

# การทดสอบระบบทำความชื้นแบบนาฟเพียนเมมเบรนกับห่อเซลล์เชื้อเพลิง แบบเพิ่มขนาด 300 วัตต์

## Test of a Nafion Membrane Humidifier with a 300-W Stack PEMFC

วิภาวดี วงษ์สุวรรณ<sup>1</sup> และ นฤฤทธิ์ หล่อประดิษฐ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานขั้นสูง (Research Center for Advanced Energy Technology)

1771/1 ถ.พัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

wipawadee.w@gmail.com

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

### บทคัดย่อ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) เข้ากันได้ดีกับรถยนต์ไฮโดรเจน สิ่งสำคัญประการหนึ่ง คือ การจัดการความชื้นของก๊าซเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่องควบคุมความชื้น งานวิจัยนี้ได้ทดสอบระบบควบคุมความชื้นแบบนาฟเพียนเมมเบรน (Nafion Membrane Humidifier : NMH) สำหรับห่อเซลล์ PEMFC ขนาด 300 วัตต์ ผลการทดสอบแสดงว่าที่อุณหภูมิที่นำก๊าซไฮโดรเจน 80 °C กำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ 212.4 วัตต์ เมื่อแปรผันอุณหภูมิที่นำก๊าซเป็น 60, 70 และ 80 °C ตามลำดับ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ในกระแสก๊าซไฮโดรเจนที่ได้เป็น 30.9%, 28.0% และ 32.6% ตามลำดับ และค่า %RH ของก๊าซออกซิเจนเป็น 17.0%, 13.2% และ 10.0% ตามลำดับ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้เป็น 193.68, 193.44 และ 212.4 วัตต์ ตามลำดับ ทางด้านการศึกษาเชิงทฤษฎีนั้นแบบจำลองเครื่องทำความชื้นเมื่อทำงานร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์ของกระแสที่ทางออก NMH และกำลังไฟฟ้าที่ได้ของ PEMFC ในระดับความแม่นยำที่ยอมรับได้

คำสำคัญ: เซลล์เชื้อเพลิง, PEMFC, การควบคุมความชื้น, เครื่องทำความชื้นแบบนาฟเพียนเมมเบรน

### Abstract

A Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) is compatible to the hydrogen-automobile. One important issue is fuel gas humidifying by using a humidifier. This research focuses on a Nafion Membrane Humidifier (NMH) to humidify a 300 W- stack PEMFC. The experimental results showed that at the temperature of hydrogen tube about 80° C, the maximum generated power was 212.4 W. If the tube temperature was varied by 60, 70 and 80° C, the resulted relative humidity (%RH) of hydrogen was 30.9%, 28.0% and

32.6%, respectively. Also, %RH of oxygen was 17.0%, 13.2% and 10.0%, respectively. Subsequently, the generated power was 193.68, 193.44 and 212.40 Watt, respectively. In theoretical study, the humidifier-PEMFC model could predict the relationship between an exit %RH of NMH and the generated power of PEMFC in the acceptable level.

Keywords: Fuel cell, PEMFC, Humidity control, Nafion Membrane Humidifier (NHM)

### 1. บทนำ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่นิยมใช้งานกับยานยนต์ คือ ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell; PEMFC) หากเมมเบรนใน PEMFC ชื้นหรือแห้งเกินไปประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลง การควบคุมความชื้นของก๊าซเชื้อเพลิงจึงมีผลต่อความชื้นของห่อเซลล์ การทำความชื้นก๊าซที่สะดวกและนิยมคือการใช้เครื่องทำความชื้นภายนอกห่อเซลล์ โดยรูปแบบที่เหมาะสมกับยานยนต์ คือเครื่องทำความชื้นแบบนาฟเพียนเมมเบรน (Nafion membrane humidifier: NMH) เพราะเขา ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหว ดูแลรักษาและถอดเปลี่ยนได้ง่าย

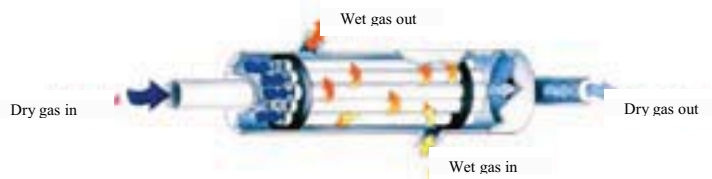
การวิจัยด้านการทำความชื้นภายนอกที่พบ [1] สนใจผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของก๊าซออกซิเจน ไฮโดรเจน และอากาศ กับอัตราการไหลของก๊าซ โดยแสดงผลเป็นกราฟโพลาไรเซชันของห่อเซลล์ ที่แสดงความสัมพันธ์กระแส-ความต่างศักย์ (I-V) และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Power density) กรณีแปรผันอุณหภูมิที่ด้านเอาต์ [1] มีการทดลองอุปกรณ์ให้ความชื้นแบบใช้เมมเบรนเพื่อควบคุมความชื้นของ PEMFC กรณีสภาวะคงตัวและสภาวะเปลี่ยนแปลงตามเวลา [2] และดูผลกระทบจากความชื้นของก๊าซที่ป้อนในสภาวะทำงานแบบคงตัว [3] พบว่าการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าได้รับอิทธิพลมาจากความชื้นสัมพัทธ์ของ

เชื้อเพลิงและสมมูลย์มวลของอากาศ (Stoichiometry) และเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อุณหภูมิ 50°C และความชื้นของก๊าซต่ำ (33% และ 0%) จะทำให้เกิดการสูญเสียไนเมมเบรน (Membrane Electrode Assembly; MEA) ของห่อเซลล์ ดังนั้นการควบคุมความชื้นจากภายนอกด้วยเครื่องทำความชื้น (Humidifier) และการควบคุมสภาวะการทำงานของห่อเซลล์มีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพของเซลล์ ค่าประสิทธิภาพจะดีกว่าการไม่ควบคุมความชื้น เมื่อมีค่าความชื้นที่เหมาะสมเมมเบรนจึงมีคุณสมบัติเหนียวนำโปรตอนได้เพิ่มขึ้น [4] งานวิจัยนี้จึงเน้นศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ให้ความชื้นแบบนาฟเพียนเมมเบรนเมื่อทำงานร่วมกับ PEMFC รวมไปถึงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ให้ความชื้นชนิด NMH เมื่อทำความชื้นห่อเซลล์

2. การทำความชื้นของห่อเซลล์เชื้อเพลิง

2.1 เครื่องทำความชื้นแบบนาฟเพียนเมมเบรน

เครื่องทำความชื้นแบบนาฟเพียนเมมเบรน (NMH) มีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 1 ซึ่งเห็นทางเข้าและออกของก๊าซแห้งและก๊าซชื้น ก๊าซสองกระแสมีการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นระหว่างกันผ่านเมมเบรน ก๊าซร้อนชื้นจะเย็นและแห้งลง ส่วนก๊าซเย็นแห้งจะร้อนและชื้นขึ้น NMH มีลักษณะคล้ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ โดยท่อด้านในเป็นสารนาฟเพียนที่อนุญาตให้เฉพาะความชื้นถ่ายโอนข้ามไปในทิศทางเดียว ซึ่งความร้อนก็จะแพร่และถ่ายโอนโดยกระบวนการพาความร้อนผ่านเมมเบรนไปยังก๊าซด้านที่เย็นกว่าด้วยเช่นกัน ก๊าซเชื้อเพลิง (H<sub>2</sub> หรือ O<sub>2</sub>) จะไหลผ่านเพื่อรับความชื้นและความร้อนที่ถ่ายโอนผ่านท่อนาฟเพียนภาพถ่าย NMH ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 การทำงานของอุปกรณ์ทำความชื้นแบบนาฟเพียนเมมเบรน



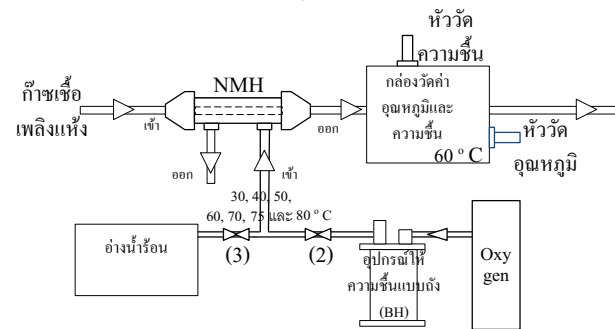
รูปที่ 2 รูปถ่ายแสดงเครื่องทำความชื้นแบบนาฟเพียนเมมเบรน (NMH) จาก Perma Pure ที่ใช้ในการทดสอบ

2.2 การทดสอบเครื่องทำความชื้นกับ PEMFC

การทดสอบแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ (1) การทดสอบเฉพาะ NMH (2) การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว PEMFC กับ NMH และ (3) การทดสอบห่อเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC กับระบบควบคุมความชื้นจากภายนอกแบบ NMH

2.2.1 ระบบทดสอบ NMH

ในเบื้องต้น NMH ต้องได้รับการสอบเทียบผลการทำความชื้นดังรูปที่ 3 โดยทำความชื้นก๊าซชื้นด้วยเครื่องทำความชื้นแบบถัง (Bottle Humidifier; BH) ที่ทางเข้า NMH ก๊าซชื้นที่ได้ที่ตำแหน่ง (2) ใช้แทนก๊าซชื้นทางออกจากห่อเซลล์ด้านแคโทด จากนั้นความชื้นจะถ่ายโอนผ่านนาฟเพียนเมมเบรนมายังด้านก๊าซแห้ง ทำให้ก๊าซที่แห้งนั้นชื้นและร้อนขึ้น คือ อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio, ω) เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งวัดค่าทั้งสองได้ที่กล่องวัดค่าอุณหภูมิและความชื้น และแบ่งการทดสอบเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ (1) ก๊าซออกซิเจนถูกปรับสภาพให้ร้อนและชื้นโดย BH เพื่อใช้เป็นตัวแทนของก๊าซชื้นจากห่อเซลล์เชื้อเพลิง โดยระดับอุณหภูมิในการให้ความร้อนกับก๊าซออกซิเจนคือ 30, 40, 50, 60, 70, 75 และ 80 °C และกรณีที่ (2) ใช้น้ำร้อน (ตำแหน่ง (3)) ให้ความชื้นกับก๊าซแห้งโดยแปรผันอุณหภูมิของอ่างน้ำระหว่าง 30-80 °C เพื่อเปรียบเทียบกับผลทำความชื้นโดย NMH และเงื่อนไขการทดสอบสรุปดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 ชุดการทดสอบสมรรถนะ NMH

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบสมรรถนะ Nafion Membrane Humidifier (NMH) โดยเปรียบเทียบกับ Bottle Humidifier (BH)

ชนิดของกระแส	อัตราการไหลกระแส (SCCM)	อัตราการไหลก๊าซที่รับความชื้น (SCCM)		ระดับอุณหภูมิของกระแส (°C)
		ไฮโดรเจน	ออกซิเจน	
1.1: BH (กรณีฐานสำหรับเปรียบเทียบกับ กรณีใช้ NMH)	-	2,000	1,000	30, 40, 50, 60 <sup>(*)</sup>
1.2: ก๊าซออกซิเจนชื้นทางเข้า NMH	1,000	2,000	1,000	30, 40, 50, 60, 70, 75, 80
1.3: น้ำร้อนทางเข้า NMH	1,625	2,000	1,000	30, 40, 50, 60, 70, 75, 80

BH = Bottle Humidifier, NMH = Nafion Membrane Humidifier,

(\*) เมื่ออุณหภูมิ 60 °C ก๊าซจะถึงสภาวะอิ่มตัว

2.2.2 ระบบทดสอบ NMH กับเซลล์เดี่ยว PEMFC

การทดสอบต่อไปเป็นการทดสอบ NMH กับเซลล์เดี่ยว เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการทำความชื้นโดย NMH เปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ BH โดยการทดสอบแรกได้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซร้อนชื้น (ออกซิเจนชื้น) กับก๊าซเย็นแห้ง (H<sub>2</sub> หรือ O<sub>2</sub>) ใน NMH แสดงดังรูปที่ 4 เงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 2 ควบคุมอุณหภูมิเซลล์เดี่ยวเป็น 50, 60 และ 70 °C

การทดสอบที่สองโดยใช้น้ำร้อนให้ความร้อนและความชื้นกับก๊าซเย็นแห้งแสดงดังรูปที่ 5 และสรุปเงื่อนไขทดสอบในตารางที่ 3 สภาวะควบคุมของน้ำร้อนจากอ่างน้ำร้อน (Water bath) ได้แก่ อัตราไหล และอุณหภูมิ น้ำร้อน

2.2.3 ระบบทดสอบ NMH กับ ห่อเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC

ห่อเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ถูกทดสอบประสิทธิภาพเมื่อก๊าซเชื้อเพลิงได้รับความชื้นจาก NMH ห่อเซลล์เชื้อเพลิงนี้ประกอบเองในประเทศมี 20 ชั้นเซลล์ (คิดเป็นกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์) ดังรูปที่ 6 ใช้เมมเบรน Nafion 115 พื้นที่ทำปฏิกิริยา ขนาด 7 cm x 7 cm แผ่นสะสมกระแสเป็นกราฟไฟต์ที่มีรูปแบบสนามการไหลแบบคดไปมา (Serpentine) ช่องทางเดินก๊าซกว้าง 1 mm จำนวนสี่ช่องทางเดินขนานกัน ทดสอบเปรียบเทียบ 3 กรณี สำหรับการควบคุม อุณหภูมิทางเข้าของก๊าซ H<sub>2</sub> ชื้น/อุณหภูมิห่อเซลล์ /อุณหภูมิทางเข้า O<sub>2</sub> ชื้น (หน่วย °C) เป็น 60/60/60, 70/60/70 และ 80/60/80 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดสอบเซลล์เดี่ยวกับ NMH

กรณีทดสอบ Gas-to-gas กับ NMH	อุณหภูมิก๊าซออกซิเจนทางเข้าเซลล์ (°C)	อุณหภูมิเซลล์เดี่ยว (°C)	อุณหภูมิก๊าซไฮโดรเจนทางเข้าเซลล์ (°C)
2.1	35	50	38
2.2	45	60	46
2.3	46	70	46

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดสอบเซลล์เดี่ยวกับ NMH โดยใช้น้ำร้อน

เงื่อนไขตัวแปรควบคุม	ค่าควบคุม	หน่วย
1. อุณหภูมิเซลล์เดี่ยว	60	°C
2. อุณหภูมิ น้ำร้อน เริ่มต้น	26	°C
3. ค่าแปรผันอัตราการไหล น้ำร้อน	0.5, 1.0	L/min
4. ค่าแปรผันอุณหภูมิ น้ำร้อน แต่ละการทดสอบ	40, 60, 70	°C
5. กระแสไฟฟ้าที่ดึงไปภาระงาน	2, 4, 6, .....28	Amp

2.2.4 เครื่องมือวัดและควบคุม

ระบบเครื่องมือวัด ประกอบด้วย เครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิ การวัดอัตราการไหล ระบบควบคุมการตั้งกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ระบบวัดอุณหภูมิห่อเซลล์ และโปรแกรมควบคุมชื่อ "Fuelcell Control" ดังรายละเอียดต่อไปนี้

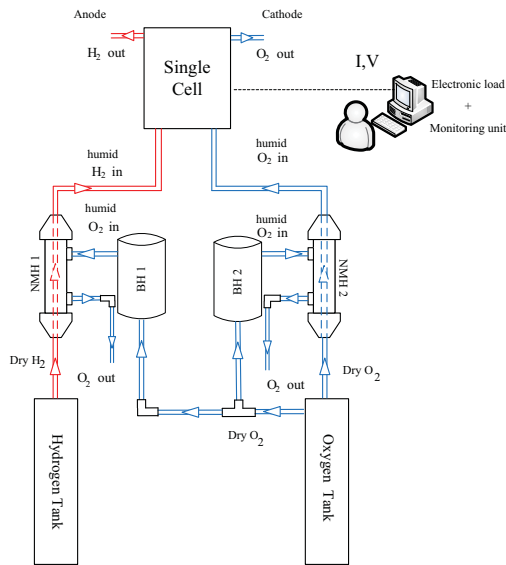
2.2.4.1. เครื่องวัดความชื้น จาก Vaisala series HMT330 สามารถวัดได้ทั้งค่าความชื้นและอุณหภูมิ ใช้ร่วมกับกล่องสำหรับวัดค่า (Chamber) ที่ติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิชื้นนั้นเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของเหลวเมื่อมาพบกับสภาวะอุณหภูมิที่ต่ำกว่า เครื่องควบคุมความดันก๊าซ (Gas Pressure Regulator, GPR) ทำหน้าที่ควบคุมความดันก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนระหว่างการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ให้อยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศ

2.2.4.2. เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Mass Flow Controller, MFC) จาก MKS Serial 5XX04 Model: M100B53CS1BV--S มีช่วงการทำงานกับอัตราการไหล 0-5,000 SCCM (Standard Cubic Centimeter per Minute)

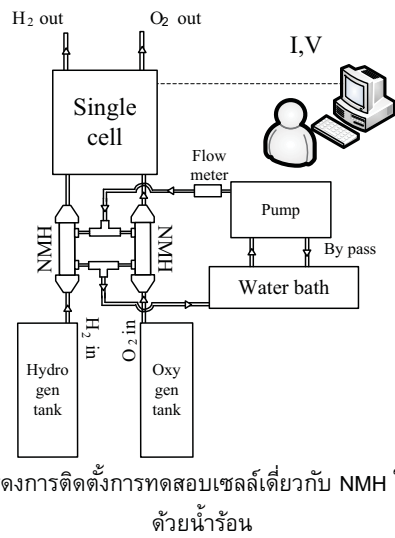
2.2.4.3. อุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าภายนอกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตั้งค่ากำลังไฟฟ้าทดสอบในช่วง 0 - 600 วัตต์ ความต่างศักย์ 0 - 120 โวลต์ ตั้งกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 - 120 แอมแปร์

2.2.4.4. การวัดอุณหภูมิห่อเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ขนาด 300 วัตต์ เพื่อตรวจสอบว่าความร้อนสะสมเกินกว่าสภาวะการทำงานที่เหมาะสมและทำให้ห่อเซลล์เสียหายได้หรือไม่ การวัดค่าอุณหภูมิทำโดยการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K และเครื่องมือวัด ยี่ห้อ PICO รุ่น TC-08 แสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม "Picolog Recorder"

2.2.4.5. โปรแกรมควบคุม ชื่อ "Fuelcell Control" เป็นสื่อกลางระหว่างอุปกรณ์ประกอบระบบทั้งหมดกับผู้ทดสอบ ทำหน้าที่ส่งค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดทั้งหลายไปควบคุมเงื่อนไขการทดสอบระบบ และคำนวณประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง โปรแกรมนี้ได้รับการออกแบบและพัฒนาขึ้นโดย "ห้องปฏิบัติการวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ศูนย์ความเป็นเลิศทางฟิสิกส์" ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



รูปที่ 4 แสดงการติดตั้งการทดสอบเซลล์เดี่ยว กับ NMH ให้ความชื้นด้วยก๊าซชื้น



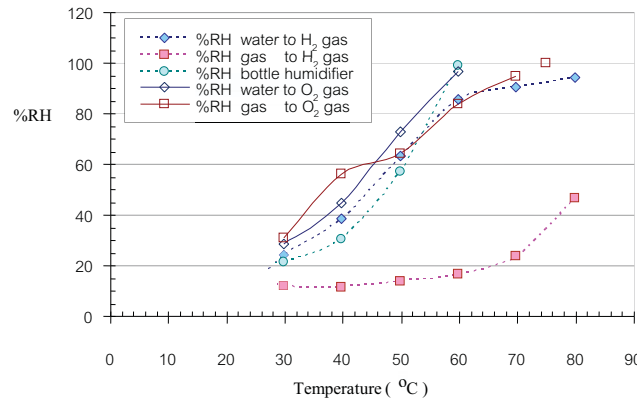
รูปที่ 5 แสดงการติดตั้งการทดสอบเซลล์เดี่ยวกับ NMH ให้ความชื้นด้วยน้ำร้อน



รูปที่ 6 ภาพถ่ายห่อเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 300 วัตต์

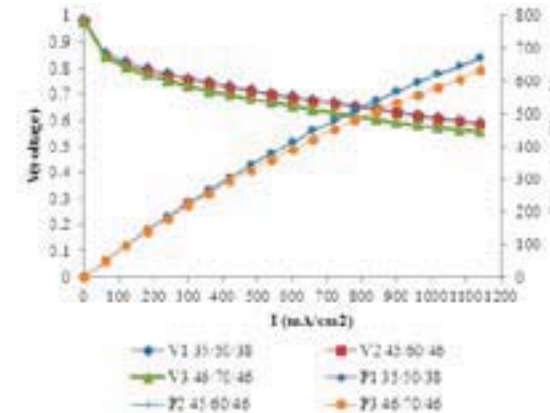
### 2.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ NMH ใช้การเปรียบเทียบสภาวะการทำงานและประสิทธิภาพการให้ความชื้นโดย NMH กับ BH ดังรูปที่ 3 พบว่าผลการทำความชื้นต่างกันอย่างชัดเจน รูปที่ 7 แสดงว่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของกระแสน้ำร้อนซึ่งเป็นแหล่งความร้อนและความชื้นและเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเกิน 55°C โดยกรณีที่ใช้ NMH จะให้ความชื้นกับก๊าซเชื้อเพลิงแห้งได้ดีที่สุดเมื่อใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งความร้อนและความชื้นให้กับก๊าซออกซิเจน



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ อุณหภูมิกระแสน้ำร้อน กับ ความชื้นสัมพัทธ์ของก๊าซเชื้อเพลิงชื้น กรณีทำความชื้นโดย NMH เทียบกับ BH

การทดสอบเซลล์เดี่ยวกับ NMH 2 ตัว โดยใช้ก๊าซออกซิเจนชื้นจากเครื่อง BH (แทนกระแสน้ำที่ถูกนำกลับมาจากคาโทด) เป็นแหล่งความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงของเซลล์เดี่ยว (ออกซิเจนและไฮโดรเจน) เมื่อทดสอบที่กระแส 0 ถึง 57 แอมแปร์ เพิ่มขึ้นครั้งละ 3 แอมแปร์ ได้กราฟโพลาไรเซชันดังรูปที่ 8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิควบคุมมีผลเล็กน้อยกับกำลังไฟฟ้าที่ได้ แม้จะเพิ่มอุณหภูมิควบคุมขึ้น 10°C กำลังไฟฟ้าที่ได้ก็ต่างกันไม่มาก อัตราการลดลงของความต่างศักย์ต่างกันเล็กน้อยเช่นกัน ที่สภาวะอุณหภูมิก๊าซไฮโดรเจน/อุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง/อุณหภูมิก๊าซออกซิเจน (หน่วย °C) เป็น 35/50/38, 45/60/46 และ 46/70/46 ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 670.98 mW/cm<sup>2</sup>, 666.90 mW/cm<sup>2</sup> และ 634.79 mW/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใช้ BH ทำความชื้นกำลังไฟฟ้าที่ได้ต่างกันถึง 220 mW/cm<sup>2</sup> แสดงว่าการปรับสภาพความชื้นของก๊าซทางเข้าเซลล์เดี่ยวโดย NMH ดีกว่าการใช้ BH



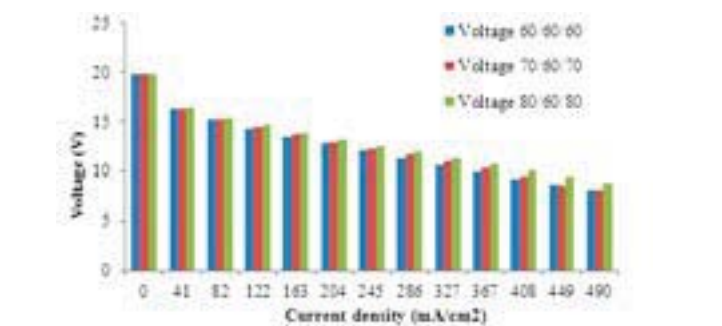
รูปที่ 8 กราฟโพลาไรเซชันการทดสอบเซลล์เดี่ยวกับ NMH

V1/P1, V2/P2, V3/P3 คือค่าความต่างศักย์และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (mW/cm<sup>2</sup>) ที่เงื่อนไขการทดสอบ อุณหภูมิก๊าซไฮโดรเจน / อุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง / อุณหภูมิก๊าซออกซิเจน เป็น 35°C/50°C /38°C, 45°C /60°C /46°C, และ 46°C /70°C /46°C ตามลำดับ

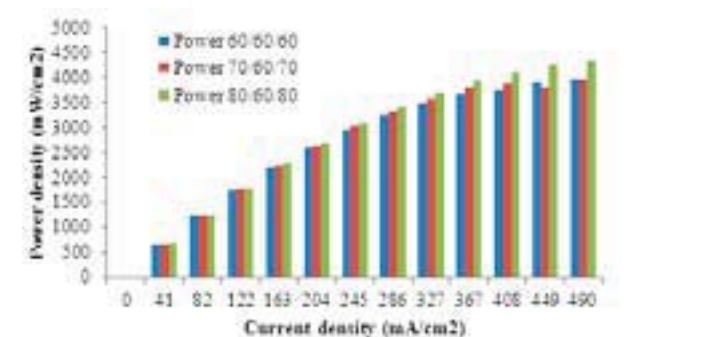
กรณีทดสอบห่อเซลล์ 300 วัตต์ กับ NMH โดยไม่ควบคุมอุณหภูมิ ก๊าซ H<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> ทางเข้าห่อเซลล์ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยกว่ากรณีใช้ BH อยู่เกือบ 50% ผู้วิจัยจึงติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) กับท่อทางเดินก๊าซเชื้อเพลิงทั้งสองหลังจากที่ได้ผ่าน NMH เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซเชื้อเพลิงก่อนเข้าห่อเซลล์ และลดความเสี่ยงในการควบแน่นของไอน้ำในก๊าซเชื้อเพลิง ผลการทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ และกับความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบ 3กรณีการควบคุมอุณหภูมิทางเข้าของก๊าซ H<sub>2</sub> ชื้น / อุณหภูมิห่อเซลล์ / อุณหภูมิทางเข้า O<sub>2</sub> ชื้น (หน่วย °C) เป็น 60/60/60, 70/60/70 และ 80/60/80 ตามลำดับ พบว่า เมื่ออุณหภูมิของก๊าซเชื้อเพลิงชื้นสูงขึ้น ในขณะที่ห่อเซลล์ถูกควบคุมไว้ที่ 60 °C เท่ากัน ความต่างศักย์จะลดลงช้าและกำลังไฟฟ้าที่ได้จะเพิ่มขึ้นมากกว่าการทดสอบในสภาวะที่ไม่มีการให้ความร้อนโดยฮีตเตอร์ แต่ %RH จะลดลง เมื่ออุณหภูมิทางเดินก๊าซเชื้อเพลิงเป็น 80°C ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด 4,234.07 mW/cm<sup>2</sup> หรือ 212.4 วัตต์ ที่ความต่างศักย์ 9.43 V (หรือ 0.47 V ต่อเซลล์) เมื่อแปรผันอุณหภูมิที่นำก๊าซเป็น 60, 70 และ 80 °C ตามลำดับ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ในกระแสก๊าซไฮโดรเจนที่ได้เป็น 30.9%, 28.0% และ 32.6% ตามลำดับ และค่า %RH ของก๊าซออกซิเจนเป็น 17.0%, 13.2% และ 10.0% ตามลำดับ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้เป็น 193.68, 193.44 และ 212.4 วัตต์

การทดสอบเซลล์เดี่ยวกับ NMH โดยใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งให้ความร้อนและความชื้นกับก๊าซเชื้อเพลิงแห้งด้วย NMH ดังชุดทดสอบในรูปที่ 5 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดียิ่งกว่าการงานจากเงื่อนไขทดสอบทั้ง 8 ได้ดังรูปที่ 11 ในขณะที่ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่แต่ละค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 12

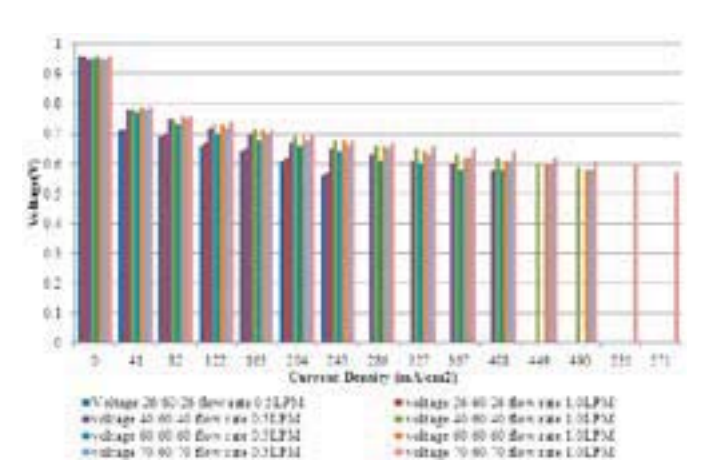
รูปที่ 12 แสดงว่า ที่สภาวะการทดลอง 60/60/60 อัตราการไหลของน้ำร้อน 1 ลิตรต่อนาที ให้กระแสและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ามากกว่ากรณีอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที อาทิ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 286 mA/cm<sup>2</sup> (14 A) ที่ความต่างศักย์ 0.66 V เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำร้อนจ่ายเข้า NMH ที่สูงกว่าทำให้การถ่ายโอนน้ำผ่านเมมเบรนนาฟเพียนเข้าสู่ก๊าซเชื้อเพลิงดีขึ้น ส่งผลดีต่อการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในห่อเซลล์จึงผลิตกระแสไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความต่างศักย์ลดลงช้ากว่าด้วย



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กรณีทดสอบห่อเซลล์ 300 W กับ NMH

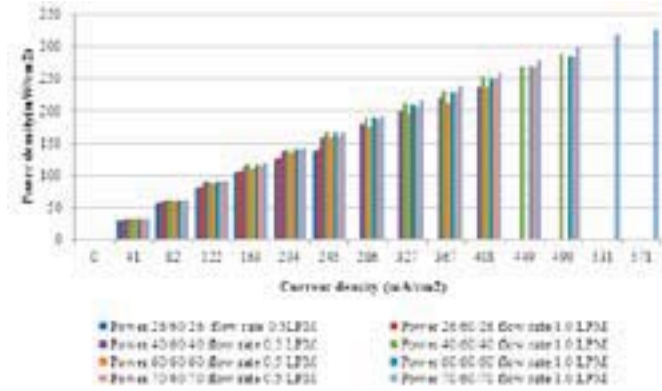


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กรณีทดสอบห่อเซลล์ 300 W กับ NMH



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า สำหรับ 8 สภาวะการทดสอบของ NMH (กรณีน้ำร้อน) กับเซลล์เดี่ยว





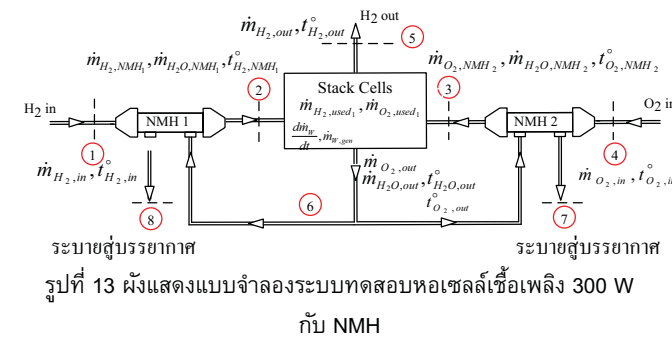
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสสำหรับ 8 สภาวะการทดสอบของ NMH (กรณีน้ำร้อน) กับเซลล์เดี่ยว

ตัวเลข Voltage/Power xx/xx/xx หมายถึง ค่าความต่างศักย์หรือกำลังไฟฟ้าที่ได้เมื่อควบคุมอุณหภูมิก๊าซไฮโดรเจน/อุณหภูมิเซลล์เดี่ยว/อุณหภูมิก๊าซไฮโดรเจน ดังเงื่อนไขในตารางที่ 3

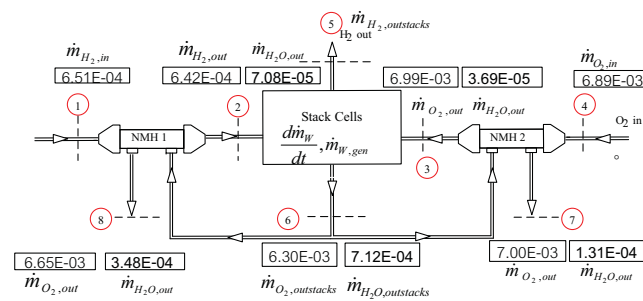
Flow rate 0.5 หรือ 1.0 LPM หมายถึง อัตราการไหลของน้ำร้อนที่ไหลเวียนมายัง NMH ในหน่วยลิตรต่อนาที

#### 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

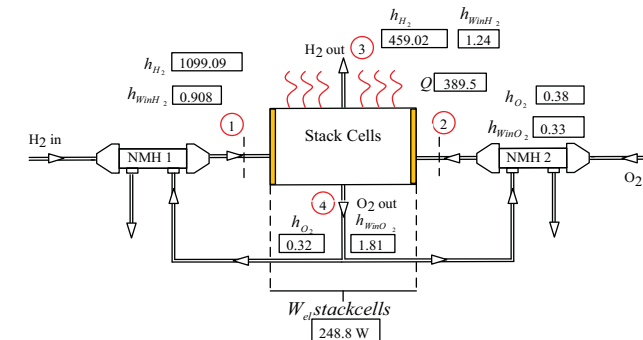
ผู้วิจัยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปริมาณควบคุม NMH โดยอาศัยสมการสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน เพื่อทำนายความชื้นสัมพัทธ์และระดับอุณหภูมิของก๊าซเชื้อเพลิงขึ้นที่ออกจาก NMH และปริมาณน้ำที่อาจจะสะสมภายใน NMH นอกจากนี้ยังใช้แบบจำลองทำนายพฤติกรรมเมื่อ NMH ถูกใช้งานร่วมกับห่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC และผลการคำนวณได้รับการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง ยกตัวอย่างปริมาณควบคุม NMH1 ทางด้านซ้ายของรูปที่ 13 สำหรับทำนายความชื้นให้ก๊าซไฮโดรเจน ตำแหน่งทางเข้าและออกของก๊าซแห้งและชื้นทั้ง 2 กระแสคือตำแหน่ง 1, 2, 6 และ 8



รูปที่ 13 ผังแสดงแบบจำลองระบบทดสอบห่อเซลล์เชื้อเพลิง 300 W กับ NMH



รูปที่ 14 แผนภาพการไหลของมวล (Mass Flow Diagram) ที่ NMH ในเงื่อนไขการทดสอบ 60/60/60



รูปที่ 15 แผนภาพการไหลของพลังงาน (Energy Flow Diagram) ที่ NMH ในเงื่อนไขการทดสอบ 60/60/60

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บางส่วนจากสมดุลมวลของ NMH1 และ NMH2 เพื่อการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ NMH ทั้งสอง สำหรับการทำความชื้นก๊าซ H<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> แสดงดังสมการที่ (1) – (4)

$$[\dot{m}_{H_2,1} + \dot{m}_{H_2O,6} + \dot{m}_{O_2,6}] - [\dot{m}_{H_2,2} + \dot{m}_{H_2O,2} + \dot{m}_{O_2,8} + \dot{m}_{H_2O,8}] \quad (1)$$

$$\left[ \frac{M_{H_2} (P_{atm} - \varphi_{H_2,1} P_{sat,1}) Q_{H_2,1}}{RT_1} + \frac{0.5629(\varphi_{O_2,6} P_{sat,6}) Q_{O_2,6} M_{O_2}}{RT_6} + \frac{M_{O_2} (P_{atm} - \varphi_{O_2,6} P_{sat,6}) Q_{O_2,6}}{RT_6} \right] -$$

$$\left[ \frac{M_{H_2} (P_{atm} - \varphi_{H_2,2} P_{sat,2}) Q_{H_2,2}}{RT_2} + 8.9361 \frac{M_{H_2} (\varphi_{H_2,2} P_{sat,2}) Q_{H_2,2}}{RT_2} \right] = 0 \quad (2)$$

$$[\dot{m}_{O_2,4} + \dot{m}_{H_2O,6} + \dot{m}_{O_2,6}] - [\dot{m}_{O_2,3} + \dot{m}_{H_2O,3} + \dot{m}_{O_2,7} + \dot{m}_{H_2O,7}] = 0 \quad (3)$$

$$\left[ \frac{M_{O_2} (P_{atm} - \varphi_{O_2,4} P_{sat,4}) Q_{O_2,4}}{RT_4} + \frac{0.5629(\varphi_{O_2,6} P_{sat,6}) Q_{O_2,6} M_{O_2}}{RT_6} + \frac{M_{O_2} (P_{atm} - \varphi_{O_2,6} P_{sat,6}) Q_{O_2,6}}{RT_6} \right] -$$

$$\left[ \frac{M_{O_2} (P_{atm} - \varphi_{O_2,3} P_{sat,3}) Q_{O_2,3}}{RT_3} + 0.5629 \frac{M_{O_2} (\varphi_{O_2,3} P_{sat,3}) Q_{O_2,3}}{RT_3} \right] = 0 \quad (4)$$

$$+ \frac{M_{O_2} (P_{atm} - \varphi_{O_2,7} P_{sat,7}) Q_{O_2,7}}{RT_7} + 0.5629 \frac{M_{O_2} (\varphi_{O_2,7} P_{sat,7}) Q_{O_2,7} M_{O_2}}{RT_7}$$

การแก้สมการสมดุลมวลจะได้แผนภาพการไหลของมวล (Mass Flow Diagram) ดังรูปที่ 14 และคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในปริมาณควบคุม NMH ได้ค่าอยู่ในช่วง +2.64 x 10<sup>-4</sup> ถึง +2.92 x 10<sup>-4</sup> kg/s กรณีการให้ความชื้นก๊าซไฮโดรเจน และ +5.40 x 10<sup>-4</sup> ถึง +5.56 x 10<sup>-4</sup> kg/s กรณีการให้ความชื้นก๊าซออกซิเจน แสดงว่ามีการสะสมน้ำใน NMH และสามารถใช้น้ำในสมการสมดุลมวลเพื่อทำนายค่า %RH ของ H<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> ที่ทางออก NMH ได้

หากไม่คิดอัตราการสะสมน้ำใน NMH จะได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของก๊าซทางออกเกือบ 100% พบจากผลการทดสอบจริงว่าค่า %RH ทางออกคือ 30% สำหรับก๊าซ H<sub>2</sub> และ 15% สำหรับก๊าซ O<sub>2</sub> ในทางกลับกัน หากพิจารณาการสะสมของน้ำใน NMH จะให้ค่า %RH ใกล้เคียงกับค่าจากการทดสอบมากยิ่งขึ้น เป็นการยืนยันสมมติฐานว่าน้ำสะสมใน NMH ทั้งสอง นอกจากนี้สมดุลพลังงานในห่อเซลล์เชื้อเพลิงขณะทำงานร่วมกับ NMH ยังช่วยทำนายค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากห่อเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อทราบอัตราการไหลและสภาพความชื้นของก๊าซเชื้อเพลิง และจะได้แผนภาพการไหลของพลังงาน (Energy Flow diagram) ดังรูปที่ 15

ค่ากำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้อยู่ในช่วง 638.31 – 639.57 W โดยความร้อนสูญเสีย (Q<sub>loss</sub>) มีค่าสูงถึง 390 – 308 W หรือคิดเป็นร้อยละ 50 สำหรับทุกเงื่อนไขการทดสอบ

#### 4. สรุป

การวิจัยนี้เน้นทดสอบพฤติกรรมการทำความชื้นของอุปกรณ์ให้ความชื้นแบบ NMH เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ BH กรณีใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวและห่อเซลล์ พบว่าน้ำร้อนเป็นแหล่งให้ความชื้นกับก๊าซเชื้อเพลิงแห้งได้เป็นอย่างดี โดยก๊าซออกซิเจนสามารถรับความชื้นจากน้ำร้อนได้ดีกว่าก๊าซไฮโดรเจน กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากห่อเซลล์จะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำร้อน แต่เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนขึ้น (ขาออกจากคาโทดของห่อเซลล์) มาให้ความชื้นจะทำให้ความชื้นได้เหมาะสมเฉพาะกรณีเซลล์เดี่ยว แต่ไม่เพียงพอต่อความต้องการในกรณีห่อเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 300 วัตต์ เนื่องจากความชื้นและอุณหภูมิของก๊าซเชื้อเพลิง O<sub>2</sub> และ H<sub>2</sub> ที่ได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของห่อเซลล์

ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองพฤติกรรมการทำงานของระบบทำความชื้นแบบภายนอก NMH สำหรับ PEMFC ได้ผลเป็น Mass flow diagram และ Energy flow diagram และยังทำนายความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้ของก๊าซเชื้อเพลิง รวมถึงกำลังไฟฟ้าที่ได้และความร้อนสูญเสียจากห่อเซลล์ อย่างไรก็ตามหากจะนำ NMH มาใช้ในการให้ความชื้นกับเชื้อเพลิงแห้ง (H<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub>) ของ PEMFC ควรต้องลดปัญหาจากกลไกการสะสมน้ำใน NMH ให้ได้เสียก่อน เพื่อไม่ให้เป็นอุปสรรคต่อการนำระบบ PEMFC มาใช้ในยานยนต์ไฮโดรเจนต่อไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนอุปกรณ์ประกอบการวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ศูนย์ความเป็นเลิศทางฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และห้องปฏิบัติการวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สวทช., สกว. และ สนพ.

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Hyun and J. Kim (2004). "Study of external humidification method in proton exchange membrane fuel cell", Journal of Power Sources, Vol. 126, pp. 98–103.
- [2] D. Chen, W. Li and H. Peng (2008). "An experimental study and model validation of a membrane humidifier for PEM fuel cell humidification control", Journal of Power Sources, Vol. 180, pp. 461–467.
- [3] F.-B. Weng, B.-S. Jou, C.-W. Li, A. Su and S.-H. Chan (2008). "The effect of low humidity on the uniformity and stability of segmented PEM fuel cells", Journal of Power Sources, Vol. 181, pp. 251–258.
- [4] นายณฤทธิ์ หล่อประดิษฐ์. (2553). "การจัดการความชื้นภายนอกของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน", วิทยานิพนธ์: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมพลังงาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.