

ระบบตรวจติดตามสำหรับหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาด 200 วัตต์



นายพิทยา คิ่งคิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

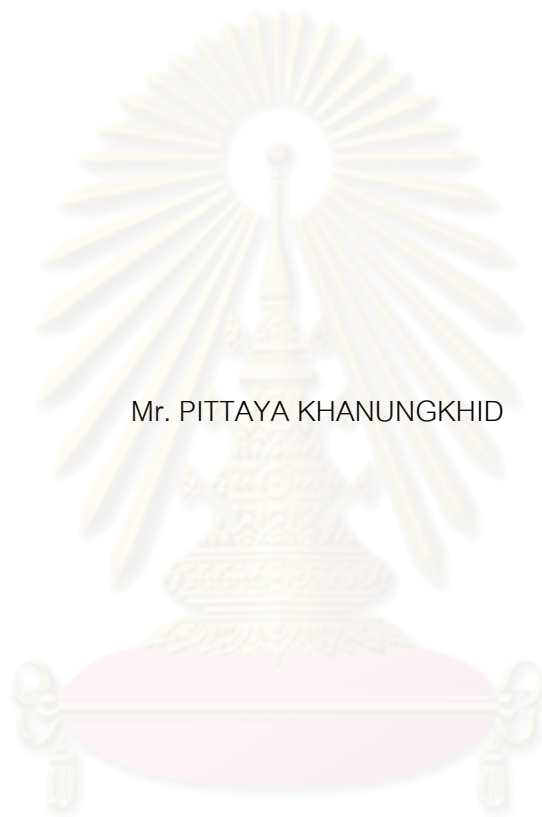
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MONITORING SYSTEM FOR 200W PEM FUEL CELL STACK



Mr. PITTAYA KHANUNGKHID

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระบบตรวจติดตามสำหรับหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม
ขนาด 200 วัตต์

โดย

นาย พิทยา คณิงคิด

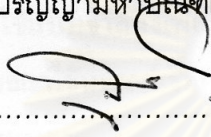
สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

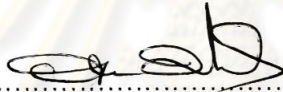
รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

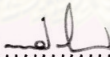


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรธน์ ประศาสน์สารกิจ)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)

คุณาส ภูจินดา

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา)

ทพ อธิวัฒน์

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม)

พินยา คณิงคิต : ระบบตรวจติดตามสำหรับหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาด 200 วัตต์. (MONITORING SYSTEM FOR 200W PEM FUEL CELL STACK)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ , 124 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาระบบตรวจติดตามหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มบนพื้นฐานของการประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อวินิจฉัยสถานะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขณะปฏิบัติการ ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงทำงานนั้น อาจเกิดปรากฏการณ์ทางกายภาพที่ส่งผลให้สมรรถนะของระบบลดลงอันได้แก่ปรากฏการณ์น้ำท่วมเซลล์หรือเซลล์แห้ง เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือการสร้างระบบติดตามปรากฏการณ์ทั้งสองในขณะที่หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์ทำงาน โดยระบบจะวัดค่าอุณหภูมิของเซลล์ ค่าความดันและความดันลดของแก๊สไฮโดรเจน ค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เซลล์ผลิตได้ ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ถูกนำมาแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ผ่านการใช้งานโปรแกรม LabVIEW™ แบบจำลองสำหรับหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกนำมาใช้โดยแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลักคือ แบบจำลองของความดันลดของแก๊สไฮโดรเจน และแบบจำลองของความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองนี้สามารถนำมาใช้ทำนายการท่วมของน้ำและการแห้งของเซลล์ได้ตามลำดับ จากนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าความดันลดที่วัดได้จริง และสามารถนำมาใช้ในการทำนายปรากฏการณ์น้ำท่วมเซลล์ได้ สำหรับการแห้งของเซลล์สามารถอธิบายได้โดยพิจารณาค่าจำนวนโมลของน้ำในเมมเบรน (Membrane water content) ซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลองโดยใช้ค่าความต้านทาน และค่าจำนวนโมลของน้ำในเมมเบรนนี้สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การเกิดเซลล์แห้งได้เมื่อมีค่าต่ำกว่า 4 โมลของน้ำต่อจำนวนหมู่กรดซัลโฟนิก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานไอโอมิกที่ได้จากแบบจำลองและที่วัดได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน สุดท้ายแบบจำลองทั้งหมดได้ถูกเขียนลงบนโปรแกรม LabVIEW™ เพื่อใช้งานร่วมกับโปรแกรมควบคุมหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ภาควิชาเคมีเทคนิค.....

สาขาวิชาเคมีเทคนิค.....

ปีการศึกษา 2553.....

ลายมือชื่อนิสิต พินยา คณิงคิต


ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5172385023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : PEM FUEL CELL / MONITORING SYSTEM / LabVIEW

PITTAYA KHANUNGKHID : MONITORING SYSTEM FOR 200W PEM FUEL
CELL STACK. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.PORNPOTE
PIUMSOMBOON, Ph.D., 124 pp.

Although various designs have been introduced to improve the performance of a Proton Exchange Membrane fuel cell (PEMFC) stack system, fault conditions, such as drying or flooding, may still occur due to the complexity of the process. The development of a monitoring system which can detect these fault conditions is a key to operate PEMFC stack system effectively. In this study, a diagnostic system for a 200W PEMFC stack system has been developed by constructing models for determining the flooding and drying conditions inside the cell. Since the membrane resistance and pressure drop across the stack are important parameters for determining either drying or flooding conditions, the model-based monitoring scheme was proposed. Under typical operating condition, stack temperature and pressure, the differential pressure across the stack, and the load current and the voltage of PEMFC stack are measured. These measurement values will be fed into the models. The models will predict the important parameters of the cell. Pressure drop will be compared with its measurement values. If their differences are significant, flooding will be declared. On the other hand, cell drying will be declared if membrane water content drops below 4. The data acquisition system and the monitoring models have been developed under LabVIEW™ environment. The modeling results for pressure drop and ohmic resistance characteristics are in agreement with measured data. Finally, the analysis algorithm was applied into LabVIEW™ software.

Department : Chemical Technology..... Student's Signature PITTAYA KHANUNGKHID
Field of Study : Chemical Technology..... Advisor's Signature 
Academic Year : 2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาอย่างสูงยิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญฤทธิ์ ที่ได้ชี้แนะและให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการทำงานของผู้วิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับทุกสิ่งที่ท่านได้สนับสนุนตลอดมา

ขอขอบคุณ ศ.ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการ รศ.ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม และ อ.ดร.คุณากร ภูจินดา ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และได้ให้ข้อคิดและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้ การศึกษาและประสบการณ์ ผู้วิจัยรู้สึกภาคภูมิใจที่ได้มีโอกาสเป็นส่วนหนึ่งของภาควิชาเคมีเทคนิคแห่งนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

เหนือสิ่งอื่นใดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่ได้ให้การสนับสนุน มอบความห่วงใยและเป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่งต่อผู้วิจัยในการศึกษาและการทำงานตลอดมา ผู้วิจัยขอมอบความสำเร็จครั้งนี้ให้แก่บิดาและมารดาด้วยความสำนึกในพระคุณอันใหญ่หลวง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.1.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเซลล์.....	5
2.1.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเซลล์.....	5
2.1.3 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์.....	7
2.1.4 ภาวะปฏิบัติการของเซลล์เชื้อเพลิง.....	10
2.1.5 ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	13
2.1.6 วิธีการตัดกระแสไฟฟ้า.....	15
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17

บทที่ 3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3.1 แบบจำลองค่าความดันลดของแก๊ส.....	22
3.1.1 การไหลของแก๊สภายในช่องทางการไหล.....	24
3.1.2 การไหลของแก๊สเมื่อไม่คำนึงถึงผลของน้ำภายในช่องทางการไหล.....	31
3.2 แบบจำลองค่าความต้านทานและปริมาณน้ำในเมมเบรน.....	32
3.2.1 เทอร์โมไดนามิกส์ของเซลล์เชื้อเพลิง.....	33
3.2.2 ศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจากแอกติเวชัน.....	33
3.2.3 ศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจากความต้านทาน.....	34
3.2.4 ศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจากการถ่ายโอนมวลสาร.....	35
3.2.5 ความชื้นของเมมเบรน.....	36
3.2.6 ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรน.....	36
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
4.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
4.2.1 ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	38
4.2.2 วาล์วบีอนแก๊สไฮโดรเจน.....	39
4.2.3 วาล์วเพิร์จ.....	40
4.2.4 สวิทช์เปิด / ปิด.....	40
4.2.5 พัดลม.....	41
4.2.6 ตัวควบคุม.....	41
4.2.7 อุปกรณ์รับสัญญาณจากเซนเซอร์และส่งสัญญาณเข้าคอมพิวเตอร์.....	42
4.2.8 อุปกรณ์วัดค่าปฏิบัติการ.....	44
4.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	46
4.3.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	46
4.3.2 ส่วนการจำลองโดยโปรแกรม LabVIEW™.....	47
4.3.3 การทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นร่วมกับระบบควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	47

บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	49
5.1 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาด 200 วัตต์.....	50
5.2 การประมาณค่า Exchange current density และ Transfer coefficient.....	52
5.3 การติดตามการเกิดน้ำท่วมเซลล์.....	56
5.3.1 Frictional pressure drop.....	58
5.3.2 Momentum pressure drop.....	60
5.3.3 การเปรียบเทียบค่าความดันดของแก๊สไฮโดรเจนเซลล์เมื่อเซลล์ เชื้อเพลิงทำงานที่ภาวะปกติ.....	61
5.3.4 การเปรียบเทียบค่าความดันดของแก๊สไฮโดรเจนเซลล์เมื่อเซลล์ เชื้อเพลิงทำงานที่ภาวะน้ำท่วม.....	64
5.4 การติดตามการเกิดเซลล์แห้ง.....	75
5.4.1 การประมาณค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	75
5.4.2 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อเซลล์ เชื้อเพลิงทำงานที่ภาวะปกติ.....	81
5.5 โปรแกรมตรวจติดตามหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....	92
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	98
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	98
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	99
รายการอ้างอิง.....	100
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก.....	105
ภาคผนวก ข.....	119
ภาคผนวก ค.....	121
ภาคผนวก ง.....	123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	124

สารบัญญัตราง

ตารางที่		หน้า
5.1	ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์ผลิตได้.....	52
5.2	ค่า $\left(E_{T,P,cal} + \frac{RT}{\alpha F} \ln i_0 \right)$, $\frac{RT}{\alpha F}$ และ $R_{ohm,cal}$ ที่ได้จากการประมาณโดยวิธีกำลังสองน้อยสุด.....	55
5.3	ค่า i_0 และ α ที่ได้จากการประมาณโดยวิธีกำลังสองน้อยสุด.....	56
5.4	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด.....	76
5.5	การเปรียบเทียบค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่วัดโดยวิธีการตัดกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทานที่ได้จากแบบจำลอง.....	86
ค1	ข้อมูลสมรรถนะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาด 200 วัตต์.....	121

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์.....	6
2.2	โครงสร้าง PFSA polymer (Nafion™).....	7
2.3	การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบ dead-end.....	12
2.4	การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบ flow-through.....	12
2.5	วงจรเสมือนแบบง่ายของเซลล์เชื้อเพลิง.....	15
2.6	กราฟแสดงการตัดกระแสไฟฟ้าโดยที่กระแสไฟฟ้าถูกตัดให้เหลือ 0 แอมแปร์....	16
2.7	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์เมื่อกระแสไฟฟ้าถูกตัดให้เหลือ 0 แอมแปร์ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเกี่ยวข้องกับการสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (Ohmic loss) ในส่วนของค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจะเกี่ยวข้องกับการสูญเสียเนื่องจากแอคติเวชัน (Activation loss) และการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transport loss) ในระบบ.....	16
3.1	โครงสร้างการทำงานของระบบติดตามหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์ขนาด 200 วัตต์.....	22
3.2	ลักษณะช่องทางการไหลของแก๊สแบบเส้นตรง	25
3.3	ลักษณะช่องทางการไหลของแก๊สแบบหักเลี้ยว.....	25
3.4	ลักษณะช่องทางการไหลของแก๊สแบบผสม.....	26
3.5	ลักษณะการไหลแบบสองเฟสภายในช่องทางการไหลของแก๊สและผลของแรงโน้มถ่วงที่มีต่อการไหลแบบสองเฟส.....	29
4.1	ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์.....	38
4.2	วาล์วป้อนแก๊สไฮโดรเจน.....	39
4.3	วาล์วเพิร์จ.....	40
4.4	สวิตช์เปิด / ปิด.....	40
4.5	พัดลม.....	41
4.6	คัทควบคุม.....	41
4.7	DAQcard PCI 6014.....	42

ภาพที่	หน้า
4.8 Ni 9211.....	43
4.9 SCC CI20.....	43
4.10 SCC 68.....	44
4.11 อุปกรณ์วัดความดัน.....	44
4.12 อุปกรณ์วัดความดันลด.....	45
4.13 Electronic Load.....	46
5.1 แผนผังแสดงอุปกรณ์ของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มขนาด 200 วัตต์...	49
5.2 แผนผังแสดงระบบการวัดข้อมูลปฏิบัติการของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มขนาด 200 วัตต์.....	50
5.3 กราฟโพลารไรเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์.....	51
5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์.....	51
5.5 กราฟโพลารไรเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์ในช่วงศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์ถึงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด.....	53
5.6 กราฟโพลารไรเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์ในช่วงศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์ถึงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการประมาณโดยวิธีกำลังสองน้อยสุด.....	54
5.7(ก) ช่องทางการไหลของแก๊สที่ไม่มีเฟสของเหลว.....	57
5.7(ข) ช่องทางการไหลของแก๊สที่มีเฟสของเหลว.....	57
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(C_r)$ กับค่า $\log(Re)$ ของการไหลแบบหนึ่งเฟส.....	58
5.9(ก) การทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	59
5.9(ข) กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานในแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	59
5.9(ค) ความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนเนื่องจากความต้านทานการไหลที่ได้จากแบบจำลอง.....	60
5.10(ก) ความดันลดรวมของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากแบบจำลอง.....	62
5.10(ข) การเปรียบเทียบค่าความดันลดที่ได้จากแบบจำลองกับค่าความดันลดที่วัดได้จริงจากการทดลอง.....	62

ภาพที่	หน้า
5.11 ความดันของแก๊สไฮโดรเจน.....	63
5.12 แผนภาพส่วนให้ความชื้นกับแก๊สไฮโดรเจน.....	64
5.13(ก) การทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่เมื่อทำความชื้นให้แก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	65
5.13(ข) ค่ากระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	65
5.13(ค) ค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	65
5.14 การเปรียบเทียบค่าความดันลดที่ได้จากแบบจำลองกับค่าความดันลดที่วัดได้จริงจากการทดลอง เมื่อแก๊สไฮโดรเจนถูกทำความชื้นที่ 50 องศาเซลเซียส.....	67
5.15(ก) การทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่หลังจากทำการไอน้ำออกจากช่องทางการไหล.....	68
5.15(ข) ค่ากระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหลังจากทำการไอน้ำออกจากช่องทางการไหล.....	68
5.15(ค) ค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหลังจากทำการไอน้ำออกจากช่องทางการไหล.....	69
5.16 การเปรียบเทียบค่าความดันลดที่ได้จากแบบจำลองกับค่าความดันลดที่วัดได้จริงจากการทดลองหลังจากทำการไอน้ำออกจากช่องทางการไหล.....	70
5.17(ก) การทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่หลังจากทำการไอน้ำออกจากช่องทางการไหลเป็นครั้งที่สอง.....	71
5.17(ข) ค่ากระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหลังจากทำการไอน้ำออกจากช่องทางการไหลเป็นครั้งที่สอง.....	71
5.17(ค) ค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหลังจากทำการไอน้ำออกจากช่องทางการไหลเป็นครั้งที่สอง.....	72
5.18 การเปรียบเทียบค่าความดันลดที่ได้จากแบบจำลองกับค่าความดันลดที่วัดได้จริงจากการทดลองหลังจากทำการไอน้ำออกจากช่องทางการไหลเป็นครั้งที่สอง.....	73

ภาพที่	หน้า	
5.19	ขั้นตอนการติดตามการเกิดน้ำท่วมภายในเซลล์เชื้อเพลิง.....	74
5.20	การหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด.....	76
5.21(ก)	การทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบการตัดกระแสไฟฟ้า.....	77
5.21(ข)	การตอบสนองของค่าศักย์ไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	78
5. 21(ค)	การตอบสนองของค่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง.....	78
5.22	ค่าความต้านทานที่คำนวณได้จากแบบจำลอง.....	80
5.23	ค่าความต้านทานที่คำนวณได้จากแบบจำลองในช่วงที่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้า.....	80
5.24	ปริมาณน้ำในเมมเบรนที่ประมาณได้จากแบบจำลอง.....	81
5.25	ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (ตามทฤษฎี).....	82
5. 26(ก)	การตัดกระแสไฟฟ้าที่ 2 แอมแปร์.....	83
5. 26(ข)	การตอบสนองของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อการตัดกระแสไฟฟ้าที่ 2 แอมแปร์.....	83
5. 27(ก)	การตัดกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์.....	84
5. 27(ข)	การตอบสนองของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อการตัดกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์.....	84
5. 28(ก)	การตัดกระแสไฟฟ้าที่ 4 แอมแปร์.....	85
5. 28(ข)	การตอบสนองของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อการตัดกระแสไฟฟ้าที่ 4 แอมแปร์.....	85
5.29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานที่วัดได้กับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง...	87
5.30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมมเบรนกับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง.....	88
5.31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนกับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง.....	89
5.32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Electro-osmotic drag coefficient กับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง.....	89
5.33	ขั้นตอนการติดตามการเกิดการแห้งของเซลล์เชื้อเพลิง.....	91
5.34	หน้าหลักของโปรแกรมควบคุมการทำงานและรวบรวมข้อมูลสำหรับชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	92
5.35	หน้าแสดงข้อมูลปฏิบัติการของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์.....	93

ภาพที่		หน้า
5.36	หน้าแสดงข้อมูลปฏิบัติการของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์ (ต่อ)....	93
5.37	หน้าแสดงการตรวจติดตามค่าความดันลด.....	94
5.38	หน้าแสดงการตรวจติดตามค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	94
5.39	ตัวอย่างหน้า Block Diagram ของโปรแกรม.....	95
5.40	Block Diagram ส่วนคำนวณค่าความดันลดจากแบบจำลอง.....	95
5.41	สมการต่างๆ ที่อยู่ภายในบล็อก SubVI คำนวณค่าความดันลด จากแบบจำลอง.....	96
5.42	Block Diagram ส่วนคำนวณค่าความต้านทานและปริมาณน้ำในเมมเบรน.....	97
5.43	สมการต่างๆ ที่อยู่ภายในบล็อก SubVI คำนวณค่าความต้านทานและ ปริมาณน้ำในเมมเบรน.....	97
ง1	การปรับเทียบอุปกรณ์วัดความดัน.....	123
ง2	การปรับเทียบอุปกรณ์วัดความดันลด.....	123

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงซึ่งกระบวนการนี้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการเผาไหม้แบบสันดาปภายในซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ด้วยการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้ปัญหาของการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงลดลงและทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นกระบวนการทางเลือกในการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สำคัญในอนาคต

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายประเภทซึ่งแต่ละประเภทมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเป็นแหล่งพลังงานในยานพาหนะและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่พกพาได้รวมทั้งเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าในครัวเรือน เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ให้ความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูง [1] อุณหภูมิขณะปฏิบัติการต่ำ อีกทั้งยังมีระบบโดยรวมที่ไม่ซับซ้อนมากนัก

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีองค์ประกอบหลักคือ อิเล็กโทรดสองขั้วที่ถูกกั้นด้วยเมมเบรนที่สามารถนำไอออนได้ แก๊สไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าทางด้านขั้วแอโนดและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจน แก๊สออกซิเจนหรืออากาศจะถูกป้อนเข้าทางด้านขั้วแคโทดและเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน โปรตอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปสู่ฝั่งแคโทดและอิเล็กตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีจะเคลื่อนที่ออกไปสู่เครื่องใช้ไฟฟ้าซึ่งต่ออยู่กับเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนสามารถถูกนำมาต่อกันหลายๆ เซลล์เพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากพอกับความต้องการใช้ไฟฟ้าได้ การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อกันในลักษณะนี้เรียกว่า หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Stack)

การออกแบบหรือสร้างระบบขับเคลื่อนหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอันได้แก่

- ระบบการจัดการน้ำ (Water management)
- การควบคุมความดันภายในเซลล์เชื้อเพลิง
- การป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้และภาวะการทำงาน
- การควบคุมอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิง
- การเชื่อมต่อเซลล์เชื้อเพลิงและการวัดไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแต่ละเซลล์
- ระบบความปลอดภัย

ดังนั้นระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงจึงต้องประกอบด้วยองค์ประกอบหลายส่วนด้วยกันและส่งผลให้ในกระบวนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องมีการประสานข้อมูลจากองค์ประกอบหลายๆ ส่วนนี้ให้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยมีการควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งต้องอาศัยข้อมูลภาวะการทำงานหลายอย่าง เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จะต้องถูกนำมาประมวลผลและส่งไปทำการปรับเปลี่ยนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ด้วยเหตุที่เซลล์เชื้อเพลิงมีระบบย่อยหลายส่วนจึงทำให้การออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงรวมทั้งกลไกการควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและระบบรวบรวมข้อมูลจึงมีบทบาทสำคัญในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและมีส่วนช่วยในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงได้

งานวิจัยนี้นำระบบรวบรวมข้อมูลสำหรับหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเดิมที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 วัตต์มาพัฒนาต่อเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานกับเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์รวมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องและได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม LabVIEW™ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้ ทั้งนี้การวัดค่าภาวะการทำงานบางอย่างภายในเซลล์เชื้อเพลิงอาจทำได้ยากจึงมีความจำเป็นต้องใช้แบบจำลองเข้ามาช่วย แต่แบบจำลองที่ดีก็ควรจะต้องคำนวณค่าต่างๆ ให้ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุดด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ออกแบบระบบเพื่อขับเคลื่อนหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงทางการค้า
- 2) พัฒนาระบบรวบรวมข้อมูลปัจจัยต่างๆ ภายในหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มเติมจากระบบเดิมที่สร้างไว้แล้ว
- 3) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้โปรแกรม LabVIEW™ เป็นเครื่องมือติดตามและประเมินสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW™ และโปรแกรมควบคุมเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้พัฒนาขึ้นไว้ก่อนแล้ว
- 2) พัฒนาแบบจำลองขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจวัดภาวะน้ำท่วมเซลล์และภาวะเซลล์แห้ง

3) พัฒนาโปรแกรมติดตามเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้งานร่วมกับโปรแกรมควบคุมเซลล์เชื้อเพลิง

4) ดำเนินการโดยทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิงทางการค้าขนาด 200 วัตต์

1.4 ข้อกำหนดของการวิจัย

1) หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สามารถทำงานที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำที่สุดได้เพียง 24.5 โวลต์เนื่องจากการตั้งค่าการควบคุมการทำงานจากโรงงานที่ผลิต

2) ระบบวัดค่าความดันและความดันลดมีเฉพาะทางด้านฝั่งแอโนดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเท่านั้น

3) การทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ 3 ตัวคือ ความดันของแก๊สขาเข้า ศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

4) แบบจำลองสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเป็นสมการสถิติแบบหนึ่งมิติ

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟลูอิด, ระบบตรวจติดตาม, โปรแกรม LabVIEW™

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้ระบบขับเคลื่อนหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์

2) ได้หน่วยทดสอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิง

3) เข้าใจการสร้างระบบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและการขยายขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า

4) ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม LabVIEW™ และสามารถทำงานร่วมกับระบบตรวจวัด ควบคุมและเก็บข้อมูลของระบบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

1.7 วิธีดำเนินการวิจัย

1) ศึกษาระบบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่พัฒนาไว้แล้วและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2) ศึกษาและออกแบบระบบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์

3) จัดหาอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการสร้างระบบใหม่เพิ่มเติม

- 4) ประกอบอุปกรณ์เพื่อขับเคลื่อนระบบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์
- 5) ทดสอบระบบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์ พัฒนาและทดสอบระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง
- 6) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิง
- 7) นำแบบจำลองที่ได้มาเขียนลงบนโปรแกรม LabVIEWTM
- 8) ทดสอบโปรแกรมแบบจำลองที่ได้ร่วมกับระบบตรวจวัดและระบบควบคุม
- 9) วิเคราะห์และสรุปผล เขียนวิทยานิพนธ์

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัยฉบับนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาส่วนต่างๆ ดังนี้

บทที่1 ความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ข้อจำกัดของการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยและวิธีการดำเนินงานวิจัย

บทที่2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่3 แบบจำลองสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

บทที่4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย

บทที่5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

บทที่6 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบพีดี้เอ็ม (Proton exchange membrane fuel cell) [1]

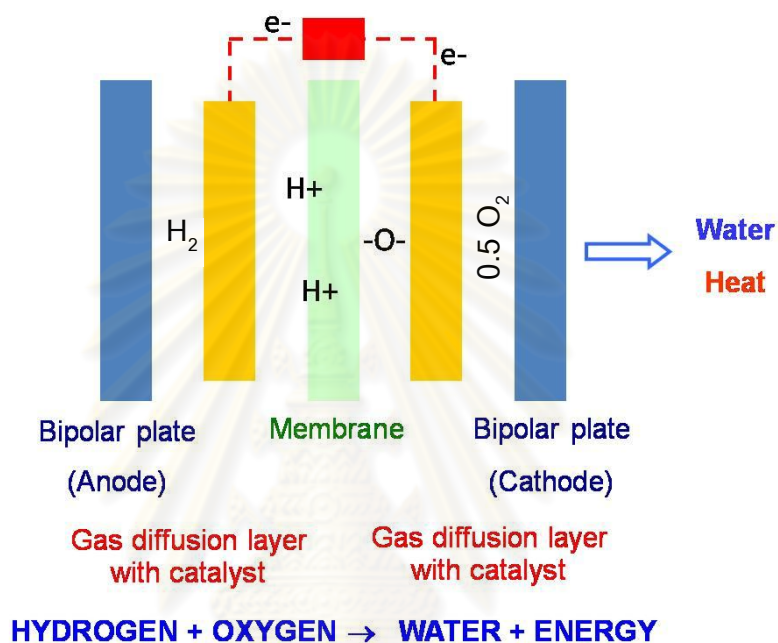
เซลล์เชื้อเพลิงแบบพีดี้เอ็มมีลักษณะการทำงานคล้ายกับการทำงานของแบตเตอรี่ ความแตกต่างคือเซลล์เชื้อเพลิงนั้นสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่มีการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงเข้าไป เชื้อเพลิงที่ใช้คือแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน ในบางกรณีมีการใช้อากาศแทนแก๊สออกซิเจน โดยศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เท่ากับ 1.23 โวลต์ หากมีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นให้นำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อกันเข้าแบบอนุกรมก็จะสามารถเพิ่มศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นได้และทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้มากขึ้น การนำหน่วยย่อยเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อกันในลักษณะนี้เรียกว่า หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell stack) ผลิตรถยนต์ที่ได้จากปฏิกิริยา คือ ไฟฟ้า ความร้อน และน้ำ ด้วยเหตุผลนี้เองที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมกว่าคือไม่มีการปลดปล่อยสารที่เป็นมลพิษนั่นเอง

เซลล์เชื้อเพลิงแบบพีดี้เอ็ม (PEM fuel cell) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อเปลี่ยนพลังงานทางเคมีของไฮโดรเจนและออกซิเจนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นที่ยุ้จกอย่างกว้างขวางในฐานะที่เป็นทางเลือกการผลิตไฟฟ้าในอนาคต เซลล์เชื้อเพลิงแบบพีดี้เอ็มใช้แผ่นเมมเบรนพอลิเมอร์นำโปรตอนเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือแพลตินั่มบนตัวรองรับคาร์บอน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิไม่สูงกว่า 80 องศาเซลเซียสซึ่งนับได้ว่าเป็นข้อดีที่ช่วยให้สามารถนำไปใช้งานในชีวิตประจำวันได้ง่าย

2.1.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีดี้เอ็ม [1]

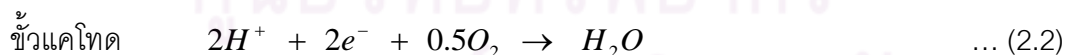
สิ่งที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของเซลล์เชื้อเพลิงพีดี้เอ็มคือเมมเบรนที่พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือยอมให้โปรตอน (H^+) เคลื่อนที่ผ่านได้แต่แก๊สไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ เมมเบรนนี้ทำหน้าที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ที่คั่นกลางระหว่างอิเล็กโทรดสองด้าน อิเล็กโทรดมักทำจากผ้าคาร์บอนหรือกระดาษคาร์บอนที่รอยต่อของเมมเบรนและอิเล็กโทรดเป็นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่การแตกตัวของไฮโดรเจนเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอนภายใต้ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นทางด้านแอโนด โปรตอนนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน ในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรดที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าออกสู่

วงจรไฟฟ้าภายนอกเซลล์แล้วเคลื่อนที่กลับเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงอีกครั้งทางด้านตรงกันข้ามของเมมเบรนแล้วเกิดปฏิกิริยา รีดักชัน กับโปรตอนและออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงทางด้านแคโทด ผลผลิตจากปฏิกิริยา คือ ไฟฟ้า และ น้ำ โดยน้ำจะถูกผลัดออกจากเซลล์แก๊สออกซิเจนที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาด้านที่ป้อนไฮโดรเจนเรียกว่าแอโนดและด้านที่ป้อนออกซิเจนหรืออากาศเรียกว่าแคโทด กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถสรุปเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2



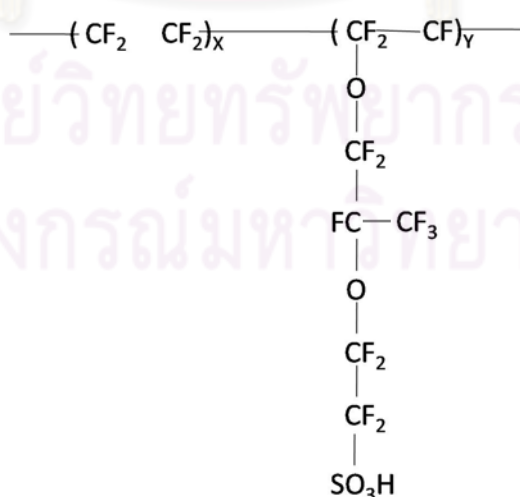
เซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีเท่ากับ 1.229 โวลต์ ที่ภาวะมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

2.1.3 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

2.1.3.1 เมมเบรน (Membrane)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มใช้เมมเบรนเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ เมมเบรนเป็นส่วนประกอบส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากเมมเบรนทำหน้าที่เป็นส่วนป้องกันไม่ให้เกิดไฮโดรเจนเคลื่อนที่จากแอโนดผ่านไปยังแคโทดแล้วเกิดปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนหรือเกิดการเผาไหม้ได้ และเมมเบรนยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้โปรตอนเคลื่อนที่จากแอโนดผ่านไปยังแคโทดได้โดยเมมเบรนจะกั้นอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง เนื่องจากเมมเบรนยอมให้โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านได้เท่านั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจนเคลื่อนที่ออกไปกับส่วนนำไฟฟ้าสูงจรภายนอกเซลล์เชื้อเพลิงและเคลื่อนที่กลับเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงอีกครั้งทางแคโทด

การเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเมมเบรนนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งคือโมเลกุลน้ำที่เกาะอยู่กับโครงสร้างของเมมเบรนโดยที่การเคลื่อนที่ของโปรตอนจะเคลื่อนที่ได้ดีเมื่อมีโมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ไประหว่างโครงสร้างของเมมเบรน ดังนั้นในเมมเบรนต้องมีย่านหรือความชื้นอยู่ด้วยจึงจะสามารถส่งผ่านโปรตอนได้ดีหรือมีค่าการนำโปรตอนสูง ด้วยเหตุผลนี้จึงส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มมีข้อด้อยคือสามารถทำงานได้เฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำเพราะถ้าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงสูงแล้วจะทำให้น้ำในเมมเบรนเหล่านี้เกิดการระเหยหรือเดือดและส่งผลให้เมมเบรนนำโปรตอนได้ไม่ดีหรือไม่สามารถนำโปรตอนได้ ในปัจจุบันเมมเบรนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ เมมเบรนแนฟิออน ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้าง PFSA polymer (Nafion™) [1]

เมมเบรนแนฟิออนจะถูกจำแนกประเภทตามความหนาและขนาดที่แตกต่างกัน โดยจะแทนด้วยสัญลักษณ์ตัวเลข 3 หรือ 4 ตัว ตัวเลข 2 ตัวแรกหมายถึงน้ำหนักและตัวเลข 2 ตัวหลังหมายถึงความหนาของเมมเบรนในหน่วยมิล (1 มิล = 1/1000 นิ้ว) โดยทั่วไปแนฟิออนจะหนาอยู่ที่ 2, 3.5, 5, 7, 10 มิล (50, 89, 127, 178, 254 ไมโครเมตร ตามลำดับ)

ปริมาณน้ำในเมมเบรน

ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีและปริมาณน้ำที่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลของเมมเบรน ปริมาณน้ำในเมมเบรนนี้มักแสดงในรูปอัตราส่วนน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักแห้งของพอลิเมอร์หรืออัตราส่วนจำนวนโมเลกุลของน้ำต่อจำนวนหมู่กรดซัลโฟนิกที่อยู่ในโครงสร้างของเมมเบรน อัตราส่วนนี้แสดงได้ดังสมการที่ 2.4

$$\lambda = \frac{N(H_2O)}{N(SO_3H)} \quad \dots (2.4)$$

ปริมาณของน้ำในโครงสร้างของเมมเบรนแนฟิออนมีค่าสูงสุดได้ถึง 22 โมเลกุลของน้ำต่อหนึ่งหมู่ซัลโฟเนต ถ้าน้ำอยู่ในสถานะไอแล้วปริมาณไอน้ำจะมีได้ 14 โมเลกุลไอน้ำต่อหนึ่งหมู่ซัลโฟเนต ปริมาณน้ำในเมมเบรนนี้จะแตกต่างกันไปตามการเตรียมก่อนการใช้งาน ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มนี้จะเกี่ยวข้องกับไอน้ำเป็นหลักเนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนที่ป้อนเข้าจะถูกทำให้อิมตัวด้วยไอน้ำก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ถ้าค่าแอกทิวิตีของไอน้ำอยู่ในช่วงระหว่าง 0.15 – 0.75 ปริมาณน้ำในเมมเบรนนี้มีค่าสูงสุดเป็น 5 โมลของไอน้ำต่อหนึ่งหมู่ซัลโฟเนต แต่ถ้าค่าแอกทิวิตีของไอน้ำอยู่ในช่วงระหว่าง 0.75 – 1.0 ปริมาณน้ำในเมมเบรนนี้จะมีค่าสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 14.4 โมลของไอน้ำต่อหนึ่งหมู่กรดซัลโฟนิก

2.1.3.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่ช่วยให้แก๊สป้อนเข้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอนด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ดังนั้นขั้วไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีความต้านทานต่ำทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีและจะต้องมีความพรุนสูงซึ่งจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าส่งผลให้พื้นที่เกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้นตามไปด้วย

ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มส่วนใหญ่จะใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีความบางมากประกบคู่ด้วยเมมเบรนและชั้นคาร์บอนที่มีความพรุนสูง บริเวณนี้เองเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาขึ้น การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้านั้นจะเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนด้วยกันคือแก๊ส อิเล็กตรอนและโปรตอน ปฏิกิริยานั้นจึงต้องเกิดขึ้นในบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่

ทั้งแก๊ส อิเล็กตรอนและโปรตอนสามารถสัมผัสกันได้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านส่วนที่นำไฟฟ้าได้ รวมถึงตัวเร่งปฏิกิริยาเองด้วย โปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนซึ่งเมมเบรนจะสัมผัสอยู่กับ ขั้วไฟฟ้า โดยตรงและแก๊สจะเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของขั้วไฟฟ้าเข้าไปสู่บริเวณเกิดปฏิกิริยา ใน ขณะเดียวกันน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะต้องถูกบังคับให้ออกจากขั้วไฟฟ้าเพื่อ ป้องกันการท่วม ของน้ำขึ้น

2.1.3.3 ชั้นแก๊สแพร่ (Gas diffusion layer)

ชั้นแก๊สแพร่คือชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและชั้นของแผ่นนำไฟฟ้า สองขั้ว ชั้นแก๊สแพร่มีหน้าที่สำคัญคือ

1. เป็นช่องทางให้แก๊สเคลื่อน ที่จากช่องทางกรไหลของแก๊สไปสู่ ชั้นตัวเร่ง ปฏิกิริยา
2. เป็นช่องทางที่ช่วยให้ น้ำสามารถเคลื่อนที่ออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไปสู่ ช่องทางการไหลของแก๊สได้
3. เป็นตัวนำอิเล็กตรอนจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาออกไปสู่แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว เพื่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรต่อไป
4. เป็นตัวนำความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาออกไปสู่แผ่นนำ ไฟฟ้าสองขั้วเพื่อเป็นการระบายความร้อน
5. เป็นส่วนที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน ดังนั้นชั้นแก๊สแพร่จึงต้องประกอบด้วยสมบัติดังนี้
 1. ต้องมีความพรุนเพื่อให้แก๊สเคลื่อนที่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาและให้น้ำเคลื่อนที่ออก จากบริเวณเดียวกันได้
 2. ต้องมีค่าการนำไฟฟ้าและค่าการนำความร้อนที่ดี
 3. ต้องมีรูพรุนขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1.3.4 แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว (Bipolar plates)

แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วจะถูกใช้เมื่อต้องนำเซลล์เข้า ออกเพลิงหลายเซลล์มาต่อเข้า ด้วยกันโดยทำหน้าที่เป็นตัวนำอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดของเซลล์หนึ่งไปสู่ขั้วแคโทดของอีกเซลล์ หนึ่ง แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วจะต้องประกอบด้วยคุณสมบัติดังนี้

1. ต้องนำไฟฟ้าได้ดีเนื่องจากต้องทำหน้าที่เชื่อมเซลล์หลายเซลล์เข้าด้วยกัน

2. ต้องไม่ยอมให้แก๊สแพร่ผ่านได้เนื่องจากต้องทำหน้าที่แยกแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนของเซลล์ที่อยู่ติดกันออกจากกัน
3. ต้องมีความแข็งแรงมากพอเพื่ออัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง
4. ต้องนำความร้อนได้ดีเพื่อช่วยในการระบายความร้อนออกจากเซลล์เชื้อเพลิง
5. ต้องสามารถขึ้นรูปหรือเจาะให้เป็นช่องทางการไหลของแก๊สได้

2.1.4 ภาวะปฏิบัติการของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell operating conditions)

2.1.4.1 ความดัน

เซลล์เชื้อเพลิงอาจทำงานที่ความดันบรรยากาศหรือที่ความดันสูงกว่านั้น ถ้าความดันของแก๊สสูงจะช่วยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น โดยความดันที่สูงขึ้นสามารถควบคุมได้โดยตัวควบคุมความดันย้อนกลับ (Back pressure regulator) ซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่ที่แก๊สขาออกจากเซลล์ ความดันที่ฝั่งขาเข้าจะต้องมีค่าสูงกว่าความดันที่ปรับไว้เนื่องจากจะมีความดันลดของแก๊สเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเซลล์เชื้อเพลิง แก๊สที่จะถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยการใช้พัดลมเป่า (Blower) หรือคอมเพรสเซอร์

2.1.4.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงจะส่งผลต่อค่าสมรรถนะที่ได้คือค่าอุณหภูมิของเซลล์ที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะปลดปล่อยความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ในกรณีที่ป็นชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนออกจากเซลล์เพื่อทำให้ค่าอุณหภูมิของเซลล์คงที่ เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นปริมาณมากจะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างมากและจะส่งผลให้เมมเบรนเสื่อมสภาพได้ ในกรณีที่ป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวหรือชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็กอาจจะต้องใช้ฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเซลล์ให้คงที่ทั้งนี้เพราะเมื่อเกิดปฏิกิริยาน้อยจะส่งผลให้มีความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยและไม่สูงเพียงพอที่จะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดี

2.1.4.3 อัตราการป้อนแก๊ส

อัตราการป้อนแก๊สให้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องเท่ากับหรือสูงกว่าค่าอัตราการใช้แก๊สไปในการเกิดปฏิกิริยา อัตราการใช้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนรวมถึงอัตราการเกิดน้ำสามารถคำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์ดังสมการที่ (2.5) – (2.7)

$$\dot{N}_{H_2} = \frac{I}{2F} \quad \dots (2.5)$$

$$\dot{N}_{O_2} = \frac{I}{4F} \quad \dots (2.6)$$

$$\dot{N}_{H_2O} = \frac{I}{2F} \quad \dots (2.7)$$

โดยที่ \dot{N} = อัตราการใช้แก๊สในการเกิดปฏิกิริยา (mols⁻¹)

I = กระแสไฟฟ้า (A)

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Cmol⁻¹)

ส่วนใหญ่แล้วค่าอัตราการไหลของแก๊สจะแสดงในหน่วยลิตรต่อนาที (Standard liters per minute, slpm) โดยที่หนึ่งลิตรมาตรฐานหมายถึงปริมาตรของแก๊ส 1 ลิตรที่ภาวะมาตรฐาน (101.3 กิโลปาสคาล และ 15 องศาเซลเซียส) ค่าอัตราการไหลของแก๊สเชิงปริมาตรสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.8) – (2.9)

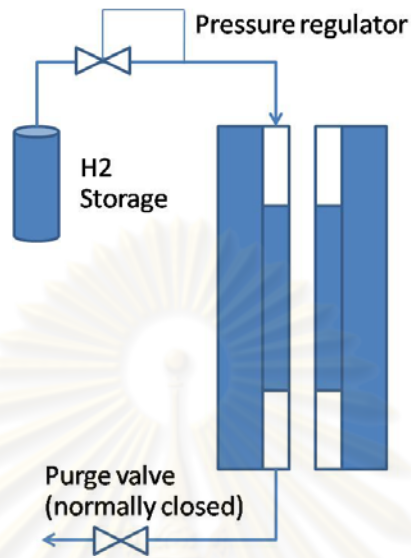
$$\dot{V}_{H_2} = 23.65 \times 60 \times \frac{I}{2F} \quad \dots (2.8)$$

$$\dot{V}_{O_2} = 23.65 \times 60 \times \frac{I}{4F} \quad \dots (2.9)$$

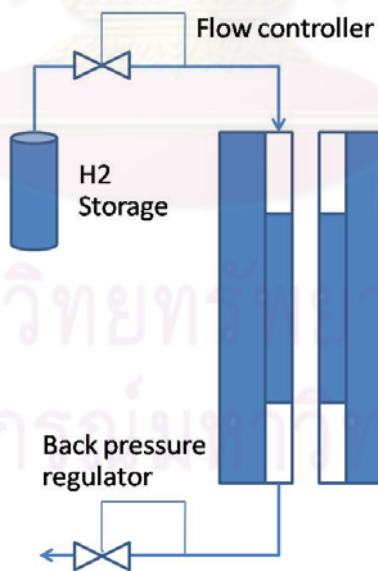
โดยที่ \dot{V}_{H_2} และ \dot{V}_{O_2} คืออัตราการไหลของไฮโดรเจนและออกซิเจน (slpm) ตามลำดับ

แก๊สไฮโดรเจนสามารถป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงได้ในอัตราเดียวกับแก๊สที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา การทำงานในแบบนี้เรียกว่าการทำงานในแบบ dead-end ซึ่งสามารถแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 2.3 ในระหว่างที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานในรูปแบบ dead-end แก๊สไฮโดรเจนจะถูกปล่อย (purge) ออกจากเซลล์เป็นช่วงๆ เพื่อป้องกันการสะสมของแก๊สและน้ำภายในช่องทางการไหล

นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงยังสามารถทำงานได้ในรูปแบบ Flow-through คือมีอัตราการป้อนแก๊สที่สูงกว่าอัตราการใช้แก๊สซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทำงานได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบ dead-end



รูปที่ 2.4 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบ flow-through

โดยปกติแล้วอากาศจะถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงด้วยอัตราที่มากกว่าอัตราการใช้แก๊สสองเท่า หรือมากกว่านี้เนื่องจากอัตราการไหลที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้นแต่ถ้าป้อนแก๊สด้วยอัตราที่สูงเกินไปก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลงได้เนื่องจากการสูญเสียแก๊สไปโดยไม่ได้เกิดปฏิกิริยา อัตราการป้อนแก๊สที่สูงขึ้นจะช่วยผลักดันน้ำออกจากเซลล์และช่วยให้มีความเข้มข้นของแก๊สภายในช่องทางการไหลสูงขึ้น

2.1.4.4 ความชื้นของแก๊ส

ความชื้นของแก๊สเข้ามีความสำคัญต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากเมมเบรนจะต้องมีความชื้นเพื่อทำให้สามารถนำโปรตอนได้ดี ดังนั้นแก๊สป้อนเข้าทั้งสองฝั่งจึงต้องถูกทำให้มีความชื้นก่อนป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง โดยทั่วไปแก๊สป้อนเข้าจะถูกทำให้มีความชื้นอิมตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ขณะเซลล์ทำงาน การทำความชื้นให้แก๊สสามารถทำได้การฉีดน้ำหรือไอน้ำให้กับแก๊สโดยตรง

2.1.5 ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (PEM fuel cell stack)

ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจนและออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 1.23 โวลต์ ดังนั้นในการทำงานจริงที่ต้องการค่ากำลังไฟฟ้าสูงจึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงต้องผลิตกระแสไฟฟ้าให้ได้สูงตามไปด้วยส่งผลให้ต้องใช้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาสูงมากและเกิดการสูญเสียทางไฟฟ้าเป็นปริมาณมาก การแก้ปัญหาเหล่านี้สามารถทำได้โดยการนำเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวมาต่อกันแบบอนุกรมหลายๆ เซลล์ซึ่งการนำเซลล์มาต่อกันแบบนี้เรียกว่าหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (PEM fuel cell stack)

2.1.5.1 ขนาดของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแยกพิจารณาได้เป็นสองส่วนคือขนาดของพื้นที่เกิดปฏิกิริยาและจำนวนเซลล์ของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้า (W) ที่ได้จากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งหาได้จาก

$$W = V \cdot I \quad \dots (2.10)$$

โดยที่ W = กำลังไฟฟ้า (watt)
 V = ศักย์ไฟฟ้า (volt)
 I = กระแสไฟฟ้า (ampere)

ค่าศักย์ไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้จากการนำค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวทุกเซลล์มารวมกัน

$$V_{st} = \bar{V}_{cell} \cdot N_{cell} \quad \dots (2.11)$$

โดยที่ V_{st} = ความต่างศักย์ไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (volt)
 \bar{V}_{cell} = ความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของแต่ละเซลล์เดี่ยว (volt)
 N_{cell} = จำนวนเซลล์ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ค่ากระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและพื้นที่เกิดปฏิกิริยาของเซลล์

$$I = i \cdot A_{cell}$$

โดยที่ i = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Acm^{-2})
 A_{cell} = พื้นที่เกิดปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ (cm^2)

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นกับการเลือกค่าศักย์เซลล์โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะช่วยให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถลดปริมาณการใช้แก๊สลงได้

2.1.5.2 การจัดการกับความร้อนของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

การระบายความร้อนให้กับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีความสำคัญเนื่องจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะปลดปล่อยความร้อนปริมาณมากอันเป็นผลมาจากค่ากำลังไฟฟ้าที่มีค่าสูง ดังนั้นเพื่อป้องกันการเสียหายของเซลล์จึงต้องนำความร้อนที่เกิดขึ้นออกจากเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีได้แก่

1. การระบายความร้อนด้วยสารหล่อเย็นที่ไหลผ่านระหว่างเซลล์ทำได้โดยให้สารหล่อเย็นไหลผ่านแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วซึ่งอาจระบายความร้อนออกระหว่างเซลล์เดี่ยวหรือระหว่างกลุ่มของเซลล์หลายๆเซลล์

2. การระบายความร้อนด้วยสารหล่อเย็นที่ไหลผ่านพื้นผิวภายนอกของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง การระบายความร้อนด้วยวิธีนี้ความร้อนจะถูกนำออกจากพื้นที่เกิดปฏิกิริยาไปสู่พื้นผิวภายนอกของเซลล์เชื้อเพลิงที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมผ่านแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว จากนั้นจึงถ่ายโอนไปยังสารหล่อเย็นโดยทั่วไปมักจะเป็นอากาศ การระบายความร้อนด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องใช้แผ่นนำ

ไฟฟ้าสองขั้วที่สามารถนำความร้อนได้ดีและเหมาะกับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีค่ากำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก

3. การระบายความร้อนด้วยการทำให้เปลี่ยนสถานะ การระบายความร้อนด้วยวิธีนี้ใช้ความร้อนของการเปลี่ยนสถานะของสารหล่อเย็นมาช่วยดึงความร้อนออกจากเซลล์เชื้อเพลิง

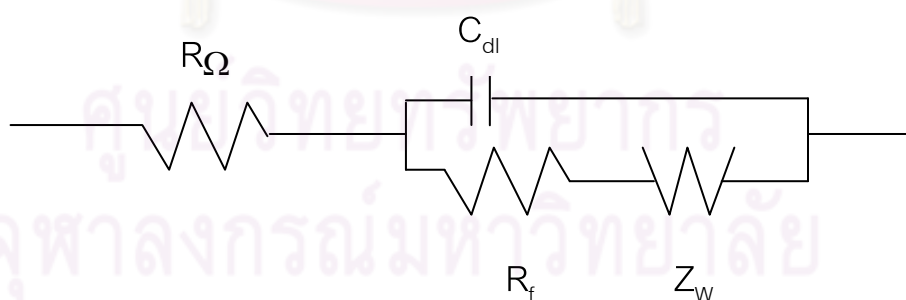
2.1.6 วิธีการตัดกระแสไฟฟ้า (Current interrupt method)

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ใช้แยกสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงออกเป็นส่วนที่ได้รับผลจากความต้านทาน (Ohmic process) และส่วนที่ได้รับผลจากสาเหตุที่ไม่ใช่ความต้านทาน (Nonohmic process) ของเซลล์เชื้อเพลิง วิธีการตัดกระแสไฟฟ้าสามารถใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีกำลังไฟฟ้าสูงได้และสามารถทดลองได้ง่ายโดยทำการทดลองไปพร้อมๆ กันกับการวัดค่าโพลาร์ไรเซชัน (i - V curve measurements)

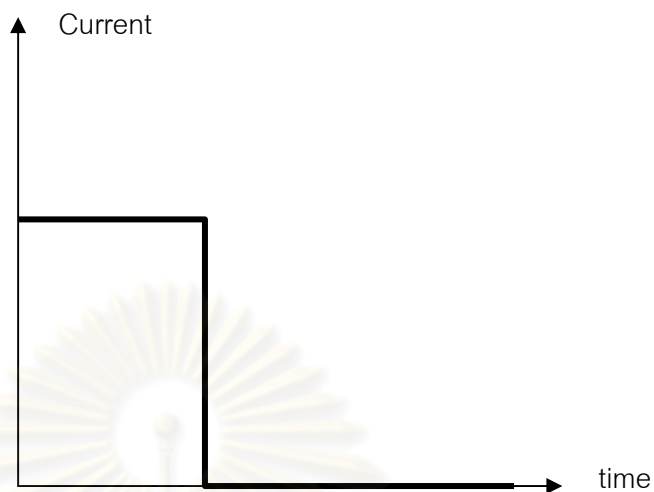
วิธีการนี้มีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอิมพีแดนซ์ดังนี้

- ใช้เวลาทดลองสั้น
- ใช้อุปกรณ์วัดที่ไม่ยุ่งยาก
- ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีกำลังไฟฟ้าสูงได้

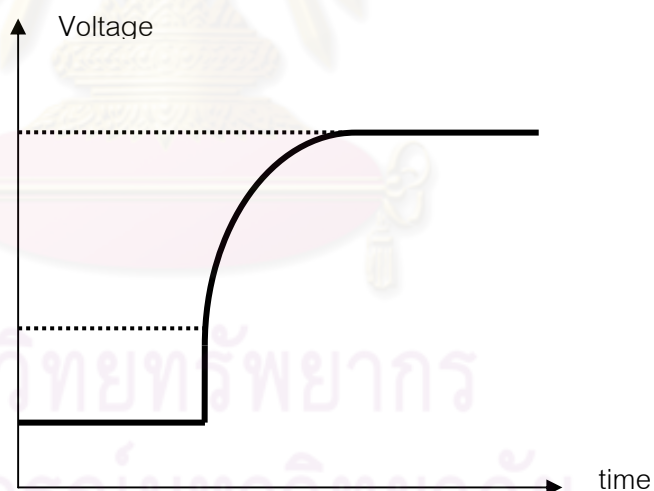
แนวคิดของวิธีการตัดกระแสไฟฟ้านี้สามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.5 – 2.7



รูปที่ 2.5 วงจรเสมือนแบบง่ายของเซลล์เชื้อเพลิง [2]



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงการตัดกระแสไฟฟ้าโดยที่กระแสไฟฟ้าถูกตัดให้เหลือ 0 แอมแปร์ [2]



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์เมื่อกระแสไฟฟ้าถูกตัดให้เหลือ 0 แอมแปร์ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเกี่ยวข้องกับการสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (Ohmic loss) ในส่วนของค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจะเกี่ยวข้องกับการสูญเสียเนื่องจากแอกทิเวชัน (Activation loss) และการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transport loss) ในระบบ [2]

ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานแบบกระแสคงที่แล้วถูกตัดกระแสไฟฟ้าลงแบบรวดเร็ว การตอบสนองของค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจะเป็นตัวแทนของตัวเก็บประจุไฟฟ้าและความต้านทานของส่วนประกอบต่างๆ ภายในเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่ค่าศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจากนั้นจะเพิ่มขึ้นต่อไปตามเวลาที่นานขึ้นและค่าศักย์ไฟฟ้าจะคงที่ที่ค่าหนึ่ง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกนั้นเป็นผลมาจากค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตามเวลานั้นเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและผลของการถ่ายโอนมวลสารภายในเซลล์เชื้อเพลิงรวมกัน ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและกระบวนการถ่ายโอนมวลสารสามารถจำลองได้ด้วยตัวต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C) และองค์ประกอบวอร์เบอร์เบิร์ก (Warburg) เนื่องจากสมบัติการเก็บประจุจึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น การตอบสนองของค่าศักย์ไฟฟ้าจึงสามารถนำมาใช้แยกการสูญเสียของเซลล์เชื้อเพลิงได้ วิธีการตัดกระแสไฟฟ้านี้จะให้ผลที่แม่นยำได้นั้นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าจะต้องทำให้ได้อย่างรวดเร็วในช่วงไมโครวินาทีถึงมิลลิวินาที

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tori และคณะ [3] ออกแบบต้นแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนสมรรถนะสูงที่ใช้เชื้อเพลิงแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวและแบบชั้นภายใต้ภาวะปฏิบัติการที่แตกต่างกันถูกทดสอบ เซลล์เชื้อเพลิงแบบชั้นขนาด 4 เซลล์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 13 วัตต์ (ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.36 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.6 โวลต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงไปเนื่องจากค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEAs) เป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพต่ำและทำให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีน้อย โดยที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีจำนวนเซลล์มากขึ้น งานวิจัยนี้ลดค่าการสูญเสียพลังงานนี้โดยการพัฒนารูปแบบเซลล์และการใช้ระบบการให้ความชื้นกับเมมเบรน

Weng และคณะ [4] ได้ออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์ที่มีพื้นที่ 100 ตารางเซนติเมตร โดยที่สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้มีค่า 0.55 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรต่อหนึ่งเซลล์ การออกแบบรูปแบบการไหลให้มีความสม่ำเสมอ การออกแบบแผ่นระบายความร้อนและแรงดันที่ใช้อัด end plate มีความสำคัญต่อการทำให้ได้สมรรถนะที่ดีที่สุดของเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็กนี้ สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบชั้นขนาด 4 เซลล์ได้ถูกวิเคราะห์ในรูปแบบภาวะคงตัว (static mode) และภาวะไม่คงตัว (dynamic mode) กราฟโพลาริเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ให้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 0.55 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (220 วัตต์) ที่ค่าความต่างศักย์ 0.5 โวลต์ต่อหนึ่งเซลล์และในภาวะที่ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้จะส่งผลให้มีน้ำท่วมภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงน้อยที่สุดด้วย ในงานวิจัยนี้ยังได้ทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงโดยต่อกับโหลดและทำงานในภาวะไม่คงตัวเพื่อจำลองการใช้งานในยานพาหนะจริง สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานในภาวะไม่คงตัวขึ้นกับอัตราส่วนไฮโดรเจนต่ออากาศ ความดันย้อนกลับ (back pressure) และค่า dynamic-loading time โดยที่ค่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่ออากาศและค่าความดันย้อนกลับจำเป็นต้องมีค่าสูงเพื่อทำให้ได้สมรรถนะสูงในการทำงานภายใต้ภาวะไม่คงตัว ในขณะที่การทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในระยะเวลานานนั้นยากที่จะควบคุมให้ได้ค่าสมรรถนะที่สูงเนื่องมาจากเกิดน้ำท่วมขึ้นในภาวะที่กำลังไฟฟ้ามีค่าสูง ทั้งนี้ได้มีการนำเสนอว่าการปรับค่าความดันย้อนกลับที่ฝั่งแคโทดเพื่อไล่น้ำออกสามารถช่วยป้องกันการท่วมของน้ำในช่องทาง การไหลของแก๊สได้และยังช่วยให้กำลังไฟฟ้าคงที่ได้ที่ 170 วัตต์ (0.42 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

Jang และคณะ [5] ได้ศึกษาผลของเซลล์แต่ละเซลล์และชั้นเซลล์เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าภาวะปฏิบัติการที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงได้แก่ อุณหภูมิการทำงานขึ้น อุณหภูมิของเซลล์ แรงที่ใช้ประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและอัตราการไหลของแก๊ส ในงานวิจัยนี้ใช้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 เซลล์มาทดลองวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสในแต่ละเซลล์ สมรรถนะของเซลล์ที่อยู่ตำแหน่งกลางของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าต่ำกว่าเซลล์อื่นๆ ทั้งสองด้าน การเพิ่มอุณหภูมิการทำงานขึ้นด้านแอโนดและการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์ส่งผลให้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีสมรรถนะสูงขึ้น การเพิ่มค่าอัตราส่วนของแก๊สป้อนเข้าต่อแก๊สที่ต้องใช้ในการเกิดปฏิกิริยาในด้านแคโทดส่งผลให้สมรรถนะในแต่ละเซลล์และสมรรถนะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้นด้วย แต่การเพิ่มค่าอัตราส่วนนี้ในด้านแอโนดไม่ส่งผลต่อสมรรถนะที่ได้ นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะสูงขึ้นตามแรงที่ใช้ประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงอีกด้วย

Zhang และคณะ [6] ได้สร้างแบบจำลองการจัดการน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนขึ้นและนำแบบจำลองที่ได้ไปทดสอบโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการ Model Predictive Control (MPC) เพื่อควบคุมปริมาณน้ำในขั้วแคโทดและลดการแกว่งของค่าความชื้นในฝั่งแคโทด ผลของแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมโดย MPC นั้นมีช่วงระยะเวลาการตอบสนอง (response time) สั้นกว่าการควบคุมแบบ PID และยังสามารถป้องกันไม่ให้เกิดการแกว่งของค่าสัดส่วนของน้ำในฝั่งแคโทดได้อีกด้วย ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมแบบ real-time เพื่อการจัดการน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนได้

Woo และคณะ [7] ได้นำเสนอการควบคุมกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยการควบคุมอัตราการป้อนแก๊สไฮโดรเจนให้เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการใช้แก๊สไฮโดรเจนโดยไม่ต้องมีการนำแก๊สไฮโดรเจนกลับมาใช้ใหม่ แก๊สไฮโดรเจนและอากาศที่แห้งจะถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงในอัตราที่เท่ากับอัตราที่แก๊สทั้งสองถูกใช้ไป แต่ถ้าใช้สารตั้งต้นเป็นออกซิเจนจะต้องใช้ปริมาณออกซิเจนอย่างน้อยที่สุดเป็น 130 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณที่ต้องใช้เพื่อให้การควบคุมกระแสไฟฟ้ามีเสถียรภาพ ข้อจำกัดของค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงและความสามารถในการควบคุมอัตราการป้อนแก๊ส การควบคุมกระแสไฟฟ้า (หรือกำลังไฟฟ้า) โดยวิธีนี้นอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วยังช่วยทำให้ระบบควบคุมเซลล์เชื้อเพลิงไม่ซับซ้อนและลดความต้องการใช้อุปกรณ์ในการนำกลับแก๊สไฮโดรเจนมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย

มานพ มาสมทบ และคณะ [8] ได้ทดลองประกอบต้นแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาด 500 วัตต์และศึกษาการพัฒนาต้นแบบชุดทดสอบสมรรถนะเพื่อนำไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์ ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วย 20 เซลล์วางเรียงกันเป็นแถวยาว จากนั้นจึงทำการทดสอบเพื่อดูสมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่สร้างขึ้น โดยอาศัยดัชนีชี้วัดต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงไฮโดรเจนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเทียบกับค่าความร้อนต่ำ (LHV) หลังจากการทดสอบพบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือ 500 วัตต์ที่กระแสไฟฟ้า 42 แอมแปร์และความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ในกรณีที่ให้ความชื้นกับชั้นเซลล์เชื้อเพลิง โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ที่ 40 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้ความชื้นกับอากาศทางเข้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและการศึกษาเสถียรภาพที่กำลังไฟฟ้า 250 วัตต์เป็นเวลา 10 ชั่วโมงพบว่ากำลังไฟฟ้าจะลดลง 3 วัตต์ต่อชั่วโมง

ราชวัลลภ แจ่มมงคล [9] ได้พัฒนาระบบการวัดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อรวบรวมและบันทึกค่าปัจจัยต่างๆ ที่เกิดขึ้นขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานและสามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ที่ต่อเข้ากับเซลล์เชื้อเพลิงผ่านโปรแกรม LabVIEW™ ตัวแปรที่ทำการวัดค่าและเก็บบันทึกคือ อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน ความดันลด อัตราการไหลของแก๊ส กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า การควบคุมเซลล์เชื้อเพลิงทำได้โดยการปรับอัตราการไหลของแก๊ส ผ่านเครื่องวัดอัตราไหลของแก๊สหรือการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าผ่านเครื่อง electronic load อุปกรณ์ทั้งสองประเภทจะติดต่อสื่อสารและส่งข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมโดยผ่านช่องสัญญาณ RS232 ข้างเซลล์เชื้อเพลิงมีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน การทำงานของพัดลมระบายความร้อนเป็นระบบเปิด-ปิด ควบคุมการทำงานโดยโปรแกรม LabVIEW™ ตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้

Chen และคณะ [10] ศึกษาความสัมพันธ์ของความถี่กับความถี่ของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้วิธีการ Fast Fourier transfer พบว่าค่า dominant frequency ของค่าความถี่ทางด้านแคโทดสามารถบ่งบอกถึงการเริ่มเกิดน้ำท่วมเซลล์ขึ้นซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ การใช้วิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณความถี่นี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือวินิจฉัยเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเซลล์ได้

Yu และคณะ [11] ศึกษาการไหลของแก๊สและพบว่าน้ำที่ท่วมในเซลล์จะสะสมอยู่ในช่องทางการไหลของแก๊สแล้วทำให้สมรรถนะของเซลล์เปลี่ยนแปลงโดยที่ค่าความถี่ของเซลล์เชื้อเพลิงจะแกว่งน้อยเมื่อเซลล์ทำงานในภาวะคงตัว นอกจากนี้ยังพบว่าสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความถี่ความถี่คือความเสียหายในช่องทางการไหล

Kim และคณะ [12] ได้เสนอแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์เพื่ออธิบายค่าอุณหภูมิของเซลล์และค่าศักย์ไฟฟ้า การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองนี้ได้จากผลการทดลองโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 กิโลวัตต์ ค่าอุณหภูมิและค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองนี้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

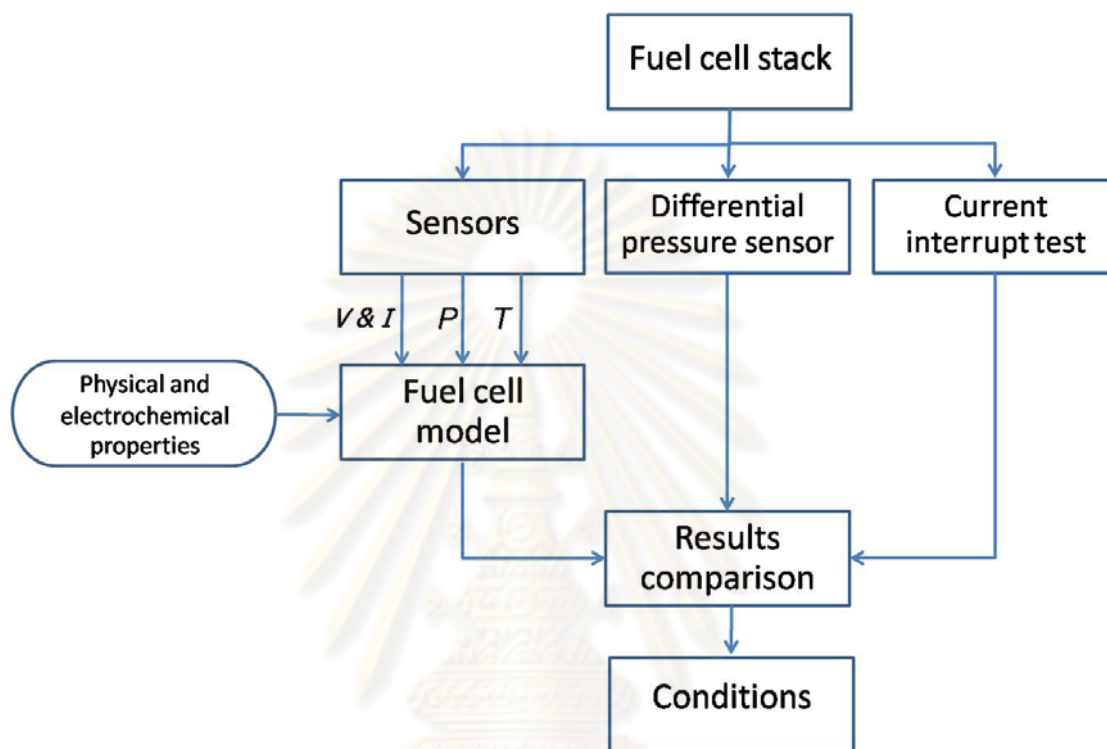
บทที่ 3

แบบจำลองสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง 2 แบบคือเมื่อมีน้ำท่วมเซลล์และเมื่อเซลล์แห้ง น้ำท่วมเซลล์เกิดจากน้ำที่เกิดจากปฏิกริยานั้นไม่สามารถถูกนำออกจากเซลล์เชื้อเพลิงผ่านทางช่องทางการไหลของแก๊สได้ทำให้น้ำสะสมตัวอยู่ภายในช่องทางการไหลซึ่งส่งผลให้แก๊สไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปยังบริเวณตัวเร่งปฏิกริยาหรือบริเวณที่เกิดปฏิกริยาขึ้นได้รวมทั้งน้ำที่ท่วมนี้จะปิดกั้นพื้นผิวที่เกิดปฏิกริยาทำให้พื้นที่เกิดปฏิกริยาได้นั้นลดน้อยลงซึ่งส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง การติดตามปรากฏการณ์นี้และสามารถระบุได้ว่าช่วงเวลาใดที่เกิดน้ำท่วมเซลล์ขึ้นจึงเป็นเครื่องมือที่สามารถวินิจฉัยการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้

นอกจากการเกิดน้ำท่วมเซลล์แล้วยังมีปรากฏการณ์อีกลักษณะที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงคือการเกิดเซลล์แห้ง เซลล์แห้งเกิดจากปริมาณน้ำในเมมเบรน (Membrane water content) มีน้อยจนทำให้ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนมีค่าต่ำและส่งผลให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้าทำให้ค่าสมรรถนะของเซลล์ลดลง ปรากฏการณ์ที่กล่าวข้างต้นทั้งสองลักษณะเกิดขึ้นเนื่องจากปัญหาของการจัดการน้ำ ถ้าหากเซลล์เชื้อเพลิงผลิตน้ำมากหรือมีการป้อนน้ำให้กับแก๊สป้อนเข้าแล้วอาจทำให้เกิดน้ำท่วมเซลล์ขึ้นนั่นคือมีน้ำมากเกินไปภายในช่องทางการไหลของแก๊ส แต่ถ้าหากน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยามีปริมาณน้อยหรือถูกพาออกจากเซลล์พร้อมกับแก๊สขาออกมากเกินไป ปริมาณน้ำในเมมเบรนจะถูกพาออกไปด้วยส่งผลให้เกิดเซลล์แห้งขึ้น แนวคิดของงานวิจัยนี้คือการติดตามค่าความดันลดคร่อมเซลล์เชื้อเพลิงและค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนเพื่อเป็นตัวชี้วัดถึงการเกิดน้ำท่วมเซลล์และเซลล์แห้งตามลำดับ การติดตามค่าพารามิเตอร์ทั้งสองทำได้โดยการนำแบบจำลองสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเข้ามาใช้คำนวณค่าความดันลดและค่าปริมาณน้ำในเมมเบรน จากนั้นนำค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสองนี้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริงขณะเซลล์เชื้อเพลิงทำงาน ค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัดจริงควรจะต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกันในภาวะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้ตามปกติ แต่เมื่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงไม่เป็นไปตามปกติหรือเกิดปรากฏการณ์ทั้งสองขึ้นควรจะต้องส่งผลให้ค่าที่ได้จากการวัดพารามิเตอร์ทั้งสองแตกต่างจากค่าที่ได้จากแบบจำลอง กล่าวคือหากเกิดปรากฏการณ์น้ำท่วมเซลล์ขึ้นค่าความดันลดคร่อมเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง ในขณะที่หากเกิดปรากฏการณ์เซลล์แห้งขึ้นแล้วค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนจะต้องมีค่าต่ำลง

แบบจำลองค่าความดันลดและแบบจำลองค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนนี้จะทำงานร่วมกันกับระบบวัดและระบบรวบรวมข้อมูลพารามิเตอร์ที่วัดได้จากการทำงานจริงผ่านการใช้งานโปรแกรม LabVIEW™ แผนผังการทำงานของโปรแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างการทำงานของระบบติดตามหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็มขนาด 200 วัตต์

3.1 แบบจำลองค่าความดันลดของแก๊ส

ในงานวิจัยนี้ใช้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200W ที่ด้านแอโนดป้อนไฮโดรเจนในแบบ dead-end โดยจะมีวาล์วควบคุมความดันเป็นตัวควบคุมการป้อนแก๊สไฮโดรเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงและไม่มีการทำความร้อนให้กับแก๊สขาเข้า ส่วนด้านแคโทดป้อนอากาศเข้าสู่เซลล์โดยใช้พัดลมเป่าอากาศซึ่งเป็นพัดลมที่ไม่สามารถปรับความเร็วได้และพัดลมนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนออกจากเซลล์เชื้อเพลิงอีกด้วย แบบจำลองค่าความดันลดจึงถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของระบบดังกล่าวโดยมีสมมติฐานดังนี้

1. การไหลภายในช่องทางการไหลเป็นการไหลของแก๊สเท่านั้น (Single-phase flow)
2. การไหลของแก๊สภายในช่องทางการไหลเป็นลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล (Friction coefficient) มีความสัมพันธ์แบบแปรผกกลับกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์
3. ค่าความหนาแน่นและความหนืดของแก๊สมีค่าคงที่
4. อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ส่งผลต่อค่าอัตราการไหลของแก๊ส
5. ค่าความดันลดภายในช่องทางการไหลของแก๊สเกิดจาก 2 สาเหตุคือ ความดันลดเนื่องจากการสูญเสียแก๊สไปเพื่อเกิดปฏิกิริยาและความดันลดเนื่องจากความต้านทานการไหลของแก๊ส

ขอบเขตของแบบจำลองค่าความดันลดของแก๊สนี้จะสนใจเฉพาะความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนเพียงด้านเดียวเนื่องจากลักษณะของตัวเซลล์เชื้อเพลิงที่ด้านแคโทดใช้การป้อนอากาศโดยใช้พัดลมเป่าอากาศผ่านแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วทำให้การวัดความดันลดของอากาศคร่อมเซลล์เชื้อเพลิงนั้นทำได้ยาก งานวิจัยนี้จึงติดตามเฉพาะค่าความดันลดทางฝั่งแอโนดเท่านั้น

แก๊สไฮโดรเจนถูกป้อนเข้าสู่ช่องทางการไหลผ่านทางวาล์วป้อนแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen supply valve) จากนั้นแก๊สไฮโดรเจนจะไหลตามช่องทางการไหลผ่านเซลล์เชื้อเพลิง และถูกกั้นไว้ไม่ให้แก๊สไหลออกจากเซลล์เชื้อเพลิงโดยวาล์วอีกหนึ่งตัว (Hydrogen purge valve) เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงถูกดึงกระแสปริมาณแก๊สไฮโดรเจนส่วนหนึ่งจะถูกใช้ไปซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ดังสมการที่ 3.1

$$n_{H_2,cons} = \frac{I}{2F} \quad \dots(3.1)$$

โดยที่ $n_{H_2,cons}$ คือ ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยา (mol s^{-1})

I คือ กระแสไฟฟ้า (Ampere)

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (C mol^{-1})

ดังนั้นปริมาณแก๊สไฮโดรเจนโดยมวลที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.2

$$m_{H_2,cons} = \frac{I}{2F} \cdot MW \quad \dots(3.2)$$

โดยที่ $m_{H_2,cons}$ คือ ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยา ($g\ s^{-1}$)
 MW คือ มวลโมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจน

3.1.1 การไหลของแก๊สภายในช่องทางการไหล [11]

ความดันลดรวมของแก๊สที่ไหลผ่านเซลล์เชื้อเพลิงที่ระยะทาง t สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนด้วยกันดังสมการที่ 3.3

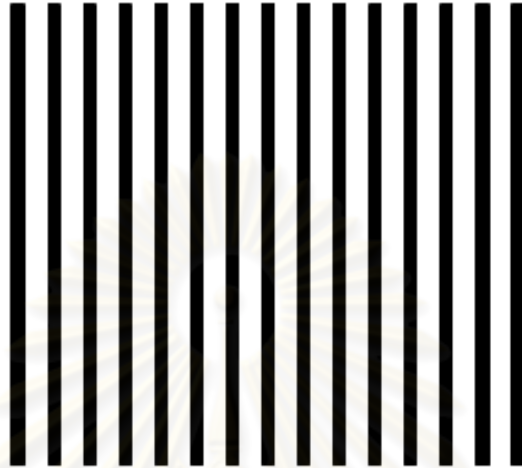
$$-\left(\frac{dP}{dt}\right)_{total} = -\left(\frac{dP}{dt}\right)_{friction} - \left(\frac{dP}{dt}\right)_{gravitaion} - \left(\frac{dP}{dt}\right)_{momentum} \quad \dots(3.3)$$

โดยที่ $-\left(\frac{dP}{dt}\right)_{total}$ คือ ความดันลดรวมของแก๊ส
 $-\left(\frac{dP}{dt}\right)_{friction}$ คือ ความดันลดเนื่องจากความต้านทานการไหล
 $-\left(\frac{dP}{dt}\right)_{gravity}$ คือ ความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
 $-\left(\frac{dP}{dt}\right)_{momentum}$ คือ ความดันลดเนื่องจากปริมาณแก๊สที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาแล้ว
 ถูกปล่อยออกจากเซลล์เชื้อเพลิง

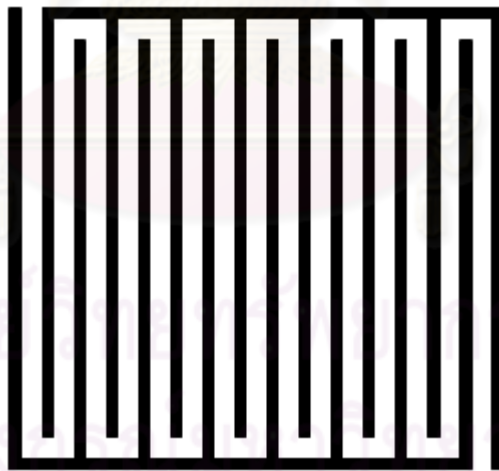
3.1.1.1 ความดันลดเนื่องจากความต้านทานการไหล (Frictional pressure drop)

ความดันลดของแก๊สส่วนหนึ่งเกิดจากความต้านทานการไหลเนื่องจากภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะมีช่องทางการไหลของแก๊สที่มีขนาดเล็กและมีช่วงหักเลี้ยวเป็นจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่นรูปที่ 3.2 - 3.3 ทำให้แก๊สที่ไหลผ่านช่องทางเหล่านี้จะสูญเสียความเร็วไปด้วยสาเหตุสองประการ ประการแรกเกิดจากความสูญเสียหลัก (Major loss) แก๊สเคลื่อนที่ภายในช่องทางการไหลนั้นจะสัมผัสกับผิวของช่องทางการไหลของแก๊สซึ่งมีความขรุขระทำให้มีความต้านทานการไหลและทำให้ความเร็วของแก๊สลดลง ประการที่สองเกิดจากความสูญเสียรอง (Minor loss) ภายในช่องทางการไหลอาจไม่ได้มีเพียงแค่ช่องทางที่เป็นเส้นตรงแต่อาจประกอบไป

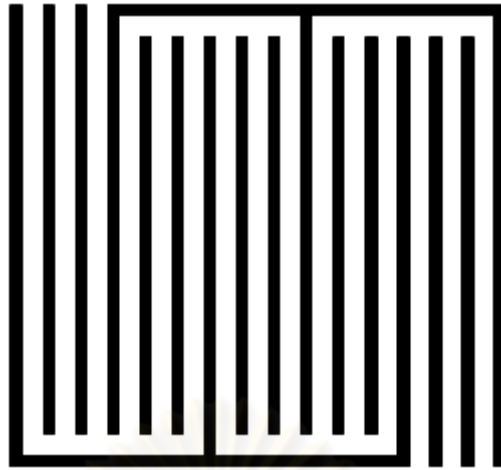
ด้วยข้อต่อข้องหรือจุดหักเลี้ยว ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ของช่องทางการไหลก็สามารถทำให้
ความเร็วของแก๊สลดลงได้ ความเร็วของแก๊สที่ลดลงนั้นส่งผลให้เกิดความดันลดของแก๊สนั้นเอง



รูปที่ 3.2 ลักษณะช่องทางการไหลของแก๊สแบบเส้นตรง (straight)



รูปที่ 3.3 ลักษณะช่องทางการไหลของแก๊สแบบหักเลี้ยว (Serpentine)



รูปที่ 3.4 ลักษณะช่องทางการไหลของแก๊สแบบผสม (Mixed serpentine)

ความเร็วของแก๊สภายในช่องทางการไหลของแต่ละเซลล์สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลของแก๊สทั้งหมดที่ป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงดังสมการที่ 3.4

$$\bar{v} = \frac{Q_{stack}}{N_{cell} N_{ch} A_{ch}} \quad \dots(3.4)$$

โดยที่ \bar{v} คือ ความเร็วของแก๊สภายในช่องทางการไหลของแต่ละเซลล์
 Q_{stack} คือ อัตราการไหลของแก๊สป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิง
 N_{cell} คือ จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่มี
 N_{ch} คือ จำนวนช่องทางการไหลภายในเซลล์แต่ละเซลล์
 A_{ch} คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล

จากความสัมพันธ์ของ Chisholm [13] จะได้ค่าความดันลดของแก๊สภายในช่องทางการไหลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.5

$$\left(-\frac{dP}{dz}\right)_{friction} = \left(-\frac{dP}{dz}\right)_l + c \left[\left(-\frac{dP}{dz}\right)_l \left(-\frac{dP}{dz}\right)_g \right]^{1/2} + \left(-\frac{dP}{dz}\right)_g \quad \dots(3.5)$$

โดยที่ $\left(-\frac{dP}{dz}\right)_l$ คือ ความดันลดของน้ำในเฟสของเหลวที่ไหลภายในช่องทางการไหล

$\left(-\frac{dP}{dz}\right)_g$ คือ ความดันลดของแก๊สที่ไหลภายในช่องทางการไหล

ค่า $\left(-\frac{dP}{dz}\right)_l$ และ $\left(-\frac{dP}{dz}\right)_g$ สามารถคำนวณได้โดยมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของเฟสทั้งสองภายในช่องทางการไหล สำหรับการไหลสองเฟสแบบราบเรียบ (Laminar-Laminar flow) จะมีค่าคงที่ C เท่ากับ 5 [13] สำหรับการไหลแบบเฟสเดียวนั้นค่าความดันลดจะมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน C_f ดังสมการที่ 3.6

$$C_f = \frac{\rho_i D_e \left(-\frac{dP}{dz}\right)_i}{2G_i^2} \quad \dots(3.6)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล
 D_e คือ Equivalent diameter of gas flow channel
 G คือ อัตราการไหลของของไหลต่อพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล
 Subscript i คือ แก๊สไฮโดรเจน หรือ ไอน้ำ หรือ น้ำ (ในสถานะของเหลว)

จากสมการที่ 3.6 จะได้ว่าค่าความดันลดของของไหลในเฟสของเหลวนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 3.7

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_l = \frac{4C_f}{D_e} \cdot \frac{G_l^2}{2\rho_l} \quad \dots(3.7)$$

และค่าความดันลดของของไหลในเฟสแก๊สสามารถหาได้จากสมการที่ 3.8

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_g = \frac{4C_f}{D_e} \cdot \frac{G_g^2}{2\rho_g} \quad \dots(3.8)$$

สำหรับการไหลแบบเฟสเดียว (Single-phase flow) จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน (C_f) ที่สัมพันธ์กันกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) และความขรุขระของผนังช่องทางการไหล (ε) [1]

$$C_f = f\left(Re, \frac{\varepsilon}{d}\right) \quad \dots(3.9)$$

การไหลของแก๊สภายในช่องทางการไหลของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นส่วนใหญ่จะมีการไหลแบบราบเรียบ [14] หรือมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 2,000 ซึ่งภายใต้การไหลลักษณะนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ นอกจากนี้ Yue และคณะได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานและตัวเลขเรย์โนลด์และพบว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นไปตามสมการที่ 3.10 [14]

$$C_f = \frac{33.8}{Re} \quad \dots(3.10)$$

3.1.1.2 ความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Gravitational pressure drop)

หากพิจารณาการไหลแบบสองเฟสแล้วค่าความดันลดที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงจะมีความสัมพันธ์กับช่องว่างภายในช่องทางการไหลของแก๊ส (Void fraction, α) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ช่องว่างภายในช่องทางการไหลของแก๊สสามารถหาได้จากสมการที่ 3.11

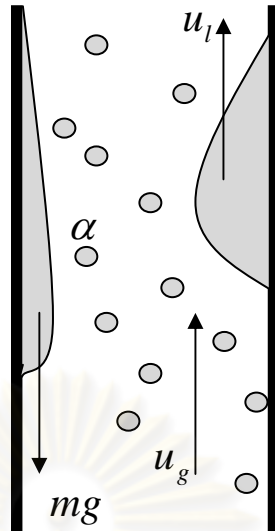
$$\alpha = \left[1 + \left(S \cdot \frac{1-x}{x} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \right]^{-1} \quad \dots(3.11)$$

โดยที่ S คือ อัตราส่วนความเร็วของแก๊สต่อความเร็วของของเหลว (u_g / u_l) หรือเรียกว่า อัตราส่วนสลลิป (Slip ratio)

x คือ อัตราส่วนของแก๊สภายในช่องทางการไหล

นอกจากนี้ Chisholm [13] ยังได้เสนอความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสลลิปอย่างง่ายไว้ดังสมการที่ 3.12

$$S = \left[1 - x \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_g} \right) \right]^{1/2} \quad \dots(3.12)$$



รูปที่ 3.5 ลักษณะการไหลแบบสองเฟสภายในช่องทางการไหลของแก๊สและผลของแรงโน้มถ่วงที่มีต่อการไหลแบบสองเฟส [11]

ดังนั้นค่าความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.13 และ 3.14

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_{gravity} = g[\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l] \sin \theta \quad \dots(3.13)$$

และ

$$\Delta P_{gravity} = -\left(\frac{dP}{dz}\right)_{gravity} \times L \quad \dots(3.14)$$

โดยที่ θ คือ มุมของทิศทางการไหลเทียบกับระนาบแนวนอน
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.81 ms^{-1})

3.1.1.3 ความดันลดเนื่องจากปริมาณแก๊สที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยา (Momentum pressure drop)

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มนั้นสามารถทำงานได้โดยการป้อนเชื้อเพลิงแบบพอดีกันกับอัตราการใช้เชื้อเพลิง (Dead-end mode) หรือสามารถป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องโดยมีอัตราการป้อนแก๊สเกินกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงจริง (Continuous mode) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานในแบบที่ป้อนแก๊สต่อเนื่องจะมีปริมาณแก๊สส่วนหนึ่งที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาและถูกปลดปล่อยออกจากเซลล์เชื้อเพลิง ปริมาณแก๊สที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่งใดๆ ภายในช่องทางการไหลแสดงได้ดังสมการที่ 3.15

$$G_g(Z) = \left(1 - \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{Z}{L}\right) G_g \quad \dots(3.15)$$

โดยที่	G_g	คือ อัตราการไหลของแก๊สต่อพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล
	λ	คือ Stoichiometric ratio หรืออัตราการป้อนแก๊สต่ออัตราการใช้แก๊สของเซลล์เชื้อเพลิง
	Z	คือ ระยะทางที่ตำแหน่งใดๆ จากตำแหน่งทางเข้าของเซลล์เชื้อเพลิง
	L	คือ ความยาวของช่องทางการไหล

อัตราการไหลของเฟสของเหลวจะนับรวมอัตราการไหลของน้ำรวมกับความชื้นของแก๊สที่ความชื้นซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 3.16

$$G_l(Z) = G_l + \frac{M_l}{M_g} \cdot \frac{P_w}{P - P_w} (G_g - G_g(Z)) \quad \dots(3.16)$$

โดยที่	G_l	คือ อัตราการไหลของของเหลวต่อพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล
	P_w	คือ ความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิใดๆ
	M_l	คือ มวลโมเลกุลของน้ำ
	M_g	คือ มวลโมเลกุลของแก๊ส

อัตราการไหลรวมของแก๊สและของเหลวหาได้จาก

$$G_{total}(Z) = G_l(Z) + G_g(Z) \quad \dots(3.17)$$

เมื่อรวมความดันลดเนื่องจากปริมาณแก๊สที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยารวมจากช่องทางเข้าไปถึงช่องทางออกจากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จาก

$$-\int_0^L \left(\frac{dP}{dz} \right)_{momentum} dz = \left[G_{total}(Z)^2 \left(\frac{x(Z)^2}{\alpha(Z)\rho_g} + \frac{(1-x(Z))^2}{(1-\alpha(Z))\rho_l} \right) \right]_0^L \quad \dots(3.18)$$

โดยที่ x คือ สัดส่วนของเฟสแก๊สในแก๊สป้อนเข้า

จะได้ว่าความดันลดเท่ากับ

$$-\Delta P_{momentum} = \left[G_{total}(Z)^2 \left(\frac{x(Z)^2}{\alpha(Z)\rho_g} + \frac{(1-x(Z))^2}{(1-\alpha(Z))\rho_l} \right) \right]_0^L \quad \dots(3.19)$$

ด้วยเหตุผลที่หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำงานในแบบ Dead-end ทำให้สามารถสมมติได้ว่าแก๊สทั้งหมดที่ป้อนเข้าถูกใช้ไปเพื่อเกิดปฏิกิริยาโดยสามารถคำนวณอัตราการไหลของแก๊สได้โดยสมการของฟาราเดย์ (สมการที่ 3.2)

3.1.2 การไหลของแก๊สเมื่อไม่คำนึงถึงผลของน้ำภายในช่องทางการไหล

เนื่องจากสมมติฐานของงานวิจัยนี้คือการไหลภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่อีมเป็นการไหลแบบหนึ่งเฟสหรือเป็นการไหลของแก๊สเท่านั้นเนื่องจากข้อจำกัดในการหาปริมาณน้ำในเฟสของเหลวที่มีอยู่จริงภายในช่องทางการไหล งานวิจัยนี้จึงใช้เพียงสมการของเฟสแก๊สเท่านั้นทำให้หากค่าความดันลดที่วัดได้จริงมีค่าแตกต่างหรือมากกว่าค่าที่คำนวณได้มากเพียงใดย่อมหมายถึงมีน้ำในเฟสของเหลวอยู่ในช่องทางการไหลมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นความดันลดรวมจากสมการที่ 3.3 จึงสามารถทำให้ง่ายขึ้นได้ดังสมการที่ 3.20

$$-\left(\frac{dP}{dt} \right)_{total} = -\left(\frac{dP}{dt} \right)_{friction} - \left(\frac{dP}{dt} \right)_{momentum} \quad \dots(3.20)$$

จากสมมติฐานทำให้แบบจำลองสามารถละลายผลของน้ำในเฟสของเหลวในช่องทางการไหลและทำให้ค่าความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่าน้อยมากไปด้วยเพราะไม่มีน้ำอยู่ในช่องทางการไหลแล้ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้สมมติให้ค่าความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่าน้อยมากและสามารถละลายได้

3.2 แบบจำลองค่าความต้านทานและปริมาณน้ำในเมมเบรน

แบบจำลองค่าความต้านทานและปริมาณน้ำในเมมเบรนของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งเป็นตัวแทนของสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงคือค่าศักย์ไฟฟ้า เซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มมีค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีเป็นไปตามความสัมพันธ์กับค่าพลังงานเสรีของกิบส์ (ΔG) ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ของแก๊สไฮโดรเจน โดยค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.21

$$E_0 = -\frac{\Delta G}{nF} \quad \dots(3.21)$$

โดยที่ n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
 F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 C / e-mol)

แต่การทำงานจริงของเซลล์เชื้อเพลิงค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลงจากค่าทางทฤษฎีนี้และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณตามเวลาจริงขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรม LabVIEW™ ซึ่งมีข้อจำกัดในการคำนวณสมการที่ซับซ้อนแล้วการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้มีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- สมการเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นสมการแบบหนึ่งมิติ (One dimensional) ซึ่งทำให้แก๊สภายในช่องทางการไหลสามารถพิจารณาว่ามีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอได้
- ค่าสมบัติทางเคมีไฟฟ้าต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าคงที่ โดยใช้ค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเท่ากันในทุกๆ เซลล์ โดยจะใช้อุณหภูมิของอากาศขาออกจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเป็นตัวแทนอุณหภูมิของเซลล์ทุกเซลล์

- แก๊สป้อนเข้าทั้งแก๊สไฮโดรเจนและอากาศเป็นแก๊สแห้งไม่มีความชื้น
- น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว
- ผลของน้ำที่สะสมอยู่ภายในช่องทางการไหลไม่ได้ถูกนำมาคำนวณจึงทำให้ค่าพื้นที่เกิดปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงจริงมีค่าคงที่

3.2.1 เทอร์โมไดนามิกส์ของเซลล์เชื้อเพลิง

สมการของเนิร์นสต์ (Nernst equation) อธิบายค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไว้ว่ามีความสัมพันธ์อยู่กับค่าอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงดังสมการที่ 3.22

$$E = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right) + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{P_{H_2}P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right) \quad \dots(3.22)$$

โดยที่	ΔH	คือ เอนทาลปีของการเกิดปฏิกิริยา
	ΔS	คือ เอนโทรปีของการเกิดปฏิกิริยา
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
	T	คือ อุณหภูมิของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง
	P_{H_2}	คือ ความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจน
	P_{O_2}	คือ ความดันย่อยของแก๊สออกซิเจน
	P_{H_2O}	คือ ความดันย่อยของไอน้ำ

ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานจริงค่าศักย์ไฟฟ้านี้จะไม่ใช่ค่าคงที่แต่จะแปรเปลี่ยนไปตามค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้อันเกิดจากสาเหตุต่างๆ ได้แก่ แอกทิเวชัน (Activation) ความต้านทาน (Ohmic) และการถ่ายโอนมวลสาร (Concentration or diffusion)

3.2.2 ศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจากแอกทิเวชัน (Activation losses)

ศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจากแอกทิเวชันเกิดจากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นต้องการพลังงานส่วนหนึ่งในการทำให้อิเล็กตรอนเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลเพื่อที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้านั่นเอง จึงทำให้เกิดการสูญเสียค่าศักย์ไฟฟ้าไปทั้งทางฝั่งแอโนดและแคโทด ศักย์ไฟฟ้าลดประเภทนี้จะเกิดขึ้นอย่างมากในช่วงที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อย ถ้าพิจารณากราฟโพลาร์

ไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงจะเห็นว่าในช่วงต้นของกราฟโพลารไรเซชันค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นช่วงที่เกิดจากผลของแอคติเวชันนั่นเอง ในขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นกราฟโพลารไรเซชันจะมีความชันลดน้อยลงนั่นคือผลของแอคติเวชันมีน้อยลงแต่ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะได้รับผลจากสาเหตุอื่นมากกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจาก แอกติเวชัน กับ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 3.23

$$V_{act} = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad \dots(3.23)$$

โดยที่ A คือ Tafel slope
 i คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ($mAcm^{-2}$)
 i_0 คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในภาวะสมดุล (Exchange current density, $mAcm^{-2}$)

ค่า A จะมีค่ามากถ้าปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้ช้า [15] และค่า i_0 จะมีค่ามากถ้าปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้อย่างรวดเร็ว โดย i_0 จะมีค่าอยู่ในช่วง $10^{-2} - 10^{-8}$ แอมแปร์ [16, 17]

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงนั้น ค่า Tafel slope สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.24

$$A = \frac{RT}{\alpha F} \quad \dots(3.24)$$

ค่าคงที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุ (Charge transfer coefficient) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาและวัสดุที่ใช้ทำเป็นอิเล็กโทรดโดยที่ค่าจะอยู่ในช่วง 0 – 1 [16] งานวิจัยนี้สมมติให้ค่า α และ i_0 เป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นไปตามที่ได้มีผู้ศึกษาไว้ว่าค่าทั้งสองจะมีค่าคงที่ที่ภาวะปฏิบัติการของเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่เปลี่ยนแปลง [16, 17]

3.2.3 ศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจากความต้านทาน (Ohmic losses)

ศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจากความต้านทาน ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเอ็ลนั้นเกิดจากสาเหตุสองประการด้วยกัน สาเหตุแรกคือเมมเบรน เมมเบรนเป็นส่วนที่ยอมให้โปรตอนเคลื่อนที่จากแอโนดไปเกิดปฏิกิริยาที่แคโทด ดังนั้นถ้าเมมเบรนนำโปรตอนได้ไม่ดีแล้วจะเกิดความต้านทานการนำโปรตอนขึ้น สาเหตุที่สองคือส่วนประกอบอื่นๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลได้แก่ส่วนทำหน้าที่

นำอิเล็กตรอนอันได้แก่ แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว ขั้วอิเล็กโทรดและแผ่นสะสมประจุ ถ้าส่วน ประกอบต่างๆ เหล่านี้นำไฟฟ้าได้ไม่ดีแล้วจะเกิดความต้านทานไฟฟ้าขึ้น ความต้านทานทั้งสองแบบเรียกรวมกันเป็นความต้านทานโอห์มิกของเซลล์เชื้อเพลิง (R_{ohm}) จากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจากความต้านทานขึ้นซึ่งมีความสำคัญกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าดังสมการที่ 3.25

$$V_{ohm} = i \cdot R_{ohm} \quad \dots(3.25)$$

เนื่องจากค่าความต้านทานการนำอิเล็กตรอนของส่วนประกอบต่างๆ ภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าน้อยกว่าความต้านทานการนำโปรตอนมาก ค่าความต้านทานโอห์มิกจึงขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของเมมเบรนเป็นหลัก ซึ่งค่าความต้านทานโอห์มิกนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของเมมเบรนและอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง

3.2.4 ศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจากการถ่ายโอนมวลสาร (Concentration losses)

ศักย์ไฟฟ้าชนิดสุดท้ายคือศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจากการถ่ายโอนมวลสาร ศักย์ไฟฟ้าลดแบบนี้จะมีผล อย่างมากต่อค่าศักย์ไฟฟ้ารวมของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่ามากหรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเข้าใกล้กระแสไฟฟ้่าจำกัด (Limiting current density) เนื่องจากเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงต้องผลิตกระแสไฟฟ้ามากแล้วจะทำให้มีความต้องการใช้แก๊สในปริมาณมากเพื่อเกิดปฏิกิริยา ถ้าแก๊สเคลื่อนที่เข้าไปสู่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยา ไม่เพียงพอ แล้วจะทำให้ความเข้มข้นของแก๊สบริเวณที่เกิดปฏิกิริยามีค่าน้อยลง ซึ่งส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ในกรณีที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มบ่อนอากาศแทนออกซิเจนแล้วเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปเรื่อยๆ นั้นปริมาณออกซิเจนทางฝั่งแคโทดจะลดลงและมีปริมาณแก๊สไนโตรเจนในช่องทางการไหลมากขึ้น ถ้าปริมาณแก๊สออกซิเจนถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วและการบ่อนอากาศไม่เพียงพอแล้วจะทำให้เกิดการตกลงของศักย์ไฟฟ้าอย่างรวดเร็วได้ ศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจากการถ่ายโอนมวลสารมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าดังสมการที่ 3.26

$$V_{conc} = \frac{RT}{nF} \left(\frac{i_{lim}}{i_{lim} - i} \right) \quad \dots(3.26)$$

ค่า i_{lim} คือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้่าจำกัด (Limiting current density)

3.2.5 ความชื้นของเมมเบรน (Membrane water content)

ศักย์ไฟฟ้าลดเนื่องจากความต้านทานหรือศักย์ไฟฟ้าลดโอห์มิกตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ตัวหนึ่งของเมมเบรนชนิดเนฟลอนคือ ปริมาณน้ำในเมมเบรน (Membrane water content, λ) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของจำนวนโมเลกุลน้ำต่อจำนวนหมู่กรดซัลโฟนิก

$$\lambda = \frac{N(H_2O)}{N(SO_3H)} \quad \dots(3.27)$$

ปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบในเมมเบรนจะส่งผลต่อค่าความต้านทานและการนำโปรตอนของเมมเบรน โดยที่ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนจะสูงขึ้นถ้าเมมเบรนมีโมเลกุลของน้ำอยู่ในโครงสร้างมากขึ้น [1]

3.2.6 ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรน (Protonic conductivity)

นอกจากค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนแล้วยังมีพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าการนำโปรตอนอีกคือ อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนสูงขึ้นด้วย [18] และคณะได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำโปรตอน ค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนและอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงดังสมการที่ 3.28

$$\kappa = (0.00514\lambda - 0.00326) \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad \dots(3.28)$$

โดยที่ κ คือ ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรน (Scm^{-1})

T คือ อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง (K)

เมื่อต้องการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าลดโอห์มิกนั้นจำเป็นต้องทราบค่าความต้านทานของเมมเบรนและค่าความต้านทานของส่วนประกอบอื่นๆ ของเมมเบรน ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนจะเป็นสัดส่วนกลับกับค่าความต้านทานของเมมเบรนซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.29

$$R_m = \frac{t_m}{A_m(0.00514\lambda - 0.00326)} \exp\left[1268\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{303}\right)\right] \dots(3.29)$$

โดยที่ R_m คือ ค่าความต้านทานของเมมเบรน (Ω)
 t_m คือ ความหนาของเมมเบรน (cm)
 A_m คือ พื้นที่ของเมมเบรน (cm^2)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. แก๊สไฮโดรเจน ความบริสุทธิ์ 99.999 %
2. อากาศ
3. แก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.99 %

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

4.2.1 ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 4.1 ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มที่มีจำนวนเซลล์ 42 เซลล์ สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 200 วัตต์ผลิตโดยบริษัท Horizon Fuel Cell Technologies เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นแก๊สไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และสารออกซิแดนต์เป็นอากาศ ระบบระบายความร้อนใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศที่เป่าผ่านเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้พัดลมที่ติดตั้งอยู่กับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตามรูปที่ 4.1

ข้อมูลทางเทคนิคแสดงได้ดังนี้

สมรรถนะ	24 โวลต์ที่ 8.4 แอมแปร์
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	220 วัตต์
พื้นที่เกิดปฏิกิริยา	19 ตารางเซนติเมตรต่อหนึ่งเซลล์
สารป้อน	แก๊สไฮโดรเจนและอากาศ
ความดัน	5.8 – 6.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
การระบายความร้อน	พัดลม

4.2.2 วาล์วป้อนแก๊สไฮโดรเจน



รูปที่ 4.2 วาล์วป้อนแก๊สไฮโดรเจน

วาล์วป้อนแก๊สไฮโดรเจนทำหน้าที่ควบคุมการป้อนแก๊สไฮโดรเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยจะมีตัวควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวาล์วป้อนแก๊สไฮโดรเจน เมื่อตัวควบคุมเซลล์เชื้อเพลิงทำงาน สถานะการทำงานของวาล์วป้อนแก๊สไฮโดรเจนจะอยู่ในสถานะเปิด เมื่อตัวควบคุมเซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้ทำงาน สถานะการทำงานของวาล์วป้อนแก๊สไฮโดรเจนจะอยู่ในสถานะปิดเพื่อป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเซลล์จากการรั่วของแก๊ส

4.2.3 วาล์วเพิร์จ



รูปที่ 4.3 วาล์วเพิร์จ

วาล์วเพิร์จทำหน้าที่ควบคุมการปล่อยแก๊สไฮโดรเจนออกจากช่องทางการไหลเพื่อปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจนที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาและน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาออกจากช่องทางการไหลภายในเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่วาล์วเพิร์จจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

4.2.4 สวิตช์เปิด / ปิด



รูปที่ 4.4 สวิตช์เปิด / ปิด

สวิตช์เปิด / ปิดทำหน้าที่เปิดหรือปิดการทำงานของตัวควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าต้องการเปิดหรือปิดสวิตช์ให้กดค้างไว้ 5 วินาที

4.2.5 พัดลม (Blower)



รูปที่ 4.5 พัดลม

พัดลมทำหน้าที่สองอย่างด้วยกัน หน้าทีอย่างแรกคือป้อนอากาศเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงเพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจน อย่างที่สองคือป้อนอากาศผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วเพื่อระบายความร้อนออกจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

4.2.6 ตัวควบคุม (Controller)



รูปที่ 4.6 ตัวควบคุม

ตัวควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ คือวาล์วป้องกันแก๊สไฮโดรเจนและวาล์วเพิร์จ รวมทั้งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคือในกรณีที่อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงสูงเกิน 67 องศาเซลเซียสตัวควบคุมจะตัดการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

4.2.7 อุปกรณ์รับสัญญาณจากเซ็นเซอร์และส่งสัญญาณเข้าคอมพิวเตอร์

4.2.7.1 DAQcard PCI 6014

PCI 6014 ทำหน้าที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดความดัน และความดันลด เพื่อแสดงผลผ่านโปรแกรม LabVIEW™ และเป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของพัลลวมระบายความร้อนของระบบ คุณสมบัติทั่วไปของ PCI 6014 คือ

- Bus : PCI
- Input resolution : 16 bits
- Max sampling rate : 200 KS/s
- Input range : ± 0.05 to ± 10 V
- Analog outputs : 2
- Output resolution : 16 bits
- Output rate : 10k S/s
- Output range : ± 10

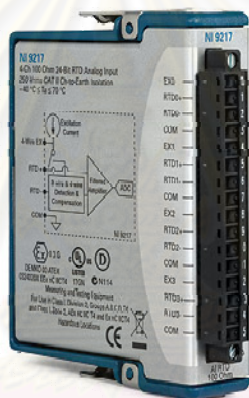


รูปที่ 4.7 DAQcard PCI 6014

4.2.7.2 Ni 9211

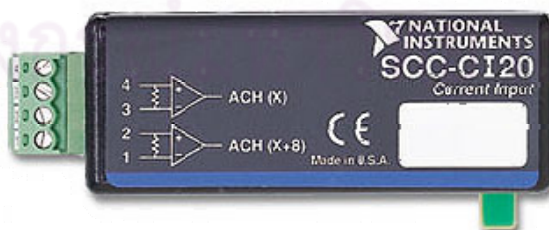
Ni 9211 เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางช่องทาง USB โดย Ni 9211 มีหน้าที่รับข้อมูลจากเทอร์โมคัพเปิด เพื่อส่งข้อมูลอุณหภูมิเข้าสู่โปรแกรม LabVIEW™ สามารถรับสัญญาณได้ 4 ช่องทาง คุณสมบัติทั่วไปของ Ni 9211 คือ

- Temperature range : -40 to 70 °C
- Number of input channels : 4
- Input resolution : 16 bits
- Resolution : 24 bits
- Signal Input Ranges : ± 80 mV



รูปที่ 4.8 Ni 9211

4.2.7.3 SCC CI20



รูปที่ 4.9 SCC CI20

SCC CI20 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณในรูปของกระแสให้เป็นสัญญาณแรงดัน เนื่องจากสัญญาณที่ส่งจากเซ็นเซอร์วัดความดันอยู่ในรูปของกระแส แต่อุปกรณ์ PCI 6014 รองรับ

การทำงานกับสัญญาณที่เป็นแรงดันเท่านั้น เพื่อให้ PCI 6014 สามารถรับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดความดันได้จึงต้องใช้ SCC CI20 เป็นตัวแปลงสัญญาณก่อน กระแสที่สามารถรับได้คือ 4 – 20 mA และแปลงเป็นแรงดันที่ 0 – 5 V สามารถรับข้อมูลได้ 2 ช่องทาง

4.2.7.4 SCC 68



รูปที่ 4.10 SCC 68

SCC 68 ทำหน้าที่เป็นศูนย์รวมของสัญญาณต่างๆ ที่ส่งมาจากตัววัดข้อมูลเพื่อส่งสัญญาณเข้าอุปกรณ์ PCI 6014 ดังนั้นสัญญาณจากอุปกรณ์วัดทั้งหมด จะเข้ามารวมที่ SCC 68 ก่อนส่งสัญญาณเข้า PCI 6014 เพื่อส่งข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ต่อไป

4.2.8 อุปกรณ์วัดค่าปฏิบัติการ

4.2.8.1 อุปกรณ์วัดความดัน



รูปที่ 4.11 อุปกรณ์วัดความดัน

อุปกรณ์วัดความดันรุ่น PA 3026 ทำหน้าที่วัดความดันของแก๊สไฮโดรเจนก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง สัญญาณที่ส่งออกมาเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้า 4 – 20 mA

- Measuring range : 0 – 2.5 barg
- Signal Output Ranges : 4 – 20 mA
- Operating voltage : 10 – 30 VDC
- Operating voltage : -25 to 80 °C
- Maximum pressure : 20 barg
- Application : liquids and gases

4.2.8.2 อุปกรณ์วัดความดันลด



รูปที่ 4.12 อุปกรณ์วัดความดันลด

อุปกรณ์วัดความดันลดทำหน้าที่วัดค่าความดันลดคร่อมชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ตำแหน่งที่วัดคือก่อนเข้าและออกจากเซลล์ของไฮโดรเจนเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงความดันหลังเข้าสู่เซลล์ สัญญาณที่ส่งออกมาอยู่ในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้า มีคุณสมบัติดังนี้

- Signal output : 0 – 10 V
- Measuring range : 0.01 – 0.1 bar
- Operating voltage : 11 – 33 VDC
- Maximum pressure : 0.6 barg

4.2.8.3 Electronic Load



รูปที่ 4.13 Electronic Load

อุปกรณ์ควบคุมศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง เป็นรุ่น N3306A ผู้ผลิตคือบริษัท Agilent Technologies มีคุณสมบัติดังนี้

- Current : 0 – 120 A
- Voltage : 0 – 60 V
- Maximum power : 600 W
- Net weight : 4.6 kg

4.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

4.3.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองที่ใช้เพื่อการจำลองภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ส่วนที่หนึ่งคือการคำนวณค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนเมื่อไหลผ่านชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ค่าความดันลดสามารถใช้เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเกิดปรากฏการณ์น้ำท่วมเซลล์ได้ ที่ภาวะปกติเซลล์เชื้อเพลิงควรจะทำงานโดยไม่มีน้ำท่วมภายในช่องทางการไหลจึงควรมีค่าความดันลดที่วัดได้จากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจริงใกล้เคียงกับค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลอง แต่ถ้าเกิดน้ำท่วมเซลล์แล้วค่าทั้งสองจะแตกต่างกัน ส่วนที่สองคือการคำนวณค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงและค่าปริมาณน้ำในเมมเบรน ค่าทั้งสองสามารถใช้เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเกิดปรากฏการณ์เซลล์แห้งได้โดยค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงที่สูงขึ้นบ่งบอกถึงการเกิดเซลล์แห้งได้

สมมติฐานที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง

- จำลองกระบวนการในระบบภาวะคงตัว (Steady-state condition)
- แบบจำลองที่ใช้มีลักษณะ 1 มิติ
- การไหลของแก๊สภายในช่องทางการไหลเป็นการไหลแบบเฟสเดียว (Single-phase flow)
- การไหลของแก๊สภายในช่องทางการไหลเป็นลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล (Friction coefficient) มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์
- ค่าความหนาแน่นและความหนืดของแก๊สมีค่าคงที่
- คุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ส่งผลต่อค่าอัตราการไหลของแก๊ส
- ค่าความดันลดภายในช่องทางการไหลของแก๊สเกิดจาก 2 สาเหตุคือ ความดันลดเนื่องจากการสูญเสียแก๊สไปเพื่อเกิดปฏิกิริยาและความดันลดเนื่องจากความต้านทานการไหลของแก๊ส

4.3.2 ส่วนการจำลองโดยโปรแกรม LabVIEW™

1. เปิดโปรแกรม LabVIEW™
2. นำสมการต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองมาเขียนโปรแกรมคำนวณลงบน Block Diagram ของโปรแกรม LabVIEW™
3. ตกแต่ง Front Panel ให้ง่ายต่อการใช้งาน
4. นำโปรแกรมที่ได้จากแบบจำลองนี้ไปเชื่อมต่อเข้ากับโปรแกรมควบคุมการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิง
5. ทดสอบการทำงานของโปรแกรม

4.3.3 การทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นร่วมกับระบบควบคุมการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิง

4.3.3.1 ขั้นตอนก่อนการทดลอง

1. ตรวจสอบวาล์วขาเข้าทุกตัว ให้เปิดปิดในทิศทางที่ต้องการ เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของแก๊ส และตรวจสอบวาล์วขาออกให้อยู่ในตำแหน่งปิด
2. ตรวจสอบข้อต่อ และสายไฟต่างๆ ให้อยู่ในสภาพที่พร้อมการใช้งาน

3. เปิดโปรแกรม LabVIEW™
4. เปิด Electronic Load และอุ่นเครื่อง 15 นาทีก่อนการทดลอง
5. เปิดแหล่งจ่ายไฟให้แก่เซ็นเซอร์ทุกตัว
6. ตั้งค่าโปรแกรม LabVIEW™ เพื่อควบคุมเครื่อง Electronic Load ให้อยู่ตำแหน่ง COM2
7. ตั้งค่าของเครื่อง electronic load ตามขนาดของแรงดันที่ต้องการ
8. เปิดวาล์วไฮโดรเจน โดยให้ความดันที่ออกจากถังแก๊สมีค่าประมาณ 0.45 bars
9. เปิดพัดลมเพื่อป้อนอากาศเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง
10. กดปุ่ม REC เพื่อบันทึกค่าของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความดันลด ความชื้น อัตราการไหลของแก๊ส กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ขณะทำการทดลอง ที่หน้าจอแสดงผลหน้าแรกของโปรแกรมเพื่อบันทึกข้อมูลในรูปแบบ excel

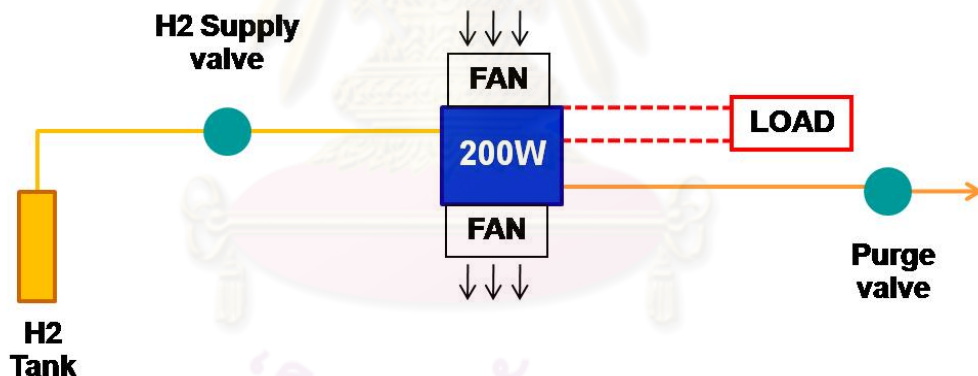
4.3.3.2 ขั้นตอนหลังการทดลอง

1. ปิดวาล์วของถังแก๊สไฮโดรเจน
2. หยุดการบันทึกข้อมูลของ LabVIEW™ โดยการกดปุ่ม STOP ที่หน้าจอแรก
3. ปิดพัดลมป้อนอากาศ
4. ปิดแหล่งจ่ายไฟของเซ็นเซอร์ทุกตัว
5. ปิดเครื่อง electronic load
6. ปิดโปรแกรม LabVIEW™

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์ กลไกการป้อนแก๊สมีสองแบบสำหรับการป้อนแก๊สไฮโดรเจนและการป้อนอากาศ โดยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนเป็นการป้อนแก๊สในแบบ Dead-end คือป้อนแก๊สเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงฝั่งแอโนดในปริมาณที่พอดีกับปริมาณแก๊สที่เกิดปฏิกิริยาไปโดยควบคุมผ่านทางวาล์วควบคุมการป้อนแก๊สไฮโดรเจน สำหรับการป้อนอากาศเป็นการป้อนอากาศแบบต่อเนื่องโดยใช้พัดลมเป่าอากาศเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงฝั่งแคโทดและเนื่องจากพัดลมที่ใช้เป็นพัดลมที่ไม่สามารถควบคุมความเร็วได้จึงทำให้อากาศถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงด้วยความเร็วที่คงที่ตลอดเวลา การปลดปล่อยแก๊สและน้ำที่อาจจะสะสมอยู่ในช่องทางการไหลฝั่งแอโนดจะควบคุมโดยวาล์วเพิร์จ สำหรับกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงทำได้โดยการควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงรูปที่ 5.1 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์

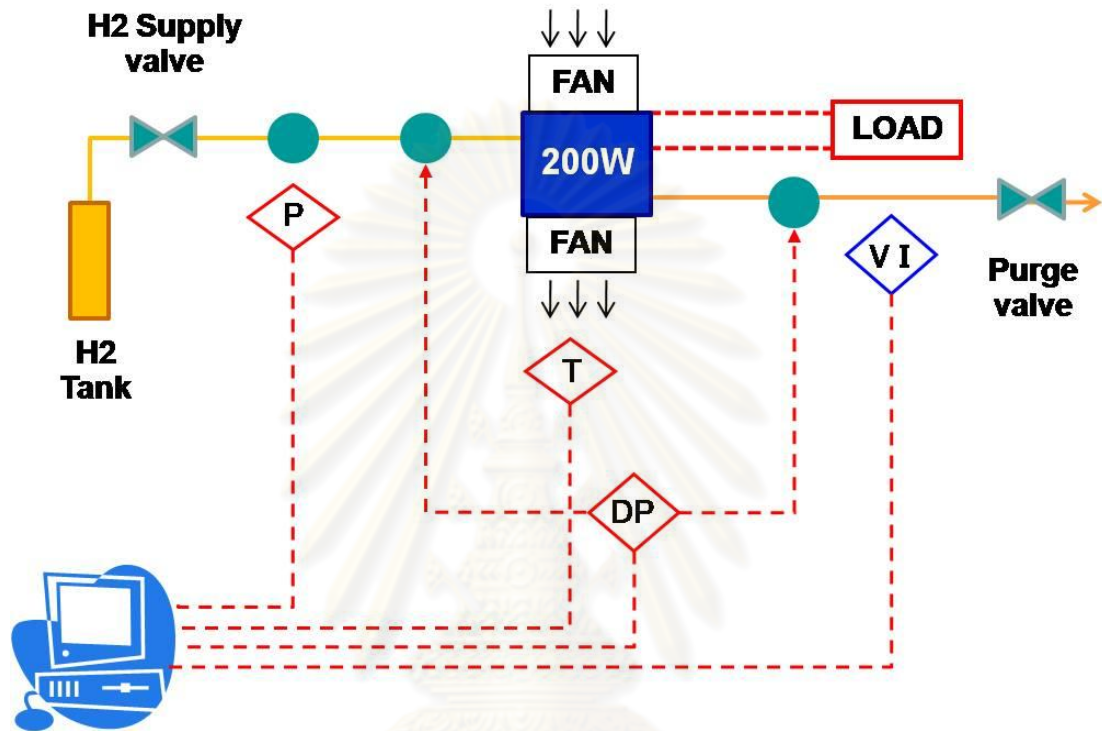


รูปที่ 5.1 แผนผังแสดงอุปกรณ์ของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

แบบพีอีเอ็มขนาด 200 วัตต์

สำหรับการติดตามเซลล์เชื้อเพลิงมีความจำเป็นต้องทำการวัดค่าปฏิบัติการต่างๆ ระบบการวัดข้อมูลต่างๆ แสดงได้ในรูปที่ 5.2 แก๊สไฮโดรเจนภายในช่องทางการไหลฝั่งแอโนดถูกวัดโดยตัววัดความดันที่ถูกติดตั้งอยู่บริเวณท่อแก๊สก่อนเข้าสู่ทางเข้าเซลล์เชื้อเพลิง ความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนถูกวัดโดยตัววัดความดันลดที่วัดความดันแก๊สสองจุดคือความดันของแก๊สที่บริเวณก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงและความดันของแก๊สที่บริเวณขาออกจากเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับ

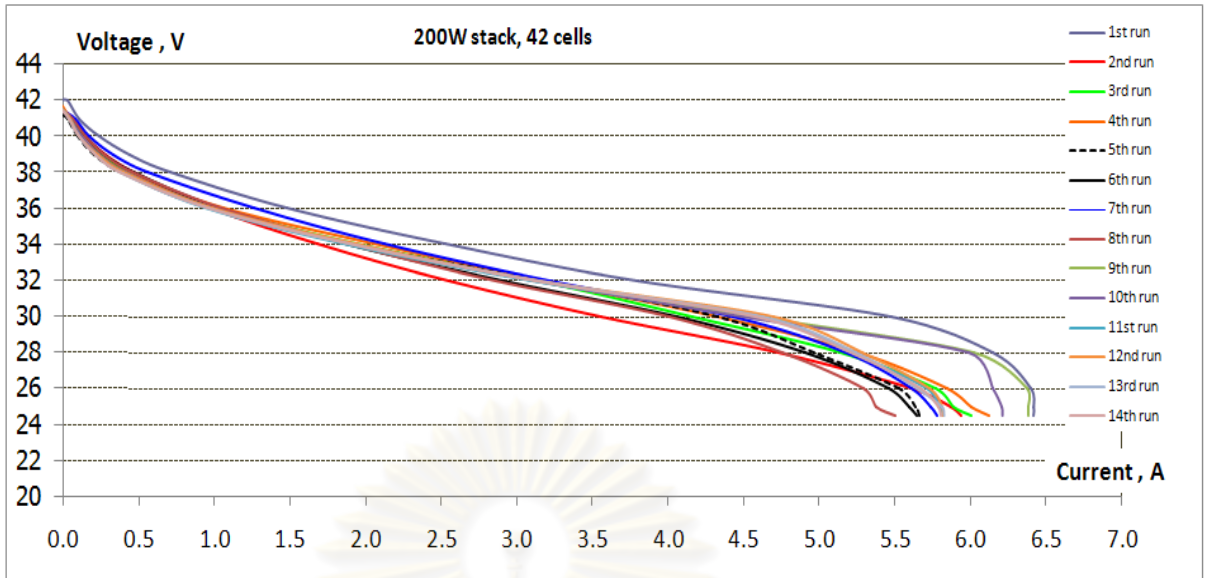
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นวัดได้โดยเทอร์โมคัปเปิลที่บริเวณอากาศหล่อเย็น ขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงถูกควบคุมด้วย Electronic load ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดนี้ถูกส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมและประมวลผลผ่านทางโปรแกรม LabVIEW™



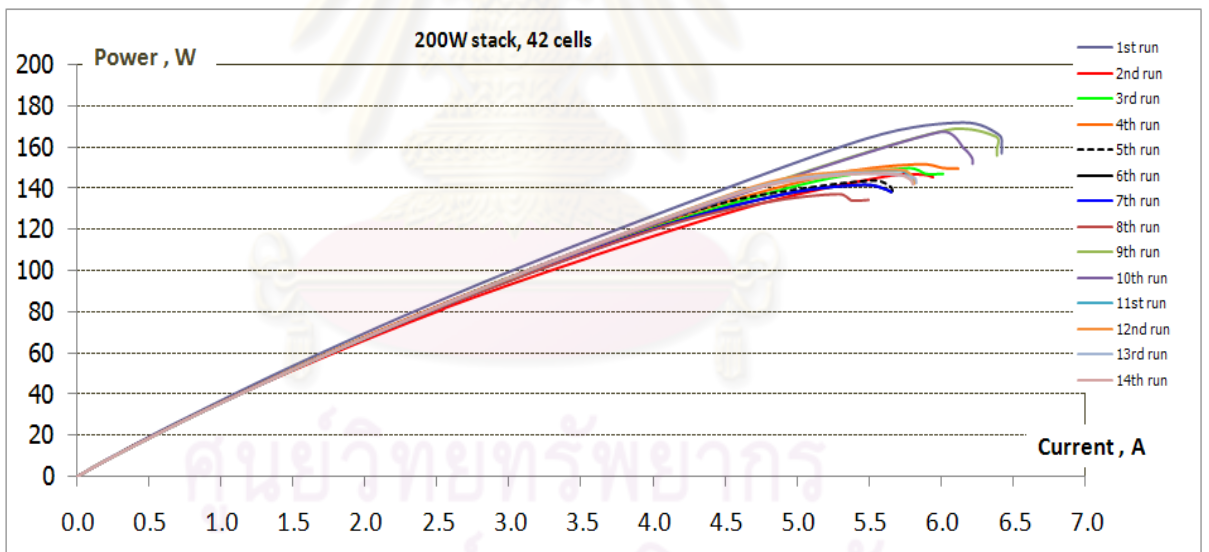
รูปที่ 5.2 แผนผังแสดงระบบการวัดข้อมูลปฏิบัติการของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟือเอ็่มขนาด 200 วัตต์

5.1 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟือเอ็่มขนาด 200 วัตต์

ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้มีขนาด 200 วัตต์ จำนวนเซลล์เท่ากับ 42 เซลล์ สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถพิจารณาได้จากกราฟ โพลารไรเซชัน ดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ แสดงในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.3 กราฟโวลตาจเรซิชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์



รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า
ของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์ผลิตได้

Voltage (V)	Current (A)		Power (W)	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
24.5	5.81	0.17	142.38	4.23
25	5.76	0.17	143.94	4.21
26	5.63	0.16	146.26	4.03
28	5.08	0.20	142.32	5.72
30	4.31	0.34	129.28	10.24
32	3.05	0.20	97.70	6.45
34	1.92	0.11	65.11	3.89
36	1.02	0.09	36.67	3.20
38	0.43	0.06	16.33	2.13
39	0.25	0.04	9.73	1.50
40	0.13	0.03	5.12	1.04
41	0.05	0.01	2.13	0.60

5.2 การประมาณค่า Exchange current density (i_0) และ Transfer coefficient (α)

พิจารณาแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้ดังสมการที่ 5.1

$$E_{cell} = E_{T,P} - \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) - iR_{ohm} - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_{lim}}{i_{lim} - i}\right) \quad \dots(5.1)$$

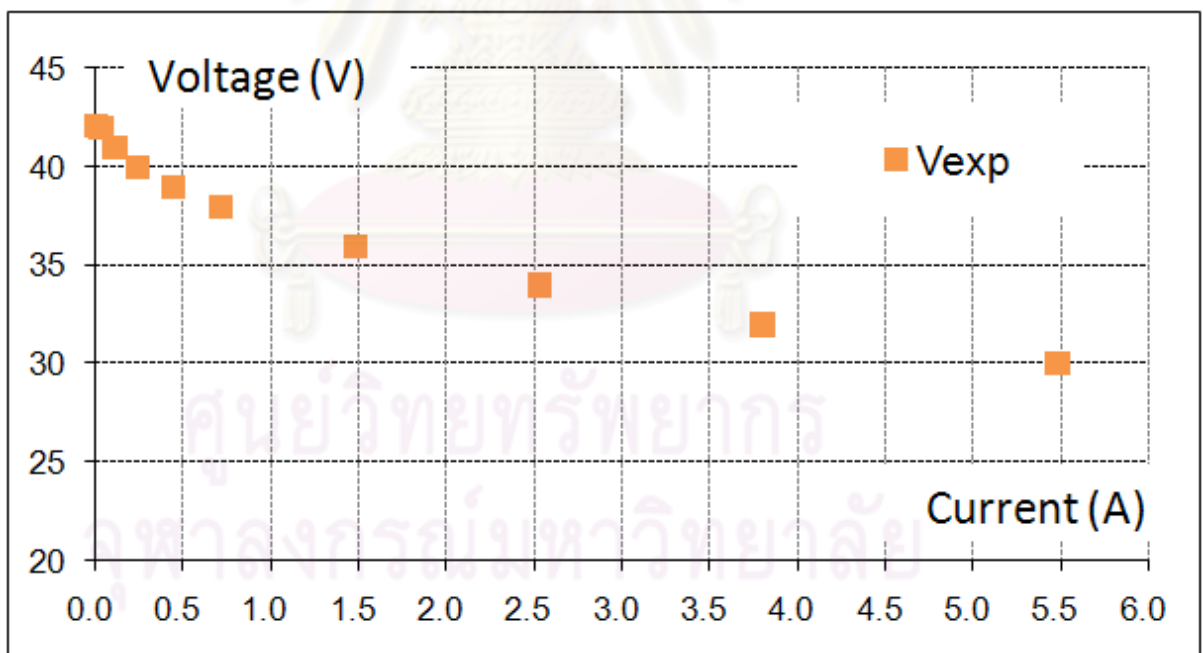
เนื่องจากมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ ค่า exchange current density (i_0), transfer coefficient (α) และ ความต้านทานโอห์มิก (R_{ohm}) จึงจำเป็นต้องทำการประมาณค่าเพื่อนำมาใช้คำนวณในแบบจำลอง แต่เนื่องจากแนวคิดของงานวิจัยนี้คือ ต้องการคำนวณค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจริง ณ เวลาที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานและติดตามค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงนี้เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดการเกิดเซลล์แห้ง ดังนั้นค่า R_{ohm} คือค่าตัวแปรตามซึ่งไม่ใช่ค่าคงที่ ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าที่ต้องทำการประมาณก่อนจึงเหลือแต่เพียงค่า i_0 และ α เท่านั้น

ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มสามารถคำนวณได้โดยการนำค่าศักย์ไฟฟ้าทั้งสามแบบไปลบออกจากค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี ในงานวิจัยนี้มีสมมติฐานว่าค่าศักย์ไฟฟาลดเนื่องจากการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transport or concentration overpotential) มีค่าน้อยและสามารถไม่นำมาคิดได้เนื่องจากการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่เป็นแบบ Dead-end และการป้อนอากาศแบบต่อเนื่องที่มากเกินไป

ดังนั้นจากสมการที่ 5.1 จึงสามารถปรับสมการให้ง่ายขึ้นได้ตามสมการที่ 5.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถพิตเข้ากับสมการอีมพีริคัลและสามารถประมาณค่า i_0 ได้

$$E_{cell} = E_{T,P} - \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) - iR_{ohm} \quad \dots(5.2)$$

เมื่อทดลองวัดค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ในช่วง 30 โวลต์ถึงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage) เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ความดันแก๊สไฮโดรเจน 0.4 บาร์เกจ จะได้กราฟโพลารไรเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตามกราฟรูปที่ 5.5



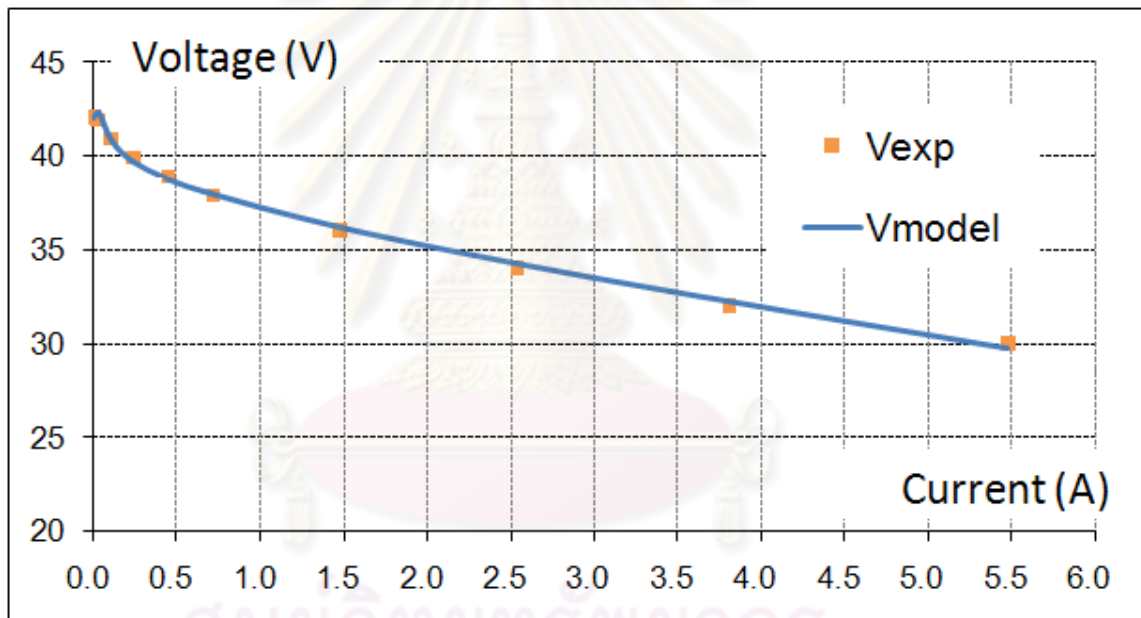
รูปที่ 5.5 กราฟโพลารไรเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์ในช่วงศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์ถึงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด

จากนั้นทำการหาค่า i_0 ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Method of least squares) โดยสมการอเนกพีรีคัลแสดงได้ดังสมการที่ 5.3

$$E_{cal} = \left(E_{T,P,cal} + \frac{RT}{\alpha F} \ln i_0 \right) - \frac{RT}{\alpha F} \ln i - iR_{ohm,cal} \quad \dots(5.3)$$

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากการประมาณเปรียบเทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จริงแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.6 ค่าคงที่ที่ประมาณได้ทั้งสามตัวมีค่าดังนี้

$$\left(E_{T,P,cal} + \frac{RT}{\alpha F} \ln i_0 \right) \text{ มีค่า } 42.87 \text{ V} \quad \frac{RT}{\alpha F} \text{ มีค่า } 1.11 \text{ V} \quad \text{และ} \quad R_{ohm,cal} \text{ มีค่า } 0.024 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$$



รูปที่ 5.6 กราฟโวลตาไรเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์ในช่วงศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์ถึงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการประมาณโดยวิธีกำลังสองน้อยสุด

จากค่าคงที่ที่ประมาณได้ทำให้สามารถคำนวณค่า i_0 ได้เท่ากับ $1.661 \times 10^{-3} \text{ mAcm}^{-2}$ ค่า α เท่ากับ 0.027 และค่า r^2 ของการประมาณมีค่า 0.9987 ซึ่งหมายความว่าค่าคงที่ที่ประมาณได้ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ประมาณได้มีความเข้ากันได้กับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง

เมื่อทำการทดลองหลายๆ ครั้งและประมาณค่า $\left(E_{T,P,cal} + \frac{RT}{\alpha F} \ln i_0 \right)$, $\frac{RT}{\alpha F}$ และ $R_{ohm,cal}$ ของการทดลองทุกครั้งจะได้ตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่า $\left(E_{T,P,cal} + \frac{RT}{\alpha F} \ln i_0\right)$, $\frac{RT}{\alpha F}$ และ $R_{ohm,cal}$ ที่ได้จากการประมาณโดยวิธี

กำลังสองน้อยสุด

การทดลองที่	$E_{T,P,cal} + \frac{RT}{\alpha F} \ln i_0$ (V)	$\frac{RT}{\alpha F}$ (V)	$R_{ohm,cal}$ ($k\Omega cm^2$)
1	42.87	1.11	0.024
2	43.13	1.42	0.030
3	42.06	1.06	0.030
4	42.14	1.10	0.028
5	41.65	1.01	0.029
6	42.65	1.23	0.029
7	42.94	1.24	0.027
8	42.76	1.29	0.028
9	42.40	1.31	0.022
10	42.53	1.34	0.022
11	42.36	1.34	0.021
12	42.41	1.34	0.021
13	42.25	1.30	0.021
14	42.19	1.28	0.022

เมื่อนำค่าคงที่ทั้งสามตัวไปคำนวณค่า i_0 และ α ของการทดลองทุกครั้งจะได้ค่า i_0 และ α แสดงได้ดังตารางที่ 5.3

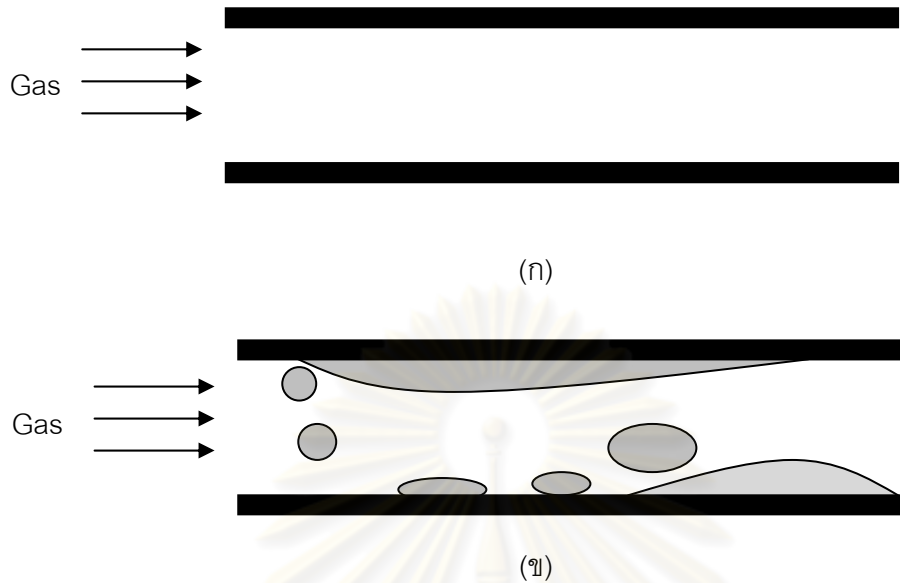
ตารางที่ 5.3 ค่า i_0 และ α ที่ได้จากการประมาณโดยวิธีกำลังสองน้อยสุด

การทดลองที่	Exchange current density, i_0 (mA/cm ²)	Transfer coefficient, α
1	0.00166	0.0258
2	0.00802	0.0202
3	0.00057	0.0270
4	0.00083	0.0259
5	0.00026	0.0284
6	0.00264	0.0232
7	0.00337	0.0232
8	0.00373	0.0222
9	0.00314	0.0218
10	0.00383	0.0214
11	0.00348	0.0213
12	0.00348	0.0214
13	0.00267	0.0220
14	0.00230	0.0224
Average	0.00286	0.0233
Standard deviation	0.0019	0.0025

ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ทั้งสองจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อติดตามภาวะเซลล์แห่งต่อไป

5.3 การติดตามการเกิดน้ำท่วมเซลล์ (Flooding)

การเกิดน้ำท่วมเป็นปรากฏการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากน้ำภายในช่องทางการไหลจะปิดพื้นผิวของอิเล็กโทรดทำให้เกิดแก๊สแพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้น้อยลงเมื่อมีน้ำในเฟสของเหลวภายในช่องทางการไหลมากขึ้นสามารถสมมติได้ว่าช่องทางการไหลของแก๊สถูกปิดบังไว้บางส่วนด้วยน้ำ จากสมมติฐานนี้จึงสามารถแสดงการเกิดน้ำท่วมภายในช่องทางการไหลได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 (ก) ช่องทางการไหลของแก๊สที่ไม่มีเฟสของเหลว (ข) ช่องทางการไหลของแก๊สที่มีเฟสของเหลว

จากรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าถ้ามีน้ำอยู่ภายในช่องทางการไหลของแก๊สแล้วทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลลดลง จากสมการที่ 5.4

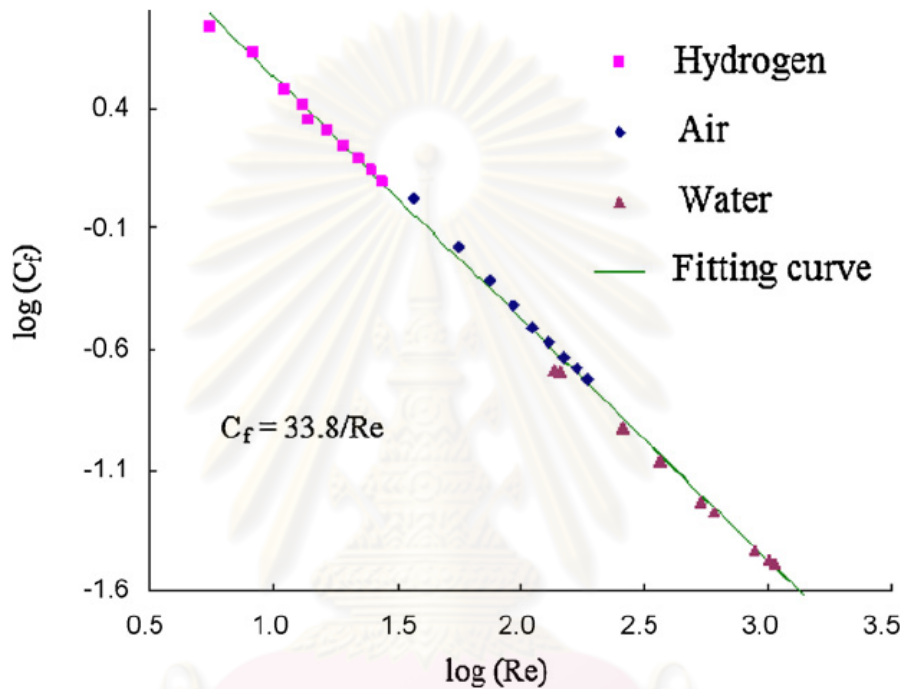
$$\bar{v} = \frac{Q_{stack}}{N_{cell} N_{ch} A_{ch}} \quad \dots(5.4)$$

เมื่อแก๊สถูกป้อนด้วยอัตราเท่าเดิมแต่ช่องทางการไหลถูกปิดบังด้วยน้ำหรือพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลลดลงทำให้ความเร็วเฉลี่ยของแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งความเร็วแก๊สที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความดันลดของแก๊สภายในช่องทางการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จากสมมติฐานที่ได้แสดงมาข้างต้นจึงนำมาสู่แนวคิดของงานวิจัยนี้คือการเปรียบเทียบค่าความดันที่วัดได้จริงจากการทดลองกับค่าความดันแก๊สที่ได้จากแบบจำลองความดันลดของแก๊ส

งานวิจัยนี้แบ่งความดันลดของแก๊สออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือความดันลดที่เกิดจากความต้านทานการไหลของแก๊ส (Frictional pressure drop) และความดันลดที่เกิดจากปริมาณแก๊สที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยา (Momentum pressure drop)

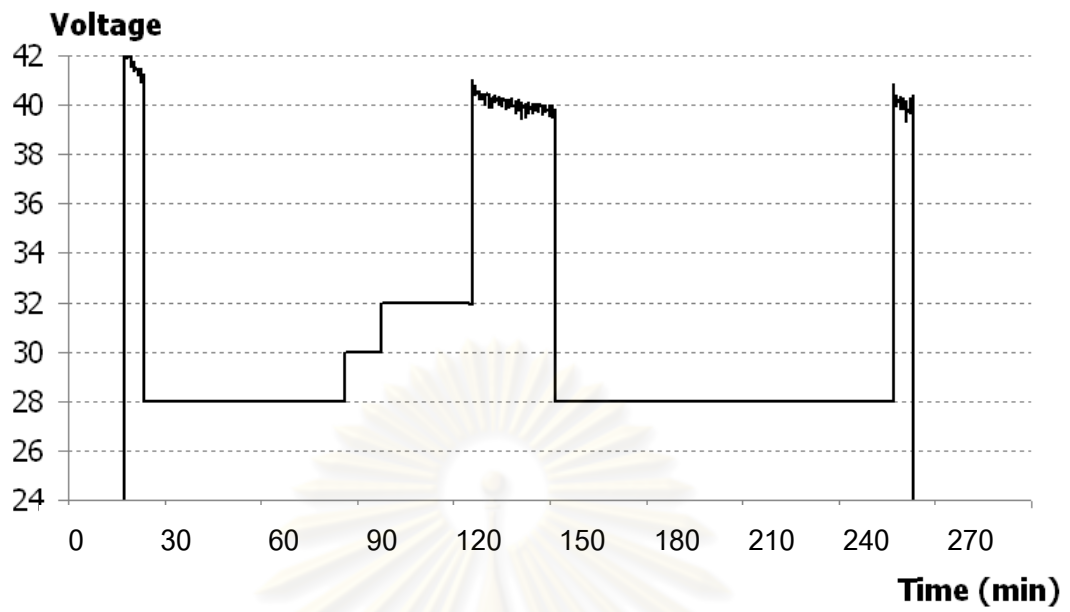
5.3.1 Frictional pressure drop

ค่าความดันลดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการไหลของแก๊ส และค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล (Friction coefficient, C_f) อัตราการไหลของแก๊สมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ที่ Yu และคณะ [11] ได้เสนอไว้ตามรูปที่ 5.8

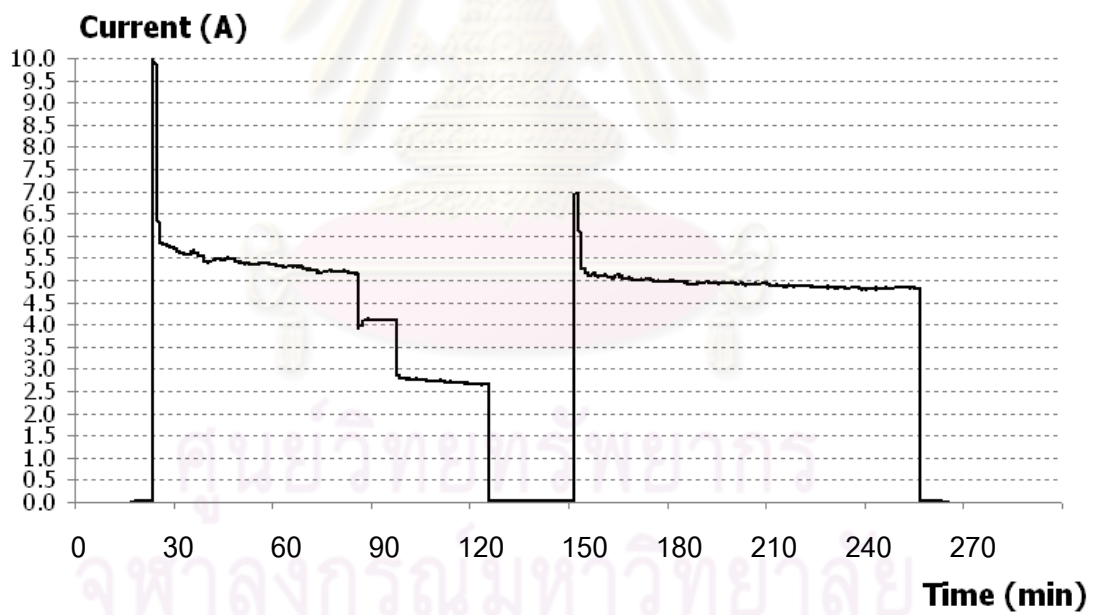


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(C_f)$ กับค่า $\log(Re)$ ของการไหลแบบหนึ่งเฟส [11]

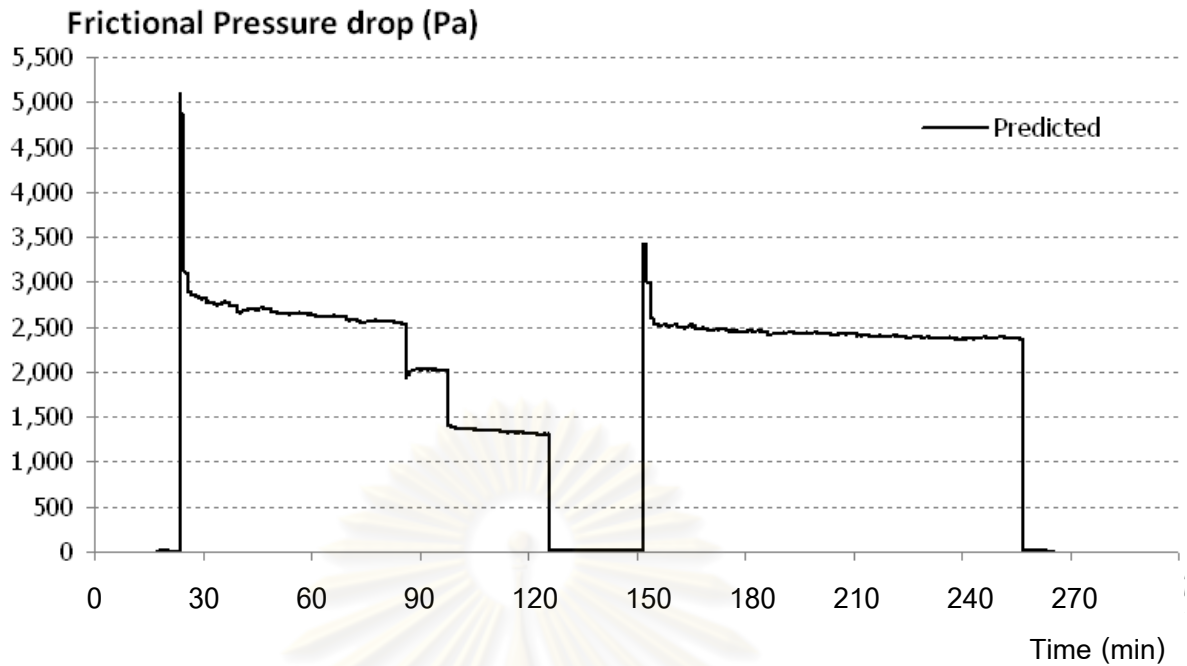
เมื่อทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงด้วยการทำงานในระบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ตามรูปที่ 5.9(ก) แล้วจะได้รับการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นไปตามรูปที่ 5.9(ค) เมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้ค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปคำนวณค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนแต่เนื่องจากสมการความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนมีตัวแปรที่ต้องทราบค่าคือค่ากระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถประมาณค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนได้ในช่วงที่หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดซึ่งมีค่ากระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.9 (ก) การทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Constant voltage)
 (ข) กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานในแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ค) ความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนเนื่องจากความต้านทานการไหลที่ได้จากแบบจำลอง

จากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ดังรูปที่ 5.9(ก) สามารถนำมาคำนวณหาค่าความดันลดที่เกิดจากความต้านทานการไหลได้จากสมการที่ 3.8

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_g = \frac{4C_f}{D_e} \cdot \frac{G_g^2}{2\rho_g}$$

ค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดจากความต้านทานการไหลแสดงได้ดังรูปที่ 5.9(ค)

ความดันลดของแก๊สที่เกิดจากความต้านทานการไหลเกิดจากค่าความเสียดทานภายในช่องทางการไหลของแก๊ส เมื่อค่ากระแสไฟฟ้ามีค่ามากเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องใช้แก๊สไฮโดรเจนในปริมาณมากทำให้มีแก๊สไหลภายในช่องทางการไหลมากขึ้น อัตราการไหลของแก๊สที่มากขึ้นจึงส่งผลให้มีเกิดความดันลดของแก๊สขึ้น ดังนั้นความดันลดที่เกิดจากความต้านทานการไหลจึงมีค่ามากขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น

5.3.2 Momentum pressure drop

ความดันลดของแก๊สอีกส่วนหนึ่งเกิดจากปริมาณแก๊สที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาและถูกปลดปล่อยออกจากเซลล์เชื้อเพลิง แก๊สส่วนที่เหลือออกจากเซลล์เชื้อเพลิงนี้ก็จะส่งผลให้เกิดความดันลดของแก๊สเช่นกัน ถ้าพิจารณาจากสมการ

$$G_g(Z) = \left(1 - \frac{1}{st} \cdot \frac{Z}{L}\right) G_g$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าถ้าเซลล์เชื้อเพลิงป้อนแก๊สไฮโดรเจนในแบบ Dead-end แล้วจะทำให้ค่าอัตราการป้อนแก๊สต่ออัตราการใช้แก๊สของเซลล์เชื้อเพลิง (st) มีค่าเป็น 1 และถ้าพิจารณาความยาวของช่องทางการไหลทั้งหมดจะทำให้ได้ $Z = L$ ดังนั้นจะทำให้ค่า $G_g(Z) = 0$ ซึ่งหมายความว่าถ้าป้อนแก๊สไฮโดรเจนแบบ Dead-end แล้วความดันลดส่วนนี้จึงสามารถละทิ้งได้

สำหรับช่วงที่เซลล์เชื้อเพลิงปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจน (Purge process) นั้นจะเป็นช่วงที่เซลล์เชื้อเพลิงเปลี่ยนรูปแบบการทำงานไปเป็นแบบต่อเนื่องดังนั้นค่าความดันลดส่วนนี้จะไม่ได้มีค่าเป็นศูนย์ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นเพราะค่า st ไม่ได้มีค่าเป็นศูนย์ทำให้ความดันลดในส่วนนี้จะต้องถูกนำมาคิดรวมด้วย แต่งานวิจัยนี้มีสมมติฐานว่าในช่วงกระบวนการปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจนนี้เป็นช่วงระยะเวลาที่สั้นจึงพิจารณากระบวนการเพิร์จนี้ว่าไม่ได้ส่งผลต่อค่าความดันลดของแก๊สในช่วงการทำงานปกติ

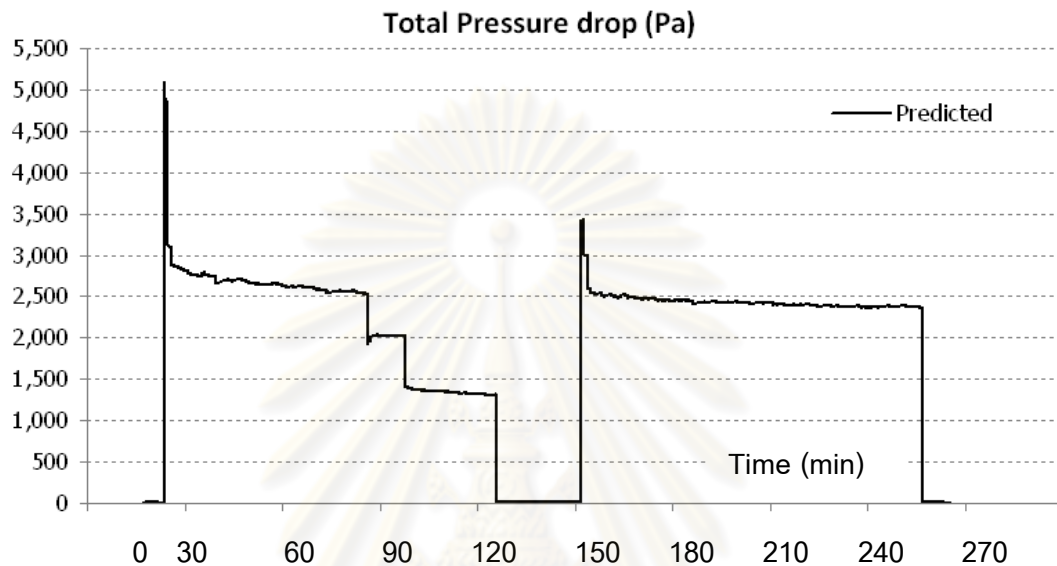
ดังนั้นจึงทำให้สามารถคำนวณได้ค่าความดันลดรวมของแก๊สไฮโดรเจนได้โดยความดันลดรวมของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนเนื่องจากความต้านทานไหลนั่นเอง ค่าความดันลดรวมของแก๊สไฮโดรเจนแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.10(ก)

5.3.3 การเปรียบเทียบค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนเซลล์เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ภาวะปกติ (Normal operating condition)

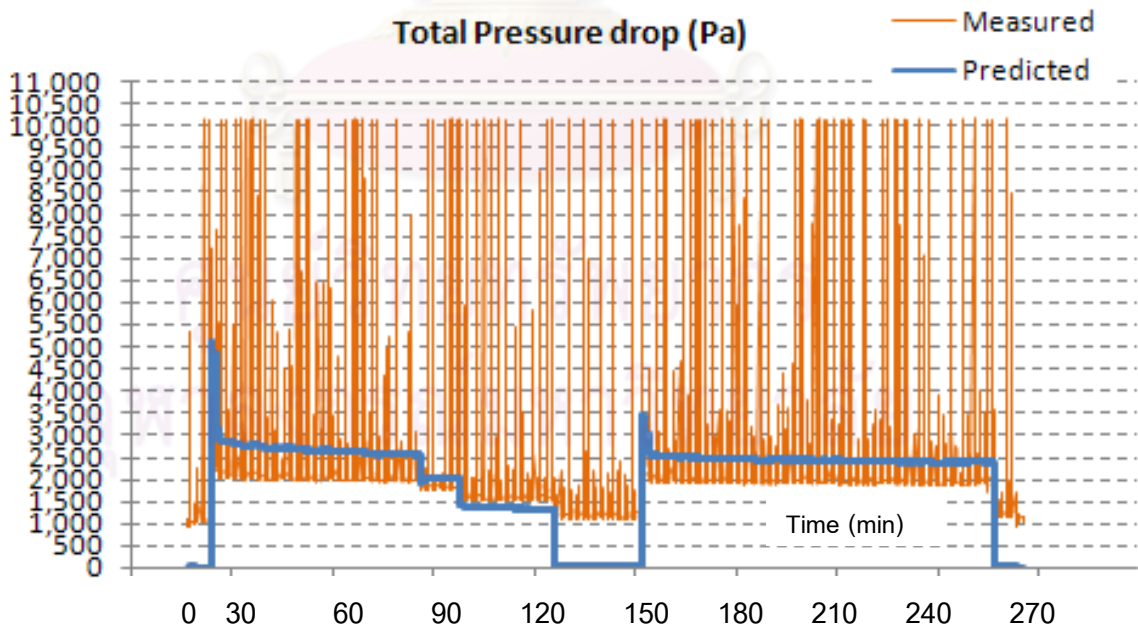
การทดสอบแบบจำลองความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่แสดงไว้ในบทที่ 3 สามารถทำได้โดยการนำผลการคำนวณค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าความดันลดที่วัดได้จริง ถ้าแบบจำลองสามารถใช้อธิบายความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนได้จริงแล้วค่าความดันลดที่ได้จากแบบจำลองและค่าความดันลดที่ได้จากการวัดควรมี

ค่าที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน การเปรียบเทียบค่าความดันทั้งสองแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.10(ข)

จากรูปที่ 5.10(ข) ถ้าพิจารณาเฉพาะช่วงที่สามารถคำนวณค่าความดันลดสามารถหาค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่วัดได้และค่าที่ได้จากการประมาณได้เท่ากับ 460 ปาสคาล



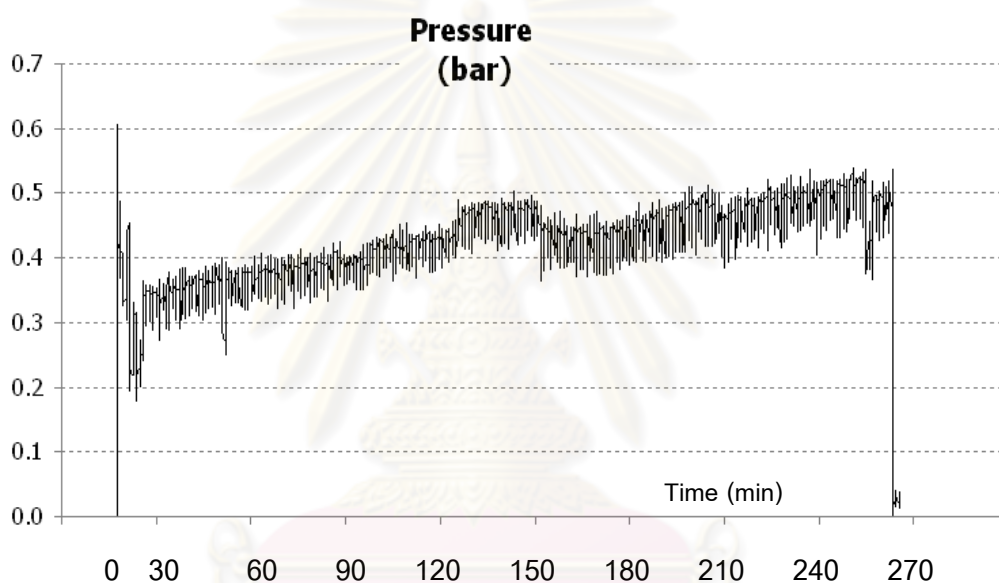
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.10 (ก) ความดันลดรวมของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากแบบจำลอง (ข) การเปรียบเทียบค่าความดันลดที่ได้จากแบบจำลองกับค่าความดันลดที่วัดได้จริงจากการทดลอง

จากรูปที่ 5.10(ข) จะเห็นได้ว่าค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากแบบจำลองกับค่าความดันลดที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน สำหรับค่าความดันลดที่มีค่าสูงเป็นช่วงๆ ไปถึง 10,000 ปาสคาลนั้นเป็นเพราะค่าความดันลดที่วัดได้เป็นค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนในช่วงที่แก๊สถูกปลดปล่อยออกจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อวาล์วเพิร์จเปิดออกซึ่งควรจะมีค่าความดันลดเท่ากับค่าความดันขาเข้าของแก๊สไฮโดรเจน รูปที่ 5.11 แสดงความดันของแก๊สไฮโดรเจน แต่เนื่องจากเซ็นเซอร์วัดความดันลดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีช่วงการวัดค่าความดันลดแค่เพียง 0.1 บาร์หรือ 10,000 ปาสคาลเท่านั้น ดังนั้นในช่วงของการปลดปล่อยแก๊สออกสู่บรรยากาศจึงวัดค่าความดันลดได้สูงสุดแค่เพียง 10,000 ปาสคาลเท่านั้น



รูปที่ 5.11 ความดันของแก๊สไฮโดรเจน

จากรูปที่ 5.10(ข) พิจารณาค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนในช่วงเวลาที่ 125 – 155 จะเห็นได้ว่าค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าเป็นศูนย์และมีค่าแตกต่างจากค่าความดันลดที่วัดได้จริงเนื่องจากในช่วงเวลานี้เป็นช่วงที่เซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้ผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้ามามีค่าเป็นศูนย์จึงทำให้ค่าตัวแปรต้นของแบบจำลองซึ่งก็คือกระแสไฟฟ้ามามีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นค่าความดันลดที่คำนวณได้จากแบบจำลองจึงมีค่าเป็นศูนย์ไปด้วย

รูป 5.10(ข) ผลการทดสอบแบบจำลองความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง

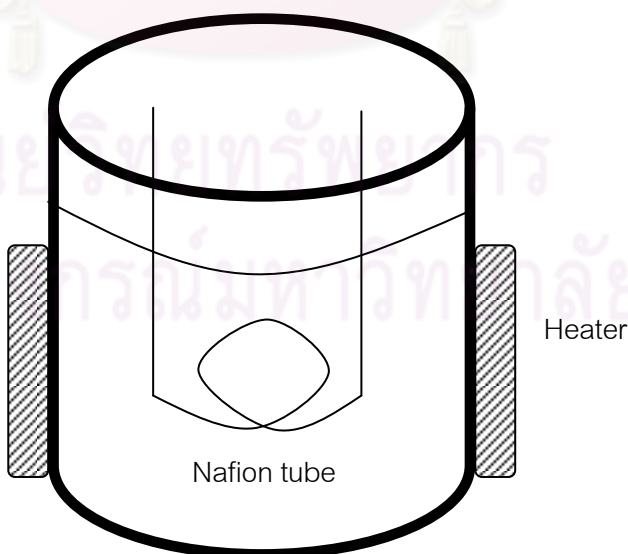
จากการทดลอง แต่แบบจำลองจะสามารถใช้ทำนายค่าความดันลดได้ในภาวะที่เซลล์เชื้อเพลิงกำลังผลิตกระแสไฟฟ้าเท่านั้น

5.3.4 การเปรียบเทียบค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนเซลล์เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ภาวะน้ำท่วม (Fault condition with flooding)

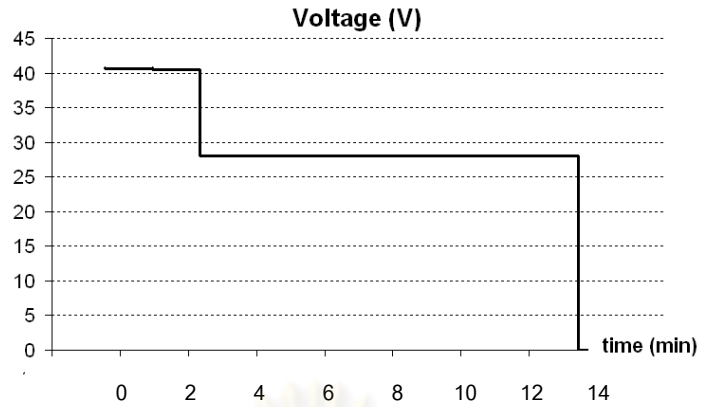
เมื่อทดสอบแบบจำลองความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนในภาวะทำงานปกติของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วและผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด จากนั้นต้องทำการทดสอบแบบจำลองในภาวะน้ำท่วมเซลล์ด้วยการจำลองการเกิดน้ำท่วมเซลล์เชื้อเพลิงนั้นทำโดยการเติมน้ำเข้าไปภายในช่องทางการไหลของแก๊สด้วยวิธีการให้ความชื้นกับแก๊สไฮโดรเจน จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่วัดได้กับค่าประมาณจากแบบจำลอง

5.3.4.1 การเปรียบเทียบค่าความดันลดเมื่อมีการ ให้ความชื้น กับแก๊สไฮโดรเจน

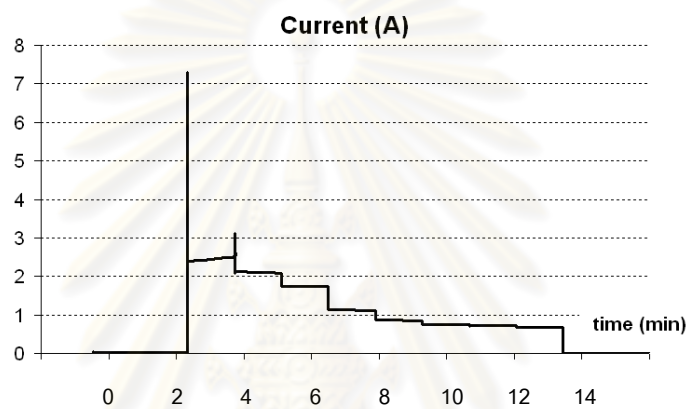
แก๊สไฮโดรเจนถูกนำเข้าสู่ส่วน ให้ความชื้น กับแก๊สที่ควบคุมอุณหภูมิของน้ำไว้ที่ 50 องศาเซลเซียสก่อนจะถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง แผนภาพระบบทำความชื้นให้แก๊สไฮโดรเจนแสดงได้ดังรูปที่ 5.12 แก๊สไฮโดรเจนถูกนำเข้าสู่ท่อเมมเบรนแนฟิออนที่สามารถยอมให้น้ำแพร่ผ่านได้ โดยที่น้ำจะถูกให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์และควบคุมอุณหภูมิของน้ำด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ



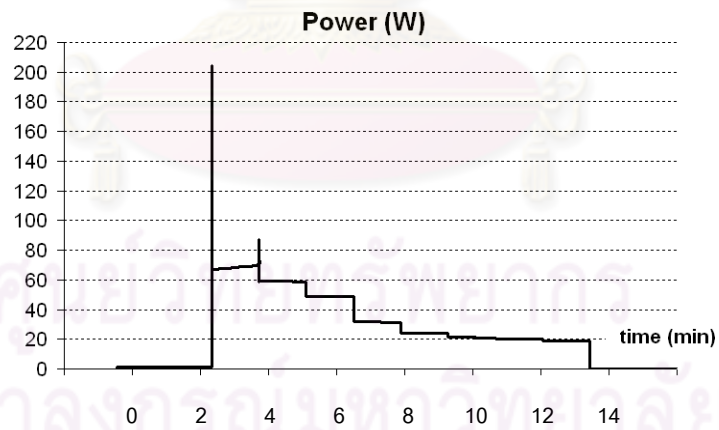
รูปที่ 5.12 แผนภาพส่วนให้ความชื้นกับแก๊สไฮโดรเจน



(ก)



(ข)



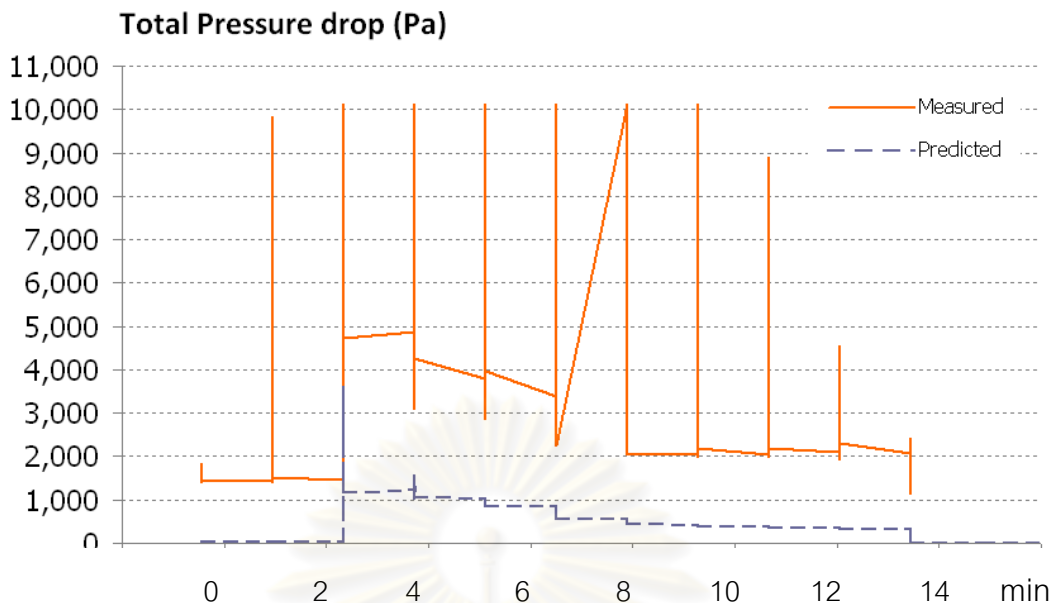
(ค)

รูปที่ 5.13 (ก) การทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
เมื่อให้ความร้อนกับแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
(ข) ค่ากระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (ค) ค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

รูปที่ 5.13(ก) - (ค) แสดงผลการดำเนินการของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระบบ การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงทำในแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ เมื่อพิจารณา ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้แล้วจะเห็นได้ว่าในช่วงที่ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่า 28 โวลต์นั้น ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องถ้าเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้กับค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานปกติจากกราฟโพลาริเซชันแล้วจะเห็นว่าที่ศักย์ไฟฟ้า 28 โวลต์ควรจะได้อำลังไฟฟ้าประมาณ 150 วัตต์ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความชื้นให้แก่สขาเข้าแล้วส่งผลต่อเซลล์เชื้อเพลิงในทางลดสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลงซึ่งเป็นผลมาจากการท่วมของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงนั่นเอง

เมื่อสามารถจำลองภาวะน้ำท่วมได้แล้วทำให้สามารถทดสอบแบบจำลองความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนได้ พิจารณาการเปรียบเทียบค่าความดันลดที่วัดจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลองจากกราฟรูปที่ 5.14 จะเห็นได้ว่าค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าความดันลดที่วัดได้จริงมากเนื่องจากความดันลดที่ได้จากแบบจำลองนั้นคำนวณจากสมการการไหลแบบหนึ่งเฟสหรือคิดเฉพาะการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่านั้น แต่ในกรณีนี้ที่มีการเติมน้ำเข้าไปกับแก๊สไฮโดรเจนที่ป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงนั้น น้ำที่เติมเข้าไปจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวและทำให้การไหลที่เกิดขึ้นภายในช่องทางการไหลจริงเป็นการไหลแบบสองเฟสซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้คำนึงถึงน้ำในช่องทางเดินแก๊ส ดังนั้นการวิเคราะห์ผลในส่วนนี้จึงสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีน้ำอยู่ภายในช่องทางการไหลแล้วจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลลดลงและเมื่อพื้นที่หน้าตัดลดลงแล้วจะส่งผลให้ความเร็วของแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ค่าความดันลดของแก๊สมีค่ามากขึ้นไปด้วย น้ำที่ท่วมอยู่ภายในช่องทางเดินแก๊สนี้เองจะบดบังพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดและส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของแก๊สไปเกิดปฏิกิริยาซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง สาเหตุนี้จึงช่วยอธิบายผลในรูปที่ 5.13(ค) ได้ว่าเมื่อเกิดน้ำท่วมแล้วจะส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเมื่อเทียบกับการทำงานที่ภาวะปกติ

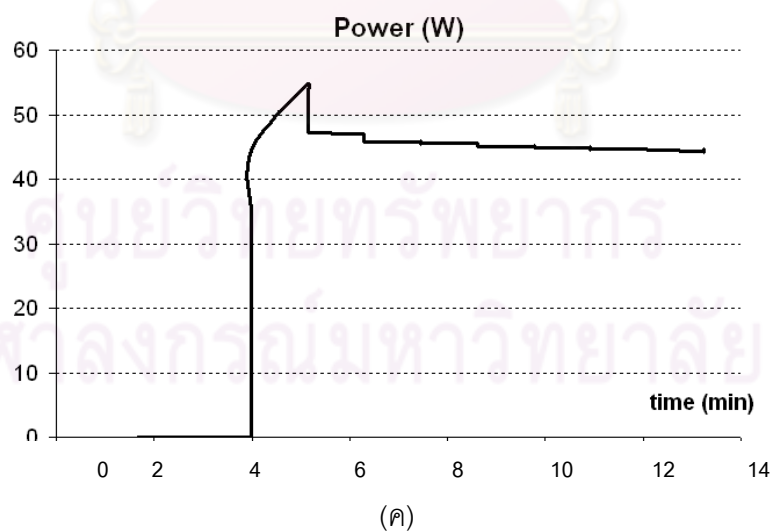
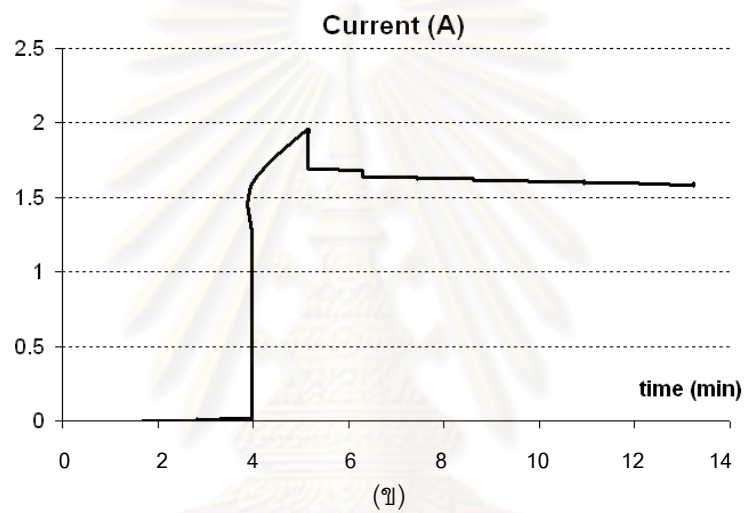
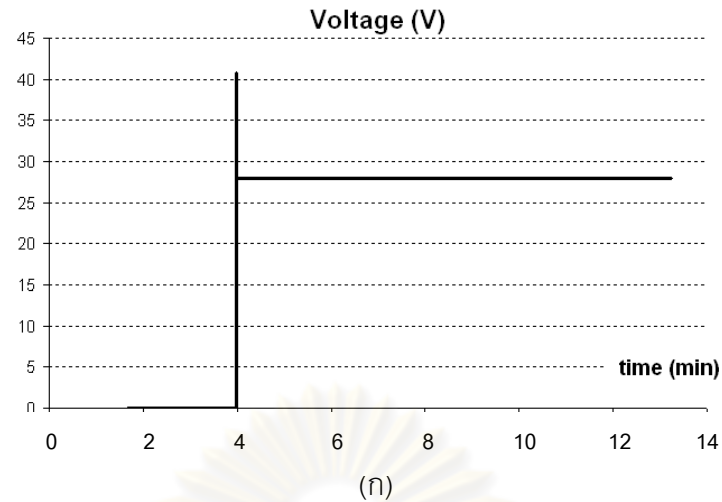
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบค่าความดันลดที่ได้จากแบบจำลอง
กับค่าความดันลดที่วัดได้จริงจากการทดลอง
เมื่อแก๊สไฮโดรเจนถูกทำความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส

5.3.4.2 การเปรียบเทียบค่าความดันลดเมื่อมีการไล่น้ำออกจากเซลล์เชื้อเพลิงครั้งที่ 1

เมื่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเนื่องจากการท่วมของน้ำจึงมีความจำเป็นต้องไล่น้ำออกจากเซลล์เชื้อเพลิงโดยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนเข้าสู่ช่องทางการไหลฝั่งแอโนดเพื่อให้แก๊สไฮโดรเจนผลักดันน้ำที่ท่วมออกจากช่องทางการไหลของเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าพิจารณาจากกราฟรูปที่ 5.15 – 5.16 ซึ่งเป็นการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงโดยที่ไม่มีการให้ความร้อนกับแก๊สไฮโดรเจนแล้วทำให้เห็นว่ายังคงมีการท่วมอยู่บางส่วนแต่น้อยกว่าเดิมเนื่องจากสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่มีค่ามากขึ้นกว่ากรณีที่มีการทำความร้อนให้แก๊สไฮโดรเจน



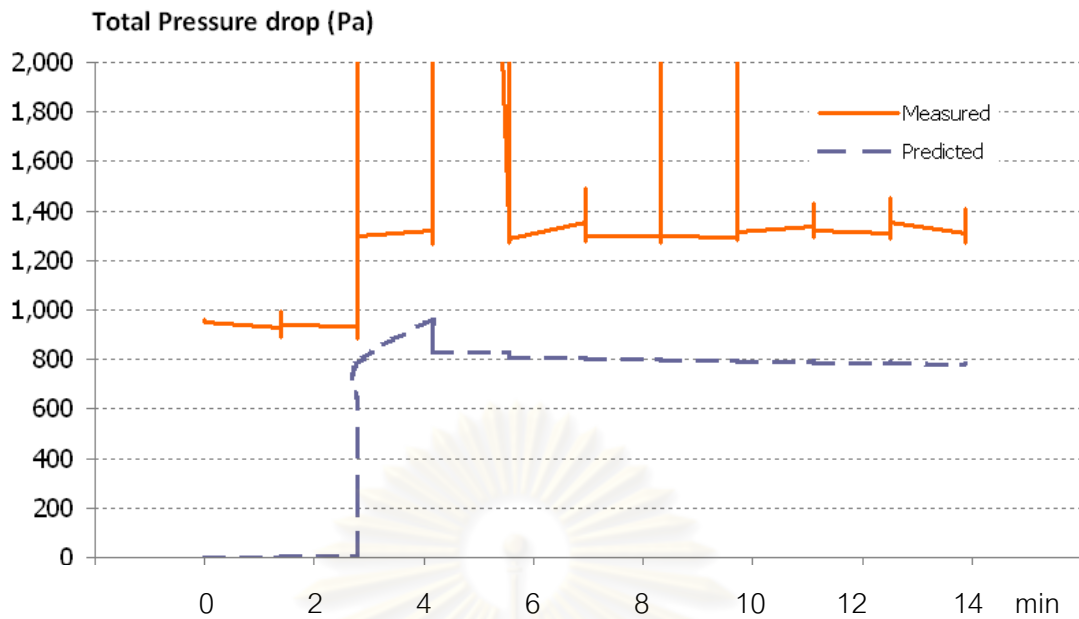
รูปที่ 5.15 (ก) การทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบคิกยู่ไฟฟ้าคงที่หลังจากทำการไล่น้ำออกจากช่องทางกรไหล (ข) ค่ากระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหลังจากทำการไล่น้ำออกจากช่องทางกรไหล (ค) ค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหลังจากทำการไล่น้ำออกจากช่องทางกรไหล

กราฟรูปที่ 5.15(ค) แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่มีค่าเสถียรมากกว่าการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อมีการให้ความร้อนกับแก๊สไฮโดรเจนเนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนที่ป้อนเข้าไม่มีความร้อนส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไม่ตกอย่างรวดเร็ว แต่สาเหตุที่กำลังไฟฟ้ายังไม่ดีเท่ากับภาวะปกติที่ไม่ได้ให้ความร้อนกับแก๊สไฮโดรเจนเหมือนกันเป็นเพราะยังคงมีน้ำที่สะสมอยู่ภายในช่องทางการไหลส่งผลให้พื้นผิวเกิดปฏิกิริยาของอิเล็กโทรดบางส่วนยังคงถูกน้ำท่วมอยู่ด้วย

เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบค่าความดันลดที่วัดจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลองจากกราฟรูปที่ 5.16 จะเห็นได้ว่าค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากแบบจำลองยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าความดันลดที่วัดได้จริงแต่ค่าทั้งสองมีค่าที่เข้าใกล้กันมากขึ้นเมื่อเทียบกับการเปรียบเทียบค่าความดันลดในกรณีที่มีการทำความร้อนให้แก๊สไฮโดรเจน เมื่อน้ำที่ท่วมอยู่ภายในช่องทางการไหลถูกผลักออกจากเซลล์เชื้อเพลิงไปทำให้การท่วมของน้ำนั้นน้อยลงและจากที่ได้อธิบายไว้แล้วว่าเมื่อมีการท่วมเกิดขึ้นจะส่งผลให้ค่าความดันลดที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าแตกต่างจากค่าที่วัดได้จริง ดังนั้นเมื่อมีการไล่น้ำออกจากเซลล์เชื้อเพลิงหรือมีการท่วมของน้ำน้อยลงความแตกต่างระหว่างค่าความดันลดที่คำนวณที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริงนั้นจึงควรที่จะลดน้อยลงกว่าความแตกต่างของค่าความดันลดเมื่อมีการท่วมในกรณีที่มีการให้ความร้อนซึ่งก็เป็นไปตามผลที่ได้ตามกราฟรูปที่ 5.16

จากรูปที่ 5.16 สามารถหาค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่วัดได้และค่าที่ประมาณได้ในช่วงนาที่ที่ 3 ถึงนาที่ที่ 14 ได้เท่ากับ 608 ปาสคาลโดยที่ค่าความดันลดที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลอง การที่ความดันลดที่วัดได้จริงมีค่าสูงกว่าค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองความดันลดที่เป็นสมการการไหลของแก๊สเท่านั้นเกิดจากมีน้ำท่วมภายในช่องทางเดินแก๊สซึ่งข้อมูลที่ป้อนเข้าแบบจำลองไม่ได้ปรับตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบกายภาพส่งผลให้ผลการประมาณจากการคำนวณต่ำกว่าค่าจริง ดังนั้นการที่ค่าความดันลดที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่าที่ประมาณได้จึงบ่งบอกได้ว่าเกิดการท่วมของน้ำขึ้นภายในช่องทางเดินแก๊ส

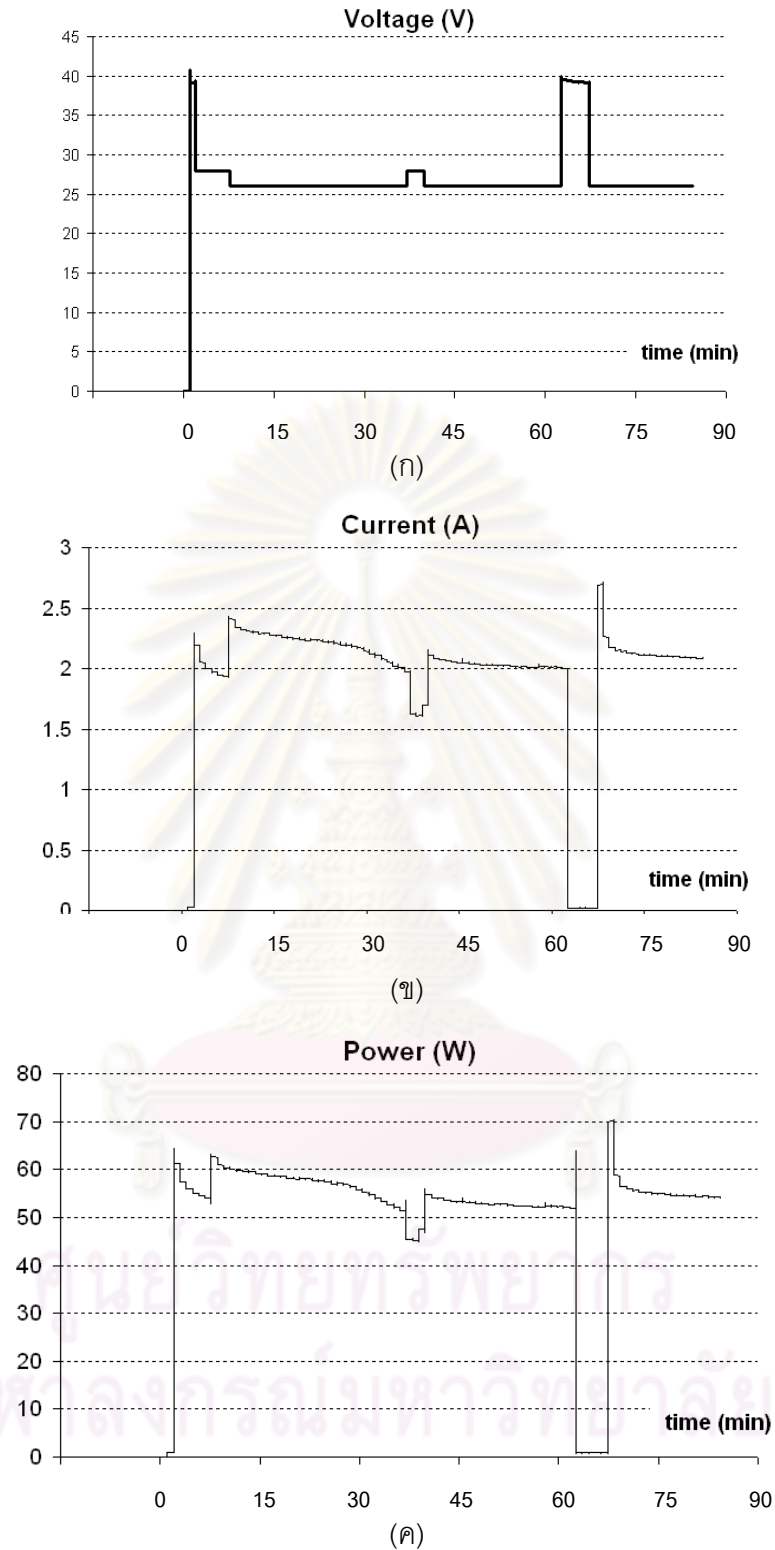
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.16 การเปรียบเทียบค่าความดันลดที่ได้จากแบบจำลอง
กับค่าความดันลดที่วัดได้จริงจากการทดลอง
หลังจากทำการไล่น้ำออกจากช่องทางการไหล

จากนั้นทำการทดสอบแบบจำลองเมื่อมีการไล่น้ำออกจากช่องทางการไหลมากขึ้นหรือการท่วมมีน้อยลง รูปที่ 5.17 – 5.18 แสดงค่าภาวะปฏิบัติการของเซลล์เชื้อเพลิงหลังจากมีการไล่น้ำโดยการปั๊มแก๊สไนโตรเจนเป็นครั้งที่สอง ถ้าพิจารณาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะเห็นว่าเมื่อการท่วมของน้ำลดลงเรื่อยๆ จะส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้นตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



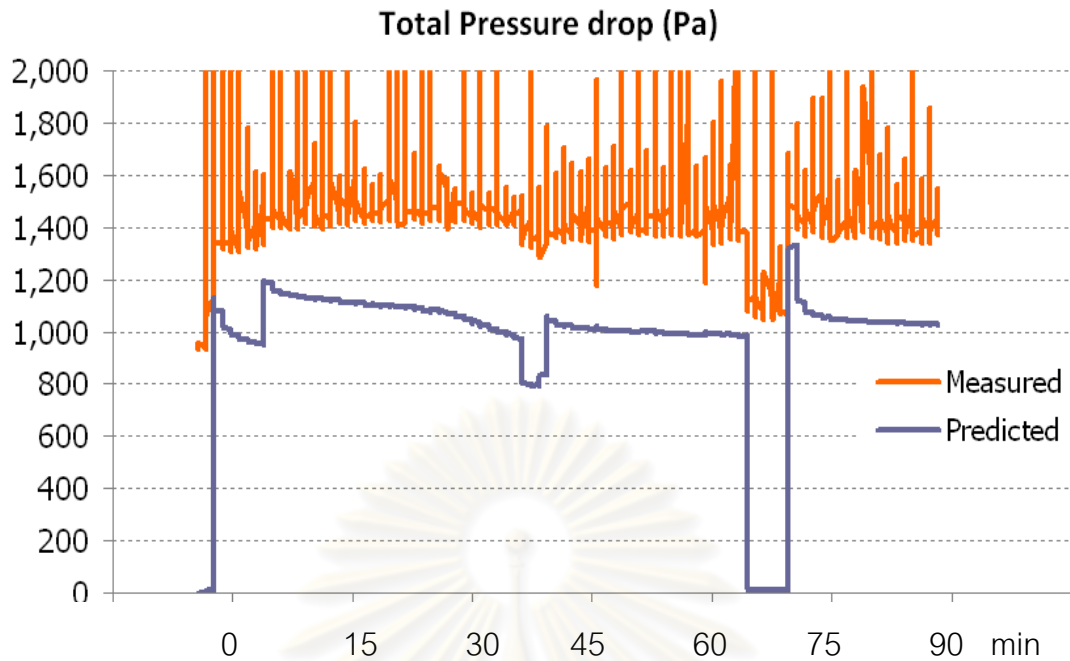
รูปที่ 5.17 (ก) การทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่หลังจากทำการไล่น้ำออกจากช่องทางการไหลเป็นครั้งที่สอง (ข) ค่ากระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหลังจากทำการไล่น้ำออกจากช่องทางการไหลเป็นครั้งที่สอง (ค) ค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหลังจากทำการไล่น้ำออกจากช่องทางการไหลเป็นครั้งที่สอง

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในกรณีที่มีการทำความชื้นให้แก่สไฮโดรเจน กรณีที่ทำการไล่น้ำออกจากช่องทางการไหลครั้งที่หนึ่งและสองตามลำดับจะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 20 วัตต์เป็น 45 วัตต์และเป็น 55 วัตต์ตามลำดับ

หลังจากทำการไล่น้ำออกจากช่องทางการไหลเป็นครั้งที่สองแล้วการเปรียบเทียบค่าความดันลดที่วัดจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลองจากกราฟรูปที่ 5.18 จะเห็นได้ว่าค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากแบบจำลองยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าความดันลดที่วัดได้จริงแต่ค่าทั้งสองมีค่าที่เข้าใกล้กันมากขึ้นเมื่อเทียบกับการเปรียบเทียบค่าความดันลดในกรณีที่ทำการไล่น้ำออกจากช่องทางการไหลครั้งที่หนึ่ง เนื่องจากน้ำที่ท่วมอยู่ในช่องทางการไหลถูกผลักออกจากเซลล์เชื้อเพลิงไปมากขึ้นจะทำให้การท่วมของน้ำมีน้อยลงกว่าเดิม ดังนั้นเมื่อมีการไล่น้ำออกจากเซลล์เชื้อเพลิงหรือมากขึ้นจึงส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างค่าความดันลดที่คำนวณที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริงนั้นจึงลดน้อยลงกว่าความแตกต่างของค่าความดันลดเมื่อมีการท่วมหรือกรณีที่ทำการไล่น้ำออกจากช่องทางการไหลครั้งแรกนั่นเองซึ่งก็เป็นไปตามผลที่ได้ตามกราฟรูปที่ 5.18

จากรูปที่ 5.18 ถ้าพิจารณาเฉพาะช่วงที่สามารถคำนวณค่าความดันลดสามารถหาค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่วัดได้และค่าที่ได้จากการประมาณได้เท่ากับ 467 ปาสคาลโดยที่ค่าความดันลดที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่าที่ประมาณได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

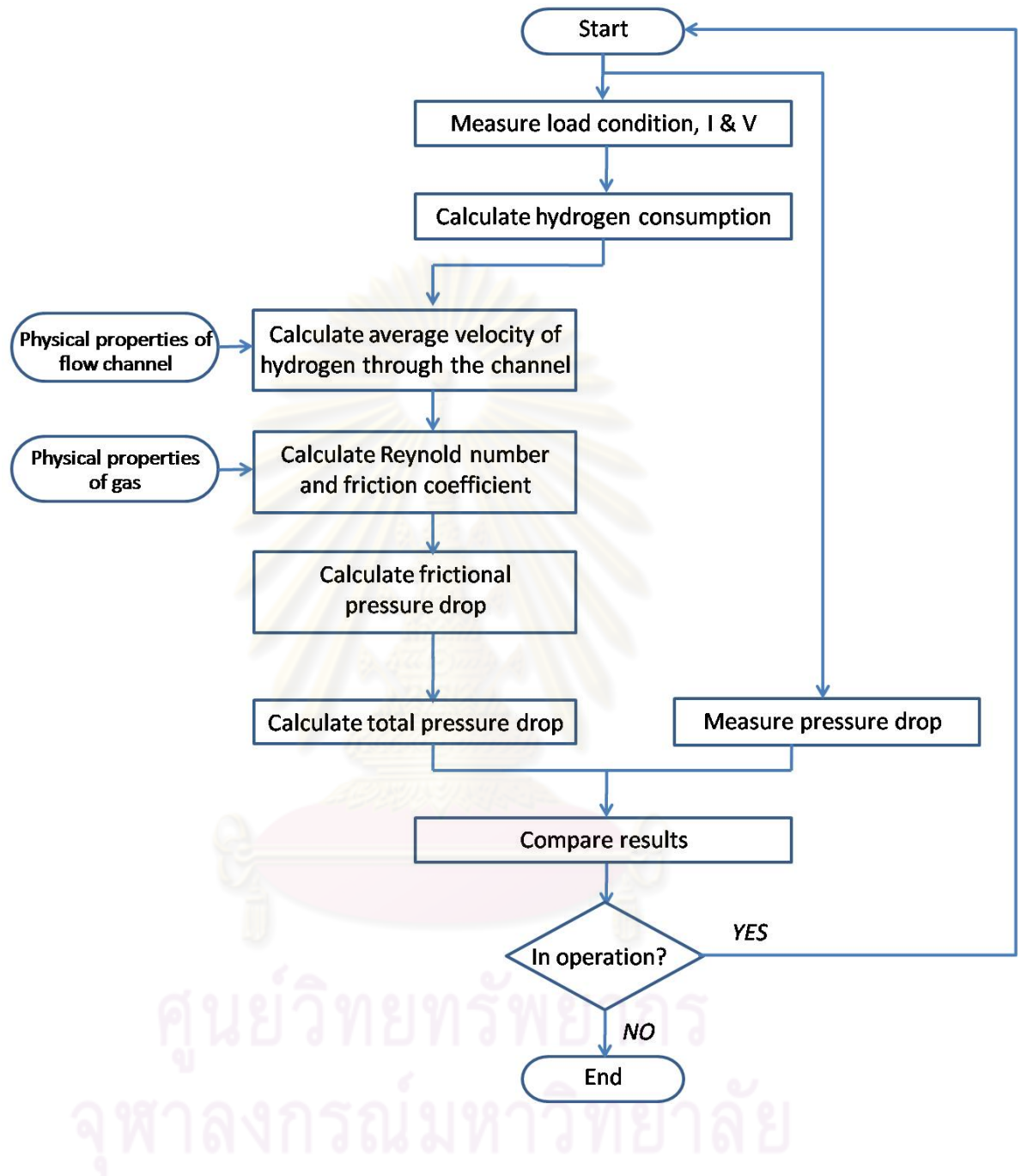


รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบค่าความดันลดที่ได้จากแบบจำลอง
กับค่าความดันลดที่วัดได้จริงจากการทดลอง
หลังจากทำการไล่น้ำออกจากช่องทางการไหลเป็นครั้งที่สอง

จากผลที่ได้แสดงมาทำให้สามารถนำการเปรียบเทียบค่าความดันลดมาใช้เพื่อเป็นตัวชี้วัดการเกิดน้ำท่วมเซลล์ได้โดยในภาวะทำงานปกติของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วค่าความดันลดที่ได้จากแบบจำลองควรมีค่าต่ำกว่าหรือมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง แต่ถ้าเกิดการท่วมของน้ำขึ้นระหว่างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วจะเกิดความแตกต่างของค่าทั้งสองขึ้นโดยค่าความดันลดที่วัดได้จริงจะมีค่าสูงกว่าค่าความดันลดที่ประมาณได้ ถ้าพิจารณาการเปรียบเทียบค่าความดันลดทั้งสองแบบของแก๊สไฮโดรเจนที่ภาวะการทำงานปกติจากกราฟรูปที่ 5.10(ข) จะเห็นได้ว่าค่าความดันลดที่วัดได้จริงมีค่าอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าค่าที่ประมาณได้จึงทำให้สามารถติดตามการเกิดน้ำท่วมได้ด้วยการติดตามค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจน โดยที่พิจารณาได้ว่าการท่วมจะเกิดขึ้นเมื่อค่าความดันลดที่วัดได้จริงมีค่าสูงกว่าค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลอง

ขั้นตอนการติดตามการเกิดน้ำท่วมภายในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแสดงได้ดัง

รูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ขั้นตอนการติดตามการเกิดน้ำท่วมภายในเซลล์เชื้อเพลิง

5.4 การติดตามการเกิดเซลล์แห้ง (Drying)

การเกิดเซลล์แห้งเป็นอีกปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากน้ำในเมมเบรนมีน้อยจนส่งผลต่อค่าการนำโปรตอนของเมมเบรน เมื่อค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนลดลงจะส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากจะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าโอห์มิกมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการทำความชื้นด้วยตัวเอง (Self-humidification) ทำให้ค่าความชื้นของเมมเบรนเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญซึ่งแตกต่างจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการให้ความชื้นกับแก๊สขาเข้า เมื่อเมมเบรนต้องทำความชื้นด้วยตัวเองแล้วทำให้เมมเบรนต้องอาศัยน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแพร่เข้ามาในโครงสร้างของเมมเบรนเองเพื่อทำให้มีความชื้นและสามารถนำโปรตอนได้ดี แนวคิดของงานวิจัยนี้คือการประมาณค่าความต้านทานโอห์มิกของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดว่าในขณะที่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงกำลังทำงานอยู่นั้นเมื่อใดที่เกิดเซลล์แห้งขึ้นโดยพิจารณาจากค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นก็จะมีโอกาสที่เมมเบรนจะแห้งได้ เมื่อประมาณค่าความต้านทานได้แล้วพารามิเตอร์ที่จะเป็นตัวชี้วัดที่ชัดเจนอีกตัวหนึ่งก็คือค่าความชื้นของเมมเบรน (Membrane water content) โดยปรากฏการณ์เซลล์แห้งจะเกิดขึ้นเมื่อเมมเบรนมีปริมาณน้ำอยู่น้อยกว่า 4 โมลของน้ำต่อจำนวนหมู่กรดซัลโฟนิก [19]

5.4.1 การประมาณค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้โดยสมการไฟฟ้าโพลารไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงตามสมการที่ 5.5

$$E_{Cell} = E_{T,P} - \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) - i \cdot R_{ohm} - \frac{RT}{nF} \left(\frac{i_{lim}}{i_{lim} - i}\right) \quad \dots(5.5)$$

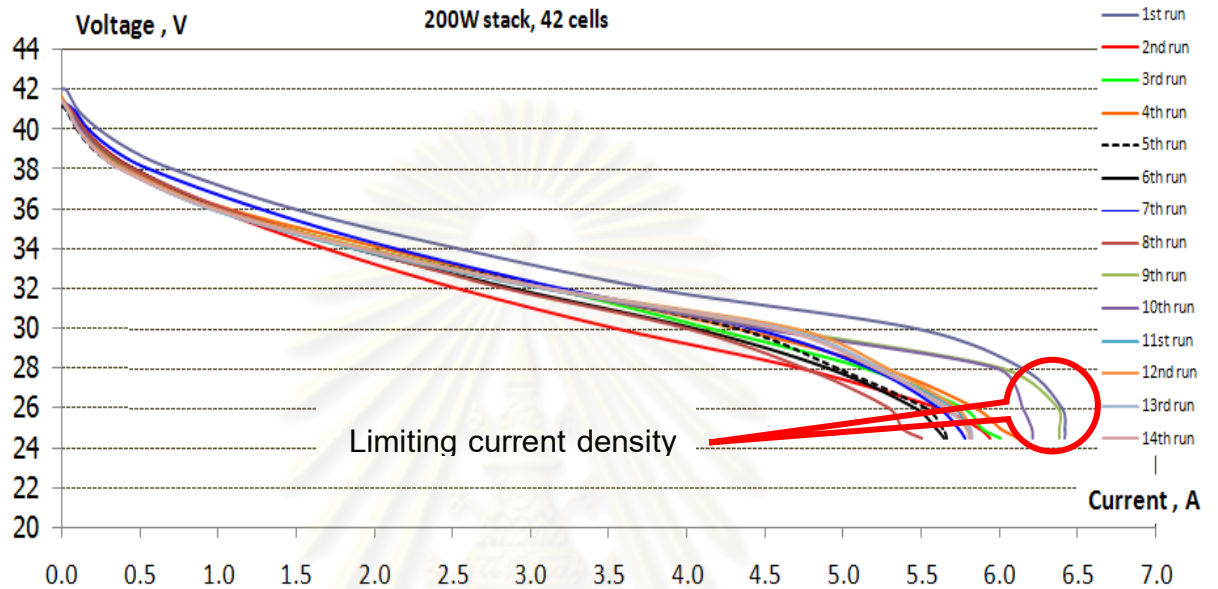
โดยที่ E_{Cell} คือ ศักย์ไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อมีการดึงความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้าเท่ากับ i

$E_{T,P}$ คือ ศักย์ไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงทางทฤษฎี

เนื่องจากการทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นตัวแปรที่ทราบค่า รวมทั้งมีการประมาณค่า i_0 และ α ซึ่งสมมติให้พารามิเตอร์ทั้งสองเป็นค่าคงที่ของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นในการคำนวณค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงต้องทราบ

ค่าพารามิเตอร์ที่เหลืออีกหนึ่งตัวคือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด (Limiting current density, i_{lim}) ซึ่งไม่ได้ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเหมือนกับการประมาณค่า i_0 และ α เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสามารถหาได้จากกราฟโพลาร์ไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวรูปที่ 5.20 โดยที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัดแสดงได้ตามตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.20 การหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด

ตารางที่ 5.4 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด

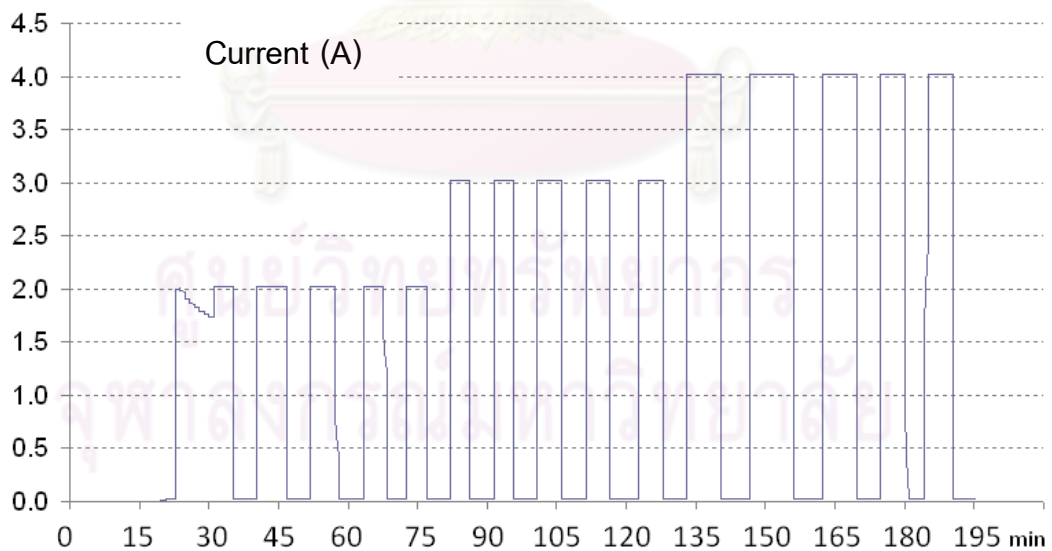
การทดลองที่	ค่ากระแสไฟฟ้าจำกัด (A)	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด (mAcm ⁻²)
1	6.42	338
2	6.38	336
3	6.22	327
Average	6.34	334
Standard deviation	0.11	5.57

จากกราฟจะเห็นได้ว่าในช่วงกระแสไฟฟ้าสูงกราฟ โพลาร์ไรเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะตกลงอย่างรวดเร็วหรือค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุด จากรูปที่ 5.20 แสดงให้เห็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด ที่ได้จากการทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสามครั้ง สำหรับการ

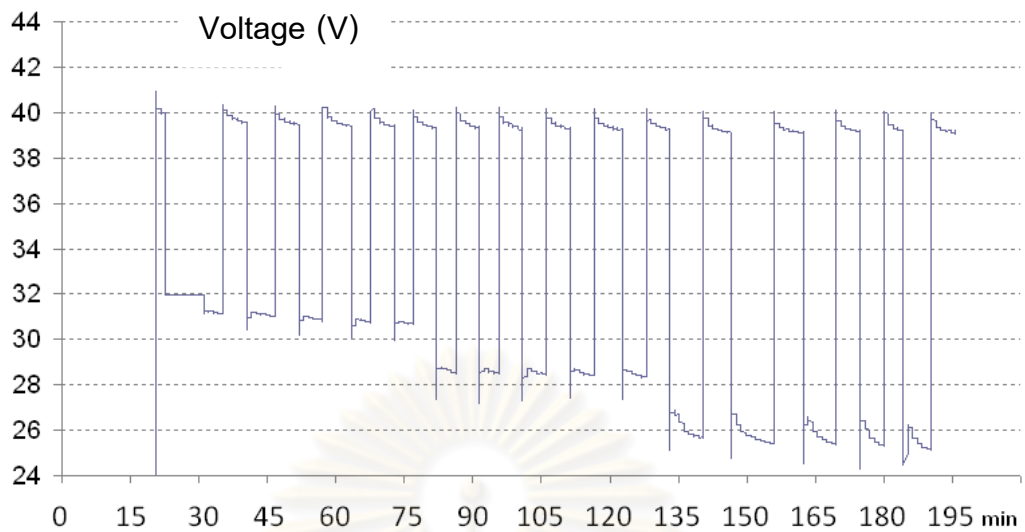
ทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงครั้งอื่นๆ ที่ไม่เห็นช่วงของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัด เนื่องจาก การทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถที่จะทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า 24.5 โวลต์ได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถดึงกระแสไฟฟ้าที่สูงจนถึงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัดได้

ค่าเฉลี่ยของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัดของการทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสามครั้งมีค่าเท่ากับ 6.34 แอมแปร์ หรือเท่ากับ 334 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัดอาจเปลี่ยนแปลงได้เมื่ออัตราการป้อนอากาศเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากระบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้จะมีพัดลมป้อนอากาศติดมาพร้อมกับตัวเซลล์เชื้อเพลิงแต่ พัดลมตัวนี้ใช้งานไม่ได้จึงได้นำพัดลมป้อนอากาศตัวอื่นมาใช้แทนซึ่งไม่ได้ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมของระบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ด้วยเหตุผลนี้จึงอาจส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่เป็นไปตามค่าสูงสุดที่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตได้ (200 วัตต์ที่กระแส 8.4 แอมแปร์) และส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัดมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนด

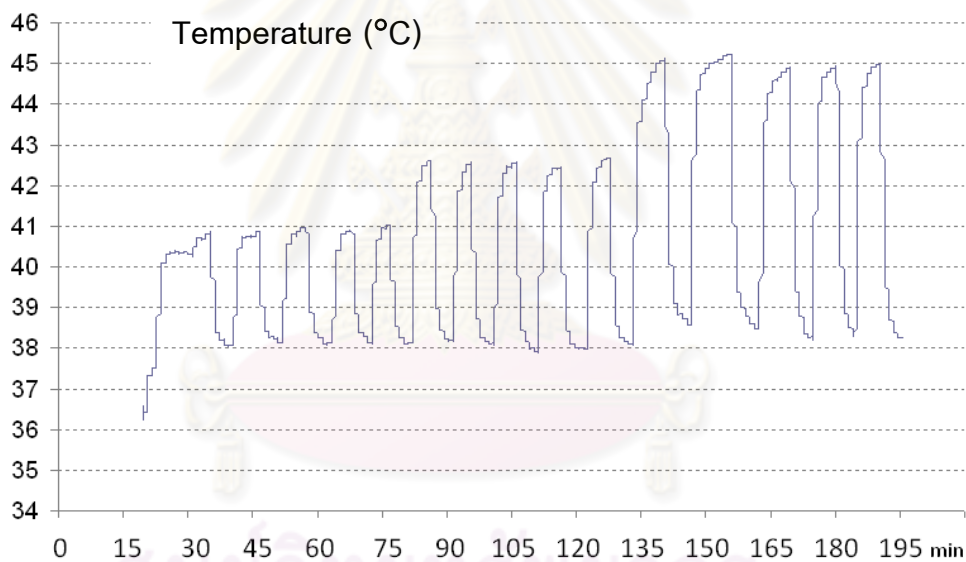
เมื่อทราบค่าคงที่ทุกตัวในสมการที่ 5.5 แล้วทำให้สามารถคำนวณค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยคำนวณจากค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแส ไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง โดยทำการทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบ กระแสไฟฟ้าคงที่ กราฟรูปที่ 5.21(ก) แสดงค่ากระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีค่าคงที่ต่างๆ กันที่ 2, 3 และ 4 แอมแปร์ตามลำดับ ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่กระแสไฟฟ้าทั้งสามค่าแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.21(ข)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.21 (ก) การทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบการตัดกระแสไฟฟ้า (Current interrupt)
 (ข) การตอบสนองของค่าศักย์ไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (ค) การตอบสนองของค่าอุณหภูมิของ
 เซลล์เชื้อเพลิง

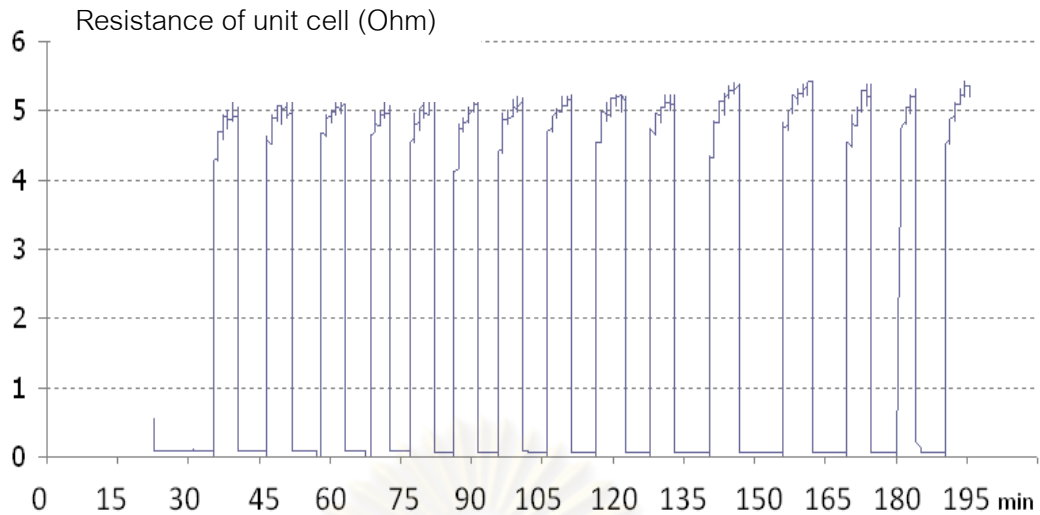
อุณหภูมิของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแสดงได้ดังรูปที่ 5.21(ค) จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นแต่ในช่วงที่ไม่ได้ดึงกระแสไฟฟ้าค่าอุณหภูมิจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ค่าอุณหภูมิของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี ($E_{T,P}$) โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ความดันคงที่ 0.4 บาร์

ความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (R_{ohm}) ที่คำนวณได้จากแบบจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.22 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมากระหว่างช่วงที่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าและช่วงที่ไม่ได้ผลิตกระแสไฟฟ้าเนื่องจากแบบจำลองค่าความต้านทานจะมีความสัมพันธ์อยู่กับค่ากระแสไฟฟ้าทำให้ในช่วงที่ไม่ได้ผลิตกระแสไฟฟ้าแบบจำลองจึงไม่สามารถหาค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจค่าความต้านทานที่คำนวณได้จากแบบจำลองในช่วงที่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าเท่านั้น ค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังกราฟรูปที่ 5.22 และ 5.23 ความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้เป็นความต้านทาน 3 ประเภทด้วยกันคือ

- ความต้านทานของเมมเบรน (Ionic resistance)
- ความต้านทานของส่วนประกอบอื่นที่ไม่ใช่เมมเบรน (Electrical resistance)
- ความต้านทานของผิวสัมผัส (Interfacial contact resistance) ได้แก่ความต้านทานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการนำแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วมาประกบกันและการประกบชั้นแก๊สแพร่และแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วเข้าด้วยกันทำให้มีรอยต่อและเกิดเป็นความต้านทานขึ้น

ความต้านทานของส่วนประกอบอื่นที่ไม่ใช่เมมเบรนได้แก่ความต้านทานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วและความต้านทานของชั้นแก๊สแพร่ ความต้านทานส่วนนี้สามารถสมมติได้ว่ามีค่าน้อยกว่าความต้านทานแบบอื่นมากและสามารถละเลยได้ [1]

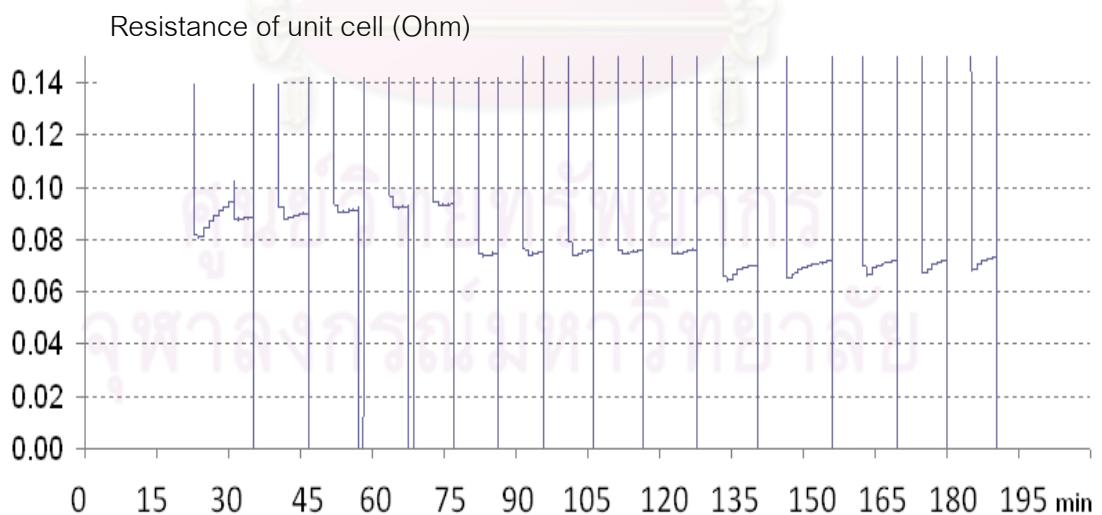
สำหรับความต้านทานอีกสองส่วนคือความต้านทานของเมมเบรนและความต้านทานของผิวสัมผัสนั้นทั้งสองส่วนมีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันทำให้ไม่สามารถละเลยค่าความต้านทานของผิวสัมผัสได้ [20, 21] ค่าความต้านทานของผิวสัมผัสจะขึ้นอยู่กับแรงอัดประกบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและคุณสมบัติของชั้นแก๊สแพร่และแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วแต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทดสอบวัดค่าความต้านทานของผิวสัมผัสโดยการถอดประกบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงด้วยข้อจำกัดนี้จึงตั้งสมมติฐานให้ค่าความต้านทานของผิวสัมผัสมีค่าคงที่และค่าความต้านทาน (R_{ohm}) ที่คำนวณได้จากแบบจำลองเป็นค่าความต้านทานรวมของความต้านทานของเมมเบรนและความต้านทานของผิวสัมผัส



รูปที่ 5.22 ค่าความต้านทานที่คำนวณได้จากแบบจำลอง

เมื่อคำนวณค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้แล้วทำให้สามารถประมาณค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเมมเบรนและปริมาณน้ำในเมมเบรนตามสมการที่ 5.6

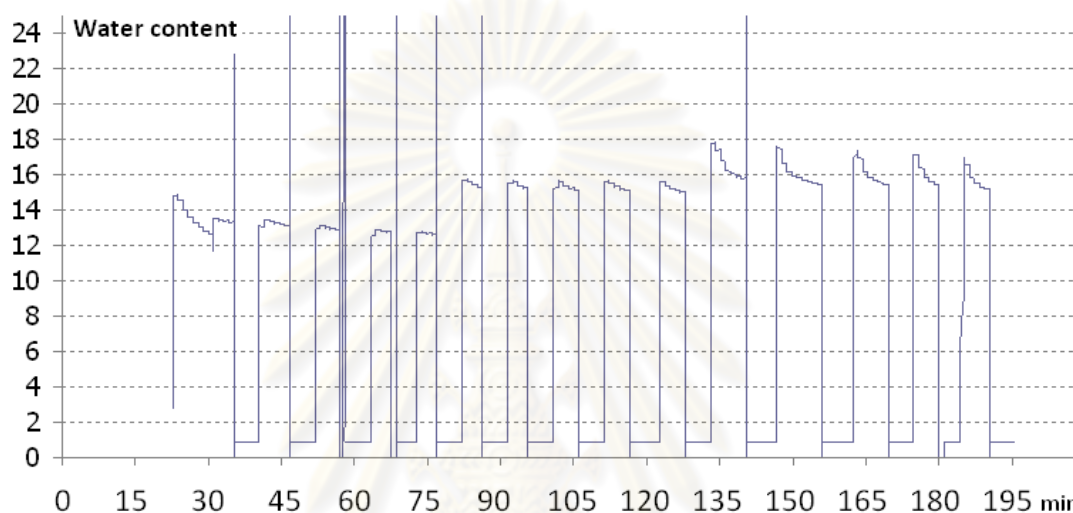
$$\lambda = \frac{1}{0.00514} \left\{ \frac{t_m}{A_m R_m} \exp \left[1268 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{303} \right) \right] + 0.00326 \right\} \quad \dots(5.6)$$



รูปที่ 5.23 ค่าความต้านทานที่คำนวณได้จากแบบจำลอง

ในช่วงที่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้า

ค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนที่คำนวณได้แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.24 จากผลที่ได้ถ้าพิจารณาในช่วงที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าจะเห็นว่าค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คืออยู่ในช่วงน้อยกว่า 22 โมลของน้ำต่อโมลของหมู่กรดซัลโฟนิก โดยเช่นเดียวกับแบบจำลองค่าความต้านทานสำหรับค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนนั้นสามารถทำนายได้เพียงในช่วงที่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าเท่านั้น



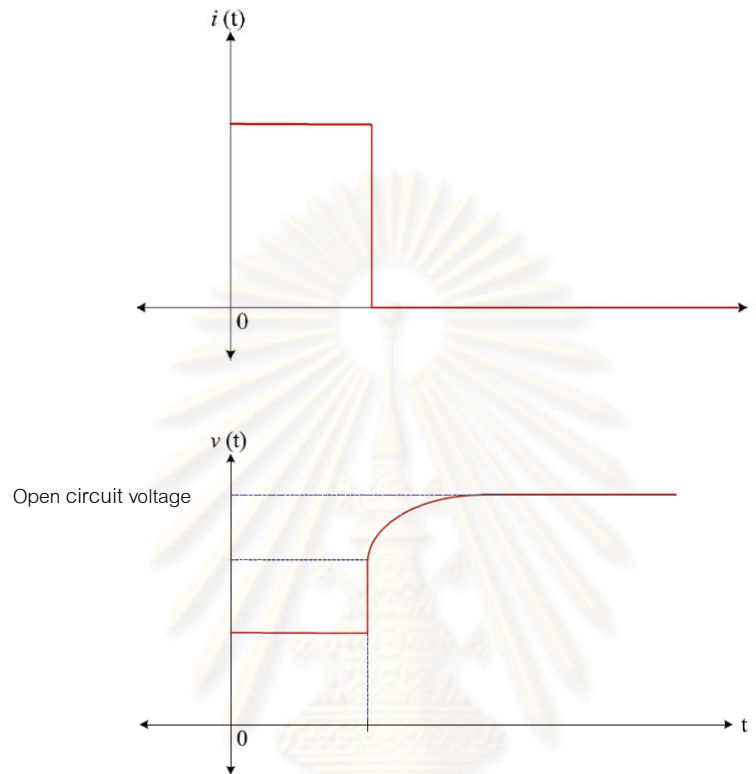
รูปที่ 5.24 ปริมาณน้ำในเมมเบรนที่ประมาณได้จากแบบจำลอง

การทดสอบแบบจำลองค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำได้โดยการทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงด้วยวิธีการตัดกระแสไฟฟ้า (Current interrupt method) โดยแบบจำลองจะสามารถเชื่อถือได้เมื่อค่าความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีการตัดกระแสไฟฟ้าตรงกับค่าที่แบบจำลองคำนวณได้

5.4.2 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ภาวะปกติ (Normal operating condition)

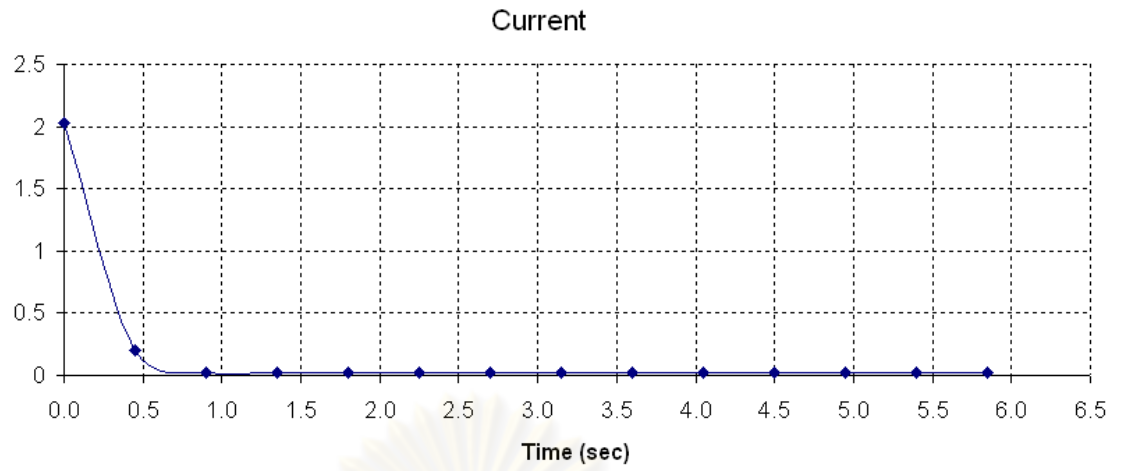
การทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อวัดค่าความต้านทานนั้นสามารถทำได้โดยวิธีการตัดกระแสไฟฟ้า (Current interrupt method) ในขณะที่มีการดึงกระแสไฟฟ้าจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงอยู่นั้นศักย์ไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ถ้าทำการตัดกระแสไฟฟ้าให้เป็นศูนย์ทันทีจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงจนมีค่าเท่ากับค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage) ทันทีที่ตัดกระแสไฟฟ้านั้นจะเห็นการตอบสนองของค่า

ศักย์ไฟฟ้าโดยค่าศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงนี้เองที่เป็นผลของการลดลงของศักย์ไฟฟ้าลดแบบโอห์มิก ดังนั้นจึงทำให้สามารถนำศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่วนนี้มาคำนวณหาค่าความต้านทานโอห์มิกได้ รูปที่ 5.25 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการตัดกระแสไฟฟ้า

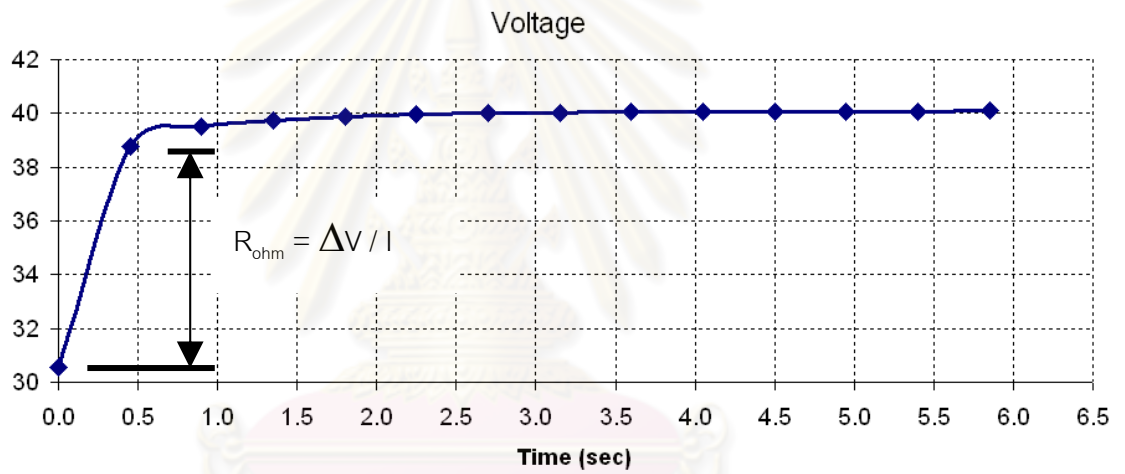


รูปที่ 5.25 ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (ตามทฤษฎี)

การทดสอบแบบจำลองค่าความต้านทานทำโดยการทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่กระแสไฟฟ้า 2, 3 และ 4 แอมแปร์เช่นเดียวกับที่ทดสอบตามกราฟรูปที่ 5.21(ก) เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่ประมาณได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริง เมื่อทำการทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงด้วยวิธีการตัดกระแสไฟฟ้าแสดงแล้วผลที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 5.26 – 5.28 สำหรับการตัดกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าโหลดไฟฟ้าซึ่งจะมีช่วงเวลาในการตอบสนองต่อการสั่งงานอยู่ช่วงหนึ่ง (ตามที่ระบุไว้ในเอกสารคู่มือการใช้งาน) ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าไม่ได้ลดลงเป็นศูนย์ทันทีที่บ่อนคำสั่งตามที่แสดงในรูปที่ 5.26(ก)



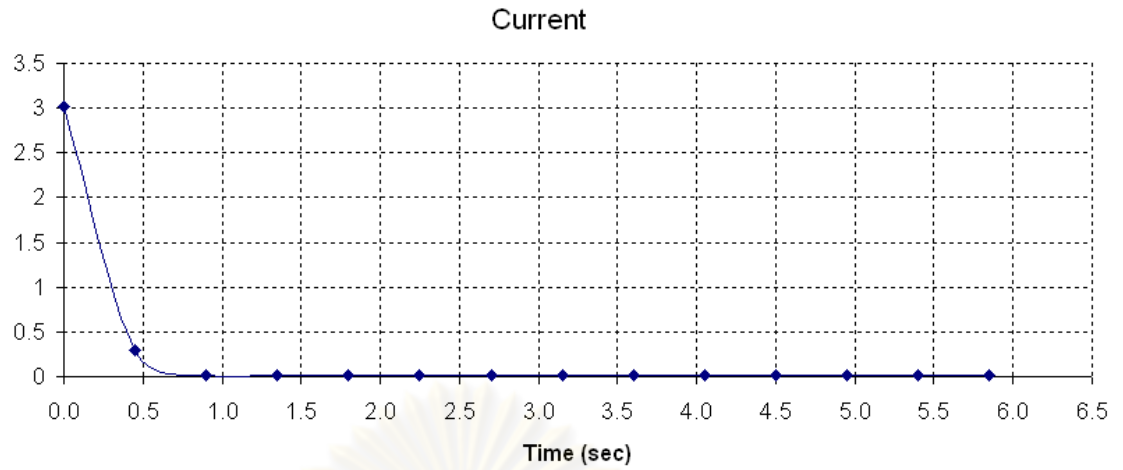
(ก)



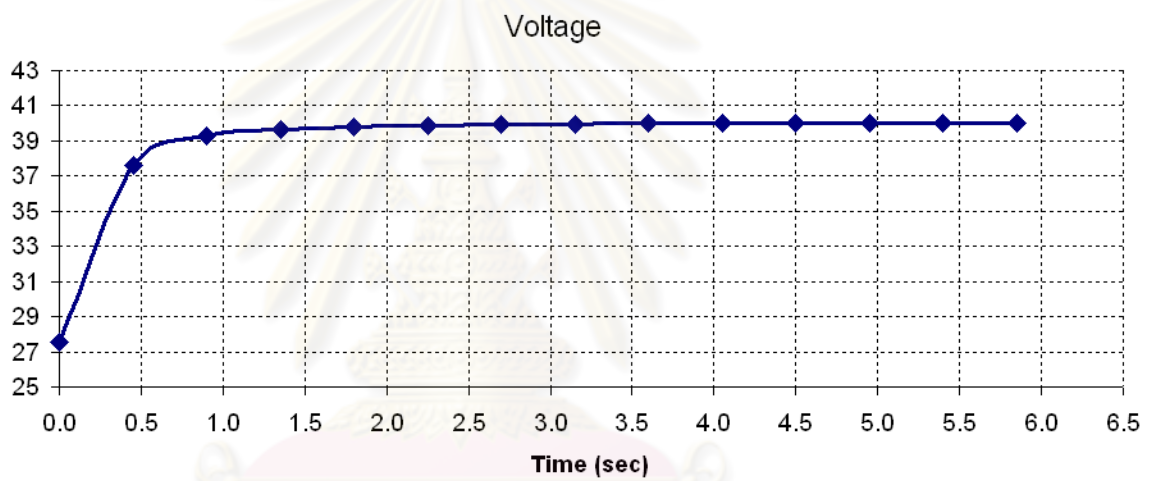
(ข)

รูปที่ 5.26 (ก) การตัดกระแสไฟฟ้าที่ 2 แอมแปร์
 (ข) การตอบสนองของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อการตัดกระแสไฟฟ้าที่ 2 แอมแปร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

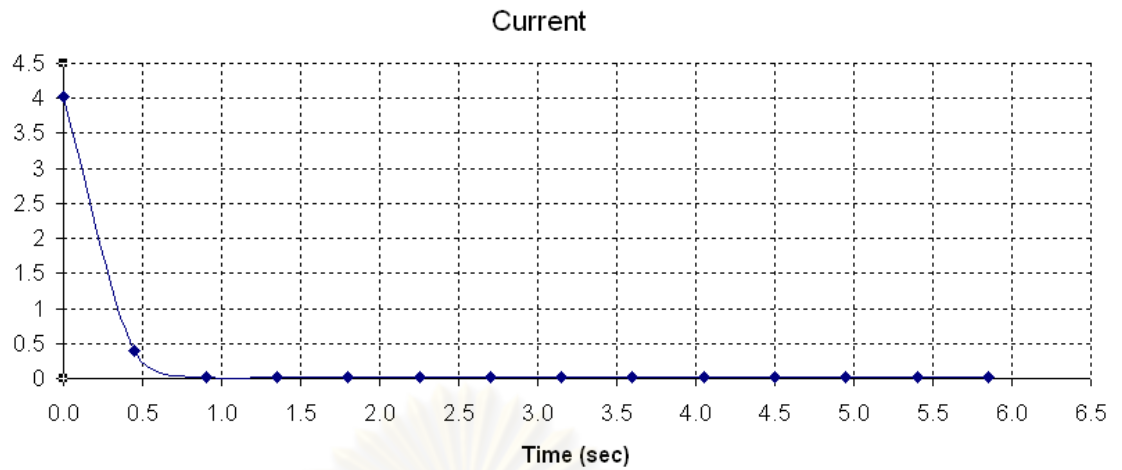


(ข)

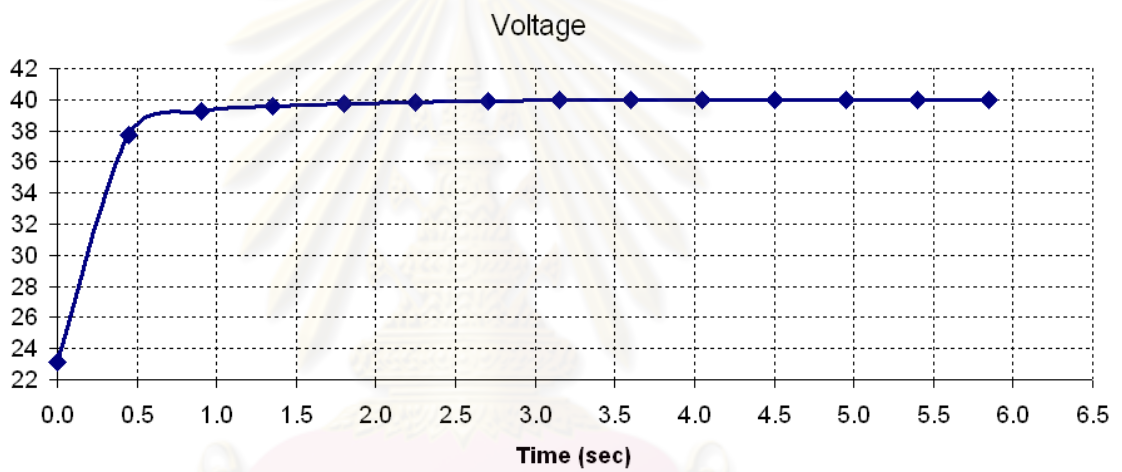
รูปที่ 5.27 (ก) การตัดกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์

(ข) การตอบสนองของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อการตัดกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.28 (ก) การตัดกระแสไฟฟ้าที่ 4 แอมแปร์

(ข) การตอบสนองของค่าศักย์ไฟฟ้าต่อการตัดกระแสไฟฟ้าที่ 4 แอมแปร์

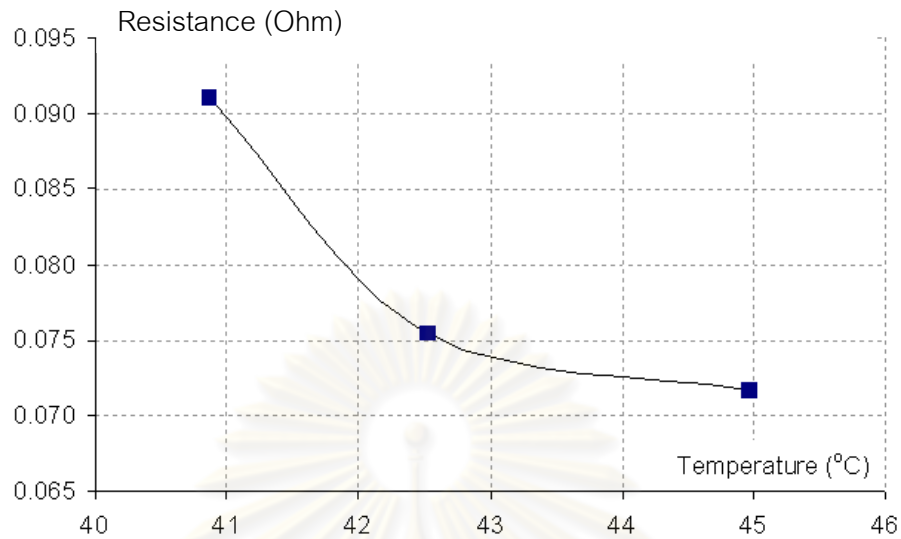
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความต้านทานที่วัดได้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลอง (รูปที่ 5.23) โดยนำค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองมาหาค่าเฉลี่ยที่ภาวะปกติแล้วเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานที่วัดได้ การเปรียบเทียบค่าทั้งสองแสดงได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่วัดโดยวิธีการตัดกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทานที่ได้จากแบบจำลอง

Current		ΔV	R_{ohm} (Stack)	R_{ohm} (Unit cell)	ค่าเฉลี่ย R_{ohm} (Model)	Difference
A	A/cm ²	V	Ω	Ω	Ω	%
2	0.11	8.37	4.18	0.100	0.091	7
		8.24	4.12	0.098		
		8.16	4.08	0.097		
		8.36	4.18	0.099		
		8.06	4.03	0.096		
		AVERAGE =	0.098			
3	0.16	10.34	3.45	0.082	0.076	11
		11.01	3.67	0.087		
		10.11	3.37	0.080		
		10.49	3.50	0.083		
		11.35	3.78	0.090		
		AVERAGE =	0.085			
4	0.21	14.56	3.64	0.087	0.072	15
		13.25	3.31	0.079		
		14.22	3.56	0.085		
		15.08	3.77	0.090		
		13.94	3.48	0.083		
		AVERAGE =	0.085			

จากตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าค่าความต้านที่วัดได้จริงมีแนวโน้มลดลงเมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น สาเหตุที่ความต้านทานมีแนวโน้มลดลงตามค่ากระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นนั้นอาจอธิบายได้ด้วยการถ่ายโอนโมเลกุลของน้ำในเมมเบรนเนื่องจากเมื่อมีการผลิตกระแสไฟฟ้ามากขึ้นก็จะมีน้ำเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากตามไปด้วย



รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานที่วัดได้กับ
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง

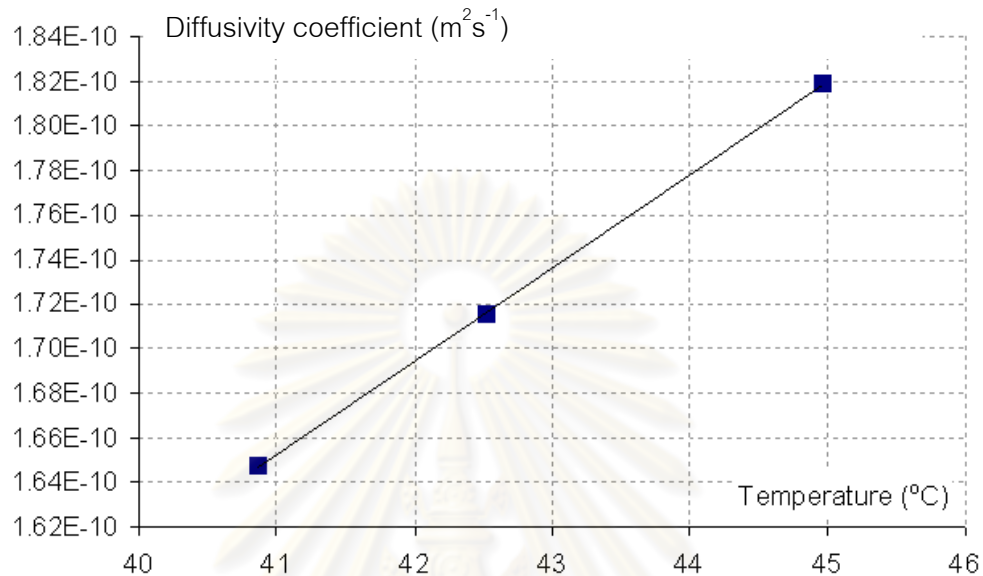
รูปที่ 5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานที่วัดได้กับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมมเบรนสูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 5.7 และ 5.8 [22]

$$D_w = D_\lambda \exp\left(2416\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{ST}}\right)\right) \quad \dots(5.7)$$

โดยที่ D_w คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมมเบรน
 T_{ST} คือ อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง
 λ คือ ปริมาณน้ำในเมมเบรน (Membrane water content)

$$D_\lambda = \begin{cases} 10^{-10}, & \lambda < 2 \\ 10^{-10}(1 + 2(\lambda_{an} - 2)), & 2 \leq \lambda \leq 3 \\ 10^{-10}(3 - 1.67(\lambda_{an} - 3)), & 3 < \lambda < 4.5 \\ 1.25 \times 10^{-10}, & \lambda \geq 4.5 \end{cases} \quad \dots(5.8)$$

จากสมการที่ 5.7 และ 5.8 สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำได้ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมมเบรนกับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง



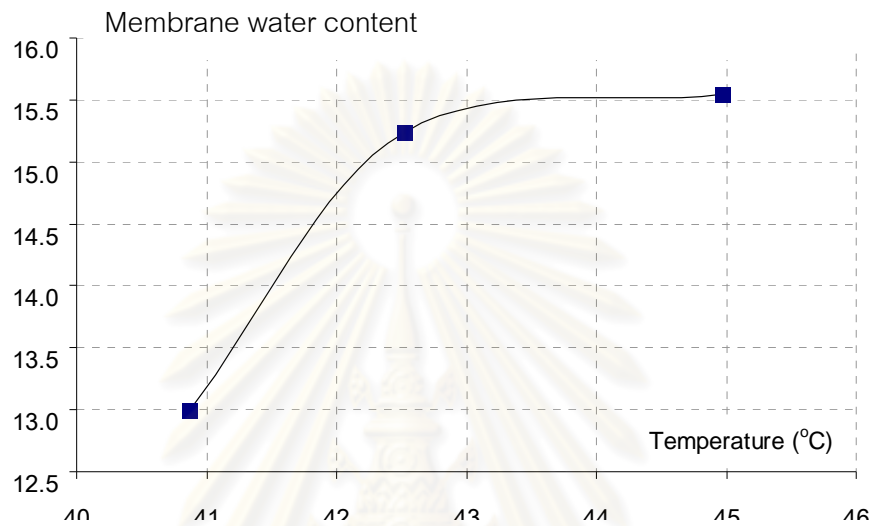
รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมมเบรนกับอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง

เมื่ออุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้นจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมีค่ามากขึ้นส่งผลให้น้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางฝั่งแคโทดสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปสู่ฝั่งแอโนดได้มากขึ้นทำให้ในเมมเบรนมีน้ำมากขึ้นตามไปด้วยและเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าความต้านทานของเซลล์ลดลงเมื่ออุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น ในทางกลับกันพิจารณาการถ่ายโอนน้ำจากแอโนดผ่านเมมเบรนไปสู่ฝั่งแคโทดจากสมการที่ 5.9 [22] จะได้ว่าค่า Electro-osmotic drag coefficient จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น

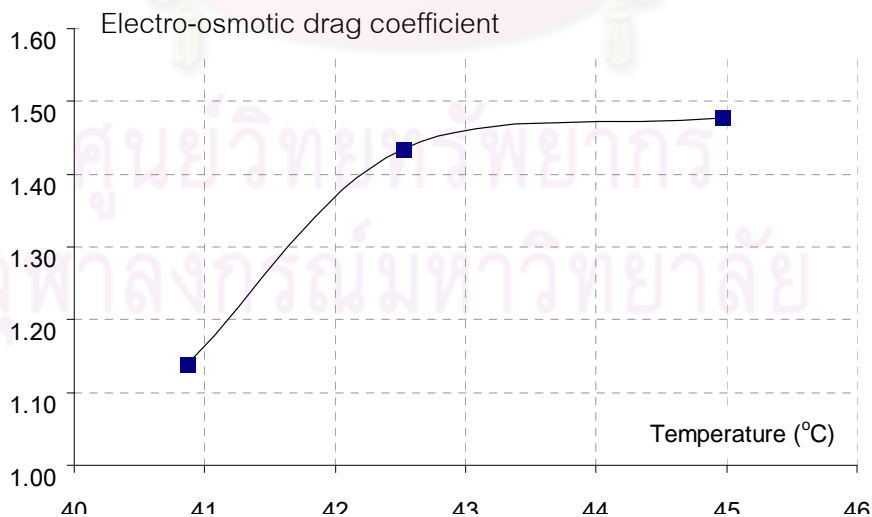
$$n_d = 0.0029\lambda^2 + 0.05\lambda - 3.4 \times 10^{-19} \quad \dots(5.9)$$

โดยที่ n_d คือ Electro-osmotic drag coefficient

จากผลการวัดค่าคุณสมบัติของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและการประมาณค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนที่แสดงในกราฟรูปที่ 5.24(ค) และ 5.27 ตามลำดับ สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนและคุณสมบัติของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังกราฟรูปที่ 5.31 และจากสมการที่ 5.9 ทำให้สามารถประมาณค่า Electro-osmotic drag coefficient ได้ดังกราฟรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำในเมมเบรน
กับคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง



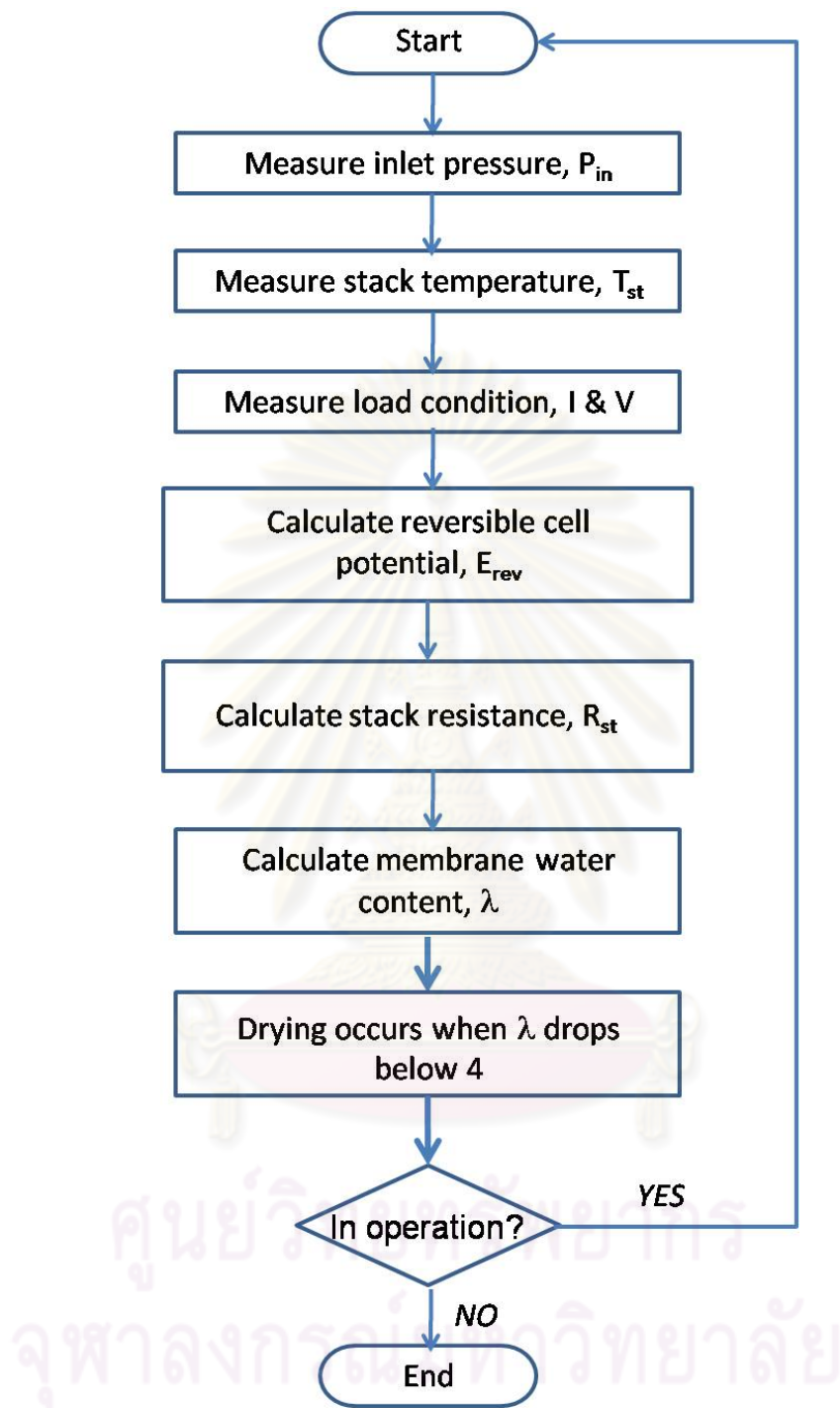
รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Electro-osmotic drag coefficient
กับคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง

ค่า Electro-osmotic drag coefficient ที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้มีน้ำเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนจากฝั่งแอโนดไปทางฝั่งแคโทดมากขึ้นส่งผลให้ในเมมเบรนมีน้ำมากขึ้นตามไปด้วย การที่น้ำสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนทั้งจากทางแคโทดไปแอโนด (รูปที่ 5.33) และจากแอโนดไปแคโทด (รูปที่ 5.35) ได้มากขึ้นทำให้ในส่งผลให้ในเมมเบรนมีน้ำอยู่มากขึ้น ปริมาณน้ำที่อยู่ในเมมเบรนนี้เองที่ส่งผลต่อค่าการนำโปรตอนของเมมเบรน โดยที่ค่าการนำโปรตอนจะมีค่ามากเมื่อเมมเบรนมีน้ำอยู่มากขึ้นและค่าการนำโปรตอนที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไอโอมิกของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ด้วยเหตุนี้จึงช่วยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงในตารางที่ 5.5 ได้

จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานที่วัดได้จริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง ทั้งนี้ค่าความต้านทานที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีตัดกระแสไฟฟ้าอาจคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากสาเหตุของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลซึ่งต้องเก็บข้อมูลที่ความเร็วสูงระดับมิลลิวินาที เมื่อค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองและมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงแล้วทำให้สามารถนำค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงไปคำนวณหาปริมาณน้ำในเมมเบรนซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเกิดเซลล์แห้งได้

ถ้าพิจารณารูปที่ 5.27 จะเห็นได้ชัดเจนว่าค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนมีค่าอยู่ในช่วง 12 – 18 โมลของน้ำต่อจำนวนของหมู่ซัลโฟนิก ซึ่งบ่งบอกว่าเมมเบรนยังคงมีน้ำอยู่เป็นปริมาณมากพอและไม่เกิดการแห้งของเมมเบรน ทั้งนี้เนื่องจากภาวะเซลล์แห้งจะเกิดขึ้นเมื่อค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนลดลงน้อยกว่า 4 [19] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถติดตามการเซลล์แห้งได้ด้วยการติดตามค่าปริมาณน้ำในเมมเบรน โดยที่พิจารณาได้ว่าการแห้งของเซลล์มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้เมื่อค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนมีค่าต่ำกว่า 12 และการแห้งของเซลล์จะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนต่ำกว่า 4 ขั้นตอนการติดตามการเกิดเซลล์แห้งสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 5.33

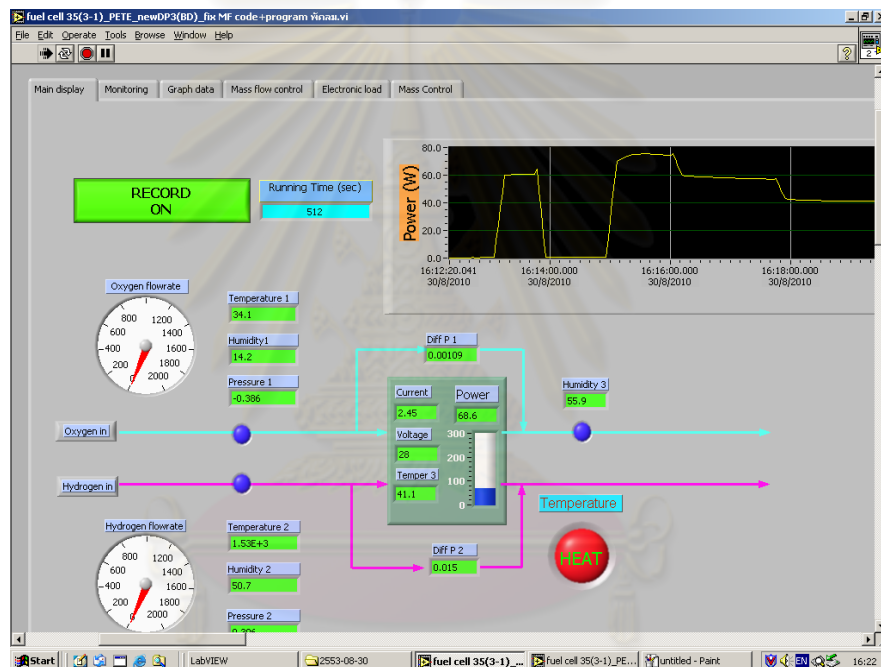
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.33 ขั้นตอนการติดตามการเกิดการแห้งของเซลล์เชื้อเพลิง

5.5 โปรแกรมตรวจติดตามหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

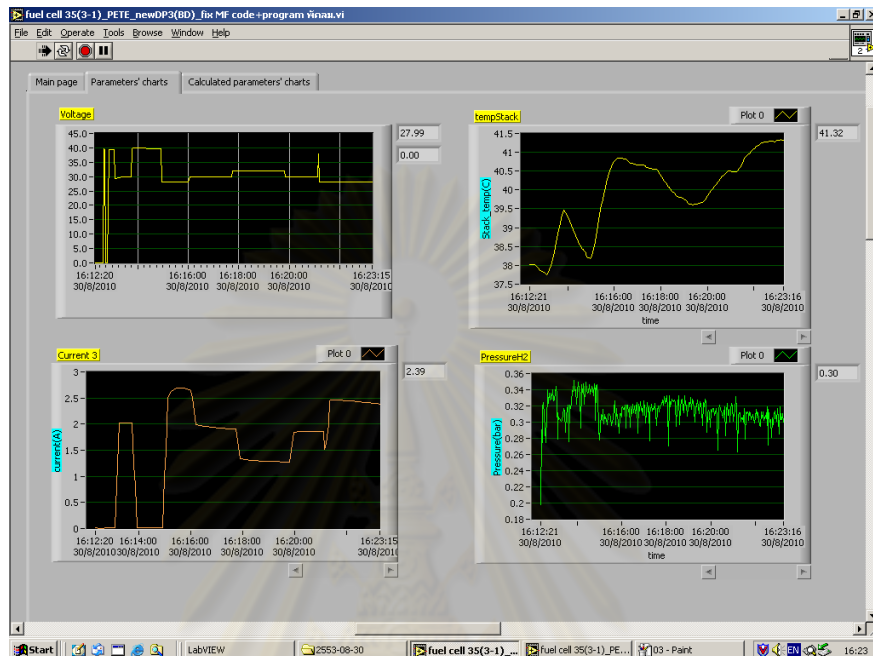
แบบจำลองสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงถูกนำมาเขียนลงบนโปรแกรม LabVIEW™ เพื่อทำงานร่วมกับระบบควบคุมเซลล์เชื้อเพลิงและระบบรวบรวมข้อมูลที่ได้ถูกพัฒนาไว้ก่อนแล้วทำให้สามารถตรวจติดตามชั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้ในขณะทำงานจริง เมื่อเปิดโปรแกรมจะเห็นหน้าจอหลักของโปรแกรมที่แสดงข้อมูลปฏิบัติการต่างๆ ในรูปแบบตัวเลขซึ่งถูกออกแบบไว้โดย *ราชวัดลม* [9] โปรแกรมนี้ถูกออกแบบไว้สำหรับการใช้งานชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนโดยป้อนแก๊สผ่านเครื่องควบคุมการไหลของแก๊ส



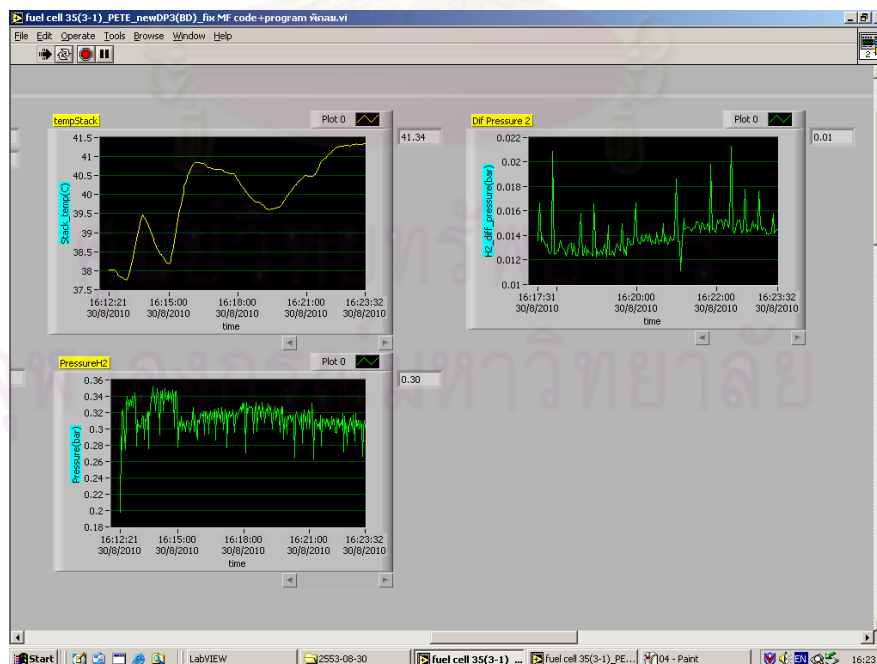
รูปที่ 5.34 หน้าหลักของโปรแกรมควบคุมการทำงานและรวบรวมข้อมูล
สำหรับชั้นเซลล์เชื้อเพลิง [11]

ในงานวิจัยนี้ใช้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงทางการค้าขนาด 200 วัตต์ที่มีตัวควบคุมการทำงานติดมาด้วยอยู่แล้วและแก๊สป้อนเข้ามีเพียงแก๊สไฮโดรเจนเท่านั้น ดังนั้นการใช้งานโปรแกรมควบคุมชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีการควบคุมเครื่องมือเพียงชนิดเดียวเท่านั้นคือโหลดไฟฟ้า โดยที่การทำงานของวาล์วป้อนแก๊สไฮโดรเจนและวาล์วเพิร์จจะถูกควบคุมโดยตัวควบคุมของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเองอยู่แล้ว และเพื่อให้โปรแกรมสามารถทำงานร่วมกับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200

วัดที่ได้งานวิจัยนี้ได้แก้ไขเพิ่มเติมในบางส่วนได้แก่ การแสดงผลของข้อมูล สำหรับข้อมูลปฏิบัติการที่วัดได้แก่กระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง ความดันและความดันลดของแก๊ส ซึ่งข้อมูลเหล่านี้แสดงอยู่ในหน้า Parameter chart ตามรูปที่ 5.35 และ 5.36



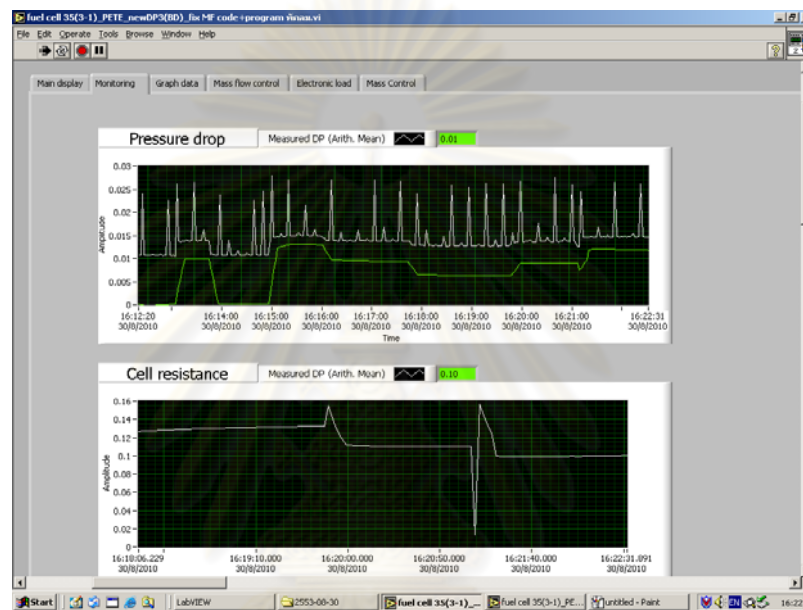
รูปที่ 5.35 หน้าแสดงข้อมูลปฏิบัติการของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์



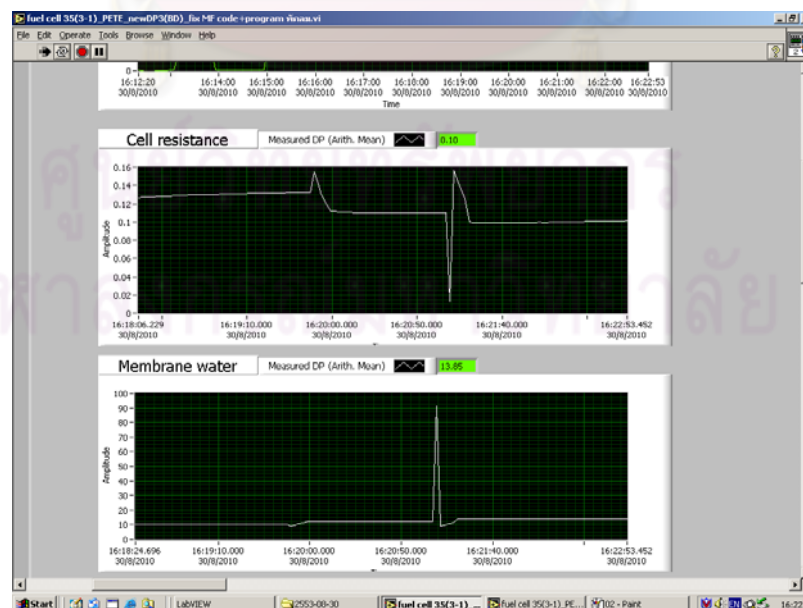
รูปที่ 5.36 หน้าแสดงข้อมูลปฏิบัติการของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์ (ต่อ)

การพัฒนาโปรแกรมอีกส่วนคือ การเพิ่มระบบตรวจติดตามสำหรับชั้นเซลล์ เชื้อเพลิงเข้าไปในโปรแกรม โดยเพิ่มหน้าต่างโปรแกรมอีก 1 หน้าคือ Monitoring page ตามรูปที่ 5.37 หน้านี้แสดงข้อมูล 3 อย่างด้วยกันคือ

- ความดันลดระหว่างที่ค่าวัดได้จริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองเพื่อเป็นการตรวจติดตามการเกิดน้ำท่วม
- ค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงและค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนเพื่อเป็นการตรวจติดตามการเกิดเซลล์แห้ง

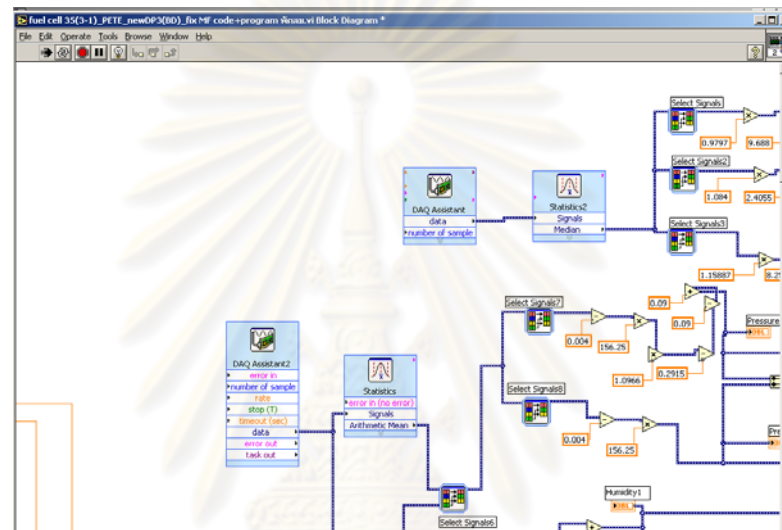


รูปที่ 5.37 หน้าแสดงการตรวจติดตามค่าความดันลด



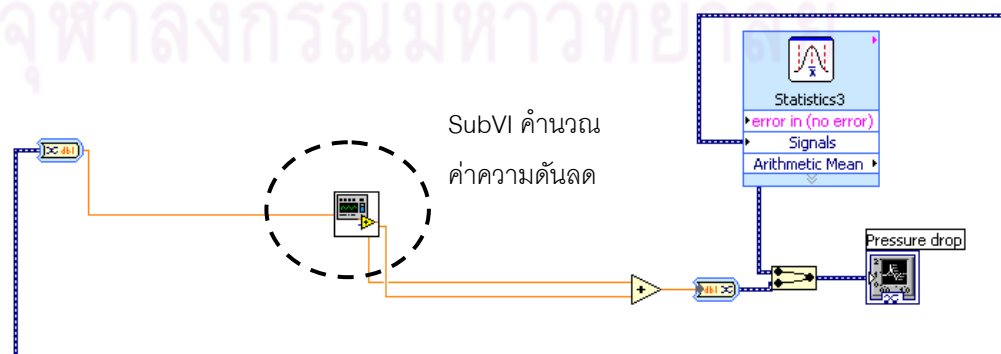
รูปที่ 5.38 หน้าแสดงการตรวจติดตามค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง

หน้าจอโปรแกรมในรูปแบบที่ 5.34 - 5.38 นั้นเรียกว่า Front Panel หรือเป็นหน้าส่วนแสดงผลเท่านั้น สำหรับการพัฒนาหรือการเขียนโปรแกรมจะต้องมีการเขียนคำสั่งต่างๆ เพื่อประมวลผลก่อนแล้วจึงแสดงผลข้อมูลเหล่านั้นออกมาได้ สำหรับโปรแกรม LabVIEW™ ใช้วิธีการเขียนโปรแกรมแบบรูปภาพมีหลักการง่ายๆ คือให้ข้อมูลหรือค่าต่างๆ ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ส่งเข้าสู่โปรแกรม ข้อมูลเหล่านั้นจะไหลไปตามเส้นทางที่เรากำหนดให้เพื่อนำไปคำนวณหรือแสดงผลในกราฟเป็นต้น ส่วนที่ใช้เขียนคำสั่งต่างๆ นี้เรียกว่า Block Diagram ซึ่งแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 5.39



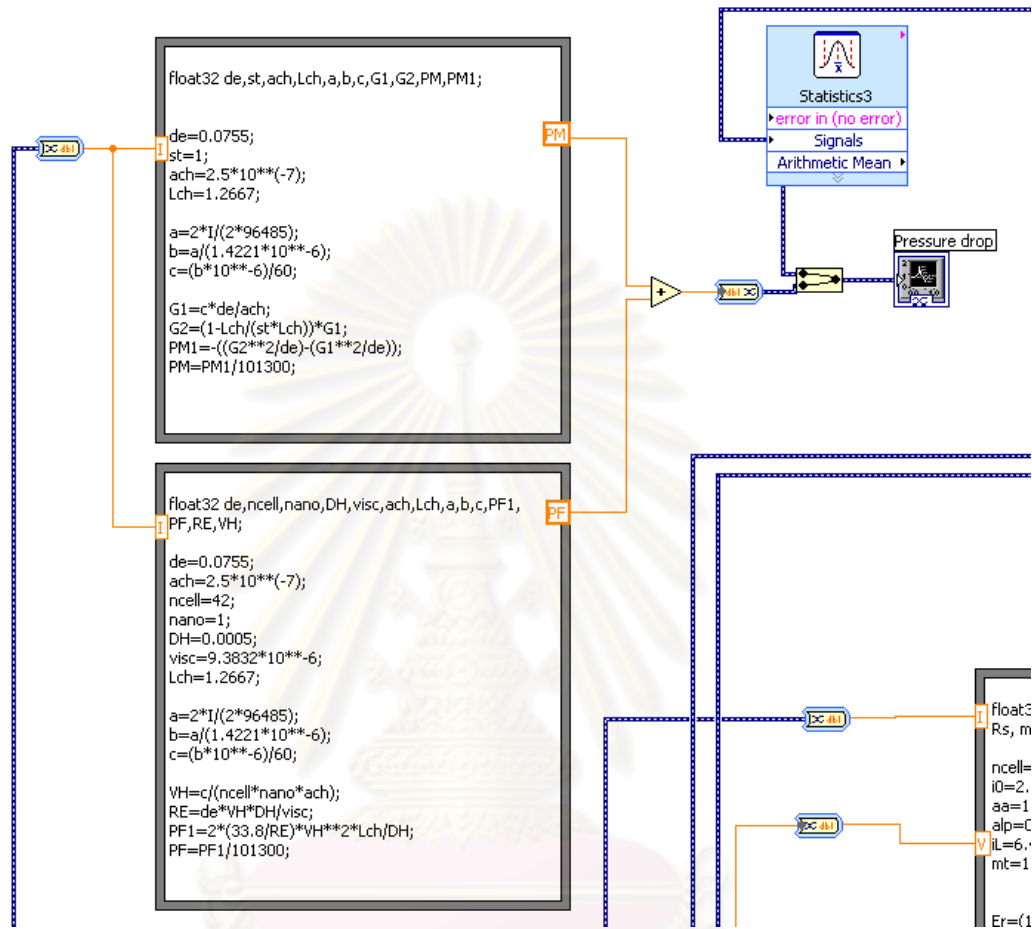
รูปที่ 5.39 ตัวอย่างหน้า Block Diagram ของโปรแกรม

โปรแกรมส่วนคำนวณค่าความดันลดแสดงได้ดังรูปที่ 5.40 ข้อมูลกระแสไฟฟ้าถูกนำเข้ามาคำนวณในบล็อก SubVI ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้คำนวณค่าความดันลดจากแบบจำลอง ข้อมูลความดันลดที่คำนวณได้ถูกส่งต่อไปแสดงผลในรูปแบบกราฟข้อมูลเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้



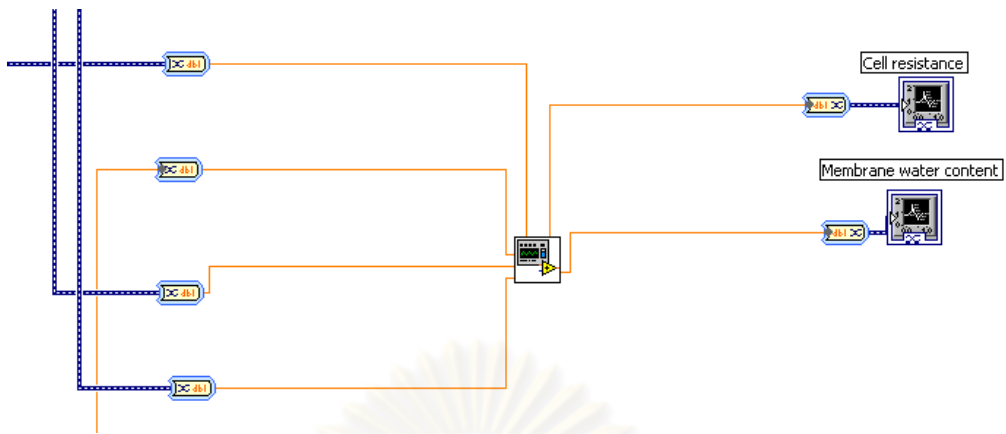
รูปที่ 5.40 Block Diagram ส่วนคำนวณค่าความดันลดจากแบบจำลอง

ถ้าเปิด SubVI ขึ้นมาจะเห็นว่ามีส่วนต่างๆ ซึ่งเป็นคำสั่งที่ใช้คำนวณค่าความดันลดโดยใช้สมการต่างๆ จากแบบจำลองค่าความดันลดนั่นเอง

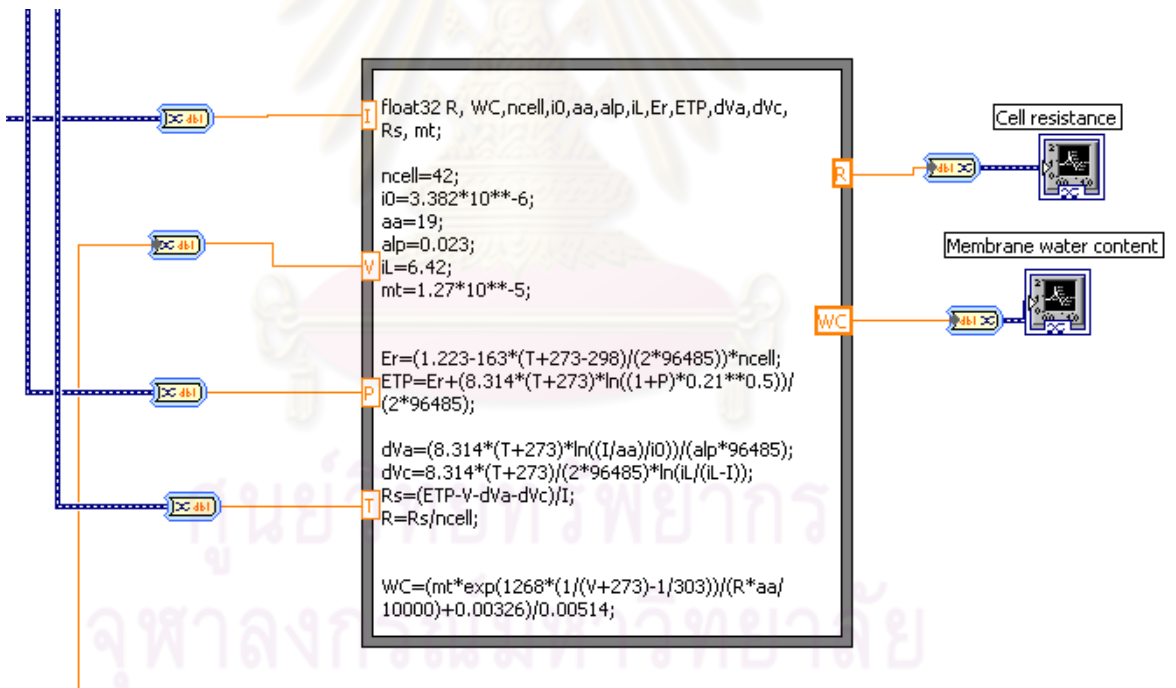


รูปที่ 5.41 สมการต่างๆ ที่อยู่ภายในบล็อก SubVI คำนวณค่าความดันลดจากแบบจำลอง

เช่นเดียวกับส่วนคำนวณค่าความดันลด การคำนวณค่าความต้านทานก็จะมีการนำข้อมูลปฏิบัติการต่างๆ มาเข้าบล็อก SubVI ที่มีสมการคำนวณค่าความต้านทานและปริมาณน้ำในเมมเบรน จากนั้นจึงส่งค่าที่คำนวณได้ออกไปแสดงผลในหน้า Front panel ต่อไป



รูปที่ 5.42 Block Diagram ส่วนคำนวณค่าความต้านทานและปริมาณน้ำในเมมเบรน



รูปที่ 5.43 สมการต่างๆ ที่อยู่ภายในบล็อก SubVI คำนวณค่าความต้านทานและปริมาณน้ำในเมมเบรน

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบตรวจติดตามสำหรับหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 วัตต์บนพื้นฐานของการพัฒนาแบบจำลองสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ภาวะคงตัว ขอบเขตของการพัฒนาระบบตรวจติดตามคือการวินิจฉัยปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสองปรากฏการณ์ได้แก่การท่วมของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงและการเกิดเซลล์แห้ง

1. การติดตามการท่วมของน้ำนั้นใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่วัดได้จริงขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานกับค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนที่คำนวณได้จากแบบจำลองโดยสมการที่ใช้เป็นสมการแบบหนึ่งมิติ การทดสอบแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าความดันลดของแก๊สไฮโดรเจนได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงที่ภาวะการทำงานปกติของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ในทางตรงกันข้ามค่าความดันลดที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าน้อยกว่าค่าความดันลดที่วัดได้จริงที่ภาวะน้ำท่วมเซลล์ ดังนั้นระบบตรวจติดตามจึงสามารถวินิจฉัยการเกิดการท่วมในขณะที่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้

2. การติดตามการเกิดเซลล์แห้งนั้นใช้วิธีการประมาณค่าความต้านทานของเมมเบรนและปริมาณน้ำในเมมเบรนขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน การแห้งของเมมเบรนนั้นเกิดจากปริมาณน้ำในเมมเบรนมีน้อยจึงส่งผลให้ความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่ามากขึ้น การทดสอบแบบจำลองค่าความต้านทานไอห้หมักโดยใช้วิธีการตัดกระแสไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถประมาณค่าความต้านทานได้ใกล้เคียงกันกับค่าที่วัดได้จากการทดลอง ดังนั้นค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนและค่าความต้านทานของเมมเบรนจึงสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการเกิดเซลล์แห้งในขณะที่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้

3. แบบจำลองที่ใช้ทั้งหมดถูกเขียนลงบนโปรแกรม LabVIEW™ เพื่อใช้ตรวจติดตามหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขณะทำงานและสามารถทำงานร่วมกับระบบรวบรวมข้อมูลของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทดสอบแบบจำลองค่าความต้านทานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อเกิดภาวะเซลล์แห้งขึ้นจริงเนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่สามารถถอดประกอบหรือเปลี่ยนเมมเบรนได้ การทำให้เมมเบรนแห้งนั้นอาจส่งผลทำให้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถทำงานเป็นปกติได้

2. ควรวัดค่าอิมพีแดนซ์ของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มเติมจากวิธีการวัดค่าความต้านทานโดยใช้วิธีการตัดกระแสไฟฟ้าเพื่อเป็นการทดสอบแบบจำลองที่น่าเชื่อถือมากขึ้นเนื่องจากวิธีการค่าความต้านทานโดยวิธีการตัดกระแสไฟฟ้านั้นต้องใช้การบันทึกข้อมูลที่มีความถี่สูงมากเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Barbir, F. PEM Fuel Cell: Theory and Practice. Burlington, MA: Elsevier Press, 2005.
- [2] O'Hayre, R., Cha, S.W., Colella, W., and Prinz, F. Fuel Cell Fundamentals. New York, NY: John Wiley & Sons, 2006.
- [3] Tori C., Balezteni M., Peralta C., Calzada R., Jorge E., Barsellini D., Garaventa G., Visintin A., and Triaca W.E. Advances in the development of a hydrogen/oxygen PEM fuel cell stack. International Journal of Hydrogen Energy (2008) : 3588-3591.
- [4] Weng F.B., Jou B.S., Su A., Chan S.H., and Chi P.H. Design, fabrication and performance analysis of a 200W PEM fuel cell short stack. Journal of Power Sources (2007) : 179-185.
- [5] Jang J.H., Chiu H.C., Yan W.M., and Sun W.L. Effects of operating conditions on the performances of individual cell and stack of PEM fuel cell. Journal of Power Sources (2008) : 473-483.
- [6] Zhang L., Pan M., and Quan S. Model predictive control of water management in PEMFC. Journal of Power Sources (2008) : 322-329.
- [7] Woo C.H., and Benziger J.B. PEM fuel cell current regulation by fuel feed control. Chemical Engineering Science (2007) : 957-968.
- [8] มานพ มาสมทบ, รพีพงศ์ สุวรรณวรางกูร, นเรศ ชัยธานี และ สุมิตรา จรสโรจน์กุล. การประกอบต้นแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาด 500 วัตต์ และ การพัฒนาต้นแบบชุดทดสอบสมรรถนะเพื่อการผลิตเชิงพาณิชย์สำหรับประเทศไทย. ใน รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18, หน้า 60. 20-21 ตุลาคม 2551 ณ โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช จังหวัดชลบุรี, 2551.
- [9] ราชวัลลภ แจ่มมงคล. ระบบรวบรวมข้อมูลและควบคุมสำหรับหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

- [10] Chen, J., and Zhou, B. Diagnosis of PEM fuel cell stack dynamic behaviors. Journal of Power Sources (2008) : 83-95.
- [11] Yu, X., Pingwen, M., Ming, H., Baolian, Y., and Shao, Z.G. The critical pressure drop for the purge process in the anode of a fuel cell. Journal of Power Sources (2008) : 163-169.
- [12] Kim, H.I., Cho, C.Y., Nam, J.H., Shin, D., and Chung T.Y. A simple dynamic model for polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) power modules: Parameter estimation and model prediction. International Journal of Hydrogen Energy (2010) : 3656-3663.
- [13] D. Chisholm, An equation for velocity ratio in two-phase flow. NEL Report (1972) : 535.
- [14] Yue, J., Chen, G.W., and Yuan, Q. Pressure drops of single and two-phase flows through T-type microchannel mixers. Chemical Engineering Journal (2004) : 11-24.
- [15] Kunusch, C., Puleston, P.F., Mayosky, M.A., and More, J.J. Characterization and experimental results in PEM fuel cell electrical behavior. International Journal of Hydrogen Energy (2010) : 5876-5881.
- [16] Laminie, J., and Dicks, A. Fuel Cell Systems Explained. 2nd ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [17] Spiegel, C. Designing and Building Fuel Cells. New York, NY: McGraw-Hill, 2007.
- [18] Springer, T.E., Zawodzinski, T.A., and Gottesfeld, S. Polymer Electrolyte Fuel Cell Model. Journal of the Electrochemical Society (1991) : 2334-2342.
- [19] Gorgün, H., Arcak, M., and Barbir, F. An Algorithm for Estimation of Membrane Water Content in PEM Fuel Cells. Journal of Power Sources (2006) : 389-394.
- [20] Gasteiger, H.A., Gu, W., Makharia, R., and Matthias, M.F. Catalyst Utilization and Mass Transfer Limitations in the Polymer Electrolyte Fuel Cells. Electrochemical Society Meeting. Orlando, FL, 2003.

- [21] Barbir, F., Braun, J., and Neutzler, J. Properties of Molded Graphite Bi-polar Plates for PEM Fuel Cells. International Journal on New Materials for Electrochemical systems (1999) : 197-200.
- [22] del Real, A.J., Arce, A., and Bordons, C. Development and Experimental Validation of a PEM Fuel Cell Dynamic Model. Journal of Power Sources (2007) : 310-324.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



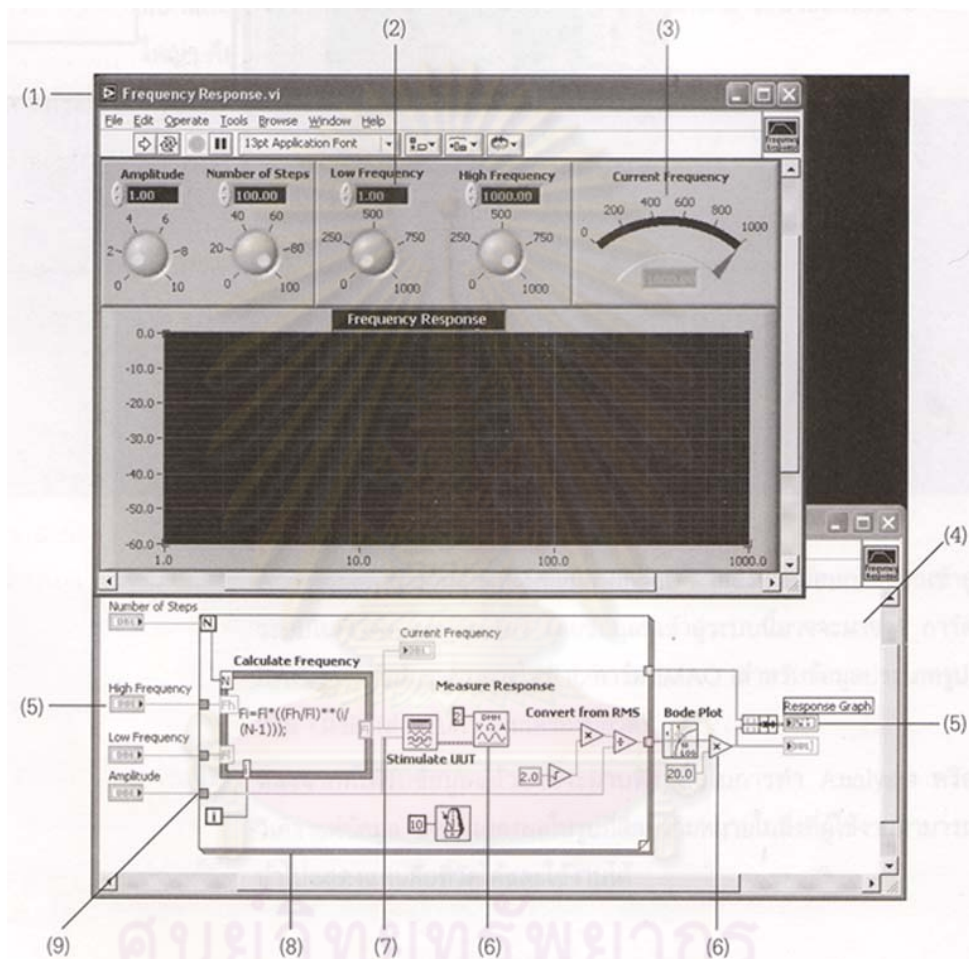
ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ก1. การใช้งานโปรแกรม LabVIEW™

ก1.1 ส่วนประกอบต่างๆใน LabVIEW



จากรูปแสดงส่วนประกอบต่างๆ ที่มีหน้าที่ดังนี้

- (1) Front Panel คือส่วนที่จะสื่อสารกับผู้ใช้โปรแกรม ซึ่งส่วนนี้จะประกอบด้วยส่วนที่รับข้อมูลจากผู้ใช้งาน และส่วนแสดงผลให้ผู้ใช้งานเห็น
- (2) Control คือสิ่งที่ผู้ใช้งานจะกำหนดค่าหรือเปลี่ยนแปลงค่าได้ หรือก็คือ Input เข้าสู่ระบบ โดยข้อมูลที่รับเข้าจะอยู่ในรูป Numeric control (ตัวรับข้อมูลแบบตัวเลข)
- (3) Indicator เป็นสิ่งที่โปรแกรมแสดงผลออกมาให้ผู้ใช้งานเห็น หรือก็คือ Output ที่ออกมาจากโปรแกรมหรือ Application ที่ผู้ใช้งานพัฒนา ในรูปเป็นตัวอย่างของตัวแสดงผลแบบตัวเลข

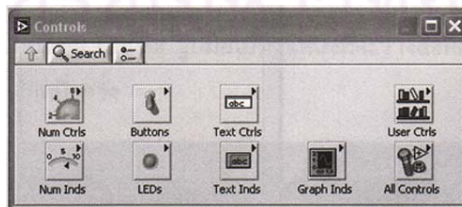
- (4) Block Diagram คือส่วนที่ผู้ใช้งานใช้ในการเขียนโปรแกรม หรือเป็นส่วนหนึ่งของ Source Code
- (5) Terminal จะมีสองรูปแบบ คือ จุดกำเนิด (Source) หรือ (Output Terminal) และ จุดรับ (Sink) หรือ (Input Terminal)
- (6) Icons คือ ส่วนที่มีการทำงานบางอย่างโดยอัตโนมัติเมื่อโปรแกรมทำงาน เช่น ฟังก์ชันซึ่งเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่มีอยู่แล้วใน LabVIEW ได้แก่ Add , Subtract หรือ SubVIs ซึ่งจะหมายถึง VI ที่ถูกเรียกอ่านจากอีก VI หนึ่ง
- (7) Wires คือ เส้นทางการส่งผ่านของข้อมูลที่ส่งผ่านจุดกำเนิดข้อมูล (Source) ไปจุดรับข้อมูล/จุดสิ้นสุด (Sink)
- (8) Structures คือ ส่วนที่ควบคุมขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม
- (9) Nodes คือ จุดเชื่อมต่อระหว่างข้อมูลกับ SubVI , Function หรือ Structure

ก1.2 การใช้งานโปรแกรมที่สร้างขึ้นจาก LabVIEW

โปรแกรมที่สร้างขึ้นโดย LabVIEW จะเรียกว่า VI ซึ่งย่อมาจาก Virtual Instrument จะมีส่วนที่ควบคุม (Control) และส่วนแสดงผล (Indicator) เช่น มีปุ่มปรับค่า, ปุ่มเปิดปิด และกราฟแสดงผล เป็นต้น

ก1.3 เครื่องมือในการออกแบบ Front Panel

เครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel จะใช้ Controls Palette และ Tools Palette LabVIEW มี Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel



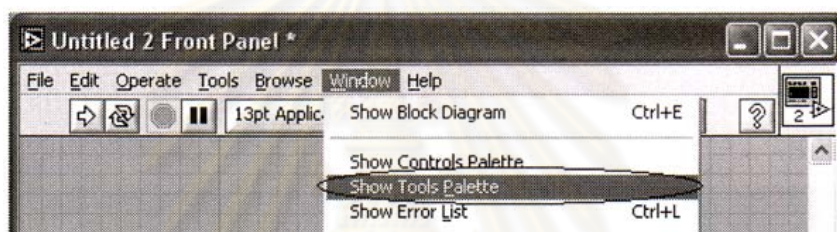
ซึ่งเป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) โดยจะจัดเป็นกลุ่มต่างๆ เช่น กลุ่มของตัวเลข (Numeric) ซึ่งภายในกลุ่มจะมี Control และ Indicator ต่างๆ ที่เกี่ยวกับตัวเลข

Tools Palette สำหรับการออกแบบ Front Panel

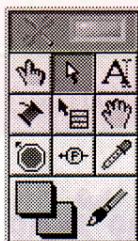


Tools Palette คือ เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม ซึ่งจะใช้ทั้งการออกแบบ Front Panel และ Block Diagram ในส่วนนี้จะกล่าวถึง Tools Palette สำหรับการออกแบบ Front Panel

วิธีเปิด Tools Palette มี 2 วิธีคือ เปิดโดย Click ที่ Window >> Show Tools Palette

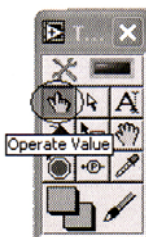


หรือ Shift + Right-click ในตำแหน่งที่ว่างของ Front Panel แล้วเลือก Tool โดย Click ที่ Tool ที่ต้องการหนึ่งครั้ง



Tool ที่ใช้บ่อยๆ ในการออกแบบ Front Panel

1. Operate Value Tool ใช้เปลี่ยนแปลงค่าของ Controls หรือ Indicators โดยการ Click Operating Tool แล้วเลื่อนไปที่ค่าของ Control หรือ Indicator ที่เราต้องการเปลี่ยนแปลงค่า แล้ว Click เพื่อเปลี่ยนค่า



2. Position/Size/Select Tool ใช้สำหรับเลือก (Select) หรือจัดวางตำแหน่ง (Position) ใหม่หรือการปรับขนาด (Size) ของ Control หรือ Indicator



3. Edit Text Tool ใช้ในการแก้ไขข้อความที่เป็นตัวอักษรหรือเพิ่มข้อความลงบน Front Panel

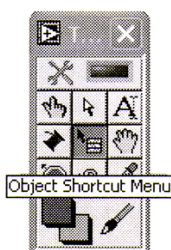


4. Set Color Tool ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสีของสิ่งที่เราต้องการเปลี่ยนสี ซึ่งสามารถเปลี่ยนสีทั้งสีด้านบน (Foreground) ของสิ่งใดๆ และสีพื้น (Background) ถ้าสิ่งนั้นมี Background



Tool อื่นๆ ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel มีดังต่อไปนี้

Object Shortcut Menu Tool ใช้สำหรับแสดงและเลือก Menu ที่เกี่ยวข้องกับสิ่งต่างๆ บน Front Panel และ Block Diagram ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะคลิกขวาแทนการเลือก Tools นี้



Scroll Window Tool ใช้สำหรับการเลื่อน (Scroll Window) ทั้ง Front Panel และ Block Diagram

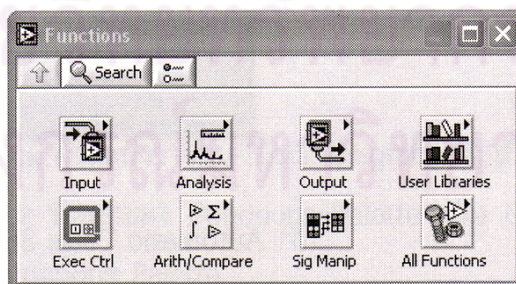


Get Color เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการคัดลอก (Copy) สีที่เราเลือกจากวัตถุหนึ่ง เพื่อที่จะนำไปใช้ในการเปลี่ยนสีของอีกวัตถุหนึ่งให้สีเหมือนกับวัตถุที่เรา Copy สีมา โดยใช้ Color Tool



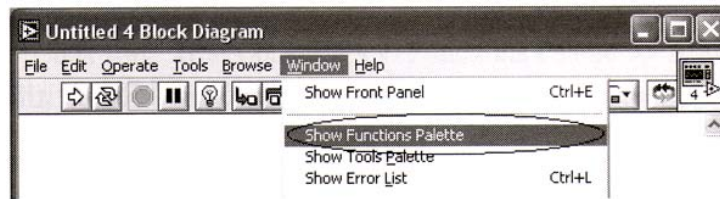
ก1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมบน Block Diagram

LabVIEW ใช้ Functions Palette ซึ่งจะมี Function และ SubVI ต่างๆที่มีอยู่แล้วให้ผู้ใช้เลือกใช้ โดย Function และ SubVI จัดเป็นกลุ่มๆ เช่น Numeric Function จะมี Function ต่างๆเกี่ยวกับตัวเลข เช่น บวก ลบ คูณ หาร



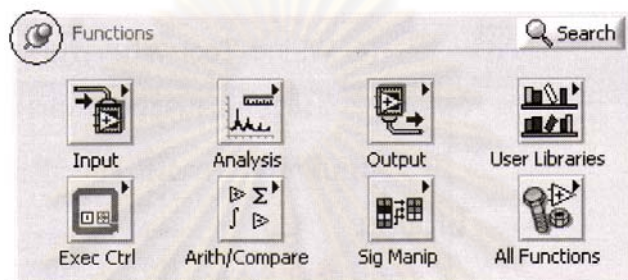
การเลือกแถบ Function หรือ Function Palette ขึ้นมาแสดงมีได้ 2 วิธี เช่นเดียวกับ Front Panel โดยการ

1. Click ที่เมนู Window >> Show Functions Palette ของ Block Diagram
- 2.



หรือ

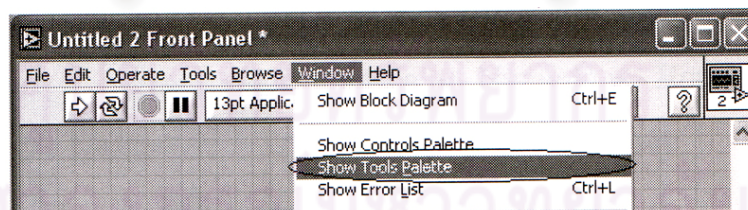
3. Right-click ที่ตำแหน่งว่างบน Block Diagram และ Click ที่หมวด



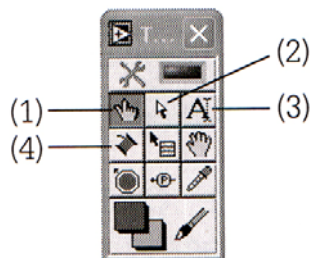
การเลือก Function มาใช้งานใช้วิธีเดียวกันกับการเลือก Control หรือ Indicator จาก Front Panel คือ Click ฟังก์ชันที่ต้องการซึ่ง Cursor ไปที่ Block Diagram ตำแหน่งที่ต้องการ และ Click อีกครั้งเดียว

Tools Palette สำหรับ Block Diagram

เปิด Tools Palette โดยการ Click ที่ Window >> Show Tools Palette หรือกด Shift + Right-click แล้ว Click เลือก Tool ที่ต้องการใช้

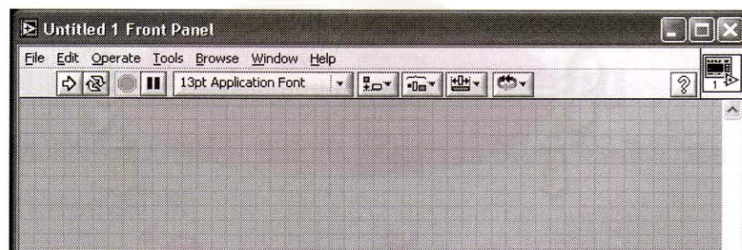








(ถ้า Automatic Tools Selection เปิดอยู่ (LED) เป็นสีเขียว ให้ Click เพื่อปิด Automatic Tool Selection ซึ่งมีเฉพาะใน Version 6.1 ขึ้นไป) Tool ที่ใช้มีดังต่อไปนี้



- (1) Operating Tool ใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าหรือเลือกค่าคงที่ใน Block Diagram
- (2) Position/Size/Select ใช้ในการเลือก / เคลื่อนย้าย / จัดขนาดของสิ่งที่สร้างขึ้นบน Block Diagram
- (3) Edit Text Tool ใช้ในการแก้ไขข้อความที่เป็นตัวอักษร หรือเพิ่มข้อความลงบน Front Panel
- (4) Wiring Tool ใช้ในการโยงสาย (Wiring) ระหว่าง Terminal หรือ Node ซึ่งสายที่โยงนี้ จะเป็นเส้นทางเดินของข้อมูล

Front Panel Toolbar



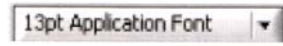
-  โปรแกรมสามารถ Run ได้เมื่อ Click ปุ่มนี้บน Toolbar
-  โปรแกรมกำลัง Run อยู่
-  โปรแกรมกำลัง Run อยู่ SubVI
-  โปรแกรมมี Error ถ้า Click จะแสดงรายการ Error List
-  โปรแกรมสามารถ Run แบบต่อเนื่อง (Continuous) เมื่อ Click ปุ่มนี้
-  กำลัง Run อย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง Click ปุ่ม Stop/Pause



เมื่อโปรแกรมกำลัง Run อยู่สามารถหยุดการทำงานของโปรแกรมโดยการ Click ปุ่ม Stop



หยุดชั่วคราว เพื่อตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม ซึ่งสามารถ Run ต่อไปได้เมื่อ Click ปุ่ม หรือกดปุ่ม อีกครั้ง



13pt Application Font

เลือกหรือแก้ไขรูปแบบอักษรที่ต้องการ



จัดแนวของสิ่งต่างๆ (Objects)



จัดระยะทางระหว่างสิ่งต่างๆ (Objects)



ปรับขนาดสิ่งต่างๆที่อยู่บน Front Panel หลายๆสิ่งซ้อนกัน



จัดลำดับของ Objects ที่วางซ้อนกัน



แสดง Context Help

Block Diagram Toolbar

สิ่งที่เพิ่มเติมจาก Front Panel Toolbar ในส่วนของ Block Diagram มีดังต่อไปนี้



Highlight Execution เมื่อ Click แล้ว ในการ Run Program จะทำให้ โปรแกรม Run ช้าลงเพื่อให้เราเห็นถึงการไหลของข้อมูล และการทำงานของโปรแกรม



เมื่อ Click แล้วจะออกจากโหมด (Mode) ที่โปรแกรม Run ช้า (Highlight Execution)



เป็นการ Run Program แบบทีละคำสั่ง และจะลงไปถึงคำสั่งของ SubVI

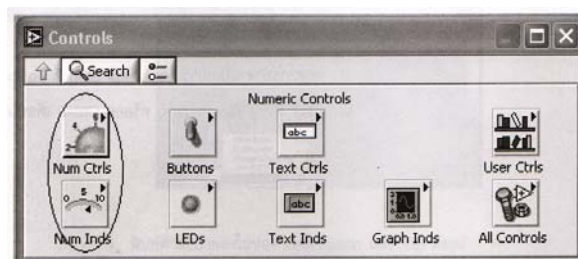


เป็นการ Run Program แบบทีละคำสั่งแต่จะไม่ลงไปถึงคำสั่ง SubVI

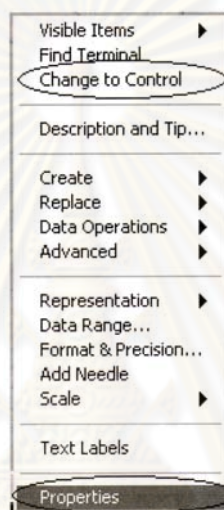


ให้ Run จนออกจาก Loop และ SubVI

Numeric Datatypes

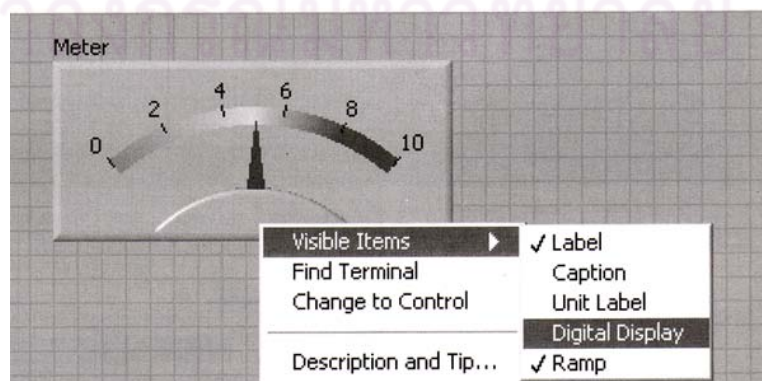


LabVIEW มีรูปแบบการรับข้อมูลเข้า (Input = Control) และแสดงผล (Output = Indicator) ชนิดแบบตัวเลขหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละตัวถูกกำหนดเป็น Control หรือ Indicator ไว้แล้ว แต่เราสามารถเปลี่ยนจาก Control เป็น Indicator หรือจาก Indicator หรือ Control ได้โดยการ Right-click ที่ Numeric Control หรือ Indicator นั้นแล้วเลือก Change to Control หรือ Change to Indicator
















นอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติอื่นๆ อีกที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการ Right-click ที่สิ่งนั้น (Object) แล้วเลือกจาก Short Cut Menu ของ Object นั้นๆ หรือเลือกจากเมนู Properties ซึ่งเริ่มมีใน LabVIEW ตั้งแต่เวอร์ชัน 7.0 ขึ้นไป คุณสมบัติที่สำคัญคือ

- Visible Item >> Digital Display เพิ่มการแสดงผลเป็นตัวเลข เช่น แสดงตัวเลขของค่า Meter Indicator



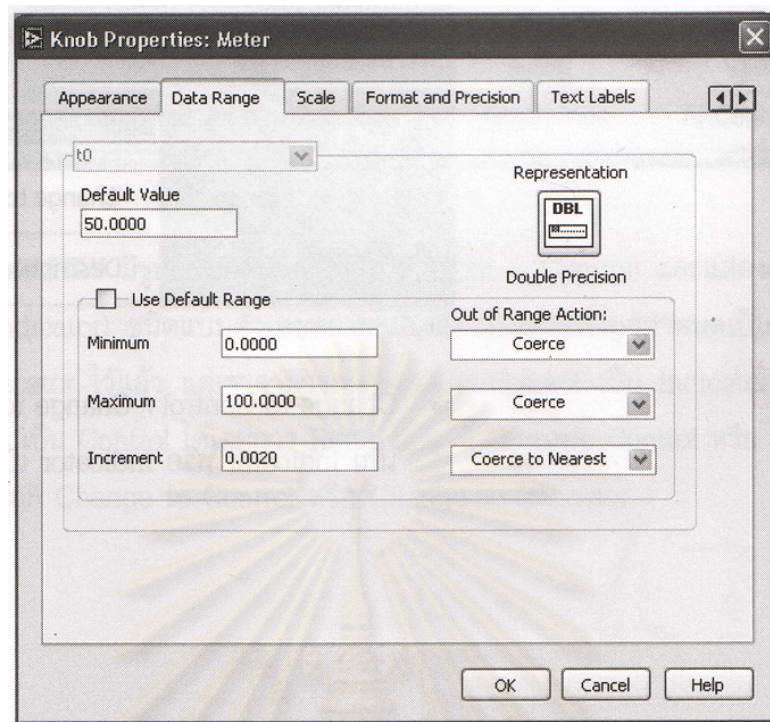
- Change to Control / Change to Indicator เป็นการเปลี่ยนจาก Control เป็น Indicator หรือ Indicator เป็น Control
- Representation เป็นการเลือกรูปแบบความละเอียดของตัวเลขในการใช้งานดังต่อไปนี้

Terminal	Numeric Data Type	Bits of Storage on Disk	Approximate Number of Decimal Digits	Approximate Range on Disk
	Extended-precision, floating-point	128	varies from 15 to 33 by platform; refer to the LabVIEW Data Storage Application Note for more information about using numeric data types in LabVIEW	Minimum positive number: 6.48e-4966 Maximum positive number: 1.19e+4932 Minimum negative number: -6.48e-4966 Maximum negative number: -1.19e+4932
	Double-precision, floating-point	64	15	Minimum positive number: 4.94e-324 Maximum positive number: 1.79e+308 Minimum negative number: -4.94e-324 Maximum negative number: -1.79e+308
	Single-precision, floating-point	32	6	Minimum positive number: 1.40e-45 Maximum positive number: 3.40e+38 Minimum negative number: -1.40e-45 Maximum negative number: -3.40e+38
	Long signed integer	32	9	-2,147,483,648 to 2,147,483,647
	Word signed integer	16	4	-32,768 to 32,767
	Byte signed integer	8	2	-128 to 127
	Long unsigned integer	32	9	0 to 4,294,967,295
	Word unsigned integer	16	4	0 to 65,535
	Byte unsigned integer	8	2	0 to 255
	Complex extended-precision, floating-point	256	varies from 15 to 33 by platform; refer to the LabVIEW Data Storage Application Note for more information about using numeric data types in LabVIEW	Same as extended-precision, floating-point for each (real and imaginary) part
	Complex double-precision, floating-point	128	15	Same as double-precision, floating-point for each (real and imaginary) part
	Complex single-precision, floating-point	64	6	Same as single-precision, floating-point for each (real and imaginary) part
	Signed, fixed-point number	<64.64>	19	Minimum time (in seconds): 5.4210108624275221700372640043497e-20 Maximum time (in seconds): 9,223,372,036,854,775,808

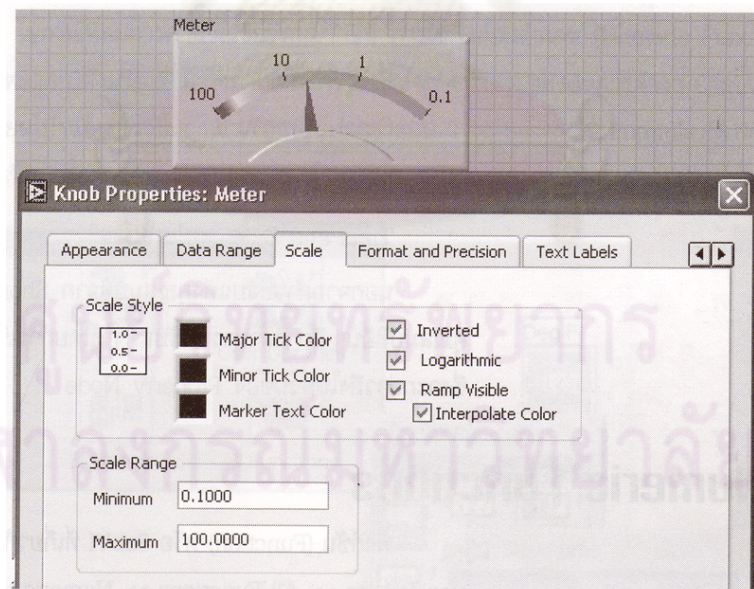
Refer to the [LabVIEW Data Storage Application Note](#) for more information about using the time stamp data type in LabVIEW.

- Data Range เป็นการกำหนดช่วงค่าที่จะใช้งาน เช่น สามารถกำหนดค่าต่ำสุดและสูงสุดที่จะให้ผู้ใช้งานป้อนอยู่ระหว่าง 0.00 – 100.00

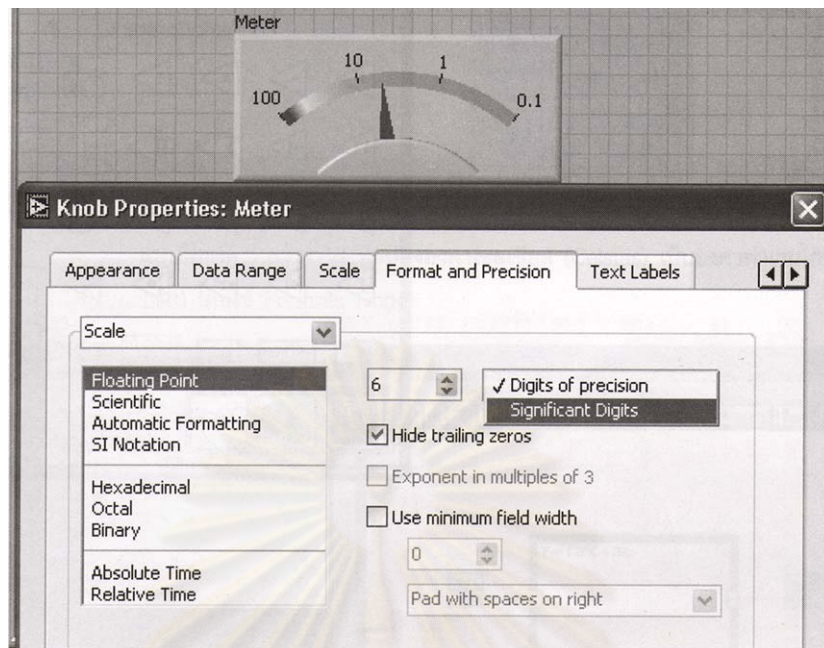
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



- Scale ปรับรูปแบบสเกลตามความเหมาะสมในการใช้งาน



- Format และ Precision เป็นการกำหนดรูปแบบการแสดงผลแบบและจำนวนตัวเลขทศนิยม ซึ่งสามารถเลือกให้แสดงผลแบบตัวเลขดังต่อไปนี้ ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบ (Representation) ของตัวเลขที่ใช้งานด้วย



รูปแบบของตัวเลขมีให้เลือกแสดงผลหลายรูปแบบ เช่น

Decimal : เลขฐานสิบ

Hexadecimal : เลขฐาน 16

Octal : เลขฐาน 8

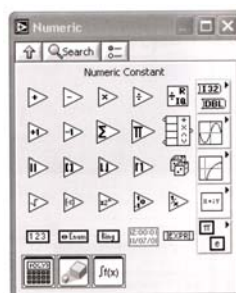
Binary : เลขฐาน 2

Time and Date : รูปแบบเวลา

นอกจากการปรับแต่งคุณสมบัติจาก Short Cut Menu แล้ว LabVIEW ยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ อีก ที่สามารถปรับแต่งได้โดยการเขียนโปรแกรม โดยใช้ Property Node ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนของ Property Node

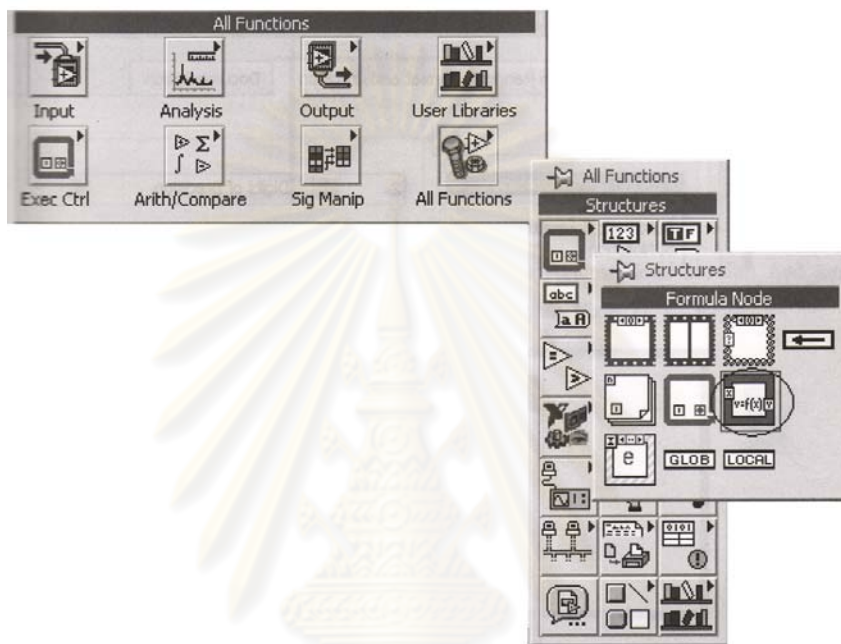
Numeric Function

ฟังก์ชัน (Function) หรือ SubVI ที่เกี่ยวข้องกับตัวเลขสามารถเลือกใช้ได้จาก Function Palette >> All Function >> Numeric หรือ Function Palette >> All Function >>...



Formula Node

ในกรณีที่สมการคำนวณซับซ้อนมากขึ้น การใช้ฟังก์ชันตัวเลข (Numeric Function) หลายๆตัวมาต่อกันอาจทำให้ความเข้าใจการทำงานของสมการต่างๆยากขึ้น หรือเขียนโปรแกรมเร็วขึ้นถ้าเราเขียนเป็นสมการแบบ Text-based ใช้ Formula Node ในการเขียนสมการแบบ Text-based



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลทางเทคนิคของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาด 200 วัตต์

ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	PEM
จำนวนเซลล์	42
กำลังไฟฟ้า	200W
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	220W
สมรรถนะ	24V at 8.4A
สารป้อน	แก๊สไฮโดรเจนและอากาศ
ความบริสุทธิ์ของแก๊สไฮโดรเจน	99.999%
ความดันแก๊สไฮโดรเจน	5.8 - 6.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
การทำความชื้นให้แก๊สขาเข้า	ไม่
พื้นที่เกิดปฏิกิริยา	19 ตารางเซนติเมตร
การระบายความร้อน	พัดลม
น้ำหนัก	1,250 กรัม
อุณหภูมิทำงานสูงสุด	67 องศาเซลเซียส
ขนาด	10.5 cm × 17.2 cm × 12.2 cm

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
ข้อมูลสมรรถนะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาด 200 วัตต์

ตารางที่ ค1 ข้อมูลสมรรถนะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาด 200 วัตต์

Voltage	Current (V)													
	1st run	2nd run	3rd run	4th run	5th run	6th run	7th run	8th run	9th run	10th run	11st run	12rd run	13rd run	14th run
24.5	6.42	5.94	6.01	6.12	5.66	5.65	5.78	5.50	6.38	6.22	5.82	5.82	5.83	5.81
25	6.42	5.87	5.89	6.01	5.64	5.60	5.74	5.38	6.38	6.21	5.80	5.81	5.81	5.79
26	6.40	5.61	5.77	5.85	5.53	5.46	5.61	5.29	6.37	6.15	5.71	5.73	5.64	5.67
28	6.15	4.73	5.14	5.26	4.97	4.91	5.18	4.76	6.02	5.99	5.22	5.29	5.24	5.21
30	5.48	3.56	4.16	4.33	4.33	4.06	4.43	4.02	4.59	4.50	4.62	4.70	4.62	4.58
32	3.80	2.55	3.15	3.17	3.17	2.91	3.22	2.86	3.13	3.12	3.11	3.16	3.15	3.13
34	2.53	1.68	1.94	2.06	1.92	1.87	2.13	1.88	1.89	1.92	1.86	1.94	1.89	1.90
36	1.48	0.98	1.02	1.06	0.96	1.03	1.26	1.04	0.98	0.98	0.95	0.98	0.96	0.96
38	0.71	0.47	0.43	0.42	0.38	0.47	0.56	0.46	0.41	0.41	0.39	0.40	0.38	0.38
39	0.44	0.28	0.26	0.24	0.21	0.28	0.33	0.27	0.23	0.24	0.22	0.23	0.22	0.21
40	0.24	0.15	0.15	0.12	0.09	0.15	0.17	0.15	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10
41	0.11	0.07	0.04	0.05	0.03	0.06	0.08	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04
OCV =	42.07	41.22	41.50	41.66	41.2	41.22	41.41	41.512	41.52	41.515	41.51	41.5	41.45	41.42

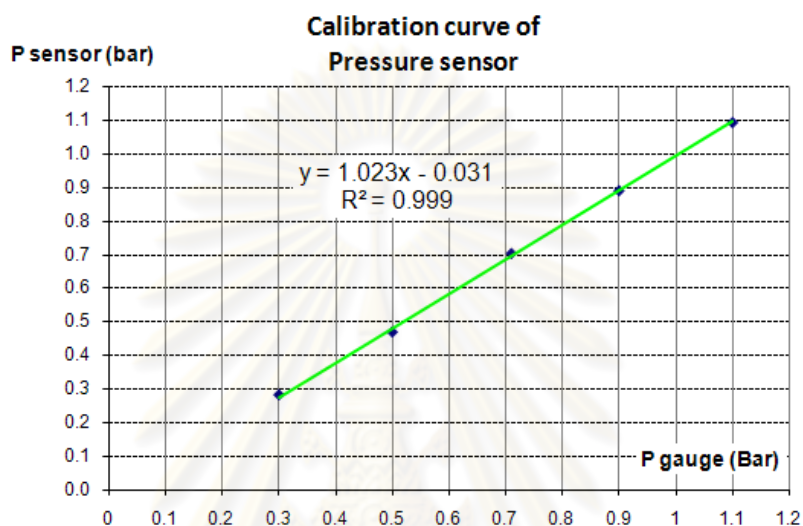


ภาคผนวก ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

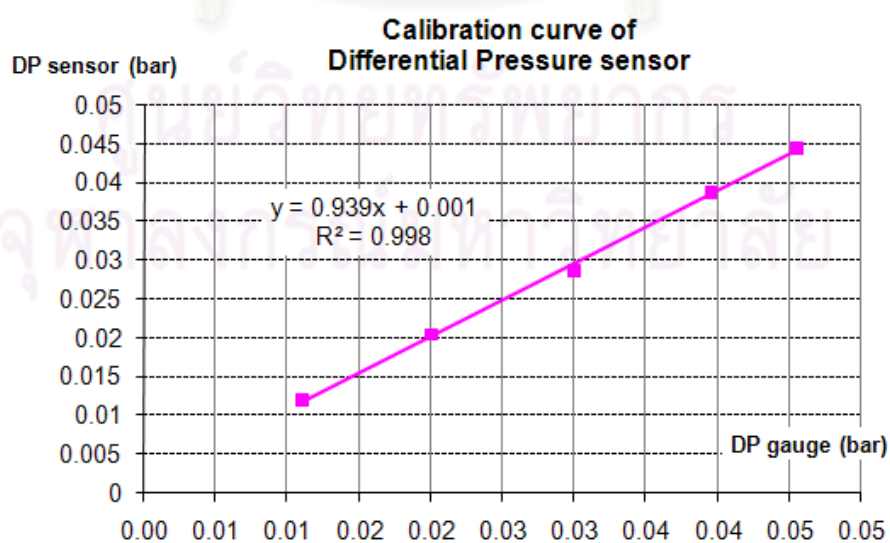
ภาคผนวก ง
การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดข้อมูล

ง1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน



รูปที่ ง1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

ง2 การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดความดันลด



รูปที่ ง2 การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดความดันลด

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิทยา คณิงคิด เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2551 และศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2553



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย