

ผลกระทบของขนาดทางกายภาพของช่องทางการไหลฝั่งแคโรตต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง  
ชนิด PEM แบบ Open-Cathode



นางสาวสรวิรัตน์ เกียรติธรรมรงค์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF GEOMETRY OF CATHODE FLOW CHANNEL ON PERFORMANCE OF OPEN-  
CATHODE PEM FUEL CELL

Miss Suangrat Kiattamrong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2014  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของขนาดทางกายภาพของช่องทางการไหลฝั่ง  
แคโทดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แบบ  
Open-Cathode  
โดย นางสาวสรวงรัตน์ เกียรติธรรมรงค์  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.อังคิรี ศรีภคการ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อังคิรี ศรีภคการ)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม)

สรवरรัตน เกียรติธรรมรงค์ : ผลกระทบของขนาดทางกายภาพของช่องทางการไหลฝั่งแคโร  
ดต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แบบ Open-Cathode (EFFECT OF  
GEOMETRY OF CATHODE FLOW CHANNEL ON PERFORMANCE OF OPEN-  
CATHODE PEM FUEL CELL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อังคิรี ศรีภคการ,  
151 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อแสดงบทบาทของขนาดทางกายภาพของช่องทางการไหลผ่าน  
ทางตัวแปร “สัดส่วนรูปร่าง” และพื้นที่การไหลของอากาศ ซึ่งส่งผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง  
ชนิด PEM แบบ open-cathode เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ขนาดเซลล์เดี่ยวถูก  
สร้างขึ้นเพื่อทดสอบพร้อมกับอุปกรณ์เสริมการทำงาน แผ่น MEA มีขนาด  $100 \text{ cm}^2$  แผ่น  
flowfield ฝั่งแคโรดที่มีรูปร่างช่องทางการไหลแตกต่างกัน 6 แบบ แบ่งเป็นสัดส่วนรูปร่าง 2 ขนาด  
ได้แก่ 0.80 และ 1.25 และพื้นที่การไหล 3 ขนาด ได้แก่ 2, 5 และ  $8 \text{ mm}^2$  ได้ถูกสร้างขึ้น พัดลมถูก  
คัดเลือกให้ป้อนอากาศได้อย่างแม่นยำต่อการสร้างกระแสไฟฟ้าขาออกที่ 30 A และการรักษาอุณหภูมิ  
ของภายในเซลล์ให้เหมาะสมของแต่ละชุดทดสอบ N-slew rate ถูกยืนยันว่าเป็นเครื่องมือบ่งชี้ความ  
ผันผวนของภาระแบบไม่คงตัวที่เหมาะสมกับเซลล์เชื้อเพลิงใด ๆ การทดสอบด้วยสภาวะการทำงาน  
ทั้งแบบคงตัวและไม่คงตัวให้ผลการทดสอบที่สอดคล้องกัน คือ รูปร่างช่องทางการไหลที่มีสัดส่วนเป็น  
1.25 หรือรูปร่างแบบกว้าง-ตื้นช่วยให้การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงดีกว่าสัดส่วน 0.80 หรือแบบแคบ-  
ลึก เนื่องจากมีพื้นที่ให้อากาศซึมเข้าสู่ MEA มากกว่า ช่วยลดการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากการถ่ายเท  
มวล ในขณะที่พื้นที่การไหลอากาศไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะ  
ที่อากาศถูกป้อนแม่นยำ ลักษณะเช่นนี้บ่งชี้ว่า การถ่ายเทอากาศเข้าสู่ MEA มีบทบาทสำคัญสูงสุดใน  
การออกแบบช่องทางการไหลอากาศของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แบบ open-cathode ถึงแม้ว่า  
ช่องทางการไหลแบบกว้าง-ลึกจะทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM ดีขึ้น การ  
ออกแบบช่องทางการไหลต้องคำนึงถึงความเค้นในวัสดุที่ใช้ผลิตเพื่อรักษาอายุการใช้งานของเซลล์  
เชื้อเพลิง ทำให้สัดส่วนช่องทางการไหลอากาศที่แนะนำในวิทยานิพนธ์นี้ มีค่ามากกว่า 1.00 เล็กน้อย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5670418121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) / OPEN CATHODE / FLOWFIELD

SUANGRAT KIATTAMRONG: EFFECT OF GEOMETRY OF CATHODE FLOW CHANNEL ON PERFORMANCE OF OPEN-CATHODE PEM FUEL CELL. ADVISOR: ASSOC. PROF. ANGKEE SRIPAKAGORN, Ph.D., 151 pp.

This thesis was attempted to study the influence of the geometry, in terms of the aspect ratio and the flow area, of the air flow channel on the performance of the open-cathode PEMFC. The single-cell PEMFC were fabricated for the experiment with the auxiliary equipment. MEA size was  $100 \text{ cm}^2$ . Six cathode bipolar plates with different channel configurations, such as, 2 aspect ratios; 0.80 and 1.25 and 3 flow areas; 2, 5 and  $8 \text{ mm}^2$  were produced. The fans were precisely selected for the fuel cell operation of each test units at the current output at 30 A and the suitable cell temperature. The steady state and transient experiments were conducted. N-slew rate was demonstrated to be an appropriate parameter to indicate the degree of transient in the operation of fuel cell systems regardless of its size. The results from both experiments confirmed that the test units with the aspect ratio at 1.25 or the wide-and-shallow channel performed better than those with the aspect ratio at 0.80 or narrow-and-deep channel because of the lower voltage loss due to the mass transfer. However, change in the flow area did not affect the fuel cell performance. Although, the wide-and-shallow channel is preferable according to the conclusion, the flowfield design has to concern on the stress issue as well. Consequently, this thesis recommends the aspect ratio of the air channel at slightly more than unity.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยคำแนะนำและความรู้จาก รศ. ดร.อังคิรี ศรีภคภากร อาจารย์ที่ปรึกษาของวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ รศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ และ ผศ. ดร.เก็จวลี พฤกษาทรร ที่ให้ความรู้เชิงเคมีและคำปรึกษาเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิง PEM

ขอขอบคุณ Fuel Cell Research Group และภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษา เอื้อเพื่ออุปกรณ์ประกอบทดลอง ได้แก่ เครื่องสร้างภาระทางไฟฟ้า และเครื่องสร้างไฟฟ้ากระแสตรง

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (RES560530272-EN), Special Task Force for Activating Research (STAR), ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (EN276B) และทุนสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการศึกษาต่อเนื่องตรี-โท คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ ผศ. ดร.สันหพศ จันทรานูวัฒน์, อ. ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ และสมาชิก Smart Mobility Research Center ที่ร่วมการสัมมนาย่อยทุกสัปดาห์ ทุกคำแนะนำช่วยเพิ่มทักษะในด้านการทำวิจัยและการนำเสนอของผู้วิจัยเป็นอย่างมาก

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 จุดประสงค์และขอบเขตการทำงาน.....	3
1.2.1 จุดประสงค์ .....	3
1.2.2 ขอบเขตการทดสอบ .....	3
1.3 ขั้นตอนการทำงาน .....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	6
2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบ Proton Exchange Membrane .....	6
2.2 เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ Open-Cathode .....	7
2.3 แนวทางการพัฒนา open-cathode PEMFC .....	9
2.3.1 ปัญหาการจัดการน้ำภายในเซลล์ .....	10
2.3.2 ปัญหาอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ .....	13
2.4 การศึกษาเกี่ยวกับช่องทางการไหลของ Open-Cathode PEMFC.....	14
2.5 การออกแบบระบบพัดลมของ Open-Cathode PEMFC.....	21
2.6 การทดสอบและประเมินสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง .....	22

บทที่ 3	ความรู้เบื้องต้นในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง.....	25
3.1	ขนาดพื้นที่เกิดปฏิกิริยาและจำนวนเซลล์แถว.....	25
3.2	รูปแบบของช่องทางการไหลของสารตั้งต้น.....	28
3.2.1	รูปแบบการไหลภายในเซลล์แถว.....	28
3.2.2	ช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield.....	30
3.2.2.1	ช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield ฝั่งแอโนด (ไฮโดรเจน).....	30
3.2.2.2	ช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield ฝั่งแคโทด (ออกซิเจน).....	30
3.3	อัตราการไหลที่เพียงพอของสารตั้งต้น.....	31
3.4	วัสดุในการผลิตแผ่น Flowfield.....	35
3.5	ความดันตกในช่องทางการไหลของสารตั้งต้น.....	35
3.6	ความดัน Clamping.....	37
3.7	การทำงานของพัดลม.....	37
บทที่ 4	รายละเอียดชุดทดสอบแบบเซลล์เดี่ยว.....	40
4.1	รูปแบบเส้นทางการไหลในเซลล์แถว.....	40
4.2	รายละเอียดของแผ่น MEA.....	40
4.3	รายละเอียดของแผ่น Flowfield.....	41
4.4	แผ่นรวมกระแส แผ่นฉนวน และแผ่นประกบปริม.....	47
4.5	อัตราการไหลและความดันขาเข้าไฮโดรเจนเพื่อสร้างกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	51
4.6	อัตราการไหลและความดันขาเข้าอากาศเพื่อสร้างกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	52
4.7	การประกอบเซลล์เชื้อเพลิง.....	55
4.8	ชุดพัดลม.....	57
บทที่ 5	การติดตั้งชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ปัญหาที่พบ และการแก้ไข.....	60
5.1	การเตรียมการทดสอบ.....	60



5.1.1 ส่วนประกอบแผ่นทดสอบ .....	60
5.1.2 ซอฟต์แวร์เก็บข้อมูลศักย์ไฟฟ้าจากชุดทดสอบ.....	61
5.1.3 การติดตั้งบนแผ่นทดสอบ.....	63
5.2 ขั้นตอนการทดสอบ .....	66
5.3 ปัญหาที่พบและวิธีการแก้ไข.....	66
บทที่ 6 แผ่นรูพรุน.....	72
6.1 แผ่นแคโทดเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ Open-Slit.....	72
6.2 ลักษณะของรูบนแผ่นแคโทดต่อพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง .....	73
6.3 การออกแบบแผ่นรูพรุนและการศึกษาผลของรูปแบบรูพรุนต่อสมรรถนะของเซลล์ เชื้อเพลิง .....	74
บทที่ 7 ผลการทดสอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว.....	78
7.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวด้วยภาระคงตัว .....	78
7.1.1 ผลกระทบจากสัดส่วนรูปร่าง ของช่องทางการไหลอากาศ.....	78
7.1.2 ผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ .....	80
7.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวด้วยภาระไม่คงตัว.....	82
7.2.1 ผลกระทบจากสัดส่วนรูปร่างของช่องทางการไหลอากาศ.....	82
7.2.2 ผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ .....	84
7.2.3 ผลกระทบเพื่อประเมิน N-Slew Rate.....	85
7.3 ผลการทดสอบผลกระทบของแผ่นรูพรุนต่อสมรรถนะของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว .....	92
7.3.1 ผลของขนาดของรูพรุนต่อสมรรถนะของชุดทดสอบ .....	92
7.3.2 ผลของสัดส่วนพื้นที่รูต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยาต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง .....	93
7.4 การอภิปรายผลการทดสอบ .....	94
7.5 การอภิปรายเชิงเศรษฐศาสตร์.....	100

บทที่ 8	บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	103
8.1	บทสรุปและประโยชน์ที่ได้รับ .....	103
8.1.1	พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ forced-air open-cathode .....	104
8.1.2	ศึกษาผลของสัดส่วนของช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield ต่อสมรรถนะของ เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode .....	104
8.2	ข้อเสนอแนะ .....	106
ภาคผนวก ก	รายละเอียดอุปกรณ์เสริมในการทดสอบ .....	108
ก.1	เครื่องสร้างภาระไฟฟ้า .....	108
ก.2	เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง .....	108
ก.3	วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 V .....	109
ก.4	วาล์วคลวด .....	110
ก.5	Data Acquisition .....	110
ก.6	พัลส์สำหรับชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว .....	111
ก.7	รถยนต์สำหรับการประเมินความเป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Open-cathode PEM ในงานยานยนต์ .....	112
ภาคผนวก ข	การจัดเตรียม MEA สำหรับการทดสอบ .....	115
ภาคผนวก ค	สภาวะเซลล์แห้งและน้ำท่วมเซลล์ .....	117
ค.1	น้ำท่วมเซลล์ .....	117
ค.2	เซลล์แห้ง .....	121
ภาคผนวก ง	การเสื่อมสภาพของแผ่น MEA .....	123
ภาคผนวก จ	ความพยายามในการศึกษาความเป็นไปได้ ของเซลล์เชื้อเพลิง Open-Cathode PEM ในยานยนต์ .....	127
ง.1	การใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงในด้านยานยนต์ .....	127
ง.2	ความเป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Open-Cathode ในยานยนต์ .....	129

ง.3 แบบจำลองเพื่อประเมินความเป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Open-Cathode ในยานยนต์ 130	
ง.4 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไขในอนาคต.....	133
ภาคผนวก ฉ ค่าใช้จ่าย.....	135
รายการอ้างอิง.....	142
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	151



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 รายละเอียดของช่องทางการไหลอากาศผ่าน flowfield ฝั่งแคโรต	43
ตารางที่ 2 ปริมาณความร้อนในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุด ณ เงื่อนไขแวดล้อมที่กำหนด	53
ตารางที่ 3 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกต่ำสุด และอัตราการไหลอากาศเพื่อการหล่อเย็นของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุด	53
ตารางที่ 4 ความดันตกในช่องทางการไหลอากาศที่อัตราการไหลอากาศสูงสุดสำหรับการสร้างกระแสไฟฟ้า	54
ตารางที่ 5 ความดันตกในช่องทางการไหลอากาศที่อัตราการไหลอากาศสูงสุดที่ยังคงสภาพการไหลแบบราบเรียบ	54
ตารางที่ 6 ความดันตกใจช่องทางการไหลอากาศที่อัตราการไหลอากาศ เพื่อรักษาความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและขาออกให้มีค่าไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส	55
ตารางที่ 7 รายละเอียดของวาล์วขดลวด CHSFC 2W-025-08	110
ตารางที่ 8 รายละเอียดทางเทคนิคของรถยนต์ TOYOTA Corolla Altis JS Petrol [75]	113
ตารางที่ 9 ค่าใช้จ่ายเพื่อการผลิตชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง	135
ตารางที่ 10 ค่าใช้จ่ายในโครงการ เรียงตามลำดับการซื้อ	136
ตารางที่ 11 ค่าใช้จ่ายต่อหนึ่งชิ้น ของรายการค่าใช้จ่าย เพื่อการผลิตชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง (ไม่รวมพัสดุ)	139

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 Hydrogen Fuel Cell RC Car [3] .....	6
ภาพที่ 2 PowerTrek fuel cell charger [4] .....	7
ภาพที่ 3 ส่วนประกอบภายในเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode 1 เซลล์ [7].....	8
ภาพที่ 4 เส้นโค้ง Polarization ของความหนาแน่นพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้เครื่องอัดอากาศและเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode แบบเซลล์เดี่ยวและแบบเซลล์แถว [16].....	9
ภาพที่ 5 โครงร่างของระบบกำลังของรถยนต์ Honda Fuel Cell Power FCX [17].....	10
ภาพที่ 6 ปฏิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงและแรงที่เกี่ยวข้องในการถ่ายเทน้ำ .....	11
ภาพที่ 7 ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับน้ำที่เกิดขึ้นได้ในเซลล์เชื้อเพลิง [9] .....	12
ภาพที่ 8 ผลจากความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อการทำงานของเซลล์แถว [22].....	14
ภาพที่ 9 ช่องทางการไหลแบบตรง [26] .....	15
ภาพที่ 10 ทิศทางและขนาดของแรง electroosmotic drag และ back diffusion ของน้ำ.....	16
ภาพที่ 11 เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังของเซลล์เชื้อเพลิง natural open-cathode PEM ที่มีช่องทางการไหลขนาดต่างกัน [7].....	17
ภาพที่ 12 ความแตกต่างของอัตราการถ่ายเทออกซิเจนจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างช่องทางการไหลอากาศ [7] .....	18
ภาพที่ 13 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงจากการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างช่องทางการไหลอากาศ [7].....	18
ภาพที่ 14 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความดันตกภายในตลอดเส้นทางการไหลของอากาศ .....	22
ภาพที่ 15 ลักษณะจุดหักเหของ flowfield ฝั่งแคโรตของเซลล์เชื้อเพลิง Nexa.....	22
ภาพที่ 16 รถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงรุ่น FCV ของ Toyota [37].....	23
ภาพที่ 17 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของ n-slew rate ของแต่ละวัฏจักรขับขี [38].....	24
ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ของเซลล์ ประสิทธิภาพ และความหนาแน่นกระแส ซึ่งมาจากเส้นโค้ง polarization [36] .....	26

ภาพที่ 19 รูปแบบตำแหน่งท่อรวมขาเข้าและขาออกแบบตัว U (บน) และตัว Z (ล่าง) [36].....	28
ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบอัตราการไหลอากาศที่เข้าสู่แต่ละเซลล์ในเซลล์แถว.....	29
ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบ polarization curve และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า เมื่อรูปแบบการไหลของไฮโดรเจนเป็นแบบปลายปิด และแบบปลายเปิดที่อัตราการไหลต่างๆ [8] .....	29
ภาพที่ 22 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง [36] .....	32
ภาพที่ 23 ค่า Nusselt Number [36].....	33
ภาพที่ 24 ค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของอากาศ [36].....	34
ภาพที่ 25 ค่าความหนืดของสารในเซลล์เชื้อเพลิง [36].....	36
ภาพที่ 26 การหาจุดทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบพัดลมของ Lopez-Sabiron [11] .....	38
ภาพที่ 27 ช่วงการทำงานของระบบพัดลมของ Lopez-Sabiron [11].....	39
ภาพที่ 28 แผ่น MEA จาก FuelCellsEtc .....	41
ภาพที่ 29 ภาพวาดของแผ่น flowfield ฟิ่งแอโนด .....	42
ภาพที่ 30 แผ่น flowfield ฟิ่งแอโนด.....	42
ภาพที่ 31 ภาพวาดของแผ่น flowfield ฟิ่งแคโทด.....	44
ภาพที่ 32 ภาพวาดของแผ่น flowfield ฟิ่งแคโทด.....	45
ภาพที่ 33 ภาพวาดของแผ่น flowfield ฟิ่งแคโทด.....	46
ภาพที่ 34 ภาพวาดของแผ่นรวมกระแสฟิ่งแอโนดและแคโทด (ลำดับจากซ้ายไปขวา) .....	47
ภาพที่ 35 แผ่นทองแดงตัดตามแบบ .....	48
ภาพที่ 36 แผ่นรวมกระแสฟิ่งแอโนด (ซ้าย) และแคโทด (ขวา).....	48
ภาพที่ 37 ภาพวาดแผ่นประกบริมหัวท้ายฟิ่งแอโนดและแคโทด .....	49
ภาพที่ 38 แผ่นประกบริมหัวท้ายฟิ่งแอโนด (ซ้าย) และแคโทด (ขวา) .....	50
ภาพที่ 39 แผ่นฉนวนฟิ่งแอโนด (ซ้าย) และแคโทด (ขวา).....	50
ภาพที่ 40 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงของชุดทดสอบแบบเซลล์เดี่ยว .....	56
ภาพที่ 41 ชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวที่ประกอบเสร็จแล้ว .....	56

ภาพที่ 42	พัลลัม SUNON .....	57
ภาพที่ 43	เส้นโค้ง characteristic ของพัลลัม SUNON รุ่น MC25100V1 .....	58
ภาพที่ 44	เส้นโค้ง characteristic ของพัลลัม SUNON รุ่น MC17080V1 .....	58
ภาพที่ 45	เส้นโค้ง characteristic ของพัลลัม SUNON รุ่น MC17080V2.....	59
ภาพที่ 46	ชุดพัลลัม .....	59
ภาพที่ 47	แท่นทดสอบ .....	60
ภาพที่ 48	วงจรสร้างไฟฟ้ากระแสตรง 5 V .....	61
ภาพที่ 49	User Interface ของ voltage.vi.....	62
ภาพที่ 50	Block diagram ของ voltage.vi.....	62
ภาพที่ 51	การวางชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงลงในส่วนติดตั้งเซลล์เชื้อเพลิงของแท่นทดสอบ .....	63
ภาพที่ 52	การต่อท่อไฮโดรเจนขาเข้าและขาออกของชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว .....	64
ภาพที่ 53	อุปกรณ์ควบคุมความดันไฮโดรเจน.....	64
ภาพที่ 54	การต่อท่อที่เข้ากับวาล์วขดลวด.....	65
ภาพที่ 55	สถานะพร้อมทำงานของแผงวงจรสร้างไฟฟ้า 5 V.....	66
ภาพที่ 56	แผนผังแสดงลำดับเหตุการณ์ผิดปกติในการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง .....	67
ภาพที่ 57	ภาพวาดด้านหน้าและด้านข้างของแผ่นกั้นซีมและแผ่น MEA เพื่อแสดงการเจาะรูแผ่นกั้นซีมเพื่อประกอบแผ่น MEA.....	68
ภาพที่ 58	การเสียรูปของแผ่น MEA เนื่องจากความดันไฮโดรเจน .....	69
ภาพที่ 59	การเสียรูปของแผ่นกั้นซีม เนื่องจากแรงดันของไฮโดรเจน.....	69
ภาพที่ 60	แผ่นรูพรุน .....	70
ภาพที่ 61	แผ่นรูพรุนที่ประกอบเข้ากับชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว.....	71
ภาพที่ 62	ลำดับการประกอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว.....	71
ภาพที่ 63	เซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM แบบ open-slit [6] .....	72
ภาพที่ 64	แผ่นมีรูจากการศึกษาของ Bussayajarn [6].....	73

ภาพที่ 65 ตำแหน่งการวางตัวของรู [68].....	75
ภาพที่ 66 รูปแบบรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1, 2 และ 3 mm [69].....	75
ภาพที่ 67 ภาพวาดแผ่นรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 3 mm พิตช์ 4 และ 6 mm ตามลำดับ.....	76
ภาพที่ 68 แผ่นรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 3 mm พิตช์ 4 และ 6 mm ตามลำดับ.....	76
ภาพที่ 69 ภาพวาดและแผ่นรูพรุนที่เสร็จสมบูรณ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm พิตช์ 4 mm....	77
ภาพที่ 70 เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ 2 mm <sup>2</sup> .....	79
ภาพที่ 71 เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ 5 mm <sup>2</sup> .....	79
ภาพที่ 72 เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ 8 mm <sup>2</sup> .....	80
ภาพที่ 73 เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีสัดส่วนรูปร่างเท่ากับ 0.8.....	81
ภาพที่ 74 เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีสัดส่วนรูปร่างเท่ากับ 1.25.....	81
ภาพที่ 75 เส้นโค้ง hysteresis เต็มพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 2 mm <sup>2</sup> .....	82
ภาพที่ 76 เส้นโค้ง hysteresis เต็มพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 5 mm <sup>2</sup> .....	83
ภาพที่ 77 เส้นโค้ง hysteresis เต็มพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 8 mm <sup>2</sup> .....	83
ภาพที่ 78 เส้นโค้ง hysteresis เต็มพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีสัดส่วนรูปร่างของช่องทางการไหลอากาศเป็น 0.80.....	84
ภาพที่ 79 เส้นโค้ง hysteresis เต็มพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีสัดส่วนรูปร่างของช่องทางการไหลอากาศเป็น 1.25.....	85





ภาพที่ 91 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis n-slew rate 0.3 เต็มพิกัดและครึ่งพิกัด ของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 8 mm<sup>2</sup> และสัดส่วนรูปร่าง 1.25.. 92

ภาพที่ 92 เส้นโค้ง polarization ของชุดทดสอบที่บรรจุแผ่นรูพรุนหลายขนาดที่มีสัดส่วนพื้นที่รู ต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยาคงที่ ..... 93

ภาพที่ 93 เส้นโค้ง polarization แสดงผลการทดสอบชุดทดสอบที่บรรจุแผ่นรูพรุนที่มีสัดส่วน พื้นที่รูต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยาต่างกัน ..... 94

ภาพที่ 94 ตำแหน่ง (x<sub>R</sub>,y<sub>R</sub>) และ (x<sub>L</sub>,y<sub>L</sub>) บน hysteresis loop..... 97

ภาพที่ 95 %Hysteresis จากการทดสอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 2 mm<sup>2</sup> และสัดส่วนรูปร่าง 0.80 (ซ้าย) และ 1.25 (ขวา)..... 97

ภาพที่ 96 %Hysteresis จากการทดสอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 5 mm<sup>2</sup> และสัดส่วนรูปร่าง 0.80 (ซ้าย) และ 1.25 (ขวา)..... 98

ภาพที่ 97 %Hysteresis จากการทดสอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 8 mm<sup>2</sup> และสัดส่วนรูปร่าง 0.80 (ซ้าย) และ 1.25 (ขวา)..... 98

ภาพที่ 98 ราคาต้นทุนการผลิตต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าพิกัดของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ตามรายละเอียดการออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้..... 100

ภาพที่ 99 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนการผลิตต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าพิกัด ระหว่างชุดทดสอบ เซลล์เชื้อเพลิงดั้งเดิมของวิทยานิพนธ์นี้และชุดทดสอบที่ผลิตจากวัสดุทดแทนที่ได้จากการสืบค้น เบื้องต้น..... 101

ภาพที่ 100 การลดลงอย่างต่อเนื่องจากต้นทุนการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ในเซลล์เชื้อเพลิง [70] ..... 102

ภาพที่ 101 KIKUSUI รุ่น PLZ1004W [71] ..... 108

ภาพที่ 102 YUGO รุ่น TG3020E..... 109

ภาพที่ 103 ET-MINI-PWR5 [72]..... 109

ภาพที่ 104 ผังวงจรของ ET-MINI-PWR5 [72]..... 110

ภาพที่ 105 NI 9221 [73] (ซ้าย) และ NI cDAQ-9172 [74] (ขวา) ..... 111

ภาพที่ 106 ขนาดและรายละเอียดของพัดลม SUNON รุ่น MC25100V1 [62]..... 111

ภาพที่ 107 ขนาดและรายละเอียดของพัดลม SUNON® รุ่น MC17080V1 และ MC17080V2  
 [62]..... 112

ภาพที่ 108 ศักย์ไฟฟ้าขาออกของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 5 cm<sup>2</sup>  
 สัดส่วนรูปร่าง 1.25 ขณะสร้างกระแสไฟฟ้า 14 และ 16 A..... 115

ภาพที่ 109 ความสามารถในการสร้างไฟฟ้าของแผ่น MEA ตัวอย่าง 2 แผ่น ที่ไม่คงที่ ..... 116

ภาพที่ 110 น้ำท่วมช่องทางการไหลอากาศ ..... 117

ภาพที่ 111 ศักย์ไฟฟ้าขาออกของชุดทดสอบแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดช่องทางการไหล 5  
 mm<sup>2</sup> สัดส่วนรูปร่าง 0.80 ขณะสร้างกระแสไฟฟ้าขาออกคงตัว ขนาด 8, 10 และ 12 A..... 118

ภาพที่ 112 ศักย์ไฟฟ้าขาออกของชุดทดสอบแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีสัดส่วนรูปร่าง 0.80 ขณะ  
 รับภาระไม่คงตัวแบบครึ่งพิกัดต่ำ ที่ n-slew rate ±0.3 และทำการไล่น้ำใน loop ที่ 30..... 119

ภาพที่ 113 Hysteresis loop ของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว ขนาดพื้นที่ช่องทางการไหล 8 mm<sup>2</sup>  
 สัดส่วนรูปร่าง 0.8 ที่รับภาระครึ่งพิกัดสูง ที่ n-slew rate ±0.3..... 120

ภาพที่ 114 Hysteresis loop ที่แสดงถึงปรากฏการณ์น้ำท่วมในเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบปรกติ  
 [36]..... 120

ภาพที่ 115 น้ำท่วมช่องทางการไหลไฮโดรเจน..... 121

ภาพที่ 116 Hysteresis loop ที่แสดงถึงปรากฏการณ์เซลล์แห้งในเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ  
 ปรกติ [76]..... 121

ภาพที่ 117 การเปรียบเทียบ hysteresis loop ของ loop ที่ 1, 15 และ 30 จากการทดสอบชุด  
 ทดสอบที่มีสัดส่วนรูปร่าง 1.25 ด้วยภาระไม่คงตัว แบบเต็มพิกัด ..... 122

ภาพที่ 118 แผ่น MEA ก่อนทำการทดสอบ ผลกระทบของลักษณะรูพรุนบนแผ่นรูพรุนต่อ  
 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ..... 123

ภาพที่ 119 การเปรียบเทียบสมรรถนะของชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ที่มีขนาดช่องทางการไหล  
 อากาศ 5 mm<sup>2</sup> สัดส่วนรูปร่าง 1.25 และแผ่นรูพรุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm พิตช์ 2  
 mm ที่แตกต่างกันระหว่างการทดสอบครั้งแรกและครั้งต่อมา..... 124

ภาพที่ 120 การเปรียบเทียบสมรรถนะชุดทดสอบดังภาพที่ 109 ซ้ำอีกครั้ง เพื่อแสดงการ  
 เสื่อมสภาพของแผ่น MEA..... 125

ภาพที่ 121 แผ่น MEA ที่ยังไม่ได้ใช้งาน..... 125

ภาพที่ 122 การเปรียบเทียบเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด [80]..... 128

ภาพที่ 123 ความเร็วสัมพัทธ์ของอากาศเมื่อเทียบกับตัวรถ ..... 130

ภาพที่ 124 ช่องสำหรับอากาศที่ป้อนเข้าสู่แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM..... 132

ภาพที่ 125 ภาพจำลองแสดงโดเมนของแบบจำลองเพื่อประเมินความเป็นไปได้ของเซลล์  
เชื้อเพลิง open-cathode PEM ในงานยานยนต์ ..... 132

ภาพที่ 126 แนวคิดการสร้างโดเมนของแบบจำลองในแนวนอน ..... 133

ภาพที่ 127 โดเมนของแบบจำลองแนวนอนโดยโปรแกรม GAMBIT ..... 133



## บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

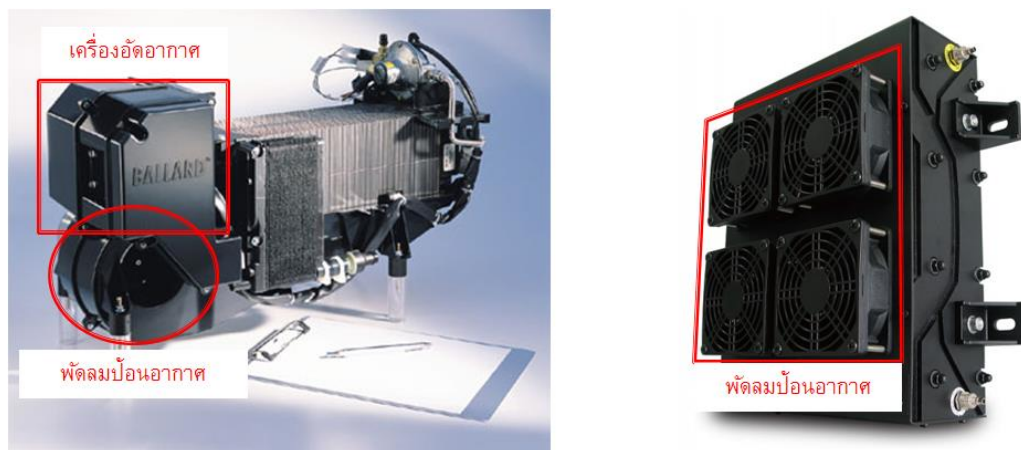
เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) เป็นเทคโนโลยีสะอาดที่ได้รับความสนใจมากขึ้นในสภาวะที่บรรยากาศเป็นมลพิษมากขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จากปฏิกิริยาระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนบนอิเล็กโทรไลต์จะให้น้ำบริสุทธิ์เป็นผลิตภัณฑ์เท่านั้น จึงเป็นข้อได้เปรียบที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงถูกมองหวังให้เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังทดแทน เช่น เครื่องยนต์สันดาปภายในสำหรับใช้ในยานยนต์ เป็นต้น

เซลล์เชื้อเพลิงแบบ proton exchange membrane หรือ polymer electrolyte membrane (PEM) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่มีความโดดเด่นมากที่สุดชนิดหนึ่ง พอลิเมอร์ที่มีชื่อทางการค้าว่า Nafion นิยมใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิง PEM มากที่สุด การสร้างกระแสไฟฟ้าของแผ่นพอลิเมอร์หรือเมมเบรนไม่แตกต่างไปจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น แต่ด้วยน้ำหนักที่เบาและสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้างซึ่งรวมทั้งอุณหภูมิห้องด้วย จึงไม่ต้องการอุปกรณ์ทำความร้อนและลดเวลาช่วงเวลารอก่อนเริ่มทำงานได้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้โดดเด่นด้วยจำนวนอุปกรณ์ช่วยทำงานในระบบที่น้อยกว่า ลดพื้นที่ของอุปกรณ์ เพิ่มพื้นที่ทำงาน และลดน้ำหนักรวมของทั้งระบบ และยังโดดเด่นเป็นอย่างมากในงานด้านยานยนต์

องค์ประกอบหลักของเซลล์เชื้อเพลิง PEM โดยทั่วไปประกอบด้วย เซลล์แกว (fuel cell stack) คือชุดของเซลล์เชื้อเพลิง PEM ที่ต่อกันแบบอนุกรม และอุปกรณ์เสริมการทำงาน ได้แก่ เครื่องอัดอากาศ เพื่อป้อนอากาศจากภายนอก ซึ่งมีส่วนผสมของออกซิเจนอยู่ เข้าสู่เซลล์แกว, ชุดวาล์วควบคุมความดัน เพื่อรักษาระดับความดันของไฮโดรเจนให้พอเหมาะกับการป้อนไฮโดรเจนเข้าสู่เซลล์แกว, พัดลมระบายอากาศ เพื่อช่วยถ่ายเทความร้อนจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีออกสู่ภายนอก, อุปกรณ์วัดค่าสถานะต่าง ๆ และแผงควบคุมการทำงาน หากสังเกตจะพบว่า เครื่องอัดอากาศและพัดลมระบายอากาศ เป็นอุปกรณ์ในระบบเสริมการทำงานที่บริโภคพลังงานสูงที่สุด ทำหน้าที่เหมือนกันในการสร้างความดันให้แก่อากาศ เพื่อผลักดันให้อากาศเคลื่อนที่ ข้อสังเกตนี้ ได้ถูกพัฒนาเป็นเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ในเวลาต่อมา

เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ถูกพัฒนาขึ้นจากความพยายามที่จะลดต้นทุนการผลิตของเซลล์เชื้อเพลิง PEM ทั่วไป ให้มีความเป็นไปได้ในเชิงการผลิตมากขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode มีสองแบบ ได้แก่ แบบ natural และ forced เซลล์เชื้อเพลิงแบบ forced open-cathode ใช้พัดลมแทนเครื่องอัดอากาศในการป้อนอากาศสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบ forced open-cathode ในขณะเดียวกัน ก็ช่วยถ่ายเทความร้อนออกจากเซลล์แกว (ภาพที่ 1) การปรับหน้าที่ของ

อุปกรณ์ในระบบเสริมการทำงานนี้ส่งผลกระทบต่อชิ้นส่วนอื่นในเซลล์แกว เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของแผ่น flowfield เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้พัดลม ซึ่งสามารถสร้างความแตกต่างความดันได้น้อยกว่าเครื่องอัดอากาศที่ขนาดกำลังเท่ากัน



ภาพที่ 1 ความแตกต่างของอุปกรณ์เสริมการทำงาน  
ระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แบบปรกติและแบบ open-cathode

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ทั้งแบบปรกติและแบบ open-cathode ได้ 2 สาเหตุใหญ่ ๆ ได้แก่ ปัญหาการจัดการน้ำและปัญหาอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ และหนึ่งในวิธีการจัดการปัญหาสำคัญทั้งสองนี้คือ การปรับเปลี่ยนรูปร่างของช่องทางการไหลอากาศบนแผ่น flowfield ฝั่งแคโทด

ลักษณะทางกายภาพของช่องทางการไหลอากาศบนแผ่น flowfield ฝั่งแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ส่งผลโดยตรงต่อการทำงานของพัดลม ช่องทางการไหลขนาดเล็กส่งผลให้อัตราการสร้างกระแสไฟฟ้าสูงอย่างสม่ำเสมอตลอดกันทั้งเมมเบรน แต่ต้องการกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าพัดลมมากขึ้น ประสิทธิภาพรวมของทั้งระบบจึงลดลง เพราะสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมากับอุปกรณ์เสริมการทำงานมากขึ้น ส่วนช่องทางการไหลขนาดใหญ่ ขนาดของ rib ถูกบังคับให้ใหญ่ตามไปด้วยเพื่อป้องกันแรงกดทับที่ไม่สม่ำเสมอในเมมเบรนซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้น บริเวณของเมมเบรนที่อยู่ใต้ rib จะไม่ได้รับออกซิเจนเพื่อทำการผลิตกระแสไฟฟ้า และทำให้กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แกวสร้างได้ลดลงเช่นกัน การออกแบบแผ่น flowfield จึงต้องการการพิจารณาอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ที่มีประสิทธิภาพดี

ความสนใจในการปรับสัดส่วนของช่องทางการไหลในงานวิจัยทำให้เกิดตัวแปรสำคัญค่าหนึ่งขึ้นมา คือ aspect ratio ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความกว้างต่อความลึก ในวิทยานิพนธ์นี้จะถูกกล่าวถึง

ในชื่อ “สัดส่วนรูปร่าง” ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมา โดยส่วนใหญ่ ทำการปรับสัดส่วน โดยการกำหนดขนาด ความกว้างหรือความลึกไว้ที่ค่า ๆ หนึ่ง แล้วปรับเพิ่ม/ลดขนาดของอีกค่าหนึ่ง ในมุมมองของผู้จัดทำวิทยานิพนธ์เองแล้ว การปรับค่าเช่นนี้ส่งผลให้ทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก พื้นที่หน้าตัด และความเร็วการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลง ส่งกระทบต่อความดันตกในช่องทางการไหลโดยตรง ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลสรุปว่า สัดส่วนของช่องทางการไหลอากาศส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของเซลล์ เชื้อเพลิง โดยที่สามารถแยกผลกระทบอันเกิดจากสัดส่วนรูปร่างและขนาดพื้นที่การไหลออกจากกัน ได้อย่างชัดเจน

วิทยานิพนธ์นี้จึงจัดทำขึ้น เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode เมื่อสัดส่วนรูปร่างของช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield ของอากาศแตกต่างกัน โดยที่ขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลมีค่าคงที่ เพื่อง่ายต่อการสังเกตว่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นเป็นพฤติกรรมที่เซลล์เชื้อเพลิงตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนนี้จริงหรือไม่ ช่องทางการไหลอีกสองชุดที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดต่างไปจะถูกนำมาทดสอบเปรียบเทียบ เพื่อให้มั่นใจในแนวโน้มของผลลัพธ์ เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ที่มี flowfield ขนาดต่าง ๆ กันจะถูกสร้างขึ้นจริงเพื่อทำการทดลอง

พฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่แสดงออกต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของช่องทางการไหล ถูกตรวจวัดผ่านทางเส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า เพื่อบ่งบอกถึงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

## 1.2 จุดประสงค์และขอบเขตการทำงาน

### 1.2.1 จุดประสงค์

- พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ forced-air open-cathode
- ศึกษาผลของสัดส่วนของช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode

### 1.2.2 ขอบเขตการทดสอบ

- เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ขนาด 1 เซลล์ จะถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นชุดทดสอบ จำนวน 6 ชุด ตามจำนวนรูปแบบช่องทางการไหลฝั่งแคโรตที่ต้องการศึกษา (2 สัดส่วนรูปร่าง และ 3 ขนาดพื้นที่การไหล)

- ขนาด active area ของ MEA ถูกกำหนดไว้ที่ 50 – 200 cm<sup>2</sup> ซึ่งเป็นขนาดที่ใหญ่กว่าระดับงานการวิจัย แต่ไม่ใหญ่กว่าระดับใช้งานจริง เนื่องจากผลการศึกษาจะนำไปประยุกต์เพื่อสร้างเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 2 kW ในอนาคต
- การประเมินสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงกระทำโดยการวัดขนาดกระแสและศักย์ไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ และนำผลมาสร้างกราฟเส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า
- การทดสอบจะถูกกระทำภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อให้ผลการทดสอบเชื่อถือได้

### 1.3 ขั้นตอนการทำงาน

- ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- กำหนดปัญหาและแนวทางการศึกษาออกแบบการทดลอง
- ออกแบบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวและสิ่งผลิต
- ประกอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวและอุปกรณ์ตรวจวัด และตรวจสอบความเรียบร้อย
- ทำการทดลองชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว
- ทำการทดลองผลของรูปร่างของแผ่นรูพรุนต่อสมรรถนะของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว
- วิเคราะห์ผลการทดลอง
- สรุปผลการทดลอง
- ทำรายงานและเตรียมตัวนำเสนอ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- เรียนรู้ขั้นตอนการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode
- ทราบแนวทางการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ forced open-cathode ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และเล็งเห็นถึงแนวทางการพัฒนาในอนาคต
- เข้าใจถึงการตอบสนองต่อภาระภายนอกแบบต่าง ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode
- ทราบว่าสัดส่วนรูปร่างส่งผลต่อเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ forced open-cathode ที่ทำงานในสภาพภูมิอากาศที่มีความชื้นสูงอย่างประเทศไทยอย่างไร



- ชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวและแท่นทดสอบที่สร้างขึ้นจริง จะเป็นตัวอย่างที่เป็นรูปธรรมแก่นักวิจัยรุ่นต่อไป ทั้งในด้านการนำไปใช้ต่อ ผลิตซ้ำ หรือพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นไป เพื่อทำการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิง PEM ต่อไป
- ความรู้ที่ได้จากการวิทยานิพนธ์นี้ จะถูกนำไปประยุกต์เพื่อสร้างเซลล์เชื้อเพลิง PEM แลวงขนาดใหญ่ในอนาคต

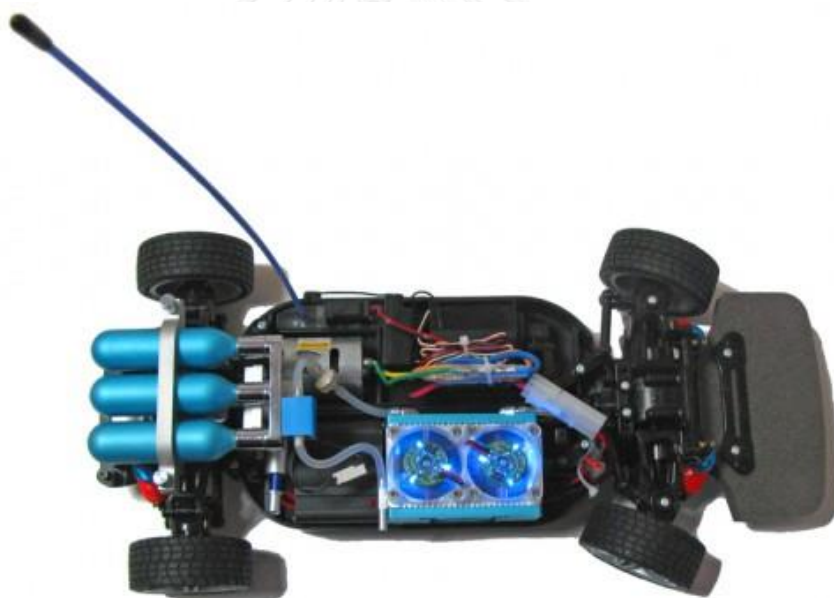


## บทที่ 2 ปรัชน์วรรณกรรม

### 2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบ Proton Exchange Membrane

เซลล์เชื้อเพลิงแบบ proton exchange membrane (PEMFC) หรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบ polymer electrolyte (PEFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่ใช้ไอเลคโตรไลต์เป็นพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ด้วยคุณสมบัติที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้องและให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดในกลุ่มของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยกัน [1] จึงทำให้ PEMFC โดดเด่นกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆในงานยานยนต์ [2]

