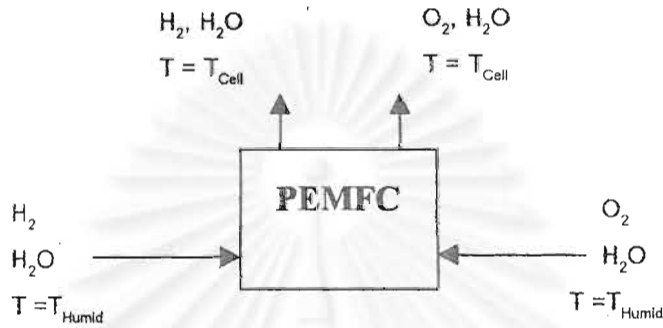
Cell Temperature = 50 °C

Potential (V)	Before Redesign Test Station			After Redesign Test Station					
	Humidifier Temperature = 60 °C			Humidifier Temperature = 50 °C			Humidifier Temperature = 60 °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)
0.97	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.90	0.0010	0.19	0.0009	0.0007	0.15	0.0007	0.0009	0.18	0.0008
0.85	0.0025	0.50	0.0021	0.0023	0.46	0.0019	0.0032	0.63	0.0027
0.80	0.0063	1.25	0.0050	0.0064	1.28	0.0051	0.0100	2.00	0.0080
0.75	0.0154	3.08	0.0116	0.0423	8.46	0.0317	0.0359	7.18	0.0269
0.70	0.0340	6.80	0.0238	0.0982	19.64	0.0687	0.1013	20.26	0.0709
0.65	0.0667	13.34	0.0434	0.2054	41.08	0.1335	0.2006	40.12	0.1304
0.60	0.1243	24.86	0.0746	0.3773	75.46	0.2264	0.3444	68.88	0.2066
0.55	0.2235	44.70	0.1229	0.5981	119.62	0.3290	0.5420	108.40	0.2981
0.50	0.4140	82.80	0.2070	0.8307	166.14	0.4154	0.7797	155.94	0.3899
0.45	0.7602	152.04	0.3421	1.0410	208.20	0.4685	0.9705	194.10	0.4367

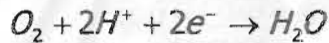
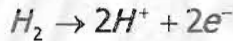
ภาคผนวก ค

การคำนวณควบน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง

เนื่องจากสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ ดังนั้นการควบของน้ำภายในเซลล์จะสามารถบอกค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำได้ โดยการคำนวณจะใช้



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น



ควบน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง

ปริมาณน้ำสะสมในเซลล์เชื้อเพลิง = ปริมาณน้ำในแก๊สขาเข้า + ปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยา - ปริมาณน้ำในแก๊สขาออก

สมมติฐานคือ แก๊สขาเข้าและขาออกจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแก๊สที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ (%Relative Humidity = 100)

จากข้อมูลการทดลองที่ภาวะ

ความดัน	1	บรรยากาศ
อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	30	องศาเซลเซียส
อัตราการไหลขาเข้าของไฮโดรเจนเท่ากับ	0.0004	โมลต่อนาที
อัตราการไหลขาเข้าของออกซิเจนเท่ากับ	0.0036	โมลต่อนาที
เซลล์เชื้อเพลิงมีพื้นที่ทำปฏิกิริยาเท่ากับ	5	ตารางเซนติเมตร
อุณหภูมิของแก๊สขาเข้าเท่ากับ	35	องศาเซลเซียส
ค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้	150	มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
การคำนวณจากหลักอ้างอิงในช่วงเวลา	1	นาที

ปริมาณน้ำในแก๊สขาเข้า

ความดันไอของน้ำที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.0555 atm
เนื่องจากแก๊สอิ่มตัวด้วยไอน้ำที่ 35 องศาเซลเซียส ดังนั้น

$$P_{H_2O} = P_{H_2O} = 0.0555 \text{ atm}$$

จากกฎความดันย่อยของดาลตัน

$$P_T = P_{H_2} + P_{H_2O}$$

$$P_{H_2} = 1 - 0.0555 = 0.9445 \text{ atm}$$

∴ ความดันย่อยของไฮโดรเจนและออกซิเจนขาเข้าเท่ากับ 0.9445 atm

จาก

$$\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} = \frac{n_{H_2}}{n_{H_2O}}$$

