

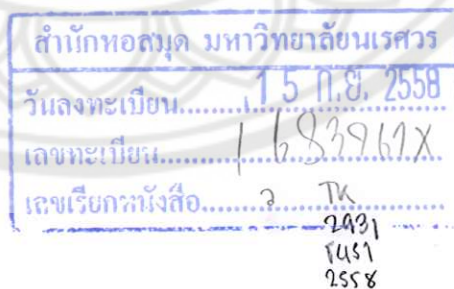


รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของ
ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ
Technical Performance and Economic Assessment of
Fuel Cell Stand-alone Power System

คณะผู้วิจัย สังกัด

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1. ดร. สุขฤดี สุขใจ | สังกัด วิทยาลัยพลังงานทดแทน |
| 2. ดร. ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงศ์ | สังกัด วิทยาลัยพลังงานทดแทน |
| 3. นายรัฐพร เงินมีศรี | สังกัด วิทยาลัยพลังงานทดแทน |
| 4. นายคงฤทธิ แม่นศิริ | สังกัด วิทยาลัยพลังงานทดแทน |



กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินการวิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่อนุเคราะห์เงินอุดหนุนการวิจัยพัฒนา สาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและคณิตศาสตร์ งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2557 และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวรที่สนับสนุนงานวิจัยอย่างจริงจังและต่อเนื่องมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ผู้ที่มีส่วนร่วมช่วยเหลือในการทดสอบ และเก็บข้อมูลทุกท่าน และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่วิทยาลัยพลังงานทดแทนทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ดร.สุกฤดี สุขใจ



ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)

การประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของ
ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

(ภาษาอังกฤษ)

Technical Performance and Economic Assessment of
Fuel Cell Stand-alone Power System

ชื่อผู้วิจัย

1. ดร. สุขฤดี สุขใจ
2. ดร. ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงศ์
3. นายรัฐพร เงินมีศรี
4. นายคงฤทธิ แม่นศิริ

หน่วยงานที่สังกัด

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ถ.พิษณุโลก-
นครสวรรค์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

โทร. 055-963182

โทรสาร. 055-963182

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยสาขา

วิทยาศาสตร์กายภาพและคณิตศาสตร์

งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี

2557

จำนวนเงิน

355,900 บาท ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ ตุลาคม 2556 – ธันวาคม 2557

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ ซึ่งระบบผลิตเซลล์เชื้อเพลิงฯ มีส่วนประกอบหลักประกอบด้วย เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell, FC) ขนาด 1,200 วัตต์ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (DC/AC inverter) และภาระไฟฟ้าแบบปรับค่าได้ (Variable AC Load) ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ตอนได้แก่ 1) การประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ 2) การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง 3) การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ จากผลการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระมีประสิทธิภาพสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 37 เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟระหว่าง 500 - 900 วัตต์ ในขณะที่ประสิทธิภาพของระบบจะประสิทธิภาพลดลงเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟสูงกว่า 900 วัตต์ ผลการวิจัยในส่วนที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงที่พัฒนาขึ้นนั้นใช้วิธีไฮบริด (Semi-empirical method) ซึ่งสมการที่ใช้สำหรับ Semi-empirical เมื่อการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลทดสอบ พบว่าผลที่ได้ไปในทิศทางเดียวกันและมีความแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และในส่วนสุดท้ายทำการประเมินสมรรถนะทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ พบว่าระบบฯ ดังกล่าวใช้งบประมาณใน

การลงทุน 157,000 บาท ค่าสมมูลประจำปีของราคาระบบตลอดช่วงอายุการใช้งานของระบบ (ALCC) มีค่าเท่ากับ 23,797 บาท โดยระบบฯ มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้า (COE) 7.58 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

คำสำคัญ: สมรรถนะทางด้านเทคนิค; เซลล์เชื้อเพลิง; ระบบอิสระ; การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์

Abstract

The aims of this research were to evaluate the technical performance and economic assessment of standalone fuel cell system. The main component of system consists of 1,200 W fuel cell stack, DC/AC inverter and variable AC load. There are 3 parts of investigation in this research as follows; 1) the technical performances of standalone fuel cell system were evaluated. 2) The mathematical model of fuel cell system was developed. 3) The economics of standalone fuel cell system were studied. From the results of the first part, they were found that the maximum efficiency of standalone fuel cell system is 37% when the power outputs of fuel cell are 500 Watt – 900 Watt. Whereas, the efficiency of standalone fuel cell system will decrease when the power output of fuel cell is higher than 900 Watts. The second part of this research, the semi-empirical model was used for fuel cell mathematical model. The model validations between the simulation and the experiment give a relative difference less than 5%. The last part of this research, the economic evaluation presented the capital cost, annuity (ALCC), and cost of energy (COE) of a fuel cell stand-alone Power System were 157,000 Baht, 23,797 Baht and 7.58 Baht/kWh, respectively.

Keywords: Technical Performance; Fuel Cell; Standalone system; Economic Assessment

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1	1
บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการวิจัย	2
ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
บทที่ 2	4
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ประวัติของเซลล์เชื้อเพลิง	4
พื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง	4
ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิง	6
การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิง	6
กรอบแนวความคิดของโครงการ	9
การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3	14
วิธีดำเนินการวิจัย	14
ตอนที่ 1 การประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ	14
ตอนที่ 2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง	20
ตอนที่ 3 การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ	25
บทที่ 4	28
ผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ข้อมูล	28
ตอนที่ 1 ผลการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ	28
ตอนที่ 2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง	34
ตอนที่ 3 การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ	38
บทที่ 5	40
สรุปและข้อเสนอแนะ	40
บรรณานุกรม	42

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโลกในปี 2578	1
รูปที่ 2 ประวัติของไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิง.....	5
รูปที่ 3 แสดงการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	5
รูปที่ 4 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง	6
รูปที่ 5 รถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงจากบริษัท BMW	7
รูปที่ 6 เซลล์เชื้อเพลิงแบบพกพาสำหรับ PDA ของบริษัท Motorola	7
รูปที่ 7 เซลล์เชื้อเพลิงแบบ Residential ที่ทดสอบโดย Japan Gas Association	8
รูปที่ 8 Schematic of future moon base, including a regenerative fuel cell.....	8
รูปที่ 9 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง.....	9
รูปที่ 10 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ	14
รูปที่ 11 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า	15
รูปที่ 12 การติดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ.....	17
รูปที่ 13 จุดตรวจวัดสำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ	18
รูปที่ 14 วงจรสมมูลของเซลล์เชื้อเพลิง.....	21
รูปที่ 15 การจำลองสภาพของภาระไฟฟ้า.....	28
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ไฮโดรเจนกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง.....	29
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้า	30
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง	31
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า กับประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า.....	32
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า กับประสิทธิภาพของระบบ.....	33
รูปที่ 21 การสูญเสียพลังงานในรูปของระบบเซลล์เชื้อเพลิง.....	33
รูปที่ 22 การหาพารามิเตอร์คงที่ด้วยวิธีการทำ Curve Fitting	35
รูปที่ 23 MATLAB/SIMULINK สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง.....	35
รูปที่ 24 polarization curve และ P-I characteristic curve ของเซลล์เชื้อเพลิง	36
รูปที่ 25 Voltage drops ที่เกิดจากการสูญเสียในการเปลี่ยนรูปพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	37
รูปที่ 26 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างการทดสอบและแบบจำลอง	38

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง	15
ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า	16
ตารางที่ 3 การจัดเก็บข้อมูลและตัวแปรที่ใช้สำหรับการทดสอบ	16
ตารางที่ 4 ตัวคูณปรับค่าเข้าสู่มูลค่าปัจจุบัน	26
ตารางที่ 5 อายุการใช้งานของอุปกรณ์และค่าบำรุงรักษาต่อปี	27
ตารางที่ 6 การลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ	38
ตารางที่ 7 การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ	39

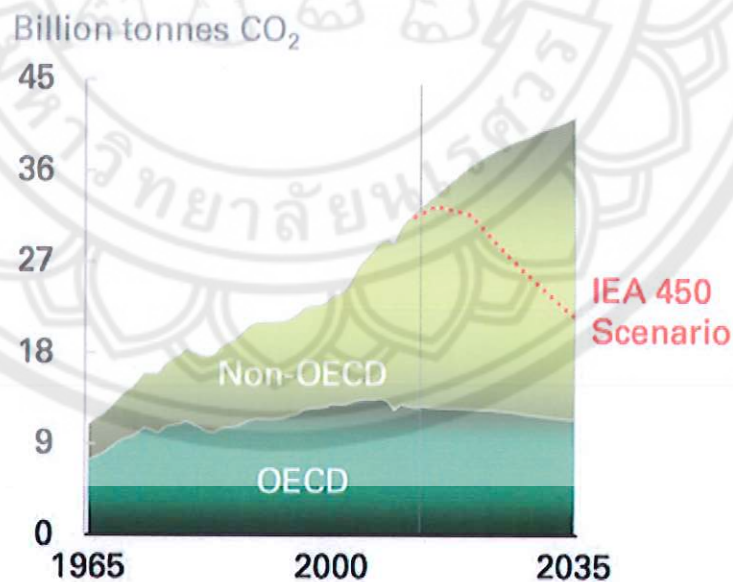


บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

สภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง (Climate Change) รุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศทั่วโลก ทั้งยังทำให้เกิดความหายนะอย่างใหญ่หลวงไม่ว่าจะเป็นการเกิดคลื่นความร้อนในทวีปยุโรปทำให้มีผู้เสียชีวิตจำนวนมาก พายุเฮอริเคนที่ทำลายเมืองในประเทศสหรัฐอเมริกาอย่างหนักในตลอดหลายปีที่ผ่านมา และเกิดความแห้งแล้งอย่างรุนแรงและยาวนานในทวีปแอฟริกา สำหรับประเทศไทยนั้นเกิดมหาอุทกภัยครั้งใหญ่ เหตุการณ์เหล่านี้จะทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้นหากยังมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างต่อเนื่อง นอกจากปัญหาสภาวะอากาศเปลี่ยนแปลงแล้ว ปัญหาหลักอีกประการได้แก่ การเพิ่มขึ้นของประชากรส่งผลต่อการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยแหล่งพลังงานสำรองจากฟอสซิลที่เป็นแหล่งพลังงานหลักที่ใช้บนพื้นโลกมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องและจะหมดไปในอนาคตอันใกล้นี้ แม้ว่าปริมาณพลังงานสำรองจากฟอสซิลจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ความต้องการใช้พลังงานกลับสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว เนื่องจากการเพิ่มของประชากร การเติบโตทางเศรษฐกิจและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และคาดการณ์ว่าในปี พ.ศ. 2578 จะมีปริมาณก๊าซเรือนกระจกมากกว่า 40,000 ล้านตันต่อปี



รูปที่ 1 ภาพจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโลกในปี 2578 [1]

เทคโนโลยีพลังงานทดแทนนั้นมีอยู่หลายชนิด การเลือกใช้ต้องมีความเหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ และศักยภาพของพื้นที่ สำหรับประเทศไทยเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมกับศักยภาพมีอยู่หลายเทคโนโลยี ได้แก่ เทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีที่กล่าวมานั้นมีข้อจำกัดอยู่ 2 ประการ คือ พื้นที่ในการติดตั้งระบบมีขนาดใหญ่ เนื่องจากประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานต่ำ และความไม่แน่นอนของแหล่งกำเนิดพลังงานซึ่งไม่สามารถกำหนดได้ ดังนั้นจึงแสวงหาเทคโนโลยีอื่นที่มีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่มีอยู่อย่างจำกัดในอนาคต เซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงถึงร้อยละ 90 และสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายเช่น ระบบไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ชนบทห่างไกล ในครัวเรือน หรือในอาคารสำนักงานต่างๆ รวมถึงในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ วิทยุ หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กอื่นๆ อุปกรณ์ทางการทหาร เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีหน่วยงานใดในประเทศไทย ที่ทำการศึกษาค้นคว้าการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงอย่างจริงจัง และต่อเนื่อง ดังนั้นเพื่อให้ประเทศมีความพร้อมในการที่จะรองรับในเทคโนโลยีดังกล่าว จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่บุคลากรด้านวิชาการในประเทศจะต้องมีความร่วมมือในการศึกษาอย่างเป็นระบบในด้านเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง ระบบการทดสอบและความเป็นไปได้ในการส่งเสริมการผลิต การใช้งานโดยเร่งด่วน

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1 เพื่อออกแบบและติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ
- 2 เพื่อประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ
- 3 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการวิจัย

- 1 เผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสารภายในประเทศ หรืองานประชุมสัมมนาเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย
- 2 ทราบถึงสมรรถนะทางด้านเทคนิคและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าแบบอิสระจากเซลล์เชื้อเพลิง
- 3 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าแบบอิสระจากเซลล์เชื้อเพลิง
- 4 ผลลัพธ์ที่ได้ของโครงการจะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงในอนาคต รวมถึงเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงของประเทศ
- 5 ตอบสนองนโยบายภาครัฐในเรื่องของการพัฒนาการใช้แหล่งพลังงานใหม่จากแสงอาทิตย์ของประเทศ

ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะทำการพัฒนาระบบไฟฟ้าแบบอิสระจากเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) ขนาด 1.2 กิโลวัตต์ โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงนั้น จ่ายไฟฟ้าให้กับอาคารภายในอาคารทดสอบ พื้นที่โครงการสวนพลังงาน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบ เช่น อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง คุณภาพไฟฟ้าของระบบ เป็นต้น และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

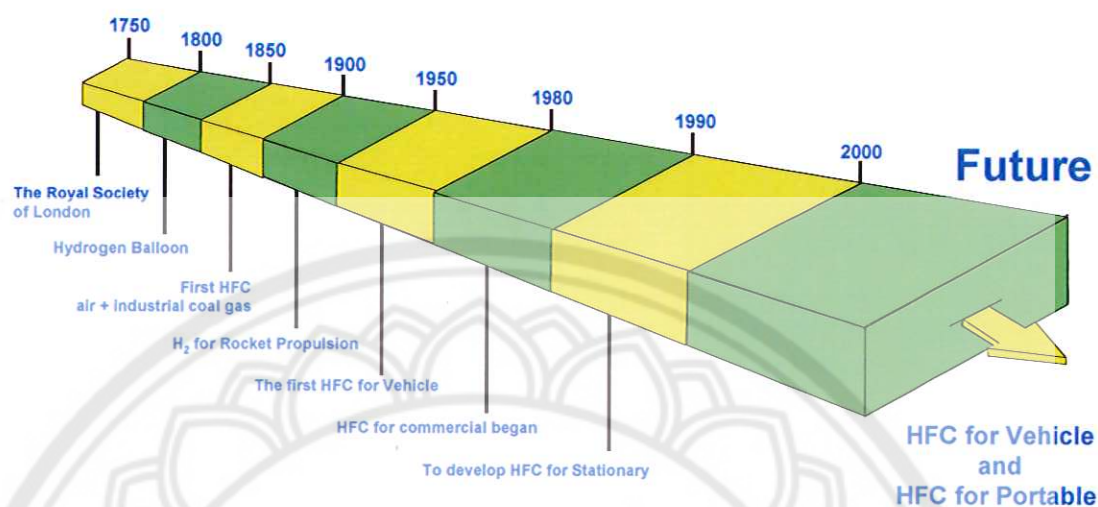
ประวัติของเซลล์เชื้อเพลิง

หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวิส Christian Friedrich Schönbein ในปี ค.ศ. 1838 และตีพิมพ์ในเดือนมกราคมปีถัดมาใน "Philosophical Magazine" อาศัยหลักการจากบทความชิ้นนี้ เซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกสร้างขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเวลส์ Sir William Grove ต้นแบบของเขาได้ตีพิมพ์ในปี 1843 จนในช่วงปี 1950 หลักการของ Grove ได้รับความสนใจอีกครั้ง โดยความต้องการเทคโนโลยีระบบพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่องานด้านอวกาศและด้านการทหาร ยานอวกาศและเรือดำน้ำ ต้องการระบบพลังงานไฟฟ้าซึ่งต้องไม่ใช่เทคโนโลยีเครื่องยนต์สันดาปภายใน จนกระทั่งในปี 1959 วิศวกรชาวอังกฤษ Francis Thomas Bacon ได้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 กิโลวัตต์ได้สำเร็จ ในปีเดียวกันนี้เองที่กลุ่มที่นำโดย Harry Ihrig ได้ผลิตแทรกเตอร์ขนาด 15 กิโลวัตต์ให้กับ Allis-Chalmers ซึ่งได้นำไปแสดงทั่วสหรัฐอเมริกา ระบบนี้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ไฮโดรเจนอัดและก๊าซออกซิเจนเป็นสารตั้งต้น ในปีเดียวกันนี้เองที่ Bacon และทีมงานได้สร้างเครื่องผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ที่ใช้งานได้จริงสำหรับเครื่องเชื่อม ซึ่งนำไปสู่สิทธิบัตรของ Bacon และในปี 1960 NASA ทุ่มงบประมาณ 10 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เพื่อพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงสำหรับโครงการอวกาศ เนื่องจากการใช้แบตเตอรี่ธรรมดามีน้ำหนักมากเกินไปสำหรับยานอวกาศ

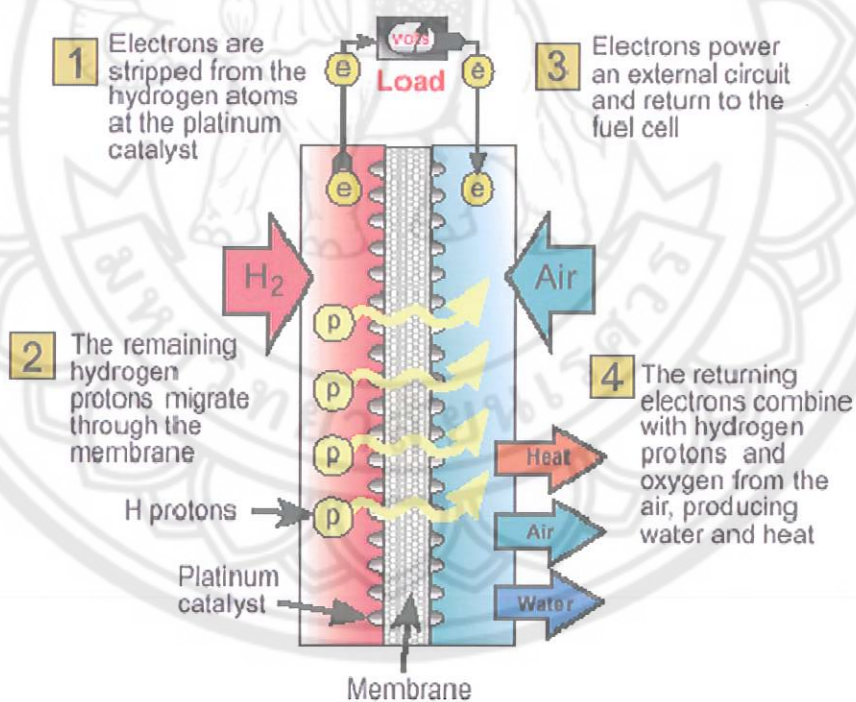
จากนั้นในช่วงปี 1980s และ 1990s โดย Geoffrey Ballard เจ้าของบริษัทเซลล์เชื้อเพลิงในแคนาดาที่โด่งดัง Ballard Power Systems Inc. นำมาซึ่งการใช้ Nafion วัสดุที่ถูกกว่าและทนทานเป็นอิเล็กโทรไลต์ และการลดการใช้แพลทินัม ทำให้อนาคตการใช้เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับผู้บริโภค เช่น ในรถยนต์มีความเป็นไปได้มากขึ้นและต้นทศวรรษที่ 90 นักวิทยาศาสตร์และวิศวกร ได้พัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงแบบต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและลดราคาของระบบได้ในขณะเดียวกัน ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ และเป็นเทคโนโลยีที่ปฏิวัติการใช้พลังงานของโลกในอนาคต

พื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง คืออุปกรณ์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนด้วยกระบวนการ "Electrochemical" โดยการรวมตัวกันระหว่างเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ (ไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ โพรเพน) และอากาศ ผลของกระบวนการดังกล่าวยังทำให้ได้น้ำซึ่งเป็นเสมือนไอเสียของระบบด้วย เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีเชื้อเพลิงป้อนให้ระบบ ไม่ต้องการการประจุใหม่เหมือนกับแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการแปลงรูปพลังงานที่สูงกว่าเทคโนโลยีการแปลงรูปพลังงานอื่นๆ ที่ใช้กันอยู่ การทำงานปราศจากการเผาไหม้จึงไม่มีมลพิษ ไม่มีการเคลื่อนไหวยของอุปกรณ์ดังรูปที่ 3



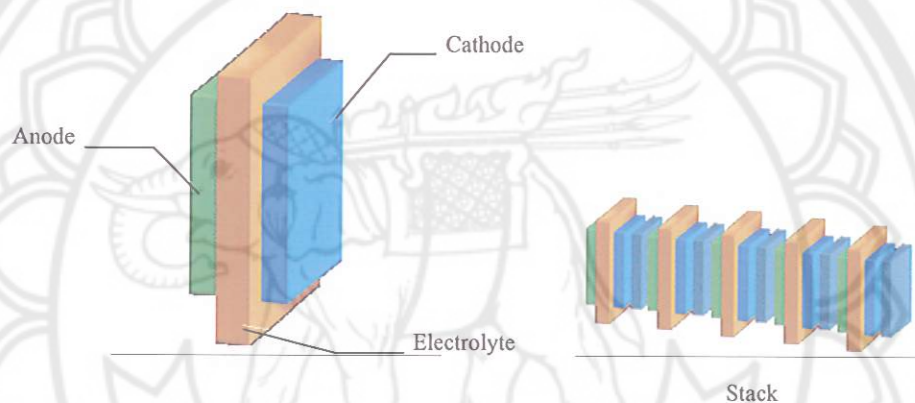
รูปที่ 2 ประวัติของไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 3 แสดงการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

โดยเมื่อไฮโดรเจนผ่านเข้ามาที่ platinum catalyst ก็จะแตกตัวให้อิเล็กตรอนและโปรตอน อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปที่ขั้วไฟฟ้า โปรตอนที่เหลืออยู่เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน (membrane) อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาที่ขั้วให้พลังงานกับภาระทางไฟฟ้าภายนอก จากนั้นก็เคลื่อนที่กลับเข้าเซลล์

เชื้อเพลิงเพื่อรวมตัวกับโปรตอนจากไฮโดรเจนและออกซิเจนจากอากาศ ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้ได้ความร้อนและน้ำ เซลล์เชื้อเพลิงประกอบไปด้วยชั้นของวัสดุสามชั้นเรียงซ้อนกัน ชั้นแรกเป็นแอโนด (Anode) ชั้นที่สองเป็นอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และชั้นที่สามเป็นแคโทด (Cathode) โดยที่แอโนดและแคโทดทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ส่วนชั้นตรงกลางนั้นเป็นโครงสร้างที่เป็นพาหะซึ่งดูดซับอิเล็กโทรไลต์เอาไว้ เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะใช้อิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเป็นของเหลว หรือของแข็งในรูปของโครงสร้างเมมเบรน เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงจำเป็นต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงหลายๆ เซลล์มาต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตามต้องการ ซึ่งเรียกลักษณะของการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อกันหลายๆ เซลล์ว่า “stack” (รูปที่ 4) [2,3]



รูปที่ 4 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิง

- เพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงาน ลดการใช้น้ำมัน ลดการนำเข้าน้ำมัน เพิ่มความสามารถในการจัดหาไฟฟ้าให้กับผู้ใช้
- ความมั่นคงของระบบสูง
- ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ
- สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างสม่ำเสมอ และต่อเนื่อง
- สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด เช่น ไฮโดรเจน แก๊สธรรมชาติ โพรเพน บิวเทน เป็นต้น
- เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่มีเสียงดังระหว่างทำงาน
- ประสิทธิภาพสูง 50 – 70% สำหรับการเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้า และ 90% หากรวมพลังงานความร้อนที่ผลิตได้

การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งาน เป็น 4 แบบได้แก่

1. การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์ (Vehicle)
2. การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบพกพา (Portable)

3. การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับที่พักอาศัย (Residential)
4. การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่ (Stationary)

การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์ (Vehicle)

 2000 Series 7 (745h)	FUEL TYPE
	Gasoline/liquid hydrogen
	ENGINE TYPE
	ICE (fuel cell APU)
	FUEL CELL SIZE/TYPE
	5 kW/PEM
	FUEL CELL MANUFACTURER
	UTC Fuel Cells
	RANGE – 180 mi (300 km)
	MPG EQUIVALENT – n/a
	MAX SPEED – 140 mph

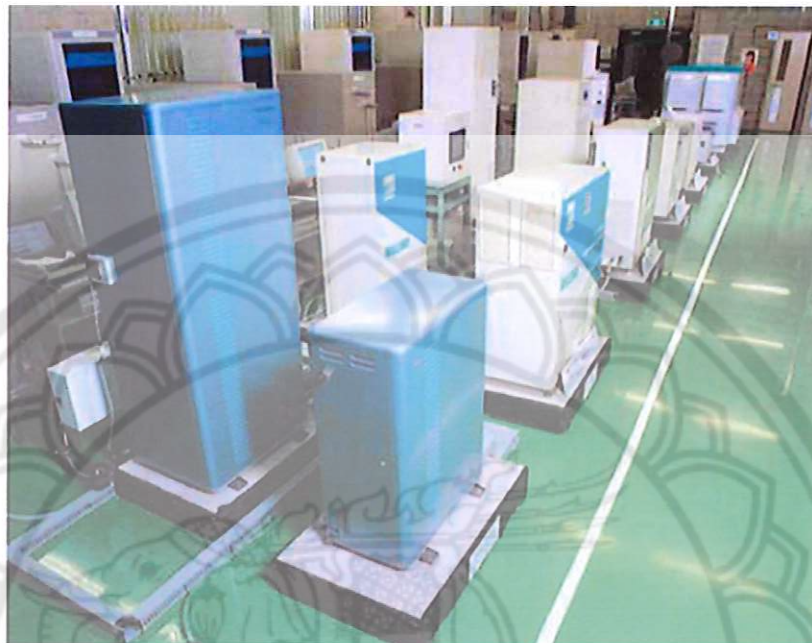
รูปที่ 5 รถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงจากบริษัท BMW [5]

การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบพกพา (Portable)



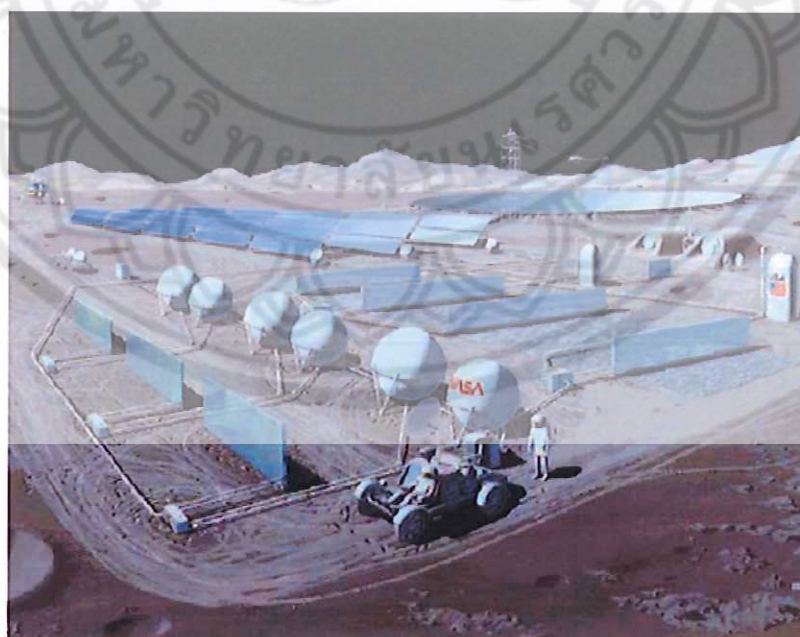
รูปที่ 6 เซลล์เชื้อเพลิงแบบพกพาสำหรับ PDA ของบริษัท Motorola [6]

การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับที่พักอาศัย (Residential)



รูปที่ 7 เซลล์เชื้อเพลิงแบบ Residential ที่ทดสอบโดย Japan Gas Association [7]

การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่ (Stationary)

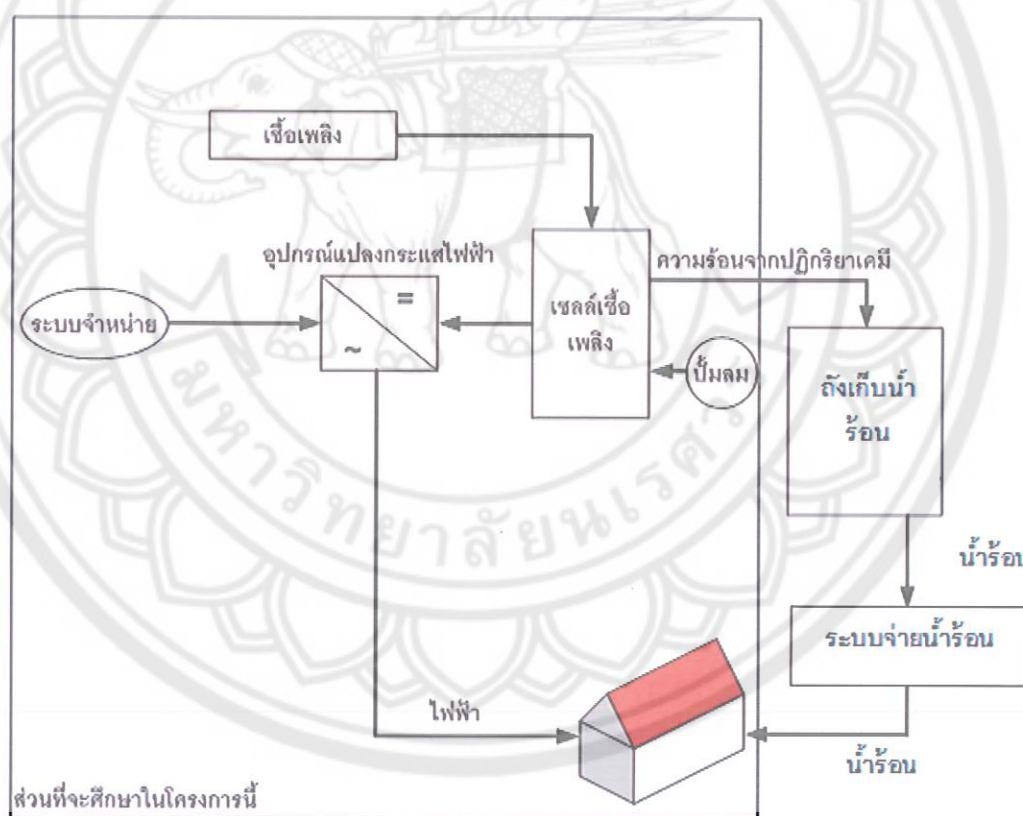


รูปที่ 8 Schematic of future moon base, including a regenerative fuel cell [8]

ด้วยเทคโนโลยีด้านเซลล์เชื้อเพลิงที่ก้าวหน้า ทำให้มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะทดแทนโรงไฟฟ้า พลังงานความร้อนที่ใช้กันอยู่ เซลล์เชื้อเพลิงขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงกว่าโรงไฟฟ้าที่มีอยู่ในปัจจุบัน เทคโนโลยีด้านเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกพัฒนาจนสามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยตรงจากไฮโดรเจน ในเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้นยังสามารถใช้ความร้อน และน้ำที่ได้ ไปอุตสาหกรรมอื่นน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าได้อีกทาง

กรอบแนวความคิดของโครงการ

โครงการนี้จะทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 กิโลวัตต์ โดยทำการสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบ และความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์นอกจากนี้ผู้วิจัยทำการศึกษาปริมาณความร้อนที่เหลือทิ้งจากเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีอุณหภูมิขณะ Operate 60°C เพื่อนำมาใช้กับระบบทำน้ำร้อนสำหรับครัวเรือน ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง
ร่วมกับระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานเหลือทิ้ง

หลักการทำงานของระบบ

1. เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะจ่ายให้กับเซลล์เชื้อเพลิง
2. ป้อนลมจะดูดอากาศเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิง
3. ภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ทำให้ได้ไฟฟ้าและความร้อน
4. ไฟฟ้าที่ได้จะผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในการจ่ายให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในอาคาร ในกรณีที่ไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่เพียงพอระบบจะดึงไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายมาจ่ายให้กับภาระไฟฟ้า
5. ในส่วนความร้อนที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศนั้น จะถูกนำไปใช้ผลิตน้ำร้อนและเก็บไว้ในถังเก็บเพื่อการใช้งานในบ้านเรือน

การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์ และคณะ. [9] ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) ซึ่งนำผลที่มาจากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อหา polarization curves ของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 420 W ในสภาวะ full humidify และ cathode stoichiometry ratios เท่ากับ 2 ผลของการเปรียบเทียบ polarization curves ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการทดสอบพบว่า polarization curves ของทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 3 เท่านั้นเอง

เทอดไทย วัฒนธรรม. [10] ได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแก๊วชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาดสูงสุด 500 วัตต์ โดยพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจากวัสดุที่มีตามท้องตลาดทั้งในและต่างประเทศ โดยมีการต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบอนุกรม 8, 20 และ 28 เซลล์ ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 0.6 โวลต์ต่อเซลล์ ได้ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 280, 228 และ 217 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 203, 413 และ 547 วัตต์ตามลำดับ และได้ทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 50 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีประสิทธิภาพไม่ลดลง การประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงที่พัฒนาขึ้นมีความคุ้มค่าในการลงทุนที่ผลตอบแทนร้อยละ 15 เมื่อราคาไฟฟ้าต่อหน่วยมีค่าเท่ากับ 20 บาท และมีระยะเวลาในการคืนทุนเท่ากับ 8 ปี 3 เดือน นอกจากนี้ได้พัฒนาเครื่องให้ความชื้นกับเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการทดสอบสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงขนาดใหญ่ให้มีประสิทธิภาพทำความชื้นเชื้อเพลิงที่ป้อนได้ไม่น้อยกว่า 95 % และพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงได้ผลตามเป้าประสงค์อีกด้วย

เทอดไทย วัฒนธรรม. [11] ได้พัฒนาดันแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาดสูงสุด 1,000 วัตต์ โดยเริ่มจากการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่มีพื้นที่หน้าตัด 150 ตารางเซนติเมตร โดยเพิ่มจำนวนเซลล์จาก 8 เป็น 20 และ 28 เซลล์ ตามลำดับ โดยเซลล์เชื้อเพลิงนี้ได้ใช้ส่วนประกอบ

ของอิเล็กโทรดเมมเบรนที่พัฒนาขึ้นเองซึ่งมีส่วนประกอบของ แพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตาราง เซนติเมตร และชิ้นส่วนอื่นๆ ที่สร้างขึ้นเองภายในประเทศ โดยสามารถผลิตไฟฟ้าได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 203, 413 และ 547 วัตต์ตามลำดับ ที่ความดันบรรยากาศ และเมื่อเพิ่มความดันในตัวเซลล์เป็น 10 psig จะได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 721 วัตต์ คิดเป็นร้อยละ 72 ของเป้าหมายในการผลิต การประเมิน ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงที่พัฒนาขึ้นมีความคุ้มค่าในการลงทุนที่ ผลตอบแทนร้อยละ 9 และ 10 และมีระยะเวลาในการคืนทุนเท่ากับ 11 ปี 8 เดือน และ 10 ปี 11 เดือน เมื่อราคาไฟฟ้าต่อหน่วยมีค่าเท่ากับ 20 บาท และ 21 บาท ตามลำดับ

มรกต ชาญสำรวจ. [12] ได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ขนาดเล็ก สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจำนวน 2 ชุด แต่ละชุดมีแรงดันไฟฟ้า ขนาด 24 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ โดยต่อขานเซลล์เชื้อเพลิงเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการ ขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังมอเตอร์ 750 วัตต์ และบรรทุกผู้โดยสาร 1 คน จากผลการทดสอบ พบว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถขับเคลื่อนรถไฟฟ้าได้ความเร็วคงที่ประมาณ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

พรพิมล เพ็ชรวัฒนา. [13] ได้ศึกษาวิจัยระบบจัดการน้ำภายนอกเซลล์เดี่ยวและห่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบ เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) เน้นการศึกษาภาคปฏิบัติโดยการทดสอบระบบให้ความชื้นแก่ ก๊าซเชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ไฮโดรเจนและออกซิเจน รวมถึงก๊าซไนโตรเจน โดยใช้ระบบจ่าย ความชื้นแบบถังทำความชื้น (Bottle Humidifier) ซึ่งวัดความชื้นโดยไฮโกรมิเตอร์ที่ได้รับการสอบ เทียบ (Calibration) แล้ว ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของเครื่องทำความชื้น มีผลต่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลก๊าซในช่วง 50 - 500 sccm

เซลล์เดี่ยวและห่อเซลล์ 5 ชั้น ได้รับการทดสอบที่สภาวะการทำงานต่างกัน ได้แก่ (1) การ เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนและอุณหภูมิควบคุมที่เครื่องทำความชื้น (2) อัตราส่วนระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงทั้งสองกรณีอัตราส่วนการป้อนก๊าซทั้งสองด้วยอัตราส่วนทางทฤษฎี มวลสารสัมพันธ์ (Stoichiometry ratio) หรือแบบอัตราส่วนเท่ากัน (3) การให้ความชื้นแก่อิเล็กโทรด ด้านเดียว หรือทั้งสองด้าน หรือไม่ให้เลย รวมถึง (4) การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ตามเวลาเมื่อ เปลี่ยนกรรมวิธีการ By pass ก๊าซเชื้อเพลิงจากระบบจ่ายความชื้น หากเกิดการลดลงของความต่าง ศักย์ ผลการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ (Test Station) ทำให้ทราบกราฟ ประสิทธิภาพ (Polarization curve) และทราบค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์สูงสุด ที่ความหนาแน่นกระแสที่ต้องการ ซึ่งนำไปใช้เป็นสภาวะในการทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เดี่ยวและห่อเซลล์เชื้อเพลิง 5 ชั้น เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ตามเวลา และผลการ By pass ก๊าซเชื้อเพลิงจากเครื่องทำความชื้นเพื่อลดปัญหาการท่วมของน้ำในเซลล์เชื้อเพลิง

การทำความชื้นที่ทั้งด้านออกซิเจน (แคโทด) และไฮโดรเจน (แอโนด) จะให้ประสิทธิภาพ สูงสุด และหากอุณหภูมิเครื่องทำความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้เพิ่มขึ้น แต่พบว่กำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์สูงสุดเกิดที่อัตราการไหลไม่สูงนัก นอกจากนี้อัตราส่วนการป้อน ก๊าซทั้งสองด้วยอัตราส่วนทางทฤษฎีมวลสารสัมพันธ์ (Stoichiometry ratio) หรือแบบอัตราส่วน

เท่ากัน ไม่ให้ประสิทธิภาพที่ต่างกัน เพราะการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิงด้านแคโทดจะไม่ได้ รับผลกระทบจากความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาหากมีไนโตรเจนปนอยู่ด้วยดังเช่นกรณีใช้อากาศจ่าย

การทดสอบ By pass ก๊าซเชื้อเพลิงทั้งสองจากเครื่องทำความชื้น พบว่า การเพิ่มอัตราการ ไหลก๊าซออกซิเจนเป็นสองเท่าในขณะที่ By pass จากเครื่องทำความชื้น จะลดปัญหาความต่างศักย์ ตกเนื่องจากน้ำท่วมได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีการให้ออกซิเจนเท่าเดียว และที่ระยะเวลาทำงานของ หอเซลล์ยาวนานขึ้นหรืออุณหภูมิสูงขึ้น ระยะเวลาในการ By pass จะลดลง และหอเซลล์ 5 ชั้น สามารถทำงาน ที่ระดับความต่างศักย์ 2.34 – 2.37 Volt ได้นานถึง 360 นาที ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา ในภาคทฤษฎีด้วย โดยการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในหอเซลล์ที่สภาวะการทำงานต่างกัน จากอัตราการเกิดน้ำด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และสมดุลของน้ำที่เข้าสู่เซลล์ สะสมหรือลดลงในเซลล์ และออกจากเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้สามารถทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำในหอเซลล์เชื้อเพลิงได้ ผล การทำนายแสดงว่าปริมาณน้ำที่สะสมในเซลล์ที่ความหนาแน่นกระแส 80 mA/cm² อยู่ในช่วง 9.64 - 11.12 กรัม/ ชั่วโมง และเมื่อเปรียบเทียบกรณีให้ความชื้นและไม่ให้ความชื้นแก่ก๊าซออกซิเจน พบว่า กรณีหลังสามารถลดปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในเซลล์ลงได้ 9.45%

สายชล สิทธิพงศ์, [14] ได้ออกแบบและสร้างต้นแบบระบบควบคุมการทำงานสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง แบบ Stack ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ได้สร้างระบบควบคุมและทดสอบการทำงานเซลล์ เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการและระบบควบคุมการทำงานที่สร้างขึ้นเอง ซึ่งประยุกต์มาจากระบบแรก ระบบควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นเองทำงานโดยอัตโนมัติ ซึ่งควบคุมด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถควบคุมให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยประสิทธิภาพ การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับปัจจัย อัตราการไหลของก๊าซ อุณหภูมิ ความชื้น และความดัน การทำงาน การทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ เชื้อเพลิง ระหว่างระบบควบคุมและทดสอบการทำงานเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการกับระบบ ควบคุมการทำงานที่สร้างขึ้นเอง ผลการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1 ชั้น มีประสิทธิภาพการทำงาน ไกล่เคียงกัน เซลล์เชื้อเพลิงที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบที่สร้างขึ้นเอง ให้กำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 194.97 mW/cm² ที่อุณหภูมิการทำงาน 37 - 42 องศาเซลเซียส ความดัน 2 บาร์เกจ ประสิทธิภาพ เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 3 และ 5 ชั้น ระบบควบคุมการทำงานที่สร้างขึ้นเองให้ประสิทธิภาพสูงกว่าระบบ ควบคุมและทดสอบการทำงานในห้องปฏิบัติการอย่างชัดเจน โดยให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 414.25 mW/cm² และ 752.80 mW/cm² ตามลำดับ เมื่อความดันเท่ากับ 2 บาร์เกจ ช่วงอุณหภูมิการทำงาน ที่เหมาะสม 60 - 70 องศาเซลเซียส

วรารณ เตปิน และคณะ [15] ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมระบบเซลล์เชื้อเพลิง โดยจะเป็นการพัฒนาควบคุมและการวัด การแสดงผล และการบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติโดยใช้ คอมพิวเตอร์ เพื่อความสะดวก และเป็นส่วนเสริมให้กับการดำเนินงานวิจัย จึงได้แบ่งการดำเนินการ ออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การออกแบบและสร้างวงจรไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และ (2) การ ออกแบบโปรแกรมเพื่อการรับข้อมูล ส่งสัญญาณควบคุม บันทึก และเรียกดูข้อมูลของตัวแปรในระบบ จากการออกแบบและผลการทดสอบระบบควบคุม พบว่าระบบสามารถส่งสัญญาณควบคุม รับค่า

สัญญาณจากอุปกรณ์ที่ทำการวัด และประมวลผลข้อมูลได้อย่างถูกต้อง โดยมีค่าความถูกต้องไม่เกิน 0.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งระบบเครื่องมือวัดที่สามารถควบคุมได้ในโครงการนี้ ประกอบด้วย ระบบควบคุมอัตราการป้อนแก๊ส มีค่าความถูกต้อง 0.56 เปอร์เซ็นต์ การวัดค่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์ ระบบวัดค่าทางไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า คือ ระดับกระแสและแรงดัน โดยมีค่าความถูกต้อง 0.2 และ 0.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ รวมถึงโปรแกรมการส่งสัญญาณควบคุม แสดงผล บันทึก และเรียกดูข้อมูล โดยใช้โปรแกรม LabVIEW 5.1 ทำให้ระบบมีความสะดวกในการใช้งาน

จากผลการดำเนินงานทั้งหมดของโครงการ พบว่าระบบสามารถทำงานตามคำสั่งและสามารถแสดงผลการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่างถูกต้อง สำหรับแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคต สามารถที่จะพัฒนาไปสู่ระบบควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ที่สมบูรณ์ในลักษณะ supervisory control and monitoring ที่สามารถรองรับระบบขนาดใหญ่ขึ้น หรือมีความซับซ้อนมากขึ้นได้ อย่างเหมาะสม

จากการทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เน้นเป็นการวิจัยในส่วนของการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเป็นหลัก และอุปกรณ์ในส่วนของการควบคุมเซลล์เชื้อเพลิงโดยส่วนใหญ่จะเป็นเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็ก (สเกลวัตต์) แต่ในส่วนของการวิจัยเชิงระบบนั้น ยังไม่มีการวิจัยเป็นรูปธรรมภายในประเทศ “การประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ” จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยสำหรับประเทศไทย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ผู้วิจัยได้ทำการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ ขนาด 1.2 KW ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับพื้นที่เฉพาะ เช่น พื้นที่ห่างไกล พื้นที่เกาะ หรือสำหรับผลิตไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในเรือ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้แบ่งเนื้องานออกเป็น 3 ตอน ได้แก่

1. การประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ
2. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง
3. การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

ตอนที่ 1 การประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

ระบบผลิตเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระที่พัฒนาขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบหลักประกอบด้วย เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell, FC) ขนาด 1,200 วัตต์ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (DC/AC inverter) ขนาด 1,000 วัตต์ และภาระไฟฟ้าแบบปรับค่าได้ (Variable AC Load) ส่วนประกอบหลักของระบบฯ แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) ของบริษัท Ballard รุ่น Nexa Power Module ขนาด 1,200 วัตต์ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวมี DC/DC Converter อยู่ในตัวซึ่งทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

พารามิเตอร์	ค่า
กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิง	1,200 W
ช่วงของแรงดันไฟฟ้า	22 – 50 VDC
แรงดันไฟฟ้าที่สภาวะทำงาน	26 VDC
กระแสไฟฟ้าที่สภาวะทำงาน	46 ADC
ปริมาณไฮโดรเจนที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด	18.5 sl/min

เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าในระบบเซลล์เชื้อเพลิง (รูปที่ 11) นั้นทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในโครงการนี้เป็นเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบ 24 V คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 11 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

พารามิเตอร์	ค่า
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า	21 - 32 VDC
แรงดันไฟฟ้าที่สภาวะทำงาน	24 VDC
แรงดันไฟฟ้าขาออก	220 VAC
ฮาร์มอนิกส์	4%
Power Factor	>0.98
กระแสไฟฟ้าสูงสุด	110%
อุณหภูมิทำงาน	0 - 45°C

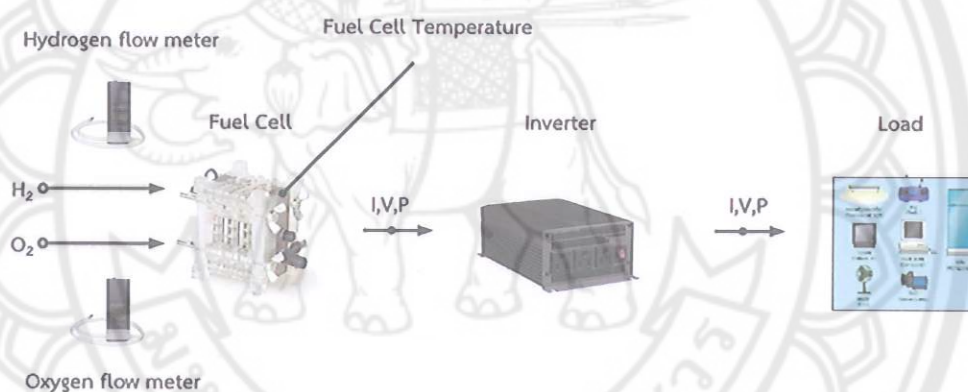
ระบบตรวจวัดและบันทึกข้อมูล

การตรวจวัดและจัดเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อแบบอิสระ จำแนกออกเป็น 2 ด้านได้แก่ ด้านไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ กำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้า เป็นต้น และด้านเคมี เช่น ปริมาณไฮโดรเจน ปริมาณออกซิเจน เป็นต้น โดยข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นจะถูกจัดเก็บลงในเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติทุกๆ 5 นาที (ตารางที่ 3) และตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจวัด (รูปที่ 12 และรูปที่ 13)

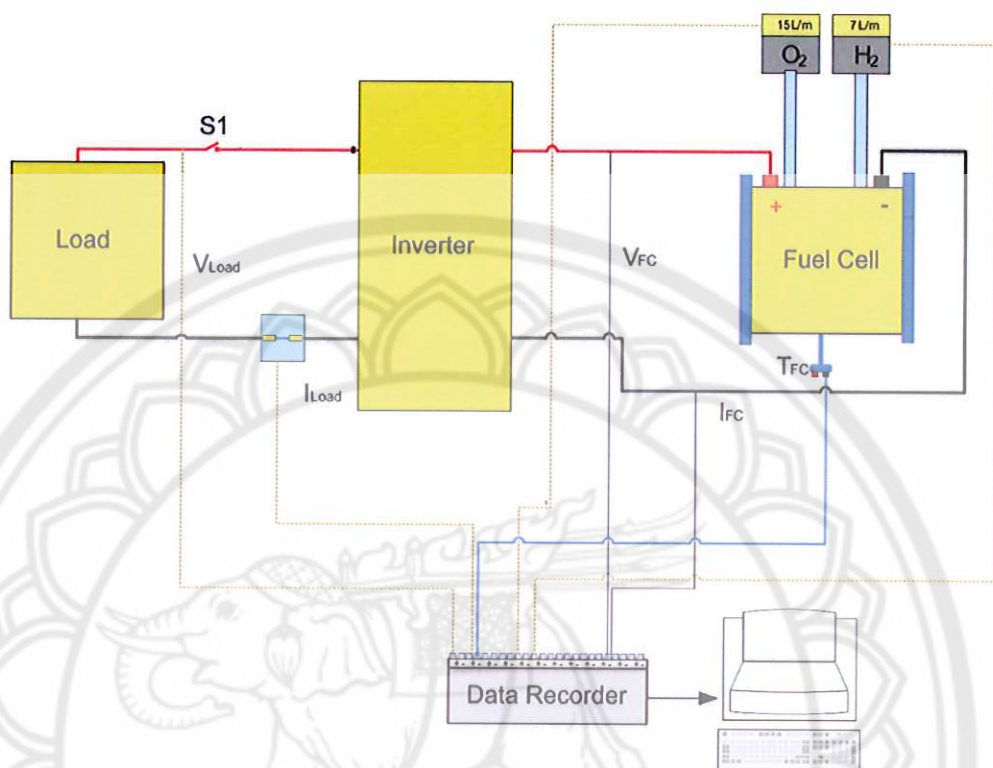
ตารางที่ 3 การจัดเก็บข้อมูลและตัวแปรที่ใช้สำหรับการทดสอบ

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	เฉลี่ย	หน่วย	หมายเหตุ
อุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง	T_{FC}	5 นาที	°C	Temp. Sensor
แรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้	V_{FC}	5 นาที	V	Power Meter
กระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้	I_{FC}	5 นาที	A	Power Meter
กำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้	P_{FC}	5 นาที	A	Power Meter

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	เฉลี่ย	หน่วย	หมายเหตุ
แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้า	V_{Load}	5 นาที	V	Power Meter
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้า	I_{Load}	5 นาที	A	Power Meter
กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้า	P_{Load}	5 นาที	A	Power Meter
ปริมาณไฮโดรเจน	V_{H_2}	5 นาที	L/min	Flow meter
ปริมาณออกซิเจน	V_{O_2}	5 นาที	L/min	Flow meter



รูปที่ 12 การติดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ



รูปที่ 13 จุดตรวจวัดสำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

การวิเคราะห์สมรรถนะด้านเทคนิคของเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

ในการวิเคราะห์สมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพของระบบฯ และการหาการสูญเสียพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปความร้อน

การหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง, [16]

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง หาได้จากกฎข้อที่หนึ่งของฟาราเดย์ แสดงดังสมการที่ 1

$$\eta_{FC} = \mu_F \frac{V_C}{1.48} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

η_{FC}	คือ	ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (%)
μ_F	คือ	การใช้งานของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน (0.95)
V_C	คือ	แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ (V)

การหาประสิทธิภาพเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสามารถหาได้จากสัดส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระไฟฟ้า ต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง แสดงดังสมการที่ 2

$$\eta_{INV} = \frac{I_{Load} \times V_{Load} \cos \varphi}{I_{FC} \times V_{FC}} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ		
I_{Load}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ภาระไฟฟ้า (A)
I_{FC}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง (A)
V_{Load}	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ภาระไฟฟ้า (V)
V_{FC}	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง (V)

การหาประสิทธิภาพของระบบ,

ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระสามารถหาได้จากสมการที่ 3

$$\eta_{SYS} = \eta_{FC} \times \eta_{INV} \quad (3)$$

การหาการสูญเสียพลังงานด้านความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง, (Thermal Loss; Eloss) [16]

การสูญเสียพลังงานทางด้านความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการที่ 4

$$E_{loss} = P_{FC} \left(\frac{1.25}{V_C} - 1 \right) \cdot t \quad (4)$$

เมื่อ

E_{loss}	คือ	การสูญเสียพลังงานทางด้านความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง (Wh)
P_{FC}	คือ	กำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ (W)
t	คือ	เวลา (hr)

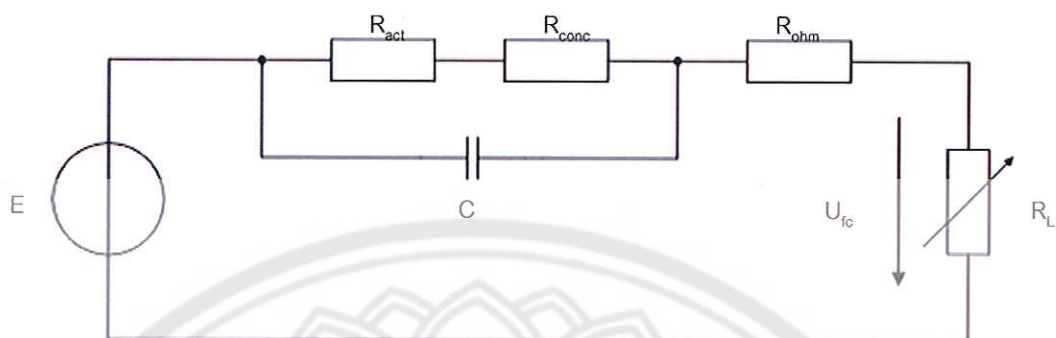
ตอนที่ 2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

สำหรับเนื้อหาในส่วนของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนได้แก่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า สำหรับงานวิจัยนี้ โปรแกรม Matlab/Simulink จะถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และใช้สำหรับการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการประเมินผลทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระสำหรับการประเมินผลแบบระยะยาว (Long Term Performance Evaluation)

Matlab เป็น ภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่มาพร้อมด้วยสภาพแวดล้อมการทำงานเชิงโต้ตอบ ซึ่งสามารถคำนวณคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วมากกว่าภาษาคอมพิวเตอร์สมัยก่อน เช่น ภาษา C, C++ หรือ Fortran Matlab เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่ใช้สำหรับคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Computing) แสดงผลกราฟฟิก และเขียนแอปพลิเคชัน ทำให้สามารถคำนวณผลลัพธ์ พัฒนาอัลกอริทึม สร้างแบบจำลอง และแอปพลิเคชันได้ง่ายและรวดเร็วมาก ภายในตัว Matlab ประกอบด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ ทูลบ็อกซ์ (Toolbox : กลุ่มฟังก์ชันสำเร็จรูปในแต่ละสาขาวิชา) และฟังก์ชันพื้นฐานจำนวนมาก ทำให้การวิเคราะห์ทำได้หลากหลายวิธี พร้อมกับคำตอบที่รวดเร็วกว่า โปรแกรมตารางคำนวณ(Spreadsheet) หรือภาษาคอมพิวเตอร์สมัยก่อน เช่น C, C++, Fortran, Java และอื่นๆ นอกจากนี้ Matlab ยังสามารถไปประยุกต์ใช้งานได้หลายสาขามาก ทั้ง การประมวลผลสัญญาณ(Signal Processing) การสื่อสาร(Communication) การประมวลผลภาพและวิดีโอ(Image and Video Processing) ระบบควบคุม(Control System) การวัดและควบคุม(Instruments and Control) การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์(Economic) การคำนวณทางชีววิทยา(Biology) และอื่นๆ มีนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรหลายล้านคนทั้งในแวดวงการศึกษาและอุตสาหกรรมที่ใช้ Matlab ในการคำนวณเชิงตัวเลข และนอกจากนี้ Simulink จะถูกนำมาใช้ในการพัฒนาบล็อกสำหรับอุปกรณ์ประกอบในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง

โดยทั่วไป แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ถูกพัฒนาขึ้นมานั้นมี 4 แบบจำลอง ซึ่งประกอบไปด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ stack voltage, the anode flow, the cathode flow และ the membrane hydration แต่สำหรับงานวิจัยนี้สนใจในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ stack voltage ซึ่ง block diagram ของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ stack voltage แสดงดังรูปที่ 14 โดยแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (U_{FC}) จะเป็นฟังก์ชันของ กระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ความดันที่ขั้วแคโทด อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง และความชื้นภายในเมมเบรน ซึ่งสามารถถูกนำเสนอด้วยการสูญเสียของเซลล์เชื้อเพลิง 3 ส่วน ได้แก่ The activation loss, ohmic loss และ concentration loss.



รูปที่ 14 วงจรสมมูลของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนรูปจากพลังงานทางเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ซึ่งพลังงานเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์ Gibbs free energy (Δg_f) สำหรับไฮโดรเจนและออกซิเจนซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์สามารถหาได้จาก [16]

$$\Delta g_f = g_f \text{ of products} - g_f \text{ of reactants} = (g_f)_{H_2O} - (g_f)_{H_2} - (g_f)_{O_2} \quad (5)$$

การเปลี่ยนแปลงใน Gibbs free energy นั้นเปลี่ยนแปลงตามพารามิเตอร์หลักสองตัวได้แก่ อุณหภูมิและความดัน

$$\Delta g_f = \Delta g_f^0 - \bar{R}T_{fc} \ln \left[\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right] \quad (6)$$

Δg_f^0 คือ การเปลี่ยนของ Gibbs free energy ที่สภาวะความดันมาตรฐาน (1 bar) ซึ่ง มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง (T_{fc}) ในหน่วยของเคลวิน ในส่วนของความดันของไฮโดรเจน (p_{H_2}) ออกซิเจน (p_{O_2}) และน้ำ (p_{H_2O}) อยู่ในหน่วยของ $\bar{R}$ คือค่าคงที่ของก๊าซ

สำหรับการเปลี่ยนรูปจาก Gibbs free energy เป็น พลังงานไฟฟ้า (electrical energy) ซึ่งงานของไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของประจุในวงจรไฟฟ้าแสดงดังสมการ

$$\text{Electrical work done} = -2FE \quad (7)$$

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ และ E คือค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง และสามารถเปลี่ยนรูปของงานของไฟฟ้าเป็น Gibbs free energy ถ้าระบบนั้นเป็นระบบผันกลับได้แสดงดังสมการ

$$\Delta g_f = -2FE \quad (8)$$

นำสมการที่ (8) แทนที่ในสมการที่ (6) เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง E ได้ดังนี้

$$E = \frac{-\Delta g_f}{2F} = \frac{-\Delta g_f^0}{2F} + \frac{RT_{fc}}{2F} \ln \left[\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right] \quad (9)$$

ในการใช้งานจริงเซลล์เชื้อเพลิงนั้นไม่เป็นระบบผันกลับได้ การเปลี่ยนแปลงของ Gibbs free energy นั้นเปลี่ยนแปลงจากสภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 25 °C และความดัน 1 atm ค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 1.229 V ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิดังสมการที่ (10)

$$-\frac{\Delta g_f^0}{2F} = 1,229 + (T_{fc} - T_0) \left(\frac{\Delta S^0}{2F} \right) \quad (10)$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความร้อนจำเพาะกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (ΔS^0) ของปฏิกิริยาที่แสดงดังสมการที่ (11)

$$-\frac{\Delta g_f^0}{2F} = 1,229 - \frac{298,15 * \Delta S_0^0}{2F} + \left(\frac{\Delta S_0^0}{2F} \right) T_{fc} \quad (11)$$

แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในอุดมคติสามารถหาได้สมการที่ (12)

$$E = 1,229 - 8,5 * 10^{-4} (T_{fc} - 298,15) + 4,308 * 10^{-5} T_{fc} (\ln(p_{H_2}) + 0,5 \ln(p_{O_2})) \quad (12)$$

โดยทั่วไปแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้งานจริง (actual fuel cell voltage, U_{fc}) นั้นจะมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 12 ผลของความแตกต่างนั้นเนื่องมาจากการสูญเสียของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งประกอบไปด้วย โพลาริเซชันทางเคมี (R_{act}) โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (R_{ohm}) และ โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (R_{conc}) จากการสูญเสียดังกล่าวของแรงดันไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 13

$$U_{fc} = E - U_{act} - U_{ohm} - U_{conc} \quad (13)$$

โพลาริเซชันทางเคมี (chemical polarization)

โพลาริเซชันทางเคมี (chemical polarization) หรือ activation polarization (U_{act}) จะเกิดในช่วงแรกของการลดลงของความต่างศักย์คร่อมเซลล์เชื้อเพลิง โดยเกิดขึ้นเนื่องจากอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate) มีค่าต่างดังปฏิกิริยาที่ช้าอโนด ความสัมพันธ์ระหว่าง U_{act} และความหนาแน่นของกระแส (i) สามารถหาได้จาก Tafel equation [16].

$$U_{act} = a \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (14)$$

สมการของ Tafel สามารถใช้ได้จาก $i > i_0$ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบอุณหภูมิต่ำเช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) เป็นต้น, ค่าเริ่มต้นของ i_0 มีค่าประมาณ 0.1 mA/cm^2 [16]. อย่างไรก็ตามในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น U_{act} สามารถหาได้จากสมการ

$$U_{act} = u_0 + u_a (1 - e^{-c_1 i}) \quad (15)$$

เมื่อ

u_0 คือ การลดลงของแรงดันไฟฟ้าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0
 u_a และ c_1 เป็นค่าคงที่สามารถหาได้จากการทดลอง

โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (The ohmic loss)

โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานนั้นเกิดขึ้นจากความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดเนื่องมาจากองค์ประกอบของตัวเซลล์เอง ซึ่งประกอบด้วย ความต้านทานของขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และองค์ประกอบที่เป็นอิเล็กโทรดของเซลล์ โดยเฉพาะกรณีเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนองค์ประกอบที่มีความต้านทานมาก คือ เมมเบรนที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งนำไอออนได้น้อยกว่าสารละลายกรดหรือเบส โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานเกิดในช่วงกลางของกราฟโพลาริเซชัน แสดงสมการที่ (16) ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กับความหนาแน่นของกระแส (current density) [17]

$$U_{ohm} = i \times R_{ohm} \quad (16)$$

โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานเป็นฟังก์ชันของการนำไฟฟ้าของเมมเบรน (σ_m) และความหนาของเมมเบรน (t_m) [17].

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (17)$$

การนำไฟฟ้าของเมมเบรน (σ_m) เป็นฟังก์ชันของปริมาณน้ำภายในเมมเบรน (λ_m) และอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (18) ส่วนค่าของ λ_m มีค่าระหว่าง 0 ถึง 14 ซึ่งแทนค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 0% ถึง 100% [17]

$$\sigma_m = (b_{11}\lambda_m - b_{12}) * e^{\left(b_2 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_f}\right)\right)} \quad (18)$$

ค่าคงที่ b_{11} , b_{12} and b_2 สามารถหาได้จากการทดลอง (empirically) [17].

โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (The Concentration losses)

โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (U_{conc}) เกิดในช่วงท้ายสุดของกราฟโพลาริเซชัน ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง การลดลงของความต่างศักย์เนื่องมาจากข้อจำกัดในการจ่ายเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดซ์ให้กับเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งจำเป็นต้องใช้เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ (diffusion) แก๊สไปยังขั้วไฟฟ้า เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในช่วงที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง และผลของปฏิกิริยา (product) ซึ่งเกิดที่ขั้วไฟฟ้ามีผลให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ลดลงหรืออีกนัยหนึ่งคือ ความดันของสารตั้งต้นลดลง เป็นผลให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามสมการของเนิร์นสต์ สำหรับการลดลงของแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากความเข้มข้นสามารถหาได้จากสมการ [17]

$$U_{conc} = i \left(c_2 \frac{i}{i_{max}} \right)^{c_3} \quad (19)$$

เมื่อ c_2 และ c_3 คือค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่ดังกล่าวสามารถหาได้จากการทดลอง และ i_{max} คือค่าสูงสุดของความหนาแน่นของกระแส ซึ่งค่าของ c_2 , c_3 และ i_{max} ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิง [17].

นำสมการที่ (15), (16) และ (19) แทนลงในสมการที่ (16) ได้ดังนี้

$$U_{fc} = E - [u_0 + u_a(1 - e^{-c_i})] - [iR_{ohm}] - \left[i \left(c_2 \frac{i}{i_{max}} \right)^{c_3} \right] \quad (20)$$



ตอนที่ 3 การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. การประเมินปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี จากตอนที่ 1 (กิโวลต์ชั่วโมง)
 2. การหาค่าสมมูลรายปีของระบบฯ ตลอดช่วงอายุการใช้งานของระบบ
- การประเมินค่าไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิง จะพิจารณาราคาการลงทุนของระบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ก. เงินลงทุนเริ่มแรกประกอบด้วย

- 1) เซลล์เชื้อเพลิง
- 2) แบตเตอรี่
- 3) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า
- 4) อุปกรณ์ติดตั้งอื่นๆ เช่น สายไฟ สวิตช์ไฟฟ้า ฯลฯ
- 5) ค่าแรงในการติดตั้ง

ข. เงินลงทุนประจำปีได้แก่

- 1) ค่าซ่อมบำรุง
- 2) ค่าอะไหล่

ข้อมูลที่ใช้ในสมการคำนวณการหาราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย

- 1) ราคาเริ่มต้นของการติดตั้งระบบฯ (Capital Cost, C_c)
- 2) ค่าเดินระบบและซ่อมบำรุงประจำปี (Operation & Maintenance Cost, C_{om})
- 3) ต้นทุนทดแทนของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Replacement Cost, C_{rm})
- 4) ต้นทุนทดแทนของระบบย่อย (Subsystem Replacement Cost, C_{rs})
- 5) อายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง (PV Array Life Time, Y_m)
- 6) อายุการใช้งานของระบบย่อย (Subsystem Life Time, Y_s)
- 7) ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้ตลอดทั้งปี (PV System Energy Output, E_y)

ในการคำนวณจะทำการพิจารณาในช่วงระยะเวลา Y ปี อัตราส่วนลด (Discount Rate) เท่ากับ $d\%$ อัตราเงินเฟ้อ (Inflation Rate) เท่ากับ i เปอร์เซนต์

การวิเคราะห์ประกอบด้วย

1. การหามูลค่าปัจจุบันของต้นทุนทดแทนทั้งหมด (C_r) ของเซลล์เชื้อเพลิงและระบบย่อยจากสมการ

$$C_r = C_{rm} \sum_{i=1}^{n_m} \left[\frac{(1+i)^{y-1}}{(1+d)^{iy_m}} \right] + C_{rs} \sum_{i=1}^{n_s} \left[\frac{(1+i)^{y-1}}{(1+d)^{iy_s}} \right] \quad (21)$$

n_m	คือ	จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง
n_s	คือ	จำนวนระบบย่อย
C_{rm}	คือ	ราคาเซลล์เชื้อเพลิงที่เปลี่ยนทดแทน (บาท)
C_{rs}	คือ	ราคาระบบย่อยที่เปลี่ยนทดแทน (บาท)

2. การหามูลค่าปัจจุบันการเดินระบบและซ่อมบำรุง

$$C_s - C_{rm} \times P_a \quad (22)$$

P_a คือ ค่าตัวปรับค่าเข้าสู่มูลค่าในปัจจุบันของระบบ (Present Worth Factor) แสดงดังตาราง 4

$$P_a = \frac{(1+d)^Y + 1}{d(1+d)^Y} \quad (23)$$

ตารางที่ 4 ตัวคูณปรับค่าเข้าสู่มูลค่าปัจจุบัน

อัตราส่วนลด (%)	ตัวคูณปรับค่าเข้าสู่ปัจจุบันสำหรับจำนวนปีที่พิจารณา					
	5	10	15	20	25	30
0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
5	4.3	7.7	10.4	12.5	14.1	15.4
10	3.8	6.1	7.6	8.5	9.1	9.4
15	3.3	5.0	5.9	6.3	6.5	6.6
20	3.0	4.2	4.7	4.9	5.0	5.0

3. การคำนวณราคาตลอดช่วงอายุการใช้งานของระบบ (Life Cycle Cost, LCC)

$$LCC = C_c + C_r + C_a - C_s \quad (24)$$

C_c คือ ราคาเริ่มต้นของการติดตั้งระบบฯ (บาท)

C_s คือ มูลค่าซากของระบบฯ (บาท)

4. การคำนวณค่าสมมูลประจำปีของราคาระบบตลอดช่วงอายุการใช้งานของระบบ (Annual Equivalent of the Life Cycle Cost, ALCC)

$$ALCC = LCC/P_a \quad (25)$$

5. การคำนวณราคาไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจากสมการ

$$C_w = ALCC/E_y \quad (26)$$

Q_y คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้ตลอดทั้งปี ต่อหนึ่งตารางเมตร

4.2 การศึกษาทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

การพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงฯ ในงานวิจัยนี้มีเงื่อนไขในการพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ราคาเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 50,000 บาท/กิโลวัตต์
2. ราคาอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ในระบบคิดรวมภาษีมูลค่าเพิ่ม 7 เปอร์เซ็นต์
3. อัตราส่วนลดเท่ากับ 7.10 เปอร์เซ็นต์ต่อปี
4. อัตราเงินเฟ้อเท่ากับ 2.16 เปอร์เซ็นต์ต่อปี (อ้างอิงจาก ธนาคารแห่งประเทศไทย ณ เดือน กรกฎาคม 2557)
5. มูลค่าซากของระบบ ฯ คิดที่ 5 เปอร์เซ็นต์ของเงินลงทุนติดตั้งระบบ
6. ใช้มูลค่าเงินในปี 2557

ตารางที่ 5 อายุการใช้งานของอุปกรณ์และค่าบำรุงรักษาต่อปี

อุปกรณ์	อายุการใช้งาน (ปี)	ค่าบำรุงรักษาคิดเป็น % ของราคาอุปกรณ์
เซลล์เชื้อเพลิง	10	1.00
เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า	10	1.00
แบตเตอรี่	5	1.00
สายไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ	10	1.00

บทที่ 4

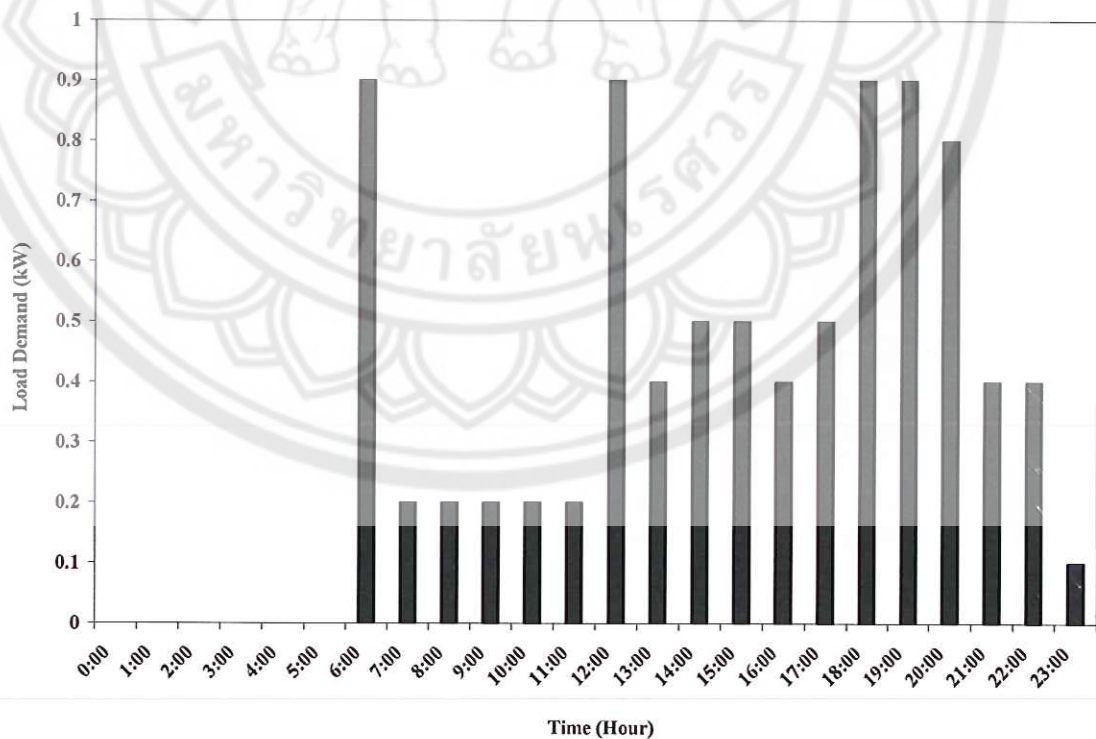
ผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการทดสอบของการศึกษาวิจัยการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระนั้นแบ่งออกเป็น 3 ตอนได้แก่ 1) การประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ 2) การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง 3) การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

ตอนที่ 1 ผลการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

ภาระไฟฟ้าสำหรับการศึกษาวิจัย

การใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่นั้นมีการใช้ที่ค่อนข้างแตกต่างกันทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ สภาพภูมิอากาศ ราคาค่าไฟฟ้า รวมไปถึงการนำไปใช้งานในแต่ละรูปแบบ เช่น การใช้งานเพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับสถานีสื่อสาร การใช้งานสำหรับบ้านเรือน หรือการใช้งานสำหรับเครื่องเรือน ภัยสึนามิ เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้จำลองสภาพการภาระไฟฟ้าภายในอาคารทดสอบ ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน (ดังรูปที่ 15)

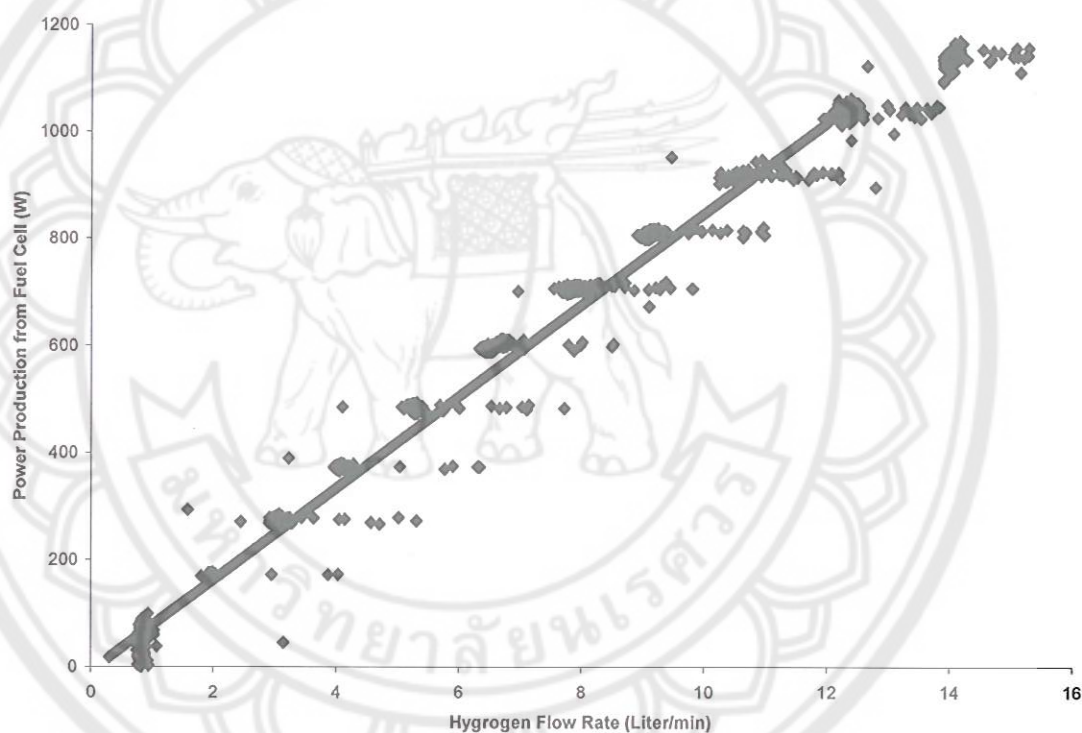


รูปที่ 15 การจำลองสภาพของภาระไฟฟ้า

จากรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดของวันมีค่าเท่ากับ 900 วัตต์ ช่วงเช้า เที่ยง และตอนเย็นเนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นของการประกอบอาหารจึงทำให้มีความต้องการไฟฟ้าค่อนข้างสูง ในขณะที่ความต้องการไฟฟ้าต่ำสุดนั้นเท่ากับ 100 วัตต์ โดยค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าต่อวันมีค่าเท่ากับ 8,600 วัตต์ชั่วโมงต่อวัน หรือคิดเป็น 3,139 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ไฮโดรเจนกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง

จากผลการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงแปรผันตรงกับปริมาณการใช้ไฮโดรเจนแสดงดังรูปที่ 16

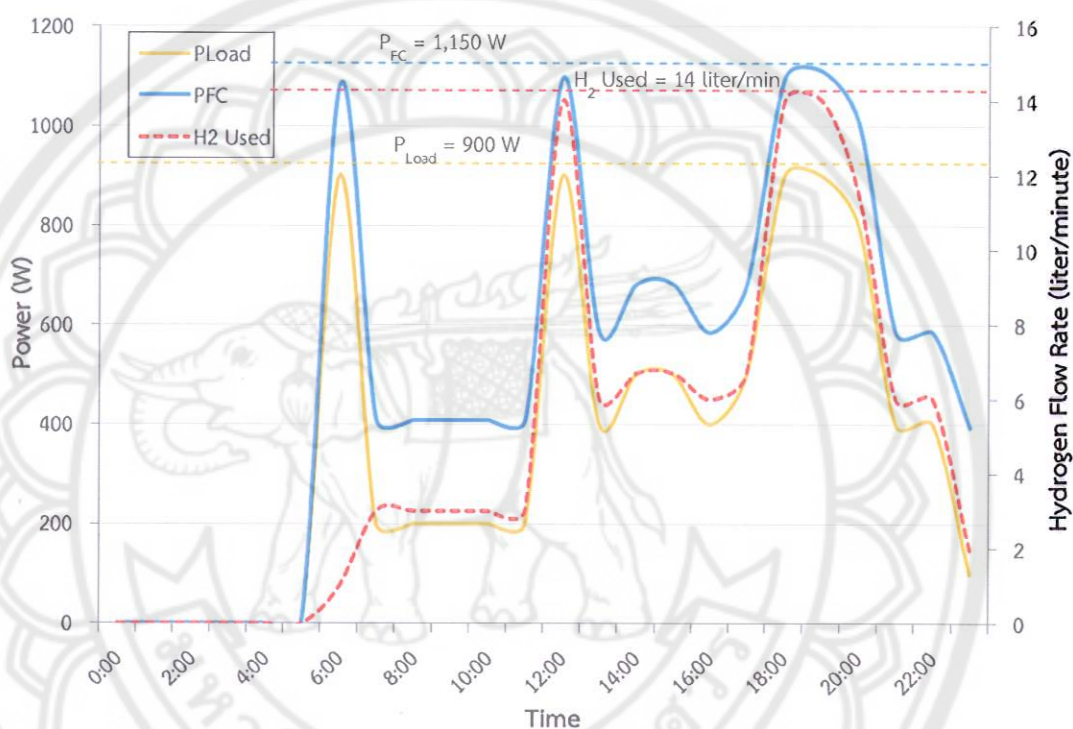


รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ไฮโดรเจนกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง

จากรูป 16 จะเห็นได้ว่าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1,200 วัตต์นั้นมียัตราการใช้ไฮโดรเจนประมาณ 16 liter/minute เมื่อเทียบกับข้อกำหนดทางด้านเทคนิคจากบริษัทผู้ผลิตจากตารางที่ 3.1 นั้นพบว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าที่กำลังสูงสุดนั้นน้อยกว่าประมาณ 2 liter/minute และปริมาณการใช้ไฮโดรเจนและการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นสามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังนี้ $y = 83.218x + 23.499$ เมื่อ y คือกำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ และ x คือปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง จากสมการพบว่าหากใช้ไฮโดรเจน 1 liter/minute เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 100 วัตต์

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้าและปริมาณการใช้ไฮโดรเจน

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้าและปริมาณการใช้ไฮโดรเจน แสดงดังรูปที่ 17

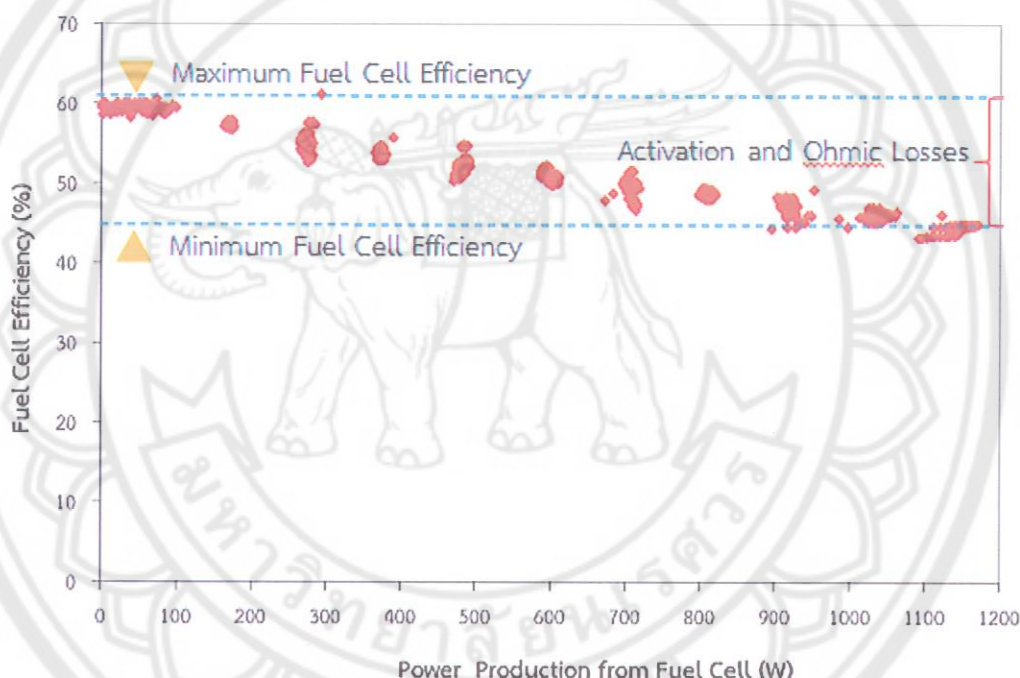


รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้าและปริมาณการใช้ไฮโดรเจน

จากรูปที่ 17 จะเห็นว่าปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะมีค่าสูงสุดที่ 1,150 วัตต์ เมื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายให้กับภาระไฟฟ้าที่ 900 วัตต์ ซึ่งมีการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเท่ากับ 14 ลิตรต่อนาที โดยตลอดทั้งวันพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงมีการผลิตพลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 12.2 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน เพื่อจ่ายให้กับภาระไฟฟ้า 8.6 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนรูปพลังงานจากไฟฟ้ากระแสตรงที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับในการจ่ายให้กับภาระไฟฟ้านั้นมีการสูญเสียพลังงาน 3.6 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงกับประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 18 จากรูปพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 60 ณ สภาวะแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด หรือไม่มีภาระไฟฟ้า ขณะที่เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1,200 วัตต์นั้นจะมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 45 เนื่องมาจากการสูญเสียภายในของเซลล์เชื้อเพลิงในส่วนของ Activation Loss และ Ohmic Loss ในการทำปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงนั่นเอง ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ในกรณีที่ต้องการให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นในส่วนของการออกแบบนั้นควรมีการออกแบบให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ประมาณร้อยละ 80 ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบุไว้ใน Specification

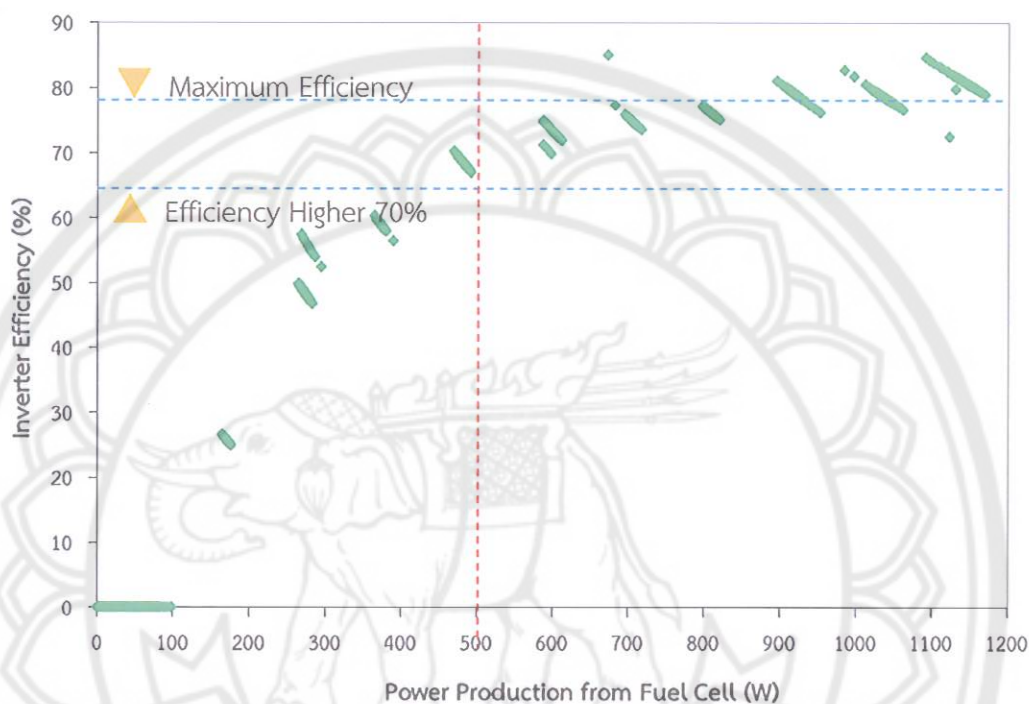


รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง
กับประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงกับประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 19 จากผลการทดสอบเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระพบว่าเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้างดงามมีประสิทธิภาพสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 82 เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1,200 วัตต์ ในขณะที่ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 70 เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงกว่า 500 วัตต์ ดังนั้นในการออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระควรมีการออกแบบให้มีการใช้กำลังไฟฟ้า

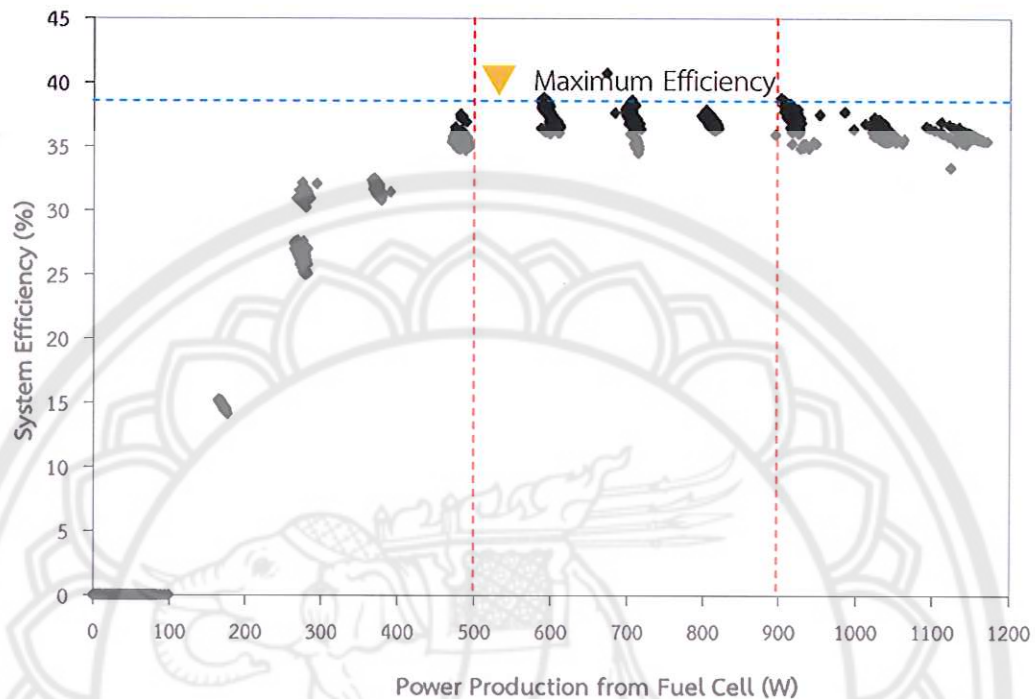
จากเซลล์เชื้อเพลิงสูงมากกว่าร้อยละ 40 ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบุใน Specification เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการเชื่อมต่อกับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าชนิดดังกล่าว อีกทั้งจะส่งผลให้เกิดการใช้งานระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระอย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุดอีกด้วย



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า กับประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

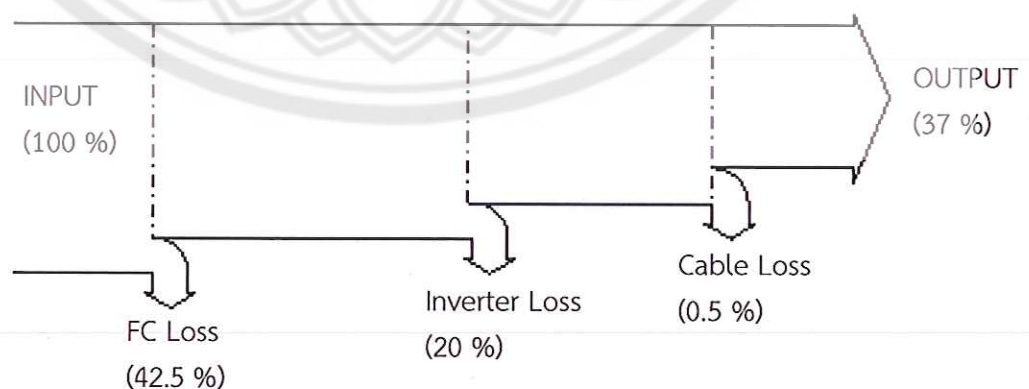
ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงกับประสิทธิภาพของระบบฯ แสดงดังรูปที่ 20 จากผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระพบว่าระบบฯ ดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 37 เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้ระหว่าง 500 - 900 วัตต์ ในขณะที่ประสิทธิภาพของระบบจะประสิทธิภาพลดลงเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงกว่า 900 วัตต์ เนื่องจากผลกระทบของ Ohmic loss ภายในเซลล์เชื้อเพลิงนั่นเอง ดังนั้นในการออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระควรมีการออกแบบให้มีการใช้กำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ระหว่างร้อยละ 40 - 90 ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบุใน Specification เพื่อให้เกิดการใช้งานระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระอย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า กับประสิทธิภาพของระบบฯ

การสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง, (Energy Loss; Eloss)

การสูญเสียพลังงานในระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระแสดงดังรูปที่ 21 จากผลการคำนวณพบว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงฯ นั้นมีการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ 7.6 หรือคิดเป็นร้อยละ 63 ที่การผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง 12.2 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน



รูปที่ 21 การสูญเสียพลังงานในรูปของระบบเซลล์เชื้อเพลิงฯ

การสูญเสียของพลังงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระสามารถจำแนกการสูญเสียจากอุปกรณ์หลักดังนี้

1. เซลล์เชื้อเพลิงนั้นเกิดจากปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงในการเปลี่ยนรูปจากพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าพบว่าการสูญเสียประมาณร้อยละ 42.5
2. การสูญเสียจากการแปลงไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าพบว่าการสูญเสียประมาณร้อยละ 20
3. การสูญเสียจากความต้านทานภายในสายไฟฟ้าที่เลือกใช้ พบว่าการสูญเสียประมาณร้อยละ 0.5

ตอนที่ 2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะเป็นการคำนวณแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่การทำงานในลักษณะการใช้งาน เช่นที่ ความดัน อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง และความชื้นของเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่าต่างๆกันตามลักษณะการใช้งานจริง โดยการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้จะเน้นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของเซลล์เชื้อเพลิงเท่านั้น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นนั้นเป็นแบบวิธีไฮบริด เอ็มไพริคัล (Semi-empirical method) ซึ่งสมการที่ใช้สำหรับ Semi-empirical แสดงได้ดังนี้

$$U_{fc} = E - [u_0 + u_a(1 - e^{-c_1 i})] - [iR_{ohm}] - \left[i \left(c_2 \frac{i}{i_{max}} \right)^{c_3} \right] \quad (4.1)$$

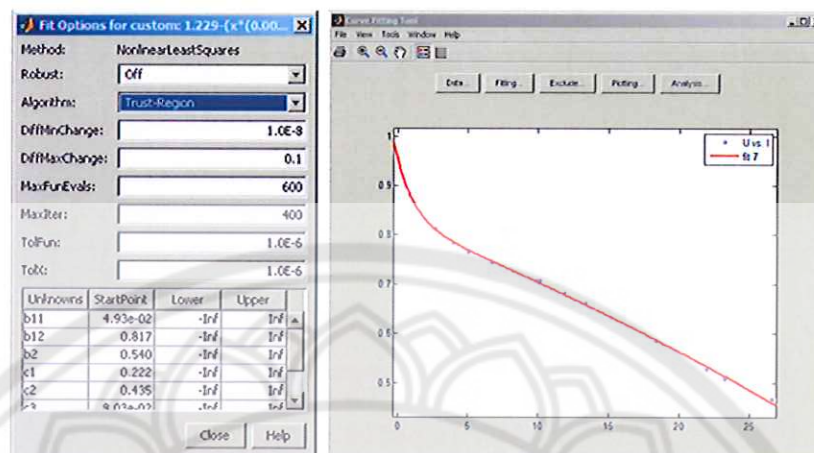
ความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงในส่วนของ Ohmic loss นั้นเป็นส่วนระหว่างความหนาของเมมเบรนกับ Membrane Conductivity สามารถหาได้จากสมการที่ 4.2

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (4.2)$$

และ Membrane Conductivity สามารถหาได้จาก สมการที่ 4.3

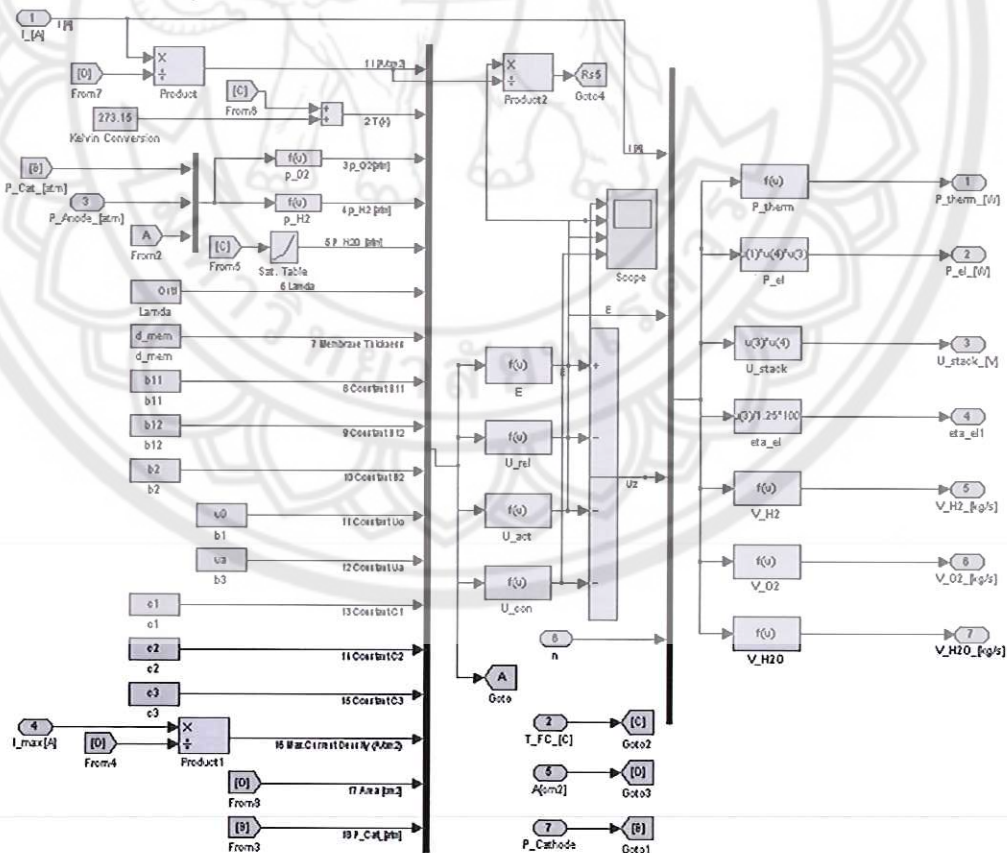
$$\sigma_m = (b_{11}\lambda_m - b_{12}) * e^{\left(b_2 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_K} \right) \right)} \quad (4.3)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่ามีพารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่หลายตัวดังนี้ U_0 , U_a , C_1 , C_2 , C_3 , B_{11} , B_{12} and B_2 ในงานวิจัยนี้พารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ต่างๆ นั้นจะหาจากการทำ Curve Fitting ด้วย Curve Fitting Tool จาก MATLAB โปรแกรม โดยจะใช้ข้อมูลในตอนต้นที่ 1 เป็นข้อมูลขาเข้าในการทำ Curve Fitting โดยการทำ Curve Fitting แสดงดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 การหาพารามิเตอร์คงที่ด้วยวิธีการทำ Curve Fitting

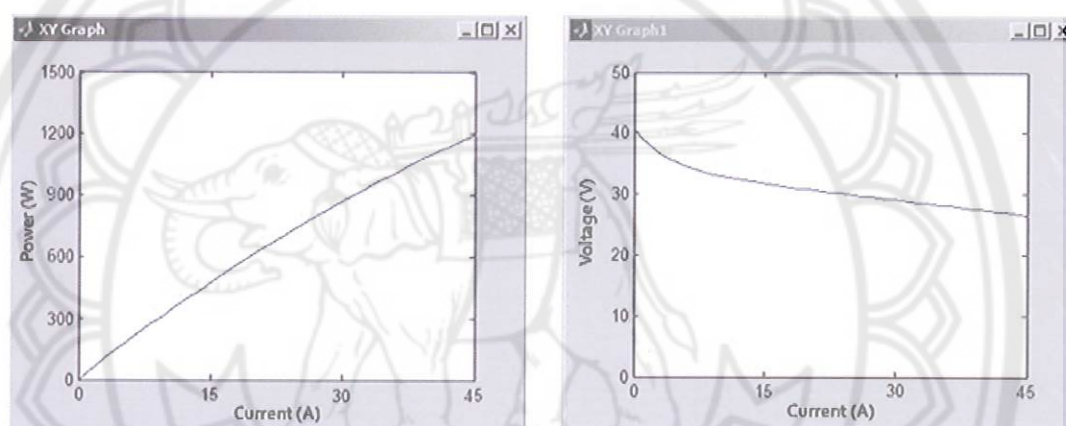
จากนั้นแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นจะถูกนำมาใช้สำหรับการเขียนโปรแกรมด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในตอนต้นที่ 1 ซึ่งโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น แสดงดัง รูปที่ 23



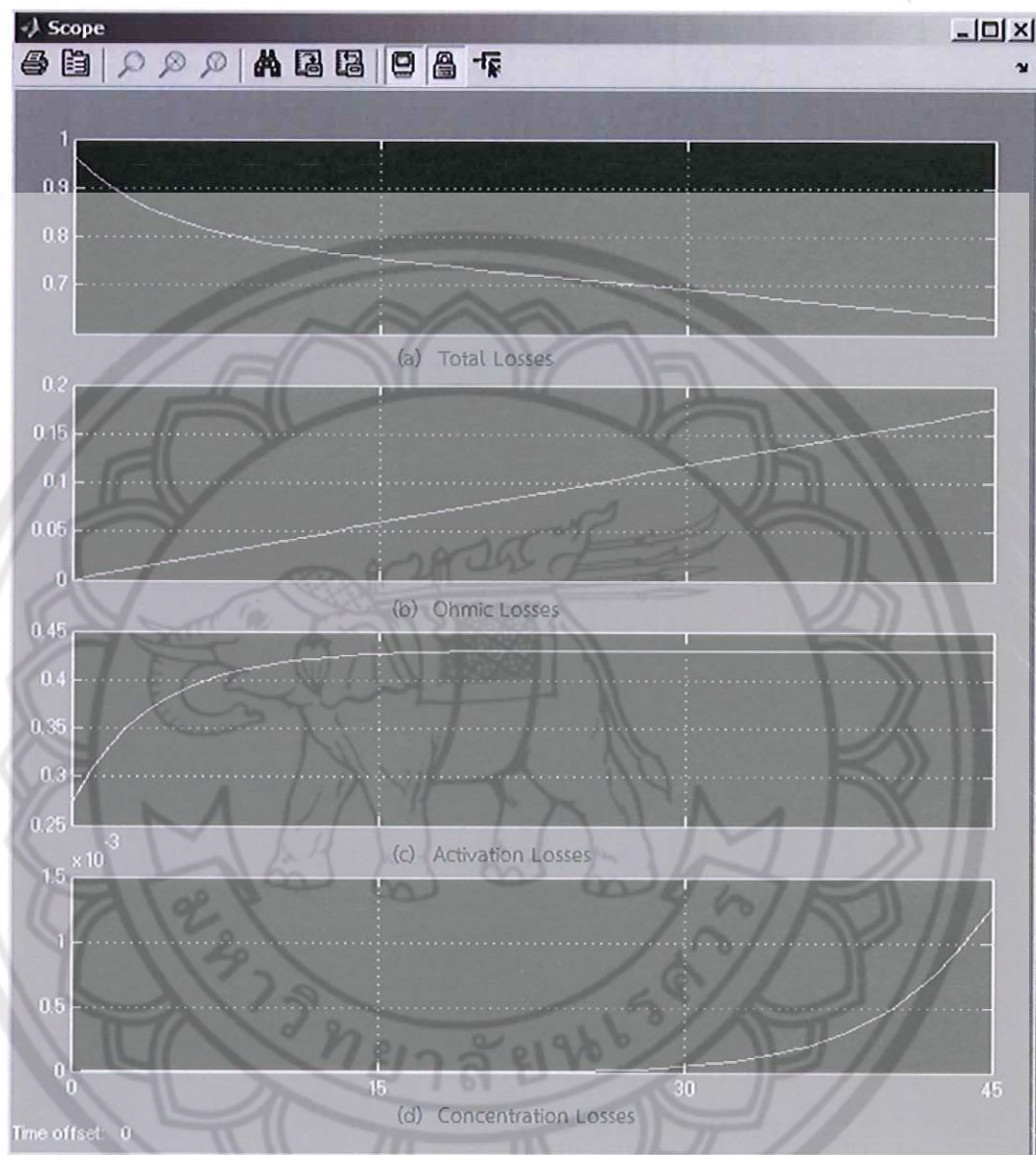
รูปที่ 23 MATLAB/SIMULINK สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

ผลของการจำลองการทำงานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงได้ด้วย polarization curve และ คุณสมบัติทางไฟฟ้า P-I (P-I characteristic curve) แสดงได้ดังรูปที่ 24 จากผลการจำลองการทำงานที่อุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง 50 และที่ความชื้นของเมมเบรนมีค่าเท่ากับ 100 พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 1,200 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 26.67 V และกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 45 A

รูปที่ 25 แสดงให้เห็นถึงความผันแปรระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงกราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง (Voltage Drop) ที่เกิดจาก Activation Loss, Ohmic Loss และ Concentration Loss ของเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ แสดงดัง

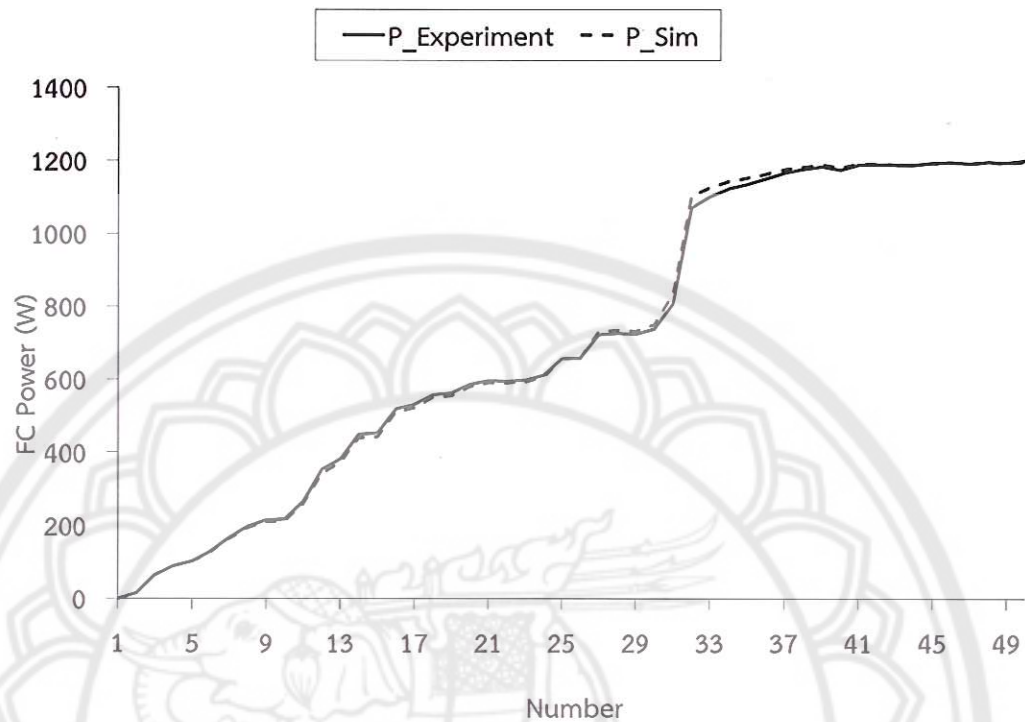


รูปที่ 24 polarization curve และ P-I characteristic curve ของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 25 Voltage drops ที่เกิดจากการสูญเสียในการเปลี่ยนรูปพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง

การเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลที่ได้จากการทดสอบของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 26 จากรูปแสดงให้เห็นว่าผลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ผลที่ต่างกันนั้นมีสาเหตุมาจากผู้วิจัยไม่สามารถวัดค่าปริมาณความชื้นภายในเมมเบรนได้จึงทำให้ผลในส่วน of ค่า loss ที่เกิดจาก Ohmic loss มีความคลาดเคลื่อนบางเล็กน้อย



รูปที่ 26 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างการทดสอบและแบบจำลอง

ตอนที่ 3 การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

การพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงฯ ในงานวิจัยนี้มีเงื่อนไขในการพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ราคาเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 50,000 บาท/กิโลวัตต์
2. ราคาอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ในระบบคิดรวมภาษีมูลค่าเพิ่ม 7 เปอร์เซ็นต์
3. อัตราส่วนลดเท่ากับ 7.10 เปอร์เซ็นต์ต่อปี
4. มูลค่าซากของระบบ ฯ คิดที่ 5 เปอร์เซ็นต์ของเงินลงทุนติดตั้งระบบ
5. ใช้มูลค่าเงินในปี 2557

ตารางที่ 6 การลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

รายการ	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
เซลล์เชื้อเพลิง	100,000.00	100,000.00
เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า	40,000.00	40,000.00
อุปกรณ์ประกอบรวมในระบบ (สายไฟฟ้า เบรกเกอร์ ฯลฯ)	7,000.00	7,000.00
ค่าแรงในการติดตั้ง	10,000.00	10,000.00
ราคารวมทั้งสิ้น		157,000.00

ตารางที่ 7 การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

Year	Capital Cost	O&M	Discount Factor	NPV
0	157,000.00		1.000	158,570.00
1		1,570.00	1.000	1,570.00
2		1,570.00	0.934	1,465.92
3		1,570.00	0.872	1,368.74
4		1,570.00	0.814	1,278.00
5		1,570.00	0.760	1,193.28
6		1,570.00	0.710	1,114.17
7		1,570.00	0.663	1,040.31
8		1,570.00	0.619	971.34
9		1,570.00	0.578	906.95
10	- 7,850.00	1,570.00	0.539	846.83
			0.504	- 3,953.44
			Total NPV	166,372.10

ALCC	23,797.26	Baht/Year
Energy Production	3,139.00	kWh/Year
Cost of Energy (COE)	7.58	Baht/kWh

จากผลการศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระพบว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระขนาด 1.2 กิโลวัตต์ ต้องใช้งบประมาณในการลงทุน 157,000 บาท ค่าสมมูลประจำปีของราคาระบบตลอดช่วงอายุการใช้งานของระบบ (ALCC) มีค่าเท่ากับ 23,797 บาท โดยระบบฯ มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้า (COE) 7.58 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งหากเทียบกับราคาราคาไฟฟ้าในปัจจุบันที่มีอัตราอยู่ที่ประมาณ 3.5 บาทนั้น พบว่าต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระสูงกว่าอัตราค่าไฟฟ้าในปัจจุบันประมาณ 2 เท่า แต่อย่างไรก็ตามระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระก็ยังเป็นที่น่าสนใจสำหรับในอนาคตอันใกล้เนื่องจากแนวโน้มของราคาเซลล์เชื้อเพลิงนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน และหากมีการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นจะเกิดการแข่งขันทางด้านราคาเหมือนกับเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน นอกจากเซลล์เชื้อเพลิงยังเป็นเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก อีกทั้งยังทำงานโดยปราศจากเสียงรบกวน และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นไฟฟ้าสูงเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนชนิดอื่นๆ

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาวិจัยการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระนั้นคณะผู้วิจัยได้แบ่งผลการทดสอบออกเป็น 3 ตอนได้แก่ 1) การประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ 2) การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ 3) การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

- ประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระมีประสิทธิภาพสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 37 เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟระหว่าง 500 - 900 วัตต์ ในขณะที่ประสิทธิภาพของระบบจะประสิทธิภาพลดลงเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟสูงกว่า 900 วัตต์ เนื่องจากผลกระทบของ Ohmic loss ภายในเซลล์เชื้อเพลิงนั่นเอง ดังนั้นในการออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระควรมีการออกแบบให้มีการใช้กำลังไฟจากเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ระหว่างร้อยละ 40 - 90 ของกำลังไฟสูงสุดที่ระบุใน Specification เพื่อให้เกิดการใช้งานระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด การสูญเสียของพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระสามารถจำแนกการสูญเสียจากอุปกรณ์หลัก 3 ส่วนได้แก่ 1) เซลล์เชื้อเพลิงนั้นเกิดจากปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงในการเปลี่ยนรูปจากพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าพบว่าการสูญเสียประมาณร้อยละ 42.5 2) การสูญเสียจากการแปลงไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าพบว่าการสูญเสียประมาณร้อยละ 20 และ 3) การสูญเสียจากความต้านทานภายในสายไฟฟ้าที่เลือกใช้ พบว่าการสูญเสียประมาณร้อยละ 0.5

- งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของเซลล์เชื้อเพลิงด้วย วิธีเซมิ-เอ็มไพริคัล (Semi-empirical method) ซึ่งสมการที่ใช้สำหรับ Semi-empirical พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงได้ดังนี้

$$U_{fc} = E - \left[0.2755 + 0.1556(1 - e^{-29.5i}) \right] - \left[i \frac{0.0125}{\sigma_m} \right] - \left[i \left(1.1483 \frac{i}{i_{max}} \right)^{7.1848} \right] \quad (5.1)$$

และ Membrane Conductivity, σ_m แสดงได้ดังนี้

$$\sigma_m = (0.005139\lambda_m - 0.00326) * e^{\left(350 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_c} \right) \right)} \quad (5.2)$$

เมื่อการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลทดสอบ พบว่าผลที่ได้ไปในทิศทางเดียวกันและมีความแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี สำหรับผลที่แตกต่างกันนั้นมีสาเหตุมาจากผู้วิจัยไม่สามารถวัดค่าปริมาณ

ความชื้นภายในเมมเบรนได้จึงทำให้ผลในส่วนของคุณค่า loss ที่เกิดจาก Ohmic loss มีความคลาดเคลื่อนบางเล็กน้อย

- ประเมินสมรรถนะทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระพบว่าระบบฯ ดังกล่าวใช้งบประมาณในการลงทุน 157,000 บาท ค่าสมมูลประจำปีของราคาระบบตลอดช่วงอายุการใช้งานของระบบ (ALCC) มีค่าเท่ากับ 23,797 บาท โดยระบบฯ มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้า (COE) 7.58 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งหากเทียบกับราคาราค่าไฟฟ้าในปัจจุบันที่มีอัตราอยู่ที่ประมาณ 3.5 บาทนั้น พบว่าต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระสูงกว่าอัตราค่าไฟฟ้าในปัจจุบันประมาณ 2 เท่า แต่อย่างไรก็ตามระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระก็ยังเป็นที่น่าสนใจสำหรับในอนาคตอันใกล้เนื่องจากแนวโน้มของราคาเซลล์เชื้อเพลิงนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน และหากมีการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นจะเกิดการแข่งขันทางด้านราคาเหมือนกับเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงยังเป็นเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก อีกทั้งยังทำงานโดยปราศจากเสียงรบกวน และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นไฟฟ้าสูงเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนชนิดอื่นๆ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาวิจัยถึงความชื้นภายในเมมเบรนเพื่อความต้องการมากยิ่งขึ้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง
2. ควรมีการศึกษาการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระในระยะยาวเพื่อพิจารณาการลดลงของสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะการใช้งานจริง

บรรณานุกรม

- [1] Kammen, D. M. (2002). The role of fuel cells in the renewable roadmap to energy independence. Testimony for the United States House Subcommittee on Energy, February 21.
- [2] Stambouli, B. A., and Traversa, E. (2002). Fuel cells, an alternative to standard sources of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, page 297-306.
- [3] Bewag Fuel Cell Innovation Park,
<http://www.innovation-brennstoffzelle.de/e/index.html>
- [4] Erdmann, G. (2003). Future economics of the fuel cell housing market. *International Journal of Hydrogen*, 28, page 685-694.
- [5] US Department of Energy: <http://www.energy.gov>
- [6] Fuel Cell Market Survey: Portable Application, <http://www.fuelcelltoday.com>
- [7] Fuel Cell Market Survey: small stationary, <http://www.fuelcelltoday.com>
- [8] Picture courtesy of NASA, <http://www.fuelcelltoday.com>
- [9] Chatchai Sirisamphanwong, Wattanapong Rakwichian, Sukruedee Sukchai, Nipon Ketjoy. (2010). Fuel Cell Model base on Proton Exchange Membrane (PEM). *IIRE International Journal of Renewable Energy*. Vol.5 No.2.
- [10] เทอดไทย วัฒนธรรม (2552). ต้นแบบเซลล์เชื้อเพลิงแก๊สสำหรับใช้งานประจำบ้าน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย
- [11] เทอดไทย วัฒนธรรม (2552). ต้นแบบเซลล์เชื้อเพลิงแก๊สขนาด 1 กิโลวัตต์. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย
- [12] มรกต ขาญสำรวจ (2551). การสร้างต้นแบบพลังงานเซลล์เชื้อเพลิง [Fuel Cell] ชนิด PEMFC เพื่อนำไปใช้ขับเคลื่อนรถพลังงานไฟฟ้า. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, บริษัท คลีนฟูล เอ็นเนอร์ยี เอ็นเตอร์ไพรส์, ปทุมธานี, ประเทศไทย
- [13] พรพิมล เพ็ชรวัฒนา (2548). ระบบจัดการน้ำในสแต็กของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

- [14] สายชล สิทธิพงศ์ (2548). การออกแบบระบบควบคุมการทำงานสำหรับสแต็กเซลล์ เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [15] วราภรณ์ เตปิ่น และคณะ (2543). การพัฒนาระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิง. ปรินซ์นิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ประเทศไทย
- [16] James Larminie and Andrew Dicks. (2003). Fuel cell systems explained (2nd ed.). N.P.: John Wiley & Sons.
- [17] Jay Pukrushpan, Anna Stefanopoulou and Huei Peng. (2004). Control of fuel cell power systems. London: Springer-Verlag.





สมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ
สุฤดี สุขใจ* ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์รังษ์ รัฐพร เงินมีศรี และ คงฤทธิ มั่นศิริ

Technical Performance of Stand Alone Fuel Cell System

Sukruedee Sukchai*, Chatchai Sirisamphanwong, Rattaporn Ngoenmeesri and Kongrit Mansiri

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

School of renewable energy technology, Naresuan University

*Corresponding author. E-mail: sukruedee@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ ซึ่งระบบผลิตเซลล์เชื้อเพลิง มีส่วนประกอบหลักประกอบด้วย เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell, FC) ขนาด 1,200 วัตต์ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (DC/AC inverter) และการไฟฟ้าแบบปรับค่าได้ (Variable AC Load) ในงานวิจัยนี้ทำการประเมิน 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพของระบบ และการสูญเสียทางความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพของระบบ มีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 60, ร้อยละ 80 และ ร้อยละ 40 ตามลำดับ ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงมีการสูญเสียทางความร้อนคิดเป็น 6.7 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวันหรือคิดเป็นร้อยละ 54.9

คำสำคัญ: สมรรถนะทางด้านเทคนิค เซลล์เชื้อเพลิง ระบบอิสระ

Abstract

The aims of this research were to evaluate the technical performance of standalone fuel cell system. The main component of system consists of 1,200 W fuel cell stack, DC/AC inverter and variable load. There are 4 parameters that were be evaluated as follows; the efficiency of fuel cell stack, the efficiency of inverter, the efficiency of system and the thermal loss of fuel cell. From the results, it was found that the efficiency of fuel cell stack, the efficiency of inverter, and the efficiency of system are 60%, 80%, and 40%, respectively. In addition, the thermal loss of fuel cell is 6.7 kWh/day or 54.9%.

Keywords: Technical Performance, Fuel Cell, Standalone system

บทนำ

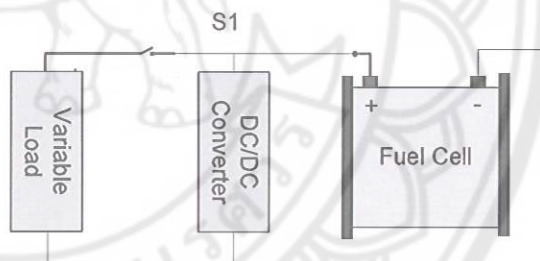
สภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง (Climate Change) รุนแรงอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศทั่วโลก (Richard and Tuckett, 2009) ส่งผลให้เกิดความหายนะอย่างใหญ่หลวงหลายครั้งในรอบ 10 ปีที่ผ่านมา นอกจากนี้ปัญหาสภาวะอากาศเปลี่ยนแปลงแล้ว ปัญหาแหล่งพลังงานสำรองจากฟอสซิลที่ลดลงและจะหมดไปในอนาคต ยังเป็นปัญหาหลักของโลกอีกประการหนึ่ง นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและหมุนเวียนได้โดยไม่มีวันหมดสิ้น เพื่อนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิล

เทคโนโลยีพลังงานทดแทนพลังงานทดแทนนั้นมีอยู่หลายชนิด การเลือกใช้ต้องมีความเหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ และศักยภาพของพื้นที่ สำหรับประเทศไทยเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมกับศักยภาพมีอยู่หลายเทคโนโลยี ได้แก่ เทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าจากพลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีที่กล่าวมานั้นมีข้อจำกัดอยู่ 2 ประการ คือ พื้นที่ในการติดตั้งระบบมีขนาดใหญ่ เนื่องจากประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานต่ำ และความไม่แน่นอนของแหล่งกำเนิดพลังงานซึ่งไม่สามารถกำหนดได้ ดังนั้น จึงแสวงหาเทคโนโลยีอื่นที่มีความเหมาะสมกับ

สภาพพื้นที่มีอยู่อย่างจำกัดในอนาคต เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงถึงร้อยละ 90 ตอบสนองต่อภาระไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว ทำงานโดยไม่มีการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ (Singh et al., 2012; Scrivano et al., 2009) และสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายเช่น ระบบไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ชนบทห่างไกล ในครัวเรือน หรือในอาคารสำนักงานต่าง ๆ รวมถึงในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ วิทยุ หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กอื่น ๆ อุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น โดยหลายหน่วยงานทั่วโลกให้ความสนใจในการศึกษาการศึกษา เช่น R. Johnson และคณะ (Johnson et.al., 2001) ทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ขนาด 3 kWe จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าร้อยละ 55 (วรภรณ์ เตปิ่น และคณะ, 2543) ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมระบบเซลล์เชื้อเพลิง (มรกต ชาญสำรวจ, 2551) ได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนาดเล็ก ดังนั้น ในบทความวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

ระบบผลิตเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระที่พัฒนาขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบหลักประกอบด้วย เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell, FC) ขนาด 1,200 วัตต์ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (DC/AC inverter) และภาระไฟฟ้าแบบปรับค่าได้ (Variable AC Load) ส่วนประกอบหลักของระบบฯ แสดงดังรูปที่ 1



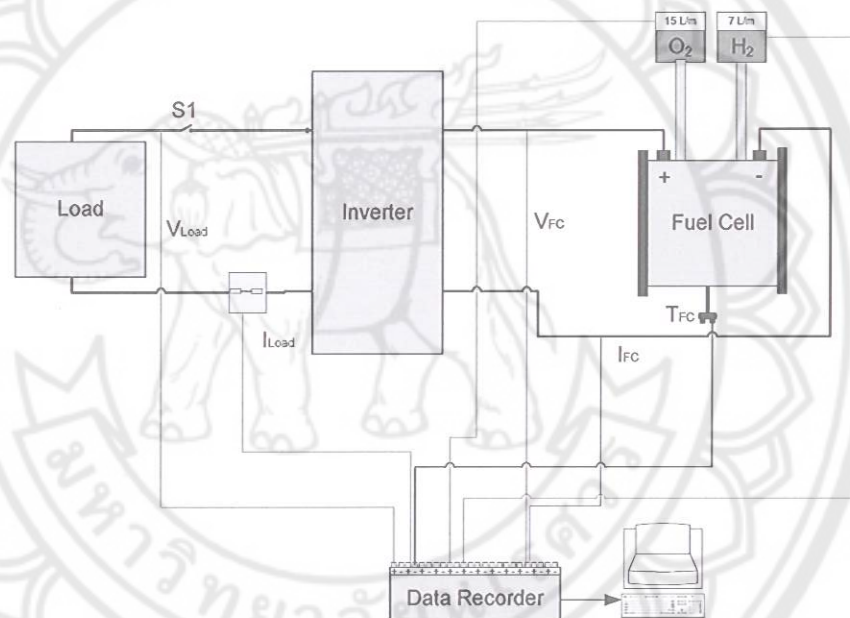
รูปที่ 1 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

วิธีการดำเนินการวิจัย

การตรวจวัดและจัดเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ จำแนกออกเป็น 2 ด้านได้แก่ ด้านไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ กำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้า เป็นต้น และด้านเคมี เช่น ปริมาณไฮโดรเจน ปริมาณออกซิเจน เป็นต้น โดยข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นจะถูกจัดเก็บลงในเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติทุก ๆ 5 นาที (ตารางที่ 1) และตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจวัด (รูปที่ 2)

ตารางที่ 1 การจัดเก็บข้อมูลและตัวแปรที่ใช้สำหรับการทดสอบ

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	เฉลี่ย	หน่วย	หมายเหตุ
อุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง	T_{FC}	5 นาที	$^{\circ}\text{C}$	Temperature Sensor
แรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้	V_{FC}	5 นาที	V	Power Meter
กระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้	I_{FC}	5 นาที	A	Power Meter
กำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้	P_{FC}	5 นาที	A	Power Meter
แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้า	V_{Load}	5 นาที	V	Power Meter
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้า	I_{Load}	5 นาที	A	Power Meter
กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้า	P_{Load}	5 นาที	A	Power Meter
ปริมาณไฮโดรเจน	V_{H_2}	5 นาที	L/min	Flow meter
ปริมาณออกซิเจน	V_{O_2}	5 นาที	L/min	Flow meter



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

การประเมินสมรรถนะของระบบ

ในการวิเคราะห์สมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพของระบบฯ และการหาการสูญเสียพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปความร้อน

การหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง, η_{FC} (Larminie et al., 2003)

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง หาได้จากกฎข้อที่หนึ่งของฟาราเดย์ แสดงดังสมการที่ 1

$$\eta_{FC} = \mu_F \frac{V_c}{1.48} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

η_{FC} คือ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (%)

μ_F	คือ	การใช้งานของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน (0.95)
V_C	คือ	แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ (V)

การหาประสิทธิภาพเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า η_{INV}

ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสามารถหาได้จากสัดส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระไฟฟ้าต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง แสดงดังสมการที่ 2

$$\eta_{INV} = \frac{I_{Load} \times V_{Load} \cos \phi}{I_{FC} \times V_{FC}} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

I_{Load}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ภาระไฟฟ้า (A)
I_{FC}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง (A)
V_{Load}	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ภาระไฟฟ้า (A)
V_{FC}	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง (A)

การหาประสิทธิภาพของระบบฯ, η_{SYS}

ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระสามารถหาได้จากสมการที่ 3

$$\eta_{SYS} = \eta_{FC} \times \eta_{INV} \quad (3)$$

การหาการสูญเสียพลังงานด้านความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง, (Thermal Loss; E_{loss}) [4]

การสูญเสียพลังงานทางด้านความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการที่ 4

$$E_{loss} = P_{FC} \left(\frac{1.25}{V_C} - 1 \right) \cdot t \quad (4)$$

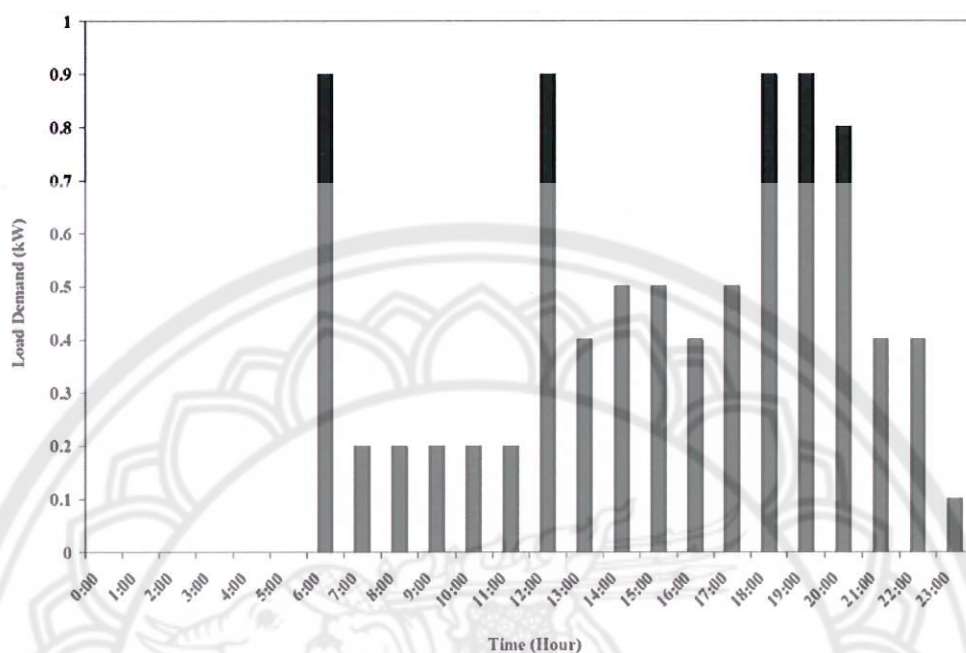
เมื่อ

E_{loss}	คือ	การสูญเสียพลังงานทางด้านความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง (Wh)
P_{FC}	คือ	กำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ (W)
t	คือ	เวลา (hr)

ผลการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบฯ

ภาระไฟฟ้าสำหรับการศึกษาวิจัย

การใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่นั้นมีการใช้ที่ค่อนข้างแตกต่างกันทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ สภาพภูมิอากาศ ราคาค่าไฟฟ้า รวมไปถึงการนำไปใช้งานในแต่ละรูปแบบ เช่น การใช้งานเพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับสถานีสื่อสาร การใช้งานสำหรับบ้านเรือน หรือการใช้งานสำหรับเครื่องเตือนภัยสึนามิ เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้จำลองสภาพการใช้ไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ไม่มีไฟฟ้าสำหรับที่พักอาศัย (ดังรูปที่ 3)

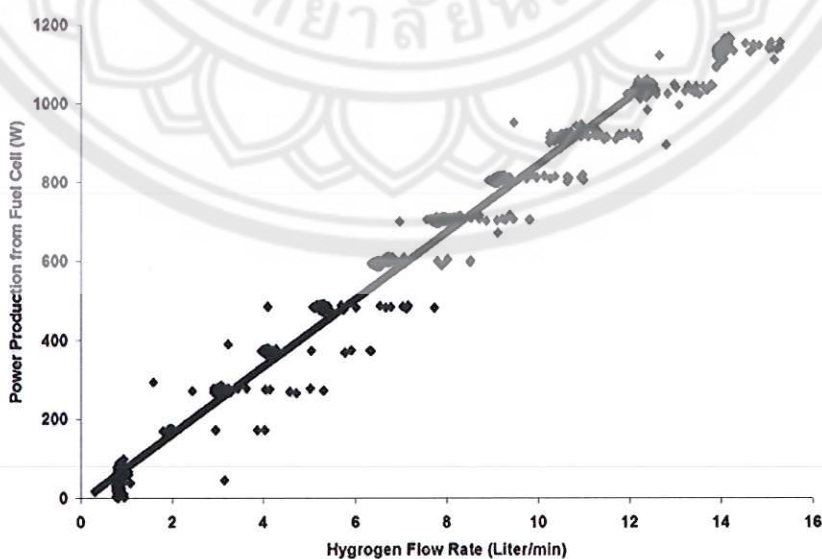


รูปที่ 3 การจำลองสภาพของภาระไฟฟ้า

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดของวันมีค่าเท่ากับ 0.9 กิโลวัตต์ ในขณะที่ความต้องการไฟฟ้าต่ำสุดนั้นเท่ากับ 0.1 กิโลวัตต์ โดยค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าต่อวันมีค่าเท่ากับ 8.6 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน หรือคิดเป็น 3,139 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ไฮโดรเจนกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง

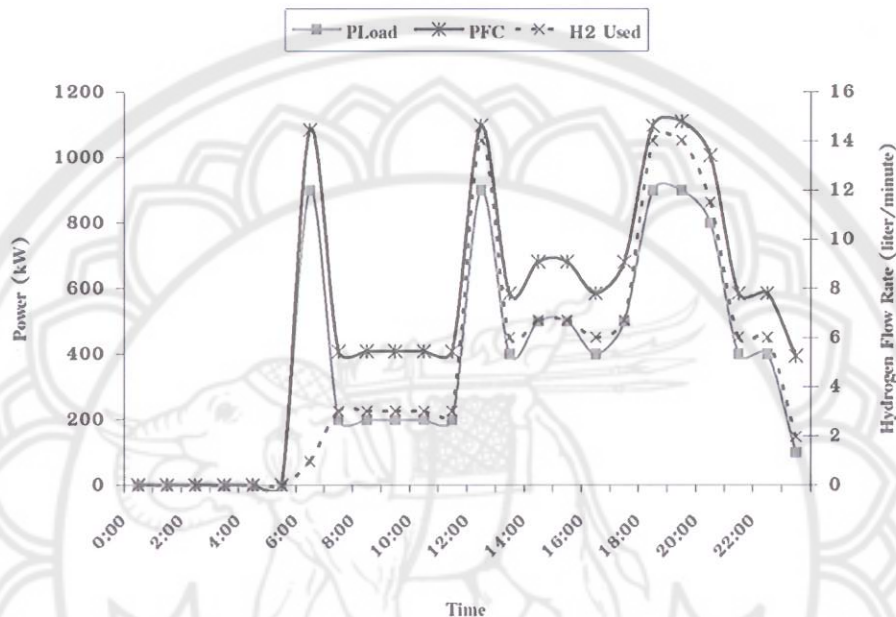
จากผลการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงแปรผันตรงกับปริมาณการใช้ไฮโดรเจนแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ไฮโดรเจนกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้าและปริมาณการใช้ไฮโดรเจน

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้าและปริมาณการใช้ไฮโดรเจน แสดงดังรูปที่ 5

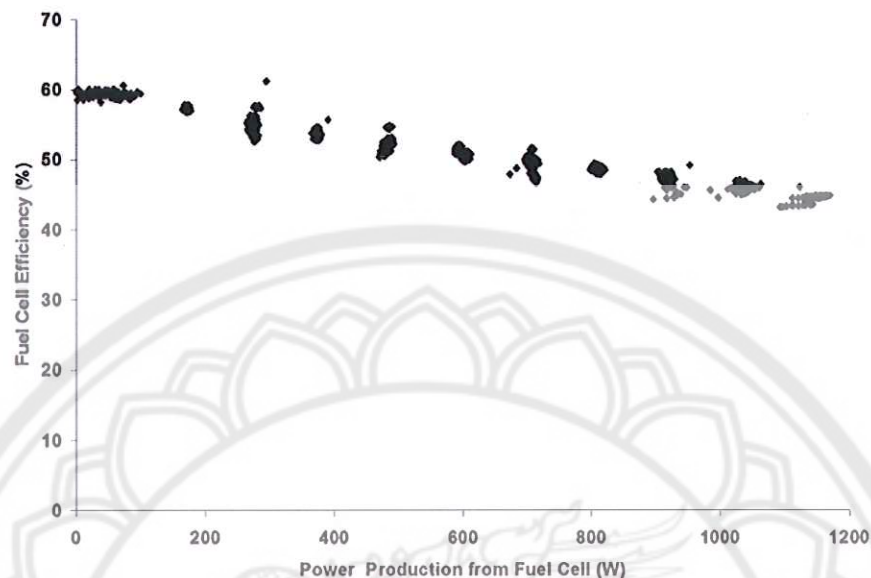


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้าและปริมาณการใช้ไฮโดรเจน

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะมีค่าสูงสุดที่ 1,150 วัตต์ เมื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายให้กับภาระไฟฟ้าที่ 900 วัตต์ ซึ่งมีการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเท่ากับ 14 ลิตรต่อวินาที โดยตลอดทั้งวันพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงมีการผลิตพลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 12.2 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน เพื่อจ่ายให้กับภาระไฟฟ้า 8.6 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนรูปพลังงานจากไฟฟ้ากระแสตรงที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับในการจ่ายให้กับภาระไฟฟ้านั้นมีการสูญเสียพลังงาน 3.6 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงกับประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 6

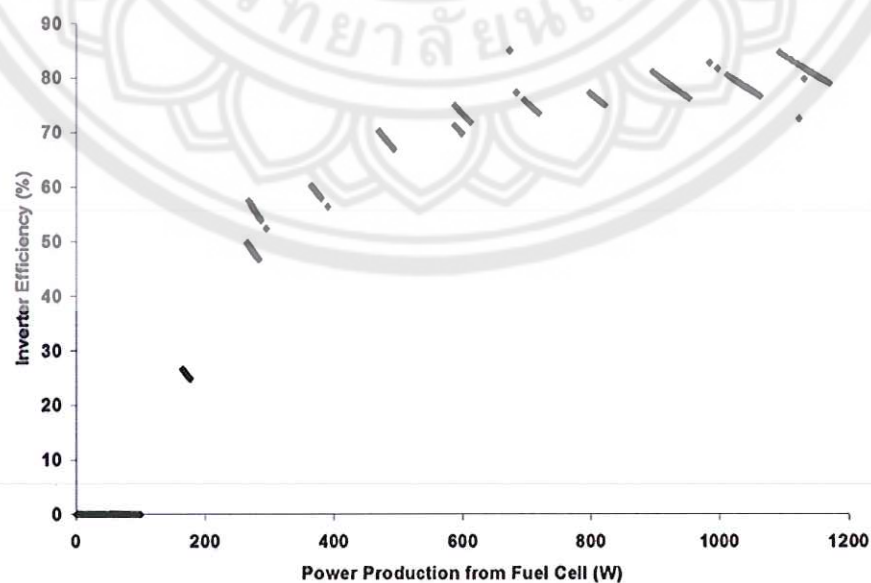


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงกับประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 60 ณ สภาวะแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด หรือไม่มีภาระไฟฟ้า ขณะที่เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1,200 วัตต์นั้นจะมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 45 เนื่องมาจากการสูญเสียภายในของเซลล์เชื้อเพลิงในส่วนของ Concentration loss ในการทำปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงนั่นเอง (James Larminie and Andrew Dicks, 2003)

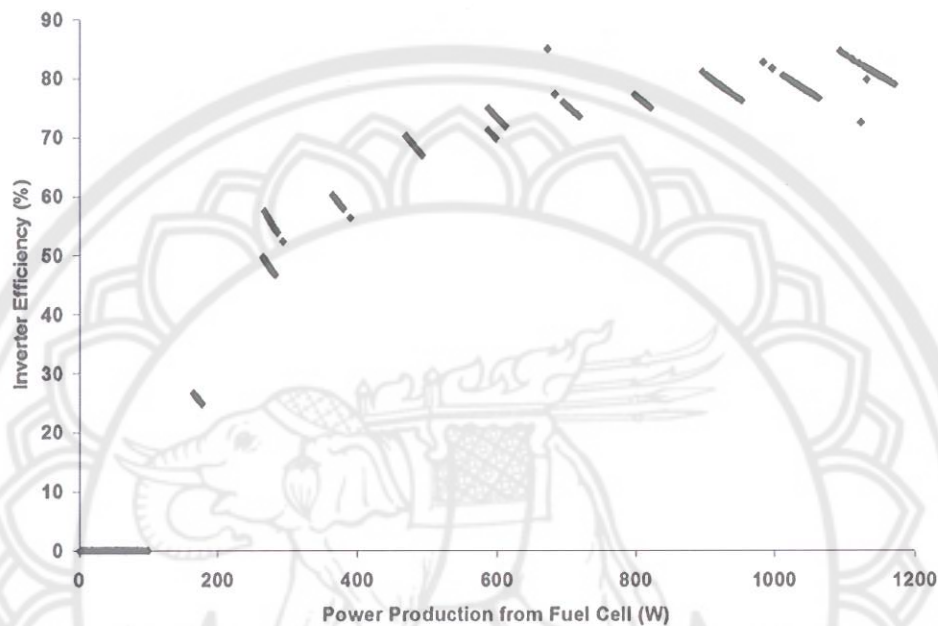
ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงกับประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงกับประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 80 เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1,200 วัตต์นั้น ในขณะที่ประสิทธิภาพของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 70 เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงกว่า 500 วัตต์



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงกับประสิทธิภาพของระบบ

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของระบบสูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 40 เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 600 วัตต์ และเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้นจนถึง 1,200 วัตต์นั้นจะเห็นว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบนั้นจะลดลงตามลำดับอันเนื่องมาจากการสูญเสียในส่วนของ Concentration loss ที่กล่าวมาข้างต้นนั่นเอง

การสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง, (Energy Loss; E_{loss})

ตารางที่ 2 แสดงการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.7 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ที่การผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง 12.2 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 54.9

ตารางที่ 2 การสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิง

	Energy Production	Energy Loss	Energy Loss (%)
Energy Loss	12.2 kWh/day	6.7 kWh/day	54.9 %

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาวิจัยการประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระพบว่า ความต้องการไฟฟ้าสูงสุดของวันมีค่าเท่ากับ 900 วัตต์ ในขณะที่ความต้องการไฟฟ้าต่ำสุดนั้นเท่ากับ 100 วัตต์ โดยค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าต่อวันมีค่าเท่ากับ 8.6 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน หรือคิดเป็น 3,139 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี โดยระบบเซลล์

เชื้อเพลิงจะมีการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเท่ากับ 14 ลิตรต่อนาที่เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าและจ่ายให้กับความต้องการไฟฟ้าสูงสุด 900 วัตต์ โดยจากการศึกษาพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงมีการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนคิดเป็นร้อยละ 54.9

ประสิทธิภาพของระบบสูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 40 เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 600 วัตต์ และเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้นจนถึง 1,200 วัตต์นั้นจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบนั้นจะลดลงตามลำดับ จะเห็นได้ว่าหากต้องการที่จะเพิ่มสมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงนั้นควรจะมีการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงที่ร้อยละ 50 ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะทำให้ได้ประสิทธิภาพของระบบสูงที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินการวิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่อนุเคราะห์เงินอุดหนุนการวิจัย พัฒนา สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพและคณิตศาสตร์ งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2557 ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวรที่สนับสนุนงานวิจัยอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด และขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของวิทยาลัยพลังงานทดแทนทุกท่าน ที่ให้การช่วยเหลือจนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- มรกต ขาญสำรวจ. (2551). การสร้างต้นแบบพลังงานเซลล์เชื้อเพลิง [Fuel Cell] ชนิด PEMFC เพื่อนำไปใช้ขับเคลื่อนรถพลังงานไฟฟ้า. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. ปทุมธานี: บริษัท คลีนฟูเอล เอ็นเนอร์ยี เอ็นเตอร์ไพรส์.
- วรารณ เดบิน และคณะ. (2543). การพัฒนาระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิง. ปริญญานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- S.N.Singh, Preeta John and Navneet Prabhakar. (2012). Technical feasibility of photovoltaic fuel cell: a model of green home power supply for rural India. International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS), 1(2), 216-220.
- G. Scrivano*, A. Piacentino, F. Cardona. (2009). Experimental characterization of PEM fuel cells by micro-models for the prediction of on-site performance. Renewable Energy Journal, 34(2009), 634-639.
- Richard P and Tuckett. (2009). Chapter 1 - The Role of Atmospheric Gases in Global Warming. Climate Change, 3-19.
- James Larminie and Andrew Dicks. (2003). Fuel cell systems explained (2nd ed.). N.P.: John Wiley & Sons.
- R. Johnson, C. Morgan, et.al. (2001). Performance of a proton exchange membrane fuel cell stack, Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks Energy Center.
- Tingting Guan, Per Alvfors, Goran Lindbergh. (2014). Investigation of the prospect of energy self-sufficiency and technical performance of an integrated PEMFC (proton exchange membrane fuel cell), dairy farm and biogas plant system. Applied Energy Journal, xxx.
- Han Xu, Zheng Dang, Bo-Feng Bai. (2013). Analysis of a 1 kW residential combined heating and power system based on solid oxide fuel cell. Applied Thermal Engineering Journal, (50), 1101-1110.
- Lúcia Bollini Braga, et.al. (2014). Comparative analysis between a PEM fuel cell and an internal combustion engine driving an electricity generator: Technical, economical and ecological aspects. Applied Thermal Engineering Journal, (63), 354-361.



เลขทะเบียน.....113.....

หนังสือยินยอมการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการบนเว็บไซต์
ฐานข้อมูล NU Digital Repository (<http://obj.lib.nu.ac.th/media/>)
สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร

ตามที่ข้าพเจ้า ดร.สุกฤดี สุขใจ (วิทยาลัยพลังงานทดแทน) ได้ส่งผลงานทางวิชาการการรายงาน
การวิจัย (เรื่อง) รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์การประเมินสมรรถนะทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบ
ผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิสระ

ปีที่พิมพ์ 2558

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานทางวิชาการเป็นลิขสิทธิ์ของข้าพเจ้า ดร.สุกฤดี สุขใจ
(ผู้วิจัยร่วม) และท่านอื่น ๆ เป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ร่วม และเพื่อให้ผลงานทางวิชาการของข้าพเจ้าเป็น
ประโยชน์ต่อการศึกษาและสาธารณชน จึงอนุญาตให้เผยแพร่ผลงาน ดังนี้

☒ อนุญาตให้เผยแพร่

☐ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ เนื่องจาก.....

ลงชื่อ

(.....
(.....
.....)

วันที่

30 ต.ค. 58

หมายเหตุ ลิขสิทธิ์ใดๆ ที่ปรากฏอยู่ในผลงานนี้เป็นความรับผิดชอบของเจ้าของผลงาน ไม่ใช่ของสำนักหอสมุด