นอกจากความโดดเด่นด้านการใช้งานในยานยนต์แล้ว PEMFC ยังมีช่วงขนาดใช้งานที่กว้างมาก พกพาได้ และทำงานที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พบ PEMFC ถูกผลิตเป็นสินค้าอุปโภคหลายรูปแบบ เช่น รถยนต์บังคับ (ภาพที่ 2), เครื่องชาร์จแบตเตอรี่พกพา (ภาพที่ 3) เป็นต้น



ภาพที่ 2 Hydrogen Fuel Cell RC Car [3]

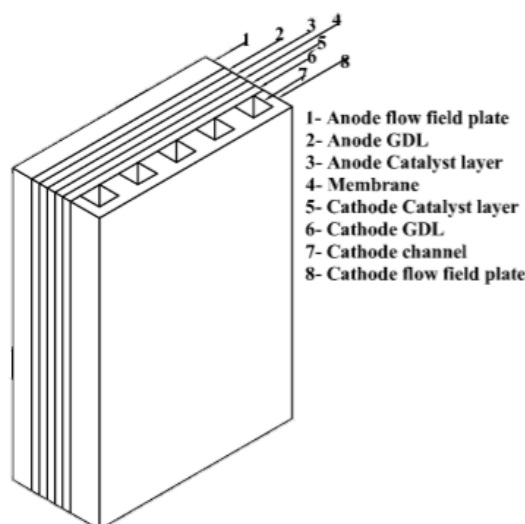


ภาพที่ 3 PowerTrek fuel cell charger [4]

## 2.2 เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ Open-Cathode

ระบบเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM ถูกพัฒนาขึ้นจากความพยายามที่จะลดต้นทุนการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมของ PEMFC [5] โดยการลดจำนวนอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ทับซ้อนกันออกไป เพื่อให้ open-cathode PEMFC เป็นเรื่องจริงของต้นก้างกลางเลือกใหม่ในยานยนต์ จึงทำให้เกิดความแตกต่างที่ชัดเจนของ open-cathode PEMFC จาก PEMFC ปกติ การป้อนอากาศเข้าสู่เซลล์แถวของ open-cathode PEMFC นั้น กระทำเพื่อป้อนออกซิเจน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้า และเพื่อระบายความร้อนจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี การป้อนอากาศจึงอาจกระทำโดยพัดลมหรืออาศัยการไหลของอากาศในธรรมชาติโดยตรง เครื่องอัดอากาศจึงไม่มีความจำเป็น ณ ที่นี้ อุปกรณ์อีกชนิดที่ถูกตัดออกจากระบบเสริมการทำงานคือ เครื่องสร้างความชื้น (humidifier) Membrane ของ open-cathode PEMFC ถูกพัฒนาให้เป็นแบบ self-humidified ที่สามารถสะสมความชื้นจากปฏิกิริยาสร้างกระแสไฟฟ้าและจากความชื้นในอากาศโดยตรง [6]

ส่วนประกอบภายในเซลล์เชื้อเพลิง PEM 1 เซลล์ ประกอบด้วยแผ่นสองขั้ว (Bipolar) หรือแผ่น flowfield ทำหน้าที่ควบคุมเส้นทางการไหลของสารตั้งต้นทั้งสอง ถัดเข้ามา คือ gas diffusion layer (GDL) เพื่อแพร่สารตั้งต้นให้กระจายเข้าสู่เมมเบรนอย่างทั่วถึง และ catalyst layer ที่มีส่วนผสมของแพลตินัมเพื่อช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา สุดท้าย พอลิเมอร์เมมเบรน หรือ PEM อยู่ตรงกลางของเซลล์ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบภายในเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode 1 เซลล์ [7]

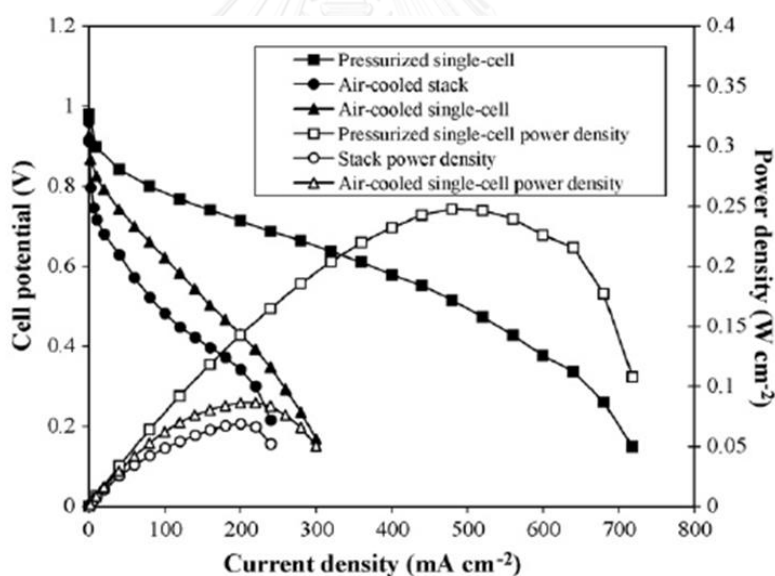
Open-cathode PEMFC มีอยู่สองรูปแบบ คือ natural และ forced เซลล์เชื้อเพลิง natural open-cathode หรือ natural-convection open-cathode และ forced open-cathode หรือ forced-air แตกต่างกันตรงที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิง forced open-cathode มีพัดลมช่วยเพิ่มอัตราการไหลของมวลอากาศเข้าสู่เซลล์แถว ขณะที่เซลล์เชื้อเพลิง natural open-cathode ไม่มีอุปกรณ์ช่วยนี้

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาแสดงพบว่าระบบ open-cathode PEMFC แบบ natural convection ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าแบบ forced-air [8] เนื่องจากอากาศไหลเข้าสู่ membrane อย่างอิสระโดยอาศัยการพาความร้อนจากความแตกต่างของอุณหภูมิเท่านั้น อัตราการถ่ายเทออกซิเจนจึงไม่เพียงพอ นอกจากนี้ การถ่ายเทความร้อนที่จำกัดทำให้น้ำระเหยออกจากเซลล์และทำให้ membrane ขาดน้ำ ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าลดลง จึงไม่สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าปริมาณมากได้ [9]

สำหรับ forced open-cathode PEMFC ที่มีระบบป้อนอากาศเป็นส่วนประกอบเพิ่มเติม ภาวการณ์น้ำท่วมเป็นปัญหาที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบ งานวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งสู่การปรับรูปร่างของช่องทางการไหลของอากาศ [10] และปรับปรุงการควบคุมพัดลมป้อนอากาศ [11] บางงานวิจัยสนใจศึกษาส่วนผสมทางเคมี catalyst layer และ GDL รวมไปถึงการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆในแบบจำลอง [12] และการจัดเรียงชั้นของ membrane electrode assembly (MEA) [13] อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยความหนาแน่นกระแสและกำลังไฟฟ้าของ forced open-cathode PEMFC ยังคงต่ำกว่า PEMFC แบบปกติ เนื่องจากปัญหาการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอของแต่ละเซลล์ในเซลล์แถว [14]

### 2.3 แนวทางการพัฒนา open-cathode PEMFC

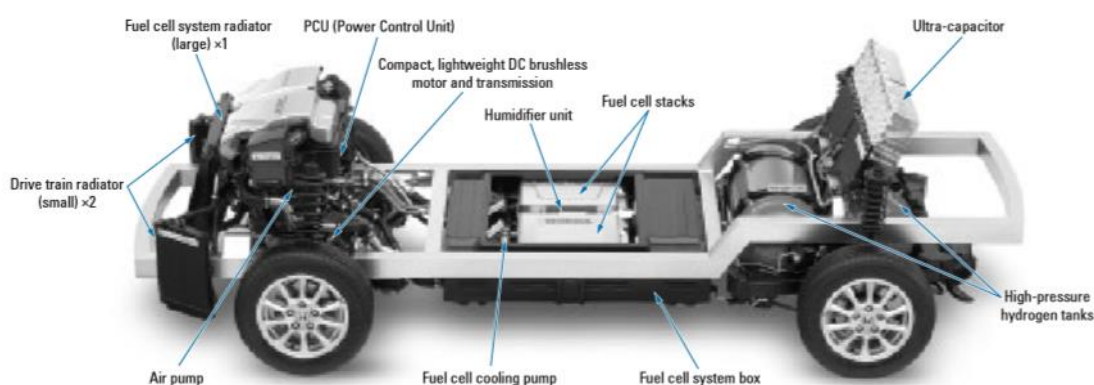
Open-cathode PEMFC ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยการลดอุปกรณ์ที่ทำงานทับซ้อนกันและลดภาระของอุปกรณ์ในระบบเสริมลงดังที่กล่าวแล้ว เมื่อคำนึงถึงความจริงที่ว่า กำลังไฟฟ้าจาก PEMFC ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อป้อนสู่ภาระภายนอกจะมีสัดส่วนมากขึ้นเมื่อเทียบกับกำลังที่สูญเสียให้แก่อุปกรณ์ในระบบเสริมการทำงาน จึงคาดหวังได้เช่นกันว่า ประสิทธิภาพรวมของ open-cathode PEMFC ทั้งระบบจะมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแล้วกลับพบว่า การลดอุปกรณ์ในระบบเสริมการทำงานออกไปส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดังที่เห็นได้จากการเปรียบเทียบ polarization curve ระหว่าง open-cathode PEMFC [10-12] และ PEMFC แบบปรกติ [14, 15] ซึ่ง Wu [16] ได้แสดงถึงการเปรียบเทียบนี้ไว้เช่นกันในภาพที่ 5 เซลล์เชื้อเพลิง PEMFC ทั่วไป (pressurized single-cell) สามารถให้ความหนาแน่นกระแสและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode (air-cooled) อยู่กว่าหนึ่งเท่าหรือกว่า 100% เมื่อเทียบกับค่าจากเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode



ภาพที่ 5 เส้นโค้ง Polarization ของความหนาแน่นพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้เครื่องอัดอากาศและเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode แบบเซลล์เดี่ยวและแบบเซลล์แถว [16]

จากปัญหาที่กล่าวไปข้างต้น ทำให้ในปัจจุบัน ความเป็นไปได้ของรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงยังคงอยู่ในส่วนของ PEMFC แบบปรกติเสียมากกว่า ดังที่สังเกตได้จากรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงที่มีขายเชิงพาณิชย์ เช่น Honda Fuel Cell Power FCX [17] ในภาพที่ 6 เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนึงถึงปัจจัยสำคัญที่จะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ [5] อันได้แก่ ความไม่ซับซ้อนของ

ระบบ น้ำหนัก และการลดปริมาตรรวมของระบบลง อีกทั้งยังไม่มีนักวิจัยท่านใดประเมินว่า เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าขาออกสุทธิและต้นทุนการผลิต (ซึ่งมีอุปกรณ์ในระบบน้อยกว่า และความซับซ้อนในการประกอบน้อยกว่า) ระหว่าง PEMFC แบบปรกติและแบบ open-cathode และสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าขาออกสุทธิต่อน้ำหนักระบบเซลล์เชื้อเพลิง การมองข้าม open-cathode PEMFC ตั้งแต่เพิ่งเริ่มเป็นที่สนใจในเชิงการวิจัยนี้ จึงเป็นการตัดสินใจที่เร็วเกินไป

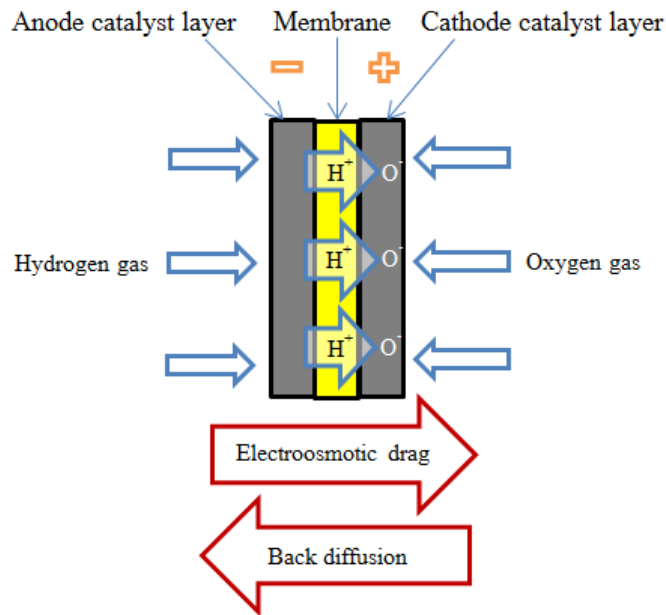


ภาพที่ 6 โครงร่างของระบบกำลังของรถยนต์ Honda Fuel Cell Power FCX [17]

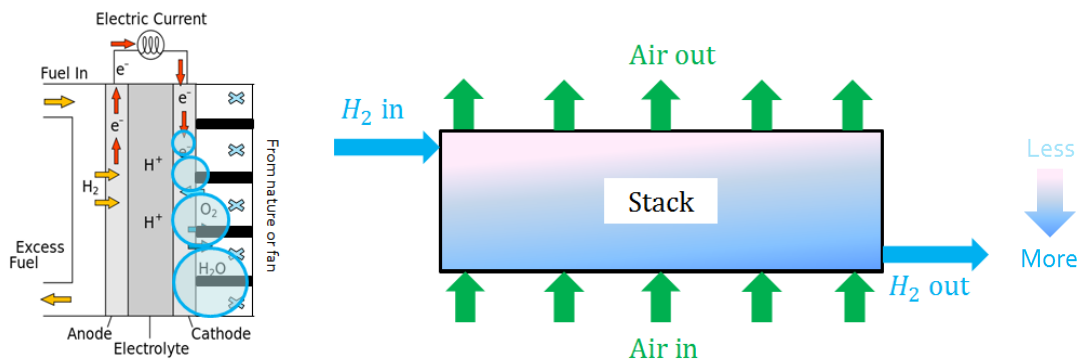
เมื่อศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับ open-cathode PEMFC พบว่าการศึกษาเพื่อเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง สนใจอยู่ในขอบเขตเพียงเซลล์เดียว โดยปัญหาหลักที่นักวิจัยให้ความสนใจเนื่องจากส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์และลดอายุการใช้งานลง คือ ปัญหาการจัดการน้ำในเซลล์แวมและปัญหาอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะกล่าวถึงที่มาของแต่ละปัญหาในลำดับถัดไป

### 2.3.1 ปัญหาการจัดการน้ำภายในเซลล์

น้ำปริมาณที่เหมาะสม ช่วยการนำโปรตอนและเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีบน membrane แต่น้ำในสถานะของเหลวเป็นตัวการสำคัญที่ขัดขวางการเดินทางของออกซิเจนเข้าสู่ membrane [18] ภาพที่ 7 แสดงทิศทางการแพร่ของน้ำอันเกิดจากแรงสองชนิด คือ electroosmotic drag และ back diffusion ซึ่ง electroosmotic drag มีทิศจากฝั่งแอโนดไปยังฝั่งแคโทด ส่วน back diffusion มีทิศจากฝั่งแคโทดไปยังฝั่งแอโนด แรงทั้งสองชนิดนี้มีผลสำคัญต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์การเกิดน้ำท่วมและเซลล์ขาดน้ำ (ภาพที่ 8) ในเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง



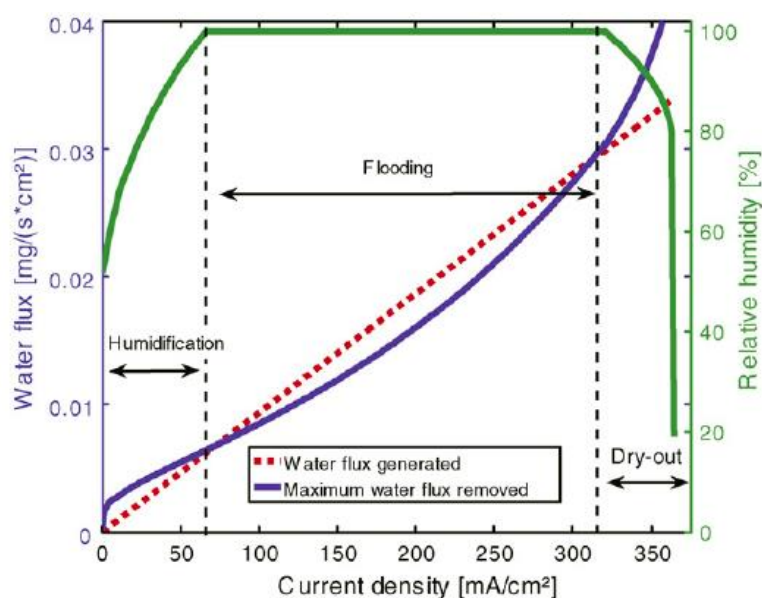
ภาพที่ 7 ปฏิกริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงและแรงที่เกี่ยวข้องในการถ่ายเทน้ำ



ภาพที่ 8 ปัญหาการจัดการน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แบบ open-cathode ทั้งแบบเซลล์เดี่ยว (ซ้าย) และเซลล์แถว (ขวา) โดยสังเขป

ปัญหาการจัดการน้ำในเซลล์ก่อให้เกิดเหตุการณ์สำคัญสองอย่าง ได้แก่ น้ำท่วมเซลล์ และเซลล์แห้ง ภาพที่ 9 ได้แสดงถึงปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นในเซลล์และอัตราการถ่ายเทน้ำออกจากระบบที่แต่ละค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง PEM หนึ่ง เพื่ออธิบายถึงที่มาของเหตุการณ์น้ำท่วมและเซลล์แห้ง [9] ขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงสร้างกระแสไฟฟ้า แรง electroosmotic drag จะเกิดขึ้นและเพิ่มขึ้นตามขนาดภาระ เพื่อดึงน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยามายังฝั่งแคโทด เมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นหรือเซลล์เชื้อเพลิงสร้างกระแสไฟฟ้ามากขึ้น น้ำจากอากาศที่ป้อนเข้ามาสะสมตัวและขัดขวางออกซิเจนไม่ให้ผ่าน gas diffusion layer (GDL) เข้าสู่ membrane ทางฝั่งแคโทด ปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดขึ้นทั่วแผ่น MEA ได้ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

ลดลง ในขณะที่แรง electroosmotic drag มีอิทธิพลมากกว่า back diffusion หากช่องทางการไหลของอากาศไม่ได้ถูกออกแบบมาอย่างดีและเซลล์เชื้อเพลิงไม่มีระบบไล่น้ำ เซลล์อาจพบกับภาวะน้ำท่วมได้ ในทางตรงข้าม การสะสมตัวของน้ำทางฝั่งแคโทดที่มากกว่าทางฝั่งแอโนดจะทำให้เกิด back diffusion และเมื่อ back diffusion มีค่ามากกว่า electroosmotic drag เซลล์จะพบกับภาวะขาดน้ำ [7] อย่างไรก็ตาม ลำดับการเกิดน้ำท่วมก่อนเกิดเซลล์แห้งที่ความหนาแน่นกระแสสูงไม่ได้เป็นตามภาพที่ 9 เสมอไป ความชื้นและอุณหภูมิป้อนเข้าของสารตั้งต้น และการออกแบบช่องทางการไหล ทำให้เหตุการณ์ทางน้ำในแต่ละเซลล์เชื้อเพลิงแตกต่างกันออกไปได้ [12, 19]



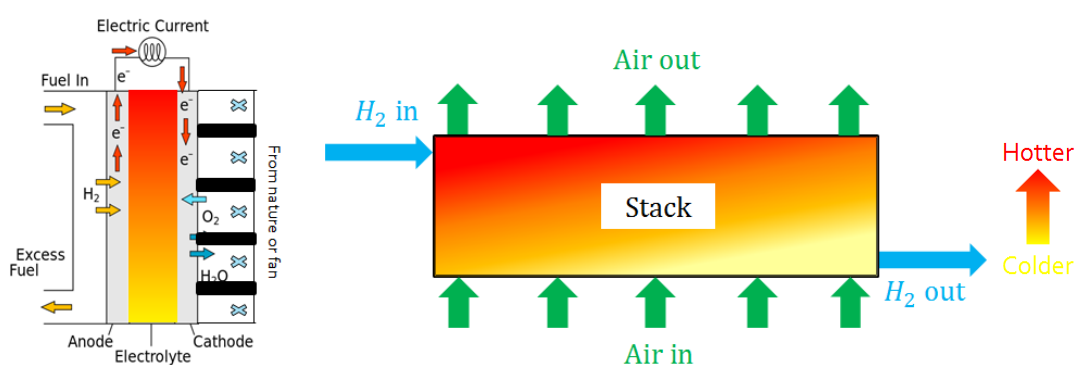
ภาพที่ 9 ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับน้ำที่เกิดขึ้นได้ในเซลล์เชื้อเพลิง [9]

นอกจากอิทธิพลจากการแพร่ของน้ำแล้ว ความร้อนจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ณ ภาวะที่เซลล์เชื้อเพลิงรับภาระสูงก็มีส่วนให้เซลล์ขาดน้ำด้วยเช่นกัน เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงสร้างกระแสไฟฟ้าปริมาณมาก ความร้อนจากปฏิกิริยาก็มากด้วยเช่นกัน ความร้อนเหล่านี้มีผลต่อน้ำในเซลล์แฉวเช่นกัน ความร้อนจะถูกถ่ายเทออกมากที่สุดผ่านทางอากาศที่ป้อนเข้าสู่เซลล์แฉว น้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ไม่ถูกการแพร่ย้อนกลับดึงไปฝั่งแอโนดจะถูกความร้อนเหล่านี้จนกลายเป็นไอและระเหยไปพร้อมกับอากาศขาออก จนทำให้ membrane ทั้ง membrane ที่แห้งจะสูญเสียความสามารถในการขนส่งโปรตอน ทำให้ความต้านทาน ionic เพิ่มขึ้น และศักย์ไฟฟ้าขาออกลด ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง [1]



### 2.3.2 ปัญหาอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ

อีกสาเหตุสำคัญที่ทำให้สมรรถภาพของ open-cathode PEMFC ต่ำ คือ ปัญหาอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ (ภาพที่ 10) อุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอตลอดเซลล์แถวทำให้ความต้านทานภายในเซลล์เพิ่มขึ้น และลดประสิทธิภาพสุทธิ ความแตกต่างของอุณหภูมิยังทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal stress) ที่ไม่เท่ากันบนแผ่น MEA เมื่อใช้งานในระยะยาวแล้ว ความเค้นนี้จะทำให้แผ่น MEA เสื่อมสภาพ ทั้งการแตกร้าว (cracking) และการแยกชั้น (delamination) จุดที่เกิดการเสื่อมสภาพนี้จะกลายเป็นบริเวณรวมตัวของน้ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงในที่สุด [20]

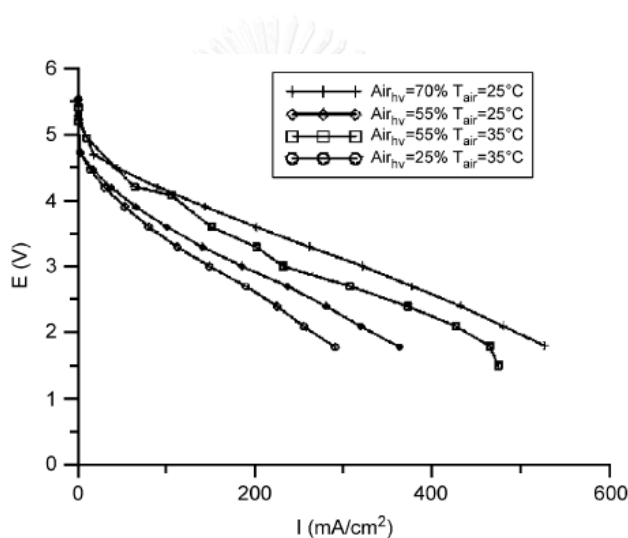


ภาพที่ 10 ปัญหาอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แบบ open-cathode ทั้งแบบเซลล์เดี่ยว (ซ้าย) และเซลล์แถว (ขวา) โดยสังเขป

การศึกษาปัญหาทางความร้อนในเซลล์เชื้อเพลิงมักสนใจความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์แถวกับสภาพแวดล้อม [7, 11] และระหว่างแต่ละเซลล์ [16] มากกว่าความแตกต่างภายในเซลล์ เพราะมีค่าไม่มากจนมีนัยสำคัญ (ประมาณ 5 องศาเซลเซียส สำหรับความแตกต่างสูงสุดของอุณหภูมิภายในเซลล์ เมื่ออุณหภูมิภายในเซลล์มีค่าประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส [21]) และอีกทั้งการประเมินความสามารถของเซลล์เชื้อเพลิงในระดับเซลล์ประเมินจากความหนาแน่นกระแสและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าบอกได้ถึงความสามารถของเซลล์อยู่แล้ว การศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเซลล์จึงถูกละไปในวิทยานิพนธ์นี้

ถึงแม้ว่าปัญหาอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอจะพบได้เช่นกันใน PEMFC ทั่วไป แต่สถานการณ์ที่เกิดขึ้นกับ open-cathode PEMFC นั้นรุนแรงกว่าและคาดเดาได้ยากกว่า [19] สาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากไม่มีเครื่องสร้างความชื้น แม้ว่า membrane ของ open-cathode PEMFC จะเป็นแบบ self-humidified หรือสามารถเก็บกักความชื้นไว้ได้เอง แต่ Jung [22] พบว่า การเพิ่มความชื้นและอุณหภูมิให้แก่อากาศที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง โดยเฉพาะการเพิ่มความชื้นในอากาศป้อนเข้า ส่งผล

ให้ประสิทธิภาพในการสร้างกำลังไฟฟ้าของ membrane ดีขึ้นดังแสดงในภาพที่ 11 นั้นแสดงว่า โดยลำพังแล้วคุณสมบัติ self-humidified ของ membrane ยังไม่สามารถทดแทนการใช้เครื่องสร้างความชื้นได้เพียงพอ แต่เมื่อพิจารณาสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยที่มีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 60-80 [23] และมีอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งประเทศประมาณ 20-35°C [24] เปรียบเทียบกับค่าความชื้นและอุณหภูมิที่ถูกแนะนำโดย Chu [25] (สภาพสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการทำงานของ open-cathode PEMFC คือ ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่าร้อยละ 30 และอุณหภูมิอยู่ในช่วง 20 - 40°C) การศึกษานี้จึงละการพิจารณาการผลกระทบของความร้อนและความชื้นในอากาศต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงไป เนื่องจากสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยที่ส่งเสริมการทำงานของ open-cathode PEMFC อยู่แล้ว

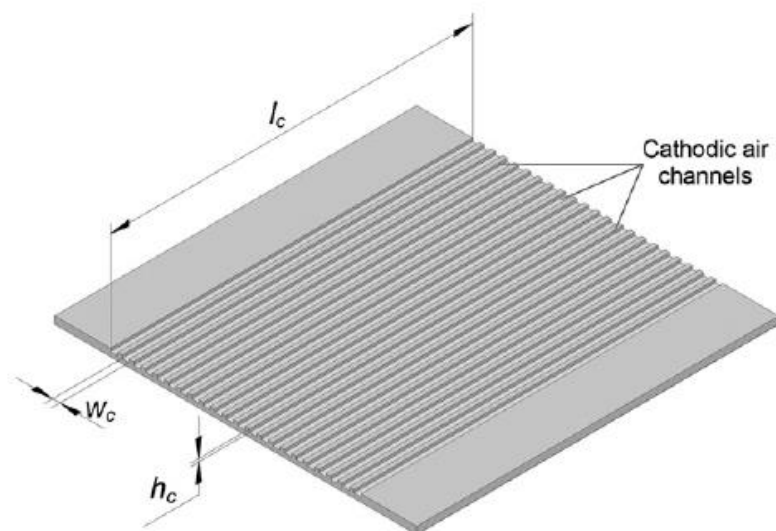


ภาพที่ 11 ผลจากความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อการทำงานของเซลล์แกว [22]

วิธีการหนึ่งที่ได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่องเพื่อพัฒนาการจัดการน้ำในเซลล์เชื้อเพลิง คือ การปรับสัดส่วนของช่องทางการไหลที่เหมาะสมที่สุด (optimization) และการพัฒนาระบบพัดลมควบคู่กันไป

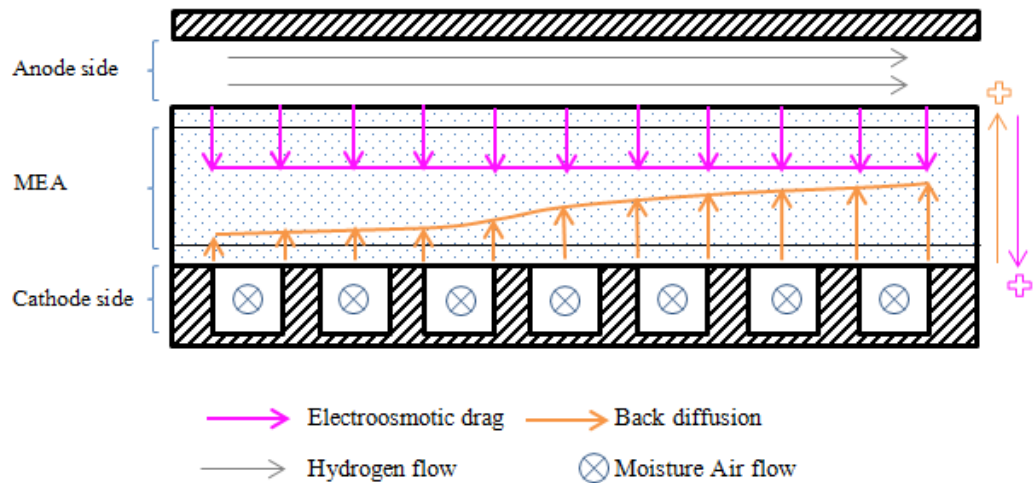
## 2.4 การศึกษาเกี่ยวกับช่องทางการไหลของ Open-Cathode PEMFC

รูปแบบของแผ่น flowfield ทางด้านแคโทด (อากาศ) ภายใน open-cathode PEMFC มีหลายแบบ สำหรับการศึกษเกี่ยวกับช่องทางการไหลในบ่อนี้ จะสนใจเฉพาะแผ่น flowfield แบบที่นิยมมากที่สุด นั่นคือ ช่องทางการไหลแบบตรง (straight channel) ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ช่องทางการไหลแบบตรง [26]

การถ่ายเทน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ หากอากาศมีความชื้นและอุณหภูมิแตกต่างกันอัตราการถ่ายเทน้ำนี้ก็เปลี่ยนไปเช่นกัน ภาพที่ 13 แสดงถึงการเคลื่อนตัวของน้ำภายใน MEA ซึ่งมีแรงกระทำต่อน้ำในทิศทางที่ต่างกันสองแรง คือ electroosmotic drag และ back diffusion ที่เปลี่ยนไปตามเส้นทางการไหลของแก๊สไฮโดรเจน รูปแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำที่สะสมในแต่ละส่วนของ MEA ไม่เท่ากันแม้แต่ภายในเซลล์เดียวกันก็ตาม ขนาดแรง electroosmotic drag สม่่าเสมอเนื่องจากปริมาณการสร้างกระแสไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันในเซลล์ ส่วนขนาดแรง back diffusion แปรผันไปตามปริมาณน้ำที่สะสมในฝั่งแคโทด ซึ่งเพิ่มขึ้นตามเส้นทางการไหลของแก๊สไฮโดรเจน นั้นทำให้ปริมาณน้ำสะสมตัวอยู่ฝั่งแคโทดมากและฝั่งแอโนดแห่งบริเวณทางเข้าของแก๊สไฮโดรเจน และปริมาณสะสมได้ฝั่งแคโทดจะลดลงจนกลายเป็นแห้ง ส่วนทางกับฝั่งแอโนดที่มีน้ำไปสะสมมากขึ้นบริเวณปลายเส้นทางการไหลของไฮโดรเจน



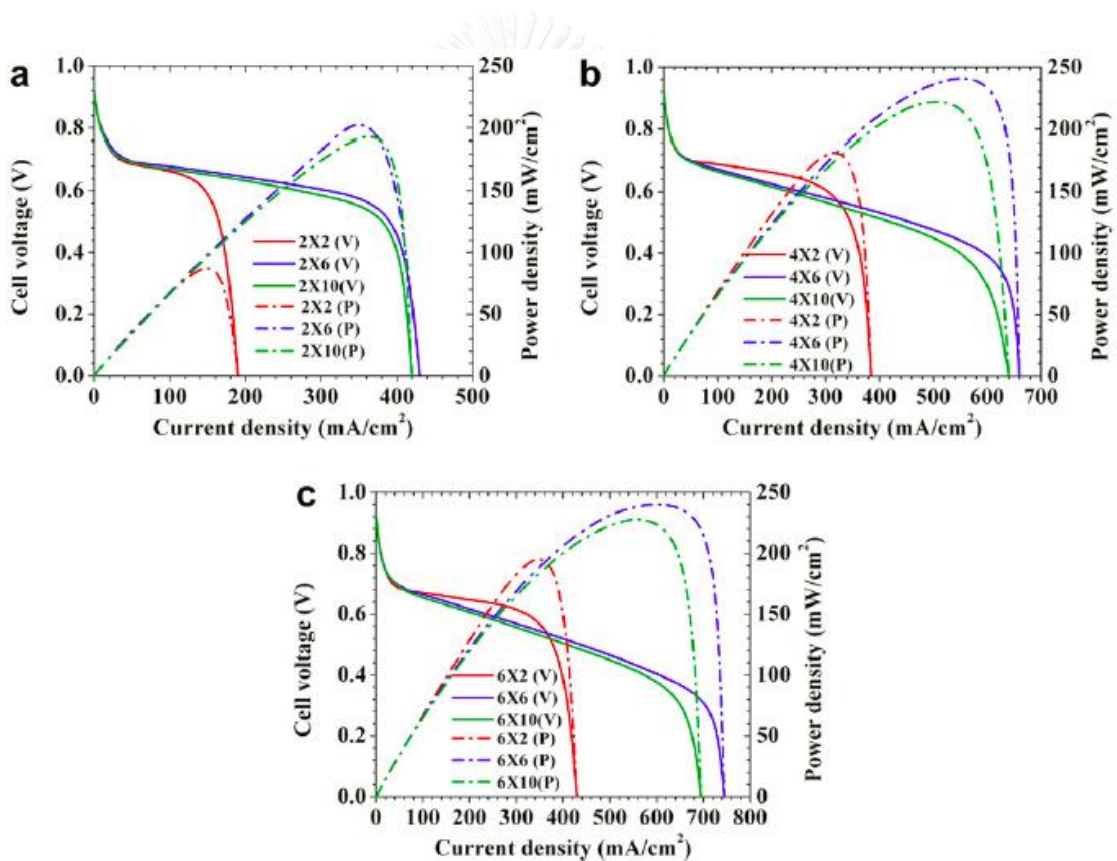
ภาพที่ 13 ทิศทางและขนาดของแรง electroosmotic drag และ back diffusion ของน้ำ

ปรากฏการณ์น้ำท่วมและเซลล์แห้ง เกิดจากปัจจัยทางฝั่งแคโทดเป็นส่วนใหญ่ ปัญหาน้ำท่วมไม่เกิดขึ้นที่ช่องการไหลฝั่งแอโนด [14, 26, 27] งานศึกษาจึงมุ่งสนใจทำการศึกษาในด้านแคโทดเป็นหลัก กรณีของน้ำท่วมเซลล์ น้ำที่สะสมทางแอโนดถูกขับออกจากเส้นทางการไหลของไฮโดรเจนได้อย่างง่ายดายด้วยความดันไฮโดรเจนที่สูงอยู่แล้ว ขณะที่ทางฝั่งแคโทด พัดลมไม่อาจสร้างความดันได้สูงเท่า กรณีเซลล์แห้ง ฝั่งแอโนดจะแห้งเพียงบริเวณเล็กๆ ใกล้ช่องทางเข้าของแก๊สไฮโดรเจนหรือบริเวณที่มีแรงดันของแก๊สไฮโดรเจนสูงและมี back diffusion น้อย อีกทั้งรูปแบบเส้นทางการไหลแบบปิดของไฮโดรเจน ความชื้นจะไม่ถูกขับออกไปโดยทันที ในทางกลับกัน หากความร้อนจากการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงหรือความร้อนของอากาศแวดล้อมสูงและมีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศน้อย น้ำสามารถระเหยออกจากเซลล์ได้ง่ายทางด้านแคโทดที่เปิดสู่ภายนอกโดยตรง ด้วยเหตุผลเหล่านี้ ทำให้ช่องทางการไหลฝั่งแคโทดจึงมักถูกพิจารณา optimize ทั้งเพื่อลดภาระของพัดลม จัดการน้ำในเซลล์และสำคัญที่สุด คือ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

รูปแบบของ flowfield ที่ง่ายที่สุดและเผยแพร่มากสำหรับ open-cathode PEMFC ในเชิงพาณิชย์ คือ ช่องทางการไหลทางตรง ดังที่กล่าวไปแล้ว เพราะฉะนั้น พื้นที่หน้าตัด ความกว้าง และความลึกของช่องทางจึงเป็นค่าที่สำคัญที่ถูกใช้เพื่อ optimization ที่อัตราการไหลอากาศหนึ่ง ๆ นั้น

ถึงแม้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นชนิด PEM เหมือนกัน แต่การป้อนอากาศต่างกัน ผลการวิจัยเกี่ยวกับผลของรูปร่างของช่องทางการไหลต่อสมรรถนะจึงมีทั้งที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและแตกต่างกัน ในการศึกษาเกี่ยวกับช่องทางการไหลใน PEMFC แบบปรกติ ช่องทางการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กกว่าจะทำให้อากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้นซึ่งนั่นช่วยกำจัดน้ำที่ขัดขวางการไหลได้ และช่วยให้ uniformity ของการไหลของอากาศดีขึ้นซึ่งช่วยให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเกิดอย่าง

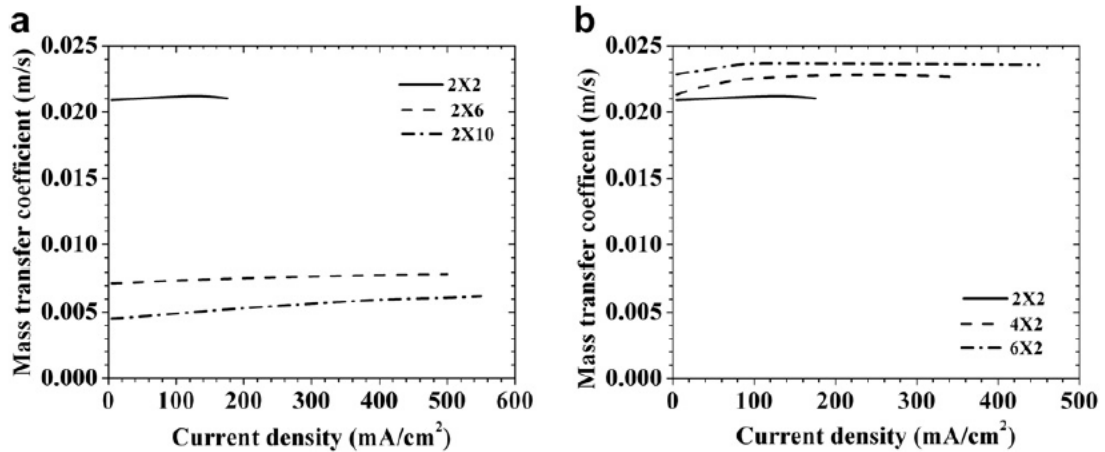
สม่ำเสมอมากขึ้น แต่เพิ่มความดันตกในเส้นทางการไหล ทำให้ภาวะของพัดลมมากขึ้น [10] สำหรับ open-cathode PEMFC แบบ natural convection แล้ว พื้นที่หน้าตัดช่องทางไหลที่เล็กทำให้แรงลอยตัวของอากาศมีค่าไม่มากพอที่จะเอาชนะความต้านทานการไหล ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดถูกจำกัด เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศน้อยกว่าในช่องทางไหลขนาดใหญ่ [7] ดังภาพที่ 14 และในปัจจุบันนี้ ยังไม่มีผู้ทำการศึกษาผลของขนาดช่องทางไหลของอากาศต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM แบบ forced-air โดยตรง อย่างไรก็ตามงานวิจัยได้ออกแบบและสร้างเซลล์เชื้อเพลิง forced-air open-cathode ด้วยหลักการเช่นเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบปรกติ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงนี้สามารถทำงานได้ใกล้เคียงความมุ่งหวัง [11] นั้นแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่เซลล์เชื้อเพลิง forced-air open-cathode PEM จะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับแบบปรกติ



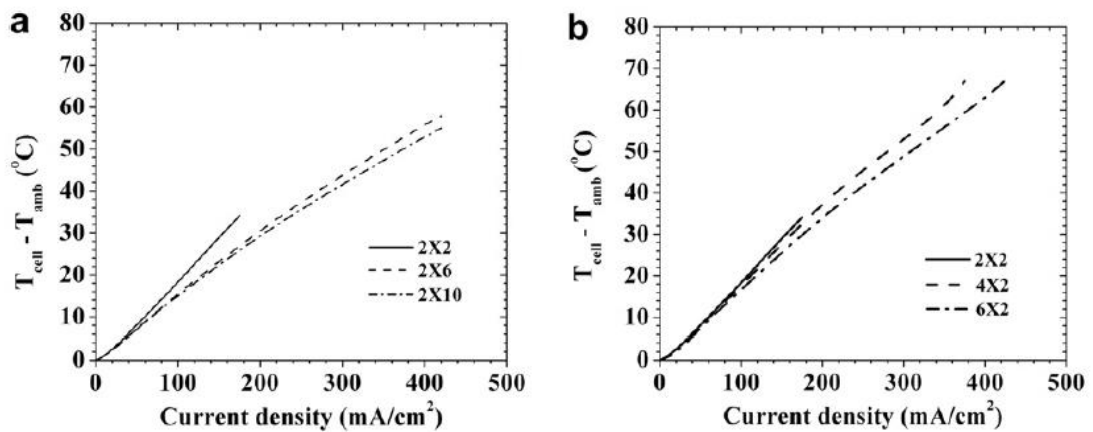
ภาพที่ 14 เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังของเซลล์เชื้อเพลิง natural open-cathode PEM ที่มีช่องทางไหลขนาดต่างกัน [7]

ผลกระทบจากการปรับสัดส่วนของช่องทางไหลอากาศของเซลล์เชื้อเพลิง PEM ทั้งแบบปรกติ [15, 28] และ open-cathode [7] ส่วนมากเป็นไปในทิศทางเดียวกัน การเพิ่มขนาดความกว้างถูกระบุว่าเป็นการเพิ่มพื้นที่ให้ออกซิเจนในอากาศซึมเข้าสู่ MEA ได้มากขึ้นดังภาพที่ 15 [29]

นอกจากนี้ การเพิ่มขนาดความลึกถูกค้นพบว่าช่วยลดความแตกต่างของอุณหภูมิลงได้มากกว่าการเพิ่มความกว้างดังภาพที่ 16



ภาพที่ 15 ความแตกต่างของอัตราการถ่ายเทออกซิเจนจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างช่องทางการไหลอากาศ [7]



ภาพที่ 16 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงจากการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างช่องทางการไหลอากาศ [7]

นอกจากสัดส่วนและพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลแล้ว รูปร่างของ rib ก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่น่าสนใจในการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบปรกติ แผ่น flowfield ที่มี rib กว้าง จะช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและกระจายแรงอัดจากทั้งความเค้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเค้นจากการประกอบเซลล์แวงเอง [19, 30, 31] แต่ rib ที่มีขนาดกว้างเกินไปจะพบกับปัญหา under-rib effect ซึ่งออกซิเจนเข้าไปไม่ถึงทั่วถึง ทำให้บริเวณนั้นเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีลดลงและสร้างกระแสไฟฟ้าได้น้อยลง [10]

จากการสอบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นเกี่ยวกับ optimization ของช่องทางการไหลฝั่งแคโทด ยังมีงานวิจัยจำนวนไม่มากนักที่ศึกษาแผ่น flowfield เฉพาะใน open-cathode PEMFC เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบปรกติ ทำให้ข้อมูลที่สามารถอ้างอิงเพื่อการผลิตอุปกรณ์จริงไม่หลากหลายและชัดเจนเพียงพอ เป็นอุปสรรคสำหรับการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ และทำให้เกิดเป็นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อศึกษาว่า สัดส่วนที่ต่างกันของช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield นั้นส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ open-cathode PEMFC อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

ความไม่ชัดเจนที่สังเกตได้จากการทบทวนงานวิจัย สามารถสรุปเป็นข้อใหญ่ได้ดังนี้

- การปรับสัดส่วนกระทำโดยไม่คุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกและพื้นที่หน้าตัด แม้ว่าการปรับสัดส่วนเช่นนั้นจะทำให้การศึกษาแนวโน้มของผลที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนขึ้น แต่ไม่มีการเปรียบเทียบอัตราการไหลและความเสียหายการไหลที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งต่างก็ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยเช่นกัน ข้อสรุปของผลกระทบจากการปรับสัดส่วนจึงไม่อาจสรุปได้ว่าเกิดจากผลของสัดส่วนอย่างแท้จริง โดยไม่มีผลกระทบจากพื้นที่การไหล
- กราฟจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยส่วนมากแสดงผลกระทบต่อเซลล์เชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยจากการปรับขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล ทำให้เกิดข้อสงสัยว่าผลกระทบจากการปรับสัดส่วนช่องทางการไหลส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจริงหรือไม่ และ
- การปรับสัดส่วน ไม่ว่าจะเกิดทิศทางการเพิ่มหรือลดของสัดส่วนรูปร่างต่าง ส่งผลทั้งในทางที่ดีและเสียต่อสมรรถนะในด้านที่ต่างกัน แต่ไม่มีการเปรียบเทียบอย่างชัดเจนว่า การปรับสัดส่วนไปในแต่ละทิศทางนั้น ทิศทางใดส่งผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงดีกว่ากัน

สำหรับแนวทางในการศึกษาขนาดรูปร่างช่องทางการไหลฝั่งแคโทดที่ผ่านมา การศึกษาสามารถกระทำได้ทั้งจากการทำการทดลองบนเซลล์เชื้อเพลิงจริงแล้ววัดค่าโดยตรง และจากการสร้างแบบจำลองและสั่งให้โปรแกรมแสดงผลเฉพาะค่าที่สนใจ

ตัวอย่างหนึ่งของงานวิจัยที่สร้างแบบจำลองเพื่อทำการศึกษาแทนการสร้างเครื่องจริง ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนช่องทางการไหลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง คือ ผลงานของ Kumar [7] ซึ่งได้สร้างแบบจำลองสำหรับ open-cathode PEMFC เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนของช่องทางการไหลฝั่งแคโทด แบบจำลองถูกตรวจสอบความแม่นยำด้วยเส้นโค้ง polarization กับผลการทดลองของ Tabe [29] เมื่อพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงจริงได้ การศึกษาจะกระทำโดยการปรับค่าตัวแปรทางกายภาพต่างๆใน

โปรแกรมเพื่อศึกษาสมรรถนะในด้านต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิงแทนการทดลองผลจากเซลล์เชื้อเพลิงจริง

ตัวอย่างของงานที่สร้าง open-cathode PEMFC ขึ้นมาเพื่อทำการทดลอง ได้แก่ งานของ Lopez-Sabiron [11] ซึ่งได้ออกแบบและพัฒนา forced open-cathode PEMFC ขนาด 2 กิโลวัตต์ขึ้นมา เพื่อทดสอบร่วมกับระบบพัลลัมที่มีการทำงานที่ง่ายกว่า โดยการปรับความเร็วรอบไปตามช่วงขนาดกระแสไฟฟ้าขาออก การออกแบบอ้างอิงทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสิ้น ระบบพัลลัมในเซลล์เชื้อเพลิงถูกตรวจสอบสมรรถนะ โดยการวัดความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในเซลล์แถวด้วยภาพถ่ายทางความร้อน (thermography) วัดกระแสและความดันไฟฟ้าขาออกเพื่อสร้าง polarization curve ที่แตกต่างกันไปตามความชื้นอากาศขาเข้าที่เปลี่ยนไป

ความแตกต่างของผลการศึกษาที่ได้จากแบบจำลองและการทดลอง คือ แบบจำลองสามารถแสดงผลลัพธ์ที่สนใจได้จากการแก้ค่าสั่งในคอมพิวเตอร์ ซึ่งหลายค่าที่ผู้วิจัยสนใจ ไม่อาจตรวจวัดได้ง่ายหรือไม่อาจวัดได้เลยจากการทดลอง และเช่นกัน หากแบบจำลองมีความแม่นยำไม่สูงพอหรือระเบียบวิธีเชิงตัวเลขถูกประยุกต์ด้วยวิธีที่ไม่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองก็ไม่อาจเชื่อถือได้เท่าผลจากการวัดจริงเช่นกัน

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกที่จะเอาวิธีการทดลองเพื่อการศึกษา เพราะไม่สามารถประเมินความแม่นยำของแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้โดยไม่มีชุดทดสอบจริงมาเปรียบเทียบ ชุดทดสอบที่สร้างขึ้นสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นพื้นฐานที่สำคัญต่อการศึกษาดูในอนาคต

ชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเซลล์เดี่ยวแบบ natural open-cathode ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ขนาด และแต่ละขนาดพื้นที่หน้าตัด มีสัดส่วนรูปร่างต่างกันขนาดละ 2 ชุด รวมเป็นชุดทดสอบทั้งหมด 6 ชุด จะถูกสร้างขึ้น และจะถูกทดสอบประสิทธิภาพ จากนั้น ชุดทดสอบที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจะถูกพัฒนาให้กลายเป็นเซลล์เชื้อเพลิง forced open-cathode ขนาด 5 เซลล์ และทดสอบประสิทธิภาพอีกครั้ง ข้อมูลประสิทธิภาพของชุดทดสอบทั้งหมดจะถูกประเมินว่า สัดส่วนของช่องทางการไหลมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญจริงหรือไม่

ขนาดของพื้นที่การไหลและสัดส่วนรูปร่างจะถูกกำหนดขึ้นจากการพิจารณาเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขายในเชิงพาณิชย์ คือ H-SERIES STACKS ของ HORIZON FUEL CELL TECHNOLOGIES [32] และเนื่องจากสัดส่วนรูปร่างของ H-SERIES STACKS มีค่าประมาณ 0.8 จึงกำหนดสัดส่วนรูปร่างไว้สองค่า ได้แก่ 0.80 และ 1.25 ซึ่งเป็นส่วนกลับของ 0.80 เพื่อการออกแบบช่องทางการไหลอากาศ



## 2.5 การออกแบบระบบพัดลมของ Open-Cathode PEMFC

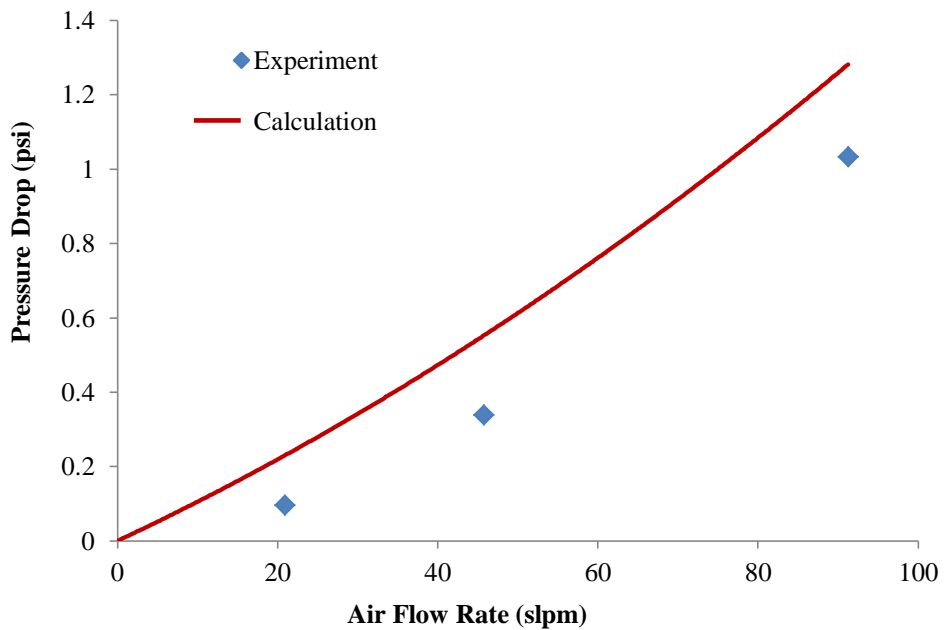
อีกหนึ่งชิ้นส่วนสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการไหลของอากาศสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบ forced open-cathode คือ พัดลม ตำแหน่งการวาง จำนวน ชนิด และเทคนิคการควบคุมพัดลม ต่างส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงผ่านทางอัตราการไหลของอากาศที่พัดลมสร้างขึ้นได้โดยตรง

ชนิดของพัดลมที่นิยมใน open-cathode PEMFC คือพัดลมแบบ axial พัดลมแบบ axial ให้การไหลที่ไม่เสถียร ณ ช่วงความดันที่สร้างได้หนึ่งๆ ระบบควบคุมต้องพยายามปรับจุดทำงานของพัดลมให้อยู่ห่างจากบริเวณที่ไม่เสถียรนี้ วิธีการหนึ่งก็คือ การเปลี่ยน characteristic curve ของพัดลม โดยการปรับ fan rating และการวางพัดลมเรียงกันแบบอนุกรม [33, 34] ลำดับต่อไปที่ควรสนใจ คือ การเปลี่ยน stack curve โดยการปรับขนาดและรูปร่างของช่องทางการไหลของอากาศ ดังที่ได้กล่าวถึงไปแล้ว วิธีการสุดท้าย คือ การออกแบบระบบพัดลมให้เหมาะสม [11] ความรู้พื้นฐานทาง Mechatronics ต้องถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมการทำงานของพัดลมตามสภาวะทำงานของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เช่น ในงานยานยนต์ เป็นต้น

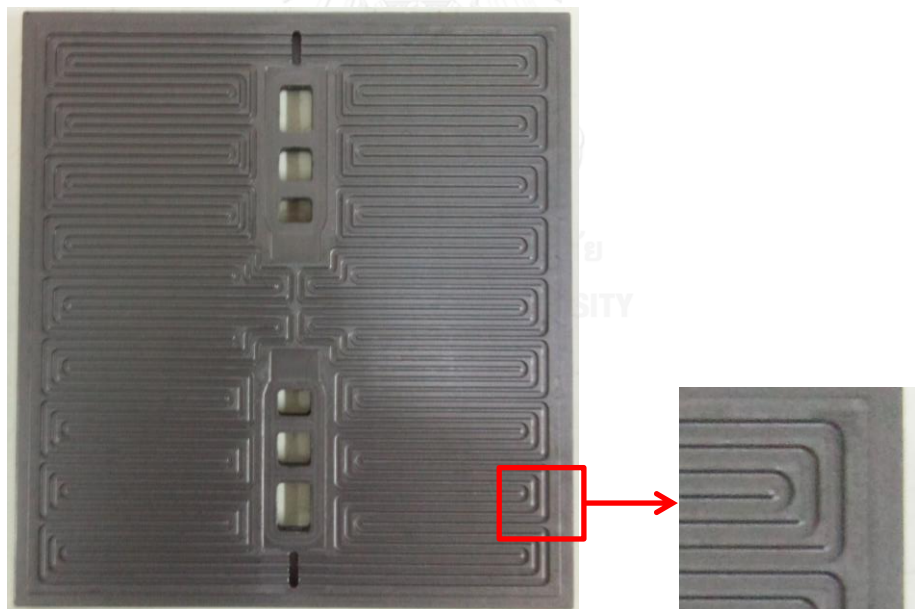
จากผลงานที่ผ่านมาของผู้วิจัย เกี่ยวกับการกำหนดขนาดของอุปกรณ์ในระบบเสริมการทำงาน ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบทั่วไป คือ Ballard Nexa PEMFC Module 1.2 kW [35] ได้มีการคำนวณความดันตกในเส้นทางการไหลของอากาศตามวิธีการของ Barbir [36] และเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าความแตกต่างของความดันที่วัดได้จริง พบว่าการคำนวณให้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนดังแสดงในภาพที่ 17 ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากการกำหนดสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (minor loss) ให้แก่จุดหักเหี้ยวของช่องทางการไหลตามที่ Barbir เสนอ ซึ่งไม่แม่นยำเนื่องจากไม่ใช่จุดหักเหี้ยวแบบคม (sharp turn) ตามเงื่อนไขของ Barbir ดังภาพที่ 18 อย่างไรก็ตาม Barreras [26] ได้แสดงให้เห็นว่า สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode ซึ่งมีเพียงช่องทางการไหลแบบทางตรงพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมเท่านั้น สมการที่สนใจเฉพาะแรงเสียดทานการไหลในช่วงการไหลแบบราบเรียบของ Barbir [36] สามารถทำนายค่าได้อย่างแม่นยำ สมการสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการไหลของ Barbir คือ

$$f = \frac{55 + 41.5e^{-\frac{3.4}{W/D}}}{Re} \quad (1)$$

โดย  $w$  และ  $h$  คือ ความกว้างและความสูงของช่องทางการไหล และ  $Re$  คือ Reynolds number กรณีที่ Reynolds number มีค่ามากกว่า 500 สัมประสิทธิ์  $f$  ประเมินได้จาก Moody's chart



ภาพที่ 17 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความดันตกภายในตลอดเส้นทางการไหลของอากาศของ Ballard Nexa PEMFC module ขนาด 1.2 kW ที่นำเสนอโดย Barbir และค่าที่วัดได้จริง [35]



ภาพที่ 18 ลักษณะจุดหักเหี้ยวของ flowfield ฝั่งแคโธดของเซลล์เชื้อเพลิง Nexa

## 2.6 การทดสอบและประเมินสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

การทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงทำได้โดยการให้เซลล์เชื้อเพลิงรับภาระแบบคงตัว (steady) และไม่คงตัว (transient)

การทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงด้วยภาระแบบไม่คงตัวสามารถทำได้หลายวิธี แต่เนื่องจากจุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์คือการนำความรู้ที่ได้เพื่อการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงขนาดใหญ่ และ PEMFC ได้ถูกนำไปใช้อย่างเป็นทางการเป็นรูปธรรมในยานยนต์แล้ว สังเกตได้จากรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงที่ผลิตออกมาสู่ตลาดรถยนต์ส่วนบุคคล เช่น รถยนต์ hybrid รุ่น FCX ของ Honda และรุ่น FCV ของ Toyota (ภาพที่ 19) ในการศึกษาครั้งนี้ จะเลือกทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงด้วยภาระเทียบเท่าวัฏจักรขับซึ่งเป็นสำคัญ

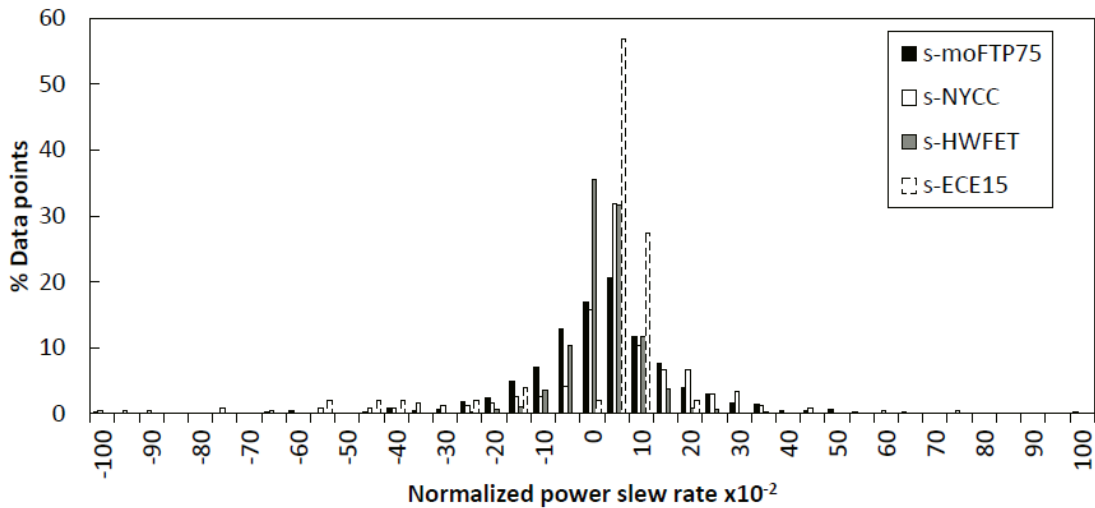


ภาพที่ 19 รถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงรุ่น FCV ของ Toyota [37]

จากการทบทวนการศึกษาพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อรับภาระแบบวัฏจักรขับที่วูฒันันท์ [38] ได้เสนอตัวแปรไร้มิติ normalized power slew rate หรือ n-slew rate แสดงถึงการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงต่อสภาพภาระไม่คงตัว อีกทั้งคำนวณและทดสอบได้ว่า ภาระแบบวัฏจักรขับที่มีสภาพไม่คงตัวเทียบเท่าภาระแบบ sinusoidal [39, 40] ที่มี n-slew rate ในช่วง  $\pm 0.30$  ดังแสดงในภาพที่ 20 ซึ่ง n-slew rate ประเมินได้จาก

$$\tau_p^* = \left( \frac{\tau_s}{P_{rated}} \right) \left( \frac{dP}{dt} \right) \quad (2)$$

โดย คือ n-slew rate,  $\tau_s$  คือ time scale ของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งสำหรับเมมเบรน Nafion®112 ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มี  $\tau_s$  เท่ากับ 1 s [38],  $P_{rated}$  คือ พิกัดกำลังไฟฟ้า และ  $\frac{dP}{dt}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา



ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของ n-slew rate ของแต่ละวัฏจักรขับขี่ [38]

การทดสอบชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงในวิทยานิพนธ์นี้ จะกำหนดภาระไม่คงที่แบบ sinusoidal แบบต่างกัน ดังนี้

- ช่วงภาระ 0 - 30 A หรือเต็มพิกัด 0.10 Hz เทียบเท่า n-slew rate  $\pm 0.30$
- ช่วงภาระ 0 - 15 A หรือครึ่งพิกัดต่ำ ความถี่ 0.10 Hz เทียบเท่า n-slew rate  $\pm 0.15$  และความถี่ 0.20 Hz เทียบเท่า n-slew rate  $\pm 0.30$
- ช่วงภาระ 15 - 30 A หรือครึ่งพิกัดสูง ความถี่ 0.10 Hz เทียบเท่า n-slew rate  $\pm 0.15$  และความถี่ 0.20 Hz เทียบเท่า n-slew rate  $\pm 0.30$

สำหรับสภาวะแวดล้อมขณะทำงานที่เอื้อต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ถูกระบุไว้โดย Jung และคณะ [41] ได้ระบุไว้ว่า ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่มากกว่า 55% ช่วยให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้ประสิทธิภาพและเสถียรภาพที่สูงขึ้น นอกจากนี้ หากอุณหภูมิแวดล้อมของเซลล์เชื้อเพลิง PEM สูง เซลล์เชื้อเพลิงจะยังต้องการการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงขึ้นเพื่อป้องกันไม่ให้ MEA แห้ง

### บทที่ 3 ความรู้เบื้องต้นในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงจากการทดลองต่อสัดส่วนของช่องทางการไหลที่เปลี่ยนแปลงไป ชุดเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ต้องถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นชุดทดสอบแผ่น flowfield ขั้นตอนแรกของการดำเนินการจึงเป็นการผลิตชุดทดสอบ

การทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองบนเซลล์เชื้อเพลิง เป็นขั้นตอนแรกในการสร้างชุดทดสอบ จากนั้น รูปแบบของแต่ละส่วนของชุดทดสอบจะต้องถูกเลือกและสรุปรวมกันเป็นงานออกแบบสุดท้ายก่อนทำการผลิต เนื่องจาก MEA ไม่ได้เป็นส่วนที่ถูกทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้และได้รับความเอื้อเพื่อ MEA จากภาควิชาเคมีเทคนิค ของคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เนื้อหาส่วนใหญ่ในบทนี้จึงกล่าวถึงชิ้นส่วนที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นเอง อย่างไรก็ตาม เนื้อหาที่เป็นข้อมูลเบื้องต้นของการออกแบบชุดเซลล์เชื้อเพลิงจะยังถูกกล่าวถึง แม้ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับชิ้นส่วนทางกลเหล่านั้นก็ตาม

เซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM ไม่ใช่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใหม่ล่าสุด แต่เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ต่างหากที่กำลังเป็นที่สนใจในแวดวงนักวิจัยด้านเซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบัน แนวทางในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode ส่วนหนึ่งยังคงสามารถอ้างอิงได้จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเซลล์เชื้อเพลิง PEM ขณะที่ในบางส่วนที่เป็นเอกลักษณ์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode ต้องทำการอ้างอิงจากวรรณกรรมที่ศึกษาเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้โดยเฉพาะแทน

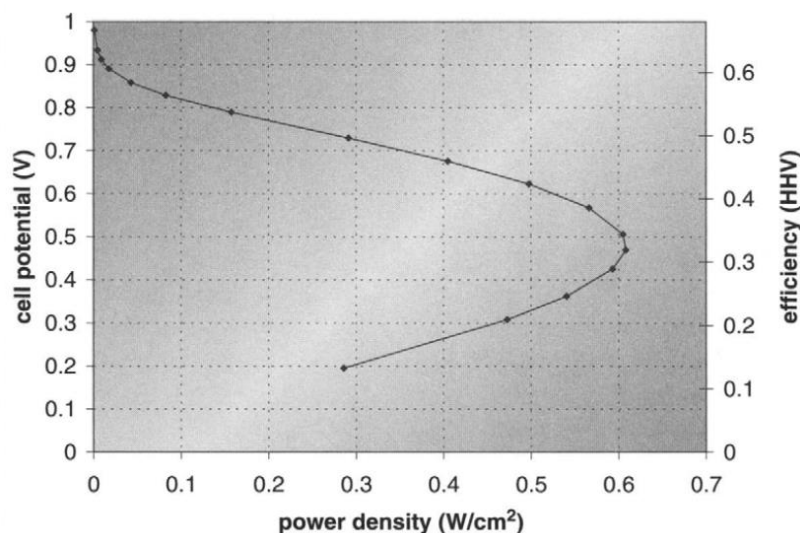
#### 3.1 ขนาดพื้นที่เกิดปฏิกิริยาและจำนวนเซลล์แถว

สำหรับการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงให้สามารถทำงานรองรับภาระทางไฟฟ้าขนาดที่ต้องการ สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ ขนาดของเครื่อง หากเครื่องมีขนาดใหญ่เกินไป พื้นที่ใช้สอยในบริเวณโดยรอบจะน้อยลงและน้ำหนักระบบสุทธิจะมากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อความเป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ในเชิงพาณิชย์ การกำหนดขนาดของเซลล์แถวจึงมีความจำเป็นอย่างสูง และสามารถควบคุมค่าใช้จ่ายในการผลิตชุดทดลองไม่ให้สูงเกินไปได้อีกด้วย

ตัวแปรสองค่าที่มีความสัมพันธ์กับขนาดของเซลล์แถวและขนาดภาระทางไฟฟ้าที่กำหนดไว้ คือ ขนาดพื้นที่เกิดปฏิกิริยา และจำนวนเซลล์แถว

เซลล์เชื้อเพลิง PEM เซลล์หนึ่งสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้จำกัด เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่จำกัด การเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาบนเมมเบรนของเซลล์เชื้อเพลิงทำได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การเพิ่มอุณหภูมิแก่เซลล์ และการเพิ่มขนาดพื้นที่เมมเบรนหรือการเพิ่มพื้นที่เกิดปฏิกิริยา [42] การเพิ่มขนาดพื้นที่เกิดปฏิกิริยาของเซลล์ ช่วยให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพที่ดี

ขึ้น ภาพที่ 21 แสดงให้เห็นว่าการกำหนดขนาดเซลล์เชื้อเพลิงให้ใหญ่เพื่อให้ช่วงความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าขณะทำงานไม่สูงนักจะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานด้วยประสิทธิภาพสูงด้วย [36]



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ของเซลล์ ประสิทธิภาพ และความหนาแน่นกระแส ซึ่งมาจากเส้นโค้ง polarization [36]

ถึงแม้การเพิ่มขนาดเมมเบรนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับการใช้งานจริงจะประกอบด้วยเมมเบรนที่มีพื้นที่เกิดปฏิกิริยาในช่วง  $200 - 600 \text{ cm}^2$  [42] และจำนวนเซลล์มากกว่า 100 เซลล์ ขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงเพื่อการวิจัยจะมีขนาดเล็กกว่า (พื้นที่เกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า  $50 \text{ cm}^2$  และจำนวนเซลล์น้อยกว่า 10 เซลล์) การรักษาความสม่ำเสมอของสารตั้งต้นตลอดช่องทางการไหลกระทำได้ยากและยิ่งยากขึ้นเมื่อเมมเบรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งปัญหานี้ส่งผลให้นักวิจัยสนใจการปรับขนาดของช่องทางการไหลโดยเฉพาะฝั่งแคโรติดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 อัตราการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ และความร้อนจากปฏิกิริยาไม่สม่ำเสมอ ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงดังกล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.3 [7, 43, 44] แม้ว่าความไม่สม่ำเสมอของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงส่วนหนึ่งเกิดขึ้นในท่อรวมด้วย และเซลล์แถวที่ประกอบด้วยเซลล์หลายเซลล์แล้ว ความไม่สม่ำเสมอของสารตั้งต้นยิ่งมากตาม แต่ความไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับในช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield [45, 46]

ขนาดพื้นที่เกิดปฏิกิริยาและคุณลักษณะของแผ่นเมมเบรนเป็นสิ่งกำหนดขนาดกระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิง PEM เซลล์หนึ่งสามารถสร้างได้ แผ่นเมมเบรนแผ่นหนึ่งสามารถสร้างกระแสไฟฟ้ามากที่สุดแต่ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าค่าหนึ่งซึ่งถูกระบุโดยผู้ผลิต อย่างไรก็ตาม การสร้างเซลล์เชื้อเพลิงที่บรรจุแผ่นเมมเบรนขนาดใหญ่นี้ไว้อาจให้กระแสไฟฟ้าได้น้อยกว่าผลคูณระหว่างขนาด

พื้นที่และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าด้วยเหตุผลความไม่สม่ำเสมอที่กล่าวไปแล้ว และจะต้องได้รับการปรับปรุงด้วยการปรับขนาดช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield

อีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญ คือ จำนวนเซลล์ทั้งหมดที่ต้องการสำหรับเซลล์แถว 1 ชุด เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นเมมเบรน, catalyst layer, GDL และแผ่น flowfield จะถูกนำมาเรียงต่อกันแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้า แต่เมื่อทำงานจริง ศักย์ไฟฟ้าของระบบรวมจะน้อยกว่า thermodynamic reversible potential และการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามขนาดกระแสไฟฟ้าที่สร้างได้ การสูญเสียเหล่านี้ประกอบไปด้วยการสูญเสียจากปฏิกิริยา (activation losses), การสูญเสียตามกฎของโอห์ม (Ohmic losses) และการสูญเสียจากการถ่ายเทมวล (mass transport losses) ดังแสดงได้ด้วยสมการ

$$V_{fc} = E_{(T,P)} - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{mt} \quad (3)$$

โดยที่  $V_{fc}$  คือ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้ thermodynamic reversible potential [47] สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{(T,P)} = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right) - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{\prod a_{prod}^{v_i}}{\prod a_{react}^{v_i}}\right) \quad (4)$$

โดยที่  $\Delta H$  คือ การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี ซึ่งมีค่า  $-285,826 \text{ J/mol}$  ที่ความดัน 1 atm อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  [48],  $\Delta S$  คือ การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี ซึ่งมีค่า  $-163 \text{ J/mol/K}$  ที่ความดัน 1 atm อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  [48],  $n$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทไปต่อหนึ่งโมล,  $F$  คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์,  $T$  คือ อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง,  $R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส,  $a_{prod}$  และ  $a_{react}$  คือ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้น ซึ่งคำนวณได้จากความดันของไอน้ำและของน้ำและไฮโดรเจน ทหารด้วยความดันแก๊สรวมที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง และ  $v_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ stoichiometry ของแต่ละสารที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยา

การสูญเสียจากปฏิกิริยาหรือ  $\Delta V_{act}$  สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta V_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (5)$$

โดยที่  $\alpha$  คือ ค่าคงที่การถ่ายเทประจุ,  $i$  คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และ  $i_0$  คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ค่าศักย์จากปฏิกิริยามีค่าสมดุลและกระแสไฟฟ้าสุทธิเป็นศูนย์ การสูญเสียตามกฎของโอห์มหรือ  $\Delta V_{ohm}$  คำนวณได้จาก

$$\Delta V_{ohm} = i \cdot R_{ohm} \quad (6)$$

โดยที่  $R_{ohm}$  คือ ความต้านทานของเซลล์ภายใน และการสูญเสียจากการถ่ายเทมวลมีค่า

$$\Delta V_{mt} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (7)$$

โดยที่  $i_L$  คือ ความหนาแน่นกระแสสูงสุด ค่าคงที่ทั้งหมดต้องถูกระบุโดยผู้ผลิตแผ่นเมมเบรน

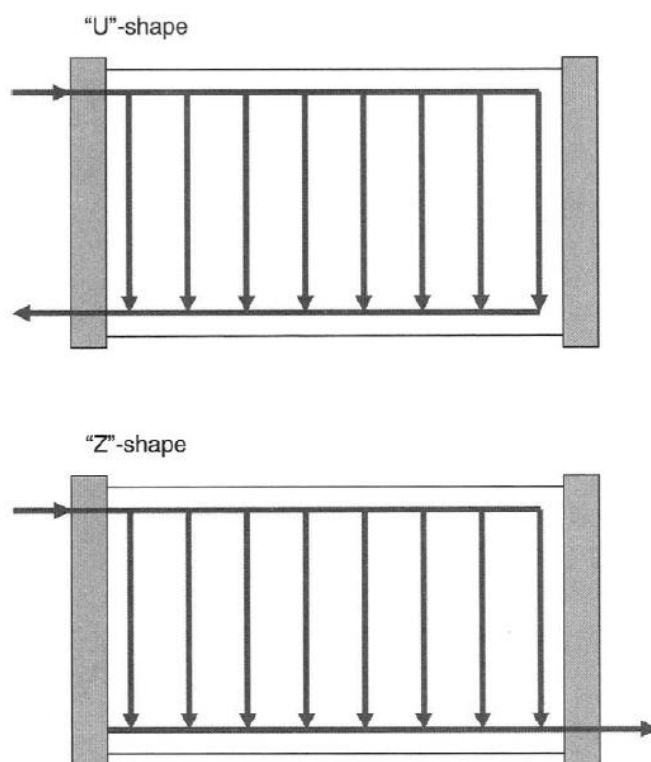
อย่างไรก็ตาม ผู้ผลิตมักระบุค่าศักย์ไฟฟ้าเซลล์ (cell voltage) มาให้ ทำให้สามารถประเมิน ศักย์ไฟฟ้าที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (ศักย์ไฟฟ้าทำการ) หรือ  $V_{cell}$  ที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดมาด้วยเสมอ ซึ่งสามารถใช้ค่านี้ในการคำนวณขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงได้

### 3.2 รูปแบบของช่องทางการไหลของสารตั้งต้น

#### 3.2.1 รูปแบบการไหลภายในเซลล์แกว

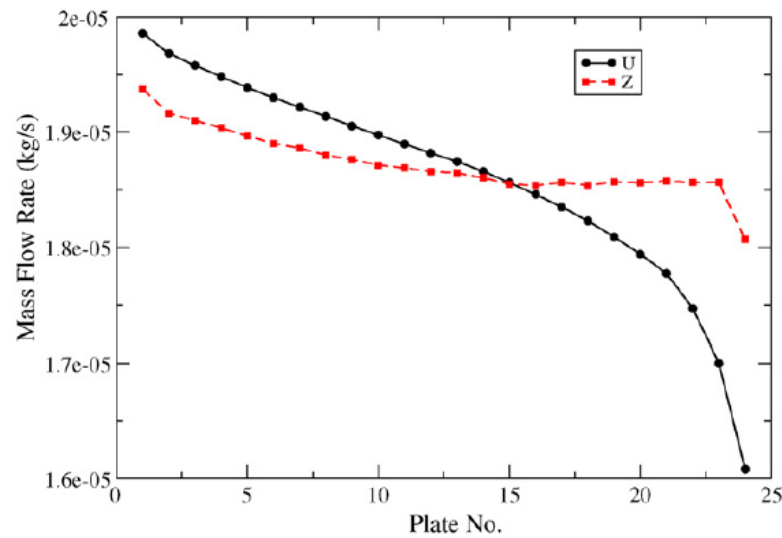
ช่องทางการไหลของไฮโดรเจนจะประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ช่องทางจากท่อรวมสู่แต่ละ เซลล์ และช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield ส่วนช่องทางการไหลของอากาศมีลักษณะเป็นช่อง ตรงที่เปิดสู่อากาศแวดล้อมโดยตรง จึงแตกต่างจากช่องทางการไหลของไฮโดรเจน เพราะไม่มีส่วนของ ท่อรวมให้พิจารณา

สำหรับรูปแบบตำแหน่งท่อรวมขาเข้าและขาออกของไฮโดรเจนมีอยู่สองแบบ ได้แก่ รูปแบบตัว Z และตัว U [46, 49, 50] ดังภาพที่ 22 ซึ่ง Mustata [46] ได้สร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบ จากรูปแบบท่อรวมที่ต่างกันต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าสำหรับท่อรวมอากาศแล้ว รูปแบบ ตัว Z ช่วยการไหลของอากาศแพร่เข้าสู่เซลล์แกวได้สม่ำเสมอมากกว่าดังแสดงในภาพที่ 23 และผล จากการศึกษาี้ ถูกใช้อ้างอิงสำหรับการพิจารณารูปแบบท่อรวมทางฝั่งไฮโดรเจนด้วยเช่นกัน



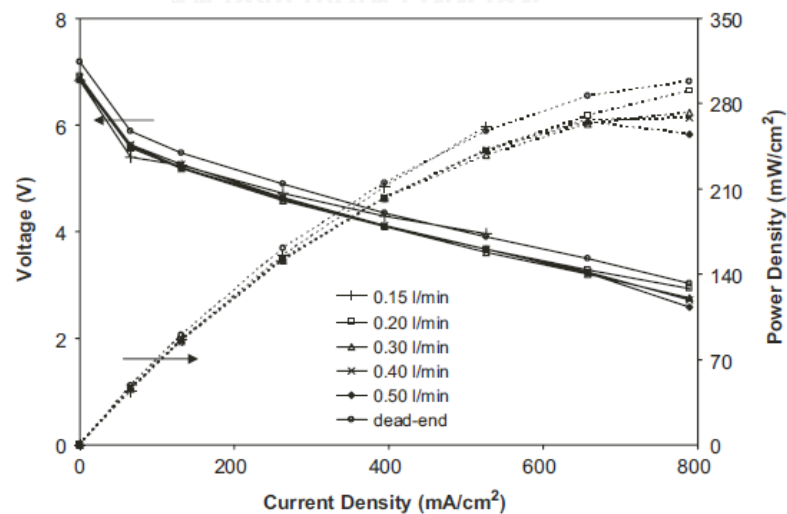
ภาพที่ 22 รูปแบบตำแหน่งท่อรวมขาเข้าและขาออกแบบตัว U (บน) และตัว Z (ล่าง) [36]





ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบอัตราการไหลอากาศที่เข้าสู่แต่ละเซลล์ในเซลล์แกวที่มีรูปแบบท่อรวมแบบ U และ Z [46]

อีกลักษณะสำคัญของเส้นทางการไหลของสารตั้งต้นที่ คือ รูปแบบปลายปิด (dead-end mode) และรูปแบบปลายเปิด (open-end mode) จากการศึกษาของ Santa Rosa [8] บนเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode การไหลของไฮโดรเจนแบบปลายปิด ให้กำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าการไหลแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหลต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบ polarization curve และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า เมื่อรูปแบบการไหลของไฮโดรเจนเป็นแบบปลายปิด และแบบปลายเปิดที่อัตราการไหลต่างๆ [8]

ความดันตกในท่อรวมขาเข้าและขาออกของไฮโดรเจนเป็นต้นแปรสำคัญที่บอกถึงความสม่ำเสมอของไฮโดรเจนที่เข้าสู่เซลล์แต่ละเซลล์ ระดับความดันบริเวณเดียวกันในแต่ละเซลล์ควรมีค่าเท่ากัน เพื่อให้สารตั้งต้นไหลเข้าได้เท่ากัน อย่างไรก็ตาม การประเมินความดันตกในท่อรวมไม่สามารถทำได้โดยง่ายและมีค่าน้อยกว่าความดันตกในช่องทางการไหล [36] อย่างไรก็ตาม การประเมินในเบื้องต้นจึงอาศัยการประเมินแบบทำซ้ำ โดยการสุ่มค่าความดันขาเข้าขึ้น จากนั้น ประเมินความดันตกในช่องทางการไหลแทน หากความดันตกในช่องทางการไหลรวมกับความดันขาออกของไฮโดรเจนขาออกมีค่าน้อยกว่าความดันขาเข้าที่สมมติไว้แต่แรกมากกว่า 10% แล้วค่าความดันสมมตินั้นสามารถใช้งานได้

### 3.2.2 ช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield

#### 3.2.2.1 ช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield ฝั่งแอโนด (ไฮโดรเจน)

รูปแบบช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield ทางฝั่งแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode ยังคงลักษณะทั่วไปเหมือนเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบปรกติ รูปแบบที่เป็นที่นิยม ได้แก่ serpentine, parallel และแบบผสม

ช่องทางการไหลแบบ serpentine ป้องกันน้ำท่วมในช่องทางการไหลมากที่สุดแต่ความดันตกสูงสุด ส่วนช่องทางการไหลแบบ parallel นั้นสามารถกระจายแก๊สได้สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น และแบบผสม ที่รวมเอาเอกลักษณ์ของทั้งรูปแบบ serpentine และ parallel ไว้ด้วยกัน แต่เนื่องจากการทบทวนวรรณกรรม น้ำท่วมทางฝั่งแอโนดเกิดขึ้นน้อยมาก ช่องทางการไหลแบบ parallel จึงพบได้มากในเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์

เนื่องจากการศึกษาของ Santa Rosa [8] แสดงให้เห็นว่า หากเลือกใช้ช่องทางการไหลแบบปิดแล้ว การพิจารณาค่าความดันตกในช่องทางการไหลไม่มีความจำเป็น เนื่องจากรูปแบบการไหลแบบปิดช่วยให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานด้วยประสิทธิภาพที่ดีกว่าการไหลแบบเปิด นี่แสดงว่า การพิจารณาขนาดและรูปร่างของช่องทางการไหลฝั่งแอโนดไม่มีความจำเป็นในกรณีนี้ รูปแบบช่องทางการไหลทุกแบบสามารถใช้งานได้ดีทั้งหมด

#### 3.2.2.2 ช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield ฝั่งแคโทด (ออกซิเจน)

เนื่องจากรูปแบบช่องทางการไหลอากาศของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode เป็นแบบช่องตรง จึงเหลือเพียงการพิจารณาปรับขนาดและสัดส่วนเป็นประเด็นสำหรับการออกแบบช่องทางการไหลฝั่งแคโทดเท่านั้น และเป็นหัวข้อสนใจสำหรับวิทยานิพนธ์นี้เช่นกัน

### 3.3 อัตราการไหลที่เพียงพอของสารตั้งต้น

อัตราการไหลของสารตั้งต้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดกระแสไฟฟ้าที่ผลิต Barbir [36] ได้เสนอสมการอัตราการไหลของอากาศและไฮโดรเจนไว้ว่า

$$\dot{m}_{air,in} = \frac{\lambda M_{air} N_{cell} I_{stack}}{4x_{O_2} F} \quad (8)$$

$$\dot{m}_{H_2,in} = \frac{M_{H_2} N_{cell} I_{stack}}{2F} \quad (9)$$

โดย  $\lambda$  คือ air stoichiometry ซึ่งมีค่าประมาณ 2 [39],  $M_{air}$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ มีค่า  $28.97 \times 10^{-3}$  kg/mol,  $M_{H_2}$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของไฮโดรเจน มีค่า  $2.016 \times 10^{-3}$  kg/mol,  $N_{cell}$  คือ จำนวนเซลล์,  $I_{stack}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เซลล์แถวสร้างได้,  $x_{O_2}$  คือ เศษส่วนโมลของอากาศ มีค่าประมาณ 0.21 และ  $F$  คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ มีค่า 96,485 C/mol

เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนแผ่นเมมเบรนเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน อากาศจึงเป็นตัวกลางสำคัญในการถ่ายเทความร้อน จากงานวิจัยของ Schmeister [48] การถ่ายเทความร้อนออก (active heat removal [34]) จากเซลล์เชื้อเพลิงเกิดขึ้นได้หลายทางดังสมการ

$$\dot{Q}_{heat} = \dot{Q}_{cnv} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{cool} + \dot{Q}_{ex} \quad (10)$$

โดย  $\dot{Q}_{cnv}$  คือ อัตราการพาความร้อน,  $\dot{Q}_{rad}$  คือ อัตราการแผ่รังสีความร้อน,  $\dot{Q}_{cool}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านอากาศหล่อเย็น และ  $\dot{Q}_{ex}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านอากาศที่ส่วนเหลือจากการสร้างกระแสไฟฟ้า ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้สามารถคำนวณโดยประมาณได้จากการสมมติให้การกำลังที่สูญเสียกลายเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมด ได้ว่า

$$\dot{Q}_{heat} = \dot{Q}_{H_2,in} - P_{stack} \quad (11)$$

โดย  $P_{stack}$  คือ กำลังที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ มีค่าเท่ากับ  $V_{cell} \times I_{stack}$  และ  $\dot{Q}_{H_2,in}$  คือ ความร้อนจำเพาะของไฮโดรเจน ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{H_2,air} = \dot{m}_{H_2,in} HHV_{H_2} \quad (12)$$

โดย  $HHV_{H_2}$  คือ Higher Heating Value ของไฮโดรเจน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 141.80 MJ/kg

นอกจากนี้ Schmeister [51] กล่าวว่า การถ่ายเทความร้อนในเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบปรกติเกิดขึ้นมากที่สุดผ่านทางอากาศหล่อเย็น ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{cool} = \dot{m}_{air,cool} C_{p,air} (T_{cool,out} - T_{cool,in}) \quad (13)$$

และ

$$\dot{Q}_{cool} = hA_c (T_{cool,out} - T_{cool,in}) \quad (14)$$

โดย  $\dot{m}_{air,cool}$  คือ อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็น,  $C_{p,air}$  คือ ความจุจำเพาะของอากาศ มีค่า 1.005 kJ/kg-K,  $T_{cool,in}$  และ  $T_{cool,out}$  คือ อุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกจากเซลล์แถวตามลำดับ,  $A_c$  และ  $h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งประเมินค่าจาก

$$h = \frac{k}{D_h} Nu \quad \text{or} \quad h = \frac{k}{L} Nu_L \quad \text{or} \quad h = \frac{k}{L} \overline{Nu}_L \quad (15)$$

โดย  $k$  คือ ค่าความสามารถในการนำความร้อน ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ ดังภาพที่ 25,  $D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของช่องทางการไหล,  $L$  คือ ความยาวของช่องทางการไหล และ  $Nu$  คือ Nusselt number ซึ่งมีค่าดังภาพที่ 26

Thermal Conductivity of Some Fuel Cell Materials	
Material	Thermal Conductivity <sup>a</sup> W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Aluminum	237
Copper	401
Nickel	91
Nickel alloys (Inconel, Hasteloy)	12
Titanium	22
Stainless steel 316	13
Platinum	71
Graphite	98
Graphite/polymer mix	-20 <sup>b</sup>
Carbon fiber paper	1.7 <sup>b</sup>
Teflon	0.35
Liquid water	0.611
Water vapor	0.0198
Air	0.0267
Hydrogen	0.198

<sup>a</sup>At 300 K; <sup>b</sup>through-plane.

ภาพที่ 25 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง [36]



Condition	Equation
<b>Laminar flow</b>	
Hydraulically fully developed, $x/D > 0.05 RePr$	
Thermally fully developed $x/D > 0.05 RePr$	
Uniform wall temperature	
Square tube	$Nu = 2.98$
Circular tube	$Nu = 3.66$
Uniform wall heat flux	
Square tube	$Nu = 3.61$
Circular tube	$Nu = 4.36$
Thermal entry	
Uniform wall temperature	$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 \frac{RePr}{x/D}}{1 + 0.04 \left(\frac{RePr}{x/D}\right)^{2/3}}$
Uniform wall temperature $x/D < 0.01 RePr$	$Nu = 1.67 \left(\frac{RePr}{x/D}\right)^{1/3}$
Uniform wall heat flux $x/D < 0.01 RePr$	$Nu = 1.95 \left(\frac{RePr}{x/D}\right)^{1/3}$
Hydraulic and thermal entry $x/D < 0.01 RePr$	$Nu = 1.86 \left(\frac{RePr}{x/D}\right)^{1/3}$
<b>Turbulent flow</b>	
Hydraulically fully developed	
Thermally fully developed	$Nu = \frac{(f/8)RePr}{1.07 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr^{2/3} - 1)}$ where $f = 4/(1.58 \ln Re - 3.28)^2$
Thermal entry $x/D < 60$	$Nu = Nu_{TFD} \left(1 + \frac{1.4}{x/D}\right)$
Hydraulic and thermal entry $x/D < 60$	$Nu = Nu_{TFD} \left(1 + \frac{6}{x/D}\right)$
Transitional turbulent flow	$Nu = C_{tr}Nu_{L2} + (1 - C_{tr})Nu_{T8}$ $Nu_{L2} = Nu \text{ for } Re = 2000$ $Nu_{T8} = Nu \text{ for } Re = 8000$ $C_{tr} = 1.33 - Re/6000$

ภาพที่ 26 ค่า Nusselt Number [36]

อย่างไรก็ดี เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากขึ้น การถ่ายเทความร้อนโดยการพาและการแผ่รังสีความร้อนจะถูกนำมาพิจารณาด้วย อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาและการแผ่รังสีความร้อน [34] จะถูกคำนวณร่วมกันจาก

$$\dot{Q}_{cnv} + \dot{Q}_{rad} = \frac{T_s - T_{amb}}{R} \quad (16)$$

โดย  $T_s$  คือ อุณหภูมิผิวของเซลล์แกว และ  $R$  คือ ความต้านทานเชิงความร้อน ซึ่งคำนวณจาก

$$R = \frac{1}{hA_s + \sigma FA_s(T_s + T_{amb})(T_s^2 + T_{amb}^2)} \quad (17)$$

โดย  $\sigma$  คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzman มีค่า  $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ,  $F$  คือ shape factor ที่มีค่าประมาณ 1,  $A_s$  คือ พื้นที่ผิวของเซลล์แกว และ  $h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่คำนวณได้จาก

$$h = \frac{k}{L} Nu_L \quad (18)$$

โดย  $Nu$  ประเมินจาก

$$Nu_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.5}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (19)$$

โดย  $Ra_L$  หรือ Rayleigh number และ  $Pr$  หรือ Prandtl number ประเมินค่าได้จาก

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_0)L^3}{\nu\alpha} \quad (20)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (21)$$

โดย  $g$  คือ ค่าความเร่งโน้มถ่วง,  $\beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน สำหรับแก๊ส,  $\nu$  คือ ความหนืดจลน์ และ  $\alpha$  ค่าความสามารถในการแพร่ความร้อน ค่าตัวแปรต่างๆของอากาศสามารถประเมินได้จากภาพที่ 27

Air Thermal Properties

Property	@300 K	@350 K
Density, $\rho$ , $\text{kg m}^{-3}$	1.1774	0.998
Specific heat, $c_p$ , $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	1.0057	1.0090
Thermal conductivity, $k$ , $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	0.02624	0.03003
Thermal diffusivity, $\alpha$ , $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	$0.2216 \times 10^{-4}$	$0.2983 \times 10^{-4}$
Thermal expansion, $\beta$ , $\text{C}^{-1}$	0.00333	0.00286
Viscosity, $\mu$ , $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$1.846 \times 10^{-5}$	$2.075 \times 10^{-5}$
Kinematic viscosity, $\nu$ , $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	$15.68 \times 10^{-6}$	$20.76 \times 10^{-6}$
Prandtl number, $Pr$	0.708	0.697

ภาพที่ 27 ค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของอากาศ [36]

ในท้ายที่สุดแล้ว จะสามารถคำนวณอัตราการไหลของอากาศ เพื่อจุดประสงค์ด้านการระบายความร้อนอย่างเดียวนั้น ได้จาก

$$\dot{m}_{air,cool} = \frac{\dot{m}_{H_2,in} HHV_{H_2} - P_{stack} - (\dot{Q}_{cnv} + \dot{Q}_{rad})}{C_{p,air}(T_{cool,out} - T_{cool,in})} \quad (22)$$

โดยความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แกวหรือผลต่างระหว่างพลังงานจากไฮโดรเจนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ สามารถประเมินให้มีค่าประมาณ

$$\dot{m}_{H_2,in} HHV_{H_2} - P_{stack} = (1.482 - V_{cell}) I_{stack} N_{cell} \quad (23)$$

เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode ใช้อากาศเพื่อนำออกซิเจนสู่เซลล์แกวและเพื่อ การระบายความร้อน อัตราการไหลอากาศที่คำนวณได้จากทั้งสองสมการต้องนำมาเปรียบเทียบกัน และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง คำนวณได้จาก

$$\eta = \frac{\dot{m}_{H_2, in} HHV_{H_2}}{P_{stack}} \quad (24)$$

### 3.4 วัสดุในการผลิตแผ่น Flowfield

แกรไฟต์ โลหะผสม (metal composite) คาร์บอนผสม (carbon composite) และโลหะ เช่น อลูมิเนียม เหล็กกล้า เป็นต้น เป็นวัสดุที่นิยมใช้มากที่สุดในการผลิตแผ่น flowfield [52] แผ่น flowfield หรือแผ่นสองขั้ว ต้องผลิตมาจากวัสดุที่มีความแข็งแรง เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี และมีน้ำหนักเบา ดังนั้น แกรไฟต์และโลหะจึงได้รับความนิยมมากในช่วงแรก เมื่อความรู้ทางด้านวัสดุพัฒนามากขึ้น โลหะผสมและคาร์บอนผสมได้เข้ามามีบทบาทในเซลล์เชื้อเพลิงในเวลาต่อมาแต่ยังไม่แพร่หลายนัก

อย่างไรก็ดี แผ่น flowfield ต้องสัมผัสกับ MEA อยู่เสมอ เมื่อกระบวนการสร้างไฟฟ้าเกิดขึ้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นทั่วแผ่น MEA ทำให้แผ่น flowfield ที่ผลิตโดยวัสดุที่มีส่วนผสมของโลหะที่ต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ต่ำ [1, 36, 52-54] จะเกิดการสึกกร่อนในเนื้อวัสดุและ ส่วนประกอบออกไซด์ที่เกิดขึ้น ซึ่งลดสมรรถนะ และอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ในที่สุด แต่ ความพยายามในการใช้โลหะทดแทนแกรไฟต์ยังคงดำเนินต่อไปเพื่อลดต้นทุนการผลิต การเคลือบผิว โลหะได้รับความสนใจมากขึ้น ทั้งด้านวิธีการเคลือบผิวและวัสดุเคลือบ วัสดุที่ใช้ผลิตแผ่น flowfield วัสดุเคลือบผิว และวิธีการเคลือบ ส่งผลต่อคุณสมบัติของแผ่น flowfield ทั้งสิ้น [52-56] ซึ่งแผ่น อะลูมิเนียมเคลือบทองคำด้วยกรรมวิธีเคลือบด้วยไอเชิงกายภาพ (Physical Vapour Deposition หรือ PVD) มีความโดดเด่นเป็นพิเศษ เนื่องจากน้ำหนักที่เบา ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง และความต้านทานสัมผัสต่ำ [55]

### 3.5 ความดันตกในช่องทางการไหลของสารตั้งต้น

Barbir [36] ได้เสนอวิธีการประเมินความดันตกในช่องทางการไหล จากหลักกลศาสตร์ของไหล เบื้องต้น ความดันตกสามารถประเมินได้โดยง่ายจาก

$$\Delta p = \sum K \rho \frac{v^2}{2} + \sum f \frac{L}{D_h} \rho \frac{v^2}{2} \quad (25)$$

โดย  $K$  คือ ค่าคงที่การสูญเสียตรง,  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของสารตั้งต้น,  $v$  คือ ความเร็วการไหลของ สารตั้งต้น ซึ่งคำนวณได้จาก

$$v = \frac{\dot{Q}}{A_{ch} N_{cell} N_{ch}} \quad (26)$$

โดยที่  $\dot{Q}$  คือ อัตราการไหลของอากาศ,  $A_{ch}$  คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล,  $N_{cell}$  คือ จำนวนเซลล์ในเซลล์แถว,  $N_{ch}$  คือ จำนวนท่อขนานในแต่ละเซลล์ และ  $D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของช่องทางการไหล ซึ่งประเมินได้จาก

$$D_h = \frac{2WD}{W+D} \quad (27)$$

โดย  $W$  และ  $D$  คือ ความกว้างและความลึกของช่องทางการไหลตามลำดับ

ส่วน  $L$  คือ ความยาวช่องทางการไหล สำหรับช่องทางการไหลอากาศ ความยาวช่องทางการไหลมีค่าเท่ากับความกว้างของแผ่น flowfield ตามแนวการไหลอากาศ สำหรับช่องทางการไหลของไฮโดรเจน ความยาวประเมินจาก

$$L = \frac{A_{ch}}{N_{ch}(w_c + w_l)} \quad (28)$$

โดย  $A_{ch}$  คือ ขนาดพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยา และ  $w_l$  คือ ระยะระหว่างช่องทางการไหล และ  $Re$  คือ Reynold's number ซึ่งหาค่าได้จาก

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (29)$$

โดยที่  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดระหว่างสารตั้งต้นและช่องการไหล ซึ่งประเมินจาก

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T_0 + C}{T + C} \right) \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \quad (30)$$

ซึ่ง  $\mu_0$  คือ ค่าความหนืดที่รู้ค่า ที่อุณหภูมิ  $T_0$  และ  $C$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ มีค่าดังภาพที่ 28

Viscosity of Fuel Cell Gases (at 25°C)

	Viscosity $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	Coefficient $C$
Hydrogen	$0.92 \times 10^{-5}$	72
Air	$1.81 \times 10^{-5}$	120
Water vapor	$1.02 \times 10^{-5}$	660

ภาพที่ 28 ค่าความหนืดของสารในเซลล์เชื้อเพลิง [36]

เนื่องจากภูมิอากาศของประเทศไทยที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดผสมต้องถูกประเมินจากสมการ

$$\mu_{mix} = \frac{\mu_1}{1 + \Psi_1 \frac{M_2}{M_1}} + \frac{\mu_2}{1 + \Psi_2 \frac{M_1}{M_2}} \quad (31)$$

โดยที่เลขตัวห้อย 1 และ 2 บอกถึงส่วนประกอบที่ 1 และ 2 ของสารผสม และ

$$\Psi_1 = \frac{\sqrt{2}}{4} \left( 1 + \left( \frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^{0.5} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^{0.25} \right)^2 \left( 1 + \frac{r_1}{r_2} \right)^{-0.5} \quad (32)$$



$$\Psi_2 = \frac{\sqrt{2}}{4} \left( 1 + \left( \frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{0.5} \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{0.25} \right)^2 \left( 1 + \frac{r_2}{r_1} \right)^{-0.5} \quad (33)$$

ซึ่ง  $r$  คือ สัดส่วนเชิงปริมาตรของสารส่วนประกอบแต่ละชนิด

ความรู้ข้างต้นนี้จะถูกนำไปใช้ทั้งทางฝั่งแอโนดและแคโทด โดยทางฝั่งแอโนดจะพิจารณาการสูญเสียเฉพาะที่เกิดภายในแผ่น flowfield เท่านั้น ภาระการสูญเสียในช่องทางการไหลส่วนอื่นไป วาล์วควบคุมความดันของไฮโดรเจนจะถูกตั้งไว้ที่ความดันสูงกว่าค่าความดันตกที่ประเมินได้นี้ แต่เนื่องจากค่าความดันนี้มีความสัมพันธ์กับความดัน clamping

### 3.6 ความดัน Clamping

ความดัน clamping ที่เหมาะสมที่มีผู้ได้ทำการศึกษามีค่าที่ไม่สอดคล้องกัน (1 – 1.5 MPa โดย Xing [57], 0.5 – 1.0 MPa โดย Taymaz [58], 10 – 20 bar โดย Chang [59] และ 1.93 MPa โดย Zhou [60]) ดังนั้น ค่าความดันที่เหมาะสมจะถูกปรับตั้ง โดยการยึดตาม Karvonen [61] ที่ 1 MPa แทนการสุ่มทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม เพราะเสี่ยงต่อการสร้างความเสียหายต่อ MEA เนื่องจากความดัน clamping ส่งผลกระทบต่อความพรุนและการเสื่อมสภาพของ MEA ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง [57-60]

การยึดเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์เข้ากันเป็นเซลล์แถวนิยมใช้ tie rod และแป้นเกลียว การขันแป้นเกลียวต้องกระทำด้วยแรงบิดที่สามารถประเมินได้จาก

$$T = \frac{FK_b D_b}{N_b} \quad (34)$$

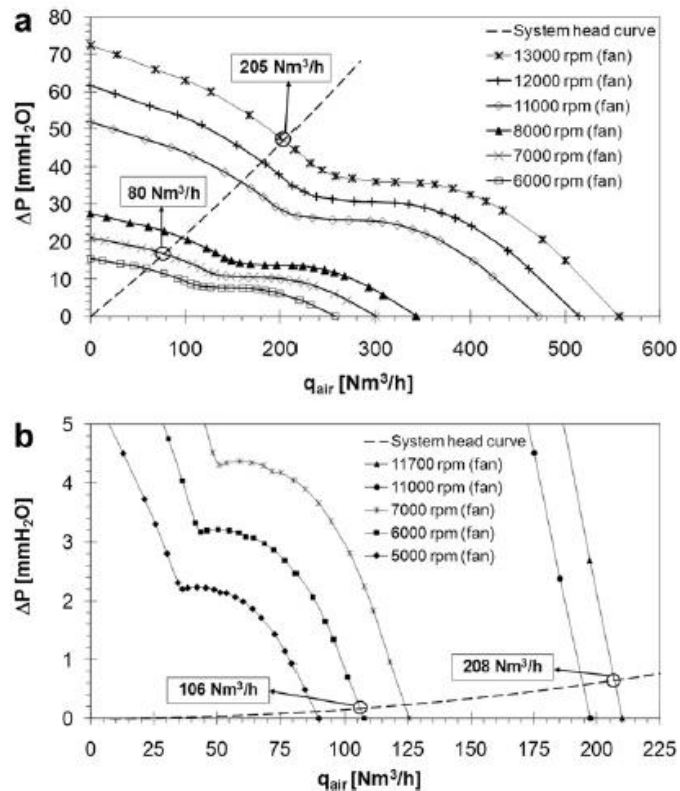
โดย  $F$  คือ แรง clamping,  $K_b$  คือ สัมประสิทธิ์เสียดทาน ซึ่งมีค่า 0.2 สำหรับการรัดแบบแห้ง และ 0.17 สำหรับการรัดแบบหล่อลื่น,  $D_b$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแป้นเกลียวและ  $N_b$  คือ จำนวนชุดของ tie-rod และแป้นเกลียว [36]

### 3.7 การทำงานของพัดลม

พัดลมเป็นอุปกรณ์ทางกลชนิดหมุน (rotating equipment) เอกลักษณ์ของอุปกรณ์รูปแบบนี้คือ เส้นโค้ง characteristic แต่ละอุปกรณ์จะมีเส้นโค้งที่แตกต่างกันไปตามจุดทำงานและขนาด กระแสไฟฟ้าป้อนเข้าพัดลม การออกแบบระบบและการทำงานของพัดลมให้สอดคล้องกับสภาวะทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นการ optimize เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบได้อีกทางหนึ่ง ประเภทของพัดลมที่นิยมนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง คือ พัดลมแบบ axial

ตัวอย่างหนึ่งของการออกแบบระบบและการทำงานของพัดลมจัดทำโดย Lopez-Sabiron [11] พัดลม axial สองขนาดถูกนำมาปรับใช้ โดยพัดลมขนาดเล็กกว่า 4 เครื่อง ถูกจัดให้ทำงานพร้อมกันและวางตำแหน่งไว้ที่ขอบของเซลล์แถว ขณะที่พัดลมขนาดใหญ่ 2 เครื่อง ถูกจัดไว้ตรงกลาง

เซลล์แถว สมการของเส้นโค้ง characteristic ของพัดลมทั้งสองขนาดถูกสร้างขึ้นจากผลการทดสอบพัดลม และนำมาใช้ร่วมกับเส้นความดันตกภายในช่องทางการไหลอากาศเพื่อหาจุดทำงานของพัดลม ดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 การหาจุดทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบพัดลมของ Lopez-Sabiron [11]

a) พัดลมกลาง และ b) พัดลมด้านข้าง

จุดที่น่าสนใจคือ การแบ่งช่วงการทำงานของพัดลมที่เข้าใจง่าย ทำให้การควบคุมทำได้โดยง่าย ที่ภาระกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 15 A ชุดพัดลมกลางจะทำงานที่ความเร็วรอบ 7,000 rpm ที่ช่วงภาระกระแสไฟฟ้าระหว่าง 15 – 35 A พัดลมกลางจะถูกเพิ่มความเร็วรอบเป็น 13,000 rpm ต่อมา ที่ภาระกระแสไฟฟ้า 35 – 50 A พัดลมข้างจะมาช่วยเสริมการทำงานของพัดลมกลาง โดยทำงานที่ความเร็วรอบ 6,000 rpm และสุดท้าย เมื่อภาระกระแสไฟฟ้าสูงกว่า 50 A พัดลมด้านข้างจะเพิ่มความเร็วรอบไปที่ 11,700 rpm ขณะที่พัดลมกลางยังคงการทำงานที่ 13,000 rpm ดังแสดงในภาพที่ 30 ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงนี้สามารถทำงานได้ตามเป้าหมายและระบบพัดลมสามารถระบายอากาศเพื่อรักษาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในเซลล์แถวได้

Regime	Working condition	$I$	$q_{\text{air, total supplied}}$
		A	Nm <sup>3</sup> /h
1	Only central fans	<15	80
	7000 min <sup>-1</sup> 80 Nm <sup>3</sup> /h		
2	Only central fans	15–35	205
	13 000 min <sup>-1</sup> 205 Nm <sup>3</sup> /h		
3	Central fans	35–50	417
	13 000 min <sup>-1</sup> 205 Nm <sup>3</sup> /h		
	Backs up lateral fans		
	6000 min <sup>-1</sup> 212 Nm <sup>3</sup> /h		
4	Central fans	>50	621
	13 000 min <sup>-1</sup> 205 Nm <sup>3</sup> /h		
	Backs up lateral fans		
	11 700 min <sup>-1</sup> 416 Nm <sup>3</sup> /h		

ภาพที่ 30 ช่วงการทำงานของระบบพัดลมของ Lopez-Sabiron [11]

## บทที่ 4 รายละเอียดชุดทดสอบแบบเซลล์เดี่ยว

องค์ประกอบของชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่ผู้วิจัยต้องจัดทำขึ้น ได้แก่ แผ่น flowfield, แผ่นรวมกระแส และแผ่นประกบรีม นอกจากนี้ ชุดพัฒนาต้องถูกผลิตแยกเพื่อการถอดประกอบได้อย่างสะดวก

ภายหลังการทบทวนงานวิจัยที่ได้ผลิตเซลล์เชื้อเพลิงจริงเพื่อทำการทดสอบ การนำสมการและวิธีการทั้งหมดมาสังเคราะห์และตัดสัณเป็นขนาดและลักษณะของงานออกแบบชุดทดสอบ ได้ถูกนำเสนอไว้ในบทนี้

### 4.1 รูปแบบเส้นทางการไหลในเซลล์แถว

เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode มีรูปแบบการไหลไฮโดรเจนภายในเซลล์แถวแบบประยุกต์ระหว่าง Z ท่อขาออกของไฮโดรเจนเป็นแบบปลายปิด แต่เพื่อป้องกันสถานะน้ำท่วมทางฝั่งแอโนด วาล์วขับ (purge valve) จะถูกติดตั้งที่ท่อขาออก

เส้นทางการไหลของอากาศมีทิศทางตั้งฉากกับเส้นทางการไหลไฮโดรเจน ผ่านทางช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield ที่เปิดสู่สิ่งแวดล้อม โดยมีพัดลมช่วยผลักดันอากาศเข้าสู่รูขนาดเล็กเหล่านี้

### 4.2 รายละเอียดของแผ่น MEA

แผ่น MEA จากบริษัท FuelCellsEtc ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น HA-MEA ขนาดพื้นที่เกิดปฏิกิริยา  $100 \text{ cm}^2$  ซึ่งมี GDL อยู่ที่ผิวหน้าทั้งสองด้าน (ภาพที่ 31) ถูกเลือกใช้ เมมเบรนผลิตจาก Nafion® 212 หนา  $0.002 \text{ นิ้ว}$  ปริมาณ platinum loading อยู่ที่  $0.5 \text{ mg/cm}^2$  ขนาดพื้นที่เกิดปฏิกิริยานี้ถูกเลือก เนื่องจากความมุ่งหมายที่จะประยุกต์เอาความรู้จากงานวิจัยนี้ไปใช้เพื่อพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงขนาด  $2 \text{ kW}$  ซึ่งใหญ่กว่าเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อการวิจัยทั่วไปแต่เล็กกว่าสำหรับการใช้งานจริงดังที่อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 3.1 และเพื่อป้องกันการรั่วซึมของไฮโดรเจนและการเกิดความเค้นสูงบนแผ่น MEA แผ่นกันซึมที่ผลิตจากซิลิโคนจากบริษัท FuelCellStore ประเทศสหรัฐอเมริกา ถูกนำมาตัดแต่งและวางประกบทั้งสองด้านของแผ่น MEA



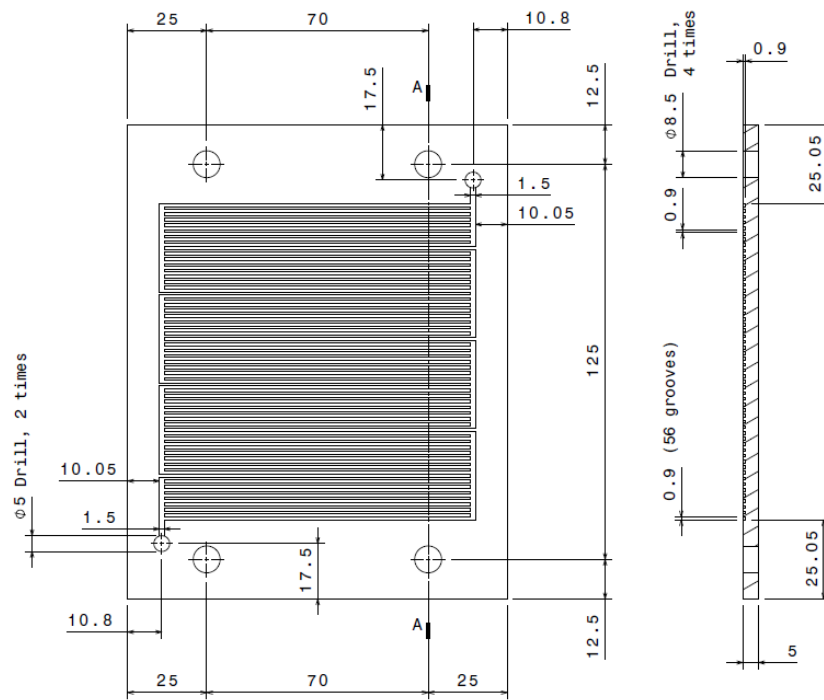
ภาพที่ 31 แผ่น MEA จาก FuelCellsEtc

#### 4.3 รายละเอียดของแผ่น Flowfield

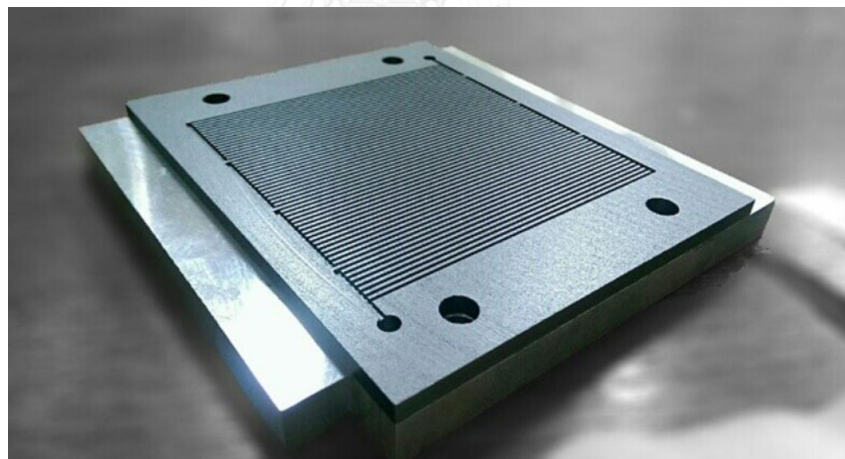
แผ่น flowfield ทั้งหมดในวิทยานิพนธ์นี้ถูกออกแบบโดยผู้จัดทำและถูกสั่งผลิตจาก บริษัท Schunk Kohlenstofftechnik GmbH ประเทศเยอรมนี

แผ่น flowfield ฝั่งแอโนด ผลิตจากแกรไฟต์ขนาด  $15 \times 12 \times 5 \text{ mm}^3$  กัดทำร่องช่องทาง การไหลขนาดกว้าง  $0.9 \text{ mm}$  ลึก  $0.9 \text{ mm}$  ด้วยรูปแบบ flowfield แบบ parallel-serpentine ดังแสดงในภาพที่ 32 และภาพที่ 33 ขนาดสัดส่วนของช่องทางไหลนี้มีค่า

$$D_h = \frac{2 * 0.0009m * 0.0009m}{0.0009m + 0.0009m} = 0.0009 \text{ m} \quad (35)$$



ภาพที่ 32 ภาพวาดของแผ่น flowfield ฝั่งแอโนด



ภาพที่ 33 แผ่น flowfield ฝั่งแอโนด

แผ่น flowfield ฝั่งแคโทดผลิตจากแกรไฟต์ ถูกกัดให้มีช่องทางการไหลแบบช่องตรงที่มีพื้นที่หน้าตัดของช่องขนาด  $2 \text{ mm}^2$ ,  $5 \text{ mm}^2$  และ  $8 \text{ mm}^2$  รายละเอียดของช่องทางการไหลเป็นดัง

แผ่น flowfield ที่กำหนดให้มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันจะมีสัดส่วนรูปร่างของช่อง 0.80 และ 1.25 อย่างละชุด ความแตกต่างของสัดส่วนรูปร่างนี้ไม่กระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก เช่น กรณีของช่องทางการไหลพื้นที่หน้าตัด  $2 \text{ mm}^2$  ที่มีค่าสัดส่วนรูปร่าง 0.80 คิดเป็นขนาดความกว้าง 1.26 mm และความลึก 1.58 mm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

$$D_h = \frac{2 \times 1.26 \times 1.58}{1.26 + 1.58} = 1.402 \text{ mm} \quad (36)$$

และที่สัดส่วนรูปร่าง 1.25 คิดเป็นขนาดความกว้าง 1.58 mm และความลึก 1.26 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเป็น

$$D_h = \frac{2 \times 1.58 \times 1.26}{1.58 + 1.26} = 1.402 \text{ mm} \quad (37)$$

เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของช่องทางการไหลทั้งสองมีค่าเท่ากัน

นอกจากนี้ จากสมการที่ 2.1 สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์เสียดทานสำหรับช่องทางการไหลที่มีสัดส่วนรูปร่าง 0.80 และ 1.25 ที่การไหลแบบราบเรียบ ได้

$$f = \frac{55 + 41.5e^{-\frac{3.4}{Re}}}{Re} = 55.59Re^{-1} \quad (38)$$

และ

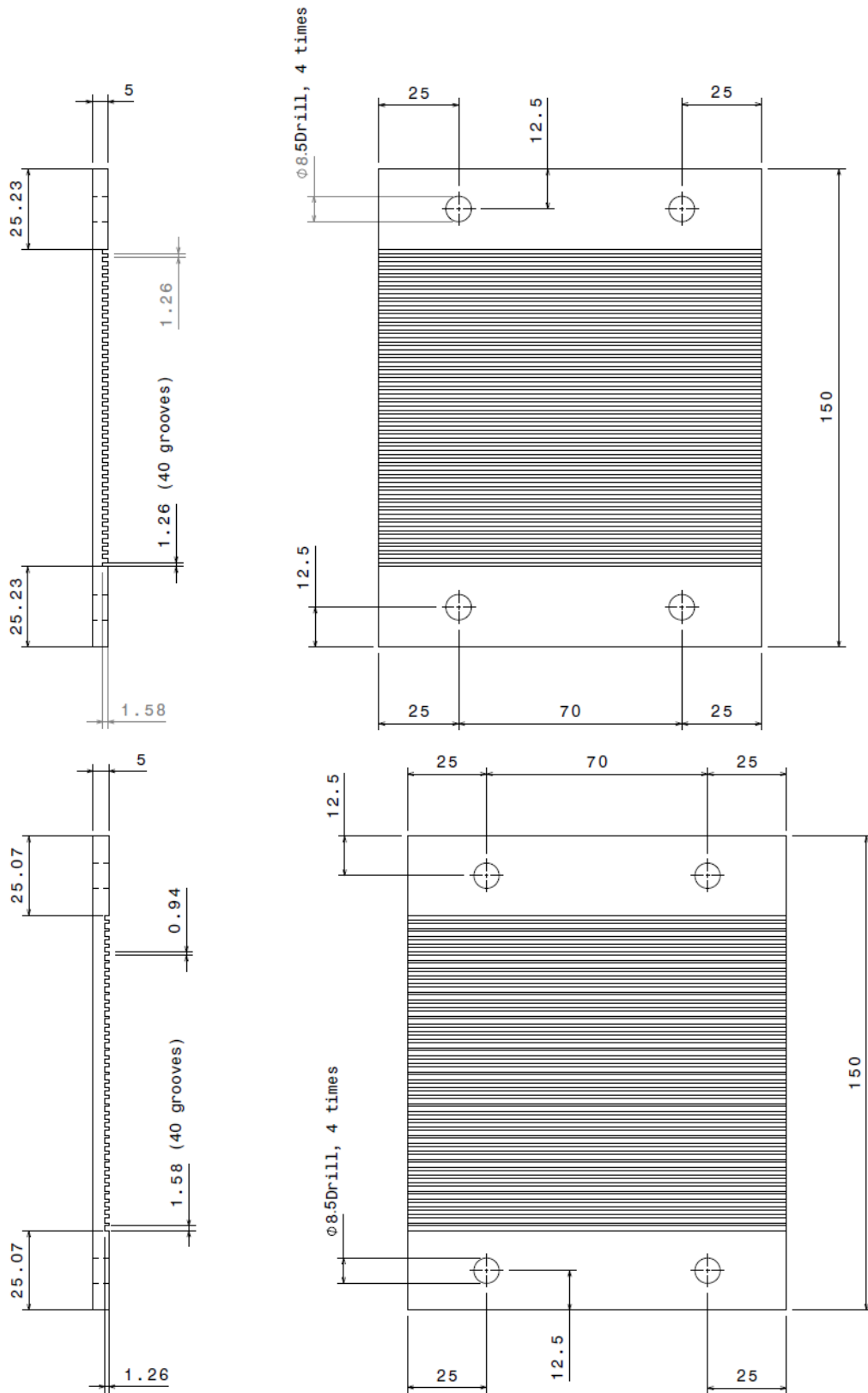
$$f = \frac{55 + 41.5e^{-\frac{3.4}{1.25Re}}}{Re} = 57.73Re^{-1} \quad (39)$$

ตามลำดับ พบว่าค่าทั้งสองแตกต่างกันไม่มาก เมื่อคำนวณเป็นขนาดความดันตกในช่องทางการไหลขนาดภาวะของพัดลมจึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 1 รายละเอียดของช่องทางการไหลอากาศแผ่น flowfield ฝั่งแคโรต

พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	สัดส่วนรูปร่าง	ความกว้าง (mm)	ความลึก (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ไฮดรอลิก (mm)	Friction Factor
2.0	0.80	1.26	1.58	1.402	55.59Re <sup>-1</sup>
	1.25	1.58	1.26	1.402	57.73Re <sup>-1</sup>
5.0	0.80	2.00	2.50	2.222	55.59Re <sup>-1</sup>
	1.25	2.50	2.00	2.222	57.73Re <sup>-1</sup>
8.0	0.80	2.53	3.16	2.810	55.59Re <sup>-1</sup>
	1.25	3.16	2.53	2.810	57.73Re <sup>-1</sup>

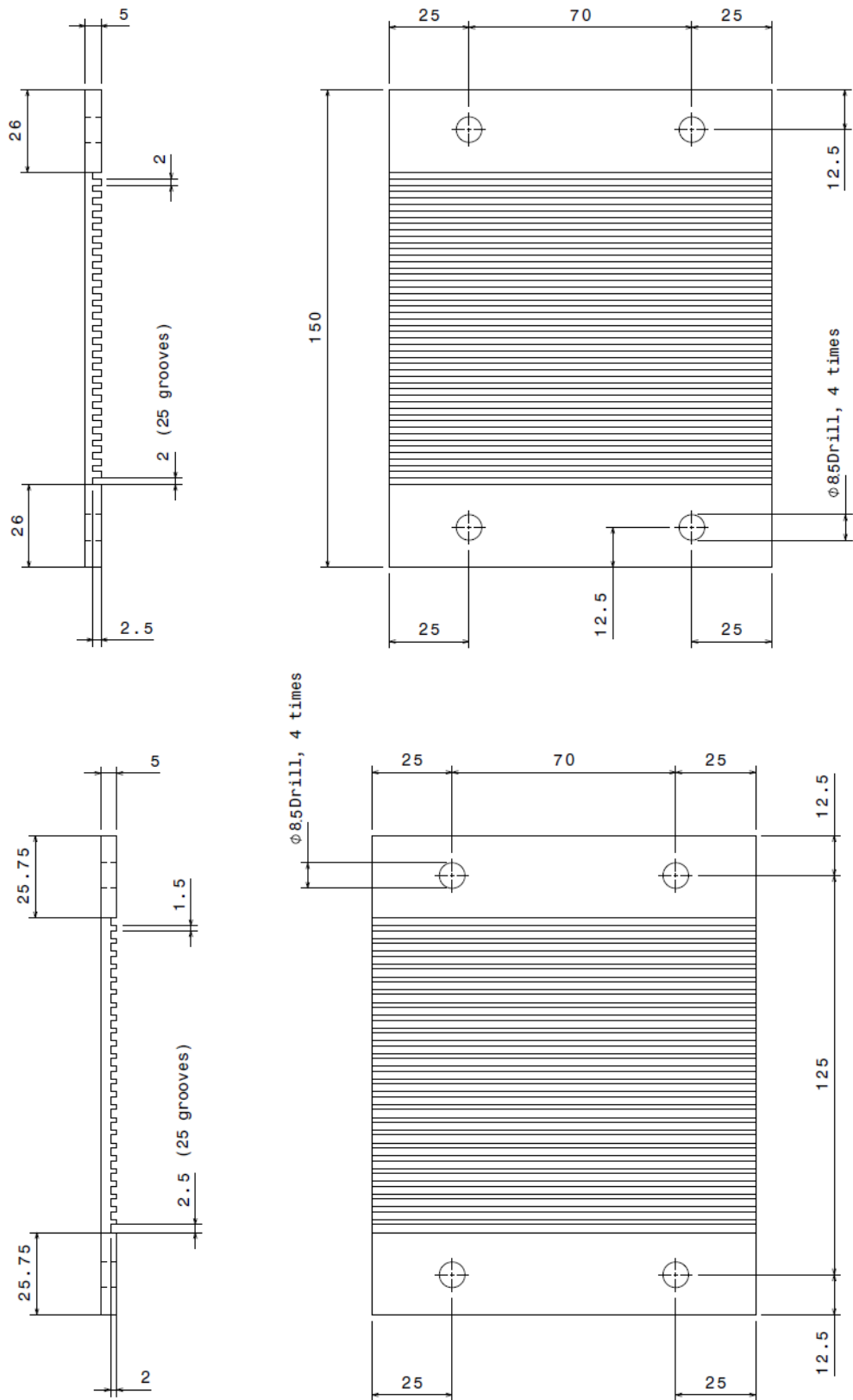
ข้อมูลของช่องทางการไหลในตารางที่ 1 ได้ถูกนำมาใช้ในการวาดแบบของแผ่น flowfield ขนาดของแผ่น flowfield ที่กำหนด คือ 15 x 12 x 5 mm<sup>3</sup> ภาพวาดของแผ่น flowfield ฝั่งแคโรตที่มีขนาดช่องการไหลอากาศ 2, 5 และ 8 mm<sup>2</sup> เป็นดังภาพที่ 34 - ภาพที่ 36 ตามลำดับ



ภาพที่ 34 ภาพวาดของแผ่น flowfield ฟิ้งแคโรต

ที่มีพื้นที่หน้าตัดช่องทางการไหล  $2 \text{ mm}^2$  ที่มีสัดส่วนรูปร่าง 0.8 และ 1.25 (ลำดับจากบนลงล่าง)





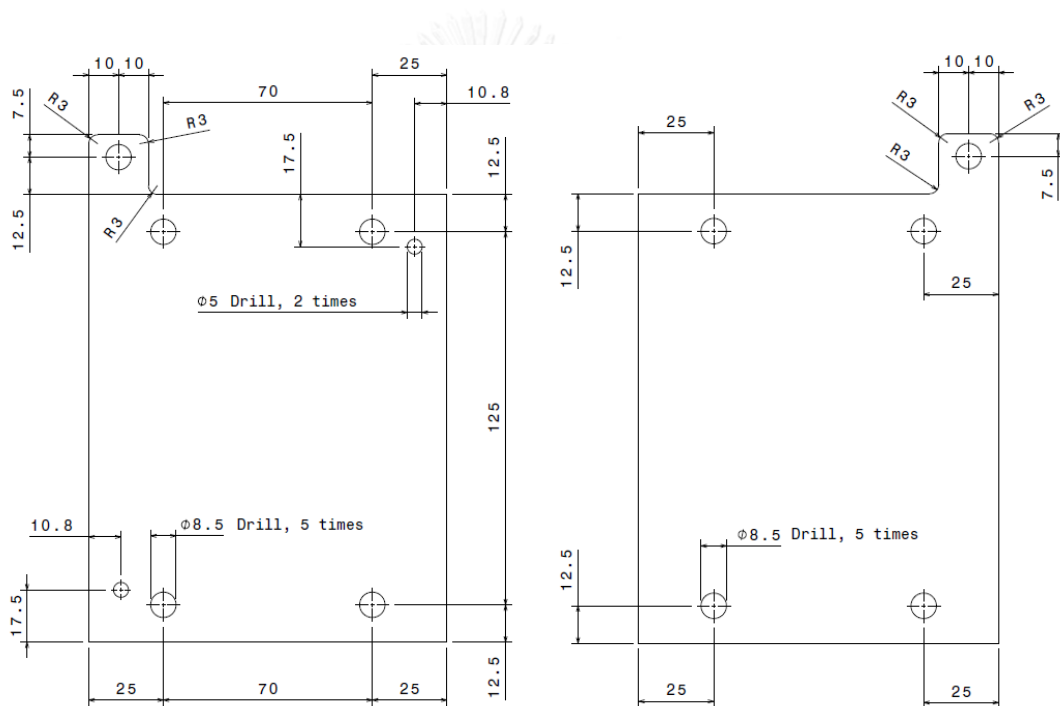
ภาพที่ 35 ภาพวาดของแผ่น flowfield ฟังก์ชัน

ที่มีพื้นที่หน้าตัดช่องทางการไหล  $5 \text{ mm}^2$  ที่มีสัดส่วนรูปร่าง 0.8 และ 1.25 (ลำดับจากบนลงล่าง)

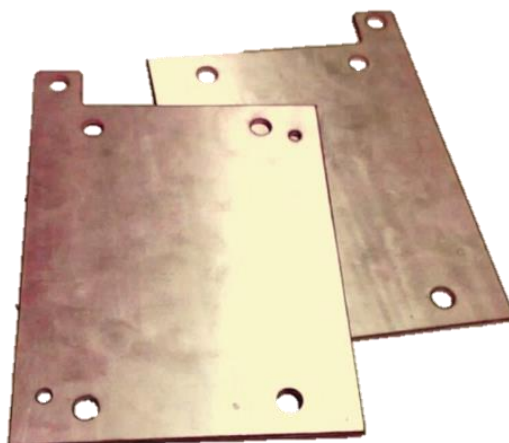


#### 4.4 แผ่นรวมกระแส แผ่นฉนวน และแผ่นประกบปริม

แผ่นรวมกระแส (current collector) หรือขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จะวางประกบแผ่น flowfield ทั้งสองด้าน แผ่นรวมกระแสผลิตจากโลหะที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง (ความต้านทานไฟฟ้าต่ำ) และความต้านทานไฟฟ้าสัมผัส (contact resistance) ต่ำ ในที่นี้เลือกใช้วัสดุเป็นแผ่นทองแดงชุบทองคำ (gold coating) ด้วยการชุบด้วยไฟฟ้า (electroplating) แผ่นทองแดงความหนา 2 mm ถูกสั่งตัดที่ บริษัท อันลี อุตสาหกรรม จำกัด ให้มีรูปร่างตามแบบดังภาพที่ 37 ภาพที่ 38 แสดงแผ่นทองแดงที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ซึ่งจะนำไปชุบทองคำ สำเร็จเป็นแผ่นรวมกระแสดังภาพที่ 39



ภาพที่ 37 ภาพวาดของแผ่นรวมกระแสฝั่งแอโนดและแคโทด (ลำดับจากซ้ายไปขวา)

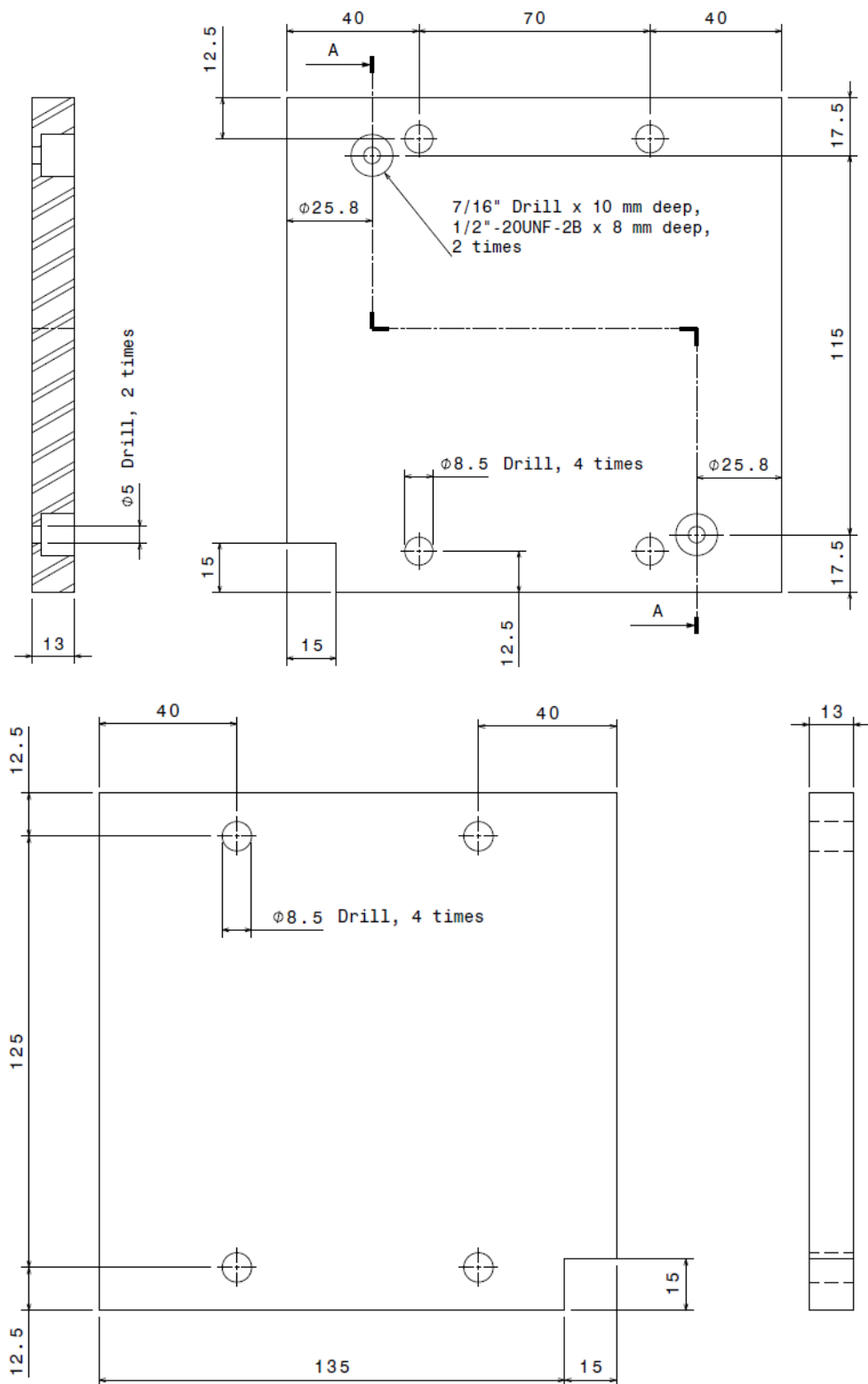


ภาพที่ 38 แผ่นทองแดงตัดตามแบบ



ภาพที่ 39 แผ่นรวมกระแสดังแอนด (ซ้าย) และแคโธด (ขวา)

แผ่นประกบบริม (end plate) ต้องมีความแข็งแรงสูง ทนต่อการเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงตัดที่เกิดขึ้นจากการขัน stud รััดแผ่นประกบบริมหัวท้าย เพื่อรักษาการกระจายแรงกดให้ใกล้เคียงกันทั้งเซลล์ แต่เนื่องจากการออกแบบให้ตำแหน่งสลักภัณฑ์ลอดทะลุโครงสร้าง จึงไม่มีความเสี่ยงต่อการโก่งของแผ่นประกบบริม ในที่นี้จึงออกแบบให้แผ่นประกบบริมผลิตจากอลูมิเนียมอัลลอย 7075 ความหนา 1.3 cm ดังแสดงไว้ในภาพที่ 40 และภาพที่ 41 แผ่นประกบบริมถูกสั่งผลิตที่ ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็กซ์เซล ทูล ประเทศไทย

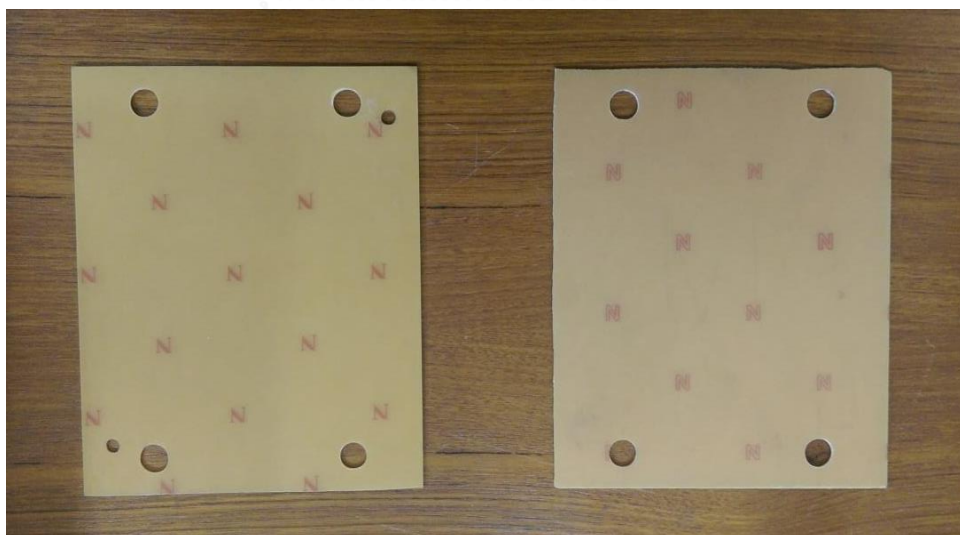


ภาพที่ 40 ภาพวาดแผ่นประกบกับริมห้วท้ายฝั่งแอนตและแคโรต



ภาพที่ 41 แผ่นประกับริมหัวท้ายฝั่งแอโนด (ซ้าย) และแคโทด (ขวา)

นอกจากส่วนประกอบหลักของเซลล์เชื้อเพลิงที่กล่าวไปข้างต้น ยังมีอีกส่วนประกอบ คือ แผ่นฉนวน (insulation plate) ได้ถูกนำมาแทรกระหว่างแผ่นรวมกระแสและแผ่นประกับริมหัวท้ายเพื่อป้องกันการลัดวงจร แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ แผ่นฉนวนถูกกำหนดให้เป็นวัสดุที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้าและรับแรงกด จึงเลือกใช้แผ่นเบกาไลต์ ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและสามารถกระจายความเค้นได้ดี นำมาตัดให้ได้ขนาด 15 cm x 12 cm และเจาะรูสำหรับสลักกัณฑ์และช่องทางการไหลไฮโดรเจนสำหรับฝั่งแอโนด ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 แผ่นฉนวนฝั่งแอโนด (ซ้าย) และแคโทด (ขวา)

#### 4.5 อัตราการไหลและความดันขาเข้าไฮโดรเจนเพื่อสร้างกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เพื่อการผลิตไฟฟ้าที่กำลังสูงสุด (ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ  $0.3 \text{ A/cm}^2$ ) อัตราการไหลสูงสุดของไฮโดรเจนสามารถประเมินได้จากสมการที่ (9)

$$\dot{m}_{H_2,in} = \frac{2.016 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} * 1 * \frac{0.3 \text{ A}}{\text{cm}^2} * 10^2 \text{ cm}^2}{2 * 96485 \text{ C/mol}} = 3.13 \times 10^{-7} \text{ kg/s} \quad (40)$$

ในเบื้องต้นกำหนดความดันแก๊สไฮโดรเจนที่  $1.5 \text{ kPa}$  อัตราการไหลของมวลไฮโดรเจนสามารถประเมินเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรได้

$$\dot{Q}_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2,in}}{\rho_{H_2}} = \frac{3.13 \times 10^{-7} \text{ kg/s}}{0.0899 \text{ kg/m}^3 * \frac{1.5 \text{ kPa}}{1.03 \text{ kPa}} * \frac{273 \text{ K}}{298 \text{ K}}} = 2.61 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \quad (41)$$

และประเมินเป็นความเร็วการไหลภายในช่องทางการไหลด้วยสมการที่ (26) ได้

$$v_{H_2} = \frac{2.61 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}{(0.0009 \text{ m})^2 * 1 * 8} = 0.403 \text{ m/s} \quad (42)$$

ซึ่งแสดงว่าการไหลเป็นแบบราบเรียบ เนื่องจาก

$$Re = \frac{0.0899 \text{ kg/m}^3 * \frac{1.5 \text{ kPa}}{1.03 \text{ kPa}} * \frac{273 \text{ K}}{298 \text{ K}} * 0.403 \text{ m/s} * 0.0009 \text{ m}}{0.92 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 4.73 \quad (43)$$

ประเมินสัมประสิทธิ์เสียดทานตามสมการ (1) ได้

$$f = \frac{55 + 41.5 e^{\frac{3.4}{0.0009 \text{ m}/0.0009 \text{ m}}}}{4.73} = 11.9 \quad (44)$$

และความยาวของช่องทางการไหลตามสมการ (28) คือ

$$L = \frac{10^2 \text{ cm}^2}{8(0.09 \text{ cm} + 0.09 \text{ cm})} = 69.4 \text{ cm} \quad (45)$$

ความดันตกในช่องทางการไหลของไฮโดรเจนแบบ parallel-serpentine ประเมินอย่างแม่นยำด้วยการคำนวณจากสมการ (20) ก่อนข้างซับซ้อน ในเบื้องต้น จึงละการประเมินผลการสูญเสียรองและประเมินโดยกำหนดรูปแบบช่องทางการไหลเป็นแบบ parallel 8 ช่อง ความดันตกในช่องทางการไหลไฮโดรเจนจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \Delta p &= 11.9 * \frac{0.694 \text{ m}}{0.0009 \text{ m}} * \frac{0.0899 \text{ kg}}{\text{m}^3} * \frac{1.5 \text{ kPa}}{1.03 \text{ kPa}} * \frac{273 \text{ K}}{298 \text{ K}} * \frac{(0.403 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} \\ &= 89.7 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (46)$$

ผลลัพธ์มีค่าน้อยมาก ดังนั้น ในเบื้องต้น ความดันไฮโดรเจนขาเข้าจะถูกปรับตามความสะดวกของผู้วิจัย ซึ่งมีค่าตั้งแต่  $0.2 - 2.0 \text{ bar}$

#### 4.6 อัตราการไหลและความดันขาเข้าอากาศเพื่อสร้างกำลังไฟฟ้าสูงสุด

อัตราการไหลของอากาศเพื่อเป็นสารตั้งต้นสำหรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าออกแบบที่ 0.3 A/cm<sup>2</sup> ประเมินจากสมการ 3.6 ได้

$$\begin{aligned} \dot{m}_{air,in} &= \frac{2 * 28.97 * 10^{-3} \text{ kg/mol} * 1 * (10\text{cm})^2 * \frac{0.3A}{\text{cm}^2}}{4 * 0.21 * 96485 \text{ C/mol}} \\ &= 2.14 * 10^{-5} \text{ kg/s} \end{aligned} \quad (47)$$

อัตราการไหลของมวลอากาศหล่อเย็นประเมินได้จากสมการ (22) แต่เพื่อกำหนดขนาดพัดลมเบื้องต้น จะละการพิจารณาการแผ่รังสีความร้อนไป เมื่อกำหนดให้พื้นที่ผิวสำหรับการพาความร้อนและแผ่รังสีความร้อนเป็น 0.020 และ 0.0054 m<sup>2</sup> ตามลำดับแล้ว ค่าคงที่เบื้องต้นและสภาวะแวดล้อมถูกกำหนดดังนี้

$$\begin{aligned} Pr &= 0.697 \\ \alpha &= 2.98 * 10^5 \text{ m}^2/\text{s} \\ \beta &= 0.00286 \text{ K}^{-1} \\ \nu &= 2.08 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \\ c_p &= 1009 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{C}} \\ k &= 0.0267 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \\ T_s &= 348 \text{ K} \\ T_{amb} &= 298 \text{ K} \quad A_s \cong 0.00254 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

และทำการคำนวณตามสมการที่ (16) ถึงสมการที่ (23) แล้วจะได้ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาและแผ่รังสีความร้อนเป็นดังตารางที่ 2 ปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายเทออกจากเซลล์เดี่ยวน้อยกว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง แสดงว่า อัตราการไหลเพิ่มเติมมีความจำเป็นต่อการช่วยถ่ายเทความร้อนออกจากเซลล์เชื้อเพลิง และเมื่อคำนวณความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างอากาศขาเข้าและขาออก และอัตราการไหลอากาศเพื่อการหล่อเย็นต่ำสุด ที่เป็นไปได้ จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3 ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำน้อย แสดงถึงการถ่ายเทความร้อนออกทางอากาศที่ไม่ดีและต้องการปริมาณการไหลที่มากเพื่อถ่ายเทความร้อนให้เพียงพอ การไหลอากาศเพื่อการถ่ายเทความร้อนจึงไม่ใช่แบบระบายเรียบในกรณีนี้ อัตราการไหลจะถูกคำนวณโดยการกำหนดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกที่รับได้ และคำนวณกลับเป็นอัตราการไหลเพื่อการหล่อเย็นในภายหลัง



ตารางที่ 2 ปริมาณความร้อนในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุด ณ เงื่อนไขแวดล้อมที่กำหนด

ความร้อนที่เกิดขึ้น	ความร้อนจากการพาความร้อน	ความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน
29.5 W	6.75 W	7.32 W

ตารางที่ 3 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกต่ำสุด และอัตราการไหลอากาศเพื่อการหล่อเย็นของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุด

พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	สัดส่วนรูปร่าง	ความแตกต่างอุณหภูมิ (K)	อัตราการไหลเพื่อการหล่อเย็น (kg/s)
2	0.80	8.520	0.001450
	1.25	9.185	0.001345
5	0.80	13.64	0.0009060
	1.25	14.69	0.0008410
8	0.80	17.06	0.0007240
	1.25	18.36	0.0006730

ความดันตกในช่องทางการไหลอากาศที่อัตราการไหลสูงสุดสำหรับการสร้างกำลังไฟฟ้าสูงสุด และสำหรับการไหลแบบราบเรียบ ถูกประเมินด้วยสมการในหัวข้อ 3.5 และได้ผลเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ตามลำดับ สำหรับความดันในช่องทางการไหลอากาศที่อัตราการไหลสูงสุดสำหรับการหล่อเย็น ไม่ถูกพิจารณาตั้งที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ และในที่นี้ ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกจากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถอนุโลมให้มีค่าสูงสุดไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถประเมินขนาดความดันตกได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 4 ความดันตกในช่องทางการไหลอากาศที่อัตราการไหลอากาศสูงสุดสำหรับการสร้างกระแสไฟฟ้า

$A$ ( $mm^2$ )	$D_h$ ( $mm$ )	สัดส่วน รูปร่าง	$N_{ch}$	$v$ (m/s)	$Re$	$f$	$P$ (Pa)
2	1.402	0.8	40	0.22719	26.9805	2.06045	5.37062
2	1.402	1.25	40	0.22719	26.9805	2.13983	5.57754
5	2.222	0.8	25	0.14540	27.3669	2.03136	1.36834
5	2.222	1.25	25	0.14540	27.3669	2.10962	1.42112
8	2.81	0.8	20	0.11360	27.0382	2.05605	0.668464
8	2.81	1.25	20	0.11360	27.0382	2.13527	0.694218

ตารางที่ 5 ความดันตกในช่องทางการไหลอากาศที่อัตราการไหลอากาศสูงสุดที่ยังคงสภาพการไหลแบบราบเรียบ

$A$ ( $mm^2$ )	$D_h$ ( $mm$ )	สัดส่วน รูปร่าง	$N_{ch}$	$v$ (m/s)	$Re$	$f$	$P$ (Pa)
2	1.402	0.8	40	4.1508	492.940	0.112776	98.1225
2	1.402	1.25	40	4.1508	492.940	0.117121	101.903
5	2.222	0.8	25	2.6565	500.000	0.111184	25.0010
5	2.222	1.25	25	2.6565	500.000	0.115468	25.9642
8	2.81	0.8	20	2.0754	493.995	0.112536	12.2130
8	2.81	1.25	20	2.0754	493.995	0.116871	12.6835

ตารางที่ 6 ความดันตกใจช่องทางการไหลอากาศที่อัตราการไหลอากาศ เพื่อรักษาความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและขาออกให้มีค่าไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส

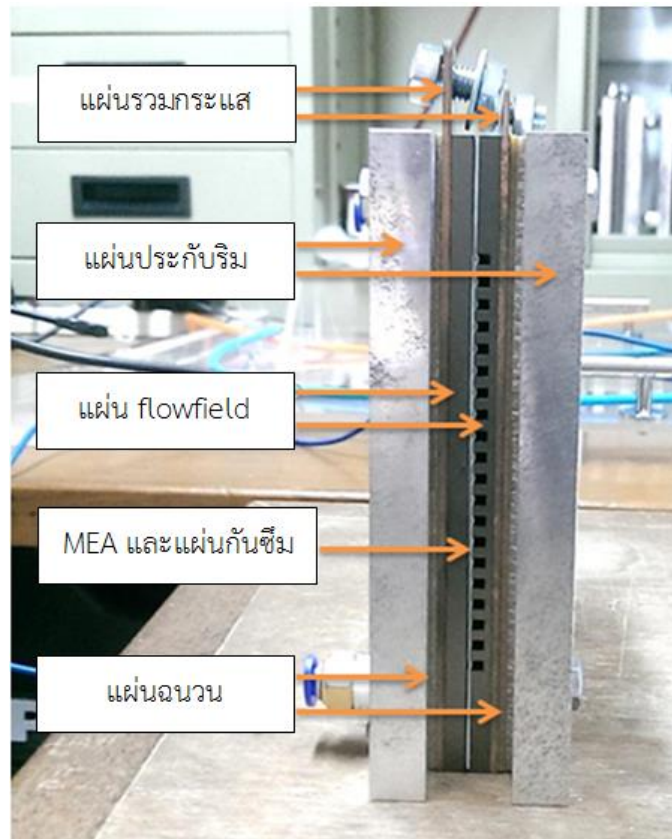
$A$ ( $mm^2$ )	$D_h$ ( $mm$ )	สัดส่วน รูปร่าง	$N_{ch}$	$v$ (m/s)	$Re$	$f$	$P$ (Pa)
2	1.402	0.8	40	2.6096	262.111	0.212093	61.6895
2	1.402	1.25	40	2.6096	262.111	0.220265	64.0663
5	2.222	0.8	25	1.6702	265.865	0.209098	15.7181
5	2.222	1.25	25	1.6702	265.865	0.217155	16.3237
8	2.81	0.8	20	1.3048	262.672	0.211640	7.67830
8	2.81	1.25	20	1.3048	262.672	0.219794	7.97412

#### 4.7 การประกอบเซลล์เชื้อเพลิง

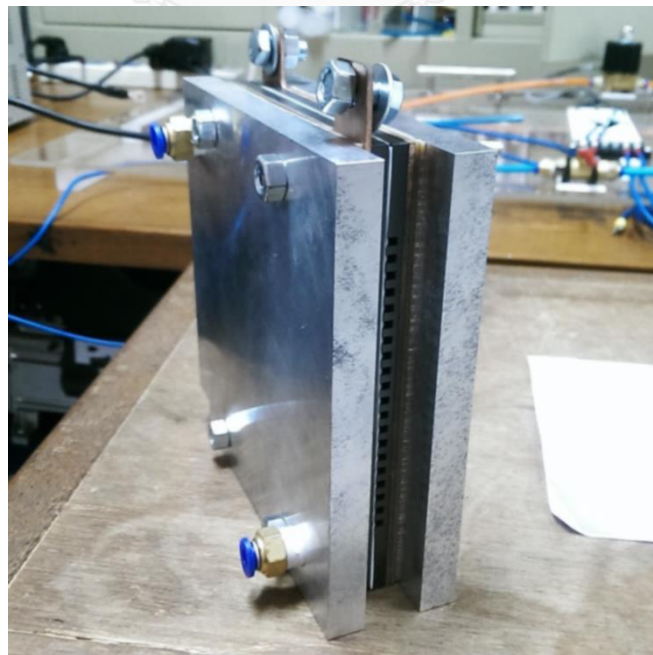
ลำดับการประกอบเซลล์เชื้อเพลิงเป็นไปตามภาพที่ 43 ส่วนประกอบทั้งหมดจะถูกรัดเข้าด้วยกันด้วยความดัน clamping 1 MPa โดยสลักเกลียวและแป้นเกลียว 4 ชุด ด้วยแรงบิดที่ประเมินได้ ดังนี้

$$T_b = \frac{1MPa \times (15cm \times 12cm) \times 0.2 \times 8mm}{4} = 7.2 Nm \quad (48)$$

สลักเกลียวจะถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการลัดวงจรภายในเซลล์ และเมื่อรัดสลักเกลียวทั้งหมดแล้วจะได้ชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง 6 ชุด ลักษณะดังภาพที่ 44 การประกอบกระทำบนแท่นประกอบอะคริลิกที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อเป็นต้นแบบแทนประกอบจริงซึ่งจะถูกปรับแก้ไปจากต้นแบบตามความเหมาะสม



ภาพที่ 43 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงของชุดทดสอบแบบเซลล์เดี่ยว

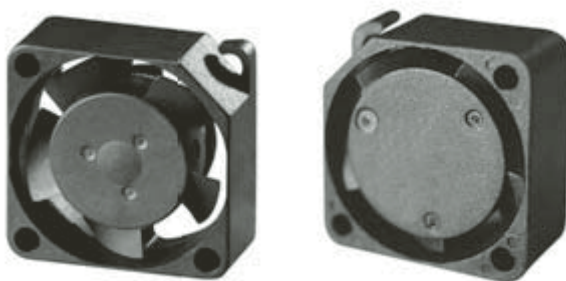


ภาพที่ 44 ชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวที่ประกอบเสร็จแล้ว

#### 4.8 ชุดพัดลม

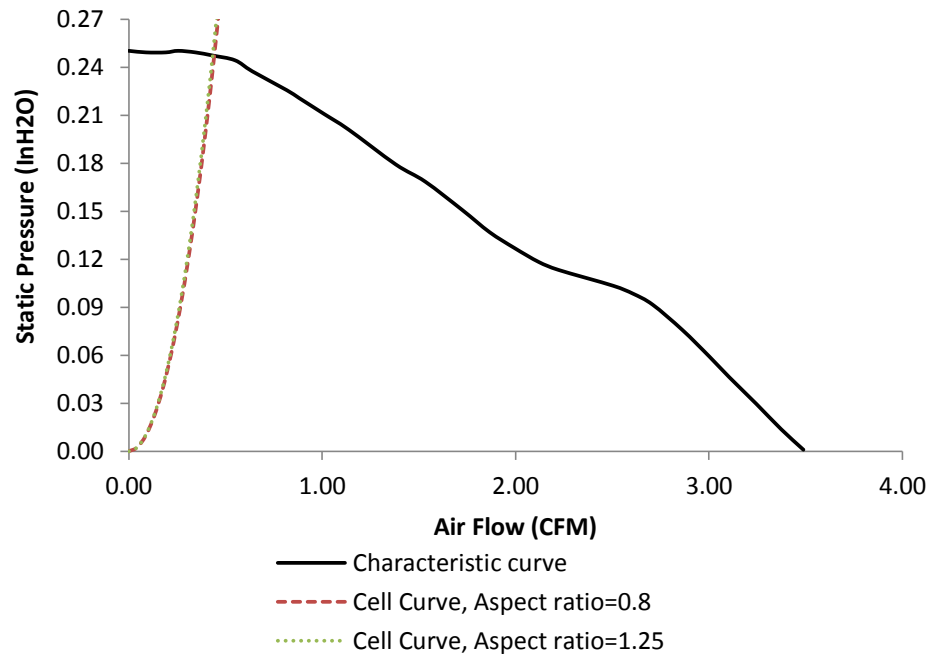
ชุดพัดลมประกอบด้วยมอเตอร์และพัดลม ชุดพัดลมสำหรับชุดทดสอบแบบเซลล์เดี่ยวและเซลล์แถวจะถูกสร้างแยกกัน พัดลมเป็นแบบ axial ซึ่งนิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode เนื่องจากมีอัตราการบริโภคกำลังไฟฟ้าน้อย มอเตอร์ผลิตจากแผ่นอะคริลิกต่อกันด้วยกาวอะคริลิก และ sealant แบบใส ซึ่งสามารถถอดแยกและประกอบยึดได้โดยง่าย

สำหรับการเลือกพัดลมแบบ axial ที่มีให้อัตราการไหลและความดันสถิตที่เหมาะสมเพื่อใช้กับชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวที่ได้ออกแบบทำได้ลำบาก เพราะการไหลเพื่อการทดสอบมีอัตราการไหลที่ต่ำ แต่ต้องการความดันที่ค่อนข้างสูง ในที่นี้จึงเลือกใช้พัดลมของ SUNON® รุ่น MC25100V1, MC17080V1 และ MC17080V2 (ภาพที่ 45) สำหรับชุดทดสอบขนาดช่องทางการไหล 2, 5 และ 8 mm<sup>2</sup> ตามลำดับ จุดทำงานของพัดลม คือ จุดที่เส้นโค้งความดันตกในช่องทางการไหลที่มีสัดส่วนรูปร่างเป็น 0.80 และ 1.25 ตัดกับเส้นโค้ง characteristic ของพัดลมเป็นดังภาพที่ 46 – ภาพที่ 48

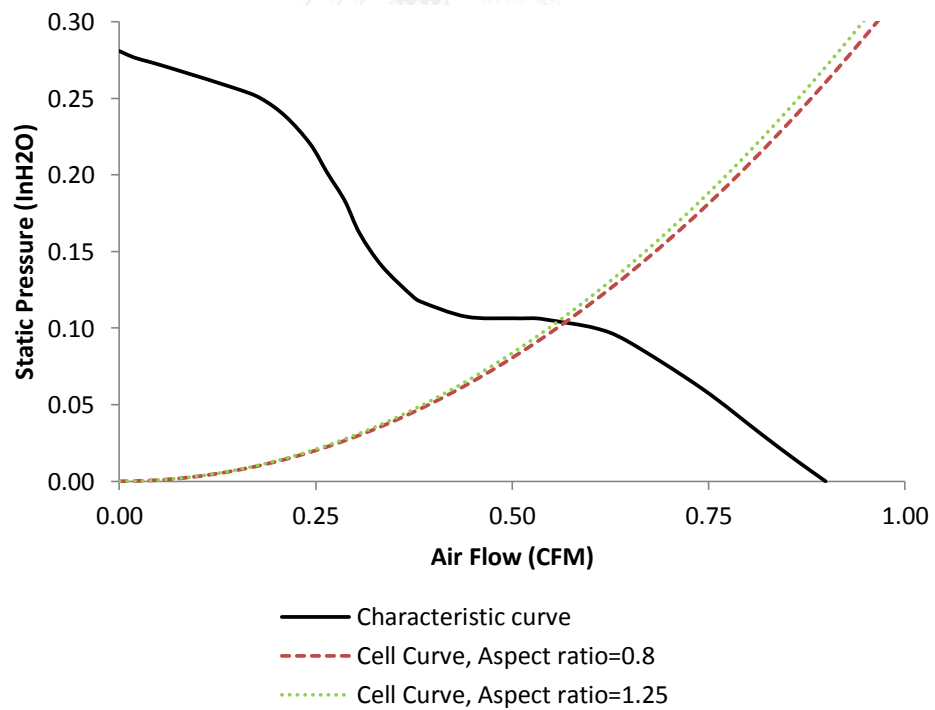


ภาพที่ 45 พัดลม SUNON

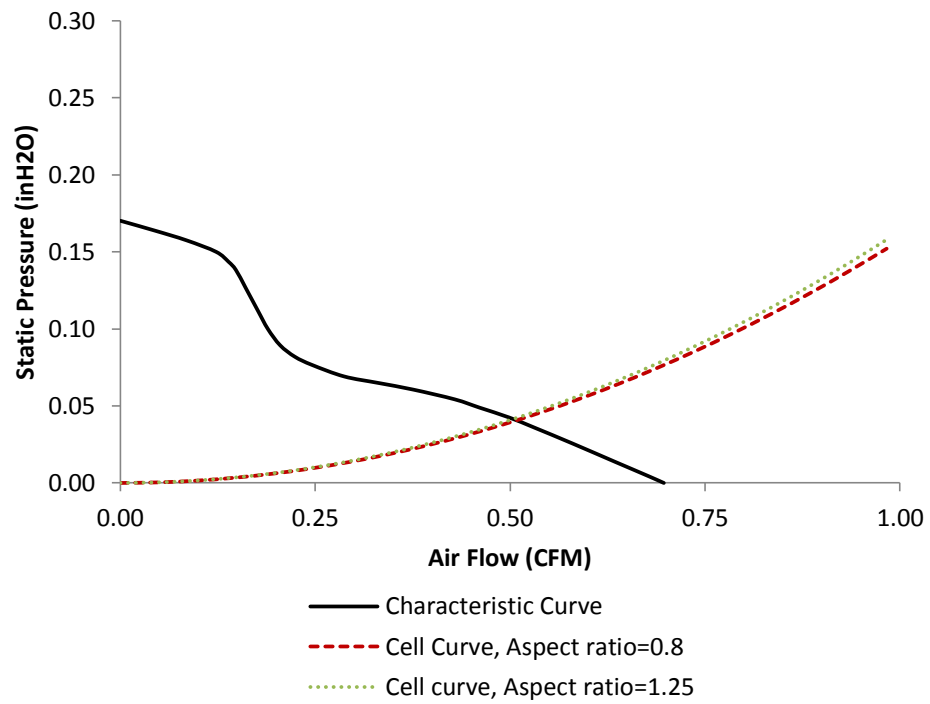
รุ่น MC25100V1 (ภาพซ้าย) , MC17080V1 และ MC17080V2 (ภาพขวา) [62]



ภาพที่ 46 เส้นโค้ง characteristic ของพัดลม SUNON รุ่น MC25100V1

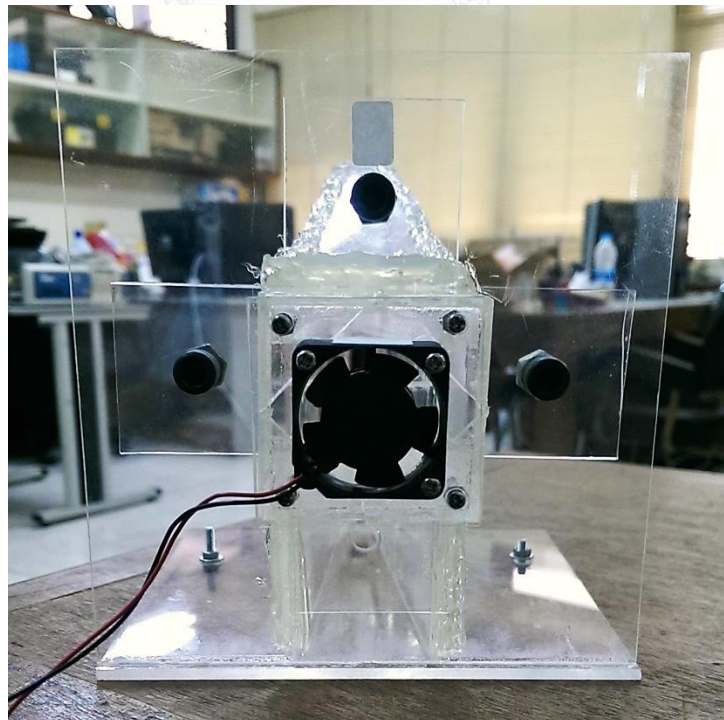


ภาพที่ 47 เส้นโค้ง characteristic ของพัดลม SUNON รุ่น MC17080V1



ภาพที่ 48 เส้นโค้ง characteristic ของพัดลม SUNON รุ่น MC17080V2

เมื่อประกอบพัดลมเข้ากับชุดอุปกรณ์จะได้เป็นชุดพัดลมที่สมบูรณ์ดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 ชุดพัดลม

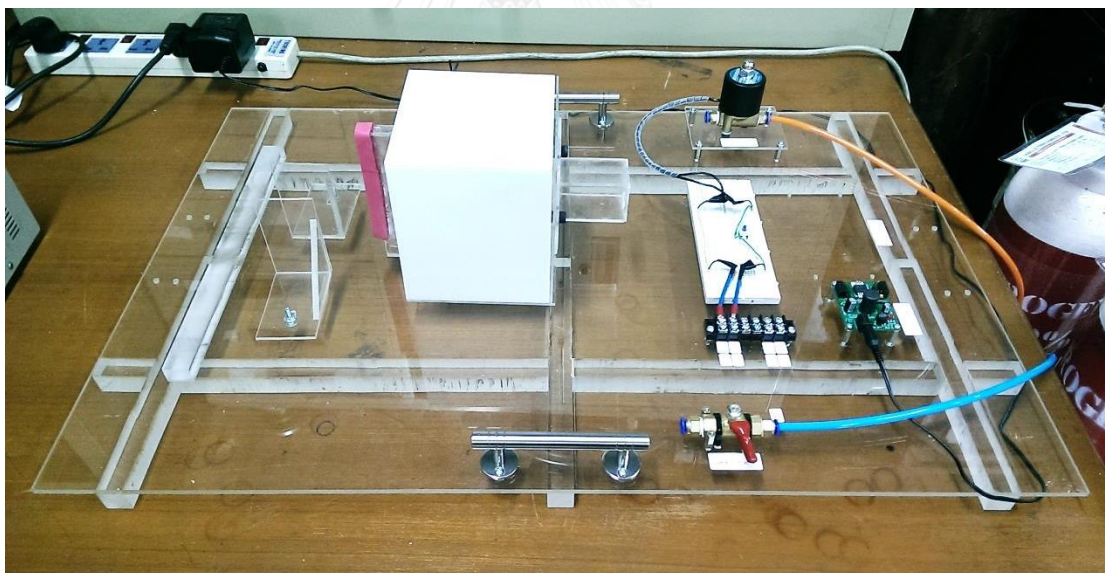
## บทที่ 5 การติดตั้งชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ปัญหาที่พบ และการแก้ไข

หลังการผลิตชิ้นส่วนและประกอบเป็นชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวแล้ว ชุดทดสอบ จะถูกนำมาติดตั้งบนแท่นทดสอบเพื่อทำการทดสอบตามลำดับ

### 5.1 การเตรียมการทดสอบ

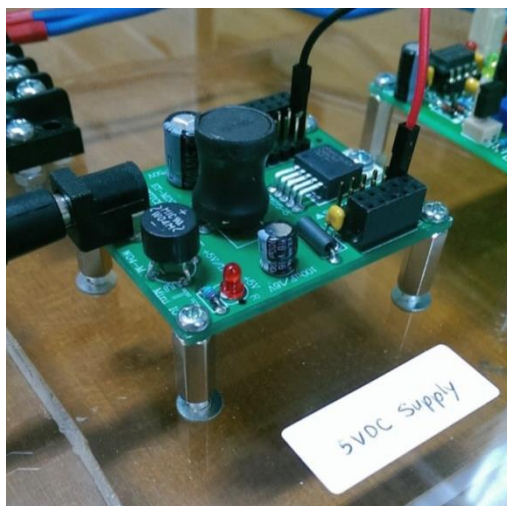
#### 5.1.1 ส่วนประกอบแท่นทดสอบ

แท่นทดสอบในภาพที่ 50 ประกอบด้วยส่วนติดตั้งเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนติดตั้งชุดพัดลม และส่วนควบคุม (ตามลำดับจากซ้ายไปขวา) ส่วนติดตั้งเซลล์เชื้อเพลิง ประกอบด้วยหมอนและฉากปรับตำแหน่งได้ 2 ชุด ส่วนติดตั้งชุดพัดลม มีร่องสำหรับสลักยึดชุดพัดลม และส่วนควบคุมประกอบด้วย วาล์วป้อนไฮโดรเจน, วาล์วขาดลวด, วงจรสร้างไฟฟ้ากระแสตรง 5 V (ภาพที่ 51), สถานีขั้วไฟฟ้า (terminal) และ project board สำหรับต่อวงจรเพิ่มเติม



ภาพที่ 50 แท่นทดสอบ





ภาพที่ 51 วงจรสร้างไฟฟ้ากระแสตรง 5 V

#### 5.1.2 ซอฟต์แวร์เก็บข้อมูลศักย์ไฟฟ้าจากชุดทดสอบ

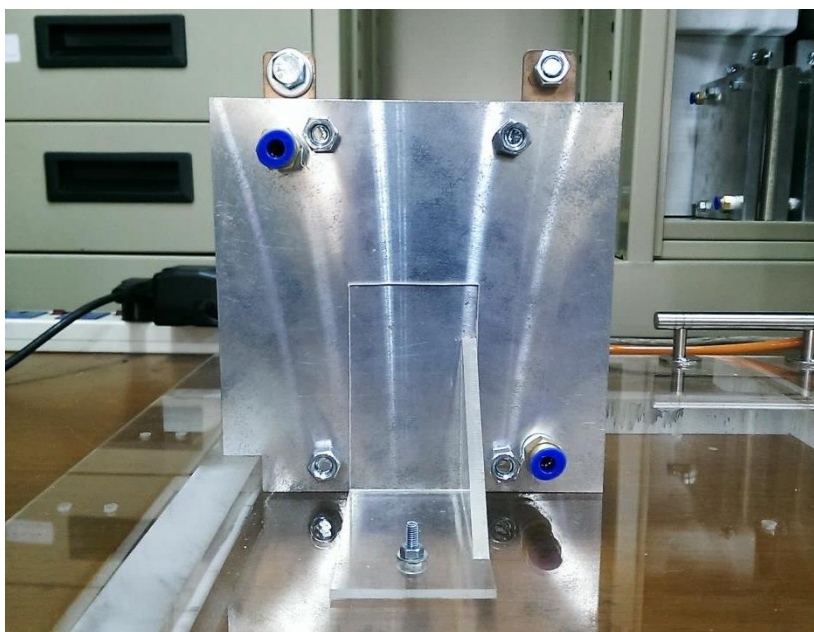
เพื่อความสะดวกในการเก็บและประมวลผลข้อมูล ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออกจากชุดทดสอบ จะถูกบันทึกอย่าง real time ด้วยการรับค่าผ่าน data acquisition โดยการควบคุมผ่าน user interface ของซอฟต์แวร์ voltage.vi (ภาพที่ 52) ที่เขียนขึ้นบนโปรแกรม LabView ด้วย graphical language ในรูปของ block diagram (ภาพที่ 53)



### 5.1.3 การติดตั้งบนแท่นทดสอบ

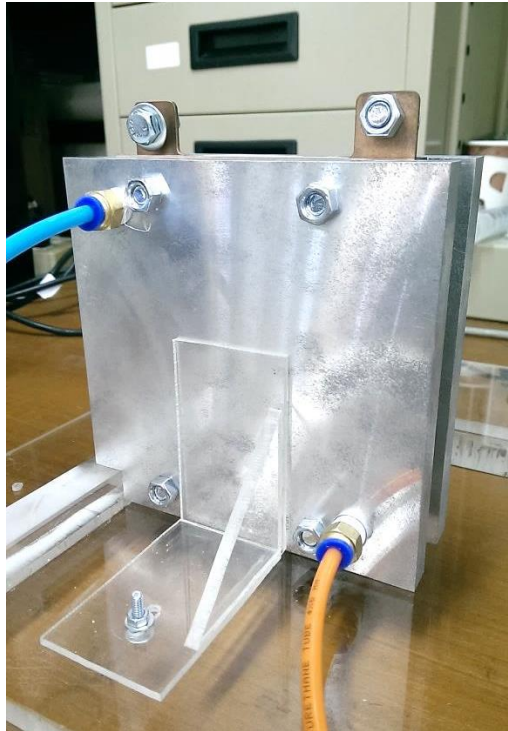
ขั้นตอนการติดตั้งชุดทดสอบลงบนแท่นทดสอบ เป็นดังนี้

1. วางชุดพัสดุลงในส่วนติดตั้งและร้อยสลักเกลียวและแป้นเกลียวไว้อย่างหลวม
2. นำชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงมาวางชนกับชั้นกำหนดตำแหน่ง โดยให้แผ่นประกบกับริมสวมขอบเข้าพอดีกับหมอนบนแท่นทดสอบดังภาพที่ 54 และให้ช่องขาออกของอุโมงค์ลมสวมเข้ากับชุดทดสอบพอดี



ภาพที่ 54 การวางชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงลงในส่วนติดตั้งเซลล์เชื้อเพลิงของแท่นทดสอบ

3. จัดตำแหน่งฉากทั้งสองขึ้นให้พยางชุดทดสอบทั้งสองด้านได้พอดี และรัดแป้นเกลียวและสลักเกลียวให้เรียบร้อย
4. รัดสลักเกลียวและแป้นเกลียวของชุดพัสดุให้แน่น
5. ต่อสายไฟฟ้ากระแสตรงจากเครื่องจ่ายไฟฟ้า 5 V เข้าสู่พัสดุ
6. ต่อท่อสีฟ้าจากท่อต่อขาออกของวาล์วป้อนไฮโดรเจนและสีเหลืองจากท่อต่อขาเข้าของวาล์วขาดลวดเข้ากับท่อต่อบนชุดทดสอบดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 การต่อท่อไฮโดรเจนเข้าและขาออกของชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว

7. ต่อท่อไฮโดรเจนเข้า (สีฟ้า) เข้ากับท่อต่อบนอุปกรณ์ควบคุมความดันบนถังไฮโดรเจนในภาพที่ 56



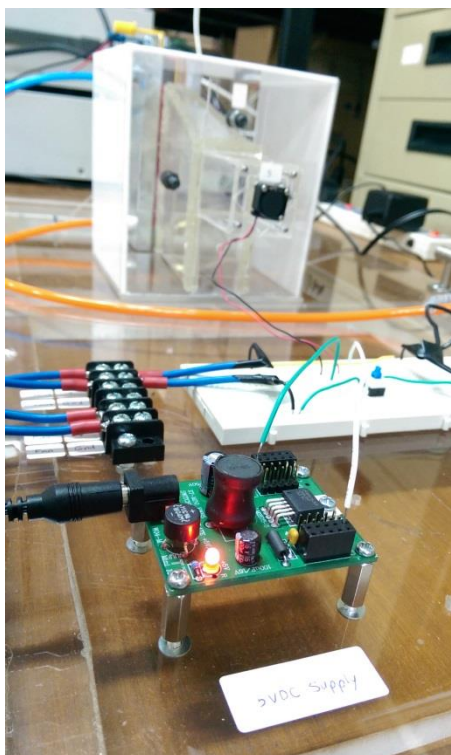
ภาพที่ 56 อุปกรณ์ควบคุมความดันไฮโดรเจน

8. ต่อท่อทิ่ง (สีเหลือง) เข้ากับท่อต่อขาเข้าของวาล์วขดลวดดังภาพที่ 57





ภาพที่ 57 การต่อท่อที่เข้ากับวาล์วขดลวด

9. ต่อคู่สายไฟฟ้ากระแสตรง 12 V จากเครื่องจ่ายภายนอกเข้าสู่สถานีขั้วไฟฟ้า
10. ต่อวงจรสวิตช์แบบปรกติปิด (normally closed) บน project board และต่อวงจรเข้าระหว่างสายไฟ 12 V จากสถานีและสายไฟป้อนวาล์วขด
11. ต่อสายไฟจากเครื่องสร้างภาระไฟฟ้าจากภายนอกเข้ากับขั้วของแผ่นรวมกระแสไฟฟ้าของชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง โดยสายไฟขั้วลบต่อกับขั้วฝั่งแอโนดและสายไฟขั้วบวกต่อกับขั้วฝั่งแคโทด
12. เปิดเครื่องสร้างภาระไฟฟ้า ตรวจสอบการต่อสายไฟอีกครั้ง
13. ต่อสายไฟเพื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของชุดทดสอบเข้ากับ data acquisition เปิดไฟล์ voltage.vi และทดสอบการวัดค่า โดยเปรียบเทียบค่าที่ user interface ของโปรแกรมกับจอของเครื่องสร้างภาระไฟฟ้า
14. ปรับวาล์วควบคุมความดันไฮโดรเจนทั้งหมดให้ความดันขาเข้าอยู่ที่ 0.2 bar
15. เสียบปลั๊ก adapter ของวงจรสร้างไฟฟ้า 5 V และตรวจสอบสัญญาณไฟสีแดงแสดงสถานะพร้อมทำงานบนแผงวงจรดังภาพที่ 58 สังเกตการทำงานของพัดลมว่าไม่มีอาการผิดปกติ เช่น การสั่น มีเสียงดัง เป็นต้น



ภาพที่ 58 สถานะพร้อมทำงานของแผงวงจรสร้างไฟฟ้า 5 V

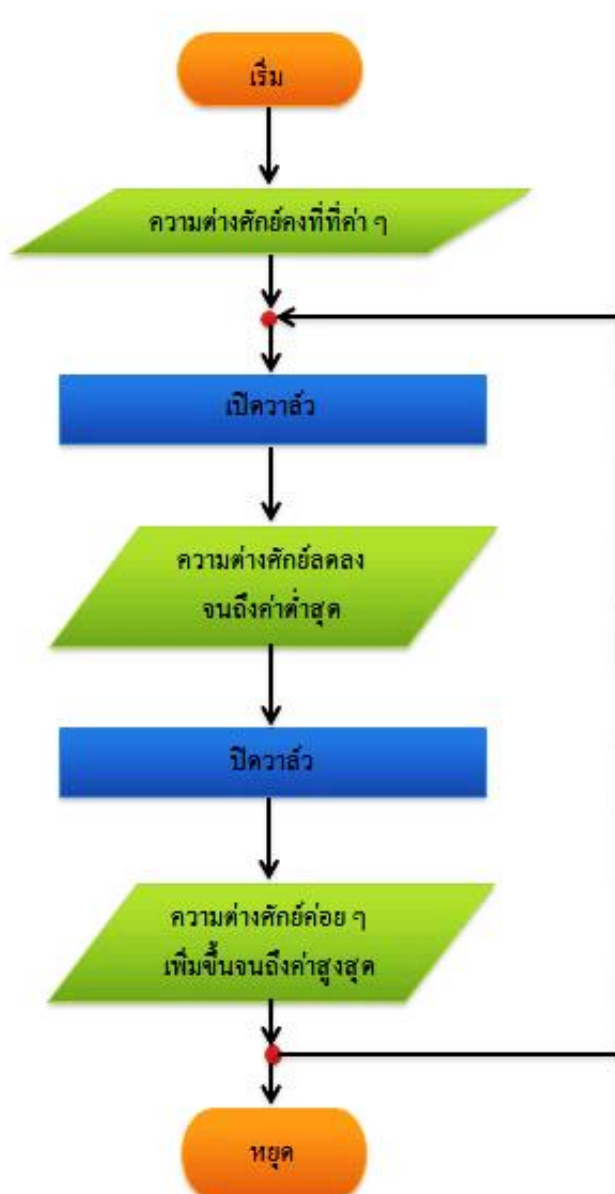
## 5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. เปิดวาล์วป้อนไฮโดรเจน และสังเกตความต่างศักย์ของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเกือบ 1 V
2. ตั้งค่ากระแสไฟฟ้าขาออกที่ต้องการให้เครื่องสร้างกระแสทำการ
3. กดปุ่ม  บน user interface ของ voltage.vi เพื่อเริ่มทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า
4. เริ่มการดึงกระแสไฟฟ้าของเครื่องสร้างกระแสไฟฟ้า
5. กดสวิตช์เพื่อเปิดวาล์วขดลวดทุก ๆ 12 วินาที
6. เมื่อเก็บผลได้เพียงพอแล้วและต้องการเก็บผลที่ภาระไฟฟ้าที่แตกต่างไป ให้ยกเลิกการดึงกระแสของเครื่องสร้างกระแสไฟฟ้า กดปุ่ม  ของ voltage.vi เพื่อหยุดการบันทึกค่า ปรับค่ากระแสไฟฟ้าขาออกที่ต้องการใหม่ และเริ่มการดึงกระแสใหม่อีกครั้ง

## 5.3 ปัญหาที่พบและวิธีการแก้ไข

ความผิดปกติสามารถสังเกตเห็นได้ทันทีเมื่อเปิดวาล์ว ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแผ่นรวมกระแสจากเริ่มต้นที่ค่าใกล้ศูนย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทันทีที่เริ่มหมุนเปิดวาล์วอย่างเช่นที่ควรจะเป็น แต่ต่อมา กลับลดลงจนเกือบศูนย์อย่างรวดเร็ว และเมื่อหมุนปิดวาล์ว ความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นไปที่

เกือบ 1 V และเมื่อเปิดวาล์วอีกครั้ง ความต่างศักย์จะลดลงจนเกือบศูนย์อีกครั้งหนึ่ง เป็นเช่นนี้เสมอตามภาพที่ 59

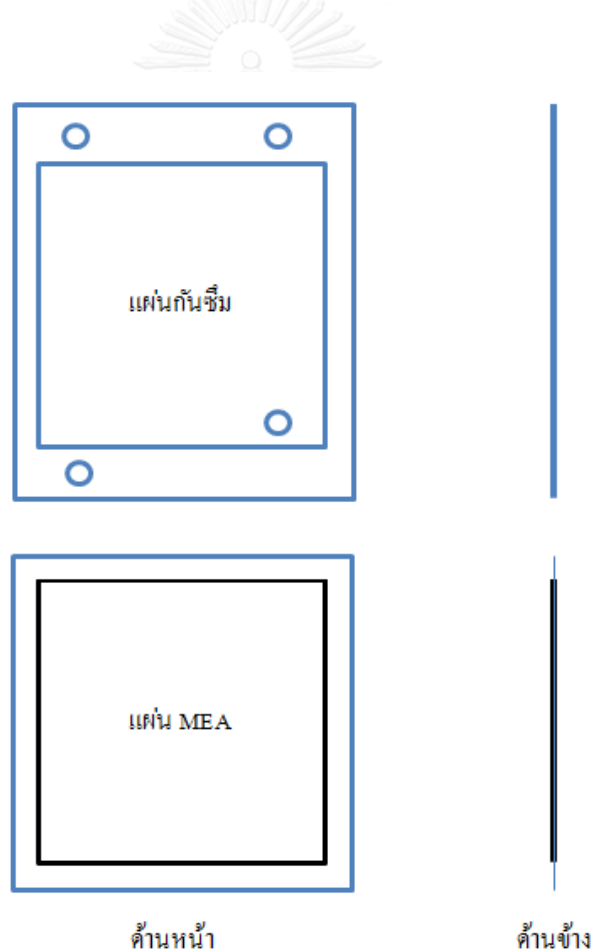


ภาพที่ 59 แผนผังแสดงลำดับเหตุการณ์ผิดปกติในการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

จากความผิดปกตินี้ สันนิษฐานได้ว่าเกิดจากสาเหตุทางกล เนื่องจากเมื่อวาล์วปิดแล้ว ความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มไปที่เกือบ 1 V ซึ่งเป็นความต่างศักย์สูงสุดปกติของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าขาออก และเมื่อกำหนดให้เครื่องสร้างภาระไฟฟ้าดึงกระแสไฟฟ้าที่ 1 A เพื่อให้เกิดการ

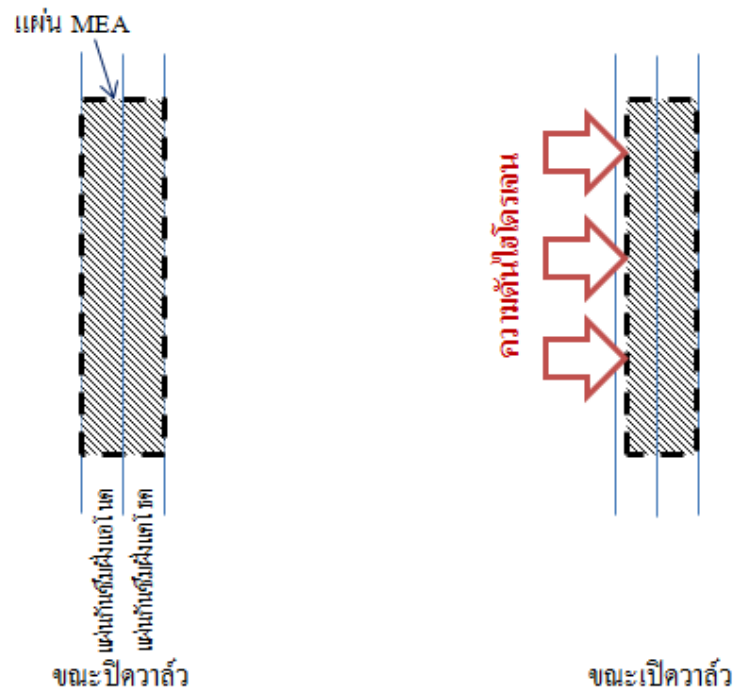
สร้างกระแสไฟฟ้าจากไฮโดรเจนที่ค้างอยู่ในท่อ พบว่าเซลล์สามารถสร้างกำลังไฟฟ้าขาออกได้ 0.8 W และพบน้ำในระบบ ทั้งสองเหตุการณ์นี้แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีอย่างปรกติขึ้นที่ MEA แล้ว

การลดลงอย่างรวดเร็วของความต่างศักย์ไฟฟ้าสันนิษฐานได้ว่าเกิดจากการสูญเสียพื้นที่สัมผัสระหว่างแผ่น MEA และแผ่น flowfield ฝั่งแอโนด และการเสีรูรูปไปจากแนวระนาบของแผ่น MEA การเสีรูรูปของแผ่นกันซึมจากความดัน clamping เป็นประเด็นหนึ่งที่ถูกคำนึงถึงในการเลือกความหนาแผ่นกันซึม แผ่นกันซึมจะถูกเจาะรูเพื่อเผื่อพื้นที่ไว้สำหรับ MEA ดังภาพที่ 60 โดยจะทำหน้าที่ทั้งกันการรั่วไหลของไฮโดรเจนและป้องกันไม่ให้ MEA โดนกดทับมากเกินไป และรูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode คือ ช่องทางการไหลอากาศเปิดสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้ MEA รับแรงดันที่ไม่สมดุลระหว่างด้านแอโนดและแคโทด จึงมีความเป็นไปได้ที่แผ่น MEA เสีรูรูปโดยการโค้งงอไปทางด้านแคโทดมากเกินไปจนไม่สัมผัสกับแอโนดดังภาพที่ 61



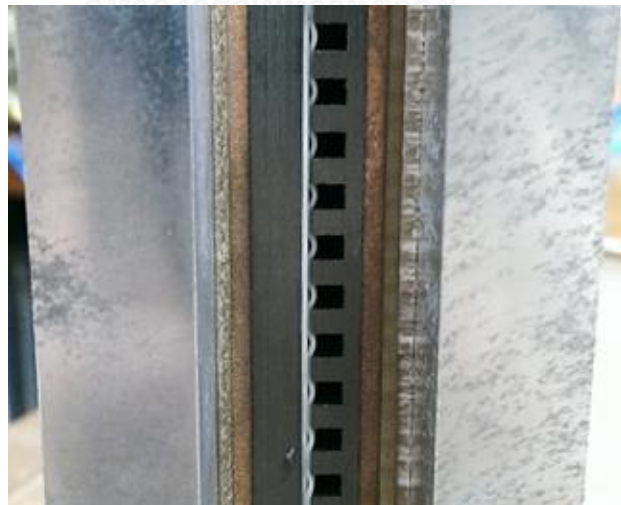
ภาพที่ 60 ภาพวาดด้านหน้าและด้านข้างของแผ่นกันซึมและแผ่น MEA เพื่อแสดงการเจาะรูแผ่นกันซึมเพื่อประกอบแผ่น MEA





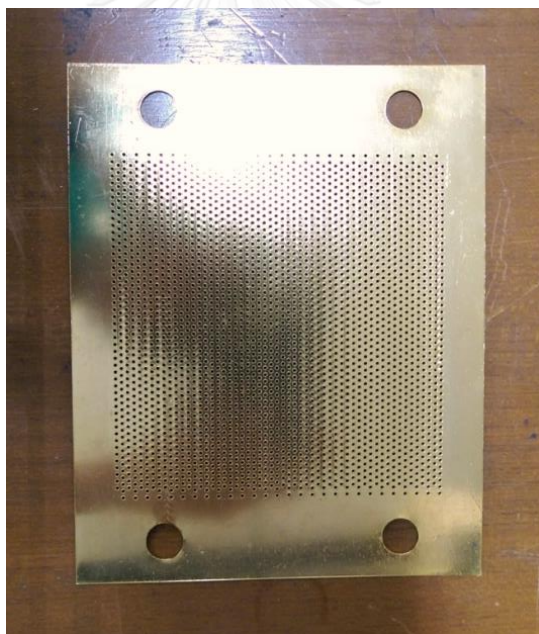
ภาพที่ 61 การเสียรูปของแผ่น MEA เนื่องจากความดันไฮโดรเจน

นอกจากนี้ยังพบการรั่วของไฮโดรเจนระหว่างแผ่นกันซึมทั้งจากการสัมผัสและเสียง สาเหตุเกิดจากการเสียรูปของแผ่นกันซึม เนื่องจากแรงดันของไฮโดรเจนแตกต่างจากความดันอากาศมาก ทำให้แผ่นกันซึมเปลี่ยนรูปร่างโป่งงอเข้าไปตามช่องทางการไหลอากาศดังภาพที่ 62

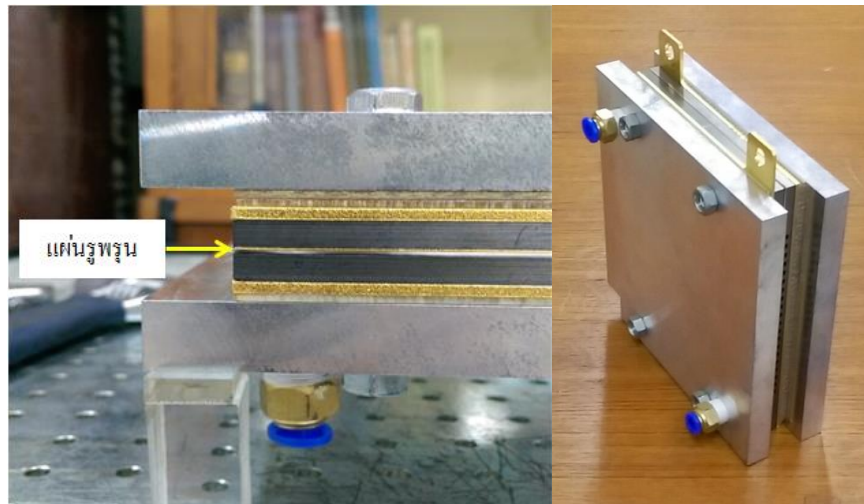


ภาพที่ 62 การเสียรูปของแผ่นกันซึม เนื่องจากแรงดันของไฮโดรเจน

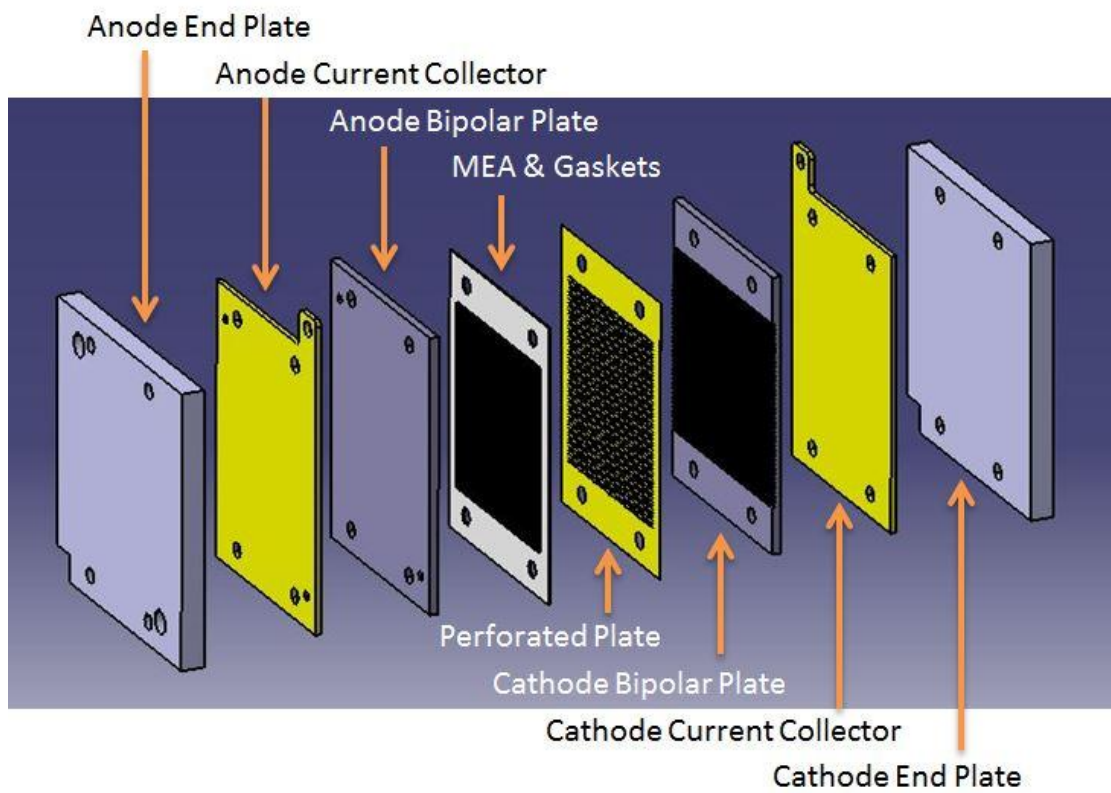
เพื่อชดเชยการเสีรูปของ MEA แผ่นกันซึมแผ่นใหม่ที่บางลงจะถูกนำมาใช้แทนแผ่นเดิมทางด้านแอโนด เพื่อให้มั่นใจได้ว่า MEA และแผ่น flowfield ฝั่งแอโนดจะไม่สูญเสียพื้นที่สัมผัสระหว่างกัน ส่วนวิธีแก้ไขปัญหาการรั่วซึมและช่วยพยุงโครงสร้างของ MEA ไม่ให้ฉีกขาด ซึ่งอาจเสียหายได้จากความแตกต่างของความดันที่ต่างกันมากระหว่างไฮโดรเจนและอากาศ ทำได้โดยการผลิตแผ่นรูพรุน (perforated plate) ดังภาพที่ 63 ในลักษณะเดียวกันกับแผ่นแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode แบบ open-slit [6, 59] โดยผลิตจากแผ่นทองแดงความหนา 0.4 mm ตัดให้ได้ขนาด 15 cm x 12 cm เจาะรูสำหรับสลักกัณฑ์และรูพรุนแบบวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm วางตัวทำมุม 60 องศา ด้วยระยะพิตซ์ 2 mm และเคลือบทองคำที่ผิวชิ้นงานด้วยการชุบไฟฟ้า (electroplating) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในการเคลือบผิว ซึ่งนิยมในการผลิตแผ่น flowfield เช่นกัน [54] แผ่นรูพรุนจะถูกวางแทรกระหว่างแผ่นกันซึมฝั่งแคโทดและแผ่น flowfield ฝั่งแคโทดดังภาพที่ 64 และทำให้ลำดับการประกอบเซลล์เป็นไปดังภาพที่ 65



ภาพที่ 63 แผ่นรูพรุน



ภาพที่ 64 แผ่นรูพรุนที่ประกอบเข้ากับชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว



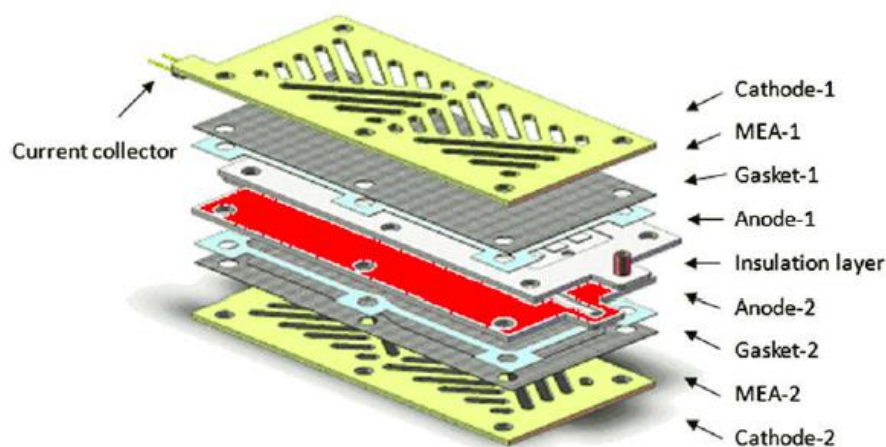
ภาพที่ 65 ลำดับการประกอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว

## บทที่ 6 แผ่นรูพรุน

แผ่นรูพรุนถูกประดิษฐ์ให้มีลักษณะคล้ายคลึงกับแผ่นแคโทด แผ่นแคโทด ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-slit จะถูกนำมาทบทวนถึงหลักการออกแบบและผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อนำมาเทียบเคียงและปรับใช้ในการออกแบบแผ่นรูพรุน ที่จะผลิตขึ้นเพื่อแก้ปัญหาที่พบในการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวไบโบทที่ผ่านมา

### 6.1 แผ่นแคโทดเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ Open-Slit

เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-slit เป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode แบบหนึ่งที่เหมาะสมกับงานภาระต่ำ [6] แผ่น MEA ฝั่งแคโทดเปิดออกสู่ภายนอกด้วยแผ่นแคโทด ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งแผ่น flowfield แผ่นรวมกระแส และแผ่นประกบรีม ดังภาพที่ 66 แผ่นแคโทดจึงผลิตจากแผ่นทองแดงชุบทองคำ ซึ่งเป็นของแข็งที่นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความแข็งแรง ทนการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และมีความต้านทานไฟฟ้าหน้าสัมผัสต่ำ



ภาพที่ 66 เซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM แบบ open-slit [6]

เนื่องจากข้อจำกัดด้านโครงสร้างของแผ่นแคโทด ที่เป็นแผ่นที่มีพื้นที่เปิดให้อากาศเข้าสู่ MEA ได้ในแนวตั้งฉากกับ MEA ไม่เหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีช่องทางการไหลแบบ flowfield ที่อากาศไหลเข้าสัมผัส MEA ในแนวเดียวกับแผ่น MEA เซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-slit จึงไม่สามารถพัฒนาเป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์แถวได้ เพราะอากาศจะไม่สามารถเข้าสู่ MEA ชั้นในได้เลย การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-slit จึงมุ่งเน้นการใช้งานภาระต่ำดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

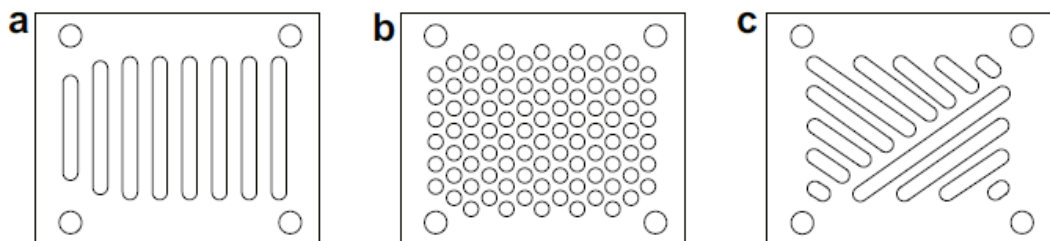
อย่างไรก็ดี ผู้ทำวิจัยได้ประยุกต์เอารูปแบบของแผ่นแคโทดมาช่วยพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode โดยการปรับรูปแบบเป็นแผ่นรูพรุนแทน เพราะต้องการใช้ประโยชน์จากเอกลักษณ์ของแผ่นแคโทด ที่นำไฟฟ้า นำความร้อน ทนการกัดกร่อน เป็นโครงสร้างพวยพุ่งช่วยพวยรูปร่างของแผ่น MEA และแผ่นกันซึม และยอมให้อากาศเข้ามาสัมผัส MEA ในแนวตั้งฉาก

## 6.2 ลักษณะของรูบนแผ่นแคโทดต่อพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-slit ลักษณะของรูบนแผ่นส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง [63] ในลักษณะเดียวกันกับช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield ฝั่งแคโทดของ open-cathode ขนาดพื้นที่รูบนแผ่นที่มากช่วยเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเช่นเดียวกับการเพิ่มความกว้างช่องทางการไหลอากาศ [64, 65] จากการศึกษาของ Bussayajarn [6] แผ่นมีรู 3 แบบ ดังภาพที่ 67 ที่มีสัดส่วนรูเท่ากันถูกนำมาทดสอบ แผ่นมีรูแบบรูกลมให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุด ขณะที่แผ่นมีรูแบบเส้นขนานและเส้นเฉียงให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาถึงเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกและความกว้างของ rib พบว่า แผ่นรูกลมมีค่าตัวแปรทั้งสองต่ำที่สุดที่ 4 และ 1 mm ตามลำดับ ขณะที่แผ่นรูขนานและรูเฉียงมีค่าตัวแปรทั้งสองที่ใกล้เคียงกันที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกและความกว้าง rib ประมาณ 7.75 และ 1.75 mm ตามลำดับ แต่พื้นที่รูมากเกินไปจะส่งผลให้การรักษาความสม่ำเสมอในการกระจายความเค้นและอุณหภูมิจะทำได้ยากขึ้นและความต้านทานจะสูงขึ้นตามกฎของโอห์ม [64, 66, 67] ซึ่งสามารถประเมินได้โดยง่ายจากสมการ

$$R_{ohm} = \rho_R \frac{l}{a} \quad (49)$$

เมื่อ  $\rho_R$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีเท่ากับเศษส่วนกลับของ  $\Omega_C$  หรือ สภาพการนำไฟฟ้า,  $l$  คือ ระยะของแนวการนำไฟฟ้าหรือความหนาของแผ่นมีรู และ  $a$  คือพื้นที่หน้าตัดในแนวการนำไฟฟ้าหรือพื้นที่ส่วนที่ไม่มีรูนั่นเอง



ภาพที่ 67 แผ่นมีรูจากการศึกษาของ Bussayajarn [6]

a) แบบเส้นขนาน b) แบบรูกลม c) แบบเส้นเฉียง

อนึ่ง แผ่นรูพรุนมีตำแหน่งอยู่ระหว่างแผ่น MEA และแผ่น flowfield ฝั่งแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode แบบปรกติ หน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนและกระจายแรงอัดเป็นของแผ่น flowfield อยู่แล้ว ดังนั้น ลักษณะรูบนแผ่นรูพรุนจึงไม่สามารถถูกศึกษาพิจารณาให้มีผลต่อพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงเหมือนดังกรณีแผ่นมีรูทั้งหมดได้

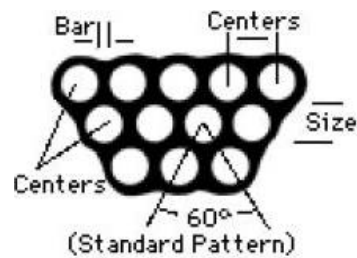
### 6.3 การออกแบบแผ่นรูพรุนและการศึกษาผลของรูปแบบรูพรุนต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

แผ่นรูพรุน ต้องผลิตจากวัสดุที่คงรูปได้ดีเพื่อต้านทานการโก่งตัวของแผ่น MEA จากแรงดันแก๊สสามารถนำไฟฟ้าได้ดี ต้านทานการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และมีความต้านทานไฟฟ้าหน้าสัมผัสต่ำ วัสดุที่คงรูปและนำไฟฟ้าได้ดี ได้แก่ แกรไฟต์ และโลหะ เช่น เงิน ทองแดง ทองคำ อะลูมิเนียม (เรียงตามค่าความต้านทานไฟฟ้าจากมากไปน้อย) เป็นต้น แต่โลหะส่วนใหญ่ไม่ต้านทานต่อการกัดกร่อนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเฉพาะในสภาวะที่อัตราการกัดกร่อนสูงอย่างเช่นในเซลล์เชื้อเพลิง และความต้านทานไฟฟ้าหน้าสัมผัสระหว่างโลหะส่วนใหญ่กับแผ่น MEA และ/หรือแผ่น flowfield ซึ่งผลิตจากแกรไฟต์ มีค่าสูงมากจนทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำ จึงเหลือเพียงแกรไฟต์และทองคำเท่านั้นที่มีความเหมาะสม

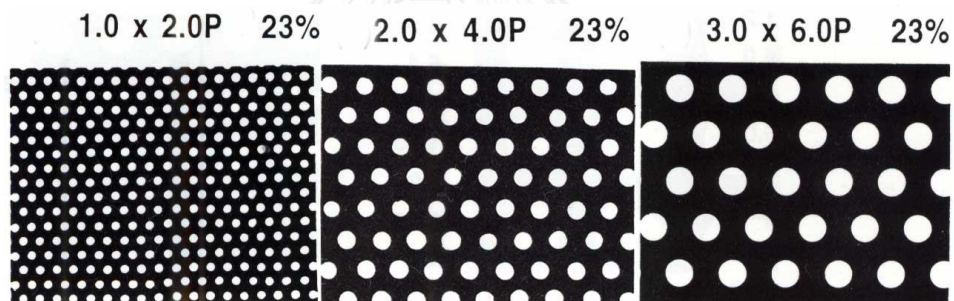
แกรไฟต์และทองคำต่างก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน แกรไฟต์แผ่นบางกีดตามเป็นรูพรุนขนาดเล็กได้ยาก ต้องใช้ต้นทุนในการผลิตสูง และเปราะง่าย ทองคำมีราคาสูงและเสียรูปได้ง่ายกว่าวัสดุอื่นที่ความหนาเดียวกัน การผลิตแผ่นรูพรุนจากวัสดุอื่นแล้วเคลือบผิววัสดุนั้นด้วยการพ่นแกรไฟต์หรือการชุบไฟฟ้าด้วยทองคำ อย่างไรก็ตาม การพ่นแกรไฟต์ลงบนผิวโลหะต้องการ binder ที่จำเพาะ คุณภาพสูง และราคาสูง เพื่อให้ความสม่ำเสมอของผงแกรไฟต์บนโลหะสูงและความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ในวิทยานิพนธ์นี้ แผ่นรูพรุนถูกเลือกให้ผลิตจากแผ่นทองแดงตัดตามแบบและชุบไฟฟ้าด้วยทองคำในลักษณะเดียวกับแผ่นรวมกระแส

ลักษณะของรูพรุนควรได้รับการพิจารณาเลือกอย่างเหมาะสม หน้าที่เฉพาะของส่วนที่มีรูพรุนบนแผ่นรูพรุนมี 3 ประการ ได้แก่ พยุงรูปทรงของแผ่น MEA, เป็นช่องเปิดให้อากาศผ่านเข้าสู่ MEA และนำไฟฟ้า ขนาดรูที่ใหญ่และลวดลายที่ถี่จะเพิ่มพื้นที่ให้ออกซิเจนซึมเข้าสู่ MEA ได้มากและสม่ำเสมอทั้งแผ่น แต่ไม่ควรถี่ไปจนทำให้สูญเสียพื้นที่ในการนำไฟฟ้า แผ่นรูพรุนแบบรูกกลม เรียงตัวทำมุม 60 องศา ต่อกันดังภาพที่ 68 ถูกเลือกนำมาศึกษา รูปแบบของรูพรุนแบบนี้ทำให้การปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกและระยะพิตช์เพียงอย่างเดียวหนึ่งส่งผลกระทบต่อสัดส่วนพื้นที่รูปต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยาของ MEA ดังนั้น เพื่อการศึกษาผลของลักษณะรูพรุนต่อการกระจายอากาศบน MEA ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง แผ่นรูพรุนอีก 2 แบบ จึงถูกผลิตเพิ่ม ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะพิตช์ต่างกับแบบเดิม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก 1 mm ระยะพิตช์ 2 mm แต่ให้อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะพิตช์คงที่ที่ 1:2 เพื่อรักษาให้สัดส่วนพื้นที่รูปต่อ

พื้นที่เกิดปฏิกิริยาครั้งที่ 23% ดังภาพที่ 69 เพื่อนำมาทดสอบในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวและเปรียบเทียบกราฟ polarization ที่ได้จากการทดสอบแผ่นรูพรุนแต่ละแบบ วิธีการนี้ จะทำให้พื้นที่เปิดรับออกซิเจน และความสามารถในการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนผ่านเนื้อวัสดุของแผ่นรูพรุน ทั้งสามเท่ากัน หากพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงออกแตกต่างกัน ความแตกต่างนี้จะเป็นผลจากความสม่ำเสมอจากการซึมเข้าสู่ MEA ของออกซิเจนและความร้อนจากปฏิกิริยาบน MEA

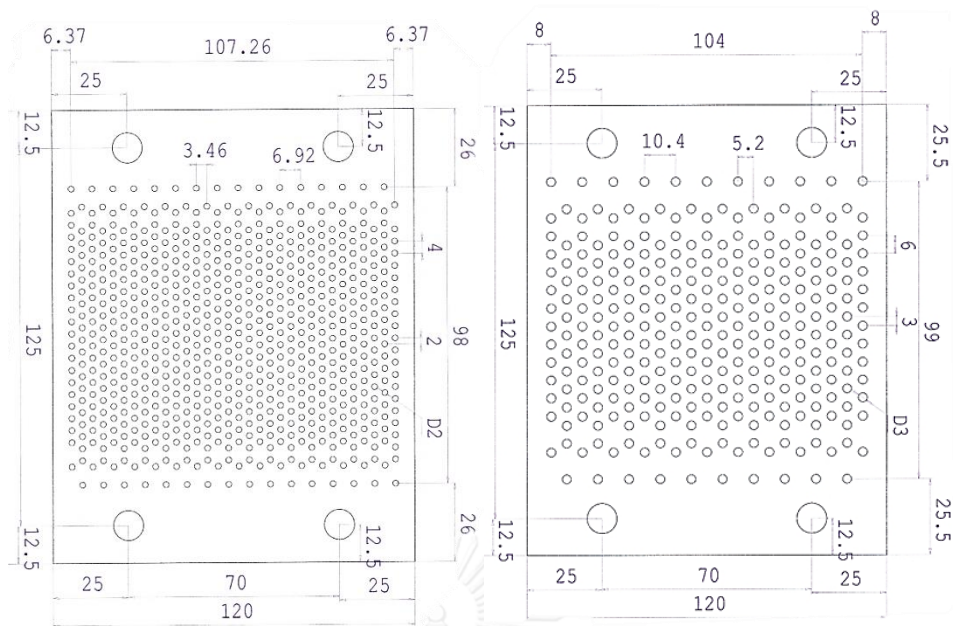


ภาพที่ 68 ตำแหน่งการวางตัวของรู [68]

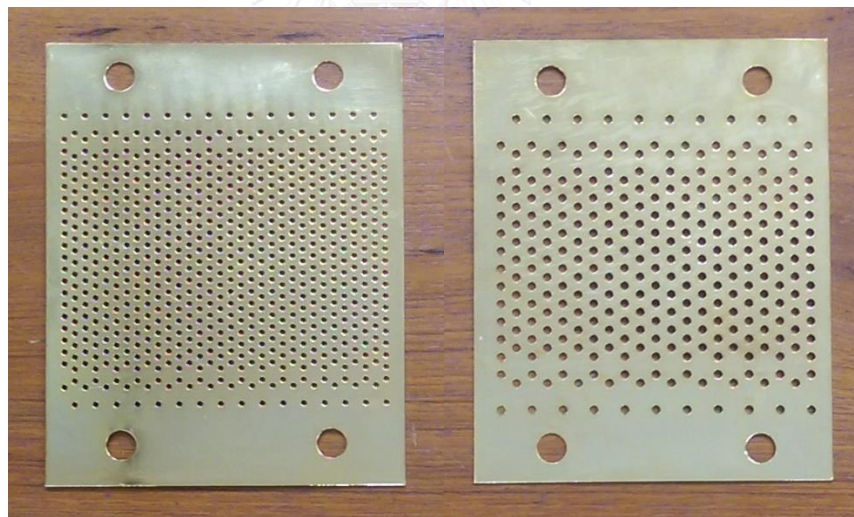


ภาพที่ 69 รูปแบบรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1, 2 และ 3 mm [69]

แผ่นทองแดงหนา 0.4 mm ถูกตัดตามแบบดังภาพที่ 70 โดย บริษัท เอกสยามโลหะกิจ จำกัด และนำมาชุบไฟฟ้าด้วยทองคำแท่งจนสำเร็จเป็นแผ่นรูพรุนดังภาพที่ 71 แผ่นรูพรุนทั้งสองจะถูกนำมาทดสอบร่วมกับแผ่นรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก 1 mm พิตซ์ 2 mm



ภาพที่ 70 ภาพวาดแผ่นรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 3 mm  
พิตช์ 4 และ 6 mm ตามลำดับ

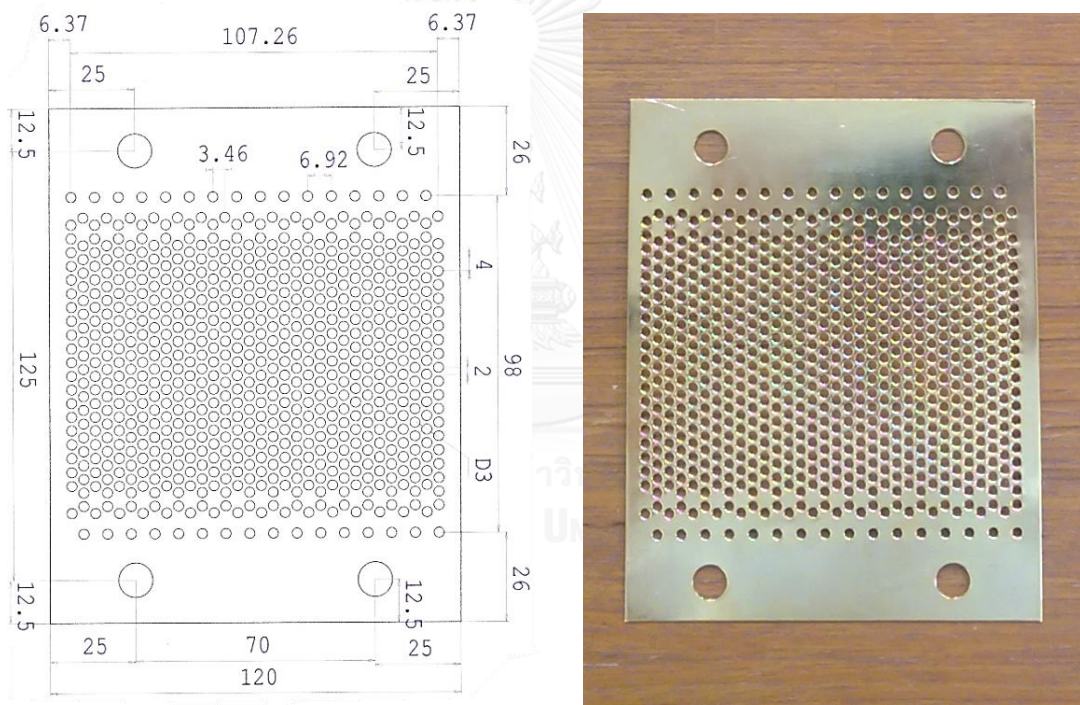


ภาพที่ 71 แผ่นรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 3 mm  
พิตช์ 4 และ 6 mm ตามลำดับ

แผ่นรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก 1, 2 และ 3 mm พิตช์ 2, 4 และ 6 mm ซึ่ง สัดส่วนพื้นที่รูต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 23% ถูกนำมาประกอบในชุดทดสอบเซลล์เดียว แผ่น flow field ฝั่งแคโรตของชุดทดสอบที่เลือกใช้เพื่อการทดสอบนี้ คือ แผ่นที่มีขนาดช่องทางการไหล อากาศ  $5 \text{ mm}^2$  และสัดส่วนรูปร่าง 1.25 การทดสอบกระทำด้วยภาระคงตัว



เพื่อศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนพื้นที่รูต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยาต่อพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง แผ่นรูพรุนที่มีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm ระยะพิตช์ 4 mm คิดเป็นสัดส่วนพื้นที่รูต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยาได้ 51% ถูกผลิตจนสำเร็จด้วยเช่นกัน ดังภาพที่ 72 และนำมาทดสอบด้วยภาวะแบบคงตัว ผลการทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแผ่นรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก 2 mm พิตช์ 4 mm เพื่อศึกษาผลจากการเพิ่มสัดส่วนโดยการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลาง และแผ่นรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm พิตช์ 6 mm เพื่อศึกษาผลจากการเพิ่มสัดส่วนโดยการลดขนาดพิตช์ ผลการทดสอบจะถูกแสดงไว้ในบทต่อไปพร้อมกับผลการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบจากสัดส่วนรูปร่างและขนาดพื้นที่การไหลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง และอภิปรายผลร่วมกัน



ภาพที่ 72 ภาพวาดและแผ่นรูพรุนที่เสร็จสมบูรณ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm พิตช์ 4 mm

## บทที่ 7 ผลการทดสอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว

เมื่อชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวทำงานได้อย่างสมบูรณ์แล้ว การทดสอบเพื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อสร้างกระแสไฟฟ้าตามค่าที่กำหนดไว้ ได้เริ่มขึ้นในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์อากาศอยู่ในช่วง 60 - 70% และอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ผลลัพธ์ที่บันทึกได้จะถูกนำมาแสดงในรูปเส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งแสดงถึงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

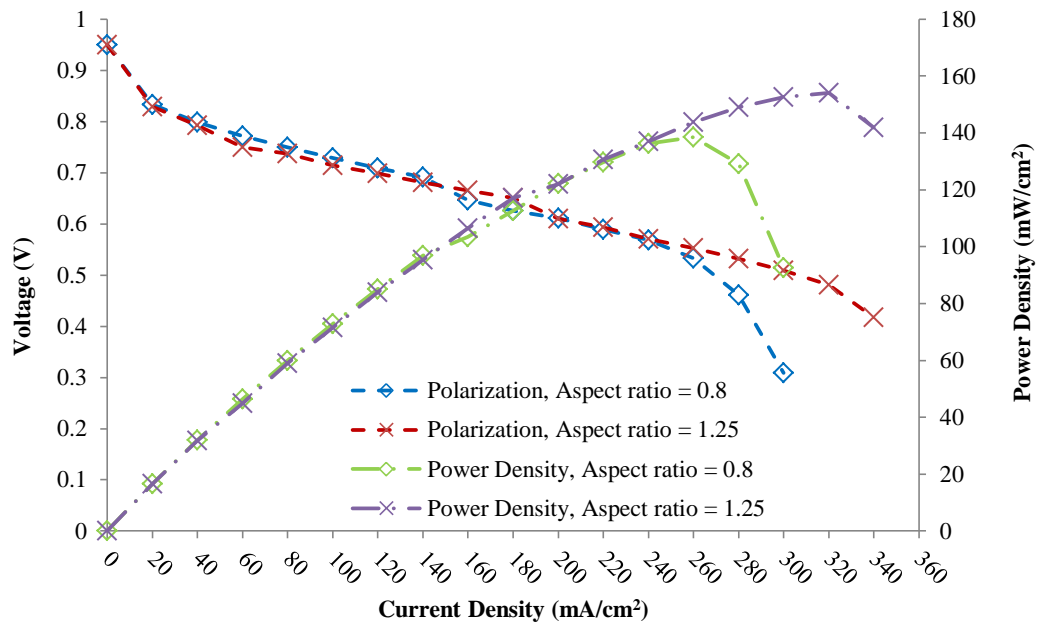
### 7.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวด้วยภาระคงตัว

\* ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขณะทำการทดสอบ คือ 65 %

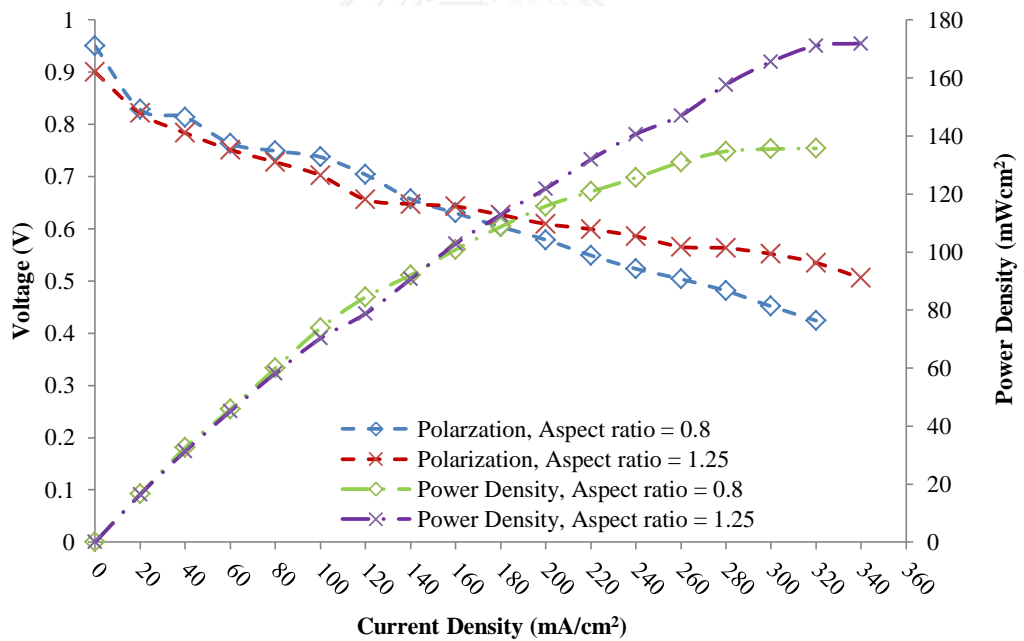
#### 7.1.1 ผลกระทบจากสัดส่วนรูปร่าง ของช่องทางการไหลอากาศ

เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 2, 5 และ 8 mm<sup>2</sup> ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 73, ภาพที่ 74 และภาพที่ 75 ตามลำดับ แต่ละรูปแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนรูปร่างเป็น 0.8 และ 1.25

