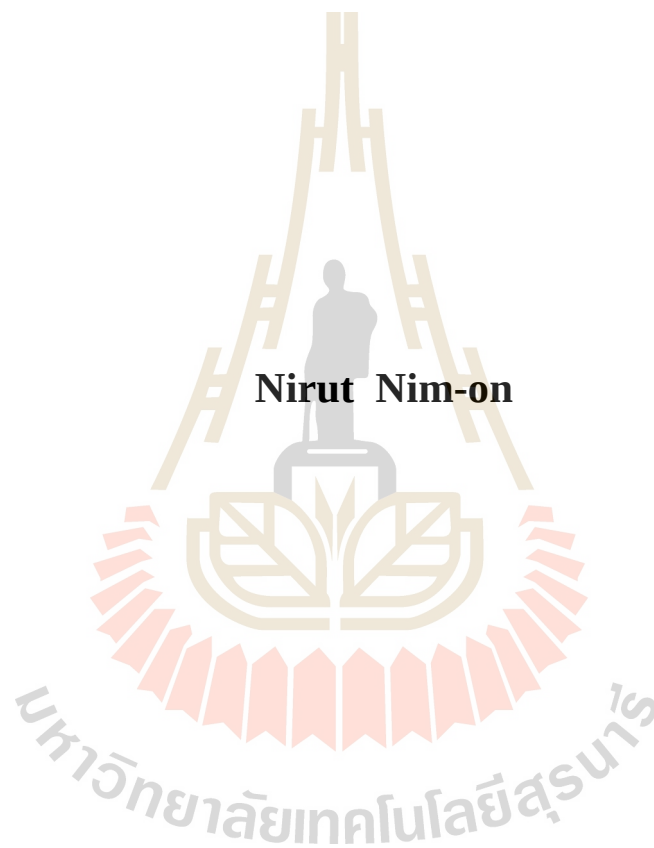


วิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้
กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**PERFORMANCE ANALYZING OF FUEL CELL
SYSTEMS FOR ISOLATED POWER
SYSTEM APPLICATION**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2012**

วิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้
กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

ประธานกรรมการ



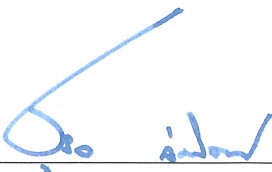
(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ



(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ขำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นิรุทธิ์ นิ่มอ่อน : วิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด (PERFORMANCE ANALYZING OF FUEL CELL SYSTEMS FOR ISOLATED POWER SYSTEM APPLICATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันท์ อุ่นศิริไธย์, 170 หน้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะระบบเซลล์เชื้อเพลิงประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำการศึกษาคือเป็นแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell ,SOFC) และระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell ,PEMFC) โดยเริ่มจากการศึกษาการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ SOFC ด้วยการสถานการณ์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และยังได้นำไปฝึกสอนกับระบบโครงข่ายประสาทแบบ Generalized Regression Network (GRNN) ผลจากการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน 1.45% นอกจากนี้ยังได้มีการคำนวณความคุ้มค่าซึ่งพบว่าไม่คุ้มค่า เนื่องจากต้นทุนเชื้อเพลิงมีราคาสูงกว่าราคาขายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในปัจจุบัน ถ้ากำหนดราคาต้นทุนเชื้อเพลิง 4 บาท และราคาขาย 8 บาท พบว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ที่พิกัดต่ำกว่า 500 W ไม่มีความคุ้มค่าในทางกลับกันหากพิจารณาเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ที่พิกัดสูงกว่า 500 W ขึ้นไปจะมีระยะเวลาคืนทุนที่เร็วขึ้น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่นำเสนอเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในระบบแบบแยกโดด ได้ค่ากระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าตามพิกัดของอุปกรณ์ที่ทดสอบ ทั้งนี้ดำเนินการทดสอบระบบ PEMFC พิกัด 20 W ซึ่งจ่ายโหลดสูงสุด 8.3 W และระบบ PEMFC พิกัด 500 W จ่ายโหลดสูงสุดในการทดสอบ 310 W จากผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ พบว่ามีความสอดคล้องกัน สำหรับ PEMFC พิกัด 20 W มีค่าความคลาดเคลื่อน 2.02% ส่วน PEMFC พิกัด 500 W มีค่าความคลาดเคลื่อน 5.40% รวมถึงการเปรียบเทียบอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนของ PEMFC พิกัด 500 W มีค่าความคลาดเคลื่อน 16.18% ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ที่พิกัดต่าง ๆ สามารถนำไปจำลองเพื่อใช้งานกับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดดที่สถานะต่าง ๆ ได้

NIRUT NIM-ON : PERFORMANCE ANALYZING OF FUEL CELL
SYSTEMS FOR ISOLATED POWER SYSTEM APPLICATION. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. ANANT OONSIVILAI, Ph.D., 170 PP.

FUEL CELL/PEMFC/ SOFC/POWER SYSTEM

This thesis represents the analysis of fuel cell system performance that applied with isolated power system. Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) and Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) fuel cell systems are the fuel cell system that used for this study. The SOFC fuel cell system was analyzed with simulation through mathematical modeling and also trained with Generalized Regression Network (GRNN). The results from simulation showed similar to the results from the experiment with the error at 1.45%. In addition, the break-even point was calculated, the results showed that it is not cost-effective due to the fuel cost was higher than the current electricity price sold. If the fuel cost is 4 baht and the selling price is 8 baht, it was found that the PEMFC fuel cell system at less than 500 W was not economically practical. On other hand, when consider the PEMFC fuel cell system at over 500 W, it would show a faster break-even period. The mathematical model of PEMFC fuel cells system for analyzing its performance with isolated load application power systems confirmed the proposed model, when compared with the actual test results in the isolated separation system that showed current, voltages, and power following the rated of the test equipment. Furthermore, the PEMFC test system performed at 20 W gave the maximum load at 8.3 W and PEMFC system rated at 500 W gave maximum load at 310 W. From the comparison between the simulation results and the experiment

results, It was found that the results were correlated for the PEMFC rated 20 W showing the error at 2.02%. Meanwhile, the PEMFC rated at 500 W showing the error at 5.40%. In addition, the comparison of the PEMFC's at 500 W hydrogen flow rate showed the error at 16.18%. This study showed that the fuel cell mathematical model for PEMFC at various coordinates could be applied in isolated systems at the different state.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature วิเศษ วัฒน

Advisor's Signature คค

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่งและให้ความรู้ด้านวิชาการมาโดยตลอด อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจและแบบอย่างที่ดีต่อการดำเนินชีวิตในหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาแนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณอัญชลี รักด่านกลาง และคุณภัทรวรรณ เกนพะนาน ที่ได้ช่วยติดต่อประสานงานกับฝ่ายต่าง ๆ ให้กับผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณประพันธ์ คัททวิ คุณศรัณย์ ดอกไม้กุล และบุคลากรฝ่ายห้องปฏิบัติการวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนทางด้านอุปกรณ์และให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณนายวรวิทย์ พยัมโช และคุณเกษม ประดิษฐ์วัฒนกิจ เป็นอย่างยิ่งที่คอยช่วยเหลือให้ความรู้คำแนะนำและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณปาริสา รัตนพิทักษ์กุล ที่ให้ข้อมูลและคำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณนายเสาร์ นิ่มอ่อน ผู้เป็นบิดา และนางไกล่รุ่ง นิ่มอ่อน ผู้เป็นมารดา ที่คอยส่งเสริมทางด้านการศึกษามาอย่างดีมาโดยตลอด อีกทั้งยังให้ความรักความห่วงใย รวมทั้งเป็นกำลังใจในยามที่ผู้วิจัยท้อและทุกข์ใจ จนทำให้ผู้วิจัยไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นตลอดมา

นิรุทธิ์ นิ่มอ่อน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ผ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.3 สรุป.....	6
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
3.1 บทนำ.....	7
3.2 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	7
3.3 คุณสมบัติของไฮโดรเจน	14
3.4 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	15
3.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	16
3.5.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6	ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง	23
3.6.1	โพลาริเซชันทางเคมี	24
3.6.2	โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน	24
3.6.3	โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น	25
3.7	องค์ประกอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	26
3.7.1	หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	27
3.7.2	เมมเบรน	27
3.7.3	ขั้วไฟฟ้า	28
3.7.4	ตัวเร่งปฏิกิริยา	29
3.7.5	แผ่นสะสมกระแส	31
3.7.6	วัสดุสำหรับทำแผ่นสะสมกระแส	32
3.7.7	ประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรน	32
3.7.8	ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง	33
3.8	สรุป	36
4	ศึกษาแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิง	37
4.1	บทนำ	37
4.2	แบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ SOFC	37
4.2.1	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง	40
4.2.2	การสร้างแบบจำลองรวมระบบเซลล์เชื้อเพลิง	47
4.3	การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมประเภท GRNN กับระบบเซลล์เชื้อเพลิง	56
4.3.1	Generalized Regression Networks (GRNN)	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	แบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC	63
4.4.1	ระบบ PEMFC 20 W (12 Stack)	78
4.4.2	ระบบ PEMFC 500 W (36 Stack)	79
4.4.3	ระบบ PEMFC 1000 W (72 Stack)	81
4.5	สรุป	84
5	การออกแบบและติดตั้งแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิง	
	แบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	85
5.1	บทนำ	85
5.2	ระบบเซลล์เชื้อเพลิงประเภท PEM (PEM fuel cell) ขนาด 500 W	85
5.2.1	เซลล์เชื้อเพลิง	86
5.2.2	วาล์วต่อก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ	87
5.2.3	อุปกรณ์ระบายความดัน	87
5.2.4	ระบบลัดวงจรระบบ	88
5.2.5	ปุ่มเปิด-ปิดการทำงาน	88
5.2.6	ระบบพัดลมระบายอากาศ	89
5.2.7	อุปกรณ์เชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมภายในเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์เชื้อเพลิง	89
5.2.8	อุปกรณ์ควบคุมค่าภายในเซลล์เชื้อเพลิง	90
5.2.9	จุดเชื่อมต่อท่อไฮโดรเจนที่เข้าและออกจากระบบ	91
5.2.10	จุดเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง	91
5.2.11	ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง (ในกรณีก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ)	92
5.2.12	ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง (ในกรณีไอน้ำระบายออกจากระบบ)	93
5.2.13	ถังก๊าซไฮโดรเจน	93
5.2.14	วาล์วปรับความดัน	94
5.2.15	แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง	94

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.16	ข้อต่อทองเหลือง	95
5.2.17	โหลดที่ใช้ในการทดสอบ.....	95
5.3	คุณลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 W	96
5.4	ระบบเซลล์เชื้อเพลิงประเภท PEM ขนาด 20 W	97
5.4.1	เซลล์เชื้อเพลิง 20 W	98
5.4.2	ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง	99
5.4.3	ตัวควบคุม	100
5.4.4	อุปกรณ์ระบายความดัน	100
5.4.5	ถังไฮโดรเจนขนาดเล็ก ขนาด 10 ลิตร.....	101
5.4.6	โหลดที่ใช้ในการทดสอบ.....	101
5.5	คุณลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 20 W.....	102
5.6	สรุป	104
6	การทดสอบแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรน	
	แลกเปลี่ยนโปรตอนและวิเคราะห์ผลแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิง	106
6.1	บทนำ	106
6.2	การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน.....	106
6.2.1	การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 500 W	107
6.2.2	การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 20 W	110
6.2.3	การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1000 W	112
6.2.4	การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 2000 W	114
6.2.5	การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 5000 W	116
6.3	การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 500 W	122
6.3.1	ทดสอบที่สภาวะไร้โหลด	123
6.3.2	ผลการทดสอบที่สภาวะไร้โหลด	124

สารบัญ (ต่อ)

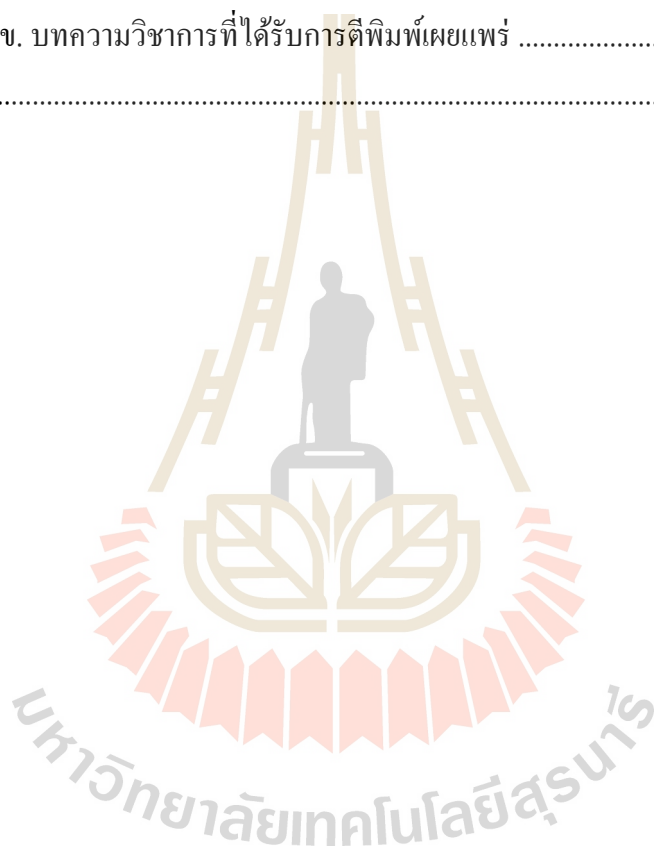
หน้า

6.3.3 ทดสอบที่สภาวะรับโหลด	125
6.3.4 ผลการทดสอบที่สภาวะรับโหลด	126
6.3.4.1 ผลทดสอบโหลดไฟ 3 หลอด	126
6.3.4.2 ผลทดสอบโหลดไฟ 4 หลอด	128
6.3.4.3 ผลทดสอบโหลดไฟ 9 หลอด	129
6.3.4.4 ผลทดสอบโหลดไฟ 9 หลอด แบบต่อวงจรแบบผสม	131
6.3.5 วัดอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน	133
6.4 การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 20 W	135
6.4.1 ทดสอบและผลการทดสอบที่สภาวะไร้โหลด	136
6.4.2 ทดสอบและผลการทดสอบที่สภาวะรับโหลด	137
6.4.2.1 ทดสอบโหลดหลอดไฟกระแสดัง 1 หลอด	138
6.4.2.2 ทดสอบโหลดหลอดไฟกระแสดัง 2 หลอด	139
6.4.2.3 ทดสอบโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดัง	140
6.4.2.4 ทดสอบโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดังและหลอดไฟ 1 หลอด	141
6.4.2.5 ทดสอบโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดังและหลอดไฟ 2 หลอด	142
6.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	145
6.5.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 500 W	145
6.5.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 20 W	148
6.6 การนำไปใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด	150
6.7 สรุป	152
7 สรุปและข้อเสนอแนะ	154
7.1 สรุป	154
7.2 ข้อเสนอแนะ	156

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง	157
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการจำลองระบบ PEMFC ทาง MATLAB ที่ PEMFC 500 W	159
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	162
ประวัติผู้เขียน	170



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
3.1 ค่ามาตรฐานทางอุณหพลศาสตร์และการคำนวณปริมาณทางอุณหพลศาสตร์	21
4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบ SOFC system model.....	40
4.2 ค่าแรงดันที่วัดได้จากแบบจำลองย่อย (V).....	44
4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากแบบจำลองย่อย (kW).....	44
4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆใน ระบบ PEMFC.....	77
4.5 ค่าที่ทดสอบได้จากแบบจำลอง PEMFC 20 W.....	78
4.6 ค่าที่ทดสอบได้จากแบบจำลอง PEMFC 500 W.....	79
4.7 ค่าที่ทดสอบได้จากแบบจำลอง PEMFC 1000 W.....	81
5.1 รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 W	96
5.2 คุณลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 20 W.....	102
6.1 ต้นทุนคงที่ของ PEMFC 500 W.....	107
6.2 ต้นทุนคงที่ของ PEMFC 20 W.....	110
6.3 ต้นทุนคงที่ของ PEMFC 1000 W.....	112
6.4 ต้นทุนคงที่ของ PEMFC 2000 W.....	114
6.5 ต้นทุนคงที่ของ PEMFC 5000 W.....	116
6.6 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุนของ PEMFC.....	119
6.7 กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สำคัญ.....	120
6.8 ผลเฉลี่ยค่าแรงดันของการต่อหลอดไฟอนุกรมกัน 9 หลอด	130
6.9 ค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้	132
6.10 อัตราการไหลที่ค่าต่างๆ	134
6.11 ค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้	143
6.12 ค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้แสดงการใช้ไฟฟ้าของบ้าน 1 หลัง.....	151

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	8
3.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์	9
3.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก	10
3.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอนดลอม	11
3.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง	12
3.6 ภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	18
3.7 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในเชิงอุณหพลศาสตร์.....	19
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นของกระแส	23
3.9 ภาพตัดขวางของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน 1 เซลล์.....	26
3.10 การเปรียบเทียบรูปแบบของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	29
3.11 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา.....	30
3.12 แผ่นสะสมกระแส.....	31
3.13 ส่วนประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง	34
4.1 แบบจำลองทางพลวัต SOFC	40
4.2 ส่วนย่อยของระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC.....	42
4.3 ทดสอบแบบจำลองย่อย (ทดสอบหาค่าแรงดัน)	43
4.4 ทดสอบแบบจำลองย่อย (ทดสอบหาค่ากำลังงาน).....	43
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันแบบจำลอง SOFC.....	45
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและค่ากำลังไฟฟ้าแบบจำลอง SOFC	46
4.7 แบบจำลองรวมระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC.....	47
4.8 รายละเอียดโปรแกรมการคำนวณส่วนย่อย SOFC	48
4.9 รายละเอียดโปรแกรมคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน	48
4.10 ค่าความดันของไฮโดรเจนแบบจำลอง SOFC.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11	ค่าความดันของออกซิเจนแบบจำลอง SOFC 50
4.12	ค่าความดันของน้ำแบบจำลอง SOFC 51
4.13	ค่าผลต่างระหว่างความดันของไฮโดรเจนกับออกซิเจนแบบจำลอง SOFC 52
4.14	ค่าแรงดันเอาต์พุตของแบบจำลอง SOFC 53
4.15	ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) ของแบบจำลอง SOFC 54
4.16	ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ของแบบจำลอง SOFC 55
4.17	ข่ายประสาทงานเทียมมีการเชื่อมต่อกันผ่านกลุ่มโนด 56
4.18	แผนผังการทำงานของ GRNN 57
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันโดยใช้ GRNN 58
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและค่ากำลังโดยใช้ GRNN 58
4.21	เปรียบเทียบค่าแรงดันระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 4.00E-4$ 59
4.22	เปรียบเทียบค่าแรงดันระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 8.00E-4$ 59
4.23	เปรียบเทียบค่าแรงดันระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 1.2.00E-3$ 60
4.24	เปรียบเทียบค่าแรงดันระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 1.6.00E-3$ 60
4.25	เปรียบเทียบค่ากำลังระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 4.00E-4$ 61
4.26	เปรียบเทียบค่ากำลังระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 8.00E-4$ 61
4.27	เปรียบเทียบค่ากำลังระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 1.2.00E-3$ 62
4.28	เปรียบเทียบค่ากำลังระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 1.6.00E-3$ 62
4.29	โครงสร้างของ PEMFC 64
4.30	วงจรสมมูลรูปแบบอย่างง่ายของ PEMFC เพียงหนึ่งเซลล์ 64
4.31	แผนภาพของเซลล์เชื้อเพลิงและแรงดันไฟฟ้าลดลง 66
4.32	แบบจำลองของ PEMFC 75
4.33	แบบจำลองของ PEMFC ทาง Simulink MATLAB 76
4.34	ค่ากระแสและแรงดัน PEMFC 20 W 78
4.35	ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้า PEMFC 20 W 79
4.36	ค่ากระแสและแรงดัน PEMFC 500 W 80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้า PEMFC 500 W.....	81
4.38 ค่ากระแสและแรงดัน PEMFC 1000 W	82
4.39 กระแสและกำลังไฟฟ้า PEMFC 1000 W.....	83
5.1 แผนผังระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM 500 W	85
5.2 เซลล์เชื้อเพลิง	86
5.3 วาล์วต่อก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ	87
5.4 อุปกรณ์ระบายความดัน	87
5.5 ระบบลัดวงจร	88
5.6 ปุ่มเปิด-ปิดการทำงาน	88
5.7 ระบบพัดลมระบายอากาศ.....	89
5.8 อุปกรณ์เชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมค่าภายในเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์เชื้อเพลิง.....	90
5.9 อุปกรณ์ควบคุมค่าภายในเซลล์เชื้อเพลิง	90
5.10 จุดเชื่อมต่อท่อไฮโดรเจนที่เข้าและออกจากระบบ	91
5.11 จุดเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง.....	92
5.12 ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง (กรณีก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ)	92
5.13 ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง (กรณีระบายไอน้ำออกจากระบบ).....	93
5.14 ถังก๊าซไฮโดรเจน	93
5.15 วาล์วปรับความดัน	94
5.16 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง	94
5.17 ขั้วต่อทองเหลือง.....	95
5.18 โหลดทดสอบโหลดไฟกระแสตรง	95
5.19 แผนผังระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM 20 W	97
5.20 เซลล์เชื้อเพลิง 20 W.....	98
5.21 เซลล์เชื้อเพลิงส่วนด้านหน้าระบายความร้อน.....	99
5.22 ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับระบบเซลล์เชื้อเพลิง	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.23 ตัวควบคุม	100
5.24 อุปกรณ์ระบายความดัน	100
5.25 ถังไฮโดรเจนขนาดเล็ก ขนาด 10 ลิตร	101
5.26 โหลดที่ใช้ในการทดสอบ	101
5.27 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM 500 W.....	103
5.28 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM 20 W.....	103
6.1 แผนภูมิการวิเคราะห์จุดกึ่งทุน	107
6.2 การเชื่อมต่อและติดตั้งอุปกรณ์ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะไร้โหลด.....	122
6.3 ระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC ขนาด 500 W	123
6.4 ทดสอบที่สภาวะไร้โหลด	124
6.5 ผลการทดสอบที่สภาวะไร้โหลด PEMFC 500 W	124
6.6 สัญญาณแรงดันจากเครื่องออกซิลโลสโคป ที่สภาวะไร้โหลด PEMFC 500W	125
6.7 ทดสอบที่สภาวะรับ โหลด	125
6.8 โหลดหลอดไฟกระแสดำรงที่ใช้ในการทดสอบ	126
6.9 การทดสอบหลอดไฟ 3 หลอด.....	126
6.10 ผลทดสอบสัญญาณค่าแรงดันจากหลอดหลอดไฟ 3 หลอด PEMFC 500 W	127
6.11 ค่าแรงดันสัญญาณจากออกซิลโลสโคปหลอดหลอดไฟ 3 หลอด PEMFC 500 W	127
6.12 ทดสอบหลอดหลอดไฟ 4 หลอด	128
6.13 ผลการทดสอบหลอดหลอดไฟ 4 หลอด PEMFC 500 W	128
6.14 ผลการทดสอบหลอดหลอดไฟ 4 หลอดจากออกซิลโลสโคป PEMFC 500 W	129
6.15 ทดสอบหลอดหลอดไฟ 9 หลอด	129
6.16 ค่าแรงดันของการต่อหลอดไฟอนุกรมกัน 9 หลอด PEMFC 500 W	130
6.17 ทดสอบหลอดไฟ 9 หลอด แบบต่อแบบผสม	131
6.18 การต่อวงจรเพื่อทำการทดสอบ.....	131
6.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของผลทดสอบ PEMFC 500 W.....	132
6.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและกำลังไฟฟ้า PEMFC 500 W.....	133
6.21 วัดอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน	134

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.22 การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM 20 W	136
6.23 ระบบการทำงานเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM 20 W	136
6.24 สัญญาณแรงดันผลจากการทดสอบที่สภาวะไร้โหลด PEMFC 20 W	137
6.25 การทดสอบที่สภาวะรับโหลด	137
6.26 ทดสอบโหลดหลอดไฟกระแสดตรง 1 หลอด	138
6.27 สัญญาณแรงดันผลการทดสอบโหลดหลอดไฟกระแสดตรง 1 หลอด PEMFC 20 W	138
6.28 ทดสอบโหลดหลอดไฟกระแสดตรง 2 หลอด	139
6.29 สัญญาณแรงดันผลการทดสอบโหลดหลอดไฟกระแสดตรง 2 หลอด PEMFC 20 W	139
6.30 ทดสอบโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดตรง	140
6.31 สัญญาณแรงดันผลการทดสอบโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดตรง PEMFC 20 W	140
6.32 ทดสอบโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดตรงและหลอดไฟ 1 หลอด	140
6.33 ผลการทดสอบโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดตรงและหลอดไฟ 1 หลอด PEMFC 20 W	141
6.34 ทดสอบโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดตรงและหลอดไฟ 2 หลอด	142
6.35 ผลการทดสอบโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดตรงและหลอดไฟ 2 หลอด PEMFC 20 W	142
6.36 สัญญาณค่าแรงดันที่ได้ในช่วงที่ปล่อยไอน้ำออกมา PEMFC 20 W	143
6.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของผลทดสอบ PEMFC 20 W	144
6.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าของผลทดสอบ PEMFC 20 W	145
6.39 ค่ากระแสและแรงดันระหว่างผลทดสอบจริงกับแบบจำลอง PEMFC 500 W	146
6.40 ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าระหว่างผลทดสอบจริงกับแบบจำลอง PEMFC 500 W	147
6.41 ค่ากระแสและแรงดันระหว่างผลทดสอบจริงกับแบบจำลอง PEMFC 20 W	148
6.42 ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าระหว่างผลทดสอบจริงกับแบบจำลอง PEMFC 20 W	149
6.43 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงประยุกต์ใช้ในครัวเรือน	150

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเพิ่มขึ้นของประชากรและการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ นำไปสู่การเพิ่มของการบริโภคพลังงานมากขึ้นตามไปด้วย โดยในขณะที่ปริมาณพลังงานสำรองของเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่อย่างจำกัด กำลังน้อยลงไปเรื่อย ๆ ผลทำให้ราคาของเชื้อเพลิงฟอสซิลมีราคาสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศของโลก ดังนั้นการแสวงหาพลังงานทดแทนรูปแบบใหม่มาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลจึงมีความจำเป็น โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีความจำเป็นอย่างสูง พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นหนทางที่ดีในการนำมาเป็นพลังงานทดแทน เพราะเป็นพลังงานสะอาด

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกหนึ่งชนิดที่ได้รับการพัฒนามาอย่างรวดเร็ว โดยลักษณะสำคัญคือมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง การก่อให้เกิดมลพิษต่ำหรืออาจจะไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมเลย การทำงานที่เงียบและความน่าเชื่อถือที่สูงไปจนถึงมีชิ้นส่วนที่จะต้องเคลื่อนที่ในจำนวนจำกัด โดยมีการสร้างพลังงานในทางไฟฟ้าเคมี ให้ก๊าซที่มีส่วนประกอบของไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ไว้ทางชีวแอโนดและอากาศธรรมดาในขั้วแคโทด จากนั้นนำสารประกอบที่เป็นตัวนำไฟฟ้าซึ่งสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ ผลที่ได้จากกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับสารประกอบตัวนำซึ่งเป็นส่วนจำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาขนถ่ายไอออน จึงทำให้ได้พลังงานทางไฟฟ้าออกมา เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีในการนำมาเป็นพลังงานทดแทนได้ดี ก็เนื่องมาจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ว่านี้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าแบบเดิมอีกด้วย

โครงการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาการทำงานและข้อดีข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิง
- 2) เพื่อสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง
- 3) เพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบจากแบบจำลอง
- 4) เปรียบเทียบผลการทดสอบจริงกับการจำลองผลระบบเซลล์เชื้อเพลิง

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

การศึกษาพัฒนาและวิเคราะห์แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง และทำการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane - PEM) เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของระบบ และนำมาเปรียบเทียบข้อบกพร่อง ประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวและนำมาประยุกต์ใช้กับชีวิตประจำวันและนำไปสู่การพัฒนาในอนาคตต่อไป

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ทำการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเซลล์เชื้อเพลิง
- 2) ทำการศึกษาข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับระบบเซลล์เชื้อเพลิง
- 3) ศึกษาแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิง
- 4) ทำการติดตั้งระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM เพื่อทำการทดสอบ
- 5) ทำการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM และเปรียบเทียบผลกับแบบจำลองและวิเคราะห์สรุปผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ทราบถึงข้อดีข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่เรานำมาศึกษาว่ามีสมรรถนะในการทำงานเป็นอย่างไร
- 2) ได้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงพลังงานสะอาดไว้ใช้ในครัวเรือน
- 3) ได้แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงในการนำไปเป็นต้นแบบในการศึกษาต่อไป
- 4) ได้ต้นแบบในการจำลองที่มาพลังงานที่สะอาดและช่วยแก้ปัญหามลภาวะ

1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ จากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสังเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปรัทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบเซลล์เชื้อเพลิง

บทที่ 4 กล่าวถึงการศึกษาแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิง

บทที่ 5 กล่าวถึงการติดตั้งแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

บทที่ 6 กล่าวถึงการทดสอบแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและวิเคราะห์ผลแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ วิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโคด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีประกอบด้วยฐานข้อมูลจาก IEEE, IEE, และ Science Direct ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการทดสอบเร่งการเสื่อมอายุของฉนวนยางซิลิโคนที่นักวิจัยหลาย ๆ ท่านทำการค้นคว้าและวิจัยสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1999	J. Padulles, G.W. Ault and J.R. McDonald	แบบบูรณาการรวมของโรงไฟฟ้า SOFC แบบไดนามิกสำหรับการใช้พลังงานจำลองระบบ
2001	Y. Zhu and K. Tomsovic	การพัฒนา รูปแบบ สำหรับการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานของกังหันขนาดเล็กและเซลล์เชื้อเพลิง
2003	S.Jemei, D. Hissel, M.C Pera and J.M. Kauffmann	เซลล์เชื้อเพลิงบนกระดานจำลองการจ่ายไฟบนพื้นฐานของวิธีการเครือข่ายประสาท

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2004	Shaoduan Ou and Luke E.K. Achenie	รูปแบบเครือข่ายประสาทไฮบริดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC
2006	R. Contino, F. Iannoe, S. Leva and D. Zaninelli	ระบบเซลล์เชื้อเพลิง-แสงอาทิตย์ไฮบริดที่ควบคุมขนาดและการประเมินผลงานแบบไดนามิก
2007	N. Kalhoff	การบูรณาการงานรวมของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายไฟสำหรับเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารโทรคมนาคม
2007	A. Seangrungs, A. Abtahi and A. Zilouchain	รูปแบบเครือข่ายประสาทเพื่อเชื้อเพลิงแบบ PEMFC ในเชิงพาณิชย์
2008	S. Leva and D. Zaninelli	ไฮบริดพลังงานทดแทนแบบระบบเซลล์พลังงานเชื้อเพลิง และการประเมินผลการออกแบบและประสิทธิภาพการทำงาน
2008	S. Jemei, D. Hissel, M.C. Pera and M. Kauffmann	วิธีการสร้างแบบจำลองแบบใหม่ของการฝังตัวเซลล์เชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าตามเครือข่ายประสาทเทียม
2009	J.M. Lee and B.H. Cho	แบบจำลองไดนามิกของระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC
2010	M.E. Youssef, M.H. Khalil and K.E. Al-Nadi	การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการแลกเปลี่ยนโปรตอนเยื่อหุ้มเซลล์เชื้อเพลิง (PEMFC)
2010	Satonsawapak, M., Krapeedang, M., Oonsivilai, R., and Oonsivilai, A.	การระบุอัตราการไหลของก๊าซในโรงไฟฟ้าชีวมวลโดยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง
2010	S.V.Puranik, A. Keyhani and F. Khorrami	การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทของการแลกเปลี่ยนโปรตอนเยื่อหุ้มเซลล์เชื้อเพลิง

จากวรรณกรรมและผลงานวิจัยที่ได้สรุปผ่านมา ทำให้ทราบว่ามีการวิจัยได้คิดค้นและนำเสนอแนวคิดวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในแบบและวิธีต่าง ๆ สามารถทำให้ผู้ศึกษาวิจัยทางด้านนี้มองเห็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบ รวมถึงแนวทางในการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในส่วนถัดไปจากนี้เป็นการสรุปงานวิจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิจัยครั้งนี้ โดยกล่าวถึงรูปแบบวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแนวคิดต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างงานวิจัยในหัวข้อวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด ต่อไปดังนี้

2.3 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและการวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ โดยค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEEE, IEE และอื่น ๆ ทำให้ทราบถึงผลงานดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์ แนวทางการวิจัยของผู้วิจัยอื่น ๆ ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป จากการสืบค้นปริทัศน์และวรรณกรรมเห็นได้ชัดว่าพลังงานทดแทนชนิดระบบเซลล์เชื้อเพลิงกำลังเป็นที่สนใจ จึงทำให้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงออกมาอย่างมากมาย ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้เริ่มวิจัยขึ้น เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่ปรากฏงานวิจัยที่ใด ๆ ที่ต้องทดสอบและสร้างชิ้นงานเพื่อทดสอบด้วยวิธีการนี้

บทที่ 3

ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด จำเป็นต้องรู้ถึงคุณสมบัติต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงในบทนี้จึงได้ทำการอธิบายเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงอย่างละเอียด โดยอธิบายในเรื่องของประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง ทฤษฎีของเซลล์เชื้อเพลิง โดยอธิบายรายละเอียดดังนี้

3.2 ความเป็นมาและความสำคัญ

เซลล์เชื้อเพลิงถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 โดยเซอร์วิลเลียม โรเบิร์ต (Sir William Robert Grove) ผู้พิพากษาชาวเวลส์ที่มีความเป็นนักประดิษฐ์และนักฟิสิกส์ในตัวเอง โดยเขามีความเชื่อว่า เมื่อเราสามารถแยกน้ำด้วยไฟฟ้าได้ก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซออกซิเจนแล้วในทางกลับกันหากผสมก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนด้วยวิธีที่เหมาะสมก็ควรจะได้พลังงานไฟฟ้าออกมาเช่นกัน ดังนั้นเขาจึงเริ่มสร้างเครื่องมือทดลองที่เรียกว่า “ก๊าซแบตเตอรี่” ออกมา เครื่องมือของโกรฟถือได้ว่าเป็นต้นแบบของเซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบัน หลังจากทดลองอยู่นานหลายปี ในที่สุดเขาก็ได้ทดลองผสมไฮโดรเจน และออกซิเจนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์คือ กรดซัลฟูริก และใช้ขั้วแพลทินัมทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและน้ำ แต่ในขณะนั้นสิ่งประดิษฐ์ของโกรฟยังไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาพอที่จะใช้งานได้

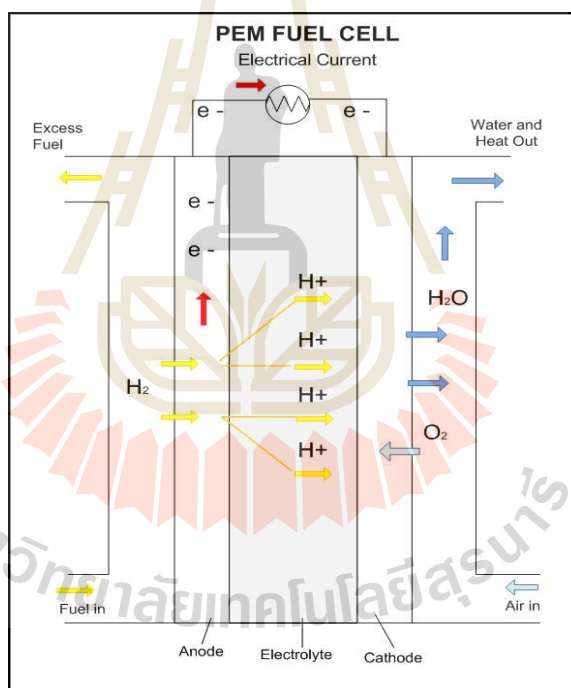
คำว่า “Fuel cell” ถูกใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1889 โดยลูดวิก มอนด์ (Ludwig Mond) และชาร์ลส์ แลงเกอร์ (Charles Langer) ทั้งสองพยายามประดิษฐ์เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้งานได้จริงโดยใช้อากาศและถ่านหิน (Coal Gas) นอกจากประดิษฐ์ทั้งสองคนแล้วยังมี วิลเลียม ไวท์ จาคส์ (William White Jaques) ก็เป็นอีกผู้หนึ่งที่ถูกบันทึกว่าเป็นผู้เริ่มใช้คำนี้เช่นกัน โดยจาคส์เป็นนักวิจัยคนแรกที่ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และต่อจากนั้นมาก็มีงานวิจัยอีกหลายชิ้นที่เกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงออกมา โดยสามารถจำแนกเซลล์เชื้อเพลิงโดยพิจารณาตามชนิดของสารประกอบตัวนำ ได้ดังนี้

-เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane - PEM)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ในรูปแบบแผ่นพอลิเมอร์บาง ทำงานในสถานะอุณหภูมิต่ำประมาณ 80°C มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 40-50 % สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 50-250 kW

ข้อดี เนื่องจากเซลล์ชนิดนี้ทำงานอยู่ที่อุณหภูมิต่ำและใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง จึงไม่มีปัญหาการรั่วซึม เกิดการกัดกร่อนน้อย เซลล์แบบนี้จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในอาคาร บ้านเรือนและรถยนต์

ข้อเสีย ต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีความบริสุทธิ์สูงเท่านั้น และโลหะแพลทินัมที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยามีราคาแพง อีกทั้งแผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนก็มีราคาสูงอีกด้วย แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (ดัดแปลงมาจาก

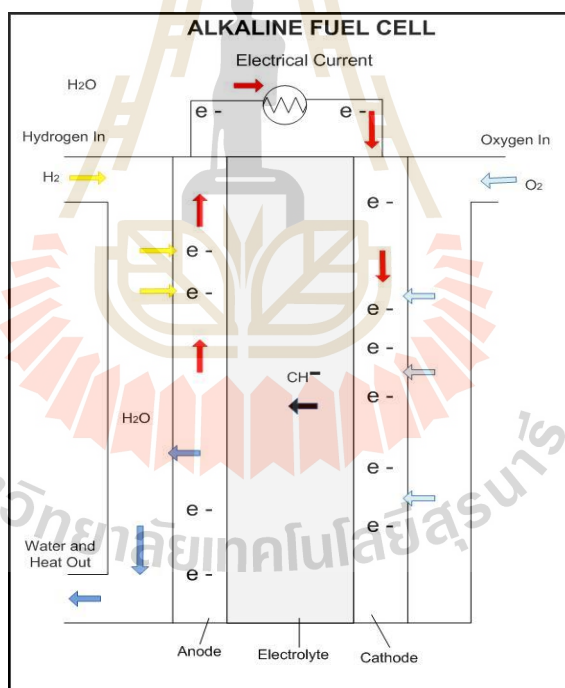
:<http://www2.dede.go.th/hydronet/01Knowledge/01Fuel%20Cell/FuelCellMain.html>)

- เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline)

เซลล์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงถึง 70% องค์การนาซาใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าและน้ำให้กับยานอวกาศในโครงการอพอลโล และโครงการเจมินีมาแล้ว เชื้อเพลิงที่ใช้กับเซลล์ชนิดนี้คือ ไฮโดรเจน และออกซิเจนบริสุทธิ์ และใช้สารอิเล็กโทรไลต์ เช่น โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ สภาวะอุณหภูมิที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 150-200 °C

ข้อดี มีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงและใช้สารอิเล็กโทรไลต์ เช่น โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ราคาถูก

ข้อเสีย เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จำเป็นต้องใช้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงมากซึ่งมีราคาแพงมาก และต้นทุนการผลิตของเซลล์ชนิดนี้มีราคาแพง ทำให้การใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จำกัดอยู่เฉพาะงานในด้านอวกาศเท่านั้น



รูปที่ 3.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (ดัดแปลงมาจาก

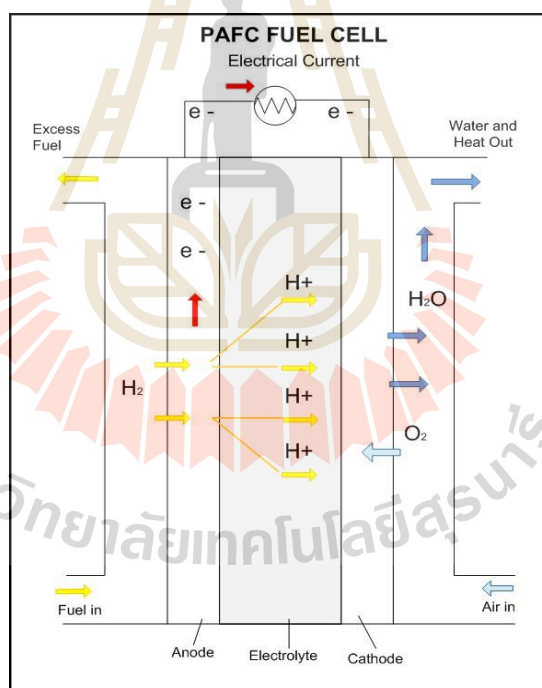
:<http://www2.dede.go.th/hydronet/01Knowledge/01Fuel%20Cell/FuelCellMain.html>)

-เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid)

ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารอิเล็กโทรไลต์โดยปัจจุบันมีการผลิตเซลล์แบบนี้ออกมาเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เซลล์แบบกรดฟอสฟอริกทำงานในช่วงอุณหภูมิประมาณ 150-200 °C ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้กรดฟอสฟอริกจะนำประจุไฟฟ้าได้น้อย เซลล์มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 40% แต่ว่าสามารถใช้ประโยชน์จากไอน้ำร้อนที่เกิดขึ้นโดยนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าร่วม (Cogeneration) ต่อได้

ข้อดี เป็นเซลล์ที่สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิดแม้แต่น้ำมันเชื้อเพลิงแต่ต้องกำจัดกำมะถันในน้ำมันออกให้เหลืออยู่น้อยที่สุดก่อน

ข้อเสีย ต้องใช้โลหะแพลทินัมที่มีราคาสูงเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเซลล์มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์ชนิดอื่น ชิ้นส่วนภายในจำเป็นต้องใช้วัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ดี



รูปที่ 3.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (ดัดแปลงมาจาก

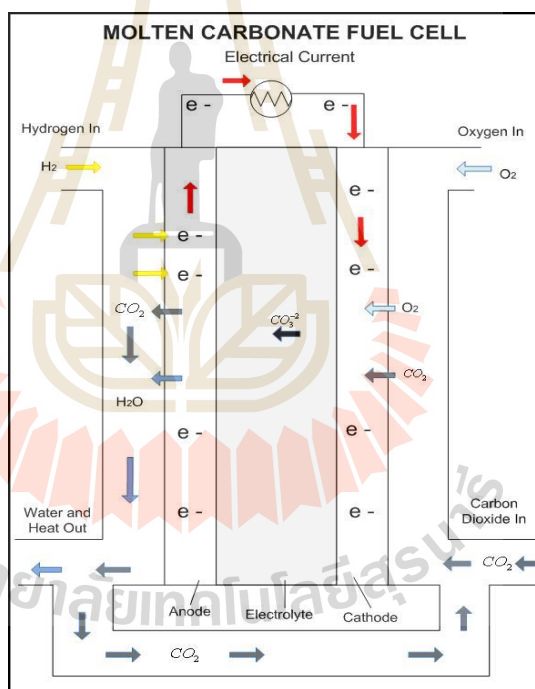
:<http://www2.dede.go.th/hydronet/01Knowledge/01Fuel%20Cell/FuelCellMain.html>)

-เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้สารละลายคาร์บอเนต หรือ โซเดียมคาร์เนต หรือ โพแทสเซียมคาร์บอเนตที่หลอมเหลว เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประมาณ 650°C เซลล์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 60% และหากใช้ร่วมกับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าความร้อนร่วมแล้วจะมีประสิทธิภาพสูงถึง 85%

ข้อดี เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าได้หลายชนิดเช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซโพรเพน น้ำมันดีเซล เป็นต้น

ข้อเสีย ที่สภาวะอุณหภูมิสูงจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะกับการใช้งานขนาดเล็กกว่าเมกะวัตต์



รูปที่ 3.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม (ดัดแปลงมาจาก

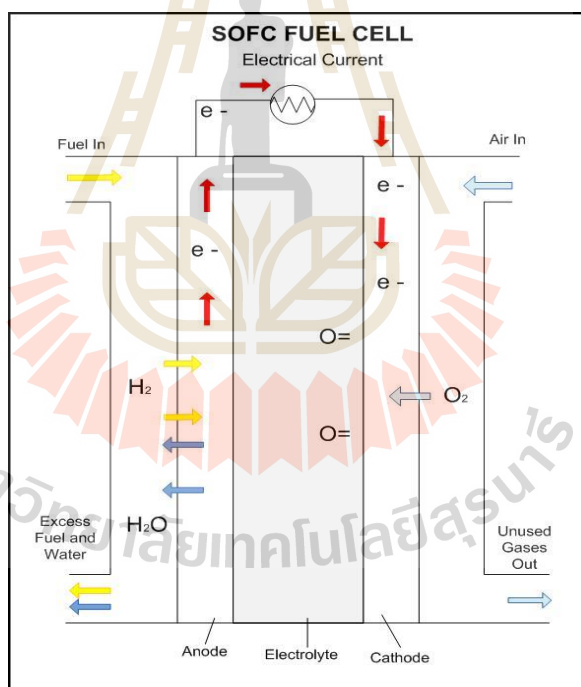
:<http://www2.dede.go.th/hydronet/01Knowledge/01Fuel%20Cell/FuelCellMain.html>)

-เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide)

เซลล์ชนิดนี้ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็งทำจากสารประกอบเซรามิก เช่น เซอร์โคเนีย ออกไซด์ เป็นต้น มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 60% และหากนำมาใช้กับระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าแบบความร้อนร่วมแล้วจะให้อัตราประสิทธิภาพสูงถึง 85% เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิ 800-1000 °C

ข้อดี เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูงมากดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้โลหะแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่ต้องใช้ระบบรีฟอร์มเมอร์ (Reformer) ในการเปลี่ยนสภาพเชื้อเพลิงจึงอาจจะช่วยลดต้นทุนในการสร้างระบบรีฟอร์มเมอร์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิดเพราะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทนทานต่อการบวมของออกไซด์ได้ดี

ข้อเสีย เซลล์ที่ทำงานในสภาวะอุณหภูมิสูงต้องเสียเวลาในการอุ่นเครื่องนาน และจำเป็นต้องสร้างผนังหนาเพื่อป้องกันความร้อนที่แผ่ออกมา



รูปที่ 3.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (ดัดแปลงมาจาก

:<http://www2.dede.go.th/hydronet/01Knowledge/01Fuel%20Cell/FuelCellMain.html>)

-เซลล์เชื้อเพลิงแบบสังกะสี-อากาศ (Zinc-Air)

เซลล์เชื้อเพลิงสังกะสี-อากาศใช้โลหะสังกะสีเป็นขั้วแอโนด เชื้อเพลิงที่ใช้คือ ก๊าซไฮโดรเจนหรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนก็ได้ ขั้วแคโทดเป็นอากาศและใช้แผ่นกรองสำหรับแยกก๊าซออกซิเจนออกมาจากอากาศเพื่อป้อนเข้าระบบ เซลล์ชนิดนี้ใช้สารโปดัสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิการทำงานของระบบอยู่ในช่วงประมาณ 700°C

ข้อดี โลหะสังกะสีที่ใช้ทำขั้วแอโนดมีราคาถูก เซลล์ทำงานได้โดยไม่ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยาและสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายรูปแบบตั้งแต่ก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์จนถึงน้ำมันเชื้อเพลิง

ข้อเสีย หลังจากทำปฏิกิริยาเคมีแล้วโลหะสังกะสีจะเปลี่ยนเป็นซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จึงต้องคอยเปลี่ยนแผ่นสังกะสีใหม่เป็นระยะ

-เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol)

เป็นเซลล์ที่เพิ่งถูกพัฒนาขึ้นมาจากแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแต่มีแนวโน้มที่สามารถจะพัฒนาให้ใช้กับอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กหรือรถยนต์ได้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากเมทานอลได้โดยไม่ต้องผ่านสารเข้าระบบรีฟอร์มเมอร์ ซึ่งแตกต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นที่จะทำงานโดยการป้อนไฮโดรเจนเข้าระบบโดยตรง เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรงมีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 40 % ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิระหว่าง $50-100^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิก่อนข้างต่ำจึงเหมาะสมที่จะพัฒนาให้เป็นแหล่งพลังงานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เช่น คอมพิวเตอร์แล็ปท็อป โทรศัพท์มือถือ นอกจากนี้ยังเหมาะที่จะนำมาใช้กับรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าแบบเดิมเมทานอลด้วย

- เซลล์เชื้อเพลิงแบบระบบหมุนเวียนน้ำ (Regenerative)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานแบบหมุนเวียนน้ำในระบบ น้ำจะถูกแยกด้วยไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนที่ได้จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงป้อนระบบเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา ซึ่งนอกจากกระแสไฟฟ้าแล้วยังได้ความร้อนและน้ำเป็นผลผลิตร่วมด้วย น้ำที่ได้จะถูกนำไปแยกด้วยกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง ดังนั้นน้ำจึงถูกหมุนเวียนอยู่ในระบบปิดตลอด ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้ยังอยู่ในขั้นการวิจัยและพัฒนาโดยองค์การนาซาและสถาบันอื่น ๆ ทั่วโลก

3.3 คุณสมบัติของไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุดและเป็นองค์ประกอบของน้ำที่เป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่สุดของสิ่งมีชีวิตบนโลก เป็นโมเลกุลมีทั่วไปตามธรรมชาติ บรรยากาศในโลกมีก๊าซไฮโดรเจนประมาณ 0.1 ppm. มีความแข็งแรงในการยึดโมเลกุล เท่ากับ 436 kJ/mol (104 kcal/mol) ดังนั้น เมื่อต้องการให้ไฮโดรเจนโมเลกุลทำปฏิกิริยา จึงต้องใช้พลังงานเพื่อทำลายความแข็งแรงในการยึดโมเลกุลดังกล่าว เช่น เพิ่มอุณหภูมิ ใช้สารเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ไฮโดรเจนอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียส อยู่กลาง ภายในนิวเคลียส ประกอบด้วยโปรตอน และนิวตรอน และมีอิเล็กตรอนวิ่งรอบนอกเหมือนธาตุอื่น ๆ ไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทปขึ้นกับจำนวนโปรตอน และจำนวนนิวตรอนที่ต่างกัน ดังนี้

ไฮโดรเจน (Hydrogen) มีจำนวนโปรตอน 1 โปรตอน จำนวน 1 นิวตรอน มีน้ำหนักอะตอม เท่ากับ 1.0078

ดิวเทอเรียม (Deuterium) มีจำนวนโปรตอน 2 โปรตอน จำนวน 1 นิวตรอน มีน้ำหนักอะตอม เท่ากับ 2.0141

ทริเทียม (Tritium) มีจำนวนโปรตอน 3 โปรตอน จำนวน 1 นิวตรอน มีน้ำหนักอะตอม เท่ากับ 3.0161

ลักษณะทั่วไปของไฮโดรเจนทั้ง 3 สถานะ ไฮโดรเจนที่เป็นของแข็ง ไม่มีสี โครงสร้างผลึก 6 เหลี่ยม Molar Volume มีค่า 22.56 cm³/mol ไฮโดรเจนที่เป็นของเหลวไม่มีสี ค่าความหนืด (Viscosity) ต่ำ เคลื่อนที่ได้เร็ว ไฮโดรเจนที่เป็นก๊าซ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ ก๊าซไฮโดรเจน 1 ลิตร มีมวล 0.0898 กรัม

โมเลกุลของไฮโดรเจน มี 2 รูปแบบ คือ Ortho-Hydrogen และ Para-Hydrogen ทั้งสองชนิดมีลักษณะการหมุนของนิวเคลียสอะตอม โดย Ortho-Hydrogen มีนิวเคลียสอะตอมที่ประกอบเป็นโมเลกุลหมุนไปในทิศทางเดียวกัน ส่วน Para-Hydrogen มีนิวเคลียสอะตอมที่ประกอบเป็นโมเลกุลหมุนไปในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้คุณสมบัติด้าน Thermodynamics แตกต่างกัน แต่คุณสมบัติทางเคมีไม่ต่างกัน อัตราส่วนสมดุลระหว่าง Ortho-Hydrogen : Para-Hydrogen = 3:1 ที่อุณหภูมิห้องเรียกว่า Normal Hydrogen และ Para-Hydrogen เป็นรูปแบบไฮโดรเจนที่มีพลังงานต่ำ ความร้อนจากปฏิกิริยาในการเปลี่ยน Normal Hydrogen ไปเป็น Para-Hydrogen เรียกว่า DH การละลายของไฮโดรเจนในของเหลวได้น้อย จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยไฮโดรเจนมีค่าการละลายที่ 273.15 °K มีค่า 1.755x10⁻³ mol% การละลายของไฮโดรเจนในโลหะ

3.4 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท โดยแบ่งตามประเภทของสารพาประจุ (Electrolyte) โดยจะกล่าวถึงการทำงานโดยละเอียดของเซลล์ประเภทเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane) เซลล์เชื้อเพลิงจะแบ่งโครงสร้างออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่

1. ขั้วแอโนด (Anode) เป็นขั้วลบ มีหน้าที่ส่งอิเล็กตรอนออกจากขั้ว โดยอิเล็กตรอนได้จากปฏิกิริยา



โดยที่ขั้วจะมีช่องที่ติดกับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งฉาบอยู่บนผิวหน้าของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยปฏิกิริยาจะเกิดเมื่อผ่านก๊าซไฮโดรเจนเข้าไป

2. ขั้วแคโทด (Cathode) เป็นขั้วบวก โดยมีช่องติดกับเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ทำหน้าที่รับโปรตอนและก๊าซออกซิเจนซึ่งถูกปล่อยออกมาที่ผิวหน้าของเยื่อซึ่งฉาบตัวเร่งปฏิกิริยาเอาไว้และทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนกลับมาจากวงจรภายนอก เพื่อรวมกันเป็นน้ำ ดังปฏิกิริยา



3. สารพาประจุ (Electrolyte) เป็นส่วนที่มีความสำคัญ เพราะ เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่างๆ และเป็นส่วนที่เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทแตกต่างกัน โดยประเภทที่เรากล่าวถึงอยู่นี้ สารพาประจุ จะเป็นเพียงเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน เท่านั้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนแผ่นพลาสติกในการทำครัว โดยจะให้โปรตอนผ่านได้แต่

4. ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เป็นวัสดุพิเศษที่ช่วยให้ปฏิกิริยาในขั้นตอนต่าง ๆ เกิดได้ดี โดยส่วนใหญ่จะเป็นผงแพลทินัมเคลือบอยู่บนเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งจะมีลักษณะขรุขระเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับก๊าซไฮโดรเจน และ ออกซิเจน

หลักการทำงาน คือ H_2 จะถูกปล่อยไปในด้านแอโนดโดยใช้ความดัน เมื่อก๊าซไปสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา ก็จะมีการแตกตัวออกเป็น โปรตอนและอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรภายนอก ส่วนโปรตอนนั้นจะผ่านช่องของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนไปยังขั้วแคโทดซึ่งจะไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่รับมาจากวงจรภายนอก รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนซึ่งแตกตัวโดยการเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นโมเลกุลของน้ำขึ้นมา ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนนี้จะนำไปใช้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้เพื่อประโยชน์ในงานด้านต่าง ๆ

แต่เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจน H_2 เป็นก๊าซที่อันตราย เนื่องจากติดไฟได้ง่าย จึงไม่เหมาะสมในการบรรจุหรือเคลื่อนย้ายไปมาและจึงทำให้มีการพัฒนาเป็น Fuel Processor ซึ่งมีหลักการคือ

1. ใช้เครื่อง Reformer เปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ H_2O และ O_2 ให้กลายเป็น H_2 , CO และ CO_2
 2. ใช้เครื่อง Catalytic Converter เปลี่ยน CO ให้กลายเป็น CO_2
 3. จากนั้น ก็จะนำ H_2 มาใช้ได้ตามต้องการ ส่วน CO_2 ก็ถูกปล่อยสู่อากาศต่อไป
- วิธีนี้นอกจากจะเพิ่มความปลอดภัยแล้วยังเป็นการประหยัดอีกด้วย เนื่องจากสามารถเปลี่ยนสารอื่น ๆ มาเป็น H_2 ได้

จากการศึกษาและทำวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ในหัวข้อ วิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด จะทำการศึกษาในเซลล์เชื้อเพลิงประเภทระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane - PEM) เพื่อที่จะทำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบแยกโดดต่อไป ดังนี้

3.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

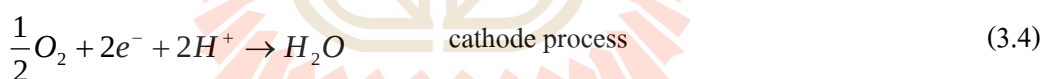
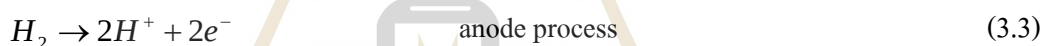
เซลล์เชื้อเพลิง คือ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี มีลักษณะการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องเมื่อการป้อนก๊าซเชื้อเพลิงเข้าไปได้เหมาะสมและไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลที่ได้จากปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงคือ น้ำ และความร้อน เซลล์เชื้อเพลิงที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิดการแบ่งชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงอาจแบ่งโดยใช้ความดันของก๊าซที่เข้าไป หรือใช้อุณหภูมิการทำงาน เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเกณฑ์ โดยทั่วไปแล้วจะแบ่งประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงตามชนิดของอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

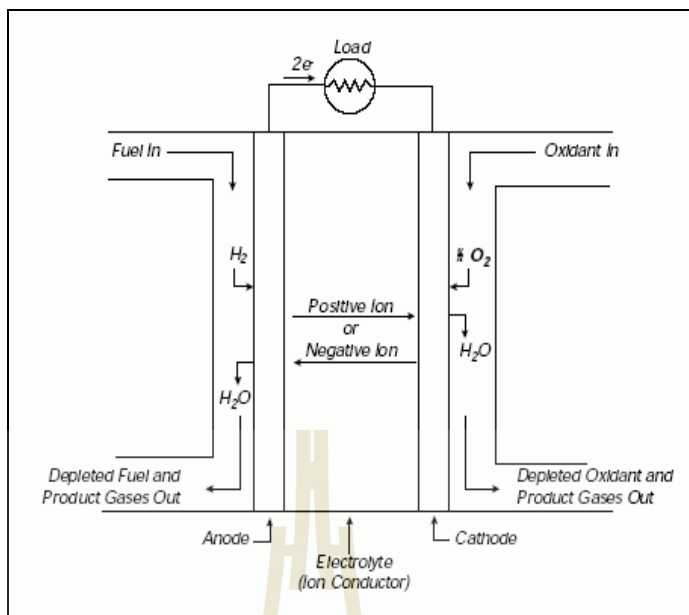
การควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ กล่าวคือ $50 - 80^\circ C$ โดยใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นอิเล็กโทรไลต์และมีแพลทินัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ จึงต้องมีการควบคุมเรื่องของการจัดการน้ำและความร้อนภายในเซลล์เชื้อเพลิงให้เหมาะสม เพราะน้ำที่เกิดขึ้นภายในอยู่ในสถานะของเหลวซึ่งจะตกค้างภายในการไหลของก๊าซและทำให้พื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิงลดลง การนำน้ำส่วนนี้ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงวิธีหนึ่งทำได้โดยการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซให้มากขึ้น ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีความนิยมนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับยานยนต์ เนื่องจากเซลล์

เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ มีประสิทธิภาพสูง มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง อายุการใช้งานยาวนาน มีขนาดกะทัดรัด เชื้อเพลิงหาได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายต่อกำลังไฟฟ้าที่ต่ำ อีกทั้งยังนิยมใช้ในการศึกษาวิจัยการผลิตพลังงานและประยุกต์ในการใช้งานจริงกันอย่างแพร่หลาย

3.5.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีความพรุน คือ แอโนดและแคโทด สัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจเป็นของแข็งหรือของเหลว โดยการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเริ่มจากขั้วแอโนดได้รับเชื้อเพลิง ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งโมเลกุลก๊าซไฮโดรเจนแตกตัวให้อิเล็กตรอน (e^-) กับโปรตอน (H^+) ดังสมการที่ 3.3 โดยโปรตอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังขั้วแคโทดได้ เนื่องจากสารอิเล็กโทรไลต์มีคุณสมบัติเป็นตัวนำโปรตอน อิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่เป็นกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรภายนอกเพื่อไปยังขั้วแคโทด เมื่อขั้วแคโทดได้รับก๊าซออกซิเจนรวมตัวกับอิเล็กตรอนและโปรตอนแล้วจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ที่ขั้วแคโทดสมการที่ 3.4 ซึ่งผลจากปฏิกิริยาจะได้โมเลกุลของน้ำรวมทั้งเกิดความร้อนดังรูปที่ 3.6



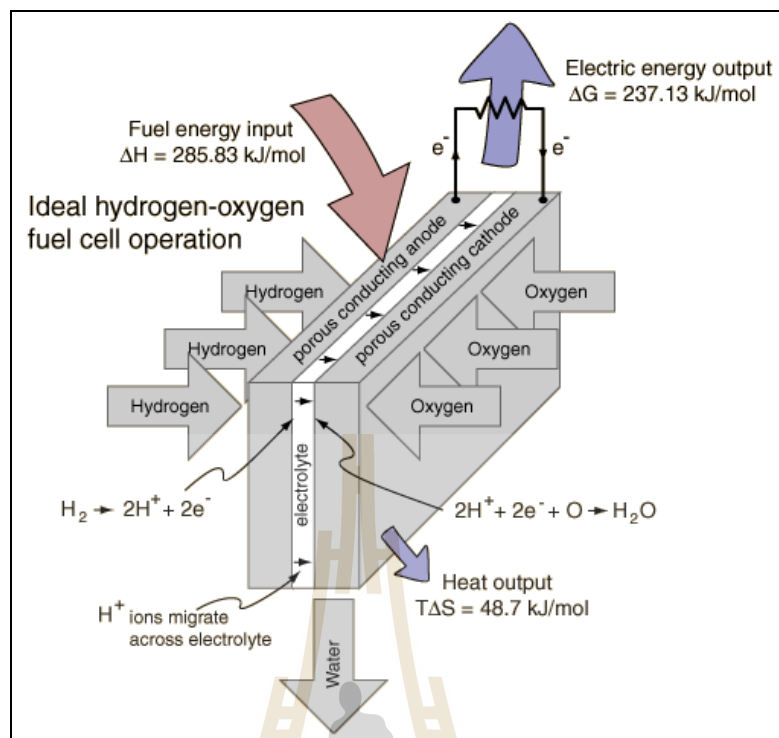


รูปที่ 3.6 ภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

(ที่มา: <http://www.mechanicalengineering.tv/images/fuel.gif>, 2004)

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ที่เรียกว่า Thermodynamics Potentials โดยอาศัยความสัมพันธ์ของปริมาณต่าง ๆ ทางอุณหพลศาสตร์สามารถอธิบายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังรูปที่ 3.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.7 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในเชิงอุณหพลศาสตร์

(ที่มา: <http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbase/thermo/electro.html>, 2002)

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาที่ปล่อยพลังงานออกมา ดังสมการที่ 3.6



ความร้อนหรือเอนทัลปีของการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ปล่อยออกมาจากระบบ คือ ผลต่างระหว่างความร้อนของการเกิดผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้น ซึ่งความร้อนของการเกิดสารผลิตภัณฑ์ (น้ำ) จากปฏิกิริยาเคมีข้างต้นมีค่าเท่ากับ -285.83 kJ/mol และค่าความร้อนของการเกิดสารตั้งต้น (ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน) มีค่าเท่ากับ 0 kJ/mol ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 3.7

$$\begin{aligned} \Delta H &= (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - (h_f)_{O_2} \\ \Delta H &= -285.83 - 0 - 0 \\ \Delta H &= -285.83 \text{ kJ/mol} \end{aligned} \quad (3.7)$$

ดังนั้นสมการที่ 3.6 สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ 3.8



ในงานทางด้านเซลล์เชื้อเพลิงพลังงานที่ปล่อยออกมาจากระบบ จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยปริมาณทางอุณหพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงดังสมการที่ 3.9

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.9)$$

โดยที่

$$\Delta S = (S_f)_{H_2O} - (S_f)_{H_2} - (S_f)_{O_2} \quad (3.10)$$

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 °K พลังงานที่เกิดจากการรวมกันของอะตอมทำให้ปริมาณของก๊าซลดลง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเอนทัลปีและเอนโทรปี ดังแสดงในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.1 ค่ามาตรฐานทางอุณหพลศาสตร์และการคำนวณปริมาณทางอุณหพลศาสตร์

Quantity	H ₂	0.5O ₂	H ₂ O	Change
Enthalpy	0	0	-285.83 kJ	$\Delta H = -285.83 \text{ kJ}$
Entropy	130.68 J/K	$0.5 \times 205.14 \text{ J/K}$	69.91 J/K	$T \Delta S = -48.70 \text{ kJ}$

คำนวณหาพลังงานที่ปล่อยออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิง (ΔG)

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

การลดลงของเอนโทรปีเนื่องจากเป็นปฏิกิริยารวมตัว ดังนั้นปริมาณพลังงาน $T \Delta S$ ต้องถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อมในรูปของพลังงานความร้อนอุณหภูมิ T เพื่อให้เอนโทรปีรวมมีค่าคงที่จากการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงให้ออกมาเท่ากับ 237.13 kJ ต่อ 1 โมล ไฮโดรเจนโดยมีพลังงานบางส่วนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อมสำหรับงานทางไฟฟ้าที่ได้รับจะอยู่ในรูปของประจุไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 3.12

$$W_{el} = qE \quad (3.11)$$

โดยที่

$$q = n_e N_{avg} q_{el} \quad (3.12)$$

เมื่อ	W_{el}	คือ งานทางไฟฟ้า (J/mol)
	q	คือ ประจุ (Coulombs/mol)
	E	คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volts)
	n_e	คือ จำนวนอิเล็กตรอนต่อโมเลกุล H ₂ (เท่ากับ 2 electron/molecule)
	N_{avg}	คือ จำนวนโมเลกุลต่อโมล (เลขอะโวกาโด) เท่ากับ $6.022 \times 10^{23} \text{ molecules/mol}$
	F	คือ ผลคูณระหว่างเลขอะโวกาโดกับประจุ 1 อิเล็กตรอน 96,485 (Coulombs/electron-mol)

ดังนั้นงานทางไฟฟ้าหาได้จากสมการที่ 3.11 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับค่า Gibbs free energy, ΔG ได้ดังสมการที่ 3.14

$$W_{el} = n_e FE \quad (3.13)$$

$$W_{el} = -\Delta G \quad (3.14)$$

จากสมการที่ 3.14 และ 3.15 สามารถจัดรูปใหม่ และเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และ Gibbs free energy, ΔG ดังสมการที่ 3.15

$$E = \frac{-\Delta G}{n_e F} \quad (3.15)$$

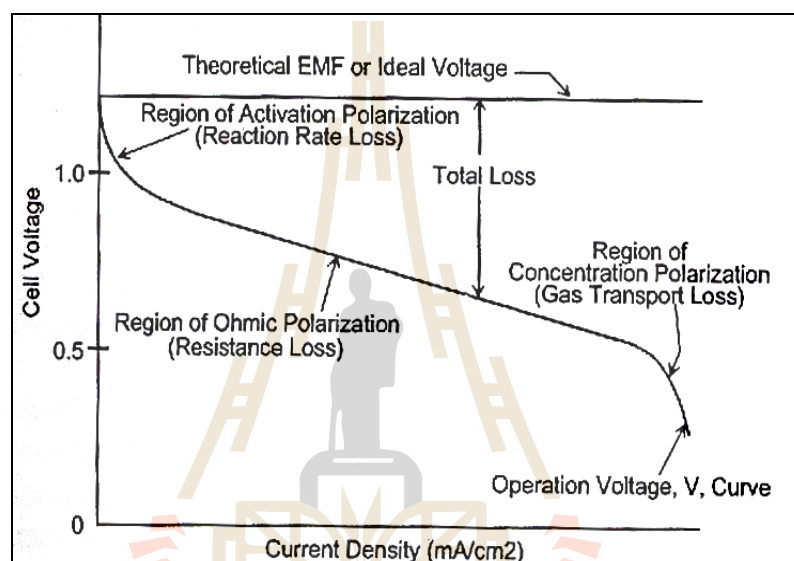
$$E = \frac{237,340 \text{ J/mol}}{2 \times 96,485 \text{ A} \cdot \text{s/mol}}$$

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

สำหรับศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibb's free energy) ของก๊าซเชื้อเพลิงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา และกระแสไฟฟ้าที่ถูกต้องเมื่อนำแต่ละเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรมแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นตามจำนวนชั้นของเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกัน กระแสไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันขึ้นกับขนาดของพื้นที่ทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง คุณสมบัติของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน โดยต้องออกแบบให้จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่ออนุกรมและขนาดของพื้นที่ผลิตกระแสหรือพื้นที่ทำปฏิกิริยาของสเต็มเซลล์เชื้อเพลิงเหมาะสมกับกำลังไฟฟ้าที่จะนำไปใช้งาน เมื่อที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ๆ จะต้องนำเอาสเต็มเซลล์แต่ละชุดมาต่อเข้าด้วยกันทั้งในลักษณะอนุกรมหรือขนานเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าตามต้องการ

3.6 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน สามารถจะวัดออกมาในค่าของความหนาแน่นกระแส (current density) ในหน่วยของ milliamperes per square centimeter (mA/cm²) ซึ่งพื้นที่ที่เป็นตัวหารนี้ก็คือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้จาก I-V characteristic curve ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นของกระแส (Kordesch, 1996)

จากกราฟความต่างศักย์ที่เซลล์เชื้อเพลิงให้ออกมาจะลดลงเมื่อมีกระแสไหลมากขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีแล้วความสัมพันธ์ของความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสควรจะเป็นเส้นตรงขนานกับแกนนอนแต่เนื่องจากข้อจำกัดในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากสาเหตุสำคัญ ดังนี้ คือ

1. ความสามารถของตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาไม่สามารถทำให้เกิดประจุไฟฟ้าได้เพียงพอออกมาขณะที่ต้องการกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเริ่มต้นการทำงานนั้นสภาวะความชื้นและอุณหภูมิในเซลล์เชื้อเพลิงยังไม่ถึงจุดที่เหมาะสมแก่การเกิดปฏิกิริยาทำให้ในช่วงนี้ ความต่างศักย์จะลดลงอย่างชัดเจน เรียกว่า reaction rate loss

2. ความต้านทานภายในของแผ่นสะสมกระแส ชั้นการแพร่ของก๊าซ และเมมเบรน เนื่องจากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุ ความต้านทานภายในเมมเบรน และพื้นที่สัมผัสระหว่างแผ่น

สะสมกระแสกับพื้นที่ทำปฏิกิริยาซึ่งมีผลจากการออกแบบซึ่งการไหลของก๊าซทำให้ความสามารถในการนำอิเล็กตรอนและโปรตอนต่ำลง เรียกว่า resistance loss หรือ ohmic loss

3. อัตราการแพร่ของก๊าซเข้าไปทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ เนื่องจากเกิดน้ำที่เกิดในชั้นการแพร่หรือในช่องการไหลของก๊าซมีมากเกินไปทำให้ลดช่องการไหลของก๊าซ และลดพื้นที่ทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาน้อยลง เรียกว่า gas transport loss

จากข้อจำกัดที่กล่าวมาทั้งหมดมีผลต่อการลดลงของความต่างศักย์ เรียกว่า โพลาริเซชัน (polarization curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์เชื้อเพลิง โดยประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์คร่อมเซลล์เชื้อเพลิงหรือความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (power density) ซึ่งหาได้จากผลคูณระหว่างความต่างศักย์กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density)

3.6.1 โพลาริเซชันทางเคมี

โพลาริเซชันทางเคมีหรือ activation polarization จะเกิดในช่วงแรกของการลดลงของความต่างศักย์คร่อมเซลล์เชื้อเพลิง โดยเกิดขึ้นเนื่องจากอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate) มีค่าต่ำ ดังปฏิกิริยาที่ข้อ 3.3 ในขณะเปิดวงจรจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซลล์อัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ 3.3 จากซ้ายไปขวาเท่ากับจากขวาไปซ้ายซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลแต่เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลออกจากเซลล์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากซ้ายไปขวามากกว่าจากขวาไปซ้ายและศักย์ไฟฟ้าจะลดลงจนกระทั่ง ส่วนจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีขึ้นอยู่กับพลังงานกระตุ้น (activation energy) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยามีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้นถ้าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงเมื่อเทียบกับพลังงานของโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาแล้วอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีก็จะมีค่าต่ำลง ทำให้เกิดการโพลาริเซชันทางเคมีมาก วิธีแก้ไขคือเพิ่มพลังงานของโมเลกุลสารตั้งต้นให้มากขึ้น เช่นเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น หรือในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลทินัม เพื่อช่วยลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาให้มีค่าลดลง

3.6.2 โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน

ความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดเนื่องมาจากองค์ประกอบของตัวเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย ความต้านทานจากขั้วไฟฟ้าเนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างแผ่นสะสมกระแสกับอิเล็กโทรด ความต้านทานจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในชั้นการแพร่ของก๊าซ และความต้านทานจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาต่อเข้ากับตัวของเซลล์เชื้อเพลิง กรณีของเซลล์เชื้อเพลิง

แบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน องค์ประกอบที่มีความต้านทานมาก คือ ความต้านทานจาก ขั้วไฟฟ้าวิธีที่สามารถลดความต้านทานนี้ทำได้โดยการให้พื้นที่สัมผัสของแผ่นสะสมกระแสกับ อิเล็กโทรดมีค่าเหมาะสมและกระจายเท่ากันทั่วทั้งแผ่น โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานเกิด ในช่วงกลางของกราฟโพลาริเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กับความหนาแน่นกระแส (current density)

3.6.3 โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น

โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นเกิดในช่วงท้ายสุดของกราฟโพลาริเซชันซึ่งเป็นช่วงที่เกิดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง การลดลงของความต่างศักย์เนื่องมาจากข้อจำกัดในการถ่ายเทเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดซ์ให้กับเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งจำเป็นต้องใช้เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ (diffusion) ก๊าซไปยังขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในช่วงที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง และเมื่อการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามีค่าสูงจะเป็นผลให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลงเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากซ้ายไปขวามีค่าสูง ทำให้ความดันของสารตั้งต้นลดลงเป็นผลให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามสมการของเนิร์นสต์ (Nernst's equation) ดังสมการที่ 3.16

$$E = E^0 + \frac{RT}{n_e F} \left(\ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3.16)$$

โดยที่ $\Delta G \propto P$ ดังนั้น $E \propto P$

เมื่อ E 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)

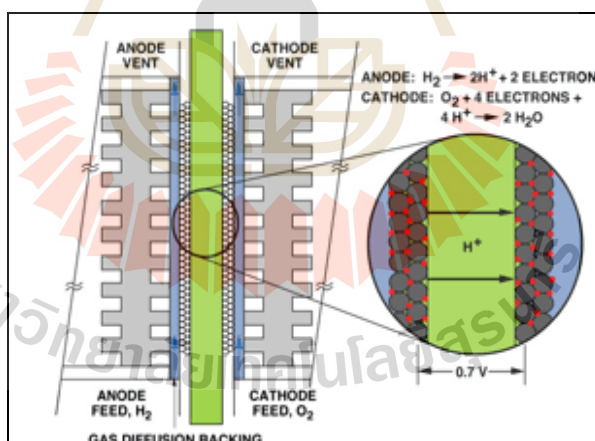
T คือ อุณหภูมิก๊าซ (K)

P คือ Partial Pressure ของ H_2 , O_2 และ H_2O

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงในทางปฏิบัตินั้น เมื่อความหนาแน่นกระแสมากขึ้นจะเป็นผลทำให้ค่าความต่างศักย์จะแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่ของก๊าซโดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าระบบที่มีความดันต่ำกว่า

3.7 องค์ประกอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ Membrane Electrode Assembly (MEAs) แสดงดังรูปที่ 3.9 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเมื่อทำงานสามารถจะให้กระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง เริ่มพัฒนาขึ้นโดยบริษัท General Electric ในปี ค.ศ. 1960 (Watkins, 1993) เพื่อใช้งานในโครงการอวกาศของสหรัฐ หรือ องค์การนาซ่า ในปัจจุบันการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนยังคงดำเนินต่อไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นโดยพัฒนาส่วนประกอบ เช่น เมมเบรน ขั้วไฟฟ้า และแผ่นสะสมกระแส เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสและให้กำลังไฟฟ้าสูงขึ้น พร้อมทั้งพยายามลดต้นทุนการผลิตเพื่อให้สามารถนำเข้าสู่ระบบอุตสาหกรรมการผลิตต่อไป



รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน 1 เซลล์

(ที่มา: http://www.rpi.edu/polymers/research_fuel_cells.html, 2005)

3.7.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ประกอบด้วยเมมเบรนพอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์เพื่อเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออนไฮโดรเจนหรือโปรตอน โดยที่เมมเบรนดังกล่าวจะถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีรูพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัมกระจายอย่างสม่ำเสมอ น้ำที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะถูกดึงออกจากเซลล์พร้อมกับก๊าซที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทางขั้วแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกระบายโดยระบบหล่อเย็น (cooling system) เซลล์เชื้อเพลิงต้องอาศัยความชื้นเป็นตัวกลางในการพาไฮโดรเจนไอออนให้เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนจากขั้วแอโนดไปขั้วแคโทด เนื่องจากเมมเบรนมีคุณสมบัติในการนำไอออนได้ดีเมื่อมีความชื้น ดังนั้นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต้องเป็นก๊าซที่มีความชื้น (humidified gases) สำหรับประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มีปัจจัยหรือตัวแปรหลายอย่างที่เกี่วข้อง 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. เงื่อนไขในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลและความชื้นของก๊าซที่เข้าทำปฏิกิริยา เป็นต้น

3.7.2 เมมเบรน

อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มีลักษณะเป็นเมมเบรนพอลิเมอร์เหมือนพลาสติก โดยคุณสมบัติของเมมเบรนพอลิเมอร์ที่ถูกใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มีดังต่อไปนี้

1. มีค่าการนำไอออนสูงแต่มีค่าการนำอิเล็กตรอนต่ำ
2. มีค่าการแพร่ของก๊าซต่ำ
3. มีขนาดที่แน่นอน
4. มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง
5. มีการแพร่ของน้ำต่ำ
6. มีความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำ (dehydration)

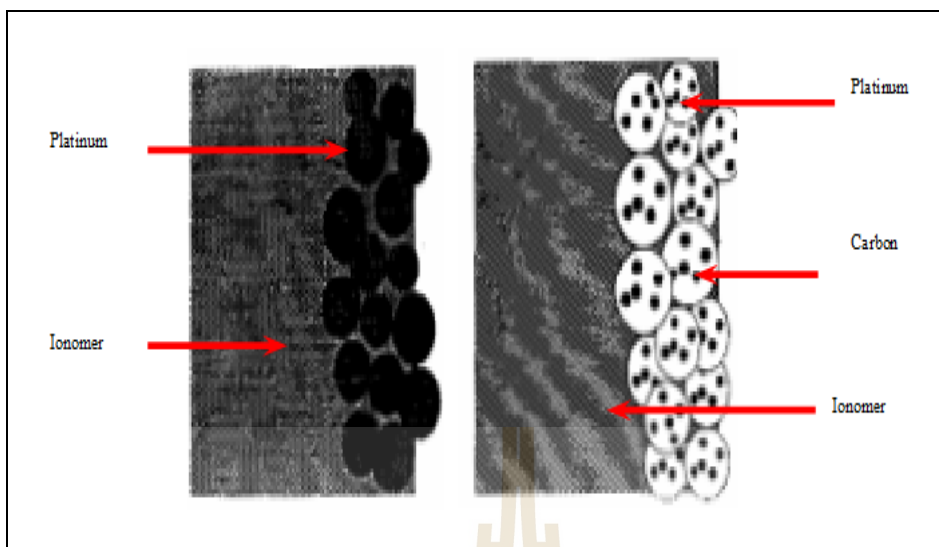
7. มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน รีดักชันและไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

8. มีค่าการถ่ายเทไอออนบวก (cation) สูง

เมมเบรนพอลิเมอร์มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากมีกลุ่มของซัลโฟนิค (sulfonic group) ประกอบอยู่ที่ปลายสายโซ่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลของกรดเปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิค (perfluorosulfonic acid) จึงมักเรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่สามารถนำไอออนไฮโดรเจนได้ดี โดยเงื่อนไขการนำไอออนต้องอยู่ในสภาวะที่มีความชื้นเข้าไปเกี่ยวข้อง เนื่องจากเมมเบรนมีคุณสมบัติความเป็นกรดซึ่งจำเป็นต้องมีโมเลกุลของน้ำต่อไฮโดรเจนไอออนที่ทำให้เกิดการนำไอออนได้ดีที่สุดคือประมาณ 3 : 1 ดังนั้นค่าการนำไอออนของพอลิเมอร์จึงขึ้นอยู่กับค่าความดันน้ำที่ตำแหน่งนั้น ๆ ภายในเซลล์เชื้อเพลิง อุณหภูมิเซลล์ และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของความชื้นด้วย

3.7.3 ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยแพลทินัมที่เกาะอยู่บนคาร์บอน ซึ่งเสริมความแข็งแรงด้วยผ้าหรือกระดาษคาร์บอน และใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ของเทฟลอน เป็นตัวเชื่อมยึดอนุภาคแพลทินัมให้ติดอยู่บนคาร์บอนการสร้างขั้วไฟฟ้าแบบที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาคิดค้นบนเมมเบรนสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีแรกเป็นการทำขั้วไฟฟ้าแบบเก่าคือการใช้แพลทินัมดำ (platinum black) มาอัดโดยใช้ความร้อนให้ติดลงไปโดยตรงบนแผ่นเมมเบรน และอีกวิธีเป็นการทำขั้วไฟฟ้าแบบใหม่หรือแบบชั้นฟิล์มบาง (มีความหนา 4 – 5 μm) โดยการนำแพลทินัมมาเกาะบนตัวรองรับคาร์บอนก่อนจากนั้นค่อยนำไปเกาะบนเมมเบรน โดยขั้วไฟฟ้าแบบชั้นฟิล์มบางให้สมรรถนะการทำงานที่ดีกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ใช้แพลทินัมดำ โดยเปรียบเทียบจากการใช้ไฮโดรเจนกับอากาศเป็นสารตั้งต้นและยังมีปริมาณการใช้แพลทินัมที่น้อยกว่าถึง 10 เท่า โดยรูปที่ 3.10 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Norbeck, 1996)

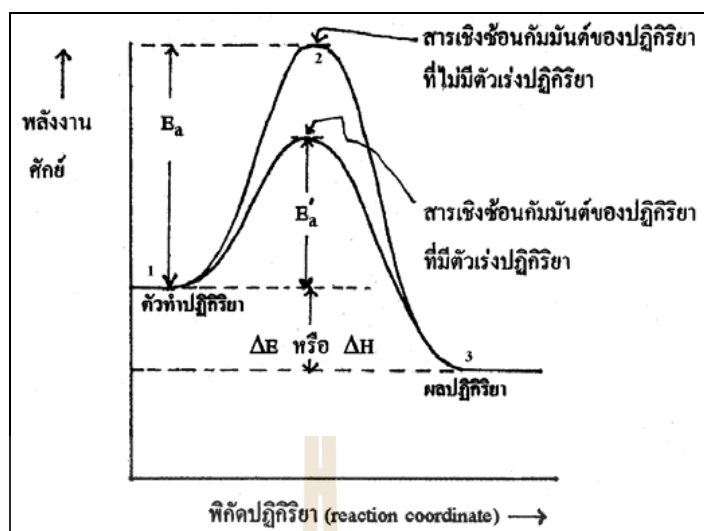


รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบรูปแบบของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [Norbeck และคณะ, 1996]

3.7.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งถ้านำก๊าซทั้งสองมาผสมกันในอุณหภูมิปกติจะไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นเนื่องจากโมเลกุลมีความเสถียรมาก ยกเว้นแต่ถ้าจะมีบางสิ่งมาทำเป็นตัวกระตุ้นจึงจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ เช่น การให้ความร้อนระหว่างที่ก๊าซไฮโดรเจนผสมกับออกซิเจนหรือเติมสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นโดยสารที่เติมลงไปนั้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดลง สารที่ช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้โดยตัวเองไม่เปลี่ยนแปลงเป็นสารอื่น และปริมาณคงเดิมเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุด เรียกสารนั้นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา อธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ การทำให้พลังงานกระตุ้น (activation energy) E_a น้อยลง

จากรูปที่ 3.11 การที่ $E_a < E_a$ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วแต่สำหรับความร้อนของปฏิกิริยาจะมีค่าเท่าเดิมเสมอไม่ว่าปฏิกิริยานั้นจะมีตัวเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของอิเล็กตรอนที่สารผลิตภัณฑ์ (product) ซึ่งต่างไปจากการจัดเรียงขณะยังเป็นสารตั้งต้น ซึ่งรูปแบบการจัดเรียงตัวจะเป็นลักษณะที่ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำกว่าสารตั้งต้นซึ่งผลต่างของพลังงานสารตั้งต้นกับสารผลิตภัณฑ์ก็คือ พลังงานความร้อนที่ได้ออกมาจากปฏิกิริยานั่นเอง โดยจากรูปที่ 3.11 เป็นการอธิบายถึงระดับพลังงานของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ในขณะเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 3.11 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา (วิโรจน์ ปิยวัชรพันธุ์, 2540)

โดยที่ E_a : พลังงานกระตุ้นเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

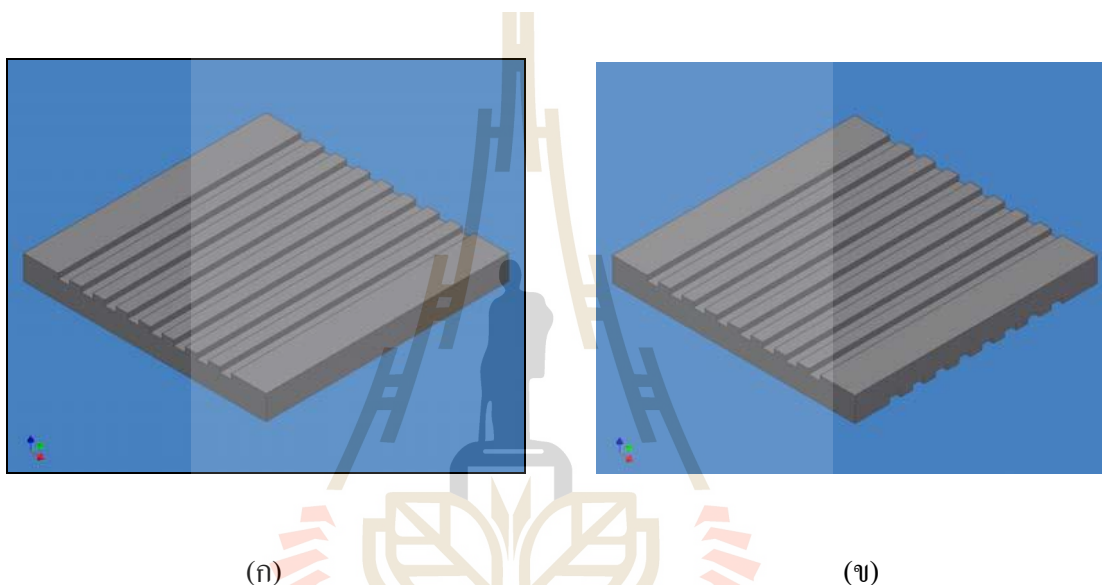
E'_a : พลังงานกระตุ้นเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา

โดย ณ จุดที่ 1 พลังงานของอิเล็กตรอนอยู่ที่ ground state ไม่มีปฏิกิริยาใด ๆ เกิดขึ้นและเมื่อมีพลังงานกระตุ้นเพิ่มเข้าไปให้สารตั้งต้นทำให้ระดับพลังงานเพิ่มไปสู่ ณ จุดที่ 2 แต่ในกรณีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดระดับพลังงานกระตุ้นลงจาก E_a มาเป็น E'_a กระบวนการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น

จากนั้นจะได้สารผลิตภัณฑ์ออกมาพร้อมกับปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบต่าง ๆ โดยระดับพลังงานสุดท้ายจะตกมาอยู่ ณ จุดที่ 3 โดยผลรวมของพลังงานที่ปล่อยออกมาเท่ากับผลบวกของพลังงานกระตุ้น (E_a) และพลังงานการเกิดปฏิกิริยา (ΔH) โดยถ้า ΔH เป็นบวกจะเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน และถ้า ΔH เป็นลบจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนซึ่งสามารถใช้แพลทินัม (Pt) พาลาเดียม (Pd) นิกเกิล (Ni) และเหล็ก (Fe) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถดูดก๊าซไฮโดรเจนได้ดีมาก ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนแตกเป็นอะตอมซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยามาก และยิ่งพื้นที่ผิวมากปฏิกิริยาก็ยิ่งเกิดได้เร็วขึ้น

3.7.5 แผ่นสะสมกระแส

แผ่นสะสมกระแส (Current Collector Plate) เป็นองค์ประกอบในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีน้ำหนักมากที่สุด โดยเฉพาะเมื่อประกอบเป็นชั้นเซลล์ซึ่งแผ่นสะสมกระแส เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แผ่นช่องทางเดินก๊าซ (gas flowfield plate) จะประกอบเป็น โครงสร้างหลักของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง แผ่นสะสมกระแสมี 2 แบบ คือ bipolar plate และ unipolar plate โดยที่ bipolar plate จะคั่นอยู่ระหว่างเซลล์แต่ละเซลล์ที่ประกอบเป็น stack cell ซึ่งในแต่ละ bipolar plate จะทำหน้าที่เป็นทั้ง ขั้วบวก และขั้วลบ ในเวลาเดียวกันโดยแผ่นสะสมกระแสทั้ง 2 แบบแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผ่นสะสมกระแส (ก) แบบ unipolar plate (ข) แบบ bipolar plate

จากรูปที่ 3.12 สำหรับ unipolar plate จะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกหรือลบอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น โดยหน้าที่หลักของแผ่นสะสมกระแส มีดังต่อไปนี้

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

แผ่นสะสมกระแสจะมีช่องทางเดินก๊าซอยู่บนผิวหน้า โดยอาจจะมีลักษณะรูปแบบที่แตกต่างกันระหว่างขั้วแอโนด และแคโทดและทิศทางการไหลของก๊าซบนขั้วไฟฟ้าก็จะแตกต่างกันในแต่ละด้านด้วย ซึ่งมีลักษณะการไหลในทิศทางตรงกันข้ามกันหรือไหลในทิศทางที่ตัดกันก็สามารถทำได้ การออกแบบแผ่นสะสมกระแสถือว่ามีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงาน

ของเซลล์เชื้อเพลิงเพราะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการกระจายตัวของก๊าซที่เข้าทำปฏิกิริยา มีผลให้ประสิทธิภาพการทำงาน และนอกจากการออกแบบรูปแบบของช่องทางเดินก๊าซจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วยังมีผลต่อการจัดการน้ำ (water management) ภายในเซลล์ด้วย

3.7.6 วัสดุสำหรับทำแผ่นสะสมกระแส

คุณสมบัติของวัสดุที่จะมาทำแผ่นสะสมกระแสมีดังต่อไปนี้

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

ปัจจุบันวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุด คือ กราไฟต์ที่ผ่านกระบวนการอัดเรซิน (resin impregnated) เพื่ออุดรูพรุนภายในเนื้อกราฟต์แต่มีข้อเสียคือการขึ้นรูปยากและมีราคาแพง ดังนั้นจึงมีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวัสดุทดแทนกราฟต์ โดยอาศัยคุณสมบัติของแผ่นสะสมกระแสข้างต้นเป็นเกณฑ์ในการเลือกวัสดุ

3.7.7 ประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรน

ประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรน Membrane Electrode Assembly (MEA) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าประกบเข้ากับเมมเบรนโดยใช้วิธีการกดอัดด้วยความร้อน โดยขั้วไฟฟ้าประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นส่วนที่ทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งการเรียงตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะเรียงตัวแบบ three phase boundary ซึ่งหมายถึงพื้นผิวสัมผัสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวทำปฏิกิริยาและเมมเบรนหรืออิเล็กโทรไลต์ โดยพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาใน three-phase boundary ต้องมีค่ามากกว่าพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (Terrance, 2000)

โดยส่วนใหญ่ขั้วไฟฟ้าสำหรับนำมาประกอบเป็น MEA ทำมาจากกระดาษหรือผ้าคาร์บอนที่นำมาผ่านกระบวนการทำให้ผิวหน้าของผ้าคาร์บอนอิ่มตัว (impregnating) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบของน้ำหมึก (ink) ซึ่งน้ำหมึกประกอบไปด้วยแพลทินัม และเสริมความแข็งแรงด้วยอนุภาคคาร์บอนผสมกับ Nafion emulsion ผ้าคาร์บอนที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทำให้อิ่มตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเรียกว่า ชั้นการแพร่ของก๊าซ (gas diffusion layer) แต่เมื่อผ่านกระบวนการทำให้

อิมตัวมาแล้วเรียกว่า gas diffusion electrode จากนั้นนำมาประกบเข้ากับเมมเบรนด้วยกรรมวิธีกดอัดด้วยความร้อนก็จะได้ MEA ตามต้องการ สำหรับนำไปใช้ทดสอบในระบบเซลล์เชื้อเพลิง

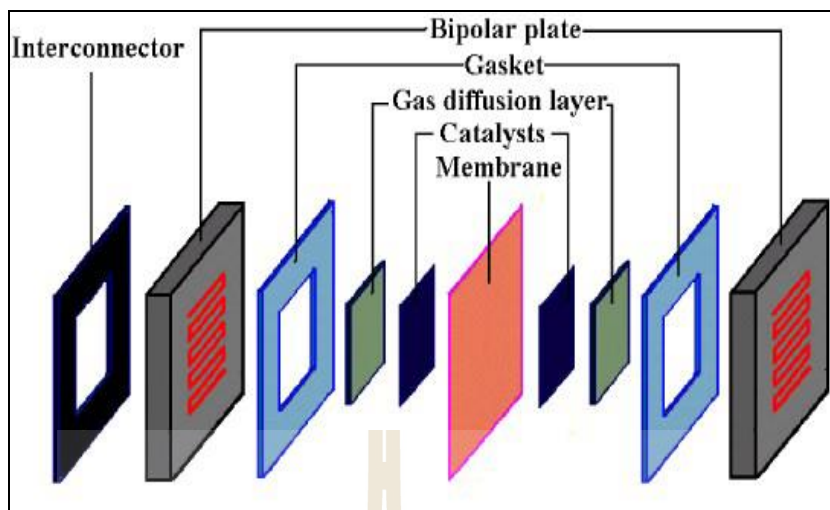
3.7.8 ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Stacks) ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ประกอบด้วยเซลล์เดี่ยวแต่ละเซลล์เรียงซ้อนกันแบบอนุกรม เพื่อให้ได้จำนวนเซลล์ตามที่ต้องการ โดยองค์ประกอบของเซลล์เดี่ยวประกอบด้วยแผ่น MEA ที่ถูกประกบด้วยแผ่นสะสมกระแสโดยป้องกันการรั่วของก๊าซในแต่ละด้านของแผ่น MEA ด้วยปะเก็น (gasket) ซึ่งก๊าซที่ให้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะกระจายไปทั่วผิวหน้าของ MEA โดยผ่านช่องทางเดินก๊าซบนผิวหน้าของแผ่นสะสมกระแส ซึ่งแผ่นปะเก็นจะประกบในแต่ละด้านของ MEA โดยจะเว้นช่องไว้สำหรับขั้วไฟฟ้าหรือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา

การป้องกันการรั่วของก๊าซที่มีประสิทธิภาพ จะต้องมียุทธศาสตร์ของเมมเบรนตรงบริเวณขอบของแผ่น MEA เหลือพอสำหรับการประกบกับแผ่นปะเก็นพร้อมกับการยึดตรึงที่แน่นหนาด้วย (Mikkola, 2002) โดยจะมีแผ่นปิดท้าย (end plate) ในแต่ละด้านของตัวเซลล์เชื้อเพลิงช่วยเสริมความแข็งแรงอีกชั้นหนึ่ง

สำหรับการประกอบชั้นเซลล์ ทำได้โดยการเพิ่มแผ่นสะสมกระแสที่มีหน้าของช่องทางเดินก๊าซทั้งสองหน้าหรือ bipolar plate แทรกเข้าไปในเซลล์เดี่ยวโดยที่ bipolar plate จะทำหน้าที่เป็นทั้งขั้วไฟฟ้าบวกและลบในเวลาเดียวกัน จำนวนชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับจำนวนของ bipolar plate ที่แทรกเข้าไประหว่างเซลล์เดี่ยว การประกอบชั้นเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 3.13 จะต้องให้ความสำคัญกับวิธีการป้องกันการรั่วซึมของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนเข้าหากันในแต่ละด้านของ MEA ซึ่งจะมีผลให้เกิดไฟลุกไหม้บนขั้วไฟฟ้าภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้

นอกจากการป้องกันการรั่วซึมของก๊าซแล้ว ยังต้องให้ความสำคัญกับวิธีการยึดตรึงเพื่อให้องค์ประกอบของชั้นเซลล์ประกบกันอย่างสนิทแน่นหนา โดยจะมีผลโดยตรงต่อความต้านทานพื้นผิวสัมผัส (contact resistance) ขององค์ประกอบภายในเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าพื้นผิวสัมผัสไม่แน่นสนิทจะมีผลให้เกิดการลดลงของความต่างศักย์ (potential drop) อย่างรวดเร็วขณะเกิดการดึงกระแสจากตัวต้านทานภายนอก



รูปที่ 3.13 ส่วนประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

(ที่มา: <http://www.kemi.dtu.dk>, 2006)

สำหรับปริมาณเชื้อเพลิงที่เซลล์เชื้อเพลิงต้องการใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดยตรงจากปริมาณกระแสไฟฟ้า เนื่องจากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแปรผันโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตออกมาโดยเกิดปฏิกิริยาสุดท้ายได้น้ำออกมาเป็นผลิตภัณฑ์และสามารถทราบปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาได้จากการคำนวณปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ถูกใช้ไป

อัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนในปฏิกิริยาเป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าที่ให้ออกมา (output current) ซึ่งกระแสไฟฟ้าในหน่วยแอมแปร์ หมายถึงจำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าต่อวินาทีในแต่ละโมเลกุลของไฮโดรเจนจะประกอบด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว ดังนั้นการวัดกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้คือ การวัดจำนวนของโมเลกุลของไฮโดรเจนที่แตกตัวให้อิเล็กตรอนออกมา ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$1 \text{ ampere of current} = 1 \text{ coulomb of electron per second}$$

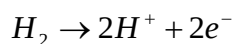
$$1 \text{ coulomb of electron per second} = 6.241506 \times 10^{18} \text{ electrons per second}$$

จากความรู้พื้นฐานทางเคมีในการคำนวณปริมาณของสารจากสมการเคมี ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารในสมการเคมี มีดังนี้



$$\frac{1}{2} \text{ moles of A} = \frac{1}{b} \text{ moles of B} = \frac{1}{c} \text{ moles of C} = \frac{1}{d} \text{ moles of D}$$

จากปฏิกิริยาด้านขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง



จะได้ว่า

$$\text{mole of } H_2 = \frac{1}{2} \text{ mole of } e^-$$

$$= \frac{6.241506 \times 10^{18} / 6.022136 \times 10^{23}}{2}$$

$$= 5.182136 \times 10^{-6} \text{ mole/second}$$

เมื่อ 1 โมล เท่ากับ ก๊าซ $22.428782 \times 10^3 \text{ cm}^3$
ไฮโดรเจน มีความหนาแน่น เท่ากับ 0.0899 kg/m^3
ดังนั้นสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ อัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนต่อปริมาณกระแสไฟฟ้า
1 แอมแปร์ จะมีค่าเท่ากับ

$$= 5.182136 \times 10^{-6} \frac{\text{mole}}{\text{second}} \times 22.428782 \times 10^3 \frac{\text{cm}^3}{\text{mole}}$$

$$= 0.116229 \text{ cm}^3 / \text{sec}$$

$$= 6.9737 \text{ sccm}$$

$$= 3.76 \times 10^{-5} \text{ kg/min}$$

ดังนั้นอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เดียวคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Hydrogen consumption rate} = 0.116229 \times \text{Amps} \times 60 \text{ second (หน่วย sccm)} \quad (3.18)$$

Hydrogen consumption rate คือ อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน

ในกรณีที่นำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน สามารถคำนวณอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจนได้ดังนี้

$$\text{Hydrogen consumption rate} = 0.116229 \times n_{\text{cell}} \times \text{Amps} \times 60 \text{ second (หน่วย sccm)} \quad (3.19)$$

โดยที่ n_{cell} : จำนวนเซลล์เดี่ยวที่นำมาต่ออนุกรมกัน

sccm = Converting flow in standard cubic centimeters per minute (การแปลงอัตราการไหลในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)

3.8 สรุป

ในบทที่ 3 นี้ได้ทำการอธิบายทฤษฎีและสมมติฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าต่าง ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติของไฮโดรเจน ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงว่าแบ่งออกได้เป็นกี่ประเภท ตามชนิดของสารตัวนำที่อยู่ในระบบเซลล์เชื้อเพลิง การทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยจะทำการสนใจในเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC เป็นพิเศษเนื่องจากจะนำข้อมูลที่ได้จากศึกษานี้ไปสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป โดยที่การศึกษาและทำวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ในหัวข้อวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด จะทำการศึกษาและทดสอบในระบบเซลล์เชื้อเพลิงประเภทเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane - PEM) เพื่อที่จะทำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบแยกโดดต่อไป และในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการศึกษาแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ SOFC (Modeling of SOFC system) และแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC

บทที่ 4

ศึกษาแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิง

4.1 บทนำ

การศึกษาเกี่ยวกับการจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถนำไปสู่การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดดได้ โดยในบทนี้จะทำการศึกษาจากแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจากผู้ที่เคยได้ศึกษามาแล้วและนำมาทำการจำลองผลทาง Simulink จากโปรแกรม MATLAB เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงต่อไป

4.2 แบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ SOFC

แบบจำลองพลวัตส่วนกำลังงานพื้นฐานแบบ SOFC (Modeling of SOFC system) ใช้เพื่อการวิเคราะห์สภาพการทำงานในระหว่างการดำเนินไปอย่างปกติ พื้นฐานของมันคือบางกลยุทธการควบคุมของระบบเซลล์เชื้อเพลิง ฟังก์ชันการตอบสนองของกระบวนการเชื้อเพลิงและส่วนกำลังงาน ถูกเพิ่มเพื่อสร้างแบบจำลองระบบกำเนิดกำลังงาน SOFC การจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ถึงแม้ว่า CO สามารถที่จะเป็นเชื้อเพลิงใน SOFC ปฏิกริยาในการเปลี่ยน CO ปฏิกริยาที่พิเศษทางเคมี การออกแบบปัจจุบันและการกระทำถ้าก๊าซเชื้อเพลิงมีน้ำผสมอยู่ด้วยปฏิกิริยาการเปลี่ยน CO คือ



เมื่อใช้การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นพื้นฐาน สมมติให้ มีแค่ H_2 และ O_2 ถูกส่งเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิง

2) ประโยชน์การใช้เชื้อเพลิงพิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างการไหลของเชื้อเพลิงซึ่งทำปฏิกิริยาและการไหลเข้าของเชื้อเพลิง แล้วเราก็จะได้

$$U_f = q_{H_2}^r / q_{H_2}^{in} \quad (4.2)$$

โดยทั่วไปประมาณ 80-90% ของประโยชน์เชื้อเพลิงที่ถูกใช้ไป ซึ่งทำให้ได้สมการดังนี้

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 I_{fe}^r}{2F} = 2K_r I_{fe}^r \quad (4.3)$$

สำหรับไฮโดรเจนที่ไหลเข้าอย่างแน่นอน ความต้องการกระแสจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถกำหนดให้อยู่ในช่วงได้ดังนี้

$$\frac{0.8q_{H_2}^{in}}{2K_r} \leq I_{fe}^{in} \leq \frac{0.9q_{H_2}^{in}}{2K_r} \quad (4.4)$$

3) กระแสขาออกจริงในระบบเซลล์เชื้อเพลิง สามารถวัดได้ ดังนั้นเชื้อเพลิงที่ไหลเข้าสามารถควบคุมโดย U_f ที่ 85% ดังเช่น

$$q_{H_2}^{in} = \frac{2K_r I_{fe}^r}{0.85} \quad (4.5)$$

4) ความจุกำลังสูงสุดคือ อัตราส่วนของกำลังงานสูงสุดทางทฤษฎีที่ถูกส่งและอัตรากำลังงานในระบบเชื้อเพลิง เป็นเพียงแค่การประมาณกับส่วนของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้งานได้ สำหรับศักยภาพและพฤติกรรมการรับภาระโหลดทางพลวัตที่เป็นไปได้สูงสุด p_k ควรสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ ค่านี้มีผลกระทบต่อพื้นที่เซลล์เชื้อเพลิงโดยตรงโดยเฉพาะความคงที่ของเอาต์พุต ค่าใช้จ่ายเป็นตัวจำกัดเพดานของค่าคงที่เอาต์พุต อยู่ในช่วงระหว่าง 130 ถึง 180% ในทางปฏิบัติค่าของเพดานจะถูกจำกัดโดยการทำงานของระบบความปลอดภัยด้วย ในคำสั่งที่ป้องกันความเสียหายจากสารประกอบตัวนำไฟฟ้า (electrolyte) ความแตกต่างของความดันของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจนผ่านขั้วแอโนดและแคโทดการแบ่งก๊าซควรมีความดันต่ำกว่า 4 kPa ภายใต้สภาวะปกติ และ 8 kPa ภายใต้สภาวะชั่วคราว (transient) เนื่องจากความแตกต่าง

ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีความจุกำลังงานสูงสุดที่แตกต่างกัน โดยการจำลองค่า p_k ที่ได้ในแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงควรต่ำกว่า 170 % ซึ่งหมายความว่ากำลังงานสูงสุดที่ส่งออกของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะต่ำกว่า 1.7 ครั้ง ของอัตราพลังงาน

5) ปฏิกริยาทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิงคือ



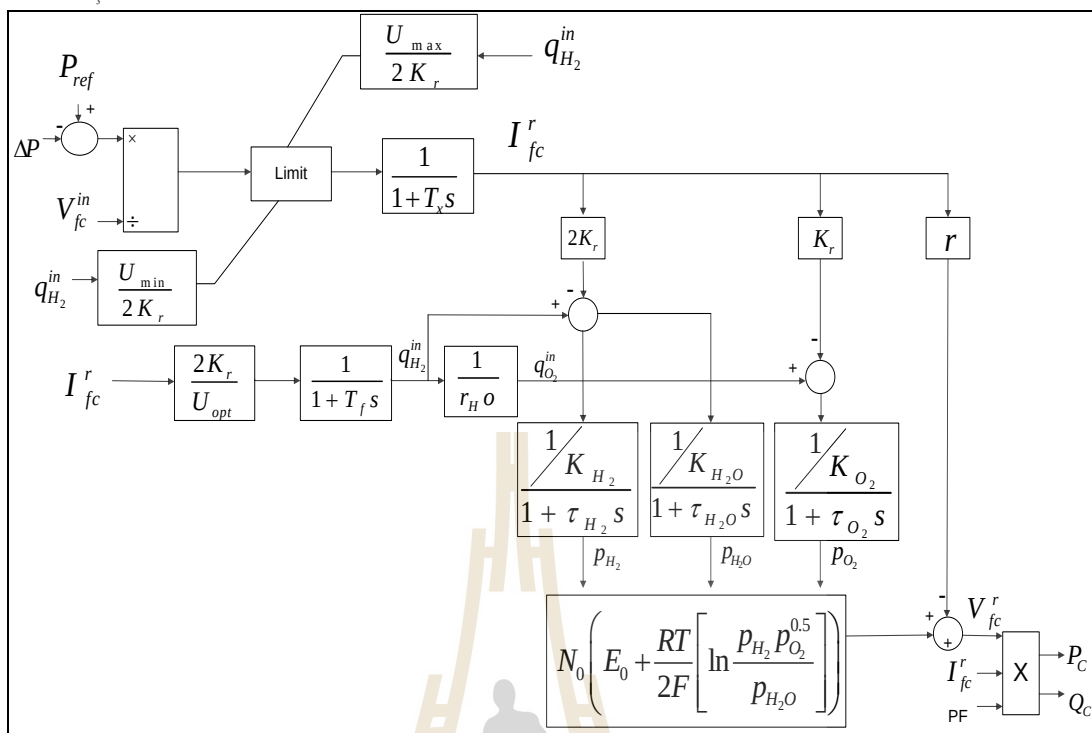
ดังนั้น อัตราส่วนของการเผาไหม้ระหว่าง ไฮโดรเจน กับ ออกซิเจน เป็น 2 ต่อ 1 ออกซิเจนจำนวนมากจะถูกเก็บไว้เพื่อให้ปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจนสมบูรณ์มากขึ้นการจำลองในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแสดงให้เห็นว่า $r_{\text{H}_2\text{O}}$ มีค่าประมาณ 1.145 เพื่อที่จะรักษาความดันเซลล์เชื้อเพลิงให้ต่ำกว่า 4 kPa ภายใต้สภาวะปกติ ดังนั้น ออกซิเจนที่ไหลเข้าไปจะถูกควบคุมเพื่อรักษา $r_{\text{H}_2\text{O}}$ ที่ 1.145 โดยควบคุมความเร็วของเครื่องบีบอัดอากาศ

5) ผลการตอบสนองทางเคมีในกระบวนการพลังงานโดยทั่วไปแล้วจะช้าเนื่องจากการเกี่ยวข้องกับเวลาของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางปฏิกิริยาเคมีหลังจากการเปลี่ยนแปลงการไหลของตัวทำปฏิกิริยา ฟังก์ชันการตอบสนองทางพลวัตนี้ถูกนำมาจำลองเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับแรกโดย เวลาคงที่ 5 วินาที

6) เวลาการตอบสนองทางไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจะรวดเร็วตามปกติและจะผูกพันกับอัตราเร็วของปฏิกิริยาทางเคมีที่ดีในการฟื้นฟูประจุที่ได้ใช้ไปแล้วโดยโพลด ฟังก์ชันการตอบสนองทางพลวัตนี้ถูกวางให้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนลำดับแรกเช่นเดียวกัน ซึ่งมีค่าคงตัวทางเวลาเป็น 0.8 วินาที

7) ในส่วนของสถานะทางกำลังงานระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถให้เอาต์พุตนอกเหนือจากกำลังงานจริงนั่นคือกำลังปฏิกิริยา โดยทั่วไป PF สามารถกำหนดให้อยู่ในช่วง 0.8-1.0 เนื่องจากเวลาในการตอบสนองของสถานะทางกำลังงานมีค่าน้อยกว่า 10 ms ไม่มีความจำเป็นที่จะรวมรายละเอียดแบบจำลองในระบบพลวัตอย่างช้าของเซลล์พลังงาน เว้นแต่ว่าเราสามารถสมมติให้ PF สามารถปรับค่าได้โดยสถานะทางกำลังงาน

จากข้อมูลข้างต้น แบบจำลองพลวัตของระบบ SOFC ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่ง $q_{\text{O}_2}^{\text{in}}$ คือการไหลเข้าของออกซิเจน (Zhu, Y. and Tomsovic, K. 2002)



รูปที่ 4.1 แบบจำลองทางพลวัตของ SOFC

4.2.1 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง

กำหนด อัตรากำลังของระบบ SOFC นี้เป็น 100 kW และค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกำหนดได้ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใน ระบบ SOFC system model

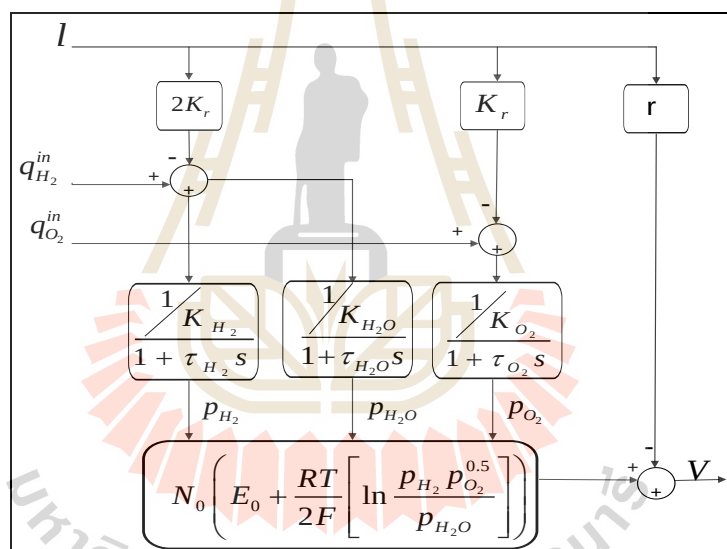
พารามิเตอร์	การนำเสนอ	ค่าที่ใช้
P_{rate}	พิกัดกำลัง (Rated power)	100 kW
P_{ref}	กำลังไฟฟ้าอ้างอิง (Real power reference)	100 kW
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)	1273 K
F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday's constant)	96487 C/mol
R	ค่าคงที่ก๊าซสากล (Universal gas constant)	8314 J/(kmol. k)
E_0	ความต่างศักย์ในอุดมคติ (Ideal standard potential)	1.18 V
N_0	จำนวนเซลล์อนุกรมในกองชั้น (Number of cells in series in the stack)	384

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆใน ระบบ SOFC system model (ต่อ)

พารามิเตอร์	การนำเสนอ	ค่าที่ใช้
K_r	ค่าคงที่(Constant), $K_r = N_0 / 4F$	0.996×10^{-6} kmol/(s A)
$U_{\max}$	จำนวนสูงสุดของการใช้เชื้อเพลิง (Maximum fuel utilization)	0.9
$U_{\min}$	จำนวนต่ำสุดของการใช้เชื้อเพลิง(Minimum fuel utilization)	0.8
U_{opt}	ค่าที่เหมาะสมของการใช้เชื้อเพลิง(Optimal fuel utilization)	0.8
K_{H_2}	ค่าคงที่มวลโมเลกุลของไฮโดรเจน (Value molar constant for hydrogen)	8.43×10^{-4} kmol/(s atm)
K_{O_2}	ค่าคงที่มวลโมเลกุลของออกซิเจน(Value molar constant for water)	2.81×10^{-4} kmol/(s atm)
K_{H_2O}	ค่าคงที่มวลโมเลกุลของน้ำ (Value molar constant for oxygen)	2.52×10^{-3} kmol/(s atm)
τ_{H_2}	การตอบสนองทางเวลาการไหลของไฮโดรเจน(Response time for hydrogen flow)	26.1 s
τ_{H_2O}	การตอบสนองทางเวลาการไหลของน้ำ (Response time for water flow)	78.3 s
τ_{O_2}	การตอบสนองทางเวลาการไหลของออกซิเจน (Response time for oxygen flow)	2.91 s
r	ค่าความต้านทานสูญเสีย (Ohmic loss)	0.126 Ω
T_e	การตอบสนองทางไฟฟ้า (Electrical response)	0.8 s
T_f	การตอบสนองทางเวลาของการประมวลผลของเชื้อเพลิง (Fuel processor response time)	5 s
r_{H-O}	อัตราส่วนของไฮโดรเจนกับออกซิเจน (Ratio of hydrogen to oxygen)	1.145
PF	ตัวประกอบกำลัง (Power factor)	1.0

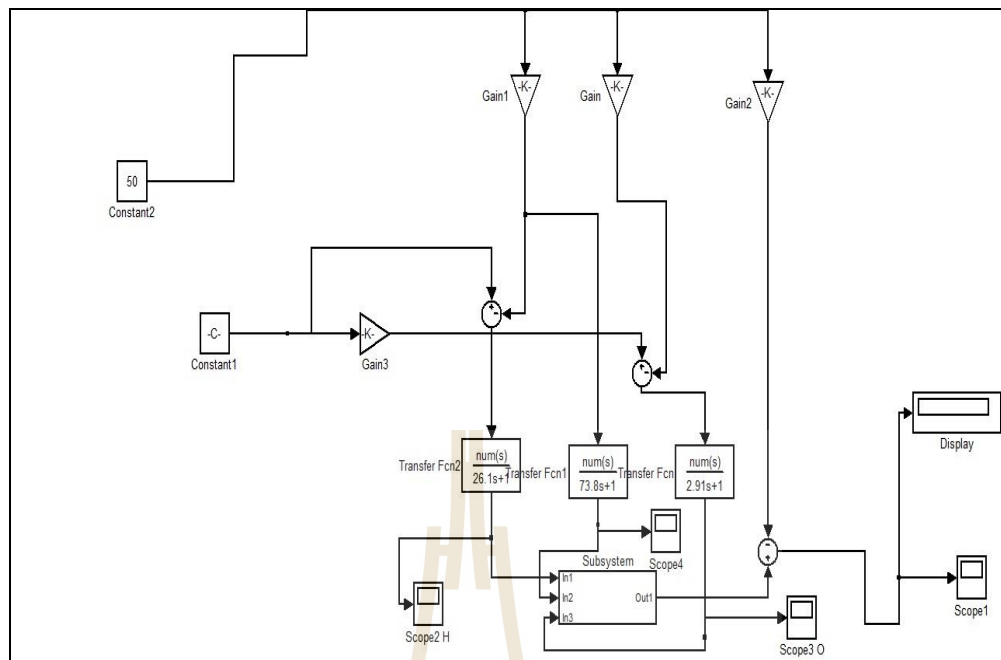
จากตารางที่ 4.1 อธิบายตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC ขนาด 100 kW

สำหรับท่อของ SOFC อุณหภูมิในการทำงานที่เหมาะสม มีค่าประมาณ 1273 K ค่ามาตรฐานของศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ E_0 ของ H_2/O_2 คือ 1.229 V กับน้ำที่ผลิตได้ และ 1.18 V กับไอน้ำที่ผลิตได้ (ภายใต้ความดัน 1 atm และ อุณหภูมิ 298 K) สำหรับ SOFC E_0 มีค่าเท่ากับ 1.18 V อัตราแรงดัน V_{rate} มีค่าเท่ากับ 333.8 V ภายใต้อัตรากำลังงานเอาต์พุต ศักย์สมดุลไฟฟ้าในอุดมคติ E สามารถคำนวณได้จาก $N_0 E - r(P_{rate}/V_{rate}) = V_{rate}$ ดังนั้น E มีค่าเท่ากับ 0.97 V ค่าเฉลี่ยความดันของออกซิเจนในการไหลที่เข้าคาโทด ซึ่งอยู่ในช่วง 0.16-0.20 bar ในแบบจำลองนี้ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฮโดรเจนและออกซิเจน อยู่ประมาณ 0.18 bar ที่อัตรากำลังงานขาออก สมมติให้ค่า PF จะคงที่เท่ากับ 1 (Padulles, J., Ault, G.W. and McDonald, J.R., 2000)

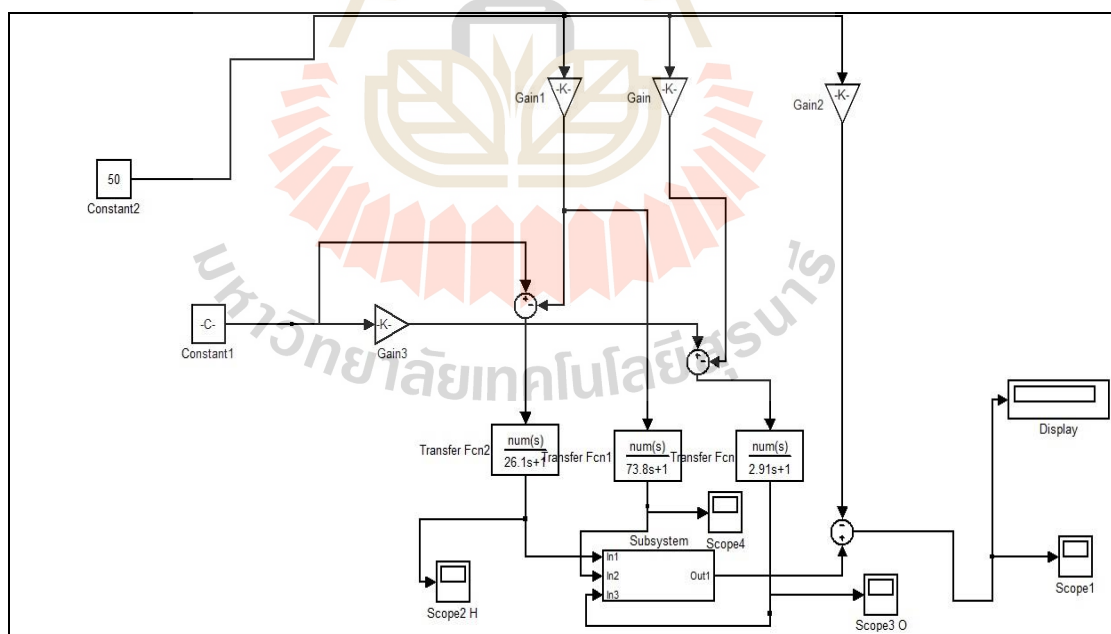


รูปที่ 4.2 ส่วนย่อยของระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC

เพื่อตรวจสอบว่าแต่ละส่วนทำงานได้และเป็นไปตามข้อมูลเบื้องต้นที่ได้ศึกษามาหรือไม่ โดยการทดสอบป้อนค่ากระแส และการไหลของไฮโดรเจนเป็นค่าคงที่ เพื่อตรวจสอบดูว่าโปรแกรมทำงานและผลทดสอบที่ได้ถูกต้องหรือไม่ จากรูปที่ 4.2 โดยการจำลองผลทาง Simulink จากโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 ทดสอบแบบจำลองย่อย (ทดสอบหาค่าแรงดัน)



รูปที่ 4.4 การทดสอบแบบจำลองย่อย (ทดสอบหาค่ากำลังงาน)

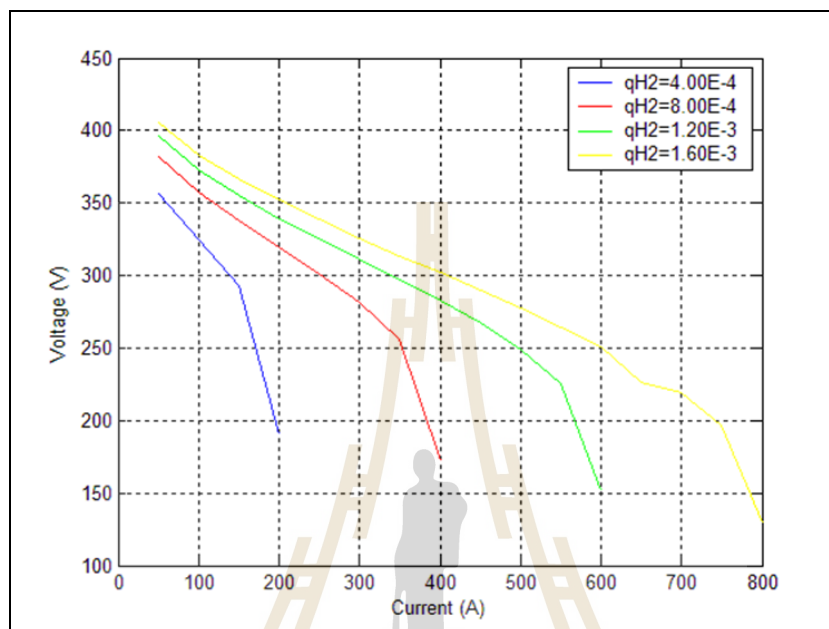
ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันที่วัดได้จากแบบจำลองย่อย (V)

ค่ากระแส(A)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$qH_2 = 4.00E-04$	356.2	324.9	293.3	190.5												
$qH_2 = 8.00E-04$	382.1	357.2	337.6	319.6	301.5	281.7	256.4	172.6								
$qH_2 = 1.20E-03$	306.2	372.7	355.1	339.1	325.3	311.2	297.2	282.6	267	249.2	225.8	151.7				
$qH_2 = 1.60E-03$	405.9	383.1	366.3	351.9	338.6	326	313.8	301.7	298.6	277.3	264.6	251.12	236.5	219.6	197.2	

ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากแบบจำลองย่อย (kW)

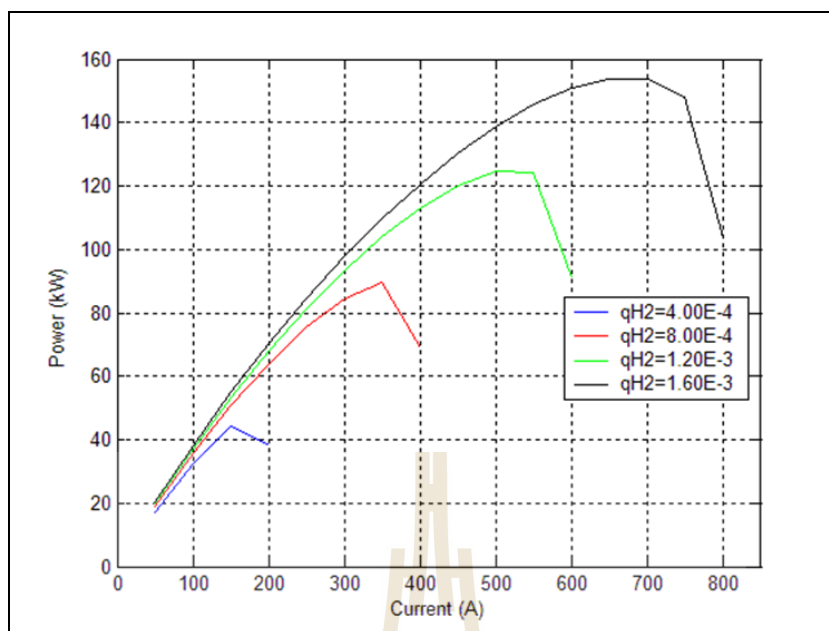
ค่ากระแส(A)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$qH_2 = 4.00E-04$	17.18	32.49	43.99	38.11												
$qH_2 = 8.00E-04$	19.11	35.72	50.64	63.91	75.36	84.5	89.75	69.06								
$qH_2 = 1.20E-03$	19.81	37.27	53.27	67.94	81.32	93.37	104.0	113	120.2	124.6	124.2	91.03				
$qH_2 = 1.60E-03$	20.29	38.31	54.95	70.37	84.65	97.8	109.8	120.7	130.3	138.6	145.5	150.7	153.8	153.7	147.9	103.6

จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่ากระแส แต่ละอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน สามารถนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และค่าแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้า ได้ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันแบบจำลอง SOFC

จากรูปที่ 4.5 จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันทำให้ทราบได้ว่าที่ค่ากระแสสูงขึ้นค่าแรงดันจะลดลงตามลำดับ ที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ต่าง ๆ กัน จากรูปทำให้ทราบว่า ระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ SOFC นี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันได้ค่าที่สูงมาก

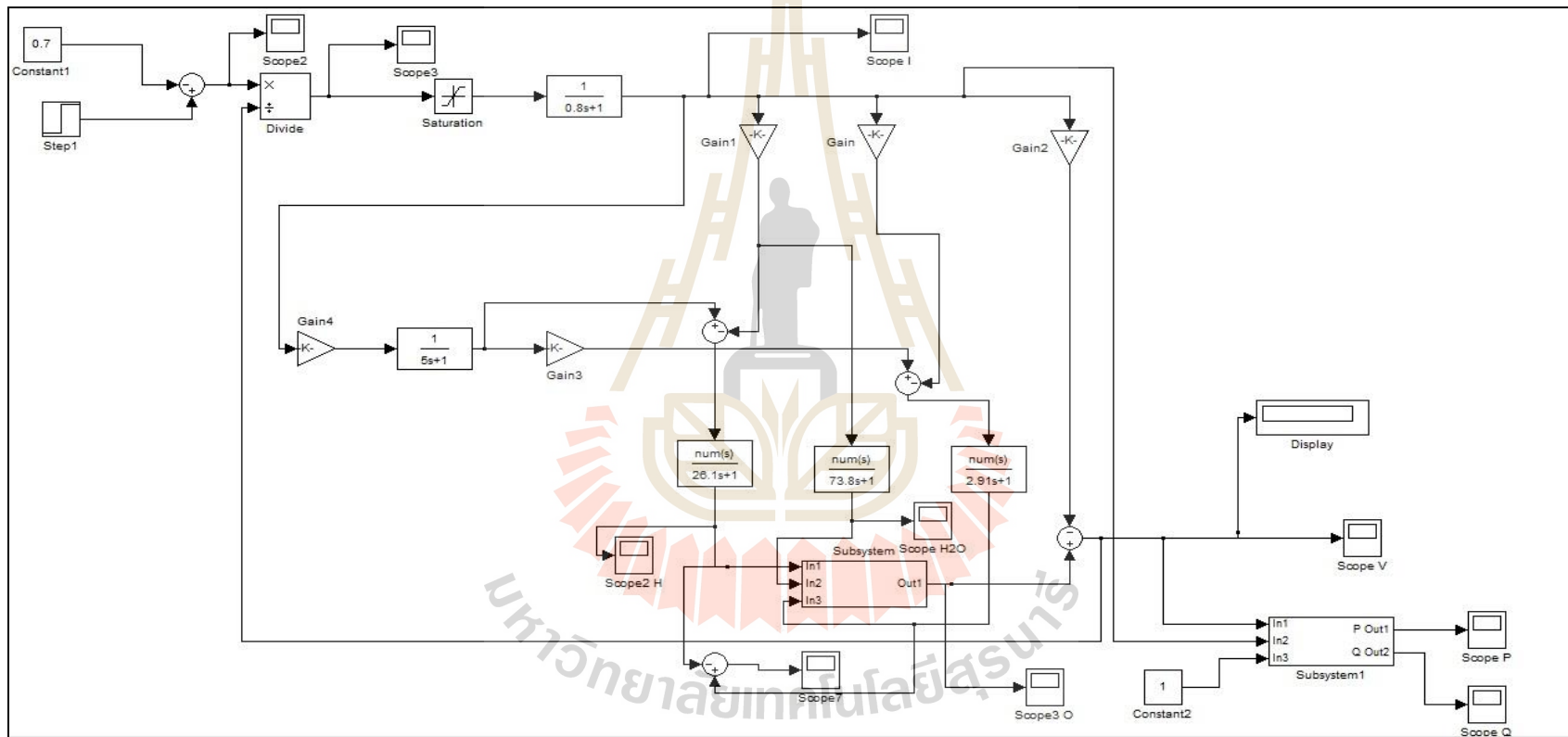


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับค่ากำลังไฟฟ้าแบบจำลอง SOFC

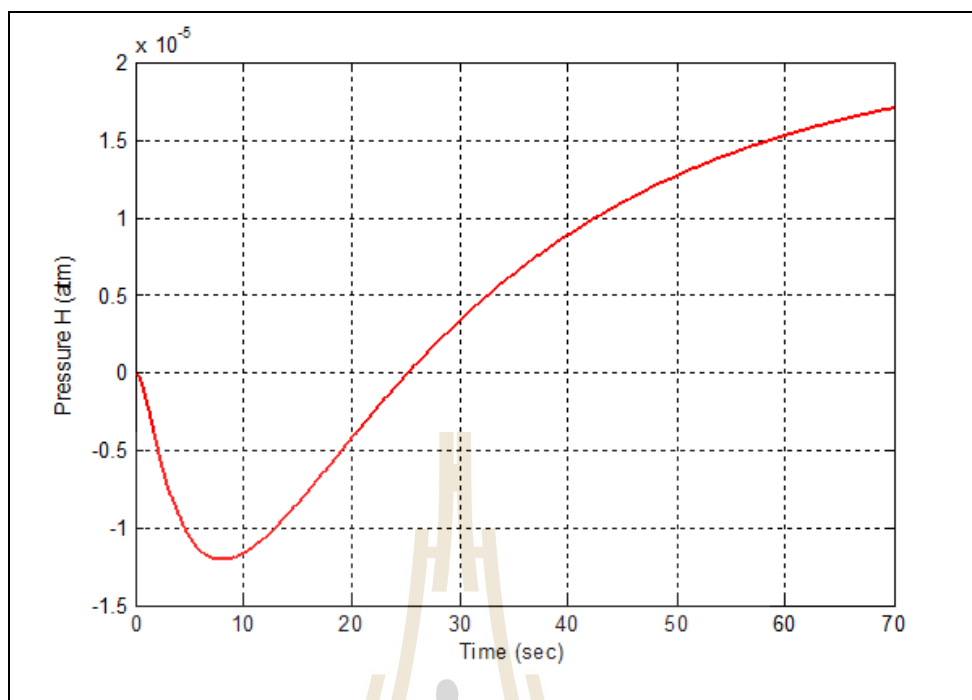
จากรูปที่ 4.5 จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันทำให้ทราบว่าที่ค่ากระแสสูงขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นไปด้วยตามลำดับ ที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ต่าง ๆ กัน ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้นี้มีค่าที่สูงมาก (kW)

4.2.2 การสร้างแบบจำลองรวมระบบเซลล์เชื้อเพลิง

จากการศึกษาแบบจำลอง SOFC และพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถนำมาสร้างแบบจำลอง SOFC ได้ดังรูปที่ 4.7

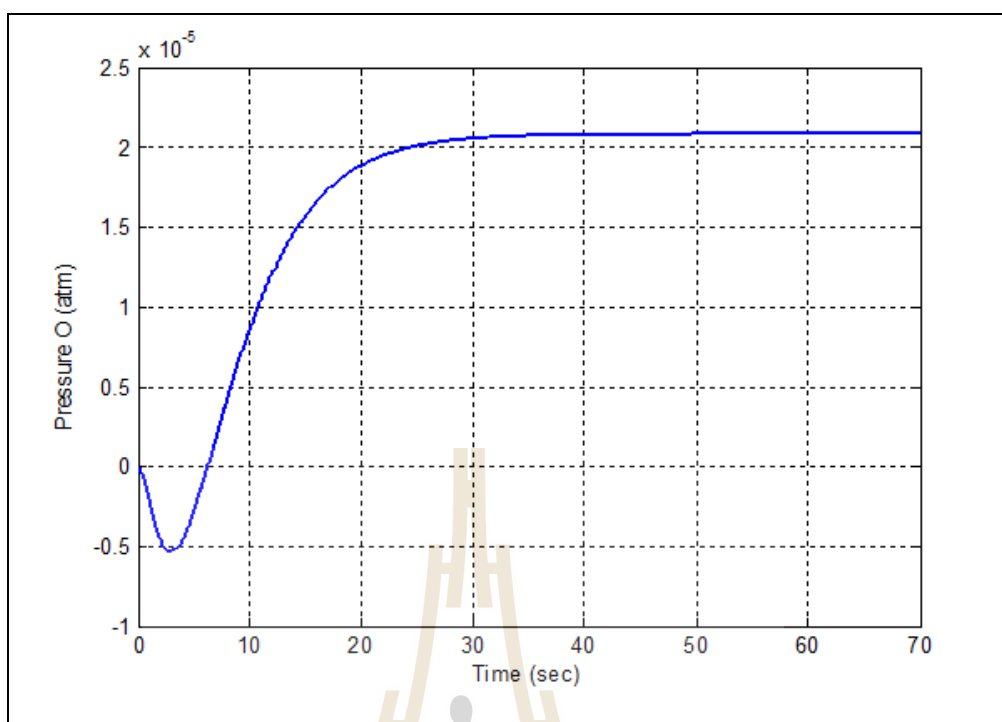


รูปที่ 4.7 แบบจำลองรวมระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC



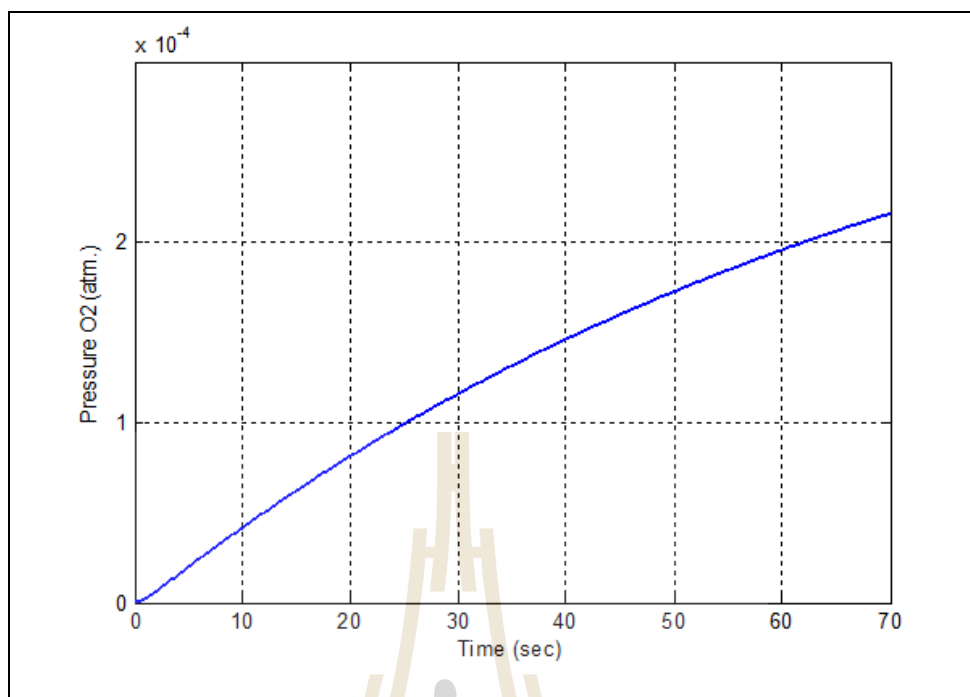
รูปที่ 4.10 ค่าความดันของไฮโดรเจนแบบจำลอง SOFC

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันของไฮโดรเจนกับเวลา คือผลที่ได้จากการทดสอบรูปที่ 4.7 แบบจำลองรวมระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC โดยที่เวลา 10 วินาทีแรกค่าความดันของไฮโดรเจนลดลงจนถึงค่าติดลบจากนั้น ที่ค่าเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น



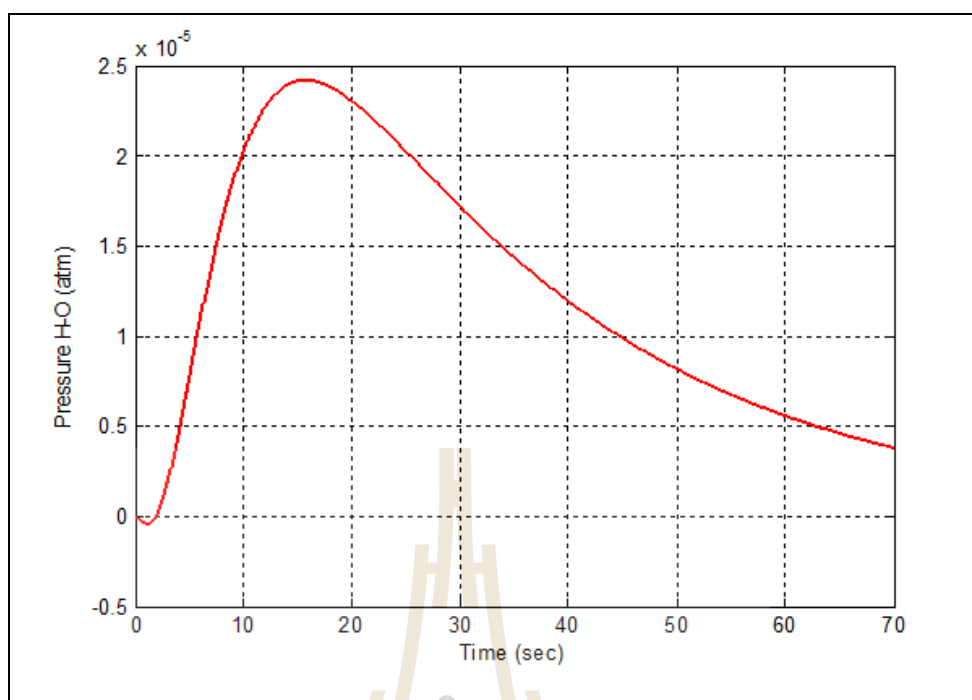
รูปที่ 4.11 ค่าความดันของออกซิเจนแบบจำลอง SOFC

จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันของออกซิเจนกับเวลา คือผลที่ได้จากการทดสอบตามรูปที่ 4.7 แบบจำลองรวมระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC ที่ค่าเวลา 10 วินาทีแรกค่าความดันออกซิเจนลดลงเป็นค่าติดลบโดยที่ค่าความเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันของออกซิเจนเพิ่มขึ้นจนถึงที่เวลา 30 วินาที ค่าความดันของออกซิเจนถึงจะคงที่ตลอด



รูปที่ 4.12 ค่าความดันของน้ำแบบจำลอง SOFC

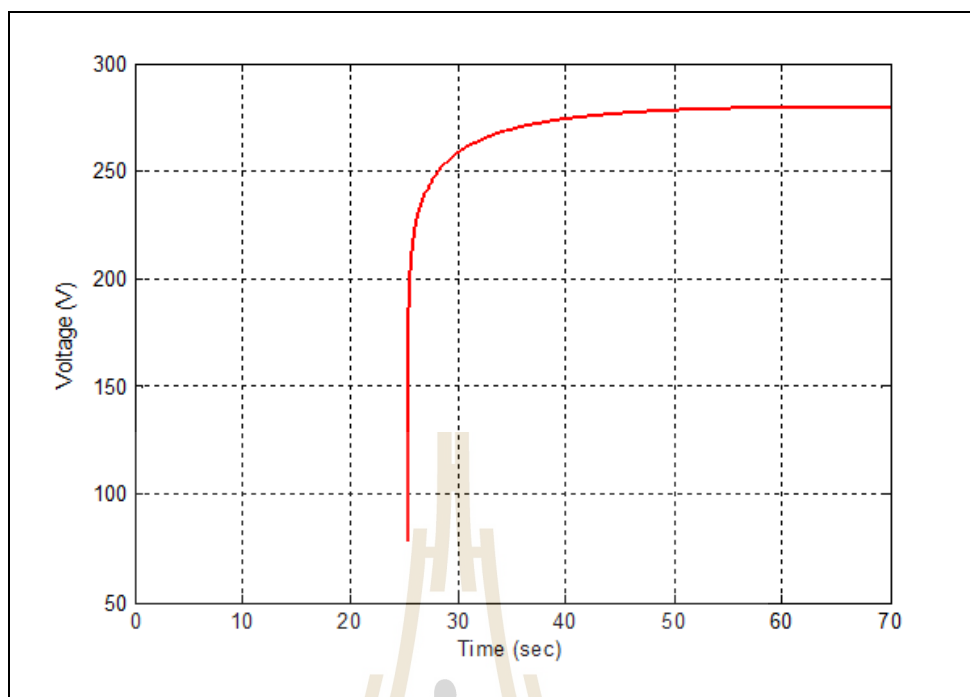
จากรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความน้ำกับเวลา คือผลที่ได้จากการทดสอบรูปที่ 4.7 แบบจำลองรวมระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC โดยที่ค่าความเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.13 ค่าผลต่างระหว่างความดันของไฮโดรเจนกับออกซิเจนของแบบจำลอง SOFC

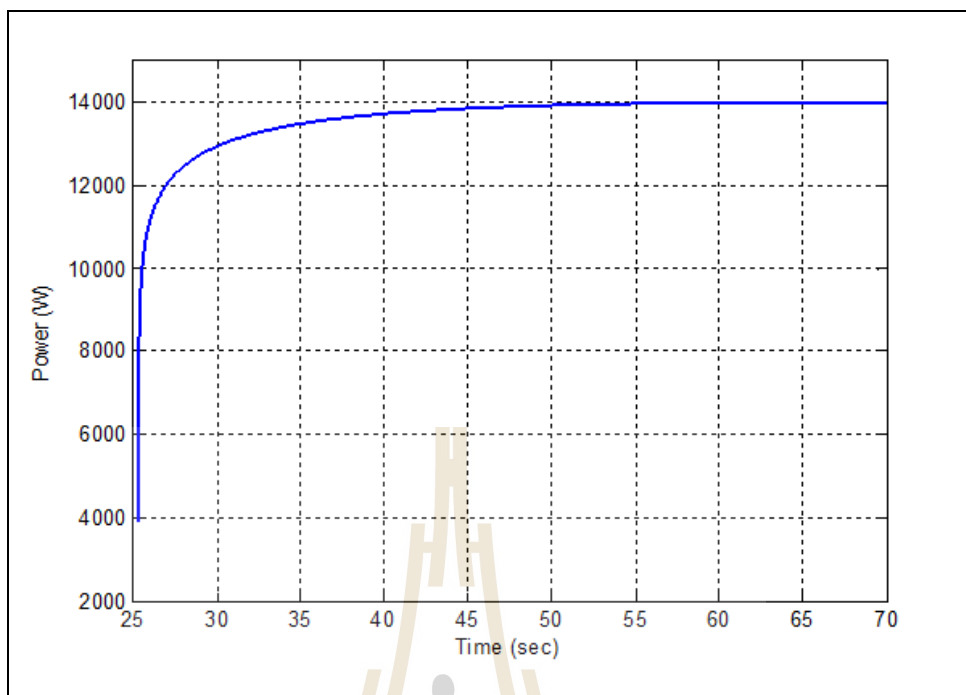
จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของค่าผลต่างระหว่างความดันของไฮโดรเจนกับออกซิเจนกับเวลา คือผลที่ได้จากการทดสอบรูปที่ 4.7 แบบจำลองรวมระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC โดยที่เวลา 15 วินาทีแรกค่าผลต่างระหว่างความดันของไฮโดรเจนกับออกซิเจนเพิ่มขึ้น จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



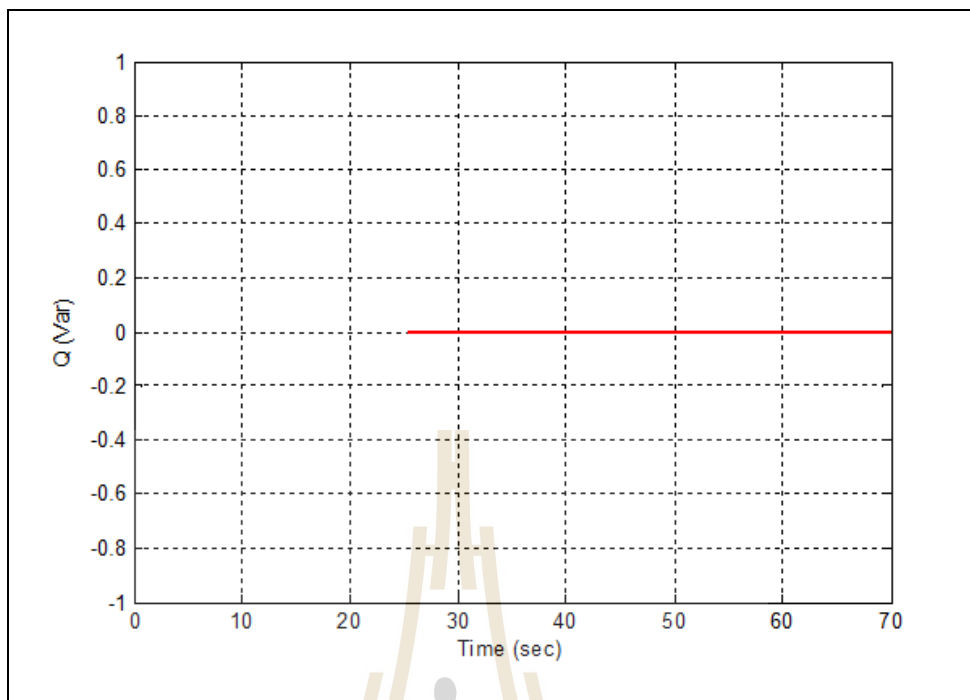
รูปที่ 4.14 ค่าแรงดันเอาต์พุตของแบบจำลอง SOFC

จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงดันเอาต์พุตกับเวลา คือผลที่ได้จากการทดสอบรูปที่ 4.7 แบบจำลองรวมระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC โดยจะเห็นได้ว่าที่เวลาประมาณ 25 วินาที ค่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงที่เวลา 50 วินาที ค่าแรงดันจึงจะคงที่ตลอด



รูปที่ 4.15 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) ของแบบจำลอง SOFC

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) กับเวลา คือผลที่ได้จากการทดสอบรูปที่ 4.7 แบบจำลองรวมระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC โดยจะเห็นได้ว่าที่เวลาประมาณ 25 วินาที ค่ากำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนไปถึงที่เวลา 50 วินาที ค่ากำลังไฟฟ้าจึงจะคงที่ตลอด และค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงถึง 14000 W หรือ 14 kW

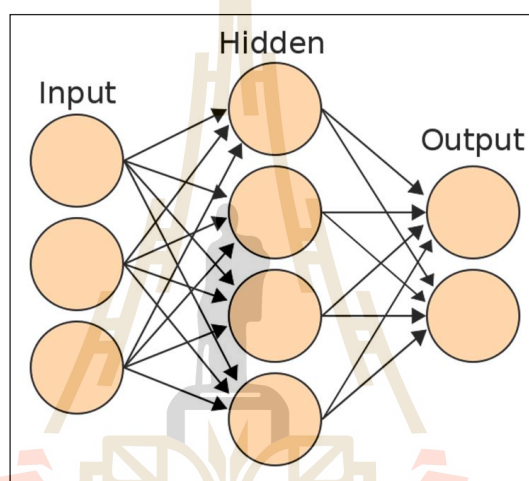


รูปที่ 4.16 ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ของแบบจำลอง SOFC

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) กับเวลา คือผลที่ได้จากการทดสอบรูปที่ 4.7 แบบจำลองรวมระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่าเป็นศูนย์ตลอดการทดสอบระบบ

4.3 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมประเภท GRNN กับระบบเซลล์เชื้อเพลิง

โครงข่ายประสาทเทียม หรือ ข่ายงานประสาทเทียม (Artificial neural network) คือ โมเดลทางคณิตศาสตร์หรือโมเดลทางคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลสารสนเทศด้วยการคำนวณแบบคอนเนกชันนิสต์ (Connectionist) แนวคิดเริ่มต้นของเทคนิคนี้ได้มาจากการศึกษาโครงข่ายไฟฟ้าชีวภาพ (Bioelectric network) ในสมอง ซึ่งประกอบด้วย เซลล์ประสาท (Neurons) และจุดประสานประสาท (Synapses) ตามโมเดลนี้ ข่ายงานประสาทเกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ประสาท จนเป็นเครือข่ายที่ทำงานร่วมกัน (Oonsivilai, A. and M.E. EI-Hawary,1999)

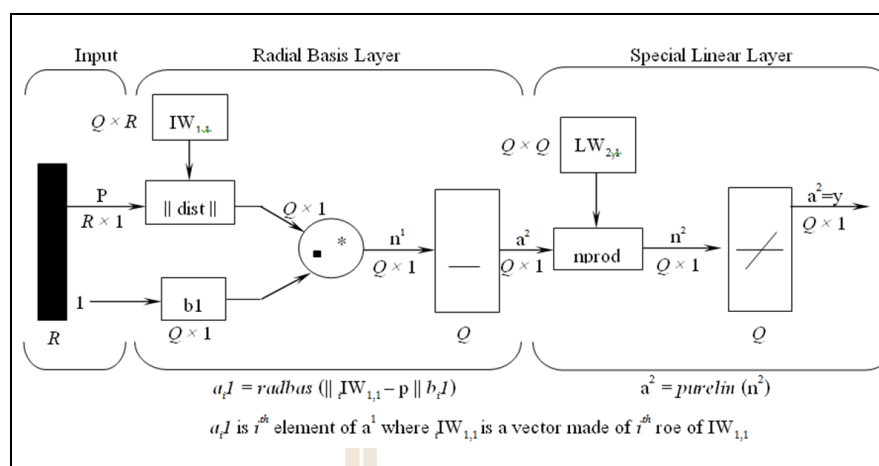


รูปที่ 4.17 ข่ายงานประสาทเทียมมีการเชื่อมต่อกันผ่านกลุ่มโนด

(ที่มา: http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%A5%E0%B9%8C:Artificial_neural_network.svg)

4.3.1 Generalized Regression Networks (GRNN)

โดยทั่วไปเครือข่ายประสาทแบบการถดถอย (GRNN) มักจะใช้สำหรับฟังก์ชันการประมาณ มันมีชั้นพื้นฐานรัศมีและชั้นพิเศษเส้นตรง โดยแผนผังการทำงานสำหรับ GRNN แสดงอยู่ด้านล่าง จะมีลักษณะคล้ายกับระบบเครือข่ายพื้นฐานรัศมี แต่มีชั้นที่สองแตกต่างกันเล็กน้อย (Oonsivilai, A. and M.E. EI-Hawary,1999)



รูปที่ 4.18 แผนผังการทำงานของ GRNN

จากรูปที่ 4.16 โดยที่ R = no. of elements in input vector

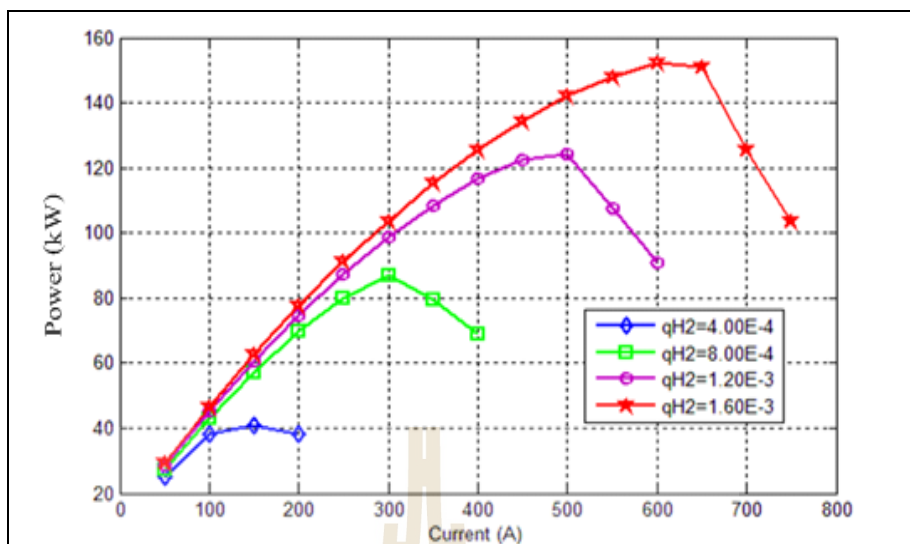
Q = no. of neurons in layer 1

Q = no. of neurons in layer 2

Q = no. of input/ target pairs

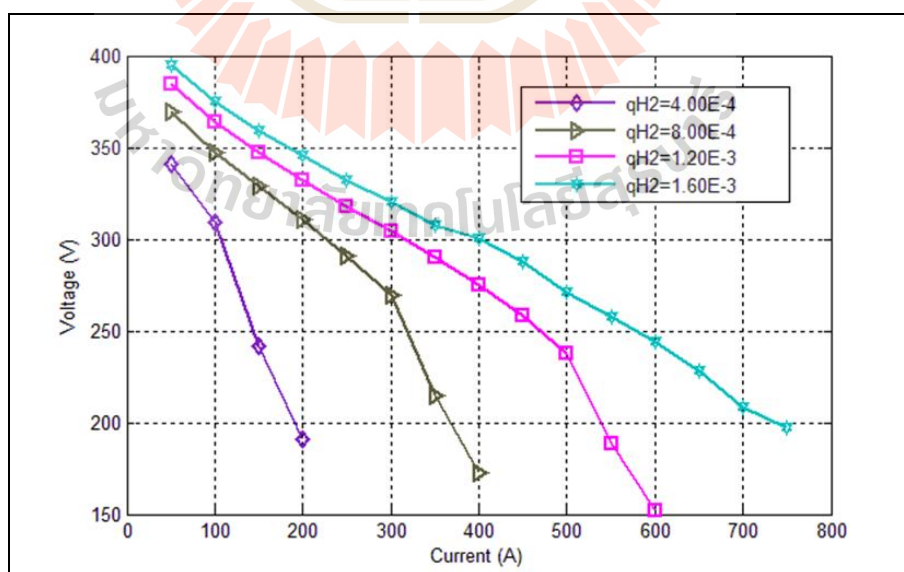
นำค่าจากการทดสอบทางโปรแกรม MATLAB Simulink ของ SOFC จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 โดยใช้โครงข่ายประสาท GRNN ในการทดสอบเพื่อทำการนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ผล จะได้ผลดังรูป 4.19 และ 4.20 (Youssef, M.E., Moataz, H.K. and Khairia, E.AL-NAdi. ,2010)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



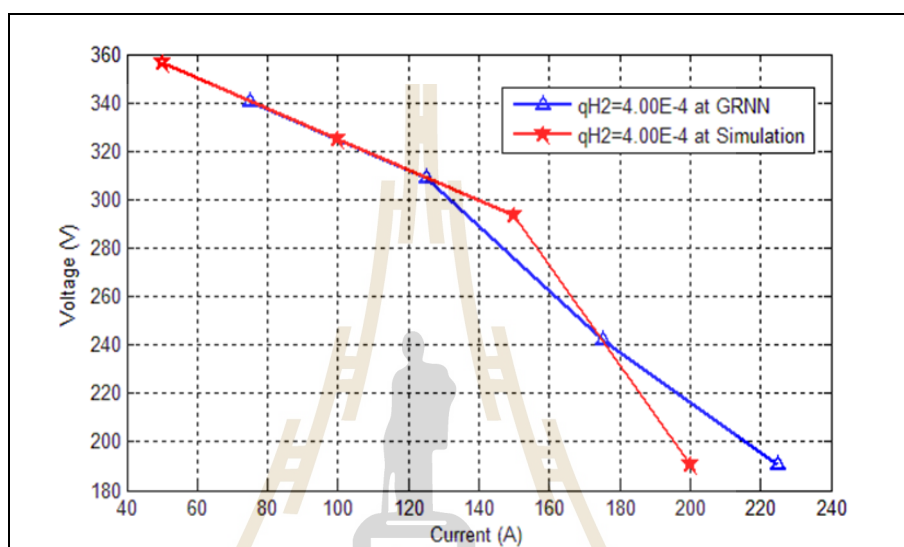
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าโดยใช้ GRNN

จากรูปที่ 4.19 คือการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าโดยใช้ GRNN โดยจะเห็นได้ว่ากราฟที่ได้จากการใช้ GRNN มีค่าใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับค่าที่ได้จากการทดสอบระบบ SOFC จาก Simulink Matlab เป็นอย่างมาก โดยที่ค่ากระแสเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นด้วย

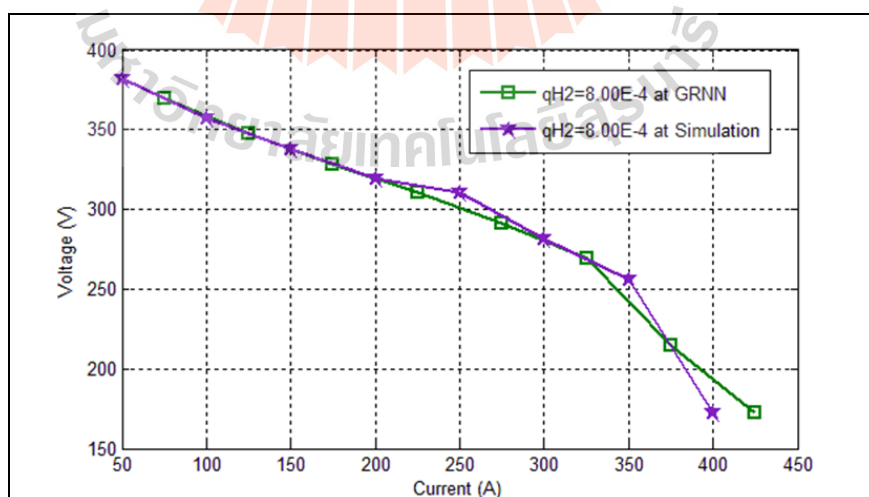


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและค่ากำลังโดยใช้ GRNN

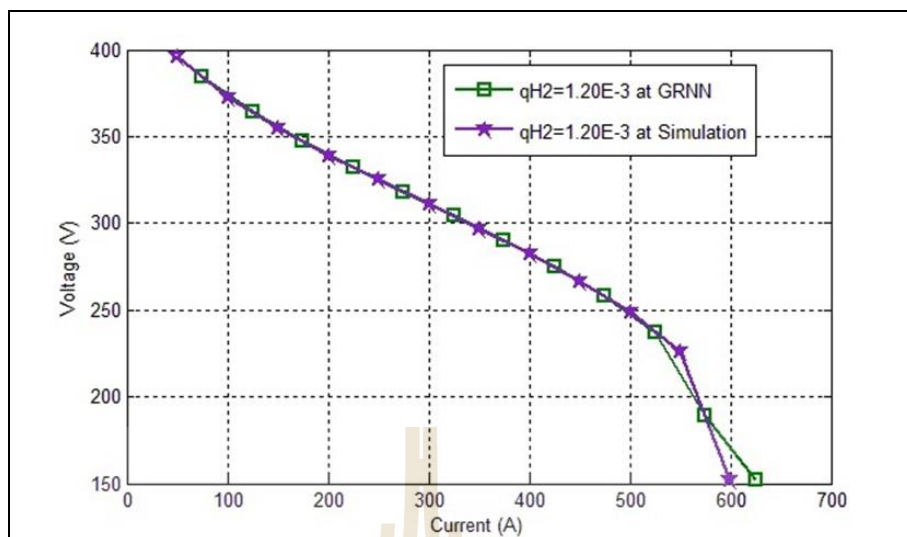
จากรูปที่ 4.20 คือการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันโดยใช้ GRNN โดยจะเห็นได้ว่ากราฟที่ได้จากการใช้ GRNN มีค่าใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับค่าที่ได้จากการทดสอบระบบ SOFC จาก Simulink Matlab เป็นอย่างมาก โดยที่ค่ากระแสเพิ่มขึ้นค่าแรงดันก็ลดลงด้วยนำค่าที่ได้ในการวัดค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่ได้มาวาดกราฟเปรียบเทียบค่าเพื่อดูว่าค่าใกล้เคียงกันหรือไม่หรือต่างกันเล็กน้อยเพียงใด



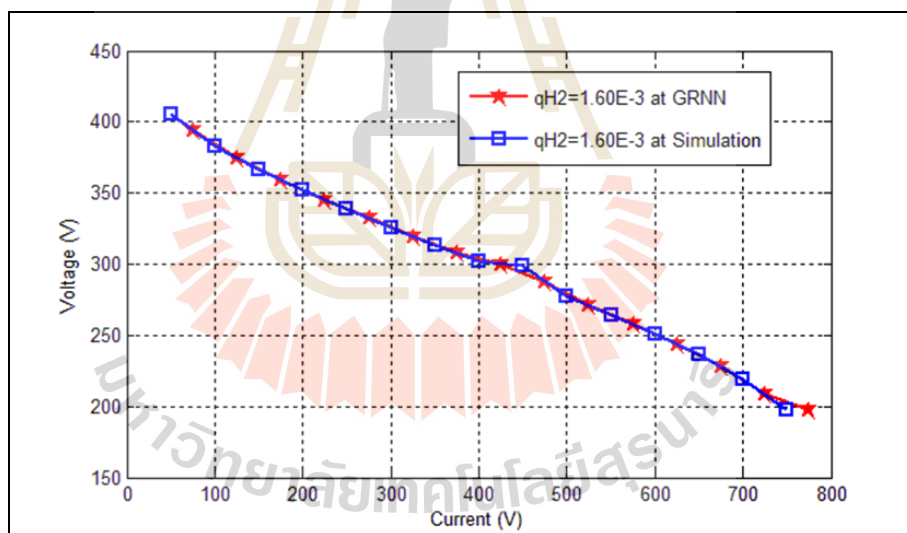
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าแรงดันระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 4.00E-4$



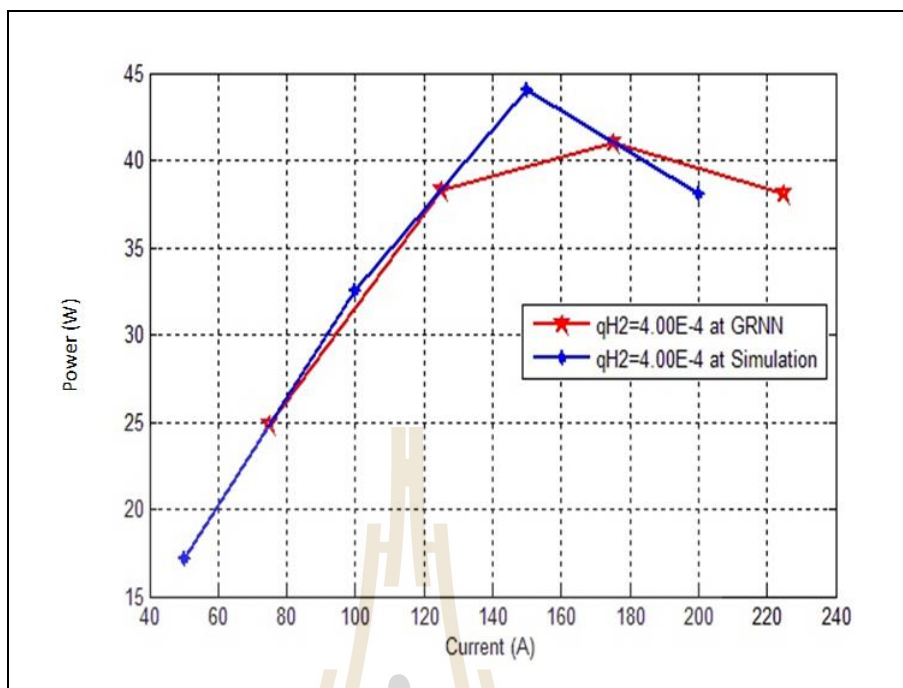
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่าแรงดันระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 8.00E-4$



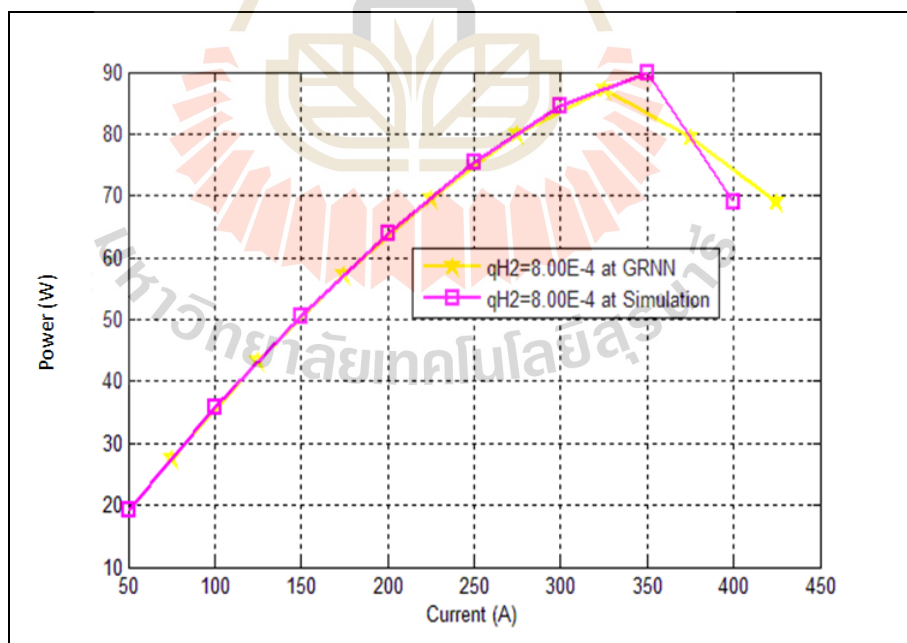
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบค่าแรงดันระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 1.20E-3$



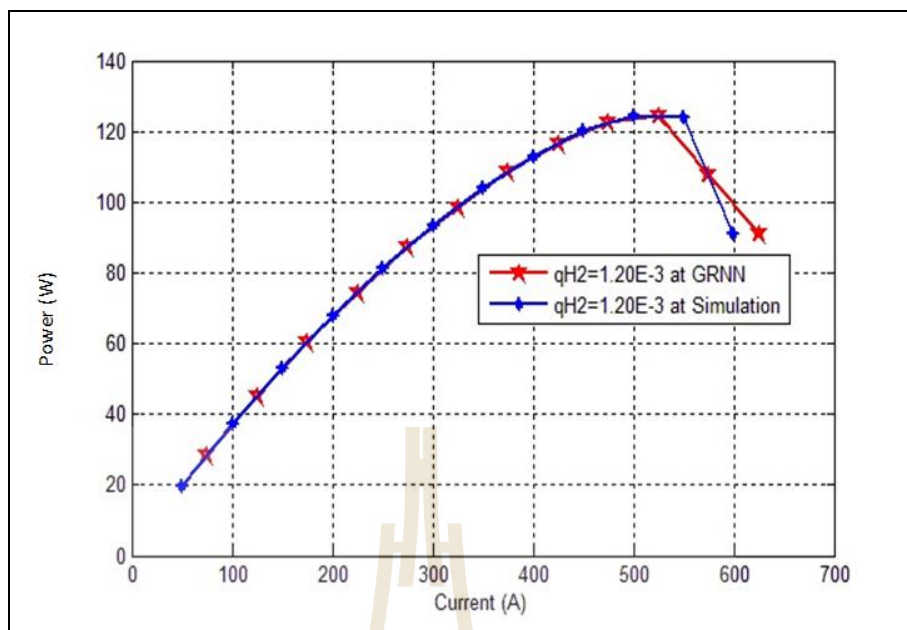
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่าแรงดันระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 1.60E-3$



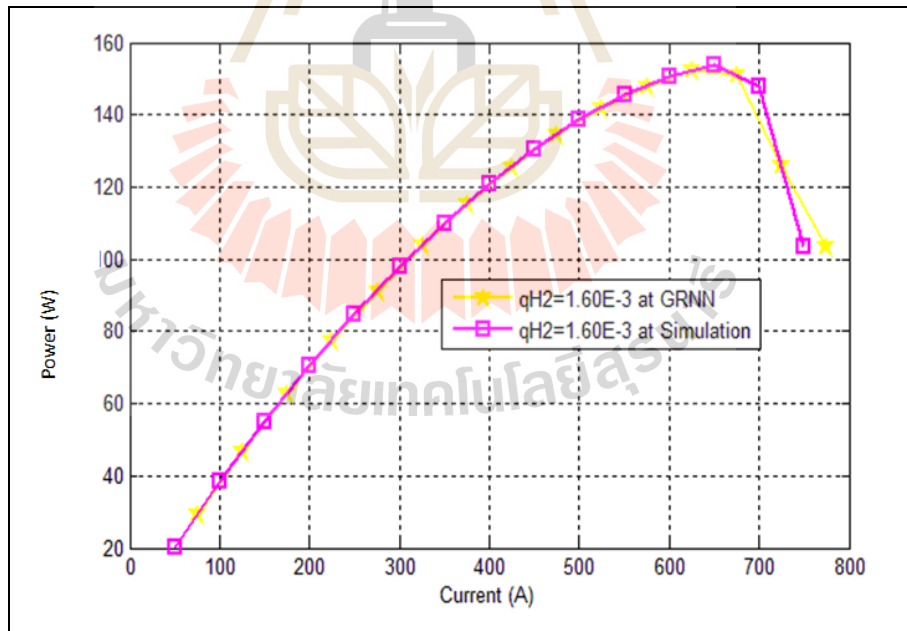
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบค่ากำลังระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 4.00E-4$



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่ากำลังระหว่างการ Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 8.00E-4$



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบค่ากำลังระหว่างกร Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 1.20E-3$



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่ากำลังระหว่างกร Simulation กับ GRNN ที่ $qH_2 = 1.60E-3$

จากกราฟข้างต้นจะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้นำมาวาดกราฟเปรียบเทียบดูค่าความแตกต่างของ กราฟนั้นจะเห็นได้ว่ากราฟมีค่าความแตกต่างกันไม่มาก และกราฟที่ได้จาก GRNN มีแนวโน้มของ กราฟที่ใกล้เคียงกับกราฟที่ได้จากการ Simulation ของ FUEL CELLS แบบ SOFC ลักษณะของ กราฟที่ได้อาจจะต่างกันที่จุดเริ่มต้นซึ่งสามารถทำให้ทราบได้ว่า GRNN สามารถทำนายค่าได้อย่าง แม่นยำใกล้เคียงของระบบ และเมื่อนำกราฟมาเปรียบเทียบค่าหาความคลาดเคลื่อนโดยค่าที่ได้ จากการใช้โปรแกรม GRNN จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการ simulation เป็นอย่างมาก กราฟที่ได้ จาก GRNN จะมีลักษณะของเส้นกราฟมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟ simulation และเมื่อเปรียบเทียบหาความคลาดเคลื่อน 1.45% ผลที่ได้เป็นที่น่าสนใจและยอมรับได้ และต้อง พัฒนากันต่อไป

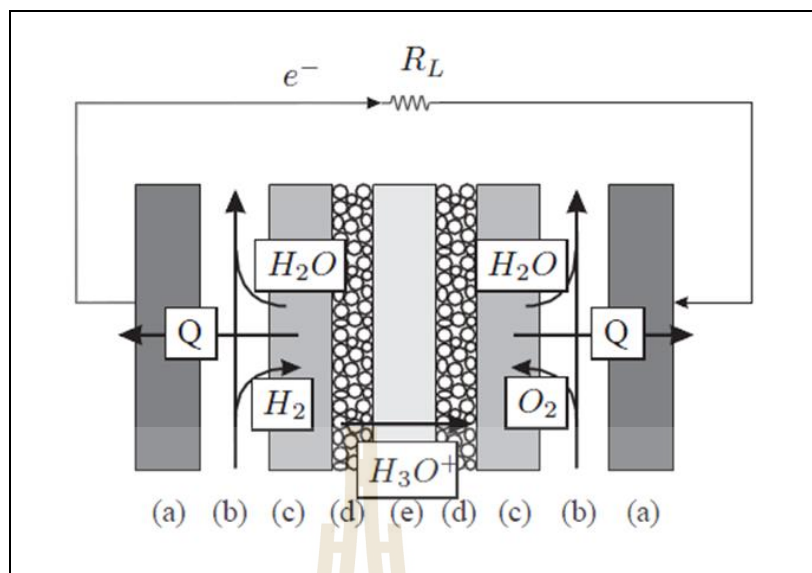
จากการศึกษาและใช้ GRNN ข้างต้นดังผลที่แสดงให้เห็นจากกราฟแล้วนั้น ทำให้ทราบได้ ว่า GRNN สามารถช่วยลดเวลาและปัญหาในการทำงานได้ โดยคือเมื่อทราบอินพุตและเอาต์พุตแล้ว นั้น GRNN ก็จะสามารถประเมินและทำงานของระบบได้ โดยทำให้สามารถทำนายค่าที่ต้องการ ทราบและหาข้อผิดพลาดได้จากระบบ โดยที่ไม่ต้องทำการทดลองหรือสืบค้นหาค่าใหม่ของระบบ ตั้งแต่ต้น

4.4 แบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC

จากการศึกษาแบบจำลองและพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ SOFC มาแล้วนั้น จึงนำไปสู่การ สร้างระบบแบบจำลอง PEMFC โดยใช้แผนภาพดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 ในการสร้างแบบจำลอง ของระบบ PEMFC เพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการจำลองผลทาง MATLAB และการ ทดลองจากเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงจริงต่อไป (Colleen Spiegel, 2008)

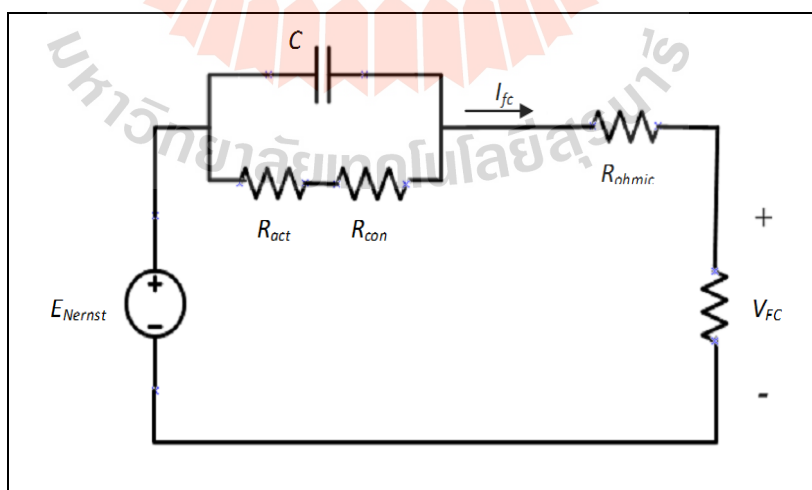
โดยการศึกษาและสร้างแบบจำลองของ PEMFC จะทำการสร้าง 3 ระบบ คือที่ ระบบ 20 W 500 W และ 1000 W โดยมีขั้นตอนดังนี้

จากการศึกษาของระบบ PEMFC ของวงจรสมมูลเทวินิน (Thevenin's equivalent circuit) ดังรูปที่ 4.29 และ 4.30



รูปที่ 4.29 โครงสร้างของ PEMFC

- (a) แผ่นสองขั้ว
- (b) ช่องการไหลของก๊าซ
- (c) ชั้นอิเล็กโทรด
- (d) ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและ
- (e) ชั้นพอลิเมอร์ (Andrea, 2006)

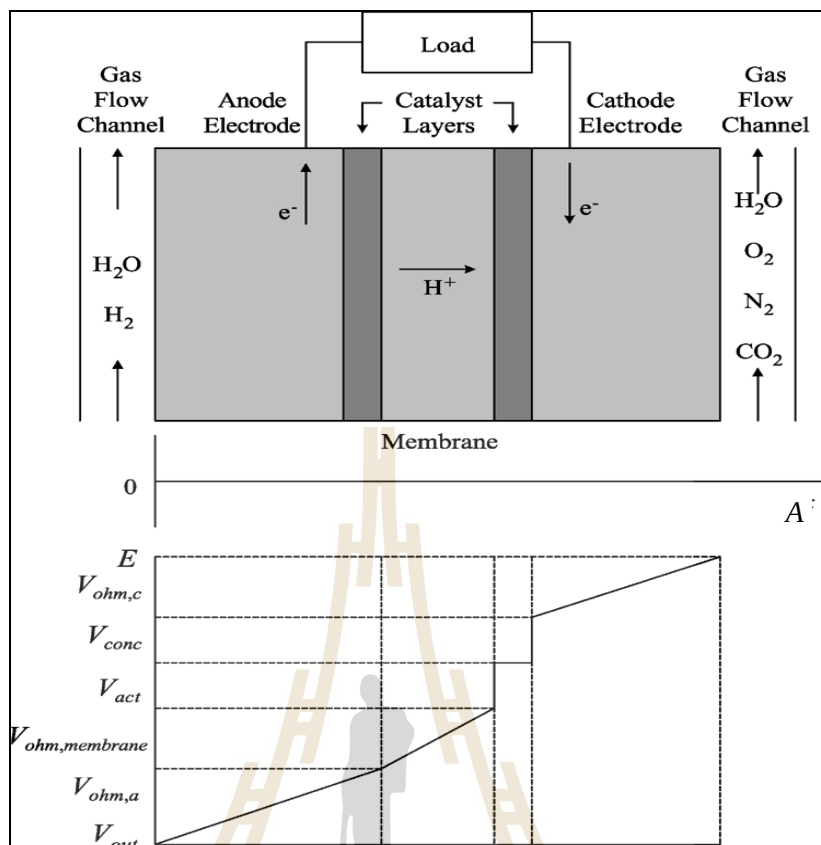


รูปที่ 4.30 วงจรสมมูลรูปแบบอย่างง่ายของ PEMFC เพียงหนึ่งเซลล์

โดยการพัฒนารูปแบบไดนามิกในส่วนนี้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอ การสร้างรูปแบบแบบไดนามิกสำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC เพื่อลดความซับซ้อนจะทำการวิเคราะห์สมมติฐานดังต่อไปนี้ (Correa, J.M., Farret, F.A., Popov, V.A. and Simoes, M.G. ,2005)

- 1) การกระทำที่หนึ่งมิติ
- 2) ก๊าซในอุดมคติและกระจาย
- 3) ความดันคงที่ในเซลล์เชื้อเพลิงช่องทางไหลของก๊าซ
- 4) เชื้อเพลิงเป็น H_2 ความชื้นและอนุภาคน้ำที่ปนเปื้อนอากาศความชื้น สมมติขั้วบวกความดันไอน้ำที่มีประสิทธิภาพเป็น 50% ของความดันไอน้ำอิ่มตัวในขณะที่มีประสิทธิภาพแรงดันน้ำแคโทดเป็น 100%
- 5) เซลล์เชื้อเพลิงทำงานภายใต้อุณหภูมิ 100 C^0 และผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาอยู่ในรูปของเหลว
- 6) คุณสมบัติของเทอร์โมไดนามิกที่มีการประเมินค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในส่วนของกองชั้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกองถูกละทิ้งและความจุความร้อนโดยรวมเฉพาะของสแต็คจะถือว่าคงที่
- 7) พารามิเตอร์สำหรับแต่ละเซลล์สามารถพิจารณาร่วมกันเพื่อเป็นตัวแทนของกองสแต็คเซลล์เชื้อเพลิง

โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.31 แผนภาพของเซลล์เชื้อเพลิงและแรงดันไฟฟ้าลดลง

จากรูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแส พบว่าที่ค่ากระแสเพิ่มขึ้นค่าแรงดันจะลดลง

การแพร่ของก๊าซในขั้วไฟฟ้า (Gas Diffusion in the Electrodes)

ในการคำนวณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงมีผลกระทบต่อแรงดันบางส่วนของ H_2 และ O_2 จำเป็นต้องได้รับการพิจารณา ในส่วนผสมของก๊าซ N ซึ่งประกอบไปด้วยไม่มีชนิดแพร่กระจายของส่วนประกอบ i ผ่านขั้วไฟฟ้าที่มีรูพรุนสามารถอธิบายได้ด้วยสูตรสเตฟาน-แมกซ์เวล (Stefan-Maxwell)

$$\nabla x_i = \frac{RT}{P} \sum_{j=1}^N \frac{x_i N_j - x_j N_i}{D_{i,j}} \quad (4.7)$$

โดยที่ x_i คือ เศษส่วนของโมลชนิด i

N_i คือ การไหลของก๊าซแบบผิวเผินชนิด i

P คือ ความดัน

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ, 8.3143 J/(mol.K)

ในช่องขั้วบวกกระแสแก๊สเป็นส่วนผสมของ H_2 และ H_2O (g) ฟลักซ์โมลของน้ำ (ในระยะแก๊ส) ปกติขั้วบวก N_{H_2O} พื้นผิวสามารถตั้งค่าให้เป็นศูนย์ตามสมมติฐาน 1) -3) ในหนึ่งมิติ (1-D) ขั้นตอนการขนส่งตามแนวแกน x แสดงในรูปที่ 4.31 แพร่กระจายของน้ำได้ง่ายเช่น

$$\begin{aligned} \frac{dx_{H_2O}}{dx} &= \frac{RT}{Pa} \left(\frac{x_{H_2O} N_{H_2} - x_{H_2} N_{H_2O}}{D_{H_2O,H_2}} \right) \\ &= \frac{RT}{Pa} \left(\frac{x_{H_2O} N_{H_2}}{D_{H_2O,H_2}} \right) \end{aligned} \quad (4.8)$$

ฟลักซ์โมลของ H_2 จะถูกกำหนดโดยกฎของคูลอมบ์

$$N_{H_2} = \frac{I_{den}}{2F} \quad (4.9)$$

โดยการรวมสมการ (4.8) และ (4.9) และการบูรณาการการส่งออกที่เกี่ยวข้องกับ X จากช่องทางขั้วบวกกับพื้นผิวดักร่งปฏิกิริยาที่จะช่วยให้

$$x_{H_2O}^* = x_{H_2O}^{channel} \exp\left(\frac{RTI_{den} l_a}{2FP_a D_{H_2O_2, H_2}}\right) \quad (4.10)$$

โดยที่ $x_{H_2O}^* + x_{H_2}^* = 1$ ความดันบางส่วนที่มีประสิทธิภาพของ H_2 เป็น

$$p_{H_2}^* = \frac{p_{H_2O}^*}{x_{H_2O}^*} (1 - x_{H_2O}^*) \quad (4.11)$$

ตามสมมติฐานข้อที่ 4), $p_{H_2O}^*$ ที่ขั้วบวกเป็น $0.5p_{H_2O}^{sat}$ ดังนั้น $p_{H_2}^*$ จะได้เป็น

$$p_{H_2}^* = 0.5p_{H_2O}^{sat} \left[\frac{1}{x_{H_2O}^{channel} \exp\left(\frac{RTI_{den} l_a}{2FP_a D_{H_2O, H_2}}\right)} - 1 \right] \quad (4.12)$$

ก๊าซที่ไหลในช่องแคโทดเป็น O_2 , N_2 , $H_2O_{(g)}$ และ CO_2 การใช้ตามสมการที่ (4.7) การแพร่กระจายของ $H_2O_{(g)}$ ที่ด้านแคโทด สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \frac{dx_{H_2O}}{dx} &= \frac{RT}{P_C} \left(\frac{x_{O_2} N_{H_2O} - x_{H_2O} N_{O_2}}{D_{H_2O, O_2}} \right) \\ &= \frac{RT}{P_C} \left(\frac{-x_{H_2O} N_{O_2}}{D_{H_2O, O_2}} \right) \end{aligned} \quad (4.13)$$

โดยการคล้ายกับการวิเคราะห์ขั้วบวก, เศษโมลที่มีประสิทธิภาพของน้ำที่อินเตอร์เฟซกับตัวเร่งปฏิกิริยาแคโทดที่สามารถหาได้จาก

$$x_{H_2O}^* = x_{H_2O}^{channel} \exp\left(\frac{RTI_{den} l_c}{4FP_c D_{H_2O, O_2}}\right) \quad (4.14)$$

ผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์ที่คล้ายกันที่มีประสิทธิภาพส่วนต่อโมลของ N_2 และ CO_2 นอกจากนี้ยังสามารถได้รับการพิจารณา

$$x_{N_2}^* = x_{N_2}^{channel} \exp\left(\frac{RTI_{den} l_c}{4FP_c D_{N_2, O_2}}\right) \quad (4.15)$$

$$x_{CO_2}^* = x_{CO_2}^{channel} \exp\left(\frac{RTI_{den} l_c}{4FP_c D_{CO_2, O_2}}\right) \quad (4.16)$$

ส่วนต่อโมลที่มีประสิทธิภาพของ O_2 เป็น

$$x_{O_2}^* = 1 - x_{H_2O}^* - x_{N_2}^* - x_{CO_2}^* \quad (4.17)$$

และความดันบางส่วนที่เกี่ยวข้องที่มีประสิทธิภาพของ O_2 เป็น

$$p_{O_2}^* = \frac{p_{H_2O}^*}{x_{H_2O}^*} x_{O_2}^* = \frac{p_{H_2O}^*}{x_{H_2O}^*} (1 - x_{H_2O}^* - x_{N_2}^* - x_{CO_2}^*) \quad (4.18)$$

ตามสมมติฐานที่ 4), $p_{H_2O}^*$ ที่เท่ากับแคโทด $p_{H_2O}^{sat}$ และสมการข้างต้นสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$p_{O_2}^* = p_{H_2O}^{sat} \left[\frac{1 - x_{N_2}^* - x_{CO_2}^*}{x_{H_2O}^*} - 1 \right] \quad (4.19)$$

โดยที่ $p_{H_2}^*$ และ $p_{O_2}^*$ คำนวณได้จาก สมการ (4.12) และ (4.19) จะถูกนำมาใช้ในสมการ Nernst (ส่วน C) เพื่อหาแรงดันออกเซลล์เชื้อเพลิงในส่วนย่อยต่อไปนี้ สมการความสมดุลของวัสดุที่จะได้รับการพัฒนาซึ่งจะถูกใช้ในการตรวจสอบแรงดันออกเซลล์เชื้อเพลิง (Outeiro, M.T., Chibante, R. and Carvalho, 2009)

วัสดุอนุรักษ์สมการ (Material Conservation Equations)

การเปลี่ยนแปลงทันทีในแรงดันบางส่วนที่มีประสิทธิภาพของไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกกำหนดผ่านสมการของก๊าซในอุดมคติดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\frac{V_a}{RT} \frac{dp_{H_2}^*}{dt} &= M_{H_2,in} - M_{H_2,out} - \frac{i}{2F} \\ &= M_{H_2,net} - \frac{i}{2F}\end{aligned}\quad (4.20)$$

โดยที่ V_i คือ การลดลงของแรงดันไฟฟ้าของประเภท i (ในหน่วยโวลต์)

a คือ แอโนด, c คือ แคโทด

$$\begin{aligned}\frac{V_c}{RT} \frac{dp_{O_2}^*}{dt} &= M_{O_2,in} - M_{O_2,out} - \frac{i}{4F} \\ &= M_{O_2,net} - \frac{i}{4F}\end{aligned}\quad (4.21)$$

ที่สถานะคงตัวทุกความดันบางส่วนจะมีการพิจารณาที่จะเก็บไว้คงที่เป็น

$$\frac{dp_{H_2}^*}{dt} = \frac{dp_{O_2}^*}{dt} = 0 \quad (4.22)$$

ดังนั้นโมลอัตราการไหลสุทธิของ H_2 และ O_2 ที่มีความสถานะคงตัวคือ

$$M_{H_2,net} = 2M_{O_2,net} = \frac{I}{2F} \quad (4.23)$$

โดยที่ M_i คือ อัตราการไหลของโมลของชนิด i (ในโมเลกุลต่อวินาที)

ภายใต้สภาวะชั่วคราวมีความล่าช้าระหว่างการเปลี่ยนแปลงในการรับภาระโหลดและการไหลของเชื้อเพลิงและสารต้านอนุมูลอิสระดังต่อไปนี้ความสัมพันธ์ที่ถูกลำเอียงมาใช้เพื่อเป็นตัวแทนของผลกระทบในความล่าช้านี้คือ

$$\begin{aligned}\tau_a \frac{dM_{H_2,net}}{dt} &= \frac{i}{2F} - M_{H_2,net} \\ \tau_c \frac{dM_{O_2,net}}{dt} &= \frac{i}{4F} - M_{O_2,net}\end{aligned}\quad (4.24)$$

โดยที่ τ_a คือ ความล่าช้าของเชื้อเพลิงที่การไหล (เป็นวินาที)

τ_c คือ อนุโมลอิสระชะลอการไหล (เป็นวินาที)

เซลล์เชื้อเพลิงแรงดันขาออก (Fuel-Cell Output Voltage)

ปฏิกิริยาโดยรวมในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเขียนได้เป็น



ตามสมมติฐานที่ (5) สมการ Nernst ที่เกี่ยวข้องถูกใช้ในการคำนวณที่มีศักยภาพย้อนกลับเป็น

$$E_{cell} = E_{0,cell} + \frac{RT}{2F} \ln[p_{H_2}^* \cdot (p_{O_2}^*)^{0.5}] \quad (4.26)$$

โดยที่ $E_{0,cell}$ คือ เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและสามารถแสดงดังต่อไปนี้

$$E_{0,cell} = E_{0,cell}^o - k_E (T - 298) \quad (4.27)$$

โดยที่ $E_{0,cell}^o$ คือ มีศักยภาพในการอ้างอิงมาตรฐานที่มาตรฐาน, สถานะ 298 K และความดัน 1 บรรยากาศ

k_E คือ การคำนวณค่าคงที่ในเชิงประจักษ์ E_0 (ในหน่วยโวลต์ต่อเคลวิน)

เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์แรงดัน $E_{d,cell}$ ถือว่าเป็นลบออกจากทางด้านขวาของสมการ (4.26) สำหรับผลรวมของความล่าช้าเชื้อเพลิงและสารต้านอนุมูลอิสระที่กล่าวไว้ในส่วนต่อไป สถานะอย่างต่อเนื่องค่าของ $E_{d,cell}$ เป็นศูนย์ แต่ก็ก็จะแสดงอิทธิพลของเชื้อเพลิงและความล่าช้าในการสารต้านอนุมูลอิสระแรงดันออกเซลล์เชื้อเพลิงในระหว่างการไหลชั่วคราว มันสามารถเขียนได้เป็น (Outeiro, M.T., and Carvalho, A.S., 2011)

$$E_{d,cell} = \lambda_e [i(t) - i(t) * \exp(-\frac{t}{\tau_e})] \quad (4.28)$$

โดยที่ λ_e คือ ปัจจัยคงที่ในการคำนวณ $E_d [\Omega]$

τ_e คือ ความล่าช้าการไหลโดยรวม (เป็นวินาที)

$$E_{d,cell}(s) = \lambda_e I(s) \frac{\tau_e s}{\tau_e s + 1} \quad (4.29)$$

สมการที่ (4.29) ใช้สำหรับการพัฒนารูปแบบทั้งใน SIMULINK ที่อาจเกิดขึ้นในภายใต้สมการ (4.26) โดยจะได้สมการใหม่คือ

$$E_{cell} = E_{0,cell} + \frac{RT}{2F} \ln[p_{H_2}^* \cdot (p_{O_2}^*)^{0.5}] - E_{d,cell} \quad (4.30)$$

ที่ E_{cell} คำนวณจาก (4.30) เป็นจริงวงจรเปิดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง แต่ภายใต้สภาวะปกติแรงดันออกของเซลล์เชื้อเพลิงน้อยกว่า E_{cell} การกระตุ้นการสูญเสีย ohmic ด้านทานแรงดันและความเข้มข้นในช่วงที่มีศักย์ภาพ มีแรงดันไฟฟ้าลดลงในเซลล์เชื้อเพลิง

$$V_{cell} = E_{cell} - V_{act,cell} - V_{ohm,cell} - V_{conc,cell} \quad (4.31)$$

ใช้สมมติฐานที่ 7) แรงดันออกของเซลล์เชื้อเพลิงสเตดตี้ที่จะได้รับเป็น

$$V_{out} = N_{cell} V_{cell} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (4.32)$$

ในสมการแรงดันเอาต์พุตของเซลล์เดี่ยวสามารถคำนวณได้ตามสมการของเนิร์นสต์ (Nernst Equation) และกฎของโอห์ม (Ohm's law)

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{Ohmic} - V_{con} \quad (4.33)$$

โดยที่ E_{Nernst} คือ ศักย์ภาพทางอุณหพลศาสตร์ของเซลล์ในวงจรเปิดซึ่งหมายถึงแรงดันย้อนกลับซึ่งสามารถระบุได้ดังต่อไปนี้

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times T \times [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (4.34)$$

P_{H_2} และ P_{O_2} คือ ส่วนของความดัน (atm) ของไฮโดรเจนและออกซิเจนตามลำดับ T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน, Kelvin) ในเซลล์ V_{act} เป็นแรงดันไฟฟ้าตกเนื่องจากการกระตุ้นการทำงานของขั้วบวกและขั้วลบ (หรือเรียกว่าการใช้งานในช่วงที่มีศักย์ภาพ)

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 \times T + \xi_3 \times T \times \ln(CO_2) + \xi_4 \times \ln(i_{FC})] \quad (4.35)$$

โดยที่ CO_2 มีความเข้มข้นของออกซิเจนในผิวหน้ารอยต่อของตัวเร่งปฏิกิริยาจากแก๊ส (mol.cm⁻³) และค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรสำหรับรูปแบบแต่ละเซลล์จะแสดงโดย $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ และ ψ

$$CO_2 = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \times e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}} \quad (4.36)$$

เมื่อ V_{ohmic} คือแรงดันไฟฟ้าตก ohmic (หรือเรียกว่า ohmic over-potential) การวัดแรงดันไฟฟ้าตก ohmic เกิดจากความต้านทานของการนำโปรตอนผ่านอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็งและอิเล็กตรอนผ่านเส้นทางของมัน

$$V_{ohmic} = i_{FC} (R_M + R_C) \quad (4.37)$$

เมื่อ R_M คือ ความต้านทานเมมเบรนที่เทียบเท่ากับการนำโปรตอน และ R_C คือความต้านทานการสัมผัสเทียบเท่ากับการนำอิเล็กตรอน

$$R_M = \frac{\rho_M \times \lambda}{A} \quad (4.38)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของเซลล์ (cm²)

λ คือ ความหนาของเมมเบรน

ρ_M คือ สภาพต้านทานจำเพาะของเมมเบรน ($\Omega \cdot cm$) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\rho_M = \frac{181.6 \cdot [1 + 0.03 \cdot (\frac{i_{FC}}{A}) + 0.062 \cdot (\frac{T}{303})^2 \cdot (\frac{i_{FC}}{A})^{2.5}]}{[\psi - 0.634 - 3 \cdot (\frac{i_{FC}}{A})] \cdot \exp[4.18 \cdot (\frac{T - 303}{T})]} \quad (4.39)$$

เมื่อ ψ คือ เอ็มพีริคัลพารามิเตอร์ (Empirical parameter)

V_{CON} คือ แรงดันที่เกิดจากการลดความเข้มข้นของก๊าซสารตั้งต้นหรือจากการขนส่งของมวลของออกซิเจนและไฮโดรเจน (concentration over potential)

$$V_{Con} = -B \times \ln(1 - \frac{J}{J_{max}}) \quad (4.40)$$

โดยที่ B คือ เป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของเซลล์และการดำเนินงานของสถานะ (V)

J คือ ความหนาแน่นกระแสในเซลล์ที่เกิดขึ้นจริง (A/cm^2) รวมทั้งความหนาแน่นกระแสถาวร (J_n) โดยคำนวณได้ดังสมการที่ 4.15

$$J = \frac{i_{FC}}{A} \quad (4.41)$$

$$P_{FC} = i_{FC} \times V_{FC} \quad (4.42)$$

โดยที่ P_{FC} คือ กำลังไฟฟ้าขาออก

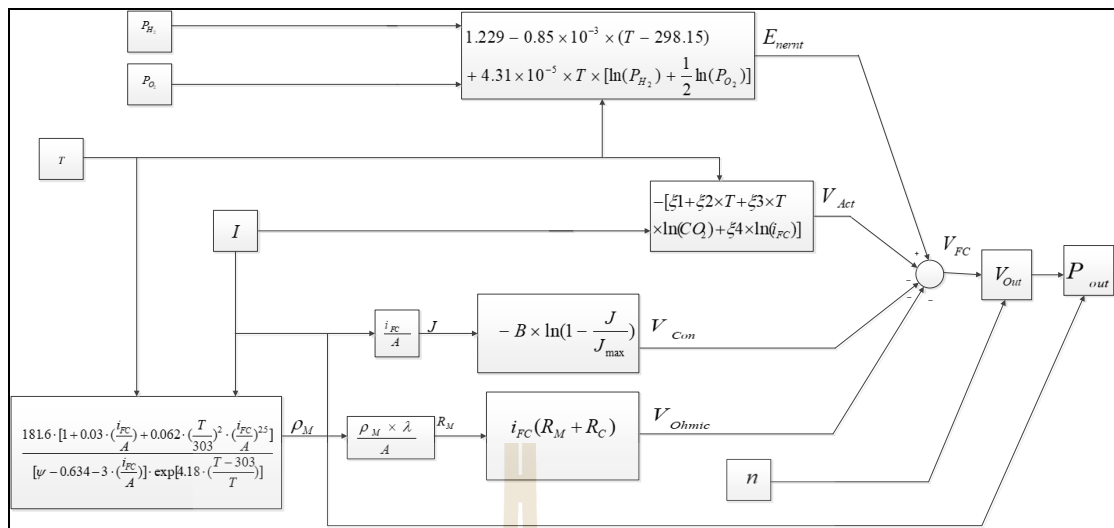
V_{FC} คือ แรงดันขาออกของเซลล์เชื้อเพลิง

i_{FC} คือ กระแสของเซลล์เชื้อเพลิง

เมื่อนำเซลล์ n เซลล์มาต่อแบบอนุกรม, V_s คือ แรงดันเอาต์พุต สามารถคำนวณได้โดย

$$V_s = n \times V_{FC} \quad (4.43)$$

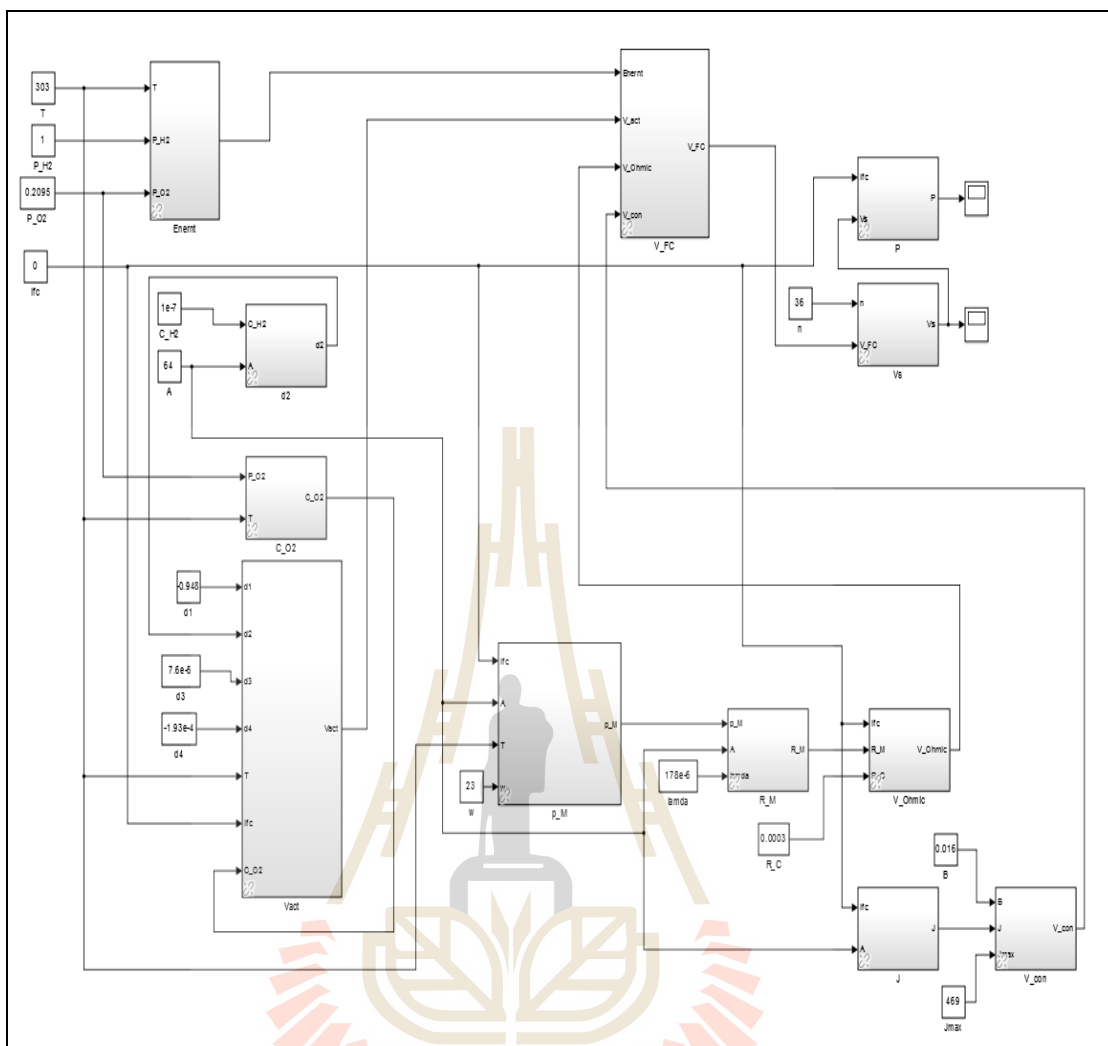
โดยที่ n คือ จำนวนเซลล์ที่ถูกใช้ในชั้นสแต็ก (stack) จากสมการข้างต้น ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นำมาประกอบใช้ในแบบจำลองดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.32 แบบจำลองของ PEMFC

เพื่อตรวจสอบว่าแต่ละส่วนทำงานได้และเป็นไปตามข้อมูลเบื้องต้นที่ได้ศึกษามาหรือไม่ โดยการทดสอบเราจะป้อนค่ากระแส และการไหลของไฮโดรเจนเป็นค่าคงที่ เพื่อดูว่าโปรแกรมทำงานและผลที่ได้ถูกต้องหรือไม่ โดยการจำลองผลทาง Simulink จากโปรแกรม MATLAB และนำผลที่ได้ไปประเมินและวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.33





รูปที่ 4.33 แบบจำลองของ PEMFC ทาง Simulink MATLAB

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆใน ระบบ PEMFC

ค่าพารามิเตอร์	การนำเสนอ	ค่าที่ใช้
n	จำนวนเซลล์ที่ใช้ในสแต็ค (stack)	12, 36, 72
A	พื้นที่หน้าตัดของเซลล์ (cm^2)	64 cm^2
λ	ความหนาของเซลล์ (m)	$178 \mu\text{m}$
T	อุณหภูมิเคลวิน (K)	333 K
P_{O_2}	ความดันของก๊าซออกซิเจน (atm)	0.2095 atm
P_{H_2}	ความดันของก๊าซไฮโดรเจน (atm)	1 atm
R_c	ค่าความต้านทาน (Ω)	0.0003Ω
B	ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของเซลล์และการดำเนินงานของสถานะ	0.016 V
ζ_1	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรสำหรับรูปแบบแต่ละเซลล์	-0.948
ζ_2	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรสำหรับรูปแบบแต่ละเซลล์	$0.00286 + 0.0002 \cdot \ln(A) + (4.3 \cdot 10^{-5}) \cdot \ln(c_{\text{H}_2})$
ζ_3	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรสำหรับรูปแบบแต่ละเซลล์	7.6×10^{-5}
ζ_4	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรสำหรับรูปแบบแต่ละเซลล์	-1.93×10^{-4}
ψ	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรสำหรับรูปแบบแต่ละเซลล์	23.0
J_n	ความหนาแน่นกระแสในเซลล์ที่เกิดขึ้นจริง (A/cm^2)	$3 \text{ mA}/\text{cm}^2$
J_{max}	ความหนาแน่นกระแสถาวร (A/cm^2)	$469 \text{ mA}/\text{cm}^2$
C	ค่าของตัวเก็บประจุทางไฟฟ้า (F)	3 F

จากตารางที่ 4.4 อธิบายความหมายของตัวแปรและแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ใน ระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC

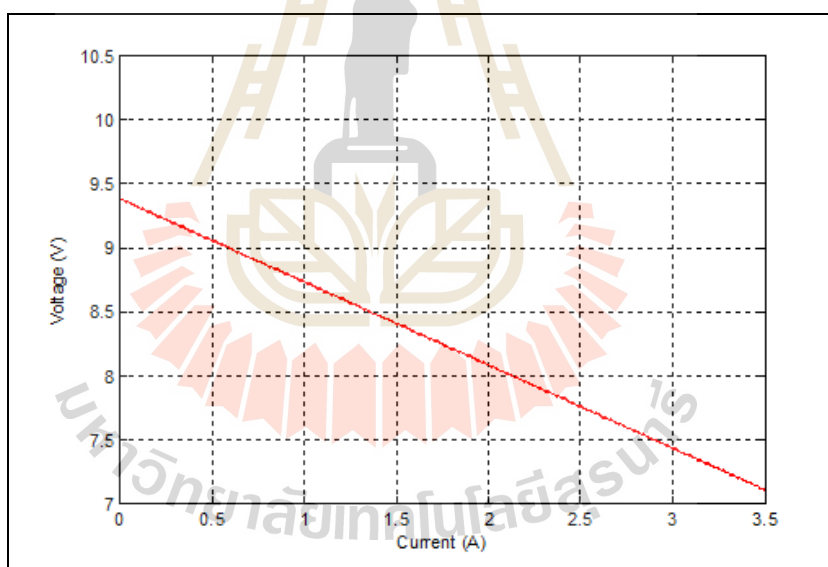
4.4.1 ระบบ PEMFC 20 W (12 Stack)

นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.4 ใส่ในระบบแบบทดสอบ Simulation ทาง MATLAB ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบของแบบจำลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าที่ทดสอบได้จากแบบจำลอง PEMFC 20 W

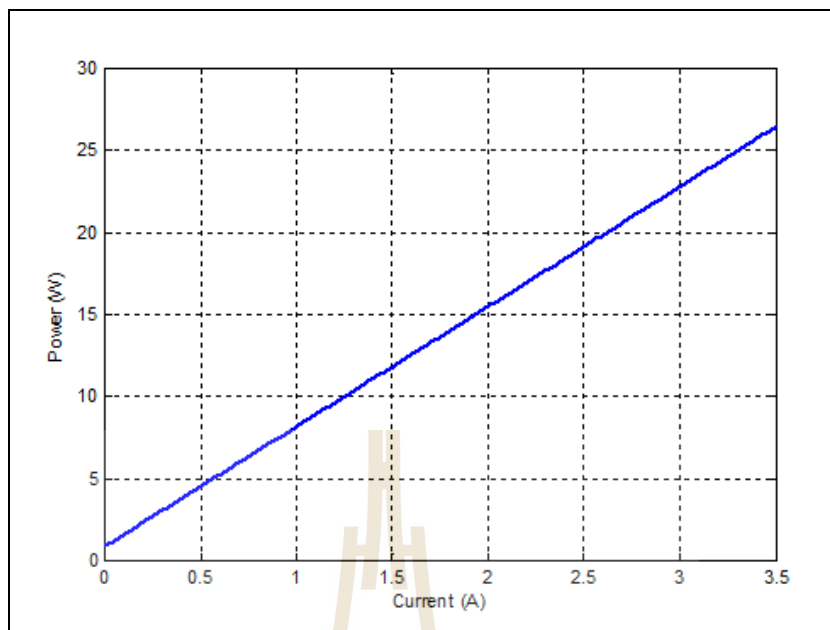
กระแส (A)	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
แรงดัน (V)	10.0315	8.8898	8.3879	8.0080	7.8706	7.6985	7.5550	7.4313
กำลังไฟฟ้า(W)	1.0031	4.4449	8.3879	12.1319	15.7412	19.2463	22.6500	26.0094

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่า แรงดันและกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจำลอง PEMFC 20 W ที่ค่ากระแสเพิ่มขึ้นตามลำดับ สามารถนำไปวาดกราฟได้ดังรูปที่ 4.34 และ 4.35



รูปที่ 4.34 ค่ากระแสและแรงดัน PEMFC 20 W

จากรูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของระบบ PEMFC 20 W ทำให้ทราบได้ว่าเมื่อค่ากระแสเพิ่มขึ้นค่าแรงดันลดลง



รูปที่ 4.35 ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้า PEMFC 20 W

จากรูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าของระบบ PEMFC 20 W ทำให้ทราบได้ว่าเมื่อค่ากระแสเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

จากราฟทั้งสองรูปสามารถแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นค่าแรงดันเพิ่มขึ้น ส่วนค่ากระแสเพิ่มขึ้นและกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ

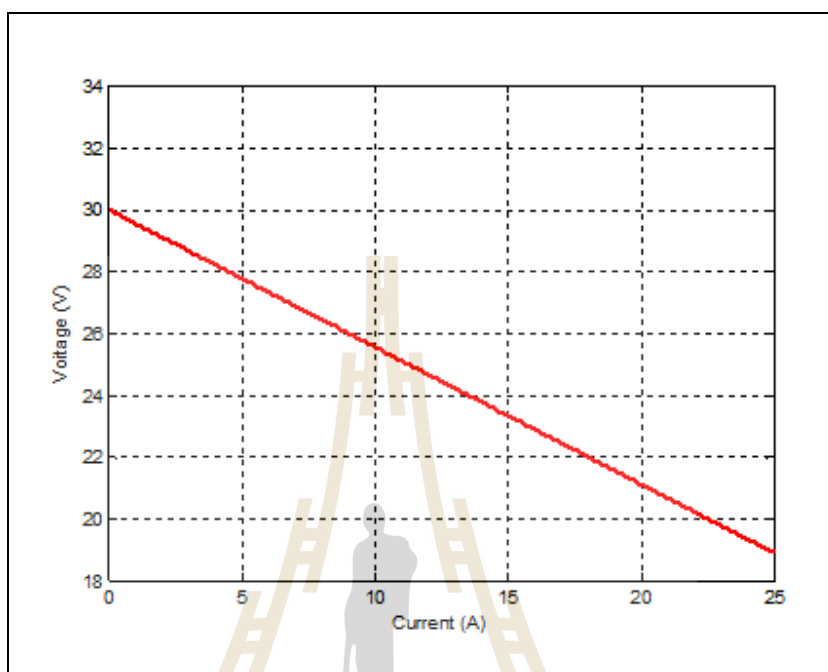
4.4.2 ระบบ PEMFC 500 W (36 Stack)

โดยระบบดังกล่าวนี้ จะมีค่าพารามิเตอร์ดังตาราง 4.4 นำค่าพารามิเตอร์ใส่ในระบบแบบทดสอบ Simulation ทาง MATLAB ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบของจำลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าที่ทดสอบได้จากแบบจำลอง PEMFC 500 W

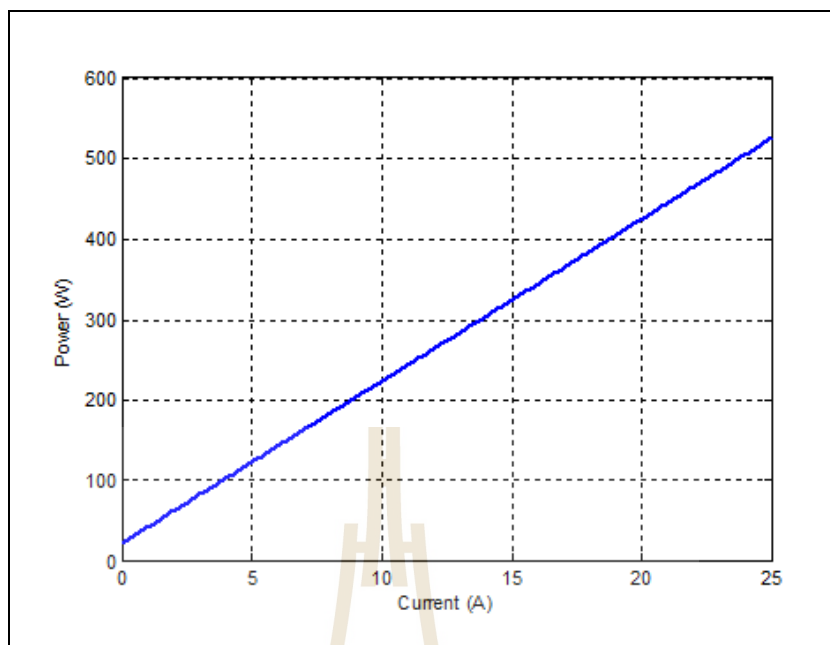
กระแส (A)	0.1	5	10	15	20	25
แรงดัน (V)	32.9460	25.7220	23.7857	22.4428	21.3343	20.3466
กำลังไฟฟ้า(W)	6.5892	128.6101	237.7857	336.6424	426.6866	508.6644

จากตารางที่ 4.6 แสดงค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจำลอง PEMFC 500 W ที่ค่ากระแสเพิ่มขึ้นตามลำดับ สามารถนำไปวาดกราฟได้ดังรูปที่ 4.36 และ 4.37



รูปที่ 4.36 ค่ากระแสและแรงดัน PEMFC 500 W

จากรูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของระบบ PEMFC 500 W ทำให้ทราบได้ว่าเมื่อค่ากระแสเพิ่มขึ้นค่าแรงดันลดลง



รูปที่ 4.37 ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้า PEMFC 500 W

จากรูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าของระบบ PEMFC 500 W ทำให้ทราบได้ว่าเมื่อค่ากระแสเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

จากราทั้งสองรูปสามารถแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นค่าแรงดันเพิ่มขึ้น ส่วนค่ากระแสเพิ่มขึ้นและกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ

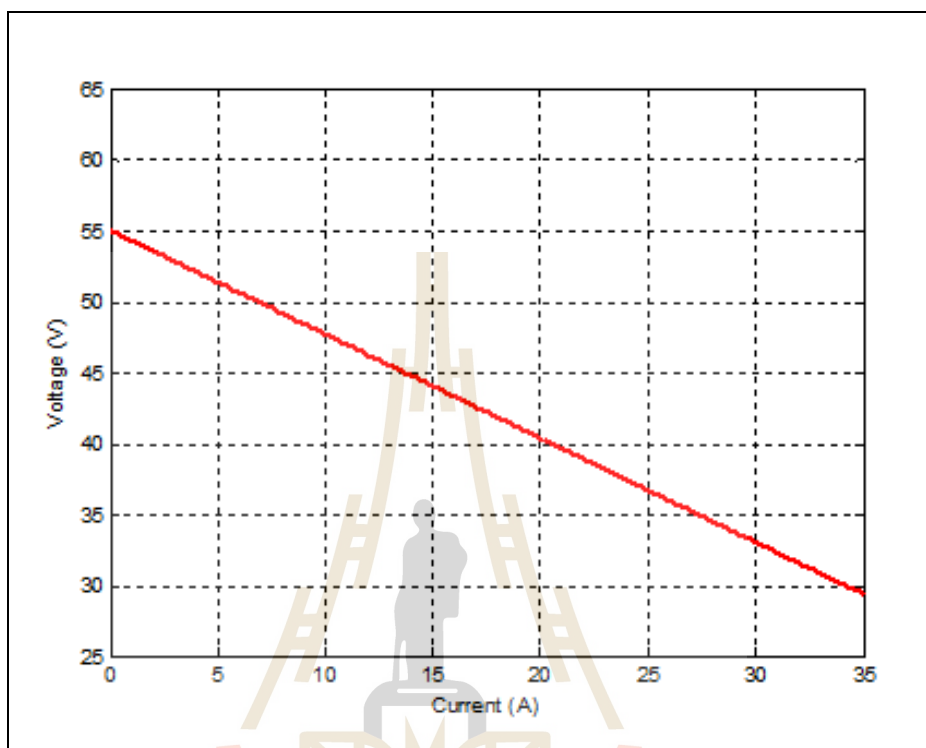
4.4.3 ระบบ PEMFC 1000 W (72 Stack)

โดยระบบดังกล่าวนี้ จะมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.4 นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.4 ไปใส่ในระบบแบบทดสอบ Simulation ทาง MATLAB ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบของจำลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าที่ทดสอบได้จากแบบจำลอง PEMFC 1000 W

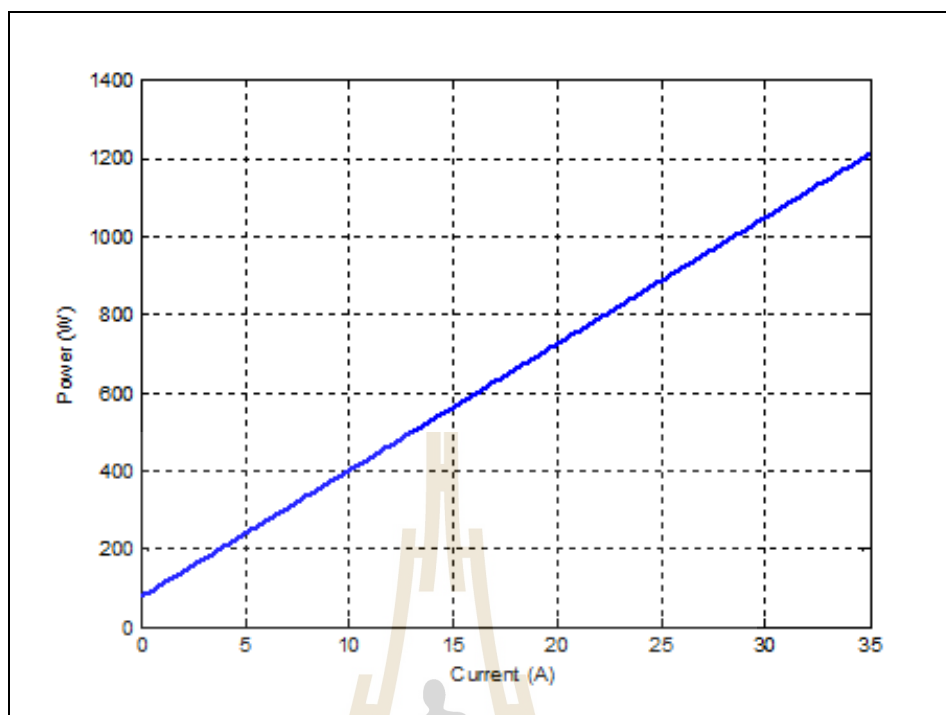
กระแส (A)	0.1	5	10	15	20	25	30	35
แรงดัน (V)	64.51	47.13	43.25	40.57	38.35	36.37	34.54	32.78
กำลังไฟฟ้า(W)	6.45	235.62	423.51	608.48	766.97	909.33	1036	1147.30

จากตารางที่ 4.7 แสดงค่า แรงดันและกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแบบจำลอง PEMFC 20 W ที่ค่ากระแสเพิ่มขึ้นตามลำดับ สามารถนำไปวาดกราฟได้ดังรูปที่ 4.38 และ 4.39



รูปที่ 4.38 ค่ากระแสและแรงดัน PEMFC 1000 W

จากรูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของระบบ PEMFC 1000 W ทำให้ทราบได้ว่าเมื่อค่ากระแสเพิ่มขึ้นค่าแรงดันลดลง



รูปที่ 4.39 กระแสและกำลังไฟฟ้า PEMFC 1000 W

จากรูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าของระบบ PEMFC 1000 W ทำให้ทราบได้ว่าเมื่อค่ากระแสเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

จากรูปทั้งสองรูปสามารถแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นค่าแรงดันเพิ่มขึ้น ส่วนค่ากระแสเพิ่มขึ้นและกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ

จากการจำลองผลจากแบบจำลองของ PEMFC 20W 500W และ 1000W ทำให้ได้ค่าแรงดันและค่ากำลังไฟฟ้า จากการทดสอบสามารถแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นค่าแรงดันเพิ่มขึ้น ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ

จากการสร้างและทดสอบแบบจำลองของระบบ PEMFC สามารถทำให้ทราบค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าที่ค่ากระแสต่าง ๆ จากนั้นจะนำไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลความเป็นไปได้ระหว่างการทดสอบจริงกับแบบจำลองต่อไป โดยการเปรียบเทียบนี้จะใช้ที่ PEMFC 20 W และ 500 W ดังจะกล่าวในบทต่อไป

4.5 สรุป

ทำการศึกษาแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ SOFC เพื่อศึกษาลักษณะทางพลวัตซึ่งกลไกการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงนี้จะคล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC ต่างกันที่ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่า และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำงานสูงถึง $800-1000^{\circ}\text{C}$ จึงทำให้ใช้เวลาอุ่นเครื่องนาน ค่าพลังงานที่ได้จาก SOFC มีค่าพลังงานที่สูงและได้ค่าทางไฟฟ้าที่สูงด้วย จากการนำใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมประยุกต์ใช้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้ GRNN (Generalized Regression Network) ข้างต้นดังผลที่แสดงให้เห็นจากกราฟแล้วนั้น ทำให้ทราบได้ว่า GRNN สามารถช่วยลดเวลาและปัญหาในการทำงานได้ โดยเมื่อทราบอินพุตและเอาต์พุตแล้วนั้น GRNN ก็สามารถประเมินและทำงานของระบบได้ โดยทำให้สามารถทำนายผลหาริตทดสอบและหาค่าที่หายไปได้ โดยที่ไม่ต้องทำการทดลองหรือสืบค้นหาค่าใหม่ของระบบตั้งแต่เริ่มต้น ซึ่งในการทำการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้งานได้จริง ทำการทดสอบเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC ขนาด 20 W และ 500 W เนื่องจากทำงานของระบบ PEMFC ในสภาวะอุณหภูมิค่าประมาณ $50-80^{\circ}\text{C}$ มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 40-50 % และจากการจำลองผลทาง Simulink MATLAB ทำให้ทราบได้ว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการทำงานผลิตค่าทางไฟฟ้าได้สูง และสามารถศึกษาต่อใช้กับระบบแยกโคคได้ รวมไปถึงการนำไปใช้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอาคารบ้านเรือนและรถยนต์ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบจากแบบจำลองที่เปรียบเทียบกับทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงจริง ดังที่ได้แสดงในบทที่ 6 ในส่วนของผลการทดสอบต่อไป

บทที่ 5

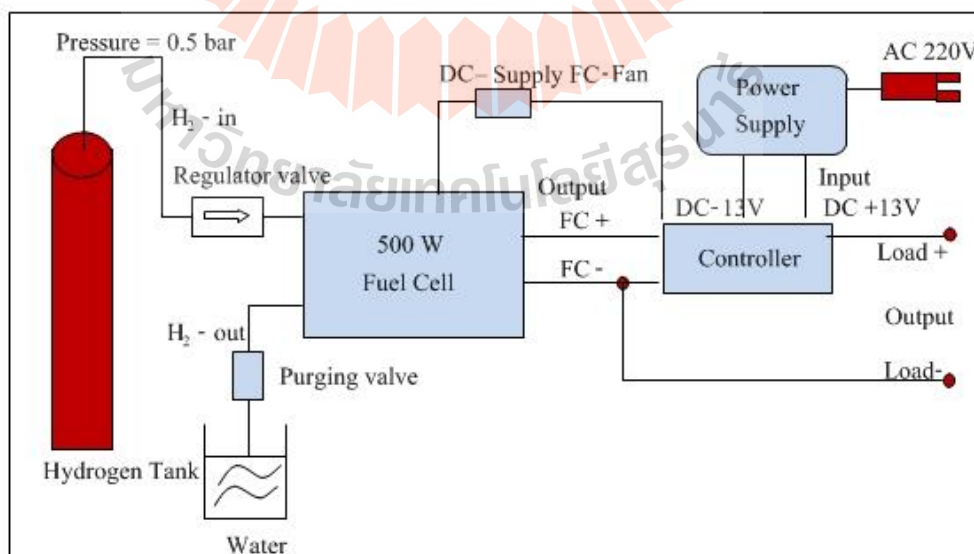
การติดตั้งระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

5.1 บทนำ

การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการทดสอบการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด โดยจะทำการสร้างแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane - PEM) โดยมีขั้นตอนการติดตั้งและการสร้างแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM ดังต่อไปนี้

5.2 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงประเภท PEM (PEM fuel cell) ขนาด 500 W

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ติดตั้งจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งานและการนำไปใช้งานที่หลากหลายโดยสามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์โหลดทางไฟฟ้า โดยการติดตั้งและสร้างระบบเซลล์เชื้อเพลิงนี้จะอาศัยการวางแผนผังอ้างอิงตามคู่มือการใช้งาน H-500 Fuel cell stack ของบริษัท ฮอริซอน เมโทร โพลิส จำกัด (Horizon Fuel Cell Technologies ,2012) โดยสามารถสร้างแผนผังการติดตั้งได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนผังระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM 500 W

โดยเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงประเภท PEMFC ขนาด 500 W จะมีส่วนประกอบและอุปกรณ์ของเครื่องดังต่อไปนี้ ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 W (Stack and System Component Information)

5.2.1 เซลล์เชื้อเพลิง

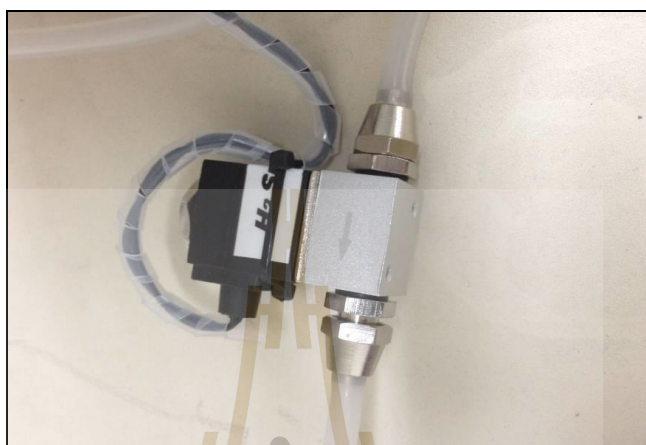
เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละแผ่นจะถูกนำมาเรียงและเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ต่อเข้ากับสายไฟและขั้วไฟฟ้าสามารถนำ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการใช้งานต่อได้ทันทีด้านหลังของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีช่องว่างเพื่อให้ระบายความร้อนและไอน้ำที่เกิดขึ้นเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงได้รับก๊าซไฮโดรเจน ส่วนด้านหน้าจะมีพัดลมขนาดเล็กเพื่อดูดอากาศและระบายความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 เซลล์เชื้อเพลิง

5.2.2 วาล์วต่อก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ

ควบคุมก๊าซไฮโดรเจนที่เข้าสู่ระบบในกรณีที่ระบบมีการทำงาน และทำหน้าที่หยุดการไหลของไฮโดรเจน ในกรณีที่ระบบหยุดการทำงาน แสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 วาล์วต่อก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ

5.2.3 อุปกรณ์ระบายความดัน

ทำหน้าที่ความดันภายในเซลล์เชื้อเพลิง ในกรณีที่มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมากเกินไปรวมทั้งระบายไอน้ำ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง แสดงได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 อุปกรณ์ระบายความดัน

5.2.4 ระบบลัดวงจรระบบ

ใช้ในกรณีที่ไม่ได้ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงเป็นระยะเวลานานๆ เพื่อเป็นการกระตุ้นระบบการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิง รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง แสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ระบบลัดวงจร

5.2.5 ปุ่มเปิด-ปิดการทำงาน

ใช้ในการเปิดและปิดการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมค่าภายในเซลล์เชื้อเพลิงและการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิง แสดงได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ปุ่มเปิด-ปิด การทำงาน

5.2.6 ระบบพัดลมระบายอากาศ

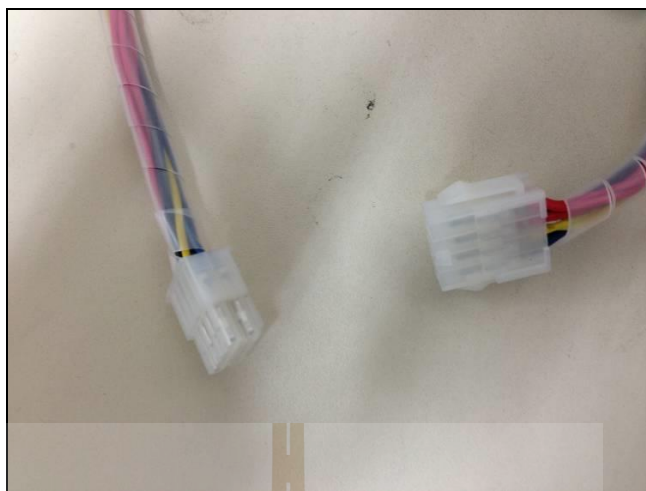
ทำหน้าที่ในการดูดอากาศเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง รวมทั้งลดอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงในกรณีที่เซลล์เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงเกินไป แสดงได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ระบบพัดลมระบายอากาศ

5.2.7 อุปกรณ์เชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมค่าภายในเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์เชื้อเพลิง

เพื่อเชื่อมต่อระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเข้ากับระบบพัดลม, T-sensor, ระบบระบายความดันและระบบควบคุมก๊าซไฮโดรเจน ของอุปกรณ์ควบคุมค่าภายในเซลล์เชื้อเพลิง แสดงได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 อุปกรณ์เชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมค่าภายในเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์เชื้อเพลิง

5.2.8 อุปกรณ์ควบคุมค่าภายในเซลล์เชื้อเพลิง

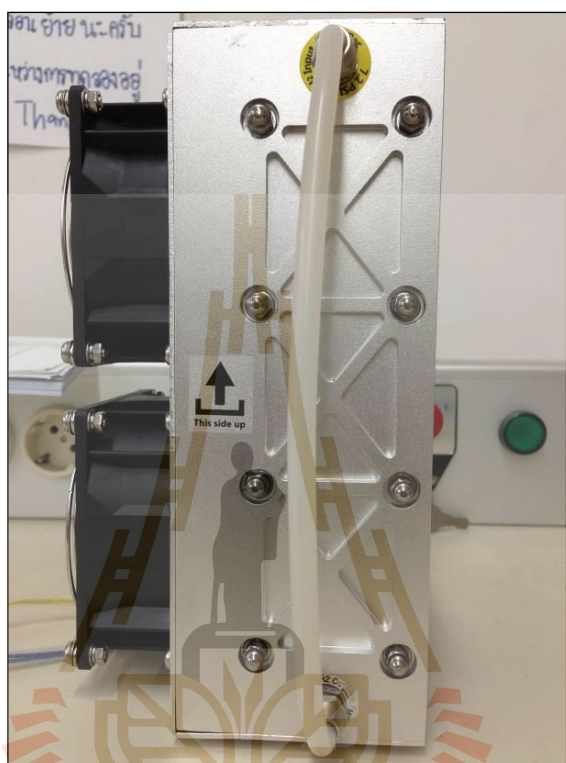
อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ, การทำงานของพัดลม, ปริมาณไฮโดรเจนในระบบและระบบความดันและระบายไอน้ำ รวมทั้งควบคุมการทำงานและผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง แสดงได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 อุปกรณ์ควบคุมค่าภายในเซลล์เชื้อเพลิง

5.2.9 จุดเชื่อมต่อท่อไฮโดรเจนที่เข้าและออกจากระบบ

H2 Input เชื่อมต่อกับท่อทางซิติโคลน และ H2 Output เชื่อมต่อกับท่อทางซิติโคลน แสดงได้ดังรูปที่ 5.10

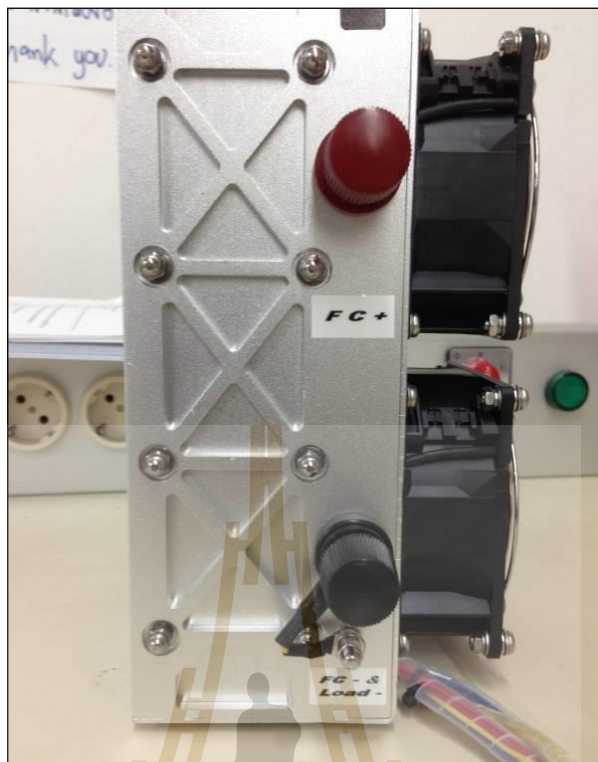


รูปที่ 5.10 จุดเชื่อมต่อท่อไฮโดรเจนที่เข้าและออกจากระบบ

5.2.10 จุดเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง

FC+ เชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงด้านบวก (สีแดง)

FC- เชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงด้านลบ (สีดำ) แสดงได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 จุดเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง

5.2.11 ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง (ในกรณีก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 x 0.6 เซนติเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง (ในกรณีก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ)

5.2.12 ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง (ในกรณีระบายไอน้ำออกจากระบบ)
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 0.2 x 0.4 เซนติเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง (ในกรณีก๊าซไฮโดรเจนออกจากระบบ)

5.2.13 ถังก๊าซไฮโดรเจน

ระดับความบริสุทธิ์ก๊าซไฮโดรเจน (Composition) 99.995% ปราศจากความชื้น
แสดงได้ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ถังก๊าซไฮโดรเจน

5.2.14 วาล์วปรับความดัน

ใช้ดูปริมาณก๊าซในถังและปรับความดันก่อนเข้าเครื่องเซลล์เชื้อเพลิง แสดงได้ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 วาล์วปรับความดัน

5.2.15 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

ให้ความต่างศักย์ 12-15 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

5.2.16 ข้อต่อทองเหลือง

ใช้สำหรับต่อกับท่อทางซิลิโคนที่มีขนาดต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ข้อต่อทองเหลือง

5.2.17 โหลดที่ใช้ในการทดสอบ

หลอดไฟกระดิ่ง 12 V 50 W แสดงได้ดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 โหลดทดสอบหลอดไฟกระดิ่ง

5.3 คุณลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 W

มีรายละเอียดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 W

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง (Type of fuel cell)	PEM
จำนวนเซลล์ (Number of cells)	36
กำลังไฟฟ้าที่ได้ (Rated power)	500 W
ประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน (Performance)	21.6 V ที่ 24 A.
ค่าไฟฟ้าของระบบควบคุมค่าภายในเซลล์เชื้อเพลิง (DC Voltage)	12 V
ค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ไล่อากาศ (Purging valve voltage)	12 V
ค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ควบคุมก๊าซไฮโดรเจน (H ₂ supply valve voltage)	12 V
ค่าไฟฟ้าของพัดลมระบายอากาศ (Blower voltage)	12 V
ตัวทำปฏิกิริยา (Reactants)	ไฮโดรเจนและอากาศ
ระดับอุณหภูมิภายนอก (External temperature)	5 – 30 °C
ระดับอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุด (Max. Stack temperature)	65 °C
ระดับความบริสุทธิ์ของก๊าซไฮโดรเจน (Composition)	99.995% (ปราศจากความชื้น)
ระดับความดันของก๊าซไฮโดรเจน (H ₂ Pressure)	0.45-0.55 Bar
ระบบควบคุมความชื้น (Humidification)	อัตโนมัติ
ระบบระบายความร้อน (Cooling)	ระบบพัดลมระบายอากาศ
น้ำหนักโดยรวม (Weight with fan & casing)	2800 g
ขนาด (Dimensions)	21.5 cm x 12.5 cm x 18 cm
อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน (Flow rate at rated output)	7 l/min
เวลาเริ่มต้นการทำงาน (Start up time)	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 วินาทีที่อุณหภูมิห้อง
ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (Efficiency of stack)	40% ที่กำลังไฟสูงสุด

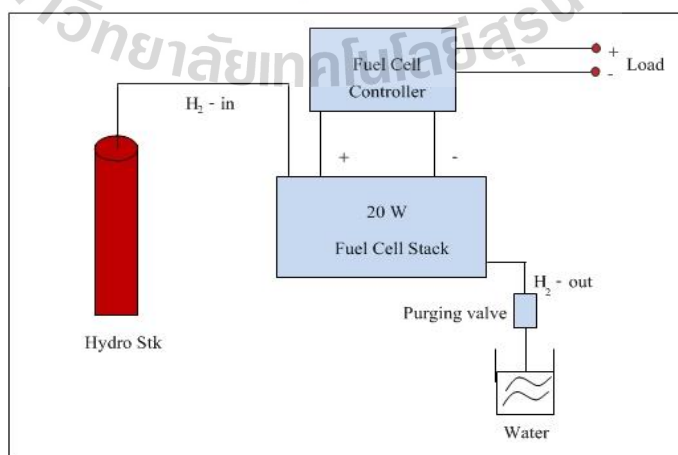
ตารางที่ 5.1 รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 W (ต่อ)

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ระบบหยุดการทำงานเมื่อความต่างศักย์ต่ำเกินไป (Low Voltage Shut down)	18 V
ระบบหยุดการทำงานเมื่อกระแสไฟฟ้าสูงเกินไป (Over current Shut down)	30 A
ระบบหยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงเกินไป (Low Voltage Shut down)	65 °C
แหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ควบคุมระบบ (External power supply*)	13V(+V), <5A

จากตาราง 5.1 แสดงรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 500 W และคุณสมบัติและระบบการทำงานของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิง 500 W

5.4 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงประเภท PEM ขนาด 20 W

โดยระบบเซลล์เชื้อเพลิงประเภท PEM 20 W ก็เช่นเดียวกันการติดตั้งและสร้างระบบเซลล์เชื้อเพลิงนี้จะอาศัยการวางแผนผังอ้างอิงตามคู่มือการใช้งาน H-20 Fuel cell stack ของบริษัท ฮอริซอน เมโทร โพลิต จำกัด (Horizon Fuel Cell Technologies, 2011) โดยสามารถสร้างแผนผังการติดตั้งได้ดังต่อไปนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 5.19

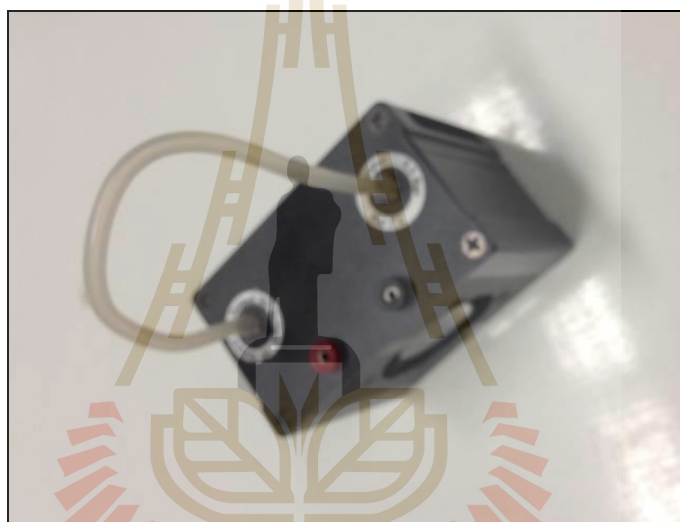


รูปที่ 5.19 แผนผังระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM 20 W

โดยเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงประเภท PEM ขนาด 20 W จะมีส่วนประกอบและอุปกรณ์ที่คล้ายกับเครื่อง 500 W แต่จะมีขนาดเล็กกว่าโดยมีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ ดังต่อไปนี้

5.4.1 เซลล์เชื้อเพลิง 20 W

เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละแผ่นจะถูกนำมาเรียงและเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ต่อเข้ากับสายไฟและขั้วไฟฟ้าสามารถนำอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการใช้งานต่อได้ทันทีด้านหลังของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีช่องว่างเพื่อให้ระบายความร้อนและไอน้ำที่เกิดขึ้นเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงได้รับก๊าซไฮโดรเจน ส่วนด้านหน้าจะมีพัดลมขนาดเล็กเพื่อดูดอากาศและระบายความร้อน แสดงได้ดังรูปที่ 5.20 และ 5.21



รูปที่ 5.20 เซลล์เชื้อเพลิง 20 W



รูปที่ 5.21 เซลล์เชื้อเพลิงส่วนด้านหน้าระบายความร้อน

5.4.2 ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง

จะถูกใช้สำหรับการเชื่อมต่อตัวควบคุมแรงดันและเซลล์เชื้อเพลิง แสดงได้
ดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง

5.4.3 ตัวควบคุม

จะควบคุมการทำงานของระบบรวมไปถึงการถ่ายเทระบายไอน้ำและการลัดวงจรของเซลล์เชื้อเพลิง แสดงได้ดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 ตัวควบคุม

5.4.4 อุปกรณ์ระบายความดัน

ทำหน้าที่ความดันภายในเซลล์เชื้อเพลิง ในกรณีที่มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมากเกินไปรวมทั้งระบายไอน้ำ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง แสดงได้ดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 อุปกรณ์ระบายความดัน

5.4.5 ถังไฮโดรเจนขนาดเล็ก ขนาด 10 ลิตร

เป็นถังไฮโดรเจนขนาดเล็กมีขนาดความจุ 10 ลิตร พร้อมกับหัวจ่ายควบคุมแรงดันอัตโนมัติแล้ว แสดงได้ดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 ถังไฮโดรเจนขนาดเล็ก ขนาด 10 ลิตร

5.4.6 โหลดที่ใช้ในการทดสอบ

ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก 5 V และหลอดไฟกระแสตรง 6.2 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 โหลดที่ใช้ในการทดสอบ

5.5 คุณลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 20 W

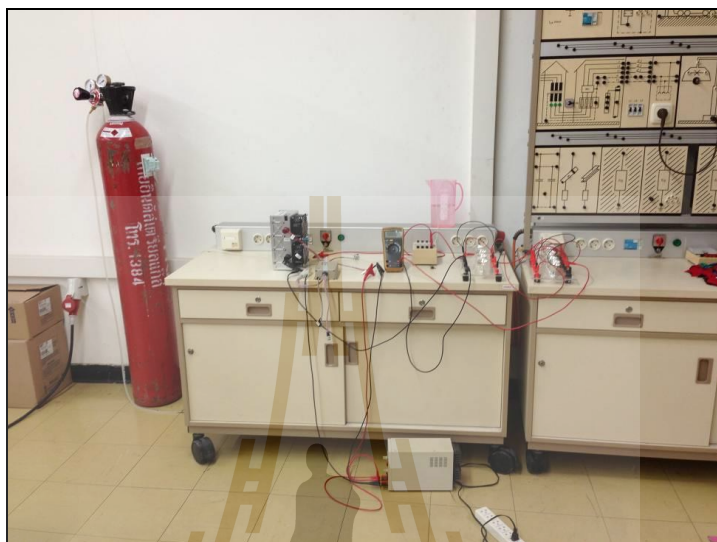
มีรายละเอียดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 คุณลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 20 W

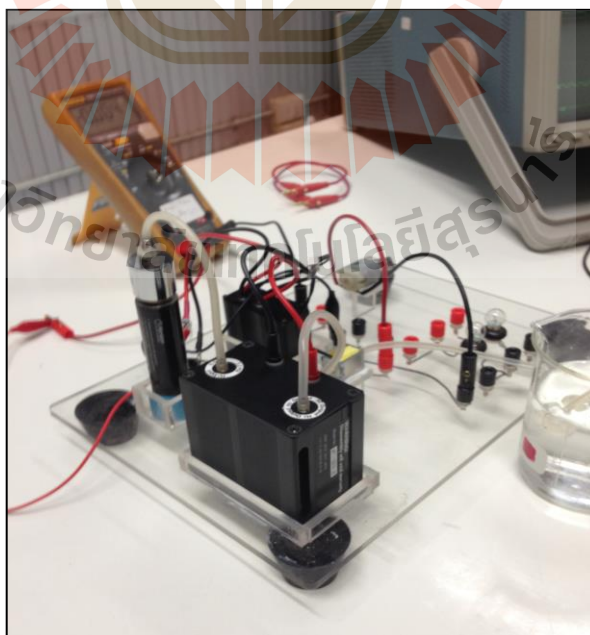
คุณสมบัติ	รายละเอียด
ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง (Type of fuel cell)	PEM
จำนวนเซลล์ (Number of cells)	13
กำลังไฟฟ้าที่ได้ (Rated power)	20 W
ประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน (Performance)	7.8 V ที่ 2.6 A.
ค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ไล่อากาศ (Purging valve voltage)	6 V
ค่าไฟฟ้าของพัดลมระบายอากาศ (Blower voltage)	5 V
ตัวทำปฏิกิริยา (Reactants)	ไฮโดรเจนและอากาศ
ระดับอุณหภูมิภายนอก (External temperature)	5 – 30 °C
ระดับอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุด (Max Stack temperature)	55 °C
ระดับความบริสุทธิ์ของก๊าซไฮโดรเจน (Composition)	99.995% (ปราศจากความชื้น)
ระดับความดันของก๊าซไฮโดรเจน (H ₂ Pressure)	0.45-0.55 Bar
ระบบควบคุมความชื้น (Humidification)	อัตโนมัติ
ระบบระบายความร้อน (Cooling)	ระบบพัดลมระบายอากาศ
น้ำหนักโดยรวม (Weight with fan & casing)	275 g
ตัวควบคุม (Controller)	90 g
ขนาด (Dimensions)	7.5 cm x 4.7 cm x 7.0 cm
อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน (Flow rate at rated output)	0.28 l/min
เวลาเริ่มต้นการทำงาน (Start up time)	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 วินาทีที่อุณหภูมิห้อง
ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (Efficiency of stack)	40% ที่กำลังไฟสูงสุด

จากตาราง 5.2 แสดงรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 20 W และคุณสมบัติและระบบการทำงานของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิง 20 W

หลังจากออกแบบและจัดเตรียมอุปกรณ์ต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองขนาดประกอบไปด้วย 500 W และ 20 W จากนั้นทำการติดตั้งระบบดังแผนผังที่ออกแบบไว้เพื่อเตรียมการทดสอบ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.27 และ 5.28 ตามลำดับ



รูปที่ 5.27 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM 500 W



รูปที่ 5.28 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM 20 W

จากรูปที่ 5.27 และ รูปที่ 5.28 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่จะใช้ทดสอบกับระบบเซลล์เชื้อเพลิง EMFC 20 W และ 500 W เพื่อทำการจ่ายโหลดทดสอบต่อไปในบทที่ 6

5.6 สรุป

ในเนื้อหาบทที่ 5 ได้กล่าวถึงการเตรียมอุปกรณ์สำหรับการติดตั้งเพื่อทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC โดยอ้างอิงจากคู่มือการใช้งานของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM Fuel cell stack ของบริษัท ฮอริซอน เมโทรโพลิส จำกัด ซึ่งประกอบด้วยที่ระบบ PEMFC 500 W ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิง 500 W วาล์วต่อก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ อุปกรณ์ระบายความดัน ระบบลัดวงจรระบบ ปุ่มเปิด-ปิดการทำงาน ระบบบัลลวระบายอากาศ อุปกรณ์เชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมค่าภายในเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์เชื้อเพลิง อุปกรณ์ควบคุมค่าภายในเซลล์เชื้อเพลิง จุดเชื่อมต่อท่อไฮโดรเจนที่เข้าและออกจากระบบ จุดเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง ท่อสำหรับเชื่อมต่อเซลล์เชื้อเพลิง ถังก๊าซไฮโดรเจน วาล์วปรับความดัน แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ข้อต่อทองเหลือง และโหลดที่ใช้ทดสอบ ที่ระบบ PEMFC 20 W ประกอบด้วยอุปกรณ์ เซลล์เชื้อเพลิง 20 W ท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง ตัวควบคุม อุปกรณ์ระบายความดัน ถังไฮโดรเจนขนาดเล็ก 10 ลิตร โหลดที่ใช้ในการทดสอบ โดยอุปกรณ์แต่ละชนิดนั้นได้อธิบายอย่างละเอียดเกี่ยวกับการทำงานและการติดตั้งในระบบเซลล์เชื้อเพลิง ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ติดตั้งจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งานและการนำไปใช้งานที่หลากหลายโดยสามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์โหลดทางไฟฟ้า โดยจะเห็นความแตกต่างได้ว่าที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ขนาด 500 W จะมีขนาดอุปกรณ์ที่ใหญ่กว่าและจำนวนอุปกรณ์การวางผังการต่อที่ซับซ้อนกว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ 20 W ดังนั้นการต่อและการติดตั้งเครื่องระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ 500 W

จากการศึกษาคู่มือการใช้งานของเครื่อง PEMFC 500 W สามารถสรุปได้ว่า

- 1) ในการวัดค่ากระแสที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะรับภาระโหลดควรใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่พิกัดของเครื่องวัดสูงกว่า 10 A เพราะเนื่องจากเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 500 W มีค่ากระแสที่สูงมาก
- 2) ในการหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเซลล์เชื้อเพลิง เครื่องทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ควรมีระบบควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (Mass flow controller) ที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซที่เข้าสู่ระบบ รวมทั้งระบบระบายก๊าซในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า
- 3) เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการใช้งานควรโหลดอิเล็กทรอนิกส์ในการทดสอบ
- 4) ระบบความปลอดภัยในระหว่างการทดสอบควรทดสอบในสถานที่ที่อากาศถ่ายเทได้สะดวกและควรตรวจสอบว่ามีก๊าซไฮโดรเจนรั่วหรือไม่

5) หลังจากการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงแล้วควรนำไปเก็บในถุงพลาสติกที่สามารถปิดปากได้ ใช้ผ้าเล็กหรือกระดาษชำระชุบน้ำบิดพอหมาด ๆ ไล่ไไว้ภายในถุง เพื่อรักษาความชื้นให้กับเซลล์เชื้อเพลิงและควรเก็บที่อุณหภูมิห้อง หลังจากประกอบและติดตั้งระบบเซลล์เชื้อเพลิงเสร็จสมบูรณ์เรียบร้อยแล้วนั้นส่วนวิธีการทดสอบและผลการทดสอบจะกล่าวในบทที่ 6 ต่อไป



บทที่ 6

การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและ วิเคราะห์ผลแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

6.1 บทนำ

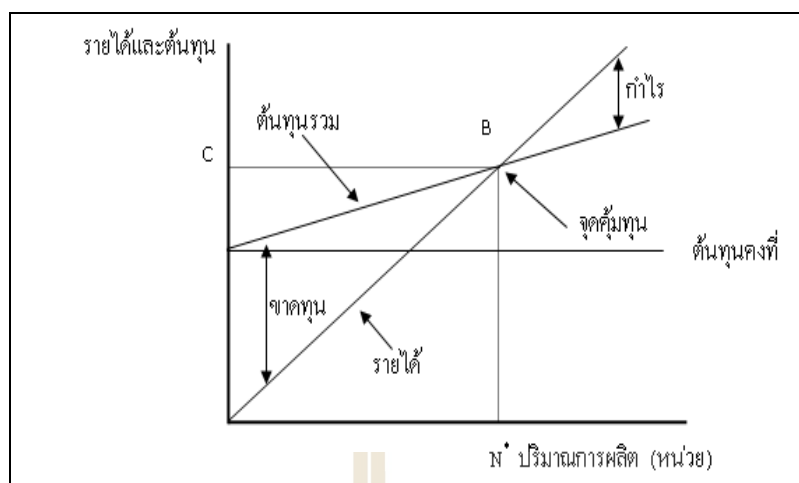
จากบทที่ 5 ได้กล่าวถึงการออกแบบการจัดวางแผนผังของระบบเซลล์เชื้อเพลิงและอธิบายถึงอุปกรณ์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC ทั้ง 20 W และ 500 W โดยในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนวิธีการทดสอบและทดลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC ทั้งสองขนาดทั้งที่สภาวะไร้โหลดและสภาวะรับโหลด เพื่อการเปลี่ยนแปลงของกระแส แรงดัน และกำลังทางไฟฟ้า เพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลต่อไป โดยหลักการทดสอบและผลการทดสอบจะกล่าวได้ดังต่อไปนี้

6.2 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน คือ การวิเคราะห์ตัดสินใจเลือกลงทุนโครงการต่าง ๆ บางครั้งต้องการจะทราบว่าจำนวนผลผลิตที่จะผลิตคุ้มทุนควรเป็นเท่าไรเพื่อเป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจจุดคุ้มทุน (break – even analysis) คือจุดที่รายได้กับรายจ่ายเท่ากัน นั่นคือกำไรเป็นศูนย์นั่นเอง การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุน รายได้ และผลกำไรที่ปริมาณการผลิตต่าง ๆ การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเหมาะสมกับโครงการระยะสั้น เงื่อนไขต่าง ๆ ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดโครงการ เพราะถ้ามีการเปลี่ยนแปลงก็จะมีผลทำให้การตัดสินใจคลาดเคลื่อนได้

$$TC = TR \quad (6.1)$$

โดยที่ TC = ต้นทุนรวม และ TR = รายรับรวม



รูปที่ 6.1 แผนภูมิการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

จากรูปที่ 6.1 จุด B เป็นจุดคุ้มทุนที่ต้องผลิต ปริมาณ N^* หน่วย ต้นทุนรวม C บาท ซึ่งเกิดจากเส้นของรายได้ตัดกับเส้นของต้นทุนรวม และปริมาณที่อยู่ระหว่างเส้นรายได้กับเส้นต้นทุนนั้น ถ้าด้านบนเป็นกำไร ด้านล่างเป็นการขาดทุน

6.2.1 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 500 W

จากศึกษาหาข้อมูลพบว่าต้นทุนคงที่มีดังนี้

ตารางที่ 6.1 ต้นทุนคงที่ของ PEMFC 500 W

ลำดับ	รายการ	ราคา (บาท)
1	เครื่อง PEMFC 500 W	157,500
2	ค่าถังไฮโดรเจน (ไม่รวมก๊าซ)	5,000
3	ค่า Regulator valve (วาล์วปรับความดัน)	3,000
4	ปรับแรงดันไฟฟ้า จาก DC-AC	3,600
5	อุปกรณ์ท่อยางและข้อต่อต่างๆ	1,000
6	แบตเตอรี่ DC 12 V (ใช้กระตุ้น)	2,000
7	ค่าติดตั้ง	3,000
รวม		175,100

จากตารางที่ 6.1 อธิบายรายละเอียดของราคาค่าต้นทุนคงที่ของ PEMFC 500 W
ต้นทุนแปรผัน

ค่าก๊าซไฮโดรเจน ราคา 680 บาท ต่อถัง

คำนวณอัตราการผลิตที่ PEMFC 500 W ผลิตได้

ก๊าซ 1 ถัง มี 7 m^3 ($1 \text{ m}^3 = 1,000$ ลิตร) เพราะฉะนั้น 1 ถัง มี 7,000 ลิตร

โดย PEMFC 500 W มีอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจน 7 L/min ซึ่งจะใช้ได้ $1,000$ นาที $= 16.66$

ชั่วโมง

จาก $W = P \times t$ (คำนวณพลังงานหน่วยจูล)

$W = 500 \text{ W} \times 1000 \text{ min} = 500,000 \text{ J}$

เพราะฉะนั้นจะได้พลังงานหน่วยไฟฟ้า $= 500,000/60 \text{ W/h}$

$= 8.333 \text{ kW/h}$

ซึ่ง PEMFC ใช้ก๊าซ 1 ถัง สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 8.33 kWh หรือ 8.33 หน่วย ที่ผลิต

500 W

ซึ่งจะมีต้นทุนในการผลิตค่าไฟฟ้า หน่วยละ $680/8.33 = 81.632$ บาท

โดย 1 วันจะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ $(8.33/16.66) \times 24 = 12$ หน่วย/วัน

ซึ่งราคาขายที่ขายให้กับการไฟฟ้าขายได้ในราคาหน่วยละ 8 บาท เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าเป็นการขาดทุนโดยสิ้นเชิงไม่คุ้มทุน ซึ่งปัจจุบันราคาก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ยังมีราคาแพงอยู่เป็นอย่างมาก ซึ่งอาจจะเหมาะสมในอนาคตที่ราคาไฟฟ้าสูงขึ้น หรือค้นพบแหล่งวัตถุดิบของไฮโดรเจนที่สามารถสังเคราะห์ได้ในราคาที่ต่ำกว่าราคาปัจจุบัน ถ้าได้มีการพัฒนาและลดต้นทุนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ก็จะสามารถลดต้นทุนและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างคุ้มค่า อาทิเช่น การใช้เครื่องแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำแล้วป้อนเข้าสู่ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า ก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างคุ้มค่าและบางที่อาจไม่มีต้นทุนค่าเชื้อเพลิงอีกด้วย

ตัวอย่างการคำนวณจุดคุ้มทุน

โดยที่ให้ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงอยู่ที่หน่วยละ 4 บาท ดังนั้นจึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

คำนวณหน่วยการผลิตรวม เมื่อไม่คิดค่าของเงินกับเวลาและใช้ค่าบำรุงรักษาเพียง 2,000 บาท เท่านั้น และไม่คิดค่าการต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย (เพราะเนื่องจากจัดให้อยู่ในระบบแบบแยกโคด)

จากสมการที่ 6.1 จะได้ว่า

$$TC = TR$$

ต้นทุนรวม = รายรับรวม

$$175,100 + 2,000 + 4N = 8N$$

$$177,100 = 4N$$

$$N = 44,275 \text{ หน่วย}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ระยะเวลาคืนทุนได้เท่ากับ $(175,100 + 2,000 + 4(44,275)) / (8 \times 12 \times 30 \times 12)$
 $= 10.24$ ปี

และเมื่อคิดอัตราดอกเบี้ยของเงินและเวลามาเกี่ยวข้องโดยให้ดอกเบี้ย 8 %

ต้นทุนคงที่ = ต้นทุนในการก่อสร้างทั้งสิ้น 175,100 + ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาปีละ 2,000 บาท

ต้นทุนแปรผัน = ต้นทุนในการผลิต 4 บาทต่อหน่วยไฟฟ้า ($12 \times 30 \times 12 \times 4 = 17,280$ บาท)

รายได้ = รายได้จากการขายไฟฟ้า ราคาขาย 8 บาทต่อหน่วย (ผลิตได้ $12 \times 30 \times 12$ หน่วย)

สมมติให้ n คือ จำนวนปีที่ถึงจุดคุ้มทุน

จุดคุ้มทุน คือ จุดที่รายได้มีค่าเท่ากับต้นทุนรวม

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$(34,560)(P/A, 8\%, n) = (175,100 + (2,000)(P/A, 8\%, n)) + 17,280(P/A, 8\%, n)$$

$$(34,560 - 17,280 - 2,000)(P/A, 8\%, n) = 175,100$$

$$(15,280)(P/A, 8\%, n) = 175,100$$

$$(P/A, 8\%, n) = 11.46$$

$$1.08^n - 1 = 0.08 \times 1.08^n \times 11.46$$

$$1.08^n - 1 = 0.92 \times 1.08^n$$

$$(1 - 0.92) 1.08^n = 1$$

$$(0.08) 1.08^n = 1$$

$$1.08^n = 12.5$$

$$N \log(1.08) = \log(12.5)$$

$$N = 32.81 \text{ ปี}$$

สรุปได้ว่า จะคุ้มทุนเมื่อดำเนินการผลิตไป 32.81 ปี เมื่อคิดต้นทุนเชื้อเพลิงหน่วยละ 4 บาท

6.2.2 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 20 W

จากศึกษาหาข้อมูลพบว่าต้นทุนคงที่มีดังนี้

ตารางที่ 6.2 ต้นทุนคงที่ของ PEMFC 20 W

ลำดับ	รายการ	ราคา (บาท)
1	เครื่อง PEMFC 20 W	21,125
2	ค่าแก๊สไฮโดรเจน (ไม่รวมก๊าซ)	5,000
3	ค่า Regulator valve (วาล์วปรับความดัน)	3,000
4	ปรับแรงดันไฟฟ้า จาก DC-AC	3,600
5	อุปกรณ์ท่อขงและข้อต่อต่างๆ	1,000
6	ค่าติดตั้ง	2,000
รวม		35,725

จากตารางที่ 6.2 อธิบายรายละเอียดของราคาต้นทุนคงที่ของ PEMFC 20 W
ต้นทุนแปรผัน

ค่าแก๊สไฮโดรเจน ราคา 680 บาท ต่อถัง

คำนวณอัตราการผลิตที่ PEMFC 20 W ผลิตได้

ก๊าซ 1 ถัง มี 7 m^3 ($1 \text{ m}^3 = 1,000$ ลิตร) เพราะฉะนั้น 1 ถัง มี 7,000 ลิตร

โดย PEMFC 20 W มีอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจน 0.28 L/min ซึ่งจะใช้ได้

25,000 นาที = 416.67 ชั่วโมง

จาก $W = P \times t$ (คำนวณพลังงานหน่วยจูล)

$W = 20 \text{ W} \times 25,000 \text{ min} = 500,000 \text{ J}$

เพราะฉะนั้นจะได้พลังงานหน่วยไฟฟ้า = $500000/60 = 8333.33 \text{ W/h}$

= 8.333 kW/h ซึ่ง PEMFC ใช้ก๊าซ 1 ถัง สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 8.33 kW/h

หรือ 8.33 หน่วย

ซึ่งจะมีต้นทุนในการผลิตค่าไฟฟ้า หน่วยละ $680/8.33 = 81.632$ บาท

โดย 1 วันจะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ $(8.33/416.67) \times 24 = 0.48$ หน่วย/วัน

ราคาต่อหน่วยที่ผลิตได้จะมีค่าเท่ากับ PEMFC 500 W แต่ประสิทธิภาพกำลังการผลิตนั้นจะไม่สูงเท่ากับ PEMFC 500 W เพราะกำลังการผลิตผลิตได้แค่ 20 W เท่านั้น โดยคิดเฉลี่ยเป็นจะผลิตได้แค่ $(8.33/416.67) \times 24 = 0.48$ หน่วย/วัน เท่านั้น PEMFC 20 W จึงเหมาะสำหรับการ

พกพาไปในที่ทุรกันดาร ตามป่าเขา สามารถใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับหลอดไฟแสงสว่าง ชาร์ตโทรศัพท์มือถือได้

ตัวอย่างการคำนวณจุดคุ้มทุน

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณได้ดังนี้ โดยที่ให้ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงอยู่ที่หน่วยละ 4 บาท จำนวนหน่วยการผลิตรวม เมื่อไม่คิดค่าของเงินกับเวลา และใช้ค่าบำรุงรักษาเพียง 100 บาท เท่านั้น และไม่คิดค่าการต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย เพราะเป็นแบบระบบแยกโดด

จากสมการที่ 6.1 จะได้ว่า

$$TC = TR$$

ต้นทุนรวม = รายรับรวม

$$35,725 + 100 + 4N = 8N$$

$$36,725 = 4N$$

$$N = 8,956.25 \text{ หน่วย}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้นจะได้ระยะเวลาคืนทุนได้เท่ากับ } & (35,725 + 100 + 4(8,956.25)) / (8 \times 0.48 \times 30 \times 12) \\ & = 51.83 \text{ ปี} \end{aligned}$$

ซึ่งเป็นไปไม่ได้ สรุปคือไม่สามารถหาจุดคุ้มทุนได้ เพราะเนื่องจากเป็นเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก จึงไม่เหมาะต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าในครัวเรือน โดยจากการคำนวณแบบคิดดอกเบี้ยจะเห็นได้ว่า ใน 1 วัน เครื่อง PEMFC 20 W สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้แค่ 0.48 หน่วยเท่านั้น ซึ่งถือว่ากำลังการผลิตที่ได้น้อยมาก และประกอบกับต้นทุนคงที่ในการผลิตมีค่าสูงมาก สูงถึง 35,725 บาท อีกทั้งราคาขายต่อปีขายไปได้แค่ 1382.4 บาท จึงไม่สมเหตุสมผลและทำให้อัตราการใช้ดอกเบี้ยแต่ละปีคิดค่าลบไปเรื่อยๆ จึงทำให้การคำนวณออกมาในการหาค่าจำนวนปีคิดลบนั่นเอง โดยเครื่อง PEMFC 20 W จะเหมาะต่อการพกพาในที่ห่างไกลความเจริญโดยจะใช้กับหลอดไฟให้แสงสว่างกระแสตรง พัดลมขนาดเล็ก และชาร์ตแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือ สามารถใช้แทนถ่านไฟฉายได้ เป็นต้น

6.2.3 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1000 W

จากศึกษาหาข้อมูลพบว่าต้นทุนคงที่มีดังนี้

ตารางที่ 6.3 ต้นทุนคงที่ของ PEMFC 1000 W

ลำดับ	รายการ	ราคา (บาท)
1	เครื่อง PEMFC 1000 W	240,000
2	ค่าถังไฮโดรเจน (ไม่รวมก๊าซ)	5,000
3	ค่า Regulator valve (วาล์วปรับความดัน)	3,000
4	ปรับแรงดันไฟฟ้า จาก DC-AC	3,600
5	อุปกรณ์ท่อยางและข้อต่อต่างๆ	1,000
6	แบตเตอรี่ DC 12 V (ใช้กระตุ้น)	2,000
7	ค่าติดตั้ง	3,000
รวม		257,600

จากตารางที่ 6.3 อธิบายรายละเอียดของราคาค่าต้นทุนคงที่ของ PEMFC 1000 W

ต้นทุนแปรผัน

ค่าก๊าซไฮโดรเจน ราคา 680 บาท ต่อถัง

คำนวณอัตราการผลิตที่ PEMFC 1000 W ผลิตได้

ก๊าซ 1 ถัง มี 7 m^3 ($1 \text{ m}^3 = 1,000$ ลิตร) เพราะฉะนั้น 1 ถัง มี 7,000 ลิตร

โดย PEMFC 1000 W มีอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจน 14 L/min ซึ่งจะใช้ได้ 500 นาที = 8.33

ชั่วโมง

จาก $W = P \times t$ (คำนวณพลังงานหน่วยจูล)

$$W = 1000 \text{ W} \times 1000 \text{ min} = 1,000,000 \text{ J}$$

เพราะฉะนั้นจะได้พลังงานหน่วยไฟฟ้า = $1,000,000/60 = 16,666.66 \text{ W/h}$

= 16.66 kW/h ซึ่ง PEMFC ใช้ก๊าซ 1 ถัง สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 16.66 kWh หรือ

16.66 หน่วย ที่พิกัด 1000 W

ซึ่งจะมีต้นทุนในการผลิตค่าไฟฟ้า หน่วยละ $680/16.66 = 40.81$ บาท

โดย 1 วันจะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ $(16.66/8.33) \times 24 = 48$ หน่วย/วัน

ซึ่งราคาขายที่ขายให้กับการไฟฟ้าขายได้ในราคาหน่วยละ 8 บาท เท่านั้น ซึ่งทำให้เห็นได้ว่าเป็นการขาดทุนโดยสิ้นเชิงไม่คุ้มทุน ซึ่งปัจจุบันราคาก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ยังมีราคาแพงอยู่เป็นอย่างมาก ซึ่งถ้าได้มีการพัฒนาและลดต้นทุนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ก็จะสามารถลดต้นทุนและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างคุ้มค่า อาทิเช่น การใช้เครื่องแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำแล้วป้อนเข้าสู่ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า ก็จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างคุ้มค่าและบางทีอาจไม่มีต้นทุนค่าเชื้อเพลิงอีกด้วย

ตัวอย่างการคำนวณจุดคุ้มทุน

โดยที่ให้ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงอยู่ที่หน่วยละ 4 บาท ดังนั้นจึงสามารถคำนวณได้ดังนี้ จำนวนหน่วยการผลิตรวม เมื่อไม่คิดค่าของเงินกับเวลา และใช้ค่าบำรุงรักษาเพียง 45,000 บาท เท่านั้น และไม่คิดค่าการต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย (เพราะเนื่องจากจัดให้อยู่ในระบบแบบแยกโคด)

จากสมการที่ 6.1 จะได้ว่า

$$TC = TR$$

ต้นทุนรวม = รายรับรวม

$$257,600 + 45,000 + 4N = 8N$$

$$302,600 = 4N$$

$$N = 75,650 \text{ หน่วย}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ระยะเวลาคืนทุนได้เท่ากับ $(257,600 + 10,000 + 4(66,900)) / (8 \times 48 \times 30 \times 12) = 4.38$ ปี

และเมื่อคิดอัตราดอกเบี้ยของเงิน และ เวลา มาเกี่ยวข้องโดยให้ดอกเบี้ย 8 %

ต้นทุนคงที่ = ต้นทุนในการก่อสร้างทั้งสิ้น 257,600 + ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาปีละ 45,000 บาท

ต้นทุนแปรผัน = ต้นทุนในการผลิต 4 บาทต่อหน่วยไฟฟ้า $(48 \times 30 \times 12 \times 4 = 69120 \text{ บาท})$

รายได้ = รายได้จากการขายไฟฟ้า ราคาขาย 8 บาทต่อหน่วย (ผลิตได้ $48 \times 30 \times 12$ หน่วย)

สมมติให้ n คือ จำนวนปีที่ถึงจุดคุ้มทุน

จุดคุ้มทุนคือ จุดที่รายได้มีค่าเท่ากับต้นทุนรวม

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$(138,240)(P/A, 8\%, n) = (257,600 + (45,000)(P/A, 8\%, n)) + 69,120(P/A, 8\%, n)$$

$$(13,8240 - 69,120 - 45,000)(P/A, 8\%, n) = 257,600$$

$$(24,120)(P/A, 8\%, n) = 257,600$$

$$(P/A, 8\%, n) = 10.68$$

$$1.08^n - 1 = 0.08 \times 1.08^n \times 10.68$$

$$1.08^n - 1 = 0.85 \times 1.08^n$$

$$(0.15) 1.08^n = 1$$

$$N \log(1.08) = \log(6.67)$$

$$N = 24.66 \text{ ปี}$$

สรุปได้ว่า จะคุ้มทุนเมื่อดำเนินการผลิตไป 24.66 ปี เมื่อคิดต้นทุนเชื้อเพลิงหน่วยละ 4 บาท

6.2.4 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 2000 W

จากศึกษาหาข้อมูลพบว่าต้นทุนคงที่มีดังนี้

ตารางที่ 6.4 ต้นทุนคงที่ของ PEMFC 2000 W

ลำดับ	รายการ	ราคา (บาท)
1	เครื่อง PEMFC 2000 W	457,500
2	ค่าถังไฮโดรเจน (ไม่รวมก๊าซ)	5,000
3	ค่า Regulator valve (วาล์วปรับความดัน)	3,000
4	ปรับแรงดันไฟฟ้า จาก DC-AC	3,600
5	อุปกรณ์ท่อและข้อต่อต่างๆ	1,000
6	แบตเตอรี่ DC 12 V (ใช้กระตุ้น)	2,000
7	ค่าติดตั้ง	3,000
รวม		475,100

จากตารางที่ 6.4 อธิบายรายละเอียดของราคาค่าต้นทุนคงที่ของ PEMFC 2000 W

ต้นทุนแปรผัน

ค่าก๊าซไฮโดรเจน ราคา 680 บาท ต่อถัง

คำนวณอัตราการผลิตที่ PEMFC 2000 W ผลิตได้

ก๊าซ 1 ถัง มี 7 m^3 ($1 \text{ m}^3 = 1,000 \text{ ลิตร}$) เพราะฉะนั้น 1 ถัง มี 7,000 ลิตร

โดย PEMFC 500 W มีอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจน 29 L/min ซึ่งจะใช้ได้ 241.379 นาที =

4.02 ชั่วโมง

จาก $W = P \times t$ (คำนวณพลังงานหน่วยจูล)

$$W = 2000 \text{ W} \times 1000 \text{ min} = 2,000,000 \text{ J}$$

เพราะฉะนั้นจะได้พลังงานหน่วยไฟฟ้า = $2,000,000/60 = 33,333.33 \text{ W/h}$
 $= 33.33 \text{ kW/h}$ ซึ่ง PEMFC ใช้ก๊าซ 1 ถึง สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 33.33 kWh หรือ 33.33 หน่วย ที่พิกัด 2000 W

ซึ่งจะมีต้นทุนในการผลิตค่าไฟฟ้า หน่วยละ $680/33.33 = 20.40$ บาท

โดย 1 วันจะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ $(33.33/4.02) \times 24 = 198.98$ หน่วย/วัน

ซึ่งราคาขายที่ขายให้กับการไฟฟ้าขายได้ในราคาหน่วยละ 8 บาท เท่านั้น ซึ่งทำให้เห็นได้ว่าเป็นการขาดทุนโดยสิ้นเชิงไม่คุ้มทุน ซึ่งปัจจุบันราคาก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ยังมีราคาแพงอยู่เป็นอย่างมาก ซึ่งถ้าได้มีการพัฒนาและลดต้นทุนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ก็จะสามารถลดต้นทุนและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างคุ้มค่า อาทิเช่น การใช้เครื่องแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำแล้วป้อนเข้าสู่ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า ก็จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างคุ้มค่าและบางทีอาจไม่มีต้นทุนค่าเชื้อเพลิงอีกด้วย

ตัวอย่างการคำนวณจุดคุ้มทุน

โดยที่ให้ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงอยู่ที่หน่วยละ 4 บาท ดังนั้นจึงสามารถคำนวณได้ดังนี้ จำนวนหน่วยการผลิตรวม เมื่อไม่คิดค่าของเงินกับเวลา และใช้ค่าบำรุงรักษาเพียง 235,000 บาท เท่านั้น และไม่คิดค่าการต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย (เพราะเนื่องจากจัดให้อยู่ในระบบแบบแยกโคด)

จากสมการที่ 6.1 จะได้ว่า $TC = TR$

ต้นทุนรวม = รายรับรวม

$$475,100 + 235,000 + 4N = 8N$$

$$710,100 = 4N$$

$$N = 177,525 \text{ หน่วย}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ระยะเวลาคืนทุนได้เท่ากับ $(475,100 + 250,000 + 4(177,525)) / (8 \times 198.98 \times 30 \times 12)$
 $= 2.47$ ปี

และเมื่อคิดอัตราดอกเบี้ยของเงิน และ เวลา มาเกี่ยวข้องโดยให้ดอกเบี้ย 8%

ต้นทุนคงที่ = ต้นทุนในการก่อสร้างทั้งสิ้น 475,100 + ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาปีละ 235,000 บาท

ต้นทุนแปรผัน = ต้นทุนในการผลิต 4 บาทต่อหน่วยไฟฟ้า $(198.98 \times 30 \times 12 \times 4 = 286,531.2$ บาท)

รายได้ = รายได้จากการขายไฟฟ้า ราคาขาย 8 บาทต่อหน่วย (ผลิตได้ $198.98 \times 30 \times 12$ หน่วย)

สมมติให้ n คือ จำนวนปีที่ถึงจุดคุ้มทุน

จุดคุ้มทุนคือ จุดที่รายได้มีค่าเท่ากับต้นทุนรวม

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$(573,062.4)(P/A, 8\%, n) = (475,100 + (230,000)(P/A, 8\%, n)) +$$

$$286,531.2(P/A, 8\%, n)$$

$$(573,062.4 - 286,531.2 - 235,000)(P/A, 8\%, n) = 475,100$$

$$(51,531.2)(P/A, 8\%, n) = 475,100$$

$$(P/A, 8\%, n) = 9.21$$

$$1.08^n - 1 = 0.08 \times 1.08^n \times 9.21$$

$$1.08^n - 1 = 0.73 \times 1.08^n$$

$$(0.27) 1.08^n = 1$$

$$N \log(1.08) = \log(3.7)$$

$$N = 16.99 \text{ ปี}$$

สรุปได้ว่าจะคุ้มทุนเมื่อดำเนินการผลิตไป 16.99 ปี เมื่อคิดต้นทุนเชื้อเพลิงหน่วยละ 4 บาท

6.2.5 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 5000 W

จากศึกษาหาข้อมูลพบว่าต้นทุนคงที่มีดังนี้

ตารางที่ 6.5 ต้นทุนคงที่ของ PEMFC 5000 W

ลำดับ	รายการ	ราคา (บาท)
1	เครื่อง PEMFC 5000 W	975,000
2	ค่าถังไฮโดรเจน (ไม่รวมก๊าซ)	5,000
3	ค่า Regulator valve (วาล์วปรับความดัน)	3,000
4	ปรับแรงดันไฟฟ้า จาก DC-AC	5,000
5	อุปกรณ์ท่อทางและข้อต่อต่างๆ	2,000
6	แบตเตอรี่ DC 12 V (ใช้กระตุ้น)	2,000
7	ค่าติดตั้ง	3,000
รวม		995,000

จากตารางที่ 6.5 อธิบายรายละเอียดของราคาต้นทุนคงที่ของ PEMFC 5000 W
ต้นทุนแปรผัน

ค่าก๊าซไฮโดรเจน ราคา 680 บาท ต่อถัง

คำนวณอัตราการผลิตที่ PEMFC 5000 W ผลิตได้

ก๊าซ 1 ถัง มี 7 m^3 ($1 \text{ m}^3 = 1,000$ ลิตร) เพราะฉะนั้น 1 ถัง มี 7,000 ลิตร

โดย PEMFC 500 W มีอัตราการใช้ก๊าซไฮโดรเจน 70 L/min ซึ่งจะใช้ได้ 100 นาที = 1.66

ชั่วโมง

จาก $W = P \times t$ (คำนวณพลังงานหน่วยจูล)

$W = 5000 \text{ W} \times 1000 \text{ min} = 5,000,000 \text{ J}$

เพราะฉะนั้นจะได้พลังงานหน่วยไฟฟ้า = $5,000,000/60 = 83,333.33 \text{ W/h}$

= 83.33 kW/h ซึ่ง PEMFC ใช้ก๊าซ 1 ถัง สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 83.33 kWh หรือ

83.33 หน่วย ที่พิกัด 5000 W

ซึ่งจะมีต้นทุนในการผลิตค่าไฟฟ้า หน่วยละ $680/83.33 = 8.16$ บาท

โดย 1 วันจะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ $(83.33/1.66) \times 24 = 1,204.77$ หน่วย/วัน

ซึ่งราคาขายที่ขายให้กับการไฟฟ้าขายได้ในราคาหน่วยละ 8 บาท เท่านั้น ซึ่งทำให้เห็นได้ว่าเป็นการขาดทุนโดยสิ้นเชิงไม่คุ้มทุน ซึ่งปัจจุบันราคาก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ยังมีราคาแพงอยู่เป็นอย่างมาก ซึ่งถ้าได้มีการพัฒนาและลดต้นทุนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ก็จะสามารถลดต้นทุนและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างคุ้มค่า อาทิเช่น การใช้เครื่องแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำแล้วป้อนเข้าสู่ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า ก็จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างคุ้มค่าและบางที่อาจไม่มีต้นทุนค่าเชื้อเพลิงอีกด้วย

ตัวอย่างการคำนวณจุดคุ้มทุน

โดยที่ให้ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงอยู่ที่หน่วยละ 4 บาท ดังนั้นจึงสามารถคำนวณได้ดังนี้ จำนวนหน่วยการผลิตรวม เมื่อไม่คิดค่าของเงินกับเวลา และใช้ค่าบำรุงรักษาเพียง 1,600,000 บาท เท่านั้น และไม่คิดค่าการต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย (เพราะเนื่องจากจัดให้อยู่ในระบบแบบแยกโดด)

จากสมการที่ 6.1 จะได้ว่า

$$TC = TR$$

ต้นทุนรวม = รายรับรวม

$$995,000 + 1,600,000 + 4N = 8N$$

$$2,595,000 = 4N$$

$$N = 648,750 \text{ หน่วย}$$

$$\text{เพราะฉะนั้นจะได้ระยะเวลาคืนทุนได้เท่ากับ } (475100 + 1,600,000 + 4(648,750))/(8 \times 1204.77 \times 30 \times 12)$$

$$= 1.49 \text{ ปี}$$

และเมื่อคิดอัตราดอกเบี้ยของเงิน และ เวลา มาเกี่ยวข้องโดยให้ดอกเบี้ย 8 %

ต้นทุนคงที่ = ต้นทุนในการก่อสร้างทั้งสิ้น 995,000 + ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาปีละ 1,600,000 บาท

ต้นทุนแปรผัน = ต้นทุนในการผลิต 4 บาทต่อหน่วยไฟฟ้า ($1204.77 \times 30 \times 12 \times 4 = 1,734,868.8$ บาท)

รายได้ = รายได้จากการขายไฟฟ้า ราคาขาย 8 บาทต่อหน่วย (ผลิตได้ $1204.77 \times 30 \times 12$ หน่วย)

สมมติให้ n คือ จำนวนปีที่ถึงจุดคุ้มทุน

จุดคุ้มทุนคือ จุดที่รายได้มีค่าเท่ากับต้นทุนรวม

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} (3,469,737.6)(P/A, 8\%, n) &= (995,000 + (1,700,000)(P/A, 8\%, n)) + \\ &1,734,868.8 (P/A, 8\%, n) \\ (3,469,737.6 - 1,734,868.8 - 1,600,000) (P/A, 8\%, n) &= 995,000 \end{aligned}$$

$$(134,868.8)(P/A, 8\%, n) = 995,000$$

$$(P/A, 8\%, n) = 7.37$$

$$1.08^n - 1 = 0.08 \times 1.08^n \times 7.37$$

$$1.08^n - 1 = 0.59 \times 1.08^n$$

$$(1 - 0.59) 1.08^n = 1$$

$$(0.41) 1.08^n = 1$$

$$1.08^n = 2.43$$

$$N \log(1.08) = \log(2.43)$$

$$N = 11.54 \text{ ปี}$$

สรุปได้ว่า จะคุ้มทุนเมื่อดำเนินการผลิตไป 11.54 ปี เมื่อคิดต้นทุนเชื้อเพลิงหน่วยละ 4 บาท จากข้อมูลข้างต้นสามารถนำมาสรุปเป็นตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุนของ PEMFC

PEMFC	ระยะเวลาคืนทุน (ปี) เมื่อไม่คิดอัตราดอกเบี้ย	ระยะเวลาคืนทุน (ปี) เมื่อคิดอัตราดอกเบี้ย
20 W	51.83	—
500 W	10.24	32.81
1000 W	4.38	24.66
2000 W	2.47	16.99
5000 W	1.49	11.54

จากตารางที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุนของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC จะเห็นได้ว่าค่ากำลังวัตต์การผลิตของเครื่อง PEMFC ยิ่งกำลังวัตต์สูงเท่าไรยิ่งมีความคุ้มค่าและระยะเวลาคืนทุนเร็วเท่านั้น เนื่องมาจากอัตรากำลังผลิตที่สูง สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่าเครื่องที่มีกำลังวัตต์ต่ำ จึงสามารถคืนทุนได้เร็วยิ่งขึ้นและมีการใช้งานได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืน

จากการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของระบบเซลล์เชื้อเพลิง จะพบว่าไม่มีความคุ้มค่า เนื่องจากราคาต้นทุนเชื้อเพลิงหรือก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์นั้นมีราคาสูงมาก แต่เพื่อทำการประเมินความคุ้มค่าที่เป็นไปได้ จึงต้องกำหนดราคาต้นทุนเชื้อเพลิงที่ 4 บาท และราคาขาย 8 บาท จากการนำ PEMFC มาวิเคราะห์หาการประเมินจุดคุ้มทุน สามารถสรุปได้ว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงนั้น มีความเป็นไปได้และคุ้มค่าหากสามารถลดต้นทุนทางด้านก๊าซไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์ที่จะใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า เพราะก๊าซไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์ปัจจุบันยังคงมีราคาสูงมาก จากการคำนวณสามารถแสดงให้เห็นว่า PEMFC 500 W มีความคุ้มค่ามากกว่า PEMFC 20 W ทั้งทางด้านกำลังการผลิตและสมรรถนะในการใช้งานของระบบ เซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 20 W จึงเหมาะสำหรับการพกพาไปในที่ทุรกันดาร ตามป่าเขา สามารถใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับหลอดไฟแสงสว่าง ชาร์ตโทรศัพท์มือถือได้ และข้อที่ควรพิจารณาในการใช้จุดคุ้มทุนในการนำเอาจุดคุ้มทุนไปใช้ในการวิเคราะห์ตัดสินใจในโครงการต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

1. ต้นทุนของผลิตภัณฑ์จะแยกเป็นต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันได้ชัดเจน และต้นทุนคงที่ที่จะต้องคงที่เท่ากันตลอด ไม่ว่าจะผลิตมากหรือน้อย
2. ปริมาณการผลิตและปริมาณการขายสมมติว่าเท่ากันไม่มีการเก็บไว้
3. ข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ การประเมินทุนต่าง ๆ จะต้องถูกต้อง

4. เหมาะสำหรับโครงการที่มีอายุสั้น ๆ เพราะถ้าระยะเวลานานจะเกิดความไม่แน่นอนเกิดขึ้น

5. การพิจารณาตัดสินใจเลือกโครงการจะมองแค่จุดคุ้มทุนอย่างเดียวคงไม่ได้ จะต้องไปดูสิ่งอื่นที่เป็นปัจจัยต่อการตัดสินใจประกอบด้วย

ระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ในการวิเคราะห์ตัดสินใจเลือกลงทุนนอกจากจะพิจารณาจุดคุ้มทุนแล้ว บางครั้งยังต้องการทราบว่าคืนทุนด้วยระยะเวลาเท่าไร การคำนวณหาจะต้องแปลงมูลค่าของเงินเป็นมูลค่าปัจจุบันรายปีก็ได้ ปีที่ทำให้รายจ่ายเท่ากับรายรับนั้นคือระยะเวลาการจ่ายคืนทุน และข้อที่ควรพิจารณาในการใช้ระยะเวลาคืนทุนการวิเคราะห์ตัดสินใจในโครงการต่าง ๆ จะใช้ระยะเวลาคืนทุนพิจารณาอย่างเดียวไม่ได้ควรจะต้องใช้วิธีอื่น ๆ เช่น รายจ่ายรายปี อัตราผลตอบแทน เป็นต้น

จากการคำนวณจุดคุ้มทุนนั้นทำให้ทราบได้ว่าต้นทุนทางด้านเชื้อเพลิงของพลังงานสะอาดอย่างเซลล์เชื้อเพลิงนี้นั้นยังค่อนข้างมีราคาสูงแต่หากสามารถแยกไฮโดรเจนบริสุทธิ์ได้นั้นก็จะสามารถลดต้นทุนได้อย่างสูงมากหรือไม่ก็ไม่มีค่าใช้จ่ายในการเป็นต้นทุนของเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าก็ได้ โดยการแยกก๊าซไฮโดรเจนสามารถทำได้ดังตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.7 กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สำคัญ (ดัดแปลงมาจาก Quakernaat,1995)

กระบวนการ	ชนิดของกระบวนการ	สารตั้งต้น	พลังงานที่ใช้	ผลิตภัณฑ์ที่ก่อมลภาวะ
ทางความร้อน	Steam reforming	ก๊าซธรรมชาติ	ไอน้ำอุณหภูมิสูง	มีการให้ CO หรือ CO ₂ ออกมา
ทางความร้อน	การแยกน้ำด้วยความร้อน(Thermochemical water splitting)	น้ำ	ความร้อนอุณหภูมิสูงจากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ทำให้แก๊สเย็นตัวลง	ไม่มี
ทางความร้อน	การแยกแก๊ส (Gasification)	ถ่านหิน วัสดุชีวภาพต่างๆ	น้ำและ O ₂ ที่มีความดันและอุณหภูมิสูง	มีการให้ CO หรือ CO ₂ ออกมา
ทางความร้อน	การเผา (Pyrolysis)	วัสดุชีวภาพต่างๆ	ไอน้ำอุณหภูมิไม่สูงมาก	มีการให้ CO หรือ CO ₂

ตารางที่ 6.7 กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สำคัญ (ดัดแปลงมาจาก Quakernaat, 1995)(ต่อ)

กระบวนการ	ชนิดของกระบวนการ	สารตั้งต้น	พลังงานที่ใช้	ผลิตภัณฑ์ที่ก่อมลภาวะ
ทางเคมีไฟฟ้า	การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า	น้ำ	พลังงานจากแหล่งหมุนเวียน กลับ เช่นลม แสงแดด เป็นต้น	ไม่มี
ทางไฟฟ้าเคมี	การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า	น้ำ	พลังงานจากแหล่งสิ้นเปลือง เช่น แก๊ส ธรรมชาติ ถ่าน หิน เป็นต้น	มีการปลดปล่อย สารก่อมลภาวะ ขึ้นกับแหล่งให้ พลังงานไฟฟ้า
ทางไฟฟ้าเคมี	การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า เคมีและแสง	น้ำ	แสงแดด	ไม่มี
ทางชีวภาพ	กระบวนการทางชีวภาพที่ใช้แสง	น้ำและสาหร่าย บางชนิด	แสงแดด	ไม่มี
ทางชีวภาพ	การย่อยสลายของ แบคทีเรียที่ไม่ใช้ O ₂	วัสดุชีวภาพต่างๆ	ความร้อนที่ อุณหภูมิสูง	อาจจะมีบ้าง
ทางชีวภาพ	การบ่ม หมักของจุลชีพต่าง ๆ	วัสดุชีวภาพต่างๆ	ความร้อนที่ อุณหภูมิสูง	อาจจะมีบ้าง

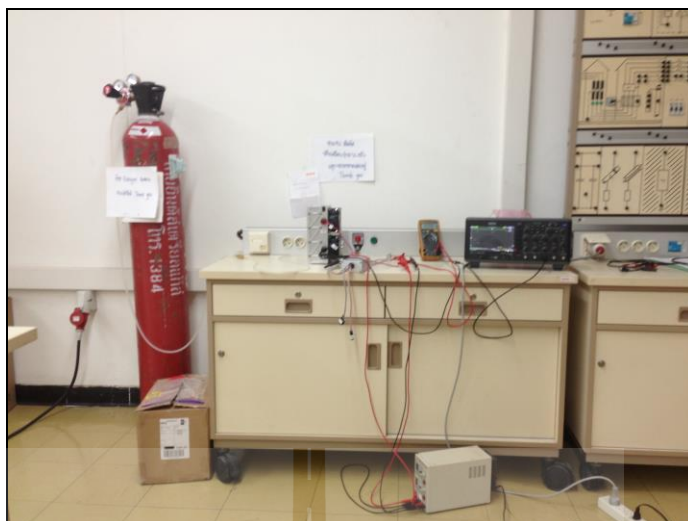
จากตารางที่ 6.7 แสดงกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สำคัญ โดยจากข้อมูลจากตารางข้างต้นทำให้ทราบได้ว่า การแยกก๊าซไฮโดรเจนสามารถทำได้หลายวิธี และสามารถนำไปสู่การพัฒนาเพื่อลดต้นทุนที่สูงของค่าก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ที่จะนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในอนาคตต่อไป

6.3 การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 500 W

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบเซลล์ เชื้อเพลิงเรียบร้อยแล้ว จากนั้นตรวจสอบการเชื่อมต่อให้ได้ตามระบบที่ถูกต้อง แสดงได้ดังรูปที่ 6.2 และ 6.3 ตรวจสอบเซลล์เชื้อเพลิงวางถูกด้านแล้ว แหล่งจ่ายไฟให้ความต่างศักย์ 12 - 15 V ความดันของก๊าซไฮโดรเจนที่เข้าสู่ระบบมีค่าระหว่าง 0.4-0.55 Bar เชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า (ที่ใช้กำลังไฟฟ้าไม่เกิน 500 W) เข้ากับระบบเซลล์เชื้อเพลิง บริเวณ “Load-” และ “Load+” ผ่านก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบ และแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ ควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงก่อนเปิดสวิตช์ เปิด-ปิด ตรวจสอบดูอีกครั้งให้แน่ใจก่อนว่า ทุกอย่างที่เชื่อมต่อจากวาล์วระบายก๊าซอยู่ในบริเวณที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย



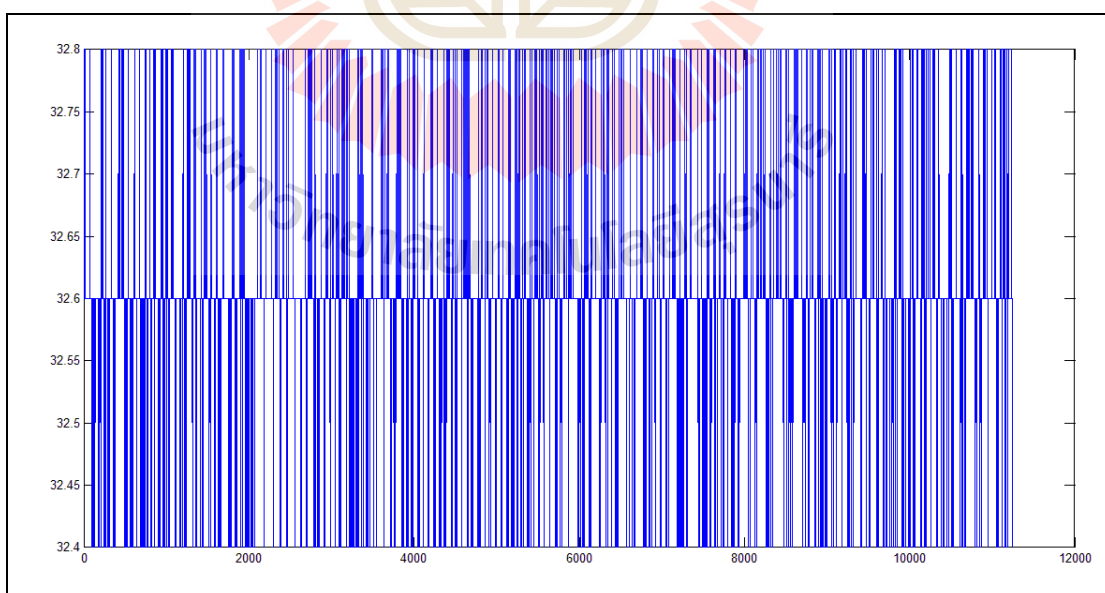
รูปที่ 6.2 การเชื่อมต่อและติดตั้งอุปกรณ์ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะไร้โหลด



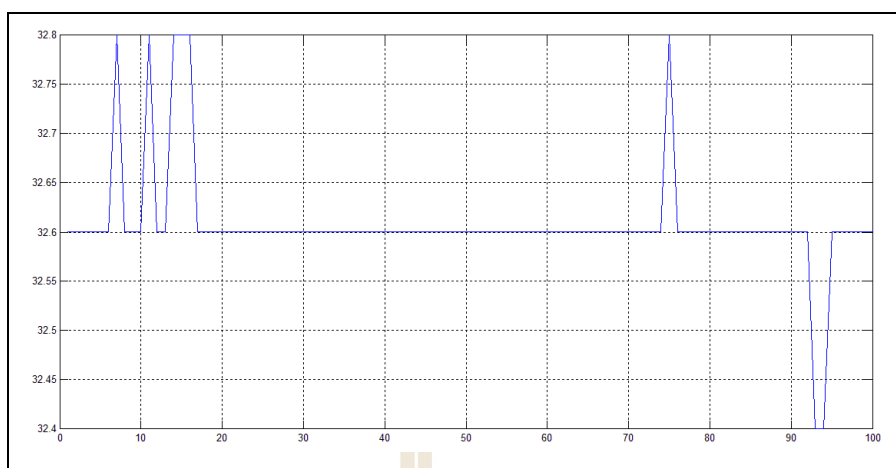
รูปที่ 6.4 ทดสอบที่สภาวะไร้โหลด

6.3.2 ผลการทดสอบที่สภาวะไร้โหลด

จากการทดสอบสามารถวัดแรงดันได้ 32.6 V และได้กราฟสัญญาณดังรูปที่ 6.5 และ 6.6 ส่วนการวัดกระแสเราไม่สามารถวัดได้เนื่องจากกระแสสูงเกินกว่า 10 A เครื่องมือที่ใช้วัดในห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าจึงไม่สามารถวัดได้ในสภาวะไร้โหลดนี้



รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบที่สภาวะไร้โหลด PEMFC 500 W



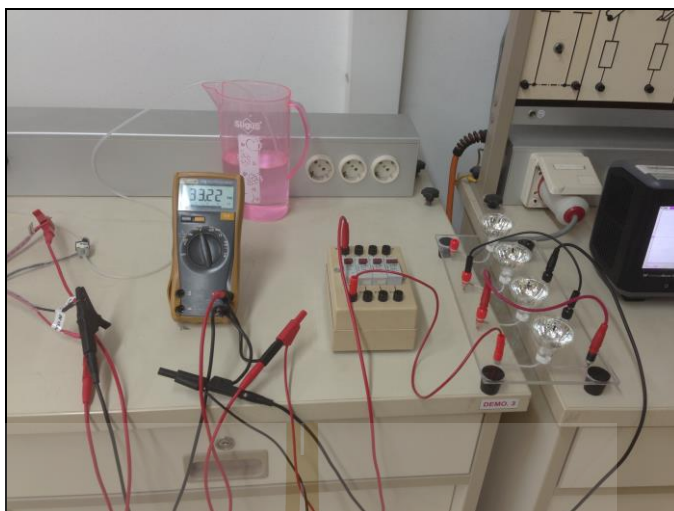
รูปที่ 6.6 สัญญาณแรงดันจากเครื่องออกซิลโลสโคปที่สภาวะไร้โหลด PEMFC 500 W

6.3.3 ทดสอบที่สภาวะรับโหลด

การทดสอบจะทำการเดินเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงและทดสอบกับโหลด การทดสอบที่สภาวะรับโหลดนี้จะใช้หลอดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V, 50 W เพราะเป็นโหลดทางไฟฟ้าอย่างง่ายและหาได้ทั่วไป โดยจะคำนึงถึงค่ากระแส แรงดัน และค่ากำลังไฟที่เครื่องสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยอ้างอิงจากตัวเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงจากคู่มือการใช้งานดังตารางแสดงคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 5 ซึ่งการทดสอบที่สภาวะรับโหลดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.7 และ รูปที่ 6.8



รูปที่ 6.7 ทดสอบที่สภาวะรับโหลด

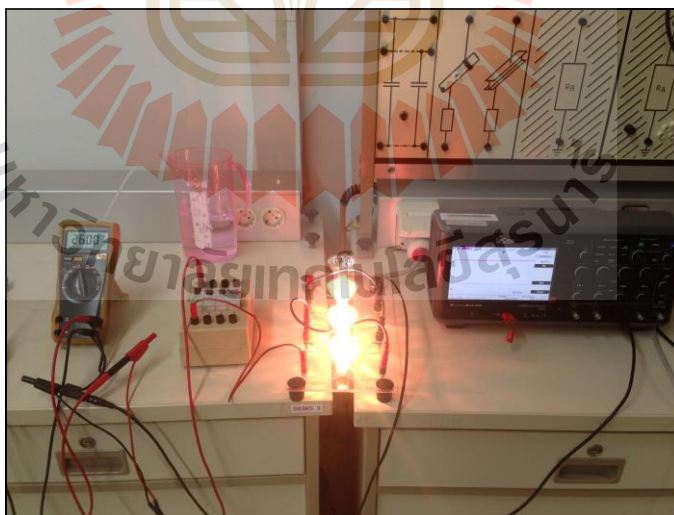


รูปที่ 6.8 โหลดหลอดไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ

6.3.4 ผลการทดสอบที่สภาวะรับโหลด

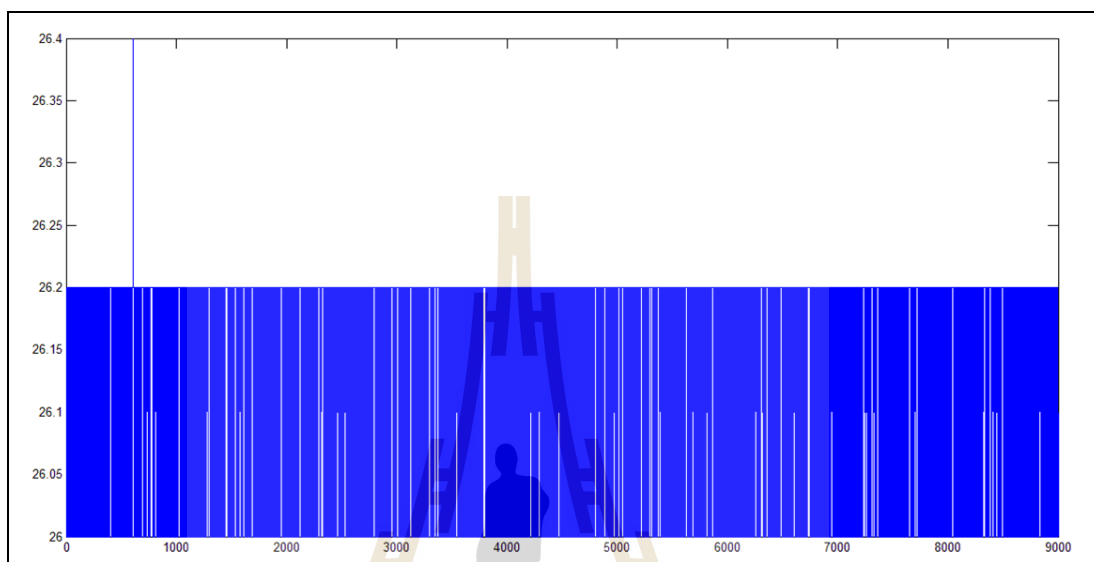
6.3.4.1 ผลทดสอบหลอดไฟ 3 หลอด

โดยการต่ออนุกรม 3 หลอดละ 12 V ,50 W แสดงได้ดังรูปที่ 6.9

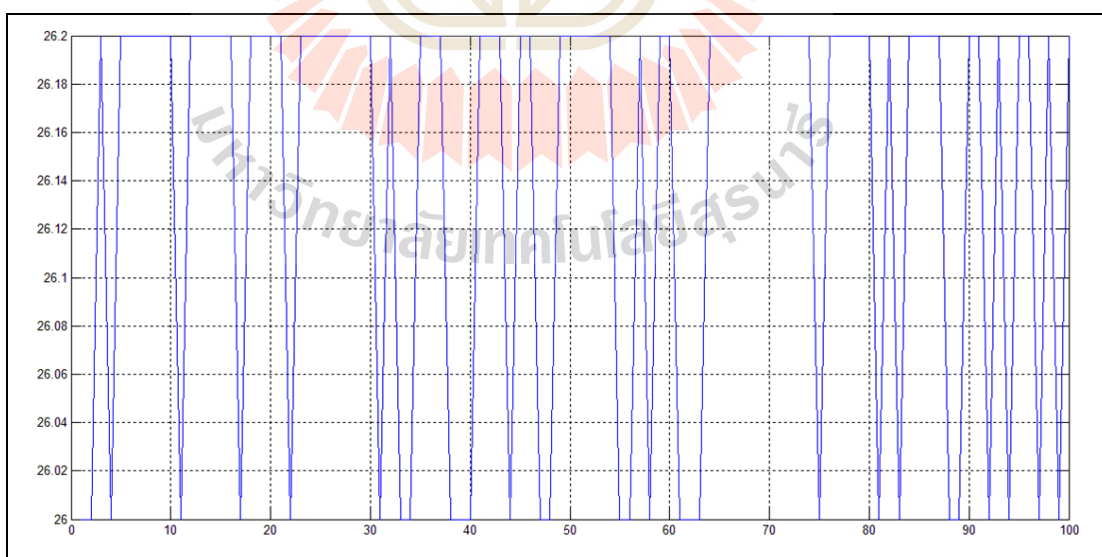


รูปที่ 6.9 การทดสอบหลอดไฟ 3 หลอด

ผลที่ได้จากการทดสอบปรากฏว่า สามารถวัดแรงดันได้ที่ 26.24 V และวัดกระแสได้ 3.561 A ส่วนกราฟที่ได้จากการวัดสัญญาณแรงดันจากเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ได้ดังรูปที่ 6.10 และ 6.11



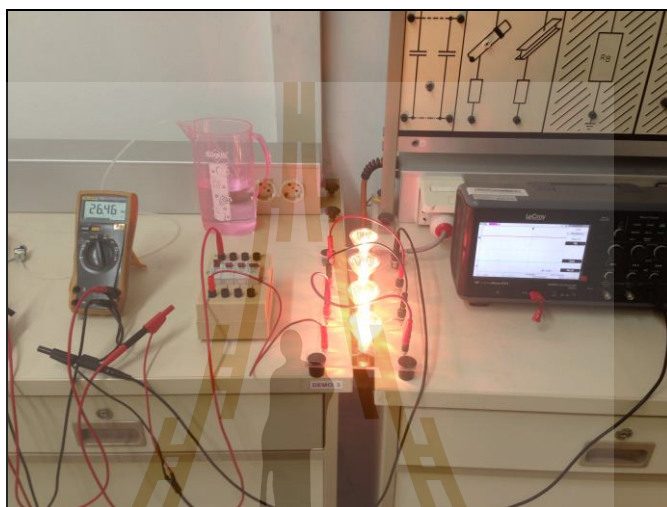
รูปที่ 6.10 ผลทดสอบสัญญาณค่าแรงดันจากโหลดหลอดไฟ 3 หลอด PEMFC 500 W



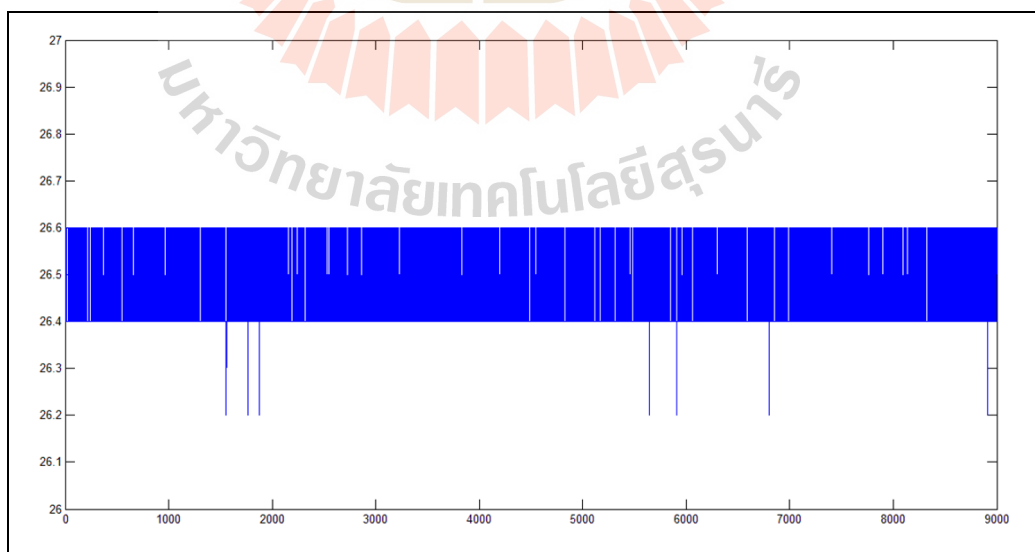
รูปที่ 6.11 ค่าแรงดันสัญญาณจากออสซิลโลสโคปโหลดหลอดไฟ 3 หลอด PEMFC 500 W

6.3.4.2 ผลทดสอบหลอดไฟ 4 หลอด

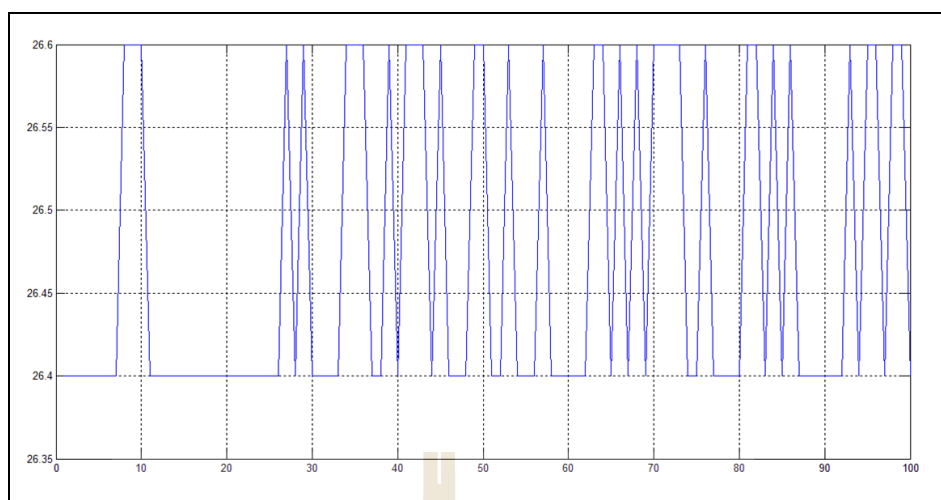
โดยการต่ออนุกรม 4 หลอด หลอดละ 12 V , 50 W แสดงได้ดังรูปที่ 6.11 ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบปรากฏว่า สามารถวัดแรงดันได้ที่ 26.46 V และวัดกระแสไม่ได้ เนื่องจากกระแสเกินพิกัดที่แอมป์มิเตอร์จะวัดได้ ในส่วนของกราฟที่ได้จากการวัดสัญญาณแรงดันจากเครื่องออสซิลโลสโคป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.12 และ 6.13



รูปที่ 6.12 ทดสอบหลอดหลอดไฟ 4 หลอด



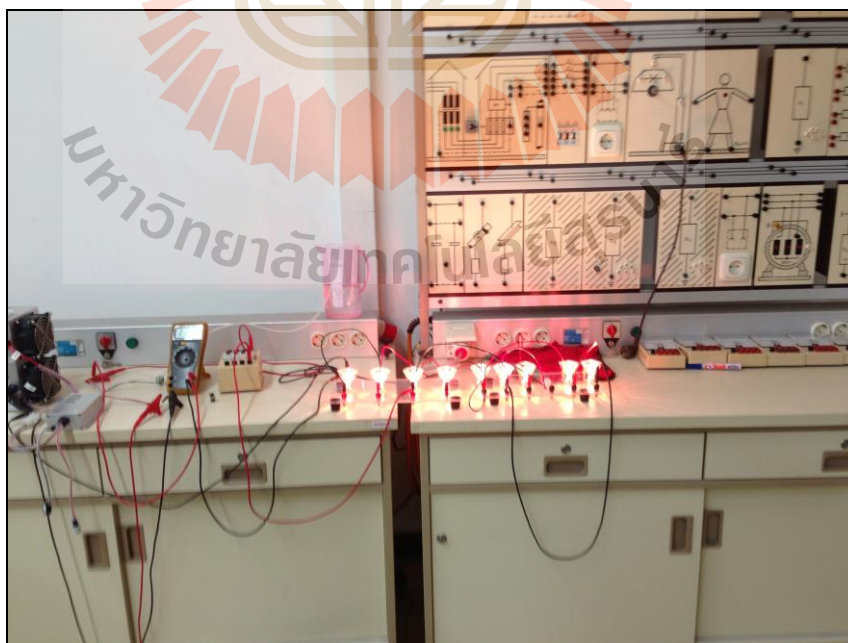
รูปที่ 6.13 ผลการทดสอบหลอดหลอดไฟ 4 หลอด PEMFC 500 W



รูปที่ 6.14 ผลการทดสอบโหลดหลอดไฟ 4 หลอดจากออสซิลโลสโคป PEMFC 500 W

6.3.4.3 ผลทดสอบหลอดไฟ 9 หลอด

ทำการทดสอบหลอดไฟ 9 หลอด ต่ออนุกรมเพื่อวัดค่าแรงดันที่ได้ แสดงดังรูปที่ 6.15 ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปค่าแรงดันเฉลี่ยแสดงได้ ดังตารางที่ 6.8

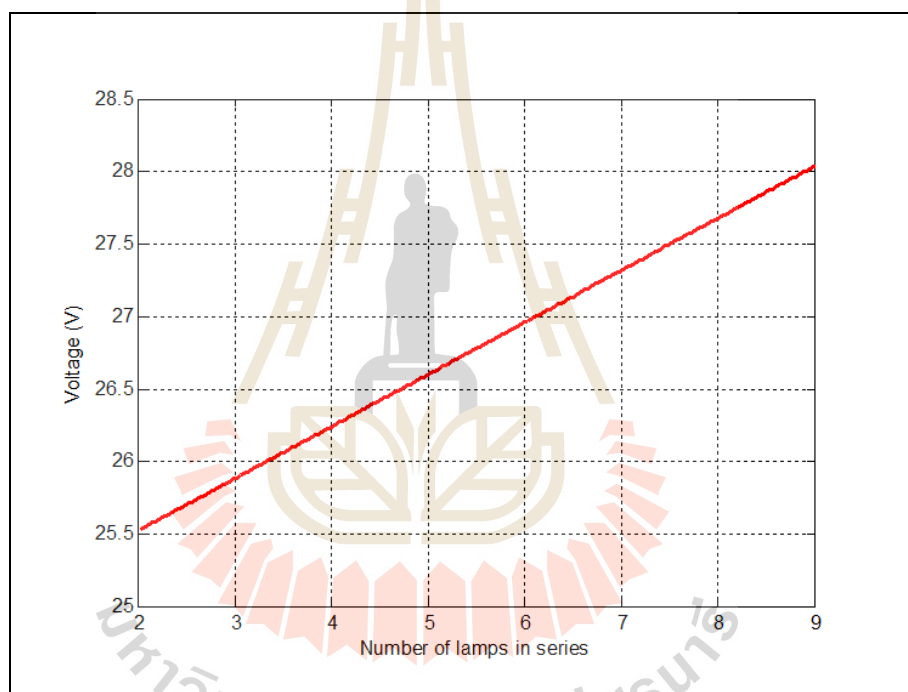


รูปที่ 6.15 ทดสอบโหลดหลอดไฟ 9 หลอด

ตารางที่ 6.8 ผลเฉลี่ยค่าแรงดันของการต่อหลอดไฟอนุกรม 9 หลอด

จำนวนหลอด	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ค่าแรงดัน (V)	-	25.29	25.94	26.34	26.75	27.01	27.32	27.71	27.87

จากตารางที่ 6.8 ค่าแรงดันที่วัดได้จากการต่อหลอดไฟอนุกรม 9 หลอด โดยจะทำการต่อเพิ่มขึ้นทีละหลอดและวัดค่าดังตาราง 6.8 จากผลค่าแรงดันเฉลี่ยดังกล่าวสามารถนำมาสร้างกราฟได้ดังรูปที่ 6.16

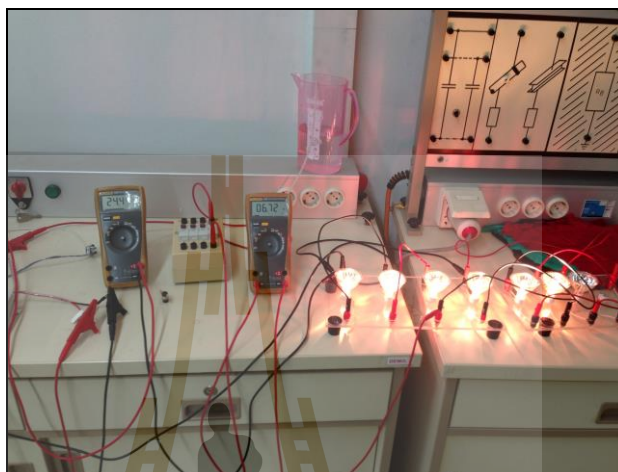


รูปที่ 6.16 ค่าแรงดันของการต่อหลอดไฟอนุกรมกัน 9 หลอด PEMFC 500 W

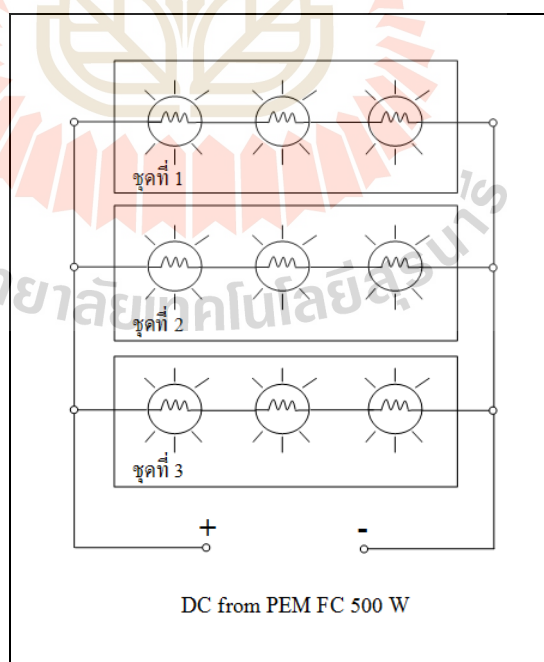
จากรูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันของการต่อหลอดไฟอนุกรมกัน 9 หลอด จะเห็นว่าเมื่อจำนวนหลอดไฟเพิ่มขึ้นค่าแรงดันก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

6.3.4.4 ผลทดสอบหลอดไฟ 9 หลอด แบบต่อวงจรแบบผสม

โดยการนำหลอดไฟ 3 หลอด มาต่ออนุกรม ทั้งหมด 3 ชุด จากนั้นทำการต่อขนานกัน เพื่อวัดค่ากระแสและแรงดัน เพื่อนำไปหาค่ากำลังงานไฟฟ้าต่อไป โดยการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.17 และค่าที่ทำการวัดได้นั้นแสดงได้ดังตารางที่ 6.9



รูปที่ 6.17 ทดสอบหลอดไฟ 9 หลอด แบบต่อแบบผสม

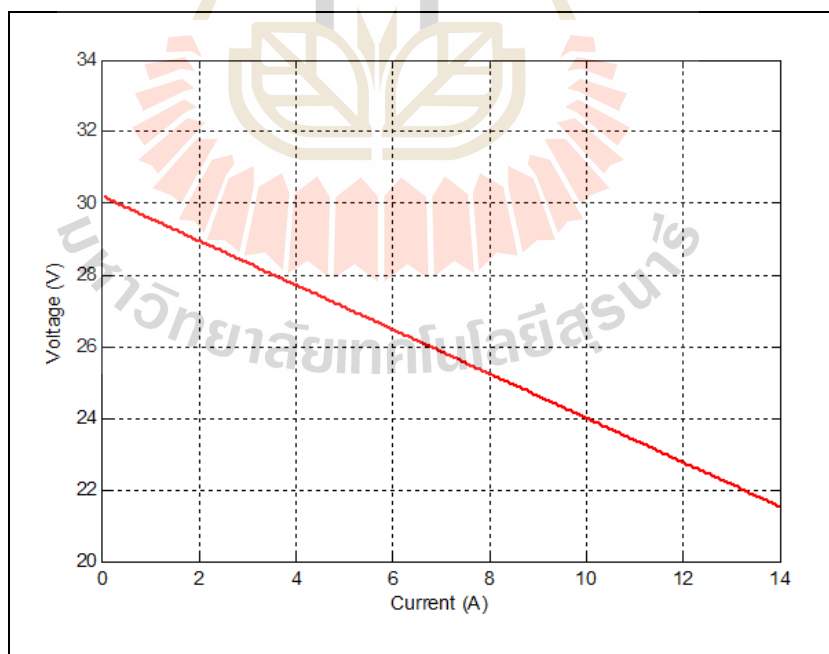


รูปที่ 6.18 การต่อวงจรเพื่อทำการทดสอบ

ตารางที่ 6.9 ค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้

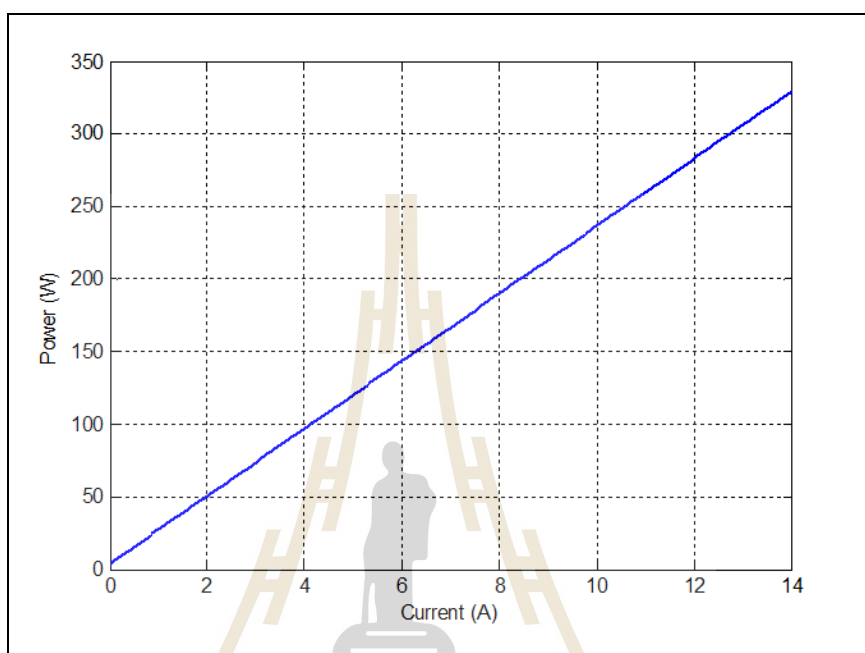
ชุดต่อแบบผสม	ที่สถานะไร้อะโหลด	ชุดที่ 1	ชุดที่ 1+2	ชุดที่ 1+2+3
ค่าแรงดัน (V)	32.4	26.25	24.02	23.516
ค่ากระแส (A)	0	3.563	6.83	13.20
ค่ากำลังไฟฟ้าจากการคำนวณ (W)	0	93.528	160.533	310.332

จากตารางที่ 6.9 แสดงผลทดสอบโหลดไฟ 9 โหลด แบบต่อวงจรแบบผสมโดยวัดทั้งค่ากระแสและแรงดัน ที่สถานะต่าง ๆ เนื่องจากค่ากระแสเกินพิกัดของเครื่องมือวัดทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้ จึงทำให้ค่ากำลังงานไฟฟ้าไม่สามารถคำนวณได้เช่นกัน เนื่องจากกระแสเกินพิกัดของแอมป์มิเตอร์ที่วัดได้ โดยขีดสเกลของแอมป์มิเตอร์ที่วัดได้คือ 10 A ดังนั้นจะได้อ่านค่าการวัดกระแสที่ได้นั้นจะเกิน 10 A โดยจะประมาณให้อยู่ที่ประมาณ 13.20 A (โดยอาศัยหลักการคำนวณจากรูปวงจร 6.18) ดังนั้นจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าของชุดที่ 1+2+3 คือ $23.516 \times 13.20 = 310.332 \text{ W}$ เพื่อทำไปวิเคราะห์และสร้างกราฟต่อไป โดยกราฟที่วาดได้ดังรูป 6.19 และ 6.20



รูปที่ 6.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของผลทดสอบ PEMFC 500 W

จากรูปที่ 6.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของผลทดสอบ
หลอดไฟ 9 หลอด แบบต่อวงจรแบบผสม จะเห็นได้ว่าเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันไฟฟ้า
ลดลง



รูปที่ 6.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและกำลังไฟฟ้า PEMFC 500 W

จากรูปที่ 6.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของผลทดสอบ
หลอดไฟ 9 หลอด แบบต่อวงจรแบบผสม จะเห็นได้ว่าเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้า
เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

6.3.5 วัดอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน

ทำการวัดและทดสอบอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนก่อนเข้าเครื่องเซลล์
เชื้อเพลิง โดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซ (flow meter) ต่อเข้ากับท่อทางซิลิโคนกับวาล์ว
ปรับความดันจากนั้นปล่อยก๊าซออกที่ความดัน 0.5 bar เพื่อวัดหาอัตราการไหลของก๊าซก่อนเข้า
เครื่องเซลล์เชื้อเพลิงแสดงได้ดังรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.21 วัดอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน

นำค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลมาเทียบกับค่าตามตารางที่กำหนดมาให้ (ตารางที่ 6.10) ของเครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซ (flow meter) ซึ่งแต่ละเครื่องจะมีความสามารถ และค่าการวัดไม่เท่ากัน โดยเครื่องที่ใช้นี้ สามารถวัดได้มากที่สุดที่ 3990 ml/min โดยที่ต้องเทียบ สเกลในการวัดค่า

ตารางที่ 6.10 อัตราการไหลที่ค่าต่างๆ

Scale Readings	Flow (ml/min)
65	3990
60	3584
55	3181
50	2788
45	2410

ตารางที่ 6.10 อัตราการไหลที่ค่าต่าง ๆ (ต่อ)

Scale Readings	Flow (ml/min)
40	2060
35	1731
30	1377
25	1029
20	692
15	419
10	207
5	115

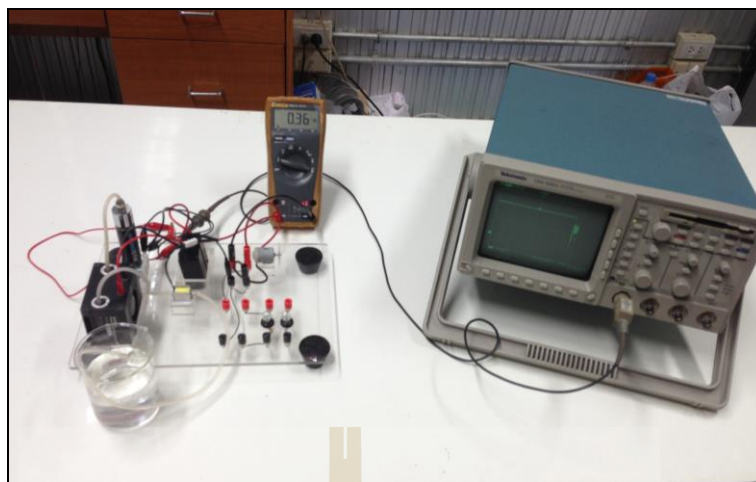
จากตารางที่ 6.10 คือค่าอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซ (flow meter) เมื่อทำการทดสอบปรากฏว่าที่ความดัน 0.29 bar จากการปล่อยก๊าซพบว่าลูกตุ้มในเครื่องวัดอัตราไหลของก๊าซได้ขึ้นไปสุดขีดที่สามารถได้ นั้นหมายความว่า ที่ 0.29 bar ได้ปริมาตร เท่ากับ 3.990 l/min เพราะฉะนั้นทำการปรับเทียบค่าจะได้ว่า ที่ความดัน 0.5 bar จะมีอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 6.879 l/min โดยทำการคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}
 \text{Hydrogen consumption rate} &= 0.116229 \times \text{ncell} \times \text{Amps} \times 60 \text{ second (หน่วย sccm)} \\
 &= 0.116229 \times 36 \times 24 \times 60 \\
 &= 6025.31136 \text{ cm}^3/\text{min} \\
 &= 6.025 \text{ l/min}
 \end{aligned}$$

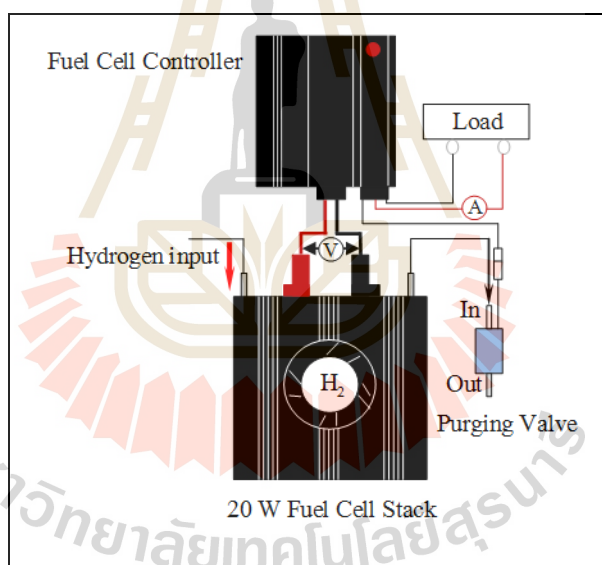
จากการคำนวณอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากการทดสอบ พบว่ามีค่าอัตราการไหลใกล้เคียงกับอัตราไหลที่กำหนดมาของเครื่อง PEMFC 500 W มีค่าความคลาดเคลื่อน 16.18%

6.4 การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 20 W

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 20 W แสดงได้ดังรูปที่ 6.22 และต่อเข้ากับท่อไฮโดรเจนขนาดเล็กที่มีหัวจ่ายอัตโนมัติควบคุมความดันแล้วตรวจสอบความถูกต้องแสดงได้ดังรูปที่ 6.23 และทำการติดตั้งโหลดเพื่อทำการทดลองต่อไปตามลำดับ



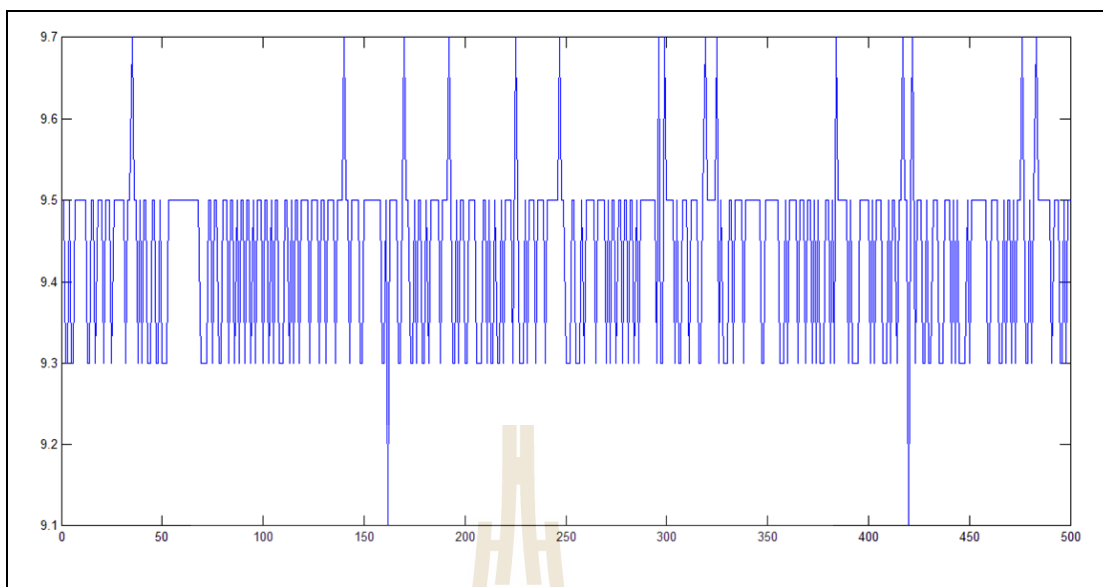
รูปที่ 6.22 การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 20 W



รูปที่ 6.23 ระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 20 W

6.4.1 ทดสอบและผลการทดสอบที่สถานะไร้โหลด

ที่สถานะไร้โหลดจะทำการวัดค่าทางไฟฟ้าต่าง ๆ เช่นเดียวกับเครื่องเซลล์เชื้อเพลิง 500 W และวัดสัญญาณแรงดันจากเครื่องออกสซิลโลสโคป โดยมีผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.24 ซึ่งจากสถานะไร้โหลดสามารถวัดค่าแรงดันได้เท่ากับ 9.4 V



รูปที่ 6.24 สัญญาณแรงดันผลจากการทดสอบที่สภาวะไร้โหลด PEMFC 20 W

6.4.2 ทดสอบและผลการทดสอบที่สภาวะรับโหลด

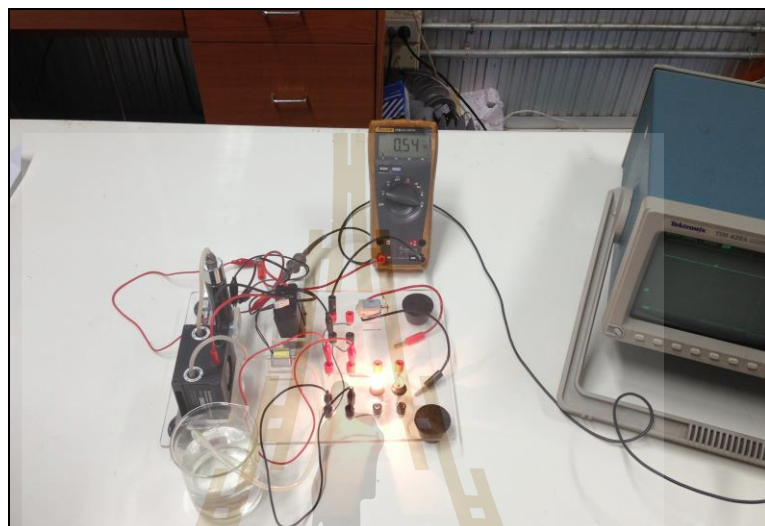
โดยโหลดที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ ได้แก่ หลอดไฟกระแสดรงขนาด 6.2 V และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสดรงขนาด 5 V โดยนำมาวางและต่ออุปกรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.25



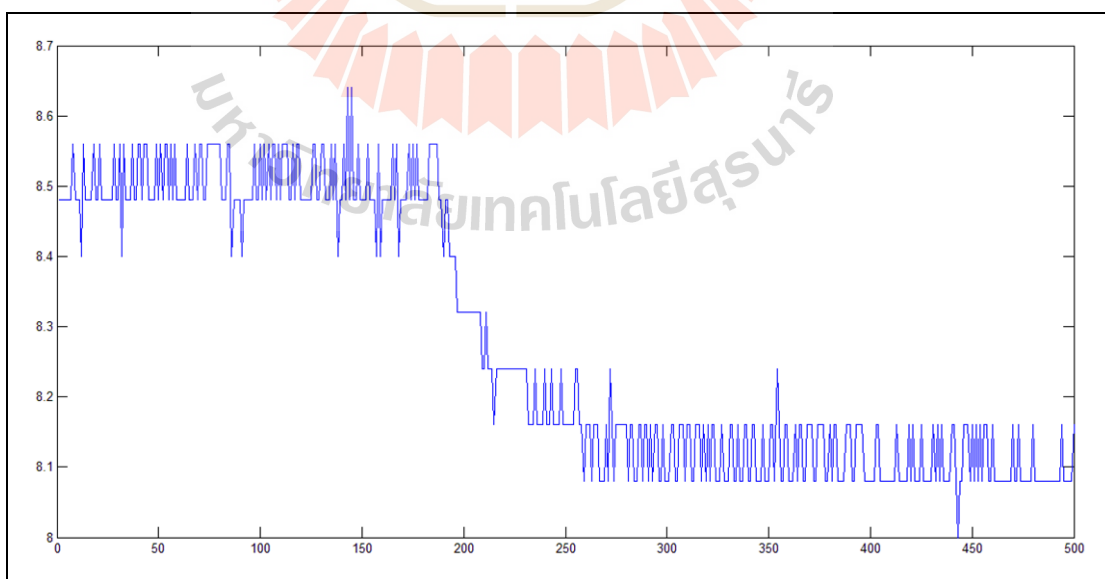
รูปที่ 6.25 การทดสอบที่สภาวะรับโหลด

6.4.2.1 ทดสอบโหลดโหลดไฟกระแสตรง 1 หลอด

ทำการทดสอบโหลดโหลดไฟกระแสตรง 1 หลอดแสดงได้ดังรูปที่ 6.26 กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงจากนั้นทำการวัดสัญญาณแรงดันและวัดกระแส ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังรูป 6.27 ซึ่งผลการทดสอบวัดค่ากระแสได้ 0.54 A และวัดค่าแรงดันได้ 8.3 V



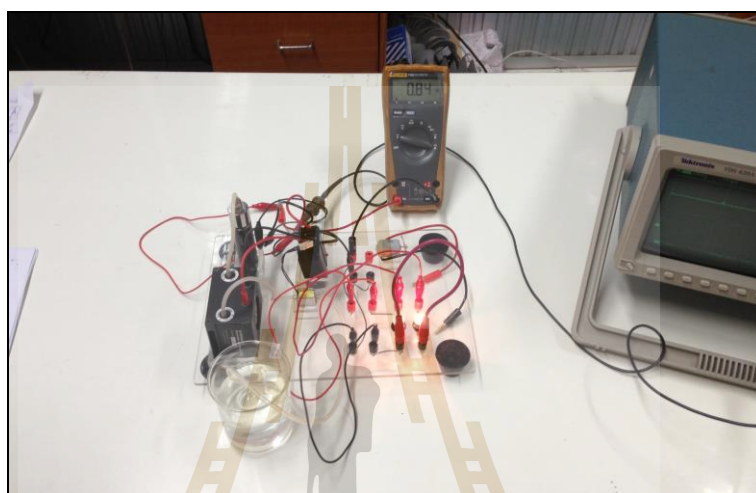
รูปที่ 6.26 ทดสอบโหลดโหลดไฟกระแสตรง 1 หลอด



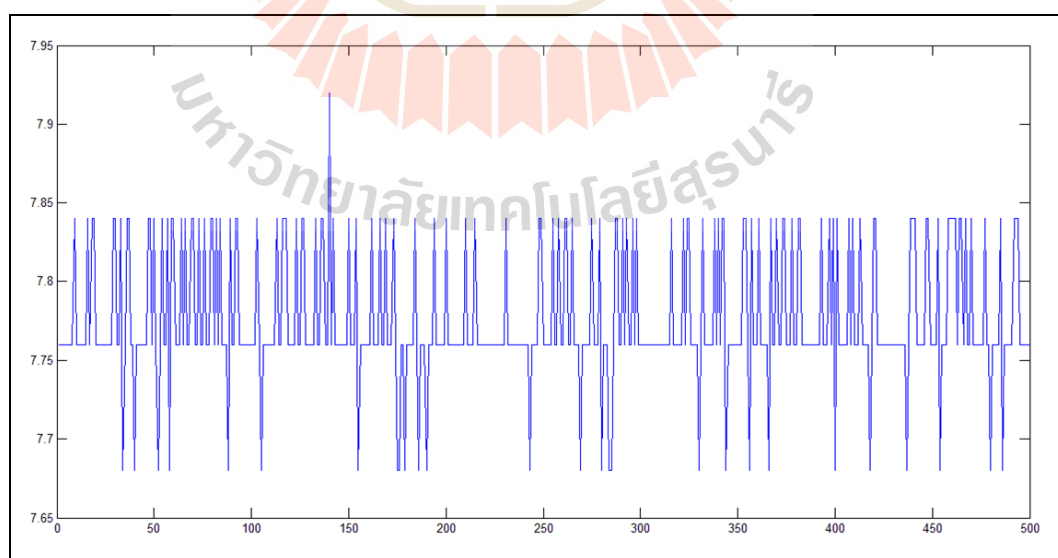
รูปที่ 6.27 สัญญาณแรงดันผลการทดสอบโหลดโหลดไฟกระแสตรง 1 หลอด PEMFC 20 W

6.4.2.2 ทดสอบโหลดหลอดไฟกระแสดตรง 2 หลอด

ทำการทดสอบโหลดหลอดไฟกระแสดตรง 2 หลอดต่อแบบขนานแสดงได้ดังรูปที่ 6.28 เพื่อให้แรงดันไม่เกิดพิกัดของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงที่ผลิตได้ กับระบบเซลล์เชื้อเพลิง จากนั้นทำการวัดสัญญาณแรงดันและวัดกระแส ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.29 ซึ่งจากการทดสอบสามารถวัดค่ากระแสได้ 0.84 A และค่าแรงดันวัดได้ 7.8 V



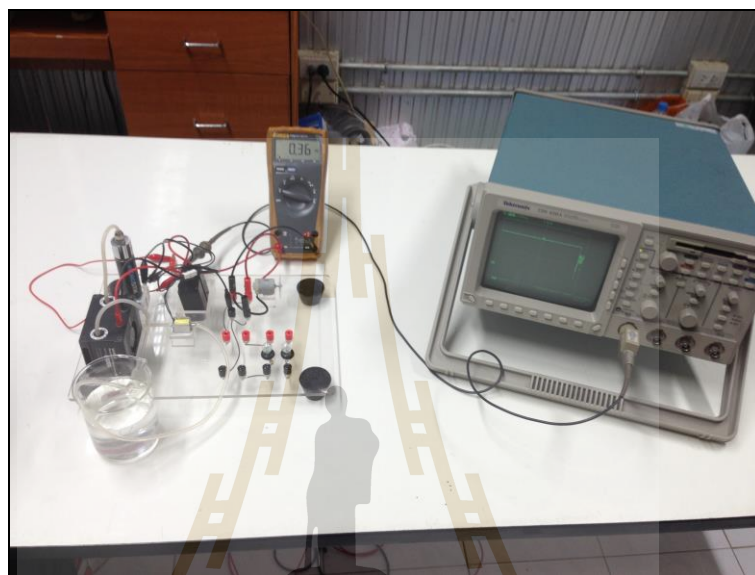
รูปที่ 6.28 ทดสอบโหลดหลอดไฟกระแสดตรง 2 หลอด



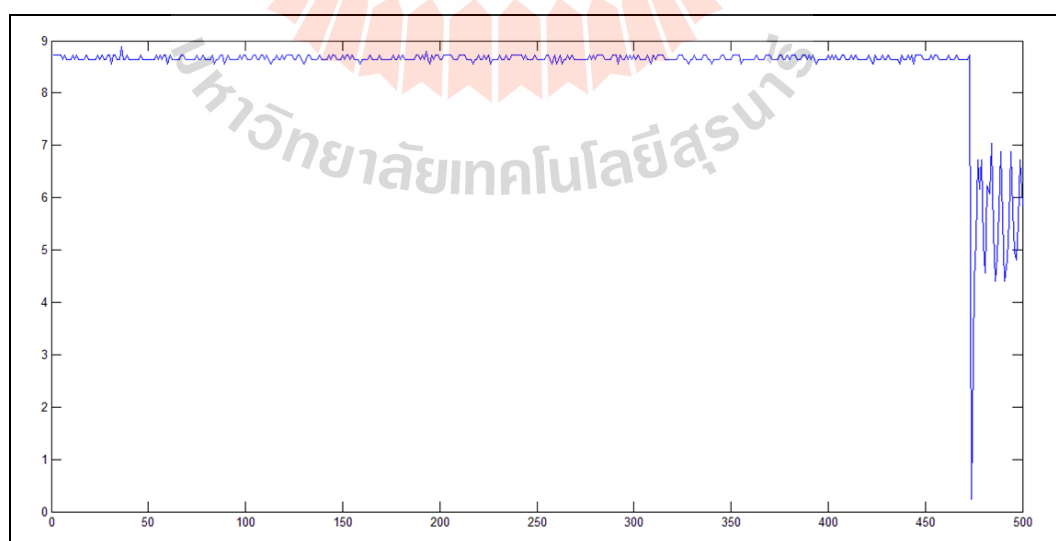
รูปที่ 6.29 สัญญาณแรงดันผลการทดสอบโหลดหลอดไฟกระแสดตรง 2 หลอด PEMFC 20 W

6.4.2.3 ทดสอบโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์ไฟฟ้ากระแสตรง

ทำการทดสอบโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์ไฟฟ้ากระแสตรง 5 V แสดงได้ดังรูปที่ 6.30 กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงจากนั้นทำการวัดสัญญาณแรงดันและวัดกระแส ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูป 6.31 ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถวัดค่ากระแสได้ 0.36 A และวัดค่าแรงดันได้ 8.7 V



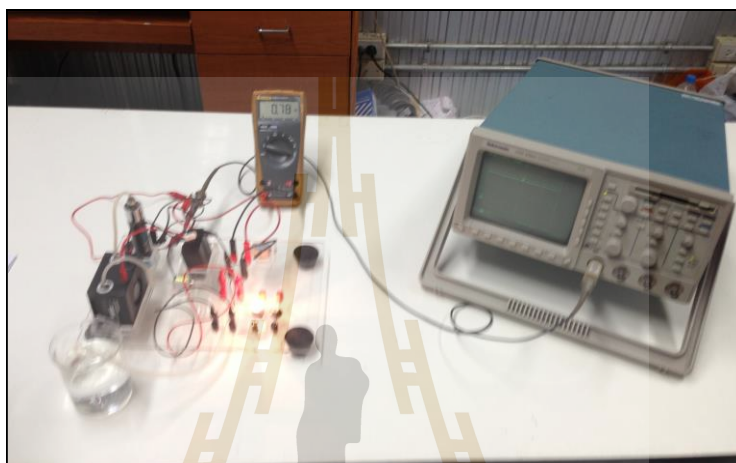
รูปที่ 6.30 ทดสอบโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์ไฟฟ้ากระแสตรง



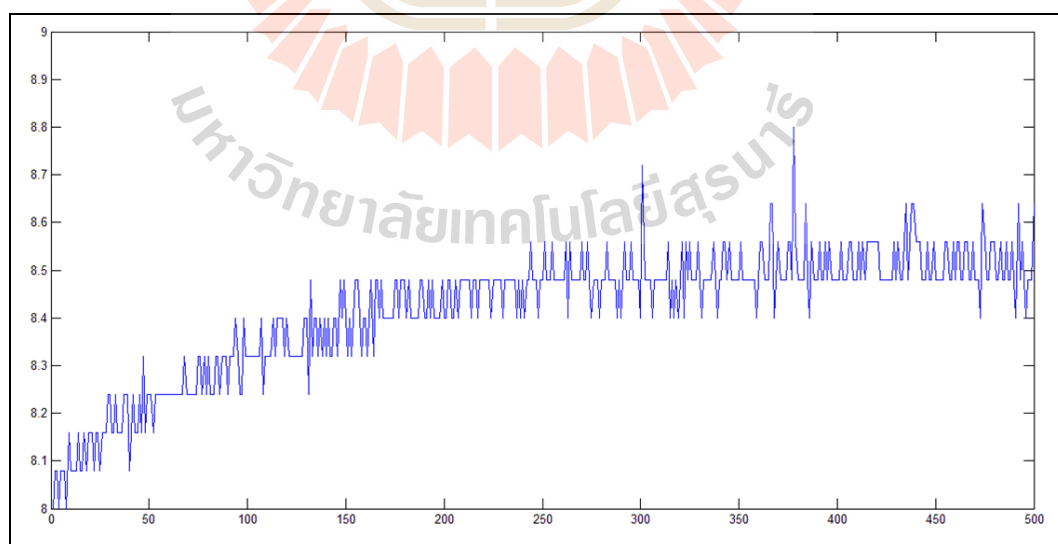
รูปที่ 6.31 สัญญาณแรงดันผลการทดสอบโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์ไฟฟ้ากระแสตรง PEMFC 20 W

6.4.2.4 ทดสอบโพลีเมอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและโหลดไฟ 1 หลอด

ทำการทดสอบ โพลีเมอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 5 V และทดสอบ
โหลดไฟ 1 หลอดต่อแบบขนานกันแสดงได้ดังรูปที่ 6.32 โดยต่อเข้ากับระบบเซลล์เชื้อเพลิงจากนั้น
ทำการวัดสัญญาณแรงดันและวัดกระแส ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.33 ซึ่งจากการ
ทดสอบสามารถวัดค่ากระแสได้ 0.78 A และค่าแรงดันวัดได้ 8.1 V



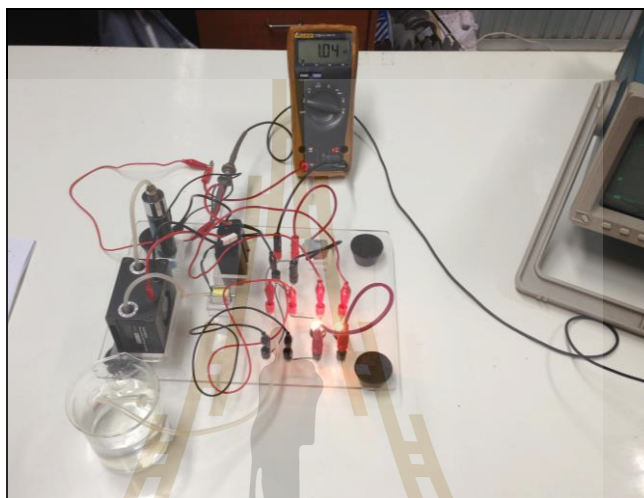
รูปที่ 6.32 ทดสอบโพลีเมอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและโหลดไฟ 1 หลอด



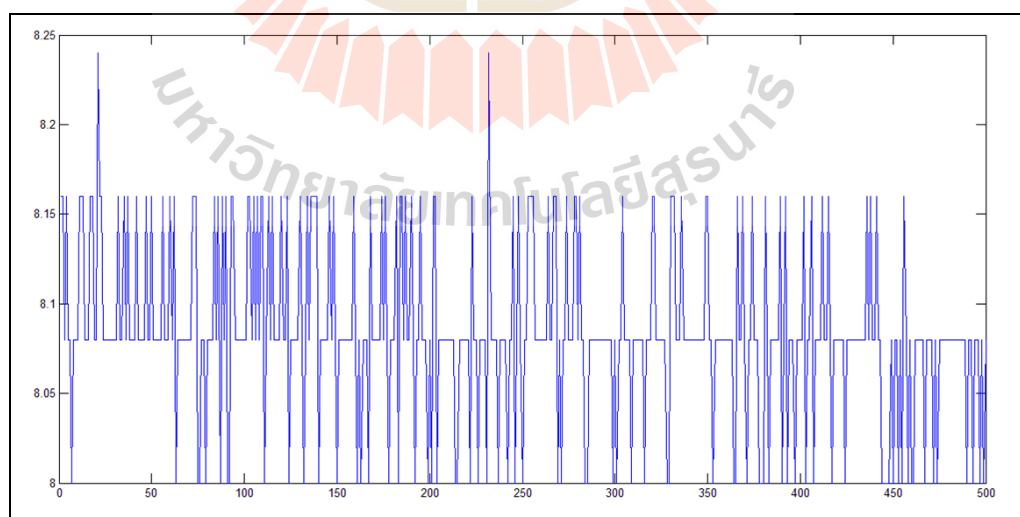
รูปที่ 6.33 ผลการทดสอบโพลีเมอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและโหลดไฟ 1 หลอด PEMFC 20 W

6.4.2.5 ทดสอบโพลีเมอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและโหลดไฟ 2 หลอด

ทำการทดสอบ โพลีเมอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 5 V และทดสอบ
โหลดไฟ 2 หลอดต่อแบบขนานกันแสดงได้ดังรูปที่ 6.34 โดยต่อเข้ากับระบบเซลล์เชื้อเพลิงจากนั้น
ทำการวัดสัญญาณแรงดันและวัดกระแส ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.35 ซึ่งจากผลการ
ทดสอบสามารถวัดกระแสได้ 1.04 A และวัดแรงดันได้ 8.0 V

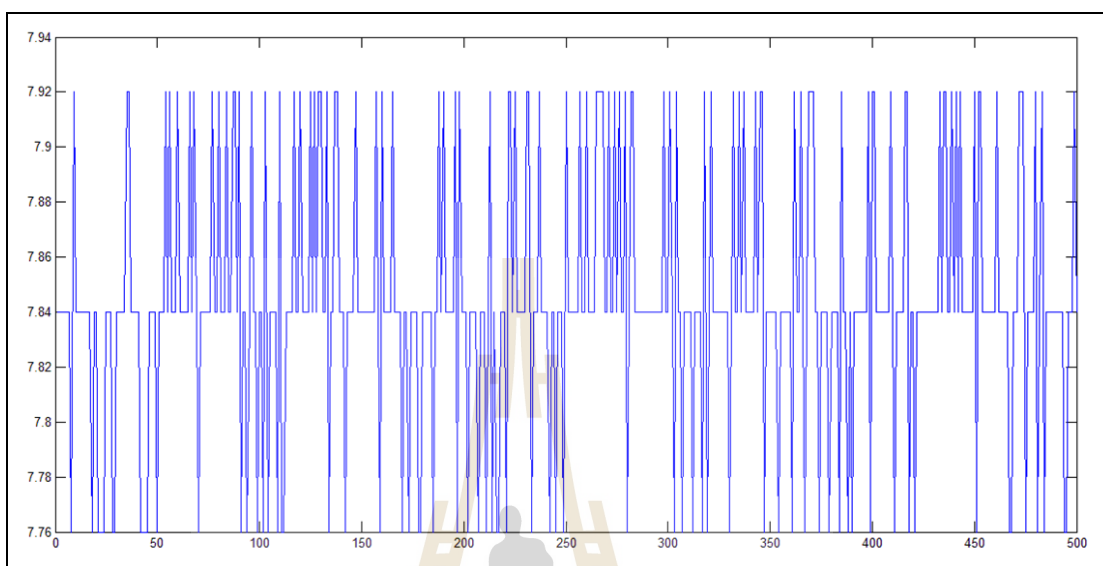


รูปที่ 6.34 ทดสอบโพลีเมอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและโหลดไฟ 2 หลอด PEMFC 20 W



รูปที่ 6.35 ผลการทดสอบโพลีเมอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและโหลดไฟ 2 หลอด PEMFC 20 W

และที่ระบบโหลดนี้สามารถวัดค่าแรงดันได้ในช่วงที่ปล่อยไอน้ำออกมาจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงดันตกลงในช่วงที่ทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 6.36



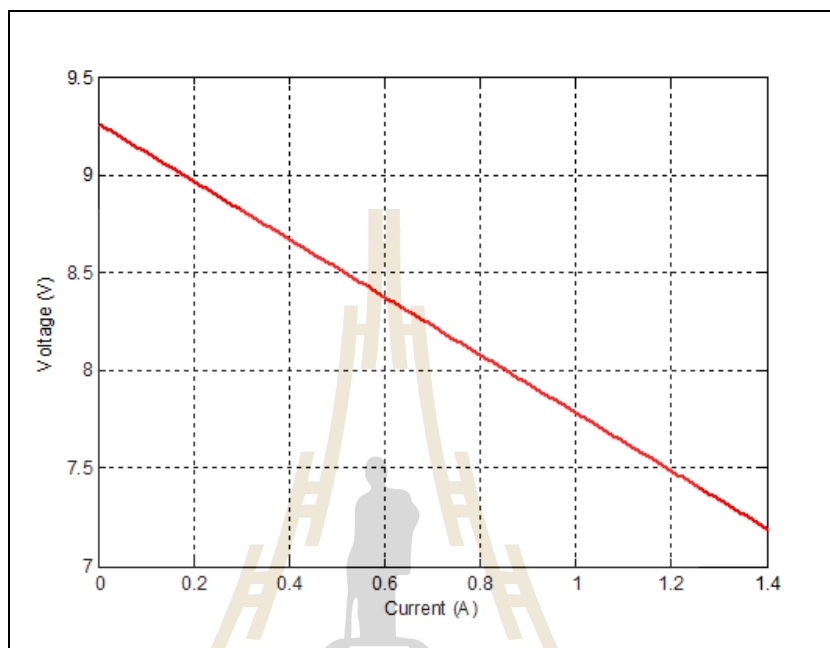
รูปที่ 6.36 สัญญาณค่าแรงดันที่ได้ในช่วงที่ปล่อยไอน้ำออกมา PEMFC 20 W

จากผลการทดสอบสามารถนำมาคำนวณหาค่ากำลังได้จากสมการ $P = VI$ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6.11 ค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้

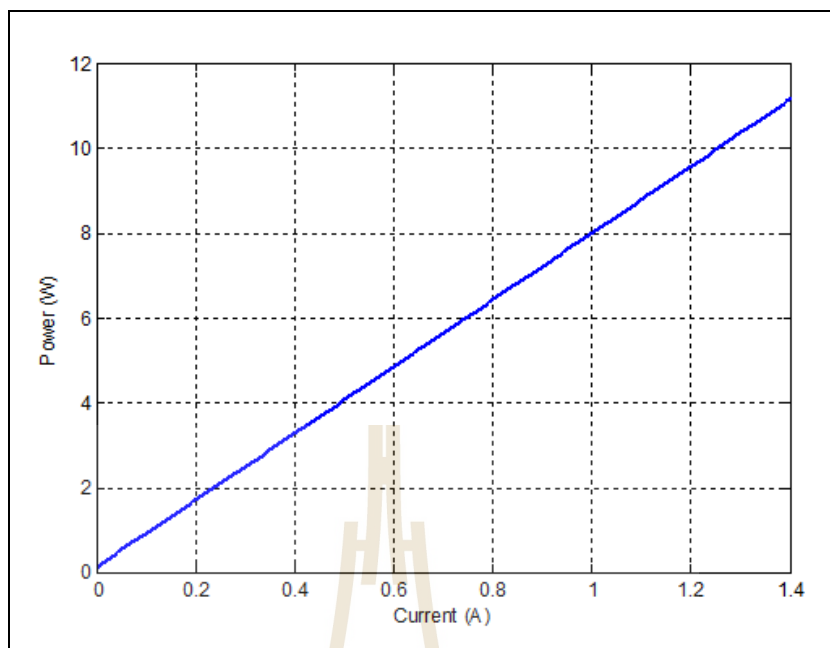
ชนิดของโหลดที่ทดสอบ	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กำลังไฟฟ้า (W)
สภาวะไร้โหลด	0	9.4	0
มอเตอร์กระแสตรง	0.36	8.7	3.132
หลอดไฟ 1 หลอด	0.54	8.3	4.482
มอเตอร์ + หลอดไฟ 1 หลอด	0.78	8.1	6.318
หลอดไฟ 2 หลอด	0.84	7.8	6.552
มอเตอร์ + หลอดไฟ 2 หลอด	1.04	8.0	8.32

จากตารางที่ 6.11 ค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดของโพลิตดสอบ PEMFC 20 W โดยวัดค่ากระแสและแรงดัน จึงนำไปสู่การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าต่อไป จากตารางนำค่าได้จากการวัดและการคำนวณมาสร้างกราฟได้ดังรูปที่ 6.37



รูปที่ 6.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของผลทดสอบ PEMFC 20 W

จากรูปที่ 6.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของผลทดสอบ เซลล์เชื้อเพลิงแบบ 20 W จะเห็นได้ว่าเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันลดลงตามลำดับ



รูปที่ 6.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและกำลังไฟฟ้า PEMFC 20 W

จากรูปที่ 6.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าของผลทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ 20 W จะเห็นได้ว่าเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามลำดับ

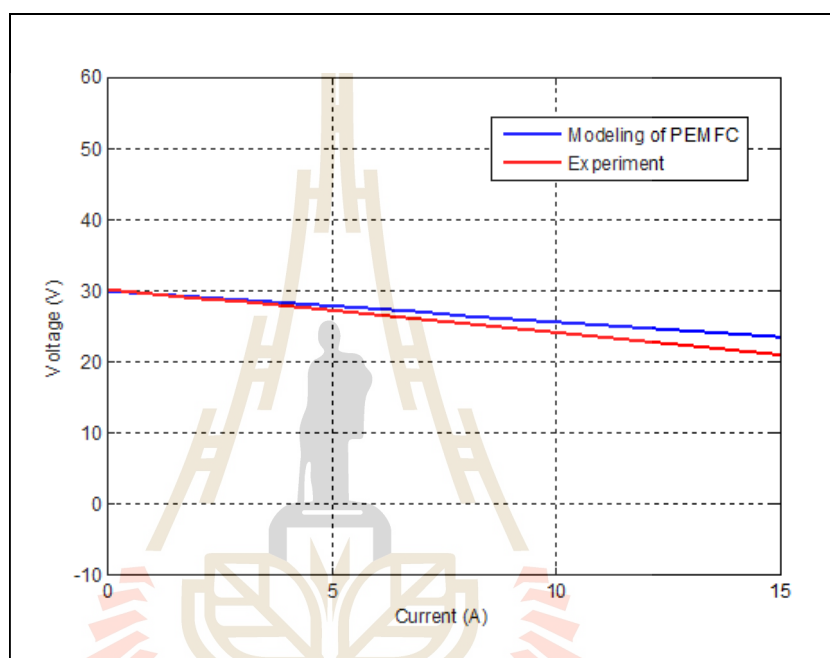
6.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

6.5.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 500 W

จากการทดสอบเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 500 W จะพบว่าที่สภาวะไร้โหลด แรงดันที่ผลิตได้มีค่าเท่า 32.6 V และเมื่อต่อโหลดหลอดไฟกระแสตรง ขนาด 12 V, 50 W โดยหลอดไฟในการทดสอบทั้งหมด 9 หลอด ผลปรากฏว่าเมื่อต่อหลอดไฟอนุกรมกันตั้งแต่ 1-9 หลอด โดยการต่อบวกเพิ่มไปเรื่อย ๆ จะทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ ดูได้จากรูปที่ 6.15 และหลอดไฟให้แสงสว่างไม่เต็มที่ และเมื่อทดสอบที่หลอดที่ 1 ทดสอบไม่ได้เนื่องจากหลอดไฟขาด สาเหตุจากกระแสและแรงดันเกินพิกัดที่หลอดไฟจะรับได้ ทำให้เห็นว่า PEMFC 500 W มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงซึ่งดูได้จากกราฟที่เมื่อค่ากระแสสูงขึ้น แรงดันลดลง ทำให้มีกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

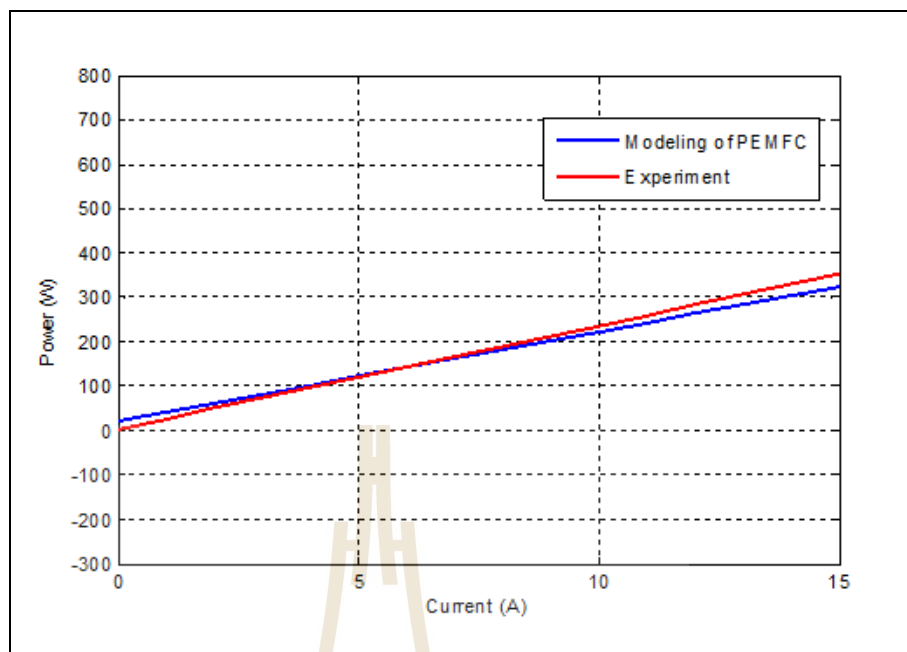
และที่ผลการทดสอบต่อโหลดไปอนุกรม 3 โหลด ทั้งหมด 3 ชุด นำมาต่อขนานกันทีละชุด ผลปรากฏว่าที่ค่ากระแสเพิ่มค่าแรงดันจะลดลง แต่ที่ค่ากระแสเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย แสดงได้ดังรูปที่ 6.39 และ 6.40

จากบทที่ 4 ได้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลอง ของระบบ PEMFC ซึ่งสามารถนำผลการจากจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังรูปที่ 6.39 และ 6.40 ดังนี้



รูปที่ 6.39 ค่ากระแสและแรงดันระหว่างผลทดสอบจริงกับแบบจำลอง PEMFC 500 W

จากรูปที่ 6.39 แสดงความสัมพันธ์ค่ากระแสและแรงดันระหว่างผลทดสอบจริงและแบบจำลอง PEMFC 500 W จะเห็นได้ค่าว่าทั้งสองค่ามีแนวโน้มค่าที่ใกล้เคียงกันโดยที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันลดลงเรื่อย ๆ ตามลำดับ



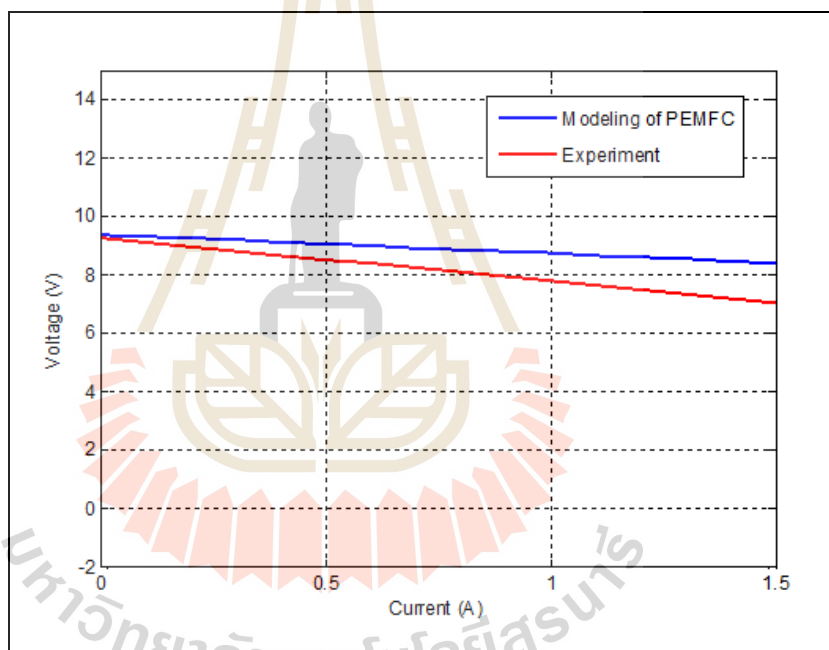
รูปที่ 6.40 ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าระหว่างผลทดสอบจริงกับแบบจำลอง PEMFC 500 W

จากรูปที่ 6.40 แสดงความสัมพันธ์ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าระหว่างผลทดสอบจริงและแบบจำลอง PEMFC 500 W จะเห็นได้ว่าทั้งสองค่ามีแนวโน้มค่าที่ใกล้เคียงกันโดยที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามลำดับ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน 5.40%

จากรูปที่ 6.39 และ 6.40 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นและผลที่ได้จากการทดสอบจริงมีผลที่ใกล้เคียงกันและไปในแนวโน้มทางเดียวกัน ค่าที่ทดสอบจริงที่มีค่าต่างไปจากการจำลองผลทาง MATLAB นั้น อาจมีความผิดพลาดจากการไหลเข้าของก๊าซไฮโดรเจนที่เครื่องเซลล์เชื้อเพลิงใช้ในการผลิตไฟฟ้าที่บางที่อาจไม่แน่นอนเนื่องจากไม่มีเครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน และกำลังความต้านทานสูญเสียต่าง ๆ และโหลดที่ใช้ทดสอบอาจมีความผิดพลาดซึ่งในการจำลองจะไม่คิดค่าเหล่านี้ แต่ผลที่ได้ก็สามารถยอมรับได้เพราะมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก

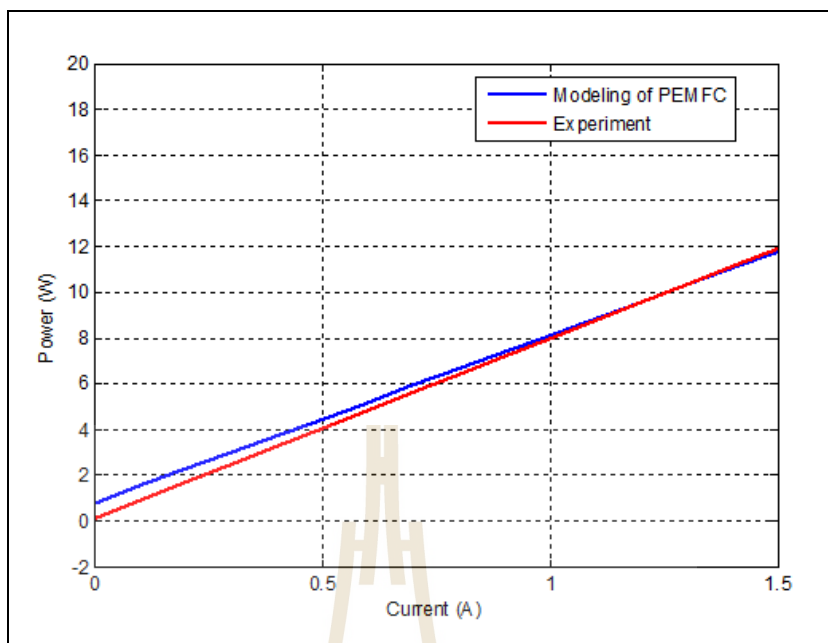
6.5.2 วิเคราะห์การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 20 W

จากการทดสอบเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 20 W จะพบว่าที่สภาวะรับโหลด แรงดันที่ผลิตได้มีค่าเท่า 9.4 V ค่ากระแส 0.23 A และทำการทดสอบที่สภาวะรับโหลด โดยใช้โหลดในการทดสอบคือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 5 V หลอดไฟกระแสตรง 6.2 V ทำการต่อและทดสอบเพื่อหาค่ากระแสและแรงดันผลที่ได้ปรากฏว่า ที่แรงดันลดลงจะทำให้กระแสสูงขึ้น และที่กระแสสูงขึ้นจะทำให้กำลังทางไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย ดูได้จากรูป 6.37 และ 6.38 และเช่นเดียวกันจากบทที่ 4 ได้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของระบบ PEMFC ซึ่งสามารถนำผลการจากจำลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริงแสดงได้ดังรูปที่ 6.41 และ 6.42 ดังนี้



รูปที่ 6.41 ค่ากระแสและแรงดันระหว่างผลทดสอบจริงกับแบบจำลอง PEMFC 20 W

จากรูปที่ 6.41 แสดงความสัมพันธ์ค่ากระแสและแรงดันระหว่างผลทดสอบจริงและแบบจำลอง PEMFC 20 W จะเห็นได้ค่าว่าทั้งสองค่ามีแนวโน้มค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่าแรงดันลดลงเรื่อย ๆ ตามลำดับ



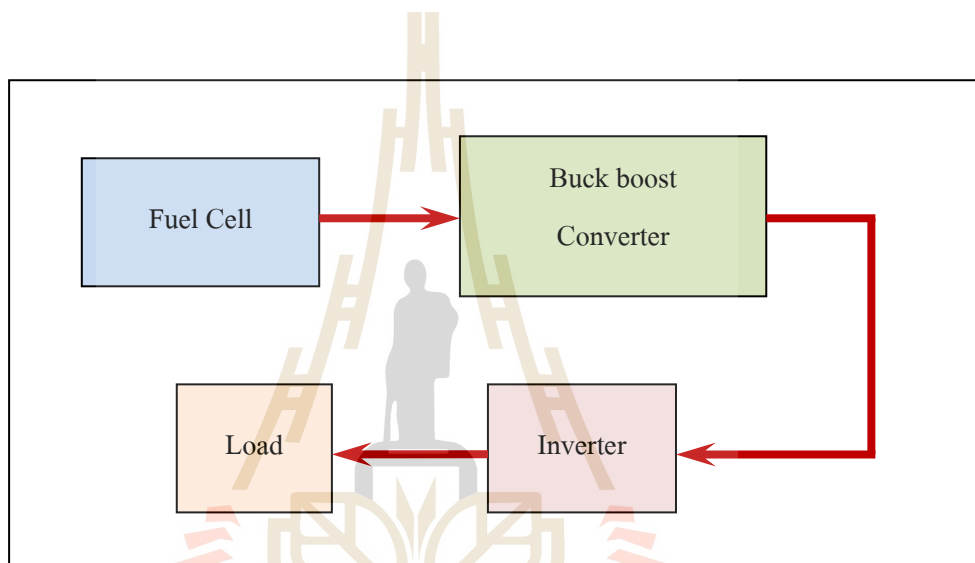
รูปที่ 6.42 ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าระหว่างผลทดสอบจริงกับแบบจำลอง PEMFC 20 W

จากรูปที่ 6.42 แสดงความสัมพันธ์ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าระหว่างผลทดสอบจริงและแบบจำลอง PEMFC 20 W จะเห็นได้ว่าทั้งสองค่ามีแนวโน้มค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามลำดับ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน 2.02%

จากรูปที่ 6.41 และ 6.42 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นและผลที่ได้จากการทดสอบจริงมีผลที่ใกล้เคียงกันและไปในแนวโน้มทางเดียวกัน ค่าที่ทดสอบจริงที่มีค่าต่างไปจากการจำลองผลทาง MATLAB นั้น อาจมีความผิดพลาดจากการไหลเข้าของก๊าซไฮโดรเจนที่เครื่องเซลล์เชื้อเพลิงใช้ในการผลิตไฟฟ้าที่บางที่อาจไม่แน่นอนเนื่องจากไม่มีเครื่องควบคุมอัตราการไหลของไฮโดรเจน และกำลังความต้านทานสูญเสียต่าง ๆ และโหลดที่ใช้ทดสอบอาจมีความผิดพลาดซึ่งในการจำลองจะไม่คิดค่าเหล่านี้ ซึ่งผลของ PEMFC 20 W มีค่าต่างจาก PEMFC 500 W ไม่ใกล้เคียงกันนั้นก็น่าจะมาจากโหลดที่ใช้ในการทดสอบ เพราะมีทั้งมอเตอร์และหลอดไฟซึ่งกำลังที่สูญเสียอาจมีมากกว่าโหลดที่ใช้ทดสอบของ PEMFC 500 W ก็อาจเป็นไปได้ โดยความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบจากค่าที่วัดได้และจำลองผลมีค่าเฉลี่ย 2.43% แต่ถึงอย่างไรก็ตามผลที่ได้ก็มีแนวโน้มของกราฟไปในทางเดียวกัน คือเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

6.6 การนำไปใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด

เซลล์เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกันนั้น แต่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กันตามบ้านและสำนักงานส่วนใหญ่ ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ซึ่งกระแสไฟฟ้าไหลทั้งสองทิศทางสลับกันเป็นวัฏจักร ถ้าต้องใช้ เซลล์เชื้อเพลิงกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ ไฟฟ้ากระแสตรงจะต้องถูกแปลงผันเป็นไฟฟ้า กระแสสลับโดยสามารถทำได้ดังรูปที่ 6.43 (Satonsawapak, M., Krapeedang, M. and Oonsivilai, A., 2010)



รูปที่ 6.43 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงประยุกต์ใช้ในครัวเรือน

จากรูปที่ 6.43 สามารถแสดงให้เห็นว่า จุดประสงค์ของตัวแปลงผันและปรับแต่ง กระแสไฟฟ้าเพื่อปรับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้เหมาะสมกระแสไฟฟ้าที่ เครื่องใช้ไฟฟ้าต้องการ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่นมอเตอร์ไฟฟ้าอย่างง่ายหรือระบบการใช้ กำลังไฟฟ้าที่ซับซ้อน ทั้งไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรงต้องมีการปรับแต่ง การปรับแต่ง กำลังไฟฟ้รวมถึงการควบคุมการไหลของกระแส (แอมแปร์) แรงดัน (โวลต์) ความถี่ และ คุณลักษณะอื่น ๆ ของกระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าต้องการ การแปลงผันและปรับแต่ง กระแสไฟฟ้าจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงเล็กน้อยประมาณ 2 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ โดยการ นำไปประยุกต์ใช้กับระบบแยกโดดนี้สามารถทำได้โดยง่าย คือ เมื่อเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงผลิต กระแสไฟฟ้าได้ไฟฟ้ากระแสตรงแล้ว จะนำไปต่อเข้ากับเครื่องแปลงแรงดันสูงก่อน ให้เป็นแรงดัน ต่ำก่อน (เนื่องจากแรงดันที่ได้จาก PEMFC มีค่าแรงดันที่สูงมาก) จากนั้นก็แปลงจากไฟฟ้า

กระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และนำไปใช้งานกับครัวเรือนได้ตามปกติ ซึ่งเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป และจากการศึกษาพบว่า เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 500 W สามารถใช้งานในครัวเรือนขนาดเล็กที่มีขนาดใช้กำลังไฟฟ้าไม่มาก ดังแสดงได้ดังตารางที่ 6.12

ตารางที่ 6.12 แสดงการใช้ไฟฟ้าของบ้าน 1 หลัง

(ข้อมูลคัดแปลงจาก <http://www.solar-thailand.com/TH/electrical-usage.asp>)

อุปกรณ์ เครื่องใช้ไฟฟ้า (W)	จำนวน	ระยะเวลาการใช้ ต่อวัน (ชม./วัน)	ระยะเวลาการใช้ ต่อสัปดาห์ (ชม./ สัปดาห์)	Unit/Week	Unit/Month
โทรทัศน์สี 14 นิ้ว 60 W	1 เครื่อง	7	49	2.94	12.6
หม้อหุงข้าว ไฟฟ้า ขนาด 1 ลิตร 400 W	1 ใบ	1	7	2.8	12
พัดลม 50 W	1 เครื่อง	8	56	2.8	12
หลอดไฟนีออน 36 W	4 หลอด	5	35	5.04	21.6
หลอดไฟ ตะเกียบ 11 W	4 หลอด	5	35	1.54	6.6
รวม		98	182	15.12	64.8

จากตารางที่ 6.12 แสดงการใช้ไฟฟ้าของบ้าน 1 หลัง จะเห็นได้ว่าที่เครื่องเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 500 W สามารถผลิตกระแสไฟฟ้ารองรับการใช้งานในบ้าน 1 ครัวเรือนได้เพียงพอสำหรับบ้านที่สมาชิกประมาณ 2-3 คน แต่ถ้าสมาชิกในครอบครัวมีจำนวนคนมากขึ้นและมีอุปกรณ์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เช่น เครื่องปรับอากาศ คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กและแบบตั้งโต๊ะ ตู้เย็น เครื่องซักผ้า เป็นต้น ก็สามารถเลือกใช้ขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในบ้านได้ เป็นแบบ 500 W จำนวน 2 เครื่อง หรือใช้ขนาดที่ผลิตได้ 1000 W, 2000 W และ 5000 W ก็ได้ตามลำดับตามความต้องการและความเหมาะสมกับการใช้งานปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าต่อไป

6.7 สรุป

ในบทที่ 6 ได้กล่าวถึงการทดสอบแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและวิเคราะห์ผลแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงทั้งแบบ 20 W และ 500 W โดยการทดสอบจะทดสอบที่สภาวะไร้โหลดและสภาวะรับภาระโหลด โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

คำนวณความคุ้มทุนซึ่งพบว่าไม่คุ้มทุน เนื่องจากต้นทุนเชื้อเพลิงมีราคาสูงกว่าราคาขายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในปัจจุบัน ถ้ากำหนดราคาต้นทุนเชื้อเพลิง 4 บาท และราคาขาย 8 บาท พบว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ที่พิกัดต่ำกว่า 500 W ไม่มีความคุ้มทุนในทางกลับกันหากพิจารณา ระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ที่พิกัดสูงกว่า 500 W ขึ้นไปจะมีระยะเวลากู้ทุนที่เร็วขึ้น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่นำเสนอเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในระบบแบบแยกโดด ได้ค่ากระแสแรงดันและกำลังไฟฟ้าตามพิกัดของอุปกรณ์ที่ทดสอบ ทั้งนี้ดำเนินการทดสอบระบบ PEMFC พิกัด 20 W ซึ่งจ่ายโหลดสูงสุด 8.3 W และระบบ PEMFC พิกัด 500 W จ่ายโหลดสูงสุดในการทดสอบ 310 W จากผลการจำลองเปรียบเทียบกับทดสอบ พบว่ามีความสอดคล้องกัน สำหรับ PEMFC พิกัด 20 W มีค่าความคลาดเคลื่อน 2.02% ส่วน PEMFC พิกัด 500 W มีค่าความคลาดเคลื่อน 5.40% รวมถึงการเปรียบเทียบอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนของ PEMFC พิกัด 500 W มีค่าความคลาดเคลื่อน 16.18% ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ที่พิกัด ต่าง ๆ สามารถนำไปจำลองเพื่อใช้งานกับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดดที่สภาวะต่าง ๆ ได้

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 500 W สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ค่าสูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับครัวเรือนต่อไปในอนาคตได้ ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็ก PEMFC 20 W ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็ก PEMFC 20 W สามารถนำไปใช้แทนถ่านไฟฉายหรือใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันได้ และสิ่งที่ทั้งสองระบบปล่อยออกมาสู่ชั้นบรรยากาศนั้นคือไอน้ำ จึงทำให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมถือได้ว่าเป็นพลังงานทางเลือกอีกทางหนึ่งที่สะอาดและปลอดภัย รวมไปถึงสามารถนำไปเป็นต้นแบบในการพัฒนาหรือศึกษาต่อไปได้ และจากการคำนวณจุดคุ้มทุนพบว่าไม่คุ้มทุนเนื่องจากต้นทุนเชื้อเพลิงของก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์มีราคาสูงมาก จึงต้องทำไปพัฒนาลดราคาต้นทุนกันต่อไป และจากลักษณะเฉพาะข้างต้นดังกล่าวข้างต้น ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) เป็นที่นิยมสูงสุดในการนำมาใช้เป็นต้นกำลังในภาคคมนาคมขนส่ง เนื่องจากมีขนาดกะทัดรัด และให้พลังงานสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก เริ่มทำงานได้รวดเร็ว สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำและอายุการใช้งานยาวนานกว่าเซลล์

เชื้อเพลิงประเภทอื่น ๆ หากแต่มีข้อเสียคือ ต้นทุนการผลิตสูงและต้องการเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีลักษณะที่เหมือนกัน หากจะแตกต่างกันก็ตรงขนาดกำลังไฟฟ้าที่ทำงานได้เท่านั้น



บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด เพื่อประเมินว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีวิธีการและการทำงานอย่างไรมีผลการทดสอบเป็นเช่นไร การดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวนี้ได้สำเร็จคล่องตามหลักวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินการวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมเป็นข้อสรุปได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ได้นำเสนอความสำคัญและที่มาของปัญหา โดยกล่าวถึงที่ปัญหาทางด้านพลังงานในปัจจุบันอีกทั้งพลังงานบางอย่างมีปัญหาผลกระทบต่อด้านสภาวะแวดล้อม เซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นพลังงานทางเลือกอีกทางหนึ่งที่จะช่วยให้ลดปัญหาการขาดแคลนพลังงาน จึงจำเป็นต้องมีการจำลองทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงขึ้น เพื่อศึกษาวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดดขึ้น ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลาย ๆ ท่านได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องระบบเซลล์เชื้อเพลิงและการจำลองผลของระบบเซลล์เชื้อเพลิงดังที่เสนอไว้ในบทที่ 2

บทที่ 3 เป็นการนำเสนอทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิง โดยกล่าวถึงชนิด โครงสร้างส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง รวมไปถึงคุณสมบัติประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด และระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงว่าทำงานอย่างไร รวมไปถึงสมการที่เกี่ยวข้องกับระบบเซลล์เชื้อเพลิง และบทที่ 4 เป็นการจำลองผลทางพลวัตของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ SOFC และจากการศึกษาการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ SOFC ด้วยการจำลองสถานการณ์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และยังได้นำไปฝึกสอนด้วยระบบโครงข่ายประสาทแบบ Generalized Regression Network (GRNN) ผลจากการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับพบว่ามีผลใกล้เคียงกัน ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน 1.45% อีกทั้งยังนำไปสู่การวิเคราะห์เพื่อศึกษาผลที่ได้จากการจำลองผลของระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC โดยที่ผลจากการจำลองทาง MATLAB Simulink เป็นที่น่าพอใจและจึงนำผลไปสู่การทดสอบเปรียบเทียบค่าจากการทดลองในบทต่อไป

บทที่ 5 ได้กล่าวถึงได้กล่าวถึงการเตรียมอุปกรณ์สำหรับการติดตั้งเพื่อทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 20 W และ 500 W รวมไปถึงคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองขนาดว่ามีการใช้งานและมีข้อแตกต่างกันอย่างไร เมื่อศึกษาอุปกรณ์การใช้งานอย่างเรียบร้อยแล้ว จะนำไปสู่ขั้นตอนการทดสอบต่อไป

บทที่ 6 ได้กล่าวถึงการทดสอบแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและวิเคราะห์ผลแบบจำลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงทั้งแบบ 20 W และ 500 W การคำนวณความคุ้มค่าซึ่งพบว่าไม่คุ้มค่า เนื่องจากต้นทุนเชื้อเพลิงมีราคาสูงกว่าราคาขายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในปัจจุบัน ถ้ากำหนดราคาต้นทุนเชื้อเพลิง 4 บาท และราคาขาย 8 บาท พบว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ที่พิกัดต่ำกว่า 500 W ไม่มีความคุ้มค่าในทางกลับกันหากพิจารณา ระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ที่พิกัดสูงกว่า 500 W ขึ้นไปจะมีระยะเวลาคืนทุนที่เร็วขึ้น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดด การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่นำเสนอเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในระบบแบบแยกโดด ได้ค่ากระแสแรงดันและกำลังไฟฟ้าตามพิกัดของอุปกรณ์ที่ทดสอบ ทั้งนี้ดำเนินการทดสอบระบบ PEMFC พิกัด 20 W ซึ่งจ่ายโหลดสูงสุด 8.3 W และระบบ PEMFC พิกัด 500 W จ่ายโหลดสูงสุดในการทดสอบ 310 W จากผลการจำลองเปรียบเทียบกับทดสอบ พบว่ามีความสอดคล้องกัน สำหรับ PEMFC พิกัด 20 W มีค่าความคลาดเคลื่อน 2.02% ส่วน PEMFC พิกัด 500 W มีค่าความคลาดเคลื่อน 5.40% รวมถึงการเปรียบเทียบอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนของ PEMFC พิกัด 500 W มีค่าความคลาดเคลื่อน 16.18% ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ที่พิกัดต่าง ๆ สามารถนำไปจำลองเพื่อใช้งานกับระบบไฟฟ้าแบบแยกโดดที่สภาวะต่าง ๆ ได้ โดยระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 500 W สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ค่าสูง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในครัวเรือนชนบทที่ห่างไกลได้ ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็ก PEMFC 20 W สามารถนำไปใช้แทนถ่านไฟฉายหรือใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันใช้แรงดันต่ำได้

จากการดำเนินการทดสอบงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

- 1) ในการวัดค่ากระแสที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะรับภาระโหลดควรใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่พิกัดของเครื่องวัดสูงกว่า 10 A เพราะเนื่องจากเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 500 W มีค่ากระแสที่สูงมาก
- 2) ในการหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเซลล์เชื้อเพลิง เครื่องทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ควรมีระบบควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (Mass flow controller) ที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซที่เข้าสู่ระบบ รวมทั้งระบบระบายก๊าซในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า
- 3) เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการใช้งานควรโหลดอิเล็กทรอนิกส์ในการทดสอบ

4) ระบบความปลอดภัยในระหว่างการทดสอบควรทดสอบในสถานที่ที่อากาศถ่ายเทได้สะดวกและควรตรวจสอบว่ามีก๊าซไฮโดรเจนรั่วหรือไม่

5) หลังจากการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงแล้วควรนำไปเก็บในถุงพลาสติกที่สามารถปิดปากได้ ใช้ผ้าเล็กหรือกระดาษชำระชุบน้ำบิดพอหมาด ๆ ไล่ไว้ภายในถุง เพื่อรักษาความชื้นให้กับเซลล์เชื้อเพลิงและควรเก็บที่อุณหภูมิห้อง

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

1) สามารถนำระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC 500 W เป็นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าประยุกต์ใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในครัวเรือนได้ เหมาะสำหรับในเขตชนบทที่ห่างไกลความเจริญ โดยการแปลงสัญญาณแรงดันกระแสตรงเป็นกระแสสลับ

2) ในการใช้งานทุกครั้งควรศึกษาข้อมูลและคู่มือการใช้งานอย่างละเอียดเพื่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพการใช้งานที่ได้คุณภาพที่สูงขึ้น และหลังการใช้ของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงควรที่จะจัดเก็บและรักษาเครื่องให้เป็นอย่างดีและควรเก็บให้อยู่ไกลจากความชื้นเพื่อยืดอายุการใช้งานของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิง

3) พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงจะเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ที่สามารถนำไปใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด ในอนาคตควรมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและเผยแพร่กันอย่างแพร่หลายเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดและผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างพอเพียงต่อไป

รายการอ้างอิง

- Colleen Spiegel. (2008). PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB.
- Correa, J.M., Farret, F.A., Popov, V.A., and Simoes, M.G. (2005). Sensitivity analysis of the modeling parameters used in Simulation of proton exchange membrane fuel cells. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**. 20(1): 211-218
- Contino, R., Iannone, F., Leva, S. and Zaninelli, D. (2006). Hybrid Photovoltaic-Fuel Cell System controller sizing and dynamic performance evaluation. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**.
- Horizon Fuel Cell Technologies. (2011). H-20 Fuel Cell Stack [User Manual].
- Horizon Fuel Cell Technologies. (2012). H-500 Fuel Cell Stack [User Manual].
- Jemi, S., Hissel, D., Marie, C.P. and Kauffmann, J.M. (2008). A New Modeling Approach of Embedded Fuel-Cell Power Generators Based on Artificial Neural Network. **IEEE Transactions on Industrial Electronic**. 55(1): 437-447.
- Jemi, S., Hissel, D., Pera, M.C. and Kauffmann, J.M. (2003). On-board fuel cell power supply modeling on the basis of neural network methodology. **Journal of Power Sources**. 124: 479-486.
- Kalhoff, N. (2007). Integration of Fuel Cell Applications into the Power Supply for Information and Telecommunications Technology. **IEEE Telecommunications Energy Conference**. 444-448.
- Lee, J.M. and Cho, B.H. (2009). A Dynamic Model of a PEM Fuel Cell System. **IEEE Power Electronic Conference and Exposition**. 720-724.
- Leva, S. and Zaninelli, D. (2009). Hybrid renewable energy-fuel cell system: Design and performance evaluation. **Electric Power Systems Research**. 79: 316-324.
- Membrane Fuel Cell. **IEEE Trans on energy conversation**. 25(2): 474-483.
- Oonsivilai, A. and M.E. El-Hawary. (1999). Power System Dynamic Load Modeling using Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. **IEEE. CCECE'99**.

- Oonsivilai, A. and M.E. El-Hawary. (1999). Wavelet Neural Network Based Short Term Load Forecasting of Electric Power System Commercial Load. **IEEE. CCECE'99**.
- Ou, S. and Achenie, Luke E.K. (2005). A hybrid neural network model for PEM fuel cells. **Journal of Power Sources**. 140: 319-330.
- Outeiro, M.T., Chibante, R., Carvalho, A.S., and de Almeida, A.T. (2009). A new parameter extraction method for accurate modeling of PEM fuel cells. **International Journal of Energy Research**. 33: 978-988.
- Outeiro, M.T., and Carvalho, A.S. (2011). Matlab/Simulink as design tool of PEM Fuel Cells as electrical generation systems. **European Fuel Cell Forum**.
- Padulles, J., Ault, G.W. and McDonald, J.R. (2000). An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation. **Journal of Power Sources**. 86: 495-500.
- Puranik, S.V., Keyhani, A. and Khorrami, F. (2010). Neural Network Modeling of Proton Exchange Saengrung, A., Abtahi, A. and Zilouchian, A. (2007). Neural network model for a commercial PEM fuel cell system. **Journal of Power Sources**. 172(2): 749-759.
- Puranik, S.V., Keyhani, A. and Khorrami, F. (2010). Neural Network Modeling of Proton Exchange Saengrung, A., Abtahi, A. and Zilouchian, A. (2007). Neural network model for a commercial PEM fuel cell system. **Journal of Power Sources**. 172(2): 749-759.
- Satonsawapak, M., Krapeedang, M., Oonsivilai, R., and Oonsivilai, A. (2010). Gas flow rate identification in biomass power plants by response surface method.. **World Academy of Science, Engineering, and Technology**. Paris, France, 27-29 October, pp: 261-264.
- Youssef, M.E., Moataz, H.K. and Khairia, E. AL-NAdi. (2010). Neural network Modeling for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). **Advances in Information Sciences and Service Sciences**. 2:
- Zhu, Y. and Tomsovic, K. (2002). Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells. **Electric Power Systems Research**. 62: 1-11.



ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการจำลองระบบ PEMFC ทาง MATLAB
ที่ PEMFC 500 W

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตัวอย่างการจำลองระบบ PEMFC ทาง MATLAB
ที่ PEMFC 500 W

```

clear all
clc

Ifc = 25; %[0.2 5 10 15 20 25]
T = 303;
P_H2 = 1;
P_O2 = 0.2095;
A = 64;
d1 = -0.948;
d3 = 7.6e-5;
d4 = -1.93e-4;
C = 3;
C_H2 = 0.0000001; %%%%%%%%%
w = 23;
R_C = 0.0003;
lamda = 178e-6;
B = 0.016;
Jmax = 469;
n = 36;

%===== Enernt =====
Enernt = 1.229 - 0.85e-3*(T - 298.15) + 4.31e-5*T*(log(P_H2)+0.5*log(P_O2));

%===== Vact =====

```

ตัวอย่างการจำลองระบบ PEMFC ทาง MATLAB
ที่ PEMFC 500 W (ต่อ)

```

C_O2 = P_O2/(5.08e6*exp(-498/T));
d2 = 0.00286 + 0.0002*log(A) + (4.3e-5)*log(C_H2);
Vact = -(d1 + d2*T + d3*T*log(C_O2) + d4*T*log(Ifc));
%===== V_Ohmic =====
p_M = 181.6*(1 + 0.03*(Ifc/A) + 0.062*(T/303)^2*(Ifc/A)^2.5)/(w - 0.634 -
3*(Ifc/A)*exp(4.18*(T-303)/T));
R_M = p_M*lamda/A;
V_Ohmic = Ifc*(R_M + R_C);
%===== V_con =====
J = Ifc/A;
V_con = -B*log(1-J/Jmax);
%===== V_FC =====
V_FC = Enernt - Vact - V_Ohmic - V_con;
%===== Vout =====
Vs = n*V_FC
P = Ifc*Vs

```



ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Nim-on, N., and Oonsivilai, A. (2012) GRNN Application In Power Systems Simulation For Integrated SOFC Plant Dynamic Model.. World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 72, pp. 1259-1264.



GRNN Application in Power Systems Simulation for Integrated SOFC Plant Dynamic Model

N. Nim-on, and A. Oonsivilai

Abstract—In this paper, the application of GRNN in modeling of SOFC fuel cells were studied. The parameters are of interested as voltage and power value and the current changes are investigated. In addition, the comparison between GRNN neural network application and conventional method was made. The error value showed the superlative results.

Keywords—SOFC, GRNN, Fuel cells.

I. INTRODUCTION

POPULATION increase and economic growth lead to energy consumption. While the limited reserve energy is reduced, the fuel cells price increase. In addition, fossil fuel combustion leads to change in environment that affects lives and environmental system. Thus, seeking for replace energy for fossil fuel is necessary because it does not affect environment including fuel cell energy could be the best way for energy replacement due to its clean and friendly to environmental.

A. Fuel Cells

A fuel cell is a device that converts the chemical energy from a fuel into electricity through a chemical reaction with oxygen or another oxidizing agent. Hydrogen is the most common fuel, but hydrocarbons such as natural gas and alcohols like methanol are sometimes used. Fuel cells are different from batteries in that they require a constant source of fuel and oxygen to run, but they can produce electricity continually for as long as these inputs are supplied.

Welsh Physicist William Grove developed the first crude fuel cells in 1839. The first commercial use of fuel cells was in NASA space programs to generate power for probes, satellites and space capsules. Since then, fuel cells have been used in many other applications. Fuel cells are used for primary and backup power for commercial, industrial and residential buildings and in remote or inaccessible areas. They are used to power fuel cell vehicles, including automobiles, buses, forklifts, airplanes, boats, motorcycles and submarines.

There are many types of fuel cells, but they all consist of an anode (negative side), a cathode (positive side) and

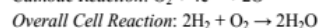
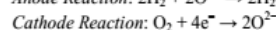
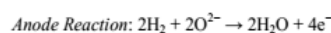
an electrolyte that allows charges to move between the two sides of the fuel cell. Electrons are drawn from the anode to the cathode through an external circuit, producing direct current electricity. As the main difference among fuel cell types is the electrolyte, fuel cells are classified by the type of electrolyte they use. Fuel cells come in a variety of sizes. Individual fuel cells produce relatively small electrical potentials, about 0.7 volts, so cells are "stacked", or placed in series, to increase the voltage and meet an application's requirements. In addition to electricity, fuel cells produce water, heat and, depending on the fuel source, very small amounts of nitrogen dioxide and other emissions. The energy efficiency of a fuel cell is generally between 40–60%, or up to 85% efficient if waste heat is captured for use.

B. High Temperature Fuel Cells

Solid oxide Fuel Cell: SOFC

Solid oxide fuel cells use a solid material, most commonly a ceramic material called yttria-stabilized zirconia (YSZ), as the electrolyte. Because SOFCs are made entirely of solid materials, they are not limited to the flat plane configuration of other types of fuel cells and are often designed as rolled tubes. They require high operating temperatures (800 to 1000 °C) and can be run on a variety of fuels including natural gas.

SOFCs are unique in that negatively charged oxygen ions travel from the cathode (negative side of the fuel cell) to the anode (positive side of the fuel cell) instead of positively charged hydrogen ions travelling from the anode to the cathode, as is the case in all other types of fuel cells. Oxygen gas is fed through the cathode, where it reacts with electrons to create oxygen ions. The oxygen ions then travel through the electrolyte to react with hydrogen gas at the anode. The reaction at the anode produces electricity and water as by-products. Carbon dioxide may also be a by-product depending on the fuel, but the carbon emissions from an SOFC system are less than those from a fossil fuel combustion plant. The chemical reactions for the SOFC system can be expressed as follows:



M.F. Karim is with the Institute Technology Brunei, Brunei (phone: +673 7157167; e-mail: mdafazulkk@yahoo.com).

M. A. Meah is with the Shahjalal University of Science and Technology, Bangladesh Institute Technology Brunei, Brunei (e-mail: mamsust@yahoo.com).

A.I.M. Ismail is with the Universiti Sains Malaysia, Malaysia (e-mail: izani@cs.usm.my).

SOFC systems can run on fuels other than pure hydrogen gas. However, since hydrogen is necessary for the reactions listed above, the fuel selected must contain hydrogen atoms. In order for the fuel cell to operate, the fuel must be converted into pure hydrogen gas. SOFCs are capable of internally reforming light hydrocarbons such as methane (natural gas), propane and butane. Heavier hydrocarbons including gasoline, diesel fuel, jet fuel and biofuels can serve as fuels in a SOFC system, but an external reformer is required.

Challenges exist in SOFC systems due to their high operating temperatures. One such challenge is the potential for carbon dust to build up on the anode, which slows down the internal reforming process. Research to address this "carbon coking" issue at the University of Pennsylvania has shown that the use of copper-based cermet (heat-resistant materials made of ceramic and metal) can reduce coking and the loss of performance. Another disadvantage of SOFC systems is slow start-up time, making SOFCs less useful for mobile applications. Despite these disadvantages, a high operating temperature provides an advantage by removing the need for a precious metal catalyst like platinum, thereby reducing cost. Additionally, waste heat from SOFC systems may be captured and reused, increasing the theoretical overall efficiency to as high as 80%–85%.

The high operating temperature is largely due to the physical properties of the YSZ electrolyte. As temperature decreases, so does the ionic conductivity of YSZ. Therefore, to obtain optimum performance of the fuel cell, a high operating temperature is required. According to their website, Ceres Power, a UK SOFC fuel cell manufacturer, has developed a method of reducing the operating temperature of their SOFC system to 500–600 degrees Celsius. They replaced the commonly used YSZ electrolyte with a CGO (cerium gadolinium oxide) electrolyte. The lower operating temperature allows them to use stainless steel instead of ceramic as the cell substrate, which reduces cost and start-up time of the system.

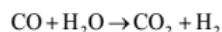
In this paper, SOFC modeling system was studied and also comparison with GRNN program was done.

II. SOFC MODELING

The SOFC modeling was created following reviewed from previous research work. In the modeling test, the hydrogen current and flow rate are the constant parameters applied. The results and correction of program were monitored and shown in the following.

SOFC modeling system include detailed as in the following:

A. Although the CO could be the fuel source in SOFC, the reaction in conversion of CO with water in system to be CO₂ and H₂ is shown below.



When use this conversion as the basic, there are only H₂ and O₂ that were sent into fuel cells.

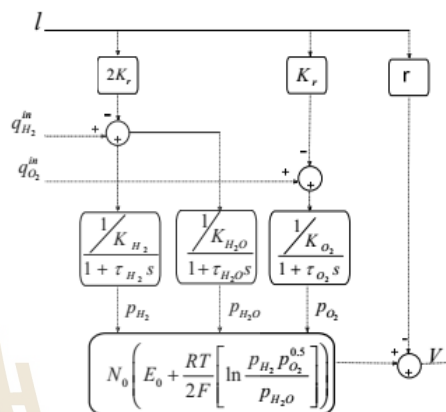


Fig. 1 SOFC stack dynamic model

TABLE I
CONSTANTS FOR POPULATION

Parameter	Value	Unit
N_0	384	
K_{H_2}	8.43e-4	Kmol/(atm s)
K_{H_2O}	2.81e-4	Kmol/(atm s)
K_{O_2}	2.52e-3	Kmol/(atm s)
τ_{H_2}	26.1	s
τ_{H_2O}	78.3	s
τ_{O_2}	2.91	s
r	0.126	Ω

B. The benefit of fuel cells could consider from ratio of gas flow rate that react and gas flow in of fuel cells which give the following equation.

$$U_f = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} \quad (1)$$

In general, around 80-90% of used fuel cells that give the equation as follow:

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 I_{fc}^r}{2F} = 2K_r I_{fc}^r \quad (2)$$

For hydrogen that flow in to fuel cells, the current needed from fuel cells system could definite in the range follow:

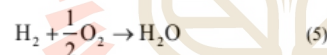
$$\frac{0.8q_{H_2}^{in}}{2K_r} \leq I_{fc}^{in} \leq \frac{0.9q_{H_2}^{in}}{2K_r} \quad (3)$$

C. The output of current in the fuel cells system could be measured so the fuel that flow in to fuel cells could be controlled by U_f at 85% as:

$$q_{H_2}^{in} = \frac{2K_r I_{fc}^r}{0.85} \quad (4)$$

D. The highest capacity is ratio of highest energy sending and ratio of power in fuel cells system that only expectation based on the theory with part of use fuel cells. For capability and workload dynamic that should be highest, the p_k should be the highest as possible. This value affect area in fuel cells directly, especially the output constant value. The cost is the limited the constant output value in the range from 130 to 180%. In practical, the limited value is stricted by safety working system. In the protection command that protect from electrolyte compound, the pressure different in fuel cells between hydrogen and oxygen passed through anode and cathode should not less than 4 kPa under normal steady state condition and 8 kPa under transient state condition. Due to the different of fuel cellss system that have various highest capacities, the modeling method to obtain the value p_k at fuel cells system should less 170% which means the highest power that send out from fuel cells less than 1.7 times of energy ratio.

E. The reaction occurs in fuel cells is:



Thus the ratio of combustion between hydrogen and oxygen is 2 to 1. The lots of oxygen will be kept for reaction of hydrogen and oxygen more complete. The simulate model showed that r_{H_2O} should be kept around 1.145 for keeping the pressure in fuel cells under 4 kPa in steady state condition, thus the oxygen that flow in to fuel cells will be controlled for keeping r_{H_2O} at 1.145 by controlling the speed of air compression.

F. The result of chemical reaction in energy process in general is very slow due to connecting to times of conversion chemical parameters after changing flow of substrate in reaction, dynamic function response in chemical reaction will be function in the model stimulate in the first order at time constant at 5 min.

G. Electrical response time in fuel cells would be fast as normal and also related with how fast the chemical reaction rate that good to recovery the ion that be used up by dynamic response function load as transfer function in the first order which there is only constant parameters in time at 0.8 second.

H. In power status, fuel cells system could give the output other than real power that is reaction power in general called PF that could be in the range 1.0-0.8. Because of response time for power status is less than 10 ms, thus it is not necessary to conclude the slow model of fuel cells except the PF could be adjusted by power status.

From data above, dynamic model of SOFC system is shown in Fig. 1 that $q_{O_2}^{in}$ is the oxygen flow in rate [1-4].

The model was created in by Simulink MATLAB program for test the pressure and power values.

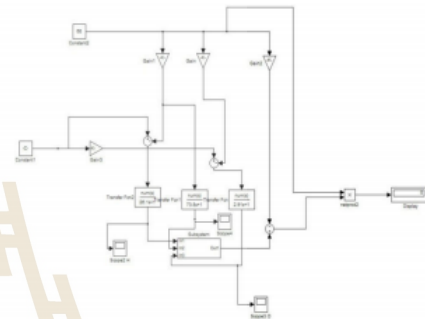


Fig. 2 SOFC model for pressure test

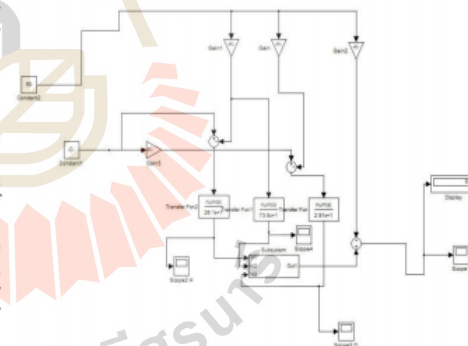


Fig. 3 SOFC model for power test

III. GENERALIZED REGRESSION NETWORKS

A generalized regression neural network (GRNN) is often used for function approximation. It has a radial basis layer and a special linear layer. The architecture for the GRNN is shown below. It is similar to the radial basis network, but has a slightly different second layer [5].

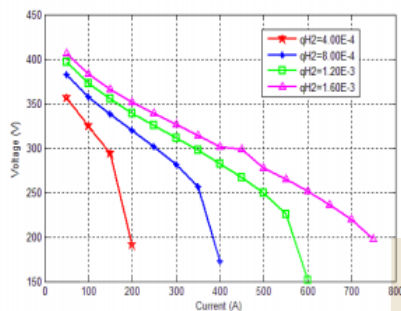


Fig. 4 The relationship of voltage and pressure at steady state condition

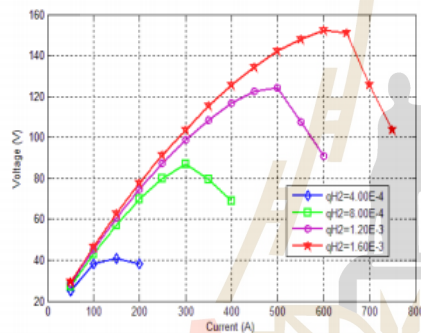


Fig. 5 The relationship of voltage and current at steady state condition

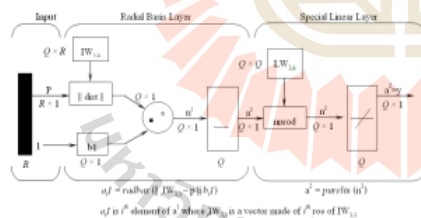


Fig. 6 GRNN flow chart [5]

Where... R = no. of elements in input vector
 Q = no. of neurons in layer 1
 Q = no. of neurons in layer 2
 Q = no. of input/ target pairs

From taking the value from the test from MATLAB Simulink to be fed in GRNN program, the analysis result is shown below.

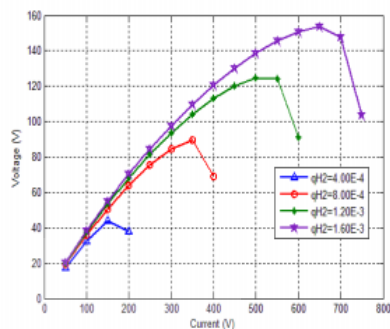


Fig. 7 The relationship of voltage and pressure by GRNN

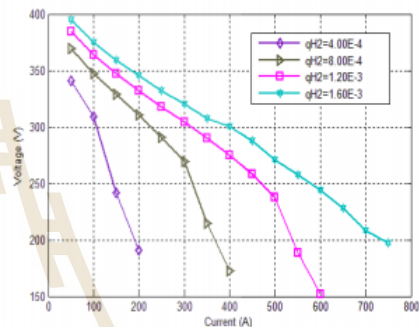


Fig. 8 The relationship of voltage and current by GRNN

IV. TEST RESULT AND DISCUSSIONS

The value from GRNN program was compared and shown in the figure below.

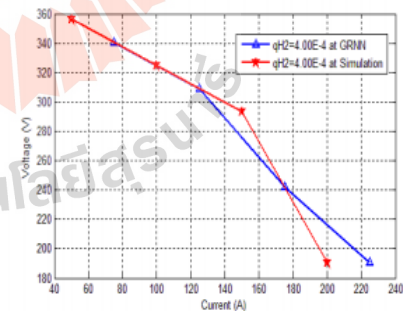


Fig. 9 Comparison of pressure value between simulation and GRNN

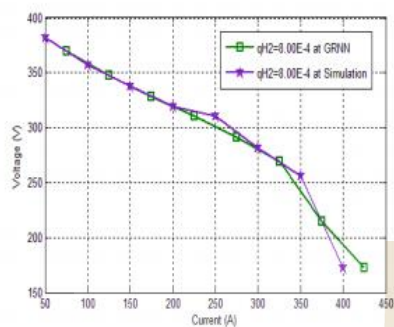


Fig. 10 Comparison of pressure value Simulation and GRNN

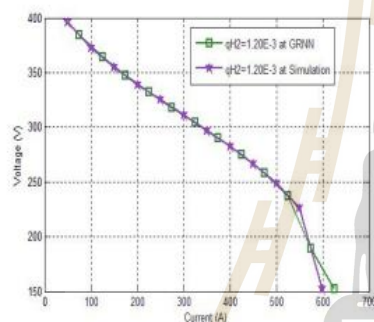


Fig. 11 Comparison of voltage value between Simulation and GRNN

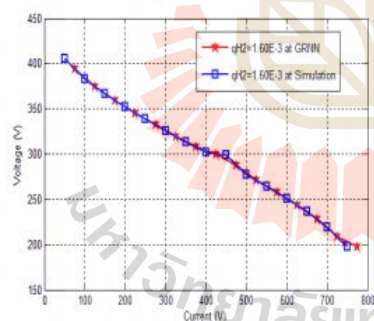


Fig. 12 Comparison of voltage value between simulation and GRNN

In the above figure, the results showed that plot from simulation and GRNN of SOFC fuel cells are the same trend.

Voltage (V)	%Error (Voltage)			
	$qH_2=4.00E-4$	$qH_2=8.00E-4$	$qH_2=1.20E-3$	$qH_2=1.60E-3$
50	4.394	3.258	3.056	2.808
100	4.863	2.744	2.361	2.192
150	17.524	2.666	2.252	1.966
200	0	2.832	2.035	1.889
250		3.284	2.167	1.860
300		4.490	2.249	1.871
350		16.341	2.456	1.928
400		0	2.760	0.497
450			3.33	3.582
500			4.69	2.289
550			16.408	2.547
600			0	2.910
650				3.572
700				5.10
750				0

From comparison of the voltage and current value between simulation and GRNN, the value from GRNN is much closed to simulation result. In addition, the graph showed two curves from simulation and GRNN much the same trend also the error value percentage in Table II showed superlative results.

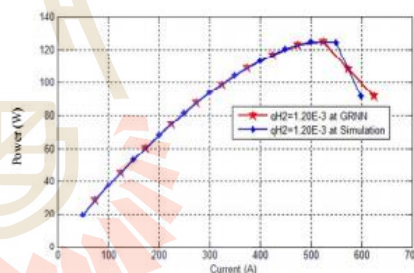


Fig. 13 Comparison of power value between simulation and GRNN

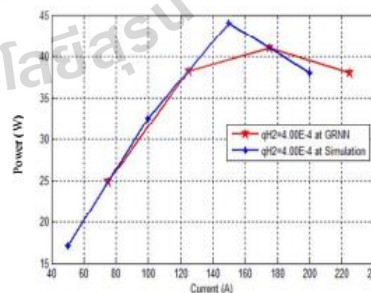


Fig. 14 Comparison of power value between simulation and GRNN

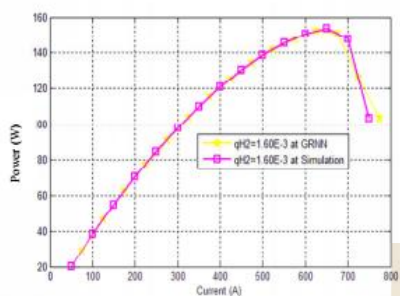


Fig. 15 Comparison of power value between simulation and GRNN

TABLE III
THE ERROR VALUE

Voltage (V)	%Error (Power)			
	$qH_2=1.00E-3$	$qH_2=8.00E-3$	$qH_2=1.20E-3$	$qH_2=1.60E-3$
50	30.823	43.458	44.068	44.06
100	15.036	20.884	21.464	21.72
150	7.16	13.102	13.769	14.030
200	0	8.95	9.846	10.146
250		6.064	7.409	7.767
300		3.106	5.692	6.134
350		11.526	4.326	4.963
400		0	3.185	3.976
450			1.83	3.184
500			0.1605	2.489
550			13.353	1.786
600			0	1.028
650				1.918
700				14.98
750				0

From comparison of the power and current value between simulation and GRNN, the value from GRNN is much closer to simulation result. In addition, the graph showed two curves from simulation and GRNN much the same trend also the error value percentage in Table III showed superlative results.

V. CONCLUSION

The results showed that GRNN is very useful for modeling in SOFC fuel cells system, in addition the voltage value was increased a little but still showed the same trend when compared with simulation results. Finally, the error value was increased little at the beginning and starts to decrease as the pressure value go up.

ACKNOWLEDGMENT

This research work was supported by Research and Development Institute Fund, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

REFERENCES

- [1] Y. Zhu, K. Tomsovic, Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells, *Electric Power systems Research* 62 (2002) 1-11.
- [2] Oonsivilai, A. and M.E. El-Hawary: "A Self-Organizing Fuzzy Power System Stabilizer", *IEEE. CCECE'98*, 1998.
- [3] Oonsivilai, A. and M.E. El-Hawary: "Power System Dynamic Load Modeling using Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", *IEEE. CCECE'99*, 1999.
- [4] Oonsivilai, A. and M.E. El-Hawary: "Wavelet Neural Network Based Short Term Load Forecasting of Electric Power System Commercial Load", *IEEE. CCECE'99*, 1999.
- [5] Satonsaowapak, M., Krapeedang, M., Oonsivilai, R., and Oonsivilai, A. 2010. Gas flow rate identification in biomass power plants by response surface method. *World Academy of Science, Engineering, and Technology*, Paris, France, 27-29 October, pp: 261 – 264.



Nirut Nim-on was born in Sukhothai Province, Thailand, in 1985. He received his B.Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2007. He is currently a graduate student in school of Electrical Engineering, institute of Engineering at the Suranaree University as well. His interesting areas are Fuel Cell Systems and electrical power system.



Anant Oonsivilai was born in Khon Kaen Province, Thailand, in 1963. He received his B. Eng., M. Eng., and Ph. D. from Khonkaen University, King Mongkut Institute of Technology North Bangkok, Thailand and Dalhousie University, Canada, in 1992 and 2000, respectively in Electrical Engineering. Dr. Oonsivilai is currently an Assistant Professor in School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His areas of interest are electrical power stability, control technology, alternative, and sustainable energy.

ประวัติผู้เขียน

นายนิรุทธิ์ นิ่มอ่อน เกิดเมื่อวันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2528 ที่ตำบลบ้านสวน อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย เริ่มศึกษาระดับอนุบาล ถึงประถมศึกษาชั้นปีที่ 6 ที่โรงเรียนวัดคู้ข่างใหญ่ ตำบลบ้านสวน อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย และศึกษาต่อระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1 จนถึงระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 6 ที่โรงเรียนสุโขทัยวิทยาคม ตำบลบ้านกล้วย อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายสำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนสุโขทัยวิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย เมื่อ พ.ศ. 2546 ในภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาและสำเร็จการศึกษาในปี 2550 จากนั้นจึงได้ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลัง และพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท มีประสบการณ์สอนเป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (3) ปฏิบัติการจักรกลไฟฟ้า 2 และ (4) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 โดยมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง และพลังงานทดแทน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี