

## รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

Performance of fuel cells

ผู้วิจัย

1. ผศ. สุจิตต์ ศรีชัย
2. นาย สุชาติ แซ่เฮ้ง

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณผลประโยชน์ ปี พ.ศ. 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

## บทคัดย่อ

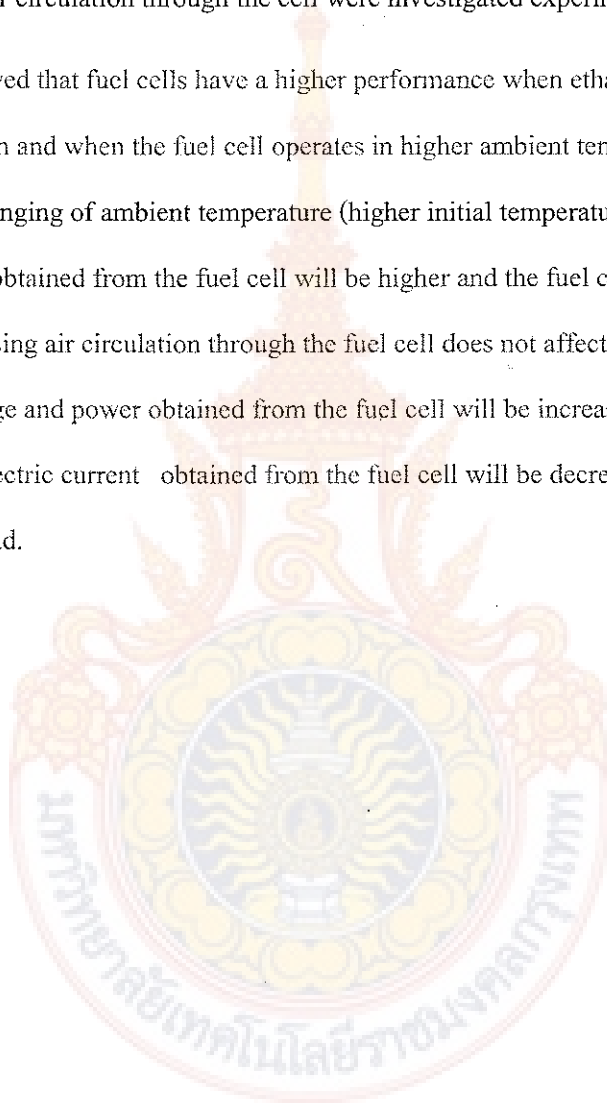
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลแบบเซลล์เดี่ยว โดยทำการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล (ร้อยละ 5, ร้อยละ 10, ร้อยละ 15 โดยปริมาตร) อุณหภูมิในบริเวณที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน ( $20^{\circ}\text{C}$ ,  $23^{\circ}\text{C}$ ,  $26^{\circ}\text{C}$ ) การเปลี่ยนแปลงอย่างค่อเนื่องของอุณหภูมิในบริเวณที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน ( $35^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C}$ ,  $43^{\circ}\text{C} - 24^{\circ}\text{C}$ ,  $46^{\circ}\text{C} - 24^{\circ}\text{C}$ ) ความต้านทานโหลด ( $3.9\ \Omega$ ,  $4.7\ \Omega$ ,  $10\ \Omega$ ) และการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง ที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

ผลการทดลองพบว่า เซลล์เชื้อเพลิงจะมีสมรรถนะสูงกว่า เมื่อใช้สารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงกว่า และเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าหรือบริเวณที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในช่วงกว้างกว่า (อุณหภูมิเริ่มต้นสูงกว่า) แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น กระแสไฟฟ้าเริ่มต้น และกำลังไฟฟ้าเริ่มต้น ที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าสูงกว่า และเซลล์เชื้อเพลิงจะจ่ายกระแสไฟฟ้าได้นานกว่า ส่วนการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงไม่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ขณะที่แรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความต้านทานของโหลด แต่กระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความต้านทานของโหลด

### Abstract

The effect on performance of single cell direct ethanol fuel cell due to ethanol solution concentrations (5%, 10%, 15% by volume), ambient temperature (20°C, 23°C, 26°C), continuously changing of ambient temperature (35°C - 23°C, 43°C - 24°C, 46°C - 24°C), load resistance (3.9  $\Omega$ , 4.7  $\Omega$ , 10  $\Omega$ ) and air circulation through the cell were investigated experimentally in this research.

The results showed that fuel cells have a higher performance when ethanol solution used has higher concentration and when the fuel cell operates in higher ambient temperature or in wide range of continuously changing of ambient temperature (higher initial temperature). The initial voltage, current and power obtained from the fuel cell will be higher and the fuel cell apply current for longer time. Increasing air circulation through the fuel cell does not affect the performance of the fuel cell. The voltage and power obtained from the fuel cell will be increased by the resistance of the load. But the electric current obtained from the fuel cell will be decreased when increase the resistance of the load.



## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณประจำปีงบประมาณ 2554 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ซึ่งได้รับการสนับสนุนเรื่องงบประมาณในการวิจัย การฝึกอบรมเพื่อให้ผู้วิจัยทราบแนวทางในการทำวิจัยอย่างมีคุณภาพ การประสานงาน และการอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ทำให้การจัดการ โครงการวิจัยดำเนินไปได้ด้วยความราบรื่น คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง และขอขอบพระคุณผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา เจ้าหน้าที่และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ณัฐชัย สงวนทรัพย์ อาจารย์ประจำสาขาเครื่องเรือน และนายวสันต์ ถาวร ที่ช่วยทำการทดลอง รวมทั้งผู้ร่วมทำงานวิจัยที่เสียสละเวลาช่วยเหลือในงานวิจัยให้ลุล่วงไปด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัยขอระลึกถึงพระคุณของท่านผู้มีพระคุณทั้งหลายของคณะผู้วิจัย คุณบิดามารดา คุณครูบาอาจารย์และแหล่งศึกษา ตลอดจนประสบการณ์ในสถานที่ทำงานแห่งนี้ ที่ประสิทธิประสาท วิชาการความรู้ในการทำงานวิจัย หากมีข้อบกพร่องประการใด คณะผู้จัดทำขอน้อมรับและทำการปรับปรุงในโอกาสต่อไป

คณะผู้วิจัย

กันยายน 2555

## สารบัญ

หน้า

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| บทคัดย่อ                                                                                                       | (1) |
| กิตติกรรมประกาศ                                                                                                | (3) |
| สารบัญ                                                                                                         | (4) |
| สารบัญตาราง                                                                                                    | (6) |
| สารบัญภาพ                                                                                                      | (8) |
| บทที่                                                                                                          |     |
| 1 บทนำ                                                                                                         |     |
| 1.1 ความสำคัญของปัญหา                                                                                          | 1   |
| 1.2 วัตถุประสงค์                                                                                               | 2   |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย                                                                                      | 2   |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                                                                  | 2   |
| 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                                                        |     |
| 2.1 ความเป็นมาของเซลล์เชื้อเพลิง                                                                               | 3   |
| 2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง                                                                             | 4   |
| 2.3 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง                                                                                     | 6   |
| 2.4 ข้อดีและข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิง                                                                          | 18  |
| 2.5 ประสิทธิภาพและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง                                                                    | 19  |
| 3 การดำเนินการวิจัย                                                                                            |     |
| 3.1 อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย                                                                               | 22  |
| 3.2 สถานที่ทำการวิจัย                                                                                          | 38  |
| 4 ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์                                                                                      |     |
| 4.1 ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล | 39  |
| 4.2 ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล                      | 44  |

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3 ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลของความต้านทานโพลีคต่อสมรรถนะของ<br>เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล                               | 49 |
| 4.4 ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง<br>ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล | 52 |
| 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ                                                                                                               |    |
| 5.1 สรุปผล                                                                                                                          | 57 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ                                                                                                                      | 57 |
| บรรณานุกรม                                                                                                                          | 58 |
| ภาคผนวก                                                                                                                             |    |
| ประวัติผู้วิจัย                                                                                                                     | 60 |



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

|    |                                                                                                                                                                             |    |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | ผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อสารละลายเอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 5                                            | 39 |
| 2  | ผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อสารละลายเอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 10                                           | 40 |
| 3  | ผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อสารละลายเอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 15                                           | 41 |
| 4  | ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิคงที่ที่ $26^{\circ}\text{C}$                             | 44 |
| 5  | ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิคงที่ที่ $23^{\circ}\text{C}$                             | 45 |
| 6  | ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิคงที่ที่ $20^{\circ}\text{C}$                             | 46 |
| 7  | ผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อความต้านทานโหลดมีค่าเป็น 3.9 โอห์ม                                                            | 49 |
| 8  | ผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อความต้านทานโหลดมีค่าเป็น 4.7 โอห์ม                                                            | 50 |
| 9  | ผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อความต้านทานโหลดมีค่าเป็น 10 โอห์ม                                                             | 51 |
| 10 | ผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อยังไม่เพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง (ครั้งที่ 1) | 52 |
| 11 | ผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อมีการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง (ครั้งที่ 1)  | 53 |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

- |    |                                                                                                                                                                             |    |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 12 | ผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อยังไม่เพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง (ครั้งที่ 2) | 54 |
| 13 | ผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อมีการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง (ครั้งที่ 2)  | 55 |



## สารบัญภาพ

| ภาพที่                                                                                                                                                                          | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 ส่วนประกอบสำคัญและการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง                                                                                                            | 5    |
| 2.2 การนำเซลล์เชื้อเพลิงหลายเซลล์มาต่อเรียงกันเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า                                                                                                             | 5    |
| 2.3 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์ (AFC)                                                                                                                                   | 6    |
| 2.4 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC)                                                                                                                 | 7    |
| 2.5 รถยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน                                                                                                                           | 8    |
| 2.6 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (PAFC)                                                                                                                            | 9    |
| 2.7 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (SOFC)                                                                                                                            | 10   |
| 2.8 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว (MCFC)                                                                                                                 | 12   |
| 2.9 การใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเชื้อเพลิงหมุนเวียนร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์                                                                                                          | 13   |
| 2.10 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอล (DMFC)                                                                                                                  | 14   |
| 2.11 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอลที่ผลิตขึ้นมาใช้งานจริง                                                                                                             | 15   |
| 2.12 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดสังกะสี-อากาศ (ZAFC)                                                                                                                         | 17   |
| 3.1 เอทานอลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายเอทานอล                                                                                                                           | 22   |
| 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลโดยไม่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์                                | 23   |
| 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลโดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์                                   | 24   |
| 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิคงที่                     | 25   |
| 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง | 26   |
| 3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของความดันทานไฮโดรเจนต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล                                                                | 26   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

|      |                                                                                                                                                               |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.7  | อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล                                | 27 |
| 3.8  | ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลที่ใช้ในการทดลอง                                                                                          | 28 |
| 3.9  | ส่วนประกอบของบอร์ดเก็บข้อมูล                                                                                                                                  | 28 |
| 3.10 | การจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล โดยไม่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์           | 29 |
| 3.11 | การจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล โดยเชื่อมต่อ กับคอมพิวเตอร์             | 30 |
| 3.12 | ตัวอย่างการปรับการแสดงผลในรูปภาพของโปรแกรม                                                                                                                    | 31 |
| 3.13 | การจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานในบริเวณที่อุณหภูมิคงที่            | 32 |
| 3.14 | การวางเซลล์เชื้อเพลิงในกล่องไม้                                                                                                                               | 34 |
| 3.15 | การเป่าลมร้อนเข้าไปในกล่องไม้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศในกล่องไม้                                                                                             | 34 |
| 3.16 | การจัดอุปกรณ์การทดลอง ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานในบริเวณที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง | 35 |
| 3.17 | การจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อทดสอบผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล                                                       | 36 |
| 3.18 | การจัดอุปกรณ์การทดลองผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล (ยังไม่เปิดพัดลม)                | 37 |
| 3.19 | การจัดอุปกรณ์การทดลองผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล (ยังไม่เปิดพัดลม)                | 38 |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

|     |                                                                                                                                                                           |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อสารละลายเอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 5                                                                           | 42 |
| 4.2 | กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อสารละลายเอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 10                                                                          | 42 |
| 4.3 | กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อสารละลายเอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 15                                                                          | 43 |
| 4.4 | กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่องจาก $35^{\circ}\text{C}$ ถึง $23^{\circ}\text{C}$ | 47 |
| 4.5 | กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่องจาก $43^{\circ}\text{C}$ ถึง $24^{\circ}\text{C}$ | 47 |
| 4.6 | กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่องจาก $46^{\circ}\text{C}$ ถึง $24^{\circ}\text{C}$ | 48 |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันและคาดว่าจะมีบทบาทสำคัญต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าในอนาคตอันใกล้นี้ เซลล์เชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี การสูญเสียพลังงานระหว่างกระบวนการผลิตไฟฟ้าจึงเกิดขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับการผลิตไฟฟ้าโดยผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ หรือ ถ่านหิน) ที่มีการเปลี่ยนรูปจากพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงไปเป็นความร้อน พลังงานกล และพลังงานไฟฟ้า ตามลำดับ เซลล์เชื้อเพลิงจึงมีประสิทธิภาพสูงในการผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้กระบวนการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไม่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ จึงปลดปล่อยก๊าซเสีย เช่น ออกไซด์ของไนโตรเจนและออกไซด์ของกำมะถันซึ่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมในปริมาณต่ำ ขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงานจะไม่เกิดเสียงรบกวนเนื่องจากไม่มีส่วนใดในเซลล์เชื้อเพลิงเคลื่อนที่จึงติดตั้งไว้ในเมืองหรือชุมชนได้ เซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกันไป ทั้งในด้านประสิทธิภาพ วัสดุที่นำมาสร้าง อุณหภูมิขณะทำงาน และวัสดุหรือสารเคมีที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงมีทั้งชนิดที่ต้องติดตั้งไว้กับที่และชนิดพกพา

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอล เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อนำมาใช้แทนแบตเตอรี่ในอุปกรณ์พกพา จึงมีขนาดเล็ก และการใช้เมทานอลซึ่งของเหลวเป็นเชื้อเพลิงนั้น ทำให้พกพาเชื้อเพลิงติดตัวไปได้สะดวกและไม่ต้องการที่ชาร์จแบตเตอรี่หรือแหล่งจ่ายไฟให้ยุ่งยาก เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงไม่อาจจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ก็เพียงแค่เติมเมทานอลเข้าไปเท่านั้น เซลล์เชื้อเพลิงจะกลับมาจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ใหม่ จึงเหมาะกับการใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ในแหล่งทุรกันดารที่ไม่มีไฟฟ้าใช้

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอลมีอุณหภูมิในการทำงานต่ำจึงไม่จำเป็นต้องใช้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิง อิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จึงต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเชื้อเพลิงเปลี่ยน โพรตอนส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอล มีราคาค่อนข้างสูง แต่เมทานอลยังมีความเป็นพิษต่อผู้ใช้งานจึงมีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลขึ้นมา เนื่องจากเอทานอลไม่เป็นพิษต่อผู้ใช้งาน ประกอบกับประเทศไทยมีวัตถุดิบในการผลิต

เอทานอลมากมาย ผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญและประโยชน์ที่จะได้รับจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลในอนาคตจึงสนใจที่จะศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลให้มีสมรรถนะสูงสุด

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาโครงสร้าง การทำงาน และการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

1.2.2 เพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล อุณหภูมิในบริเวณที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน ความต้านทานของโหลด และการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การวิจัยนี้ประกอบด้วยงาน 2 ส่วน คือ

1.3.1 การศึกษาค้นคว้าวรรณกรรมเกี่ยวกับโครงสร้าง การทำงาน และการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

1.3.2 การทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล อุณหภูมิในบริเวณที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน การไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง และความต้านทานของโหลด ที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับโครงสร้าง การทำงาน และการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

1.4.2 ได้ข้อสรุปเกี่ยวกับผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล อุณหภูมิในบริเวณที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน ความต้านทานโหลด และการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

1.4.3 ได้ชุดสาริตการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความเป็นมาของเซลล์เชื้อเพลิง

หลักการกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงเกิดขึ้นโดย คริสเตียน เฟรดเดอริก โชนไบน์ (Christian Friedrich Schönbein) นักวิทยาศาสตร์ชาวสวิส ในปี พ.ศ. 2381 แต่ผู้ที่สร้างเซลล์เชื้อเพลิงสำเร็จเป็นคนแรกคือ เซอร์ วิลเลียม โรเบิร์ต โกรฟ (Sir William Robert Grove) นักวิทยาศาสตร์ชาวเวลส์ โดยสร้างสำเร็จในปีเดียวกันนั้น หลักการให้กำเนิดไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงมีที่มาจากการพิจารณาในทางกลับกันกับกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ ในกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้านั้นใช้พลังงานไฟฟ้าแยกน้ำออกเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน ในทางกลับกันการรวมตัวกันของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนน่าจะผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาได้

โกรฟอาศัยแนวความคิดนี้ในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้แผ่นแพลทินัมที่มีลักษณะเป็นแถบยาว ๆ เป็นขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด ใส่ไว้ในหลอดทดลอง 2 หลอด หลอดหนึ่งบรรจุก๊าซไฮโดรเจน อีกหลอดหนึ่งบรรจุก๊าซออกซิเจน ปิดปากหลอดทั้งสองให้สนิท แล้วนำหลอดแก้วทั้งสองไปจุ่มในสารละลายกรดกำมะถันเจือจาง ผลที่ได้คือ มีกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสอง และเกิดน้ำในหลอดแก้วทั้งสองด้วย แม้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากหลอดแก้วทั้งสองมีค่าไม่มากนัก แต่เมื่อโกรฟนำหลอดแก้วหลาย ๆ ชุด มาต่อเข้าด้วยกัน ทำให้ได้แรงดันสูงขึ้น โกรฟเรียกอุปกรณ์นี้ว่า **แบตเตอรี่ก๊าซ**

แบตเตอรี่ก๊าซของโกรฟมีลักษณะค่อนข้างไปทางอุปกรณ์การทดลองทางวิทยาศาสตร์ ยังไม่เหมาะต่อการนำไปใช้งาน จึงมีความพยายามในการพัฒนาแบตเตอรี่ก๊าซของโกรฟให้นำไปใช้งานได้จริง โดยในปี พ.ศ. 2432 ลุดวิก มอนด์ (Ludwig Mond) และชาร์ล แลงเกอร์ (Charles Langer) เปลี่ยนมาใช้ก๊าซจากอุตสาหกรรมถ่านหินแทนก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ แล้วเรียกชื่ออุปกรณ์นี้ว่า **เซลล์เชื้อเพลิง** (fuel cells) แต่หลังจากนั้นก็ไม่มีรายงานความก้าวหน้าใด ๆ เกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากในเวลาใกล้เคียงกันนั้นมีการค้นพบเครื่องยนต์สันดาปภายในและนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรสนใจที่จะพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิง ส่งผลให้เครื่องยนต์สันดาปภายในมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว แต่การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงหยุดไปเกือบร้อยปี จนกระทั่งปี พ.ศ. 2475 ฟรานซิส โทมัส เบคอน (Dr. Francis Thomas Bacon) แห่งมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ ได้นำเซลล์เชื้อเพลิงของ

โมนด์และแลงเกอร์ มาพัฒนาและปรับปรุงใหม่โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากนิกเกิลแทนแพลทินัมและเปลี่ยนอิเล็กโทรไลต์จากกรดซัลฟริกเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีสมบัติเป็นด่าง ทำให้การกัดกร่อนแท่งอิเล็กโทรดลดน้อยลง เซลล์เชื้อเพลิงที่เบคอนพัฒนาและปรับปรุงขึ้นในปี พ.ศ. 2475 นี้ นับเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์เครื่องแรกของโลก แต่เบคอนต้องใช้เวลาถึง 27 ปี ในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจึงประสบความสำเร็จในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้งานได้จริงเครื่องแรกของโลก ในปี พ.ศ. 2502 เซลล์เชื้อเพลิงเครื่องแรกของโลกนี้มีขนาด 5 กิโลวัตต์ ซึ่งมีพลังงานมากพอที่จะใช้กับเครื่องเชื่อมโลหะได้ และในปลายปี พ.ศ. 2502 แฮรี คาร์ล (Harry Karl) ประสบความสำเร็จในการสาธิตการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 15 กิโลวัตต์ กับรถแทรกเตอร์ขนาด 20 แรงม้า

ในสมัยแรก ๆ การใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงยังอยู่ในวงจำกัด โดยใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าในยานอวกาศและผลิตน้ำดื่มให้กับนักบินอวกาศของนาซา ในปี พ.ศ. 2516 และ พ.ศ. 2522 เกิดภาวะขาดแคลนน้ำมันและน้ำมันมีราคาแพง จึงเกิดแนวคิดที่จะนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้แทนเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน และเริ่มมีการทดสอบรถยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน ในปัจจุบันมีโรงไฟฟ้าที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และเริ่มสร้างเครื่องต้นแบบของรถยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิง ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็กนั้น บริษัทเครื่องใช้ไฟฟ้ายักษ์ใหญ่ของญี่ปุ่น ได้จัดการสาธิตเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบพกพาเมื่อไม่นานมานี้

## 2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลักการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (แบตเตอรี่รถยนต์) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าประเภทเซลล์ไฟฟ้าเคมีเหมือนกัน แต่มีความแตกต่างกันหลายประการ คือ

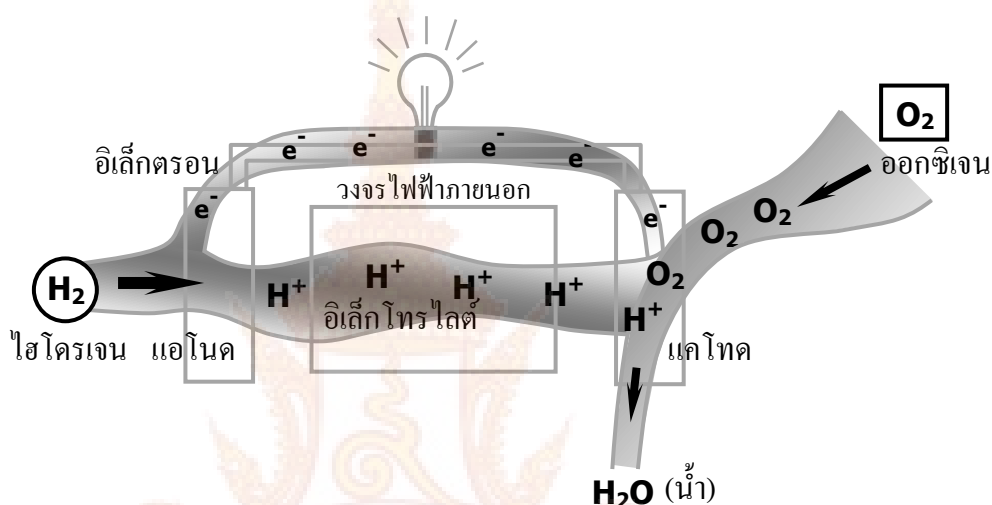
(1) แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดต้องผ่านการอัดประจุก่อนนำไปใช้งานและหลังจากใช้งานไปช่วงหนึ่ง แรงดันไฟฟ้าจะลดต่ำลงจนไม่อาจจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ ต้องนำไปอัดประจุซ้ำจึงนำกลับไปใช้งานใหม่ได้ กล่าวคือ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความจุ ขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความจุอย่างแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เพราะตราบดีที่ยังคงป้อนก๊าซเชื้อเพลิง (เช่น ก๊าซไฮโดรเจน) และก๊าซออกซิเจน (เช่น ก๊าซออกซิเจน) เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

(2) ปฏิกริยาในเซลล์เชื้อเพลิงไม่ย้อนกลับ แต่เกิดปฏิกริยาย้อนกลับในเซลล์ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ขณะอัดประจุ (ปฏิกริยาในเซลล์ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดขณะอัดประจุจะเป็นปฏิกริยาย้อนกลับกับปฏิกริยาในเซลล์ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดขณะคายประจุ)

(3) เซลล์เชื้อเพลิงเก็บพลังงานเคมีไว้ไม่ได้ สารตั้งต้นต้องผ่านเข้าสู่เซลล์และสารผลิตภัณฑ์ต้องผ่านออกจากเซลล์ตลอดเวลา ขณะที่แบตเตอรี่เก็บสะสมพลังงานเคมีไว้ได้

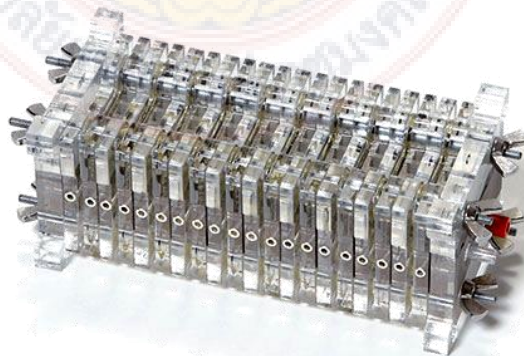
(4) เซลล์เชื้อเพลิงจัดเป็นเซลล์ปฐมภูมิแต่แบบเตอรี่ยะกั่ว-กรดจัดเป็นเซลล์ทุติยภูมิ

เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์ประกอบด้วยอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์เช่นเดียวกับเซลล์ไฟฟ้าเคมีอื่น ๆ กระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่แอโนดและแคโทด สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงและใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซออกซิแดนต์ ปฏิกิริยาของก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นที่แอโนด (ขั้วลบ) และปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจนเกิดขึ้นที่แคโทด (ขั้วบวก) อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนออกจากแอโนดผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกไปยังแคโทด ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกในทิศทางข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โดยมีน้ำบริสุทธิ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจนเป็นผลพลอยได้ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบสำคัญและการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

แรงดันไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์มีค่าไม่มากนัก ถ้าต้องการแรงดันไฟฟ้าสูง ๆ ต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงหลายเซลล์มาต่อเรียงกันซึ่งเรียกว่า **สแตค (fuel cell stack)** ดังภาพที่ 2.2 โดยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนและขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์ที่นำมาต่อเรียงกัน



ที่มา: [fuelcellstore.com](http://fuelcellstore.com) ค้นคืนเมื่อ 30 มิ.ย. 55

ภาพที่ 2.2 การนำเซลล์เชื้อเพลิงหลายเซลล์มาต่อเรียงกันเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า

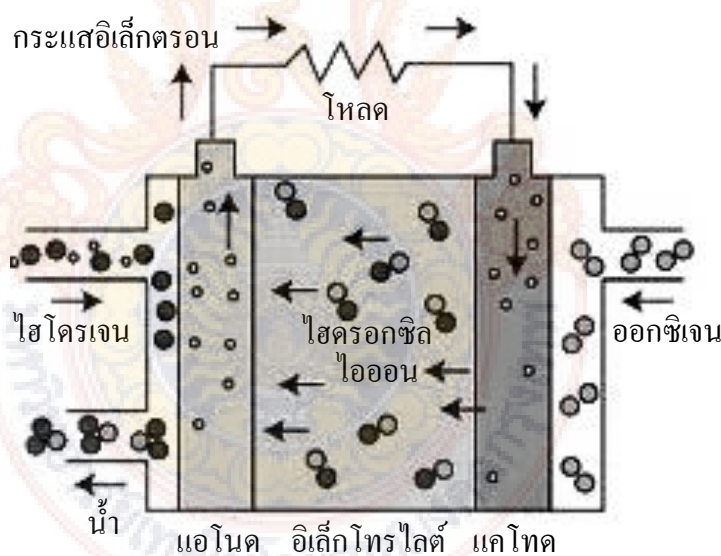
## 2.3 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันทั้งในด้านประสิทธิภาพ วัสดุที่นำมาสร้าง อุณหภูมิขณะทำงาน และวัสดุหรือสารเคมีที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ดังนี้

1. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel cell; AFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการพัฒนามากที่สุดชนิดหนึ่ง เริ่มใช้งานตั้งแต่ช่วงกลางของทศวรรษที่ 1960 โดยองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ สหรัฐอเมริกา หรือนาซา (NASA) ในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับแพลงควมและผลิตน้ำดื่มให้กับโครงการอะพอลโลและกระสวยอวกาศ

อุณหภูมิขณะทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์อยู่ในช่วง  $65^{\circ}\text{C} - 220^{\circ}\text{C}$  ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 70 (โดยประมาณ)

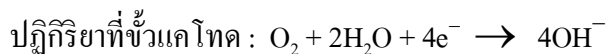
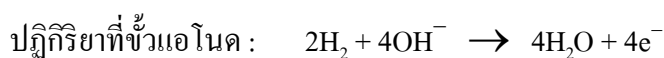
การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์เริ่มจากการเคลื่อนที่ของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) จากแคโทดเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนที่แอโนดได้น้ำและอิเล็กตรอน น้ำที่เกิดขึ้นที่แอโนดจะย้อนกลับไปยังแคโทดเพื่อนำกลับไปสร้างไฮดรอกไซด์ไอออนใหม่ ดังภาพที่ 2.3



ที่มา: energy-21.blogspot.com ค้นคืนเมื่อ 1 ก.ค. 55

ภาพที่ 2.3 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์ (AFC)

### ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์

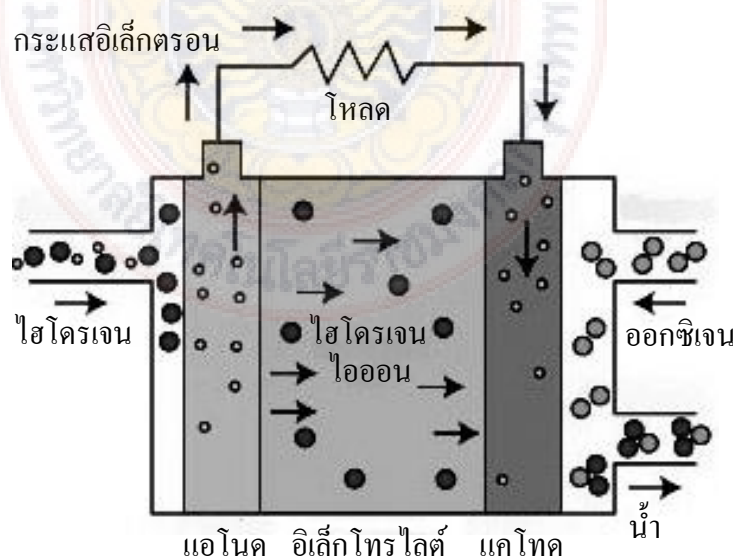


ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์คือ ราคาถูกกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ เนื่องจากเลือกวัสดุที่ใช้สร้างตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ได้หลายชนิด ขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นมักจะใช้แพลตินัมซึ่งมีราคาแพงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์คือ เซลล์จะอ่อนไหวต่อคาร์บอนไดออกไซด์มาก (คาร์บอนไดออกไซด์อาจจะปนมากับอากาศหรือไฮโดรเจนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง) คาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์และส่งผลให้เซลล์เสื่อมอย่างรวดเร็ว เชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จึงต้องมีความบริสุทธิ์สูง ถ้ามีสารประกอบพวกคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) น้ำ ( $H_2O$ ) หรือมีเทน ( $CH_4$ ) ปะปนมาในเชื้อเพลิงหรืออากาศ จะส่งผลให้เซลล์เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้กับเครื่องยนต์ของรถยนต์

## 2. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel cell : PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์แข็ง เพราะแผ่นเมมเบรนที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์ทำมาจากพอลิเมอร์ เมื่อมีความชื้นจะยอมให้โปรตอนเคลื่อนผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนเคลื่อนผ่าน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้แพลตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ปฏิกิริยาเริ่มที่แอโนด โดยไฮโดรเจนถูกแยกเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน ไฮโดรเจนไอออน (โปรตอน) จะเคลื่อนผ่านแผ่นเยื่อหรือเมมเบรนไปยังแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนออกจากแอโนดผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกแล้วเคลื่อนกลับไปยังแคโทด รวมตัวกับออกซิเจนที่ป้อนเข้ามาที่แคโทดเป็นน้ำ ดังภาพที่ 2.4



ที่มา : rcs.bham.ac.uk ค้นคืนเมื่อ 1 ก.ค. 55

ภาพที่ 2.4 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC)

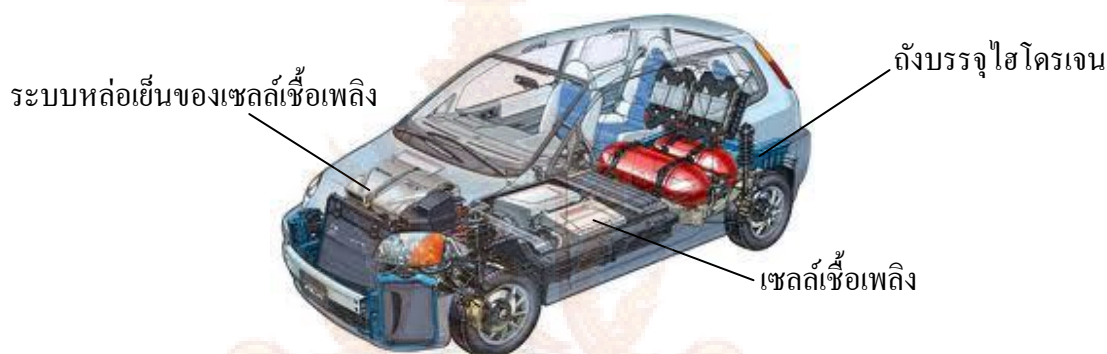
### ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด :  $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด :  $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

ปฏิกิริยารวม :  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นของพลังงานมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักหรือปริมาตร จึงสร้างเป็นเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็กได้ อุณหภูมิขณะทำงานค่อนข้างต่ำคือ อยู่ระหว่างอุณหภูมิ  $80^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$  ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาเซลล์ชนิดนี้แล้วนำเซลล์เชื้อเพลิงหลาย ๆ เซลล์มาต่อเรียงกัน เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานในรถยนต์แทนเครื่องยนต์สันดาปภายในดังภาพที่ 2.5



ที่มา: pbs.org ค้นคืนเมื่อ 1 ก.ค. 55

ภาพที่ 2.5 รถยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน

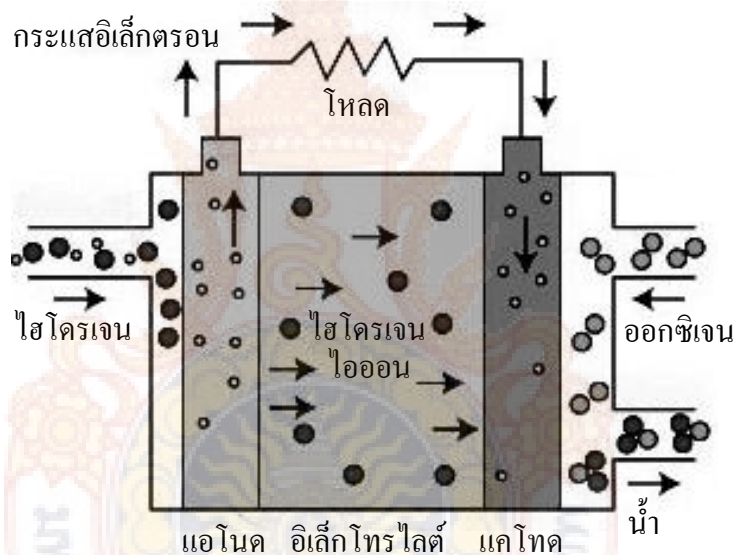
อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ซึ่งเป็นของแข็งจึงไม่มีการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์และมีการกักต่อน้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นของเหลว ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น

ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนคือ อิเล็กโทรไลต์ต้องมีความชื้นที่เหมาะสม ถ้าความชื้นต่ำเกินไป การแลกเปลี่ยนโปรตอนจะทำได้ยากหรือไม่ได้เลย ทำให้เซลล์ทำงานไม่ได้ แต่ถ้าความชื้นมากเกินไปอาจเกิดน้ำท่วมภายในเซลล์ การใช้เซลล์ชนิดนี้จึงต้องติดตั้งอุปกรณ์รักษาความชื้นให้เหมาะสม อุปกรณ์ที่ติดตั้งนี้อาจใช้พลังงานเพิ่มอีก โดยอาจเพิ่มถึงร้อยละ 30 ของพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่ใช้ต้องเป็นไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ถ้ามีสารไฮโดรคาร์บอนเจือปนแม้เพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้อายุการใช้งานของเซลล์ลดลง

### 3. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก ( Phosphoric Acid Fuel Cell : PAFC )

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้พัฒนาขึ้นในช่วงกลางของทศวรรษที่ 1960 โดยใช้แพลตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้กรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid :  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) ความเข้มข้นสูง (อาจสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์) เป็นอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากกรดฟอสฟอริกนำกระแสไอออนได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ จึงต้องทำให้อุณหภูมิขณะทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้อยู่ที่อุณหภูมิสูง ๆ อาจสูงถึง  $150^\circ\text{C}$  -  $220^\circ\text{C}$  เพื่อให้อิเล็กโทรไลต์นำกระแสได้ดีขึ้น ประสิทธิภาพการทำงานอยู่ที่ร้อยละ 40 แต่อาจสูงถึงร้อยละ 85 ถ้าใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าในระบบความร้อนร่วม

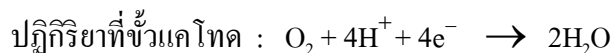
การทำงานและปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริกคล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริกพิจารณาได้จากภาพที่ 2.6



ที่มา : rcs.bham.ac.uk ค้นคืนเมื่อ 1 ก.ค. 55

ภาพที่ 2.6 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (PAFC)

#### ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก



ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริกคือ ใช้กับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ไม่บริสุทธิ์ได้ เพราะสิ่งเจือปน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์จะไม่ส่งผลเสียต่ออิเล็กโทรไลต์ และไม่กระทบต่อการทำงานของเซลล์ สามารถใช้เชื้อเพลิงที่มาจากซากฟอสซิล เช่น น้ำมันเบนซิน เซลล์ชนิดนี้มีอายุ

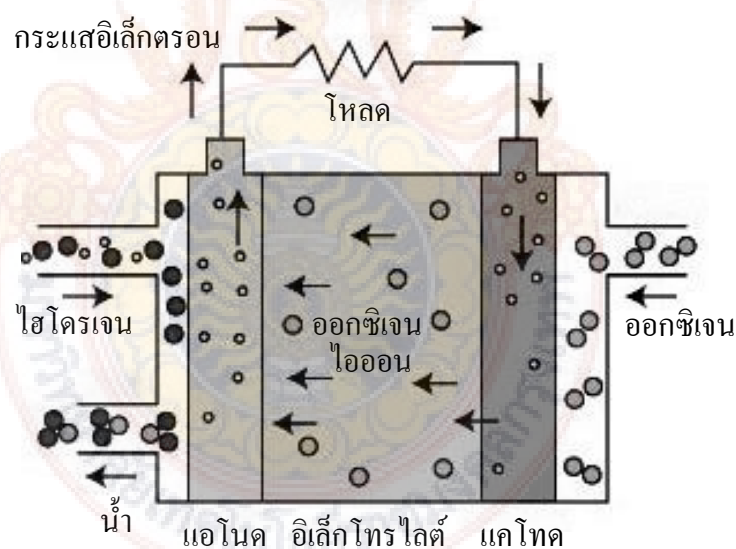
ใช้งานยาวนาน จึงนิยมสร้างเป็นเซลล์เชื้อเพลิงขนาดใหญ่ เพื่อจ่ายพลังงานให้อาคารสำนักงาน โรงพยาบาล โรงแรม ห้างสรรพสินค้า สนามบิน เป็นต้น ส่วนขนาดเล็กลงมานำไปใช้กับยานพาหนะ ขนาดใหญ่ เช่น รถไฟหรือรถโดยสาร

ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริกเป็นผลสืบเนื่องมาจากมีส่วนประกอบของกรดฟอสฟอริกและทำงานที่อุณหภูมิสูง จึงมีการกักความร้อนสูง วัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนต่างๆ จึงต้องเป็นวัสดุที่ทนต่อการกักความร้อนภายใต้อุณหภูมิสูง (การกักความร้อนที่อุณหภูมิสูง จะมีความรุนแรงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ) และการที่ใช้แพลตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริกมีราคาสูง

#### 4. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel cell : SOFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้พัฒนาขึ้นตั้งแต่ทศวรรษที่ 1950 เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิขณะทำงานสูงสุด คือ ประมาณ  $600^{\circ}\text{C}$  -  $1000^{\circ}\text{C}$  อิเล็กโทรไลต์ทำมาจากเซรามิก จึงทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้ใช้แพลตินัม จึงมีราคาถูกลง และใช้ไฮโดรเจนที่ไม่บริสุทธิ์หรือมีสิ่งเจือปนเป็นเชื้อเพลิงได้

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งพิจารณาได้จากภาพที่ 2.7



ที่มา : rcs.bham.ac.uk ค้นคืนเมื่อ 1 ก.ค. 55

ภาพที่ 2.7 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (SOFC)

ออกซิเจนที่ป้อนเข้ามาที่แคโทดถูกทำให้แตกตัวเป็นออกซิเจนไอออนและเคลื่อนผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับไฮโดรเจนไอออนที่แอโนดเป็นน้ำและได้อิเล็กตรอนอิสระ 4 ตัว อิเล็กตรอนอิสระที่ได้จากแอโนดจะเคลื่อนผ่านวงจรภายนอกและย้อนกลับมายังแคโทด ดังปฏิกิริยา

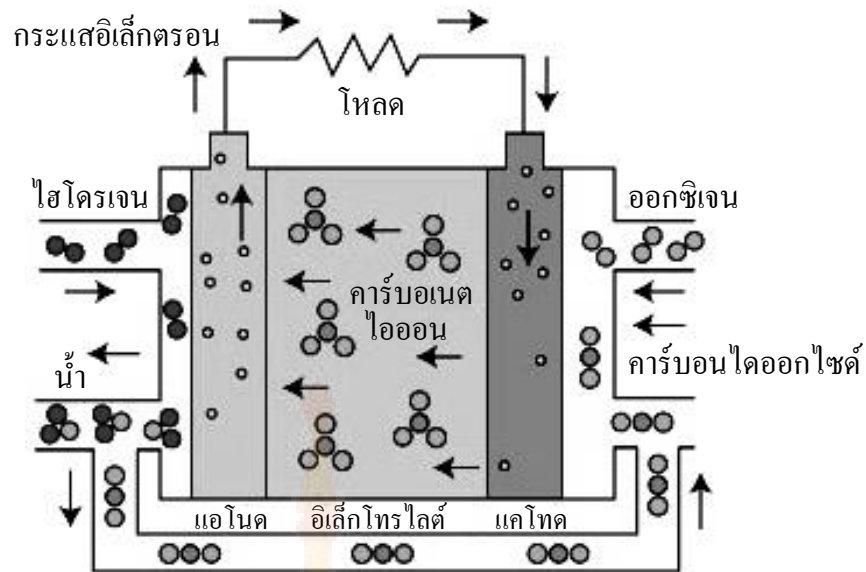


ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีค่าประมาณร้อยละ 60 แต่เนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิสูง จึงใช้เป็นระบบความร้อนร่วมได้ กล่าวคือ นอกจากกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรงแล้ว ใช้น้ำอุณหภูมิสูงที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงยังนำไปปั่นกังหันไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่งด้วย การใช้เป็นระบบความร้อนร่วมนี้ ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสูงกว่าร้อยละ 70

ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง คือ การเริ่มต้นทำงานค่อนข้างช้า เพราะต้องรอให้อุณหภูมิของเซลล์สูงถึงค่าที่กำหนดก่อนจึงทำงานได้ และการทำงานที่อุณหภูมิสูงจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ทนต่อความร้อนได้ดีซึ่งมีราคาสูงกว่าอุปกรณ์ที่ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแม้ว่าจะนิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้า แต่อาจออกแบบให้มีขนาดเล็กได้

##### 5. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว ( Molten Carbonate Fuel Cell: MCFC)

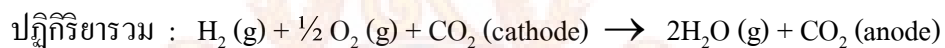
การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลวค่อนข้างต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น โดยเริ่มจากการทำเกลือคาร์บอเนตให้เป็นของเหลว อุณหภูมิขณะทำงานจึงสูง เพราะการหลอมเหลวเกลือคาร์บอเนตต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง  $650^\circ\text{C}$  เกลือคาร์บอเนตที่หลอมเหลวจะแตกตัวเป็นคาร์บอเนตไอออน ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) และไหลจากแคโทดไปยังแอโนดแล้วรวมตัวกับไฮโดรเจนได้น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนที่ได้จะเคลื่อนผ่านวงจรภายนอกแล้วเคลื่อนกลับมายังแคโทด ได้กระแสไฟฟ้าและความร้อนออกมา ดังภาพที่ 2.8



ที่มา: ogniwa-paliwowe.info ค้นคืนเมื่อ 4 ก.ค. 55

ภาพที่ 2.8 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว (MCFC)

#### ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว



เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว ใช้ निकเกิลหรือแผ่นสแตนเลสเป็นตัวเร่ง

ปฏิกิริยาแทนแพลดนิ้ม จึงมีต้นทุนในการผลิตต่ำ ความร้อนที่ได้ยังนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ด้วย ส่วนข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ เริ่มต้นทำงานช้า เพราะอุณหภูมิการทำงานสูง และเกลือคาร์บอเนตที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์เกิดการสูญเสียตลอดเวลา จึงต้องอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทดแทน นอกจากนี้อิเล็กโทรไลต์ที่ทำมาจากคาร์บอเนตยังกัดกร่อนอิเล็กโทรดด้วย

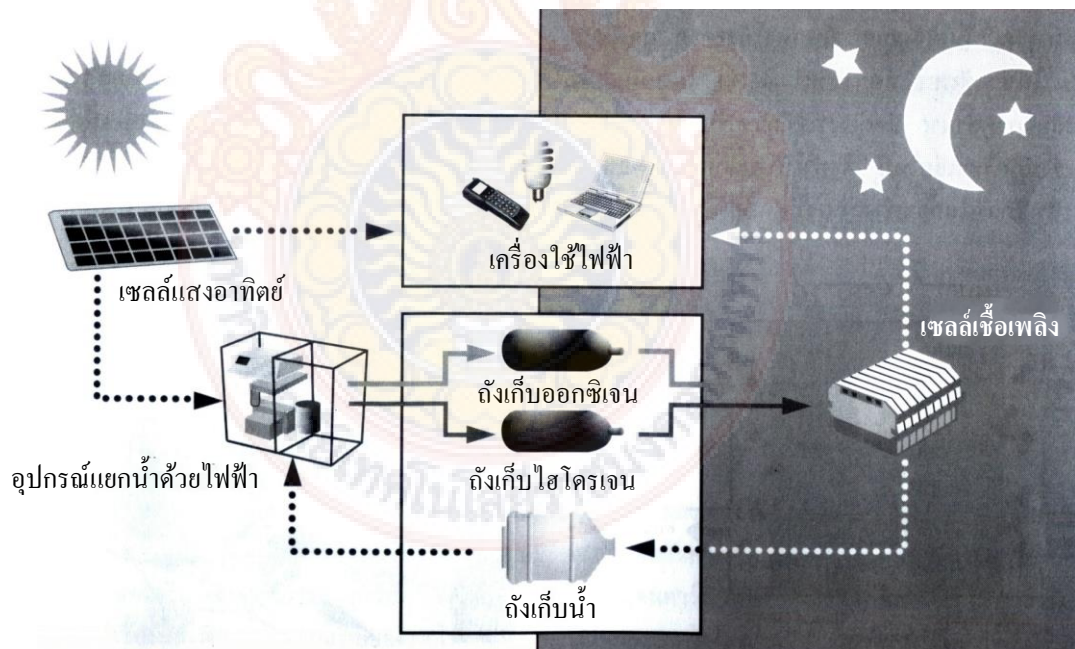
เกลือคาร์บอเนตที่ใช้ได้แก่ ลิเทียมคาร์บอเนต (Lithium Carbonate) ผสมกับ โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium Carbonate) หรือ ลิเทียมคาร์บอเนต (Lithium Carbonate) ผสมกับ โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate) เป็นต้น

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลวมีอุณหภูมิการทำงานสูงจึงใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง ทำให้ประหยัดพลังงานได้มาก เพราะไม่ต้องใช้พลังงานภายนอกในการแยกไฮโดรเจนจากน้ำหรือเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเพื่อผลิตไฮโดรเจน

## 6. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเชื้อเพลิงหมุนเวียน (Regenerative Fuel Cell : RFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นการนำเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 5 ชนิด ที่กล่าวผ่านมา มาบริหารจัดการ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของเชื้อเพลิง โดยนำของเสียที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งมาปรับสภาพให้เป็นเชื้อเพลิงอีกครั้งแล้วป้อนกลับเป็นเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิงใหม่ วงเวียนเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีลักษณะเป็นระบบปิด เพราะไม่มีการเสียมวลสารออกไป

การใช้เชื้อเพลิงในลักษณะหมุนเวียนเช่นนี้จะทำได้ก็ต่อเมื่อมีพลังงานจากแหล่งภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อเปลี่ยนน้ำที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้กลับไปเป็นเชื้อเพลิงแล้วป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงอีกครั้งหนึ่ง เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเชื้อเพลิงหมุนเวียนจึงมักนำมาใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานทดแทน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลม โดยพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมจะนำไปใช้ในกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า เพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซออกซิเจน จากนั้นจึงแยกก๊าซทั้งสองเข้าไปเก็บในถังทนแรงดันเพื่อเก็บไว้ใช้ในเวลากลางคืนที่ไม่มีแสงแดดหรือช่วงเวลาที่ลมสงบ โดยป้อนก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนในถังทนแรงดันเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนน้ำที่เป็นของเสียจะนำไปเก็บในถังเก็บ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเชื้อเพลิงหมุนเวียนร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์

ด้วยกระบวนการหมุนเวียนมวลสารเช่นนี้ทำให้เกิดการหมุนเวียนของเชื้อเพลิงและของเสียอย่างต่อเนื่อง ถ้านำไปใช้กับระบบขนาดเล็ก เช่น ติดตั้งในยานพาหนะ จะทำให้ยานพาหนะนั้นมี

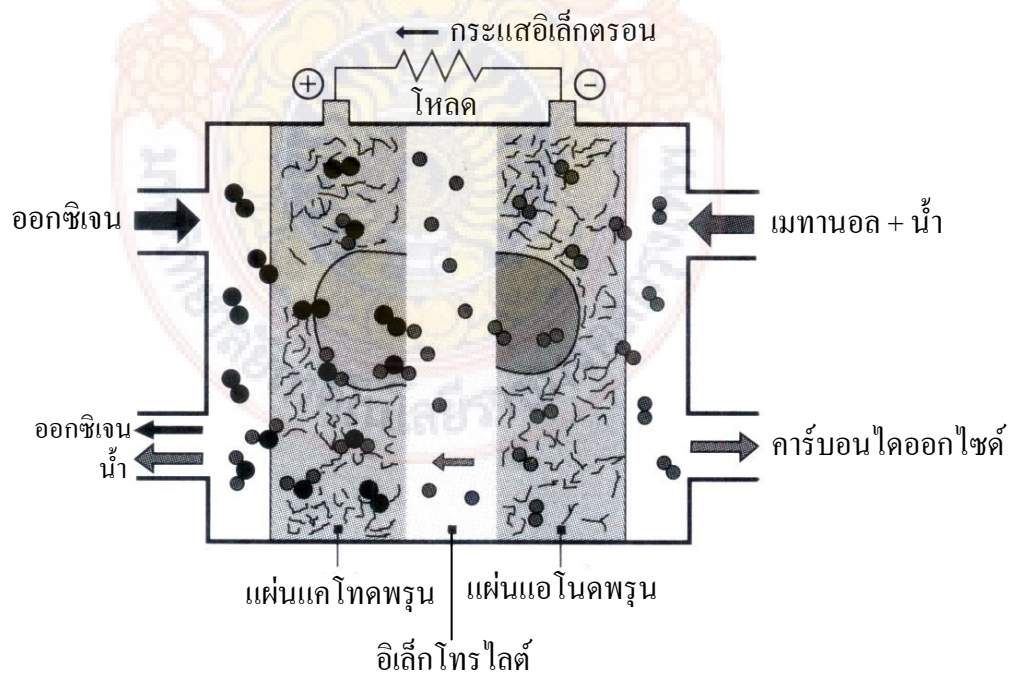
พลังงานเพียงพอที่จะใช้งานได้ตลอดอายุการใช้งาน โดยไม่ต้องเติมเชื้อเพลิงจากภายนอกเข้าไปเลย

#### 7. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอล (Direct Methanol Fuel Cell : DMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สร้างขึ้นเพื่อใช้กับเชื้อเพลิงเมทานอลหรือเมทิลแอลกอฮอล์โดยตรง จึงค่อนข้างแตกต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหลายที่กล่าวผ่านมา การใช้เมทิลแอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิง แทนก๊าซไฮโดรเจนทำให้นำไปใช้กับอุปกรณ์แบบพกพาได้สะดวกกว่า

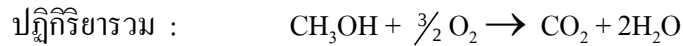
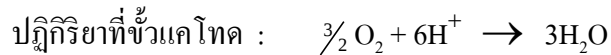
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอลพัฒนาขึ้นในช่วงต้นของทศวรรษที่ 1990 ตอนแรกมี ประสิทธิภาพต่ำมาก แต่หลังจากปรับปรุงและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่จึงมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 40 % และมีอุณหภูมิขณะทำงานอยู่ในช่วง  $50^{\circ}\text{C}$  -  $120^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำพอที่จะนำไปใช้กับอุปกรณ์พกพาต่างๆ เช่น กล้องดิจิทัล โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก เป็นต้น

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอลมีอิเล็กโทรไลต์ที่สร้างจากแผ่นพอลิเมอร์คล้ายกับ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ปฏิกิริยาภายในเซลล์เริ่มจากการแยกเมทานอล ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) เป็นโปรตอน อิเล็กตรอน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่แอโนด จากนั้นโปรตอนจะเคลื่อนผ่าน อิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับออกซิเจนที่แคโทดเป็นน้ำ ส่วนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากแอโนดจะเคลื่อน ออกสู่วงจรภายนอกแล้วกลับมายังแคโทด ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอล (DMFC)

### ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอล



เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอลพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้แทนแบตเตอรี่ในอุปกรณ์พกพา จึงมีขนาดเล็ก การใช้เชื้อเพลิงเมทานอลที่เป็นของเหลวทำให้พกพาเชื้อเพลิงติดตัวไปได้สะดวก เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอลมีข้อได้เปรียบเหนือแบตเตอรี่ตรงที่ไม่ต้องคอยหาที่ชาร์จ แบตเตอรี่หรือแหล่งจ่ายไฟให้ยุ่งยาก เมื่อพลังงานหมดเพียงแต่เติมเมทานอลลงไปก็นำมาใช้งานได้ใหม่ จึงเหมาะที่จะใช้กับอุปกรณ์พกพาโดยเฉพาะการนำไปใช้งานในถิ่นทุรกันดารที่ไม่มีไฟฟ้าใช้

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอลมีอุณหภูมิขณะทำงานต่ำและไม่ได้ใช้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิง อิเล็กโทรดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลจึงต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลจึงมีราคาค่อนข้างสูง นอกจากนี้เมทานอลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงยังเป็นพิษต่อผู้ใช้งานด้วย จึงมีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลซึ่งใช้เอทานอลหรือเอทิลแอลกอฮอล์ที่ไม่เป็นพิษขึ้นมาใช้งานแทน แต่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลมีประสิทธิภาพลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอล ทำให้การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอลยังคงดำเนินต่อไป

ภาพที่ 2.11 (ก) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอลที่ใช้กับอุปกรณ์พกพา ส่วนภาพที่ 2.11 (ข) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอลขนาด 10 mW ซึ่งให้พลังงานได้เพียงพัดลมขนาดเล็ก



ที่มา: sunrainet.com ค้นคืนเมื่อ 2 ส.ค. 55

ที่มา: uniterm.pl ค้นคืนเมื่อ 2 ส.ค. 55

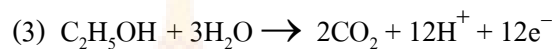
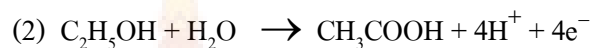
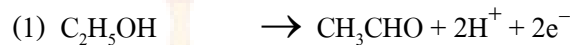
ภาพที่ 2.11 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอลที่ผลิตขึ้นมาใช้งานจริง

## 8. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล (Direct Ethanol Fuel Cell : DEFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลเป็นประเภทย่อยของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเชื้อเพลิงเปลี่ยนโปรตอน โดยที่เชื้อเพลิงเอทานอลไม่ได้เปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ตั้งแต่เริ่มต้น แต่จะป้อนเข้าสู่เยื่อหรือเมมเบรนของเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง

### ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด :



ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด :  $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

ที่ขั้วแอโนด เอทานอลส่วนหนึ่งถูกออกซิไดส์อย่างสมบูรณ์และเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังปฏิกิริยาที่ 3 ขณะที่เอทานอลบางส่วนถูกออกซิไดส์ไม่สมบูรณ์และเปลี่ยนเป็นอะซีทัลดีไฮด์ (acetaldehyde;  $\text{CH}_3\text{CHO}$ ) และกรดอะซีติก (acetic acid;  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ดังปฏิกิริยาที่ 1 และ 2

ที่ขั้วแคโทด ไฮโดรเจนเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจากอากาศภายนอกเกิดน้ำขึ้น

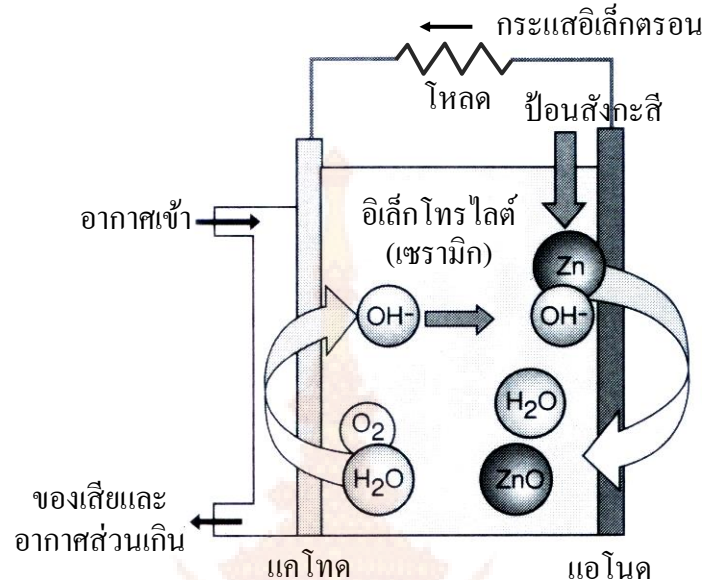
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลผลิตกระแสไฟฟ้าขณะที่เอทานอลทำปฏิกิริยาที่แอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง โปรตอนจากก๊าซไฮโดรเจนจะซึมจากสารละลายของเอทานอลผ่านเยื่อหรือเมมเบรนของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลและปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ถูกยึดอยู่ในวงจรภายนอก

## 9. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดสังกะสี-อากาศ (Zinc-Air Fuel Cell : ZAFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดสังกะสี-อากาศมีลักษณะคล้ายแบตเตอรี่มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ เนื่องจากที่แอโนดจะเกิดปฏิกิริยาเคมีจนหมดสภาพเช่นเดียวกับแบตเตอรี่ แต่แอโนดที่ใช้จนหมดสภาพนี้สามารถเปลี่ยนออกไปแล้วเอาแอโนดอันใหม่มาใส่แทน หรือนำสารมาเติมเพื่อให้มีแอโนดเพิ่มขึ้นได้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จึงมีลักษณะผสมของแบตเตอรี่และเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดสังกะสี-อากาศใช้เซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ซึ่งสามารถแยกหมู่ไฮดรอกซิลไอออนออกมาได้ มีแอโนดทำจากสังกะสี ป้อนเชื้อเพลิงได้ทั้งไฮโดรเจนบริสุทธิ์และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ต้องการอุณหภูมิการทำงานสูงถึง  $700^\circ\text{C}$  เพื่อให้เซลล์แยก

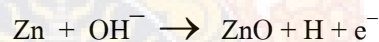
ไฮโดรเจนที่มีอยู่ในสารประกอบไฮโดรคาร์บอนออกมาใช้งานได้ ส่วนแคโทดจะทำหน้าที่แยกก๊าซออกซิเจนออกมาจากอากาศ ที่แคโทด ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำและไฮโดรเจนที่ได้มาจากหมู่ไฮดรอกซิลไอออน ดังภาพที่ 2.12



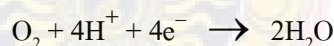
ภาพที่ 2.12 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดสังกะสี-อากาศ (ZAFC)

#### ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดสังกะสี-อากาศ

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด :

$$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$$


ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด :

$$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$$


ปฏิกิริยารวม :

$$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$$

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดสังกะสี-อากาศคือ การที่สามารถแยกไฮโดรเจนออกจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ภายในเซลล์ จึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เพื่อใช้ในการแยกไฮโดรเจนอีก อุณหภูมิการทำงานที่สูงทำให้น้ำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนร่วมได้และไอน้ำที่เกิดขึ้นยังนำไปใช้งานได้ด้วย ข้อได้เปรียบเหนือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ที่แท้จริงของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดสังกะสี-อากาศอยู่ที่อิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นของแข็งจึงไม่ต้องระวังเรื่องการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์อย่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นของเหลว และไม่ต้องคอยระวังว่าอิเล็กโทรไลต์จะเปื่อยหรือแห้งเกินไป เพราะไม่ว่าอิเล็กโทรไลต์จะเปื่อยหรือแห้ง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ยังคงทำงานได้ดี จึงไม่ต้องติดตั้งตัวตรวจวัดความชื้นเข้าไป ต่างจาก

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ต้องควบคุมความชื้นของอิเล็กโทรไลต์ให้เหมาะสม

ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดสังกะสี-อากาศ อยู่ที่แอโนดซึ่งทำจากสังกะสีจะสึกกร่อนไปเรื่อย ๆ จากการทำปฏิกิริยาเคมี จึงต้องเปลี่ยนแท่งแอโนดใหม่เมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง นอกจากนี้ยังต้องมีระบบหมุนเวียนสารละลาย เพื่อละลายเศษหรือตะกอนสังกะสีที่หลุดจากการทำปฏิกิริยาของแท่งแอโนด เพื่อป้องกันไม่ให้เศษตะกอนสังกะสีเข้าไปอุดตันอิเล็กโทรไลต์

#### 2.4 ข้อดีและข้อเสียในการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิง

การใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงมีข้อดีหลายอย่าง ได้แก่

1. เกิดมลพิษน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง เพราะของเสียหรือไอเสียจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นน้ำบริสุทธิ์ซึ่งนำไปอุปโภคหรือบริโภคได้ แม้จะมีเซลล์เชื้อเพลิงบางชนิดที่ปล่อยไอเสียเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซที่เป็นพิษ เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิง
2. มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายในและไม่เกิดเสียงดังขณะทำงานเพราะไม่มีชิ้นส่วนใด ๆ เคลื่อนไหวขณะเซลล์เชื้อเพลิงทำงาน
3. ความหนาแน่นของพลังงานสูงกว่าแบตเตอรี่จึงมีขนาดเล็กกว่าแบตเตอรี่ที่มีความจุพลังงานเท่ากัน และไม่ต้องเสียเวลาในการชาร์จหรืออัดประจุ เพียงแต่เติมเชื้อเพลิงเข้าไปก็ใช้งานได้ทันที
4. มีหลายชนิดและหลายขนาดให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม
5. วัสดุที่นำมาสร้างเซลล์เชื้อเพลิงมีความปลอดภัยมากกว่าวัสดุที่นำมาสร้างแบตเตอรี่ เนื่องจากไม่มีโลหะหนักที่เป็นภัยต่อสิ่งมีชีวิตและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

เซลล์เชื้อเพลิงมีข้อเสียและข้อจำกัดในการใช้งานหลายอย่างเช่นเดียวกัน ได้แก่

1. มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแบบอื่น ทำให้มีต้นทุนในการใช้งานสูง
2. เซลล์เชื้อเพลิงบางชนิด เช่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอล ใช้เชื้อเพลิงที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตโดยตรง เพราะเมทานอลมีฤทธิ์ทำลายเนื้อเยื่อและอาจทำให้ตาบอดได้ ถ้าไม่ระมัดระวังในการใช้งาน
3. ในกรณีที่เชื้อเพลิงที่ใช้ไม่ใช่ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ต้องมีกระบวนการแยกไฮโดรเจนออกจากเชื้อเพลิง ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานจากแหล่งอื่น ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ถ้าใช้ไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าถ่านหินจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะการเผาไหม้ของถ่านหินก่อให้เกิดก๊าซมลพิษ

เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ เป็นต้น แม้จะเป็นผลกระทบทางอ้อมก็ตาม

โดยภาพรวม เซลล์เชื้อเพลิงจึงมีทั้งข้อดีและข้อเสีย แต่ถ้ามีการจัดการอย่างเหมาะสม เช่น การนำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์หรือพลังงานลม จะก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อมน้อยมาก การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้แทนแบตเตอรี่หรือใช้แทนเครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นเรื่องที่น่าสนใจไม่น้อย เพราะนอกจากจะเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานแล้ว ยังช่วยลดขยะมีพิษที่เกิดจากแบตเตอรี่และลดการปลดปล่อยมลพิษลงด้วย เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเทคโนโลยีใหม่จึงมีราคาสูงและยังไม่เป็นที่นิยมใช้กันนัก แต่ผลจากการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นไปได้ที่จะมีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นแต่ราคาถูกลง จนกลายเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันทั่วไปในที่สุด

## 2.5 ประสิทธิภาพและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์แปลงเชื้อเพลิงเป็นพลังงานเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่เป็นประโยชน์ (U) ที่อุปกรณ์ผลิตได้กับการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ( $\Delta H$ ) ระหว่างผลผลิตและเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าไปดังสมการ

$$\eta = \frac{\text{useful energy}}{\Delta H} \dots\dots\dots (1)$$

โดยทั่วไปพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนเป็นความร้อนก่อน จากนั้นความร้อนจึงเปลี่ยนเป็นพลังงานกลซึ่งเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยการเปลี่ยนจากความร้อนเป็นพลังงานกลโดยปกติจะใช้กลจักรความร้อน ในกรณีของกลจักรความร้อน คาร์โนต์ได้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพสูงสุดของกลจักรความร้อนถูกจำกัดโดยอัตราส่วนของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (หน่วยเคลวิน) ของแหล่งจ่ายความร้อนและแหล่งดูดกลืนความร้อน

ในกรณีอุดมคติของอุปกรณ์แปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า (Electrochemical converter) อย่างเช่น เซลล์เชื้อเพลิง จะใช้การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ (Gibbs free energy) หรือ  $\Delta G$  ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิของการแปลงแทนพลังงาน (ไฟฟ้า) ที่เป็นประโยชน์ ดังนั้น ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงอุดมคติจึงหาได้จากสมการ

$$\eta_{ideal} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \dots\dots\dots (2)$$

จากสมการเคมีของปฏิกิริยาของเซลล์



การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐานของปฏิกิริยาของเซลล์จะมีค่าตามสมการ

$$\Delta G_r^o = \underline{G}_{H_2O(l)}^o - \underline{G}_{H_2}^o - \frac{1}{2} \underline{G}_{O_2}^o \quad \dots\dots\dots (4)$$

โดยน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะของเหลว

ที่ภาวะมาตรฐานคือ อุณหภูมิ 25°C (298 K) และความดัน 1 บรรยากาศ พลังงานความร้อนในปฏิกิริยาไฮโดรเจน/ออกซิเจนมีค่าเป็น 285.8 kJ/mol และพลังงานอิสระที่ใช้แทนพลังงานที่เป็นประโยชน์มีค่าเป็น 237.1 kJ/mol ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิงอุดมคติที่ทำงานโดยใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ภาวะมาตรฐานจึงมีค่าเป็น

$$\eta_{ideal} = \frac{237.1}{285.8} = 0.83 \quad \dots\dots\dots (5)$$

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจริง มักกำหนดให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันของเซลล์ขณะทำงานกับแรงดันอุดมคติของเซลล์ โดยแรงดันจริงของเซลล์มีค่าน้อยกว่าแรงดันอุดมคติของเซลล์เนื่องจากเกิดการสูญเสียที่ย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible losses) ขึ้นภายในเซลล์ การสูญเสียเหล่านี้มักหมายถึง การสูญเสียที่เป็นผลจากการเกิดโพลาไรซ์ (Polarization) การเกิดภาวะแรงดันเกิน (Overvoltage) และการสูญเสียที่เกิดจากการต้านการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Ohmic losses)

จากสมการ (1), (2) และ (5) จะได้

$$\eta = \frac{\text{useful energy}}{\Delta H} = \frac{\text{useful power}}{\Delta G / 0.83} = \frac{\text{volts}_{actual} \times \text{current}}{\text{volts}_{ideal} \times (\text{current} / 0.83)}$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน/ออกซิเจนเขียนในเทอมของแรงดันจริงของเซลล์ได้เป็น

$$\eta = \frac{0.83 (V_{actual})}{E_{ideal}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

เนื่องจากแรงดันอุดมคติของแต่ละเซลล์ที่กำลังทำงานโดยใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25°C มีค่าเป็น 1.229 V จากสมการ (6) จึงได้

$$\eta = 0.83 \left( \frac{V_{cell}}{1.229} \right)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิงจริงที่กำลังทำงานที่ความดัน  $V_{cell}$  จึงมีค่าเป็น

$$\eta = 0.675 \times V_{cell} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงตามสมการ (7) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า **ประสิทธิภาพแรงดัน**

ที่กล่าวผ่านมายู่บนสมมติฐานที่ว่าเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิงถูกแปลงเป็นพลังงานอย่างสมบูรณ์ เหมือนกรณีปกติที่เกิดขึ้นในกลจักรความร้อนส่วนใหญ่ แต่โดยปกติเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้ถูกแปลงเป็นพลังงานอย่างสมบูรณ์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพแท้จริงของเซลล์จึงต้องคูณประสิทธิภาพแรงดันด้วยค่าการใช้เชื้อเพลิง

เนื่องจากแอกติวิตีของสารตั้งต้น (reactant activities) ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิง จะลดลงเมื่อการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น การใช้เชื้อเพลิงจึงจำกัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง โดยมีผลต่อเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิขณะทำงานสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิขณะทำงานต่ำ

นอกจากมีประสิทธิภาพต่างกันแล้ว เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดยังมีสมรรถนะต่างกันด้วย สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความดัน องค์ประกอบของก๊าซ การใช้สารตั้งต้น ความหนาแน่นกระแส อายุการใช้งาน และความเข้มข้นของเชื้อเพลิง (สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเมทานอลและเอทานอล) เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล อุณหภูมิของบริเวณที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน ความต้านทานของโหลด และการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง ที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลแบบเซลล์เดี่ยว โดยสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงในที่นี้พิจารณาจากค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง และช่วงเวลาที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด

## บทที่ 3

### การดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### (1) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายเอทานอล ประกอบด้วย

1. เอทานอลหรือเอทิลแอลกอฮอล์ (99.8%)
2. น้ำกลั่น
3. บีกเกอร์ (beaker) ขนาด (ความจุ) 60 ml
4. หลอดหยด (dropper)
5. แท่งแก้วคนสาร
6. กระบอกเข็มฉีดยา (syringe)

ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เอทานอลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายเอทานอล

##### (2) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของเอทานอลต่อ

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

(2.1) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลโดยไม่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วย

1. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลแบบเซลล์เดี่ยว 1 ชุด
2. มัลติมิเตอร์ชนิดดิจิทัล 2 เครื่อง
3. กล่องความต้านทานแบบเลือกค่าได้จาก  $0 - 10 \Omega$
4. สายไฟต่อวงจร 6 เส้น
5. นาฬิกาจับเวลา

ดังภาพที่ 3.2



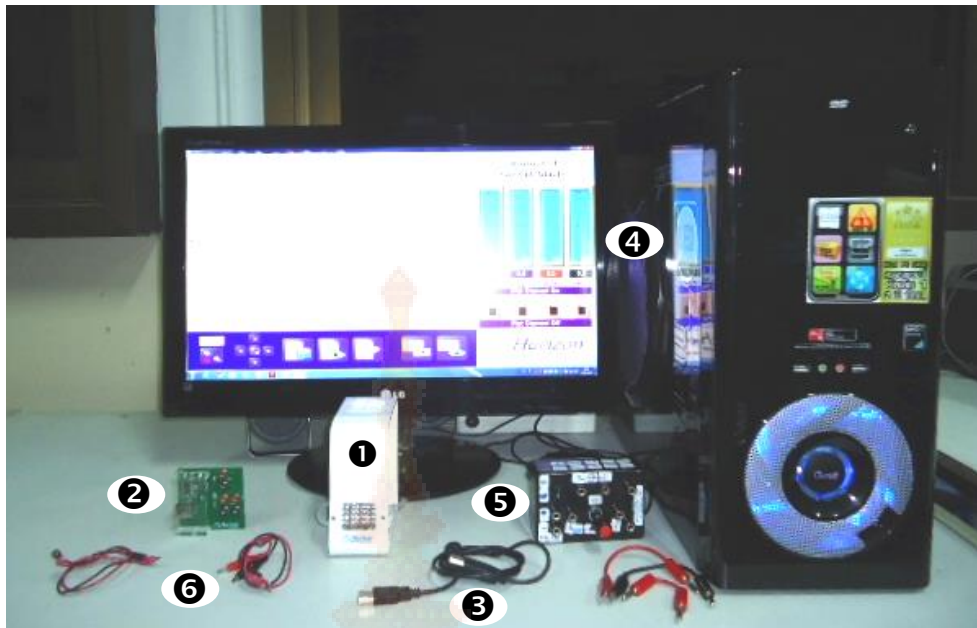
ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลโดยไม่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

(2.2) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลโดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย

1. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลแบบเซลล์เดี่ยว 1 ชุด
2. บอร์ดเก็บข้อมูล
3. สายเชื่อมต่อบอร์ดเก็บข้อมูลเข้ากับคอมพิวเตอร์
4. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง พร้อมจอภาพ
5. กล่องความต้านทานแบบเลือกค่าได้จาก  $0 - 10 \Omega$
6. สายไฟต่อวงจร 6 เส้น

ดั่งภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลโดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

(3) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

(3.1) เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิคงที่

อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย

1. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลแบบเซลล์เดี่ยว 1 ชุด
2. มัลติมิเตอร์ 3 เครื่อง
3. เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค
4. กล่องความต้านทานแบบเลือกค่าได้จาก 0 – 10  $\Omega$
5. สายไฟต่อวงจร 6 เส้น
6. นาฬิกาจับเวลา

ดั่งภาพที่ 3.4



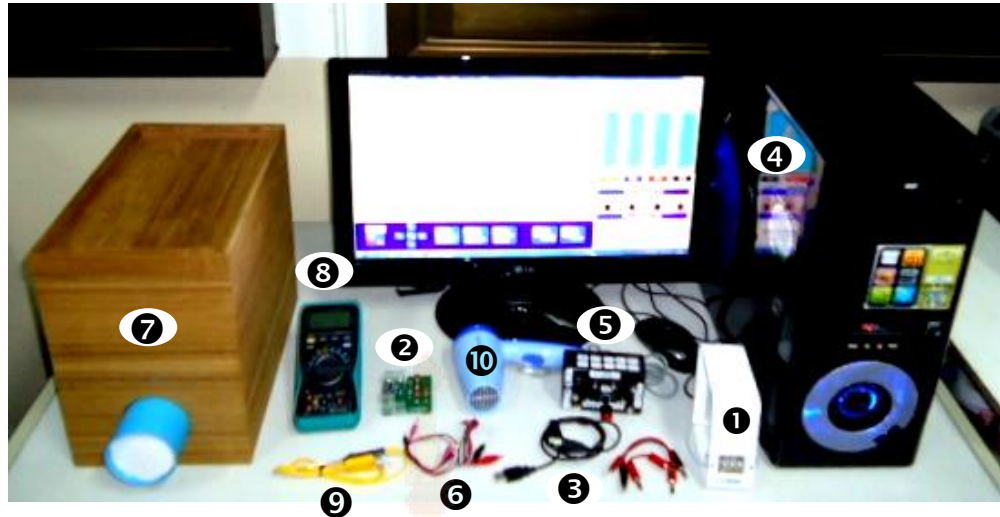
ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิคงที่

(3.2) เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย

1. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลแบบเซลล์เดี่ยว 1 ชุด
2. บอร์ดเก็บข้อมูล
3. สายเชื่อมต่อบอร์ดเก็บข้อมูลเข้ากับคอมพิวเตอร์
4. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง พร้อมจอภาพ
5. กล่องความต้านทานแบบเลือกค่าได้จาก 0 – 10  $\Omega$
6. สายไฟต่อวงจร 6 เส้น
7. กล่องไม้ ขนาดกว้าง 8 นิ้ว ยาว 12 นิ้ว สูง 12 นิ้ว
8. มัลติมิเตอร์ชนิดดิจิทัล
9. เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค
10. เครื่องเป่าลมขนาด (กำลังไฟฟ้า) 1,000 W
11. นาฬิกาจับเวลา

ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

(4) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล ประกอบด้วย

1. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลแบบเซลล์เดี่ยว 1 ชุด
2. มัลติมิเตอร์ชนิดดิจิทัล 2 เครื่อง
3. ก่อองความต้านทานแบบเลือกค่าได้จาก 0 – 10  $\Omega$
4. สายไฟต่อวงจร 6 เส้น
5. นาฬิกาจับเวลา

ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

(5) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล ประกอบด้วย

1. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลแบบเซลล์เดี่ยว
  2. กล่องความต้านทานแบบเลือกค่าได้จาก  $0 - 10 \Omega$
  3. เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (k-type thermocouple)
  4. มัลติมิเตอร์ 3 ตัว
  5. พัดลมพร้อมสายต่อพัดลมเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า
  6. นาฬิกาจับเวลา
  7. สายไฟต่อวงจร 6 เส้น
- ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

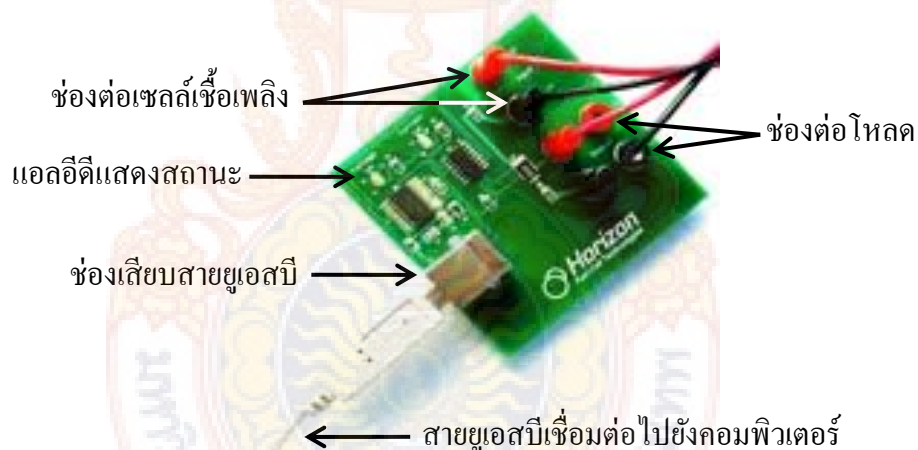
(6) ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลและบอร์ดเก็บข้อมูล

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลที่ใช้ในการทดลองมีส่วนประกอบดังภาพที่



ภาพที่ 3.8 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนบอร์ดเก็บข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ส่วนประกอบของบอร์ดเก็บข้อมูล

บอร์ดเก็บข้อมูลทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างเซลล์เชื้อเพลิง (หรือแผงเซลล์สุริยะ กังหันลม) กับคอมพิวเตอร์ เมื่อต่อบอร์ดเก็บข้อมูลเข้ากับคอมพิวเตอร์ ซอฟต์แวร์ในบอร์ดเก็บข้อมูล จะวัดและคำนวณแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า แล้วส่งปริมาณทางไฟฟ้าทั้งสามนี้ไปยังคอมพิวเตอร์ 3 ครั้งต่อวินาที ซอฟต์แวร์ในคอมพิวเตอร์จะแสดงปริมาณเหล่านี้ทั้งในรูปตัวเลขและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า บอร์ดเก็บข้อมูลจึงทำให้คอมพิวเตอร์ธรรมดากลายเป็นอุปกรณ์การทดลองอย่างหนึ่ง

### 3.1.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1.2.1 การเตรียมสารละลายเอทานอลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิง

มีขั้นตอนดังนี้

1. วัดค่าพีเอช (pH) ของน้ำกลั่นและเอทานอล บันทึกลง
2. ในการเตรียมสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ให้เทเอทานอล ปริมาตร 3 ml ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเทน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์จนได้ของผสมปริมาตร 60 ml แล้วใช้ แท่งแก้วคนสารละลายเอทานอลและน้ำให้เข้ากัน บันทึกค่าความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล

3. วัดค่า pH ของของผสม บันทึกลง

ส่วนการเตรียมสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 และร้อยละ 15 ให้เพิ่ม ปริมาตรของเอทานอลที่เทลงในบีกเกอร์เป็น 6 ml และ 9 ml ตามลำดับ จากนั้นจึงเทน้ำกลั่นลงใน บีกเกอร์จนได้สารละลายปริมาตร 60 ml แล้วใช้แท่งแก้วคนสารละลายเอทานอลและน้ำให้เข้ากัน บันทึก ค่าความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล

#### 3.1.2.2 วิธีการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อ

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลโดยไม่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

1. เตรียมสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5
2. เปิดฝาปิดกระบอกบรรจุสารละลายเอทานอลของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วเทสารละลาย ทั้ง 60 ml ลงไป ปิดฝา ปิดวาล์วให้สารละลายไหลผ่านสายยางออกมาประมาณ 10 หยด แล้วปิดวาล์ว ไว้เช่นเดิม
3. จัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 3.10 โดยปรับปุ่มเลือกค่าความต้านทานไปที่ค่า 1 โอห์ม



ภาพที่ 3.10 การจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล โดยไม่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

4. ปล่อยให้สารละลายเอทานอลทำปฏิกิริยา 10 นาที
5. กดสวิทช์ของกล่องความต้านทานไปที่ตำแหน่ง ON พร้อมจับเวลาและอ่านค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากมัลติมิเตอร์ โดยอ่านค่าทุก ๆ 1 นาที บันทึกผล จนครบ 30 นาที
6. กดสวิทช์ของกล่องความต้านทานไปที่ตำแหน่ง OFF ปลดสายไฟ และนำอุปกรณ์เตรียมสารและเซลล์เชื้อเพลิงไปล้างด้วยน้ำกลั่น
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเป็นร้อยละ 10
8. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเป็นร้อยละ 15

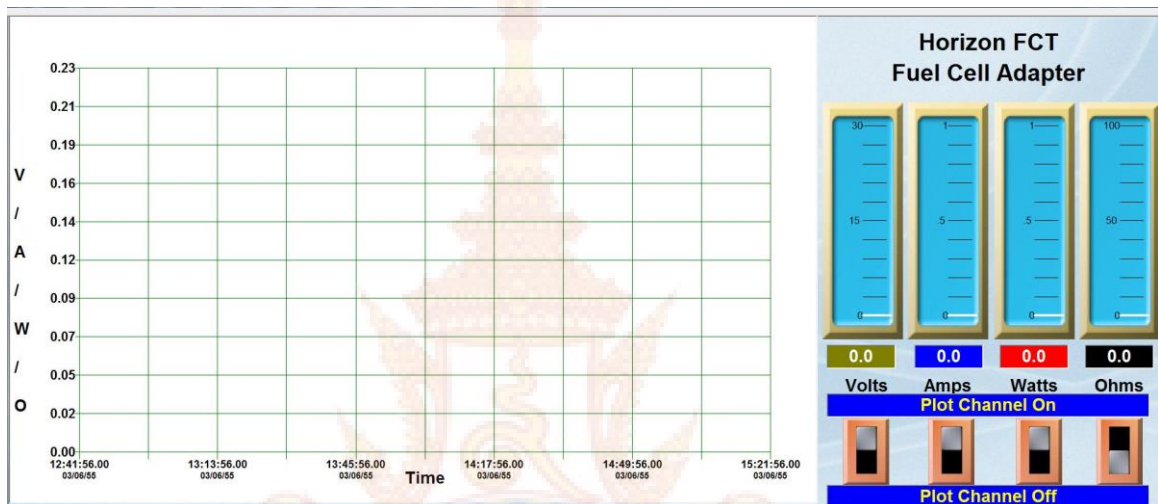
### 3.1.2.3 วิธีการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลโดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

1. เตรียมสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5
2. เปิดฝาปิดกระบอกบรรจุสารละลายเอทานอลของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วเทสารละลายทิ้ง 60 ml ลงไป ปิดฝา เปิดวาล์วให้สารละลายไหลผ่านสายยางออกมาประมาณ 10 หยด แล้วปิดวาล์วไว้เช่นเดิม
3. จัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 3.11 โดยปรับปุ่มเลือกค่าความต้านทานไปที่ค่า 10 โอห์ม



ภาพที่ 3.11 การจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลโดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

4. ปล่อยให้สารละลายเอทานอลทำปฏิกิริยา 10 นาที
5. เปิดโปรแกรม  (Horizon FCA)
6. คลิกที่ปุ่ม **English Interface**
7. ปรับการแสดงผลในรูปกราฟ โดยใช้ปุ่ม  กับ  ปรับอัตราส่วนทางแกน X และใช้ปุ่ม  กับ  ปรับอัตราส่วนทางแกน Y โดยปรับให้จุดบนสุดของแกน Y มีค่าเป็น 0.23 และปรับค่าทางแกน X ให้ได้ช่วงเวลา 2 ชั่วโมง 40 นาที และคลิกปุ่มแสดงผลค่าความต้านทานให้เป็น OFF ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 ตัวอย่างการปรับการแสดงผลในรูปกราฟของโปรแกรม

8. เลือกช่องการเชื่อมต่ออุปกรณ์เป็นช่องที่มี fuel cell adapter ต่ออยู่ (ในที่นี้คือช่องที่ 4)

9. กดปุ่มล้างข้อมูล  เพื่อลบข้อมูลเก่า
10. กดสวิทช์ของกล่องความต้านทานไปที่ตำแหน่ง ON แล้วกดปุ่มเชื่อมต่อ  ปุ่มล้างหน้าจอ (refresh)  และปุ่มบันทึกข้อมูล  ตามลำดับ

11. ปล่อยให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน 2 ชั่วโมง
12. กดปุ่มปลดการเชื่อมต่อ 
13. กดปุ่มบันทึกข้อมูล  อีกครั้ง เพื่อหยุดการบันทึกข้อมูล จากนั้นกดปุ่มดูข้อมูล  เพื่อดูข้อมูลที่บันทึกไว้ แล้วบันทึกข้อมูลลงในไฟล์เดอร์ที่ต้องการ

14. กดปุ่มบันทึกกราฟ  เพื่อบันทึกกราฟจากการทดลอง
15. ปิดโปรแกรมและปลดสายที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

16. หาค่าพีเอชของสารละลายหลังการทดลอง บันทึกผล
17. ล้างเครื่องแก้วและเซลล์เชื้อเพลิงด้วยน้ำกลั่น
18. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-17 โดยเปลี่ยนมาใช้สารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร
19. ทำการทดลองซ้ำ 1-17 โดยเปลี่ยนมาใช้สารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร

#### 3.1.2.4 วิธีการทดลองเพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานในบริเวณที่อุณหภูมิคงที่

1. ปรับอุณหภูมิห้องทดลองไว้ที่  $26^{\circ}\text{C}$
2. เตรียมสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15
3. เปิดฝาปิดกระบอกบรรจุสารละลายเอทานอลของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วเทสารละลายทั้ง 60 ml ลงไป ปิดฝา ดันปุ่มล็อกสายยางไปจากตำแหน่งล็อกสายยางเพื่อให้สารละลายไหลผ่านสายยางออกมาประมาณ 10 หยด จากนั้นดันปุ่มล็อกสายยางกลับไปยังตำแหน่งล็อกสายยางเช่นเดิม
4. จัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 3.13 โดยปรับปุ่มเลือกค่าความต้านทานไปที่ค่า 1 โอห์ม



ภาพที่ 3.13 การจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานในบริเวณที่อุณหภูมิคงที่

5. ปล่อยให้สารละลายเอทานอลทำปฏิกิริยา 10 นาที
6. กดสวิทช์ของกล่องความต้านทานไปที่ตำแหน่ง ON พร้อมจับเวลาและอ่านค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากมัลติมิเตอร์ โดยอ่านค่าทุก ๆ 1 นาที บันทึกผล จนครบ 30 นาที
7. กดสวิทช์ของกล่องความต้านทานไปที่ตำแหน่ง OFF ปลดสายไฟ และนำอุปกรณ์เตรียมสารและเซลล์เชื้อเพลิงไปล้างด้วยน้ำกลั่น
8. ปรับอุณหภูมิห้องทดลองไว้ที่  $23^{\circ}\text{C}$  แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 1-7
9. ปรับอุณหภูมิห้องทดลองไว้ที่  $20^{\circ}\text{C}$  แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 1-7

### 3.1.2.5 วิธีทดลองเพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานในบริเวณที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

1. เตรียมสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15
2. เปิดฝาปิดกระบอกบรรจุสารละลายเอทานอลของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วเทสารละลายทิ้ง 60 ml ลงไป ปิดฝา ดันปุ่มล๊อคสายยางไปจากตำแหน่งล๊อคสายยางเพื่อให้สารละลายไหลผ่านสายยางออกมาประมาณ 10 หยด จากนั้นดันปุ่มล๊อคสายยางกลับไปยังตำแหน่งล๊อคสายยางเช่นเดิม
3. ปล่อยให้สารละลายเอทานอลทำปฏิกิริยา 10 นาที
4. เปิดโปรแกรม  (Horizon FCA)
5. คลิกที่ปุ่ม **English Interface**
6. ปรับการแสดงผลในรูปภาพ โดยใช้ปุ่ม  กับ  ปรับอัตราส่วนทางแกน X และใช้ปุ่ม  กับ  ปรับอัตราส่วนทางแกน Y โดยปรับให้จุดบนสุดของแกน Y มีค่าเป็น 0.23 และปรับค่าทางแกน X ให้ได้ช่วงเวลา 2 ชั่วโมง 40 นาที และคลิกปุ่มแสดงผลค่าความต้านทานให้เป็น OFF ดังภาพที่ 3.12
7. เลือกช่องการเชื่อมต่ออุปกรณ์เป็นช่องที่มี fuel cell adapter ต่ออยู่ (ในที่นี้คือช่องที่ 4)
8. กดปุ่มล้างข้อมูล  เพื่อลบข้อมูลเก่า
9. วางเซลล์เชื้อเพลิงไว้บริเวณกึ่งกลางกล่องไม้โดยหันด้านที่มีเมมเบรนให้ตรงกับรูสำหรับเสียบโพรบของเทอร์โมคัปเปิล ดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 การวางเซลล์เชื้อเพลิงในกล่องไม้

10. ปิดฝากล่องไม้ จากนั้นสอดเครื่องเป่าลมเข้าไปในท่อพีวีซีทางด้านล่างของผนังด้านหน้าของกล่องไม้ ดังภาพที่ 3.15



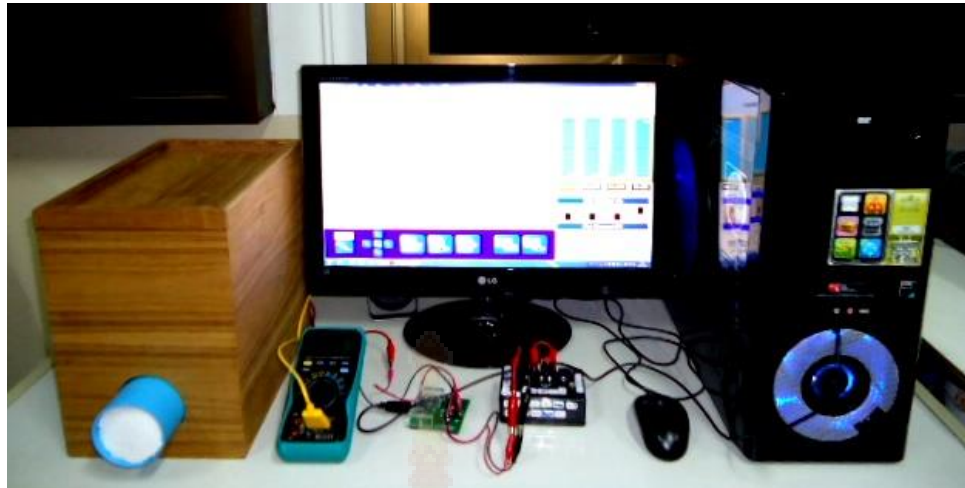
ภาพที่ 3.15 การเป่าลมร้อนเข้าไปในกล่องไม้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศในกล่องไม้

เปิดสวิทช์ของเครื่องเป่าลมเป่าลมร้อนเข้าไปในกล่องไม้เป็นเวลา 4 นาที  
ดึงเครื่องเป่าออกมาแล้วใช้แผ่นโฟมกลมขนาดพอดีกับท่อปิดปากท่อพีวีซีไว้

11. เลือกโหมดการวัดของมัลติมิเตอร์เป็นการวัดอุณหภูมิและกดปุ่ม select จนหน้าจอแสดงผลเป็นค่าอุณหภูมิในหน่วย  $^{\circ}\text{C}$  จากนั้นต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับมัลติมิเตอร์

12. แกะเทปกาวที่ผนังด้านข้างของกล่องไม้ ออกและเสียบโพรบของเทอร์โมคัปเปิลเข้าไป

13. จัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 การจัดอุปกรณ์การทดลอง ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานในบริเวณที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

14. ปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 3 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของอากาศในกล่องไม้คงที่ บันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มต้น

15. กดสวิทช์ของกล่องความดันทาน ไปที่ตำแหน่ง ON แล้วกดปุ่มเชื่อมต่อ  ปุ่มล้างหน้าจอ (refresh)  และปุ่มบันทึกข้อมูล  ตามลำดับ

16. ปล่อยให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน 2 ชั่วโมง (อุณหภูมิของอากาศในกล่องไม้จะลดลงอย่างต่อเนื่อง) บันทึกค่าอุณหภูมิสุดท้าย

17. กดปุ่มปลดการเชื่อมต่อ    
 18. กดปุ่มบันทึกข้อมูล  อีกครั้ง เพื่อหยุดการบันทึกข้อมูล จากนั้นกดปุ่มดูข้อมูล  เพื่อดูข้อมูลที่บันทึกไว้ แล้วบันทึกข้อมูลลงในไฟล์เดอร์ที่ต้องการ

19. กดปุ่มบันทึกกราฟ  เพื่อบันทึกกราฟจากการทดลอง

20. ปิดโปรแกรมและปลดสายที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

21. เปิดฝากล่องไม้เพื่อระบายความร้อน

22. หาค่าพีเอชของสารละลาย บันทึกผล

23. กดสวิทช์ของกล่องความดันทาน ไปที่ตำแหน่ง OFF ปลดสายไฟ และนำอุปกรณ์เตรียมสารและเซลล์เชื้อเพลิงไปล้างด้วยน้ำกลั่น

24. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-23 โดยเปลี่ยนช่วงเวลาในการเป่าลมร้อนเข้าไปในกล่องไม้เป็น 10 นาที และ 20 นาที

### 3.1.2.6 วิธีการทดลองเพื่อทดสอบผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

1. เตรียมสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15
2. เปิดฝาปิดกระบอกบรรจุสารละลายเอทานอลของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วเทสารละลาย ทั้ง 60 ml ลงไป ปิดฝา ดันปุ่มล๊อคสายยางไปจากตำแหน่งล๊อคสายยางเพื่อให้สารละลายไหลผ่าน สายยางออกมาประมาณ 10 หยด จากนั้นดันปุ่มล๊อคสายยางกลับไปยังตำแหน่งล๊อคสายยางเช่นเดิม
3. จัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 3.17 โดยปรับปุ่มเลือกค่าความต้านทานไปที่ค่า 3.9 โอห์ม



ภาพที่ 3.17 การจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อทดสอบผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

4. ปล่อยให้สารละลายเอทานอลทำปฏิกิริยา 10 นาที
5. กดสวิทช์ของกล่องความต้านทานไปที่ตำแหน่ง ON พร้อมจับเวลาและอ่านค่า แรงดันและกระแสไฟฟ้าจากมัลติมิเตอร์ โดยอ่านค่าทุก ๆ 1 นาที บันทึกผล จนครบ 30 นาที
6. กดสวิทช์ของกล่องความต้านทานไปที่ตำแหน่ง OFF ปลดสายไฟ และนำ อุปกรณ์เตรียมสารและเซลล์เชื้อเพลิงไปล้างด้วยน้ำกลั่น
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนความต้านทานโหลดเป็น 4.7 โอห์ม
8. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนความต้านทานโหลดเป็น 10 โอห์ม

### 3.1.2.7 วิธีการทดลองเพื่อทดสอบผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่าน

เซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

1. เตรียมสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15
2. เปิดฝาปิดกระบอกบรรจุสารละลายเอทานอลของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วเทสารละลายทั้ง 60 ml ลงไป ปิดฝา ดันปุ่มล็อกสายยางไปจากตำแหน่งล็อกสายยางเพื่อให้สารละลายไหลผ่านสายยางออกมาประมาณ 10 หยด จากนั้นดันปุ่มล็อกสายยางกลับไปยังตำแหน่งล็อกสายยางเช่นเดิม
3. จัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 3.18 โดยปรับปุ่มเลือกค่าความต้านทานไปที่ค่า 1 โอห์ม แต่ยังไม่เปิดพัดลม



ภาพที่ 3.18 การจัดอุปกรณ์การทดลองผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล (ยังไม่เปิดพัดลม)

4. ปล่อยให้สารละลายเอทานอลทำปฏิกิริยา 10 นาที
5. กดสวิทช์ของกล่องความต้านทานไปที่ตำแหน่ง ON พร้อมจับเวลาและอ่านค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากมัลติมิเตอร์ โดยอ่านค่าทุก ๆ 1 นาที บันทึกผล จนครบ 30 นาที
6. กดสวิทช์ของกล่องความต้านทานไปที่ตำแหน่ง OFF ปลดสายไฟ และนำอุปกรณ์เตรียมสารและเซลล์เชื้อเพลิงไปล้างด้วยน้ำกลั่น
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 แต่เปิดพัดลมให้เป่าลมผ่านเมมเบรนของเซลล์เชื้อเพลิงดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 การจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล (เปิดพัดลม)

### 3.2 สถานที่ทำการวิจัย

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

#### 4.1 ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

การทดลองนี้ใช้ความต้านทานโหลด  $1\ \Omega$  และเซลล์เชื้อเพลิงทำงานในบริเวณที่มีอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อสารละลายเอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 5

| นาที่ที่ | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 0.0221          | 5.10            | 0.113           |
| 2        | 0.0212          | 4.92            | 0.104           |
| 3        | 0.0207          | 4.79            | 0.0992          |
| 4        | 0.0201          | 4.68            | 0.0941          |
| 5        | 0.0197          | 4.57            | 0.0900          |
| 6        | 0.0192          | 4.46            | 0.0856          |
| 7        | 0.0187          | 4.34            | 0.0812          |
| 8        | 0.0183          | 4.25            | 0.0778          |
| 9        | 0.0178          | 4.16            | 0.0740          |
| 10       | 0.0175          | 4.06            | 0.0710          |
| 11       | 0.0171          | 3.98            | 0.0681          |
| 12       | 0.0168          | 3.90            | 0.0655          |
| 13       | 0.0165          | 3.83            | 0.0632          |
| 14       | 0.0162          | 3.76            | 0.0609          |
| 15       | 0.0159          | 3.69            | 0.0587          |
| 16       | 0.0156          | 3.64            | 0.0568          |
| 17       | 0.0154          | 3.57            | 0.0550          |
| 18       | 0.0151          | 3.53            | 0.0533          |
| 19       | 0.0149          | 3.47            | 0.0517          |
| 20       | 0.0147          | 3.41            | 0.0501          |
| 21       | 0.0145          | 3.37            | 0.0489          |
| 22       | 0.0143          | 3.32            | 0.0475          |
| 23       | 0.0141          | 3.28            | 0.0462          |
| 24       | 0.0139          | 3.23            | 0.0449          |

|    |        |      |        |
|----|--------|------|--------|
| 25 | 0.0137 | 3.19 | 0.0437 |
| 26 | 0.0135 | 3.16 | 0.0427 |
| 27 | 0.0133 | 3.11 | 0.0414 |
| 28 | 0.0132 | 3.07 | 0.0405 |
| 29 | 0.0131 | 3.04 | 0.0398 |
| 30 | 0.0129 | 3.00 | 0.0387 |

ตารางที่ 2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง  
ชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อสารละลายเอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 10

| นาที่ที่ | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 0.0217          | 7.79            | 0.169           |
| 2        | 0.0207          | 7.43            | 0.154           |
| 3        | 0.0198          | 7.13            | 0.141           |
| 4        | 0.0191          | 6.88            | 0.131           |
| 5        | 0.0185          | 6.66            | 0.123           |
| 6        | 0.0180          | 6.46            | 0.116           |
| 7        | 0.0175          | 6.31            | 0.110           |
| 8        | 0.0171          | 6.16            | 0.105           |
| 9        | 0.0167          | 6.02            | 0.100           |
| 10       | 0.0164          | 5.92            | 0.0971          |
| 11       | 0.0161          | 5.82            | 0.0937          |
| 12       | 0.0159          | 5.73            | 0.0911          |
| 13       | 0.0157          | 5.64            | 0.0886          |
| 14       | 0.0154          | 5.57            | 0.0858          |
| 15       | 0.0153          | 5.49            | 0.0840          |
| 16       | 0.0151          | 5.43            | 0.0820          |
| 17       | 0.0149          | 5.37            | 0.0800          |
| 18       | 0.0147          | 5.30            | 0.0779          |
| 19       | 0.0146          | 5.25            | 0.0766          |
| 20       | 0.0144          | 5.20            | 0.0749          |
| 21       | 0.0143          | 5.15            | 0.0736          |
| 22       | 0.0142          | 5.11            | 0.0726          |
| 23       | 0.0140          | 5.07            | 0.0710          |
| 24       | 0.0139          | 5.02            | 0.0698          |
| 25       | 0.0138          | 4.98            | 0.0687          |
| 26       | 0.0137          | 4.94            | 0.0677          |
| 27       | 0.0136          | 4.90            | 0.0666          |

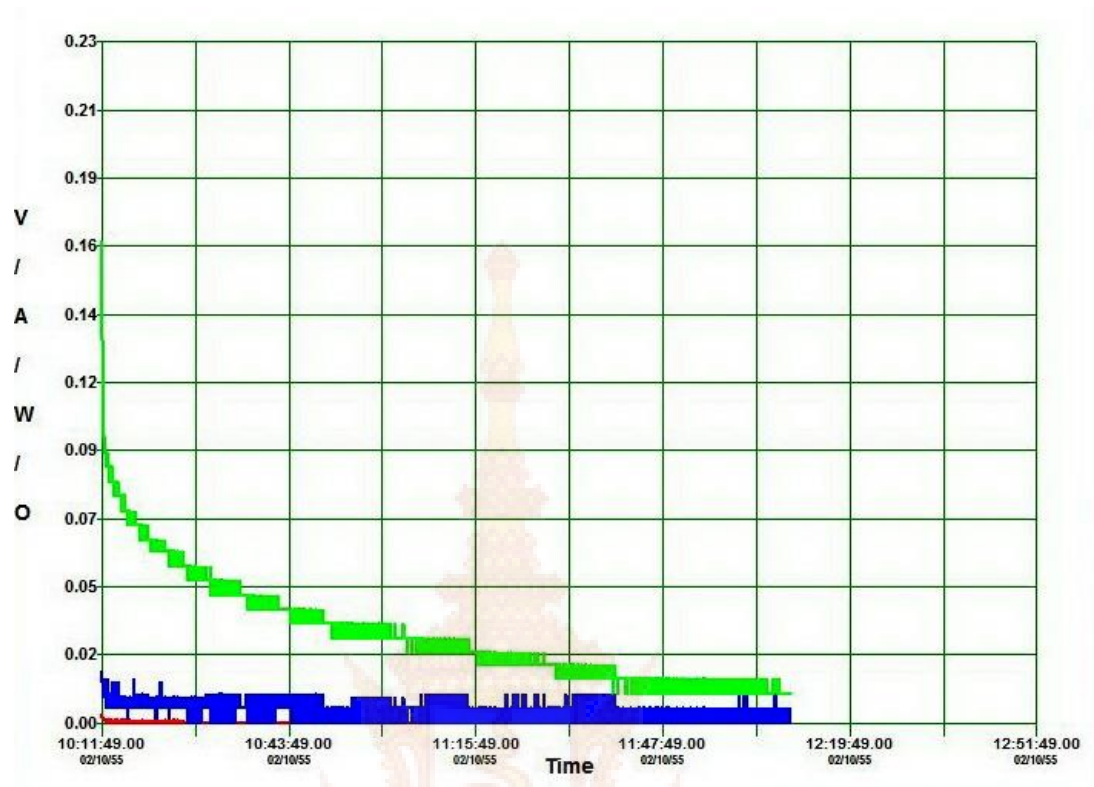
|    |        |      |        |
|----|--------|------|--------|
| 28 | 0.0135 | 4.87 | 0.0657 |
| 29 | 0.0134 | 4.84 | 0.0649 |
| 30 | 0.0133 | 4.80 | 0.0638 |

**ตารางที่ 3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง**

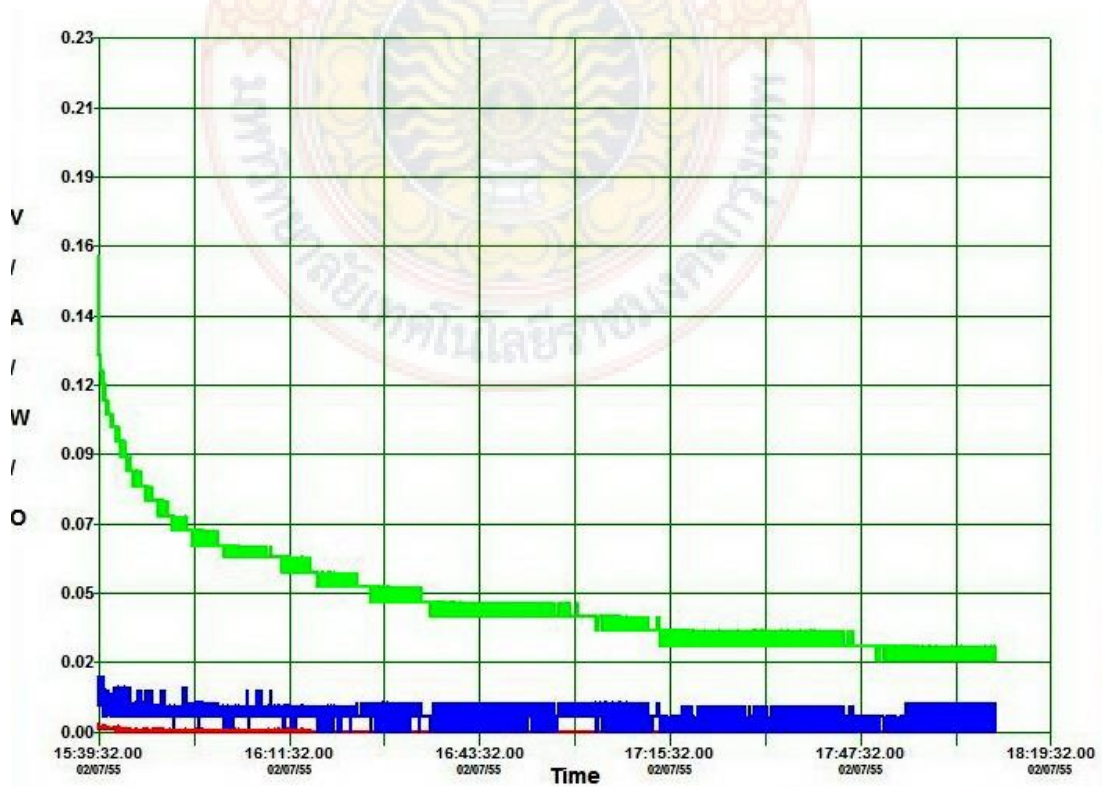
**ชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อสารละลายเอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 15**

| นาที่ที่ | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 0.0254          | 9.09            | 0.231           |
| 2        | 0.0240          | 8.59            | 0.206           |
| 3        | 0.0231          | 8.26            | 0.191           |
| 4        | 0.0224          | 8.02            | 0.180           |
| 5        | 0.0218          | 7.82            | 0.170           |
| 6        | 0.0213          | 7.65            | 0.163           |
| 7        | 0.0204          | 7.52            | 0.153           |
| 8        | 0.0206          | 7.39            | 0.152           |
| 9        | 0.0203          | 7.28            | 0.148           |
| 10       | 0.0200          | 7.18            | 0.142           |
| 11       | 0.0198          | 7.09            | 0.140           |
| 12       | 0.0195          | 7.00            | 0.136           |
| 13       | 0.0193          | 6.93            | 0.134           |
| 14       | 0.0191          | 6.86            | 0.131           |
| 15       | 0.0189          | 6.79            | 0.128           |
| 16       | 0.0188          | 6.74            | 0.127           |
| 17       | 0.0186          | 6.67            | 0.124           |
| 18       | 0.0184          | 6.61            | 0.122           |
| 19       | 0.0183          | 6.56            | 0.120           |
| 20       | 0.0182          | 6.52            | 0.119           |
| 21       | 0.0180          | 6.47            | 0.116           |
| 22       | 0.0179          | 6.43            | 0.115           |
| 23       | 0.0178          | 6.38            | 0.114           |
| 24       | 0.0177          | 6.34            | 0.112           |
| 25       | 0.0176          | 6.29            | 0.111           |
| 26       | 0.0174          | 6.25            | 0.109           |
| 27       | 0.0173          | 6.21            | 0.107           |
| 28       | 0.0172          | 6.18            | 0.106           |
| 29       | 0.0171          | 6.14            | 0.105           |
| 30       | 0.0170          | 6.11            | 0.104           |

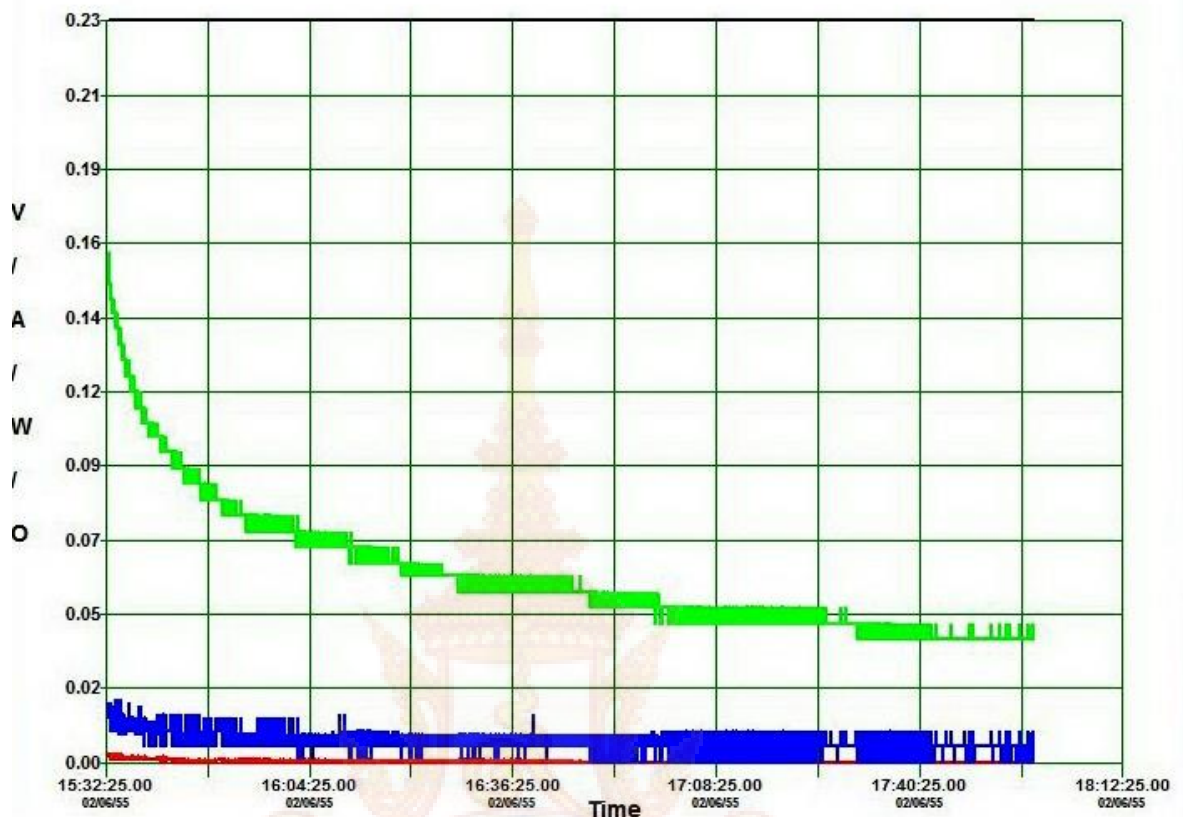
ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อสารละลายเอทานอล มีความเข้มข้นร้อยละ 5



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อสารละลายเอทานอล มีความเข้มข้นร้อยละ 10



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อสารละลายเอทานอล มีความเข้มข้นร้อยละ 15



ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อใช้งานกับโหลดค่าเท่ากันและเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิเท่ากัน พบว่า สารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงกว่าจะให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น กระแสไฟฟ้าเริ่มต้น และกำลังไฟฟ้าเริ่มต้นสูงกว่า แต่การลดลงของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าไม่แตกต่างกัน สารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงจึงส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลดได้นานกว่า

อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 20 เนื่องจากกรดอะซิติกที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นสูงจนอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้ โดยสภาพความเป็นกรดของสารละลายเอทานอลหลังการทำปฏิกิริยาทราบได้จากการวัดค่าพีเอช

#### 4.2 ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิง

##### เอทานอล

การทดลองนี้ใช้สารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15 และความดันทานโหลด 1 โอห์ม

ตารางที่ 4 ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิคงที่ที่  $26^{\circ}\text{C}$

| นาทีที่ | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1       | 0.0462          | 16.53           | 0.764           |
| 2       | 0.0429          | 15.31           | 0.657           |
| 3       | 0.0401          | 14.49           | 0.581           |
| 4       | 0.0385          | 13.93           | 0.536           |
| 5       | 0.0370          | 13.46           | 0.498           |
| 6       | 0.0358          | 13.05           | 0.467           |
| 7       | 0.0348          | 12.71           | 0.442           |
| 8       | 0.0341          | 12.40           | 0.423           |
| 9       | 0.0333          | 12.12           | 0.404           |
| 10      | 0.0327          | 11.86           | 0.388           |
| 11      | 0.0321          | 11.62           | 0.373           |
| 12      | 0.0316          | 11.42           | 0.361           |
| 13      | 0.0311          | 11.25           | 0.350           |
| 14      | 0.0305          | 11.09           | 0.338           |
| 15      | 0.0302          | 10.92           | 0.330           |
| 16      | 0.0293          | 10.77           | 0.316           |
| 17      | 0.0285          | 10.62           | 0.303           |
| 18      | 0.0281          | 10.48           | 0.294           |
| 19      | 0.0276          | 10.34           | 0.285           |
| 20      | 0.0275          | 10.19           | 0.280           |
| 21      | 0.0274          | 10.05           | 0.275           |
| 22      | 0.0274          | 9.92            | 0.272           |
| 23      | 0.0274          | 9.78            | 0.268           |
| 24      | 0.0270          | 9.69            | 0.262           |
| 25      | 0.0268          | 9.60            | 0.257           |
| 26      | 0.0266          | 9.50            | 0.253           |
| 27      | 0.0265          | 9.41            | 0.249           |
| 28      | 0.0265          | 9.31            | 0.247           |
| 29      | 0.0261          | 9.21            | 0.240           |
| 30      | 0.0256          | 9.11            | 0.233           |

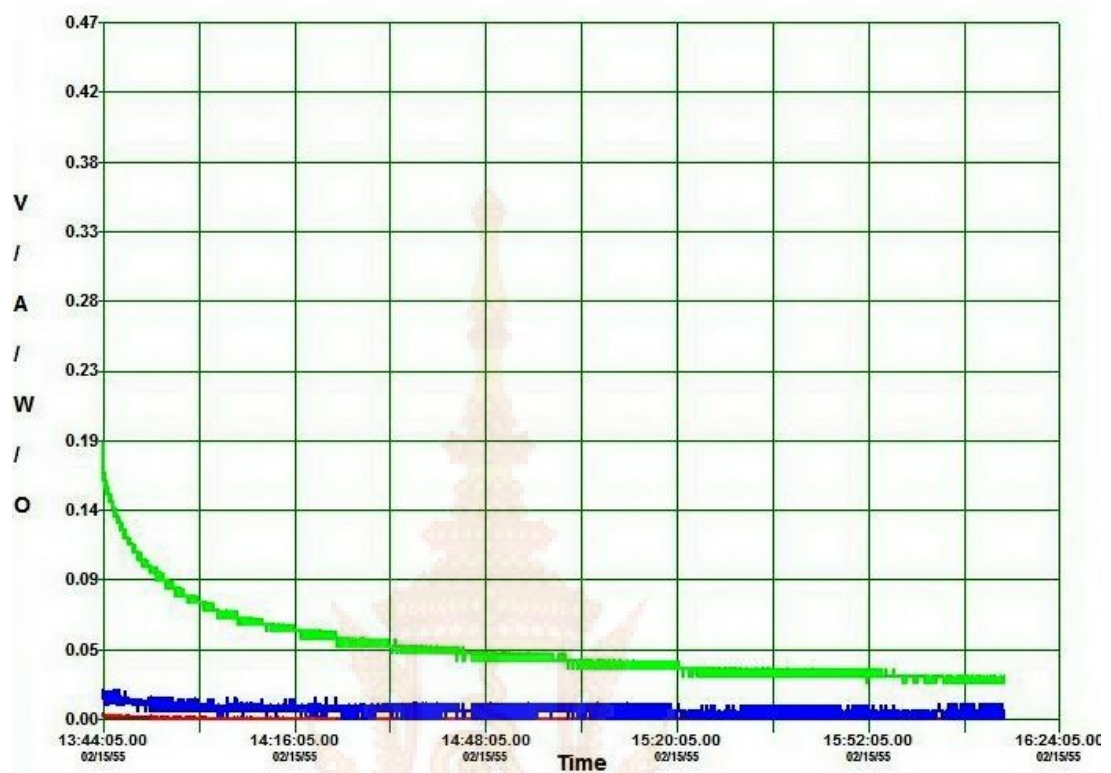
ตารางที่ 5 ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล  
เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิคงที่ที่  $23^{\circ}\text{C}$

| นาฬิกา | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1      | 0.0324          | 11.88           | 0.385           |
| 2      | 0.0316          | 11.59           | 0.366           |
| 3      | 0.0310          | 11.14           | 0.345           |
| 4      | 0.0301          | 11.01           | 0.331           |
| 5      | 0.0293          | 10.68           | 0.313           |
| 6      | 0.0286          | 10.42           | 0.298           |
| 7      | 0.0279          | 10.16           | 0.283           |
| 8      | 0.0273          | 9.92            | 0.271           |
| 9      | 0.0267          | 9.71            | 0.259           |
| 10     | 0.0262          | 9.51            | 0.249           |
| 11     | 0.0257          | 9.33            | 0.240           |
| 12     | 0.0255          | 9.18            | 0.234           |
| 13     | 0.0253          | 9.02            | 0.228           |
| 14     | 0.0251          | 8.88            | 0.223           |
| 15     | 0.0251          | 8.74            | 0.219           |
| 16     | 0.0250          | 8.60            | 0.215           |
| 17     | 0.0250          | 8.50            | 0.212           |
| 18     | 0.0251          | 8.38            | 0.210           |
| 19     | 0.0248          | 8.29            | 0.206           |
| 20     | 0.0248          | 8.18            | 0.203           |
| 21     | 0.0244          | 8.10            | 0.198           |
| 22     | 0.0232          | 8.01            | 0.186           |
| 23     | 0.0230          | 7.92            | 0.182           |
| 24     | 0.0233          | 7.86            | 0.183           |
| 25     | 0.0225          | 7.76            | 0.175           |
| 26     | 0.0224          | 7.70            | 0.172           |
| 27     | 0.0223          | 7.63            | 0.170           |
| 28     | 0.0223          | 7.56            | 0.169           |
| 29     | 0.0217          | 7.49            | 0.162           |
| 30     | 0.0215          | 7.43            | 0.160           |

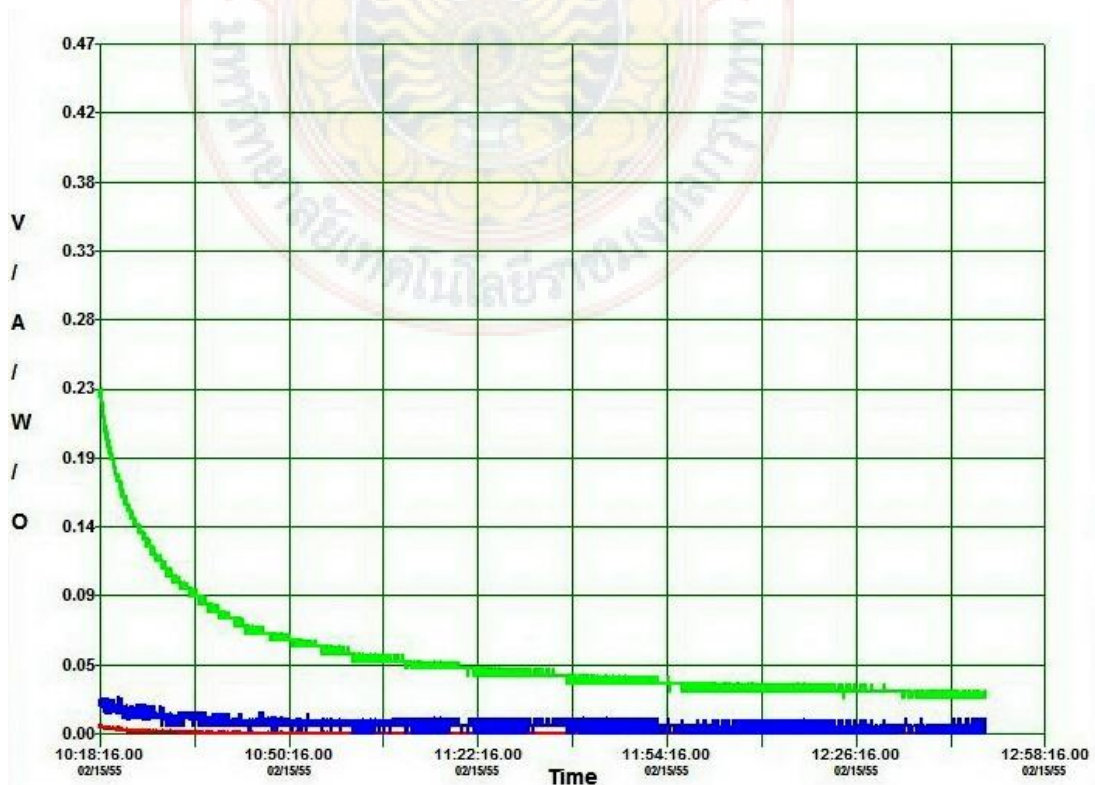
ตารางที่ 6 ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล  
เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิคงที่ที่  $20^{\circ}\text{C}$

| นาฬิกา | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1      | 0.0216          | 8.06            | 0.174           |
| 2      | 0.0209          | 7.80            | 0.163           |
| 3      | 0.0206          | 7.70            | 0.159           |
| 4      | 0.0203          | 7.60            | 0.154           |
| 5      | 0.0201          | 7.52            | 0.151           |
| 6      | 0.0199          | 7.43            | 0.148           |
| 7      | 0.0197          | 7.36            | 0.145           |
| 8      | 0.0194          | 7.27            | 0.141           |
| 9      | 0.0192          | 7.20            | 0.138           |
| 10     | 0.0190          | 7.15            | 0.136           |
| 11     | 0.0188          | 7.07            | 0.133           |
| 12     | 0.0187          | 7.01            | 0.131           |
| 13     | 0.0185          | 6.97            | 0.129           |
| 14     | 0.0184          | 6.92            | 0.127           |
| 15     | 0.0183          | 6.87            | 0.126           |
| 16     | 0.0181          | 6.82            | 0.123           |
| 17     | 0.0179          | 6.75            | 0.121           |
| 18     | 0.0178          | 6.72            | 0.120           |
| 19     | 0.0177          | 6.68            | 0.118           |
| 20     | 0.0176          | 6.63            | 0.117           |
| 21     | 0.0174          | 6.58            | 0.114           |
| 22     | 0.0173          | 6.53            | 0.113           |
| 23     | 0.0172          | 6.50            | 0.112           |
| 24     | 0.0171          | 6.45            | 0.110           |
| 25     | 0.0169          | 6.42            | 0.108           |
| 26     | 0.0169          | 6.38            | 0.108           |
| 27     | 0.0167          | 6.34            | 0.106           |
| 28     | 0.0167          | 6.32            | 0.106           |
| 29     | 0.0166          | 6.29            | 0.104           |
| 30     | 0.0165          | 6.28            | 0.104           |

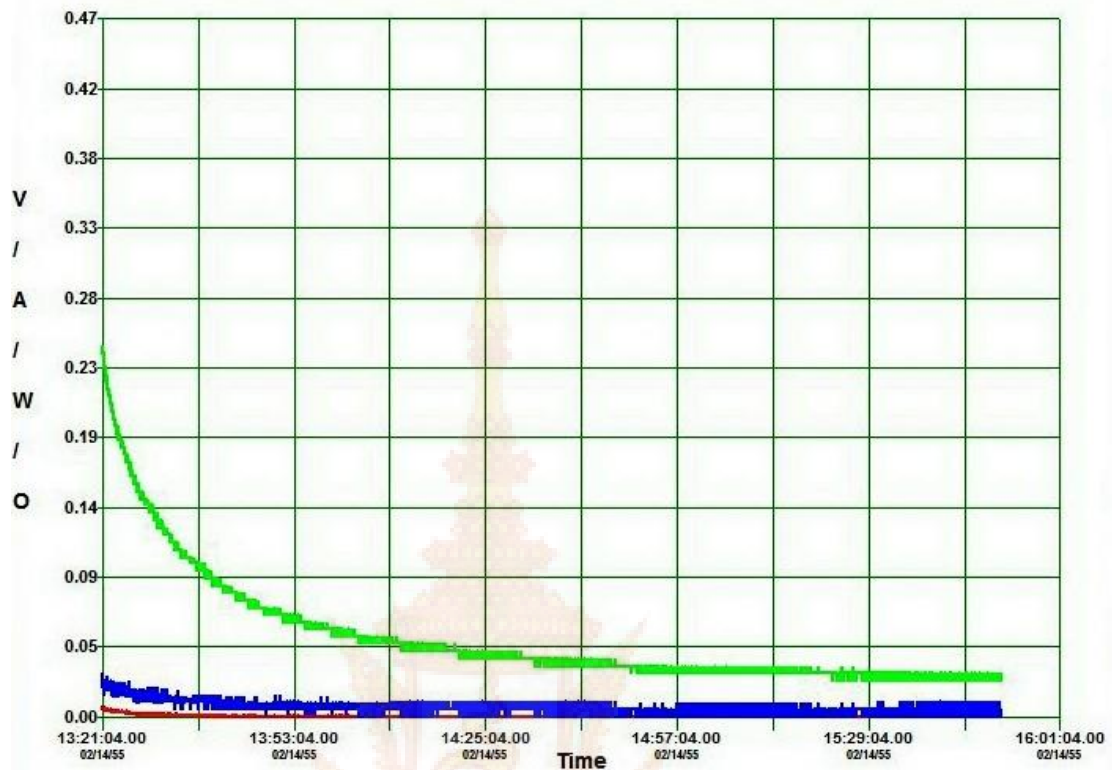
ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่องจาก  $35^{\circ}\text{C}$  ถึง  $23^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงาน อยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่องจาก  $43^{\circ}\text{C}$  ถึง  $24^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่องจาก  $46^{\circ}\text{C}$  ถึง  $24^{\circ}\text{C}$



ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อสารละลายเอทานอลที่ใช้มีความเข้มข้นเท่ากันและใช้งานกับโหลดค่าเท่ากัน พบว่า

(1) เซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น กระแสไฟฟ้าเริ่มต้น และกำลังไฟฟ้าเริ่มต้นจะสูงกว่า แต่การลดลงของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าไม่แตกต่างกัน เซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจึงจ่ายกระแสไฟฟ้าได้นานกว่า

(2) เซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานอยู่ในบริเวณที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นสูงกว่า แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น กระแสไฟฟ้าเริ่มต้น และกำลังไฟฟ้าเริ่มต้นจะสูงกว่า แต่การลดลงของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิลดลงสู่อุณหภูมิสุดท้าย ไม่แตกต่างกัน เซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานอยู่ในบริเวณที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกว้างกว่าจึงจ่ายกระแสไฟฟ้าได้นานกว่า

#### 4.3 ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

การทดลองนี้ใช้สารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15 และเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิ 25°C

ตารางที่ 7 ผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อความต้านทานโหลดมีค่าเป็น 3.9 โอห์ม

| นาที่ที่ | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 0.0573          | 11.72           | 0.672           |
| 2        | 0.0550          | 11.24           | 0.618           |
| 3        | 0.0531          | 10.87           | 0.577           |
| 4        | 0.0515          | 10.54           | 0.543           |
| 5        | 0.0502          | 10.27           | 0.516           |
| 6        | 0.0491          | 10.06           | 0.494           |
| 7        | 0.0482          | 9.87            | 0.476           |
| 8        | 0.0474          | 9.69            | 0.459           |
| 9        | 0.0466          | 9.56            | 0.446           |
| 10       | 0.0460          | 9.41            | 0.433           |
| 11       | 0.0453          | 9.28            | 0.420           |
| 12       | 0.0448          | 9.17            | 0.411           |
| 13       | 0.0443          | 9.06            | 0.401           |
| 14       | 0.0438          | 8.95            | 0.392           |
| 15       | 0.0432          | 8.85            | 0.382           |
| 16       | 0.0428          | 8.77            | 0.375           |
| 17       | 0.0424          | 8.68            | 0.368           |
| 18       | 0.0420          | 8.60            | 0.361           |
| 19       | 0.0416          | 8.52            | 0.354           |
| 20       | 0.0413          | 8.45            | 0.349           |
| 21       | 0.0409          | 8.38            | 0.343           |
| 22       | 0.0405          | 8.30            | 0.336           |
| 23       | 0.0402          | 8.24            | 0.332           |
| 24       | 0.0398          | 8.16            | 0.325           |
| 25       | 0.0395          | 8.10            | .0320           |
| 26       | 0.0392          | 8.02            | 0.314           |
| 27       | 0.0389          | 7.97            | 0.310           |
| 28       | 0.0385          | 7.89            | 0.304           |
| 29       | 0.0382          | 7.83            | 0.299           |
| 30       | 0.0379          | 7.77            | 0.295           |

ตารางที่ 8 ผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล  
เมื่อความต้านทานโหลดมีค่าเป็น 4.7 โอห์ม

| นาฬิกา | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1      | 0.0632          | 11.10           | 0.702           |
| 2      | 0.0607          | 10.67           | 0.648           |
| 3      | 0.0586          | 10.29           | 0.603           |
| 4      | 0.0567          | 9.96            | 0.565           |
| 5      | 0.0552          | 9.68            | 0.534           |
| 6      | 0.0537          | 9.45            | 0.508           |
| 7      | 0.0526          | 9.24            | 0.486           |
| 8      | 0.0515          | 9.06            | 0.467           |
| 9      | 0.0506          | 8.88            | 0.449           |
| 10     | 0.0499          | 8.78            | 0.438           |
| 11     | 0.0490          | 8.61            | 0.422           |
| 12     | 0.0483          | 8.50            | 0.411           |
| 13     | 0.0475          | 8.35            | 0.397           |
| 14     | 0.0466          | 8.20            | 0.382           |
| 15     | 0.0457          | 8.06            | 0.370           |
| 16     | 0.0450          | 7.92            | 0.356           |
| 17     | 0.0443          | 7.79            | 0.345           |
| 18     | 0.0434          | 7.64            | 0.334           |
| 19     | 0.0427          | 7.51            | 0.321           |
| 20     | 0.0421          | 7.40            | 0.312           |
| 21     | 0.0416          | 7.31            | 0.304           |
| 22     | 0.0411          | 7.22            | 0.297           |
| 23     | 0.0405          | 7.13            | 0.289           |
| 24     | 0.0401          | 7.05            | 0.283           |
| 25     | 0.0397          | 6.98            | 0.277           |
| 26     | 0.0394          | 6.93            | 0.273           |
| 27     | 0.0389          | 6.85            | 0.267           |
| 28     | 0.0386          | 6.79            | 0.262           |
| 29     | 0.0382          | 6.73            | 0.257           |
| 30     | 0.0380          | 6.69            | 0.254           |

ตารางที่ 9 ผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล  
เมื่อความต้านทานโหลดมีค่าเป็น 10 โอห์ม

| นาฬิกา | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1      | 0.1064          | 9.643           | 1.025           |
| 2      | 0.1055          | 9.54            | 1.007           |
| 3      | 0.1040          | 9.40            | 0.978           |
| 4      | 0.1023          | 9.25            | 0.946           |
| 5      | 0.1007          | 9.10            | 0.916           |
| 6      | 0.0992          | 8.91            | 0.884           |
| 7      | 0.0998          | 8.85            | 0.866           |
| 8      | 0.0966          | 8.73            | 0.843           |
| 9      | 0.0955          | 8.64            | 0.825           |
| 10     | 0.0946          | 8.56            | 0.810           |
| 11     | 0.0938          | 8.49            | 0.796           |
| 12     | 0.0930          | 8.42            | 0.783           |
| 13     | 0.0923          | 8.35            | 0.771           |
| 14     | 0.0917          | 8.29            | 0.760           |
| 15     | 0.0910          | 8.24            | 0.750           |
| 16     | 0.0905          | 8.19            | 0.741           |
| 17     | 0.0899          | 8.14            | 0.732           |
| 18     | 0.0894          | 8.10            | 0.724           |
| 19     | 0.0890          | 8.06            | 0.717           |
| 20     | 0.0885          | 8.01            | 0.709           |
| 21     | 0.0880          | 7.97            | 0.701           |
| 22     | 0.0876          | 7.93            | 0.695           |
| 23     | 0.0871          | 7.88            | 0.686           |
| 24     | 0.0867          | 7.84            | 0.680           |
| 25     | 0.0863          | 7.81            | 0.674           |
| 26     | 0.0859          | 7.78            | 0.668           |
| 27     | 0.0855          | 7.74            | 0.662           |
| 28     | 0.0851          | 7.70            | 0.660           |
| 29     | 0.0818          | 7.67            | 0.650           |
| 30     | 0.0814          | 7.64            | 0.623           |

ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลของความต้านทานโหลดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้  
เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อสารละลายเอทานอลที่ใช้มีความเข้มข้นเท่ากันร้อยละ 15 เท่ากัน และ

เซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  เท่ากัน พบว่า สำหรับความต้านทานโหลดค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นจะมีค่ามากกว่าแต่กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นจะมีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับความต้านทานโหลดค่าน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม สำหรับความต้านทานโหลดค่ามากกว่า กำลังไฟฟ้าเริ่มต้นมีค่ามากกว่า เมื่อเทียบกับความต้านทานโหลดค่าน้อยกว่า

#### 4.4 ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง

##### ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล

การทดลองนี้ใช้สารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15 และเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 10 ผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อยังไม่เพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง (ครั้งที่ 1)

| นาที่ที่ | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 0.0310          | 12.96           | 0.402           |
| 2        | 0.0310          | 13.00           | 0.403           |
| 3        | 0.0305          | 12.79           | 0.390           |
| 4        | 0.0299          | 12.53           | 0.375           |
| 5        | 0.0292          | 12.28           | 0.359           |
| 6        | 0.0287          | 12.07           | 0.346           |
| 7        | 0.0282          | 11.87           | 0.335           |
| 8        | 0.0278          | 11.69           | 0.325           |
| 9        | 0.0274          | 11.53           | 0.316           |
| 10       | 0.0270          | 11.37           | 0.307           |
| 11       | 0.0267          | 11.25           | 0.300           |
| 12       | 0.0264          | 11.12           | 0.294           |
| 13       | 0.0261          | 11.01           | 0.287           |
| 14       | 0.0257          | 10.87           | 0.279           |
| 15       | 0.0254          | 10.79           | 0.274           |
| 16       | 0.0252          | 10.67           | 0.269           |
| 17       | 0.0250          | 10.60           | 0.265           |
| 18       | 0.0248          | 10.51           | 0.261           |
| 19       | 0.0245          | 10.42           | 0.255           |
| 20       | 0.0243          | 10.33           | 0.251           |
| 21       | 0.0241          | 10.26           | 0.247           |

|    |        |       |       |
|----|--------|-------|-------|
| 22 | 0.240  | 10.19 | 0.245 |
| 23 | 0.0238 | 10.10 | 0.240 |
| 24 | 0.0234 | 9.96  | 0.233 |
| 25 | 0.0233 | 9.90  | 0.231 |
| 26 | 0.0231 | 9.83  | 0.227 |
| 27 | 0.0229 | 9.77  | 0.224 |
| 28 | 0.0228 | 9.71  | 0.221 |
| 29 | 0.0228 | 9.70  | 0.221 |
| 30 | 0.0227 | 9.65  | 0.219 |

ตารางที่ 11 ผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อมีการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง (ครั้งที่ 1)

| นาที่ที่ | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 0.0266          | 12.12           | 0.322           |
| 2        | 0.0264          | 12.04           | 0.318           |
| 3        | 0.0259          | 11.80           | 0.306           |
| 4        | 0.0253          | 11.54           | 0.292           |
| 5        | 0.0247          | 11.31           | 0.279           |
| 6        | 0.0242          | 11.06           | 0.268           |
| 7        | 0.0238          | 10.90           | 0.259           |
| 8        | 0.0235          | 10.73           | 0.252           |
| 9        | 0.0231          | 10.58           | 0.244           |
| 10       | 0.0228          | 10.44           | 0.238           |
| 11       | 0.0225          | 10.31           | 0.232           |
| 12       | 0.0223          | 10.19           | 0.227           |
| 13       | 0.0220          | 10.09           | 0.222           |
| 14       | 0.0218          | 10.00           | 0.218           |
| 15       | 0.0216          | 9.91            | 0.214           |
| 16       | 0.0214          | 9.82            | 0.210           |
| 17       | 0.0212          | 9.74            | 0.206           |
| 18       | 0.0211          | 9.65            | 0.204           |
| 19       | 0.0209          | 9.58            | 0.200           |
| 20       | 0.0207          | 9.51            | 0.197           |
| 21       | 0.0206          | 9.44            | 0.194           |
| 22       | 0.0204          | 9.37            | 0.191           |

|    |        |      |       |
|----|--------|------|-------|
| 23 | 0.0203 | 9.32 | 0.189 |
| 24 | 0.0202 | 9.25 | 0.187 |
| 25 | 0.0200 | 9.19 | 0.184 |
| 26 | 0.0199 | 9.13 | 0.182 |
| 27 | 0.0198 | 9.07 | 0.180 |
| 28 | 0.0196 | 9.01 | 0.177 |
| 29 | 0.0195 | 8.96 | 0.175 |
| 30 | 0.0194 | 8.91 | 0.173 |

**ตารางที่ 12 ผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อยังไม่เพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง (ครั้งที่ 2)**

| นาที่ที่ | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 0.0317          | 13.69           | 0.434           |
| 2        | 0.0312          | 13.38           | 0.417           |
| 3        | 0.0304          | 13.01           | 0.396           |
| 4        | 0.0295          | 12.66           | 0.373           |
| 5        | 0.0288          | 12.36           | 0.356           |
| 6        | 0.0280          | 12.09           | 0.338           |
| 7        | 0.0274          | 11.86           | 0.325           |
| 8        | 0.0268          | 11.66           | 0.312           |
| 9        | 0.0264          | 11.48           | 0.303           |
| 10       | 0.0260          | 11.31           | 0.294           |
| 11       | 0.0257          | 11.17           | 0.287           |
| 12       | 0.0253          | 11.03           | 0.279           |
| 13       | 0.0250          | 10.91           | 0.273           |
| 14       | 0.0247          | 10.79           | 0.266           |
| 15       | 0.0245          | 10.69           | 0.262           |
| 16       | 0.0241          | 10.58           | 0.255           |
| 17       | 0.0239          | 10.48           | 0.250           |
| 18       | 0.0237          | 10.40           | 0.246           |
| 19       | 0.0235          | 10.32           | 0.242           |
| 20       | 0.0233          | 10.23           | 0.238           |
| 21       | 0.0231          | 10.14           | 0.234           |
| 22       | 0.0229          | 10.06           | 0.230           |
| 23       | 0.0226          | 9.99            | 0.226           |

|    |        |      |       |
|----|--------|------|-------|
| 24 | 0.0225 | 9.92 | 0.223 |
| 25 | 0.0223 | 9.86 | 0.220 |
| 26 | 0.0221 | 9.78 | 0.216 |
| 27 | 0.0221 | 9.72 | 0.215 |
| 28 | 0.0219 | 9.65 | 0.211 |
| 29 | 0.0217 | 9.60 | 0.208 |
| 30 | 0.0216 | 9.53 | 0.206 |

ตารางที่ 13 ผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อมีการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง (ครั้งที่ 2)

| นาที่ที่ | แรงดันไฟฟ้า (V) | กระแสไฟฟ้า (mA) | กำลังไฟฟ้า (mW) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 0.0298          | 12.81           | 0.382           |
| 2        | 0.0285          | 12.28           | 0.350           |
| 3        | 0.0274          | 11.83           | 0.324           |
| 4        | 0.0265          | 11.45           | 0.303           |
| 5        | 0.0257          | 11.14           | 0.286           |
| 6        | 0.0251          | 10.86           | 0.272           |
| 7        | 0.0245          | 10.62           | 0.260           |
| 8        | 0.0241          | 10.41           | 0.251           |
| 9        | 0.0237          | 10.24           | 0.243           |
| 10       | 0.0233          | 10.08           | 0.235           |
| 11       | 0.0230          | 9.94            | 0.229           |
| 12       | 0.0229          | 9.83            | 0.225           |
| 13       | 0.0223          | 9.71            | 0.216           |
| 14       | 0.0220          | 9.60            | 0.211           |
| 15       | 0.0219          | 9.51            | 0.208           |
| 16       | 0.0219          | 9.42            | 0.206           |
| 17       | 0.0215          | 9.35            | 0.201           |
| 18       | 0.0213          | 9.27            | 0.197           |
| 19       | 0.0211          | 9.19            | 0.194           |
| 20       | 0.0209          | 9.12            | 0.191           |
| 21       | 0.0209          | 9.05            | 0.189           |
| 22       | 0.0210          | 8.97            | 0.188           |
| 23       | 0.0211          | 8.91            | 0.188           |
| 24       | 0.0210          | 8.84            | 0.186           |

|    |        |      |       |
|----|--------|------|-------|
| 25 | 0.0207 | 8.79 | 0.182 |
| 26 | 0.0206 | 8.72 | 0.180 |
| 27 | 0.0207 | 8.65 | 0.179 |
| 28 | 0.0206 | 8.58 | 0.177 |
| 29 | 0.0204 | 8.53 | 0.174 |
| 30 | 0.0203 | 8.47 | 0.172 |

ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เมื่อสารละลายเอทานอลที่ใช้มีความเข้มข้นเท่ากันร้อยละ 15 เท่ากัน และเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิเท่ากัน พบว่า เมื่อเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น กระแสไฟฟ้าเริ่มต้น และกำลังไฟฟ้าเริ่มต้น ต่างกันเพียงเล็กน้อย (มีค่าลดลง) เมื่อเทียบกับตอนที่ยังไม่เพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิง การลดลงของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ก็ไม่ต่างกัน การเพิ่มการไหลเวียนของอากาศผ่านเซลล์เชื้อเพลิงจึงไม่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

- ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอลอย่างมีนัยสำคัญคือ ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลและอุณหภูมิของบริเวณที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน ขณะที่ผลของการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศในบริเวณที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน ไม่มีนัยสำคัญต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เชื้อเพลิงเอทานอล ส่วนความต้านทานไหลจะมีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายออกมา

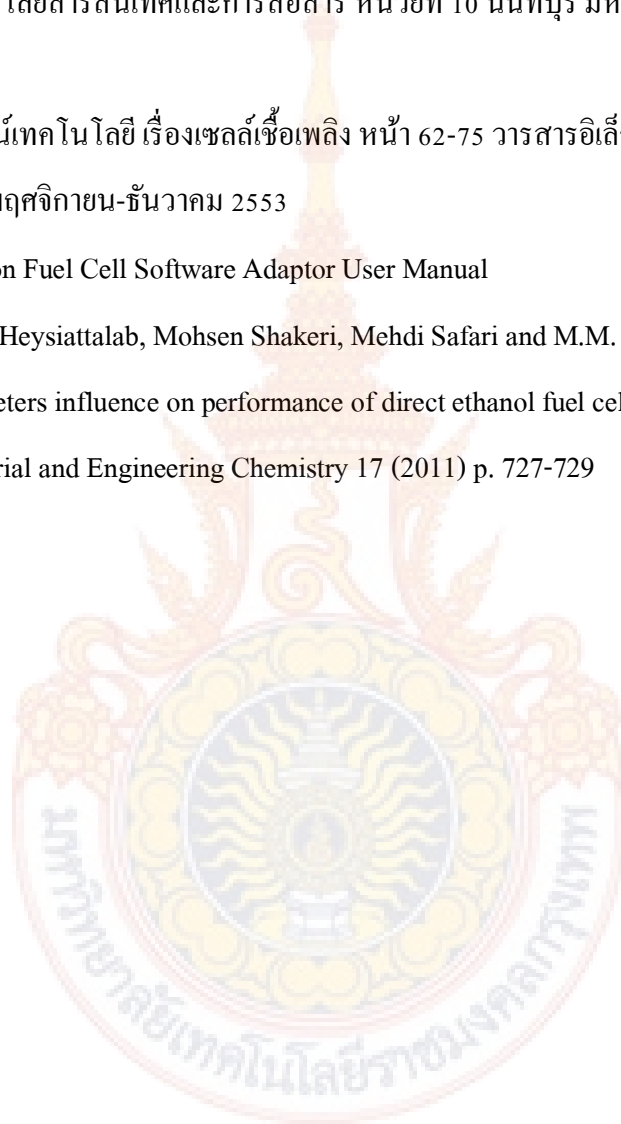
- งานวิจัยนี้ไม่สามารถหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงได้ เนื่องจากไม่ทราบอัตราการใช้ไฮโดรเจนของเซลล์เชื้อเพลิง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรขยายผลการวิจัยไปสู่สแตกของเซลล์เชื้อเพลิง (การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อรวมกันหลายๆ เซลล์)
- ควรหาทางนำกรดอะซิติกที่เกิดขึ้นในสารละลายเอทานอลหลังการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์

### บรรณานุกรม

1. ทวีศักดิ์ จินดานุรักษ์ เทคโนโลยีพลังงาน ในเอกสารการสอนชุดวิชาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมเพื่อชีวิต ฉบับปรับปรุง ครั้งที่ 2 พิมพ์ครั้งที่ 1 หน่วยที่ 8 นนทบุรี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช 2547
2. สุชาติ แซ่เฮ่ง ไฟฟ้าและแม่เหล็ก ในเอกสารการสอนชุดวิชาวิทยาศาสตร์สำหรับเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร หน่วยที่ 10 นนทบุรี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช 2555
3. คอลัมน์เทคโนโลยี เรื่องเซลล์เชื้อเพลิง หน้า 62-75 วารสารอิเล็กทรอนิกส์ ปีที่ 9 ฉบับที่ 172 เดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม 2553
4. Horizon Fuel Cell Software Adaptor User Manual
5. Saeed Heysiattalab, Mohsen Shakeri, Mehdi Safari and M.M. Keikha. Investigation of Key parameters influence on performance of direct ethanol fuel cell (DEFC) Journal of Industrial and Engineering Chemistry 17 (2011) p. 727-729



ภาคผนวก





## ประวัติของผู้วิจัย

1. ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) นายสุชาติ แซ่เฮ่ง  
ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Suchart Sae-Heng
2. หมายเลขบัตรประชาชน 390 98001730303
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ข้าราชการบำนาญ
4. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้สะดวก  
ที่อยู่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
สาขาฟิสิกส์  
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120  
หมายเลขโทรศัพท์ 02-2833991-5 ต่อ 1194  
โทรสาร 02-8604486  
e-mail suchart.heng99@gmail.com
5. ประวัติการศึกษา  
พ.ศ. 2522 กศ.บ.(ฟิสิกส์)  
มหาวิทยาลัยทักษิณ (ชื่อเดิม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สงขลา)  
พ.ศ. 2531 วท.ม.(ฟิสิกส์)  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. สาขาที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ เขียนตำราวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำงานวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย -
  - 7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนวิจัย -
  - 7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย -
  - 7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานการวิจัย การพัฒนาการทดลองเรื่องการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา
  - 7.4 งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพในการทำวิจัยว่าได้ทำการวิจัยคล่องแล้วประมาณร้อยละเท่าไร