

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมรรถนะเชิงทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน  
(Experimental study on performance of the Proton Exchange Membrane fuel cell)

โดย

ว่าที่ร้อยตรี วิษณุ รักษาชาติ



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....104296  
วัน,เดือน,ปี..... 2 พ.ย. 2552

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การศึกษาสมรรถนะเชิงทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน**  
**(Experimental study on performance of the Proton Exchange Membrane fuel cell)**

โดย

**ว่าที่ร้อยตรี วิษณุ รักษาชาติ**



**ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**

**ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ปีการศึกษา 2551**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาสมรรถนะเชิงทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

(Experimental study on performance of the Proton Exchange Membrane fuel cell)

ผู้จัดทำ

1. ว่าที่ร้อยตรี วิษณุ รักษาชาติ

รหัสนักศึกษา 48015434



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาสมรรถนะเชิงทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

ว่าที่ร้อยตรี วิษณุ รักษาชาติ 48015434  
รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2551

### บทคัดย่อ

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) หรือ PEMFC ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงประเภทหนึ่ง ในห่อเซลล์นี้ ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนและเกิดพลังงานทางไฟฟ้า และพลังงานทางความร้อนออกมา โดยบทความนี้จะกล่าวถึงการออกแบบชุดทดสอบเพื่อที่จะหาประสิทธิภาพ และอัตราการสิ้นเปลืองของไฮโดรเจนที่ไหลเข้าสู่ระบบห่อเซลล์ ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 5 กิโลวัตต์ โดยจะทำการทดสอบปล่อยให้ไฮโดรเจนไหลที่ความดันเกจในช่วง 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 บาร์ (abs) ที่อุณหภูมิประมาณ 35-50 องศาเซลเซียส โครงการงานวิศวกรรมในส่วนแรกนี้จะเกี่ยวข้องกับการกำหนดอุปกรณ์ที่จะต้องใช้ในการทดลองโดยให้ครอบคลุมช่วงการทำงานของห่อเซลล์ ที่ความดันเกจที่กำหนดไว้ในแผนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Experimental study on performance of the Proton Exchange Membrane fuel cell

Acting Sub Lt. Vissanu Ruksachart 48015434

Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Chareonsuk Advisor

### Abstract

One type of the fuel cells is proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) The fuel cell is performed based on electrochemical reaction between hydrogen and oxygen in the air, producing electrical energy and heat. This paper concerns the design of testing unit for performance and efficiency assessment of the 5 kW cell stack. It also includes measurement of fuel consumption. The hydrogen will be fed at 0.25, 0.5, 0.75 and 1 bar gauge. The first phase of this project deals with specifications of equipments that cover the operation range of the unit at designate gauge pressure.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายๆฝ่ายด้วยกัน ได้แก่ รศ.ดร.จรรูวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ เอาใจใส่ ให้คำปรึกษาและเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาลดเวลาในการทำวิจัย จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ สุมิตรา จรสโรจน์กุล ที่ให้ความกรุณาในการให้ยืมใช้อุปกรณ์และสถานที่ในการทดลอง ห้อง(M 125)

ขอขอบคุณพี่มานพ มาสมทบ และพินิตินัย ปัญญาบุญสุขกุล สำหรับคำปรึกษาข้อคิดเห็นและคำแนะนำต่างๆในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จลุล่วงไปด้วยดี

และต้องขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดในชีวิตของข้าพเจ้าที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถมีวันนี้ได้ คือ บิดา-มารดา อันเป็นที่เคารพรักร้อย่างยิ่งอีกทั้งเป็นผู้ที่ให้โอกาสในการศึกษาและเป็นกำลังใจทำให้สามารถทำงานได้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ถ้าไม่มีพวกท่านก็คงไม่ความสำเร็จในวันนี้ได้และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ว่าที่ร้อยตรี วิษณุ รักษาชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | III  |
| สารบัญ.....   | IV   |
| สารบัญรูป.....  | VII  |
| สารบัญตาราง.....  | IX   |
| รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....  | X    |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความสำคัญและที่มา.....  | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย.....   | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....  | 3    |
| 1.5 วิธีการดำเนินงาน.....   | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....   | 4    |
| 2.1 เชื้อเพลิงคืออะไร.....  | 4    |
| 2.2 ประเภทของเชื้อเพลิง.....  | 4    |
| 2.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Polymer Electrolyte Membrane PEMFC)..... | 4    |
| 2.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline).....   | 5    |
| 2.2.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide).....                                 | 5    |
| 2.2.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate).....                        | 5    |
| 2.2.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid).....                                | 6    |
| 2.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC).....                 | 6    |
| 2.4 การสำรวจระบบทดสอบสมรรถนะ PEMFC ในประเทศไทย.....                                       | 8    |
| 2.5 การสร้าง Stack ของ PEMFC.....   | 10   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 2.5.1 ขั้นตอนหลักในการสร้าง Stack ของ PEMFC .....                          | 10   |
| 2.5.1.1 การผลิต MEA.....   | 10   |
| 2.5.1.2 การผลิต Bipolar plate.....   | 13   |
| 2.5.1.3 การผลิตอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของ PEMFC.....               | 15   |
| 2.5.1.4 การประกอบ Stack ของ PEMFC.....                                     | 17   |
| 2.5.2 การประกอบชุดระบบไฟฟ้า และ อุปกรณ์อื่น ๆ เข้าที่ Stack ของ PEMFC..... | 21   |
| บทที่ 3 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัด.....                               | 22   |
| 3.1 อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของ PEMFC.....                      | 22   |
| 3.1.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน(PEMFC).....                | 23   |
| 3.1.2 Mass flow meter ของ ไฮโดรเจน.....                                    | 24   |
| 3.1.3 Mass Flow Meter GFM & Control valve.....                             | 25   |
| 3.1.4 Solenoid.....  | 25   |
| 3.1.5 Flow meter.....  | 26   |
| 3.1.6 Regulator.....   | 26   |
| 3.1.7 ถังไฮโดรเจน.....   | 27   |
| 3.1.8 ความต้านทานปรับค่าได้.....   | 27   |
| 3.1.9 หม้อน้ำหล่อเย็น.....   | 28   |
| 3.1.10 Pumps.....  | 29   |
| 3.1.11 ตัวตรวจจับการรั่วไหลของไฮโดรเจน.....                                | 29   |
| 3.1.12 Pressure gage.....  | 30   |
| 3.1.13 Amp meter คิวติดอล.....   | 30   |
| 3.1.14 Voltmeter อนุาลอก.....  | 31   |
| 3.1.15 Pressure Transducers.....   | 31   |
| 3.1.16 คอมพิวเตอร์.....  | 32   |
| 3.2 ลักษณะโดยรวมของชุดทดสอบสมรรถนะ Stack ของ PEMFC.....                    | 32   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 4 ทฤษฎีและผลการทดสอบ.....                         | 33   |
| 4.1 วิธีการทดลอง.....                                   | 33   |
| 4.1.1 การกำหนดอุปกรณ์เครื่องมือ.....                    | 33   |
| 4.1.2 การกำหนดขนาดท่อที่ใช้.....                        | 34   |
| 4.2 วิธีการตรวจสอบการรั่ว.....                          | 34   |
| 4.2.1 การตรวจสอบการรั่วให้อยู่ในปริมาณที่ยอมรับได้..... | 34   |
| 4.3 ทฤษฎีและการคำนวณ.....                               | 35   |
| 4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ PEMFC.....         | 36   |
| บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผล.....                           | 40   |
| 5.1 สรุปและวิจารณ์ผล.....                               | 40   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....                                     | 40   |
| 5.3 การนำไปใช้ประโยชน์.....                             | 41   |
| เอกสารอ้างอิง.....                                      | 42   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2-1 แสดงการทำงานของ PEMFC .....  | 7    |
| 2-2 ชั่งน้ำหนักของสารต่าง ๆ .....  | 11   |
| 2-3 สารละลาย catalyst .....  | 11   |
| 2-4 นำสารละลาย catalyst ทาถึงบน carbon paper .....   | 12   |
| 2-5 เครื่อง hot press .....  | 12   |
| 2-6 MEA ที่พร้อมใช้งาน .....   | 12   |
| 2-7 ตัวอย่างการคำนวณการกระจายความร้อนใน PEMFC-เพื่อใช้ในการออกแบบช่องระบายความร้อน .....       | 13   |
| 2-8 Bipolar plate ที่ทำจาก composite กราไฟต์ .....   | 14   |
| 2-9 Composite กราไฟต์ที่ยังไม่ได้กัดร่อง .....   | 15   |
| 2-10 Gasket .....  | 16   |
| 2-11 ลักษณะของอะลูมิเนียมที่ใช้เป็น end plate .....  | 16   |
| 2-12 ระบบการทำงานของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว .....  | 17   |
| 2-13 แบบจำลอง Stack ของ PEMFC โดยใช้โปรแกรม AutoCAD .....                                      | 18   |
| 2-14 แสดง bipolar plate, MEA และ Gasket ที่ใช้ในการประกอบ Stack .....                          | 18   |
| 2-15 แผนผังการวางส่วนประกอบต่าง ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อประกอบ Stack .....                   | 20   |
| 2-16 รูปร่างของ Stack ที่ประกอบเสร็จแล้ว .....   | 20   |
| 2-17 แผนผังต่อระบบไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงานของ Stack เซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้โปรแกรม PROTEL ..... | 21   |
| 3-1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง .....  | 23   |
| 3-2 GASHUB ขนาด 2 kW .....   | 23   |
| 3-3 BALLARD ขนาด 1.2 kW .....  | 24   |
| 3-4 Mass flow meter ของไฮโดรเจน .....  | 24   |
| 3-5 Flow Meter GFM & Control valve .....   | 25   |
| 3-6 Solenoid .....   | 25   |
| 3-7 Flow meter .....   | 26   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 3-8 Regulator.....  | 26   |
| 3-9 ถังไฮโดรเจน.....  | 27   |
| 3-10 ความต้านทานปรับค่าได้ หรือ Electronic load.....                  | 28   |
| 3-11 หม้อน้ำหล่อเย็น.....   | 28   |
| 3-12 Pumps.....   | 29   |
| 3-13 ตัวตรวจจับการรั่วไหลของไฮโดรเจน.....                             | 29   |
| 3-14 Pressure Regulators.....   | 30   |
| 3-15 Amp meter (แอมมิเตอร์).....                                      | 30   |
| 3-16 Voltmeter (โวลต์มิเตอร์).....                                    | 31   |
| 3-17 Pressure Transducers.....  | 31   |
| 3-18 คอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล.....                                   | 32   |
| 4-1 แผนผังการทดสอบสมรรถนะที่ระบบป้อนแก๊สเข้าแบบ Pressure control..... | 34   |
| 4-1 กราฟ I-V-Pตามข้อกำหนดของบริษัท BALLARDขนาด 1.2 kW.....            | 36   |
| 4-2 กราฟ I-V-P ตามข้อกำหนดของบริษัท GUSHUB ขนาด 2 kW.....             | 37   |
| 4-3 ความสัมพันธ์ของอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง.....                 | 37   |
| 4-4 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง.....                 | 38   |
| 4-5 ความสัมพันธ์ของอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงไฮโดรเจน.....         | 38   |
| 4-6 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง.....                 | 39   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2-1 รูปแบบของระบบทดสอบสมรรถนะ PEMFC ที่ใช้ในหน่วยงานต่าง ๆ..... | 9    |
| 4-1 ตารางคุณสมบัติของไฮโดรเจน.....                              | 33   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

|               |   |
|---------------|---|
| $A$           | พื้นที่หน้าตัด, $m^2$                               |
| $\Delta T$    | การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, $^{\circ}K$                 |
| $\varepsilon$ | ความเครียด  |
| $\Delta V$    | ปริมาตรแก๊ส, $cm^3$                                 |
| $\Delta t$    | เวลา, Sec   |
| $\sigma$      | ความเค้น, $N/m^2$                                   |
| $E$           | โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ, $N/m^2$                |
| $\Delta V$    | การเปลี่ยนแปลงปริมาตร, $m^3$                        |
| $P$           | กำลังไฟฟ้า, Watt                                    |
| $I$           | กระแสไฟฟ้า, Amp                                     |
| $V$           | แรงเคลื่อนไฟฟ้า, Volt                               |
| $\dot{m}$     | อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)                           |
| $q$           | การนำความร้อน, watt                                 |
| $\rho$        | ความหนาแน่นของของไหล                                |
| $k$           | ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ, $W/m \cdot ^{\circ}K$ |
| $T$           | อุณหภูมิ, K   |
| $\eta_h$      | efficiency  |
| $W$           | งานที่ได้, kw/s                                     |
| LHV           | ค่าความร้อนต่ำ, J/kg                                |
| HHV           | ค่าความร้อนสูง, J/k                                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

เนื่องจากพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงพระราชทานแนวพระราชดำริด้านการพัฒนาพลังงานทดแทนให้กับข้าราชการและประชาชนชาวไทย เพื่อให้ตระหนักถึงยุคสภาวะน้ำมันแพง โดยที่ประเทศไทยต้องนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างชาติจึงทำให้เสียรายได้เป็นจำนวนมาก ทรงได้รับสั่งให้หน่วยงานต่างๆ หาพลังงานทดแทนประเภทอื่นมาใช้แทนพลังงานประเภทน้ำมันซึ่งกำลังจะหมดไปภายในไม่ถึง 30 ปี

โครงการศึกษาพลังงานเซลล์เชื้อเพลิงเป็นพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งที่มีหน่วยงานและมหาวิทยาลัยต่างๆ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานเซลล์เชื้อเพลิง โดยการทดลองนำมาติดตั้งในรถยนต์และได้มีการนำมาใช้จริงแล้วในบางประเทศ หรือ ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงยังอาจมีต้นทุนและราคาที่ยังแพงอยู่แต่ในอนาคตจะมีค่าใช้จ่ายที่ถูกลง เนื่องจากราคาน้ำมันที่สูงขึ้นแล้วก็จะหมดลงในไม่ช้า

เซลล์เชื้อเพลิงที่จริงได้มีการพัฒนามานานแล้วซึ่งประเทศไทยได้มีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงมา 10 กว่าปีแล้วแต่ข้อมูลยังไม่แพร่หลายหรือเป็นที่รู้จักของประชาชนมากนักเลยทำให้พลังงานทดแทนประเภทนี้ยังไม่มีการใช้งานอย่างเป็นทางการทั้งทางภาคเอกชนและรัฐบาลจะมีใช้เฉพาะในหน่วยงานที่วิจัยเท่านั้นที่มีการทดลองใช้ เพื่อให้เป็นที่รู้จักของพลังงานทางเลือกประเภทเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มากขึ้นจึงขอเสนอเพื่อเป็นวิทยาทานการเผยแพร่แก่ประชาชนและหน่วยงานอื่นๆ ที่สนใจเพื่อนำไปพัฒนาต่อยอดให้เกิดประโยชน์กับประเทศ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันพลังงานจากปิโตรเลียมที่ใช้กันอยู่เริ่มเริ่มจะขาดแคลนจึงได้มีการศึกษาและวิจัยด้านพลังงานทดแทนขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งซึ่งถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันและได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่หลายประเภทขึ้นอยู่กับการออกแบบและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเป็นต้น และเนื่องจากได้มีความร่วมมือระหว่าง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังกับศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ภายใต้การควบคุมดูแลของสำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) ในการพัฒนาด้านเซลล์เชื้อเพลิงโครงการวิศวกรรมนี้จึงถูกรวมไว้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการเฉลิมพระเกียรติของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โดยการออกแบบระบบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane-PEM) จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ ชุดเซลล์เชื้อเพลิง ชุดระบบการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ชุดระบบท่อและการไหลของไฮโดรเจน โดยโครงการนี้ได้กล่าวถึงเฉพาะขั้นตอนการพัฒนาชุดทดสอบสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเท่านั้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เป็นการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาไฟฟ้าทางเคมี โดยการออกแบบระบบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เพื่อที่จะนำกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองไปใช้งานกับโหลดไฟฟ้าชนิดต่างๆต่อไปโดยมีวัตถุประสงค์คือ

1. เพื่อออกแบบและสร้างระบบห่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนให้ใช้งานได้จริง เพื่อนำไปใช้งานกับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า
2. สร้างชุดทดสอบสมรรถนะห่อเซลล์เชื้อเพลิงชนิด แบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ขนาด 5 กิโลวัตต์
3. ทำการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของความดันของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ทางเข้า ที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน (LHV) Fuel consumption และ I-V curve

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ออกแบบและกำหนดขนาดอุปกรณ์นำส่งและควบคุมปริมาณไฮโดรเจนของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสามารถทำการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง
2. ทำการติดตั้งโดยกำหนดขนาดของอุปกรณ์นำส่งและการควบคุมแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC)
3. เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ คือ แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ขนาด 2 kW (GasHub) 2 ตัว และ แบบระบายความร้อนด้วยอากาศ 1.2 kW (Ballard)
4. PEMFC บริษัท BALLARD ถูกควบคุมความดันเกิดทางเข้า 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 บาร์
5. PEMFC บริษัท GASHUB ถูกควบคุมความดันเกิดทางเข้าที่ 0.25 0.5 0.75 และ 1 บาร์
6. ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนกับออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยาทางเคมี ออกแบบการทดสอบระบบเพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้
7. ศึกษาถึงประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลด้านความดันไฮโดรเจนต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ
8. การศึกษาอยู่ในสถานะทางออกของแก๊สที่ความดันบรรยากาศ
9. การทดสอบอยู่ภายใต้การดึงโหลดที่ 50% โดยใช้ Electronic load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เกิดการพัฒนารูปแบบเซลล์เชื้อเพลิง ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
2. ลดปัญหาด้านมลภาวะทางอากาศเนื่องจากกระบวนการผลิตใช้แก๊สไฮโดรเจนกับออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยาทางเคมี แล้วกลายเป็นน้ำซึ่งน้ำที่ได้ไม่มีสารใดตกค้าง
3. ส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทางเลือกอื่น ได้มากขึ้น
4. ทำให้เกิดการตื่นตัวในด้านการใช้พลังงาน ของหน่วยงานต่างๆ

## 1.5 วิธีการดำเนินงาน

1. ออกแบบระบบสนับสนุนหอเซลล์อันได้แก่ระบบนำส่งแก๊สไฮโดรเจนทำการจัดหาอุปกรณ์
2. สร้างเครื่องต้นแบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากแก๊สไฮโดรเจนกับออกซิเจน
3. เพื่อออกแบบและสร้างระบบการนำส่งแก๊สไฮโดรเจนของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เพื่อดูระบบการควบคุมและการแสดงผลของการนำส่งแก๊สไฮโดรเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน
4. เปิดการทำงานเครื่องเพื่อให้แก๊สไฮโดรเจนกับออกซิเจน ทำปฏิกิริยาเกิดกระแสไฟฟ้าทางเคมี
5. ทำการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของอัตราการสิ้นเปลืองของเซลล์จำเพาะ ที่เครื่องผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง
6. สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เซลล์เชื้อเพลิงคืออะไร

เซลล์เชื้อเพลิง คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงและอากาศให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงโดยไม่ผ่านกระบวนการการเผาไหม้ เซลล์เชื้อเพลิงโดยทั่วไปประกอบด้วย อิเล็กโทรด (ขั้วไฟฟ้า) สองขั้ว คือ ขั้วแอโนด และ ขั้วคาโทด โดยมีอิเล็กโทรไลต์อยู่ตรงกลางระหว่างขั้วทั้งสอง ซึ่งในการใช้งานจริงจะนำเซลล์เชื้อเพลิงมาประกอบเป็นหน่วยที่ใหญ่ขึ้นซึ่งจะเรียกว่า (Stack) โดยการประกบเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ เพื่อให้เกิดการผลิตไฟฟ้าที่มากขึ้น

หมายเหตุ เนื้อหาในบทนี้คัดลอกมาจากเอกสารรายงานการวิจัยในโครงการเฉลิมพระเกียรติ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ พ.ศ.2551

### 2.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการทดลองและนำมาใช้อย่างแพร่มีอยู่ด้วยกันหลายประเภท เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจำแนกได้หลายชนิดขึ้นกับชนิดของสารที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งแบ่งได้ 5 ชนิด

#### 2.2.1. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Polymer Electrolyte Membrane, PEMFC)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ อิเล็กโทรไลต์ในรูปแบบแผ่น โพลีเมอร์บางๆ ที่สามารถนำไอออนได้ และการทำงานของเซลล์ชนิดนี้จะกระทำที่อุณหภูมิที่น้ำอยู่ในสถานะของเหลว เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะมีข้อดีในด้านการนำไปใช้ ไม่เกิดการกัดกร่อน ไม่เกิดปัญหาในการกำจัดสารอิเล็กโทรไลต์เนื่องจากสารอิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง และสามารถทำงานได้รวดเร็วแม้ที่อุณหภูมิต่ำ ในสถานะอุณหภูมิประมาณ 40 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 40 - 50 เปอร์เซ็นต์สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ตั้งแต่ช่วง 50-250 กิโลวัตต์

ข้อดี-เนื่องจากเซลล์ชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิต่ำและใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง จึงไม่มีปัญหาการรั่วซึมเกิดการกัดกร่อนน้อย

ข้อเสีย-ต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีความบริสุทธิ์สูงเท่านั้น และใช้โลหะแพลทินัมเป็นสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งราคาแพง อีกทั้งแผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนก็มีราคาสูงเนื่องจากการใช้แพลทินัมที่มีราคาสูงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2. เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline)

สารอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้จะอยู่ในรูปสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาคาโทดได้รวดเร็วในอัลคาไลน์อิเล็กโทรไลต์ ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าจะสูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งองค์การนาซาเคยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าและน้ำให้กับยานอวกาศในโครงการอพอลโล และโครงการเจมินีมาแล้ว เชื้อเพลิงที่ใช้กับเซลล์ชนิดนี้คือไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ และใช้สารอิเล็กโทรไลต์ เช่น โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ สภาวะอุณหภูมิที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 150-200 องศาเซลเซียส

ข้อดี-มีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงและใช้สารอิเล็กโทรไลต์ เช่น โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ราคาถูก

ข้อเสีย-เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จำเป็นต้องใช้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงมากซึ่งมีราคาแพงมากและต้นทุนการผลิตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีราคาแพงทำให้การใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จำกัดอยู่เฉพาะงานในด้านอวกาศเท่านั้น

### 2.2.3. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide)

เซลล์ชนิดนี้ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็งทำจากสารประกอบเซรามิก เช่น เซอร์โคเนียมออกไซด์เป็นต้น มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์และหากนำมาใช้กับระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าแบบความร้อนรวมแล้วจะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะมีส่วนคล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอนเนตหลอมเหลว คือการทำงานของเซลล์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง 600-1000 องศาเซลเซียส แต่สำหรับเซลล์ชนิดนี้จะไม่มีการรบกวนจากการกัดกร่อนของอิเล็กโทรไลต์เหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอนเนตหลอมเหลว

ข้อดี-เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้โลหะแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่ต้องใช้ระบบรีฟอร์มเมอร์ (Reformer) ในการเปลี่ยนสภาพเชื้อเพลิงจึงจะช่วยลดต้นทุนในการผลิต และนอกจากนี้ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด เพราะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทนทานต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดี

ข้อเสีย-เซลล์ทำงานในสภาวะอุณหภูมิสูงต้องเสียเวลาในการอุ่นเครื่องนาน และจำเป็นต้องสร้างผนังหนาเพื่อป้องกันความร้อนที่แผ่ออกมาและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับส่วนประกอบของเซลล์อันเกิดจากอุณหภูมิภายในเซลล์ที่สูง

### 2.2.4. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอนเนตหลอม (Molten Carbonate)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้สารลิเทียมคาร์บอนเนต, โซเดียมคาร์บอนเนต, โพตัสเซียมคาร์บอนเนตที่หลอมเหลวเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิทำงานของเซลล์ชนิดนี้ประมาณ 650 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และหากใช้ร่วมกับระบบผลิตความร้อนร่วมแล้วจะมีประสิทธิภาพสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์เชื้อเพลิงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ราคาสูง มีประสิทธิภาพที่สูง แต่ปฏิกิริยาภายในเซลล์จะเกิดเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ส่วนประกอบของเซลล์เสียหายได้นอกจากนี้ยังมีผลเกิดขึ้นจากการกัดกร่อนของเล็กโพลีโอสต์ด้วย

ข้อดี-เนื่องจากเซลล์ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูงดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของไฮโดรเจนสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าได้หลายชนิด เช่น แก๊สไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ แก๊สโพรเพน น้ำมันดีเซล เป็นต้น

ข้อเสีย-ที่สภาวะอุณหภูมิสูงจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะกับการใช้งานขนาดเล็กกว่าเมกะวัตต์

### 2.2.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid)

เซลล์ชนิดนี้ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ โดยปัจจุบันมีการผลิตเซลล์แบบนี้ออกมาเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เซลล์แบบกรดฟอสฟอริกทำงานในช่วงอุณหภูมิประมาณ 150-200 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้กรดฟอสฟอริกจะนำประจุไฟฟ้าได้น้อยและเซลล์ประเภทนี้ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีราคาสูง เซลล์มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ แต่ว่าสามารถใช้ประโยชน์จากไอน้ำร้อนที่เกิดขึ้นโดยนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าร่วม (cogeneration) ต่อได้

ข้อดี-เป็นเซลล์ที่สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิดแม้แต่น้ำมันเชื้อเพลิง แต่ต้องกำจัดกำมะถันในน้ำมันออกให้เหลืออยู่น้อยที่สุดก่อน

ข้อเสีย-ต้องใช้โลหะแพลทินัมที่มีราคาสูงเป็นสารเร่งปฏิกิริยา เซลล์มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก มีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์ชนิดอื่น ชิ้นส่วนภายในจำเป็นต้องใช้วัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ดี

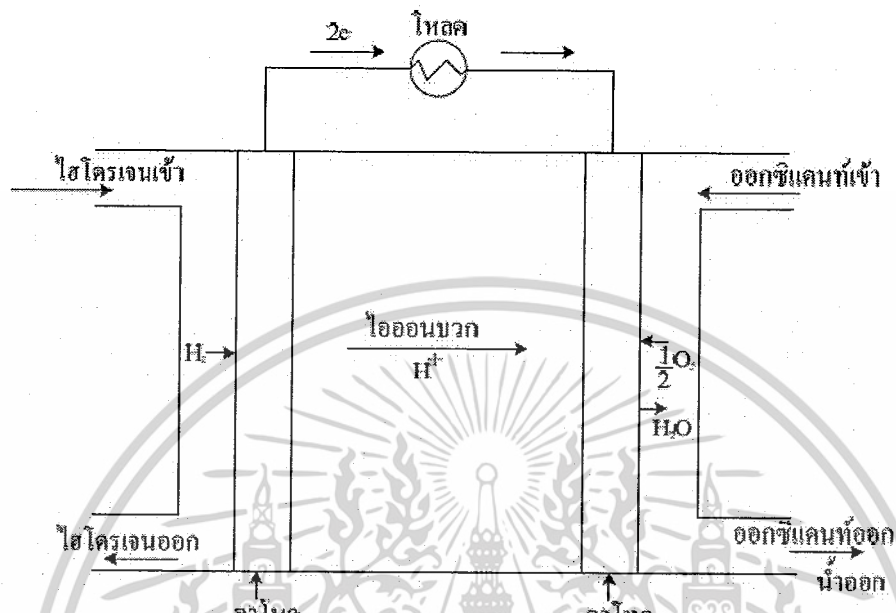
### 2.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC)

เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell technology) เป็นเทคโนโลยีที่ต่างจากเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบสันดาปภายใน เนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าแบบเผาไหม้แบบสันดาปภายในมาก นอกจากนี้ยังทำให้สามารถลดแก๊สเสียที่เกิดขึ้นได้อีกด้วยเนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงจะใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้า

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้จะมีอยู่ 2 แบบคือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) และ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (SOFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบแรกนั้นจะทำงานที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 50-80 องศาเซลเซียส ในขณะที่ เซลล์เชื้อเพลิงแบบที่ 2 นั้นจะทำงานที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงในช่วง 800-1000 องศาเซลเซียส ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นที่ PEMFC ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสำหรับอนาคตเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในบ้านหรือในรถยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง PEMFC มีข้อดีหลายด้าน อาทิเช่น ขนาดกระทัดรัด, น้ำหนักเบา, ให้ ความหนาแน่นของกำลังไฟ (power density) สูง และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ



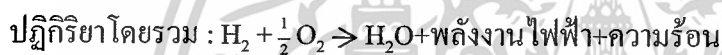
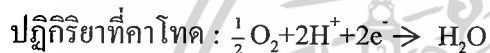
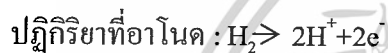
รูปที่ 2-1 แสดงการทำงานของ PEMFC

รูปที่ 2-1 แสดงการทำงานของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน (PEMFC) ซึ่ง ลักษณะ โครงสร้างทางกายภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน (PEMFC) จะ ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญได้แก่ (1) ขั้วบวกหรือแอโนด (2) ขั้วลบหรือคาโทด (3) แผ่นอิเล็กโทรไลต์ และ (4) เชื้อเพลิงซึ่งเป็นแก๊สไฮโดรเจนกับออกซิเจน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ ประกอบด้วย (i) ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดจะเปลี่ยนแก๊สไฮโดรเจนกลายเป็น โปรตอน (H<sup>+</sup>) และอิเล็กตรอนอิสระที่จะถูกถ่ายเทไปยังขั้วคาโทด ในขณะที่ (ii) ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วคาโทดจะรวมออกซิเจนและโปรตอนให้กลายเป็นน้ำ ซึ่งก่อให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนที่เป็นแหล่งกำเนิด ไฟฟ้า (รูปที่ 2-1) ดังนั้น เซลล์เชื้อเพลิงจึงสามารถให้กระแสไฟฟ้าโดยตรง และให้น้ำเป็นผลผลิต ของระบบ ดังนั้นจึงไม่มีการปลดปล่อยสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม<sup>[1]</sup> เซลล์เชื้อเพลิงจะมี ส่วนคล้ายกับแบตเตอรี่ โดยที่ทั้งสองระบบนี้จะมีขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด 2 ขั้ว ซึ่งถูกแบ่งแยกออก จากกันโดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นภายในเซลล์ก็จะสามารถผลิต กระแสไฟฟ้าขึ้นได้ แต่เซลล์เชื้อเพลิงจะแตกต่างกับแบตเตอรี่ในส่วนของเชื้อเพลิงซึ่งจะถูก ป้อนเข้าสู่ภายในเซลล์จากแหล่งกำเนิดภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจหลายประการ ดังตัวอย่างเช่น กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงไม่เป็นไปตามกฎของ Carnot ทำให้ไม่มีความจำเป็นที่ต้องเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อที่จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้แล้วที่อุณหภูมิต่ำการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงก็ไม่ส่งผลให้เกิด  $\text{NO}_x$  ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยทั่วไปแล้วถ้าใช้เชื้อเพลิงเป็นไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ น้ำ แต่อาจจะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้ถ้าใช้เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นสารประเภทไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้เรื่องของประสิทธิภาพและปราศจากมลพิษแล้ว เซลล์เชื้อเพลิงยังไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียง และสามารถออกแบบในลักษณะที่นำเซลล์แต่ละเซลล์มาต่อกันเป็นชุดๆ เพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าตามที่ต้องการได้

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด และ ขั้วคาโทด รวมทั้งปฏิกิริยาโดยรวม แสดงได้ดังต่อไปนี้



#### 2.4 การสำรวจระบบทดสอบสมรรถนะ PEMFC ในประเทศไทย

ในปัจจุบันงานวิจัยทางด้าน PEMFC ได้แพร่หลายในหน่วยงานวิจัยของรัฐบาล และมหาวิทยาลัยต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ซึ่งจากการสำรวจพบว่าหน่วยงานวิจัยเหล่านี้ได้ทำการสร้างชุดทดสอบสมรรถนะ PEMFC ขึ้นเองในหน่วยงานซึ่งมีหลายแบบ และ หลายขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า ในการสำรวจครั้งนี้ทีมคณะวิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของรูปแบบชุดทดสอบสมรรถนะในส่วนของขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า ระบบการป้อนแก๊สเข้าระบบการให้ความชื้นแก่ PEMFC และระบบการควบคุม/วัดกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 รูปแบบของระบบทดสอบสมรรถนะ PEMFC ที่ใช้ในหน่วยงานต่าง ๆ

| หน่วยงาน   | จำนวนชุดทดสอบ<br>(ชุด) | กำลังไฟฟ้า<br>(วัตต์) | ระบบป้อนแก๊ส<br>ขาเข้า  | ระบบควบคุม/<br>วัดกระแสไฟฟ้า | ระบบให้<br>ความชื้น | การควบคุมไหลของ<br>เชื้อเพลิงที่ทางออก |
|--|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------|--|
| มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์<br>(ภาควิชาวิศวกรรมเคมี)                    | 2                      | 500-1000              | Mass flow<br>controller | Automatic<br>control         | Bubblecolumn        | ไม่มี                                  |
| จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย<br>(ภาควิชาเคมีเทคนิค)                       | 2                      | 5-50                  | Mass flow<br>controller | Automatic<br>control         | Bubblecolumn        | ไม่มี                                  |
| มหาวิทยาลัยเชียงใหม่<br>(ภาควิชาฟิสิกส์)                           | 2                      | 5-300                 | Mass flow<br>controller | Automatic<br>control         | membrane            | ไม่มี                                  |
| มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี<br>พระจอมเกล้าธนบุรี<br>(ภาควิชาวิศวกรรมเคมี) | 3                      | 5-50                  | Mass flow<br>controller | Manual                       | Bubblecolumn        | ไม่มี                                  |
| ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและ<br>วัสดุแห่งชาติ (MTEC)                      | 1                      | 1000 -5000            | Pressure<br>control     | Automatic<br>control         | ไม่มี               | มี                                     |

จากตารางที่ 2-1 พบว่า รูปแบบของชุดทดสอบสมรรถนะ PEMFC ในแต่ละหน่วยงานจะคล้ายคลึงกันในส่วนขององค์ประกอบหลัก ซึ่งหน่วยงานที่สร้างชุดทดสอบสมรรถนะ PEMFC ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์คือ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ซึ่งมีชุดทดสอบขนาด 500 วัตต์ขึ้นไป โดยที่ชุดทดสอบของหน่วยงานอื่นๆ จะมีพิกัดกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าเนื่องจากว่าหน่วยงานเหล่านี้จะสนใจศึกษางานวิจัยพื้นฐานเป็น (Fundamental research) เป็นหลัก เมื่อพิจารณาระบบแก๊สขาเข้าพบว่า ระบบทดสอบจะใช้ Mass flow controller เป็นหลัก ยกเว้นระบบทดสอบ ของ MTEC ที่ใช้ Pressure control ในการควบคุมอัตราการไหล เนื่องจาก เมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงจะมีปริมาณแก๊สที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงสูงเช่นกัน ทำให้การควบคุมอัตราการไหลโดยใช้ Mass flow controller ค่อนข้างลำบาก และ ทำให้อัตราการไหลเสถียรได้ยาก ในส่วนของระบบควบคุมและวัดกระแสไฟฟ้าชุดทดสอบส่วนใหญ่จะใช้ Automatic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

control และ ใช้ โปรแกรม Lab view เพื่อสร้าง Graphical User Interface (GUI) ในการควบคุมการทำงานและเก็บข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่ได้จาก PEMFC

จากการที่ทีมวิจัยได้ทำการสำรวจชุดทดสอบทั้งหมดพบว่า ชุดทดสอบจะถูกติดตั้งอยู่กับที่และมีสายไฟจำนวนมากต่อกับเซลล์เชื้อเพลิง จึงทำให้ระบบดูเหมือนมีความซับซ้อนมาก ดังนั้น ชุดทดสอบที่ทีมวิจัยจะทำการสร้างขึ้นนี้จะเป็นชุดทดสอบแบบเคลื่อนที่ได้ เน้นความสวยงาม และความง่ายในการทำงาน ถึงไฮโดรเจนที่ใช้ก็จะเป็นถังอลูมิเนียมถังเล็กที่สามารถติดกับชุดทดสอบได้ และมีขนาดเบา เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน ระบบควบคุมแก๊สเข้าก็จะเป็นระบบควบคุมความดัน เนื่องจากถูกกว่า และ ง่ายต่อการซ่อมแซมดูแลรักษานอกจากนี้ระบบควบคุม/วัดกระแสไฟฟ้า ทางทีมวิจัยจะใช้ Data acquisition system โดยเขียนโปรแกรมอย่างง่าย ๆ ในการควบคุม ไม่ได้มีการควบคุมแบบ full Automatic control โดยใช้ Lab view เพื่อลดค่าใช้จ่ายของชุดทดสอบ ท้ายที่สุดชุดทดสอบนี้จะมีการติดตั้ง DC-DC converter เพื่อควบคุมแรงดัน ไฟฟ้าขาออกให้สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้จริง ทำให้สามารถนำไปสาธิตการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก PEMFC ได้ในเชิงพาณิชย์

## 2.5 การสร้าง Stack ของ PEMFC

ขั้นตอนนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการสร้าง PEMFC ซึ่งประกอบโดยส่วนต่าง ๆ นำมารวมกันเป็น Stack ของ PEMFC ที่มีพิคกำลังไฟฟ้าขนาดนี้สามารถนำไปใช้กับ Back up power ให้กับระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปได้

### 2.5.1 ขั้นตอนหลักในการสร้าง Stack ของ PEMFC

เนื่องการสร้าง Stack ของ PEMFC มีขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นในส่วนนี้ทีมวิจัยจะอธิบายเพียงขั้นตอนหลักในการสร้าง และ ประกอบ Stack ซึ่งประกอบด้วย

- การผลิต Membrane Electrode Assembly (MEA)
- การผลิต end plate และ bipolar plate
- การประกอบ stack ของ PEMFC

#### 2.5.1.1 การผลิต MEA

MEA ที่ผลิตขึ้นจะเป็นแบบ self-humidifying MEA ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษในการอุ้มน้ำทำให้ Membrane มีความชื้นตลอดเวลา ซึ่งจะมีข้อดีในการงดการให้ความชื้นกับแก๊สเข้า ทำให้ PEMFC มีการทำงานที่ไม่ซับซ้อน เหมาะกับการนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ ขั้นตอนการผลิต MEA มีดังต่อไปนี้

- ทำการผสม ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% Pt/Vulcan XC-72 (Pt/C) จาก E-TEK ผงคาร์บอน PTFE สารละลาย Nafion (Dupont) และ น้ำ deionized เข้าด้วยกันเพื่อทำเป็น สารละลาย catalyst ดังรูปที่ 2-1 และ 2-2 ปริมาณของ Pt ที่ใช้คือ  $0.5 \text{ mg}^2$  ซึ่งเซลล์ 1 แผ่นจะมีพื้นที่ในการทำ

ปฏิกิริยา  $100 \text{ cm}^2$  ต่อแผ่น เมื่อรวมด้าน คาโทด และ อนาโอดต้องใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ  $0.5 \times 200$  ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

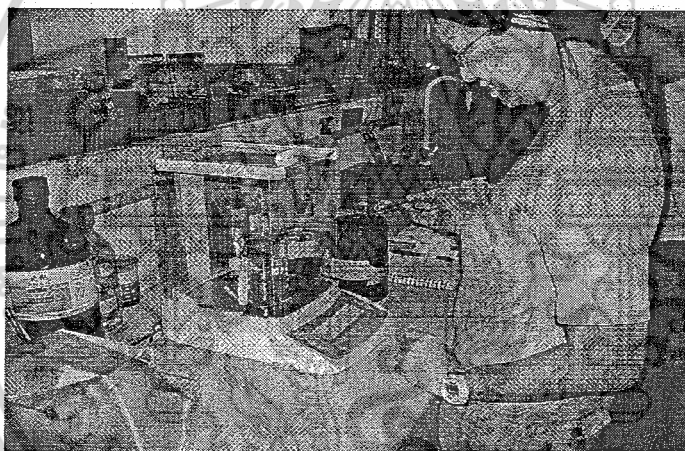
= 100 mg ต่อเซลล์ 1 แผ่น ในกรณีนี้ที่มิวิจัยได้ทำการผลิตสารละลาย catalyst เพื่อเพื่อใช้ใน stack ซึ่งคิดไว้คร่าว ๆ ว่าใน 1 stack จะประกอบด้วย 40 เซลล์ ดังนั้น ปริมาณ catalyst ที่ใช้ทั้งหมดคือ  $100 \text{ mg} \times 40 \text{ แผ่น} = 4000 \text{ mg} (4 \text{ g})$

— ทำการทาสารละลาย catalyst ลงบน carbon paper และนำไปอบโดยใช้ nitrogen oven เพื่อป้องกันไม่ให้ carbon paper ติดไฟเป็นเวลาประมาณ 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 2-3

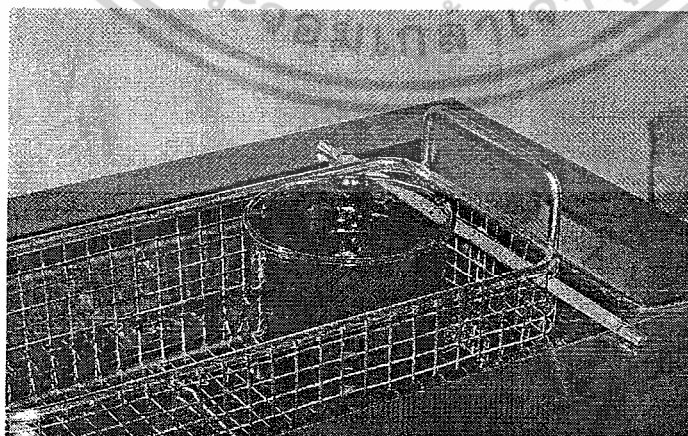
— ตัด carbon paper ที่มี ชั้นของ catalyst coat อยู่ตามขนาดที่ต้องการ ( $100 \text{ cm}^2$ ) มา 2

แผ่น แล้วทำการประกบเข้ากับแผ่น self-humidified membrane ซึ่งมีส่วนผสมของ  $\text{Pt/SiO}_2$  ซึ่งนำมาจากบริษัท Gashub Technology (สิงคโปร์)

— ทำการประกอบ MEA โดยการกดแผ่น carbon paper ที่มี catalyst กับ membrane เข้าด้วยกัน โดยใช้เครื่อง hot press (รูปที่ 2-5) ที่ความดัน 1 MPa และ อุณหภูมิ  $130^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 90 วินาที ก็จะได้แผ่น MEA ที่พร้อมใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2-6

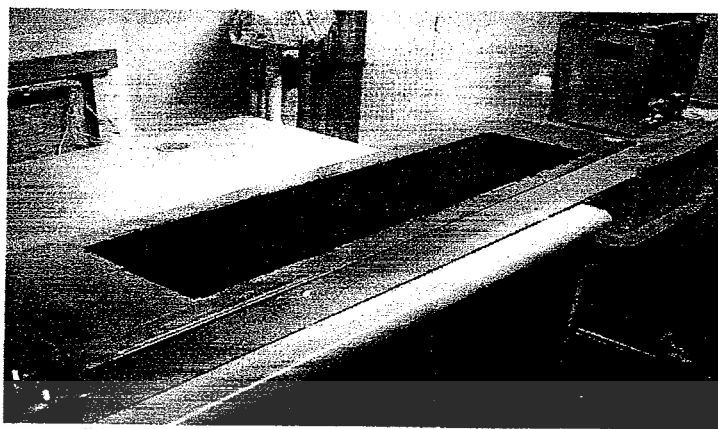


รูปที่ 2-2 ชั่งน้ำหนักของสารต่าง ๆ

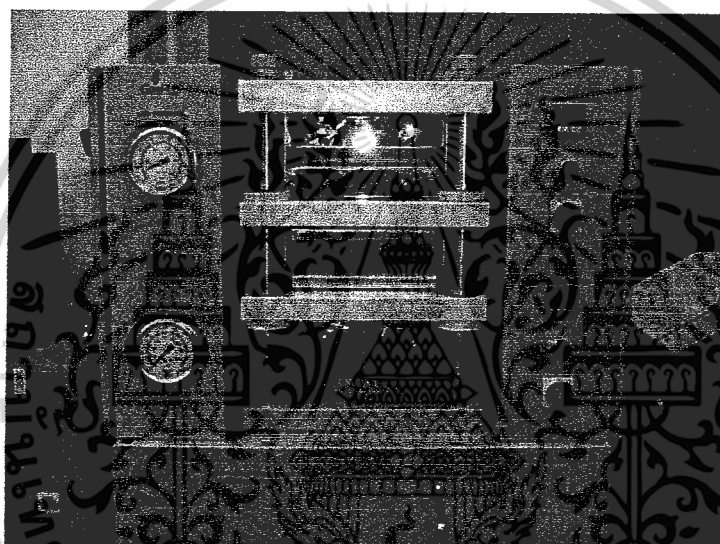


รูปที่ 2-3 สารละลาย catalyst

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-4 นำสารละลาย catalyst ทาลงบน carbon paper



รูปที่ 2-5 เครื่อง hot press

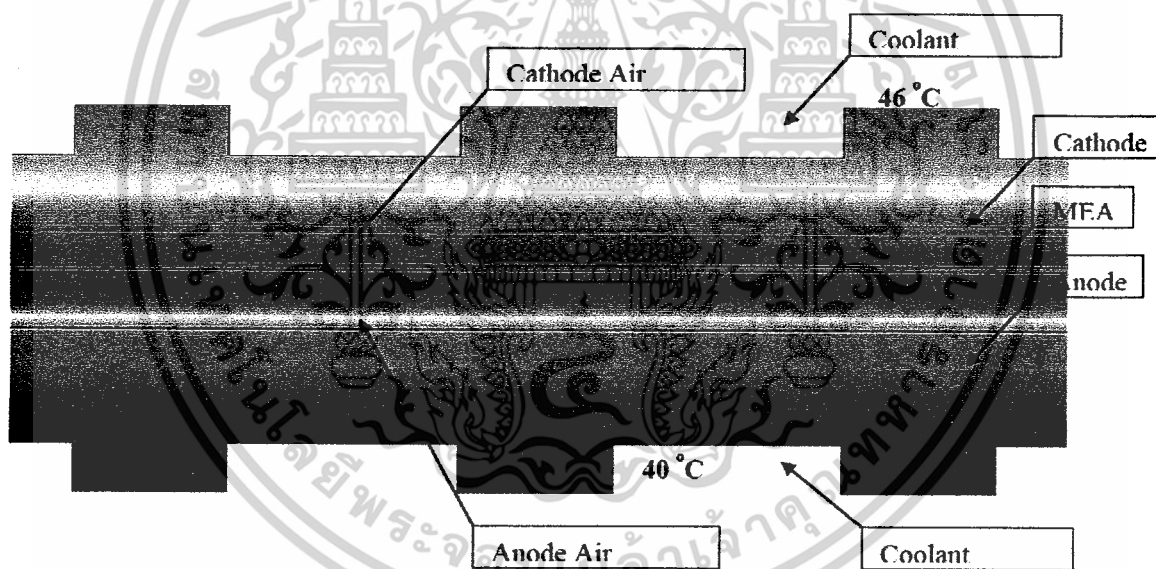


รูปที่ 2-6 MEA ที่พร้อมใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1.2 การผลิต Bipolar plate

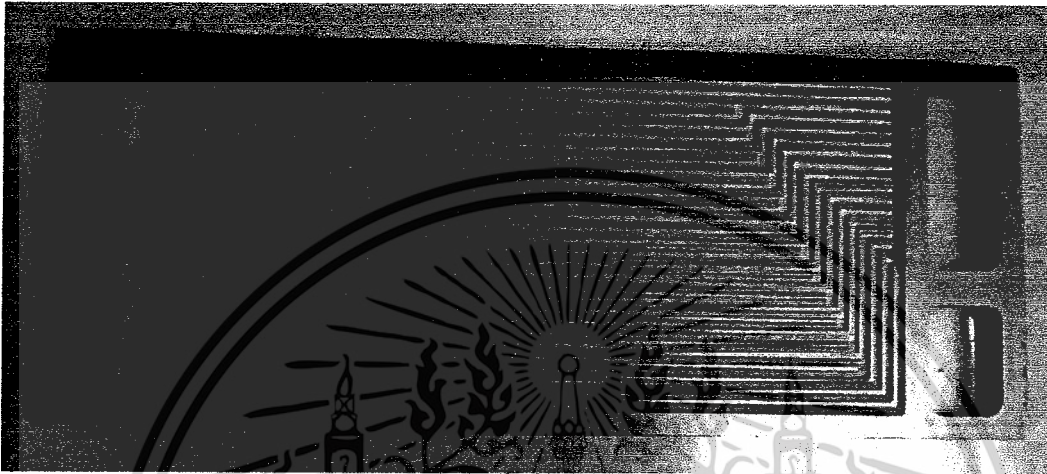
Bipolar plate เป็นส่วนประกอบที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานของ PEMFC เนื่องจากจะทำหน้าที่ 1. เป็นขั้วไฟฟ้าให้อิเล็กตรอนไหลผ่านและเกิดการเชื่อมต่อกันอย่างอนุกรมของเซลล์แต่ละเซลล์ใน Stack 2. เป็นทางเดินของ ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน เพื่อเข้าสู่ MEA ให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี 3. เป็นช่องทางในการนำน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีออกสู่ภายนอก เนื่องจากถ้าน้ำที่เป็นของเหลวถูกขังอยู่ในเซลล์ จะไป Block ไม่ให้ออกซิเจนเข้าสู่ MEA ได้ง่าย และ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานน้อยลง 4. เป็นช่องระบายความร้อน เนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นใน PEMFC เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นจึงทำให้ MEA มีอุณหภูมิสูง ถ้าการระบายความร้อนของ PEMFC ไม่ดีแล้ว MEA อาจเสื่อมสภาพได้เนื่องจากความร้อนเนื่องจาก Bipolar plate เป็นส่วนสำคัญ ดังนั้นที่วิจัยจึงได้ใช้ Software ทางวิศวกรรมศาสตร์ในการออกแบบช่องทางการไหล และ ช่องทางการระบายความร้อน ตัวอย่างของผลการคำนวณการกระจายความร้อนใน PEMFC เพื่อใช้ในการออกแบบขนาดของช่องระบายความร้อน แสดงในรูปที่ 2-7



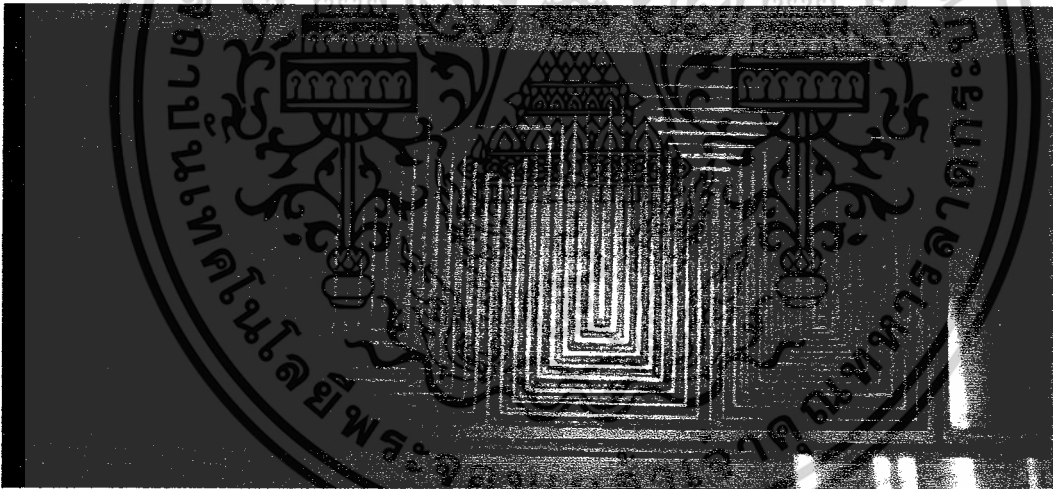
รูปที่ 2-7 ตัวอย่างการคำนวณการกระจายความร้อนใน PEMFC  
เพื่อใช้ในการออกแบบช่องระบายความร้อน

จากการออกแบบทางวิศวกรรมศาสตร์ ทำให้สามารถดำเนินการสร้าง Bipolar plate ขนาด 12 เซนติเมตร × 8.5 เซนติเมตร โดยที่มีช่องระบายความร้อนอยู่ตรงกลาง ของด้าน อาโนด และ คาโทดโดยกีดเป็นร่องในด้านที่ไฮโดรเจน ผ่านเป็นเขวังกด และ ออกซิเจนผ่านเป็นร่องตรง ดังแสดงในรูปที่ 2-7 วัสดุที่ใช้ในการทำ Bipolar plate คือ Composite กราไฟต์ จากบริษัท Bulk molding compound ประเทศสหรัฐอเมริกา ([www.bulkmolding.com](http://www.bulkmolding.com)) เนื่องจากมีคุณภาพในไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

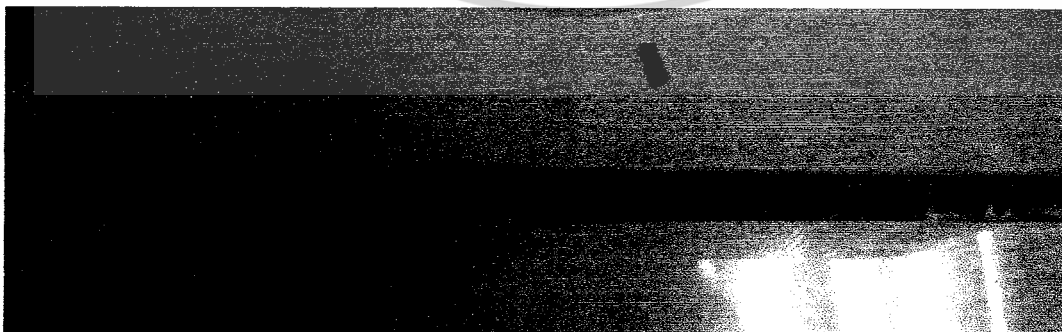
การนำกระแสไฟฟ้า และ นำความร้อนที่ดี และใช้เทคโนโลยีแม่พิมพ์ในการผลิต ทำให้ควบคุมคุณภาพของ แผ่น Composite กราไฟต์ในแต่ละแผ่นค่อนข้างแม่นยำนอกจากนี้ มีราคาค่อนข้างถูก เหมาะกับการผลิต Stack ใช้ในเชิงพาณิชย์ รูปที่ 2-9 แสดงแผ่น Composite กราไฟต์ที่ยังไม่ได้กัดร่อง



ก. Bipolar plate ค้านคาโทด



ข. Bipolar plate ค้านฮาโนด



ค. ช่องระบายความร้อน

รูปที่ 2-8 Bipolar plate ที่ทำจาก composite กราไฟต์

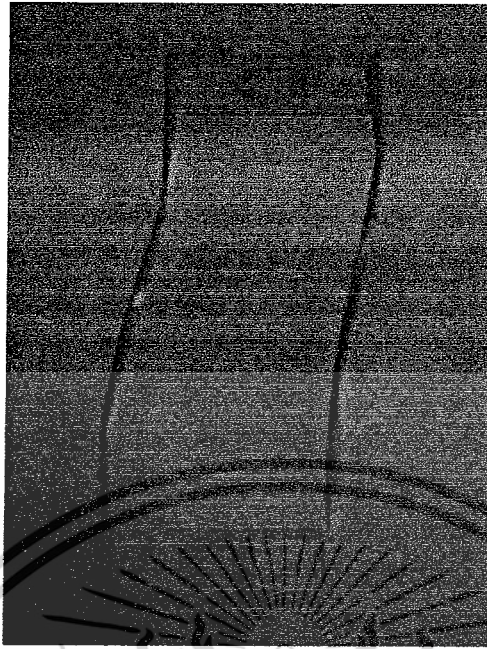
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-9 Composite กราไฟต์ที่ยังไม่ได้กัดร่อง

### 2.5.1.3 การผลิตอุปกรณ์อื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของ PEMFC

— การสร้าง Gasket: หน้าที่ของ Gasket ป้องกันการรั่วของไฮโดรเจน และ ออกซิเจนที่ขอบ เมื่อ bipolar plate ถูกประกบเข้าหากัน ดังนั้นคุณสมบัติของ Gasket จะต้องมีความยืดหยุ่นได้ดี ในกรณีนี้จะใช้แผ่นซิลิโคนเป็นวัสดุ โดยจะต้องสร้างแม่พิมพ์ที่มีความเที่ยงตรงที่จะบีบให้ Gasket มีขนาดพอดี และ ไม่บังพื้นที่ทำปฏิกิริยาของ MEA เพื่อไม่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงดังแสดงในรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-10 Gaskets

— การสร้าง End plate: End plate จะทำหน้าที่ปิดหัว-ท้าย ของ stack เพื่อเพิ่มความแข็งแรงคงทน และ เป็นตัวยึดให้ bipolar plate ติดแน่นกับ MEA เพื่อป้องกันการรั่วของแก๊ส ในงานนี้ End plateจะทำด้วย อะลูมิเนียม เนื่องจากเบา คงทน และ นำกระแสไฟฟ้าได้ดี (รูปที่ 2-11)



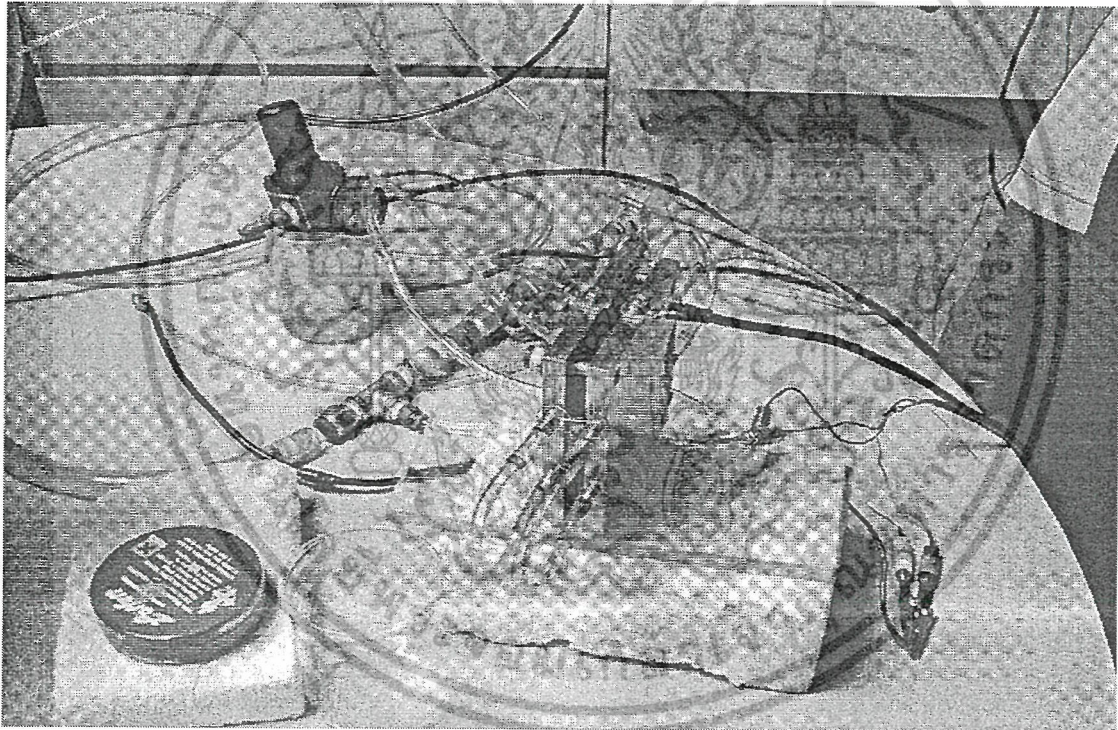
รูปที่ 2-11 ลักษณะของอะลูมิเนียมที่ใช้เป็น end plate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— ขั้วไฟฟ้า: ขั้วไฟฟ้าเป็นตัวกลางนำกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงออกไปสู่ External circuit ในงานวิจัยนี้ขั้วไฟฟ้าจะทำมาจากทองแดง

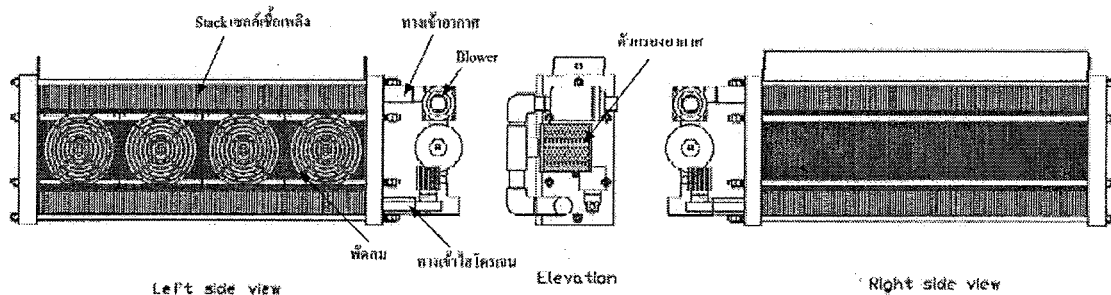
#### 2.5.1.4 การประกอบ Stack ของ PEMFC

ก่อนที่จะทำการคำนวณว่า จะใช้จำนวนเซลล์เท่าไรใน Stack เพื่อให้ได้พิกัดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาพิกัดกำลังไฟฟ้าอย่างคร่าว ๆ ของการทำงานเซลล์เดี่ยว ดังนั้น ทีมวิจัยจึงได้ทำการสร้างชุดทดสอบขนาดเล็กเพื่อดูพิกัดพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เดี่ยว ซึ่งชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวได้ประกอบอย่างง่าย ๆ โดยการป้อน ไฮโดรเจน และ อากาศเข้าเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง และต่อขั้วเข้า โหลดไฟฟ้าซึ่งสามารถวัดพลังงานไฟฟ้าได้ รูปที่ 2-12 แสดงระบบการทำงานของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว



รูปที่ 2-12 ระบบการทำงานของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว

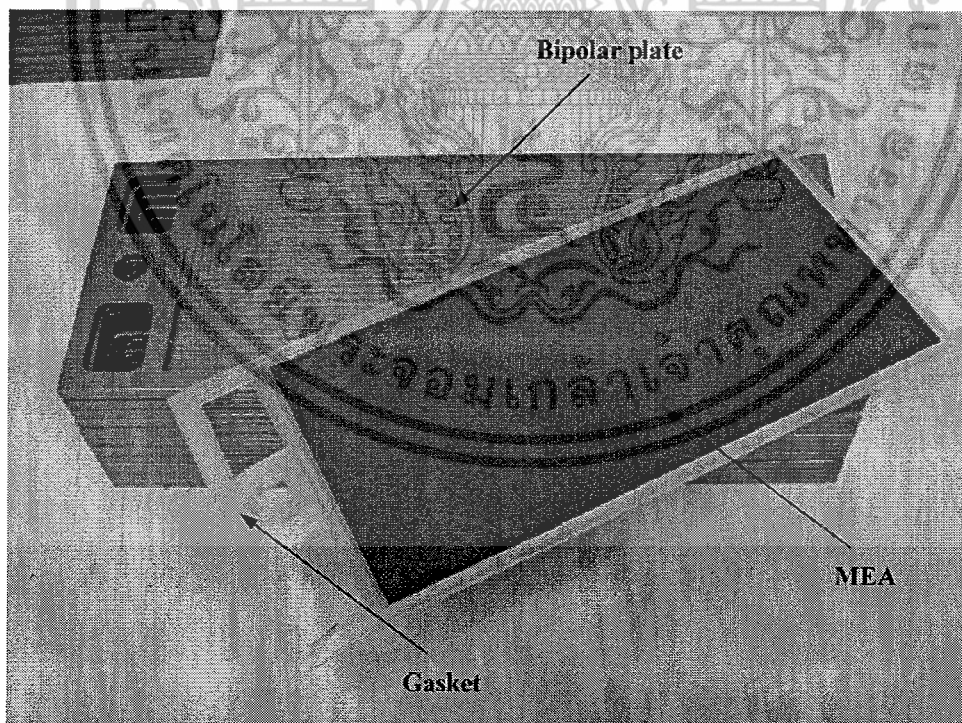
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-13 แบบจำลอง Stack ของ PEMFC โดยใช้โปรแกรม AutoCAD

จากรูปที่ 2-13 พบว่ามีการติด Blower และ ตัวกรองอากาศที่ Stack ของ PEMFC ด้วย อันที่จริงแล้วส่วนนี้ไม่จำเป็นเนื่องจาก เราสามารถป้อนอากาศผ่านชุดทดสอบสมรรถนะได้ แต่สาเหตุที่ทีมวิจัยได้ติดอุปกรณ์ป้อนอากาศเข้าที่ Stack ของ PEMFC เลยเนื่องจากเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้ถึงแม้เซลล์เชื้อเพลิงนี้ไม่ได้ต่อกับชุดทดสอบ

หลังจากทำการออกแบบรูปลักษณะของ Stack เซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 2-13 แล้ว จึงทำการประกอบ Stack ซึ่งส่วนประกอบของ bipolar plate และ MEA ก่อนประกอบ Stack แสดงได้ ดังรูปที่ 2-14 ขั้นตอนการประกอบ Stack ของ PEMFC มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-14 แสดง bipolar plate, MEA และ Gasket ที่ใช้ในการประกอบ Stack

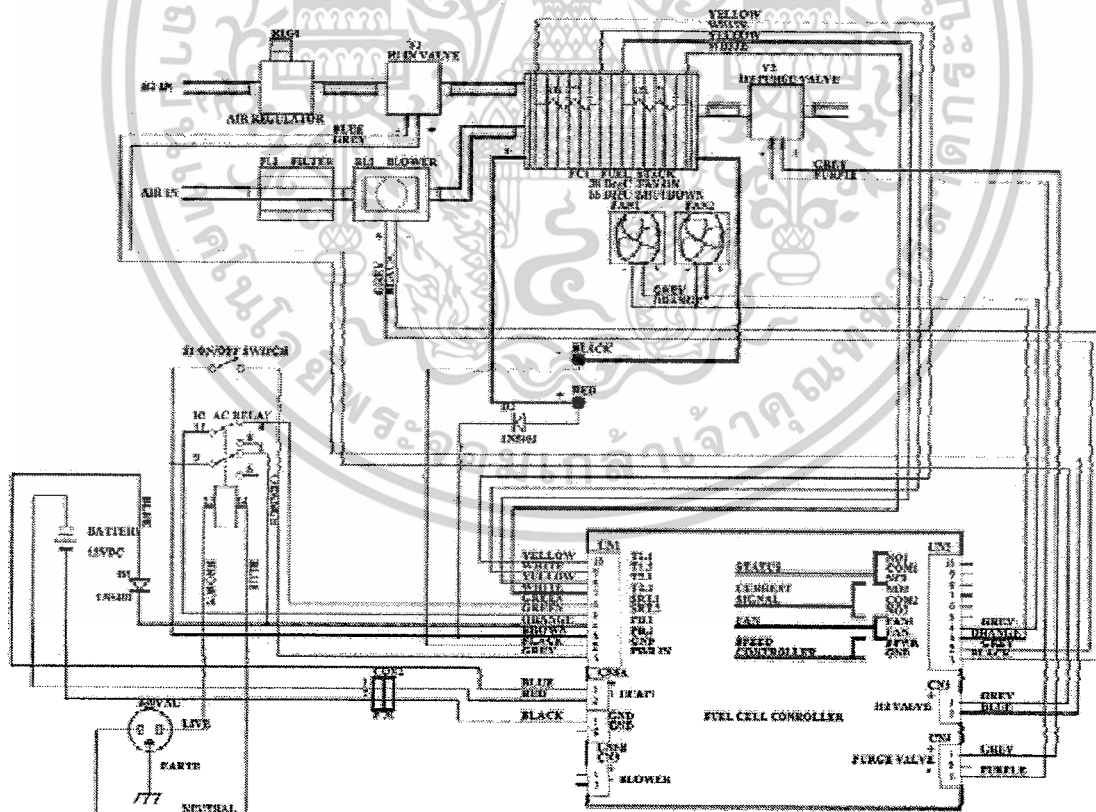
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.5.1.4.1 วางแท่นปิดหัวท้าย Teflon ลงบน โต้ะ จากนั้นจึงนำ End plate ซึ่งทำด้วย อะลูมิเนียมวางบนแท่น Teflon วางโอริง 4 วงบริเวณช่องป้อนแก๊สทั้ง 4 ช่อง สอดก้าน Guide เข้าในช่องป้อนแก๊สที่เจาะไว้ทั้งสองช่องของ End plate วางขั้วไฟฟ้าที่ทำจากทองแดงลงบน End plate โดยผ่านช่อง Guide
- 2.5.1.4.2 วางแผ่น Composite กราไฟต์ที่เป็น End plate ของด้านแอนอด โดยหยาย ด้านที่มีช่องแก๊สไว้ด้านบนโดยผ่านแท่ง Guide
- 2.5.1.4.3 วางปะเก็น Gasket ที่มีแผ่น MEA ติดอยู่ (รูปที่ 2-14) ลงบน Composite กราไฟต์ที่เป็นขั้วแอนอดโดยผ่านแท่ง Guide
- 2.5.1.4.4 วางแผ่น Bipolar plate สอดช่องแท่ง Guide โดยให้ช่องแก๊สทางด้าน คาโทดวางลงด้านล่างประกบกัน MEA เพื่อประกอบเป็นชุด Set ของเซลล์ เดี่ยวที่สมบูรณ์ โดยต้องสังเกตว่าแผ่น Bipolar plate วางเป็นแนวตรงกับ แผ่น End plate ของแอนอด
- 2.5.1.4.5 ทำซ้ำข้อที่ 2.5.1.4.4 จนกระทั่งได้จำนวนเซลล์ครบทั้งหมด 20 เซลล์ จากนั้นจึงนำ Composite graphite ที่เป็นคาโทดวางประกบ โดยให้ด้านที่มีช่องแก๊สของคาโทดไว้ด้านล่าง
- 2.5.1.4.6 วางขั้วไฟฟ้าที่ทำจากทองแดงวางบน Composite กราไฟต์ที่เป็นคาโทด จากนั้นจึงวาง End plate ที่ทำจากอะลูมิเนียมประกบ และ นำแท่นปิดหัว ท้าย Teflon วางบนแผ่นอะลูมิเนียม
- 2.5.1.4.7 ประกอบสลักเกลียว แป้นเกลียว และ แหวนรอง เข้าในรูของสลักเกลียว ของแท่น Teflon ทั้งสอง ขันให้แน่นโดยใช้ประแจ Torque กดด้วยแรงบิด 1 นิวตัน
- 2.5.1.4.8 ทำการ Seal ขอบของ End plate และ Bipolar plate ที่มีช่องแก๊สด้วย ซีลิโคนเพื่อช่วยป้องกันไม่ให้แก๊สรั่วออกสู่ภายนอกแผนผังของการวาง ส่วนประกอบต่างๆ ใน Stack และ ลักษณะของ Stack เซลล์เชื้อเพลิงที่ สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วได้แสดงในรูปที่ 2-15 และ 2-16 ตามลำดับรูป



## 2.5.2 การประกอบชุดระบบไฟฟ้า และ อุปกรณ์อื่น ๆ เข้าที่ Stack ของ PEMFC

หลังจากมีการประกอบ Stack เรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะนำ Stack ไปใช้งานจำเป็นต้องมีการประกอบชุดระบบไฟฟ้า และ อุปกรณ์อื่น ๆ เพื่อให้การทำงานของ Stack ของเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ในขั้นตอนนี้ทีมวิจัยได้สร้างวงจรไฟฟ้าอย่างง่ายเพื่อควบคุมการทำงานของ Stack ของ PEMFC โดยใช้โปรแกรม PROTEL ดังแสดงในรูปที่ 2-17 แนวคิดที่สำคัญในการควบคุมการทำงานของ Stack เซลล์เชื้อเพลิงคือ ระบบการระบายความร้อน และ ระบบการป้อนแก๊ส ในส่วนแรก ทีมวิจัยได้ทำการออกแบบวงจรควบคุมการระบายความร้อน โดยใช้พัดลม ทีมวิจัยได้ติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อวัดอุณหภูมิการทำงานของ Stack เซลล์เชื้อเพลิง โดยเมื่ออุณหภูมิของ Stack เซลล์เชื้อเพลิงเกิน 40 องศาเซลเซียส เซ็นเซอร์จะส่งผลไปที่วงจรควบคุมเพื่อไปสั่งให้พัดลมทำงานเพื่อระบายความร้อน ในส่วนที่สอง ทีมวิจัยได้ทำการสร้างระบบควบคุมการป้อนไฮโดรเจน เนื่องจากไฮโดรเจนมีราคาแพงจึงไม่ควรป้อนไฮโดรเจนอย่างต่อเนื่อง ในงานนี้ไฮโดรเจนจะถูกป้อนเป็น Pulse โดยควบคุมความดันที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิง และ มีการปล่อยไฮโดรเจนออกเป็นระยะ ๆ เพื่อให้ไฮโดรเจนทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ในเซลล์เชื้อเพลิงให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้



รูปที่ 2-17 แผงการต่อระบบไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงานของ Stack

เซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้โปรแกรม PROTEL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัด

### 3.1 อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของ PEMFC

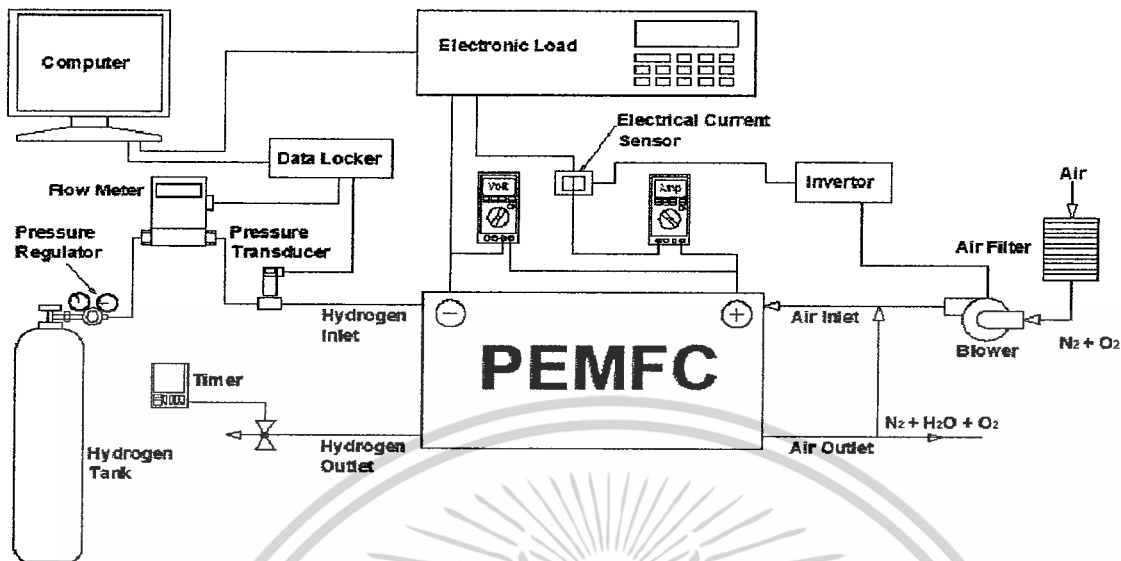
การทดสอบได้ใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน จากสองบริษัทคือ GASHUB ขนาด 2 kW และ BALLARD ขนาด 1.2 kW โดยถูกดัดแปลงเพื่อติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความดันทางเข้าของไฮโดรเจน และเครื่องมือวัดต่างๆ เช่น เครื่องมือวัดความดัน (Pressure Transducer) เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow Meter Transducer) เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า (Amp-Meter) เครื่องมือวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Volt-Meter) และเครื่องปรับเปลี่ยนภาระกำลังทางไฟฟ้า (Electronic Load) ดังแสดงในรูปที่ 3.1

เนื่องจากทดลองจำเป็นต้องเก็บค่าที่มีความละเอียดจากเครื่องมือวัดเพื่อใช้ในการคำนวณที่แม่นยำ ดังนั้นในการใช้เครื่องมือวัดทุกชิ้นจำเป็นต้องทำการสอบเทียบก่อนใช้งาน

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองบริษัทถูกควบคุมการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับภาระกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ โดยมีเครื่องตัวจับกระแสไฟฟ้าขาออกจากเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเพิ่มขึ้น ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าจะส่งสัญญาณไปที่ตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ของเครื่องอัดอากาศ (Air Blower) ทำให้ความเร็วมอเตอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลของอากาศทางเข้าในเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงทางด้านขั้วลบ (Cathode) มีปริมาณเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาตอบสนองภาระกำลังที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในขณะเดียวกันปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นตาม

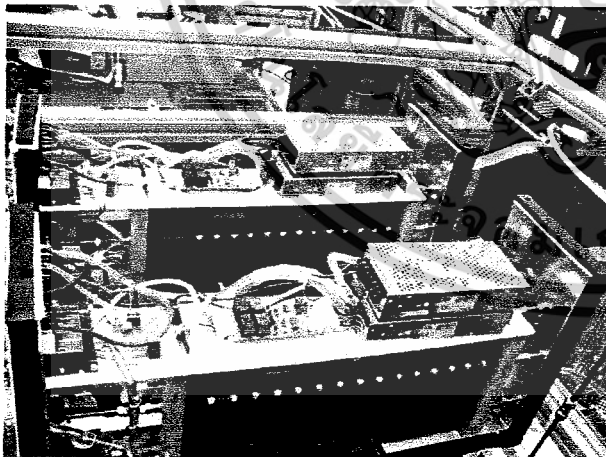
เซลล์เชื้อเพลิงบริษัท GASHUB ถูกควบคุมความดันเกิดทางเข้าที่ 0.25 0.5 0.75 และ 1 บาร์ การควบคุมการเปิดปิดวาล์วทางออกไฮโดรเจนใช้เวลา 2 นาทีสำหรับการปิด และ 1 วินาทีสำหรับการเปิด สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงบริษัท BALLARD ถูกควบคุมความดันเกิดทางเข้า 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 บาร์ การควบคุมในการเปิดปิดวาล์วทางออกของไฮโดรเจนถูกควบคุมจากชุดอุปกรณ์ที่ติดตั้งมาพร้อมกับเซลล์เชื้อเพลิงของบริษัท

หมายเหตุเนื้อหาเกี่ยวข้องกับบทนี้อ้างอิงมาจากรายงานการวิจัยโครงการโครงการเฉลิมพระเกียรติ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ พ.ศ.2551



รูปที่ 3-1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ซึ่งในการทดสอบนี้เราจะใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนของบริษัท GASHUB ขนาด 2 kW จำนวน 2 ตัว และบริษัท BALLARD ขนาด 1.2 kW จำนวน 1 ตัว (รูปที่ 3-2 และรูปที่ 3-3)

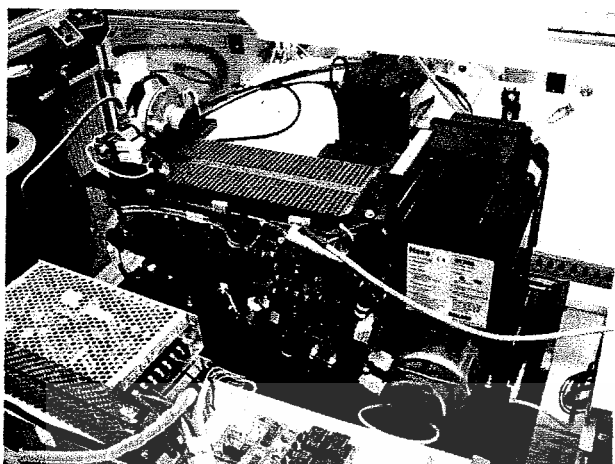


#### ข้อมูลจำเพาะของเซลล์เชื้อเพลิง

|   |
|---|
| Rated voltage: 42-48 V                        |
| Rated current: 46-48A                         |
| Approximate rated output: 2000 W              |
| Output voltage: 40-65 V                       |
| Hydrogen purity: 99.99 % H <sub>2</sub> (vol) |
| Input pressure: 0.25... 1 bar                 |
| Hydrogen consumption: max. 22 L/min           |
| ระบบระบายความร้อน น้ำ                         |

รูปที่ 3-2 GASHUB ขนาด 2 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### ข้อมูลจำเพาะของเซลล์เชื้อเพลิง

|   |
|---|
| Rated voltage: 26 V                           |
| Rated current: 46 A                           |
| Approximate rated output: 1200 W              |
| Output voltage: 22...50 V                     |
| Hydrogen purity: 99.99 % H <sub>2</sub> (vol) |
| Input pressure: 0.2... 17 bar                 |
| Hydrogen consumption: max. 18.5 SL/min        |
| ระบบระบายความร้อน อากาศ                       |

รูปที่3-3 BALLARD ขนาด 1.2 kW

3.1.2 Mass flow meter ของไฮโดรเจน (รูปที่ 3-4) ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่จะป้อนให้กับระบบ เพื่อให้รู้ถึงอัตราการสิ้นเปลืองของไฮโดรเจนที่ใช้นี้สามารถวัดอัตราการไหลได้สูงสุด 20 ลิตรต่อนาที ซึ่งเหมาะกับระบบที่ผลิตกำลังงานได้ไม่เกิน 500 วัตต์ โดยจะมีค่าเพื่อไว้ประมาณ 2-3 เท่าเพื่อสำหรับปรับค่าที่เหมาะสม และจะส่งข้อมูลอัตราการไหลให้กับอุปกรณ์บันทึกข้อมูลเพื่อบันทึกค่าที่อ่านได้



รูปที่ 3-4 Mass flow meter ของไฮโดรเจน

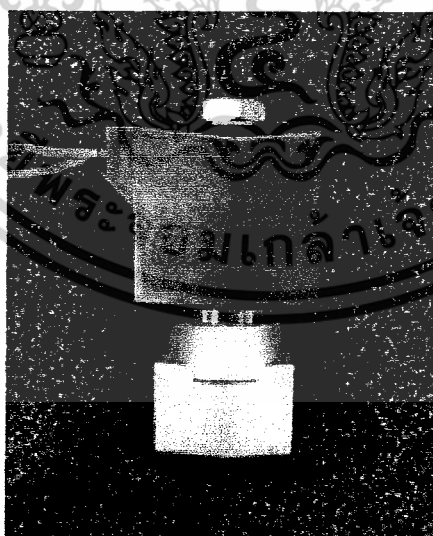
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 Mass Flow Meter GFM & Control valve (รูปที่ 3-5) ในส่วนของ Mass Flow Meter GFM จะทำหน้าที่วัดการไหลภายในท่อคู่ได้ที่มีเตอร์และในส่วนของ Control valve ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด ปิด สนามแม่เหล็ก ซึ่งจะปรับลดการไหลภายในท่อ โดยจะปรับเพิ่มขึ้นหรือ ลดลง เพื่อให้การไหลคงที่



รูปที่ 3-5 Flow Meter GFM & Control valve

3.1.4 Solenoids (รูปที่ 3-6) เป็นวาล์วไฟฟ้าทำหน้าที่ปิด – เปิดให้แก๊สผ่านเข้าสู่ระบบ โดยมันจะถูกควบคุมด้วยสวิตซ์ไฟฟ้า 220 โวลต์



รูปที่ 3-6 Solenoids

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 Flow meter (รูปที่ 3-7) ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของไฮโดรเจนและไนโตรเจนที่จะป้อนให้กับระบบ โดยฝั่งทางซ้ายวัดอัตราการไหลของไฮโดรเจนและฝั่งทางขวาวัดอัตราการไหลของไนโตรเจน เพื่อให้รู้ถึงอัตราการไหลของไฮโดรเจนและไนโตรเจน



รูปที่ 3-7 Flow meter

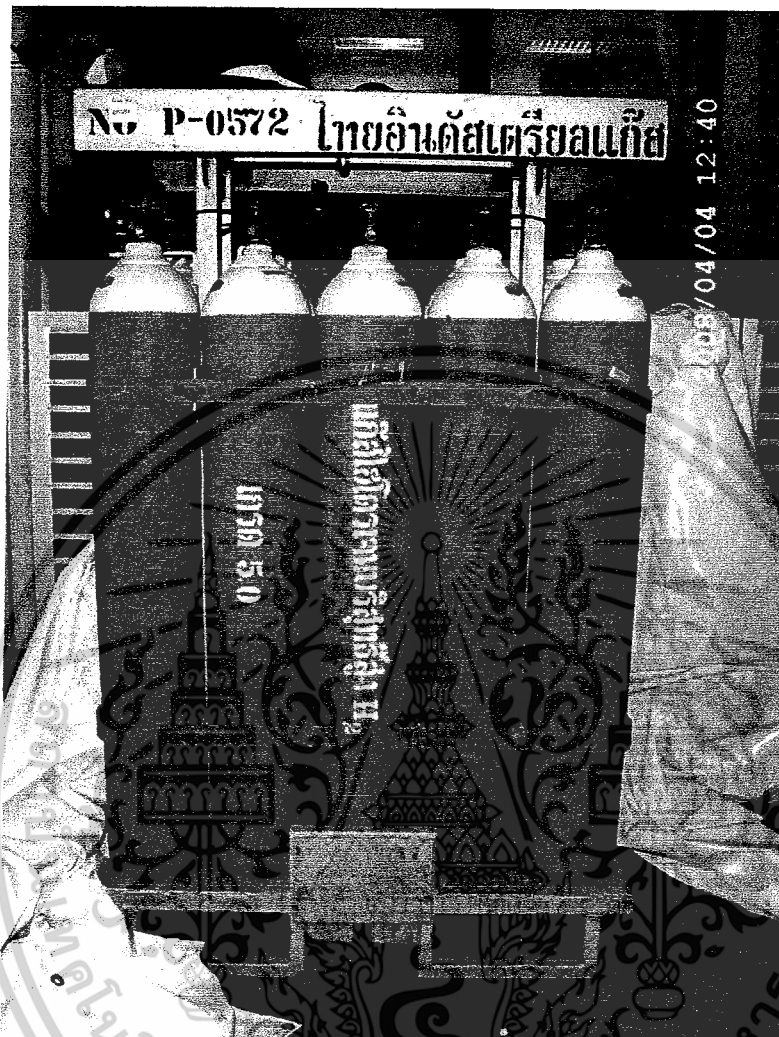
3.1.6 Regulator (รูปที่ 3-8) ทำหน้าที่ปรับลดความดันของแก๊สที่ไหลผ่านเข้า ซึ่งจะทำการปรับการไหลให้ได้ค่าตามที่ต้องการ โดยที่จะปรับความดันให้เพิ่มขึ้นหรือลงได้ตามต้องการ และสามารถดูความดันได้จากเกจวัด



รูปที่ 3-8 Regulator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 ถังไฮโดรเจน (รูปที่ 3-9) ทำหน้าที่เก็บไฮโดรเจนเพื่อนำไปใช้งานในชุดทดสอบสมรรถนะ ซึ่งถังไฮโดรเจนที่ใช้งานนี้เป็นถังไฮโดรเจนขนาด 15 ถัง



รูปที่ 3-9 ถังไฮโดรเจน Hydrogen 99.99 % H<sub>2</sub>

3.1.8 ความต้านทานปรับค่าได้ หรือ Electronic load (รูปที่ 3-10) เป็นอุปกรณ์ที่

สำคัญในการวัดกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่ Electronic load สามารถปรับค่าความต้านทานได้ที่ค่าต่างๆ เมื่อความต้านทานถูกปรับแล้ว กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงก็จะเปลี่ยนไปทำให้สามารถวัด Performance curve จากเซลล์เชื้อเพลิงได้ ในงานวิจัยนี้พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ Electronic load คือ 600 วัตต์ ซึ่ง Electronic load นี้สามารถปรับความต้านทานได้หลายโหมดดังนี้ โหมดกระแสคงที่ (Constant current mode) โหมดแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Voltage mode) โหมดความต้านทานคงที่ (Constant resistance mode) และ โหมดความต้านทาน

ขึ้นกับเวลา (Transient mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-10 ความต้านทานปรับค่าได้ หรือ Electronic load

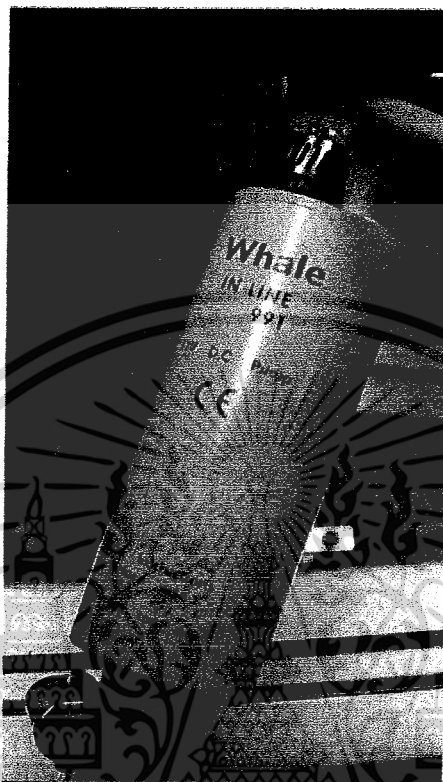
3.1.9 หม้อน้ำหล่อเย็น (รูปที่ 3-11) เป็นการระบายความร้อนให้กับระบบหอเซลล์เชื้อเพลิง โดยจะทำหน้าที่ระบายความร้อนเพื่อไม่ให้หอเซลล์มีความร้อนสูงเกินไป



รูปที่ 3-11 หม้อน้ำหล่อเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.10 Pumps (รูปที่ 3-12) ทำหน้าที่เพิ่มอัตราการไหลของน้ำจากหอเซลล์เข้าสู่หม้อน้ำหล่อเย็นมากขึ้น



รูปที่ 3-12 Pumps

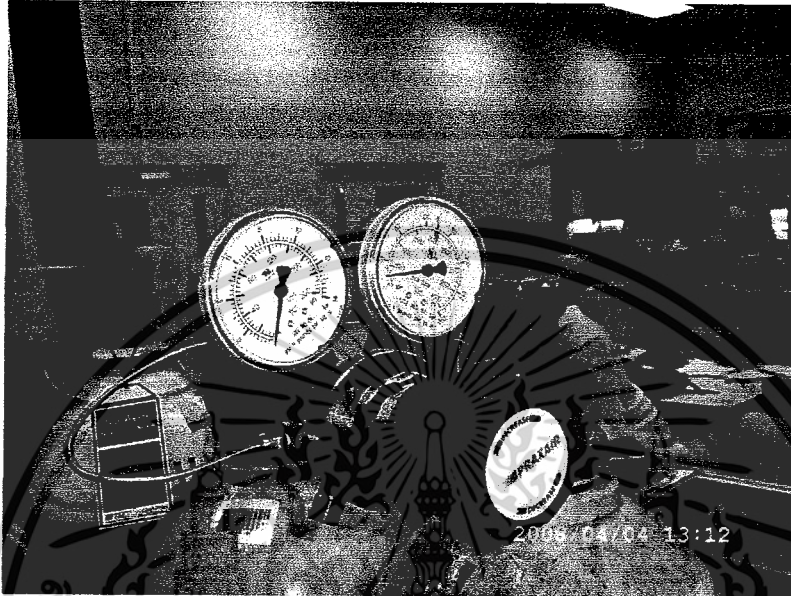
3.1.11 ตัวตรวจจับการรั่วไหลของไฮโดรเจน (รูปที่ 3-13) ซึ่งจะทำหน้าที่คอยตรวจสอบการรั่วไหลของไฮโดรเจนเมื่อเกิดการรั่วจะมีสัญญาณร้องเตือน



รูปที่ 3-13 ตัวตรวจจับการรั่วไหลของไฮโดรเจน

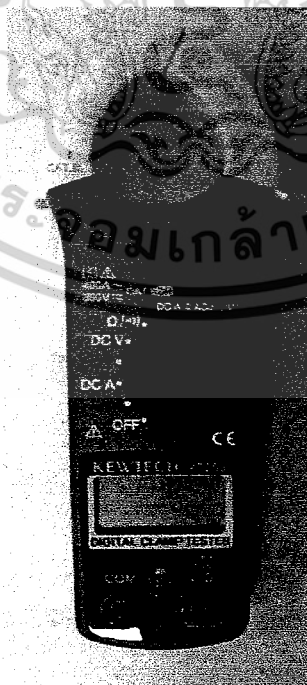
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.12 Pressure Regulator เป็นตัวตรวจวัดบอกระดับความดันภายในถังและควบคุมการเปิดปิดวาล์ว



รูปที่ 3-14 Pressure Regulators

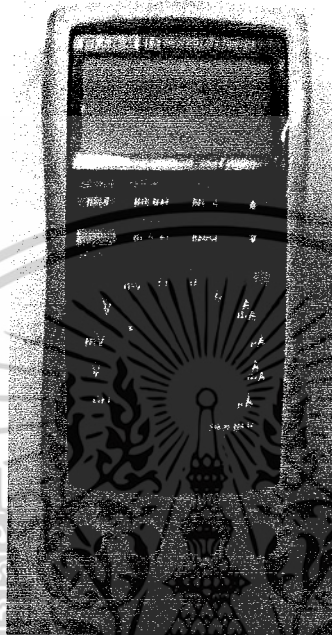
3.1.13 (รูปที่ 3-15) Amp meter (แอมมิเตอร์) แบบดิจิตอล



รูปที่ 3-15 Amp meter

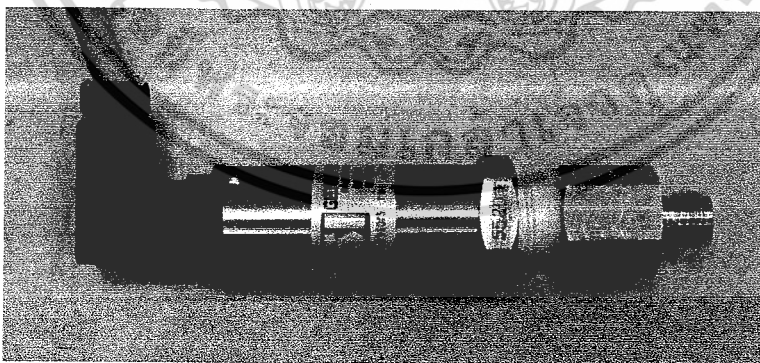
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.14 (รูปที่ 3-16) Voltmeter (โวลต์มิเตอร์) ใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้าตามจุดต่างๆที่ต้องการวัด โวลต์มิเตอร์



รูปที่ 3-16 Voltmeter (โวลต์มิเตอร์)

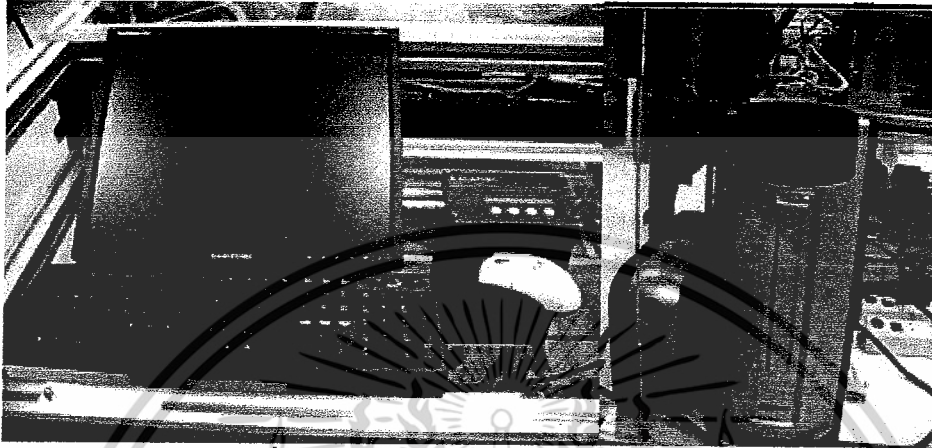
3.1.15 (รูปที่ 3-17) Pressure Transducers ทำหน้าที่วัดความดันภายในท่อเซลล์ที่ทำกรทดลองแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน



รูปที่ 3-17 Pressure Transducers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.16 (รูปที่ 3-18) คอมพิวเตอร์ใช้ในการประมวลค่าต่างๆ ที่เก็บได้จากผลการทดลอง



รูปที่ 3-18 คอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล

### 3.2 ลักษณะโดยรวมของชุดทดสอบสมรรถนะ Stack ของ PEMFC

ลักษณะโดยรวมของชุดทดสอบสมรรถนะ Stack ของ PEMFC ซึ่งโครงสร้างของชุดทดสอบนี้ทำจาก Aluminum profile อย่างดีทำให้มีน้ำหนักเบา และมีลูกกลิ้งอยู่ด้านล่างทำให้เคลื่อนที่ได้ อุปกรณ์ที่สำคัญต่าง ๆ ของชุดทดสอบจะถูกวางบน แผ่นอะคริลิก ที่ยึดติดกับ Aluminum profile ทำให้มีความคงทนแข็งแรงพอที่จะรับน้ำหนักอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ ในชุดทดสอบนี้จะมีอยู่ 3 ส่วนหลักๆ โดยส่วนที่หนึ่ง คือ ชุดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์และฮาร์ดแวร์ ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมระบบการจ่ายของไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน โดยใช้โปรแกรม PLC ในการควบคุม ในส่วนที่สอง เป็นระบบของการไหลของไฮโดรเจนและ PEMFC ซึ่งจะมีอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ และในส่วนที่สาม คือ ที่วางชุดอิเล็กโทรดน้ำจืดและแอมแปร์และช่องจ่ายไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตของเครื่อง

## บทที่ 4

### ทฤษฎีและผลการทดสอบ

#### 4.1 วิธีการทดลอง

ภายหลังจากประกอบชุดทดลองเรียบร้อยแล้วนำชุดทดลองที่ได้ต่อเข้ากับอุปกรณ์ดังแผนผังที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยคุณสมบัติของก๊าซไฮโดรเจน ค่าความหนาแน่นและค่าความร้อนต่ำ (LHV) นำไปใช้ในการคำนวณหาความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพเชิงความร้อน ถูกแสดงดังตารางที่ 1

| คุณสมบัติของไฮโดรเจน | ค่า                     | หน่วย             |
|----------------------|-------------------------|-------------------|
| ความหนาแน่น          | 0.084                   | kg/m <sup>3</sup> |
| ค่าความร้อนต่ำ (LHV) | 120.1 x 10 <sup>6</sup> | J/kg              |
| ค่าความร้อนสูง (HHV) | 141.9 x 10 <sup>6</sup> | J/Kg              |

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของไฮโดรเจน

##### 4.1.1 การกำหนดอุปกรณ์เครื่องมือ

ในการกำหนดอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการวัด โดยเทียบกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ PEMFC ที่ 2000 w และค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่ 50% , หารอัตราการไหลเชิงมวลได้จากสมการที่(4.1)

$$\dot{m} = \frac{P}{\eta_{th} LHV} \quad (4.1)$$

- $\eta_{th}$  คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน  
 $P$  คือ กำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง(J/s)  
 $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)  
 $LHV$  คือ ค่าความร้อนต่ำ (J/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 การกำหนดขนาดท่อที่ใช้

ขนาดท่อที่ใช้จะมีอยู่ 2 ขนาด คือ 2 นิ้ว กับ 3 นิ้ว โดยจะกำหนดคุณสมบัติห้องที่ 27 C โดยการหาค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ได้จากสมการที่ (4.2)

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} = \frac{Dv}{\nu} \quad (4.2)$$

- Re คือ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์  
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ  
 v คือ ความเร็วของไหลภายในท่อ  
 $\nu$  คือ ความหนืดไคเนมาติกส์  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล  
 $\mu$  คือ ความหนืดไดนามิกส์

#### 4.2 วิธีการตรวจสอบการรั่ว

ก่อนทำการทดลองเก็บข้อมูลต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าการรั่วอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

##### 4.2.1 การตรวจสอบการรั่วให้อยู่ในปริมาณที่ยอมรับได้

4.2.1.1 เปิดวาล์วที่หัวถังแก๊สในโตรเจนและทำการปรับความดันที่ Regulator ไปยังค่าที่ต่ำที่สุด

4.2.1.2 หมุนวาล์วให้แก๊สไหลผ่าน Regulator

4.2.1.3 ปรับอัตราการไหลที่เข้าสู่ชั้นหอเซลล์ โดยให้สังเกตอัตราการไหล ที่ Flow Meter

4.2.1.4 จากนั้นทำการปิดวาล์วทั้งส่วนหัวและส่วนท้ายของระบบ

4.2.1.5 ตรวจสอบดูว่ามีแก๊สไหลที่ทางออกของชั้นวางเซลล์แล้วปิดทางออกของชั้นวางเซลล์

4.2.1.6 สังเกตดูว่าแก๊สที่ Regulator ลดลงมาที่ตำแหน่งศูนย์หรือไม่

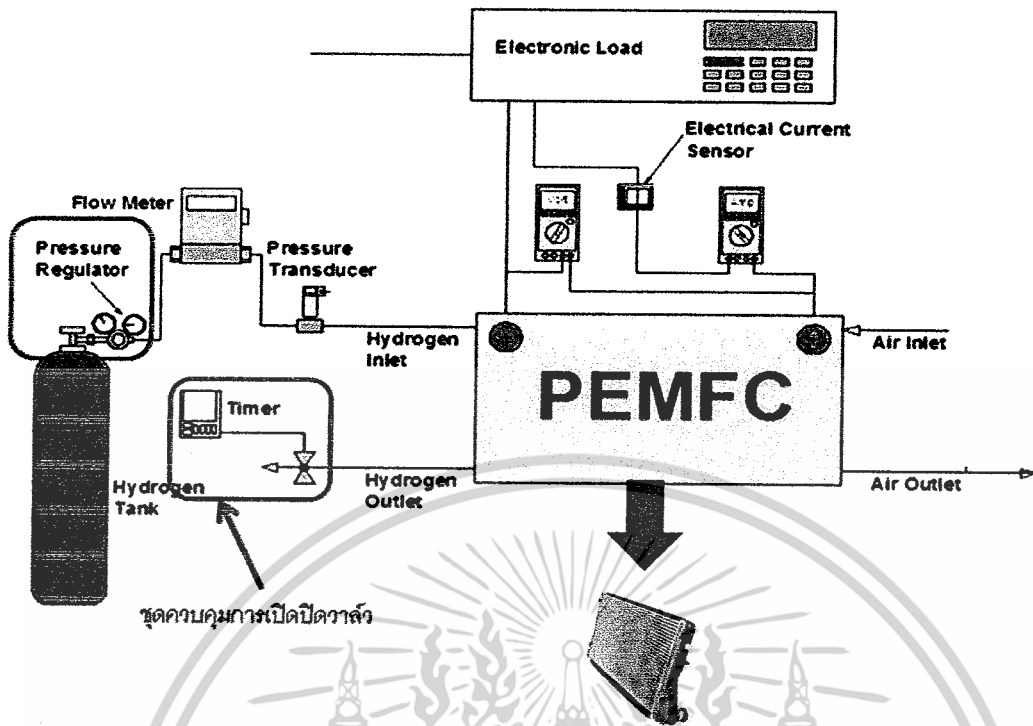
4.2.1.7 ถ้ามีการรั่วดังนั้นให้ใช้ Snoop ซึ่งเป็นการใช้น้ำสบู่มาทาเพื่อตรวจหารอยรั่วแล้วทำการทากาวตรงบริเวณที่พบรอยรั่ว แล้วรอให้กาวแห้งละทำซ้ำในข้อ 4.2.1.1 ถึง 4.2.1.6 อีกครั้ง

4.2.1.8 ทดลองที่ 10 ชั่วโมงถ้าไม่มีการรั่วก็จะดูว่าซึมที่ประมาณกี่ชั่วโมงเพื่อให้อยู่ในปริมาณที่ยอมรับได้

4.2.1.9 จากการตรวจสอบโดยทั่วไปจะต้องมีการรั่วซึมอยู่แล้วเพราะไฮโดรเจนนั้นมี

##### คุณสมบัติในการซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-1 แผนผังการทดสอบสมรรถนะที่ระบบป้อนแก๊สเข้าแบบ Pressure control

### 4.3 ทฤษฎีและการคำนวณ

เมื่อดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยการปรับความต้านทานที่ Electronic load ที่ค่าต่าง ๆ เพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงแสดงกระแสไฟฟ้า และ ความต่างศักย์ที่ผลิตได้ จากนั้นจึงนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เหล่านี้เพื่อดูประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงบริษัท GASHUB ถูกควบคุมความดันแก๊สทางเข้าที่ 0.25 0.5 0.75 และ 1 บาร์ การควบคุมการเปิดปิดวาล์วทางออกไฮโดรเจนใช้เวลา 2 นาทีสำหรับการปิด และ 1 วินาทีสำหรับการเปิด สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงบริษัท BALLARD ถูกควบคุมความดันแก๊สทางเข้า 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 บาร์ การควบคุมในการเปิดปิดวาล์วทางออกของไฮโดรเจนถูกควบคุมจากชุดอุปกรณ์ที่ติดตั้งมาพร้อมกับเซลล์เชื้อเพลิงของบริษัท

ใช้ในการคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน จำเป็นต้องใช้ค่าความหนาแน่นของไฮโดรเจนจากตารางที่ 1 เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวล (kg/s) เนื่องจากในการทดลองเครื่องมือวัดการไหลเป็นหน่วย (L/min) ถูกแสดงในสมการที่ (4.3)

$$\dot{m} = \frac{\rho V}{60000} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $m$  คืออัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)  $V$  คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรจากการทดลอง (L/min) และ  $\rho$  ค่าความหนาแน่นของไฮโดรเจน (kg/m<sup>3</sup>)

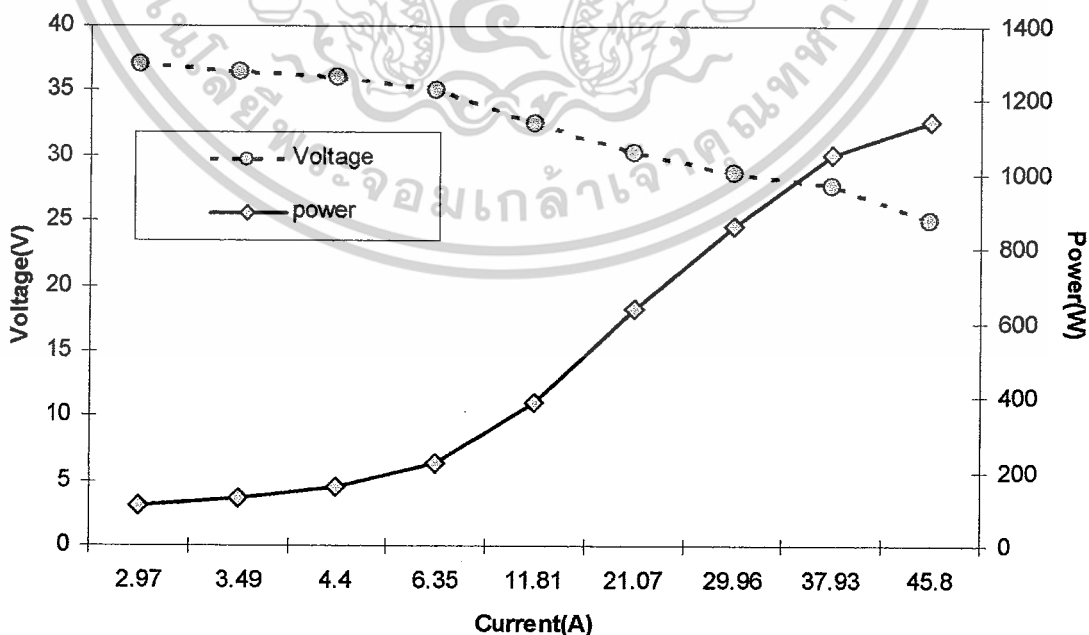
สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน จะใช้ค่าความร้อนต่ำ(LHV) ในการคำนวณ โดยสมการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนคือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ได้ต่อพลังงานที่จ่ายให้ ซึ่งสามารถแสดงในสมการที่ (4.4)

$$\eta_{th} = \frac{P}{m LHV} \tag{4.4}$$

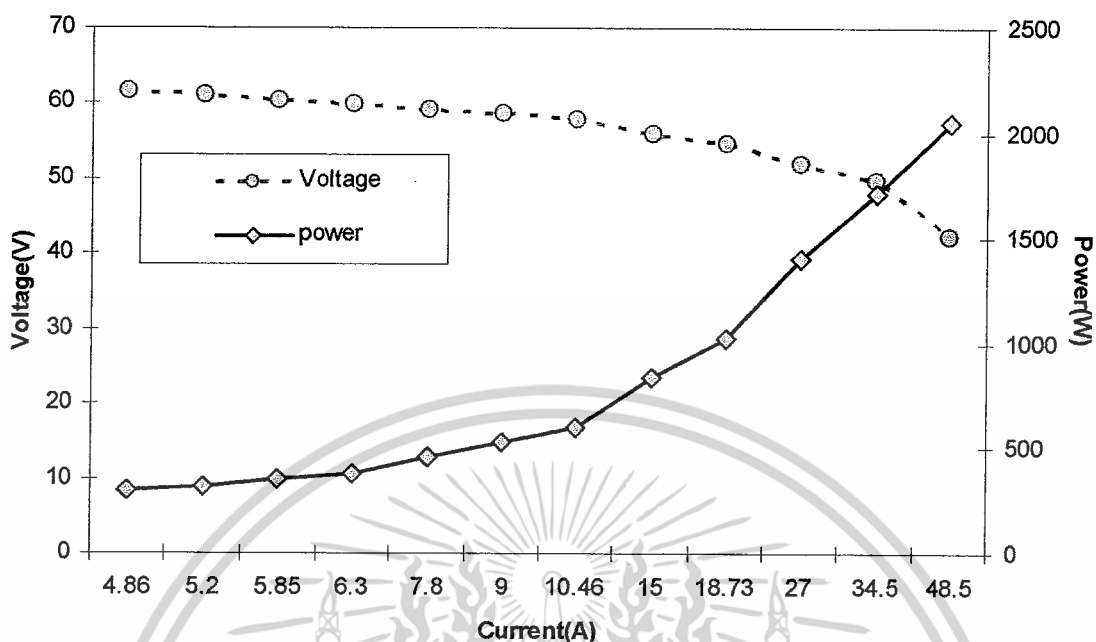
โดยที่  $\eta_{th}$  คือประสิทธิภาพเชิงความร้อน  $P$  คือกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง(J/s) และ  $LHV$  คือค่าความร้อนต่ำ (J/kg)

#### 4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของ PEMFC

ในการทดสอบเป็นสองส่วน คือ ทำการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่ภาระกำลังสูงสุด โดยกำหนดกำลังสูงสุดขึ้นอยู่กับขนาดที่แต่ละบริษัทกำหนดมา ซึ่งจะไม่ทำการทดสอบที่ภาระเกินภาระสูงสุดเนื่องจากอาจเกิดความเสียหายต่อเซลล์เชื้อเพลิงได้ ส่วนที่สองทำการทดสอบที่ภาระ 40 – 50 เปอร์เซ็นต์ โดยผลของกราฟ I-V-P ถูกแสดงดังรูปที่ 2 และ 3 และการปรับเปลี่ยนความดันทางเข้าของไฮโดรเจน ถูกแสดงในรูปที่ 4 5 6 และ 7

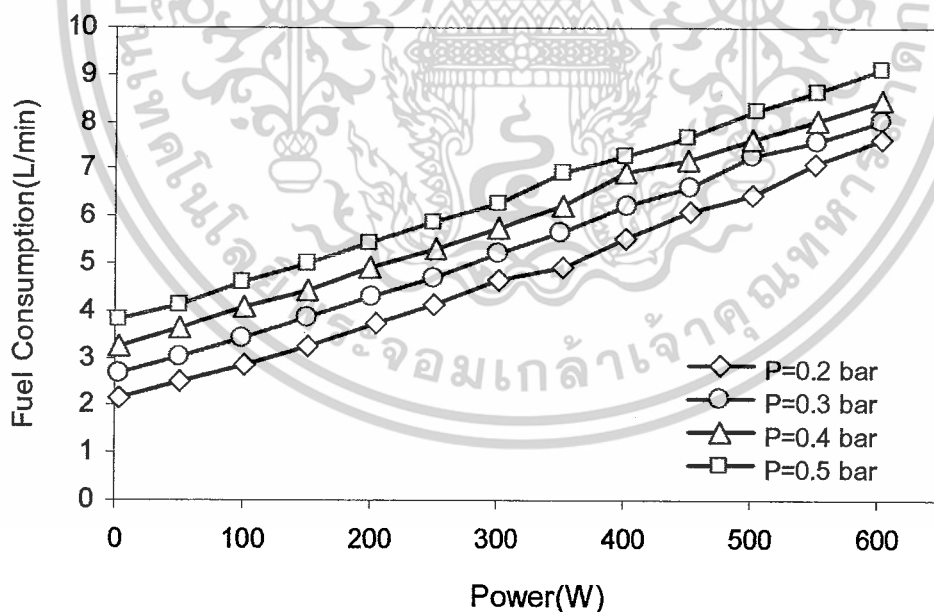


รูปที่ 4-2 กราฟ I-V-Pตามข้อกำหนดของบริษัท BALLARDขนาด 1.2 kW  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิศวกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญที่ได้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-3 กราฟ I-V-P ตามข้อกำหนดของบริษัท GUSHUB ขนาด 2 kW

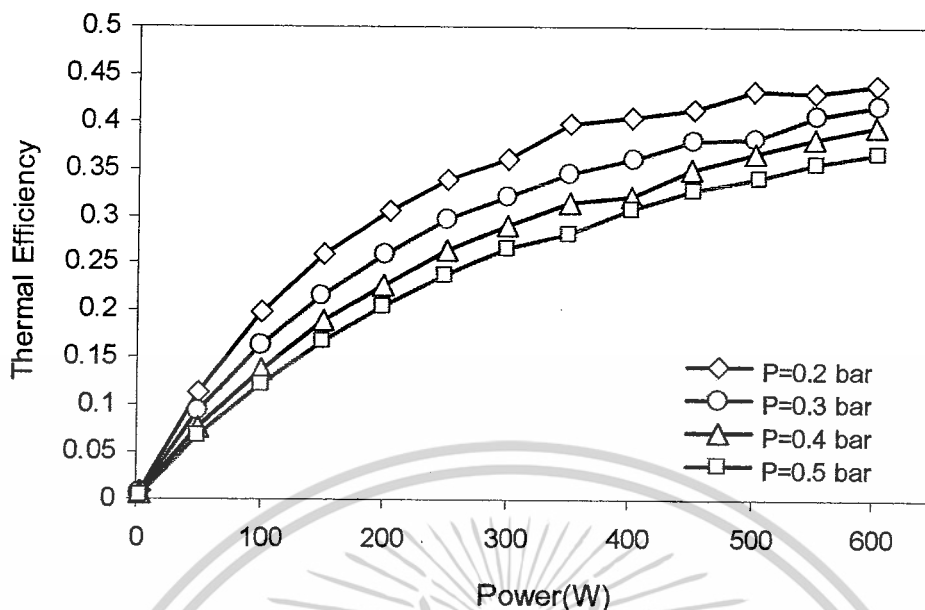
รูปที่ 4-2 และ รูปที่ 4-3 แสดงกราฟ I-V-P ของแต่ละบริษัท จะเห็นได้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะลดลง และกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

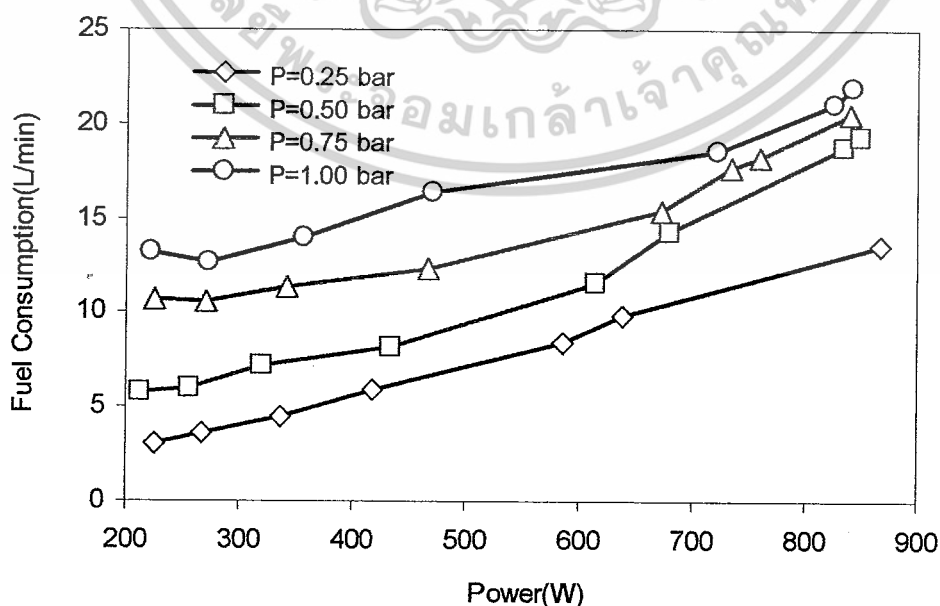
ไฮโดรเจนกับกำลังไฟฟ้าที่ได้ของบริษัทBALLARDที่ความดันทางเข้าต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



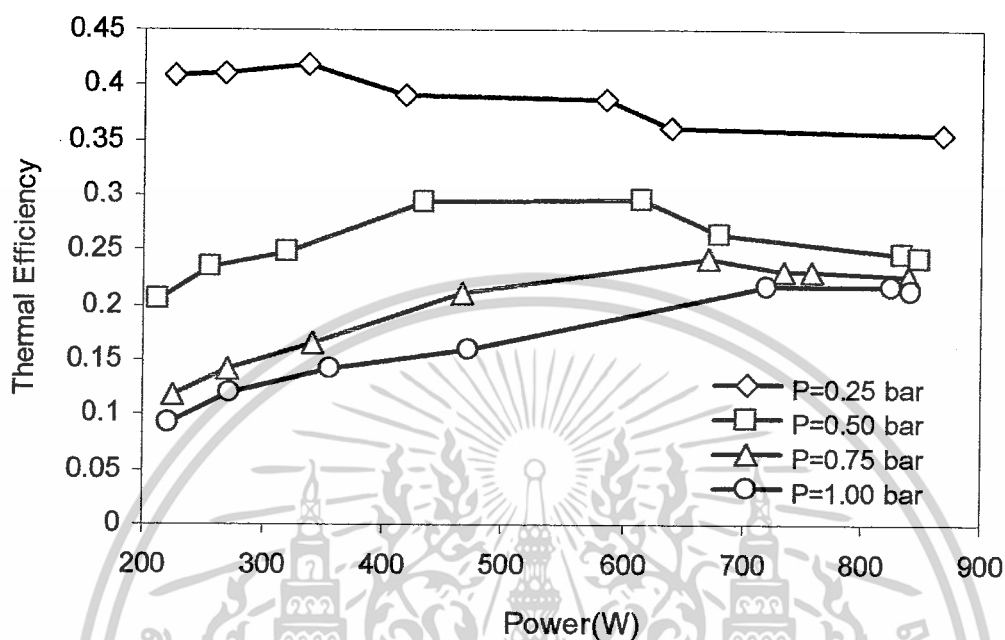
รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงกับกำลังไฟฟ้าที่ได้ของบริษัท BALLARD ที่ความดันทางเข้าต่างกัน

จากรูปที่ 4-4 แสดงการบริโภคเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และพบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความดันของไฮโดรเจนจาก 0.2 บาร์ เป็น 0.5 บาร์ ปริมาณการบริโภคเชื้อเพลิงก็สูงขึ้นตาม ในทางตรงกันข้ามกันประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะต่ำลงเมื่อเพิ่มความดันของไฮโดรเจน สำหรับรูปที่ 4-5 ช่วงกำลังไฟฟ้า 0 W มีการใช้เชื้อเพลิงเนื่องจากพลังงานถูกใช้สำหรับการหล่อเลี้ยงระบบควบคุมที่มาพร้อมกับบริษัท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ของอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงไฮโดรเจน  
กับกำลังไฟฟ้าที่ได้ของบริษัท GUSHUB ที่ความดันทางเข้าต่างกัน



รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง  
กับกำลังไฟฟ้าที่ได้ของบริษัท GUSHUB ที่ความดันทางเข้าต่างกัน

จากรูปที่ 4-6 จะพบว่าในขณะที่กำลังทางไฟฟ้าสูงการบริโภคปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นตาม และเมื่อปรับเปลี่ยนความดันทางเข้าของเซลล์เชื้อเพลิงการบริโภคเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก ขณะที่ความดันในตัวเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้นอัตราการรั่วซึมออกจากตัวเซลล์เพิ่มขึ้น และอัตราการใช้ประโยชน์ของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนลดลง เนื่องจากสูญเสียจากการระบายปริมาณไฮโดรเจนที่ทางออกเป็นจำนวนมากขณะความดันสูง สำหรับรูปที่ 4-7 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลงเมื่อความดันทางเข้าของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผล

#### 5.1 สรุปและวิจารณ์ผล

จากการทดลองปรับเปลี่ยนความดันทางเข้าของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยปรับเปลี่ยนความดันจาก 0.2 - 1 บาร์ของบริษัท GASHUB และ BALLARD พบว่าที่ความดันต่ำอัตราการใช้ประโยชน์ของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะสูง ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนดีกว่าที่ความดันทางเข้าของไฮโดรเจนสูงกว่า

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรที่จะมีการสร้าง Stack ของ PEMFC พร้อมชุดทดสอบสมรรถนะ ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าขนาดสูงกว่านี้ (ในระดับกิโลวัตต์) เพื่อครอบคลุมการนำเซลล์เชื้อเพลิงไปประยุกต์ใช้ในงานหลายๆ ประเภท

5.2.2 ควรจะมีการสนับสนุนงานวิจัยนี้ต่อไปเพื่อ ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้จริงในประเทศ โดยการประยุกต์แรกที่จะสนับสนุนคือ การผลิตรถไฟฟ้าที่ใช้พลังงานขับเคลื่อนโดยเซลล์เชื้อเพลิง หรือ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับบ้านเรือน (Distributed power generation) โดยใช้เงินลงทุนต่ำกว่า 2 ล้านบาท เพื่อแสดงให้เห็นว่าประชาชนทั่วไปสามารถซื้อเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ได้ในราคาที่ถูกลง

5.2.3 หน่วยงานให้ทุนควรจะมีการสนับสนุนงานวิจัยเพื่อทำการผลิตไฮโดรเจนมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากว่า เมื่อมีการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงในเชิงพาณิชย์แล้ว จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้ประชาชนเข้าถึงไฮโดรเจนได้ง่าย และมีราคาถูกลงเหมือนกับ LPG ถึงแม้ว่าโรงงานปิโตรเคมีจะผลิตไฮโดรเจนที่เป็นของในปริมาณที่มาก ไฮโดรเจนเหล่านี้ไม่สามารถป้อนเข้ากับเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยตรง เนื่องจาก การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจำเป็นต้องมีปริมาณการเจือปนของคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่า 10 ppm ในขณะที่ไฮโดรเจนที่ได้จากโรงงานปิโตรเคมีนั้น จะมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในระดับมากกว่า 1% ขึ้นไปจึงต้องมีระบบในการทำให้ไฮโดรเจนสะอาดก่อนซึ่งมีราคาค่อนข้างแพงไม่คุ้มกับการลงทุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การนำไปใช้ประโยชน์

เซลล์เชื้อเพลิงที่ผลิตขึ้นมาสามารถนำไปใช้ได้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง ใช้ในที่พักอาศัย หรือ สถานที่ราชการ ที่มีวิสัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ในระยะเวลาอันใกล้ และ ชุดทดสอบสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงสามารถนำไปใช้ทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ขนาดต่าง ๆ ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 500 วัตต์ได้ ทำให้ลดต้นทุนการนำเข้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### เอกสารอ้างอิง

1. Amirinejad, M., Rowshanzamir, P., and Eikani, M. H., Effects of operating parameters on performance of a proton, *Journal of Power Sources* 161 (2006) 872–875.
2. Santa Rosa, D.T., et al., High performance PEMFC stack with open-cathode at ambient, *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (2007) 4350 – 4357
3. [http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Fc\\_diagram\\_pem.gif](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Fc_diagram_pem.gif)
4. The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs (2004), National Academy of Engineering (NAE), Board on Energy and Environmental Systems (BEES)
5. Bent Sorensen, *Hydrogen and Fuel Cells; Emerging technologies and applications*, Copyright © 2005, Elsevier Inc.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้