กรณีแก๊สไฮโดรเจน

$$n_{H_2O} = \frac{(0.0004)(0.0555)}{0.9445}$$

$$= 2.35 \times 10^{-5} \text{ mole / min}$$

∴ จำนวนโมลของน้ำภายในแก๊สไฮโดรเจนขาเข้าเท่ากับ 2.35×10^{-5} โมลต่อนาที

กรณีแก๊สออกซิเจน

$$n_{H_2O} = \frac{(0.0036)(0.0555)}{0.9445}$$

$$= 2.12 \times 10^{-4} \text{ mole / min}$$

∴ จำนวนโมลของน้ำภายในแก๊สไฮโดรเจนขาเข้าเท่ากับ 2.12×10^{-4} โมลต่อนาที

ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา

ปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ตามกฎของฟาราเดย์ คือ

$$n_{H_2O} = \frac{It}{n_e F}$$

- เมื่อ I = ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
 t = เวลา (วินาที)
 n_e = จำนวนอิเล็กตรอน (equivalent/mole)
 F = ค่าคงที่ฟาราเดย์ (Faraday's constant) มีค่า 96,489 A.s/mole

ที่ค่าความหนาแน่นกระแส 150 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

$$n_{H_2O} = \frac{(150)(60)(5)}{(2)(96489)(1000)}$$

$$= 2.33 \times 10^{-4} \text{ mole / min}$$

∴ จำนวนโมลของน้ำที่เกิดขึ้นเท่ากับ 2.33×10^{-4} mole/min

จากปฏิกิริยาจะใช้ไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 2.33×10^{-4} mole/min

จะเหลือไฮโดรเจนขาออกเท่ากับ $(4.00 \times 10^{-4}) - (2.33 \times 10^{-4}) = 1.67 \times 10^{-4}$ mole/min

จากปฏิกิริยาจะใช้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 1.17×10^{-4} mole/min

จะเหลือออกซิเจนขาออกเท่ากับ $(3.60 \times 10^{-3}) - (1.17 \times 10^{-4}) = 3.48 \times 10^{-3}$ mole/min

ปริมาณน้ำในแก๊สขาออก

สมมติฐานคือ แก๊สขาออกมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง = 30 องศาเซลเซียสและอิ่มตัวด้วยไอน้ำ

$$\therefore P_{H_2O} = P_{H_2O, 30^\circ C}^* = 0.0419 \text{ atm}$$

$$P_{H_2} \text{ or } P_{O_2} = 1 - 0.0419 = 0.9581 \text{ atm}$$

คำนวณหาจำนวนโมลของน้ำในแก๊สไฮโดรเจนขาออก

$$n_{H_2O} = \frac{(0.0419)(1.67 \times 10^{-4})}{0.9581}$$

$$= 7.30 \times 10^{-6} \text{ mole / min}$$

คำนวณหาจำนวนโมลของน้ำในแก๊สออกซิเจนขาออก

$$n_{H_2O} = \frac{(0.0419)(3.48 \times 10^{-3})}{0.9581}$$

$$= 1.52 \times 10^{-4} \text{ mole / min}$$

$$\therefore \text{ปริมาณน้ำที่สะสม} = (2.35 \times 10^{-5}) + (2.12 \times 10^{-4}) + (2.33 \times 10^{-4}) - (7.30 \times 10^{-6}) - (1.52 \times 10^{-4})$$

$$= 3.09 \times 10^{-4} \text{ mole/min}$$

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพัฒนพงษ์ สงวนวัชรกุล เกิดวันที่ 7 มกราคม 2521 เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสาริตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อ พ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย