

การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 kW ชนิด

PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)

STUDY AND ANALYSIS OF 1.2KW PROTON EXCHANGE MEMBRANE

FUEL CELL (PEMFC) ELECTRIFICATION



ปนัดดา แสงแก้ว

PANUDDA SANGKAEW

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2554

การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 kW ชนิด  
PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)

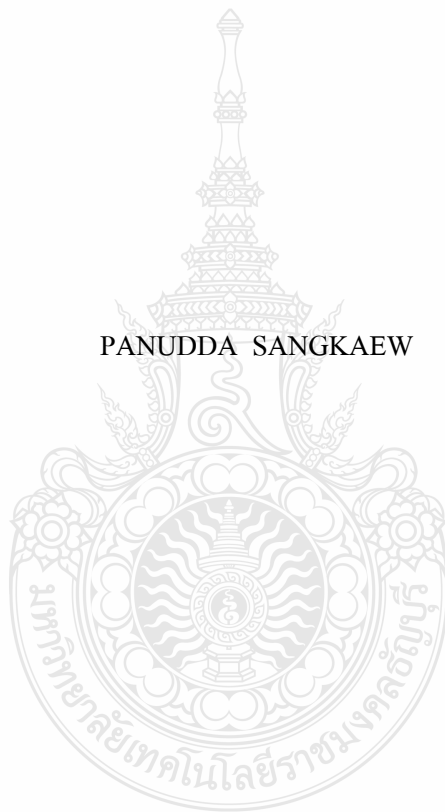


ปนัดดา แสงแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
พ.ศ. 2554

**STUDY AND ANALYSIS OF 1.2 KW PROTON EXCHANGE MEMBRANE  
FUEL CELL (PEMFC) ELECTRIFICATION**

PANUDDA SANGKAEW



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR  
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
IN ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2011

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือ  
เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นางปนัดดา แสงแก้ว





**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**  
**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 kW ชนิด PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) STUDY AND ANALYSIS OF 1.2 KW PRONTON EXCHANE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) ELECTRIFICATION

**ชื่อนักศึกษา** นางปนัดดา แสงแก้ว

**รหัสประจำตัว** 115170420109-4

**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง

**วัน เดือน ปี ที่สอบ** 15 พฤษภาคม 2554

**สถานที่สอบ** ห้องประชุมชมพูนุพันธุ์ทิพย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์**

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ)

..... กรรมการ  
(ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์)

..... กรรมการ  
(ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์)

..... กรรมการ  
(ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง)

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ผิวสอาด)  
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ขนาด 1.2 kW ชนิด PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) ร่วมกับ MATLAB/ SIMULATION
นักศึกษา	นางปนัดดา แสงแก้ว
รหัสประจำตัว	115170420109-4
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันปัญหาพลังงานเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก และมีแนวโน้มที่จะใช้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในอนาคต เชื้อเพลิงที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันก็กำลังจะหมดไป และราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น พลังงานใหม่และพลังงานสะอาดจึงถูกนำมาพิจารณาเพื่อทดแทน เซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งในการนำมาทำเป็นพลังงานไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบแบบจำลองด้วย MATLAB สำหรับทดสอบคุณลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง และได้ติดตั้งเพื่อทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ ชนิด เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ขนาด 1.2 kW 46 A โดยประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหลของก๊าซ และความชื้น เพื่อนำมาวิเคราะห์ รวมทั้งการทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ

ซึ่งจากการทดสอบ ได้มีการเปรียบเทียบกับแบบจำลองและทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในสถานะไร้อโหลด แรงดันจะมีค่า 97.21% กำลังงานจะมีค่า 100% แต่ในขณะที่มีโหลดสูงสุดแรงดันจะมีค่า 90.19% กำลังงานมีค่า 83.61% เมื่อเทียบกับแบบจำลอง เพื่อทราบหลักการทำงานในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะใช้งานจริง เปรียบเทียบกับผลการทดลองของแบบจำลอง

คำสำคัญ: เซลล์เชื้อเพลิง พลังงาน การผลิตไฟฟ้า การศึกษา การวิเคราะห์

**Thesis Title :** STUDY AND ANALYSIS OF 1.2 KW PROTON  
EXCHANGE MEMBRANE FUEL (PEMFC)  
ELECTRIFICATION

**Student Name :** Mrs. Panudda Sangkaew

**Student ID :** 115170420109-4

**Degree Award :** Master of Engineering

**Study Program :** Electrical Engineering

**Academic Year :** 2010

**Thesis Advisor :** Dr-Ing. Boonyang Plangklang



**ABSTRACT**

The current energy crisis which is the high consumption rate and continuously increasing move over the price of main resources are high, there fore a new energy and clean energy has been considered for the replacement. Fuel Cell Energy is one of the alternative energies for electric generation in future.

The paper develops a model of PEMFC by MATLAB and constructs a prototype of the operation control system of Proton Exchange Membrane Fuel Cell of 1.2 kW 46A. The study shows that the performance of fuel cell depends on pressure, temperature, gas flow rate and humidity. The control system performance in the aspect of these parameters is evaluated.

The control system performance is determined by comparing between the fuel cell powers from both experiment and model simulation. The output voltage level can vary from 97.21% (at no load) to about 90.19% (at the full load). The power level can vary from 100% (at no load) to about 83.61% (at the full load) compared simulation result. All aspects of PEMFC electrification will be fully investigated in order to develop the alternative sustainable PEMFC energy sources and to study the fundamental principles of fuel cell technology. Moreover, the calculation of operation performance of PEM by real-time recorded data is implemented. The results show that PEMFC can be used for sustainable energy supply in future.

**Keywords:** Fuel cell, Energy, Electrification, Study, Analysis.

## กิตติกรรมประกาศ

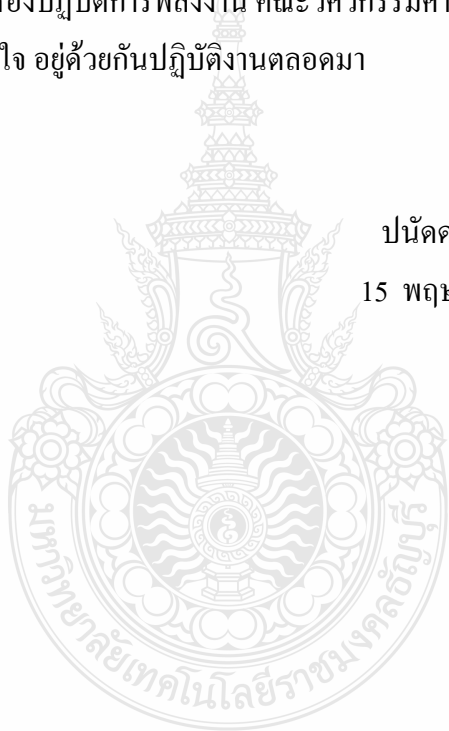
วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เป็นอย่างดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือ และคำแนะนำจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ คือ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง และ อ.วินัย จันทร์เพ็ง ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำอันมีค่ายิ่ง ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงมาไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่าน ผู้ที่ให้คำชี้แนะ แนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ต่อการทำงานวิจัย เพื่อนๆ และอาจารย์ สำหรับคำปรึกษาในครั้งนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ตลอดจนญาติพี่น้องทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้ความเข้าใจดีสำหรับเวลาที่ข้าพเจ้าต้องใช้สำหรับการศึกษาเพื่ออนาคตในครั้งนี้ รวมทั้งที่ ๆ และทีมงานวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ร่วมแรง ร่วมใจ อยู่ด้วยกันปฏิบัติงานตลอดมา

ปนัดดา แสงแก้ว

15 พฤษภาคม 2554





## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีของเซลล์เชื้อเพลิง	4
2.1 คำนำ	4
2.2 ประวัติของเซลล์เชื้อเพลิง	4
2.3 พื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง	5
2.4 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	7
2.5 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง	11
2.6 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	11
2.7 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM	18
2.8 สารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้า (Electrolyte)	25
2.9 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (Fuel Cell Stack Efficiency)	27
2.10 ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell System Efficiency)	32
2.11 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (PEM Fuel Cell Systems)	38
2.12 การทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนและออกซิเจน	40
2.13 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง	41
2.14 ข้อดีและข้อจำกัดของเซลล์เชื้อเพลิง	45
2.15 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิง	47
2.16 ราคาของเซลล์เชื้อเพลิง	50

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.17 บทสรุป	51
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	52
3.1 การทดสอบการทำงานในห้องปฏิบัติการ (Test Station)	52
3.2 การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	70
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์	76
4.1 การทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยโปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์	76
4.2 การทดสอบการทำงานในห้องปฏิบัติการ (Test Station)	85
4.3 บทสรุป	94
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	95
5.1 สรุป	95
5.2 ข้อเสนอแนะ	96
เอกสารอ้างอิง	97
ภาคผนวก	
ก. การคำนวณการหาค่าพลังงานที่ปล่อยออกจากเซลล์เชื้อเพลิง	99
ข. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	116
ประวัติผู้เขียน	159

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่	
2.1 ค่ามาตรฐานทางอุณหพลศาสตร์และการคำนวณปริมาณทางอุณหพลศาสตร์	9
2.2 ปฏิกริยาเคมี-ไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ	10
2.3 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง อุณหภูมิการทำงาน เชื้อเพลิงและออกซิเจนที่ อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ กระบวนการในอิเล็กโทรไลต์ เป้าหมายขนาดกำลังผลิต การประยุกต์ใช้และผู้จำหน่าย	43
2.4 ข้อดีและข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด	44
2.5 เปรียบเทียบระดับเสียงจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงกับเทคโนโลยีอื่นๆ	45
2.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงกับเทคโนโลยีอื่น ๆ	46
2.7 ราคาประเมินของระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดต่างๆ ในแต่ละปี (US\$/kWh ติดตั้ง)	50
2.8 ราคาและการประเมินราคาของระบบเซลล์เชื้อเพลิง	50
3.1 ข้อกำหนดของ The Nexa™ Power Module	55
3.2 สภาวะการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ	66
3.3 สภาวะการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ	67
3.4 ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิง	70
4.1 การคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์	93



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง	6
2.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	6
2.3 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในเชิงอุณหพลศาสตร์	7
2.4 หลักการเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cells, AFC)	12
2.5 หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC)	14
2.6 หลักการเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)	15
2.7 หลักการเซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)	17
2.8 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดบริเวณเยื่อหุ้มมีการแลกเปลี่ยน โปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)	18
2.9 ชั้นต่าง ๆ ของเซลล์พื้นฐานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM	19
2.10 การประกอบ PEM Membrane Electrode	20
2.11 การเปรียบเทียบรูปแบบของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	21
2.12 แผ่นสะสมกระแส (ก) แบบ Unipolar Plate (ข) แบบ Bipolar Plate	22
2.13 ส่วนประกอบของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์	24
2.14 PEM Flow Field Plates	26
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นของกระแส	28
2.16 ต้นแบบพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM	34
2.17 ความแปรผันของกราฟโพลาริเซชัน (Polarization Curve Variations)	34
2.18 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM	36
2.19 ผลกระทบของปริมาณสัมพันธ์ที่มีต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM	37
2.20 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบพลังงาน	38
2.21 ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM	39
2.22 เซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM (23 cells, 50 W, 40 A, ประมาณ 12.5 V) ผลิตโดยบริษัท ZSW	41
2.23 ระบบอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM	42
2.24 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC ขนาด 1.0 kW <sub>e</sub> และ PEMFC ขนาด 4.5 kW <sub>e</sub> ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง	46
2.25 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิง	47
3.1 The Nexa™ Power Module	52

3.2	การติดตั้งใช้งาน ของ The Nexa™ Power Module	53
3.3	ส่วนประกอบต่าง ๆ ของ The Nexa™ Power Module	54
3.4	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง	56
3.5	การต่อไฮโดรเจน	57
3.6	การต่อ Load Relay	57
3.7	การต่อชุด Diode	58
3.8	การติดตั้งถาดรองน้ำ	58
3.9	การต่อสายสัญญาณ RS485/232 กับคอมพิวเตอร์	59
3.10	การต่อวงจรในห้องปฏิบัติการ	59
3.11	การต่อถังไฮโดรเจนกับชุดเซลล์เชื้อเพลิง	60
3.12	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์	60
3.13	โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application	61
3.14	การเปิดสวิตช์เครื่องเปิด-ปิดสัญญาณ	61
3.15	การใช้งานของคำสั่ง Communication ส่วนควบคุมของเซลล์เชื้อเพลิง	62
3.16	การทำงานของพัดลมของเซลล์เชื้อเพลิง	62
3.17	การใช้งานของคำสั่ง Data Logging ส่วนควบคุมของเซลล์เชื้อเพลิง	63
3.18	โปรแกรมผลการทดสอบของเซลล์เชื้อเพลิง	64
3.19	แผนผังขั้นตอนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	65
3.20	โครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง	68
3.21	รายละเอียดการสมมูลมวล	71
4.1	ความสัมพันธ์ของสมการ $E_{Nernst}$ กับความดันของก๊าซไฮโดรเจน	74
4.2	ความสัมพันธ์จากการเกิดปฏิกิริยาเคมี	75
4.3	ความสัมพันธ์ของสมการ $V_{ohmic}$ ต่อพื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง	76
4.4	ความสัมพันธ์ของกระแสที่มีผลต่อการถ่ายโอนมวล	77
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันโดยการคำนวณด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์	78
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังงานโดยการคำนวณด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์	79
4.7	แบบจำลองการทดสอบกระแสและแรงดัน	79
4.8	ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสแบบฉับพลันด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์	80
4.9	ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Step Up ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์	81
4.10	ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Saw Tooth ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์	82
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	83
4.12	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	84

4.13	การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบจับพลัน	85
4.14	ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Step Up	86
4.15	ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Saw Tooth	87
4.16	ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Up & Down	88
4.17	ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ	89
4.18	ความสัมพันธ์ของกำลังงานเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ	90
4.19	ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบจับพลัน เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ	91
4.20	เปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำระหว่างแบบจำลองกับทดสอบในห้องปฏิบัติการ	92



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

พลังงานและมลพิษเป็นปัญหาที่ร้ายแรงที่สุดในโลกในช่วงนี้ บางครั้งวิกฤตการณ์ของโลกอาจทำให้ประเทศไทยมีผลกระทบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพราะปัจจุบันความต้องการทางด้านไฟฟ้าของประชาชนในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในอนาคตอันใกล้นี้เชื้อเพลิงที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันก็กำลังจะหมดไป และราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น พลังงานใหม่และพลังงานสะอาดจึงถูกนำมาพิจารณาเพื่อทดแทนและลดการเกิดมลภาวะต่าง ๆ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งในอนาคต ที่จะนำมาทำเป็นพลังงานไฟฟ้า

ดังนั้นจากการศึกษาจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) เพื่อทดสอบและวิเคราะห์ผลต่าง ๆ รวมทั้งประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง และเป็นแนวทางในการพัฒนาการนำไฮโดรเจนมาใช้สร้างระบบไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ให้จ่ายไฟฟ้าได้เหมาะสมกับประเทศได้ และเป็นพลังงานทางเลือกที่พึ่งพาตนเองแบบยั่งยืนได้

เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงถึง 50 – 70% สำหรับการเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้า และ 90% เมื่อรวมพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ และเซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และปัจจุบันการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงยังเป็นเพียงในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อการวิจัยและพัฒนา ซึ่งยังไม่มีการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่าใดนัก ทำให้ราคาเริ่มต้นของเซลล์เชื้อเพลิงยังคงสูงอยู่มาก [1]

การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็กชนิด PEM ขนาด 500W, 12.5V. ผลจากงานวิจัยนี้พิสูจน์แล้วว่ามีความสมรรถนะและประสิทธิภาพที่ดี เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด [2]

การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ขนาด 1.2 kW โดยการปรับอัตราการใช้ของบี๊มลม, พัดลม, เครื่องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิในสถานะโหลดคงที่, โหลดตัวแปร (วิเคราะห์ผลกระทบชั่วคราว) และระยะยาว ทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลด (เพื่อทดสอบสมการความร้อนของสแต็ค) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง ผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับการควบคุมอินพุตค่าต่าง ๆ ซึ่งก็สามารถได้ผลการทดลองเป็นไปในทางเดียวกับข้อมูลจำลอง [3]

การคำนวณการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เป็นการจำลองระบบแบบพื้นฐานทางกายภาพ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงถึงพฤติกรรมชั่วคราวของแรงดันที่เกิดขึ้นภายในระบบของเซลล์สแต็ค เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง

ได้มีการเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สมบูรณ์ ซึ่งมีลักษณะการทำงานที่หลากหลายภายในระบบของตัวเซลล์เชื้อเพลิงเอง และได้มีการแสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมต่าง ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง [4]

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษารวบรวมข้อมูลการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบต่าง ๆ และเขียนโปรแกรมวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วย MATLAB/SIMULINK

1.2.2 เพื่อศึกษาและทดสอบการทำงานและการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) ขนาด 1.2 kW

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์และประเมินผลเพื่อเปรียบเทียบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจากโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ และการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) ขนาด 1.2 kW ยี่ห้อ Nexa™ Power Module User's Manual รุ่น MAN5100078 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาใช้ทำการทดสอบเพื่อทำการวิเคราะห์ผลต่าง ๆ รวมทั้งประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์จริง เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์การทำงาน และสามารถนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการคำนวณโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ MATLAB/SIMULATION และสามารถนำไปใช้งานได้จริงร่วมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการนำไฮโดรเจนมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งในอนาคตได้

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 สามารถรวบรวมข้อมูลการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบต่าง ๆ และเขียนโปรแกรมวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วย MATLAB/ SIMULINK

1.4.2 สามารถนำข้อมูลการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมาทดสอบการทำงานและการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) ขนาด 1.2 kW

1.4.3 สามารถวิเคราะห์และประเมินผลเพื่อเปรียบเทียบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจากโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ และการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง



## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษารายละเอียดงานวิจัยจากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดขอบเขตของงานวิจัย
- 1.5.2 ศึกษารายละเอียดข้อมูลการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ
- 1.5.3 ศึกษาการทำงานของโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ MATLAB/ SIMULATION
- 1.5.4 ทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) ขนาด 1.2 kW ยี่ห้อ Nexa™ Power Module User's Manual รุ่น MAN5100078
- 1.5.5 วิเคราะห์ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมทางคณิตศาสตร์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
- 1.5.6 สรุปและอภิปรายผล
- 1.5.7 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ข้อมูลในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประกอบในการตัดสินใจ เพื่อพิจารณาเซลล์เชื้อเพลิงเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ได้
- 1.6.2 ข้อมูลในงานวิจัยนี้ สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาการนำไฮโดรเจนมาใช้สร้างระบบไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้
- 1.6.3 ข้อมูลในงานวิจัยนี้ สามารถเป็นแนวทางในการตัดสินใจ เพื่อใช้ในระบบขนส่งได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีของเซลล์เชื้อเพลิง

#### 2.1 คำนำ

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานใหม่ที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีข้อดีและสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายเช่น ระบบไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ชนบทห่างไกล ในครัวเรือน หรือในอาคารสำนักงานต่างๆ รวมถึงในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ วิทยุ หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กอื่นๆ อุปกรณ์ทางการทหาร ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าแบบ Combine Heat Cycle Power Plant (CHP) ปัจจุบันยังไม่มีหน่วยงานใดในประเทศไทย ที่ทำการศึกษาการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงอย่างจริงจัง และต่อเนื่อง

ดังนั้นเพื่อให้ประเทศมีความพร้อมในการที่จะรองรับในเทคโนโลยีดังกล่าวจึงจำเป็นต้องเริ่มที่จะศึกษาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงอย่างเร่งด่วน

#### 2.2 ประวัติของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบตัวแรกของโลกที่สามารถทำงานได้ถูกสร้างขึ้นโดย Sir William Robert Grove นักกฎหมายและนักฟิสิกส์ชาวเวลส์

ปี ค.ศ. 1811 - 1896 Sir William Robert Grove ได้ปรับปรุงแบตเตอรี่แบบเปียก (Wet-Cell Battery) เรียกว่า Grove Cell ซึ่งการทำงานของ Grove Cell ใช้ขั้วไฟฟ้าคือ แพลทินัม (Platinum) จุ่มในกรดไนตริก (Nitric) และขั้วไฟฟ้าสังกะสี (Zn) จุ่มในสารละลายซิงค์ซัลเฟต ให้กระแสไฟฟ้า 18 แอมแปร์ แรงดันที่ 1.8 โวลต์ Grove ยังพบว่า เมื่อจุ่มขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรด (Electrode) สองขั้วซึ่งทำจากแพลทินัม (Platinum) ขั้วทั้งสองแยกออกจากกันด้วยหลอดแก้วซึ่งบรรจุก๊าซเอาไว้ ข้างหนึ่งเป็นไฮโดรเจนและอีกข้างหนึ่งเป็นออกซิเจน แท่งอิเล็กโทรดทั้งสองจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (กรดซัลฟูริกเจือจาง) ทำการเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว ทั้งสองได้แต่ต่ำมากๆ ดังนั้น Grove จึงนำเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวมาต่อกันหลายๆ ตัวเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น และ Grove ได้สร้างแบตเตอรี่แก๊ส (Gas Battery) ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงตัวแรกของโลก การค้นพบของเขาได้รับความสนใจน้อยมากในช่วงเวลานั้น ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงถูกลืมไป

ปี ค.ศ. 1853 – 1932 Friedrich Wilhelm Ostwald ได้สรุปการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยอธิบายการทำงานส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นขั้วไฟฟ้า, สารละลายอิเล็กโทรไลต์, ตัวออกซิไดส์, ตัวรีดิวซ์, ไอออนบวกและไอออนลบ และแก้ปัญหาการทำงานของ Gas Battery ของ Grove ด้วย

ปี ค.ศ. 1855 – 1932 William W. Jacques ได้สร้างกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน และสร้างคาร์บอนแบตเตอรี่ (Carbon Battery) โดยนำสารละลายเบสเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ กับขั้วไฟฟ้าของคาร์บอน ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดถึง 82%

ปี ค.ศ. 1873 – 1944 Emil Baur ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงหลายประเภท ซึ่งใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้อุณหภูมิสูง

ปี ค.ศ. 1904 – 1992 Francis Thomas Bacon ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell) ซึ่งใช้นิกเกิล (Ni) เป็นขั้วไฟฟ้า ต่อมาได้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการทหาร, และยานอวกาศอะพอลโล (Apollo) และผลิตกล่องที่บรรจุเซลล์เชื้อเพลิงเรียงเป็นชั้น ๆ ให้กับสถาบันวิจัยแห่งชาติ (National Research Development Corporation) ของประเทศอังกฤษ ยานอวกาศและเรือดำน้ำ ต้องการระบบพลังงานไฟฟ้าซึ่งต้องไม่ใช่เทคโนโลยีเครื่องยนต์สันดาปภายใน

ปี ค.ศ. 1960 National Aeronautics and Space Administration (NASA) ทุ่มงบประมาณ 10 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เพื่อพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงสำหรับโครงการอวกาศ Apollo เนื่องจากการใช้แบตเตอรี่ธรรมดา มีน้ำหนักมากเกินไปสำหรับยานอวกาศ

ในช่วงต้นทศวรรษที่ 90 นักวิทยาศาสตร์และวิศวกร ได้พัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงแบบต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและลดราคาของระบบได้ในขณะเดียวกัน ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ และจะเป็นเทคโนโลยีที่ปฏิวัติการใช้พลังงานของโลกในอนาคต

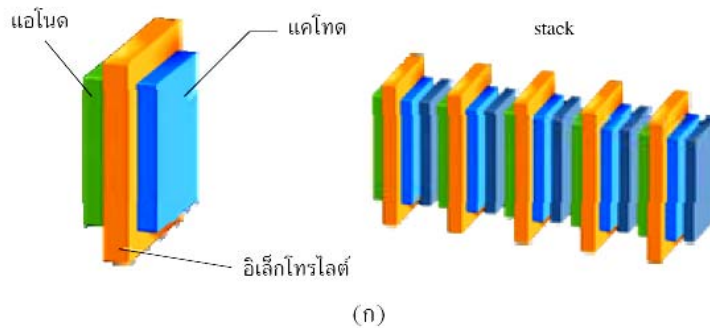
## 2.3 พื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง คืออุปกรณ์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนด้วยกระบวนการ “Electrochemical” โดยการรวมตัวกันระหว่างเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ (ไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ โพรเพน) และอากาศ (ออกซิเจน) ผลของกระบวนการดังกล่าวยังทำให้ได้น้ำซึ่งเป็นเสมือนไอเสียของระบบด้วย เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีเชื้อเพลิงป้อนให้ระบบ ไม่ต้องการการประจุใหม่เหมือนแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการแปลงรูปพลังงานที่สูงกว่า เทคโนโลยีการแปลงรูปพลังงานอื่นๆ ที่ใช้กันอยู่ การทำงานปราศจากการเผาไหม้จึงไม่มีมลพิษ ไม่มีการเคลื่อนไหวยของอุปกรณ์

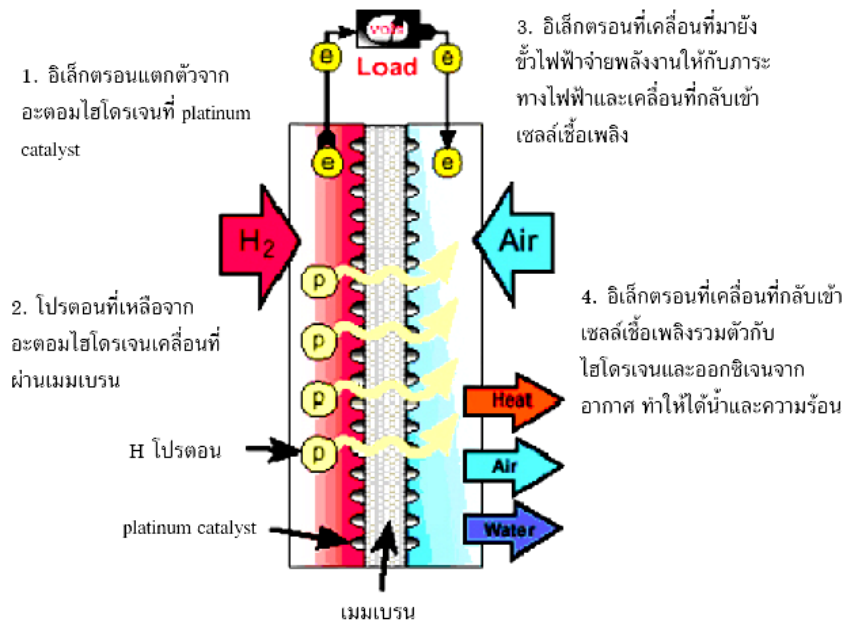
เซลล์เชื้อเพลิงประกอบไปด้วยชั้นของวัสดุสามชั้นเรียงซ้อนกัน ชั้นแรกเป็นแอโนด (Anode) ชั้นที่สองเป็นอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และชั้นที่สามเป็นแคโทด (Cathode) โดยที่แอโนดและแคโทดทำหน้าที่เป็นตัว Catalyst ส่วนชั้นตรงกลางนั้นเป็นโครงสร้างที่เป็นพาหะซึ่งดูดซับอิเล็กโทรไลต์เอาไว้ เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะใช้อิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเป็นของเหลว หรือของแข็งในรูปของโครงสร้างเมมเบรน เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงจำเป็นต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงหลายๆ เซลล์มาต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ขนาดของ

แรงดันไฟฟ้าตามต้องการ ซึ่งเรียกลักษณะของการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อกันหลายๆ เซลล์ว่า “Stack” ดังรูปที่ 2.1 ลักษณะของ Stack ของเซลล์เชื้อเพลิง (Stambouliand Traversa, 2002 / Bewag, 2004)

รูปที่ 2.2 แสดงการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกเปลี่ยนรูปให้เป็นไฮโดรเจน โดยเมื่อไฮโดรเจนผ่านเข้ามาที่ Platinum Catalyst จะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรไลต์ขึ้น ในขณะที่ทำปฏิกิริยานั้นโมเลกุลของไฮโดรเจนจะแตกตัวให้อิเล็กตรอนและโปรตอน อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปที่ขั้วไฟฟ้า โปรตอนที่เหลืออยู่เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน (Membrane) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่มายังขั้วไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้พลังงานกับภาระทางไฟฟ้า จากนั้นก็เคลื่อนที่กลับเข้าเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อรวมตัวกับโปรตอนจากไฮโดรเจน และออกซิเจนจากอากาศ ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้ได้ความร้อนและน้ำ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง [5,15]



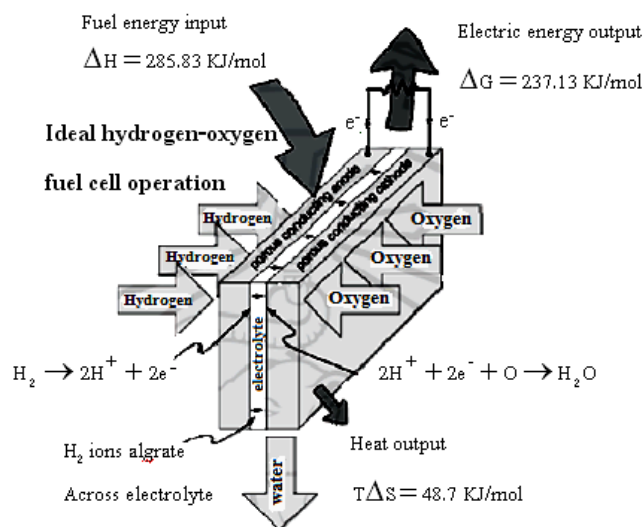
รูปที่ 2.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [6]

## 2.4 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีความพรุน คือ แอโนดและแคโทด สัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจเป็นของแข็งหรือของเหลว โดยการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเริ่มจากขั้วแอโนดได้รับเชื้อเพลิง ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งโมเลกุลก๊าซไฮโดรเจนแตกตัวให้อิเล็กตรอน ( $e^-$ ) กับ โปรตอน ( $H^+$ ) ดังสมการที่ 2.1 โดยโปรตอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังขั้วแคโทดได้ เนื่องจากสารอิเล็กโทรไลต์มีคุณสมบัติเป็นตัวนำโปรตอน อิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่เป็นกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรภายนอก เพื่อไปยังขั้วแคโทด เมื่อขั้วแคโทดได้รับก๊าซออกซิเจนรวมตัวกับอิเล็กตรอนและโปรตอนแล้ว จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ที่ขั้วแคโทดสมการที่ 2.2 ซึ่งผลจากปฏิกิริยาจะได้โมเลกุลของน้ำรวมทั้งเกิดความร้อน

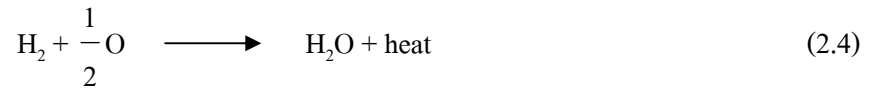


การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ ที่เรียกว่า Thermodynamics Potentials โดยอาศัยความสัมพันธ์ของปริมาณต่าง ๆ ทางอุณหพลศาสตร์ สามารถอธิบายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในเชิงอุณหพลศาสตร์ [7]

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาที่ปล่อยพลังงานออกมา ดังสมการที่ 2.4



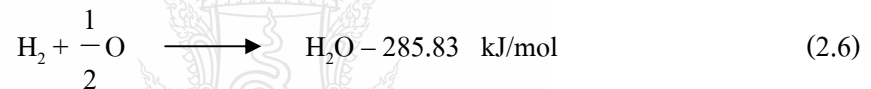
ความร้อนหรือเอนทัลปีของการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ปล่อยออกมาจากระบบ คือผลต่างระหว่างความร้อนของการเกิดผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้น ซึ่งความร้อนของการเกิดสารผลิตภัณฑ์ (น้ำ) จากปฏิกิริยาเคมีข้างต้น มีค่าเท่ากับ -285.83 kJ/mol และค่าความร้อนของการเกิดสารตั้งต้น (ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน) มีค่าเท่ากับ 0 kJ/mol ซึ่งแสดงไว้ดังสมการที่ 2.1

$$\Delta H = (h_{p\text{H}_2\text{O}}) - (h_{p\text{H}_2}) - (h_{p\text{O}_2}) \quad (2.5)$$

$$\Delta H = -285.83 - 0 - 0$$

$$\Delta H = -285.83 \text{ kJ/mol}$$

ดังนั้นสมการที่ 2.4 สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ 2.6



ในงานทางด้านเซลล์เชื้อเพลิง พลังงานที่ปล่อยออกมาจากระบบ จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยปริมาณทางอุณหพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ดังสมการที่ 2.7

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.7)$$

โดยที่ 
$$\Delta S = (S_{p\text{H}_2\text{O}}) - (S_{p\text{H}_2}) - (S_{p\text{O}_2}) \quad (2.8)$$

เมื่อ	H	คือ	Enthalpy (kJ/kg)
	S	คือ	Entropy (kJ/kg.K)
	G	คือ	Gibbs Free Energy (kJ/kg)

จากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง เป็นการรวมอะตอมของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน เกิดโมเลกุลของน้ำ โดยกระบวนการเกิดจะสมมติให้เกิดที่ความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิ 298<sup>o</sup>K พลังงานที่เกิดจากการรวมกันของอะตอม ทำให้ปริมาตรของก๊าซลดลง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเอนทัลปีและเอนโทรปี ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่ามาตรฐานทางอุณหพลศาสตร์และการคำนวณปริมาณทางอุณหพลศาสตร์

Quantity	H <sub>2</sub>	0.5O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Change
Enthalpy	0	0	-285.83 kJ	ΔH = -285.83 kJ
Entropy	130.68 J/K	0.5x205.14 J/K	69.91 J/K	TΔS = -48.70 kJ

คำนวณหาพลังงานที่ปล่อยออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิง (ΔG)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = -285.83 \text{ kJ} + 48.70 \text{ kJ} = -237.13 \quad (2.9)$$

การลดลงของเอนโทรปี เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาการรวมตัว ดังนั้นปริมาณพลังงาน TΔS ต้องถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อมในรูปของพลังงานความร้อนอุณหภูมิ T เพื่อให้เอนโทรปีรวมมีค่าคงที่จากการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงให้ออกมา เท่ากับ 237.13 kJ ต่อ 1 โมลไฮโดรเจน โดยมีพลังงานบางส่วนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม

สำหรับงานทางไฟฟ้าที่ได้รับจะอยู่ในรูปของประจุไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งแสดงได้ ดังสมการที่ 2.10

$$W_{el} = qE \quad (2.10)$$

โดยที่  $q = n_e N_{avg} q_{el}$  (2.11)

เมื่อ	$W_{el}$	คือ	งานทางไฟฟ้า (J/mol)
	$Q$	คือ	ประจุ (Coulombs/mol)
	$E$	คือ	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volts)
	$n_e$	คือ	จำนวนอิเล็กตรอนต่อโมเลกุล H <sub>2</sub> (เท่ากับ 2 Electron/Molecule)
	$N_{avg}$	คือ	จำนวน โมเลกุลต่อ โมล (เลขอะโวกาโด) เท่ากับ $6.022 \times 10^{23}$ Molecules/Mol
	$F$	คือ	ผลคูณระหว่างเลขอะโวกาโด กับ ประจุ 1 อิเล็กตรอน 96,485 (Coulombs/Electron-mol)

ดังนั้นงานทางไฟฟ้าหาได้จากสมการที่ 2.12 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับค่า Gibbs Free Energy, ΔG ได้ดังสมการที่ 2.13

$$W_{el} = n_e FE \quad (2.12)$$

$$W_{el} = -\Delta G \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.12 และ 2.13 สามารถจัดรูปใหม่ และเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และ Gibbs Free Energy,  $\Delta G$  ดังสมการที่ 2.14

$$E = \frac{-\Delta G}{n_e F} \quad (2.14)$$

$$E = \frac{237,340 \text{ J/mol}}{2 \times 96,485 \text{ A.s/mol}}$$

$$E = 1.23 \text{ volts}$$

สำหรับศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibb's Free Energy) ของก๊าซเชื้อเพลิงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา และกระแสไฟฟ้าที่ถูกดึง เมื่อนำแต่ละเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรม แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นตามจำนวนชั้นของเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกัน กระแสไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันขึ้นกับขนาดของพื้นที่ทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง คุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน โดยต้องออกแบบให้จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่ออนุกรมและขนาดของพื้นที่ผลิตกระแสหรือพื้นที่ทำปฏิกิริยาของสแต็กเซลล์เชื้อเพลิงเหมาะสมกับกำลังไฟฟ้าที่จะนำไปใช้งาน เมื่อที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ๆ จะต้องนำเอาสแต็กเซลล์แต่ละชุดมาต่อเข้าด้วยกันทั้งในลักษณะอนุกรมหรือขนาน เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าตามต้องการ ข้อจำกัดปฏิกิริยาเคมีรวมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ อธิบายตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

Fuel Cell	Anode Reaction	Cathode Reaction
Polymer Electrolyte and Phosphoric Acid	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Alkaline	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
Molten Carbonate	$H_2 + CO_3^- \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^- \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^-$
Solid Oxide	$H_2 + O^- \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^- \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^- \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^-$



CO = Carbon Monoxide	$e^-$ = Electron	H <sub>2</sub> O = Water
CO <sub>2</sub> = Carbon Dioxide	H <sup>+</sup> = Hydrogen Ion	O <sub>2</sub> = Oxygen
CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> = Carbonate Ion	H <sub>2</sub> = Hydrogen	OH = Hydroxyl Ion

## 2.5 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นการเปลี่ยนรูปจากพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไปที่พลังงานเคมีจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน และเปลี่ยนเป็นพลังงานกลก่อนเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า เรียกกระบวนการดังกล่าวว่า “วัฏจักรคาร์โนต (Carnot Cycle)” ซึ่งประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนตจะขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของกระบวนการ ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องจักรคาร์โนตแม้จะทำงานที่อุณหภูมิต่ำเพียง 80 °C ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ( $\eta_{fc}$ ) ในทางทฤษฎีขึ้นอยู่กับสัดส่วนของตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์สองตัวคือ พลังงานทางเคมีหรือพลังงานของกิบส์ (Gibbs Energy,  $\Delta G^\circ$ ) และพลังงานความร้อนรวมหรือเอนทัลปี (Enthalpy,  $\Delta H^\circ$ ) ของเชื้อเพลิง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\eta_{fc} = \frac{\Delta G^\circ}{\Delta H^\circ} \quad (2.15)$$

## 2.6 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง มีหลายชนิด แต่ทุกชนิดจะให้กระแสไฟฟ้าออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่สามารถนำไปขับมอเตอร์ หลอดไฟ หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆ ได้ โดยชนิดของตัวเซลล์เชื้อเพลิง จะแบ่งโดยสารเคมีที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเป็นหลัก, ชนิดตามอุณหภูมิการทำงาน และชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ออกแบบมาเพื่อวัตถุประสงค์ของการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยมีชนิดดังต่อไปนี้

### 2.6.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cells, AFC)

#### หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เป็นชนิดแรกที่มีการสร้างขึ้นมา เคยถูกใช้ในโครงการอวกาศของสหรัฐในช่วงปี 1960 แต่เนื่องจากระบบไวต่อการปนเปื้อนมาก จึงต้องใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์เท่านั้น ทำให้ระบบมีราคาสูงมาก ไม่สามารถนำมาขายในท้องตลาดได้

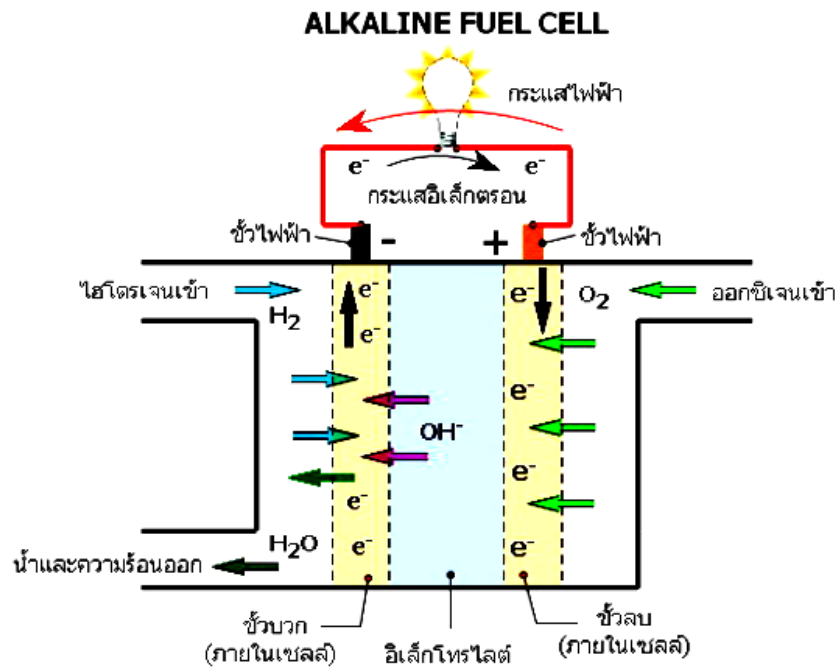
เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์จะใช้ Potassium Hydroxide (KOH) เป็นอิเล็กโทรไลต์ (30-43%) เซลล์เหล่านี้จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิห้องและจะให้ค่าความต่างศักย์สูงที่สุดที่ค่าความหนาแน่นของกระแส (Current Density) เดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงอื่นๆ ก๊าซที่ป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์จะมีก๊าซ CO<sub>2</sub> ไม่ได้ ทั้งนี้เพราะ CO<sub>2</sub> จะเกิดเป็นคาร์บอเนตใน

ตัวกลางที่เป็นด่างและทำให้รูปพุนอดตันก๊าซ  $\text{CO}_2$  จะถูกดึงออกจากอากาศโดยการดูดซึมกับน้ำโซดา (Sodalime) การทำงานของระบบ AFC เคยถูกใช้ในยานอวกาศ เรือดำน้ำ รถยนต์ไฟฟ้า และผลิตน้ำใช้ในยานอวกาศ อายุการทำงานของเซลล์อาจมีค่าสูงถึง 10,000-15,000 ชั่วโมง ราคาต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้จะมีค่าสูง ทั้งนี้เพราะใช้โลหะตระกูลสูง ต้องใช้พลังงานในการอัดหรือทำให้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นของเหลว ก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์สูงด้วยข้อเสียดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ยากต่อการขยายขนาดใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพการผลิตพลังงานสูงถึง 70%

เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์จะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ  $150\text{-}430^\circ\text{F}$  หรือ  $65\text{-}220^\circ\text{C}$  และทำปฏิกิริยาที่ความดันประมาณ 15 psig (1 barg) นอกจากนั้นแล้วแต่ละเซลล์ยังสามารถผลิตแรงดันอยู่ที่ระหว่าง 1.1 และ 1.2 VDC

#### ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cells, AFC)

ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ถ้ามีคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เกิน 350 ppm และบางครั้งก็ไม่สามารถทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ได้เช่นกัน ซึ่งสิ่งนี้เองที่ถือได้ว่าเป็นข้อเสียที่สำคัญและจำกัดทั้งชนิดของออกซิแดนต์ (Oxidant) และเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์ได้ การออกซิแดนต์ (Oxidant) จะต้องขจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปให้เหลือเพียงแต่น้ำบริสุทธิ์กับอากาศ และเชื้อเพลิงจะต้องเป็นไฮโดรเจนบริสุทธิ์เท่านั้น และสามารถทำปฏิกิริยาได้ในเวลาที่สั้น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หลักการเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cells, AFC) [8]

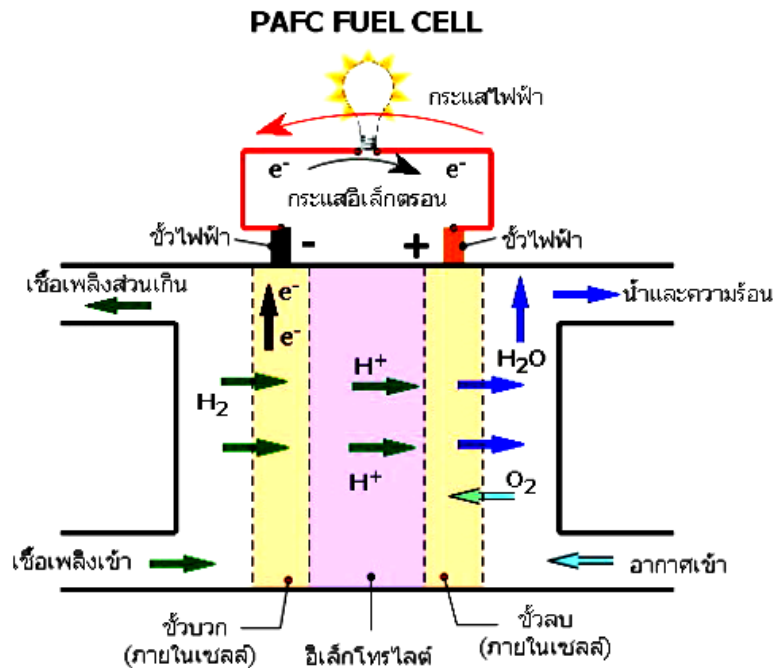
## 2.6.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC)

### หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เป็นระบบที่มีแนวโน้มที่จะถูกนำไปใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าแบบ PEMFC ทำให้ต้องใช้เวลาในการอุ่นระบบที่นานกว่า ทำให้มันไม่เสถียรในการนำมาใช้ในรถยนต์ กรดฟอสฟอริกจะถูกใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้ โดยที่กรดฟอสฟอริกถูกบรรจุในเมทริกซ์ของซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide) ปฏิกริยาในตัวกลางที่มีฤทธิ์เป็นกรดสารอิเล็กโทรไลต์จะมีความเสถียรซึ่งจะทำงานโดยสามารถใช้อากาศที่มีก๊าซ CO<sub>2</sub> อยู่ การที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้มีสถานะการทำงานที่อุณหภูมิสูงปานกลาง จะช่วยลดความเป็นพิษของก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่มีผลต่อตัว คะตะลิสต์ลง จากการทดสอบพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PAFC นี้มีอายุการใช้งานได้นานถึง 40,000 ชั่วโมงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามากกว่า 40% และใช้อุณหภูมิที่ผลิตได้ 85% ในระบบผลิตความร้อนร่วม อุณหภูมิในการทำงานระหว่าง 300-400 °F (150-200 °C) และทำปฏิกิริยาที่ความดันประมาณ 15 psig โดยแต่ละเซลล์สามารถผลิตได้เท่ากับ 1.1 VDC ปัจจุบันมีขนาดใช้งานที่ 1kW และ 1 MW

### ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC)

ใช้อิเล็กโทรไลต์เหลว ทำให้เกิดปัญหาในการควบคุมของเหลวได้ นอกจากนั้นแล้วยังระเหยได้ช้าและกินเวลานานด้วยจึงต้องใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีคุณสมบัติในการกักคร่อนในสถานะอุณหภูมิปานกลาง จึงอาจมีปัญหในเรื่องของการกักคร่อนต่อวัตต์ดูบ, ทนต่อสถานะที่มี Carbon Monoxide ได้เพียง 2 %, ทนต่อสารประกอบกำมะถันได้เพียง 50 ppm, ไม่สามารถจะผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนได้เอง (Auto-Reform Hydrocarbon Fuels) ปล่อยให้ผลิตผลที่เป็นน้ำเข้าไปทำละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก จะต้องมีการอุ่นเครื่องก่อนที่จะทำปฏิกิริยาหรือจะต้องรักษาความคงที่ของอุณหภูมิไว้ในการทำปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC) [8]

### 2.6.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)

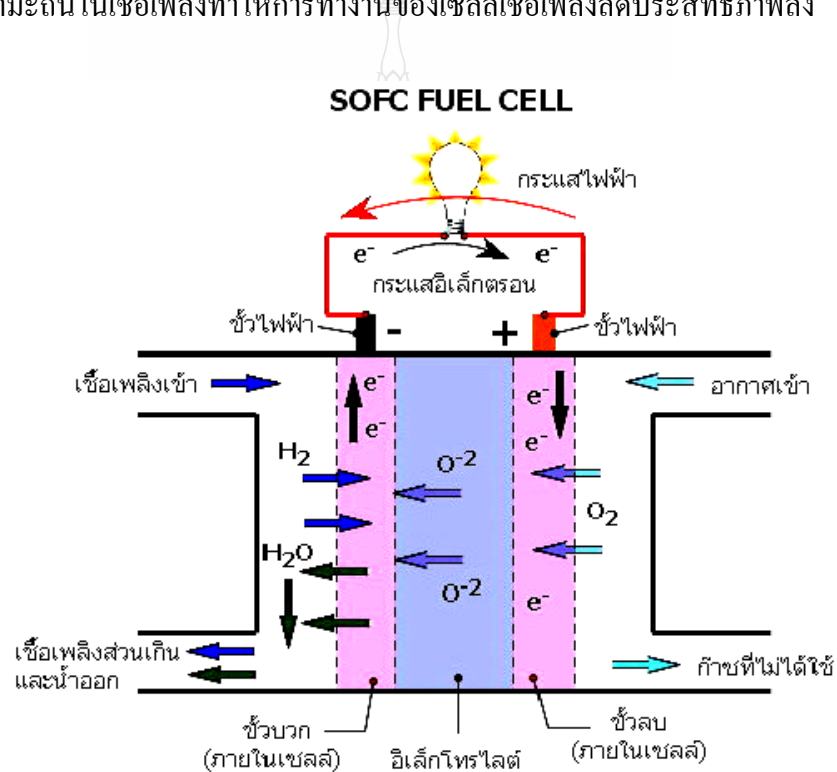
#### หลักการทํางานของเซลล์เชื้อเพลิง

เป็นระบบที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่เนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มาก แต่เซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิที่สูงมาก(ประมาณ 1,832 °F, 1,000 °C) ทำให้มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพ แต่ก็มีข้อดีตรงที่ว่า ไอ้แต่อุณหภูมิสูงที่เป็นผลผลิตจากกระบวนการนี้สามารถนำไปใช้ป่นกังหันก๊าซต่อได้ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในระบบ SOFC จะใช้ อิเล็กโทรไลต์ที่นำอะตอมของออกไซด์ ( $O_2^-$ ) จากขั้วลบไปยังขั้วบวก ซึ่งตรงกันข้ามกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นที่จะนำอะตอมของไฮโดรเจนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ทั้งอิเล็กโทรดและสารอิเล็กโทรไลต์ต่างก็ทำมาจากวัสดุเซรามิกจำพวกออกไซด์แข็ง อาทิ อิตเรียม (Yttria) หรือเซอร์โคเนีย (Zirconia) วัสดุเหล่านี้จะสามารถเป็นตัวนำไอออน  $O_2^-$  ที่อุณหภูมิสูงกว่า 800°C ถ้าเซลล์มีสภาวะการทำงานที่ประมาณ 900°C การไหลเวียนกลับของ  $CO_2$  จากทางออกหัวแอนด์ไปยังหัวแคโทดเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซจากถ่านหินหรือเชื้อเพลิงเหลวที่ถูกทำให้ระเหยสามารถถูกปฏิรูปให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิง ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการสามารถถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้ ระบบ SOFC สามารถใช้ได้กับก๊าซธรรมชาติ ดังนั้น SOFC จึงมีศักยภาพสูงในอนาคตอันใกล้อุณหภูมิทำงานประมาณ 1,800 °F (1,000 °C) และที่ความดันประมาณ 15 psig (1 barg) ซึ่งแต่ละเซลล์สามารถผลิตแรงดันได้อยู่ที่ระหว่าง 0.8 และ 1 VDC ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 100 kW ดังรูปที่ 2.6

## ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)

เนื่องจากเทคโนโลยียังไม่สูงพอ ในทางปฏิบัติยังไม่เคยเกิดกระบวนการผลิตที่เกิดจากวัสดุหลายชนิดมารวมกัน จึงต้องพัฒนาวัสดุที่เหมาะสม เพื่อที่จะได้มีคุณสมบัติในการเป็นสื่อนำพลังงาน, ถึงวัสดุจะน้อยแต่ก็สามารถทำปฏิกิริยาในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงได้แต่ก็ยังคงสถานะของแข็งแม้เวลาในการทำปฏิกิริยาจะผ่านไปนานมากเพียงใด นอกจากนั้นแล้ววัสดุที่เลือกจะต้องมีความแน่นพอเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการแตกออกหรือแยกออกเป็นส่วน ๆ ระหว่างที่เกิดความร้อน, ทำปฏิกิริยาเคมีได้กับเซลล์ประกอบอื่น ๆ และรวมกับวัสดุได้หลากหลาย

SOFC จะทนต่อการเจือปนของกำมะถันได้สูงสุดคือ 50 ppm ซึ่งการทนต่อกำมะถันที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้เซลล์เชื้อเพลิงต้องทำงานกับเชื้อเพลิงหนัก ๆ นอกจากนั้นแล้ว การที่มีจำนวนที่มากเกินไปของกำมะถันในเชื้อเพลิงทำให้การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดประสิทธิภาพลง



รูปที่ 2.6 หลักการเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) [8]

### 2.6.4. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)

#### หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

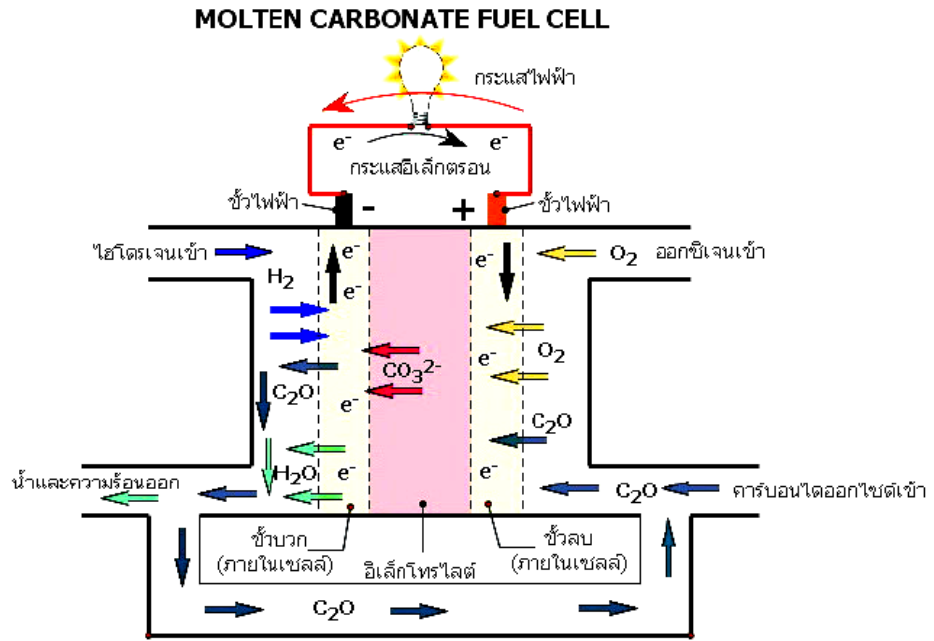
เป็นอีกประเภทหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่ แต่ชนิดนี้จะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 1,112 °F หรือ 600 °C ที่ความดันประมาณ 15 ถึง 150 psig และแต่ละเซลล์ผลิตแรงดันได้ระหว่าง 0.7 และ 1 VDC ทั้งยังสามารถให้อิออนความดันสูงเพื่อมาช่วยผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย ของผสมของเกลือลิเทียมคาร์บอเนตกับเกลือโปตัสเซียมคาร์บอเนตที่เกาะอยู่บนตัวกลาง

$\text{LiAlO}_2$  จะถูกใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในระบบเซลล์เชื้อเพลิง MCFC ก๊าซ  $\text{CO}_2$  ที่ออกมาจากขั้วอะโนดจะถูกใช้ที่ขั้วแคโทด ซึ่งการไหลเวียนกลับของ  $\text{CO}_2$  นี้เป็นสิ่งสำคัญต่อการทำงานของเซลล์ อุณหภูมิการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้จะมีค่าอยู่ในช่วง  $500\text{-}700\text{ }^\circ\text{C}$  ด้วยสภาวะอุณหภูมิที่สูงนี้ ปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดจึงไม่จำเป็นต้องมี Pt เป็นคะตะลิสต์ การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเนตหลอมสามารถทำได้ 2 แบบ คือ

- แบบที่มีการปฏิรูปภายนอกและแบบปฏิรูปภายใน ในรูปแบบแรกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซ  $\text{H}_2$  โดยเครื่องปฏิรูป (Reformer) ที่ติดตั้งภายนอก
- แบบที่สองสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซ  $\text{H}_2$  ภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิง

### ของเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cell ,MCFC)

การกัดกร่อนทางเคมีเป็นปัญหาที่ไม่ธรรมดา และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด Nickel Oxide จากขั้วลบ เพื่อทำละลายในอิเล็กโทรไลต์ หรือพุดง่าย ๆ ก็คือ การกัดกร่อนทำให้ปริมาณอิเล็กโทรไลต์ลดลง ทำให้โลหะที่ใช้แบ่งเสื่อม และทำให้เกิดการไหลของอิเล็กโทรด โดยผลกระทบที่เกิดจากการกัดกร่อนทั้งหมดนี้ เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง อายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงสั้นลง แต่ถ้าแก้ปัญหาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นทองคำขาว (Platinum) ก็จะสามารถกำจัดปัญหาในจุดนี้ไปได้แต่ราคาของทองคำขาวมีราคาแพง ทำให้ราคาของเซลล์เชื้อเพลิงมีราคาสูงมากจึงไม่นิยมนำมาใช้ อย่างหนึ่งในกรณีที่วัสดุคืบที่ใช้เป็นถ่านหินที่มีธาตุกำมะถันอยู่ การผลิตก๊าซจากถ่านหินโดยปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชันอาจจะทำให้เกิด  $\text{H}_2\text{S}$  และ  $\text{COS}$  ซึ่งก๊าซ  $\text{H}_2\text{S}$  นี้จะเป็นพิษต่อขั้วอิเล็กโทรด อุณหภูมิในการทำงานที่  $1,200\text{ }^\circ\text{F}$  ( $650\text{ }^\circ\text{C}$ ) ปัจจุบัน MCFC ใช้ได้กับไฮโดรเจน  $\text{CO}$  ก๊าซธรรมชาติ โพรเพน มีเทน และก๊าซจากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันถ่านหิน กำลังการผลิตไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $10\text{kW}\text{-}20\text{MW}$ . ดังรูปที่ 2.7



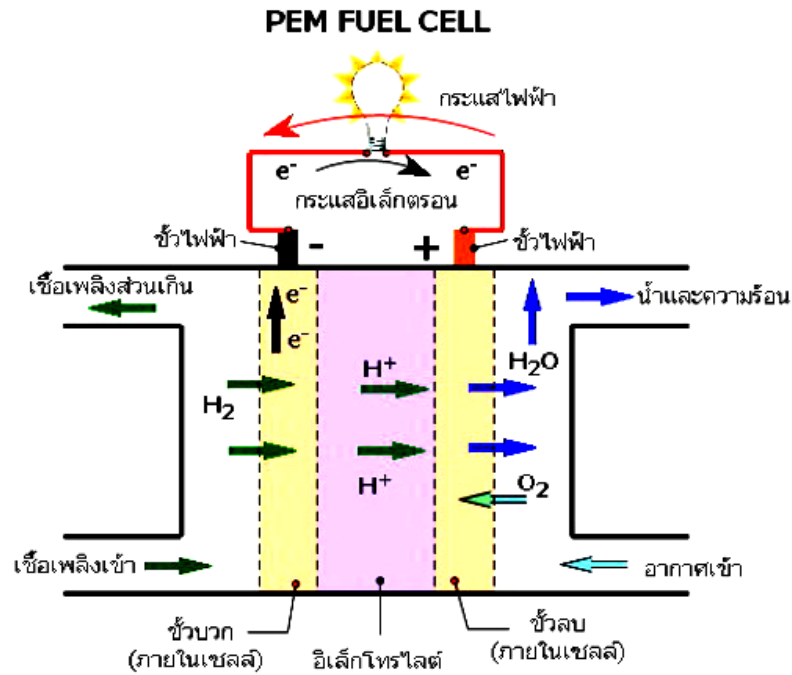
รูปที่ 2.7 หลักการเซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) [8]

### 2.6.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดบริเวณเยื่อหุ้มมีการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange

#### Membrane Fuel Cell ,PEMFC)

#### หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ซึ่งหลักการทำงานของ PEM Fuel Cell เริ่มต้นจากการอัด Hydrogen เข้าสู่ขั้วบวกของ Fuel Cell โดยใช้ความดันเพื่อให้ผ่านตัว Catalyze ไปได้ หลังจาก Hydrogen ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาไปแล้วจะทำการปล่อยอะตอมขั้วบวก (H+) ไปสู่ขั้วลบของ Fuel Cell และปล่อยอิเล็กตรอน (e<sup>-</sup>) ผ่านขั้วออกมาไปสู่ระบบวงจรภายนอกเพื่อสร้างกระแสและย้อนกลับสู่ขั้วลบของ Fuel Cell สำหรับ Oxygen จะถูกดันผ่านตัว Catalyze เช่นกันแต่ผ่านทางขั้วลบแทน โดยทำหน้าที่ดึงคู่อะตอมของ H<sup>+</sup> ผ่านชั้น Membrane เข้ามา และรับอิเล็กตรอนอิสระ (e<sup>-</sup>) จากวงจรภายนอก แล้วทำปฏิกิริยากันได้ผลลัพธ์คือ โมเลกุลของน้ำ (H<sub>2</sub>O) แสดงดังรูปที่ 2.8



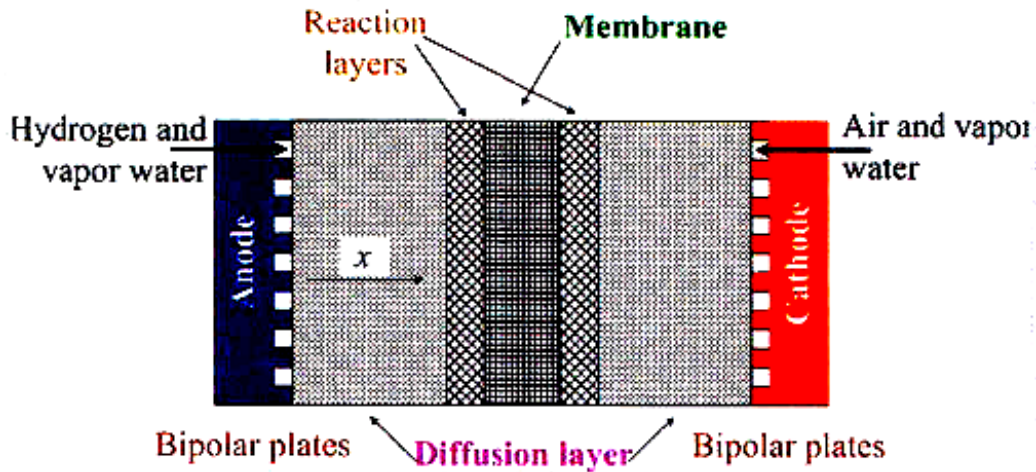
รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดบริเวณเยื่อหุ้มมีการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) [8]

## 2.7 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

ตามหลักฟิสิกส์แล้ว แต่ละเซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบไปด้วย MEA (Membrane Electrode Assembly) โดย MEA นี้ ประกอบไปด้วย ขั้วบวก (Anode), ขั้วลบ (Cathode), อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte: สารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้า), ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และ Flow Field Plates สองแผ่นที่ทำจากคาร์ไฟต์ประกบกัน แผ่นพิมพ์โลหะ (Plate) ที่เป็นทางลำเลียงเชื้อเพลิงและอากาศ กั้นคั่นกับ MEA

โครงการสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แสดงไว้ในรูปที่ 2.9 ก๊าซซึ่งไหลมาจากทิศทาง X มาจากช่องที่ถูกรอกแบบเป็นแผ่นแบบสองขั้ว (หนา 1-10 mm) ใช้น้ำถูกนำมารวมกับก๊าซเพื่อให้ความชื้นกับเมมเบรน ชั้นการกระจายตัว (Diffusion Layers: 100-500 m) มีไว้เพื่อการแพร่กระจายที่ดีของก๊าซไปยังชั้นปฏิกิริยา (Reaction Layers :5-50 m) ชั้นเหล่านี้ได้ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าของเซลล์ซึ่งทำด้วยแพลตินัมทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา





รูปที่ 2.9 ชั้นต่าง ๆ ของเซลล์พื้นฐานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

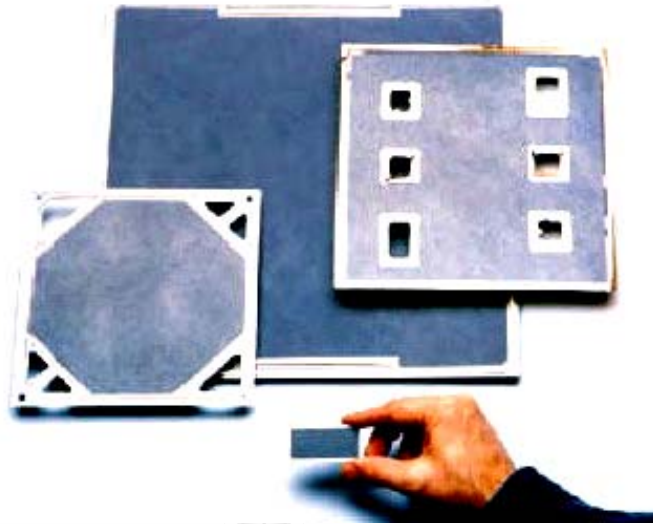
### 2.7.1 Membrane Electrode Assembly (MEA)

MEA ถือได้ว่าเป็นหัวใจหรือเรื่องที่สำคัญมากในเซลล์เชื้อเพลิง โดย MEA ประกอบด้วย เยื่อหุ้มเซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นสาร โพลิเมอร์แข็งเหมือนพลาสติก (Membrane Electrolyte Polymer Solid) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าคาร์บอนที่มีรูพรุนสองขั้ว, ตัวเร่งปฏิกิริยาทองคำขาวถูกผสมระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์และขั้วไฟฟ้า โดยกลุ่มของขั้วไฟฟ้าจะรวมถึงแผ่นปิดผนึกที่จำเป็นซึ่งเอาไว้รวม ส่วนประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกันดังรูปที่ 2.8 โดยคุณสมบัติของเมมเบรนพอลิเมอร์ที่ถูกใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มีดังต่อไปนี้

1. มีค่าการนำไอออนสูงแต่มีค่าการนำอิเล็กตรอนต่ำ
2. มีค่าการแพร่ของก๊าซต่ำ
3. มีขนาดที่แน่นอน
4. มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง
5. มีการแพร่ของน้ำต่ำ
6. มีความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำ (Dehydration)
7. มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน รีดักชันและไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
8. มีค่าการถ่ายเทไอออนบวก (Cation) สูง

เมมเบรนพอลิเมอร์มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากมีกลุ่มของซัลโฟนิก (Sulfonic Group) ประกอบอยู่ที่ปลายสายโซ่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลของกรดเปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิก (Perfluorosulfonic Acid) จึงมักเรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่สามารถนำไอออนไฮโดรเจนได้ดี โดยเงื่อนไขการนำไอออนต้องอยู่บนสภาวะที่มีความชื้นเข้าไปเกี่ยวข้อง เนื่องจากเมมเบรนมีคุณสมบัติความเป็นกรด

ซึ่งจำเป็นต้องมีโมเลกุลของน้ำต่อไฮโดรเจน ไอออนที่ทำให้เกิดการนำไอออนได้ดีที่สุด คือประมาณ 3:1 ดังนั้นค่าการนำไอออนของพอลิเมอร์จึงขึ้นอยู่กับค่าความดันน้ำที่ตำแหน่งนั้น ๆ ภายในเซลล์ เชื้อเพลิง อุณหภูมิเซลล์ และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของความชื้นด้วย ดังรูปที่ 2.10



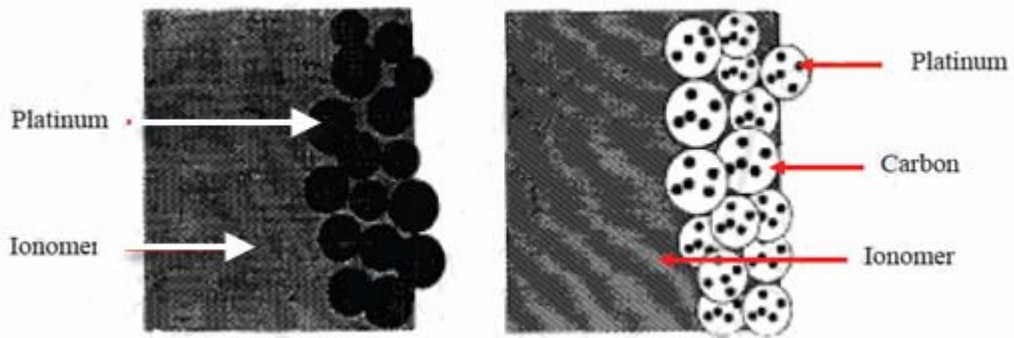
รูปที่ 2.10 การประกอบ PEM Membrane Electrode [9]

### 2.7.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ขั้วไฟฟ้าจะเป็นที่สำหรับให้ก๊าซกับอิเล็กโทรไลต์มาเจอกัน, เป็นสื่อนำพลังงานให้อิเล็กตรอนอิสระไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ และทำให้วัสดุคิบต่าง ๆ ทำงานร่วมกันได้ นอกจากนี้แล้ว วัสดุคิบที่นำมาเป็นขั้วไฟฟ้าจะต้องบางมาก, เก็บสะสมก๊าซได้มาก และถ่ายเทน้ำได้ดี ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกนำมาใช้ร่วมกับขั้วไฟฟ้าแต่ละขั้ว โดยเลือกติดตั้งบริเวณที่พบอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากบริเวณนี้อัตราการเพิ่มของปฏิกิริยาได้ตอบทางเคมีนั้นอยู่ในระดับที่สูง ตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะช่วยเพิ่มปฏิกิริยาได้ตอบทางเคมี โดยจัดหาพื้นที่ที่เหมาะสมแก่การได้ตอบปฏิกิริยา หากแต่ว่าต้องไม่ถูกใช้ที่เดียวจนหมดทั้งกระบวนการ ทองคำขาวถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการดังกล่าวนี้ เนื่องจากมีความสามารถในการเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าได้สูง มีเสถียรภาพ และเป็นตัวนำไฟฟ้า แต่เนื่องจากทองคำขาวราคาแพง ฉะนั้นจึงใช้ในปริมาณมาก เซลล์เชื้อเพลิงก็จะมีราคาแพงตามไปด้วย ฉะนั้นจึงมีความพยายามที่จะลดจำนวนการใช้ทองคำขาวลงในขณะที่ยังคงประสิทธิภาพของเซลล์ไว้ด้วย

การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาคัดคบบนเมมเบรน สามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีแรกเป็นการทำขั้วไฟฟ้าแบบเก่าคือการใช้แพลตตินัมดำ (Platinum Black) มาอัดโดยใช้ความร้อนให้ติดลงไปโดยตรงบนแผ่นเมมเบรน และอีกวิธีหนึ่งเป็นการทำขั้วไฟฟ้าแบบใหม่หรือแบบชั้นฟิล์มบาง (มีความหนา 4 – 5  $\mu\text{m}$ ) โดยการนำแพลตตินัมมาเกาะบนตัวรองรับคาร์บอนก่อนจากนั้นค่อย

นำไปเกาะบนเมมเบรน โดยข้อไฟฟ้าแบบชั้นฟิล์มบางให้สมรรถนะการทำงานที่ดีกว่าข้อไฟฟ้าแบบที่ใช้แพลตตินั่มดำ โดยเปรียบเทียบจากการใช้ไฮโดรเจนกับอากาศเป็นสารตั้งต้นและยังมีปริมาณการใช้แพลตตินั่มที่ น้อยกว่าถึง 10 เท่า ดังรูปที่ 2.11



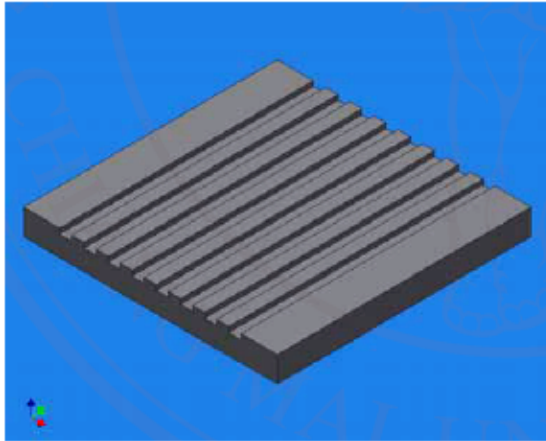
รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบรูปแบบของข้อไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [10]

### 2.7.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

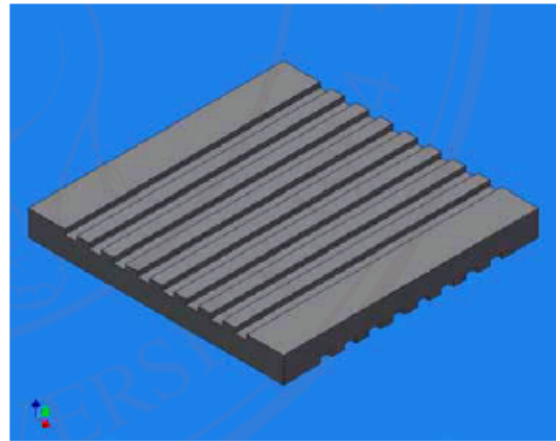
ปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งถ้าหากก๊าซทั้งสองมาผสมกันในอุณหภูมิปกติจะไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้น เนื่องจากโมเลกุลมีความเสถียรมาก ยกเว้นแต่จะมีบางสิ่งมาทำเป็นตัวกระตุ้นจึงจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ เช่น การให้ความร้อนระหว่างที่ก๊าซไฮโดรเจนผสมกับออกซิเจนหรือเติมสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น โดยสารที่เติมลงไปนั้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง สารที่ช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้โดยตัวเองไม่เปลี่ยนแปลงเป็นสารอื่น และปริมาณคงเดิมเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด เรียกสารนั้นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ การทำให้พลังงานกระตุ้น (Activation Energy)  $E_a$  น้อยลง

### 2.7.4 แผ่นสะสมกระแส (Current Collector Plate)

แผ่นสะสมกระแสเป็นองค์ประกอบในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีน้ำหนักมากที่สุด โดยเฉพาะเมื่อประกอบเป็นชั้นเซลล์ซึ่งแผ่นสะสมกระแส เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแผ่นช่องทางเดินก๊าซ (Gas Flow Field Plate) จะประกอบเป็นโครงสร้างหลักของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง แผ่นสะสมกระแสมี 2 แบบ คือ Bipolar Plate และ Unipolar Plate โดยที่ bipolar plate จะคั่นอยู่ระหว่างเซลล์แต่ละเซลล์ที่ประกอบเป็น Stack Cell ซึ่งในแต่ละ Bipolar Plate จะทำหน้าที่เป็นทั้งขั้วบวก และขั้วลบ ในเวลาเดียวกัน โดยแผ่นสะสมกระแสทั้ง 2 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.12



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.12 แผ่นสะสมกระแส (ก) แบบ Unipolar Plate (ข) แบบ Bipolar Plate

สำหรับ Bipolar Plate จะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกหรือลบอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น โดยหน้าที่หลักของแผ่นสะสมกระแส มีดังต่อไปนี้

1. กระจายก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศเข้าไปในพื้นที่ทำปฏิกิริยา
2. ระบายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา
3. นำกระแสไฟฟ้าจากเซลล์ต่อเซลล์
4. ป้องกันการรั่วของก๊าซข้ามเซลล์

แผ่นสะสมกระแสจะมีช่องทางเดินก๊าซอยู่บนผิวหน้า โดยอาจจะมีลักษณะรูปแบบที่แตกต่างกันระหว่างขั้วแอโนด และแคโทดและทิศทางการไหลของก๊าซบนขั้วไฟฟ้าก็จะแตกต่างกันในแต่ละด้านด้วย ซึ่งมีลักษณะการไหลในทิศทางตรงกันข้ามกันหรือไหลในทิศทางที่ตัดกันก็สามารถทำได้ การออกแบบแผ่นสะสมกระแสถือว่ามีค่าสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เพราะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการกระจายตัวของก๊าซที่เข้าทำปฏิกิริยา มีผลให้ประสิทธิภาพการทำงาน และนอกจากการออกแบบรูปแบบของช่องทางเดินก๊าซจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วยังมีผลต่อการจัดการน้ำ (Water Management) ภายในเซลล์ด้วย

### 2.7.5 วัสดุสำหรับทำแผ่นสะสมกระแส

คุณสมบัติของวัสดุที่จะมาทำแผ่นสะสมกระแส มีดังต่อไปนี้

1. นำไฟฟ้าได้ดี
2. นำความร้อนได้ดี
3. ก๊าซไม่สามารถซึมผ่านได้
4. มีความแข็งแรงต่อการบีบอัด
5. ทนต่อปฏิกิริยาเคมีและไม่มีสารเป็นพิษต่อเมมเบรนและตัวเร่งปฏิกิริยา
6. ราคาถูกและเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย

## 7. สารามลขึ้นรูปได้ง่าย

ปัจจุบันวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุด คือ กราไฟต์ที่ผ่านกระบวนการอัดเรซิน (Resin Impregnated) เพื่ออุดรูพรุนภายในเนื้อกราฟต์ แต่มีข้อเสียคือการขึ้นรูปยากและมีราคาแพง ดังนั้นจึงมีการศึกษาเพื่อหาวัสดุทดแทนกราฟต์ โดยอาศัยคุณสมบัติของแผ่นสะสมกระแสข้างต้นเป็นเกณฑ์ในการเลือกวัสดุ

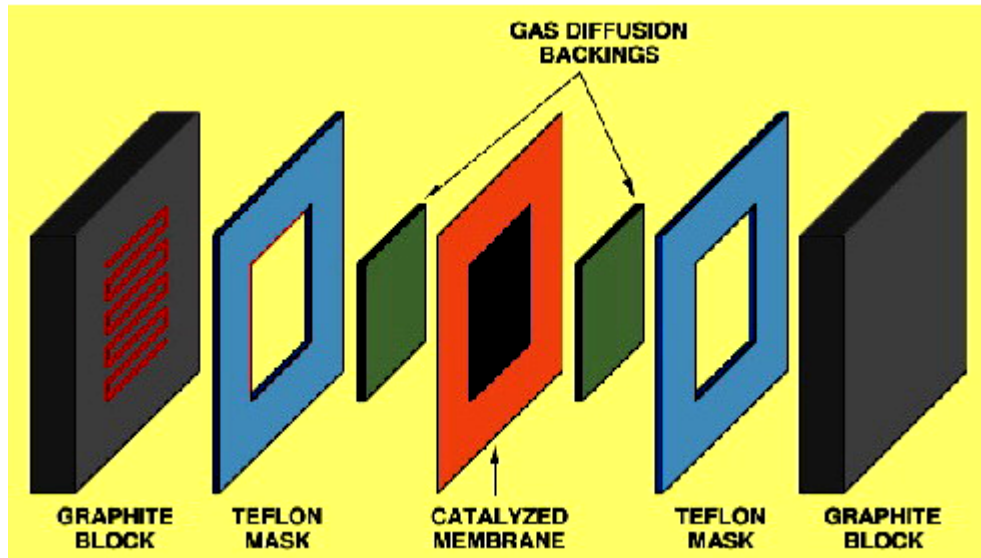
### 2.7.6 สแต็กเชื้อเพลิง (Fuel Cell Stacks)

ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ประกอบด้วยเซลล์เดี่ยวแต่ละเซลล์เรียงซ้อนกันแบบอนุกรม เพื่อให้ได้จำนวนเซลล์ตามที่ต้องการ โดยองค์ประกอบของเซลล์เดี่ยวประกอบด้วยแผ่น MEA ด้วยประเก็น (Gasket) ซึ่งก๊าซที่ให้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะกระจายไปทั่วผิวหน้าของ MEA โดยผ่านช่องทางเดินก๊าซบนผิวหน้าของแผ่นสะสมกระแส ซึ่งแผ่นประเก็นจะประกบในแต่ละด้านของ MEA โดยจะเว้นช่องไว้สำหรับขั้วไฟฟ้าหรือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา

การป้องกันการรั่วของก๊าซที่มีประสิทธิภาพ จะต้องมีพื้นที่ของเมมเบรนตรงบริเวณขอบของแผ่น MEA เหลือพอสำหรับการประกบกับแผ่นประเก็น พร้อมกับการยึดตรึงที่แน่นหนาด้วย [Mikkola, 2002] โดยจะมีแผ่นปิดท้าย (End Plate) ในแต่ละด้านของตัวเซลล์เชื้อเพลิงช่วยเสริมความแข็งแรงอีกชั้นหนึ่ง

สำหรับการประกอบชั้นเซลล์ ทำได้โดยการเพิ่มแผ่นสะสมกระแสที่มีหน้าของช่องทางเดินก๊าซทั้งสองหน้า หรือ Bipolar Plate แทรกเข้าไปในเซลล์เดี่ยว โดยที่ Bipolar Plate จะทำหน้าที่เป็นทั้งขั้วไฟฟ้าบวกและลบในเวลาเดียวกัน จำนวนชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับจำนวนของ Bipolar Plate ที่แทรกเข้าไประหว่างเซลล์เดี่ยว การประกอบชั้นเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จะต้องให้ความสำคัญกับวิธีการป้องกันการรั่วซึมของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนเข้าหากันในแต่ละด้านของ MEA ซึ่งจะมีผลให้เกิดไฟลุกไหม้บนขั้วไฟฟ้าภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้

นอกจากการป้องกันการรั่วซึมของก๊าซแล้ว ยังต้องให้ความสำคัญกับวิธีการยึดตรึงเพื่อให้องค์ประกอบของชั้นเซลล์ประกบกันอย่างสนิทแน่นหนา โดยจะมีผลโดยตรงต่อความต้านทานพื้นผิวสัมผัส (Contact Resistance) ขององค์ประกอบภายในเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าพื้นผิวสัมผัสไม่แน่นสนิทจะมีผลให้เกิดการลดลงของความต่างศักย์ (Potential Drop) อย่างรวดเร็วขณะเกิดการดึงกระแสจากตัวต้านทานภายนอก



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ [11]

สำหรับปริมาณเชื้อเพลิงที่เซลล์เชื้อเพลิงต้องการใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดยตรงจากปริมาณกระแสไฟฟ้า เนื่องจากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแปรผันโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตออกมา โดยเกิดปฏิกิริยาสุดท้ายได้น้ำออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ และสามารถทราบปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาได้จากการคำนวณปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ถูกใช้ไป

อัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนในปฏิกิริยาเป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าที่ให้ออกมา (Output Current) ซึ่งกระแสไฟฟ้าในหน่วยแอมแปร์ หมายถึง จำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าต่อวินาทีในแต่ละโมเลกุลของไฮโดรเจนจะประกอบด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว ดังนั้นการวัดกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้คือ การวัดจำนวนของโมเลกุลของไฮโดรเจนที่แตกตัวให้อิเล็กตรอนออกมา ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$1 \text{ Ampere of Current} = 1 \text{ Coulomb of Electron Per Second}$$

$$1 \text{ Coulomb of Electron Per Second} = 6.241506 \times 10^{18} \text{ Electrons Per Second}$$

จากความรู้พื้นฐานทางเคมีในการคำนวณปริมาณของสารจากสมการเคมี ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารในสมการเคมี มีดังนี้



$$\frac{1}{a} \text{ moles of } A = \frac{1}{b} \text{ moles of } B = \frac{1}{c} \text{ moles of } C = \frac{1}{d} \text{ moles of } D \quad (2.17)$$

จากปฏิกิริยาด้านซ้ายแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง



จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{mole of H}_2 &= \frac{1}{2} \text{ mole of e}^- \\ &= \frac{6.241506 \times 10^{18} / 6.022136 \times 10^{23}}{2} \\ &= 5.182136 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (2.19)$$

แต่ 1 โมล เท่ากับ ก๊าซ  $22.428782 \times 10^3$

ไฮโดรเจน มีความหนาแน่น เท่ากับ  $0.0899 \text{ kg/m}^3$

ดังนั้นสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ อัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนต่อปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} &= 5.182136 \times 10^{-6} \frac{\text{mole}}{\text{second}} \times 22.428782 \times 10^3 \frac{\text{cm}^3}{\text{mole}} \\ &= 0.116229 \text{ cm}^3/\text{sec} \\ &= 6.9737 \text{ sccm} \\ &= 3.76 \times 10^{-5} \text{ kg/min} \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เดียวคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Hydrogen Consumption Rate} = 0.116229 \times \text{Amps} \times 60 \text{ second} \quad (\text{หน่วย sccm}) \quad (2.20)$$

ในกรณีที่นำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน สามารถคำนวณอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนได้ดังนี้

$$\text{Hydrogen Consumption Rate} = 0.116229 \times n_{\text{cell}} \times \text{Amps} \times 60 \text{ second} \quad (\text{หน่วย sccm}) \quad (2.21)$$

โดยที่  $n_{\text{cell}}$  : จำนวนเซลล์เดี่ยวที่นำมาต่ออนุกรมกัน

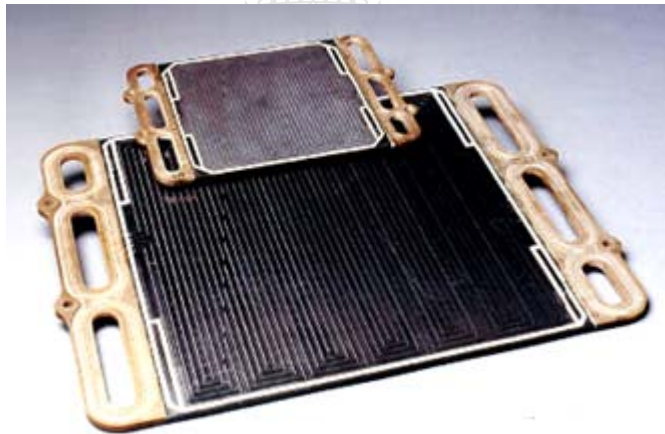
## 2.8 สารประกอบที่แตกตัวเป็นอะตอมในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้า (Electrolyte)

คุณสมบัติพื้นฐานที่โดดเด่นอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ทำจากโพลีเมอร์แข็ง ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีขนาดตั้งแต่ 50-175 Microns อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นโพลีเมอร์แข็งที่เป็นกรด ต้องการโมเลกุลของน้ำสำหรับเป็นตัวนำไฮโดรเจนอออน เมื่ออออนของไฮโดรเจนเคลื่อนที่ไปพร้อมกับโมเลกุลของน้ำระหว่างนั้นเองอออนก็จะแลกเปลี่ยนกันจนเกิดปฏิกิริยาโต้ตอบขึ้น โดยอัตราของน้ำต่อไฮโดรเจนเพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดควรจะอยู่ที่ 3:1 ด้วยเหตุผลนี้เอง ก๊าซที่ทำงาน

ร่วมกับเชื้อหุ้มเซลล์จะต้องทำให้ชุ่มไปด้วยน้ำเพื่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงในการทำปฏิกิริยา อิเล็กโทรไลต์ทั้งหมดจะต้องแสดงให้เห็นถึงระบบการทำงานพื้นฐานในการเป็นตัวควบคุม โปรตอน, เป็นฉนวนกันอิเล็กตรอน และเป็นตัวแยกก๊าซ นอกจากนี้แล้วการผลิตก็ต้องเป็นไปเพื่อผลิตเชื้อหุ้มเซลล์เพื่อให้มีแรงดันทางกลศาสตร์ที่เหมาะสม, ระยะที่คงที่ (แรงดันการขยายตัว), การเหนี่ยวนำไอออนได้สูง และน้ำหนักน้อย (น้ำหนักของโพลีเมอร์จะขึ้นอยู่กับจำนวนพื้นที่ของกรด) ซึ่งสิ่งเหล่านี้ง่ายต่อการผลิต

### 2.8.1 Flow Field Plates

แต่ละ Flow Field Plates บรรจุก๊าซเดี่ยวในรูปแบบคดเคี้ยว ซึ่งมีปริมาณก๊าซมากที่สุดมาทำการเชื่อมต่อกับ MEA โดยรูปแบบที่ต่างกันจะถูกปรับให้เหมาะสมกับรูปแบบความหลากหลายของเซลล์เชื้อเพลิง แต่ละ Plate จะต้องเป็นตัวนำไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อกระแสไฟฟ้าถูกปลดปล่อยระหว่างการทำปฏิกิริยาได้ตอบทางเคมีจะสามารถไหลจากเซลล์หนึ่งไปอีกเซลล์หนึ่งได้ Plate มักจะทำด้วยแกรไฟต์ เนื่องจากเป็นตัวนำที่ดีมาก มีการปนเปื้อนในระดับต่ำและราคาถูก การปิดผนึกระหว่างแผ่นแกรไฟต์ทำให้มั่นใจได้ว่ากระแสจะไม่ไหลมาผสมกัน แสดงดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 PEM Flow Field Plates [9]

### 2.8.2 ตัวทำให้เกิดความชื้น (Humidifier)

การตอบสนองความชื้นของก๊าซเป็นลักษณะที่จำเป็นในการทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง เพราะหากไม่มีความชื้นที่เพียงพอ การนำประจุไฟฟ้าหรือไอออนก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้และเซลล์เชื้อเพลิงก็จะเสียหายไปในที่สุด จำนวนของน้ำที่ก๊าซสามารถดูดซึมได้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้น โดยส่วนมากจะเป็นที่ความดันต่ำ โดยก๊าซที่ร้อนกว่าจะเก็บน้ำได้มากกว่าก๊าซที่เย็น เป้าหมายของการทำให้เกิดความชื้นคือการทำให้การตอบสนองของก๊าซชุ่มไปด้วยน้ำมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยก๊าซจะถูกทำให้ชุ่มเมื่อใกล้ถึงอุณหภูมิที่เซลล์เชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยา (ตั้งค่าโดย Stack

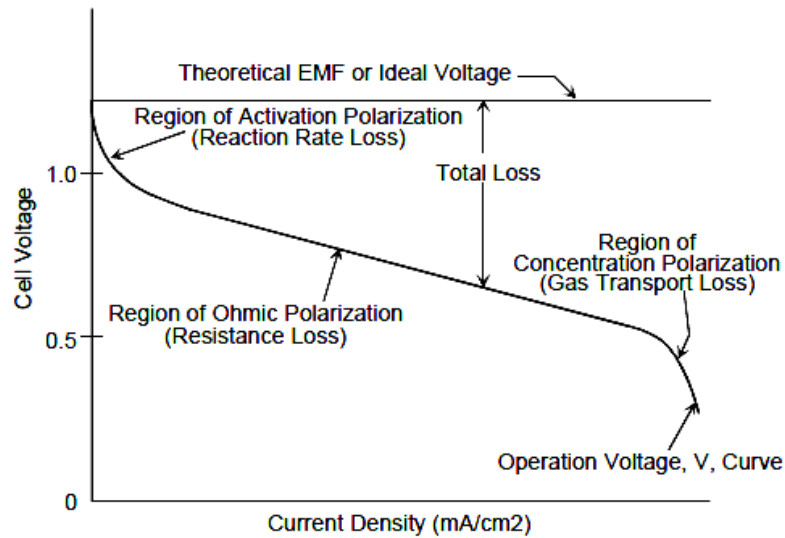


Coolant Temperature) หากทำให้เกิดความชื้นในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ก๊าซก็จะไม่เกิดความชื้นเมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา แต่ถ้าทำให้ชื้นในอุณหภูมิที่สูงกว่า น้ำจะลดลงในทางลำเลียงก๊าซ ซึ่งจะลดประสิทธิภาพเมื่อถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา Stacks ของเซลล์เชื้อเพลิงบางอัน ตัวทำความชื้นจะรวมอยู่ใน Stacks นั้น ๆ ด้วย แต่บางอันก็แยกออกมาเป็นส่วนประกอบภายนอก

ภายในตัวทำความชื้นประกอบด้วยจำนวนแผ่นแกรไฟต์ที่เพิ่มเข้ามาประกอบใน Stacks ของเซลล์เชื้อเพลิง โดยจะแยก Stack ที่อยู่ในหมวดที่กระตุ้น (ที่ซึ่งเก็บกักเซลล์เชื้อเพลิง) และหมวดที่ไม่กระตุ้น (ที่ซึ่งมีแผ่นความชื้นอยู่) โดยแผ่นทำความชื้นก็ทำหน้าที่คล้ายคลึงกับ Flow field Plate ซึ่งจะถูกใช้ในการลำเลียงน้ำและก๊าซไปยังอีกฝั่งของเยื่อหุ้มเซลล์ น้ำจะเข้าไปยังเยื่อหุ้มเซลล์อีกฝั่ง และทำให้เซลล์ใกล้เคียงชุ่มไปด้วย ฉะนั้นความหลากหลายของเยื่อหุ้มเซลล์จึงเป็นจุดประสงค์ทางการตลาดที่ยังมีอยู่ ภายในตัวทำความชื้นจะนำน้ำผ่าน Stack Coolant Steam โดยตรงและจะส่งผลให้เกิดความเรียบง่าย, ระบบจะรวมกันได้ดีเมื่ออุณหภูมิกับคุณลักษณะเหมาะสมกันหรือเข้ากันได้ แต่อย่างไรก็ตามการเรียงตัวกันเช่นนี้ก็ยังคงใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นเสมือนสารช่วยลดความร้อน นอกเหนือจากนั้นแล้ว การรวมกันของตัวทำความชื้นหรือ Stack มีแนวโน้มที่จะใหญ่และมีการดูแลที่ซับซ้อน เมื่อองค์ประกอบทั้งสองเสียพร้อมกัน ภายนอกตัวทำความชื้นจะนำน้ำผ่าน Stack Coolant Steam หรือจากการแยกกันของขอบเขตในการทำความชื้นของน้ำ

## 2.9 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (Fuel Cell Stack Efficiency)

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน สามารถจะวัดออกมาในค่าของความหนาแน่นกระแส (Current Density) ในหน่วยของ Milliampares Per Square Centimeter ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) ซึ่งพื้นที่ที่เป็นตัวหารนี้คือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง จะสามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้จาก I-V Characteristic Curve ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.15 สัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นของกระแส [12]

### 2.9.1 ลักษณะสมบัติสถานะอยู่ตัว

ลักษณะสมบัติสถานะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงรูปที่ 2.15 แสดงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้า กราฟที่ได้ประกอบด้วยสามส่วนหลักคือ

- ปรากฏการณ์กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
- ส่วนที่เป็นเชิงเส้นที่แรงดันตก มีสาเหตุจากความต้านทานภายใน
- ส่วนสุดท้ายคือพลังงานจลน์ในการแตกตัวของก๊าซผ่านอิเล็กโทรด กลายเป็นปัจจัย

จำกัดทำให้แรงดันตกอย่างมาก

กราฟโพลาริเซชัน มีคุณสมบัติเป็นแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ โดยอัตราการไหลของกระแสไฟจะขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดทางไฟฟ้าที่วางตรงข้ามเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งความสำคัญของกราฟแรงดันต่อกระแส (Polarization Curve) นี้ จะแสดงถึงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากประสิทธิภาพเป็นอัตราส่วนโดยตรงของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์หารด้วย 1.2 V

แบตเตอรี่ก็มีกราฟโพลาริเซชัน มากพอ ๆ กับเซลล์เชื้อเพลิง ทั้งแบตเตอรี่และเซลล์เชื้อเพลิงจะแสดงศักยภาพอย่างสูงของโหลดจริง เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูง แต่โหลดต่ำ ในทางกลับกันเครื่องยนต์ที่เผาไหม้ภายในจะให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อมีโหลดสูงสุด และแสดงการลดลงอย่างรวดเร็วของศักยภาพที่ไม่มีโหลด

จากกราฟความต่างศักย์ที่เซลล์เชื้อเพลิงให้ออกมาจะลดลงเมื่อมีกระแสไหลมากขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีแล้ว ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสควรจะเป็นเส้นตรงขนาน

กับแกนนอน แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากสาเหตุสำคัญ ดังนี้ คือ

1. ความสามารถของตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาไม่สามารถทำให้เกิดประจุไฟฟ้าได้เพียงพอออกมาขณะที่ต้องการกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเริ่มต้นการทำงานนั้น สภาวะความชื้นและอุณหภูมิในเซลล์เชื้อเพลิงยังไม่ถึงจุดที่เหมาะสมแก่การเกิดปฏิกิริยาทำให้ในช่วงนี้ ความต่างศักย์จะลดลงอย่างชัดเจน เรียกว่า Reaction Rate Loss

2. ความต้านทานภายในของแผ่นสะสมกระแส ชั้นการแพร่ของก๊าซ และเมมเบรน เนื่องจากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุ ความชื้นภายในเมมเบรน และพื้นที่สัมผัสระหว่างแผ่นสะสมกระแสกับพื้นที่ทำปฏิกิริยา ซึ่งมีผลจากการออกแบบ ซึ่งการไหลของก๊าซทำให้ความสามารถในการนำอิเล็กตรอนและโปรตอนต่ำลง เรียกว่า Resistance Loss หรือ Ohmic Loss

3. อัตราการแพร่ของก๊าซเข้าไปทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ เนื่องจากเกิดน้ำที่เกิดในชั้นการแพร่หรือในช่องการไหลของก๊าซมีมากเกินไป ทำให้ลดช่องการไหลของก๊าซ และลดพื้นที่ทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้การเกิดปฏิกิริยาน้อยลง เรียกว่า Gas Transport Loss

จากข้อจำกัดที่กล่าวมาทั้งหมดมีผลต่อการลดลงของความต่างศักย์ เรียกว่า โพลาริเซชัน (Polarization Curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์เชื้อเพลิง โดยประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์คร่อมเซลล์เชื้อเพลิงหรือความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power Density) ซึ่งหาได้จากผลคูณระหว่างความต่างศักย์กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current Density)

สำหรับประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มีปัจจัยหรือตัวแปรหลายอย่างที่เกี่ยข้อง ดังนี้

1. ชนิดและความหนาของเมมเบรน
2. ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา
4. ชนิดและคุณสมบัติของชั้นการแพร่ของก๊าซ (Gas Diffusion Layer)
5. ความต้านทานไฟฟ้าขององค์ประกอบเซลล์เชื้อเพลิง
6. ความต้านทานหน้าสัมผัส (Contact Resistance)
7. รูปแบบของช่องทางเดินก๊าซ (Gas Flow Field Pattern)
8. เงื่อนไขในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ประกอบด้วย อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลและความชื้นของก๊าซที่เข้าทำปฏิกิริยา เป็นต้น

### 2.9.2 โพลาริเซชันทางเคมี (Chemical Polarization)

โพลาริเซชันทางเคมี หรือ Activation Polarization จะเกิดในช่วงแรกของการลดลงของความต่างศักย์คร่อมเซลล์เชื้อเพลิง โดยเกิดขึ้นเนื่องจากอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Rate)

มีค่าต่ำ ดังปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดดังสมการที่ 2.16 ในขณะที่เปิดวงจรจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทางเซลล์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ 2.16 จากซ้ายไปขวาเท่ากับจากขวาไปซ้าย ซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุล แต่เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลออกจากเซลล์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากซ้ายไปขวามากกว่าจากขวาไปซ้าย และศักย์ไฟฟ้าจะลดลงจนกระทั่ง ส่วนจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีขึ้นอยู่กับพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยามีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้น ถ้าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูง เมื่อเทียบกับพลังงานของโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาแล้วอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีก็จะมีค่าต่ำลง ทำให้เกิดการโพลาไรเซชันทางเคมีมาก วิธีแก้ไขคือ เพิ่มพลังงานของโมเลกุลสารตั้งต้นให้มากขึ้น เช่น เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น หรือในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลตตินัม เพื่อช่วยลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาให้มีค่าลดลง

### 2.9.3 โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance Polarization)

ความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิง เกิดเนื่องมาจากองค์ประกอบของตัวเซลล์เชื้อเพลิง ประกอบด้วย ความต้านทานจากขั้วไฟฟ้า เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างแผ่นสะสมกระแสกับอิเล็กโทรด ความต้านทานจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในชั้นการแพร่ของก๊าซ และความต้านทานจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาต่อเข้ากับตัวของเซลล์เชื้อเพลิง กรณีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน องค์ประกอบที่มีความต้านทานมาก คือ ความต้านทานจากขั้วไฟฟ้า วิธีที่สามารถลดความต้านทานนี้ทำได้โดยการให้พื้นที่สัมผัสของแผ่นสะสมกระแสกับอิเล็กโทรดมีค่าเหมาะสมและกระจายเท่ากันทั่วทั้งแผ่น โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานเกิดในช่วงกลางของกราฟโพลาริเซชัน ดังรูปที่ 2.23 ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กับความหนาแน่นกระแส (Current Density)

### 2.9.4 โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization)

โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นเกิดในช่วงท้ายสุดของกราฟโพลาริเซชัน ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง การลดลงของความต่างศักย์ เนื่องมาจากข้อจำกัดในการจ่ายเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดซ์ให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจำเป็นต้องใช้เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ (Diffusion) ก๊าซไปยังขั้วไฟฟ้า เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในช่วงที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง และเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามีค่าสูงจะเป็นผลให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลงเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากซ้ายไปขวามีค่าสูง ทำให้ความดันของสารตั้งต้นลดลงเป็นผลให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามสมการของเนมสต์ (Nernst's Equation) ดังสมการ 2.16

$$E_{\text{Nernst}} = E^0 + \frac{RT}{n_e F} \ln \left( \frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{0.5}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \quad (2.16)$$

โดยที่	$\Delta G \alpha P$	ดังนั้น	$E \alpha P$
	เมื่อ $E_{Nernst}$	คือ	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volts)
	$E^0$	คือ	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ และความดันมาตรฐาน (25 °C, 1 atm) (Volts)
	$n_e$	คือ	จำนวนอิเล็กตรอนต่อโมเลกุล $H_2$ (เท่ากับ 2 Electron/Molecule)
	$F$	คือ	ผลคูณระหว่างเลขอะโวกาโด กับ ประจุ 1 อิเล็กตรอน 96,485 (Coulombs/Electron-mol)
	$R$	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซจะมีค่าเท่ากับ 8.314 J/(mol.K)
	$T$	คือ	อุณหภูมิก๊าซ (K)
	$P$	คือ	Partial Pressure ของ $H_2$ , $O_2$ และ $H_2O$

$$\text{สมการ V-Act} \quad \Delta E_{act} = \left( \frac{RT}{\alpha F} \right) \ln \left( \frac{i + i_{loss}}{i_O} \right) \quad (2.17)$$

$$\text{สมการ V-Open1} \quad \Delta E_{ohmic} = i(R_{ohmic}) \quad (2.18)$$

$$\text{สมการ V-Conc} \quad \Delta E_{conc} = \left( \frac{RT}{nF} \right) \ln \left( \frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (2.19)$$

จะได้แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง

$$V_{cell} = E_{Nernst} - \Delta E_{act} - \Delta E_{ohmic} - \Delta E_{conc} \quad (2.20)$$

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ นั้น เมื่อความหนาแน่นกระแสมากขึ้น จะเป็นผลทำให้ค่าความต่างศักย์จะแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่ของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าระบบที่มีความดันต่ำกว่า

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นผลประโยชน์เบื้องต้นของเทคโนโลยี จำเป็นมากที่จะต้องจำแนกความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพของ Stack ของเซลล์เชื้อเพลิงกับประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

### 2.9.5 ประสิทธิภาพของ Stack ของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Stack Efficiency)

ประสิทธิภาพของหน่วยแปลงพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง ตั้งขึ้นมาเพื่อที่จะวัดประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาได้ตอบทางเคมี โดยประสิทธิภาพของมันหาได้ดังสมการที่ 2.17

$$\Delta H_{(gas)}^0 = -230 \frac{\text{BTU}}{\text{mole}_{\text{water}}} = -242 \frac{\text{KJ}}{\text{mole}_{\text{water}}} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $\text{Mole}_{\text{water}} = 6.023 \times 10^{23}$  โมเลกุลของน้ำ

จำนวนของพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อไฮโดรเจนและออกซิเจนรวมกันเป็นน้ำตามปฏิกิริยาได้ตอบกลับ  $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  ซึ่งค่านี้วัดจากการทดลอง และขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ น้ำถูกสร้างขึ้นมาเช่นเดียวกับก๊าซและของเหลว ค่าของปฏิกิริยาได้ตอบของเอนทัลปีอยู่ที่ 77 °F หรือ 25 °C และที่ความดัน 1 บรรยากาศ ผลกระทบจากอุณหภูมินั้นสำคัญกว่าความดันอากาศ และจำนวนพลังงานลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น พลังงานจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยภายใต้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละตัวต่ำกว่า 30% สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิสูง แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีความสัมพันธ์กับพลังงานของ Gibbs อิสระเป็นดังสมการต่อไปนี้ โดยค่าที่ใช้แทนในสมการ (โดยใช้หน่วยวัดเป็น นิ้ว ฟุต ปอนด์ แกลลอน หลา ไมล์ เป็นต้น) ดังสมการ 2.18

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{coul}} &= - \frac{-217 \text{ BTU}}{\text{mole}_{\text{water}}} \times \frac{1055.7 \text{ J}}{\text{BTU}} \times \frac{\text{mole}_{\text{water}}}{2 \text{ mole } e^-} \times \frac{\text{mole } e^-}{36,500 \text{ coul}} \\ &= \frac{1.187 \text{ J}}{\text{coul}} = 1.187 \text{ V} \end{aligned} \quad (2.22)$$

แต่ละเซลล์สามารถแบ่งแรงดันตามทฤษฎีได้สูงสุดคือ 1.187 (ที่ 77 °F หรือ 25 °C และที่ความดัน 1 บรรยากาศ) ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องทำให้ได้สัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่มีอยู่ ณ ขณะนั้น โดยเซลล์พยายามที่จะผลิตให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดตามทฤษฎี ดังสมการ 2.19

$$\text{Efficiency}_{\text{cell}} = \frac{V_{\text{Actual}}}{\mathcal{E}_{\text{cell}}} \cong \frac{V_{\text{Actual}}}{1.2 \text{ V}} \quad (2.23)$$

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแท้ แรงดันไฟฟ้าจะอยู่ที่ประมาณ 0.5-0.6 V ที่การทำปฏิกิริยาอยู่ในระดับปกติ และสามารถเพิ่มได้ถึง 1.1 V เมื่อสภาพของวงจรไฟฟ้าเปิด และประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีจะอยู่ราว ๆ 40-50% แต่ถ้าสภาพของวงจรไฟฟ้าเปิดจะสูงขึ้นถึง 90% เลยทีเดียว

## 2.10 ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell System Efficiency)

Stack ของเซลล์เชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับอากาศที่รักษาความดันบรรยากาศภายในเครื่อง, ไฮโดรเจน และสารที่ช่วยลดความร้อน ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่เป็นจริงจะให้อุปกรณ์ที่เพิ่มเข้ามาเพื่อควบคุมก๊าซ, กระแสของของเหลว, ช่วยในการหล่อลื่น, มีอุปกรณ์ช่วยในการทำปฏิกิริยา, จัดการ

ผลผลิตที่เกี่ยวกับไฟฟ้าและควบคุมกระบวนการ บางระบบนั้นรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงกระบวนการเชื้อเพลิง โดยอุปกรณ์ทั้งหมดจะนำไปสู่การลดลงของประสิทธิภาพของระบบทั้งหมด จากต้นแบบทางทฤษฎี

ประสิทธิภาพทั้งหมดของเครื่องยนต์ที่สันดาปภายในอยู่ที่ประมาณ 15-25% คุณสมบัตินี้แสดงออกมาในประสิทธิภาพของผลผลิตของล้อรถยนต์แต่ว่าประสิทธิภาพของผลผลิตจากมูลจะอยู่ที่ประมาณ 30-35% และยิ่งจะมากขึ้นเมื่อใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล

สำหรับพลังงานเซลล์เชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ประสิทธิภาพที่สามารถเปรียบเทียบได้จากผลผลิตของมูลมีดังนี้

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง:	0-50%
การบีบอัดอากาศ:	5% (ใช้ 15% ของพลังงานทั้งหมด)
ประสิทธิภาพของ Inverter:	5%
ประสิทธิภาพของ Electric Motor:	97%

โดยแต่ละค่าเป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบทั้งหมดอยู่ที่ประมาณ 31-39%

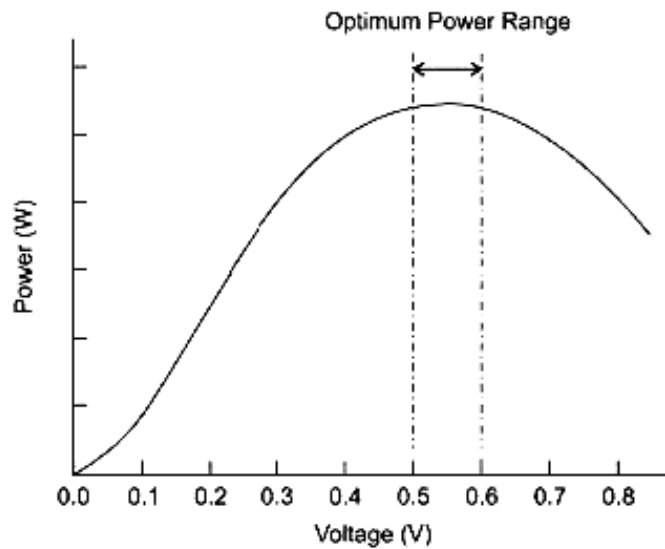
สำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพจะถูกลดลงประมาณ 65-75% ความยากที่จะบอกจำนวนจะเป็นผลเสียแก่นำหนักของระบบทั้งหมด ระบบเซลล์เชื้อเพลิง (รวมเชื้อเพลิงที่เก็บสะสมไว้ด้วย) จะหนักกว่าระบบเครื่องยนต์สันดาปภายในเมื่อเปรียบเทียบตามอัตราเชื้อเพลิงแล้ว และในที่สุดพลังงานก็จะเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ แบตเตอรี่จะมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางไฟฟ้ากับเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อใช้เครื่องผลิตพลังงานที่เคลื่อนที่ได้ด้วยตัวเอง ระบบแบตเตอรี่ก็ยังคงต้องการ Inverter และ Electric Motor แม้ว่าจะไม่ต้องการการบีบอัด, อุปกรณ์ทางความเย็นที่ซับซ้อน แบตเตอรี่มีความหมายเท่ากับที่เก็บสะสมพลังงานที่มีขนาดใหญ่กว่าเซลล์เชื้อเพลิงแม้ว่าจะชดเชยด้วยการลดองค์ประกอบอื่น ๆ ไปก็ตาม

### 2.10.1 ลักษณะเฉพาะของพลังงาน (Power Characteristics)

พลังงานทางไฟฟ้าเป็นผลผลิตของความแตกต่างระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เนื่องจากกราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงได้ชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในทุกสภาพการทำงาน ทำให้เราสามารถนำกราฟโพลาริเซชันมาสร้างเป็นกราฟทางพลังงานอื่น ๆ ที่สอดคล้องกันได้อีก พลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงจะถูกแสดงเป็นกราฟ ซึ่งเกิดจากจุดใด ๆ ก็ตามที่อยู่บนเส้นโค้ง โดยเส้นโค้งจะสัมผัสกับมุมฉาก ตามที่แสดงในรูปที่ 2.16

พลังงานสูงสุดที่ปรากฏจะอยู่ที่ประมาณ 0.5-0.6 V ซึ่งสูงพอประมาณกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ที่จุดสูงสุดแรงต้านภายในเซลล์จะเท่ากับแรงต้านภายนอกวงจร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อประสิทธิภาพลดลงแต่ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจะต้องมีการแลกเปลี่ยนผลได้ผลเสียระหว่างพลังงานกับ

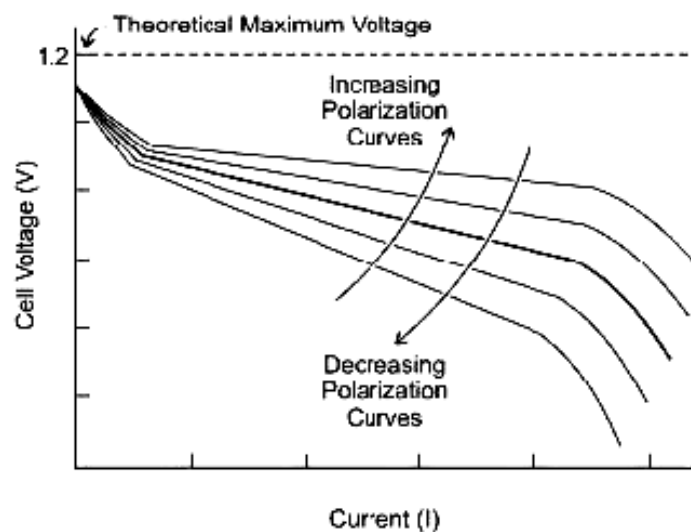
ประสิทธิภาพที่สูง ผู้ออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องเลือกระดับระบบปฏิบัติการตามความต้องการว่าต้องการพลังงานหรือประสิทธิภาพมากกว่ากัน



รูปที่ 2.16 ต้นแบบพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM [9]

### 2.10.2 ผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิและความดัน (Temperature and Pressure Effects)

ลักษณะของกราฟโพลาริเซชันดังรูปที่ 2.17 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันในการทำงานของระบบ โดยทั่วไปกราฟโพลาริเซชันสามารถทำให้เสมอกันในทั้งลักษณะและสมรรถภาพ ความแปรผันของพารามิเตอร์อาจเป็นสาเหตุให้กราฟโพลาริเซชันโค้งเพิ่มขึ้นและมีพลังงานเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.17 ความแปรผันของกราฟโพลาริเซชัน (Polarization Curve Variations) [9]



### 2.10.3 ความดัน (Pressure)

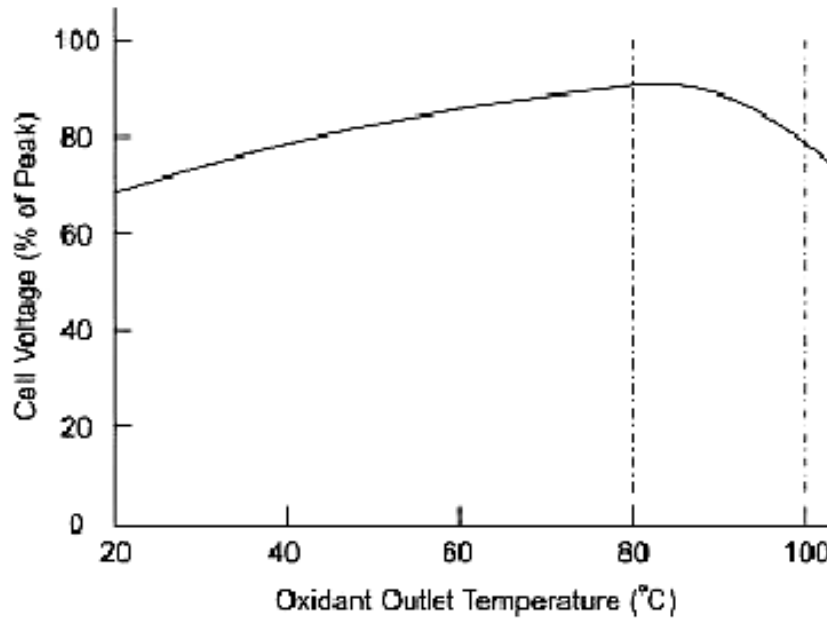
โดยปกติแล้วกราฟโพลาร์ไรเซชันของพลังงานเชื้อเพลิงจะมีความโค้งเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในระบบเพิ่มขึ้น และในทางกลับกันความโค้งก็จะลดลงเมื่อความดันในระบบลดลง

เหตุที่ทำให้เกิดกราฟเช่นนี้ก็เนื่องจากสัดส่วนในอัตราการผลิตปฏิกิริยาเคมีบางส่วนขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน (ก๊าซแต่ละชนิดที่อยู่ในก๊าซที่ผสมกันจะมีผลต่อความดันบางส่วนของส่วนผสมก๊าซนั้น ๆ ซึ่งจะมีผลต่อความดันรวมของก๊าซที่ผสมกันอีกที) ดังนั้นผลกระทบจากการที่ความดันเพิ่มขึ้นจะชัดเจนที่สุดเมื่อใช้สารที่ทำให้สารอื่นรวมตัวกับออกซิเจนอย่างเฉื่อย (เช่น อากาศ) หรือเมื่อใช้ตัวกระตุ้นอย่างเฉื่อย ในความเป็นจริงแล้ว ความดันที่สูง ๆ จะช่วยให้ไฮโดรเจนและออกซิเจนสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ได้มากขึ้น การตอบสนองต่อความดันจะตอบสนองได้ดีขึ้นที่กระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น แม้ว่าความดันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นก็ตาม แต่ก็ทำให้เกิดปัญหาอื่นด้วย

กราฟโพลาร์ไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีความโค้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และในทางกลับกันความโค้งของกราฟก็จะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาลดลง เหตุผลก็คือการที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้การถ่ายเทมวลสารในเซลล์เชื้อเพลิงทำได้ดีขึ้น และทำให้ความต้านทานในเซลล์ลดลง (เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้สภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าในโพลีเมอร์ลดลง แต่ทำให้สภาพความเป็นตัวนำไอออนหรือประจุของอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น) จากผลทั้งสองอย่างนี้ทำให้อัตราการผลิตปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การสะสมของน้ำจะมีประสิทธิภาพที่ระดับอุณหภูมิต่ำกว่า 212 °F หรือ 100 °C ที่ระดับอุณหภูมินี้ น้ำจะเดือดและกลายเป็นไอน้ำในปริมาณที่สูงมากทำให้ลดความดันบางส่วนของออกซิเจนลง ซึ่งต่อมากจะทำให้สมรรถภาพในการทำงานของเซลล์ลดลงอย่างมากเนื่องจากการขาดออกซิเจน ซึ่งจะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเสียหายและอายุการใช้งานลดลง

นอกจากนั้นอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถทำได้โดยการทำให้ปฏิกิริยาในสภาพที่ความดันสูงขึ้นได้ด้วย เนื่องจากมันจะทำให้จุดเดือดของน้ำสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลน้อยมากในทางปฏิบัติต่อความดันในระบบปฏิบัติการเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM และผลกระทบในขั้นสุดท้ายที่เกิดขึ้น คือความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นพร้อมกับอุณหภูมิ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดเดือดของน้ำ ซึ่งเมื่อจุดนี้ ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเริ่มลดลง ภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ประมาณ 175 °F หรือ 80 °C ซึ่งเป็นจุดที่ผลกระทบทั้งสองอย่างมีความสมดุลซึ่งกันและกัน ดังแสดงในรูป 2.18 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะอยู่ที่ระหว่าง 158-194 °F หรือ 70-90 °C

เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาในระบบมีความดันสูง จะทำให้เกิดอุณหภูมิในระบบที่สูงขึ้น ซึ่งกระทบต่อส่วนประกอบทั้งระบบ ซึ่งบางตัวก็ต้องมีการออกแบบใหม่ในเวลาต่อมา



รูปที่ 2.18 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM [9]

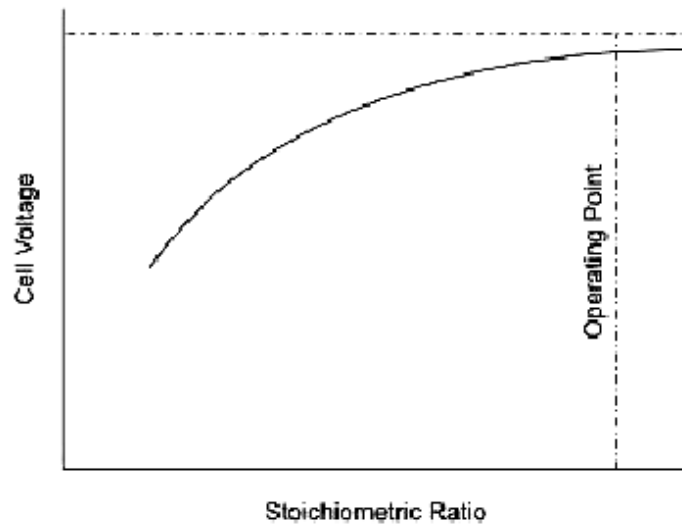
#### 2.10.4 ผลกระทบในการคำนวณน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ (Stoichiometry Effects)

กราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีความโค้งเพิ่มขึ้น เมื่อการคำนวณน้ำหนักของก๊าซที่ตอบสนองเพิ่มขึ้น และในทางกลับกัน ความโค้งของกราฟก็จะลดลง เมื่อการคำนวณน้ำหนักของก๊าซที่ตอบสนองลดลง

เหตุผลก็คือการคำนวณน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มโอกาสให้ปริมาณโมเลกุลของไฮโดรเจนและออกซิเจนเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์ได้มากขึ้น การที่การคำนวณน้ำหนักค่าเกินไปจะทำให้สูญเสียตัวตอบสนองของ Stack ของเซลล์เชื้อเพลิงจนทำให้มีปริมาณไม่เพียงพอ และเกิดความเสียหายเป็นการถาวร

การคำนวณน้ำหนักของก๊าซ คือ อัตราส่วนของปริมาณก๊าซที่มีอยู่ในปัจจุบันเทียบกับปริมาณก๊าซที่ต้องการจริง เพื่อความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะเหมือนกับคำจำกัดความของคำว่า “แรงโน้มถ่วงจำเพาะ” อย่างมาก ซึ่งมีความหมายว่า ความหนาแน่นเทียบกับสสารที่ต้องการอ้างอิง และถ้าการคำนวณน้ำหนักเท่ากับ 1.00 หมายความว่า มีจำนวนโมเลกุลของก๊าซในปริมาณที่ตรงกับทางทฤษฎี เพื่อความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยา และถ้ามากกว่า 1 หมายความว่า มีปริมาณก๊าซมากเกินไป และน้อยกว่า 1 หมายความว่า มีปริมาณของก๊าซน้อยเกินไป ถ้าอัตราส่วนเท่ากับ 2 หมายความว่า มีปริมาณโมเลกุลของก๊าซมากเกินไปที่ต้องการเป็น 2 เท่า ถ้าอัตราส่วนการคำนวณน้ำหนักของก๊าซเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต่างศักย์ของเซลล์เชื้อเพลิงเริ่มเข้าหาค่าที่ไม่มีที่สิ้นสุด (Asymptotically) ดังแสดงในรูป 2.19 โดยปกติ Stack ของเซลล์เชื้อเพลิงมักจะทำปฏิกิริยาที่อัตราการคำนวณน้ำหนักของไฮโดรเจนเท่ากับ 1.4 และการคำนวณน้ำหนักของอากาศเท่ากับ 2 ที่อัตราสูง

เมื่อเพิ่มก๊าซเข้าไปก็จะทำให้เกิดประโยชน์ขึ้นเล็กน้อย การคำนวณน้ำหนักที่ต้องการจะสูงขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยาที่พลังงานต่ำ



รูปที่ 2.19 ผลกระทบของปริมาณสัมพัทธ์ที่มีต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM [9]

### 2.10.5 ผลกระทบจากปริมาณความชื้น (Humidity Effects)

ปริมาณความชื้นในอากาศที่พอเพียงเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นต่อการทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เพราะโมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนไปพร้อมกับอะตอมของไฮโดรเจนในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนอะตอมหรือประจุขึ้น

การมีความชื้นที่ไม่เพียงพอจะทำให้เชื้อหุ้มเซลล์ขาดน้ำ ซึ่งอาจทำให้เกิดรู รอยแยก หรือความอ่อนแอได้กับเชื้อหุ้มเซลล์ ซึ่งจะทำให้เกิดผล คือ ไฟฟ้าเคมีเกิดการลัดวงจรได้ มีก๊าซจากภายนอกเข้าไปผสม เกิดความร้อนและอาจก่อให้เกิดไฟได้ในทางกลับกัน ถ้ามีปริมาณความชื้นที่มากเกินไป อาจทำให้เกิดการกลั่นตัวของน้ำและเกิดท่วมบนแผ่น Flow Field Plate ได้ ซึ่งต่อมาก่อให้เกิดการย้อนกลับของเซลล์ได้ ซึ่งจะก่อให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เท่ากับ 0 หรือติดลบ หรือถ้าติดลบในจำนวนที่มากพอก็จะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเหมือนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อน และสามารถทำลายเซลล์ได้ ในระบบการตรวจสอบดูแลเซลล์ มักจะป้องกันไม่ให้เกิดการย้อนกลับของเซลล์ขึ้นก่อนที่จะเกิดความเสียหายกับเซลล์ขึ้น

ปริมาณความชื้นมักจะถูกวัดเป็นความชื้นสัมพัทธ์ เพราะมันขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิของก๊าซ เมื่อก๊าซดูดซึมน้ำจนเต็มความสามารถที่ทำได้ ณ จุดที่ความดันและอุณหภูมิที่ใ้มนั้นจะเรียกว่าอิ่มตัว และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100% แล้ว ถ้าก๊าซที่อิ่มตัวนั้นร้อนมากขึ้น (โดยไม่มีการเพิ่มน้ำ) ความชื้นสัมพัทธ์จะลดลง (ทุก ๆ 1 °C จะทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ลดลงประมาณ 4%)

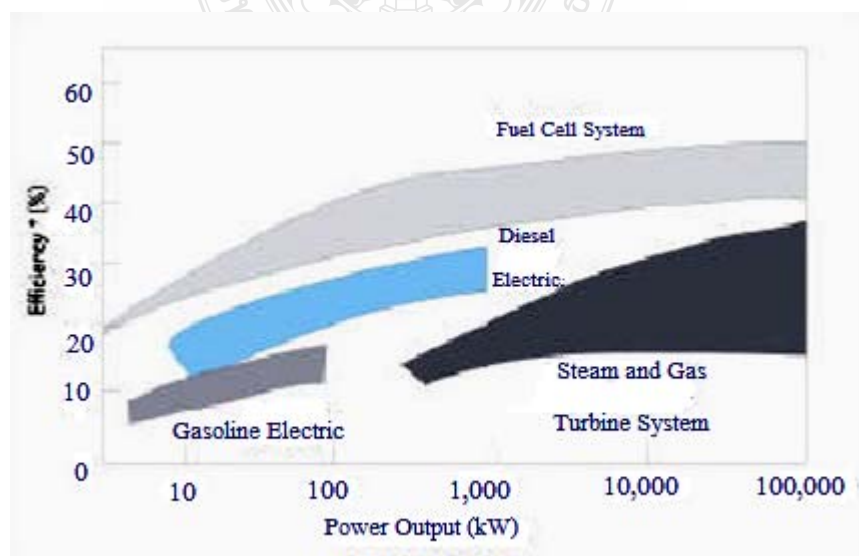
และถ้าก๊าซเย็นลงก็จะเกิดการควบแน่นหรือกลั่นตัวของน้ำ และก๊าซก็จะคงสภาพการอิมตัวเหมือนเดิม ณ อุณหภูมิใหม่

เซลล์เชื้อเพลิงมักจะทำปฏิกิริยาในสภาพที่อิมตัวหรือใกล้อิมตัว ณ อุณหภูมิที่เซลล์เชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้มีปริมาณน้ำสูงสุดและไม่เกิดการท่วมแผ่นเกิดขึ้น ในการใช้น้ำในการเพิ่มความชื้นมักจะมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิในปฏิกิริยาเท่ากับ 32-112 °F หรือ 0-100 °C ถ้านอกเหนือจากอุณหภูมิดังกล่าว น้ำจะแข็งตัวหรือเดือดตามลำดับ

ข้อสังเกตที่มากกว่านั้น คือน้ำที่ใช้ในการเพิ่มความชื้นต้องไม่เป็นสารตัวนำ ไม่เช่นนั้นอาจทำให้เกิดการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้า หรือไม่ก็อาจเกิดการกัดกร่อน Stack ของเซลล์เชื้อเพลิง น้ำกลายเป็นสารตัวนำ เนื่องจากดูดซึมอะตอมหรือประจุจากสิ่งแวดล้อม เพื่อกำจัดอะตอมหรือประจุเหล่านั้น น้ำต้องไหลอยู่ในสารที่ไม่ทำให้เกิดอะตอมหรือประจุ

## 2.11 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (PEM Fuel Cell Systems)

ลักษณะเฉพาะทางประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับระบบการเกิดพลังงานไฟฟ้าอื่น ๆ ดังแสดงในรูป 2.20 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนที่สูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขนาดเล็กและน้ำหนักปานกลาง ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดแรงจูงใจสำคัญในการพัฒนาระบบเซลล์เชื้อเพลิง โรงผลิตพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถนำมาใช้ในการนำเชื้อเพลิงจากซากพืชซากสัตว์มาใช้ เช่น เมธานอลและก๊าซธรรมชาติ การพัฒนาประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานเชื้อเพลิงจากซากพืชซากสัตว์อื่น ๆ ทำให้เกิดผลประโยชน์ทางตรงสองอย่าง คือ ลดต้นทุนเชื้อเพลิงและมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบพลังงาน [9]

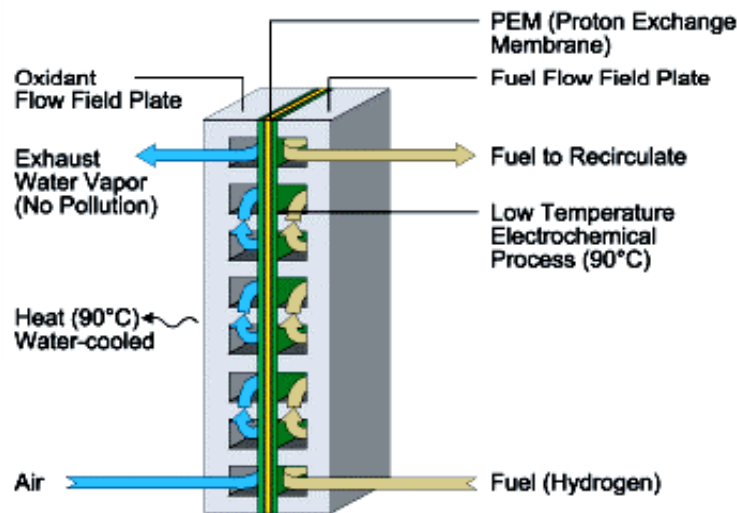
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM สามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำพอสมควร (ประมาณ 80 องศาเซลเซียส) ซึ่งหมายถึงการใช้เวลาในการอุ่นเครื่องค่อนข้างน้อย และไม่จำเป็นต้องมีโครงสร้างของตัวบรรจุเซลล์ที่มีราคาแพงเพื่อทนต่อความร้อนได้ ซึ่งในปัจจุบันก็ได้มีการพัฒนา รูปแบบตัววัสดุและระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง อย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการให้ พลังงานที่สูงขึ้น โดยที่อุปกรณ์ดังกล่าวมีขนาดเพียงกระป๋องใส่กาแฟใบหนึ่งเท่านั้นเอง ซึ่งเป็นเซลล์ที่จะถูกพัฒนาไปเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับรถยนต์และครัวเรือน โดยส่วนประกอบ หลักของ PEMFC ก็คือ

ขั้วลบ (Anode) ทำหน้าที่รับและปล่อยอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกปล่อยมาจากโมเลกุล Hydrogen เพื่อใช้สร้างกระแสไฟที่ระบบภายนอก

ขั้วบวก (Cathode) ทำหน้าที่จ่าย Oxygen ไปสู่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และยังคงอิเล็กตรอน ของ Oxygen จากระบบภายนอกมาที่ตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วรวมตัวกับอะตอมของ Hydrogen และแปร สภาพเป็นน้ำ

ตัวนำไฟฟ้า(Electrolyte) ซึ่งก็คือ Proton Exchange Membrane

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) มีหน้าที่คือช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง Hydrogen กับ Oxygen ให้ดีขึ้น โดยทั่วไปจะทำมาจากกระดาษคาร์บอนเคลือบด้วยผงทองคำขาวบางๆ เพื่อเป็นการ เพิ่มพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Oxygen และ Hydrogen ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM [9]

โดยปกติแล้วปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าใน Fuel Cell 1 เซลล์สามารถให้แรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 0.7 โวลต์ และถ้าต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าก็สามารถทำได้โดยนำเอา Fuel Cell หลายๆเซลล์มาเรียงต่อ

กันและประกอประกกันเป็นชั้นใหม่หรือเรียกว่า Fuel-Cell Stack เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM จะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 160-195 °F หรือ 70-90 °C และที่ความดัน 15-30 psig โดยแต่ละเซลล์สามารถผลิตได้ประมาณ 1.1 VDC

## 2.12 การทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนและออกซิเจน

ถูกแยกจากกันโดยเมมเบรน (20-200 m) ซึ่งนำโปรตรอนจากขั้วแอโนดไปขั้วแคโทดที่ซึ่งอิเล็กตรอนไม่สามารถทะลุผ่านไปได้ การเคลื่อนที่ของโปรตรอนนี้ได้ดึงโมเลกุลของน้ำมาด้วยทำให้เกิดการกระจายของความชื้นในเมมเบรน โมเลกุลของน้ำสามารถไปได้ทั้งสองทิศทางภายในเมมเบรนและโดยตรงกับการปริมาณน้ำที่ผลิตในฝั่งแคโทด

อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในฝั่งแอโนดนั้นไม่สามารถผ่านเมมเบรนและได้ถูกใช้ในวงจรไฟฟ้าภายนอกเช่น มอเตอร์หลอดไฟ อื่นๆ ก่อนย้อนกลับสู่แคโทด การไหลของอิเล็กตรอนหรือเรียกว่ากระแสไฟฟ้านั้น สัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.20

$$J_{H^+} = \frac{i}{F} \quad (2.24)$$

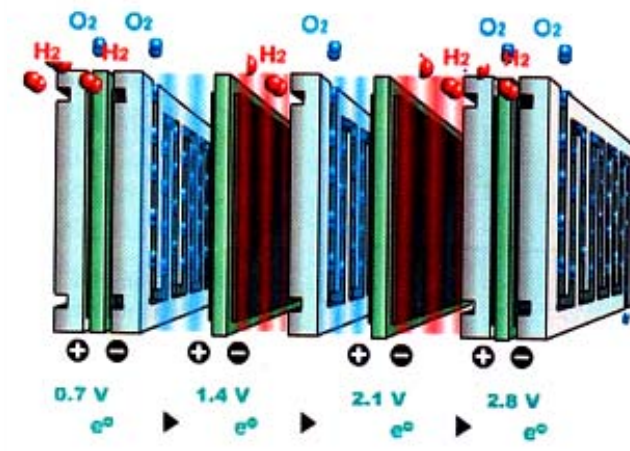
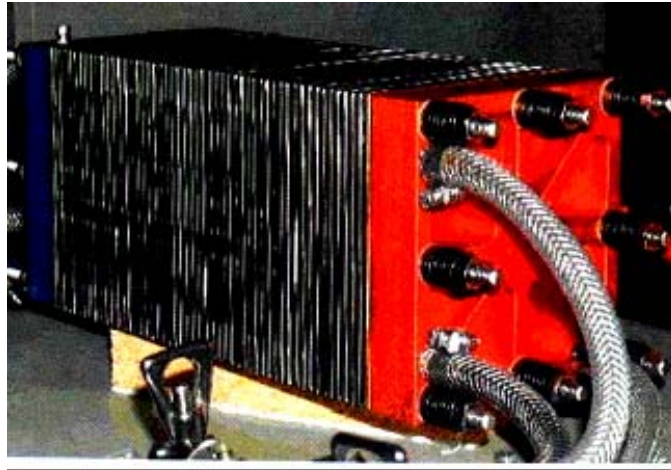
ที่ซึ่ง  $F$  คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday)

ค่าแรงดันเอาต์พุตของเซลล์หนึ่งเซลล์มาจากพลังงานปลดปล่อยอิสระของกิบส์ (Gibb's Free Energy,  $G$ ) คือ ดังสมการที่ 2.21

$$V_{rev} = \frac{\Delta G}{2F} = 1.23 \text{ V} \quad (2.25)$$

ซึ่งแรงดันนี้ไม่เคยได้ถึงค่าทางทฤษฎี แม้กระทั่งในสภาพที่ไม่มีโหลดแรงดันของเซลล์หนึ่งเซลล์ที่พิกัดกระแส (ประมาณ 0.5 A.cm<sup>-2</sup>) มีค่าประมาณ 0.6-0.7 V ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกสร้างโดยนำเซลล์มาต่ออนุกรมกันโดยประกอเป็นชั้น ๆ ดังรูปที่ 2.18 เพื่อที่จะเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น

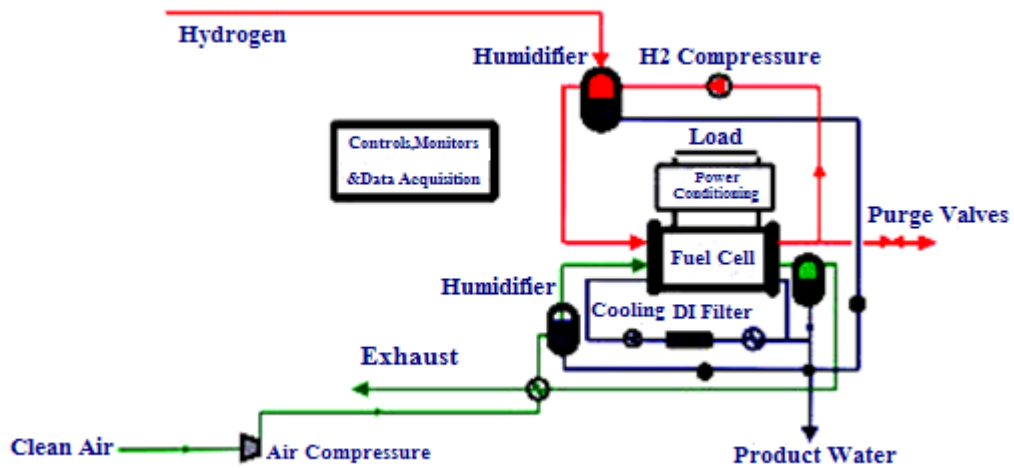
รูปที่ 2.22 แสดงท่อที่มีหน้าที่ส่งลำเลียงก๊าซ 2x4 ท่อ ซึ่งประกอด้วย 2 ขั้วต่อสำหรับกระแสไฟฟ้า 2x2 ท่อสำหรับก๊าซและ 1x2 ท่อสำหรับระบบทำระบายความร้อนก๊าซจะถูกป้อนให้เกินปริมาณเล็กน้อยของการทำปฏิกิริยาเพื่อให้แน่ใจในการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ก๊าซที่ไม่ได้ถูกทำปฏิกิริยาจะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับน้ำที่ถูกผลิต โดยทั่วไปการหมุนเวียนของน้ำจะถูกใช้ควบคุมอุณหภูมิปฏิบัติการไหลของเซลล์เชื้อเพลิง(ประมาณ 60 -70) เมื่อเริ่มทำงาน เซลล์เชื้อเพลิงจะถูกทำให้ร้อนและต่อมากจะถูกทำให้เย็นลงหลังจากการทำงานไปแล้ว ขณะเดียวกันที่กระแสพิกัด เซลล์เชื้อเพลิงผลิตพลังงานออกมาเกือบเท่ากันของพลังงานความร้อนและไฟฟ้า



รูปที่ 2.22 เซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM (23 cells, 50 W, 40 A, ประมาณ 12.5 V) ผลิตโดยบริษัท ZSW

### 2.13 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง

เนื่องจากมีความจำเป็นในการป้อนก๊าซและการระบายความร้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิงดังนั้นระบบเซลล์เชื้อเพลิงจึงประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ กัน รูปที่ 2.23 แสดงระบบอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM ซึ่งได้ถูกนำมาศึกษาวิจัยที่ห้องทดลองทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าที่เมืองซีประเทศฝรั่งเศส ถูกสร้างโดยบริษัท ZSW ประเทศเยอรมนี ซึ่งชั้นของเซลล์มี 23 เซลล์ขนาด  $100 \text{ cm}^2$  มีพิกัดกำลังที่ 500 W สำหรับพิกัดกระแส 40 A และพิกัดแรงดันประมาณ 12.5 V และที่ไม่มีโหลดประมาณ 23 V



รูปที่ 2.23 ระบบอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM [9]

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์เมมเบรน (PEMFC) กำลังได้รับความสำคัญเป็นอย่างมากโดยเป็นแหล่งจ่ายไฟสำหรับการใช้งานหลายอย่าง เนื่องจากมีอุณหภูมิระหว่างการทำงานต่ำ ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง ให้กำลังไฟฟ้าที่สูง อายุการใช้งานนาน มีความทนทานและมีไดนามิกส์ที่สูง เซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกพัฒนาสำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟที่พกพาได้และโรงจักรไฟฟ้า เซลล์เชื้อเพลิงกำลังถูกนำไปใช้งานในรถบัส



ตารางที่ 2.3 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง อุณหภูมิการทำงาน เชื้อเพลิงและออกซิเจนที่ อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้  
กระบวนการในอิเล็กโทรไลต์ เป้าหมายขนาดกำลังผลิต การประยุกต์ใช้และผู้จำหน่าย  
[14]

ชนิด	อุณหภูมิ ทำงาน (°C)	เชื้อเพลิงและ ออกซิเจน	อิเล็กโทรไลต์	กระบวนการ ในอิเล็กโทร ไลต์	เป้าหมาย ขนาด กำลังผลิต	การประยุกต์ใช้ และผู้จำหน่าย
อัลคาไลน์ (AFC)	50-200 (60-90)*	ไฮโดรเจน/ ออกซิเจน	โปตัสเซียมไฮ ดรอกไซด์(KOH)	$\text{OH}^\ominus \leftarrow$	20-100 kW	ด้านอวกาศ (ZeTek)
กรดฟอสฟอริก (PAFC)	160-210 (60-120)*	ก๊าซ ธรรมชาติ/ อากาศ	กรดฟอสฟอริก	$\text{H}^\ominus \rightarrow$	50-kW- 20MW	การศึกษาความ เป็นไปได้ทาง เทคนิค (ONSI)
คาร์บอนเดเทลว (MCFC)	630-650 (ca, 400)*	ก๊าซ ธรรมชาติ/ อากาศ	เกลือเหลว (เกลือ ไนเตรด, เกลือ ซัลเฟต, คาร์บอเนต)	$\text{CO}_2 \leftarrow$	300kW- 3MW	ทดสอบภาคสนาม (MC Power, FCE, MTU)
โซลิดออกไซด์ (SOFC)	600-1000 (300-600)*	ก๊าซ ธรรมชาติ/ อากาศ	ออกไซด์เซอร์โคเนียม เสถียรและการโคป เพอร์ออสไซด์	$\text{O}^\ominus \leftarrow$	2kW- 300 MW	ทดสอบภาคสนาม (Siemens, Sulzer- Hexis)
โปรตอนเย็ก เซนจ์เมมเบรน (PEMFC)	50-80 (<75)*	ไฮโดรเจน, เมทานอล/ อากาศ	โพลีเมอร์, โปรตอนเย็ก เซนจ์เมมเบรน	$\text{H}^\ominus \rightarrow$	2 – 250 kW	ต้นแบบ (Ballard, LFC, DeNora, H- Power, plugpower)
ดีเร็กเมทานอล (DMFC)	60-200	เมทานอล/ อากาศ	โพลีเมอร์	$\text{H}^\ominus \rightarrow$	N/A	งานวิจัยพื้นฐาน
กรดซัลฟูริก (SAFC)	80-90	แอลกอฮอล์, ไฮโดรเจน/ อากาศ	กรดซัลฟูริก	$\text{H}^\ominus \rightarrow$	N/A	N/A
โซลิด โพลีเมอร์ (SPFC)	90	ไฮโดรเจน/ อากาศ	โซลิดซัลโฟเนต โพลีไธรีน	$\text{H}^\ominus \rightarrow$	N/A	N/A

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด [14]

ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	ข้อดี	ข้อเสีย
โปรตรอนเอ็กเชนจ์เมมเบรน (PEMFC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีอิเล็กโทรดเป็นของแข็งซึ่งลดการกัดกร่อน และการแก้ไขปัญหาก็ทำได้ง่าย</li> <li>- อุณหภูมิทำงานต่ำ</li> <li>- การเริ่มต้นทำงานของระบบทำได้รวดเร็ว (Quick Start-Up)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การทำงานที่อุณหภูมิต่ำต้องใช้ตัว Catalyst ที่มีราคาสูง</li> <li>- มีความอ่อนไหวต่อความบริสุทธิ์ของเชื้อเพลิงสูง</li> </ul>
อัลคาไลน์ (AFC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดไว้มากในอัลคาไลน์อิเล็กโทรไลต์ ทำให้มีสมรรถนะสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้นทุนในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเชื้อเพลิงสูง และต้อง การระบบอัดอากาศ</li> </ul>
กรดฟอสฟอริก (PAFC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ประสิทธิภาพสูงสุดถึง 85% สำหรับทำงานแบบระบบผลิตร่วมระหว่างไฟฟ้าและความร้อน</li> <li>- สามารถใช้กับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ไม่บริสุทธิ์ได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องการ Platinum Catalyst</li> <li>- ให้กระแสและกำลังไฟฟ้าที่ต่ำ</li> <li>- ขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก</li> </ul>
คาร์บอนเดเทลว (MCFC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ประสิทธิภาพสูง</li> <li>- ใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด</li> <li>- สามารถใช้ Catalyst ได้หลายแบบ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำงานที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการสึกกร่อนและเซลล์เสียหายได้ง่าย</li> </ul>
โซลิดออกไซด์ (SOFC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ประสิทธิภาพสูง</li> <li>- ใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด</li> <li>- สามารถใช้ Catalyst ได้หลายแบบ</li> <li>- มีอิเล็กโทรดเป็นของแข็งซึ่งลดการกัดกร่อน และการแก้ไขปัญหาก็ทำได้ง่าย</li> <li>- อุณหภูมิทำงานต่ำ</li> <li>- การเริ่มต้นทำงานของระบบทำได้รวดเร็ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำงานที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการสึกกร่อนและเซลล์เสียหายได้ง่าย</li> </ul>

## 2.14 ข้อดีและข้อจำกัดของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงมีทั้งข้อดีและข้อจำกัดต่างๆ ดังต่อไปนี้ (Stambouli and Traversa, 2002)

ความมั่นคงทางด้านพลังงาน: การใช้เซลล์เชื้อเพลิงช่วยลดการใช้น้ำมัน ลดการนำเข้า และเพิ่มความเป็นไปได้ของจัดหาไฟฟ้าในหลายๆ ประเทศ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงซึ่งสามารถจัดหาและผลิตได้จากหลายแหล่ง เช่น จากก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน และผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ถ่านหิน ชีวมวล น้ำ และสารเคมี (McLellan et al., 2005)

ความมั่นคงของระบบสูง: ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบสูงกว่า 90% ความมั่นคงและความสม่ำเสมอของการจ่ายพลังงานกว่า 99.99%

ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ: เซลล์เชื้อเพลิงมีต้นทุนในการเดินระบบต่ำมากหากเทียบกับเทคโนโลยีพลังงานอื่น โดยเฉพาะหากมีการผลิตและใช้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากเมื่อพิจารณาถึงส่วนประกอบในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแล้วจะพบว่าไม่มีความสลับซับซ้อน และไม่มีส่วนใดเลยของระบบที่มีการเคลื่อนไหวระหว่างทำงาน (Nomoving Parts)

สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง: สามารถเดินระบบได้อย่างต่อเนื่องต่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองชนิดอื่น เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล หรือ เครื่องจ่ายไฟสำรอง (Uninterrupted Power Supply; UPS) เซลล์เชื้อเพลิงจะทำงานอย่างต่อเนื่องครบเท่าที่มีเชื้อเพลิงป้อนให้ระบบ ไม่ต้องการการซ่อมบำรุงและมีรอบการดูแลรักษาระบบเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล

สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด: เช่น ไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ โพรเพน บิวเทน เมทานอล และน้ำมันดีเซล เป็นต้น

เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม: เซลล์เชื้อเพลิงเป็นพลังงานที่สะอาดมากมีการปลดปล่อยมลพิษที่ต่ำกว่า 100-1,000 เท่าเมื่อเทียบกับมาตรฐานของ American Clean Bus Standard 1998 (15 ppmv of CO<sub>2</sub>) และเมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีในปัจจุบัน

ไม่มีเสียงดังระหว่างทำงาน: การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงไม่มีเสียงดังรบกวนเหมือนกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน สามารถติดตั้งภายในอาคาร ไม่ต้องมีอุปกรณ์ป้องกันเสียงดังตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบระดับเสียงจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงกับเทคโนโลยีอื่นๆ

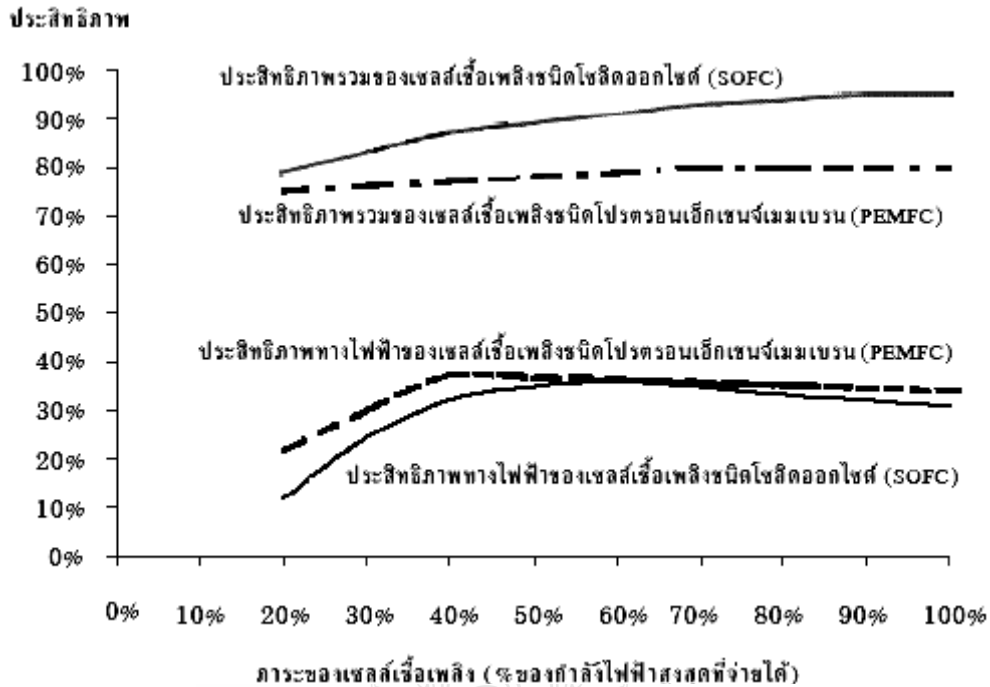
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบระดับเสียงจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงกับเทคโนโลยีอื่นๆ [15]

รายการ	โรงไฟฟ้าก๊าซ	ไมโครเทอร์ไบน์	โรงไฟฟ้าดีเซล	เซลล์เชื้อเพลิง	มาตรฐานในเขตชุมชน
ระดับเสียง	ดัง	ปานกลาง	ดัง	เบา	เบา
ระดับป้องกันเสียง	ต้องการ	ต้องการ	ต้องการ	ไม่ต้องการ	ไม่ต้องการ

\* ระดับเสียงเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิง

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงกับเทคโนโลยีอื่น ๆ [15]

รายการ	โรงไฟฟ้าก๊าซ	ไมโครเทอร์ไบน์	โรงไฟฟ้าดีเซล	เซลล์เชื้อเพลิง
ประสิทธิภาพ	20 %	24 %	32 %	90 % (รวมการใช้ความร้อน)



รูปที่ 2.24 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC ขนาด 1.0 kW<sub>e</sub> และ PEMFC ขนาด 4.5 kW<sub>e</sub> ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง [13]

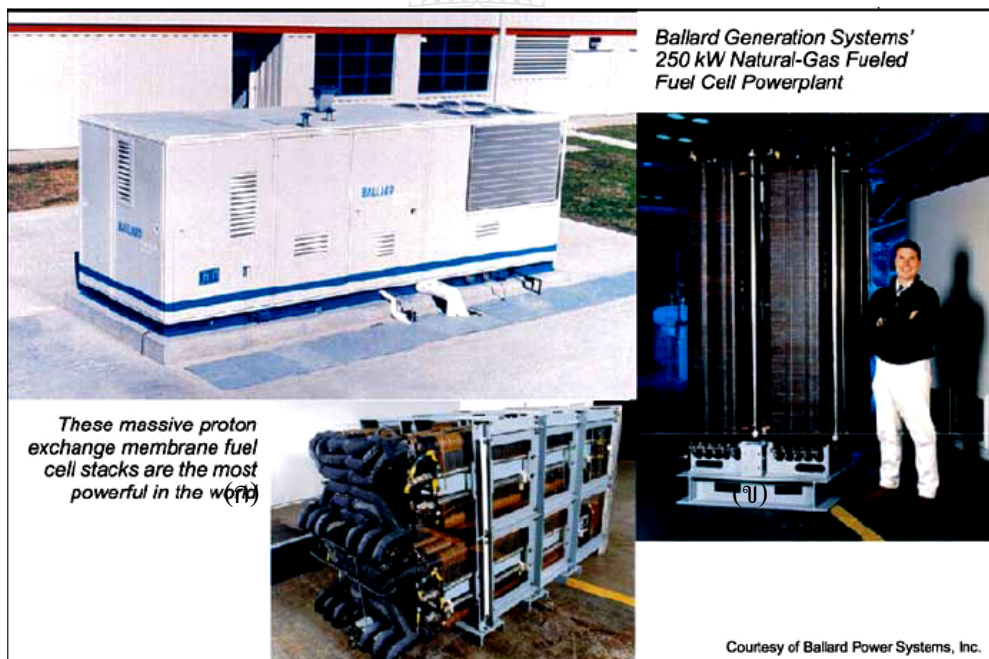
ประสิทธิภาพสูง: ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงถึง 50 – 70% สำหรับการเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้าและ 90% หากรวมพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดต้นทุนเชื้อเพลิงและอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงกับเทคโนโลยีอื่นๆ และรูปที่ 2.20 เป็นผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดโซลิดออกไซด์ (Solid Oxide Fuel Cell; SOFC) ขนาด 1.0 kW<sub>e</sub> และชนิดโปรตรอนเอ็กซ์เชนจ์เมมเบรน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell; PEMFC) ขนาด 4.5 kW<sub>e</sub> ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงต้องการออกซิเจนและไฮโดรเจนในการผลิตไฟฟ้า โดยปกติออกซิเจนจะได้ออกมาจากอากาศประมาณ 20% ซึ่งต่างจากไฮโดรเจนที่มีข้อจำกัดในเรื่องของการกักเก็บและการขนส่ง จากเหตุผลดังกล่าวทำให้มีการศึกษาและวิจัยการใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ทดแทนการใช้ไฮโดรเจนโดยตรง เช่น แอลกอฮอล์ และสารไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ซึ่งปัจจุบันได้เริ่มมีการนำมาใช้งานแล้ว แต่การใช้เชื้อเพลิงในลักษณะนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เปลี่ยนรูป (Reformer) เชื้อเพลิงเหล่านั้นให้เป็ไฮโดรเจนเพื่อป้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงบางตัวทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของการจัดการอิเล็กทรอนิกส์

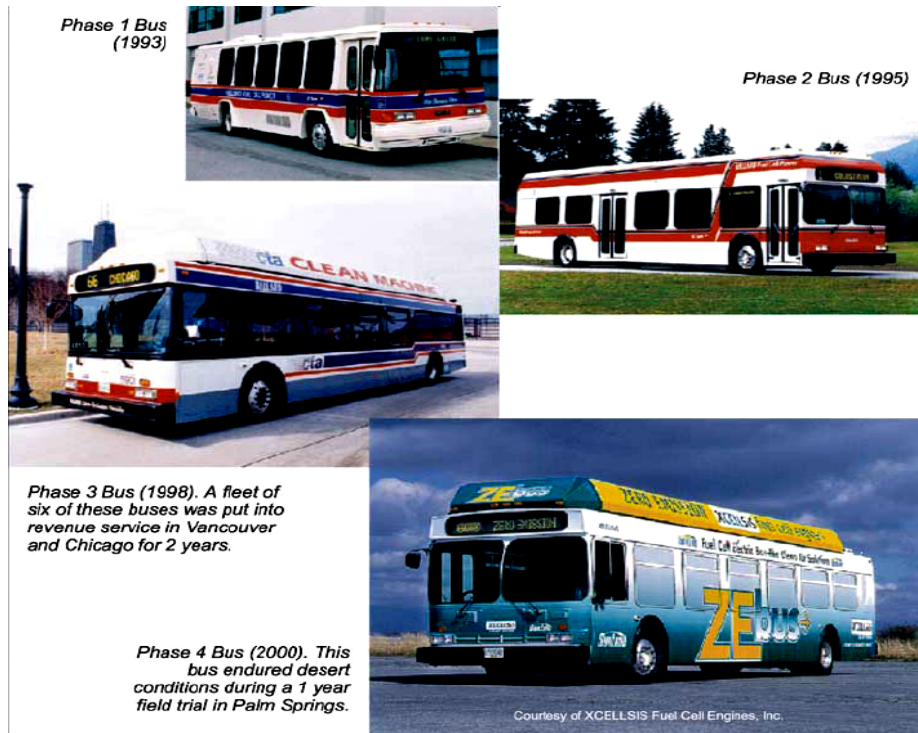
(Electrolyte Management) เช่น อิเล็กโทรไลต์แบบของเหลวมีปัญหาเรื่องการกัดกร่อน อิเล็กโทรไลต์แบบของแข็งบางชนิดมีราคาที่สูงมาก เช่น แพลทินัมในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC อิเล็กโทรไลต์บางประเภทต้องการอุณหภูมิทำงานที่สูงมาก เช่น SOFC และ Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

## 2.15 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ระบบที่ต้องการความมั่นคงของพลังงานสูง เช่นระบบคอมพิวเตอร์ ศูนย์กระจายข่าว ศูนย์สื่อสาร ศูนย์ประมวลผลข้อมูล หรือโรงงานอุตสาหกรรมไฮเทค ฯลฯ การลดการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ เช่น รถยนต์ส่วนบุคคล รถโดยสาร การใช้งานในเขตชุมชนเมือง (โรงงานอุตสาหกรรมในเขตชุมชนเมือง) สนามบิน พื้นที่หรือเขตที่มีมาตรฐานของการปลดปล่อยมลพิษที่เข้มงวด พื้นที่ที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ เช่น ใช้ในระบบไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ห่างไกลจากสายส่งไฟฟ้า ช่วยเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบสายส่งไฟฟ้าสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับโรงงานกำจัดขยะ ซึ่งก๊าซจากขยะสามารถนำมาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าและความร้อนด้วยการใช้เซลล์เชื้อเพลิง รูปที่ 2.25 เป็นตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิง

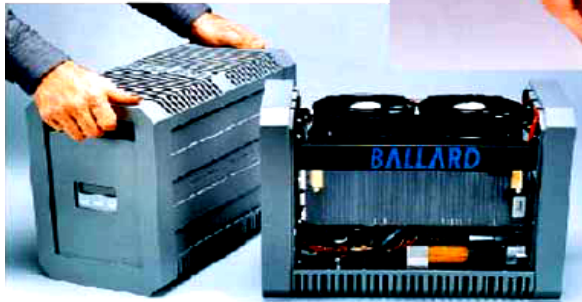


(ก) สถานีไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 250 kW [9]



(ข) รอยนต์ใช้พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิง [16]

100 W Fuel Cell Stack



1 kW Fuel Cell Power Pack

Courtesy of Ballard Power Systems Inc

„Low-Power“  
Systems  
cell phone



Camcorder,  
Computer



„High-Power“

gensets  
1 – 5



(ค) เซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็ก [9]

รูปที่ 2.25 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิง

## 2.16 ราคาของเซลล์เชื้อเพลิง

ปัจจุบันการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงยังเป็นเพียงในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อการวิจัยและพัฒนา ซึ่งยังไม่มีการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่าใดนัก ทำให้ราคาเริ่มต้นของเซลล์เชื้อเพลิงยังคงสูงอยู่มาก คืออยู่ที่ประมาณ 10,000 – 20,000 EURO/kW (Erdmann, 2003) Bauen และคณะทำการศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการใช้เซลล์เชื้อเพลิงขนาดต่าง ๆ ในระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับประเทศกำลังพัฒนาซึ่งได้ตัวเลขแสดงดังตารางที่ 2.6 (Bauen et al., 2003) นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอผลการศึกษาซึ่งแสดงสมมุติฐานของการประเมินราคาของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC จากผู้ผลิตในประเทศเยอรมัน ดังตารางที่ 2.6 (Erdmann, 2003 / Tsuchiya and Kobayashi, 2004)

ตารางที่ 2.7 ราคาประเมินของระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดต่างๆ ในแต่ละปี (US\$/kWe คิดตั้ง) [17]

	2546	2548	2553	2558	2563
1-100 kW	5,285	3,819	1,624	1,079	901
100 kW - 1MW	6,231	3,920	1,777	1,230	1,041
1 - 10 MW	7,250	3,983	1,813	1,249	1,087

kWe คือ กิโลวัตต์ไฟฟ้า

ตารางที่ 2.8 ราคาและการประเมินราคาของระบบเซลล์เชื้อเพลิง [13,17]

เป้าหมายของรากระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดโซลิดออกไซด์ (SOFC)	
เงินลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC (EURO)	
Natural Gas SOFC	$I = 900 + 500 \times \text{power (kW)}$
Heating Oil SOFC	$I = 1,400 + 500 \times \text{power (kW)}$
ค่าบำรุงรักษาระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC (EURO/ปี)	$OC = 100 + 100 \times \text{power (kW)}$
ค่าสัญญาการใช้งานระบบ SOFC	250 EURO/ปี
ราคาพลังงาน	
ราคาค่าไฟฟ้าสำหรับบ้านพักอาศัย	0.1402 EURO/kWh + 46.26 EURO/ปี
ราคาค่าก๊าซธรรมชาติสำหรับบ้านพักอาศัย	0.0389 EURO/kWh + 94.90 EURO/ปี
ราคาค่าน้ำมันเตาสำหรับบ้านพักอาศัย	39 EURO/100 liter
ราคาค่าไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบ (Fed in Power)	0.025 EURO/kWh
เงินสนับสนุนค่าไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบ (Subsidy for Fed in Power)	0.0511 EURO/kWh



## 2.17 บทสรุป

เซลล์เชื้อเพลิง คืออุปกรณ์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนด้วยกระบวนการ “Electrochemical” โดยการรวมตัวกันระหว่างเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซไฮโดรเจน และออกซิเจน

เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยชั้นของวัสดุสามชั้นเรียงซ้อนกัน ชั้นแรกเป็นแอโนด ชั้นที่สองเป็นอิเล็กโทรไลต์ และชั้นที่สามเป็นแคโทด โดยที่แอโนดและแคโทดทำหน้าที่เป็นตัว Catalyst ส่วนชั้นตรงกลางนั้นเป็นโครงสร้างที่เป็นพาหะซึ่งดูดซับอิเล็กโทรไลต์เอาไว้ เซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จำเป็นต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงหลาย ๆ เซลล์มาต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตามต้องการ เรียกว่า “Stack”

เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงถึง 50 – 70% สำหรับการเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้าและ 90% เมื่อรวมพลังงานความร้อนที่ผลิตได้

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ระบบคอมพิวเตอร์ ศูนย์กระจายข่าว ศูนย์สื่อสารศูนย์ประมวลผลข้อมูล โรงงานอุตสาหกรรม รถยนต์ส่วนบุคคล รถโดยสารเครื่องบิน ใช้ในพื้นที่หรือเขตที่มีมาตรฐานของการปลอดภัยมลพิษที่เข้มงวด และพื้นที่ที่ไม่มีไฟฟ้าใช้

ปัจจุบันการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงยังเป็นเพียงในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อการวิจัยและพัฒนา ซึ่งยังไม่มีการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่าใดนัก ทำให้ราคาเริ่มต้นของเซลล์เชื้อเพลิงยังคงสูงอยู่มากที่ประมาณ 10,000– 20,000 EURO/kW



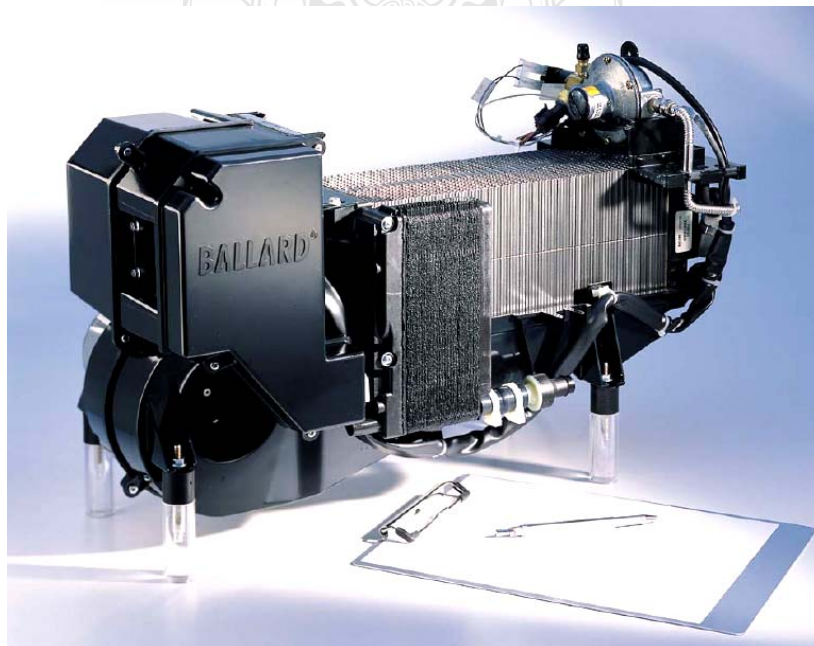
## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งงานวิจัยจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ศึกษาระบบควบคุมและทดสอบการทำงานในห้องปฏิบัติการ (Test Station) ส่วนที่สองระบบการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink ดำเนินการสร้างและทดสอบ เพื่อหาสถานะการทำงานและวิธีการทำงานที่เหมาะสมต่อการทำงาน และหาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลอง ซึ่งระบบควบคุมการทำงานที่มีประสิทธิภาพจะส่งผลต่อกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ในรายละเอียดผู้วิจัยจะขอแนะนำตามลำดับดังนี้

#### 3.1 การทดสอบการทำงานในห้องปฏิบัติการ (Test Station)

การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง จำเป็นต้องมีชุดทดสอบซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ควบคุมชนิดต่าง ๆ ทำหน้าที่ควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น อัตราการไหลของก๊าซ และ โพลลอคิเล็กทรอนิกส์ โดยศึกษาจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) ขนาด 1.2 kW ยี่ห้อ Nexa™ Power Module User's Manual รุ่น MAN5100078 ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

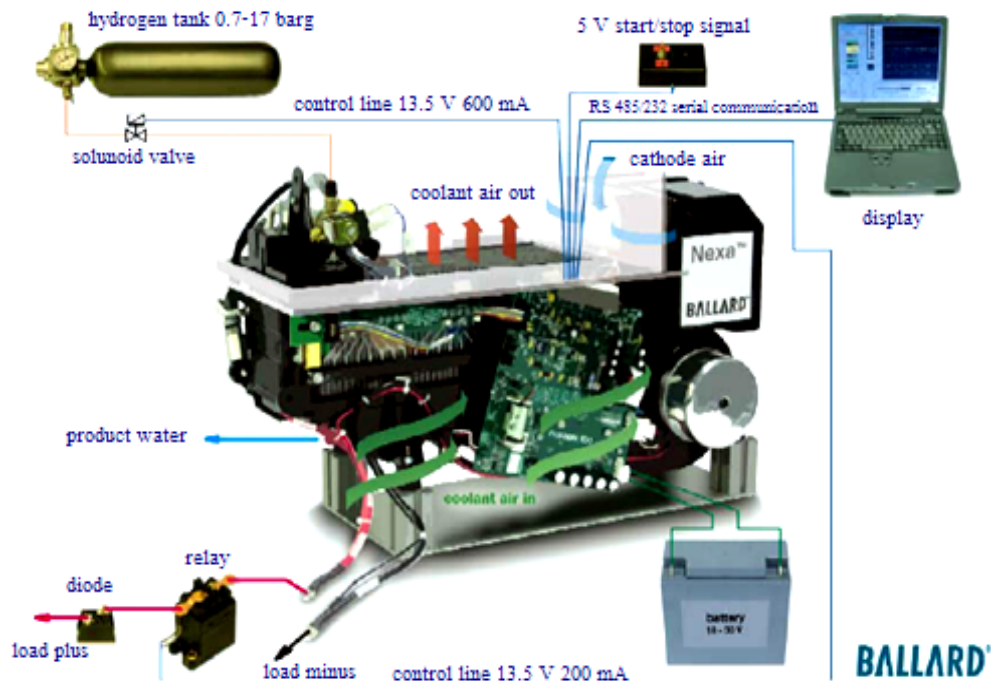


รูปที่ 3.1 The Nexa™ Power Module

อุปกรณ์ควบคุมในระบบควบคุมและทดสอบการทำงานในห้องปฏิบัติการ โดยงานวิจัยนี้ได้นำเครื่อง The Nexa™ Power Module ดังแสดงในรูป 3.1 มาใช้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังนี้

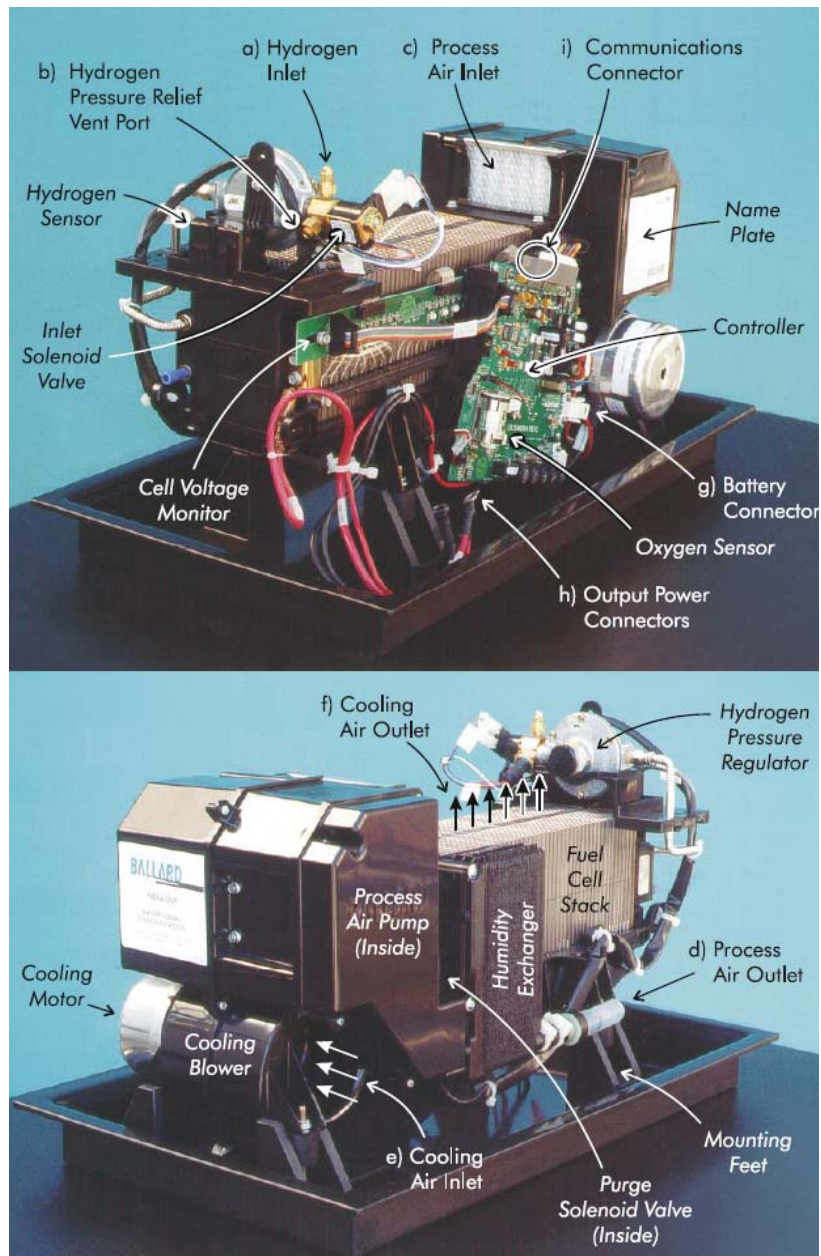
The Nexa™ Fuel Cell Stack จะทำงานที่ความถี่ต่ำ, การสูญเสียต่ำ, เสี่ยงรบกวนน้อย และการทำงานของระบบมีความน่าเชื่อถือขึ้น การออกแบบ The Nexa™ Fuel Cell Stack ให้วางเรียงซ้อนกัน โดยไม่ต้องอาศัยความชื้นจากภายนอก

The Nexa™ Fuel Cell Stack มีขนาด 1.2 kW ของกำลังงานที่ผลิตได้ แรงดันที่ผลิตได้อยู่ที่ประมาณ 43 V ที่ระบบยังไม่ทำงาน ถึงประมาณ 26 V ที่ระบบทำงานเต็มที่



รูปที่ 3.2 การติดตั้งใช้งาน ของ The Nexa™ Power Module

โดย The Nexa™ Power Module ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งมีส่วนประกอบต่าง ๆ ตามรูปที่ได้แสดงไว้ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบต่างๆ ของ The Nexa™ Power Module

ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆ ในการทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

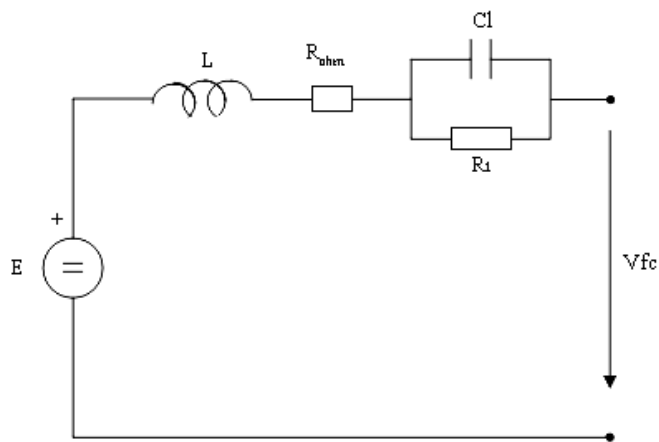
ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดของ The Nexa™ Power Module

OUTPUTS	Requirement	Definition	Quantity
Power <sup>1</sup>	Rated Power	Capacity at Standard Conditions, BOL	1200 W
	Voltage	Operating Voltage Range	22 V to 50 V
		Voltage at Rated Power	26 V
Start-up Time	Minimum Time to Achieve Rated Power from a Cold Start Condition	2 Minutes	
Emissions	Noise	Minimum Noise Emission at 1 m	72 dBA
	Water	Minimum Quantity of Liquid Water Produced at Rated Power	870 mL/hr
Physical	Dimensions	L x W x H	56 x 25 x 33 cm
	Mass	Total System Mass	13 kg
Lifetime	Operating Life	Minimum Number of Operating Hours before EOL	1500 hours
	Cyclic Life	Minimum Number of Start-up & Shut-down Cycles before EOL	500
	Shelf Life	Minimum Storage (Non-Operation) before EOL	2 years
INPUTS	Requirement	Definition	Quantity
Fuel	Purity	Lowest Acceptable Concentration of Hydrogen	99.99% H <sub>2</sub> (vol)
	Pressure	Allowable Range of Inlet Supply Pressure <sup>2</sup>	70-1720 kPa(g)
	Acceptable Impurities	Maximum Total Inert Fluids (Including Helium, Argon, Nitrogen and Water Vapour)	0.01% (vol)
		Maximum CO and CO <sub>2</sub> Combined	2 ppm (vol)
		Maximum Total Hydro Carbon	1 ppm (vol)
		Maximum Oxygen	500 ppm (vol)
	Consumption	Maximum Fuel Consumption at Rated Power	<18.5 SLPM
Power Conditioning	Current Ripple	Maximum Acceptable Current Ripple at 120 Hz. with Respect to Average DC Net Output Current	24.7% RMS 35% peak-peak

ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดของ The Nexa™ Power Module (ต่อ)

DC Power Supply	Voltage	Allowable Range of Input Voltage	18 V to 30 V
	Power	Maximum Power Draw During Start-up	60 W
Operating Environment	Location	Acceptable Locations for Use	Indoors & Outdoor
	Temperature Range	Range of Acceptable Ambient, Cooling air and Oxidant air Temperatures	3°C – 40°C
	Relative Humidity	Range of Acceptable Ambient Relative Humidity	0% - 95% (Non-Condensing)
	EMI Tolerance	Tolerance to and Operates Safety in the EMI Environment Specified by	UL 991

ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง [19]

โดยที่

- $E$  = แรงดันภายในเซลล์เชื้อเพลิง
- $R_{ohmic}$  = ความต้านทาน
- $RIC1$  = วงจรเลียนแบบการเก็บประจุ 2 ชั้น
- $V_{fc}$  = แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

### 3.1.1 การติดตั้ง The Nexa™ Power Module

3.1.1.1 ต้องแน่ใจว่าระบบ The Nexa™ Power Module ถูกติดตั้งในห้องทำการทดลองที่มีการถ่ายเทอากาศดี พร้อมกับติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเตือนภัยของก๊าซไฮโดรเจน หรือชุดตรวจจับควัน

3.1.1.2 ต้องแน่ใจว่าอากาศในห้องทำการทดลองพอเพียงกับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง และไม่ทำงานในบริเวณที่ใกล้กับประกายไฟหรือในห้องที่ไม่มีการถ่ายเทอากาศที่เหมาะสม

3.1.1.3 จัดเตรียมก๊าซไฮโดรเจนให้เหมาะสม เชื่อมต่อถังไฮโดรเจนขนาด 0.7 – 17 barg. โดยผ่านโซลินอยด์วาล์ว



รูปที่ 3.5 การต่อไฮโดรเจน

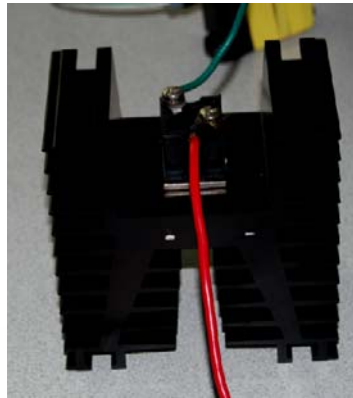
3.1.1.4 ต่อแบตเตอรี่ขนาด 24 Vdc. กับชุดควบคุมของ The Nexa™ Power Module และต้องแน่ใจว่าแหล่งจ่ายไฟสามารถทำงานได้ในขณะที่มีอัตราการไหลขึ้น ๆ ลง ๆ อย่างน้อยที่สุด 6 แอมแปร์

3.1.15 ติดตั้ง Load Relay เข้ากับขั้วบวกของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 3.6 การต่อ Load Relay

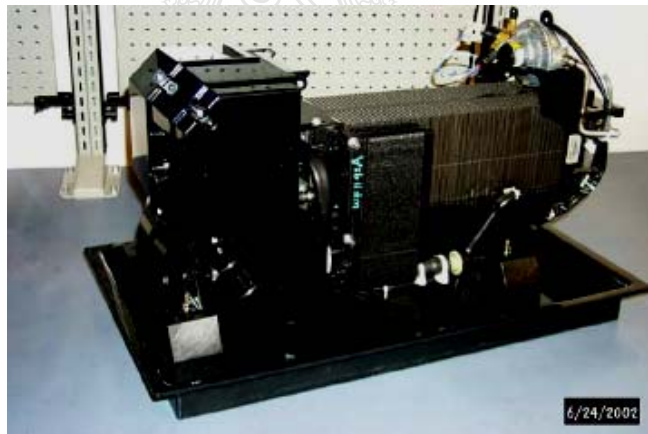
3.1.1.6 ติดตั้งชุด Diode เข้ากับขั้วบวกของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อป้องกันการต่อแบตเตอรี่  
กับเซลล์เชื้อเพลิงกลับขั้ว ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้



รูปที่ 3.7 การต่อชุด Diode

3.1.1.7 ต่อขั้วบวกและขั้วลบของ The Nexa™ Power Module กับ DC Load Bank  
สำหรับการทดสอบระบบ

3.1.1.8 จัดหาให้กระบายน้ำให้เหมาะสม สำหรับการควบแน่นของอากาศ



รูปที่ 3.8 การติดตั้งถาดรองน้ำ

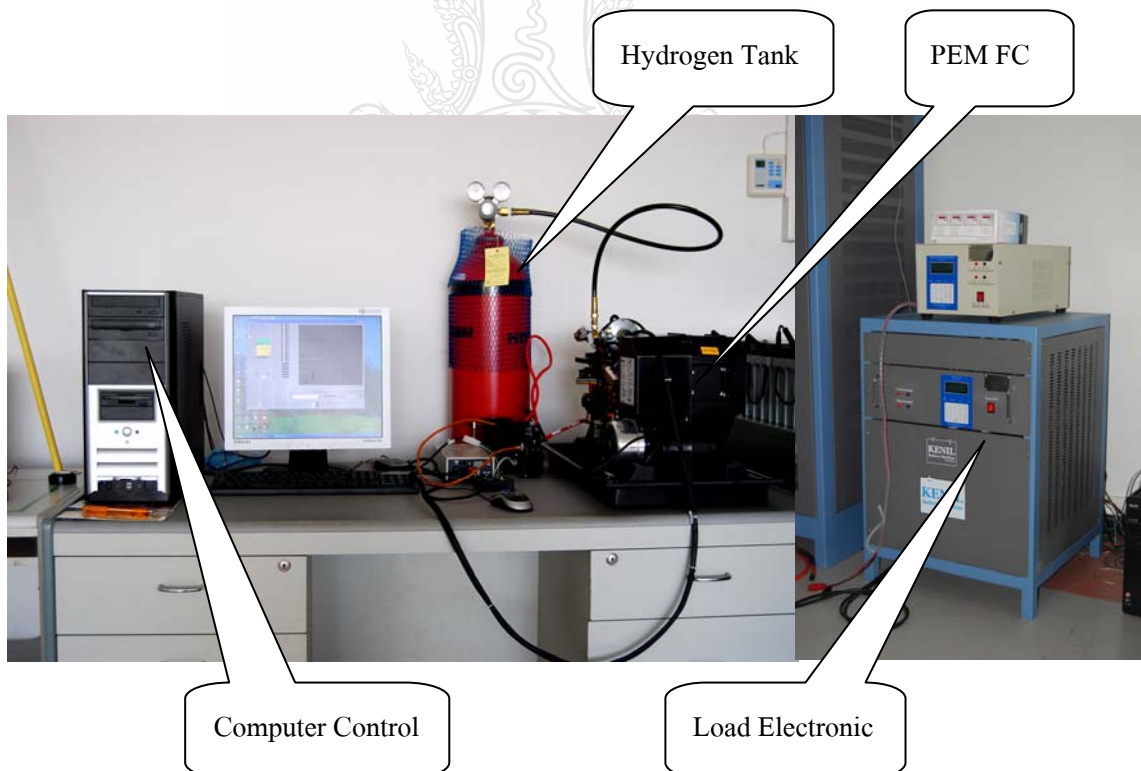


3.1.1.9 ต่อชุด The Nexa™ Power Module เข้ากับพอร์ตสื่อสารไปถึงคอมพิวเตอร์ ผ่าน  
ตัว RS485 ไปถึงตัวแปลง RS 232



รูปที่ 3.9 การต่อสายสัญญาณ RS485/232 กับคอมพิวเตอร์

### 3.1.2 วงจรจริง



รูปที่ 3.10 การต่อวงจรในห้องปฏิบัติการ

### 3.1.2.1 วิธีการเปิดเครื่องเพื่อทำการทดลอง



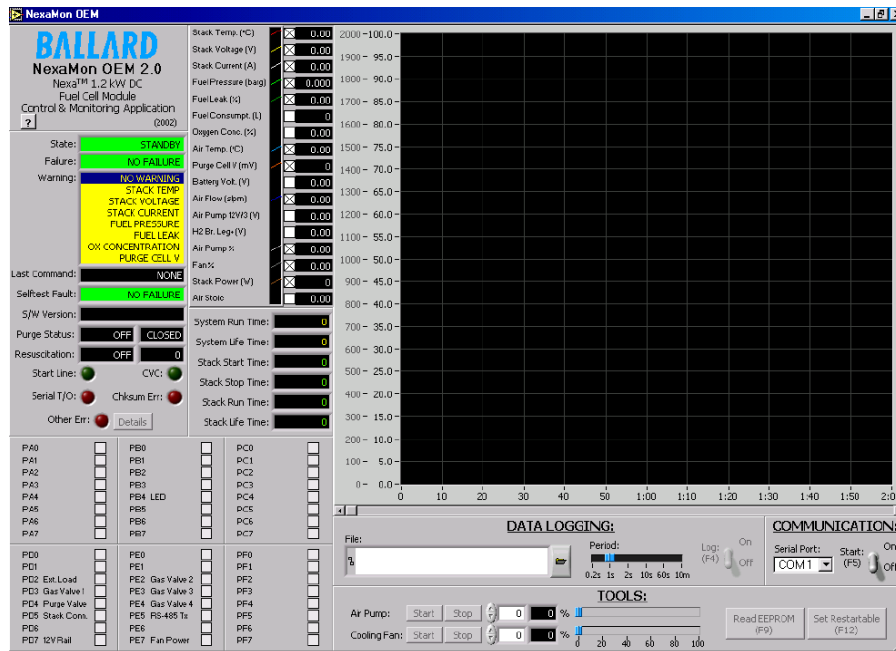
รูปที่ 3.11 การต่อถังไฮโดรเจนกับชุดเซลล์เชื้อเพลิง

1. เปิด Pressure Bar ของถังไฮโดรเจน ที่ประมาณ 1 bars (ตามคู่มือ)
2. เปิดสวิตช์ของเครื่อง Power Supply จ่ายแรงดัน 5 โวลต์



รูปที่ 3.12 แหล่งจ่ายแรงดัน 5 โวลต์

### 3. เปิดคอมพิวเตอร์ โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application



รูปที่ 3.13 โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application

### 4. เปิดสวิตช์ RUN



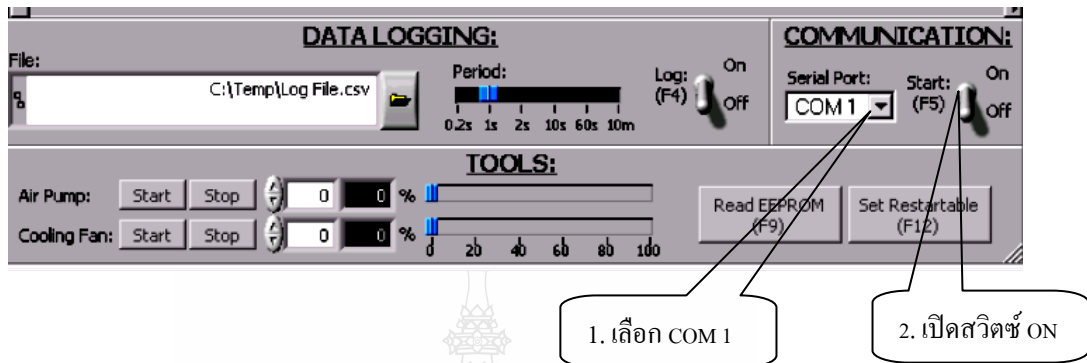
รูปที่ 3.14 การเปิดสวิตช์เครื่องเปิด-ปิดสัญญาณ

5. คู่มือคำสั่ง COMMUNICATION:

- เลือก Serial Port : COM 1
- เลือก Start ON (F5)

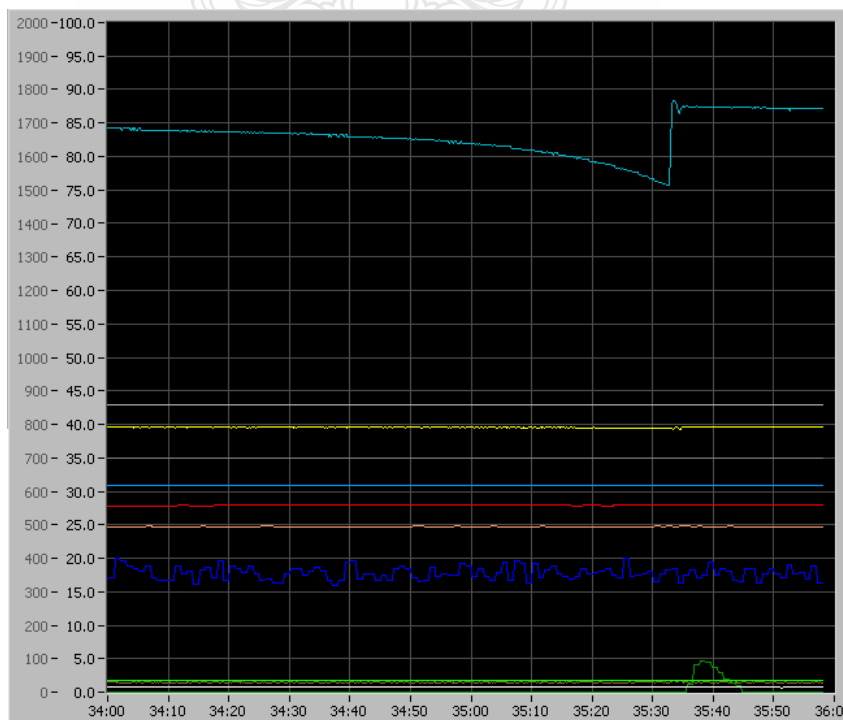
6. เมื่อเปิดเครื่องแล้ว คู่มือคำสั่ง DATA LOGGING:

- เลือก Air Pump :
- เลือก Cooling Fan :



รูปที่ 3.15 การใช้งานของคำสั่ง Communication ส่วนควบคุมของเซลล์เชื้อเพลิง

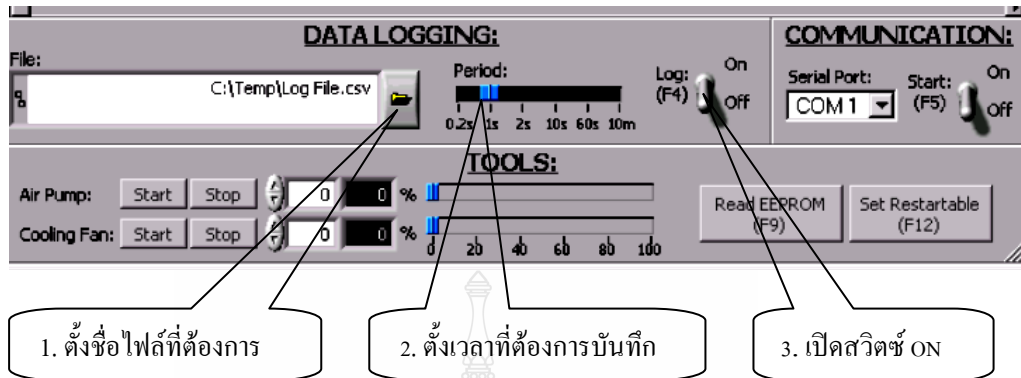
พัฒนาของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงจะทำงาน และจะมีกราฟแสดงค่าต่าง ๆ ที่เรากำหนดไว้ ขึ้นที่หน้าโปรแกรมที่เปิดอยู่ ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การทำงานพัฒนาของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิง

## 7. บันทึกค่าการทำงาน

- ตั้งชื่อ ไฟล์ที่ต้องการบันทึก
- เลือกเวลาที่ต้องการบันทึก
- เปิดสวิตซ์ ON



รูปที่ 3.17 การใช้งานของคำสั่ง Data Logging ส่วนควบคุมของเซลล์เชื้อเพลิง

## 8. การตั้งค่า Load Electronics

1. เปิดโปรแกรม MTB-Series ที่หน้าจอคอมพิวเตอร์
2. คลิกเมาท์ด้านขวาที่ตัวโปรแกรมของเครื่อง Load Electronics รุ่นที่เราใช้
3. เลือกคำสั่ง Program Edit
4. ดับเบิลคลิกที่คำสั่ง Step 1
  - เลือกคำสั่ง CA
  - เลือกเวลาที่จะป้อน โหลดให้กับเซลล์เชื้อเพลิง
  - เลือกคำสั่ง Discharge
  - เลือกเวลาที่ต้องการจะปล่อยค่า
  - ตั้งค่ากระแสตามที่เรารต้องการ
  - เลือกคำสั่ง F2
  - เลือกคำสั่ง OK
5. ดับเบิลคลิกที่คำสั่ง Step ต่อไปเรื่อย ๆ แล้วทำตามข้อ 4 จนกว่าจะจบคำสั่งตามที่ต้องการจะป้อนค่ากระแส
6. เลือกคำสั่ง Save Program (เลือกชื่อตามที่บันทึก)
7. เลือกคำสั่ง Exit
8. เลือกเครื่องหมาย ✓ ที่หน้าโปรแกรมรุ่นที่เราใช้
9. คลิกขวาที่เมาท์ เลือกคำสั่ง Download

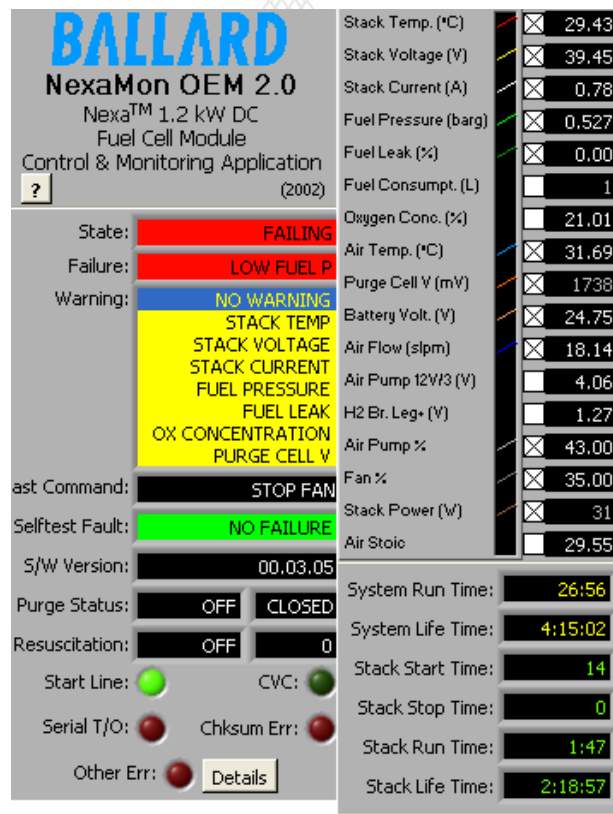
- เลือกชื่อตามที่เรากำหนดไว้

10. เลือกคำสั่ง Start
11. เลือกคำสั่ง Download
12. เลือกคำสั่ง OK
13. ปิดหน้าต่างนี้
14. เลือกคำสั่ง Data Analysis
15. ตั้งชื่อไฟล์ที่จะบันทึก

### 3.1.3. การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

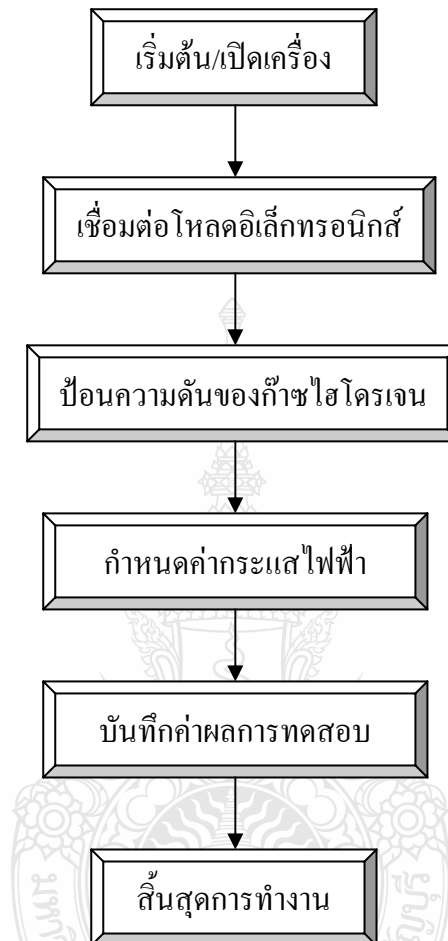
3.1.3.1 ทำการทดลองโดยการเปลี่ยน Pressure ของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่ระบบอยู่ในสถานะ NO LOAD ตามลำดับขั้นตอนดังนี้

3.1.3.2 เปิดเครื่องเซลล์เชื้อเพลิง (ตามหัวข้อที่ 1) เริ่มต้นปรับ Pressure Gage ไปที่ความดัน 0.527 barg ผลการทดลองจะได้ตามรูป 3.18



รูปที่ 3.18 โปรแกรมผลการทดสอบของเซลล์เชื้อเพลิง

การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง The Nexa™ Power Module โดยการเริ่มต้นป้อนความดัน เพื่อดูสถานะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งได้แสดงขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แผนผังขั้นตอนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ขั้นตอนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ เริ่มต้นจากการเปิดเครื่องเซลล์เชื้อเพลิง และทำการเชื่อมต่อโพลดีเล็กทรอนิกส์เข้ากับตัวเซลล์เชื้อเพลิง หลังจากนั้นปรับความดันของก๊าซไฮโดรเจนเพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่โพลดีเล็กทรอนิกส์ตามที่ต้องการทดสอบ และบันทึกผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ

อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน (barg.)	โหลดอิเล็กทรอนิกส์ (A)	อุณหภูมิ (°C)
0.5	1	40
0.8	1	40
1	1,5,10,15,20,25,30,35,40,45	40
2	1,5,10,15,20,25,30,35,40,45	40
3	1,5,10,15,20,25,30,35,40,45	40
4	1,5,10,15,20,25,30,35,40,45	40
5	1,5,10,15,20,25,30,35,40,45	40
6	1,5,10,15,20,25,30,35,40,45	40
7	1,5,10,15,20,25,30,35,40,45	40
8	1,5,10,15,20,25,30,35,40,45	40
9	1,5,10,15,20,25,30,35,40,45	40
10	1,5,10,15,20,25,30,35,40,45	40
11	1,5,10,15,20,25,30,35,40,45	40





ตารางที่ 3.3 สภาวะการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ

สภาวะการทำงาน	อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน (barg)	โหลดอิเล็กทรอนิกส์ (A)	เวลา (s)
Step Up	1	5	10
		30	10
		5	10
		30	10
		5	10
Saw Tooth	1	5	10
		30	10
		5	10
		30	10
		5	10
Up & Down	1	15	10
		30	10
		5	10
		30	10
		15	10

ซึ่งทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงตามตาราง และทำการทดสอบวงจรเปิด (Open Circuit) ทดสอบดึงกระแสจากเซลล์เชื้อเพลิง โดยกำหนดค่าใน Load Electronics บันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ เพื่อนำไปเขียนกราฟโพลาไรเซชัน (Polarization Graph)

จากการทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ได้ทำการเก็บน้ำที่ถูกปล่อยออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิง แล้วนำมาวัดอุณหภูมิของน้ำ และชั่งน้ำหนักน้ำที่ถูกปล่อยออกมา ในเวลา 1 นาที ที่ความดันของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นทุก 1 บาร์ โดยเริ่มต้นทดสอบที่ความดันของก๊าซไฮโดรเจน 1 บาร์ เพื่อคำนวณหาพลังงานที่ปล่อยออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้ทุกค่าของความดันก๊าซไฮโดรเจนที่ทำการเปลี่ยนแปลง ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.5) – (2.14)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

โดยที่

$$\Delta H = (h_{p_{H_2O}} - (h_{p_{H_2}} - (h_{p_{O_2}})$$

$$\Delta S = (s_{P_{H_2O}} - (s_{P_{H_2}} - (s_{P_{O_2}})$$

งานทางไฟฟ้า

$$W_{el} = qE$$

โดยที่

$$q = n_e N_{avg} q_{el}$$

งานทางไฟฟ้า หาได้จาก

$$W_{el} = n_e F E = -\Delta G$$

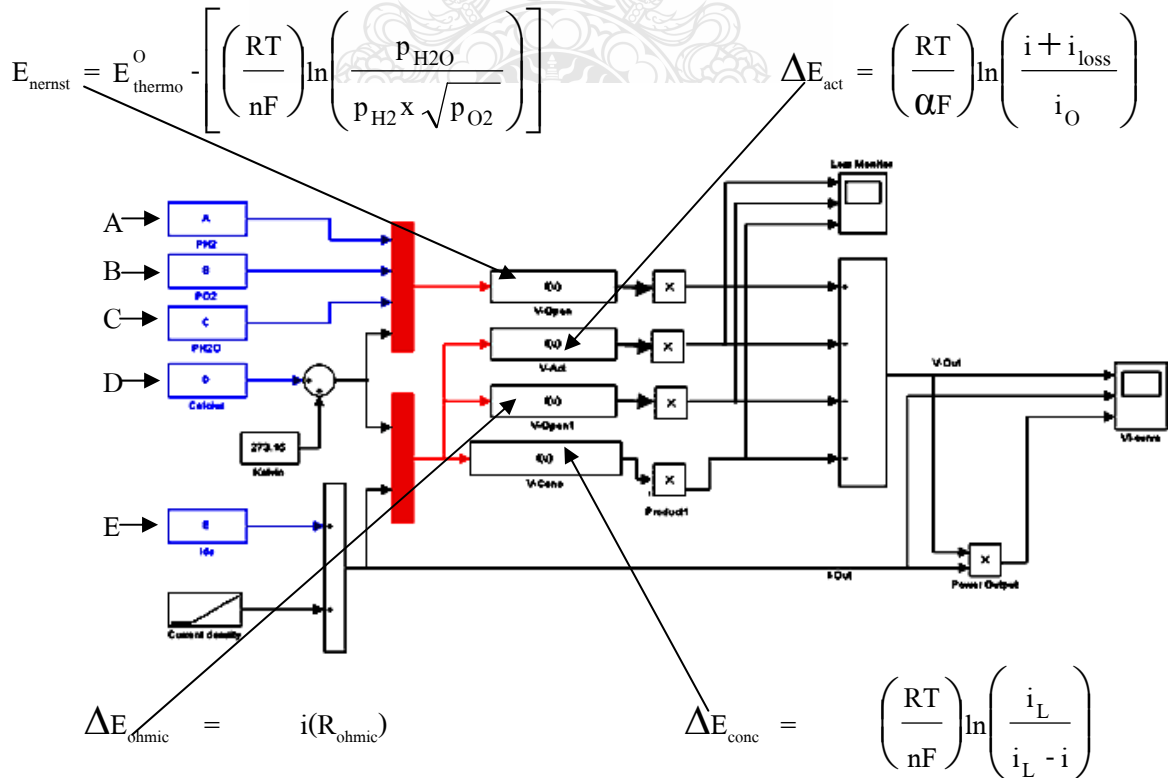
เขียนให้อยู่ในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้า

$$E = \frac{-\Delta G}{n_e F}$$

### 3.2 การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยแบบจำลองทาง

#### คณิตศาสตร์

ทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีการทดสอบดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 โครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง

- A = ความดันของก๊าซไฮโดรเจน ( $P_{H_2}$ )
- B = ความดันของออกซิเจน ( $P_{O_2}$ )
- C = ความดันของน้ำ ( $P_{H_2O}$ )
- D = อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )
- E = กระแส ( $I_{dc}$ )

จากรูปที่ 3.20 ตัวแปร A คือ ปริมาณความดันของก๊าซไฮโดรเจน ( $P_{H_2}$ ) ที่ได้จากการปรับตามที่ต้องการ ตัวแปร B และ C คือ ความดันของออกซิเจน ( $P_{O_2}$ ) และความดันของน้ำ ( $P_{H_2O}$ ) ซึ่งจะเปลี่ยนโดยอัตโนมัติตามความดันของก๊าซไฮโดรเจน ตัวแปร D คือ อุณหภูมิในขณะที่ทำการทดสอบ ตัวแปร E คือ กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการปรับที่โหลดอิเล็กทรอนิกส์ และ Product 1 คือ จำนวนของเซลล์ ซึ่งมีค่า 43 เซลล์

สมการ V-Open

$$E_{\text{nernst}} = E_{\text{thermo}}^0 - \left[ \left( \frac{RT}{nF} \right) \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \times \sqrt{P_{O_2}}} \right) \right] \quad (3.1)$$

สมการ V-Act

$$\Delta E_{\text{act}} = \left( \frac{RT}{\alpha F} \right) \ln \left( \frac{i + i_{\text{loss}}}{i_0} \right) \quad (3.2)$$

สมการ V-Open1

$$\Delta E_{\text{ohmic}} = i(R_{\text{ohmic}}) \quad (3.3)$$

สมการ V-Conc

$$\Delta E_{\text{conc}} = \left( \frac{RT}{nF} \right) \ln \left( \frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (3.4)$$

จะได้แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{nernst}} - \Delta E_{\text{act}} - \Delta E_{\text{ohmic}} - \Delta E_{\text{conc}} \quad (3.5)$$

### 3.2.1 หาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

โดยวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้จาก I-V Characteristic Curve ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงตามตารางที่ 3.4

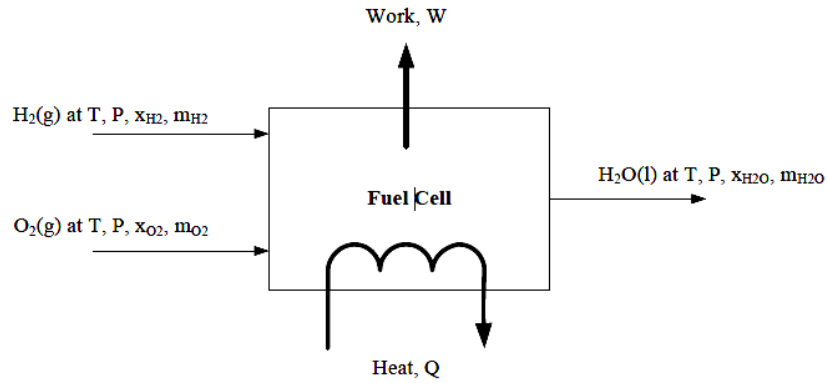
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์เชื้อเพลิง Ballard Nexa™ Power Module User's Manual

รายการ	ค่า
A, Area of cell (cm <sup>2</sup> )	110
I, Current of density (A/cm <sup>2</sup> )	0.4
R, Ideal gas constant (J/molK)	8.3144
F, Faraday's constant (Coulombs)	96,487
G <sub>f, liq</sub> , Gibbs function in liquid form (J/mol)	-228,170
n, Number of electron per reacting iron	2
T <sub>c</sub> , Temperature (°C)	65
P <sub>H2O</sub> , Hydrogen pressure (bar)	1-3
P <sub>O2</sub> , Oxygen pressure (bar)	1-3
N <sub>cell</sub> , Number of cell	43
R <sub>ohmic</sub> , Internal Resistance (Ωcm <sup>2</sup> )	0.1-0.2
α, Transfer coefficient	0.5
I <sub>o</sub> , Exchange current density (A)	10 <sup>-6.911</sup>
i <sub>l</sub> , Limiting current density (A)	1.4

ซึ่งนำค่าพารามิเตอร์ ตามตารางที่ 3.4 มาทดสอบด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ เพื่อทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

1. E<sub>Nernst</sub>
2. V<sub>act</sub>
3. V<sub>ohmic</sub>
4. V<sub>conc</sub>
5. I-V Curve
6. Power

ซึ่งจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทำให้สามารถทราบปริมาณน้ำที่ถูกปล่อยออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิง อุณหภูมิของน้ำ จึงทำให้สามารถคำนวณหาค่าของอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจน (Stoichiometric Ratio) และเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์กับปริมาณน้ำจากการทดสอบ ซึ่งได้จากสมการสมดุลมวลของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 3.21 รายละเอียดการสมดุลมวล

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง} &= \frac{\text{พลังงานที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง}}{\text{พลังงานที่จ่ายให้กับเซลล์เชื้อเพลิง}} \\ &= \frac{H_{H2,in} + H_{Air,in} + H_{H2O\_Air,in}}{H_{Air,out} + H_{H2O\_Air,out}} \end{aligned}$$

ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ อุณหภูมิน้ำ 67 °C อุณหภูมิห้อง 28 °C ปริมาณน้ำที่วัดได้จากการทดลอง = 0.532 g/s

$$\begin{aligned} H_{H2O\_Air,out} &= m_{H2O\_Air,out} \times (Cp_{H2O} T_{out} + h_{fg}) \\ &= 0.532 \times (1.85 \times 67 + 2500) = 1,396 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{H2O,gen} &= \frac{I}{2F} \cdot M_{H2O} = \frac{2,000}{2 \times 96487} \cdot 18.015 \\ &= 0.1867 \text{ g/s} \end{aligned}$$

The water mass balance

$$m_{H2O\_Air,in} = m_{H2O\_Air,out} - m_{H2O,gen}$$

$$= 0.532 - 0.1867 = 0.345 \text{ g/s}$$

$$\begin{aligned} H_{\text{H}_2\text{O}_\text{Air},\text{in}} &= m_{\text{H}_2\text{O}_\text{Air},\text{in}} \times (C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} T_{\text{in}} + h_{\text{fg}}) \\ &= 0.345 \times (1.85 \times 28 + 2500) = 880.37 \text{ W} \end{aligned}$$

ความดันอิ่มตัวที่ 67 °C  
ความดันอิ่มตัว

$$P_{\text{vs}} = e^{aT - 1 + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)}$$

$$X_{\text{S},\text{out}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{air}}} \frac{P_{\text{vs}}}{P - P_{\text{vs}}}$$

$$X_{\text{S},\text{in}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{air}}} \frac{\phi P_{\text{vs}}}{P - \phi P_{\text{vs}}}$$

$$P_{\text{vs}}(67) = 27.366 \text{ kPa}$$

$$X_{\text{s}} = 0.231 \frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{g}_{\text{air}}}$$

ความดันอิ่มตัวที่ 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 66%

$$P_{\text{vs}}(28) = 3.7822 \text{ kPa}$$

$$X_{\text{s}} = 0.016 \frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{g}_{\text{air}}}$$

$$\begin{aligned} h_{\text{H}_2,\text{in}} &= C_{p_{\text{H}_2}} \times t + X_{\text{s}}(28) \times (C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} \times t + h_{\text{fg}}) \\ &= 14.2 \times 28 + 0.016 (1.87 \times 28 + 2500) = 438.44 \text{ J/g} \end{aligned}$$

$$H_{\text{H}_2,\text{in}} = h_{\text{H}_2,\text{in}} \times M_{\text{H}_2} = 438.44 \times 2.0158 = 883.81 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} h_{\text{Air},\text{in}} &= C_{p_{\text{air}}} \times t + X_{\text{s}}(28) \times (C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} \times t + h_{\text{fg}}) \\ &= 1.01 \times 28 + 0.016 (1.87 \times 28 + 2500) = 69.12 \text{ J/g} \end{aligned}$$

$$H_{\text{air},\text{in}} = h_{\text{air},\text{in}} \times M_{\text{Air}} = 69.12 \times 0.128 = 8.85 \text{ W}$$

$$h_{\text{Air},\text{out}} = C_{p_{\text{air}}} \times t + X_{\text{s}}(67) \times (C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} \times t + h_{\text{fg}})$$

$$= 1.01 \times 67 + 0.231 (1.87 \times 67 + 2500) = 674.11 \text{ J/g}$$

$$H_{\text{air,out}} = h_{\text{air,out}} \times M_{\text{Air}} = 674.11 \times 0.128 = 86.29 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง} &= \frac{H_{\text{Air,out}} + H_{\text{H}_2\text{O}_\text{Air,out}}}{H_{\text{H}_2\text{O}_\text{Air,in}} + H_{\text{H}_2,\text{in}} + H_{\text{Air,in}}} \\ &= \frac{86.29 + 1,396}{880.37 + 883.81 + 8.85} \times 100 \\ &= 61.95\% \end{aligned}$$



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์

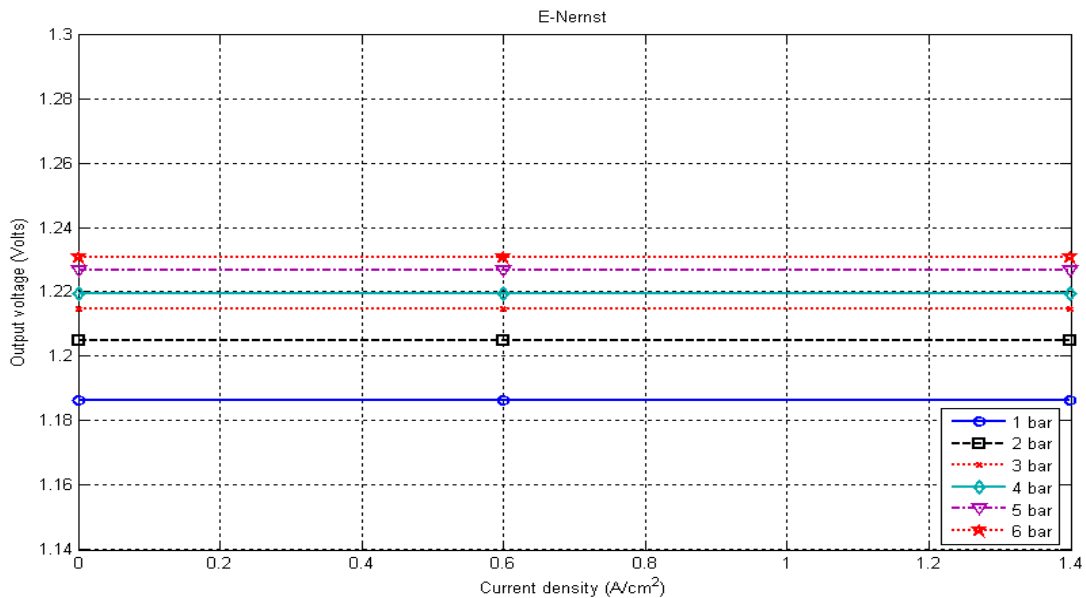
บทนี้แบ่งการนำเสนอออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นการวิเคราะห์ระบบควบคุมและทดสอบการทำงานในห้องปฏิบัติการ และส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ MATLAB Simulink เพื่อนำผลการทดสอบทั้งสองส่วนมาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

#### 4.1 การทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยโปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์

ได้ทำการทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยโปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้

##### 4.1.1 ผลการคำนวณสมการแรงดันตามทฤษฎี ( $E_{Nernst}$ )

ทำการคำนวณตามสมการ  $E_{Nernst}$  โดยการเปลี่ยนแปลงความดันของไฮโดรเจน ส่วนความดันของออกซิเจนจะ ได้จากการคำนวณ ซึ่งแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.1



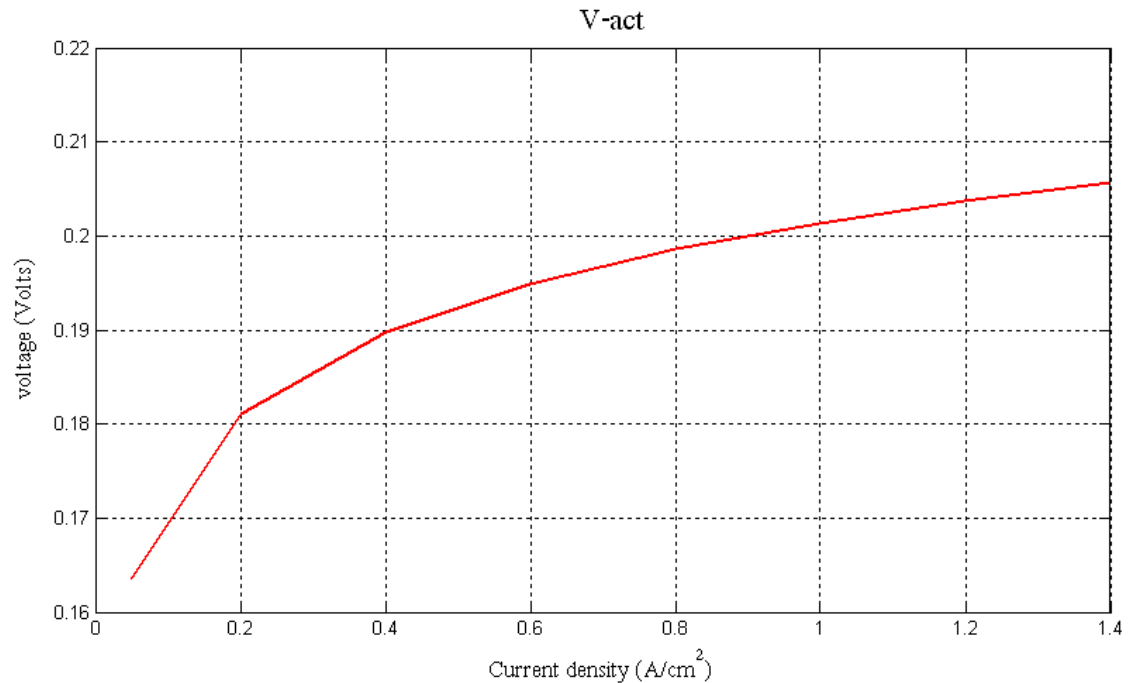
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของสมการ  $E_{Nernst}$  กับความดันของก๊าซไฮโดรเจน

จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของสมการ  $E_{Nernst}$  จะเห็นว่า ความดันของก๊าซไฮโดรเจนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดัน แต่เนื่องจากแรงดันตามทฤษฎีมีค่า 1.2 V ซึ่งผลจากการทดสอบก็จะมีแรงดันอยู่ที่ประมาณ 1.2 V เช่นกัน



#### 4.1.2 ผลการคำนวณสมการความคลาดเคลื่อนของการเกิดปฏิกิริยาเคมี ( $V_{act}$ )

รูปที่ 4.2 กำหนดหาความคลาดเคลื่อนจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยการเปลี่ยนแปลงกระแสจาก 0 – 1.4 A เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน

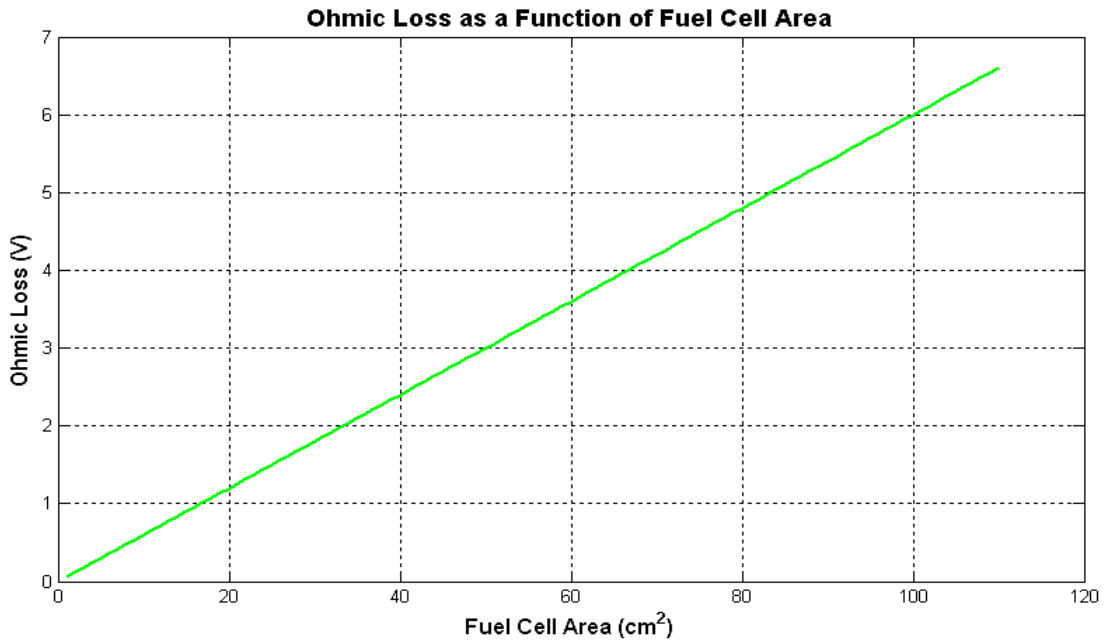


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์จากการเกิดปฏิกิริยาเคมี

จากรูปที่ 4.2 เมื่อมีการเปลี่ยนกระแสตามสมการ  $V_{act}$  จะมีผลทำให้แรงดันที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปตามกระแสที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อเพิ่มกระแสมากขึ้น แรงดันก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

#### 4.1.3 ผลการคำนวณสมการค่าความคลาดเคลื่อนจากความต้านทาน ( $V_{ohmic}$ )

ทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสมการ  $V_{ohmic}$  ว่ามีผลต่อแรงดัน โดยพื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง จะมีค่า 110 cm<sup>2</sup> ซึ่งอธิบายได้ดังสมการที่ 3.3 จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.3

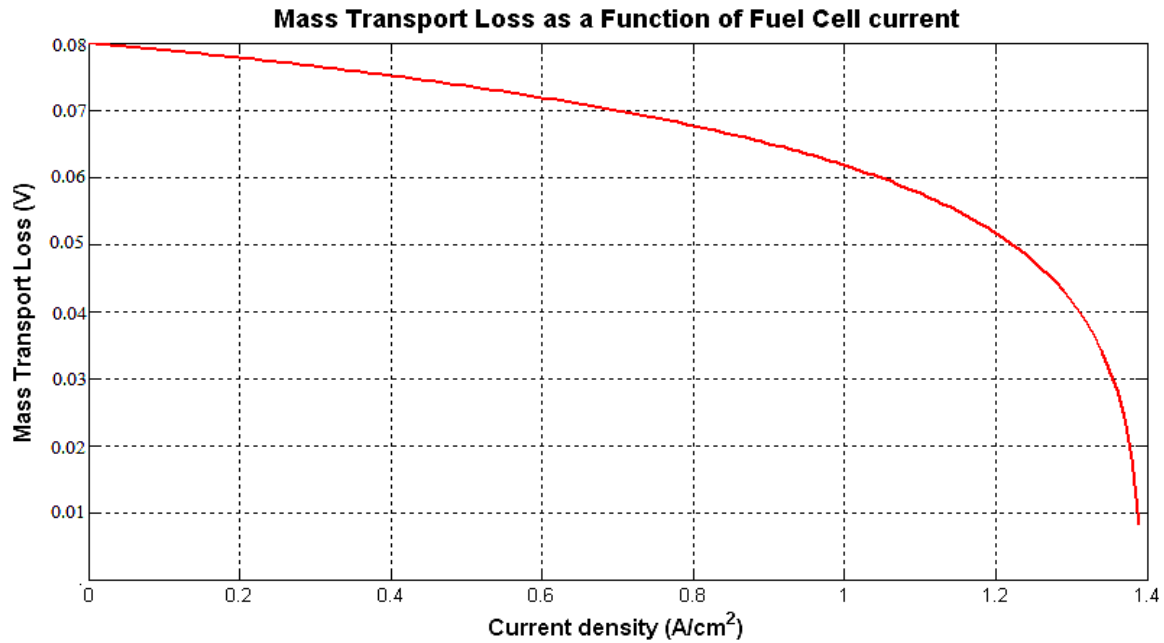


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของสมการ  $V_{ohmic}$  ต่อพื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบมีพื้นที่มาก ความต้านทานที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ด้วย ซึ่งแรงดันที่เกิดจากความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง จะขึ้นอยู่กับ แผ่นสะสมกระแส ชี้นการแพร่ของก๊าซ และเมมเบรน ซึ่งมีผลจากการออกแบบ

#### 4.1.4 ผลการคำนวณสมการค่าความคลาดเคลื่อนจากการถ่ายโอนมวล ( $V_{conc}$ )

ทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสมการ  $V_{conc}$  โดยการเปลี่ยนกระแส จาก 0 – 1.4 A เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.4

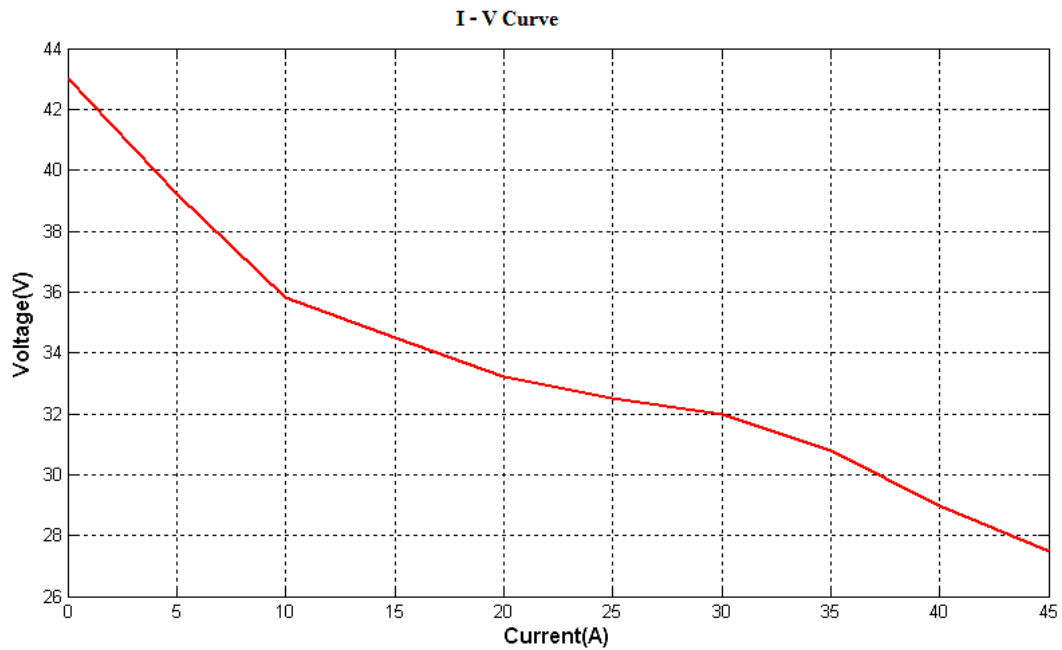


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของกระแสที่มีผลต่อการถ่ายโอนมวล

จากรูปที่ 4.4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมการ  $V_{conc}$  โดยเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ความคลาดเคลื่อนจากการถ่ายโอนมวลจะมีค่าลดลง เนื่องมาจากข้อจำกัดในการจ่ายเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจำเป็นต้องใช้เป็นจำนวนมากในขณะที่ความหนาแน่นของกระแสมีค่าสูง จึงทำให้แรงดันลดลง ซึ่งเป็นไปตามกราฟ I – V

#### 4.1.5 การทดสอบกระแสกับแรงดัน

ทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนกระแสจาก 0 – 45 A โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 A ความดันของก๊าซไฮโดรเจนมีค่า 1 barg. ใช้ทดสอบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ตามรูปที่ 4.5

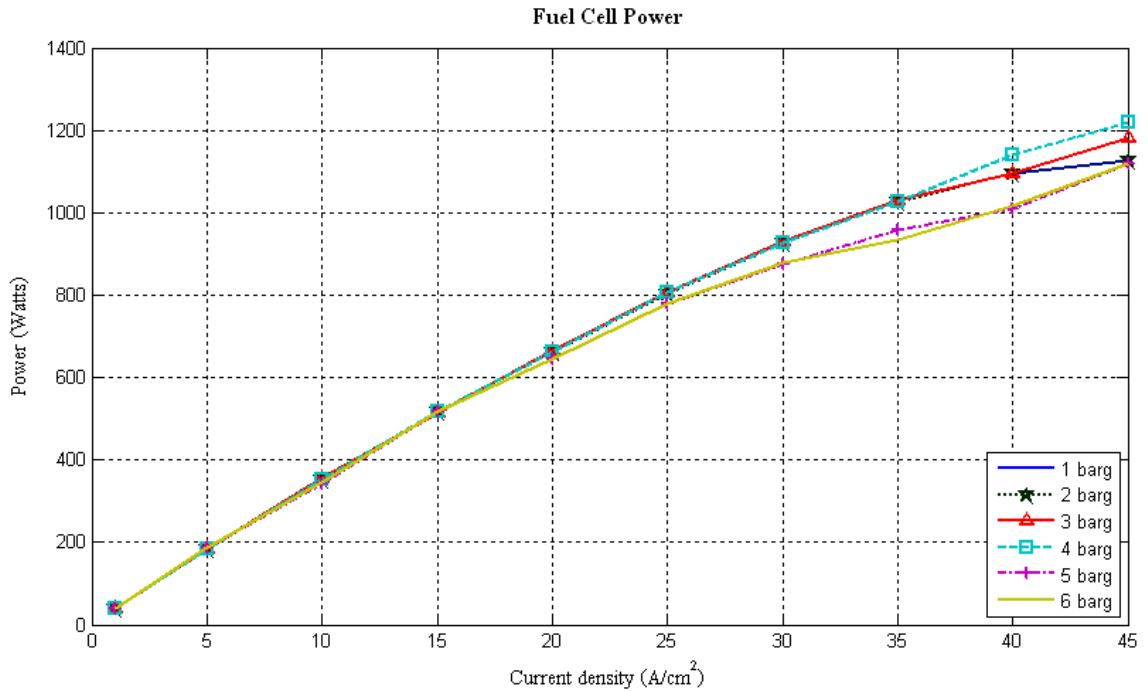


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันโดยการคำนวณด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 4.5 เมื่อปรับกระแสในขณะ No Load แรงดันที่ได้จะมีค่า 43 V และในขณะ Full Load แรงดันที่ได้จะมีค่า 26 V ซึ่งเป็นไปตามค่าของเซลล์เชื้อเพลิง

#### 4.1.6 การทดสอบกระแสกับกำลังงาน

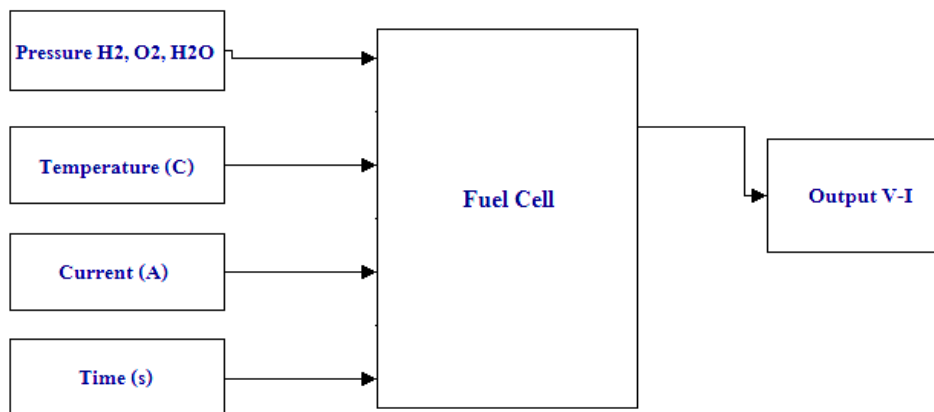
ทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยปรับกระแส 0 – 45 A เพิ่มขึ้นครั้งละ 5 A และปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนจาก 1 barg. จนถึง 6 barg. โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 barg. เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังงานที่ได้ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังงานโดยการคำนวณด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 4.6 เริ่มต้นปรับกระแสที่ค่า 1 A จนถึง 45 A โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 A ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังงานที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่ากำลังงานที่ให้ผลการทดสอบใกล้เคียงกับสเปคของเซลล์เชื้อเพลิงมากที่สุด คือค่า 1200 W คือความดันของก๊าซไฮโดรเจนที่ 4 barg. มีค่ากำลังงาน 1220 W ซึ่งมีค่ากำลังงานที่ดีที่สุด

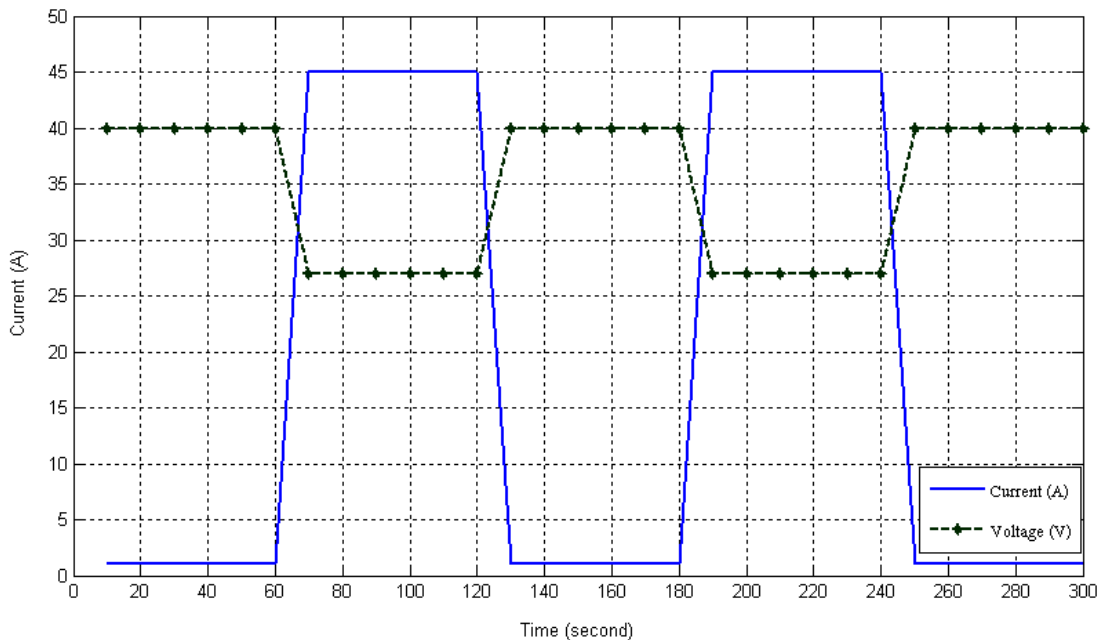
รูปที่ 4.7 เป็นรูปแบบจำลองการทดสอบเปลี่ยนแปลงกระแสแบบจับปล้น การเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Step Up และการทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Saw Tooth เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 4.7 แบบจำลองการทดสอบกระแสและแรงดัน

#### 4.1.7 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสแบบฉบับพลัน

ปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 1 บาร์ ปรับกระแส 1 A เป็นเวลา 1 นาที แล้วเพิ่มกระแสเป็น 45 A เป็นเวลา 1 นาที เสร็จแล้วลดกระแสลงเป็น 1 A เป็นเวลา 1 นาที เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดัน ดังรูปที่ 4.8

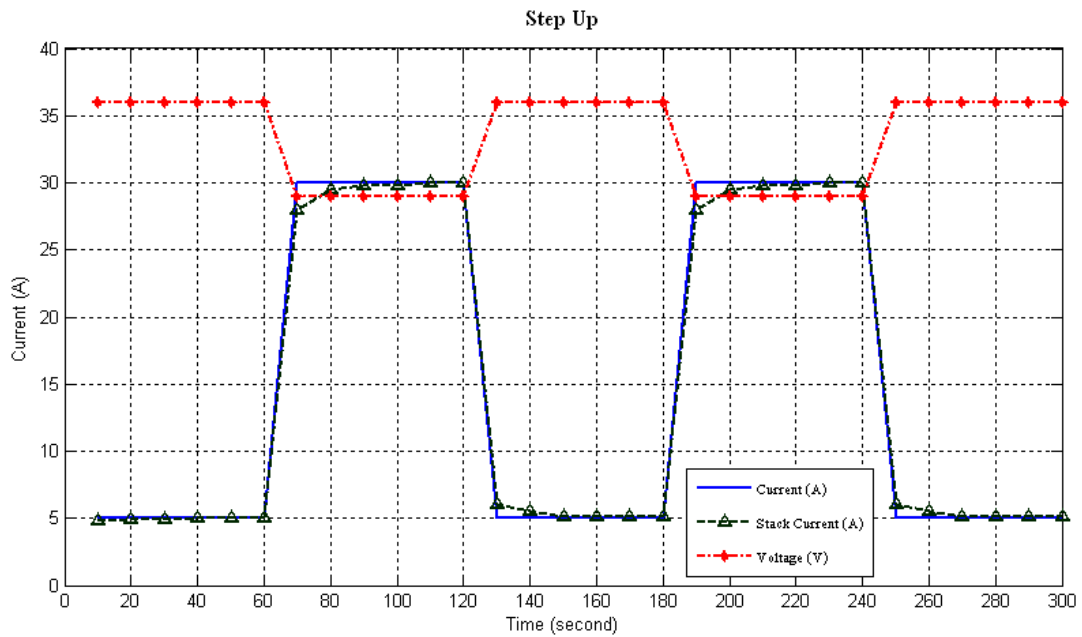


รูปที่ 4.8 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสแบบฉบับพลันด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 4.8 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบฉบับพลัน 1 A และ 45 A เป็นเวลา 1 นาที และลดเหลือ 1 A เป็นเวลา 1 นาที จากผลการทดสอบจะเห็นว่า ผลการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงต่อการปรับกระแสดังกล่าว จะมีการตอบสนองได้ใกล้เคียงกับค่ากระแสที่ปรับ โดยที่เมื่อปรับกระแส 1 A แรงดันไฟฟ้าจะมีค่า 40 V และเมื่อปรับกระแสเป็น 45 A แรงดันไฟฟ้าจะมีค่า 27 V ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำการทดสอบ

#### 4.1.8 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Step Up

ปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 1 บาร์ ปรับกระแส 5 A เป็นเวลา 1 นาที แล้วเพิ่มกระแสเป็น 30 A เป็นเวลา 1 นาที เสร็จแล้วลดกระแสลงเป็น 5 A เป็นเวลา 1 นาที เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดัน ดังรูปที่ 4.9

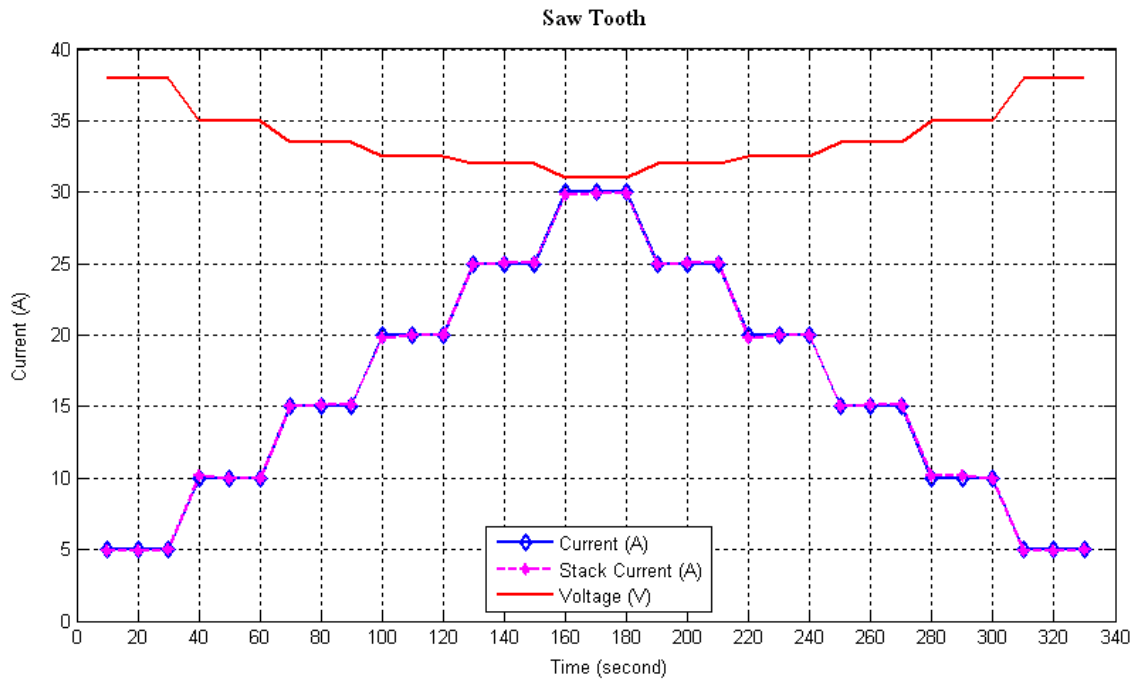


รูปที่ 4.9 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Step Up ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 4.9 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Step Up 5 A และ 30 A เป็นเวลา 1 นาที และลดลงเหลือ 5 A เป็นเวลา 1 นาที จากผลการทดสอบจะเห็นว่า ผลการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงต่อการปรับกระแสดังกล่าว จะมีการตอบสนองได้ใกล้เคียงกับค่ากระแสที่ปรับ แต่กระแสจากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อาจเนื่องมาจาก การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง ยังมีข้อผิดพลาดอยู่บ้าง

#### 4.1.9 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Saw Tooth

ปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 1 บาร์ โดยปรับกระแส 5 A, 10 A, 15 A, 20 A, 25 A, 30 A, 25 A, 20 A, 15 A, 10 A, 5 A เป็นเวลาทุก 1 นาที เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดัน ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Saw Tooth ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 4.10 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Saw Tooth โดยปรับกระแส 5 A, 10 A, 15 A, 20 A, 25 A, 30 A, 25 A, 20 A, 15 A, 10 A, 5 A เป็นเวลาทุก 1 นาที จากผลการทดสอบจะเห็นว่า ผลการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงต่อการปรับกระแสดังกล่าว จะมีการตอบสนองได้ใกล้เคียงกับค่ากระแสที่ปรับ



## 4.2 การทดสอบการทำงานในห้องปฏิบัติการ (Test Station)

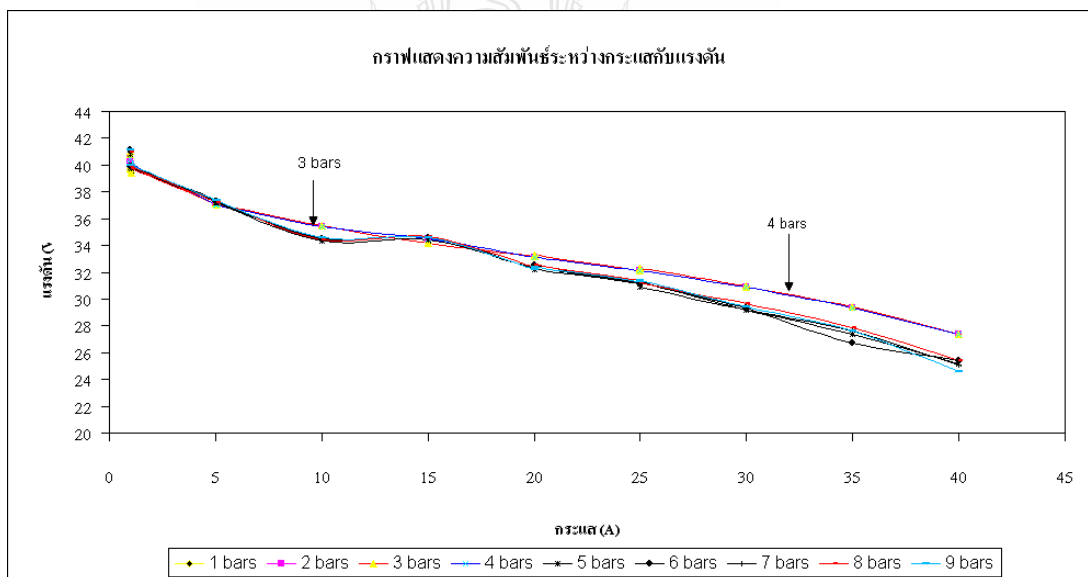
ได้ทำการทดสอบสถานะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ โดยการปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน ตั้งแต่ 0.5 – 9 barg. ตามลำดับ

### 4.2.1 ทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน

เมื่อทำการทดสอบโดยการปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนไปที่ค่า 0.5 barg. เซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากปริมาณของก๊าซไม่เพียงพอให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้ และที่หน้าโปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application จะขึ้นคำว่า ล้มเหลว (FAILURE) เป็นตัวอักษรสีแดง

เมื่อทำการทดสอบการปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนไปที่ค่า 0.7-0.99 barg. เซลล์เชื้อเพลิงจะมีการเตือนการทำงาน เนื่องจากปริมาณของก๊าซไม่เพียงพอให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้ และที่หน้าโปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application จะขึ้นคำว่า เตือน (WARNING)

เมื่อปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนไปที่ค่า 1 barg. เซลล์เชื้อเพลิงจึงจะสามารถทำงานได้ ซึ่งจากการทดสอบทำการปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนไปจนถึง 9 barg. ซึ่งจะมีผลการทดสอบ ดังรูปที่ 4.11



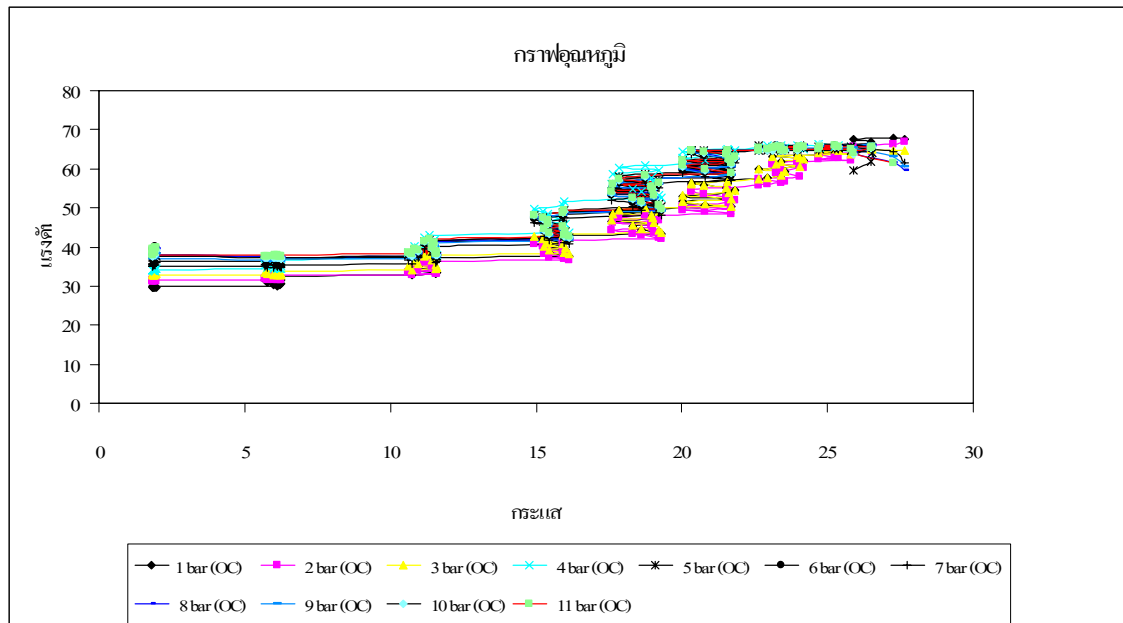
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ซึ่งจากรูปที่ 4.11 ผลการทดลองเปรียบเทียบกระแสกับแรงดัน เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันของไฮโดรเจน เมื่อกระแสสูงขึ้น มีผลทำให้แรงดันที่ได้แตกต่างกัน เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่กระจายของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำ

ปฏิกิริยาได้มากกว่า จากผลการทดลองที่ความดัน 3 -4 บาร์ จะมีแรงดันสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่า เซลล์เชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุดในช่วงความดันที่ 3-4 barg. เท่านั้น ซึ่งให้ค่าแรงดันสูงกว่าช่วงอื่น ๆ ไม่ว่าจะเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนให้มากขึ้นไปอีกก็ตาม

#### 4.2.2 ทดสอบผลกระทบที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

เมื่อมีการปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ก็จะมีผลต่ออุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12

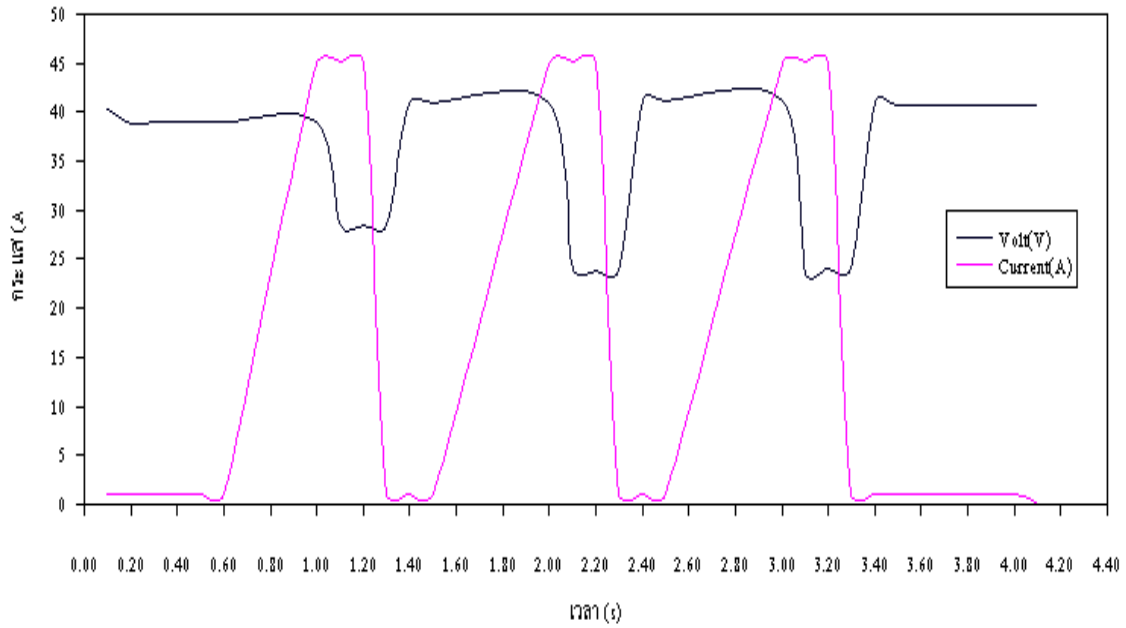


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบกระแสกับอุณหภูมิ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มไปทางเดียวกับกราฟเปรียบเทียบกระแสกับแรงดัน ที่ความดัน 3 -4 บาร์ จะมีแรงดันสูงที่สุด ซึ่งทำให้ อุณหภูมิที่ความดัน 4 บาร์ ก็มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าความดันอื่น ๆ จึงทำให้การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพดีด้วย แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ เมื่อมีการปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน และกระแสไฟฟ้าที่ปรับเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อมีไหลสูงอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงก็จะเพิ่มสูงตามไปด้วย

#### 4.2.3 ทดสอบสถานะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปลี่ยนแปลงโหลดแบบฉับพลัน

ทำการทดสอบโดยการปรับกระแสไฟฟ้าที่โหลดอิเล็กทรอนิกส์ให้มีค่า 1 A เป็นเวลา 1 นาที แล้วเพิ่มกระแสไฟฟ้าขึ้นเป็น 45 A เป็นเวลาอีก 1 นาที ทำซ้ำแบบเดียวกันอีก 2 ลูกคลื่นจะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.13

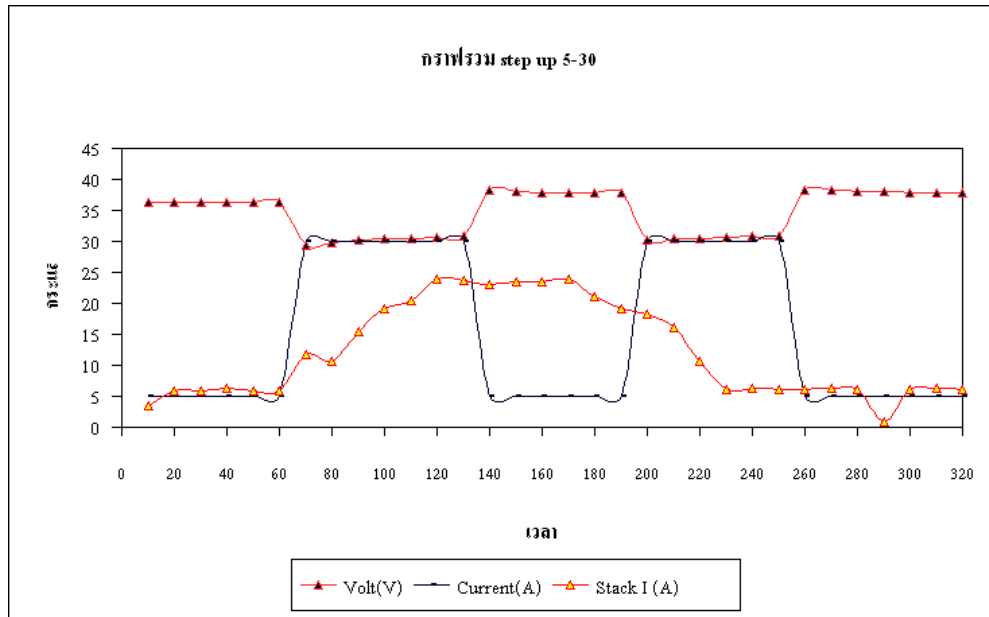


รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบฉับพลัน

จากรูปที่ 4.13 แสดงการทดสอบแบบเปลี่ยนแปลงโหลดแบบฉับพลัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อปรับกระแสไฟฟ้า 1 A แรงดันไฟฟ้าจะอยู่ที่ประมาณ 40 V แต่เมื่อปรับเพิ่มกระแสไฟฟ้าไปที่ 45 A แรงดันไฟฟ้าจะอยู่ที่ประมาณ 27 V ซึ่งก็เป็นไปตามคุณสมบัติของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิง แต่มีความคลาดเคลื่อนในส่วนของเวลาที่ทำการเปลี่ยนแปลงโหลด ทำให้กราฟการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสกับแรงดันคลาดเคลื่อนไปประมาณ 30 วินาที

#### 4.2.4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดัน แบบ Step Up

ปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 1 บาร์ ปรับกระแสไฟฟ้าจากเครื่องโหลดอิเล็กทรอนิกส์ 5 A แล้วเพิ่มเป็น 30 A เสร็จแล้วลดลงจนเหลือ 5 A แล้วเพิ่มเป็น 30 A อีกครั้ง ทดสอบเป็นเวลาทุก 10 วินาที จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.14

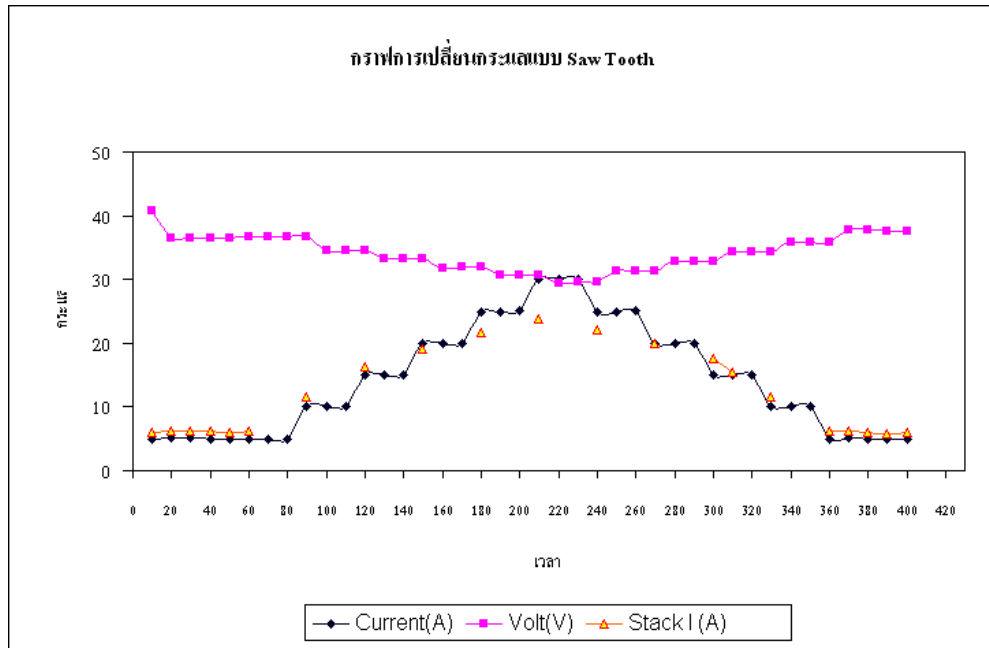


รูปที่ 4.14 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Step Up

จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของการปรับกระแสแบบ Step Up 5 – 30 A เมื่อเริ่มปรับกระแสจากโหลดอิเล็กทรอนิกส์ 5 A เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นปรับกระแสเพิ่มขึ้น 30 A เป็นเวลา 1 นาที แล้วลดกระแส 5 A เป็นเวลา 1 นาที จะเห็นว่าผลการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงต่อการปรับกระแสดังกล่าว จะมีการหน่วงเวลาอยู่ประมาณ 30 วินาที เซลล์เชื้อเพลิงถึงจะเริ่มปรับการทำงานได้ทันตามโหลดที่เราปรับ และค่ากระแสของเซลล์เชื้อเพลิง ก็ลดลงจาก 30 A เป็น 26 A ค่าและค่าแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีการแกว่งขึ้นลง ไม่คงที่ ทำให้การตอบสนองต่อการเปลี่ยนโหลดของเซลล์เชื้อเพลิงช้ากว่าการเปลี่ยนโหลดกระแสอย่างต่อเนื่องภายในเวลาทุก 1 นาที ซึ่งก็มีผลทำให้แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากการปรับโหลดก็คลาดเคลื่อนตามไปด้วย

#### 4.2.5 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดัน แบบ Saw Tooth

ปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 1 บาร์ ปรับกระแสไฟฟ้าจากเครื่องโหลดอิเล็กทรอนิกส์ โดยปรับค่ากระแสจาก 5 A, 10 A, 15 A, 20 A, 25 A, 30 A, 25 A, 20 A, 15 A, 10 A, 5 A เป็นเวลา 1 นาที จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.15

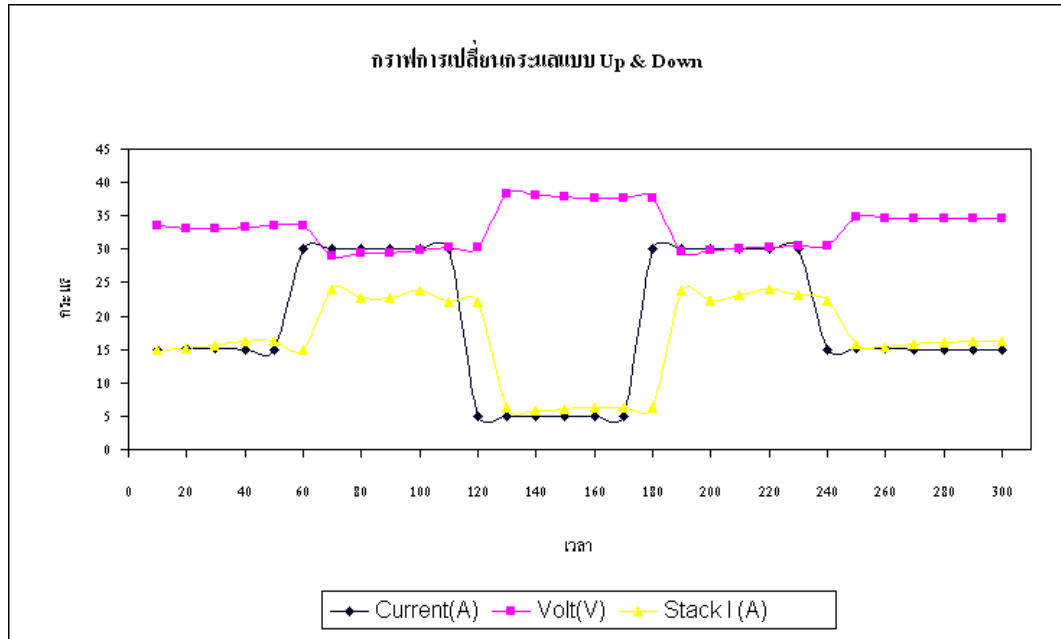


รูปที่ 4.15 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Saw Tooth

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของการปรับกระแสแบบ Saw Tooth โดยปรับค่ากระแสจาก 5 A, 10 A, 15 A, 20 A, 25 A, 30 A, 25 A, 20 A, 15 A, 10 A, 5 A เป็นเวลา 1 นาที จะเห็นว่ากระแสของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีการตอบสนองน้อยกว่าค่ากระแสที่ปรับจากโหลด และค่ากระแสของเซลล์เชื้อเพลิง ก็ลดลงจาก 30 A เป็น 24 A และค่าแรงดันที่ได้จากการปรับโหลดกระแสมีค่า 31 V แต่ค่าแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่า 29 V ค่าการตอบสนองต่อการเปลี่ยนโหลดของเซลล์เชื้อเพลิงช้ากว่าการเปลี่ยนโหลดกระแส ซึ่งก็มีผลทำให้แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากการปรับโหลดก็คลาดเคลื่อนตามไปด้วย

#### 4.2.6 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดัน แบบ Up & Down

ปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 1 บาร์ ปรับกระแสไฟฟ้าจากเครื่องโหลดอิเล็กทรอนิกส์ โดยปรับค่ากระแสจาก 15 A, 30 A, 5 A, 30 A, 15 A เป็นเวลา 1 นาที จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.16

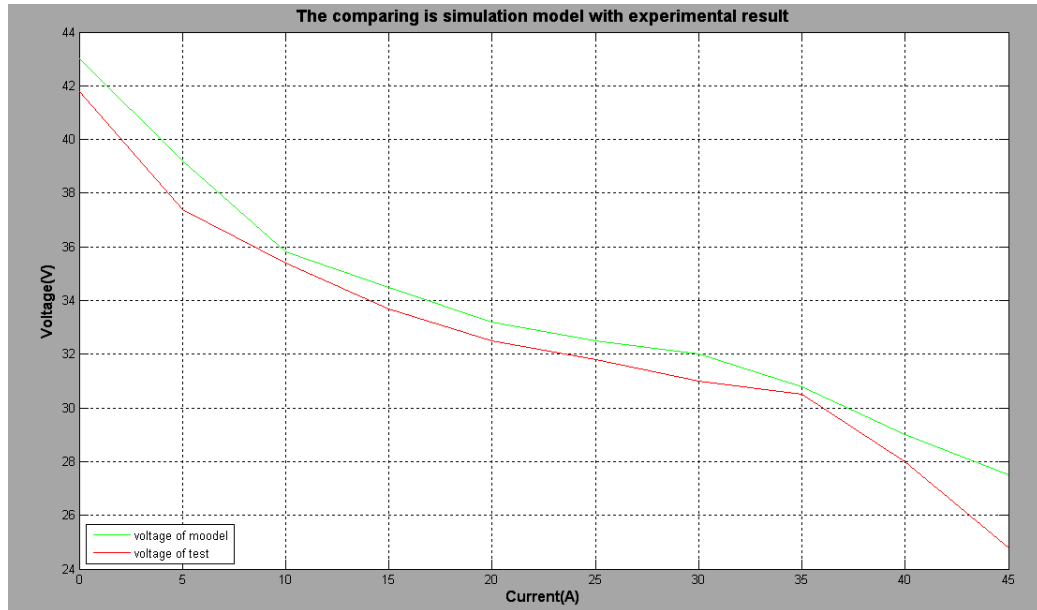


รูปที่ 4.16 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Up & Down

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของการปรับกระแสแบบ Up & Down โดยปรับค่ากระแสจาก 15 A, 30 A, 5 A, 30 A, 15 A เป็นเวลา 1 นาที จะเห็นว่ากระแสของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีการตอบสนองน้อยกว่าค่ากระแสที่ปรับจากโหลด และค่ากระแสของเซลล์เชื้อเพลิง ก็ลดลงจาก 30 A เป็น 23.73 A และค่าแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีการแกว่งขึ้นลง ไม่คงที่ ทำให้การตอบสนองต่อการเปลี่ยนโหลดของเซลล์เชื้อเพลิงช้ากว่าการเปลี่ยนโหลดกระแส ซึ่งก็มีผลทำให้แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากการปรับโหลดก็คลาดเคลื่อนตามไปด้วย

#### 4.2.7 ผลการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 1 บาร์ ปรับกระแสไฟฟ้าจากเครื่องโหลดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นครั้งละ 5 A จนถึง 45 A จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.17

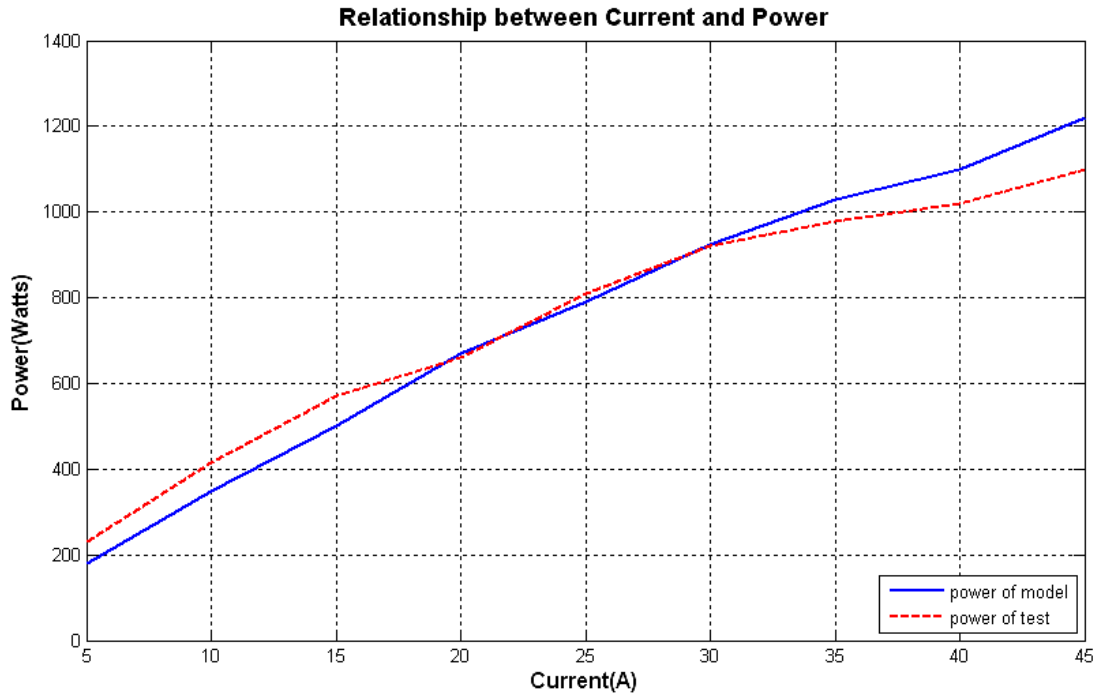


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ

จากรูปที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบแรงดันระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ โดยทำการปรับกระแสแบบไม่มีโหลด (0 A) แรงดันแบบจำลองจะมีค่า 43 V และแรงดันจากปฏิบัติมีค่า 41.8 V ส่วนการปรับกระแสแบบมีโหลดสูงสุด (45 A) แรงดันแบบจำลองจะมีค่า 27.5 V และแรงดันจากปฏิบัติมีค่า 24.8 V ซึ่งพบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 4.2.8 ผลการเปรียบเทียบกำลังงานระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 1 บาร์ ปรับกระแสไฟฟ้าจากเครื่องโหลดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นครั้งละ 5 A จนถึง 45 A จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.18



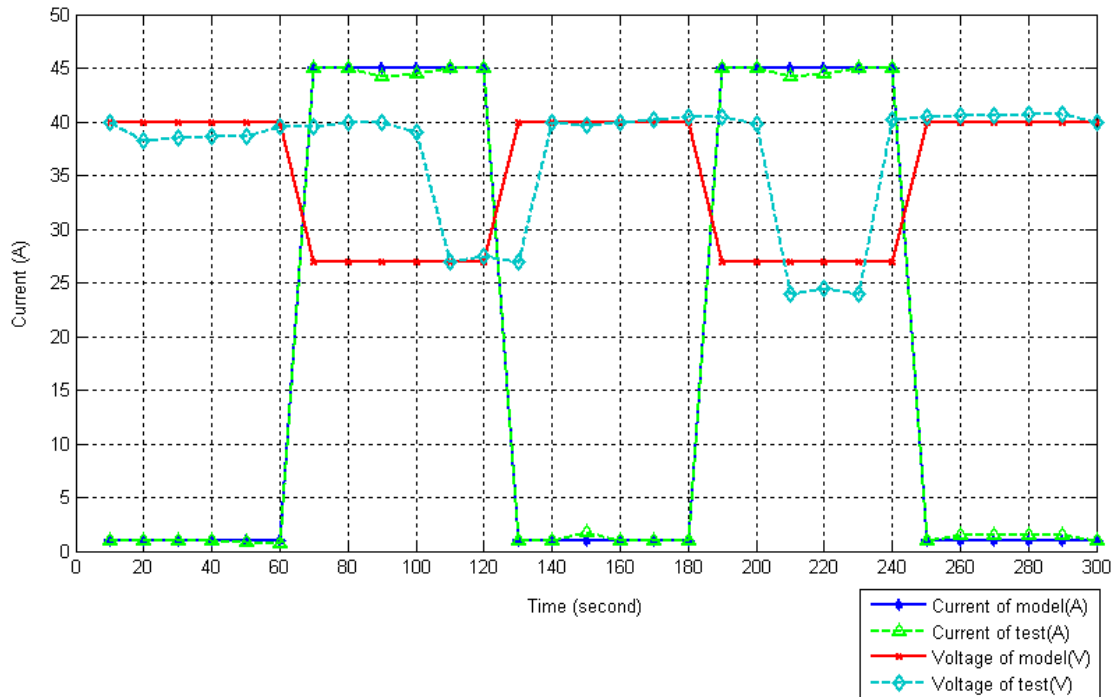
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของกำลังงานเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ

จากรูปที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบกำลังงานระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ โดยทำการปรับกระแส 5 A กำลังงานแบบจำลองจะมีค่า 180 W และกำลังงานจากปฏิบัติมีค่า 230 W ส่วนการปรับกระแสแบบมีโหลดสูงสุด (45 A) กำลังงานแบบจำลองจะมีค่า 1220 W และกำลังงานจากปฏิบัติมีค่า 1100 W ซึ่งพบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 4.2.9 ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบจับพลันระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ทำการทดสอบโดยการปรับกระแสไฟฟ้า 1 A เป็นเวลา 1 นาที แล้วเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 45 A เป็นเวลา 1 นาที จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.19

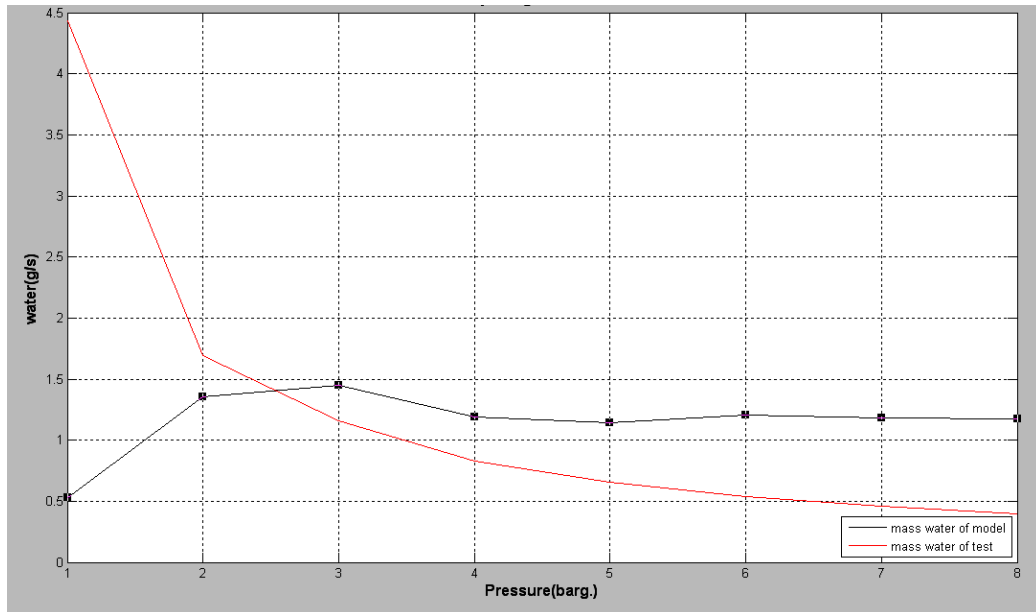




รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบฉับพลัน เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง กับปฏิบัติ

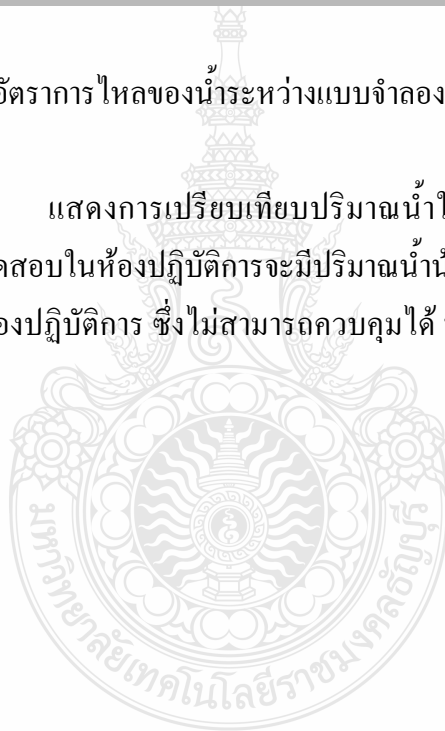
#### 4.2.10 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของมวล (Mass Flow Rate) ระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้ทำการเก็บน้ำจากการปล่อยออกจากเซลล์เชื้อเพลิง โดยการปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนตั้งแต่ 1 บาร์ จนถึง 8 บาร์ ทำให้สามารถคำนวณหาค่า ปริมาณของน้ำ, และ Stoichiometry Ratio ซึ่งจะได้ผลทดสอบดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำระหว่างแบบจำลองกับทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำในแบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีปริมาณน้ำน้อยกว่าแบบจำลอง ซึ่งอาจเกิดจาก อุณหภูมิและความชื้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้ปริมาณน้ำที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อน



#### 4.2.10 การหาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ได้ทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งคำนวณได้จากปริมาณน้ำที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีของไฮโดรเจนกับออกซิเจน แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

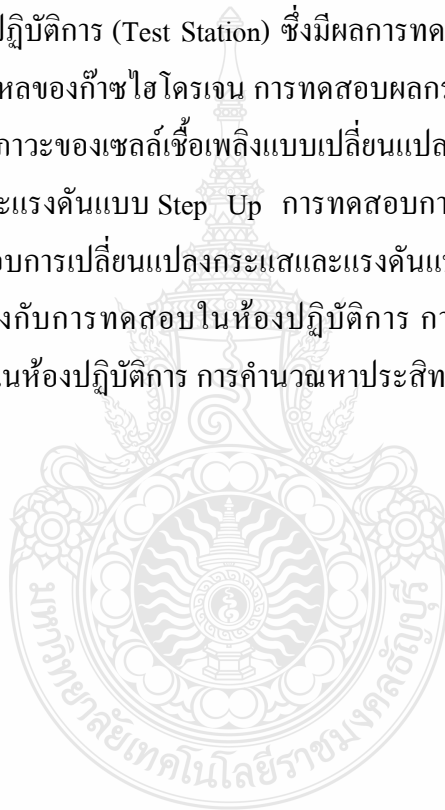
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าจากการคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

ความดัน (barg.)	อุณหภูมิ (ทดสอบ) (°C)	มวลน้ำ (ทดสอบ) (g/s)	พลังงานเข้า (W)	พลังงานออก (W)	ประสิทธิภาพ (%)
1	67	0.532	918.15	1482	61.95
2	65	1.352	873.29	3581	24.39
3	65	1.448	858.90	3,821	22.47
4	66	1.189	851.96	3,141	27.13
5	66	1.145	847.48	3,022	28.04
6	66	1.206	844.84	3,180	26.57
7	66	1.179	842.66	3,108	27.11
8	66	1.177	841.01	3,102	27.11

เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงถึง 43% แต่ในการทดสอบ เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพ ประมาณ 27%

### 4.3 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึง การทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง 2 แบบด้วยกันคือ โปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีผลการทดสอบในเรื่องของ ผลการคำนวณสมการแรงดันตามทฤษฎี ผลการคำนวณสมการความคลาดเคลื่อนของการเกิดปฏิกิริยาเคมี ผลการคำนวณสมการค่าความคลาดเคลื่อนจากความต้านทาน ผลการคำนวณสมการค่าความคลาดเคลื่อนจากการถ่ายโอนมวล ผลการทดสอบกระแสกับแรงดัน ผลการทดสอบกระแสกับกำลังงาน ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสแบบจัมปลัน ด้วยโปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสกับแรงดันแบบ Step Up ด้วยโปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Saw Tooth ด้วยโปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์ และการทดสอบการทำงานในห้องปฏิบัติการ (Test Station) ซึ่งมีผลการทดสอบในเรื่องของ การทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน การทดสอบผลกระทบที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การทดสอบสถานะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเปลี่ยนแปลงโหลดแบบจัมปลัน การทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Step Up การทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Saw Tooth การทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันแบบ Up & Down การเปรียบเทียบแรงดันระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การเปรียบเทียบกำลังงานระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การคำนวณหาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการและการทดสอบวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเปรียบเทียบกันระหว่างแบบคำนวณทางคณิตศาสตร์ (MATLAB Simulink) กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ มาศึกษาวิเคราะห์ผลการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยผู้วิจัยสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุป

สำหรับการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง จะทดสอบในห้องปฏิบัติการและแบบคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลการทดสอบนี้จะทดสอบถึงค่าความเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณน้ำที่ถูกปล่อยออกจากเซลล์เชื้อเพลิง จากจุดต่างๆ ของระบบ วิเคราะห์ผลการการทำงานของระบบ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ สรุปได้ว่า อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเมื่อปรับกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้น จะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้แตกต่างกัน เนื่องมาจากข้อจำกัดของการแพร่กระจายของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่กระจายเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่า จากผลการทดสอบที่ความดัน 3-4 บาร์ จะมีแรงดันสูงที่สุด และมีความสอดคล้องกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้มีแนวโน้มไปทางเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน ที่ความดัน 3 – 4 บาร์ จะมีแรงดันสูงที่สุด ซึ่งทำให้อุณหภูมิที่ความดัน 4 บาร์ ก็มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าความดันอื่น ๆ ซึ่งมีค่าประมาณ  $65^{\circ}\text{C}$  จึงทำให้การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพดีด้วย ในสภาวะการทำงานแบบเปลี่ยนแปลงโหลดแบบฉับพลัน ผลการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิง ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าจะคลาดเคลื่อนไปประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดในเวลา 1 นาที ผลการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 38.9% ในสภาวะการทำงานแบบ Step Up ของค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่กำหนด จากโหลดอิเล็กทรอนิกส์ มีค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า 13.33% ส่วนแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง จะมีค่าคลาดเคลื่อนขึ้นลงตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด ไม่สามารถตอบสนองได้ทันที ในสภาวะการทำงานแบบ Saw Tooth มีค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า 20% ส่วนแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อน 6.45% ในสภาวะการทำงานแบบ Up & Down ของค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงตาม

เวลาที่กำหนดจากโหลดอิเล็กทรอนิกส์ มีค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า 20.9% และเวลาในการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะช้ากว่ากระแสไฟฟ้าที่ปรับด้วยโหลดอิเล็กทรอนิกส์ประมาณ 10 วินาที ส่วนแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง จะมีค่าคลาดเคลื่อนขึ้นลงตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด ไม่สามารถตอบสนองได้ทันที

5.1.2 ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในแบบจำลองซึ่งคำนวณด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (MATLAB Simulink) สรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ในสภาวะไร้โหลด แบบจำลองมีค่าแรงดัน 43 V ส่วนในแบบจำลอง มีค่าแรงดัน 41.8 V ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 2.33% และในสภาวะมีโหลดสูงสุด แบบจำลองมีค่า 27.5 V ส่วนค่าจากการทดสอบ แรงดันที่ค่า 24.8 V ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 9.82% ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับกำลังงาน เมื่อปรับกระแส 5 A แบบจำลองจะมีกำลังงาน 230 W แบบทดสอบจะมีกำลังงาน 180 W ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 21.74%และเมื่อปรับกระแสเป็น 45 A แบบจำลองจะมีกำลังงาน 1220 W แบบทดสอบจะมีกำลังงาน 1100 W ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 9.84% ซึ่งจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ส่วนในการคำนวณหาปริมาณของน้ำ ผลจากการทดสอบจะมีปริมาณน้ำน้อยกว่าจากการคำนวณ เนื่องจากอุณหภูมิ, ความชื้น, เวลาในการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้ปริมาณน้ำที่ถูกปล่อยออกจากเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าคลาดเคลื่อนตามไปด้วย และในส่วนการคำนวณหา Stoichiometry Ratio พบว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ Stoichiometry Ratio มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย จึงทำให้แรงดันที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

5.1.3 พลังงานทางไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิง จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าประมาณ 15.75 V ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 36.63% เมื่อเทียบกับคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง

5.1.4 ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง มีค่าอยู่ที่ประมาณ 27%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในห้องทดสอบเพื่อให้การทดสอบมีความชัดเจนและถูกต้องมากขึ้น เพราะขณะที่ทำการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ต้องเปิดหน้าต่าง หรือ ประตูไว้ ให้ก๊าซไฮโดรเจนได้ระบายออกสู่อากาศภายนอก

5.2.2 ควรมีการต่ออุปกรณ์สำหรับช่วยในการรักษาระดับแรงดันให้คงที่ เพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

5.2.3 ควรมีการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงกับโหลดหลาย ๆ ประเภท เพื่อเปรียบเทียบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นิพนธ์ เกตุจ้อย, วัฒนพงษ์ รัถย์วิเชียร และ สุขฤดี นาคกรณกุล, “เซลล์เชื้อเพลิง: เทคโนโลยีพลังงานสำหรับอนาคต”, Naresuan University Journal.
- [2] P.T Thounthong and P.Sethakul, “Fuel Cell Power Generator”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 (EECON-29), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [3] Alejandro J. del Real, Alicia Arce, Carlos Bordons, 2007, “Development and experimental Validation of a PEM fuel cell dynamic model”, Journal of Power Sources 173(2007) 310-324.
- [4] Winai Chanpeng and Yottana Khunatorn, 2009, “Simulation of Dynamic Behavior of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell”, International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009, Chiang Rai.
- [5] Bewag. (2004). Bewag fuel cell innovation park. Retrieved September 20, 2004, from <http://www.innovation-brennstoffzelle.de/e/index.html>
- [6] Kammen, D. M. (2002, February). The role of fuel cells in the renewable roadmap to energy independence. Paper presented at the Testimony for the United States House Subcommittee on Energy, Washington, DC.
- [7] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/electro.html>, 2002.
- [8] สมนึก บุญพาไสว, พลุศิกายน 2548, <http://www.rmutphysics.com/charud/pdf-leaning/4/pdf-science/Fuel-cell.pdf>.
- [9] Courtesy of Ballard Nexa™ Power User's Manual System, Inc, January 2003.
- [10] Norbeck และคณะ, 1996.
- [11] Kemi.dtu.dk, 2006.
- [12] EG&G Technical Services, Inc., “Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)”, November 2004.
- [13] Erdmann, G. (2003). Future economics of the fuel cell housing market. International Journal of Hydrogen, 28, 685-694.
- [14] U.S. Department of Energy. (2005). Energy efficiency and renewable energy: Fuel cell. Retrieved September 22, 2005, from [http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc\\_types.html](http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html)
- [15] Stambouli, B. A., & Traversa, E. (2002). Fuel cells, an alternative to standard sources of energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 6, 297-306.
- [16] Intersolor 2004, Freiburg, Germany.

- [17] Bauen, A., Hart, D., & Chase, A. (2003). Fuel cells for distributed generation in developing countries-ananalysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, 695-701
- [18] Tsuchiya, H., & Kobayashi, O. (2004). Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve.*International Journal of Hydrogen Energy*, 29, 985-990.
- [19] Lucia Gauchia Babe, Prof.Dr.Javier Sanz Feito.2009, “Nonlinear dynamic per-unit models for electrochemical energy system”, University Carlos III De Madrid.



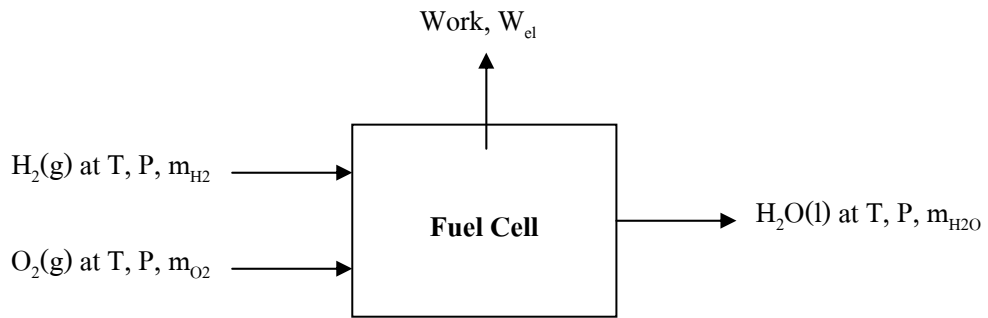




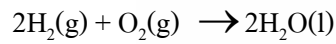
**ภาคผนวก ก**

1. การหาปริมาณของน้ำที่ปล่อยออกมา
2. การคำนวณหาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

## 1. การหาอัตราการไหลของมวล (Mass Flow Rates)



รูปที่ 3.21 รายละเอียดการสมดุลมวล



$W_{el}$  ได้มาจากการสมดุลมวลทางเคมี

$$m_{\text{H}_2} + m_{\text{O}_2} = m_{\text{H}_2\text{O}} + W_{el}$$

มวลของน้ำเข้า

$$M_{\text{H}_2\text{O,airin}} = \frac{S_{\text{O}_2}}{r_{\text{O}_2}} \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{nF} \frac{\phi_{ca} P_{vs}}{P_{ca} - \phi_{ca} P_{vs}} I_{n_{cell}}$$

มวลของน้ำ generated

$$M_{\text{H}_2\text{O,gen}} = \frac{I}{nF} M_{\text{H}_2\text{O}}$$

มวลของน้ำอิมตัว

$$M_{\text{H}_2\text{Oin,H}_2\text{Oout}} = \left[ \left( \frac{S_{\text{O}_2} - r_{\text{O}_2}}{r_{\text{O}_2}} \right) \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{4F} \frac{P_{vs}}{P_{ca} - \Delta P_{ca} - P_{vs}} I_{n_{cell}} \right]$$

ความดันอิมตัว

$$P_{vs} = e^{aT - 1 + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)}$$

$$X_{S,out} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{air}}} \frac{P_{vs}}{P - P_{vs}}$$

$$X_{S,in} = \frac{m_{H_2O}}{m_{air}} \frac{\phi P_{vs}}{P - \phi P_{vs}}$$

มวลของน้ำ

$$m_{H_2O} = X_S m_{air}$$

ความร้อน

$$Q = H_{air,out} - H_{air,in} - H_{H_2O,in}$$

เอนทาลปีของความชื้นในอากาศ

$$h_{vair} = C_{p,air} t + X(C_{p,v} t + h_{fg})$$

เอนทาลปีของน้ำ

$$h_{vwater} = C_{p,water} t$$

ที่ความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิน้ำ 67 °C = 340°K ปริมาณน้ำที่วัดได้จากการทดลอง 0.532 g/s

$$a = -5800.2206 \quad b = 1.3914993 \quad c = -0.048640239 \quad d = 0.41764768 \times 10^{-4}$$

$$e = -0.14452093 \times 10^{-7} \quad f = 6.5459673$$

$$P_{vs} = e^{aT^{-1} + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)}$$

$$= 27.366 \text{ kPa}$$

$$S_{O_2} = \frac{r_{O_2} m_{H_2O} 4F(P_{ca} - \Delta P_{ca} - P_{vs})}{M_{H_2O} \cdot P_{vs} \cdot \ln_{cell}} + r_{O_2}$$

$$= \frac{0.2095 \times 0.532 \times 4 \times 96485 (101.325 - 27.366)}{18.015 \times 27.366 \times 42 \times 43} + 0.2095$$

$$= 3.783$$

$$X_S = \frac{m_{H_2O}}{m_{air}} \frac{P_{vs}}{P - P_{vs}}$$

$$= \frac{18.015}{28.85} \frac{27.366}{(101.325 - 27.366)} = 0.231 \text{ g}_{H_2O}/\text{g}_{air}$$

$$\begin{aligned}
 M_{\text{H}_2\text{O}} &= X_s \cdot m_{\text{air}} \\
 &= 0.231 \times 0.128 = 0.0296 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{s}
 \end{aligned}$$

อุณหภูมิอากาศ 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 66%

$$\begin{aligned}
 P_{\text{vs}} &= e^{aT^{-1} + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)} \\
 &= 3.7822 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_s &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{air}}} \frac{P_{\text{vs}}}{P - P_{\text{vs}}} \\
 &= \frac{18.015}{28.85} \frac{0.66 \times 3.7822}{(101.325 - 0.66 \times 3.7822)} = 0.016 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{air}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{\text{H}_2\text{O}} &= X_s \cdot m_{\text{air}} \\
 &= 0.016 \times 0.128 = 0.002 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{\text{hum}} &= 1.01 \times 67 + 0.231 (1.87 \times 67 + 2500) \\
 &= 674.11 \text{ J/g}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{\text{amb}} &= 1.01 \times 28 + 0.016 (1.87 \times 28 + 2500) \\
 &= 69.118 \text{ J/g}
 \end{aligned}$$

$$h_{\text{water}} = 4.18 \times 65 = 271.70 \text{ J/g}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= 674.112 \times 0.128 - 69.118 \times 0.128 - 271.70 \times 0.0157 \\
 &= 73.17 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{\text{H}_2\text{O,air}} &= \frac{3.783}{0.2095} \frac{18.015}{4 \times 96485} \frac{0.66 \times 3.7822}{(101.325 - 0.66 \times 3.7822)} \times 42 \times 43 \\
 &= 0.00998 \text{ g/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{\text{H}_2\text{O,gen}} &= \frac{42}{2 \times 96485} \times 18.015 \\
 &= 0.00392 \text{ g/s}
 \end{aligned}$$

$$m_{\text{H}_2\text{Oin,H}_2\text{out}} = \left[ \left( \frac{3.783 - 0.2095}{0.2095} \right) \frac{18.015}{4 \times 96485} \frac{27.366}{(101.325 - 27.366)} \times 42 \times 43 \right]$$

$$= 0.5321 \text{ g/s}$$

$$S_{\text{O}_2}(\text{จากเครื่อง}) = 30$$

$$m_{\text{H}_2\text{O,air}} = \frac{30}{0.2095} \frac{18.015}{4 \times 96485} \frac{0.66 \times 3.7822}{(101.325 - 0.66 \times 3.7822)} \times 42 \times 43$$

$$= 0.3049 \text{ g/s}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O,gen}} = \frac{42}{2 \times 96485} \times 18.015$$

$$= 0.00392 \text{ g/s}$$

$$m_{\text{H}_2\text{Oin,H}_2\text{out}} = \left[ \left( \frac{30 - 0.2095}{0.2095} \right) \frac{18.015}{4 \times 96485} \frac{0.66 \times 27.366}{(101.325 - 0.66 \times 27.366)} \times 42 \times 43 \right]$$

$$= 4.4354 \text{ g/s}$$

ที่ความดัน 2 บาร์ อุณหภูมิน้ำ 65 °C = 338.15°K ปริมาณน้ำที่วัดได้จากการทดลอง 1.352 g/s

$$P_{\text{vs}} = e^{aT^{-1} + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)}$$

$$= 25.0387 \text{ kPa}$$

$$S_{\text{O}_2} = \frac{r_{\text{O}_2} m_{\text{H}_2\text{O}} 4F(P_{\text{ca}} - \Delta P_{\text{ca}} - P_{\text{vs}})}{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{vs}} \cdot I \cdot n_{\text{cell}}} + r_{\text{O}_2}$$

$$= \frac{0.2095 \times 1.352 \times 4 \times 96485 (202.65 - 25.0387)}{18.015 \times 25.0387 \times 42 \times 43} + 0.2095$$

$$= 24.0435$$

$$X_s = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{vs}}}{m_{\text{air}} (P - P_{\text{vs}})}$$

$$= \frac{18.015}{28.85} \frac{25.0387}{(202.65 - 25.0387)} = 0.088 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{air}}$$

$$\begin{aligned}
 M_{\text{H}_2\text{O}} &= X_S \cdot m_{\text{air}} \\
 &= 0.088 \times 0.128 = 0.0113 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{s}
 \end{aligned}$$

อุณหภูมิอากาศ 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 66%

$$\begin{aligned}
 P_{\text{vs}} &= e^{aT-1 + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)} \\
 &= 3.7822 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_S &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{vs}}}{m_{\text{air}} (P - P_{\text{vs}})} \\
 &= \frac{18.015}{28.85} \frac{0.66 \times 3.7822}{(202.65 - 0.66 \times 3.7822)} = 0.0078 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{air}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{\text{H}_2\text{O}} &= X_S \cdot m_{\text{air}} \\
 &= 0.0078 \times 0.128 = 0.0009968 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{\text{hum}} &= 1.01 \times 65 + 0.088 (1.87 \times 65 + 2500) \\
 &= 296.35 \text{ J/g}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{\text{amb}} &= 1.01 \times 28 + 0.0078 (1.87 \times 28 + 2500) \\
 &= 48.19 \text{ J/g}
 \end{aligned}$$

$$h_{\text{water}} = 4.18 \times 65 = 271.70 \text{ J/g}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= 296.35 \times 0.128 - 48.19 \times 0.128 - 271.70 \times 0.0157 \\
 &= 27.498 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{\text{H}_2\text{O,air}} &= \frac{24.04}{0.2095} \frac{18.015}{(4 \times 96485)} \frac{0.66 \times 3.7822}{(202.65 - 0.66 \times 3.7822)} \times 42 \times 43 \\
 &= 0.244 \text{ g/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{\text{H}_2\text{O,gen}} &= \frac{42}{2 \times 96485} \times 18.015 \\
 &= 0.00392 \text{ g/s}
 \end{aligned}$$

$$m_{\text{H}_2\text{Oin,H}_2\text{out}} = \left[ \left( \frac{24.04 - 0.02095}{0.2095} \right) \frac{18.015}{(4 \times 96485)} \frac{25.0387}{(202.65 - 25.0387)} \times 42 \times 43 \right]$$

$$= 3.148 \text{ g/s}$$

$$S_{O_2}(\text{จากเครื่อง}) = 30$$

$$m_{H_2O,air} = \frac{30}{0.2095} \frac{18.015}{4 \times 96485} \frac{0.66 \times 3.7822}{(202.65 - 0.66 \times 3.7822)} \times 42 \times 43$$

$$= 0.1506 \text{ g/s}$$

$$m_{H_2O,gen} = \frac{42}{2 \times 96485} \times 18.015$$

$$= 0.00392 \text{ g/s}$$

$$m_{H_2Oin,H_2Oout} = \left[ \left( \frac{30 - 0.2095}{0.2095} \right) \frac{18.015}{4 \times 96485} \frac{0.66 \times 25.0387}{(202.65 - 0.66 \times 25.0387)} \times 42 \times 43 \right]$$

$$= 1.6899 \text{ g/s}$$

ที่ความดัน 3 บาร์ อุณหภูมิน้ำ 65 °C ปริมาณน้ำที่วัดได้จากการทดลอง 1.448 g/s

$$P_{vs} = e^{aT-1 + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)}$$

$$= 25.0387 \text{ kPa}$$

$$S_{O_2} = \frac{r_{O_2} m_{H_2O} 4F(P_{ca} - \Delta P_{ca} - P_{vs})}{M_{H_2O} P_{vs} \ln_{cell}} + r_{O_2}$$

$$= \frac{0.2095 \times 1.448 \times 4 \times 96485 (303.975 - 25.0387)}{18.015 \times 25.0387 \times 42 \times 43} + 0.2095$$

$$= 40.297 \approx 40$$

$$X_s = \frac{m_{H_2O} P_{vs}}{m_{air} P - P_{vs}}$$

$$= \frac{18.015}{28.85} \frac{25.0387}{(303.975 - 25.0387)} = 0.056 \text{ g}_{H_2O}/\text{g}_{air}$$

$$M_{H_2O} = X_s \cdot m_{air}$$

$$= 0.056 \times 0.128 = 0.00717 \text{ g}_{H_2O}/\text{s}$$

อุณหภูมิอากาศ 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 66%

$$P_{vs} = e^{aT-1+b+cT+dTT+eTTT+f \ln(T)}$$

$$= 3.7822 \text{ kPa}$$

$$X_s = \frac{m_{H_2O}}{m_{air}} \frac{P_{vs}}{P - P_{vs}}$$

$$= \frac{18.015}{28.85} \frac{0.66 \times 3.7822}{(303.975 - 0.66 \times 3.7822)} = 0.00517 \text{ g}_{H_2O}/\text{g}_{air}$$

$$M_{H_2O} = X_s \cdot m_{air}$$

$$= 0.00517 \times 0.128 = 0.000651 \text{ g}_{H_2O}/\text{s}$$

$$h_{hum} = 1.01 \times 65 + 0.056 (1.87 \times 65 + 2500)$$

$$= 212.46 \text{ J/g}$$

$$h_{amb} = 1.01 \times 28 + 0.00517 (1.87 \times 28 + 2500)$$

$$= 41.48 \text{ J/g}$$

$$h_{water} = 4.18 \times 65 = 271.70 \text{ J/g}$$

$$Q = 212.46 \times 0.128 - 41.48 \times 0.128 - 271.70 \times 0.0157$$

$$= 17.62 \text{ W}$$

$$m_{H_2O,air} = \frac{40 - 18.015 - 0.66 \times 3.7822}{0.2095 \times 96485 (303.975 - 0.66 \times 3.7822)} \times 42 \times 43$$

$$= 0.035 \text{ g/s}$$

$$m_{H_2O,gen} = \frac{42}{2 \times 96485} \times 18.015$$

$$= 0.00392 \text{ g/s}$$

$$m_{H_2Oin,H_2Oout} = \left[ \left( \frac{40 - 0.2095}{0.2095} \right) \frac{18.015}{4 \times 96485} \frac{25.0387}{303.975 - 25.0387} \times 42 \times 43 \right]$$

$$= 1.448 \text{ g/s}$$

$$S_{O_2}(\text{จากเครื่อง}) = 30$$



$$\begin{aligned}
m_{\text{H}_2\text{O,air}} &= \frac{30}{0.2095} \frac{18.015}{4 \times 96485} \frac{0.66 \times 3.7822}{(303.975 - 0.66 \times 3.7822)} \times 42 \times 43 \\
&= 0.1075 \text{ g/s} \\
m_{\text{H}_2\text{O,gen}} &= \frac{42}{2 \times 96485} \times 18.015 \\
&= 0.00392 \text{ g/s} \\
m_{\text{H}_2\text{Oin,H}_2\text{Oout}} &= \left[ \left( \frac{30 - 0.2095}{0.2095} \right) \frac{18.015}{4 \times 96485} \frac{0.66 \times 25.0387}{(303.975 - 0.66 \times 25.0387)} \times 42 \times 43 \right] \\
&= 1.1577 \text{ g/s}
\end{aligned}$$

ที่ความดัน 4 บาร์ อุณหภูมิน้ำ 66 °C = 339.15 °K ปริมาณน้ำที่วัดได้จากการทดลอง 1.189 g/s

$$\begin{aligned}
P_{\text{vs}} &= e^{aT-1 + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)} \\
&= 26.1802 \text{ kPa} \\
S_{\text{O}_2} &= \frac{r_{\text{O}_2} m_{\text{H}_2\text{O}} 4F(P_{\text{ca}} - \Delta P_{\text{ca}} - P_{\text{vs}})}{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{vs}} \cdot \ln_{\text{cell}}} + r_{\text{O}_2} \\
&= \frac{0.2095 \times 1.189 \times 4 \times 96485 (405.3 - 26.1802)}{18.015 \times 26.1802 \times 42 \times 43} + 0.2095 \\
&= 42.99
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
X_{\text{S}} &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{air}}} \frac{P_{\text{vs}}}{P - P_{\text{vs}}} \\
&= \frac{18.015}{28.85} \frac{26.1802}{(405.3 - 26.1802)} = 0.0431 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{air}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{\text{H}_2\text{O}} &= X_{\text{S}} \cdot m_{\text{air}} \\
&= 0.0431 \times 0.128 = 0.00552 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{s}
\end{aligned}$$

อุณหภูมิอากาศ 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 66%

$$P_{\text{vs}} = e^{aT-1 + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)}$$

$$= 3.7822 \text{ kPa}$$

$$X_s = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{vs}}}{m_{\text{air}} P - P_{\text{vs}}}$$

$$= \frac{18.015}{28.85} \frac{0.66 \times 3.7822}{(405.3 - 0.66 \times 3.7822)} = 0.0039 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{air}}$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = X_s \cdot m_{\text{air}}$$

$$= 0.0039 \times 0.128 = 0.000495 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{s}$$

$$h_{\text{hum}} = 1.01 \times 66 + 0.0431 (1.87 \times 66 + 2500)$$

$$= 179.73 \text{ J/g}$$

$$h_{\text{amb}} = 1.01 \times 28 + 0.0039 (1.87 \times 28 + 2500)$$

$$= 38.23 \text{ J/g}$$

$$h_{\text{water}} = 4.18 \times 65 = 271.70 \text{ J/g}$$

$$Q = 179.73 \times 0.128 - 38.23 \times 0.128 - 271.70 \times 0.0157$$

$$= 13.78 \text{ W}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O,air}} = \frac{42.99 - 18.015 - 0.66 \times 3.7822}{0.2095 (4 \times 96485) (405.3 - 0.66 \times 3.7822)} \times 42 \times 43$$

$$= 0.1072 \text{ g/s}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O,gen}} = \frac{42}{2 \times 96485} \times 18.015$$

$$= 0.00392 \text{ g/s}$$

$$m_{\text{H}_2\text{Oin,H}_2\text{out}} = \left[ \left( \frac{42.99 - 0.2095}{0.2095} \right) \frac{18.015}{(4 \times 96485) (405.3 - 26.1802)} \times 42 \times 43 \right]$$

$$= 1.189 \text{ g/s}$$

$$S_{\text{O}_2} (\text{จากเครื่อง}) = 30$$

$$m_{\text{H}_2\text{O,air}} = \frac{30}{0.2095 (4 \times 96485) (405.3 - 0.66 \times 3.7822)} \times 42 \times 43$$

$$\begin{aligned}
&= 0.0748 \text{ g/s} \\
m_{\text{H}_2\text{O,gen}} &= \frac{42}{2 \times 96485} \times 18.015 \\
&= 0.00392 \text{ g/s} \\
m_{\text{H}_2\text{Oin,H}_2\text{Oout}} &= \left[ \left( \frac{30 - 0.2095}{0.2095} \right) \frac{18.015}{(4 \times 96485)} \frac{0.66 \times 26.1802}{(405.3 - 0.66 \times 26.1802)} \times 42 \times 43 \right] \\
&= 0.8278 \text{ g/s}
\end{aligned}$$

ที่ความดัน 5 บาร์ อุณหภูมิน้ำ 66 °C = 339.15 °K ปริมาณน้ำที่วัดได้จากการทดลอง 1.145 g/s

$$\begin{aligned}
P_{\text{vs}} &= e^{aT^{-1} + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)} \\
&= 26.1802 \text{ kPa} \\
S_{\text{O}_2} &= \frac{r_{\text{O}_2} m_{\text{H}_2\text{O}} 4F(P_{\text{ca}} - \Delta P_{\text{ca}} - P_{\text{vs}})}{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{vs}} \cdot \ln_{\text{cell}}} + r_{\text{O}_2} \\
&= \frac{0.2095 \times 1.145 \times 4 \times 96485 (506.63 - 26.1802)}{18.015 \times 26.1802 \times 42 \times 43} + 0.2095 \\
&= 52.43 \\
X_{\text{S}} &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{air}}} \frac{P_{\text{vs}}}{P - P_{\text{vs}}} \\
&= \frac{18.015}{28.85} \frac{26.1802}{(506.63 - 26.1802)} = 0.034 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{air}} \\
M_{\text{H}_2\text{O}} &= X_{\text{S}} \cdot m_{\text{air}} \\
&= 0.034 \times 0.128 = 0.0044 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{s}
\end{aligned}$$

อุณหภูมิอากาศ 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 66%

$$\begin{aligned}
P_{\text{vs}} &= e^{aT^{-1} + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)} \\
&= 3.7822 \text{ kPa}
\end{aligned}$$

$$X_s = \frac{m_{H_2O}}{m_{air}} \frac{P_{vs}}{P - P_{vs}}$$

$$= \frac{18.015}{28.85} \frac{0.66 \times 3.7822}{(506.63 \times 3.7822)} = 0.0031 \text{ g}_{H_2O}/\text{g}_{air}$$

$$M_{H_2O} = X_s \cdot m_{air}$$

$$= 0.0031 \times 0.128 = 0.000396 \text{ g}_{H_2O}/s$$

$$h_{hum} = 1.01 \times 66 + 0.034 (1.87 \times 66 + 2500)$$

$$= 155.86 \text{ J/g}$$

$$h_{amb} = 1.01 \times 28 + 0.0031 (1.87 \times 28 + 2500)$$

$$= 36.19 \text{ J/g}$$

$$h_{water} = 4.18 \times 65 = 271.70 \text{ J/g}$$

$$Q = 155.86 \times 0.128 - 36.19 \times 0.128 - 271.70 \times 0.0157$$

$$= 10.986 \text{ W}$$

$$m_{H_2O,air} = \frac{52.43}{0.2095} \frac{18.015}{(4 \times 96485)} \frac{0.66 \times 3.7822}{(506.63 - 0.66 \times 3.7822)} \times 42 \times 43$$

$$= 0.1045 \text{ g/s}$$

$$m_{H_2O,gen} = \frac{42}{2 \times 96485} \times 18.015$$

$$= 0.00392 \text{ g/s}$$

$$m_{H_2O,in,H_2O,out} = \left[ \left( \frac{52.43 - 0.2095}{0.2095} \right) \frac{18.015}{(4 \times 96485)} \frac{26.1802}{(506.63 - 26.1802)} \times 42 \times 43 \right]$$

$$= 1.145 \text{ g/s}$$

$$S_{O_2}(\text{จากเครื่อง}) = 30$$

$$m_{H_2O,air} = \frac{30}{0.2095} \frac{18.015}{(4 \times 96485)} \frac{0.66 \times 3.7822}{(506.63 - 0.66 \times 3.7822)} \times 42 \times 43$$

$$= 0.0598 \text{ g/s}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O,gen}} = \frac{42}{2 \times 96485} \times 18.015$$

$$= 0.00392 \text{ g/s}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O,in,H}_2\text{out}} = \left[ \left( \frac{30 - 0.2095}{0.2095} \right) \frac{18.015}{(4 \times 96485)} \frac{0.66 \times 26.1802}{(506.63 - 0.66 \times 26.1802)} \times 42 \times 43 \right]$$

$$= 0.6532 \text{ g/s}$$

ที่ความดัน 6 บาร์ อุณหภูมิน้ำ 66 °C = 339.15 °K ปริมาณน้ำที่วัดได้จากการทดลอง 1.2055 g/s

$$P_{\text{vs}} = e^{aT^{-1} + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)}$$

$$= 26.1802 \text{ kPa}$$

$$S_{\text{O}_2} = \frac{r_{\text{O}_2} m_{\text{H}_2\text{O}} 4F(P_{\text{ca}} - \Delta P_{\text{ca}} - P_{\text{vs}})}{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{vs}} \cdot \ln_{\text{cell}}} + r_{\text{O}_2}$$

$$= \frac{0.2095 \times 1.2055 \times 4 \times 96485 (607.95 - 26.1802)}{18.015 \times 26.1802 \times 42 \times 43} + 0.2095$$

$$= 66.78$$

$$X_{\text{S}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{vs}}}{m_{\text{air}} (P - P_{\text{vs}})}$$

$$= \frac{18.015}{28.85} \frac{26.1802}{(607.95 - 26.1802)} = 0.0281 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{air}}$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = X_{\text{S}} \cdot m_{\text{air}}$$

$$= 0.0281 \times 0.128 = 0.0036 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{s}$$

อุณหภูมิอากาศ 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 66%

$$P_{\text{vs}} = e^{aT^{-1} + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)}$$

$$= 3.7822 \text{ kPa}$$

$$X_{\text{S}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{vs}}}{m_{\text{air}} (P - P_{\text{vs}})}$$

$$= \frac{18.015}{28.85} \frac{0.66 \times 3.7822}{(607.95 - 0.66 \times 3.7822)} = 0.0026 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{air}}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{H}_2\text{O}} &= X_s \cdot m_{\text{air}} \\ &= 0.0026 \times 0.128 = 0.000329 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{\text{hum}} &= 1.01 \times 66 + 0.0281 (1.87 \times 66 + 2500) \\ &= 140.38 \text{ J/g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{\text{amb}} &= 1.01 \times 28 + 0.0026 (1.87 \times 28 + 2500) \\ &= 34.92 \text{ J/g} \end{aligned}$$

$$h_{\text{water}} = 4.18 \times 65 = 271.70 \text{ J/g}$$

$$\begin{aligned} Q &= 140.38 \times 0.128 - 34.92 \times 0.128 - 271.70 \times 0.0157 \\ &= 9.168 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{H}_2\text{O,air}} &= \frac{66.78}{0.2095} \frac{18.015}{(4 \times 96485)} \frac{0.66 \times 3.7822}{(607.95 - 0.66 \times 3.7822)} \times 42 \times 43 \\ &= 0.1108 \text{ g/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{H}_2\text{O,gen}} &= \frac{42}{2 \times 96485} \times 18.015 \\ &= 0.00392 \text{ g/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{H}_2\text{Oin,H}_2\text{out}} &= \left[ \left( \frac{66.78 - 0.2095}{0.2095} \right) \frac{18.015}{(4 \times 96485)} \frac{26.1802}{(607.95 - 26.1802)} \times 42 \times 43 \right] \\ &= 1.2055 \text{ g/s} \end{aligned}$$

$$S_{\text{O}_2}(\text{จากเครื่อง}) = 30$$

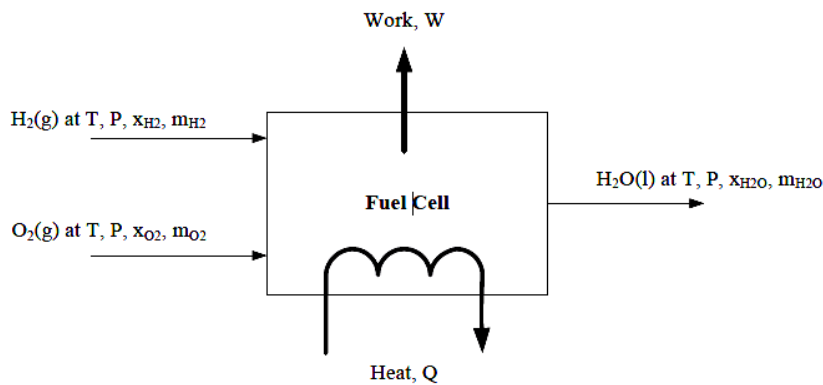
$$\begin{aligned} m_{\text{H}_2\text{O,air}} &= \frac{30}{0.2095} \frac{18.015}{(4 \times 96485)} \frac{0.66 \times 3.7822}{(607.95 - 0.66 \times 3.7822)} \times 42 \times 43 \\ &= 0.0498 \text{ g/s} \end{aligned}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O,gen}} = \frac{42}{2 \times 96485} \times 18.015$$

$$\begin{aligned}
&= 0.00392 \text{ g/s} \\
m_{\text{H}_2\text{O}_{in},\text{H}_2\text{O}_{out}} &= \left[ \left( \frac{30 - 0.2095}{0.2095} \right) \frac{18.015}{(4 \times 96485)} \frac{0.66 \times 26.1802}{(607.95 - 0.66 \times 26.1802)} \times 42 \times 43 \right] \\
&= 0.5394 \text{ g/s}
\end{aligned}$$

## 2 การหาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ซึ่งจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทำให้สามารถทราบปริมาณน้ำที่ถูกปล่อยออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิง, อุณหภูมิของน้ำ จึงทำให้สามารถคำนวณค่าของอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจน (Stoichiometric Ratio) และเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์กับปริมาณน้ำจากการทดสอบ ซึ่งได้จากสมการสมดุลมวลของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 3.21 รายละเอียดการสมดุลมวล

$$\begin{aligned}
\text{ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง} &= \frac{\text{พลังงานที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง}}{\text{พลังงานที่จ่ายให้กับเซลล์เชื้อเพลิง}} \\
&= \frac{H_{\text{H}_2,\text{in}} + H_{\text{Air,in}} + H_{\text{H}_2\text{O}_\text{Air,in}}}{H_{\text{Air,out}} + H_{\text{H}_2\text{O}_\text{Air,out}}}
\end{aligned}$$

ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ อุณหภูมิน้ำ 67 °C อุณหภูมิห้อง 28 °C ปริมาณน้ำที่วัดได้จากการทดลอง = 0.532 g/s

$$\begin{aligned}
H_{\text{H}_2\text{O}_\text{Air,out}} &= m_{\text{H}_2\text{O}_\text{Air,out}} \times (C_{p\text{H}_2\text{O}} T_{\text{out}} + h_{fg}) \\
&= 0.532 \times (1.85 \times 67 + 2500) = 1,396 \text{ W}
\end{aligned}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O,gen}} = \frac{I}{2F} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2,000}{2 \times 96487} \cdot 18.015$$

$$= 0.1867 \text{ g/s}$$

The water mass balance

$$m_{\text{H}_2\text{O,Air,in}} = m_{\text{H}_2\text{O,Air,out}} - m_{\text{H}_2\text{O,gen}}$$

$$= 0.532 - 0.1867 = 0.345 \text{ g/s}$$

$$H_{\text{H}_2\text{O,Air,in}} = m_{\text{H}_2\text{O,Air,in}} \times (C_{p\text{H}_2\text{O}} T_{\text{in}} + h_{\text{fg}})$$

$$= 0.345 \times (1.85 \times 28 + 2500) = 880.37 \text{ W}$$

ความดันไอที่ 67 °C

ความดันไอตัว

$$P_{\text{vs}} = e^{aT-1 + b + cT + dTT + eTTT + f \ln(T)}$$

$$X_{\text{S,out}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{air}}} \frac{P_{\text{vs}}}{P - P_{\text{vs}}}$$

$$X_{\text{S,in}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{air}}} \frac{\phi P_{\text{vs}}}{P - \phi P_{\text{vs}}}$$

$$P_{\text{vs}}(67) = 27.366 \text{ kPa}$$

$$X_{\text{S}} = 0.231 \frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{g}_{\text{air}}}$$

ความดันไอที่ 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 66%

$$P_{\text{vs}}(28) = 3.7822 \text{ kPa}$$

$$X_{\text{S}} = 0.016 \frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{g}_{\text{air}}}$$

$$h_{\text{H}_2,\text{in}} = C_{p\text{H}_2} \times t + X_{\text{S}}(28) \times (C_{p\text{H}_2\text{O}} \times t + h_{\text{fg}})$$

$$= 14.2 \times 28 + 0.016 (1.87 \times 28 + 2500) = 438.44 \text{ J/g}$$

$$H_{\text{H}_2,\text{in}} = h_{\text{H}_2,\text{in}} \times M_{\text{H}_2} = 438.44 \times 2.0158 = 883.81 \text{ W}$$

$$h_{\text{Air,in}} = C_{p\text{air}} \times t + X_{\text{S}}(28) \times (C_{p\text{H}_2\text{O}} \times t + h_{\text{fg}})$$



$$= 1.01 \times 28 + 0.016 (1.87 \times 28 + 2500) = 69.12 \text{ J/g}$$

$$H_{\text{air,in}} = h_{\text{air,in}} \times M_{\text{Air}} = 69.12 \times 0.128 = 8.85 \text{ W}$$

$$h_{\text{Air,out}} = C_{p_{\text{air}}} \times t + X_{s(67)} \times (C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} \times t + h_{fg})$$

$$= 1.01 \times 67 + 0.231 (1.87 \times 67 + 2500) = 674.11 \text{ J/g}$$

$$H_{\text{air,out}} = h_{\text{air,out}} \times M_{\text{Air}} = 674.11 \times 0.128 = 86.29 \text{ W}$$

$$\text{ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง} = \frac{H_{\text{Air,out}} + H_{\text{H}_2\text{O}_\text{Air,out}}}{H_{\text{H}_2\text{O}_\text{Air,in}} + H_{\text{H}_2,\text{in}} + H_{\text{Air,in}}}$$

$$= \frac{86.29 + 1,396}{880.37 + 883.81 + 8.85} \times 100$$

$$= 61.95\%$$



## ภาคผนวก ข

### ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

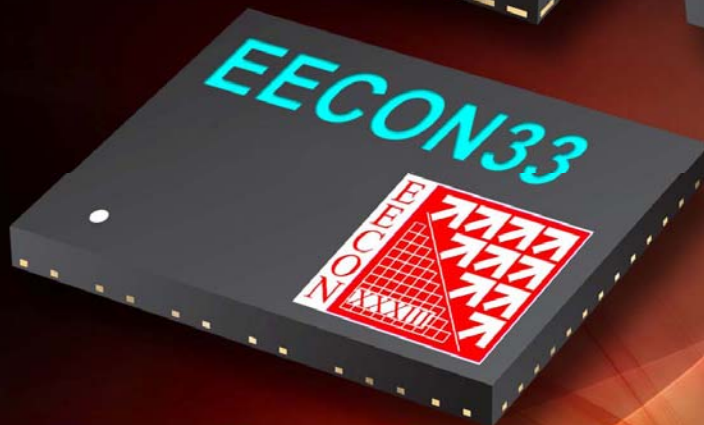
1. การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงPEMFC 1.2 kW, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (EECON-33)
2. การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงPEMFC 1.2 kW, การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3 (3<sup>rd</sup> RMUTCON)
3. การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงPEMFC 1.2 kW, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 (ENETT 2010)
4. การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงPEMFC 1.2 kW, Thailand Renewable Energy Community Configuration Conference (TREC 2)



# การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๓

33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-33)

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- ไฟโตนิคส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)



ร่วมจัดโดย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



111 Years Engineering  
Innovation



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า  
ครั้งที่ 33

**Reviewer**

Adisorn Leelasantitham  
Akaraphunt Vongkumhae  
Amnart Suk Sri  
Amorn Jiraseree-amornkun  
Amporn Poyai  
Anuchit Charean  
Anuree Lorsawatsiri  
Anuwat Jangwanitlert  
Aphibal Pruksamubal  
Apichai Bhatranand  
Apichan Kanjanavapastit  
Apinunt Thanachayanont  
Apirada Namsang  
Apiwat Lek-uthai  
Arporn Teeramongkonrasmee  
Arthit Sode-Yome  
Athikom Roeksabutr  
Attaphol Ngaopitakkul  
Boonchuay Supmonchai  
Boonlert Suechoey  
Boonruk Chipipop  
Boonsri Kaewkham-ai  
Boonyang Plangklang  
Budhapon Sawetsakulanond  
Bunlung Neammanee  
Cattareeya Suwanasri  
Chai Chompoo-inwai  
Chainarong Klimanee  
Chaiwat Nuthong  
Chaiwat Sakul  
Chaiwut Chat-uthai  
Chaiyachet Saivichit

**Affiliation**

University of the Thai Chamber of Commerce  
Naresuan University  
Khon Kaen University  
Mahanakom University of Technology  
Thai Microelectronics Center  
Kasem Bundit University  
Mahanakom University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Mahanakom University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Chulalongkorn University  
Chulalongkorn University  
Siam University  
Mahanakom University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chulalongkorn university  
South-East Asia University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Chiang Mai University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Mahanakom University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Naresuan University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Srinakharinwirot University  
King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang  
Rajamangala University of Technology Srivijaya, Trang Campus.  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chulalongkorn University



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มข. มทม.  
The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า  
ครั้งที่ 33

**Reviewer**

Chaiyaporn Lothongkam  
Chaiyut Sumpavakup  
Chakkaphong Suthaputchakun  
Chanatip Tumrongwittayapak  
Chanchai Thaijiam  
Chanchana Tangwongsan  
Chanin Bunlaksananusorn  
Chanin Wissawinthanon  
Channarong Banmongkol  
Chaodit Aswakul  
Chaovalit Thamviriyakul  
Charnchai Phuempitiwiriyawej  
Chatchai Suppitaksakul  
Chatree Mahatthanajatuphat  
Chedsada Chinrungrueng  
Chiranut Sa-ngiamsak  
Chirasak Sinsukudomchai  
Chivalai Temiyasathit  
Chokchai Sangdao  
Chow Chompoo-inwai  
Chuttchaval Jeraputra  
Chuwong Phongcharoenpanich  
Danai Laksameethanasan  
David Banjerdpongchai  
Deacha Puangdownreong  
Decha Wilairat  
Diew Koolpiruck  
Duang-arthit Srimoon  
Dulpichet Rerkpreedapong  
Ekachai Leelarasmee  
Ekachai Phaisangittisagul

**Affiliation**

Mahanakorn University of Technology  
Mahanakorn University of Technology  
Bangkok University  
Kasem Bundit University  
Srinakharinwirot University  
Chulalongkorn University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chulalongkorn university  
Chulalongkorn University  
Chulalongkorn University  
Mahanakorn University of Technology  
Chulalongkorn University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Chulalongkorn University  
Khon Kaen University  
South-East Asia University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahidol University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahidol University  
Chulalongkorn University  
South-East Asia University  
Mahidol University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Rangsit University  
Kasetsart University  
Chulalongkorn University  
Kasetsart University



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มท. มทม.  
The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า  
ครั้งที่ 33

**Reviewer**

Ekapon Siwapomsathain  
Issarachai Ngamroo  
Jakkree Srinonchat  
Jirasuk Vilasdechanon  
Juktrit Tagapanij  
Kamol Kaemarungsi  
Kamon Jirasereeamornkul  
Kampol Woradit  
Kanadit Chetpattanandh  
Kanokvate Tungpimolrut  
Kasin Vichienchom  
Keerati Chayakulkheeree  
Khatathap Swatdipisal  
Kittiphong Meesawat  
Kittisak Tripitapornchai  
Komsan Hongesombut  
Krischonme Bhunkittipich  
Kunthphong Srisathit  
La-or Kovavisaruch  
Lunchakorn Wuttisittikulki  
Mana Sriyudthsak  
Manop Aorpimai  
Manop Wongsaisuwan  
Miti Ruchanurucks  
Mongkol Konghirun  
Mongkorn Klingajay  
Monthon Leelajindakraierk  
Montri Karnjanadecha  
Montri Pannarut  
Montri Suwanapingkarl  
Naebboon Hoonchareon  
Nalin Sidahao

**Affiliation**

King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Chiang Mai University  
Mahanakorn University of Technology  
National Electronics and Computer Technology Center  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Srinakharinwirot University  
Prince of Songkla University  
National Electronics and Computer Technology Center  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Sripatum University  
King Mongkut 's University of Technology North Bangkok  
Khon Kaen University  
Rangsit University  
Kasetsart University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Mahanakorn University of Technology  
National Electronics and Computer Technology Center  
Chulalongkorn University  
Chulalongkorn University  
Mahanakorn University of Technology  
Chulalongkorn University  
Kasetsart University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Prince of Songkla University  
National Electronics and Computer Technology Center  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Chulalongkorn University  
Mahanakorn University of Technology



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มช. มทน.  
The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า  
ครั้งที่ 33

**Reviewer**

Nararat Ruangchaijatupon  
Narisara Sophayont  
Narong Buabthong  
Narong Yoothanom  
Narongrit Sanajit  
Natham Koedsam-ang  
Nattavut Chayavanich  
Natth Junkrob  
Nattha Jindapetch  
Natthaphob Nimpitiwan  
Natthawuth Somakettarin  
Nimit Boonpirom  
Nipapon Siripon  
Niphath Jantharamin  
Nopadol Uchaipichat  
Noppadol Wanichworanant  
Nuntiya Chaiyabut  
Opas Chutatape  
Ouen Pinnern  
Pakorn Kaewtrakulpong  
Panrasee Ritthipravat  
Pasawee Grimord  
Patamaporn Sripadungtham  
Pathomthath Chiradeja  
Peerapol Yuvapooisanon  
Peerayot Sanposh  
Petch Nantivatana  
Phaiboon Booppha  
Phakkawat Jantree  
Phichet Moungnoul  
Phoemphun Oothongsap

**Affiliation**

Khon Kaen University  
TOT Public Company Limited  
Thammasat university  
Sripatum University  
Mahanakorn University of Technology  
Kasem Bundit University  
King Mongkut's University of Tecnology Thonburi  
South-East Asia University  
Prince of Songkla University  
Bangkok University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Sripatum University  
Chiang Mai University  
Naresuan University  
Thammasat University  
Mahidol University  
Bangkok University  
Rangsit University  
Ramkhamhaeng University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Mahidol University  
Sripatum university  
Kasetsart University  
Srinakharinwirot University  
Mahanakorn University of Technology  
Kasetsart University  
Sripatum University  
Kasem Bundit University  
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
King Mongkut's University Technology North Bangkok



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สอ. มข. มท.  
The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า  
ครั้งที่ 33

**Reviewer**

Phomphop Naiyanetr  
Pichai Aree  
Pichaya Tandayya  
Pinit Jitjing  
Pinit Kumhom  
Pinit Thepsatorn  
Pisit Liutanakul  
Pisit Phokharatkul  
Pisit Wisutmetheekorn  
Piya Warabuntaweekorn  
Pongsack Promwong  
Ponpranod Didsayabutra  
Pornchai Chanyagorn  
Pornchai Supnithi  
Prajub Pawarangkoon  
Pramin Artrit  
Pranchalee Rattanasakornchai  
Prayoot Akkaraekthalin  
Preecha Kocharoen  
Puangtip Phadungrot  
Punyaphat Phumiphak  
Rachu Panchalard  
Rangsipan Marukatat  
Ravee Phromloungsri  
Rungsimant Sitdhikom  
Sakchai Thipchaksurat  
Saliltip Sinthusonthisat  
Samphan Phrompichai  
Samroeng Hintamai  
Sanchai Dechanupaprittha  
Sangsuree Vasupongayya  
Sansanee Auephanwiriyaikul

**Affiliation**

Mahidol University  
Thammasat University  
Prince of Songkla University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Srinakharinwirot University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Mahidol University  
Mahanakorn University of Technology  
Bangkok University  
Mahanakorn University of Technology  
California Independent System Operator  
Mahidol University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahanakorn University of Technology  
Khon Kaen University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Sripatum University  
Mahanakorn University of Technology  
Mahanakorn University of Technology  
Mahanakorn University of Technology  
Mahidol University  
Udon Thani Rajabhat University  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahanakorn University of Technology  
Mahanakorn University of Technology  
Sripatum University  
Kasetsart University  
Prince of Songkla University  
Chiang Mai University



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มช. มทน.  
The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า  
ครั้งที่ 33

**Reviewer**

Sanya Khunkhao  
Sanya Mitaim  
Saowapak Thongvigitmanee  
Sarawan Wongsu  
Sarawuth Chaimool  
Sarun Sumriddetchajom  
Semsak Uatrongjit  
Sirichai Dangeam  
Siriluck Iorepunmanee  
Siripong Chaysin  
Siriroj Sirisukprasert  
Sirivat Poonvasin  
Sirivit Taechajedcadarungsri  
Siriwich Tadsuan  
Somboon Nuchprayoon  
Somboon Sangwongwanich  
Somchai Biansoongnern  
Somchai Hiranvarodom  
Somchat Jiriwibhakorn  
Sommart Sang-Ngern  
Somnida Ratanapanachote  
Sompongse Toomsawasdi  
Somporn Sirisumranmukul  
Somsak Walairacht  
Somying Thainimit  
Somyot Kaitwanidvilai  
Songkran Kantawong  
Songphol Kanjanachuchai  
Suchada Sitjongsataporn  
Suchada Tantisatirapong  
Suchart Yammen  
Sumate Naetiladdanon

**Affiliation**

Sripatum University  
Thammasat University  
National Electronics and Computer Technology Center  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
National Electronics and Computer Technology Center  
Chiang Mai University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Suan Dusit Rajabhat University  
Srinakharinwirot University  
Kasetsart University  
Kasetsart University  
Khon Kean University  
South-East Asia University  
Chiang Mai University  
Chulalongkorn University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahanakorn University of Technology  
Mahidol University  
Siam University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Kasetsart University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok University  
Chulalongkorn University  
Mahanakorn University of Technology  
Srinakharinwirot University  
Naresuan University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มท. มทม.  
The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า  
ครั้งที่ 33

**Reviewer**

Sumrit Hungsasutra  
Suneat Pranonsatit  
Suntorn Witosurapot  
Supakit Chotigo  
Supakorn Siddhichai  
Supaporn Kiattisin  
Supatana Auethavekiat  
Supavadee Aramvith  
Supawan Phonphitakchai  
Suphattra Phetnil  
Surachai Chaitusaney  
Surachai Limyingcharoen  
Surakarn Duangphasuk  
Surapan Airphaiboon  
Suratose Tritilanunt  
Suree Pumrin  
Surin Khomfoi  
Suthee Rukkaphan  
Suwat Pattaramalai  
Tanin Duangjan  
Tanit Malakorn  
Tasanee Chayavanich  
Teeravisit Laohapensaeng  
Thanadol Pritranan  
Thanapat Promwattanapakdee  
Thanaphat Sittithumwat  
Thanapong Suwanasri  
Thavatchai Tayjasanant  
Thawatchai Thangrattanasuwan  
Theekapun Charoenpong  
Theerapol Muankhaw  
Theerayod Wiangtong

**Affiliation**

Khon Kaen University  
Kasetsart University  
Prince of Songkla University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
National Electronics and Computer Technology Center  
University of the Thai Chamber of Commerce  
Chulalongkorn Univeristy  
Chulalongkorn University  
Naresuan University  
Mahanakorn University of Technology  
Chulalongkorn University  
Khon Kaen University  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahidol University  
Chulalongkorn University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Kasem Bundit University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Srinakharinwirot University  
Naresuan University  
King Mongkut's University of Tecnology Thonburi  
Mahahakorn University of Technology  
Mahidol University  
Sripatum University  
Siam University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Chulalongkorn University  
Prince of Songkla University  
Srinakharinwirot University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Mahanakorn University of Technology



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มช. มทม.  
The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า  
ครั้งที่ 33

Reviewer	Affiliation
Theerayut Janjaem	Kasem Bundit University
Toempong Phetchakul	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Ukrit Watchareeruetai	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Varakorn Kasemsuwan	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Varathana Arjrith	Srinakharinwirot University
Vech Vivek	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Veerachai Malyavej	Mahanakorn University of Technology
Viboon Chunkag	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Vichai Saelee	South-East Asia University
Vijit Kinnares	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Virasit Imtawil	Khon Kaen University
Virote Pirajanchai	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Vladimir Buntilov	Mahidol University
Vorapong Silaphan	Mahanakorn University of Technology
Wanchai Chankaipol	Sripatum University
Wanchai Chimchavee	University of the Thai Chamber of Commerce
Wanchai Pijitrojana	Thammasat University, Rangsit Campus
Wanchak Lenwari	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Wannarat Suntiamornut	Prince of Songkla University
Warawat Tangsrianugul	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Warayut Kampeerawat	Mahanakorn University of Technology
Watcharachai Wiriyasuttiwong	Srinakharinwirot University
Weerapun Rungseevijitprapa	Chulalongkorn University
Wekin Piyarat	Srinakharinwirot University
Werapon Chiracharit	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Wichian Premchaiswadi	Siam University
Wichit Krueasuk	Sripatum University
Wijittra Petchakit	Walailak University
Wiklom Teerapabkajorndet	Prince of Songkla University
Wilaiporn Lee	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Wipavan Narksarp	Siam University
Wisut Titiroongruang	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มช. มทม.  
The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า  
ครั้งที่ 33

**Reviewer**

Wongwit Senavongse  
Worakarn Wongsachua  
Wuthiporn Loetwassana  
Yatongchai Auychai  
Yodchanan Wongsawat  
Yongyuth Naras  
Youthana Kulvitit  
Yuttapong Jiraraksoyakun

**Affiliation**

Srinakharinwirot University  
Ubon Ratchathani University  
Mahanakorn University of Technology  
Rajamangala University of Technology Isan Sakhon Nakhon Campus  
Mahidol University  
Siam University  
Chulalongkorn University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi



## PW 18

วันศุกร์ที่ 3 ธันวาคม 2553 เวลา 13.00 - 14.40 น.

ห้อง : Duangtawan Grand

ประธานกลุ่มย่อย : ผศ.ดร.ชาวี ชมภูอินใจ

### PW-090 เวลา 13.00 - 13.20 น.

การวิเคราะห์การระบายอากาศที่เหมาะสมสำหรับห้องปรับอากาศเพื่อการประหยัดพลังงานโดยใช้ระบบควบคุมการระบายอากาศอัตโนมัติ

ธนภัทร พรหมวัฒน์ภักดี พศวีร์ ศรีโหมก และ กิรติ ชะงูตศิริ

บทความนี้เป็นงานนำเสนอการออกแบบและสร้างชุดควบคุมพัดลมระบายอากาศสำหรับห้องปรับอากาศ เพื่อแก้ปัญหาการระบายอากาศเกินความจำเป็นออกจากห้องปรับอากาศที่ไม่เหมาะสมกับจำนวนคนที่อยู่ในห้อง การระบายอากาศดังกล่าวได้นำความเย็นออกจากห้องไปโดยทำให้เครื่องปรับอากาศมีการทำความเย็นมากขึ้น ต้นแบบชุดควบคุมพัดลมระบายอากาศอัตโนมัติใช้หลักการตรวจจับจำนวนคนที่อยู่ในห้องเพื่อเป็นข้อมูลในการควบคุมการทำงานของพัดลมระบายอากาศให้เป็นไปตามมาตรฐานการระบายอากาศ ชุดควบคุมพัดลมระบายอากาศประกอบไปด้วย ชุดตรวจจับจำนวนคนเข้าออก ชุดตรวจจับความเคลื่อนไหว และชุดปรับความเร็วพัดลม การทำงานจะเริ่มเมื่อมีคนเข้ามาในห้อง โดยจะนิยามจำนวนคนตรวจจับจำนวนคนที่เข้าออกห้องแสดงผลออกทาง 7 Segment และส่งผลไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งให้วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์พัดลมระบายอากาศทำงาน ซึ่งสามารถปรับอัตราการระบายอากาศได้ 4 ระดับ ที่สอดคล้องกับจำนวนคนในห้องและจะมีการตรวจสอบความเคลื่อนไหวภายในห้อง เมื่อไม่มีความเคลื่อนไหวเกิดขึ้นพัดลมระบายอากาศก็จะหยุดการทำงานทันที จากการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมที่อุณหภูมิภายใน 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 60% อุณหภูมิภายนอก 35 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 80% พบว่าการปรับระดับการระบายอากาศ สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากการระบายอากาศอื่นที่ถึงได้ประมาณ 5%

### PW-091 เวลา 13.20 - 13.40 น.

การประเมินคุณค่า และผลกระทบของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพของระบบผลิตไฟฟ้า

ชนัญญา วรรณคำ และ บัณฑิต เชื้ออารักษ์

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพกำลังพัฒนาและนำมาใช้มากขึ้นในปัจจุบัน บทความนี้นำเสนอวิธีการประเมินคุณค่าของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงาน และผลกระทบที่มีต่อความเชื่อใจได้ของระบบผลิตไฟฟ้า โดยจะอาศัยข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ย ประกอบกับการกระจายตัวของข้อมูลความเร็วลมแบบเวเบอร์สกี เพื่อประมาณค่าความเร็วลมในช่วงเวลาที่ต่าง ๆ แล้วจึงนำค่าที่ประมาณได้ไปใช้ในการแปลงค่าเป็นกำลังผลิตไฟฟ้าตามช่วงเวลาที่เราสนใจ จากนั้นจึงนำไปใช้ประเมินคุณค่าและผลกระทบต่อระบบผลิตไฟฟ้า ความวิธีการพื้นฐานของความน่าจะเป็น วิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปใช้เพื่อกำหนดแนวทางส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานของไทยต่อไป

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### PW-092 เวลา 13.40 - 14.00 น.

การศึกษาระบบวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW

ปณิศา แสงแก้ว และ บุญชิง ปลั่งกลาง

งานวิจัยนี้ดี พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม Matlab เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ขนาดกำลังไฟฟ้า 1.2 kW และได้ทำการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการชนิด เมมเบรน แลกเปลี่ยน โปรตอน (PEMFC) ขนาด 1.2 kW 46A โดยประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น จะขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซไอโครเจน อุณหภูมิการทำงาน อัตราการไหลของอากาศและก๊าซไอโครเจน และความชื้นของอากาศ ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทดลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการซึ่งในสภาวะให้โหลด แรงดันขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่า 97.21% กำลังงานที่ได้ของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่า 100% แต่ในขณะที่โหลดสูงสุด แรงดันขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่า 90.19% กำลังงานที่ได้ของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่า 83.61% เมื่อเทียบกับแบบจำลอง เพื่อทราบหลักการการทำงานในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งพบว่าความดันของก๊าซไอโครเจนมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง และการทดลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### PW-093 เวลา 14.00 - 14.20 น.

Development of a new Program for Design and Analysis of PV Hybrid System for Target Area in Thailand

Surasak Noisabtim and Boonyang Plangklang

This paper presents the development of a new software program for the Design and Analysis the PV-Hybrid system for Thailand that never published anywhere before. The Utility of this software is finding of sizing and categorizing of optimal system in target area of Thailand. In this paper, we use hourly simulation technique methods. The first step in sizing, the long term duration of sunshine data recorded for five years are used to calculate the daily mean maximum duration sunshine in a year. These data are used to estimate the global radiation on horizontal surface from linear relation in Angstrom equation. Next, the calculated radiation data is used as initial input to system. Finally, we solve sizing of PV hybrid system by linear programming model. The reliability level is measured in term of loss of load probability (LOLP).

### PW-094 เวลา 14.20 - 14.40 น.

การออกแบบวงจรจ่ายแบริ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 2 ลิโวลต์ สำหรับกับแทม

วัชร สุทธิอนุวัฒน์ และ บัณฑิต ณีเยี่ยมณี

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรจ่ายแบริ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 2 ลิโวลต์ สำหรับกับแทม ซึ่งออกแบบให้วงจรมีอัตราเร็วได้สภาวะแรงดันศูนย์ ทำให้สามารถลดความสูญเสียขณะสวิตช์เปลี่ยนสภาวะจากไม่นำกระแสเป็นนำกระแส ทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น โดยวงจรสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตได้ในช่วงกว้าง นอกจากนี้ยังมีการแยกจากกันทางไฟฟ้าและใช้อุปกรณ์น้อย จากผลการออกแบบและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice แสดงให้เห็นว่า วงจรที่ออกแบบสามารถสวิตช์ภายใต้สภาวะแรงดันศูนย์ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงและรองรับแรงดันอินพุตได้ในช่วงกว้าง (90-240 โวลต์) พร้อมทั้งแสดงพฤติกรรมการทำงานของวงจรและสามารถใช้ผลการจำลองการทำงานในการกำหนดที่ติดตั้งอุปกรณ์ได้



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มห. มทม.  
The 33rd Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT

การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW

Study and analysis of 1.2 kW PEMFC Electrification

ปณิดดา แสงแก้ว, บุญยงค์ ปลั่งกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

โทร. 086-8963741, 0-2549-3420 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail: panudda09@hotmail.com, pboonyang@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม MathLab เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ขนาดกำลังไฟฟ้า 1.2 kW และได้ทำการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการชนิด เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ขนาด 1.2 kW 46A โดยประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น จะขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซไฮโดรเจน อุณหภูมิการทำงาน อัตราการไหลของอากาศและก๊าซไฮโดรเจน และความชื้นของอากาศ ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทดลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการซึ่งในสภาวะไร้โหลด แรงดันขาคอกของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่า 97.21% กำลังงานที่ได้ของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่า 100% แต่ในขณะมีโหลดสูงสุดแรงดันขาคอกของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่า 90.19% กำลังงานที่ได้ของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่า 83.61% เมื่อเทียบกับแบบจำลอง เพื่อทราบหลักการการทำงานในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งพบว่าความดันของก๊าซไฮโดรเจนมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง และการทดลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

คำหลัก เซลล์เชื้อเพลิง, แบบจำลอง เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน, ประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง

Abstract

This paper is to study a performance of PEMFC by developing a model of PEMFC using MATLAB as well as to set up an experiment of PEMFC 1.2 kW, 46A. All aspects of PEMFC electrification were fully investigated in order to develop the alternative sustainable PEMFC energy sources and to study the fundamental principles of fuel cell technology. Moreover, the calculation of operation performance of PEM by real-time recorded data was implemented. The results show that the operation performance of fuel cell depended on pressure, temperature, gas flow rate and humidity. The results showed the comparison of both

results that control system performance in the aspect of these parameters was evaluated. The control system performance was determined by comparing the fuel cell power, on test station and model simulation. The output voltage level could vary from 97.21% (at no load) to about 90.19% (at the full load). The power level could vary from 100% (at no load) to about 83.61% (at the full load) compared to simulation result.

Keywords: Fuel cell, PEMFC, Exchange membrane fuel cell, Efficiency of PEMFC

1. บทนำ

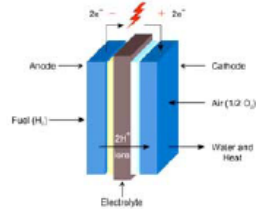
พลังงานและมลพิษเป็นปัญหาที่ร้ายแรงที่สุดในโลก ในขณะนี้ บางครั้งวิกฤตการณ์ของโลกอาจทำให้ประเทศไทยมีผลกระทบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพราะปัจจุบันความต้องการทางด้านไฟฟ้าของประชาชนในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในอนาคตอันใกล้เซลล์เชื้อเพลิงที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันก็กำลังจะหมดไป และราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น พลังงานใหม่และพลังงานสะอาดจึงถูกนำมาพิจารณาเพื่อทดแทนและลดการเกิดมลภาวะต่าง ๆ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งในอนาคต ที่จะนำมาทำเป็นพลังงานไฟฟ้า

การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ขนาด 1.2 kW โดยการปรับอัตราการไหลของบี๊มลม, ทดลม, เครื่องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ ในสภาวะโหลดคงที่, โหลดตัวแปร (วิเคราะห์ผลกระทบชั่วคราว) และระยะยาว ทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลด (เพื่อทดสอบสมการความร้อนของสแต็ค) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง ผลที่ได้ก็จะขึ้นอยู่กับการควบคุมอินพุตค่าต่าง ๆ ซึ่งก็สามารถได้ผลการทดลองเป็นไปในทางเดียวกับข้อมูลจำลอง [1]

2. ทฤษฎี

เซลล์เชื้อเพลิง คืออุปกรณ์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนด้วยกระบวนการ "Electrochemical" โดยการรวมตัวกันระหว่างเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ (ไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ โพรเพน) และอากาศ (ออกซิเจน) ผลของกระบวนการดังกล่าวจะทำให้ได้น้ำซึ่งเป็น

เสมือนไอเสียของระบบด้วย เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตรงเท่าที่มีเชื้อเพลิงป้อนให้ระบบ ไม่ต้องการการประจุใหม่เหมือนแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการแปลงรูปพลังงานที่สูงกว่าเทคโนโลยีการแปลงรูปพลังงานอื่น ๆ ที่ใช้กันอยู่ การทำงานปราศจากการเผาไหม้จึงไม่มีมลพิษ ไม่มีการเคลื่อนไหวของอุปกรณ์



รูปที่ 1: ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (Ref:

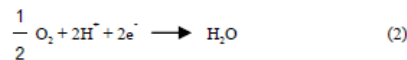
BALLARD Power to charge the world)

หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแลกเปลี่ยนโปรตอนเริ่มต้นจากการอัดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) เข้าสู่ขั้วบวกของเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้ความดันเพื่อให้อนุภาควิ่งปฏิกิริยาไปได้หลังจากก๊าซไฮโดรเจน ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาไปแล้วจะทำการปล่อยอะตอมขั้วบวก (H+) ไปสู่ขั้วลบของเซลล์เชื้อเพลิง และปล่อยอิเล็กตรอน (e-) ผ่านขั้วออกมาไปสู่ระบบวงจรภายนอกเพื่อสร้างกระแสและย้อนกลับสู่ขั้วลบของ เซลล์เชื้อเพลิง สำหรับออกซิเจนจะถูกดันผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นกันแต่ผ่านทางขั้วลบแทน โดยทำหน้าที่ดึงอะตอมของ H+ ผ่านชั้นเมมเบรนเข้ามา และรับอิเล็กตรอนอิสระ (e-) จากวงจรภายนอก แล้วทำปฏิกิริยากันได้ผลิตภัณฑ์คือ โมเลกุลของน้ำ (H<sub>2</sub>O) ดังรูปที่ 1

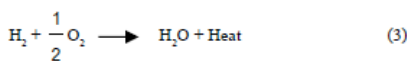
ปฏิกิริยาเคมีของขั้วแอโนด



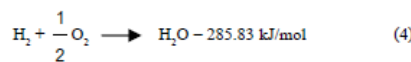
ปฏิกิริยาเคมีระหว่างขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาเคมีรวม



ปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาที่ปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งความร้อนหรือเอนทัลปีของการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ปล่อยออกมาจากระบบ คือ ผลต่างระหว่างความร้อนของการเกิดผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้น ซึ่งความร้อนของการเกิดสารผลิตภัณฑ์ (น้ำ) จากปฏิกิริยาเคมีข้างต้นมีค่าเท่ากับ -285.83 kJ/mol และค่าความร้อนของการเกิดสารตั้งต้น (ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน) มีค่าเท่ากับ 0 kJ/mol ทำให้สมการที่ (3) สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ (4)



ในทางทางด้านเซลล์เชื้อเพลิง พลังงานที่ปล่อยออกมาจากระบบ จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยปริมาณทางอุณหพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงดังสมการที่ (5)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (5)$$

โดยที่ H คือ ค่าเอนทัลปี, S คือ ค่าเอนโทรปี, และ G คือ ค่าพลังงานอิสระของกิบส์

สำหรับงานทางไฟฟ้าที่ได้รับจะอยู่ในรูปของประจุไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (6)

$$W_e = qE \quad (6)$$

$$q = n_e N_{ox} q_e \quad (7)$$

โดยที่ W<sub>e</sub> คือ ค่างานทางไฟฟ้า, q คือ ค่าประจุ, E คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, n<sub>e</sub> คือ ค่าจำนวนอิเล็กตรอนต่อโมเลกุล H<sub>2</sub> = 2, N<sub>ox</sub> คือ ค่าจำนวนโมเลกุลต่อโมล = 6.022 x 10<sup>23</sup> และ F คือ ค่าฟาราเดย์ = 96,485

ดังนั้นงานทางไฟฟ้าหาได้จากสมการที่ (8) และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy), ΔG ได้ดังสมการที่ (9)

$$W_e = n_e F E \quad (8)$$

$$W_e = -\Delta G \quad (9)$$

จากสมการที่ (8) และ (9) สามารถจัดรูปใหม่ และเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และ Gibbs free energy, ΔG ดังสมการที่ (10)

$$E = \frac{-\Delta G}{n_e F} \quad (10)$$

$$E = \frac{237,340 \text{ J/mol}}{2 \times 96,485 \text{ A.s/mol}}$$

$$E = 1.23 \text{ volts}$$

สำหรับศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) ของก๊าซเชื้อเพลิง ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา และกระแสไฟฟ้าที่ถูกดึง เมื่อนำแต่ละเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรม แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นตามจำนวนชั้นของเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกัน กระแสไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันขึ้นกับขนาดของพื้นที่ทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง คุณสมบัติของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน

## 2.1 ปฏิกิริยาขั้วแม่เหล็ก (Polarization Characteristics)

เป็นความคิดในอุดมคติว่า แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในภาวะที่ดีที่สุดตามทฤษฎีควรจะเป็น 1.2 V หากแต่ในความเป็นจริง เซลล์เชื้อเพลิงจะสำเร็จเมื่อได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุดจากผลผลิตเมื่อสูบน้ำวน ไครอร์และแรงดันไฟฟ้าก็จะต่ำลง เมื่อวัดจุดที่ได้อิมพีแดนซ์ตัวเองถูกเรียกว่า Polarization โดยจะแสดงให้เห็นผ่านกราฟ โพลาริเซชัน



2.2 ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัว

เซลล์เชื้อเพลิงในการดำเนินงานจริงนั้นจะเป็นระบบที่ผันกลับไม่ได้ หรือโดยทั่วไปมักเรียกว่า กระบวนการโพลาริเซชัน (Polarization) เป็นภาวะที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการตามความเป็นจริงมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี หรือเกิดค่าแรงดันไฟฟ้าเกินตัวที่ต้องนำมาหักลบ โดยแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้อาจเขียนได้ดังสมการ

$$V = E_{thermo} - \Delta E_{act} - \Delta E_{ohmic} - \Delta E_{conc} \quad (11)$$

โดยที่  $E_{thermo}$  คือศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน หรือศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี,  $\Delta E_{act}$  คือศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาริเซชันเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี,  $\Delta E_{ohmic}$  คือศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า,  $\Delta E_{conc}$  คือ ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาริเซชันเนื่องจากการถ่ายโอนมวล โดยศักย์ไฟฟ้าเกินตัวทั้ง 3 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_{thermo} = E_{thermo}^0 - \left[ \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \times \sqrt{P_{O_2}}} \right) \right] \quad (12)$$

โดยที่  $E_{thermo}^0$  คือค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์เชื้อเพลิง, R คือค่าคงที่สัมประสิทธิ์ของแก๊ซ, T คืออุณหภูมิ หน่วยของเคลวิน, n คือจำนวนของอิเล็กตรอนต่อโมเลกุล, F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์,  $P_{H_2O}$  คือค่าความดันของน้ำ,  $P_{H_2}$  คือค่าความดันของไฮโดรเจน,  $P_{O_2}$  คือค่าความดันของออกซิเจน

โพลาริเซชันเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Activation Polarization) เป็นการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ศักย์ไฟฟ้าส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับการขับเคลื่อนปฏิกิริยาเคมี เขียนได้ดังสมการ

$$\Delta E_{act} = \left( \frac{RT}{\alpha F} \right) \ln \left( \frac{i + i_{loss}}{i_0} \right) \quad (13)$$

โดยที่  $\alpha$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาเคมี,  $i_{loss}$  คือค่ากระแสสูญเสีย,  $i_0$  คือค่าความหนาแน่นของกระแส,  $i$  คือค่าความหนาแน่นของกระแสที่ออกแบบ

โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic Polarization) คือการสูญเสียเนื่องมาจากความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดและเมมเบรน

$$\Delta E_{ohmic} = i(R_{ohmic}) \quad (14)$$

โดยที่  $R_{ohmic}$  คือค่าความต้านทานสูญเสีย

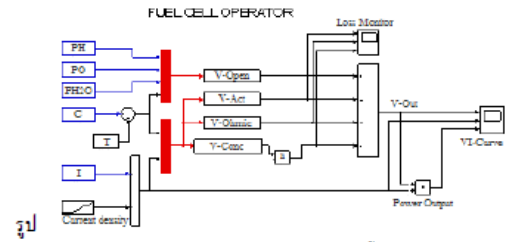
โพลาริเซชันเนื่องจากการถ่ายโอนมวล (Mass transport or Concentration Polarization) คือการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานอันเกิดจากความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ลดต่ำลงเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส เพราะสารถูกใช้ในอัตราที่สูง แต่การถ่ายเทมวลสารเข้าไปทำปฏิกิริยาเป็นไปได้น้อย

$$\Delta E_{conc} = \left( \frac{RT}{nF} \right) \ln \left( \frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (15)$$

โดยที่  $i_L$  คือค่าความหนาแน่นของกระแสจำกัด, และ  $i$  คือค่าความหนาแน่นของกระแสที่ออกแบบ

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นการพัฒนาบนพื้นฐานของสมการแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้อาจเขียนได้ดังสมการในรูปที่ 2 แสดงโครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงใน MATLAB



รูปที่ 2: โครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง

Parameters	Value
R (J/mol K)	8.3144
F (C/mol, R)	96,500
N	2
$\alpha$	15
$P_{H_2}$ (bar)	1.25
$P_{O_2}$ (bar)	0.16
$i_0$ (A)	$6.54 \times 10^{-7}$
$i_L$ (A)	$230 \times 10^{-7}$

4. วัตถุประสงค์ และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) ขนาด 1.2 kW, 46 A ยี่ห้อ Nexa™ Power Module User's Manual รุ่น MAN5100078 ดังรูปที่ 3

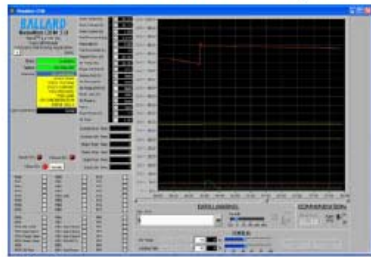


รูปที่ 3: การติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ ของ Module ที่ทำการทดสอบ เปิดคอมพิวเตอร์ โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application เพื่อบันทึกข้อมูลการ



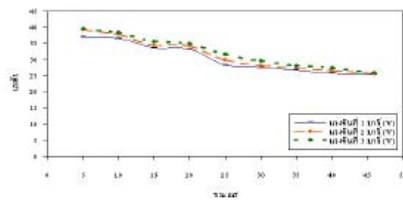


ทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำการทดสอบ ดังรูปที่ 4



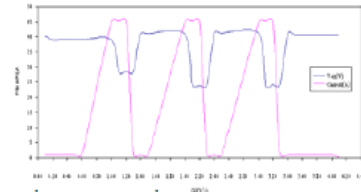
รูปที่ 4: โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application

### 5. ผลการทดลอง



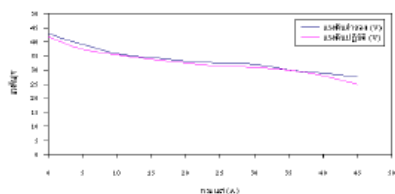
รูปที่ 5: ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง

จากผลการทดลองในรูปที่ 5 เมื่อเพิ่มกระแสขึ้นครั้งละ 5 A โดยปรับความดันของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 บาร์ จนถึง 3 บาร์ จะส่งผลทำให้ค่าแรงดันที่ได้จะแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่ของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าระบบที่มีความดันต่ำกว่า



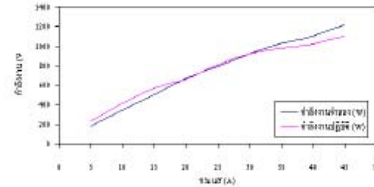
รูปที่ 6: แสดงการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบฉับพลัน

จากผลการทดลองในรูปที่ 6 เมื่อมีการป้อนกระแสที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว จาก 1 A เป็น 46 A ที่เวลาทุก 10 วินาที ทำให้แรงดันที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่จึงเกิดการกระเพื่อมของค่าแรงดัน



รูปที่ 7: การเปรียบเทียบแรงดันระหว่างแบบจำลองกับผลปฏิบัติ

จากผลการทดลองในรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ ซึ่งผลที่ได้ในสภาวะไร้โหลดในแบบจำลองมีค่า 43 V ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 41.8 V และในสภาวะมีโหลดสูงสุดในแบบจำลองมีค่า 27.5 V ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 24.8 V ซึ่งผลในทางปฏิบัติจะมีค่า error มากกว่า ในแบบจำลอง ซึ่งเกิดจากค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง



รูปที่ 8: แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ

จากผลการทดลองในรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ ซึ่งผลที่ได้ในการปรับกระแสเริ่มต้นที่ 5 A ในแบบจำลองมีค่า 180 W ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 230 W และในสภาวะมีโหลดสูงสุดในแบบจำลองมีค่า 1,220 W ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 1,020 W ซึ่งผลในทางปฏิบัติจะมีค่า error มากกว่า ในแบบจำลอง ซึ่งเกิดจากค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง

### 6. สรุป

จากการศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ในงานวิจัยนี้ พบว่าความดันของไฮโดรเจนมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งในขณะไร้โหลดแรงดันจะมีค่า 90.70% แต่ในขณะมีโหลดสูงสุด แรงดันมีค่า 76.92% เมื่อเทียบกับแรงดันตามทฤษฎี และทดสอบการเปลี่ยนโหลดของเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไร้โหลด แรงดันจะมีค่า 97.21%, กำลังงานมีค่า 100% แต่ในขณะมีโหลดสูงสุด แรงดันจะมีค่า 90.19%, กำลังงานจะมีค่า 83.61% เมื่อเทียบกับแบบจำลอง

#### เอกสารอ้างอิง

1. Alejandro J. del Real, Alicia Arce, Carlos Bordons, 2007, "Development and experimental validation of a PEM fuel cell dynamic model", Journal of Power Sources 173(2007) 310-324.



นางปมิดดา แสงแก้ว นักศึกษาปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลองหลวง งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับเรื่องพลังงาน



ดร.นุชอึ้ง ปลั่งกลาง สำเร็จการศึกษา ปริญญาเอก จาก University of Kassel, Germany ปัจจุบันเป็นอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี





[หน้าหลัก](#) [การแสดงผลงาน](#) [กำหนดการสำคัญ](#) [BECOME A SPONSORSB](#) [ติดต่อเรา](#)

You are here: [Home](#)

search...

- [ภาษาไทย](#) [English](#)
- [ความเป็นมา](#)
- [สารจากประธาน](#)
- [กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ](#)
- [กรรมการจัดงาน](#)
- [โปรแกรมการประชุม](#)
- [การแสดงผลงาน](#)
- [กำหนดการสำคัญ](#)
- [การลงทะเบียน Online](#)
- [การลงทะเบียน](#)
- [SOCIAL PROGRAM](#)
- [สถานที่จัดงาน](#)
- [ติดต่อเป็น SPONSOR](#)
- [ติดต่อเรา](#)
- [Download](#)
- [Download เอกสาร Present](#)

## เศรษฐกิจสร้างสรรค์ (CREATIVE ECONOMY)

**ขอเชิญผู้สนใจเข้าร่วมประชุม **WS** โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย\*\***

การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3 (3<sup>rd</sup> RMUTCON) และการประชุมวิชาการนานาชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 2 (2<sup>nd</sup> RMUTIC)

**"การพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในยุคเศรษฐกิจสร้างสรรค์"**

ระหว่างวันที่ 23-26 พฤศจิกายน 2553

ณ ศูนย์ประชุมสถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ ดอนเมือง กรุงเทพฯ

**\*\* ไม่ได้รับเอกสารการประชุม**

### ประกาศ

- [กำหนดการนำเสนอผลงาน](#) [Update!](#)
- [ผลงานนำเสนอ \(ภาคบรรยาย\)](#) [Update!](#)
- [ผลงานนำเสนอ \(ภาคโปสเตอร์\)](#) [Update!](#)

**หมายเหตุ** เนื่องจาก กลุ่มที่ 2 มีบทความที่ได้รับคัดเลือกการนำเสนอเป็นจำนวนมาก จึงได้จัดตารางการบรรยายเพิ่มเติมใน กลุ่มที่ 1 วันพฤหัสบดีที่ 25 พฤศจิกายน 2553 เวลา 15.20 – 17.00 น.

## ประกาศ! ผลการตอบรับบทความวิจัย (คลิก)

### และรายละเอียดการชำระเงิน (คลิก)

"เศรษฐกิจสร้างสรรค์ (Creative Economy)" กำลังสร้างการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในเศรษฐกิจไทย ในอนาคตอันใกล้ ทั้งนี้เศรษฐกิจสร้างสรรค์มีองค์ประกอบของแนวคิดการขับเคลื่อนเศรษฐกิจบนพื้นฐานของการใช้องค์ความรู้ การศึกษา การสร้างสรรค์งาน และการใช้ทรัพยากรทางปัญญา ที่เชื่อมโยงกับรากฐานทางวัฒนธรรม การส่งเสริมนวัตกรรมของสังคม และเทคโนโลยีนวัตกรรมสมัยใหม่

การพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในยุคเศรษฐกิจสร้างสรรค์จึงนับได้ว่าเป็นพื้นฐานสำคัญในการขับเคลื่อน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเพื่อสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับสินค้าและ ผลิตภัณฑ์ ตลอดจนกระบวนการผลิตในโลกยุคไร้พรมแดน การศึกษาค้นคว้าวิจัย เพื่อสร้างเทคโนโลยี และ นวัตกรรมสมัยใหม่ จะเป็นกุญแจสู่ความสำเร็จของการพัฒนาดังกล่าว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีก 8 แห่งได้แก่

- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

กรรมการพิจารณาบทความวิจัย (Peer-reviewer)

สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ (วิศวกรรมศาสตร์ สถาปัตยกรรมศาสตร์)			
1. ศ.ดร. ประดิษฐ์	เทอดทูล	16. ศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภพ
2. ศ.ดร. ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	17. รองศาสตราจารย์ ดร. โกสินทร์	จำนงไทย
3. ศ.ดร. สมชาติ	โสภณเรณฤทธิ์	18. รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย	ธีรจจา
4. ศ.ดร. ปิยะสาร	ประเสริฐธรรม	19. รองศาสตราจารย์ ดร. วรา	วราวิทย์
5. ศ.ดร. ผดุงศักดิ์	รัตนเดโช	20. รองศาสตราจารย์ ดร. วีระเชษฐ	ยันเงิน
6. ศ.ดร. ยงคิมล	เลณบุรี	21. รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิศ	เบญจางคประเสริฐ
7. รศ.ดร. วิบูลย์	ชินนัยก	22. รองศาสตราจารย์ ดร. พันธุ์ปิติ	เปี่ยมสง่า
8. รศ.ดร. ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	23. รองศาสตราจารย์ ดร. จุรีรัตน์	ดวงเดือน
9. รศ.ดร. วิจิตร	กิลนเรศ	24. นายรณฤทธิ์	ธนโกเศศ
10. รศ.ดร. สุรศักดิ์	สงวนพงษ์	25. รศ. สมสิน	วางขุนทด
11. รศ.ดร. ธนบูรณ์	ศศิภาณเดช	26. รองศาสตราจารย์วีระ	รอดสัมฤทธิ์
12. รศ.ดร. ปาเมณัส	ศิริสมบูรณ์	27. รศ. ดร. นิรัช	สุดสังข์
13. รศ.ดร. มานพ	ตันตระบัณทิตย	28. รศ. ดร. ทิพัฒน์	ธีรณวัฒน์ชชากร
14. รศ.ดร. รุ่งเรือง	กาลศิริศิลป์	29. รศ.ดร. ขาวสวน	กาญจนาโนทัย
15. รศ.ดร. จิตต์ลัดดา	ศักดิ์ภพานิชย์	30. รศ.ดร. อนุวัฒน์	ศิริวัฒน์

สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ			
1. รศ.ดร. สุนัยรัตน์	ศรีเปารยะ	11. รศ.ดร. ประเสริฐ	สุทธิประสิทธิ์
2. รศ.ดร. สมพร	ณ นคร	12. รศ.วดีนา	จันทร์ศิริ
3. รศ.ดร. กิตติมา	มันทรานนท์	13. รองศาสตราจารย์ ดร. เกษม	สร้อยทอง
4. รศ.ดร. เตือนดา	ชาญศิลป์	14. รองศาสตราจารย์เฉษฎา	อิสหะ
5. รศ.ดร. สุวัจน์	ธัญรส	15. รศ. สาระ	สวัสดิ์โยธิน
6. รศ.ดร. อัญชลี	สงวนพงษ์	16. รศ. พงศ์วิษร	สิริจันทร์วงศ์
7. รศ.ดร. วุฒิพร	พรหมขุนทอง	17. รศ. ภราดร	เพิ่มทรัพย์
8. รศ.ดร. มุกดา	สุขสวัสดิ์	18. รศ. วีระ	ผดุงพจน์
9. รศ.ดร. ประพฤติ	พรหมสมบูรณ์	19. รศ. นิพนธ์	สุรียานิติกุล
10. รศ.ดร. รัชต์	ด้านดำรงรักษ์	20. รศ. ดร. พรหมระพี	อานวยสิทธิ์

สาขาสังคมศาสตร์ การศึกษาและอื่นๆ			
1. รศ.ดร. ชนกรณ	กุลทลบุตร	11. รศ.ดร. วรพงศ์	วราชาติอุคมพงศ์
2. รศ.ดร. อัศวิน	พรหมโสภา	12. รศ.ดร. อุษภาพร	เสวกวิ
3. รศ.ดร. คารณ	ศรีน้อย	13. รศ.ดร. เกียรติศักดิ์	พันธ์ลำเจียก
4. รศ.ดร. วรณภา	โพธิ์น้อย	14. รศ.ดร. สุดใจ	ทูลพานิชย์กิจ
5. รศ.ดร. พรหมทิพย์	ศิริวรรณบุศย์	15. รศ.ดร. มาษะ	ขัดตะสังคะ
6. รศ.ดร. อาริต	ธรรมโน	16. รศ.กอบกุล	ปราบประชา
7. รศ.ดร. สุนัย	ภาศจำรูญ	17. รศ. โยธิน	แสงวงดี
8. รศ.ดร. กิ่งพร	ทองใบ	18. รองศาสตราจารย์ ดร.จินดา	ขันทอง
9. รศ.ดร. สำอาง	สืบสาน	19. รองศาสตราจารย์ ดร.จิตตินันท์	เดชะคุปต์
10. รศ.ดร. วรทิพย์	มีมาก	20. รองศาสตราจารย์ ดร. วิไลดา	เดชะเวช
11. รศ. ทนงศักดิ์	วันชัย	21. รศ. ดร. สนั่น	การค้า
12. รศ.ดร. นิยม	วงศ์พงศ์คำ	22. รศ. ดร. ธาธิ์	พงศ์สุพัฒน์
13. รศ.ดร. นิรัช	สุดสังข์	23. รศ. ดร. อรุณี	

# การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW

## Study and analysis of 1.2 kW PEMFC Electrification

### ปัทมา แสงแก้ว และ มุขัยง ปลั่งกลาง

**บทคัดย่อ** งานวิจัยนี้ได้ พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม MathLab เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ขนาดกำลังไฟฟ้า 1.2 kW และได้ทำการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการชนิด เมมเบรน แลกเปลี่ยน โปรตอน (PEMFC) ขนาด 1.2 kW 46A โดยประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น จะขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซไฮโดรเจน อุณหภูมิการทำงาน อัตราการไหลของอากาศและก๊าซไฮโดรเจน และความชื้นของอากาศ ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทดลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการซึ่งในสภาวะไร้โหลด แรงดันขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่า 97.21% กำลังงานที่ได้ของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่า 100% แต่ในขณะมีโหลดสูงสุดแรงดันขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่า 90.19% กำลังงานที่ได้ของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่า 83.61% เมื่อเทียบกับแบบจำลอง เพื่อทราบหลักการทำงานในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งพบว่าความดันของก๊าซไฮโดรเจนมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง และการทดลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

**คำสำคัญ** เซลล์เชื้อเพลิง, แบบจำลอง เมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน, ประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง



### 1. บทนำ

พลังงานและมลพิษเป็นปัญหาที่ร้ายแรงที่สุดในโลก ในขณะนี้ บางครั้งวิกฤตการณ์ของโลกอาจทำให้ประเทศไทยมีผลกระทบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพราะปัจจุบันความต้องการทางด้านไฟฟ้าของประชาชนในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในอนาคตอันใกล้เชื้อเพลิงที่มีใช้ในปัจจุบันก็กำลังจะหมดไป และราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น พลังงานใหม่และพลังงานสะอาดจึงถูกนำมาพิจารณาเพื่อทดแทนและลดการเกิดมลภาวะต่าง ๆ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งในอนาคต ที่จะนำมาทำเป็นพลังงานไฟฟ้า

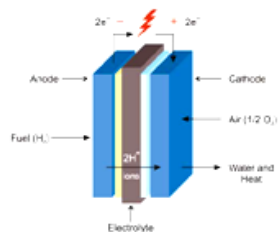
เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงถึง 50-70% สำหรับการเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้า และ 90% เมื่อรวมพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ และเซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และปัจจุบันการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงยังเป็น

เพียงในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อการวิจัยและพัฒนา ซึ่งยังไม่มีการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ขนาดใหญ่เท่าใดนัก ทำให้ราคาเริ่มต้นของเซลล์เชื้อเพลิงยังคงสูงอยู่มาก [1]

การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ขนาด 1.2 kW โดยการปรับอัตราการใช้ของบีบลม, พัดลม, เครื่องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ ในสภาวะโหลดคงที่, โหลดตัวแปร) วิเคราะห์ผลกระทบชั่วคราว (และระยะยาว ทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลด) เพื่อทดสอบสมการความร้อนของสแต็ก (เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง ผลที่ได้ก็จะขึ้นอยู่กับการควบคุมอินพุตค่าต่าง ๆ ซึ่งก็สามารถได้ผลการทดลองเป็นไปในทางเดียวกับข้อมูลจำลอง [2]

เซลล์เชื้อเพลิง คืออุปกรณ์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนด้วยกระบวนการ "Electrochemical" โดยการรวมตัวกันระหว่างเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ)ไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ โพรเพน (และ

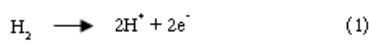
อากาศ) ออกซิเจน (ผลของกระบวนการดังกล่าวยังทำให้ได้น้ำซึ่งเป็นเสมือนไอเสียของระบบด้วย เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีเชื้อเพลิงป้อนให้ระบบ ไม่ต้องการการประจุใหม่เหมือนแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการแปลงรูปพลังงานที่สูงกว่าเทคโนโลยีการแปลงรูปพลังงานอื่น ๆ ที่ใช้กันอยู่ การทำงานปราศจากการเผาไหม้จึงไม่มีมลพิษ ไม่มีการเคลื่อนไหวของอุปกรณ์



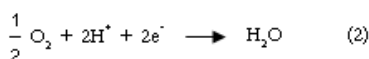
รูปที่ 1: ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (Ref: BALLARD Power to charge the world)

หลักการทำงาน ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแลกเปลี่ยนโปรตอนเริ่มต้นจากการอัดก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) (เข้าสู่ขั้วบวกของเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้ความดันเพื่อให้ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาไปได้ หลังจากก๊าซไฮโดรเจน ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาไปแล้วจะทำการปล่อยอะตอม ขั้วบวก (H+) ไปสู่ขั้วลบของเซลล์เชื้อเพลิง และปล่อยอิเล็กตรอน (e-) ผ่าน ขั้วออกมาไปสู่ระบบวงจรภายนอกเพื่อสร้างกระแสและย้อนกลับสู่ขั้วลบของ เซลล์เชื้อเพลิง สำหรับออกซิเจนจะถูกดันผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นกันแต่ผ่านทางขั้วลบแทน โดยทำหน้าที่ดึงอะตอมของ H+ ผ่านชั้นเมมเบรนเข้ามา และรับอิเล็กตรอนอิสระ (e-) จากวงจรภายนอก แล้วทำปฏิกิริยากัน ได้ผลลัพธ์คือ โมเลกุลของน้ำ (H<sub>2</sub>O) ดังรูปที่ 1

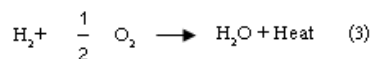
ปฏิกิริยาเคมีของขั้วแอโนด



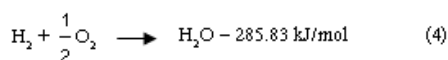
ปฏิกิริยาเคมีระหว่างขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาเคมีรวม



ปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาที่ปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งความร้อนหรือเอนทาลปีของการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ปล่อยออกมาจากระบบ คือ ผลต่างระหว่างความร้อนของการเกิดผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้น ซึ่งความร้อนของการเกิดสารผลิตภัณฑ์น้ำ (จากปฏิกิริยาเคมีข้างต้นมีค่าเท่ากับ -285.83 kJ/mol และค่าความร้อนของการเกิดสารตั้งต้น) ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน (มีค่าเท่ากับ 0 kJ/mol ทำให้สมการที่ (3) สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ (4)



ในงานทางด้านเซลล์เชื้อเพลิง พลังงานที่ปล่อยออกมาจากระบบ จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยปริมาณทางอุณหพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงาน ของเซลล์เชื้อเพลิงดังสมการที่ (5)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (5)$$

โดยที่ H คือ ค่าเอนทาลปี, S คือ ค่าเอนโทรปี, และ G คือ ค่าพลังงานอิสระของกิบส์

สำหรับงานทางไฟฟ้าที่ได้รับจะอยู่ในรูปของประจุไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (6)

$$W_a = qE \quad (6)$$

$$q = n_e N_{\text{mol}} q_e \quad (7)$$

โดยที่ W<sub>a</sub> คือ ค่างานทางไฟฟ้า, q คือ ค่าประจุ, E คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, n<sub>e</sub> คือ ค่าจำนวนอิเล็กตรอนต่อโมเลกุล H<sub>2</sub> = 2, N<sub>mol</sub> คือ ค่าจำนวน โมเลกุลต่อโมล = 6.022 x 10<sup>23</sup> และ F คือ ค่าฟาราเดย์ = 96,485

ดังนั้นงานทางไฟฟ้าหาได้จากสมการที่ (8) และ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy), ΔG ได้ดังสมการที่ (9)

$$W_a = n_e F E \quad (8)$$

$$W_a = -\Delta G \quad (9)$$

จากสมการที่ (8) และ (9) สามารถจัดรูปใหม่ และเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และ Gibbs free energy,  $\Delta G$  ดังสมการที่ (10)

$$E = \frac{-\Delta G}{n_e F} \quad (10)$$

$$E = \frac{237,340 \text{ J/mol}}{2 \times 96,485 \text{ A.s/mol}}$$

$$E = 1.23 \text{ volts}$$

สำหรับศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) ของก๊าซเชื้อเพลิง ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา และกระแสไฟฟ้าที่ถูกดึง เมื่อนำแต่ละเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรมแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นตามจำนวนชั้นของเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกัน กระแสไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันขึ้นกับขนาดของพื้นที่ทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง คุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน

ปฏิกิริยาขั้วแม่เหล็ก (Polarization Characteristics) เป็นความคิดในอุดมคติว่า แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในภาวะที่ดีที่สุดตามทฤษฎีควรจะเป็น 1.2 V หากแต่ในความเป็นจริง เซลล์เชื้อเพลิงจะสำเร็จเมื่อได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุดจากผลผลิต เมื่อสื่อนำวงโคจร และแรงดันไฟฟ้าก็จะต่ำลง เมื่อวัตถุดับที่เพิ่มขึ้น สิ่งเหล่านี้เองถูกเรียกว่า Polarization โดยจะแสดงให้เห็นผ่านกราฟโพลาริเซชัน

ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัวเซลล์เชื้อเพลิงในการดำเนินงานจริงนั้นจะเป็นระบบที่ผันกลับไม่ได้ หรือโดยทั่วไปมักเรียกว่า กระบวนการโพลาริเซชัน (Polarization) เป็นภาวะที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการตามความเป็นจริงมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี หรือเกิดค่าแรงดันไฟฟ้าเกินตัวที่ต้องนำมาหักลบ โดยแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง ( $V_{cell}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$V = E_{\text{theoretical}} - \Delta E_{\text{act}} - \Delta E_{\text{ohmic}} - \Delta E_{\text{conc}} \quad (11)$$

โดยที่  $E_{\text{theoretical}}$  คือศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน หรือศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี,  $\Delta E_{\text{act}}$  คือศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจาก โพลาริเซชันเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี,  $\Delta E_{\text{ohmic}}$  คือศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า,  $\Delta E_{\text{conc}}$  คือศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาริเซชันเนื่องจากการถ่ายโอนมวล โดยศักย์ไฟฟ้าเกินตัวทั้ง 3 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_{\text{theoretical}} = E_{\text{theoretical}}^0 - \left[ \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}}{P_{\text{H}_2\text{O}} \times \sqrt{P_{\text{O}_2}}} \right) \right] \quad (12)$$

โดยที่  $E_{\text{theoretical}}^0$  คือค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์เชื้อเพลิง,  $R$  คือค่าคงที่สัมประสิทธิ์ของก๊าส,  $T$  คืออุณหภูมิ หน่วยองศาเคลวิน,  $n$  คือจำนวนของอิเล็กตรอนต่อโมเลกุล,  $F$  คือค่าคงที่ของฟาราเดย์,  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  คือค่าความดันของน้ำ,  $P_{\text{H}_2}$  คือค่าความดันของ  $\text{H}_2$ ,  $P_{\text{O}_2}$  คือค่าความดันของ  $\text{O}_2$

โพลาริเซชันเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Activation Polarization) เป็นการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ศักย์ไฟฟ้าส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับการขับเคลื่อนปฏิกิริยาเคมี เขียนได้ดังสมการ

$$\Delta E_{\text{act}} = \left( \frac{RT}{\alpha F} \right) \ln \left( \frac{i + i_{\text{loss}}}{i_0} \right) \quad (13)$$

โดยที่  $\alpha$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาเคมี,  $i_{\text{loss}}$  คือค่ากระแสสูญเสีย,  $i_0$  คือค่าความหนาแน่นคงที่ของกระแส,  $i$  คือค่าความหนาแน่นของกระแสที่ออกแบบ

โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic Polarization) คือการสูญเสียเนื่องมาจากความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดและเมมเบรน

$$\Delta E_{\text{ohmic}} = i(R_{\text{ohmic}}) \quad (14)$$

โดยที่  $R$  คือค่าความต้านทานสูญเสีย

โพลาริเซชันเนื่องจากการถ่ายโอนมวล (Mass

transport or Concentration Polarization) คือการสูญเสียเนื่องจากแรงต้านทานอันเกิดจากความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ลดต่ำลงเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแส เพราะสารถูกใช้ในอัตราที่สูง แต่การถ่ายเทมวลสารเข้าไปทำปฏิกิริยาเป็นไปได้อีก

$$\Delta E_{conc} = \left( \frac{RT}{nF} \right) \ln \left( \frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (15)$$

โดยที่  $i_L$  คือค่าความหนาแน่นของกระแสจำกัด , และ  $i$  คือค่าความหนาแน่นของกระแสที่ออกแบบ

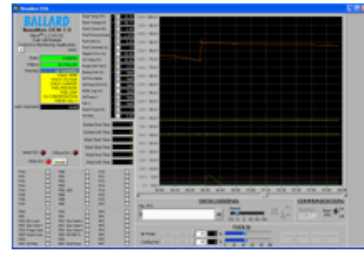
## 2. วิธีการวิจัย

ได้ศึกษาการทำงาน ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) ขนาด 1.2 kW, 46 A ยี่ห้อ Nexa™ Power Module User's Manual รุ่น MAN5100078 ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2: การติดตั้งส่วนประกอบต่างๆ ของ Module ที่ทำการทดสอบ

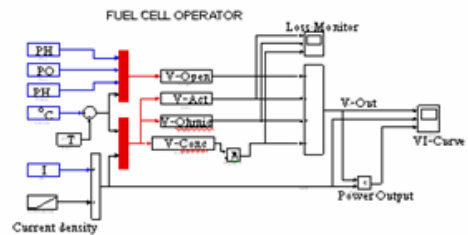
เปิดคอมพิวเตอร์ โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application เพื่อบันทึกข้อมูลการทำงาน ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำการทดสอบ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3: โปรแกรม BALLARD Nexa Mon OEM 2.0 Control & Monitoring Application

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง



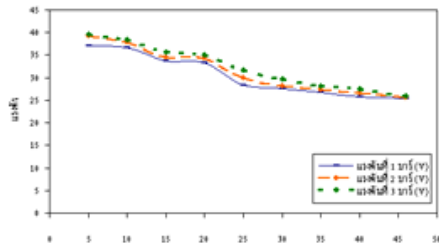
เป็นการพัฒนาบนพื้นฐานของสมการแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง ( $V_{cell}$ ) ซึ่งในรูปที่ 4 แสดงโครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงใน MATLAB

รูปที่ 4: โครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง

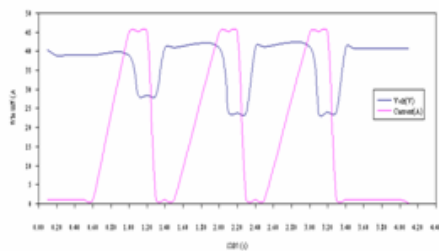
Parameters	Value
R (J/mol K)	8.3144
F (C/mol, E)	96,500
N	2
$\alpha$	15
$P_{H_2}$ (bar)	1.25
$P_{O_2}$ (bar)	0.16
$i_0$ (A)	$6.54 \times 10^{-5}$
$i_L$ (A)	$230 \times 10^{-5}$

### 3. ผลและการอภิปรายผล



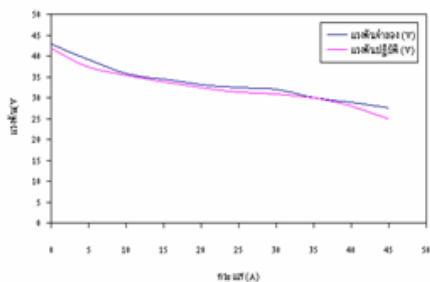
รูปที่ 5: ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง

จากผลการทดลองในรูปที่ 5 เมื่อเพิ่มกระแสขึ้นครั้งละ 5 A โดยปรับความดันของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 บาร์ จนถึง 3 บาร์ จะมีผลทำให้ค่าแรงดันที่ได้จะแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่ของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าระบบที่มีความดันต่ำกว่า



รูปที่ 6: แสดงการเปลี่ยนแปลงโวลต์แบบจับพลัด

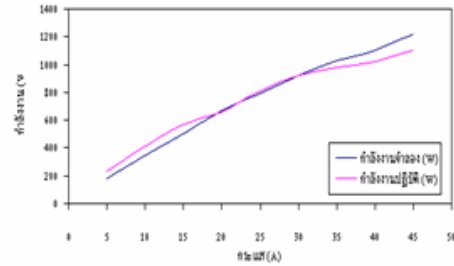
จากผลการทดลองในรูปที่ 6 เมื่อมีการป้อนกระแสที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว จาก 1 A เป็น 46 A ที่เวลาทุก 10 วินาที ทำให้แรงดันที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่ซึ่งเกิดการกระเพื่อมของค่า



แรงดัน

รูปที่ 7: การเปรียบเทียบแรงดันระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ

จากผลการทดลองในรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ ซึ่งผลที่ได้ในสภาวะไร้โหลดในแบบจำลองมีค่า 43 V ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 41.8 V และในสภาวะมีโหลดสูงสุดในแบบจำลองมีค่า 27.5 V ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 24.8 V ซึ่งผลในทางปฏิบัติจะมีค่า error มากกว่า ในแบบจำลอง ซึ่งเกิดจากค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง



รูปที่ 8: แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ

จากผลการทดลองในรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ ซึ่งผลที่ได้ในการปรับกระแสเริ่มต้นที่ 5 A ในแบบจำลองมีค่า 180 W ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 230 W และในสภาวะมีโหลดสูงสุดในแบบจำลองมีค่า 1,220 W ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 1,020 W ซึ่งผลในทางปฏิบัติจะมีค่า error มากกว่า ในแบบจำลอง ซึ่งเกิดจากค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง

### 4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรน แลกเปลี่ยนโปรตอน ในงานวิจัยนี้ พบว่าความดันของไฮโดรเจนมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งในขณะที่ไร้โหลด แรงดันจะมีค่า 90.70% แต่ในขณะที่มีโหลดสูงสุด แรงดันมีค่า 76.92% เมื่อเทียบกับแรงดันตามทฤษฎี และทดสอบการเปลี่ยน โวลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไร้โหลด แรงดัน จะมีค่า 97.21%, กำลังงานมีค่า 100% แต่ในขณะที่มีโหลดสูงสุด แรงดัน จะมีค่า 90.19%, กำลัง



งานจะมีค่า 83.61% เมื่อเทียบกับแบบจำลอง

- เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงถึง 50 – 70% สำหรับ การเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้าและ 90% เมื่อรวมพลังงานความร้อนที่ผลิตได้
- เซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ระบบคอมพิวเตอร์ ศูนย์กระจายข่าว ศูนย์สื่อสารศูนย์ประมวลผลข้อมูล โรงงานอุตสาหกรรม รถยนต์ส่วนบุคคล รถโดยสารเครื่องบิน ใช้ในพื้นที่หรือเขตที่มีมาตรฐานของการปลอดภัยมลพิษที่เข้มงวด และพื้นที่ที่ไม่มีไฟฟ้าใช้

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] นิพนธ์ เกตุจ้อย ,วัฒนพงษ์ รัชวิเชียร และ สุชาติ นาทกรณกุล ,“เซลล์เชื้อเพลิง: เทคโนโลยีพลังงานสำหรับอนาคต”,Naresuan University Journal.
- [2] Alejandro J. del Real, Alicia Arce, Carlos Bordons, 2007, “Development and experimental validation of a PEM fuel cell dynamic model”, Journal of Power Sources 173(2007) 310-324.
- [3] P.Thounthong and P.Sethakul,“Fuel Cell Power Generator” , in EECON 29 : 2549.
- [4] Winai Chanpeng and Yottana Khunatom “Simulation of Dynamic Behavior of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell”, International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009.
- [5] I. Sadli \*, P. Thounthong, J.-P. Martin, S. Ra'el, B. Davat “Behaviour of a PEMFC supplying a low voltage static converter”, Journal of Power Sources xxx(2005).



การประชุมวิชาการ  
**เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย**  
ครั้งที่ 6



5-7 พฤษภาคม 2553  
ณ โรงแรมฮอลิเดย์อินน์ รีสอร์ท ธีเจนท์ บีช ะอำ จ. เพชรบุรี  
จัดโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

## การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6

จัดโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

### ที่ปรึกษา

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
รองคณบดีฝ่ายวิจัยและสารสนเทศ

รองคณบดีฝ่ายวิชาการ  
รองคณบดีฝ่ายนวัตกรรมและบริการวิชาการ

รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา  
รองคณบดีฝ่ายกิจการนิสิต

### บรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์

### ผู้ช่วยบรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.อารีย์ ศุภสุธีกุล

อาจารย์ ดร.วิษชากร จารุศิริ

### ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์  
รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร

รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ

### มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ศาสตราจารย์ ดร.ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลขวัญ นามสงวน

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย นิยมมล

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสภณรณฤทธิ์  
รองศาสตราจารย์ ดร.สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวีร์ กาศยปนนันท์  
รองศาสตราจารย์ วารุณี เตีย

รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ นาถกรณกุล  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษกานา กูบาฮา  
อาจารย์ ดร.พัฒนา รักความสุข

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข

### มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย มณีวรรณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ เกตุจ้อย

### มหาวิทยาลัยบูรพา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวิณี ตักศิสุนทรศิริ

อาจารย์ณรงค์ อึ้งกิมบัวน

### มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญพร เลิศสถิตธนกร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด

### มหาวิทยาลัยศิลปากร

รองศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รองศาสตราจารย์ ดร. ธนัชชัย กุลวรรณิขพงษ์

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร. สุภชาติ จงโพลอย์พัฒนะ

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุลเชษฐ เพียรทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อำไพศักดิ์ ทีบุญญา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รองศาสตราจารย์ ดร. สมิตี เอี่ยมสอาด

อาจารย์ ดร. นุภาพ แยมไตรพัฒน์

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตีเกะ บุนนาค

อาจารย์ อำนาจ ผดุงศิลป์

อาจารย์ ดร. สโรชา เจริญวัย

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

อาจารย์ ดร. ชลธิศ เอี่ยมวรพณีกุล

มหาวิทยาลัยรังสิต

รองศาสตราจารย์ ดร. พินิจ งามสม

อาจารย์ ดร. วรณีย์ เอกศิลป์

ผู้ทรงคุณวุฒิภายในมหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล นามล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัญชา คังตระกูล

อาจารย์ ดร. ประชา บุญยวานิชกุล

อาจารย์ ดร. พิชพันธ์ เจริญพงษ์

อาจารย์ ดร. อาจรี สุกสุภกุล

อาจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วัชรชัย วิริยะสุทธีวงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฐมทัศน์ จิระเดชะ

อาจารย์ ดร. กิตติ สถาพรประสาธน์

อาจารย์ ดร. ธนาธิป สุขอิม

อาจารย์ ดร. กุริภัท สุนทรนนท์

อาจารย์ ดร. นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เกียรติชัย รักษาชาติ

อาจารย์ นิตต์อลิน พันธุ์อภัย

ผู้ประสานงาน

นิษา ช้วนน้ำ

วนิดา วรรณติกุล

จัดพิมพ์โดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ถ.รังสิต-องครักษ์ ต.องครักษ์ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

โทรศัพท์ 02-649-5000 ต่อ 2034 โทรสาร 037-322-601

พิมพ์ครั้งที่ 1 เมษายน 2553 จำนวนพิมพ์ 300 เล่ม

ISBN 978-616-7299-23-5

ศิลปกรรมและออกแบบปกโดย

ศิริเพ็ญ พิลาคุณ

**วันพุธที่ 5 พฤษภาคม 2553**

**ห้อง ROOM 2 : พลังงานทดแทน**

**ประธาน : ผศ.ดร.นิพนธ์ เกตุจ้อย**

13:00	ENETT6-1055	การผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากซีลีเนียมไม่สึกโดยแก๊สพีเคเซนไอน้ำ โดยใช้ถ่านหินที่ผ่านการชะเต้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เจริญ ต๊ะโปง และ สุภรินทร์ ไชยกลางเมือง
13:20	ENETT6-1057	การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะพลาสติกและยางด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ธนิษฐ์ วงศ์ศิริอำนาจ สุภาพร แสงศรีจันทร์ สุวรรณา ใจตุ้ย และ พัชรินทร์ ตาด่วง
13:40	ENETT6-1058	การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับกระบวนการผลิต แก๊สชีวมวล นำพร ปัญญาใหญ่ สุพัตรา ชายป่า และ อนุรัตน์ ภักดีสันติพงศ์
14:00	ENETT6-1060	การศึกษาแนวทางที่เหมาะสมในการผลิตและใช้เชื้อเพลิงเม็ดจากใบอ้อยและวัสดุที่ เหลือจากการเกษตร ศิริวรุฒ สาระพันธ์ และ รัชพล สันติวารการ
14:20	ENETT6-1186	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสะสมพลังงานความร้อนสำหรับโรงผลิตไฟฟ้า แบบรางพาราโบลาขนาด 10 โดยใช้ NaCl เป็นตัวกลาง พิเศษ ตู่กลาง ศราวุฒ วัณพวงษ์ รัชนีวิเชียร และ สุขฤดี สุขใจ

**ห้อง ROOM 2: พลังงานทดแทน**

**ประธาน : ดร.วิรัชชัย ไธยนรินทร์**

15:00	ENETT6-1078	การประเมินศักยภาพและทดสอบกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า: กรณีศึกษาจังหวัด นครพนม เมืองมนต์ เนตรหาญ นันทวัฒน์ วีระยุทธ และอำไพศักดิ์ ที่บุญมา
15:20	ENETT6-1084	การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW ปนัดดา แสงแก้ว และ บุญยัง ปลั่งกลาง
15:40	ENETT6-1086	การศึกษายัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของแผงรับความร้อนแบบหลอดแก้ว สุญญากาศชนิดท่อความร้อนด้วยวิธีไฟในอีลิเมนต์ จิรพงษ์ พงษ์สีทอง รัตนสุดา แนวเงินดี และ ทองพูล สังกะเพศ
16:00	ENETT6-1087	การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม วิซชากร จารุศิริ ชลสิทธิ์ กสิพล กิตติ สถาพรประสาธน์ และ ปฐมทัศน์ จิระเดชะ
16:20	ENETT6-1093	การอบแห้งแก๊นตะวันด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ เจริญพร เลิศสถิตธนกร

## การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW

### Study and analysis of 1.2 kW PEMFC Electrification

ปนัดดา แสงแก้ว, บุญยัง ปลั่งกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

โทร. 086-8963741, 0-2549-3420 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail: panudda09@hotmail.com, pboonyang@hotmail.com

Panudda Sangkaew, Boonyang Plangklang

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology, Klong 6,

Thanyaburi, Phatumthani 12110 Thailand. Tel: 0-2549-3420 Fax: 0-2549-3422 E-mail: panudda09@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบแบบจำลองด้วย MATLAB สำหรับทดสอบคุณลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง และได้ติดตั้งเพื่อทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการชนิด เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ขนาด 1.2 kW 46A โดยประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหลของก๊าซ และความชื้น บทความนำเสนอ การศึกษาและวิเคราะห์รวมทั้งการทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการซึ่งในสภาวะไร้โหลด แรงดันจะมีค่า 97.21% กำลังงานจะมีค่า 100% แต่ในขณะมีโหลดสูงสุดแรงดันจะมีค่า 90.19% กำลังงานมีค่า 83.61% เมื่อเทียบกับแบบจำลอง เพื่อทราบหลักการการทำงานในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่อยู่ในสภาวะใช้งานจริง เปรียบเทียบกับการทดลองของแบบจำลอง

คำหลัก เซลล์เชื้อเพลิง, PEMFC

#### Abstract

The paper develops a model of PEMFC by MATLAB and constructs a prototype of the operation control system of Proton Exchange Membrane Fuel Cell of 1.2 kW 46A. The study shows that the performance of fuel cell depends on pressure, temperature, gas flow rate and humidity. The control system performance in the aspect of these parameters is evaluated. The control system performance is determined by comparing between the fuel cell powers, on test station and model simulation. The output voltage level can vary from 97.21% (at no load) to about

90.19% (at the full load). The power level can vary from 100% (at no load) to about 83.61% (at the full load) compared simulation result. All aspects of PEMFC electrification will be fully investigated in order to develop the alternative sustainable PEMFC energy sources and to study the fundamental principles of fuel cell technology. Moreover, the calculation of operation performance of PEM by real-time recorded data will be implemented. The results will be compared between simulation result and experimental result.

Keywords: Fuel cell, PEMFC

#### 1. บทนำ

พลังงานและมลพิษเป็นปัญหาที่ร้ายแรงที่สุดในโลก ในช่วงนี้ บางครั้งวิกฤตการณ์ของโลกอาจทำให้ประเทศไทยมีผลกระทบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพราะปัจจุบันความต้องการทางด้านไฟฟ้าของประชาชนในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในอนาคตอันใกล้เซลล์เชื้อเพลิงที่มีอยู่ในปัจจุบันก็กำลังจะหมดไป และราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น พลังงานใหม่และพลังงานสะอาดจึงถูกนำมาพิจารณาเพื่อทดแทนและลดการเกิดมลภาวะต่าง ๆ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งในอนาคต ที่จะนำมาทำเป็นพลังงานไฟฟ้า

ดังนั้นจากการศึกษาจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาหลักการ ทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) เพื่อทดสอบและวิเคราะห์ผลต่าง ๆ รวมทั้ง ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง และเป็นแนวทางในการพัฒนาการนำไฮโดรเจนมาใช้สร้างระบบไฟฟ้าจาก เซลล์เชื้อเพลิง ให้จ่ายไฟฟ้าได้เหมาะสมกับประเทศได้ และเป็น พลังงานทางเลือกที่พึ่งพาตนเองแบบยั่งยืนได้

ENETT6-1084

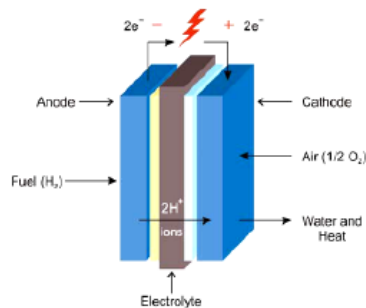
1/5

เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงถึง 50-70% สำหรับการเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้า และ 90% เมื่อรวมพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ และเซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และปัจจุบันการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงยังเป็นเพียงในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อการวิจัยและพัฒนา ซึ่งยังไม่มีการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่าใดนัก ทำให้ราคาเริ่มต้นของเซลล์เชื้อเพลิงยังคงสูงอยู่มาก [1]

การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ขนาด 1.2 kW โดยการปรับอัตราการไหลของบิมลัม, พัดลม, เครื่องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ ในสภาวะโหลดคงที่, โหลดตัวแปร(วิเคราะห์ผลกระทบชั่วคราว) และระยะยาว ทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลด (เพื่อทดสอบสมรรถนะความร้อนของสแต็ก) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง ผลที่ได้ก็จะขึ้นอยู่กับการควบคุมอินพุตค่าต่าง ๆ ซึ่งก็สามารถได้ผลการทดลองเป็นไปในทางเดียวกับข้อมูลจำลอง [2]

## 2. ทฤษฎี

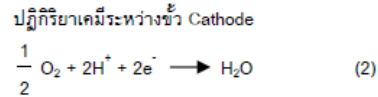
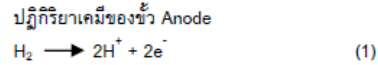
เซลล์เชื้อเพลิง คืออุปกรณ์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนด้วยกระบวนการ "Electrochemical" โดยการรวมตัวกันระหว่างเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ (ไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ โพรเพน) และอากาศ (ออกซิเจน) ผลของกระบวนการดังกล่าวยังทำให้ได้น้ำซึ่งเป็นเสมือนไอเสียของระบบด้วย เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องครบเท่าที่มีเชื้อเพลิงป้อนให้ระบบ ไม่ต้องการการประจุใหม่เหมือนแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการแปลงรูปพลังงานที่สูงกว่าเทคโนโลยีการแปลงรูปพลังงานอื่น ๆ ที่ใช้กันอยู่ การทำงานปราศจากการเผาไหม้จึงไม่มีมลพิษ ไม่มีการเคลื่อนไหวของอุปกรณ์



รูปที่ 1: ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (Ref: BALLARD Power to charge the world)

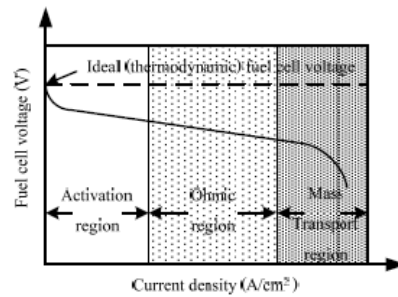
หลักการการทำงานของ PEM Fuel cell เริ่มต้นจากการอัด Hydrogen เข้าสู่ขั้วบวกของ Fuel cell โดยใช้ความดันเพื่อให้ผ่านตัว Catalyze ไปได้ หลังจาก Hydrogen ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาไปแล้วจะทำการปล่อยอะตอมของ H+ ไปสู่ขั้วลบของ Fuel cell และปล่อยอิเล็กตรอน (e-) ผ่านขั้วออกมาไปสู่ระบบวงจรภายนอกเพื่อสร้างกระแสและย้อนกลับสู่ขั้วลบของ Fuel cell สำหรับ Oxygen จะถูกดันผ่านตัว Catalyze เช่นกันแต่ผ่านทาง

ทางขั้วลบแทน โดยทำหน้าที่ดึงอะตอมของ H+ ผ่านชั้น membrane เข้ามา และรับอิเล็กตรอนอิสระ (e-) จากวงจรภายนอก แล้วทำปฏิกิริยากันได้ผลลัพธ์คือ โมเลกุลของน้ำ (H<sub>2</sub>O) ดังรูปที่ 1



## 2.1 ปฏิกิริยาขั้วแม่เหล็ก (Polarization Characteristics)

เป็นความคิดในอุดมคติว่า แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในภาวะที่ดีที่สุดตามทฤษฎีควรจะเป็น 1.2 V หากแต่ในความเป็นจริง เซลล์เชื้อเพลิงจะสำเร็จเมื่อได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุดจากผลผลิต เมื่อสื่อนำไอโครและแรงดันไฟฟ้าก็จะต้อง เมื่อวัดจุดที่ได้เพิ่มขึ้น สิ่งเหล่านี้เองถูกเรียกว่า Polarization โดยจะแสดงให้เห็นผ่านกราฟโพลาริเซชันดังรูปที่ 2



รูปที่ 2: ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต่อกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ชนิด PEM

## 2.2 ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัว

ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงรูปที่ 2 แสดงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้ากราฟที่ได้ประกอบด้วยสามส่วนหลักคือ

- ปรากฏการณ์กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
- ส่วนที่เป็นเชิงเส้นที่แรงดันตก มีสาเหตุจากความต้านทานภายใน
- ส่วนสุดท้ายคือพลังงานจลน์ในการแตกตัวของก๊าซผ่านอิเล็กโทรด กลายเป็นปัจจัยจำกัดทำให้แรงดันตกอย่างมาก

กราฟโพลาริเซชัน มีคุณสมบัติเป็นแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ โดยอัตราการไหลของกระแสไฟจะขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดทางไฟฟ้าที่วางตรงข้ามเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งความสำคัญของกราฟแรงดันต่อกระแส (Polarization curve) นี้จะแสดงถึงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากประสิทธิภาพเป็นอัตราส่วนโดยตรงของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์หารด้วย 1.2 V

เซลล์เชื้อเพลิงในการดำเนินงานจริงนั้นจะเป็นระบบที่ผันกลับไม่ได้ หรือโดยทั่วไปมักเรียกว่า กระบวนการโพลาริเซชัน (Polarization) เป็นภาวะที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการตาม

ความเป็นจริงมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี หรือเกิดค่าแรงดันไฟฟ้าเกินตัวที่ต้องนำมาหักลบ โดยแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง ( $V_{cell}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$V = E_{thermo} - \Delta E_{act} - \Delta E_{ohmic} - \Delta E_{conc} \quad (3)$$

โดยที่  $E_{thermo}$  คือศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน หรือศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี,  $\Delta E_{act}$  คือศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาริเซชันเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี,  $\Delta E_{ohmic}$  คือศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า,  $\Delta E_{conc}$  คือศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากโพลาริเซชันเนื่องจากการถ่ายโอนมวล โดยศักย์ไฟฟ้าเกินตัวทั้ง 3 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_{thermo} = E_{thermo}^0 - \left[ \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \times \sqrt{P_{O_2}}} \right) \right] \quad (4)$$

โดยที่  $E_{thermo}^0$  คือค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์เชื้อเพลิง, R คือค่าคงที่ลัมปรีของก๊าซ, T คืออุณหภูมิ หน่วยองศาเคลวิน, n คือจำนวนของอิเล็กตรอนต่อโมเลกุล, F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์,  $P_{H_2O}$  คือค่าความดันของน้ำ,  $P_{H_2}$  คือค่าความดันของไฮโดรเจน,  $P_{O_2}$  คือค่าความดันของออกซิเจน

โพลาริเซชันเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Activation Polarization) เป็นการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ศักย์ไฟฟ้าส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับกระบวนการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมี เขียนได้ดังสมการ

$$\Delta E_{act} = \left( \frac{RT}{\alpha F} \right) \ln \left( \frac{i + i_{loss}}{i_0} \right) \quad (5)$$

โดยที่  $\alpha$  คือค่าลัมปรีของปฏิกิริยาเคมี,  $i_{loss}$  คือค่ากระแสสูญเสีย,  $i_0$  คือค่าความหนาแน่นของกระแส,  $i$  คือค่าความหนาแน่นของกระแสที่ออกแบบ

โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic Polarization) คือการสูญเสียเนื่องมาจากความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดและเมมเบรน

$$\Delta E_{ohmic} = i(R_{ohmic}) \quad (6)$$

โดยที่ R คือค่าความต้านทานสูญเสีย

โพลาริเซชันเนื่องจากการถ่ายโอนมวล (Mass transport or Concentration Polarization) คือการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานอันเกิดจากความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ลดต่ำลงเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส เพราะสารถูกใช้ในอัตราที่สูง แต่การถ่ายเทมวลสารเข้าไปทำปฏิกิริยาเป็นไปได้อช้า

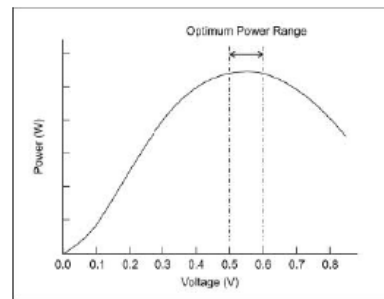
$$\Delta E_{conc} = \left( \frac{RT}{nF} \right) \ln \left( \frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (7)$$

โดยที่  $i_L$  คือค่าความหนาแน่นของกระแสจำกัด, และ  $i$  คือค่าความหนาแน่นของกระแสที่ออกแบบ

### 2.3 ลักษณะเฉพาะของพลังงาน (Power Characteristics)

พลังงานทางไฟฟ้าเป็นผลผลิตของความแตกต่างระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เนื่องจากกราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงได้ชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในทุกสภาพการทำงาน ทำให้เราสามารถนำกราฟโพลาริเซชันมาสร้างเป็นกราฟทางพลังงานอื่น ๆ ที่สอดคล้องกันได้อีก พลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงจะถูกแสดงเป็นกราฟ ซึ่งเกิดจากจุดใด ๆ ก็ตามที่อยู่บนเส้นโค้ง โดยเส้นโค้งจะสัมพันธ์กับมุมจาก ตามที่แสดงในกราฟรูปที่ 3

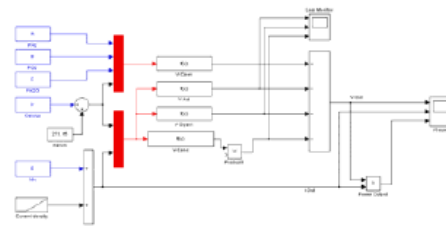
พลังงานสูงสุดที่ปรากฏจะอยู่ที่ประมาณ 0.5-0.6 V ซึ่งสูงพอประมาณกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ที่จุดสูงสุดแรงต้านภายในเซลล์จะเท่ากับแรงต้านภายนอกวงจร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อประสิทธิภาพพลดลงแต่ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจะต้องมีการแลกเปลี่ยนผลได้ผลเสียระหว่างพลังงานกับประสิทธิภาพที่สูง ผู้ออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องเลือกระดับระบบปฏิบัติการตามความต้องการว่าต้องการพลังงานหรือประสิทธิภาพมากกว่ากัน



รูปที่ 3: กราฟแสดงต้นแบบพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

### 3. แบบจำลอง MATLAB

แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นการพัฒนาบนพื้นฐานของสมการแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง ( $V_{cell}$ ) ซึ่งในรูปที่ 4 แสดงโครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงใน MATLAB



รูปที่ 4: โครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง

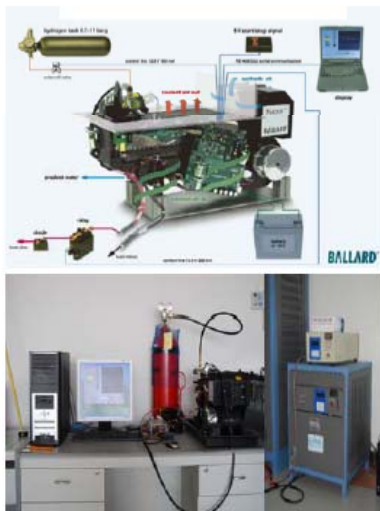


ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง

Parameters	Value
R (J/mol K)	8.3144
F (C/mol, R)	96,500
N	2
$\alpha$	15
P <sub>H<sub>2</sub></sub> (bar)	1.25
P <sub>O<sub>2</sub></sub> (bar)	0.16
i <sub>0</sub> (A)	6.54x10 <sup>-3</sup>
i <sub>L</sub> (A)	230x10 <sup>-3</sup>

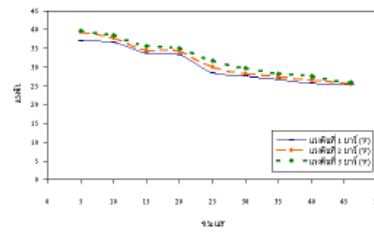
4. วัตถุประสงค์ และวิธีการทดลอง

Fuel Cell คือ อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนมาเป็นกระแสไฟฟ้า (electrochemical energy conversion device) โดยมันจะทำการแปรสภาพสาร Hydrogen (H<sub>2</sub>) และ Oxygen (O<sub>2</sub>) ให้กลายเป็นน้ำ (H<sub>2</sub>O) ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีการผลิตไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) ขนาด 1.2 kW ยี่ห้อ Nexa™ Power Module User's Manual รุ่น MAN5100078 ดังรูปที่ 5



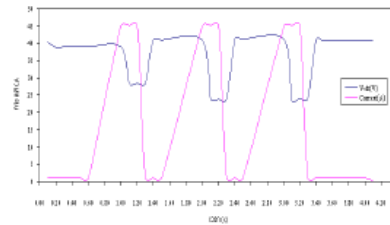
รูปที่ 5: การติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ ของ Module ที่ทำการทดสอบ

5. ผลการทดลอง



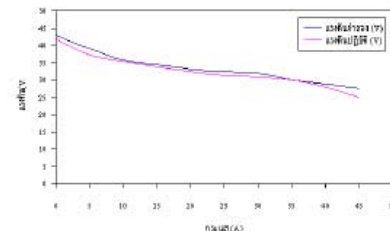
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง

จากผลการทดลองในรูปที่ 6 เมื่อมีค่ากระแสมากขึ้นจะมีผลทำให้ค่าแรงดันที่ได้จะแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่ของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าระบบที่มีความดันต่ำกว่า



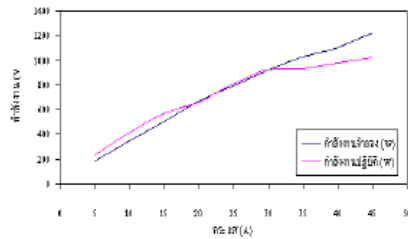
รูปที่ 7: แสดงการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบจัมป์

จากผลการทดลองในรูปที่ 7 เมื่อมีการป้อนกระแสที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว จาก 1 A เป็น 46 A ที่เวลาทุก 10 วินาที ทำให้แรงดันที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่จึงเกิดการกระเพื่อมของค่าแรงดัน



รูปที่ 8: แสดงการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ

จากผลการทดลองในรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ ซึ่งผลที่ได้ในสภาวะไร้โหลดในแบบจำลองมีค่า 43 V ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 41.8 V และในสภาวะมีโหลดสูงสุดแบบจำลองมีค่า 27.5 V ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 24.8 V ซึ่งผลในทางปฏิบัติจะมีค่า error มากกว่า ในแบบจำลอง ซึ่งเกิดจากค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง



รูปที่ 9: แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานระหว่างแบบจำลอง กับปฏิบัติ

จากผลการทดลองในรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ ซึ่งผลที่ได้ในการปรับกระแสเริ่มต้นที่ 5 A ในแบบจำลองมีค่า 180 W ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 230 W และในสภาวะมีโหลดสูงสุดในแบบจำลองมีค่า 1,220 W ส่วนในแบบปฏิบัติมีค่า 1,020 W ซึ่งผลในทางปฏิบัติจะมีค่า error มากกว่า ในแบบจำลอง ซึ่งเกิดจากค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง

## 6. สรุป

จากการศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM ในงานวิจัยนี้ พบว่า Pressure ของไฮโดรเจนมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งในขณะไร้โหลด แรงดันจะมีค่า 90.70% แต่ในขณะมีโหลดสูงสุด แรงดันมีค่า 76.92% เมื่อเทียบกับแรงดันตามทฤษฎี และทดสอบการเปลี่ยนโหลดของเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไร้โหลด แรงดันจะมีค่า 97.21%, กำลังงานจะมีค่า 100% แต่ในขณะมีโหลดสูงสุด แรงดันจะมีค่า 90.19%, กำลังงานจะมีค่า 83.61% เมื่อเทียบกับแบบจำลอง

เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงถึง 50 – 70% สำหรับ การเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้าและ 90% เมื่อรวมพลังงานความร้อนที่ผลิตได้

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ระบบคอมพิวเตอร์ ศูนย์กระจายข่าว ศูนย์สื่อสาร ศูนย์ประมวลผลข้อมูล โรงงานอุตสาหกรรม รถยนต์ส่วนบุคคล รถโดยสารเครื่องบิน ไซในพื้นทีหรือเขตที่มีมาตรฐานของการปล่อยมลพิษที่เข้มงวด และพื้นที่ที่ไม่มีไฟฟ้าใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. นิพนธ์ เกตุจ้อย, วัฒนพงษ์ รัชวีเชียร และ สุชฤดีนาถกรณกุล, "เซลล์เชื้อเพลิง: เทคโนโลยีพลังงานสำหรับอนาคต", Naresuan University Journal.
2. Alejandro J. del Real, Alicia Arce, Carlos Bordons, 2007, "Development and experimental validation of a PEM fuel cell

dynamic model", Journal of Power Sources 173(2007) 310-324.

3. P.Thounthong and P.Sethakul,"Fuel Cell Power Generator" , in EECON 29 : 2549.

4. Winai Chanpeng and Yottana Khunatom "Simulation of Dynamic Behavior of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell", International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009.

5. I. Sadli \* , P. Thounthong, J.-P. Martin, S. Ra"el, B. Davat "Behaviour of a PEMFC supplying a low voltage static converter", Journal of Power Sources xxx (2005).



School of Renewable Energy Technology  
SERT Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand



SERT Face book Society

The screenshot shows the SERT website (www.sert.nu.ac.th) with a navigation menu and a list of committee members. The list includes names and titles of individuals involved in the conference.

**คณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการ**

1. รศ.ดร.วิมลพงศ์ รักษาวิเชียร ประธานคณะกรรมการ
2. ศ.ดร.ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์
3. ดร.กอบศักดิ์ ศรีประภา
4. ดร.วีระชัย โรจนรินทร์
5. ดร.อนุสรณ์ แสงประจักษ์
6. ผศ.ดร.อชิศพล ศศิธรานุวัฒน์
7. ผศ.ดร.ณัฐภาณี ดุษฎี
8. คุณอำนาจ ทองสถิตย์
9. ผศ.ดร.สุรจิตร พรหมเมือง
10. ผศ.ดร.สุนทรินทร์ ดวนใหญ่
11. ดร.รวิภา นงประยูร
12. ผศ.ดร.สมภรณ์ สารสิทธิ์
13. ดร.เกษิณี เวเน็ชโซสง
14. รศ.ดร.สุรชัย มีจฉายัพ
15. รศ.ดร.วิภาณี สวงนเสรินทร์
16. ดร.สุชกดี สุขใจ
17. ผศ.ดร.นิพนธ์ เกตุจ้อย
18. ดร.พิชัยภูมิ วัฒนโชติ
19. ดร.ประทีปธำ ธนารักษ์
20. ผศ.ดร.ศราวุธ วิบูลย์

Copyright © 2009 All rights and reserved  
 School of Renewable Energy Technology, Naresuan University, E-mail: sert@nu.ac.th

ตารางการนำเสนอบทความ TREC 2				
รหัสบทความ	ชื่อบทความ	ผู้ส่งบทความ	วันและเวลานำเสนอ	สถานที่นำเสนอ
T01	แบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร	วสันต์ เพชรพิบูล ไพศาล บุญเยี่ยม ประมุข อุดมলেখกะ วารุณี ศรีสงคราม	22 ธ.ค 2552/ 11.15	Seminar 1
T02	โปรแกรมออกแบบและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแบบผสมผสานเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับพื้นที่เป้าหมายในประเทศไทย	สุรศักดิ์ น้อยทับทิม บุญยัง ปลั่งกลาง	22 ธ.ค 2552/ 11.45	Seminar 1
T03	การเตรียมวัสดุคาร์บอนไอทานเนตและไททานเนียมไดออกไซด์จากแร่ลูโคซีน ด้วยวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	สรพงษ์ ภวสุปรีย์ มณฑิยาชัย กลั่นบุบผา กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ธนกร วิรุฬห์หมามงคล สมหมาย ผิวสะอาด สิงห์โต สกุลเขมฤทัย จุไรรัตน์ ดวงเดือน นวตล เหล่าศิริพจน์	22 ธ.ค 2552/11.15	Seminar 2
T04	การเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเป็นพลังงานด้วยเครื่องยนต์สเตอร์ริง	สุวิทย์ ลวณะสกล พิสิษฐ มณีโชติ	22 ธ.ค 2552/11.45	Seminar 2
T05	การผลิตไบโอดีเซลจากถั่วเหลือง	คุณิศ บัวเกตุ	22 ธ.ค 2552/13.30	Seminar 1
T06	การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมความเร็วต่ำสำหรับชุมชน กรณีศึกษาจังหวัดพิษณุโลก	ย่ำพล สีดาดี ศรายุทธ ้วยวุฒิ	22 ธ.ค 2552/14.00	Seminar 1
T07	การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวกลางพลาสติกและตัวกลางไม่ใสต่อการผลิตก๊าซชีวภาพระดับครัวเรือน	สถาพร วันเทวิน ธนินัน เรืองรุ่งชัยกุล	23 ธ.ค 2552/13.00	Seminar 1
T08	การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW	ปนัดดา แสงแก้ว , บุญยัง ปลั่งกลาง	22 ธ.ค 2552/13.30	Seminar 2



## การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW

ปนัดดา แสงแก้ว , บุญยัง ปลั่งกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110  
โทร. 086-8963741, 0-2549-3420 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail:panudda09@hotmail.com,  
pboonyang@hotmail.com

### บทคัดย่อ

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นของมนุษย์ในโลกปัจจุบัน และทวีความสำคัญขึ้น เมื่อโลกยิ่งพัฒนา มากยิ่งขึ้น ความต้องการพลังงานก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย การใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานหลัก เช่น น้ำมันปิโตรเลียม ก็มีราคาสูงขึ้น ดังนั้นพลังงานทางเลือกในรูปแบบอื่น ๆ จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอนาคต เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ได้ เป็นที่ทราบ กันว่าเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้า-เคมี ที่เกิดขึ้นได้โดยไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่ง ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงยังมีใช้ไม่แพร่หลายมากนักและมีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการใช้งานใน อนาคตมากยิ่งขึ้น ซึ่งบทความนี้ จะศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (Proton Exchange Membrane) ขนาด 1.2 kW, 46 A เพื่อทราบหลักการทำงานในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์ เชื้อเพลิง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานและหาค่าความสูญเสียของเซลล์เชื้อเพลิงที่อยู่ใน สภาวะใช้งานจริง

**คำสำคัญ:** เซลล์เชื้อเพลิง; พลังงาน; การผลิตไฟฟ้า; การศึกษา; การวิเคราะห์

### 1. บทนำ

พลังงานและมลพิษเป็นปัญหาที่ร้ายแรงที่สุดในโลกในช่วงนี้ บางครั้งวิกฤตการณ์ของโลก อาจทำให้ประเทศไทยมีผลกระทบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพราะปัจจุบันความต้องการทางด้านไฟฟ้า ของประชาชนในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในอนาคตอันใกล้เชื้อเพลิงที่มี ใช้อยู่ในปัจจุบันก็กำลังจะหมดไป และราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น พลังงานใหม่และพลังงานสะอาดจึง ถูกนำมาพิจารณาเพื่อทดแทนและลดการเกิดมลภาวะต่าง ๆ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นพลังงาน ทางเลือกหนึ่งในอนาคต ที่จะนำมาทำเป็นพลังงานไฟฟ้า

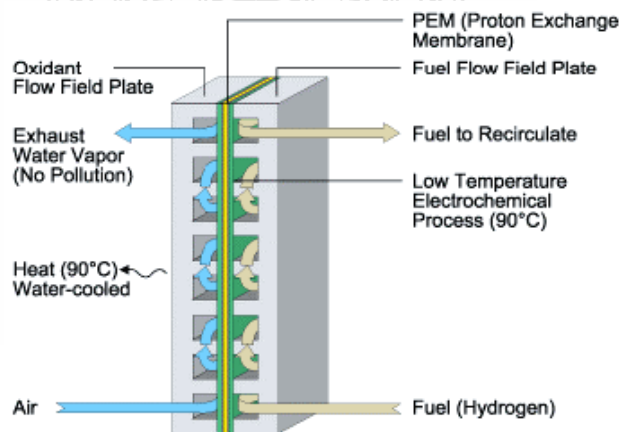
ดังนั้นจากการศึกษาจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) เพื่อทดสอบและวิเคราะห์ผลต่าง ๆ รวมทั้งประสิทธิภาพ ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง และเป็นแนวทางในการพัฒนาการนำไฮโดรเจนมาใช้สร้าง ระบบไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ให้จ่ายไฟฟ้าได้เหมาะสมกับประเทศได้ และเป็นพลังงานทางเลือก ที่พึ่งพาตนเองแบบยั่งยืนได้

เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงถึง 50–70% สำหรับการเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้า และ 90% เมื่อรวมพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ และเซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และปัจจุบันการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงยังเป็นเพียงในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อการวิจัยและพัฒนา ซึ่งยังไม่มีการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่าใดนัก ทำให้ราคาเริ่มต้นของเซลล์เชื้อเพลิงยังคงสูงอยู่มาก [1]

การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ขนาด 1.2 kW โดยการปรับอัตราการไหลของป้อนลม, พัดลม, เครื่องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ ในสภาวะโหลดคงที่, โหลดตัวแปร(วิเคราะห์ผลกระทบชั่วคราว) และระยะยาว ทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลด (เพื่อทดสอบสมการความร้อนของสแต็ก) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง ผลที่ได้ก็จะขึ้นอยู่กับการควบคุมอินพุตค่าต่าง ๆ ซึ่งก็สามารถได้ผลการทดลองเป็นไปในทางเดียวกับข้อมูลจำลอง [2]

## 2. ทฤษฎี

เซลล์เชื้อเพลิง คืออุปกรณ์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนด้วยกระบวนการ "Electrochemical" โดยการรวมตัวกันระหว่างเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ (ไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ โพรเพน) และอากาศ (ออกซิเจน) ผลของกระบวนการดังกล่าวยังทำให้ได้น้ำซึ่งเป็นเสมือนไอเสียของระบบด้วย เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องราบเท่าที่มีเชื้อเพลิงป้อนให้ระบบ ไม่ต้องการการประจุใหม่เหมือนแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการแปลงรูปพลังงานที่สูงกว่าเทคโนโลยีการแปลงรูปพลังงานอื่น ๆ ที่ใช้กันอยู่ การทำงานปราศจากการเผาไหม้จึงไม่มีมลพิษ ไม่มีการเคลื่อนไหวของอุปกรณ์



รูปที่ 1: ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

หลักการทำงานของ PEM Fuel cell เริ่มต้นจากการอัด Hydrogen เข้าสู่ขั้วบวกของ Fuel cell โดยใช้ความดันเพื่อให้ผ่านตัว Catalyze ไปได้ หลังจาก Hydrogen ผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาไปแล้วจะทำการปล่อยอะตอมขั้วบวก (H+) ไปสู่ขั้วลบของ Fuel cell และปล่อยอิเล็กตรอน (e-) ผ่านขั้วออกมาไปสู่ระบบวงจรภายนอกเพื่อสร้างกระแสและย้อนกลับสู่ขั้วลบของ Fuel cell สำหรับ

Oxygen จะถูกดันผ่านตัว Catalyze เช่นกันแต่ผ่านทางทางขั้วลบแทน โดยทำหน้าที่ดึงดูอะตอมของ H<sup>+</sup> ผ่านชั้น membrane เข้ามา และรับอิเล็กตรอนอิสระ ( e<sup>-</sup> ) จากวงจรภายนอก แล้วทำปฏิกิริยากันได้ผลลัพธ์คือ โมเลกุลของน้ำ (H<sub>2</sub>O)

ปฏิกิริยาเคมีของขั้ว Anode



ปฏิกิริยาเคมีระหว่างขั้ว Cathode



การรวมปฏิกิริยาเคมีระหว่างขั้ว Anode และขั้ว Cathode



ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานกลของแรงดันเอาต์พุตใน 1 เซลล์ สามารถคำนวณได้จาก Gibb's free energy change  $\Delta G$  (237 kJ/mol) และค่าสแตนด์ตาร์ดของจุดทำงาน (25°C)

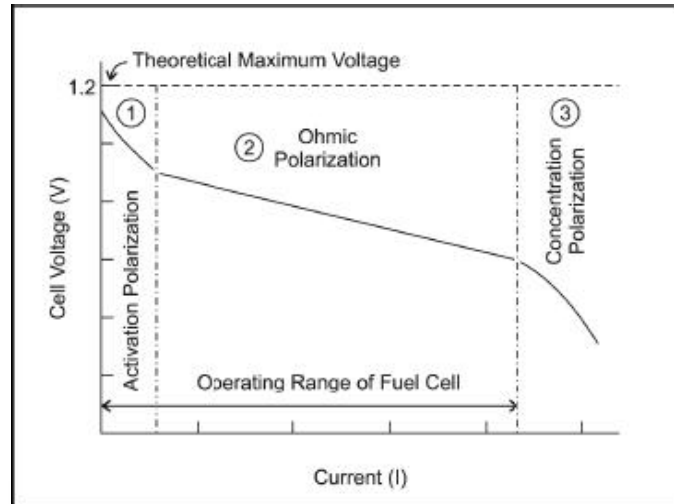
$$E = - \frac{\Delta G}{nF} = 1.23 \text{ V} \quad (4)$$

เมื่อ F เป็นค่าคงที่ของ Faraday (96,485 Coulombs) และ n เป็นจำนวนของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี (2 electrons)

## 2.1 ปฏิกิริยาขั้วแม่เหล็ก (Polarization Characteristics)

เป็นความคิดในอุดมคติว่า แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในภาวะที่ดีที่สุดตามทฤษฎีควรจะเป็น 1.2 V หากแต่ในความเป็นจริง เซลล์เชื้อเพลิงจะสำเร็จเมื่อได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุดจากผลผลิต เมื่อสู่อากาศและแรงดันไฟฟ้าก็จะต่ำลง เมื่อวัตถุติดที่ใดเพิ่มขึ้น สิ่งเหล่านี้เองถูกเรียกว่า Polarization โดยจะแสดงให้เห็นผ่านกราฟโพลาริเซชันดังรูปที่ 2





รูปที่ 2: กราฟแรงดันต่อกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ชนิด PEM

## 2.2 ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัว

ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงรูปที่ 2-5 แสดงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้า กราฟที่ได้ประกอบด้วยสามส่วนหลักคือ

- ปรากฏการณ์กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
- ส่วนที่เป็นเชิงเส้นที่แรงดันตก มีสาเหตุจากความต้านทานภายใน
- ส่วนสุดท้ายคือพลังงานจลน์ในการแตกตัวของก๊าซผ่านอิเล็กโทรด กลายเป็นปัจจัยจำกัดทำให้แรงดันตกอย่างมาก

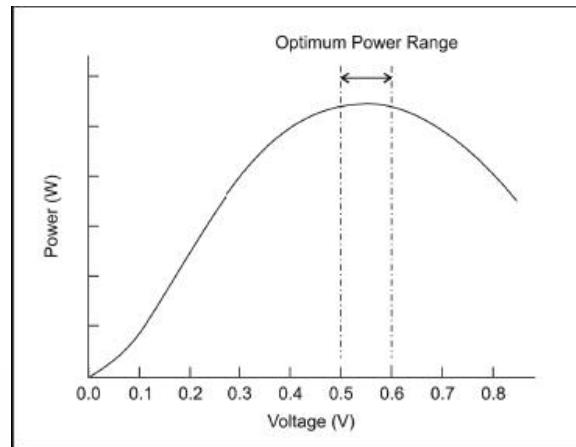
กราฟโพลาริเซชัน มีคุณสมบัติเป็นแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ โดยอัตราการไหลของกระแสไฟจะขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดทางไฟฟ้าที่วางตรงข้ามเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งความสำคัญของกราฟแรงดันต่อกระแส (Polarization curve) นี้จะแสดงถึงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากประสิทธิภาพเป็นอัตราส่วนโดยตรงของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์หารด้วย 1.2 V

## 2.3 ลักษณะเฉพาะของพลังงาน (Power Characteristics)

พลังงานทางไฟฟ้าเป็นผลผลิตของความแตกต่างระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เนื่องจากกราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงได้ชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในทุกสภาวะการทำงาน ทำให้เราสามารถนำกราฟโพลาริเซชันมาสร้างเป็นกราฟทางพลังงานอื่น ๆ ที่สอดคล้องกันได้ อีก พลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะถูกแสดงเป็นกราฟ ซึ่งเกิดจากจุดใด ๆ ก็ตามที่อยู่บนเส้นโค้ง โดยเส้นโค้งจะสัมพันธ์กับมุมฉากตามที่แสดงในกราฟ

พลังงานสูงสุดที่ปรากฏจะอยู่ที่ประมาณ 0.5-0.6 V ซึ่งสูงพอประมาณกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ที่จุดสูงสุดแรงต้านภายในเซลล์จะเท่ากับแรงต้านภายนอกวงจร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อประสิทธิภาพลดลงแต่ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจะต้องมีการแลกเปลี่ยนผลได้ผลเสียระหว่างพลังงาน

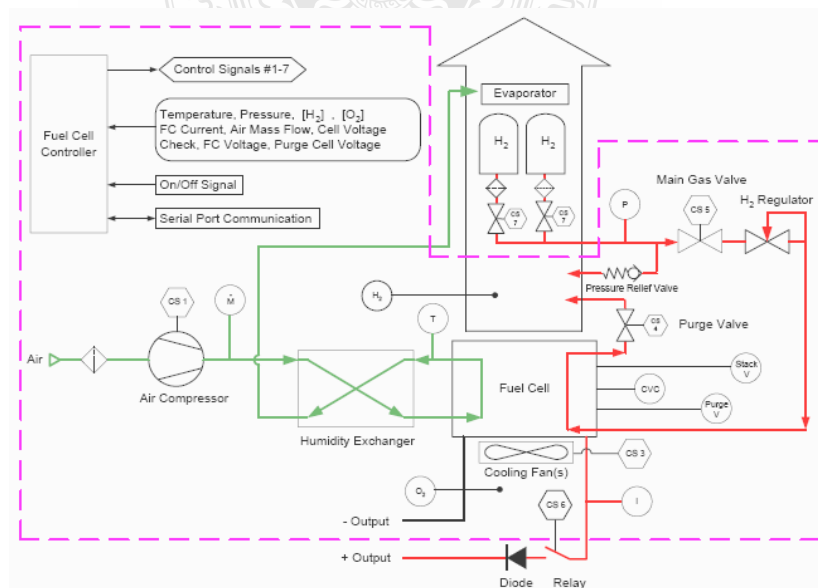
กับประสิทธิภาพที่สูง ผู้ออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องเลือกระดับระบบปฏิบัติการตามความต้องการว่าต้องการพลังงานหรือประสิทธิภาพมากกว่ากัน



รูปที่ 3: กราฟแสดงต้นแบบพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

### 3. วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

Fuel Cell คือ อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกี่ยวข้อง อิเล็กตรอนมาเป็นกระแสไฟฟ้า (electrochemical energy conversion device) โดยมันจะทำการแปรสภาพสาร Hydrogen ( $H_2$ ) และ Oxygen ( $O_2$ ) ให้กลายเป็นน้ำ ( $H_2O$ ) ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีการผลิตไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) ขนาด 1.2 kW ยี่ห้อ Nexa™ Power Module User's Manual รุ่น MAN5100078



รูปที่ 4: รูปแสดงการติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ ของ Module ที่ทำการทดสอบ

### 3.1 สภาวะไร้โหลด

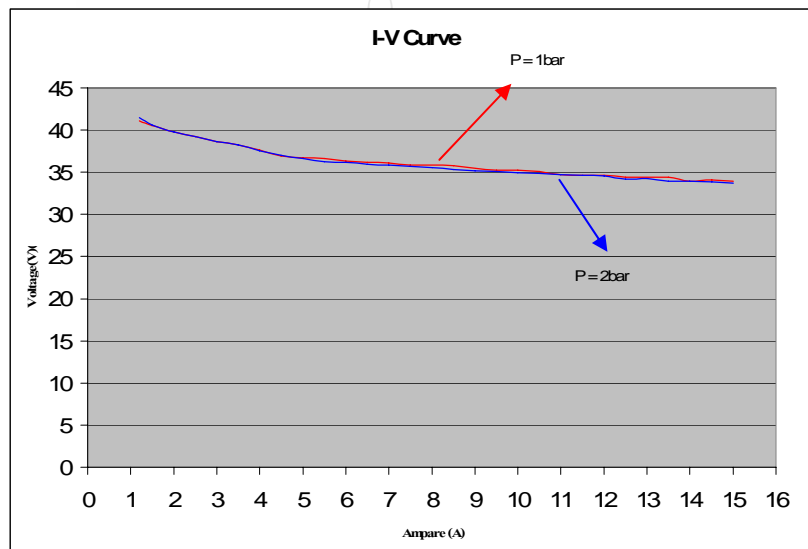
ได้ทำการทดสอบการเปลี่ยนค่า Pressure ของไฮโดรเจน ค่าต่าง ๆ กัน เพื่อดูว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะทำงานเป็นอย่างไร โดยการเปลี่ยนค่า Pressure ของไฮโดรเจนไปครั้งละประมาณ 0.5 barg. ซึ่งเริ่มต้นปรับค่า Pressure ที่ 0.300 barg. – 10.5 barg. ตามลำดับ

### 3.2. สภาวะโหลดแบบค่าความต้านทาน

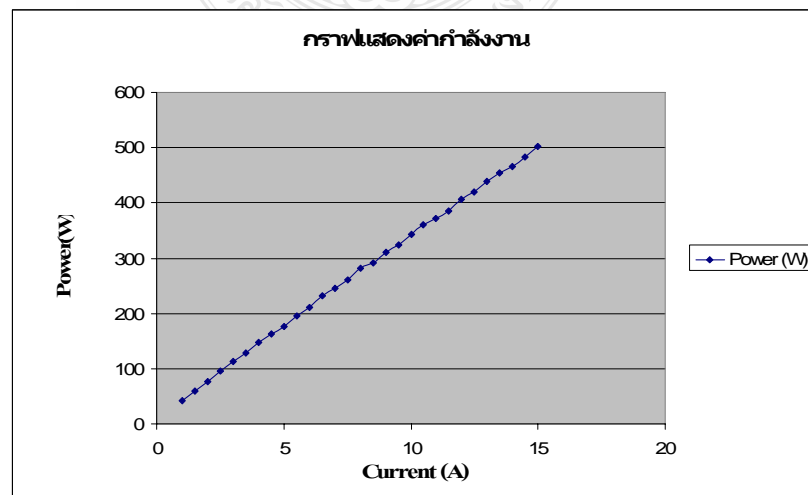
ได้ทำการทดสอบการเปลี่ยนค่ากระแส จากโหลดแบบค่าความต้านทาน จากค่า 1A จนถึงค่า 15A โดยการกำหนดค่า Pressure ของไฮโดรเจนให้คงที่ ดังนี้

3.2.1. ปรับ Pressure ที่ 1.000 barg. ทดลองเริ่มปรับกระแสที่ค่า 1A. แล้วเพิ่มกระแสครั้งละ 0.5 A. จนถึง 15 A.

3.2.2. ปรับ Pressure ที่ 2.000 barg. ทดลองเริ่มปรับกระแสที่ค่า 1A. แล้วเพิ่มกระแสครั้งละ 0.5 A. จนถึง 15 A.



รูปที่ 5: รูปแสดงการเปรียบเทียบ I-V Curve ระหว่าง Pressure 1 bar และ 2 bar



รูปที่ 6: รูปแสดงค่ากำลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง

#### 4. สรุปผลการทดลอง

เมื่อ Pressure ของไฮโดรเจนมีค่าต่ำกว่า Pressure ของระบบที่เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถทำงานได้ ซึ่งก็คือ 1 barg. เซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ทำงาน แต่เมื่อเพิ่ม Pressure ไปจนถึงค่าที่ระบบสามารถทำงานได้ (1barg. – 10.5 barg.) แรงดันที่ได้จะอยู่ที่ประมาณ 39.45-39.75 V. เมื่อเทียบค่าแรงดันที่ได้จากการทดลองจะอยู่ที่ 90.70% เมื่อเทียบกับค่าแรงดันตามทฤษฎี จะเห็นว่า Pressure ไม่มีผลต่อการทดลองในสภาวะไร้อโหลด

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างค่า Pressure ที่ 1 bar และ 2 bar จะเห็นว่าเมื่อปรับค่า Pressure เพิ่มขึ้นจากเดิม ค่าแรงดันที่ได้จากการทดลองจะลดลง ซึ่งก็แสดงว่า ค่า Pressure มีผลต่อแรงดันด้วยเช่นกัน และเมื่อปรับค่ากระแสเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันจะลดลงจะเรื่อย ๆ จะมีผลให้ค่ากำลังงานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีค่าตรงกันข้ามกับค่าแรงดัน และจากการทดลองในสภาวะ Full Load แรงดันที่ได้จะอยู่ที่ 76.92% เมื่อเทียบกับค่าแรงดันตามทฤษฎี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1]. นิพนธ์ เกตุจ้อย, วัฒนพงษ์ รัชนีวิเชียร และ สุขฤดี นาถกรณกุล, “เซลล์เชื้อเพลิง: เทคโนโลยีพลังงานสำหรับอนาคต” , Naresuan University Journal.
- [2]. Alejandro J. del Real, Alicia Arce, Carlos Bordons, 2007, “Development and experimental validation of a PEM fuel cell dynamic model”, Journal of Power Sources 173(2007) 310-324.
- [3]. M.T. Outeiro, R. Chibante, A.S. Carvalho, A.T. de Almeida, 2008, “A parameter optimized model of a Proton Exchange Membrane fuel cell including temperature effects”, Journal of Power Sources 185(2008) 952-960.
- [4]. P. Thounthong and P. Sethakul, “Fuel Cell Power Generator” , in EECON 29 : 2549.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นางปนัดดา แสงแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	5 ธันวาคม 2515
ที่อยู่	12/397 ม.4 หมู่บ้านแพรมหาพร ซ.30 ถ.รังสิต-นครนายก ต.บึงขี้เฒ อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12130
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเซนต์จอห์น เมื่อ พ.ศ.2539
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2539 - ปัจจุบัน
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	ครุปฏิบัติกร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยรังสิต
	ปนัดดา แสงแก้ว และบุญยังปลั่งกลาง, การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33, 1-3 ธันวาคม 2553, ณ โรงแรมเซ็นทรัลแกรนด์ธารา ดวงตะวัน, จังหวัดเชียงใหม่
	ปนัดดา แสงแก้ว และบุญยังปลั่งกลาง, การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW, การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3 “การพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในยุคเศรษฐกิจสร้างสรรค์”, 23-26 พฤศจิกายน 2553, ณ ศูนย์ประชุมสถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ หลักสี่, จังหวัดกรุงเทพฯ
	ปนัดดา แสงแก้ว และบุญยังปลั่งกลาง, การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, 5-7 พฤษภาคม 2553, ณ โรงแรมสอติเคย์อินน์ รีสอร์ท รีเจนท์ บีช ชะอำ, จังหวัดเพชรบุรี
	ปนัดดา แสงแก้ว และบุญยังปลั่งกลาง, การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW, การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ ครั้งที่ 2 “รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน แห่งประเทศไทย”, 22-23 ธันวาคม 2552, ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร, จังหวัดพิษณุโลก