

การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW Study and analysis of 1.2 kW PEMFC Electrification

ปนัดดา แสงแก้ว , บุญยัง ปลั่งกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

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

Panudda Sangkaew, Boonyang Plangklang

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

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบแบบจำลองด้วย MATLAB สำหรับทดสอบคุณลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง และได้ติดตั้งเพื่อทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการชนิด เมมเบรน แลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ขนาด 1.2 kW 46A โดยประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหลของก๊าซ และความชื้น บทความนำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์รวมทั้งการทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างแบบจำลองและทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการซึ่งในสภาวะไร้อโหลด แรงดันจะมีค่า 97.21% กำลังงานจะมีค่า 100% แต่ในขณะที่มีโหลดสูงสุดแรงดันจะมีค่า 90.19% กำลังงานมีค่า 83.61% เมื่อเทียบกับแบบจำลอง เพื่อทราบหลักการการทำงานในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่อยู่ในสภาวะใช้งานจริง เปรียบเทียบกับผลการทดลองของแบบจำลอง

คำหลัก เซลล์เชื้อเพลิง, PEMFC

Abstract

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

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

Keywords: Fuel cell, PEMFC

1. บทนำ

พลังงานและมลพิษเป็นปัญหาที่ร้ายแรงที่สุดในโลก ในช่วงนี้ บางครั้งวิกฤตการณ์ของโลกอาจทำให้ประเทศไทยมีผลกระทบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพราะปัจจุบันความต้องการทางด้านไฟฟ้าของประชาชนในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในอนาคตอันใกล้นี้เชื้อเพลิงที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันก็กำลังจะหมดไป และราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น พลังงานใหม่และพลังงานสะอาดจึงถูกนำมาพิจารณาเพื่อทดแทนและลดการเกิดมลภาวะต่าง ๆ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งในอนาคต ที่จะนำมาทำเป็นพลังงานไฟฟ้า

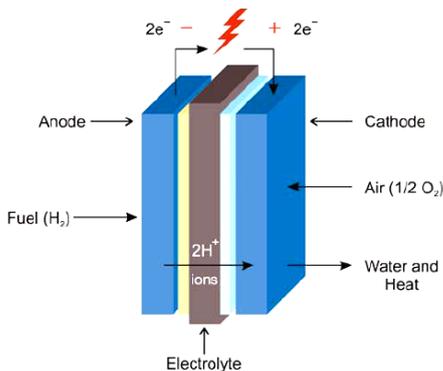
ดังนั้นจากการศึกษานี้มีแนวคิดที่จะศึกษาหลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) เพื่อทดสอบและวิเคราะห์ผลต่าง ๆ รวมทั้งประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง และเป็นแนวทางในการพัฒนาการนำไฮโดรเจนมาใช้สร้างระบบไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ให้จ่ายไฟฟ้าได้เหมาะสมกับประเทศได้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

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

การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ขนาด 1.2 kW โดยการปรับอัตราการไหลของบีมลม, พัดลม, เครื่องควบคุมความชื้น และอุณหภูมิ ในสภาวะโพลดคงที่, โพลดตัวแปร(วิเคราะห์ผลกระทบชั่วคราว) และระยะยาว ทดสอบการเปลี่ยนแปลงโพลด (เพื่อทดสอบสมการความร้อนของสแต็ก) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง ผลที่ได้ก็จะขึ้นอยู่กับการควบคุมอินพุตค่าต่าง ๆ ซึ่งก็สามารถได้ผลการทดลองเป็นไปในทางเดียวกับข้อมูลจำลอง [2]

2. ทฤษฎี

เซลล์เชื้อเพลิง คืออุปกรณ์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนด้วยกระบวนการ "Electrochemical" โดยการรวมตัวกันระหว่างเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ (ไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ โพรเพน) และอากาศ (ออกซิเจน) ผลของกระบวนการดังกล่าวทำให้ได้น้ำซึ่งเป็นเสมือนไอเสียของระบบด้วย เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีเชื้อเพลิงป้อนให้ระบบ ไม่ต้องการการประจุใหม่เหมือนแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการแปลงรูปพลังงานที่สูงกว่าเทคโนโลยีการแปลงรูปพลังงานอื่น ๆ ที่ใช้กันอยู่ การทำงานปราศจากการเผาไหม้จึงไม่มีมลพิษ ไม่มีการเคลื่อนไหวยของอุปกรณ์



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

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

ทางขั้วลบแทน โดยทำหน้าที่ดึงดูดอะตอมของ H+ ผ่านชั้น membrane เข้ามา และรับอิเล็กตรอนอิสระ (e-) จากวงจรภายนอก แล้วทำปฏิกิริยากันได้ผลลัพธ์คือ โมเลกุลของน้ำ (H₂O) ดังรูปที่ 1

ปฏิกิริยาเคมีของขั้ว Anode

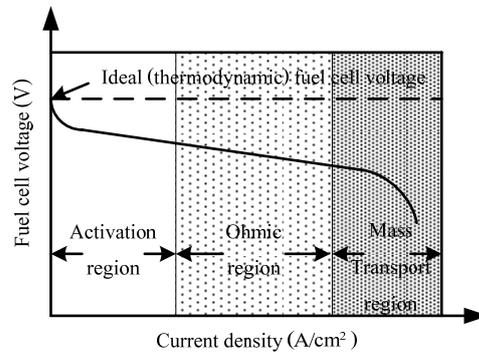


ปฏิกิริยาเคมีระหว่างขั้ว Cathode



2.1 ปฏิกิริยาขั้วแม่เหล็ก (Polarization Characteristics)

เป็นความคิดในอุดมคติว่า แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในภาวะที่ดีที่สุดตามทฤษฎีควรจะเป็น 1.2 V หากแต่ในความเป็นจริง เซลล์เชื้อเพลิงจะสำเร็จเมื่อได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงที่สุดจากผลผลิต เมื่อสื่อนำไอโจนและแรงดันไฟฟ้าก็จะต่ำลง เมื่อวัตต์ถูกบีบที่ได้เพิ่มขึ้น สิ่งเหล่านี้เองถูกเรียกว่า Polarization โดยจะแสดงให้เห็นผ่านกราฟโพลลาไรเซชันดังรูปที่ 2



รูปที่ 2: ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต่อกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ชนิด PEM

2.2 ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัว

ลักษณะสมบัติสภาวะอยู่ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงรูปที่ 2 แสดงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงในฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้ากราฟที่ได้ประกอบด้วยสามส่วนหลักคือ

- ปรากฏการณ์กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
- ส่วนที่เป็นเชิงเส้นที่แรงดันตก มีสาเหตุจากความต้านทานภายใน
- ส่วนสุดท้ายคือพลังงานจลน์ในการแตกตัวของก๊าซผ่านอิเล็กโทรด กลายเป็นปัจจัยจำกัดทำให้แรงดันตกอย่างมาก

กราฟโพลลาไรเซชัน มีคุณสมบัติเป็นแรงดันไฟฟ้าของเซลล์โดยอัตราการไหลของกระแสไฟจะขึ้นอยู่กับขนาดของโพลดทางไฟฟ้าที่วางตรงข้ามเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งความสำคัญของกราฟแรงดันต่อกระแส (Polarization curve) นี้จะแสดงถึงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากประสิทธิภาพเป็นอัตราส่วนโดยตรงของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์หารด้วย 1.2 V

เซลล์เชื้อเพลิงในการดำเนินงานจริงนั้นจะเป็นระบบที่ผันกลับไม่ได้ หรือโดยทั่วไปมักเรียกว่า กระบวนการโพลลาไรเซชัน (Polarization) เป็นภาวะที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการตาม

ความเป็นจริงมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี หรือเกิดค่าแรงดันไฟฟ้าเกินตัวที่ต้องนำมาหักลบ โดยแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (V_{cell}) สามารถเขียนได้ดังสมการ

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

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

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

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

โพลาริเซชันเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Activation Polarization) เป็นการสูญเสียเนื่องมาจากแรงต้านทานของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ศักย์ไฟฟ้าส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับการขับเคลื่อนปฏิกิริยาเคมี เขียนได้ดังสมการ

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

โดยที่ α คือค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาเคมี, i_{loss} คือค่ากระแสสูญเสีย, i_0 คือค่าความหนาแน่นของกระแส, i คือค่าความหนาแน่นของกระแสที่ออกแบบ

โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic Polarization) คือการสูญเสียเนื่องมาจากความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดและเมมเบรน

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

โดยที่ R คือค่าความต้านทานสูญเสีย

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

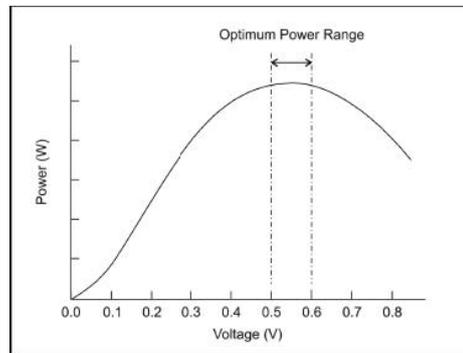
$$\Delta E_{conc} = \left(\frac{RT}{nF} \right) \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (7)$$

โดยที่ i_L คือค่าความหนาแน่นของกระแสจำกัด, และ i คือค่าความหนาแน่นของกระแสที่ออกแบบ

2.3 ลักษณะเฉพาะของพลังงาน (Power Characteristics)

พลังงานทางไฟฟ้าเป็นผลผลิตของความแตกต่างระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เนื่องจากกราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงได้ชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในทุกสภาพการทำงาน ทำให้เราสามารถนำกราฟโพลาริเซชันมาสร้างเป็นกราฟทางพลังงานอื่น ๆ ที่สอดคล้องกันได้ อีก พลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะถูกแสดงเป็นกราฟ ซึ่งเกิดจากจุดใด ๆ ก็ตามที่อยู่บนเส้นโค้ง โดยเส้นโค้งจะสัมพันธ์กับมุมฉาก ตามที่แสดงในกราฟรูปที่ 3

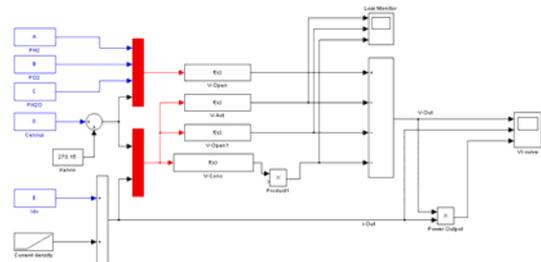
พลังงานสูงสุดที่ปรากฏจะอยู่ที่ประมาณ 0.5-0.6 V ซึ่งสูงพอประมาณกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ที่จุดสูงสุดแรงต้านภายในเซลล์จะเท่ากับแรงต้านภายนอกวงจร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อประสิทธิภาพพลดลงแต่ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจะต้องมีการแลกเปลี่ยนผลได้ผลเสียระหว่างพลังงานกับประสิทธิภาพที่สูง ผู้ออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องเลือกระบบปฏิบัติการตามความต้องการว่าต้องการพลังงานหรือประสิทธิภาพมากกว่ากัน



รูปที่ 3: กราฟแสดงต้นแบบพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

3. แบบจำลอง MATLAB

แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นการพัฒนาบนพื้นฐานของสมการแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (V_{cell}) ซึ่งในรูปที่ 4 แสดงโครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงใน MATLAB



รูปที่ 4: โครงสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิง

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง

Parameters	Value
R (J/mol K)	8.3144
F (C/mol, R)	96,500
N	2
α	15
P _{H₂} (bar)	1.25
P _{O₂} (bar)	0.16
i ₀ (A)	6.54x10 ⁻³
i _L (A)	230x10 ⁻³

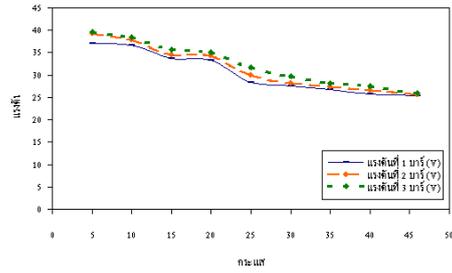
4. วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

Fuel Cell คือ อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนมาเป็นกระแสไฟฟ้า (electrochemical energy conversion device) โดยมีจะทำการแปรสภาพสาร Hydrogen (H₂) และ Oxygen (O₂) ให้กลายเป็นน้ำ (H₂O) ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีการผลิตไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) ขนาด 1.2 kW ยี่ห้อ Nexa™ Power Module User's Manual รุ่น MAN5100078 ดังรูปที่ 5



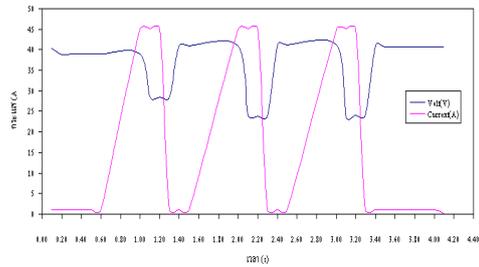
รูปที่ 5: การติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ ของ Module ที่ทำการทดสอบ

5. ผลการทดลอง



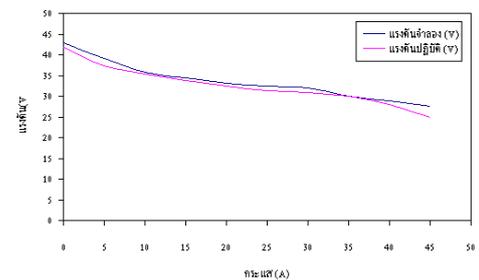
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง

จากผลการทดลองในรูปที่ 6 เมื่อมีค่ากระแสมากขึ้นจะมีผลทำให้ค่าแรงดันที่ได้จะแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่ของก๊าซ โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่า ก๊าซจะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าระบบที่มีความดันต่ำกว่า



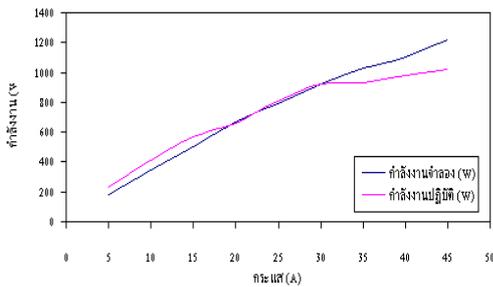
รูปที่ 7: แสดงการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบจับพลัน

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



รูปที่ 8: แสดงการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างแบบจำลองกับปฏิบัติ

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



รูปที่ 9: แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานระหว่างแบบจำลอง กับปฏิบัติ

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

6. สรุป

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

เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงถึง 50 – 70% สำหรับ การเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้าและ 90% เมื่อรวมพลังงานความร้อนที่ผลิตได้

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ระบบคอมพิวเตอร์ ศูนย์กระจายข่าว ศูนย์สื่อสาร ศูนย์ประมวลผลข้อมูล โรงงานอุตสาหกรรม รถยนต์ส่วนบุคคล รถโดยสารเครื่องบิน ใช้ในพื้นที่หรือเขตที่มีมาตรฐานของการปลดปล่อยมลพิษที่เข้มงวด และพื้นที่ที่ไม่มีไฟฟ้าใช้

เอกสารอ้างอิง

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

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

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

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

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