

# การวัดน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงแลกเปลี่ยนโปรตอน

## Water measurement in PEM fuel cells

ปริยาภัทร์ แววดี สุนันท์ ลี้มตระกูล และ เทอดไทย วัฒนธรรม

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ 10900

Email : charinee\_tik@hotmail.com, fengsul@ku.ac.th, terdthai.v@ku.ac.th

### บทคัดย่อ

ในเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ปริมาณน้ำภายในเซลล์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์ หากมีปริมาณน้ำไม่เหมาะสมจะทำให้สมรรถนะของเซลล์ต่ำลง งานวิจัยนี้จึงได้วัดปริมาณน้ำทั้งด้านแคโทดและแอโนดที่เกิดขึ้นจากเซลล์ที่อุณหภูมิความชื้นต่างกัน (80 และ 95 °C) วิเคราะห์และเปรียบเทียบกับสมรรถนะของเซลล์ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำด้านแคโทดมากกว่าปริมาณน้ำด้านแอโนดที่ทุกอุณหภูมิความชื้น เนื่องจากน้ำเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทางด้านแคโทด เมื่อเปรียบเทียบน้ำและสมรรถนะของเซลล์ที่อุณหภูมิความชื้นต่างกัน พบว่า ที่อุณหภูมิความชื้น 95 °C มีปริมาณน้ำมากกว่าทั้งด้านแอโนดและแคโทด แต่มีสมรรถนะน้อยกว่าเซลล์ที่อุณหภูมิความชื้น 80 °C เนื่องจากที่อุณหภูมิความชื้นสูง เกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำ ส่งผลให้เกิดการอุดตันชั้นรูพรุนของชั้นแพร่ก๊าซ สมรรถนะของเซลล์จึงต่ำกว่า ดังนั้น การแก้ปัญหา น้ำท่วมโดยใช้ช่องการไหลเอียงลงเพื่อดักน้ำออกจากเซลล์ ไม่ช่วยให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น เนื่องจากเมมเบรนแห้งเกินไปจึงทำให้การนำโปรตอนของเมมเบรนไม่ดี สมรรถนะจึงต่ำกว่า

### คำสำคัญ

เซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรน เมมเบรนแห้ง สมรรถนะของเซลล์

### Abstract

In a PEM fuel cell, the cell humidity is an important factor affecting cell performance. This work studied the effect of humidifier temperature (80 and 95 °C) on the cell performance and water occurrence. The results showed the water flowing out from the cathode side was more than that of anode side for both humidifier temperatures due to water occurrence from electrochemical reaction. Comparisons of the water flowing out and the cell performance of the cell operated with different humidifier temperatures presented that at the humidifier temperature of 95 °C, the amount of water flowing out was higher for both cathode and anode side. But the

cell performance was lower because at higher humidifier temperature, condensation occurred leading to gas diffusion layer plugging. Thus, the cell performance was lower. Using a down-slanted channel at the cathode side could not improve cell performance due to membrane dehydration.

### Keywords

proton exchange membrane fuel cell, dehydration, cell performance

#### 1. บทนำ

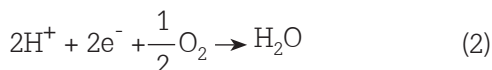
เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่ให้กำเนิดไฟฟ้าด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เชื้อเพลิงที่นิยมใช้ป้อนคือก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยมีผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเซลล์คือ กระแสไฟฟ้า น้ำ และความร้อน เซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่หลายชนิดซึ่งเดินเครื่องที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ตั้งแต่ 60-1,000 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งานและแบ่งตามชนิดของอิเล็กโทรไลต์ แต่ที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาเป็นอย่างมากคือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิที่ใช้งานอยู่ระหว่าง 60 - 90 องศาเซลเซียส [1] มีความสะดวกเดินเครื่องได้โดยง่ายและใช้เวลาในการเดินเครื่องน้อย [2-3] เหมาะในการนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ในชีวิตประจำวัน

กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเกิดได้ดังนี้ ก๊าซเชื้อเพลิงซึ่งได้แก่อไฮโดรเจนเมื่อถูกป้อนเข้ามาทางด้านแอโนดจะสัมผัสกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) แตกตัวให้โปรตอน ( $H^+$ ) และอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) ออกมา โดยโปรตอนจะแพร่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นแผ่นพอลิเมอร์เมมเบรนไปยังด้านแคโทด และอิเล็กตรอนวิ่งผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกเพื่อไปยังขั้วแคโทด เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า ในขณะที่ตัวออกซิแดนท์ (Oxidant) คือก๊าซออกซิเจนจะถูกป้อนเข้ามาทางด้านแคโทด รวมตัวกับโปรตอนและอิเล็กตรอน

เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ได้น้ำและความร้อน โดยมีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องดังสมการ (1)-(3) ปฏิกิริยาด้านแอโนด



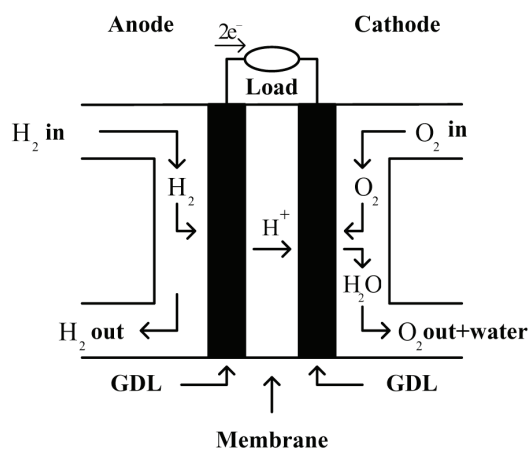
ปฏิกิริยาด้านแคโทด



ปฏิกิริยารวม



การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะประกอบไปด้วยอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นแผ่นพอลิเมอร์ของแข็งเคลือบด้วยชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (Catalyst layer) และประกบด้วยชั้นแพร่ก๊าซ (gas diffusion

layer, GDL) รวมเรียกว่า ส่วนประกอบเมมเบรนอิเล็กโทรด (Membrane electrode assembly, MEA) ถัดไปประกอบด้วยช่องทางไหล (Flow field) ของก๊าซ แผ่นรวมกระแส (Current collector plate) และแผ่นประกบริม (End plate) และอัดส่วนประกอบต่างๆ เข้าด้วยกันด้วยการหมุนยึดด้วยน็อต

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายโอนโปรตอน ก๊าซเชื้อเพลิงจำเป็นต้องมีความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพื่อให้กระบวนการนำโปรตอนผ่านเมมเบรนมีประสิทธิภาพดีที่สุด น้ำที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงมาจาก 2 สาเหตุ คือ น้ำที่ได้รับจากอุปกรณ์ให้ความชื้น (Humidifier) เนื่องจากก๊าซได้รับความชื้นจากอุปกรณ์ให้ความชื้น ทำให้ก๊าซที่เข้ามาทำปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ในรูปของก๊าซเปียก โดยปริมาณน้ำที่ได้จากอุปกรณ์ให้ความชื้นนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ป้อนเข้าอุปกรณ์ให้ความชื้น ความชื้นจะมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความชื้นสูงขึ้น และอีกสาเหตุหนึ่งคือน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วแคโทด โดยปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้จะขึ้นกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) ที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตออกมา น้ำที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปตามช่องทางเดินก๊าซ และถูกกำจัดออกจากเซลล์ไปพร้อมกับก๊าซขาออก ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นควรถูกกำจัดออกไปได้เหมาะสม หากเซลล์มีปริมาณน้ำค้างอยู่มากเกินไปจะทำให้เกิดการท่วมภายในรูปทรงของชั้นแพร่ก๊าซ ส่งผลให้เกิดการกีดขวางของก๊าซที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยา ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง เพราะมีการสูญเสียการถ่ายโอนมวล (Mass transport losses) [4] แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณน้ำน้อยเกินไป เมมเบรนของเซลล์เชื้อเพลิงจะแห้ง ทำให้การนำโปรตอนผ่านเมมเบรนได้ยากขึ้น

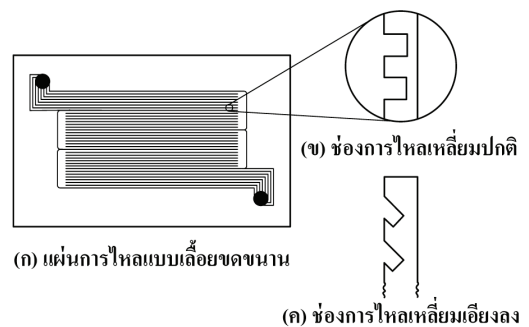
มีงานวิจัยที่ศึกษาประเด็นในเรื่องพฤติกรรมของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงกันอย่างกว้างขวาง การถ่ายโอนน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงค่อนข้างยากที่จะจินตนาการ อย่างไรก็ตามได้มีการพยายามที่จะทำให้เห็นภาพการ

ถ่ายโอนน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง เช่น มีนักวิจัยได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบใส เพื่อที่จะมองเห็นการกระจายตัวของน้ำและน้ำท่วมภายในช่องทางไหลของก๊าซด้านแคโทด [5]

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการเกิดน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่อุณหภูมิความชื้นต่างกัน โดยการวัดปริมาณน้ำขาออกทั้งด้านแคโทด และด้านแอโนด วิเคราะห์ และเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การศึกษากลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิความชื้นต่างกันใน ทำโดยการวัดปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากขาออกของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งด้านแคโทด และแอโนด เปรียบเทียบกับสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้ได้เดินเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 150 ตารางเซนติเมตร จำนวน 1 เซลล์ ใช้แผ่นการไหลแบบเลื้อยขดขนาน (Serpentine flow channel) ที่มีช่องการไหล 5 ช่องหลัก ในแต่ละช่องหลักแบ่งเป็น 7 ช่องย่อย ดังแสดงในภาพที่ 2(ก) โดยแผ่นการไหลมีช่องการไหลเหลี่ยมปกติที่ใช้กันทั่วไป ดังแสดงในภาพที่ 2 (ข)

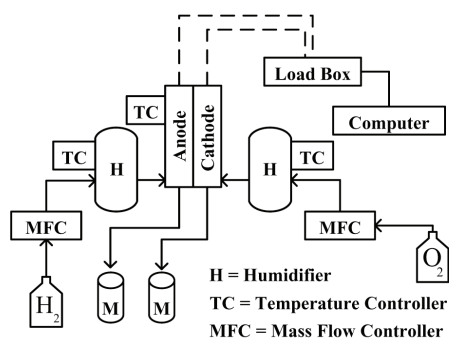


ภาพที่ 2 (ก) รูปแบบแผ่นการไหล

(ข) ภาพขยายตัดขวางของช่องการไหลเหลี่ยมปกติ

(ค) ภาพขยายตัดขวางของช่องการไหลเอียงลง

การเตรียมเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ทำได้โดยเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรน (Nafion 112, Dupont) ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนคาร์บอนแบลค (40 % Pt/C, Alfa Aesar) ทั้งด้านแคโทดและแอโนด ด้วยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ประกอบด้วยชั้นแพร่ก๊าซ (10 BA, SGL) จากนั้นประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังกล่าวมาในหัวข้อที่ผ่านมา เซลล์เชื้อเพลิงต่อเข้ากับระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ควบคุมโหลดไฟฟ้า และวัดค่าทางไฟฟ้า (Load box, Scribner 890 L) แสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์พีซี มีการป้อนก๊าซเชื้อเพลิงผ่านอุปกรณ์ให้ความชื้น (Humidifier) ที่ติดตั้งภายนอกเซลล์ ความชื้นจะควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) อัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงควบคุมโดยอุปกรณ์ควบคุมและวัดอัตราไหล (Mass flow controller, MKS) ซึ่งติดตั้งก่อนเข้าสู่เซลล์ให้ความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 3



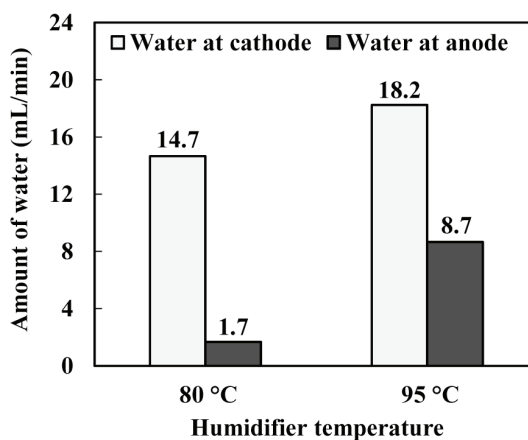
ภาพที่ 3 ระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

การศึกษานี้เดินระบบภายใต้ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิเซลล์คงที่ที่ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิความชื้นทั้งด้านแอโนดและแคโทด มีสองระดับคือ 80 และ 95 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวัดเมื่อระบบมีความต่างศักย์ 0.7 โวลต์ และวัดปริมาณน้ำขาออกจากเซลล์เชื้อเพลิงทั้งด้านแอโนดและแคโทด

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 3.1 ปริมาณน้ำด้านแคโทดและแอโนด

เปรียบเทียบปริมาณน้ำด้านแคโทดและแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงพบว่า ปริมาณน้ำด้านแคโทดมีมากกว่าปริมาณน้ำด้านแอโนดที่สภาวะอุณหภูมิความชื้นทั้งสอง เนื่องจากน้ำด้านแคโทดเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและความชื้นที่ป้อนเข้ามาจากอุปกรณ์ให้ความชื้น แต่ น้ำด้านแอโนดเกิดจากความชื้นที่ป้อนเข้ามาจากอุปกรณ์ให้ความชื้นเพียงอย่างเดียว ปริมาณน้ำด้านแคโทดจึงมีมากกว่า 2.1 ถึง 8.6 เท่าตัว ดังแสดงผลในภาพที่ 4

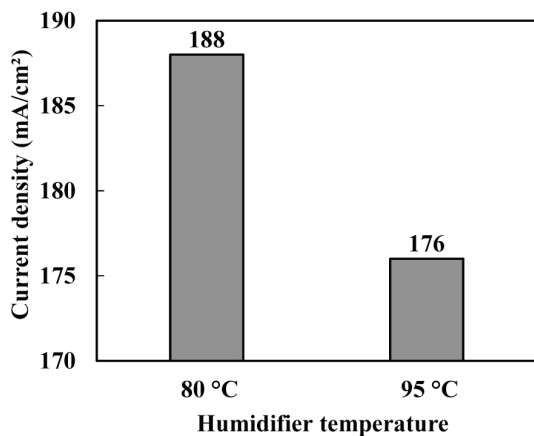


ภาพที่ 4 ปริมาณน้ำด้านแคโทดและแอโนด

#### 3.2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

จากภาพที่ 4 เปรียบเทียบปริมาณน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิความชื้นต่างกัน พบว่า ที่อุณหภูมิความชื้น 95 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิความชื้น 80 องศาเซลเซียส ทั้งด้านแคโทดและแอโนด เนื่องจากความชื้นปริมาณมากจากอุปกรณ์ให้ความชื้นที่มีอุณหภูมิสูงๆ เมื่อเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะทำให้เกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำ ทำให้มีปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นมากกว่าเซลล์ที่มีอุณหภูมิความชื้นต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าเซลล์เชื้อเพลิง

ที่มีอุณหภูมิความชื้น 95 องศาเซลเซียส ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าน้อยกว่า เนื่องจากปริมาณน้ำที่เกิดจากการควบแน่นมีมากกว่า จึงเข้าไปอุดตันในรูพรุนของชั้นแพร่ก๊าซ เกิดการกีดขวางการแพร่ของก๊าซเชื้อเพลิงเข้าไปทำปฏิกิริยาในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเกิดลดลง ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีน้อยกว่า ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

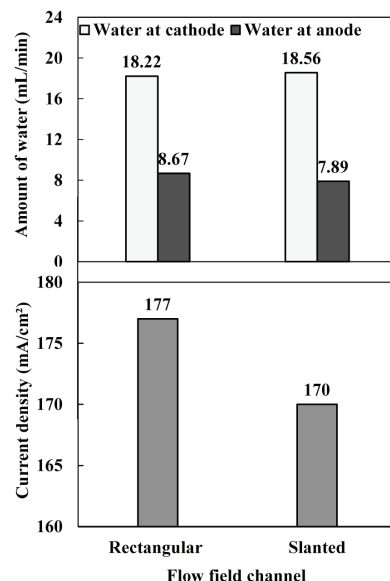
### 3.3 ผลการใช้แผ่นการไหลที่มีช่องการไหลเอียงลง

ปริมาณน้ำที่อุณหภูมิความชื้น 95 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดน้ำปริมาณมากโดยเฉพาะด้านแคโทดส่งผลให้เกิดน้ำท่วมเซลล์ ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ในงานวิจัยนี้จึงออกแบบช่องการไหลเอียงลงด้านแคโทด เพื่อดักกักน้ำที่มากเกินไปออกจากเซลล์ ดังแสดงในภาพที่ 2 (ค) จากการเปรียบเทียบปริมาณน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องการไหลเหลี่ยมมุมฉากปกติที่ใช้ทั่วไปกับเซลล์เชื้อเพลิงที่ปรับให้มีช่องการไหลเอียงลงที่อุณหภูมิความชื้น 95 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณน้ำที่ออกด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องการไหลเอียงลงมีค่ามากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องการไหลเหลี่ยมมุมฉาก ดังแสดงในภาพที่ 6 เนื่องจากลักษณะช่องการไหลเอียงลงช่วยผลักดันให้น้ำตกอยู่ที่ด้านล่างของช่องการไหล และกักออกจากเซลล์พร้อมก๊าซออกได้จริง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนา

แน่นกระแสไฟฟ้า พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องการไหลเอียงลงมีสมรรถนะต่ำกว่าดังแสดงในภาพที่ 6 เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องการไหลเอียงลงทำให้น้ำออกจากเซลล์เชื้อเพลิงมากกว่าน้ำที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงมากเกินไป มีผลให้เมมเบรนแห้ง เป็นเหตุให้การนำโปรตอนของเมมเบรนไม่ดี เกิดการต้านทานไฟฟ้า สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจึงต่ำลง จึงเห็นได้ว่าการกักน้ำส่วนเกินโดยมีช่องการไหลเอียงลงไม่ช่วยทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น การใช้ช่องการไหลเหลี่ยมมุมฉากปกติก็เพียงพอ และให้ผลดีกว่า ดังนั้นการเดินเซลล์เชื้อเพลิงควรจะเลือกสภาวะที่มีปริมาณน้ำในเซลล์เหมาะสมเพื่อให้เมมเบรนมีความชื้นเหมาะสมต่อการนำโปรตอนแต่ไม่ควรมีมากเกินไป เพราะจะทำให้ชั้นการแพร่ของก๊าซเกิดการอุดตัน

## 4. สรุปผลการทดลอง

การวัดปริมาณน้ำและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิความชื้นต่างกัน สรุปได้ว่า ปริมาณน้ำด้านแคโทด



ภาพที่ 6 ปริมาณน้ำและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

มากกว่าด้านแอโนดในทุกอุณหภูมิความชื้น เนื่องจากเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของด้านแคโทด เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำและสมรรถนะของเซลล์ พบว่า ปริมาณน้ำที่อุณหภูมิความชื้น 95 องศาเซลเซียส มีมากกว่าทั้งด้านแอโนดและแคโทด แต่มีสมรรถนะต่ำกว่าเซลล์เชื้อเพลิง ที่อุณหภูมิความชื้น 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิความชื้นสูงเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำ ส่งผลให้เกิดการอุดตันชั้นรูพรุนของชั้นแพร่ก๊าซ สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจึงต่ำกว่า

เมื่อประยุกต์ใช้แผนการไหลที่มีช่องการไหลเอียงลงในด้านแคโทดเพื่อแก้ปัญหา น้ำท่วมเซลล์ พบว่า สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงแห้งเกินไป การนำโปรตอนของเมมเบรนจึงไม่ดี สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจึงน้อยกว่าเซลล์ที่ใช้แผนการไหลที่มีช่องการไหลมุมฉากตามปกติ ดังนั้น การประยุกต์ใช้ช่องการไหลเอียงลงเช่นนี้ไม่สามารถช่วยปรับปรุงสมรรถนะได้ การเดินเซลล์ควรเลือกสภาวะที่ทำให้มีปริมาณน้ำในเซลล์เหมาะสม เพื่อให้เมมเบรนมีความชื้นเหมาะสมต่อการนำโปรตอน แต่ไม่ควรมีมากเกินไปทำให้เกิดการอุดตันต่อการแพร่ของก๊าซ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้สนับสนุนทุนวิจัย ได้แก่ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และศูนย์ความเป็นเลิศด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Guvelioglu G.H and Stenger H.G. 2007. Flow rate and humidification effects on a PEM fuel cell performance and operation. Journal of Power Sources. 163: 882-91.
- [2] Hu M., Sui S., Zhu X., Yu Q., Cao G., Hong X. and Tu H. 2006. A 10 kW class PEM fuel cell stack based on the catalyst-coated membrane (CCM) method. Inter Journal of Hydrogen Energy. 31: 1010-8.
- [3] Hental P.L., Lakeman J.B., Mepsted G.O., Adcock P.L. and Moore J.M. 1999. New materials for polymer electrolyte membrane fuel cell current collectors. Journal of Power Sources. 80: 235-41.
- [4] Su A., Weng F.-B., Hsu C.-Y. and Chen Y.-M. 2006. Studies on flooding in PEM fuel cell cathode channels. International Journal of Hydrogen Energy. 31: 1031-1039.
- [5] Weng F.B., Su A., Hsu C.Y. and Lee C.Y. 2006. Study of water flooding behaviors in cathode channel of a transport proton- exchange membrane fuel cell. Journal of Power Sources. 157: 674-680.