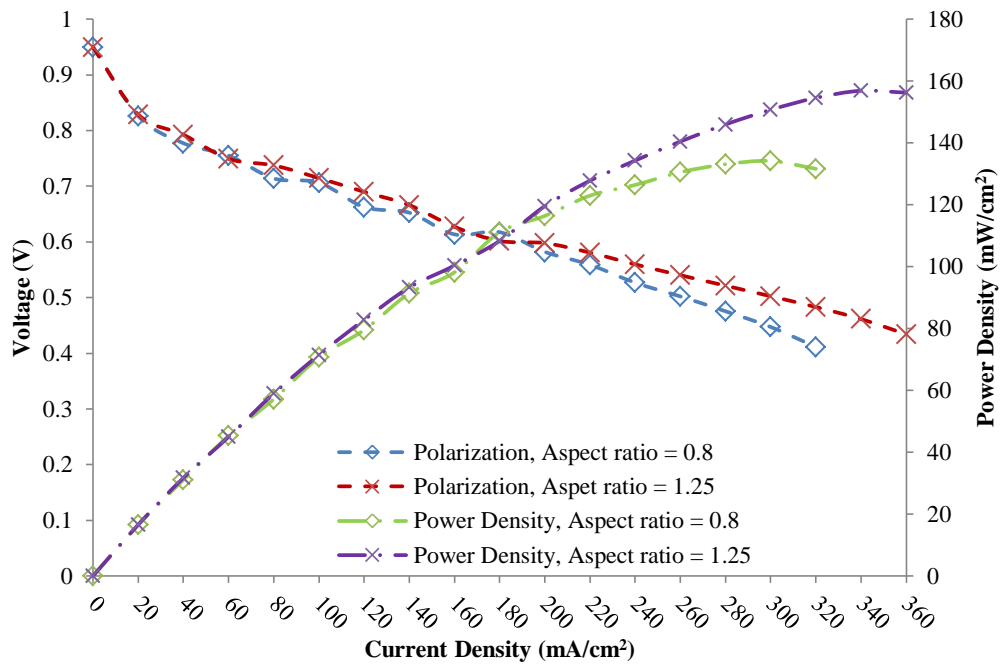
ในกรณีของชุดทดสอบที่มีขนาดพื้นที่การไหล 2 mm<sup>2</sup> (ภาพที่ 73) ชุดทดสอบที่มีสัดส่วนรูปร่างเป็น 0.80 และ 1.25 สามารถถึงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ที่ 300 และ 340 mA/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 138 สำหรับสัดส่วนรูปร่าง 0.80 และ 154 mW/cm<sup>2</sup> สำหรับสัดส่วนรูปร่าง 1.25 สำหรับชุดทดสอบที่พื้นที่การไหล 5 mm<sup>2</sup> ชุดทดสอบที่มีสัดส่วนรูปร่างเท่ากับ 0.80 สามารถทำงานได้ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด 320 mA/cm<sup>2</sup> โดยที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 136 mW/cm<sup>2</sup> และชุดทดสอบที่มีสัดส่วนรูปร่างเท่ากับ 1.25 สามารถทำงานได้ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด 340 mA/cm<sup>2</sup> โดยที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 172 mW/cm<sup>2</sup> และสำหรับชุดทดสอบที่พื้นที่การไหล 8 mm<sup>2</sup> ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด มีค่า 320 mA/cm<sup>2</sup> และ 134 mW/cm<sup>2</sup> สำหรับชุดทดสอบที่มีสัดส่วนรูปร่างเท่ากับ 0.80 และมีค่า 360 mA/cm<sup>2</sup> และ 157 mW/cm<sup>2</sup> สำหรับชุดทดสอบที่มีสัดส่วนรูปร่างเท่ากับ 1.25



ภาพที่ 73 เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ 2 mm<sup>2</sup>



ภาพที่ 74 เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ 5 mm<sup>2</sup>

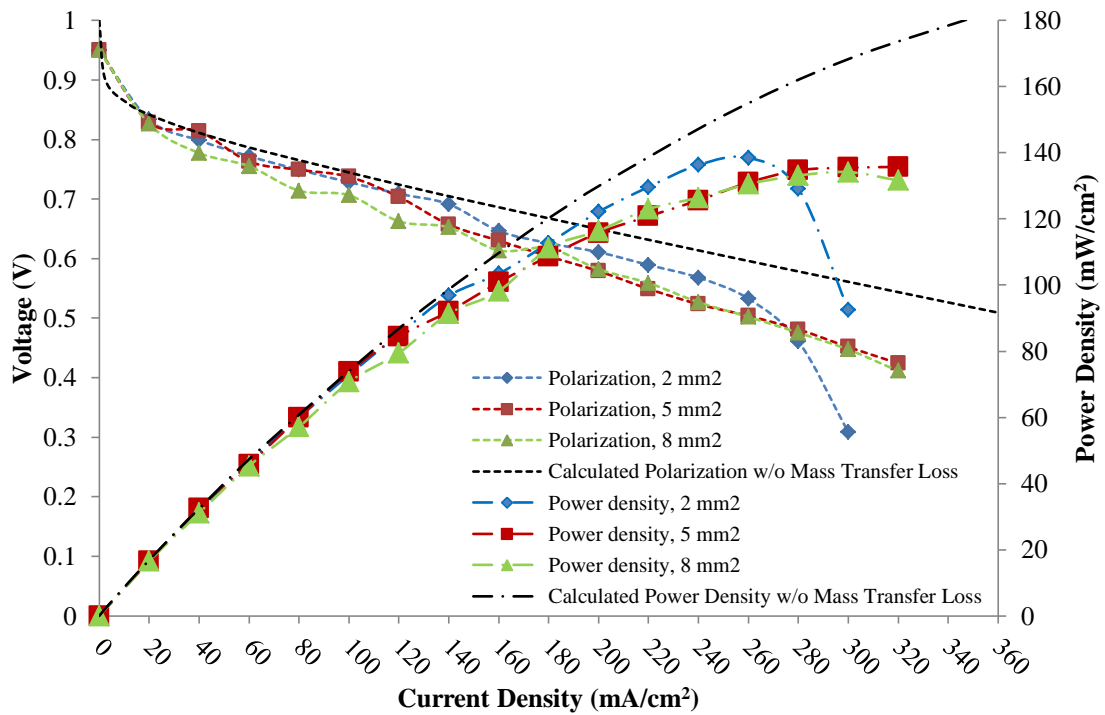


ภาพที่ 75 เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ 8 mm<sup>2</sup>

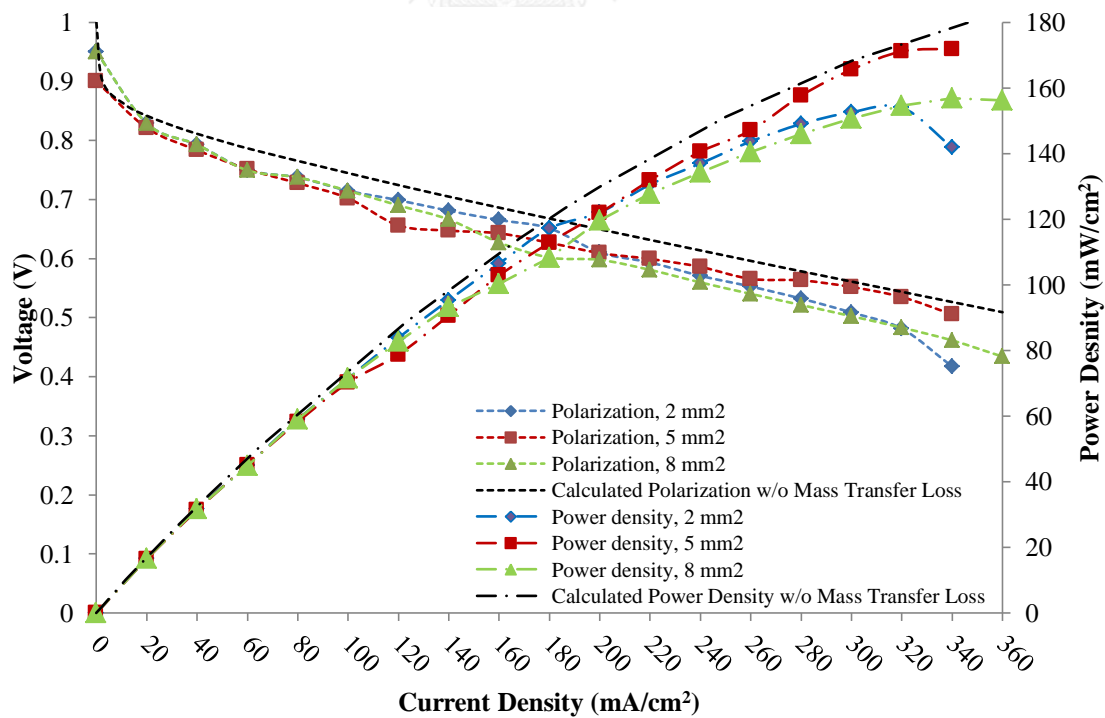
ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า เซลล์เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนรูปร่าง 1.25 สามารถทำงานที่ความหนาแน่นกระแสและกำลังไฟฟ้าสูงกว่าในทุกขนาดพื้นที่การไหล ซึ่งความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยของแต่ละพื้นที่การไหลที่สัดส่วนรูปร่าง 0.80 และ 1.25 มีค่า 136 และ 161 mW/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่า ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สัดส่วนรูปร่าง 1.25 มีค่ามากกว่าที่สัดส่วนรูปร่าง 0.80 อยู่ 18%

#### 7.1.2 ผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ

เมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้งของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีพื้นที่การไหลต่างกัน ที่แต่ละค่าสัดส่วนรูปร่าง ร่วมกับการค่าศักย์และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าจากการประเมิน (โดยไม่พิจารณาการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากการถ่ายเทมวล) จะได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 76 และภาพที่ 77



ภาพที่ 76 เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีสัดส่วนรูปร่างเท่ากับ 0.8



ภาพที่ 77 เส้นโค้ง polarization และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีสัดส่วนรูปร่างเท่ากับ 1.25

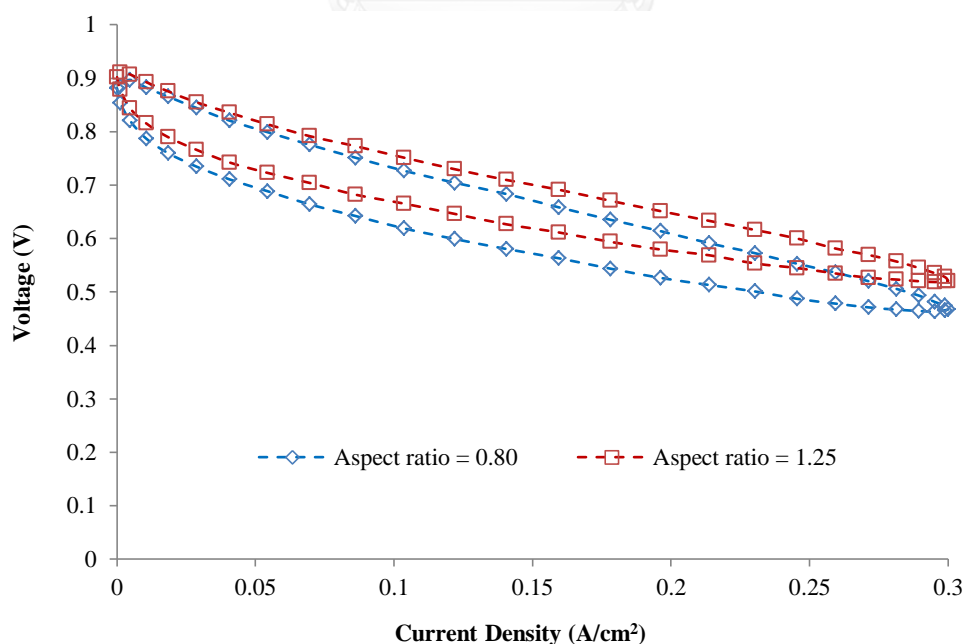
ผลการเปรียบเทียบไม่สามารถแสดงถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศได้ เพราะเส้นโค้งทั้งหมดที่แต่ละค่าสัดส่วนรูปร่างไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยของทั้งสองสัดส่วนรูปร่างที่พื้นที่การไหล 2, 5 และ 8 mm<sup>2</sup> มีค่าเป็น 146, 154 และ 145 mW/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบทุกผลลัพธ์กับเส้นจากการประเมินการสูญเสียจากปฏิกิริยาและการสูญเสียตามกฎของโอห์ม เส้นผลลัพธ์อยู่ใต้เส้นจากการประเมินทั้งหมด

## 7.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวด้วยภาระไม่คงตัว

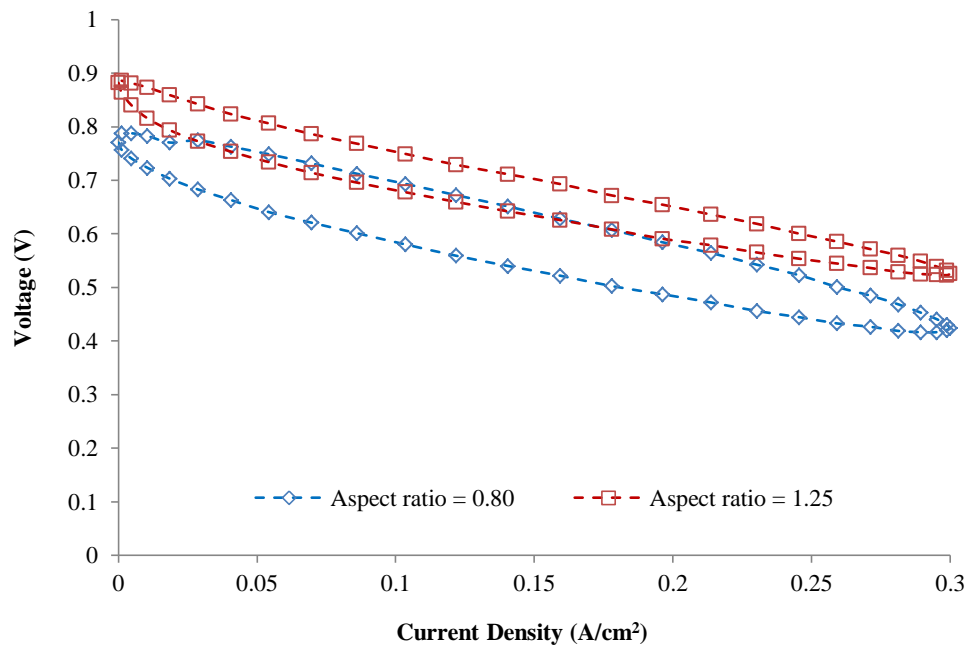
\* ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขณะทำการทดสอบ คือ 63 %

### 7.2.1 ผลกระทบจากสัดส่วนรูปร่างของช่องทางการไหลอากาศ

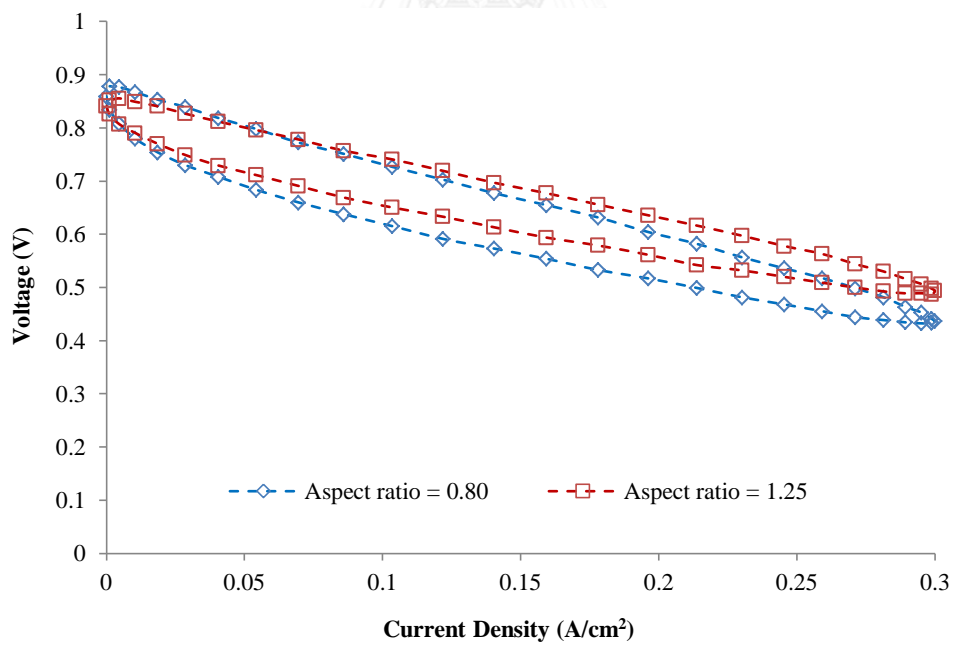
เช่นเดียวกับผลการทดสอบด้วยภาระคงที่ เซลล์เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนรูปร่างของช่องทางการไหลอากาศ 1.25 ทำงานด้วยสมรรถนะที่ดีกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนรูปร่างเป็น 0.80 เมื่อรับภาระแบบ sinusoidal ความถี่ 0.1 Hz ในช่วง 0 – 30 A หรือเทียบเท่า n-slew rate ขนาด  $\pm 0.3$  ทั้งที่ขนาดพื้นที่ช่องทางการไหล 2, 5 และ 8 mm<sup>2</sup> ดังแสดงในภาพที่ 78, ภาพที่ 79 และภาพที่ 80 ตามลำดับ



ภาพที่ 78 เส้นโค้ง hysteresis เต็มพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 2 mm<sup>2</sup>



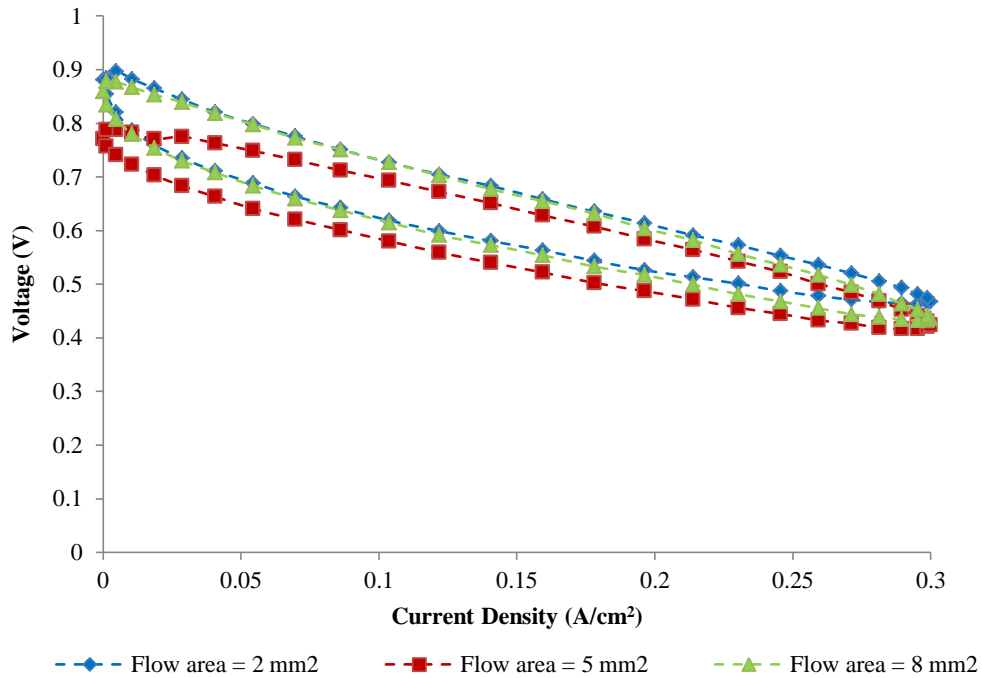
ภาพที่ 79 เส้นโค้ง hysteresis เต็มพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว  
ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 5 mm<sup>2</sup>



ภาพที่ 80 เส้นโค้ง hysteresis เต็มพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว  
ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 8 mm<sup>2</sup>

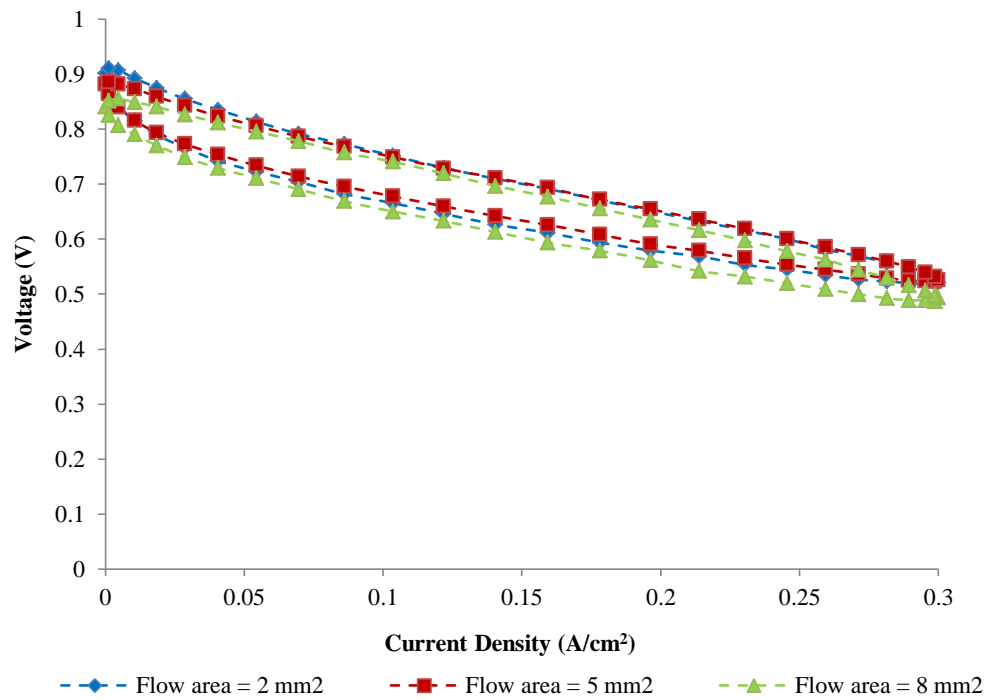
### 7.2.2 ผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ

เช่นเดียวกับผลการทดสอบแบบภาระคงที่ ผลจากขนาดช่องทางการไหลของอากาศที่มีต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEMFC แสดงแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนทั้งที่สัดส่วนรูปร่างของช่องทางการไหลเป็น 0.80 และ 1.25 ดังแสดงในภาพที่ 81 และภาพที่ 82



ภาพที่ 81 เส้นโค้ง hysteresis เต็มพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีสัดส่วนรูปร่างของช่องทางการไหลอากาศเป็น 0.80

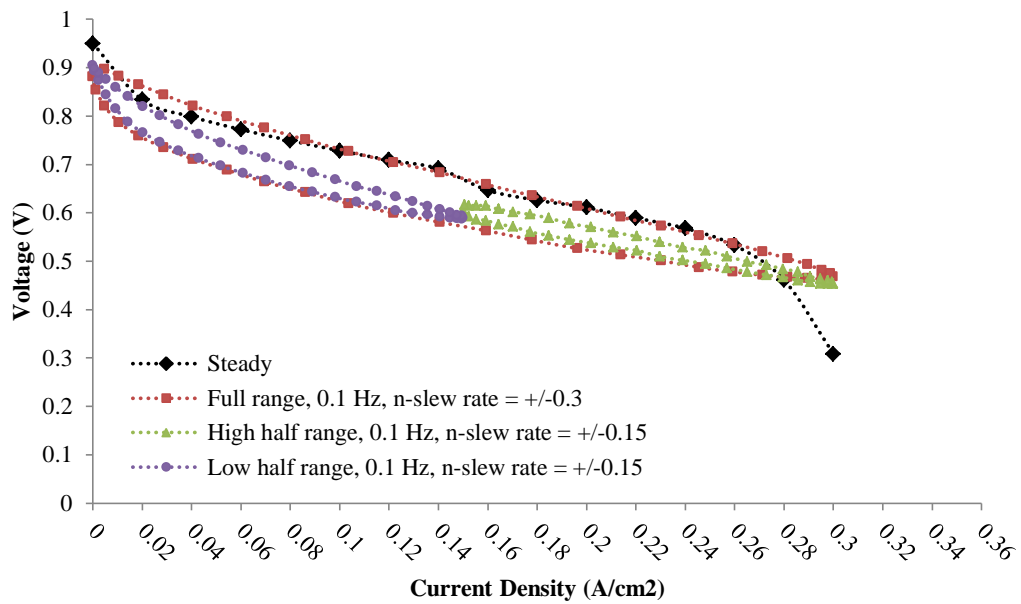




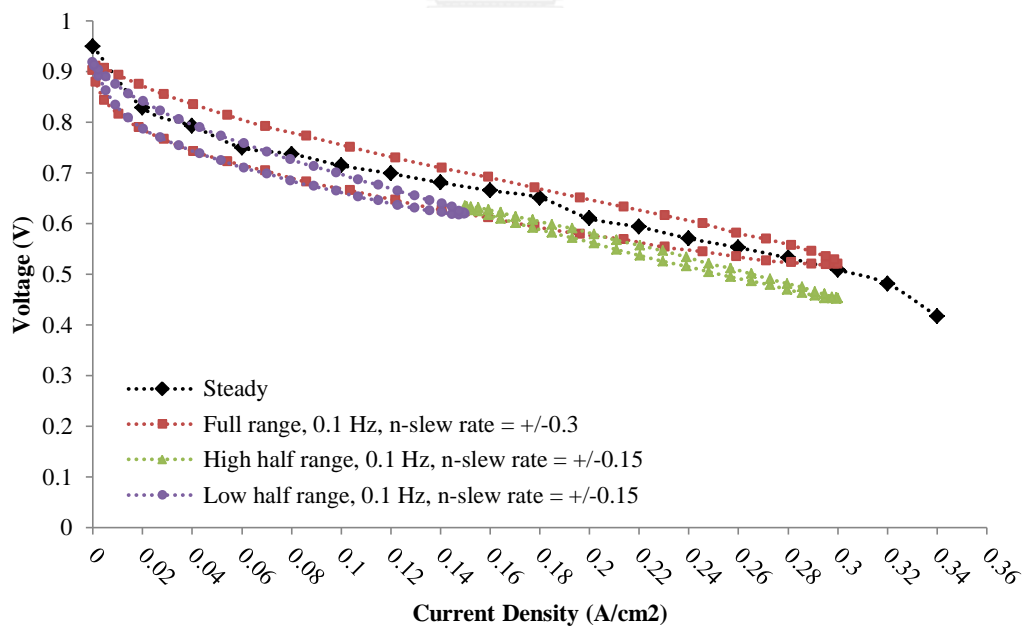
ภาพที่ 82 เส้นโค้ง hysteresis เต็มพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีสัดส่วนรูปร่างของช่องทางการไหลอากาศเป็น 1.25

### 7.2.3 ผลกระทบเพื่อประเมิน N-Slew Rate

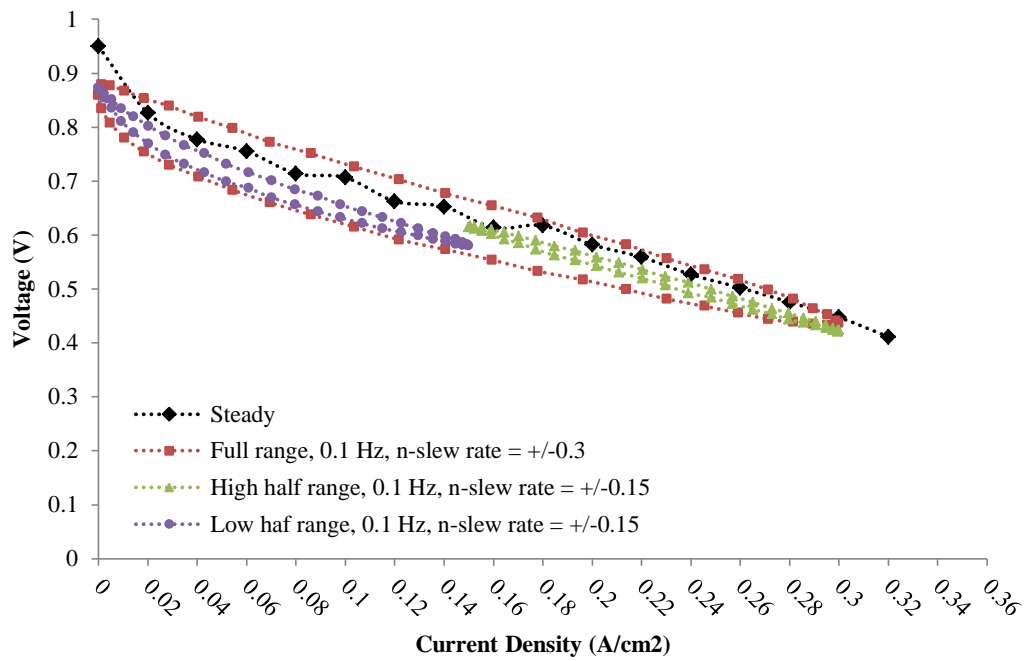
เมื่อทดสอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวด้วยภาระแบบ sinusoidal ความถี่ 0.1 Hz ในช่วง 0 – 15 และ 15 - 30 A และนำเสนอผลลัพธ์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยภาระช่วง 0 – 30 A และเส้นโค้ง polarization เทียบกับผลการทดสอบด้วยภาระแบบคงตัว จะได้ดังแสดงในภาพที่ 83 – ภาพที่ 88 เรียงตามลำดับรูปร่างทางกายภาพของช่องทางการไหลอากาศ



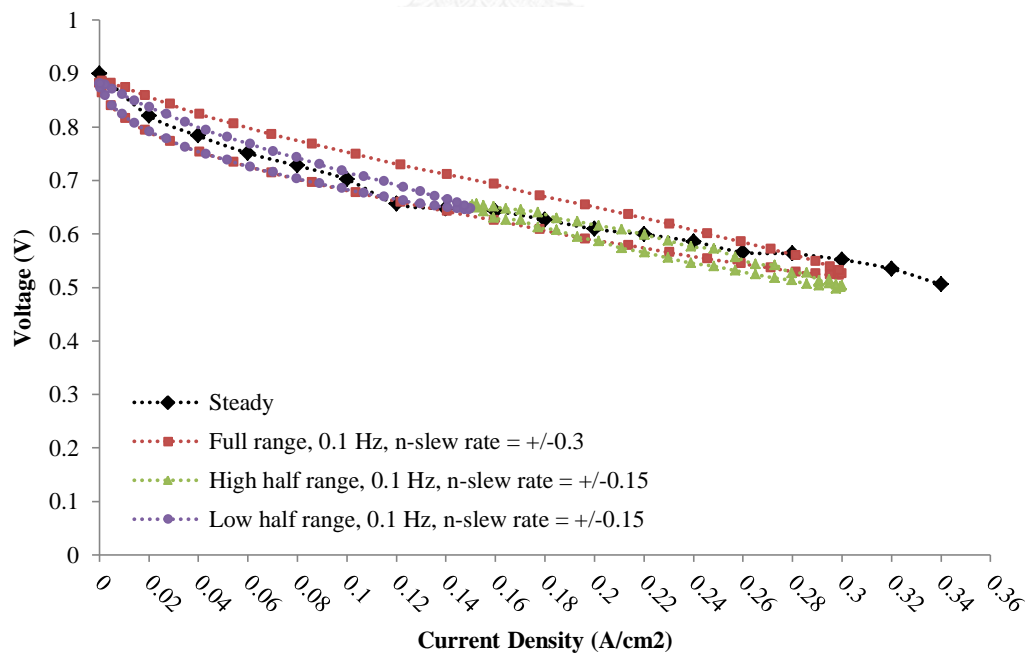
ภาพที่ 83 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis ความถี่ 0.1 Hz เต็มพิกัดและครึ่งพิกัดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดของช่องช่องทางไหลอากาศ 2 mm<sup>2</sup> และสัดส่วนรูปร่าง 0.80



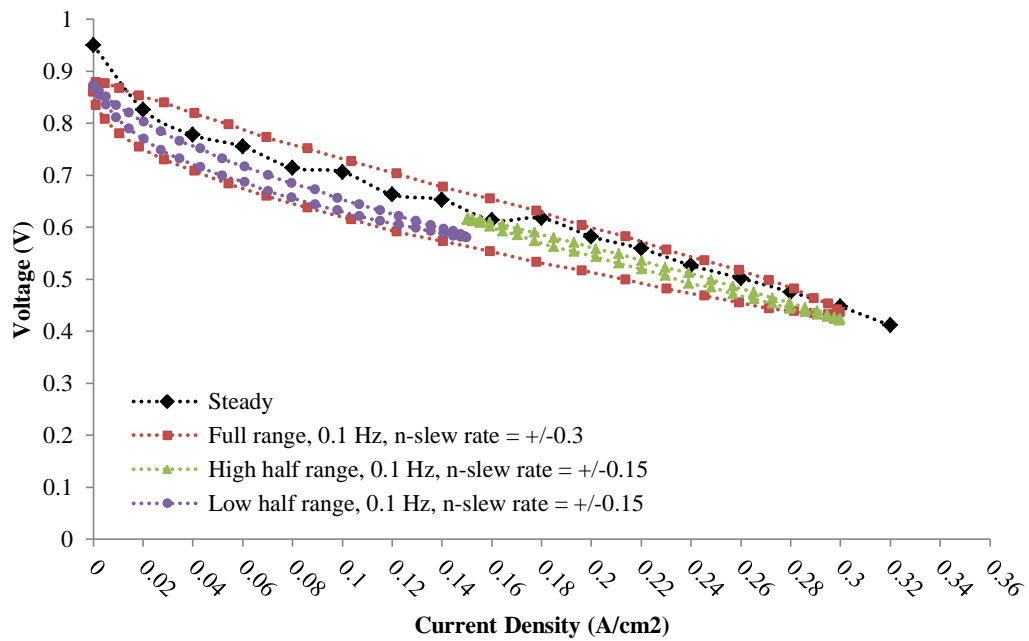
ภาพที่ 84 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis ความถี่ 0.1 Hz เต็มพิกัดและครึ่งพิกัดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดของช่องช่องทางไหลอากาศ 2 mm<sup>2</sup> และสัดส่วนรูปร่าง 1.25



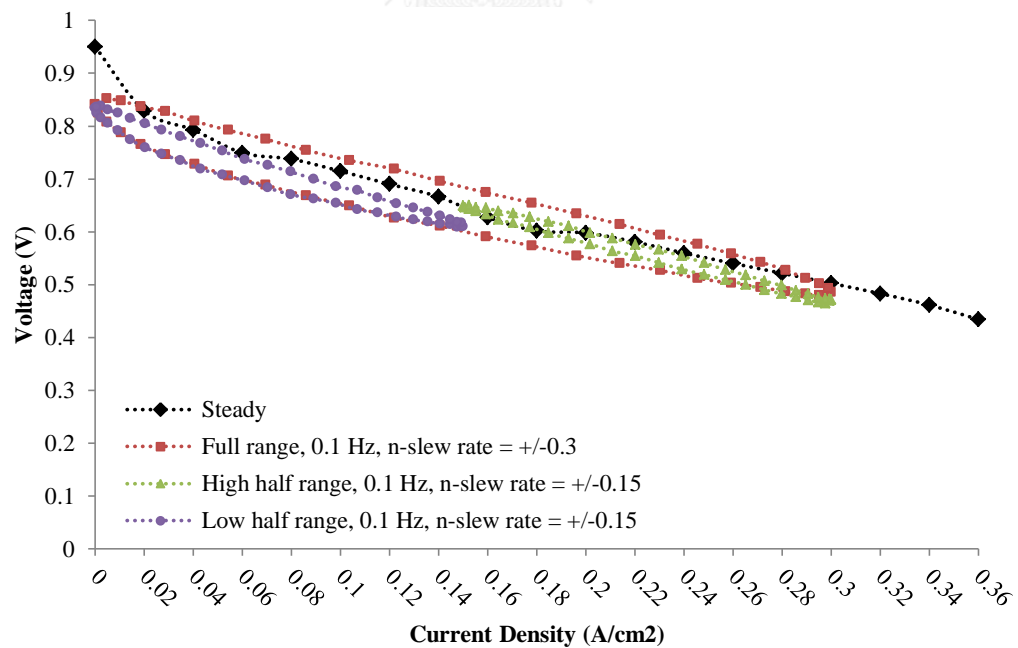
ภาพที่ 85 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis ความถี่ 0.1 Hz เต็มพิกัดและครึ่งพิกัดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ 5 mm<sup>2</sup> และสัดส่วนรูปร่าง 0.80



ภาพที่ 86 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis ความถี่ 0.1 Hz เต็มพิกัดและครึ่งพิกัดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ 5 mm<sup>2</sup> และสัดส่วนรูปร่าง 1.25



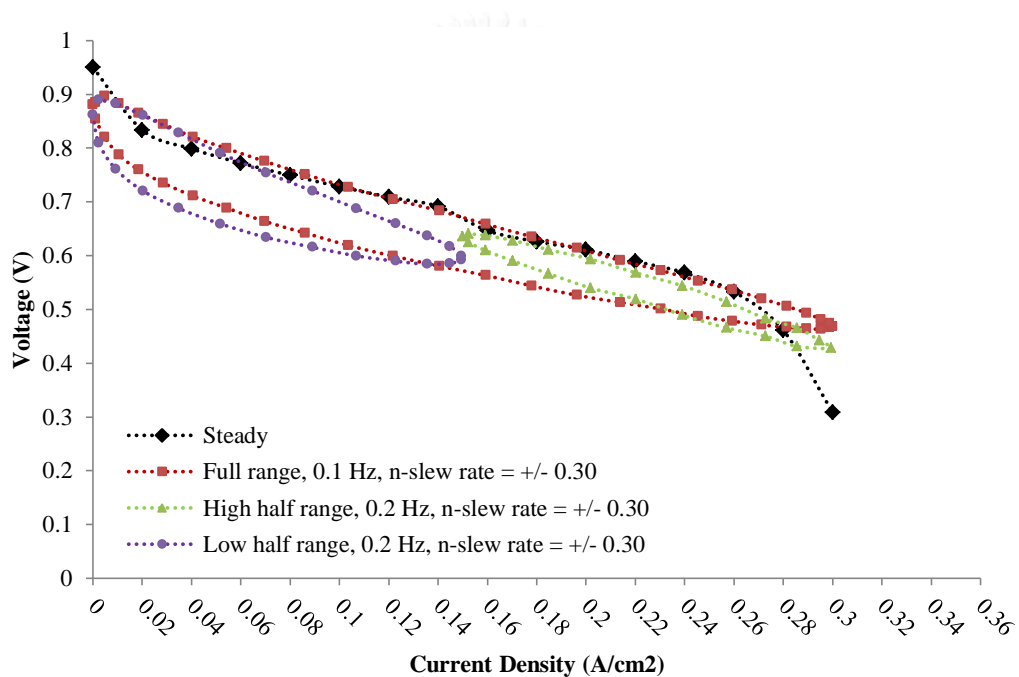
ภาพที่ 87 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis ความถี่ 0.1 Hz เต็มพิกัดและครึ่งพิกัดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลอากาศ  $8 \text{ mm}^2$  และสัดส่วนรูปร่าง 0.80



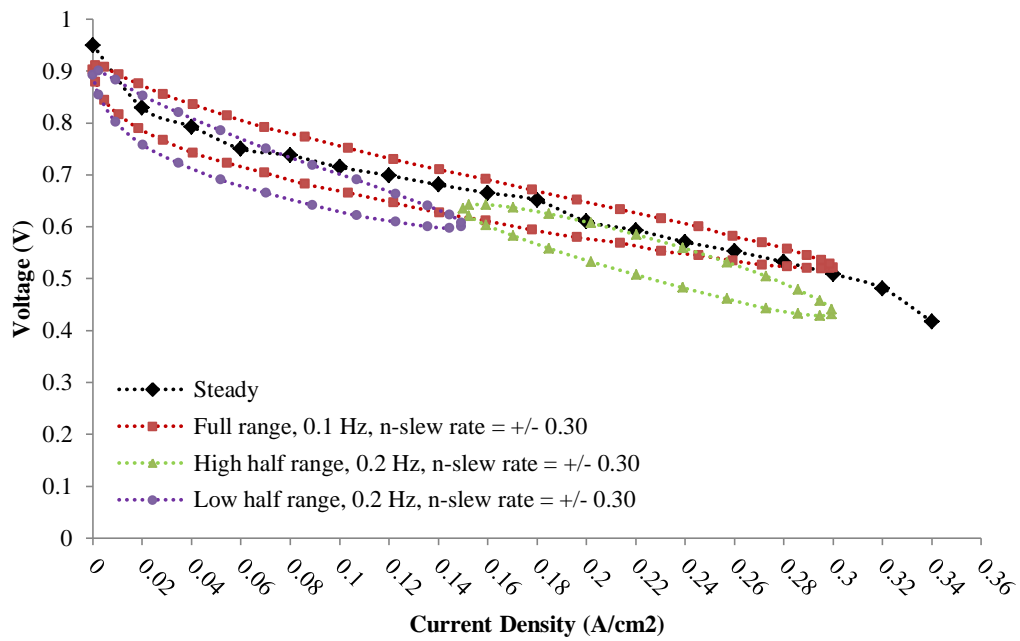
ภาพที่ 88 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis ความถี่ 0.1 Hz เต็มพิกัดและครึ่งพิกัดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ  $8 \text{ mm}^2$  และสัดส่วนรูปร่าง 1.25

Hysteresis loop ของภาวะแบบ sinusoidal เต็มพิกัด ความถี่ 0.1 Hz หนากว่า hysteresis loop ของภาวะแบบ sinusoidal ครึ่งพิกัด ความถี่ 0.1 Hz ทั้งพิกัดสูงและต่ำ อีกนัยหนึ่ง ตัวแปร power slew rate ( $dP/dt$ ) ไม่สามารถแสดงถึงการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงต่อภาวะภายนอกแบบไม่คงตัวได้

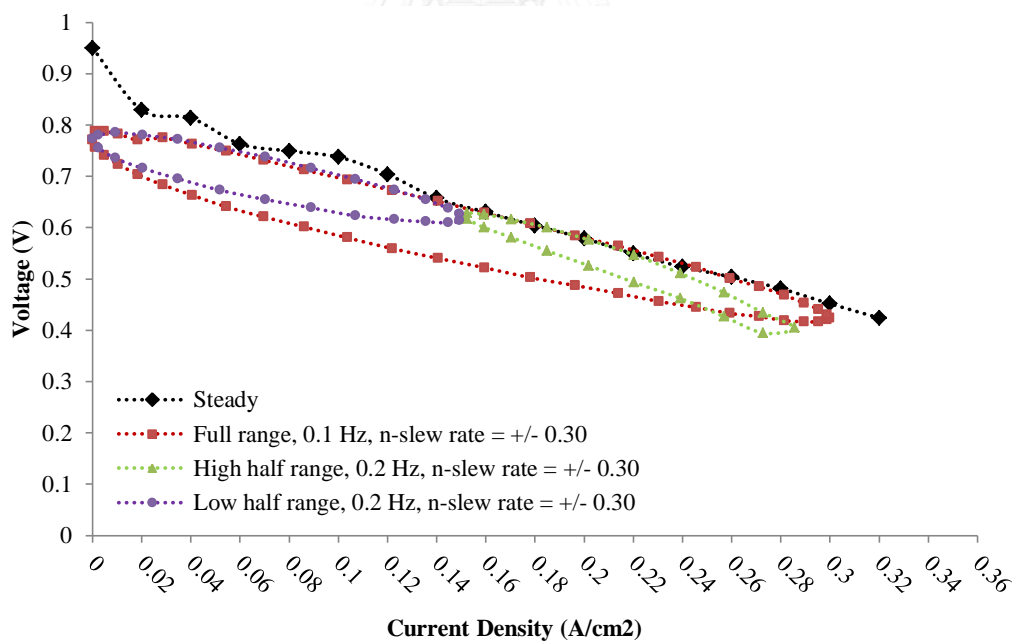
เนื่องจากภาวะแบบ sinusoidal ความถี่ 0.1 Hz ในช่วง 0 – 15 และ 15 – 30 A เทียบเท่ากับ n-slew rate เพียง  $\pm 0.15$  จึงได้ทดสอบเซลล์เดี่ยวด้วยภาวะแบบ sinusoidal ความถี่ 0.2 Hz ในช่วง 0 – 15 และ 15 – 30 A ซึ่ง n-slew rate มีค่า  $\pm 0.3$  และนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบซ้ำดังแสดงในภาพที่ 89 – ภาพที่ 94



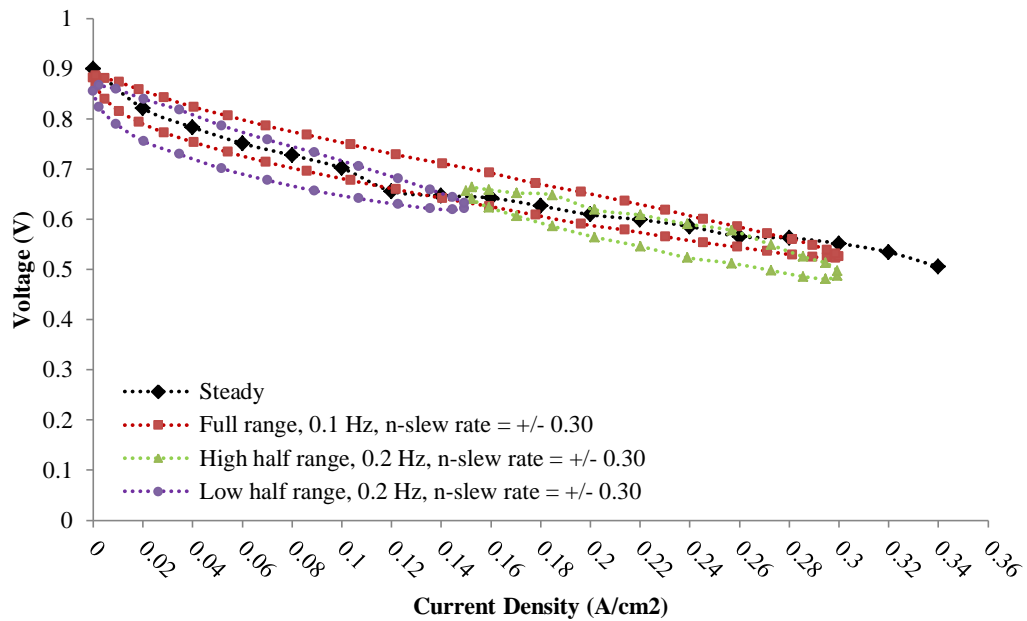
ภาพที่ 89 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis n-slew rate 0.3 เต็มพิกัดและครึ่งพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 2 mm<sup>2</sup> และสัดส่วนรูปร่าง 0.80



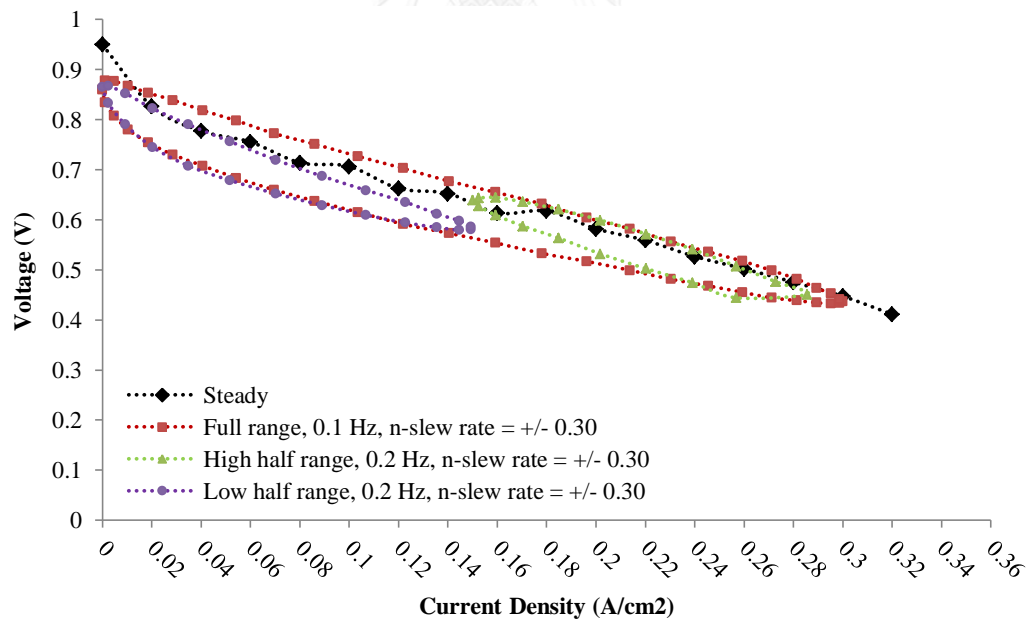
ภาพที่ 90 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis n-slew rate 0.3 เต็มพิกัดและครึ่งพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 2 mm<sup>2</sup> และสัดส่วนรูปร่าง 1.25



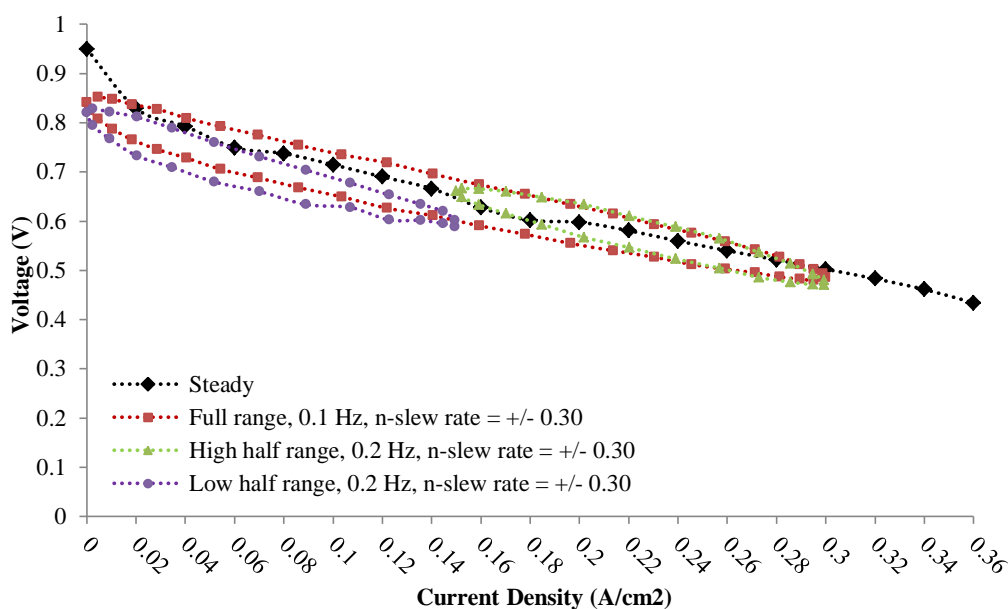
ภาพที่ 91 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis n-slew rate 0.3 เต็มพิกัดและครึ่งพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 5 mm<sup>2</sup> และสัดส่วนรูปร่าง 0.80



ภาพที่ 92 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis n-slew rate 0.3 เต็มพิกัดและครึ่งพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ  $5 \text{ mm}^2$  และสัดส่วนรูปร่าง 1.25



ภาพที่ 93 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis n-slew rate 0.3 เต็มพิกัดและครึ่งพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ  $8 \text{ mm}^2$  และสัดส่วนรูปร่าง 0.80



ภาพที่ 94 การเปรียบเทียบเส้นโค้ง hysteresis n-slew rate 0.3 เต็มพิกัดและครึ่งพิกัด ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ  $8 \text{ mm}^2$  และสัดส่วนรูปร่าง 1.25

ความหนาของ hysteresis loop ของภาวะแบบ sinusoidal ครึ่งพิกัด ความถี่ 0.2 Hz เพิ่มขึ้น จากความถี่ 0.1 Hz อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับ hysteresis loop เต็มพิกัด 0.1 Hz ความหนา ของ loop ใกล้เคียงกันมาก และ n-slew rate ของภาวะครึ่งพิกัด ความถี่ 0.2 Hz และเต็มพิกัด 0.1 Hz มีค่าเท่ากันที่  $\pm 0.3$  แสดงว่า n-slew rate แสดงถึงการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงต่อภาวะ ภายนอกแบบไม่คงตัวได้ดีกว่า power slew rate แบบปรกติ

นอกจากนี้ ชุดทดสอบที่มีสัดส่วนรูปร่างของช่องทางการไหลเป็น 0.8 เมื่อทดสอบด้วยภาวะ ครึ่งพิกัดสูง n-slew rate  $\pm 0.3$  ไม่สามารถทำงานที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $0.3 \text{ mA/cm}^2$  ได้ แสดงถึงสมรรถนะที่ต่ำกว่าชุดทดสอบที่มีสัดส่วนรูปร่างของช่องทางการไหลอากาศเป็น 1.25

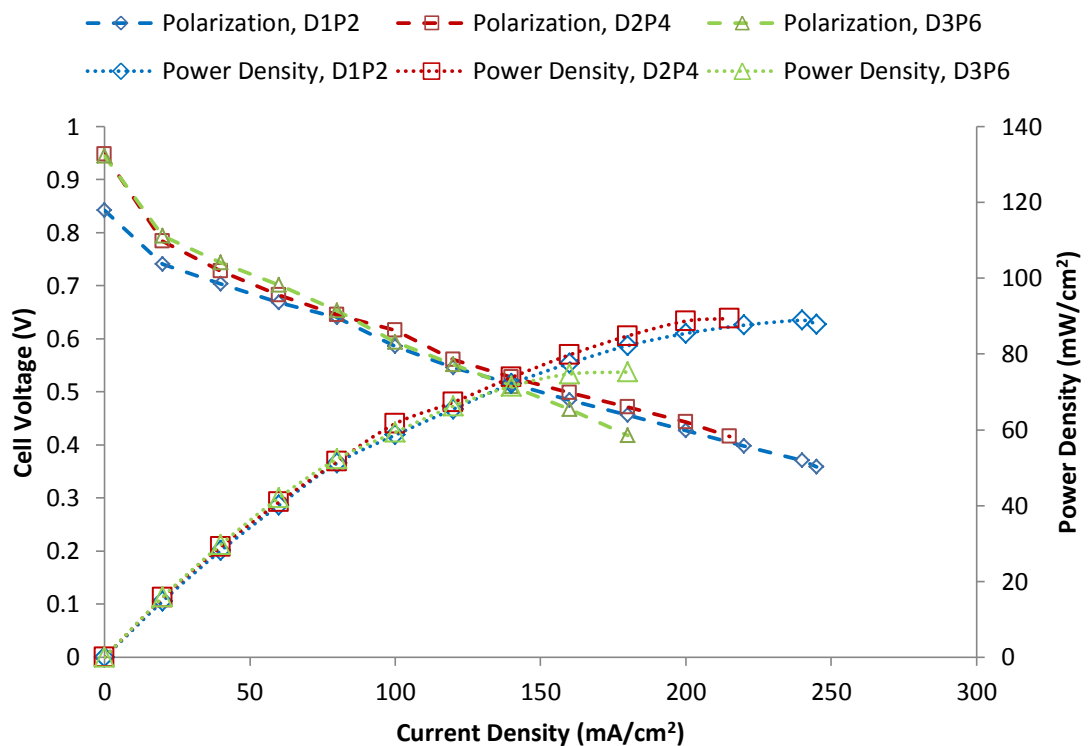
### 7.3 ผลการทดสอบผลกระทบของแผ่นรูพรุนต่อสมรรถนะของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว

#### 7.3.1 ผลของขนาดของรูพรุนต่อสมรรถนะของชุดทดสอบ

ภาพที่ 95 แสดงผลการทดสอบที่แสดงผลกระทบของรูปแบบของแผ่นรูพรุนต่อพฤติกรรมของ เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode เมื่อสัดส่วนพื้นที่รูต่อพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาครั้งที่ 23% เมื่อ ทำการทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 61% แผ่นรูพรุน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเพิ่ม ขนาดพื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก และรักษาสัดส่วนพื้นที่รูต่อพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาให้คงที่ เพื่อ รักษาความต้านทานไอหิมให้คงที่ ไม่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม



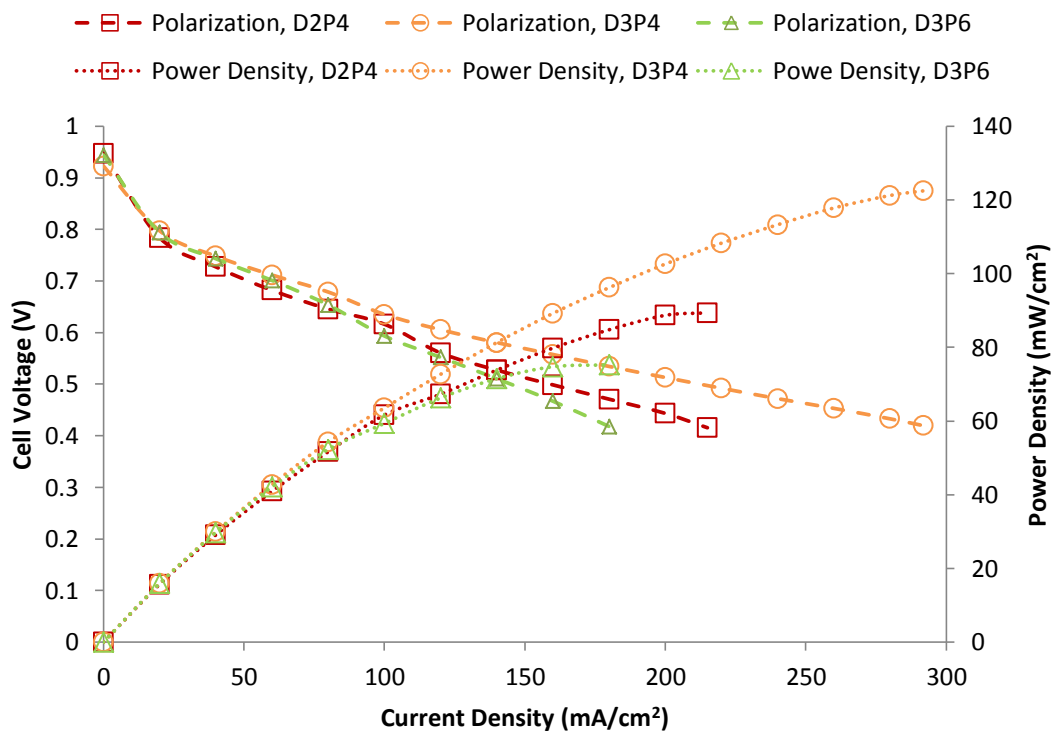
ดี ระยะพิตช์ที่มาก จากการเพิ่มความกว้างของ rib มีแนวโน้มในการเกิด under-rib effect [10] ซึ่งสังเกตได้จากความแตกต่างของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถสร้างได้ สำหรับแผ่นรูพรุนแต่ละแบบ แผ่นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรลิก 1 mm พิตช์ 2 mm (D1P2) สามารถให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าแผ่นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรลิก 2 mm พิตช์ 4 mm (D2P4) และเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรลิก 3 mm พิตช์ 6 mm (D3P6) ตามลำดับ



ภาพที่ 95 เส้นโค้ง polarization ของชุดทดสอบที่บรรจุแผ่นรูพรุนหลายขนาดที่มีสัดส่วนพื้นที่รูต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยาคงที่

### 7.3.2 ผลของสัดส่วนพื้นที่รูต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยาต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

ชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยแผ่นรูพรุนที่มีสัดส่วนพื้นที่รูต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยาสูงสุด มีสมรรถนะดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดสอบอื่นดังแสดงในภาพที่ 96 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มสัดส่วนพื้นที่รูต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยา ทั้งโดยการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกและลดขนาดพิตช์ ถึงแม้จะเพิ่มความต้านทานทางไฟฟ้า แต่การเพิ่มพื้นที่ให้อากาศซึมเข้าสู่ MEA มีอิทธิพลมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบในบทที่ผ่านมาว่า การเพิ่มความกว้างของช่องทางการไหลอากาศ ช่วยเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยการลดการสูญเสียศักย์ไฟฟ้า อันเนื่องมาจากการถ่ายเทมวล



ภาพที่ 96 เส้นโค้ง polarization แสดงผลการทดสอบชุดทดสอบที่บรรจุแผ่นรูพรุนที่มีสัดส่วนพื้นที่รูต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยาต่างกัน

#### 7.4 การอภิปรายผลการทดสอบ

เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode แบบเซลล์เดี่ยวได้ถูกออกแบบ โดยเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องในการป้อนอากาศ ทั้งรูปร่างของช่องทางการไหลและการเลือกพัดลม และถูกผลิตขึ้นจริงเพื่อเป็นชุดทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถทำงานได้บรรลุค่าที่ออกแบบไว้ทั้งสิ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการป้อนอากาศในปริมาณที่พอเพียงสำหรับการผลิตไฟฟ้าและระบายความร้อน และยังแสดงให้เห็นว่า การคำนวณการไหลอากาศด้วยแบบจำลองหนึ่งมิติ จากความรู้ในด้านเซลล์เชื้อเพลิงและกลศาสตร์ของไหล เช่นเดียวกับที่ Barreras [26] และ Lopez-Sabiron [11] ใช้ในการศึกษา เพียงพอสำหรับการออกแบบสร้างเซลล์เชื้อเพลิงให้สามารถทำงานบรรลุเป้าประสงค์ อีกทั้งผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนของช่องทางการไหลอากาศมีความสำคัญต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode ซึ่งสอดคล้องกับวรรณกรรมในอดีต ขณะที่พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลไม่แสดงผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งไม่สอดคล้องกับวรรณกรรมในอดีต

ถึงแม้จะมีทั้งผลที่สอดคล้องและไม่สอดคล้อง แต่วิธีการทดสอบและชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ในวิทยานิพนธ์นี้ถูกออกแบบด้วยหลักทางวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อหลีกเลี่ยงผลจากความไม่เท่าเทียม ในการป้อนสารตั้งต้น ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้สะท้อนถึง พฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่เปลี่ยนแปลงไปจากกายภาพของช่องทางการไหลอากาศที่แตกต่างกัน เท่านั้น ซึ่งจากความรู้ของผู้ทำวิจัย ไม่มีการศึกษาแบบนี้มาก่อนสำหรับช่องทางการไหลของเซลล์ เชื้อเพลิง ดังนั้น การที่ผลการทดสอบจะมีความแตกต่างจากการศึกษาที่ผ่านมาบ้างจึงไม่ใช่เรื่อง ผิดปกติ

ความกว้างและความลึกของช่องทางการไหลอากาศมีความสำคัญต่อสมรรถนะของเซลล์ เชื้อเพลิงในลักษณะที่ต่างกัน แต่ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ สูง เช่น ประเทศไทย เป็นต้น ซึ่งเป็นภาวะเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้ดี เซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode ที่มีรูปร่างช่องทางการไหลอากาศแบบกว้างตื้น ทำงานด้วยสมรรถนะที่ดีกว่าเซลล์ เชื้อเพลิงแบบ open-cathode ที่มีรูปร่างช่องทางการไหลอากาศแบบแคบลึก เหตุผลเบื้องหลัง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้อาจอธิบายได้ด้วยภาพที่ 76 และภาพที่ 77 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ต่ำ เส้นผลลัพธ์อยู่ภายใต้เส้นจากการประเมินการสูญเสียจากปฏิกิริยาและการสูญเสียตามกฎของ โอห์ม แสดงว่า ที่สภาวะทำงานนี้ เซลล์เชื้อเพลิงรับผลกระทบมาจากการสูญเสียทั้งสองนี้ ขณะที่ย่าน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง เส้นผลลัพธ์อยู่ภายใต้เส้นจากการประเมิน แสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะ ทำงานนี้ เซลล์เชื้อเพลิงได้รับผลกระทบจากการสูญเสียอื่นด้วย คือ การสูญเสียจากการถ่ายเทมวล และเมื่อผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เซลล์เชื้อเพลิง open-cathode ที่มีสัดส่วนรูปร่างเท่ากับ 1.25 มีสมรรถนะดีกว่าสัดส่วนรูปร่างเท่ากับ 0.80 ทำให้การอธิบายว่า การสูญเสียจากการถ่ายเทมวลเป็น ปรากฏการณ์สำคัญเบื้องหลังผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับงานของ Kumar [7] ที่ว่า ช่องทางการ ไหลอากาศที่มีขนาดกว้าง ช่วยให้ออกซิเจนเข้าสู่ MEA ได้มากขึ้น

ทั้งนี้ ขนาดของสัดส่วนรูปร่างควรมากกว่า 1 เพียงเล็กน้อยและขนาดความกว้างช่องทางการ ไหลและความกว้าง rib ต้องเหมาะสม ความกว้าง rib ที่น้อยเกินไป จะทำให้เกิดปัญหาความเค้นบน แผ่น MEA และแผ่น flowfield ความกว้าง rib ที่มากเกินไป จะทำให้เกิด under-rib effect ดังเช่น ที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2

ขนาดช่องทางการไหลอากาศ ถูกรายงานว่าส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง แบบปรกติและ open-cathode แต่อุปกรณ์ช่วยป้อนอากาศของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองแตกต่างกัน พัดลมไม่สามารถสร้างความดันได้สูงเท่าเครื่องอัดอากาศที่อัตราการไหลเดียวกัน ผู้วิจัยจึงคำนวณ และเลือกพัดลมที่สามารถป้อนอากาศที่ความดันและอัตราการไหลที่เพียงพอได้ และพบว่าขนาด ช่องทางการไหลไม่มีผลกระทบต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode และไม่สอดคล้องกับ การศึกษากรณีเซลล์เชื้อเพลิงแบบปรกติ

การทดสอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวกระทำด้วยภาวะทั้งแบบคงตัวและไม่คงตัว โดยภาวะแบบไม่คงตัวที่ใช้ทดสอบ ถูกปรับให้มีความเท่าเทียมกับวัฏจักรซึบซึบ ผลลัพธ์จากการทดลองทั้งสองแบบให้ผลลัพธ์ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้ ผลการทดสอบที่สัดส่วนรูปร่าง 1.25 ให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีกว่านั้น สอดคล้องกับการประเมินผลของ Shimpalee ที่ว่า ช่องทางการไหลที่กว้างเหมาะสมกับการใช้งานในยานยนต์ [15]

นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบระหว่าง hysteresis loop จากการทดสอบแบบเต็มพิกัด ความถี่ 0.1 Hz หรือเทียบเท่า n-slew rate  $\pm 0.30$  กับแบบครึ่งพิกัด ความถี่ 0.1 หรือเทียบเท่า n-slew rate  $\pm 0.15$  และความถี่ 0.2 หรือเทียบเท่า n-slew rate  $\pm 0.30$  พบว่า การระบุสภาพความไม่คงตัวของภาวะด้วย n-slew rate เหมาะสมกว่า power slew rate ในเชิงของความสามารถของเซลล์เชื้อเพลิงในการตอบสนองต่อภาวะนั้น ๆ ซึ่งสังเกตได้จากความหนาของ hysteresis loop ที่ใกล้เคียงกันมากกว่า ดังในภาพที่ 83 - ภาพที่ 94 อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เห็นการเปรียบเทียบที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ตัวแปร %hysteresis ได้ถูกใช้เพื่อแสดงถึงขนาดของ hysteresis loop เพื่อประเมินการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงต่อภาวะแบบไม่คงตัว

การประเมิน %hysteresis แบบปรกติ หาก hysteresis loop จากการทดสอบแบบเต็มพิกัด มีลักษณะดังภาพที่ 97 กำหนดให้จุดข้อมูลที่อยู่ขวาสุดและซ้ายสุดอยู่ที่ตำแหน่ง  $(x_R, y_R)$  และ  $(x_L, y_L)$  ตามลำดับ แล้วตำแหน่งกึ่งกลางระหว่าง  $x_R$  และ  $x_L$  อยู่ที่

$$x_m = \frac{(x_R - x_L)}{2} + x_L \quad (50)$$

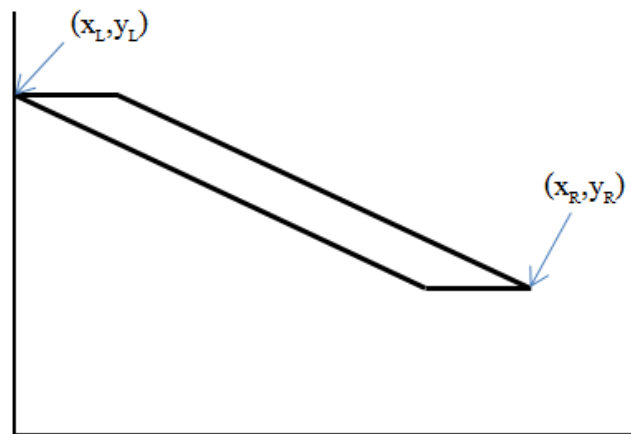
ณ ตำแหน่งนี้ จะมีค่า  $y$  อยู่ 2 ค่า กำหนดให้ค่าที่มากกว่าเป็น  $y_{MH}$  และค่าที่น้อยกว่าเป็น  $y_{ML}$  ทำให้คำนวณ %Hysteresis ได้จาก

$$\%Hys_{full} = \frac{y_{MH} - y_{ML}}{y_{max} - y_{min}} \times 100\% \quad (51)$$

สำหรับ hysteresis loop แบบครึ่งพิกัด สมการ (51) จะถูกปรับเปลี่ยนดังนี้

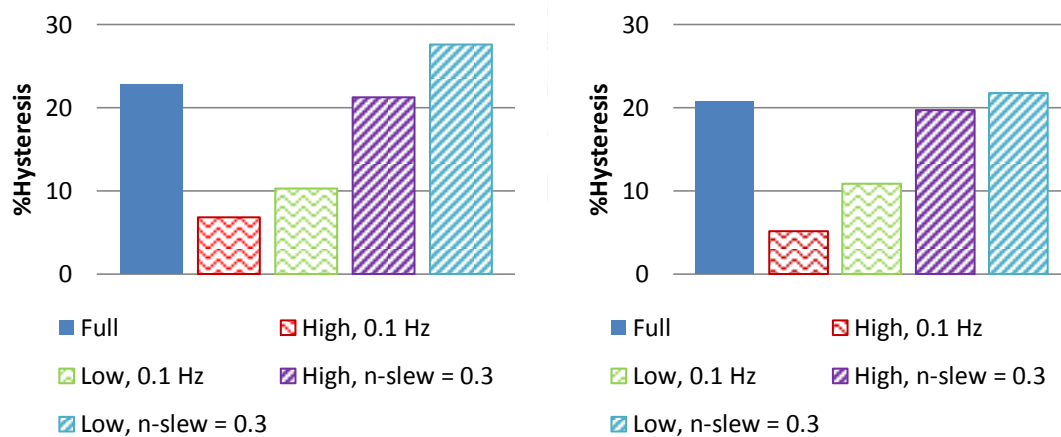
$$\%Hys_{half} = \left( \frac{y_{MH} - y_{ML}}{y_{max} - y_{min}} \right)_{half} \cdot \frac{(y_{max} - y_{min})_{half}}{(y_{max} - y_{min})_{full}} \times 100\% \quad (52)$$

การปรับสมการเช่นนี้ ทำให้การเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้แสดงถึงความหนาของ loop เพราะต้องคำนึงถึงความไม่คงตัวของเส้นโค้ง polarization อันเนื่องมาจากการทำงานในสภาพภาวะไม่คงตัวเป็นสำคัญ

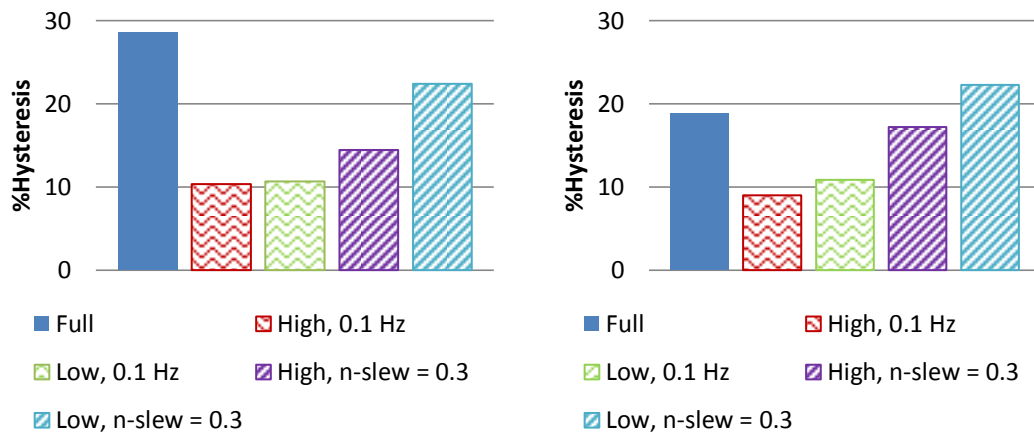


ภาพที่ 97 ตำแหน่ง  $(x_R, y_R)$  และ  $(x_L, y_L)$  บน hysteresis loop

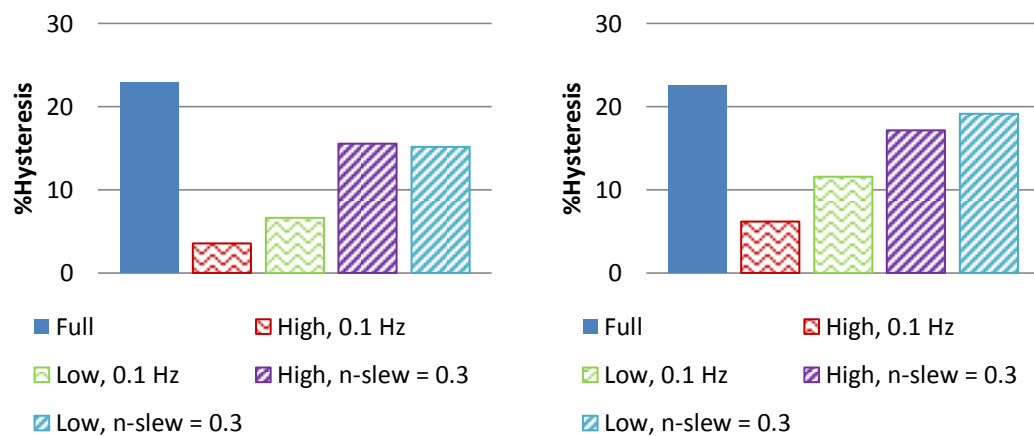
ค่า %hysteresis ที่ประเมินได้ ถูกนำมาเรียงเรียงและนำเสนอในภาพที่ 98 – ภาพที่ 100 สังเกตได้ว่า %hysteresis จากการทดสอบด้วยภาระแบบครึ่งพิกัดที่มี n-slew rate เท่ากับ  $\pm 0.3$  มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบด้วยภาระแบบเต็มพิกัดเหมือนกัน มากกว่า %hysteresis จากการทดสอบแบบครึ่งพิกัด ความถี่ 0.1 Hz ซึ่งช่วยยืนยันว่า n-slew rate สามารถแสดงถึงการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงต่อสภาพภาระไม่คงตัวได้ดีกว่า power slew rate



ภาพที่ 98 %Hysteresis จากการทดสอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ  $2 \text{ mm}^2$  และสัดส่วนรูปร่าง 0.80 (ซ้าย) และ 1.25 (ขวา)



ภาพที่ 99 %Hysteresis จากการทดสอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว  
ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ  $5 \text{ mm}^2$  และสัดส่วนรูปร่าง 0.80 (ซ้าย) และ 1.25 (ขวา)



ภาพที่ 100 %Hysteresis จากการทดสอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว  
ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ  $8 \text{ mm}^2$  และสัดส่วนรูปร่าง 0.80 (ซ้าย) และ 1.25 (ขวา)

อย่างไรก็ดี การแสดงผลการทดสอบด้วยภาระไม่คงตัวทำได้ลำบากจากสภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีทั้งสภาวะเซลล์แห้งและน้ำท่วมเซลล์ในการทดสอบแต่ละครั้ง (ภาคผนวก ค) ซึ่งเกิดจากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในแต่ละวันและเวลาที่ทำการทดสอบมีค่าไม่เท่ากัน การเลือกชุดข้อมูลมาแสดงผลให้มีความเท่าเทียมกันทุกชุดทดสอบจึงทำได้ลำบาก ผู้วิจัยจึงใช้การเลือกชุดข้อมูลที่ดีที่สุดของแต่ละชุดทดสอบมานำเสนอแนวโน้มของข้อมูล นอกจากนี้ เนื่องจากข้อจำกัดของระบบจัดเก็บ

ข้อมูล ทำให้ hysteresis loop ที่แสดงในที่นี้ จะมีความแตกต่างไปจากความเป็นจริงอันเป็นผลมาจากการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าที่กระทำด้วยเวลาที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่  $\pm 0.1$  s อยู่เสมอ

เพื่อการวิเคราะห์ผลที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นในอนาคต การพัฒนาแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อศึกษาสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและระบบจัดเก็บข้อมูลเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาในการวิจัยขั้นต่อไป

แผ่นรูพรุน เป็นชิ้นส่วนที่ผู้ทำวิทยานิพนธ์สร้างขึ้น เพื่อแก้ปัญหาการเสีรูของแผ่นกันซึม อันเนื่องมาจากความดันไฮโดรเจนทำให้แผ่นกันซึมเสีรูตามรูปร่างของช่องทางการไหลอากาศ โดยได้แรงบันดาลใจมาจากแผ่นคาโธดของเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM แบบ open-slit อย่างไรก็ตาม แผ่นรูพรุนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่น flowfield ผลิตจากกระดาษคาร์บอนได้เช่นกัน

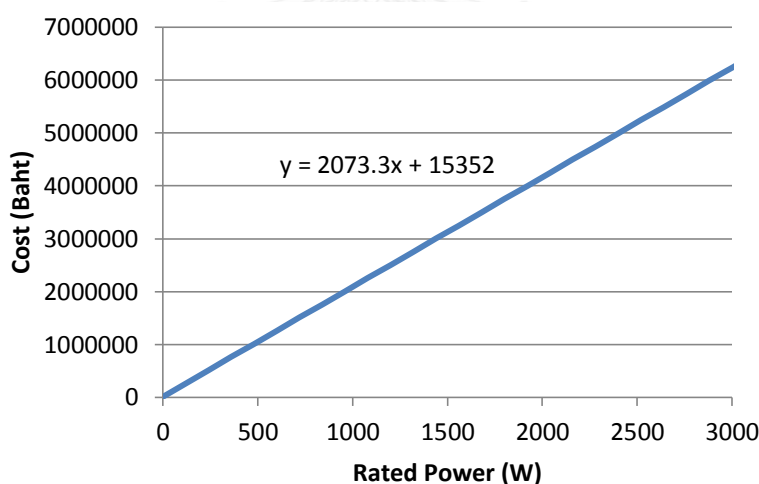
รูปแบบของรูบนแผ่นรูพรุนมีหลากหลาย อย่างไรก็ตาม รูปแบบรูกลม เป็นรูปแบบที่พื้นที่ที่สุดเหมาะสมสำหรับการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม แผ่นทองแดงถูกเลือกใช้เนื่องจากเป็นวัสดุพื้นฐานความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง และแปรรูปง่าย มาเคลือบผิวด้วยทองคำ เพื่อลดความต้านทานสัมผัสและเพิ่มความต้านทานการสึกกร่อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยการชุบด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการเคลือบผิววัสดุ อย่างไรก็ตาม ในการผลิตแผ่นรูพรุนยังคงเปิดกว้างสำหรับการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง เช่นเดียวกับกรณีของแผ่น flowfield

ผลการทดสอบแผ่นรูพรุนสอดคล้องกับผลการทดสอบช่องทางการไหลอากาศในบทที่ผ่านมา นั่นคือ การเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศและ MEA ช่วยลดการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากการถ่ายเทมวลได้ ซึ่งการสูญเสียจากการถ่ายเทมวลมีอิทธิพลสูงในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง [48] ดังนั้น การเพิ่มสัดส่วนพื้นที่รูต่อพื้นที่เกิดปฏิกิริยาจึงช่วยเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM เช่นเดียวกับการเลือกใช้สัดส่วนรูปร่างที่สูงกว่าสำหรับแผ่น flowfield

รูปแบบของรูพรุนไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEMFC อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อสังเกตภาพที่ 95 จะพบว่าผลการทดสอบสำหรับแผ่นรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm พิตซ์ 6 mm แสดงการทำงานด้วยสมรรถนะไม่แตกต่างไปจากผลการทดสอบแผ่นรูพรุนอีกสองแบบ จนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าลดลงต่ำกว่าผลการทดสอบอื่นอย่างชัดเจน ณ ความหนาแน่นกระแส 180 mA/cm<sup>2</sup> ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ทำงานได้ นอกจากนี้ยังพบว่า ความหนาแน่นกระแสสูงสุดจากแต่ละผลการทดสอบมีค่าไม่เท่ากัน ความแตกต่างนี้แสดงถึงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของผลกระทบจาก under-rib effect [10] ที่เอาชนะผลกระทบจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนที่มากกว่า ซึ่งทำให้ความดัน partial ต่ำกว่า จึงเพิ่มความสะดวกในการซึมเข้าสู่ MEA ของอากาศ [64, 65]

## 7.5 การอภิปรายเชิงเศรษฐศาสตร์

ด้วยการคำนวณและออกแบบตามหลักการพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงและกลศาสตร์ของไหล ด้วยแบบจำลองหนึ่งมิติ และสิ่งผลิตขึ้นส่วนจากหน่วยงานที่มีความน่าเชื่อถือสูง เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode แบบเซลล์เดี่ยวที่ป้อนอากาศด้วยพัดลม พร้อมด้วยอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ บนแท่นทดสอบ ในการศึกษานี้ สามารถทำงานได้บรรลุค่าออกแบบ นอกจากนี้ แผ่นรูพรุนได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อป้องกันการรั่วซึมของแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งช่วยลดราคาเชื้อเพลิงและป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้โดยไม่ตั้งใจ และป้องกันแผ่น MEA จากการฉีกขาด อย่างไรก็ตาม ภาพที่ 101 ได้แสดงค่าใช้จ่ายในการสร้างชุดทดสอบสูงมากถึง 2 ล้านบาทต่อ 1 MW เนื่องจากการผลิตที่เลือกวัสดุจากหน่วยงานที่มีความน่าเชื่อถือสูงและเป็นการสั่งซื้อ/สิ่งผลิตปลีกเพื่อการผลิตชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว ทำให้ค่าใช้จ่ายเพื่อสินค้าและบริการสูงมาก เมื่อเทียบกับราคาขายของโมดูลเซลล์เชื้อเพลิงตัวอย่างแบบ open-cathode ขนาด 100 (พ.ศ. 2558) และ 1000 (พ.ศ. 2558) ที่เทียบเท่ากับ 0.60 และ 0.25 ล้านบาทต่อ 1 MW ซึ่งจะเห็นได้ว่า ยิ่งผลิตขนาดใหญ่ขึ้น ราคาต่อหนึ่งหน่วยการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะยิ่งถูกลง ดังนั้น การเลือกหน่วยงานติดต่อเพื่อการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงขนาดใหญ่แบบเซลล์แถวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาอย่างถี่ถ้วน นอกจากนี้ เพื่อลดราคาต้นทุนต่อกำลังไฟฟ้า พิกัดให้ต่ำกว่าปัจจุบัน การเลือกใช้วัสดุทดแทนก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ

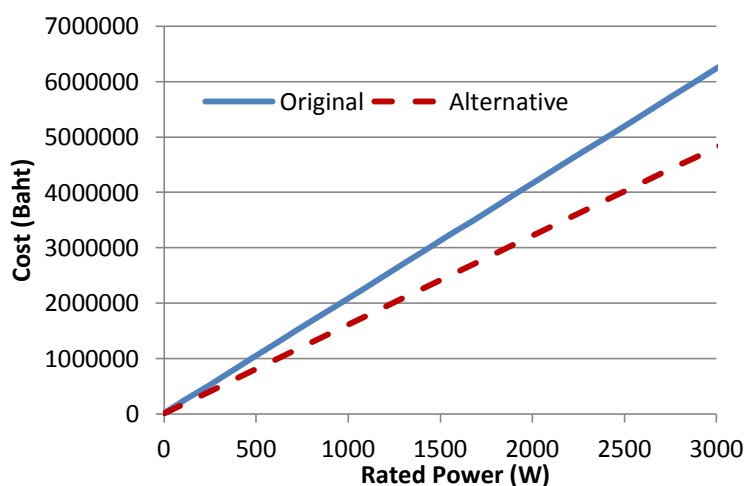


ภาพที่ 101 ราคาต้นทุนการผลิตต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าพิกัดของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ตามรายละเอียดการออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้

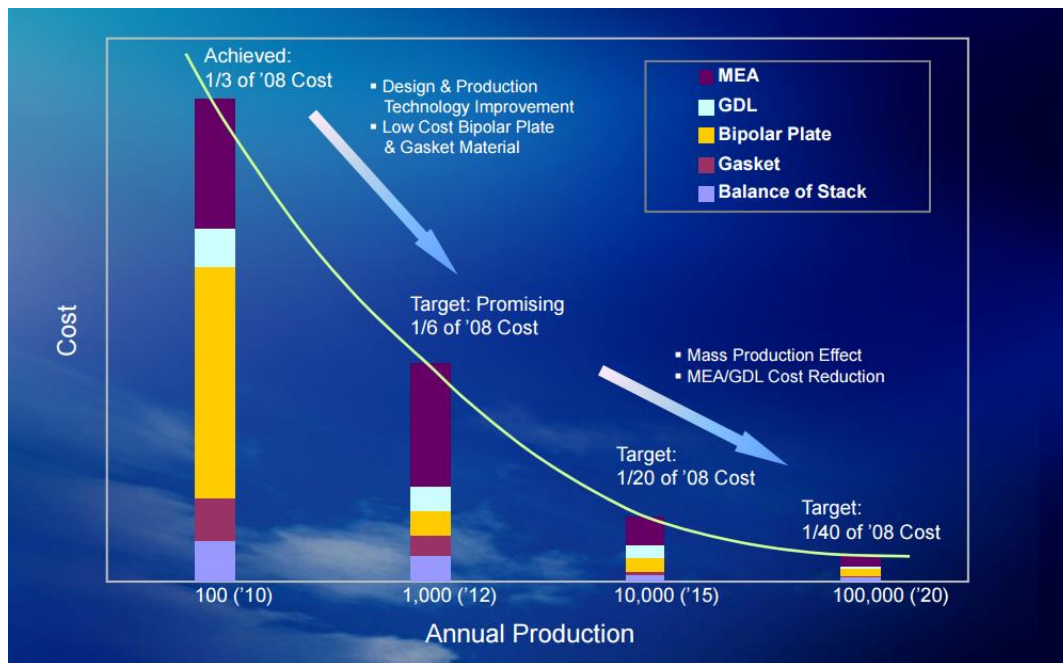
การเลือกวัสดุทดแทน เพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ถูกศึกษาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะวัสดุทดแทนแผ่นสองขั้วดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 3 วัสดุที่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์นำเสนอ คือ แผ่นสองขั้วที่ผลิตจากเหล็กกล้า SS 316L ชุบด้วยทองคำ ซึ่งถูกรายงานว่าทำงานด้วยสมรรถนะเทียบเท่ากับแผ่น



สองชั่วโมงที่ผลิตจากแกรไฟต์ [52] หากผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ผลิตชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวในวิทยานิพนธ์นี้ อีกครั้งด้วยวัสดุทดแทนเฉพาะส่วนของแผ่นสองชั่วโมงที่ได้นำเสนอไป ราคาต้นทุนการผลิตจากการ สืบค้นเบื้องต้นจะลดลงดังแสดงในภาพที่ 102 โดยราคาที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 23 ของราคาตั้งเดิม หากในอนาคต ได้รับการสนับสนุนแผ่น MEA ที่ผลิตโดยภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ราคาต้นทุนการผลิตจะลดลงอีกมาก เนื่องจากส่วนประกอบที่มีราคาสูงที่สุดใน เซลล์เชื้อเพลิง คือ แผ่น MEA นั้นเอง ซึ่งราคาของแผ่น MEA ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คิดเป็นถึง 28% ของราคาต้นทุนในการผลิตชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว ขณะเดียวกัน ราคาต้นทุนการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง โดยเฉพาะแผ่น MEA มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง [70] ดังแผนภูมิในภาพที่ 103



ภาพที่ 102 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนการผลิตต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าพิกัด ระหว่างชุดทดสอบเซลล์ เชื้อเพลิงดั้งเดิมของวิทยานิพนธ์นี้และชุดทดสอบที่ผลิตจากวัสดุทดแทนที่ได้จากการสืบค้นเบื้องต้น



ภาพที่ 103 การลดลงอย่างต่อเนื่องจากต้นทุนการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ในเซลล์เชื้อเพลิง [70]

## บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### 8.1 บทสรุปและประโยชน์ที่ได้รับ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แบบ open-cathode ถูกประยุกต์สร้างขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบทั่วไปด้วยความพยายามที่จะลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์เสริมการทำงาน อุปกรณ์ในระบบเสริมการทำงานที่บริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุด คือ อุปกรณ์ป้อนอากาศ อันได้แก่ พัดลมระบายอากาศและเครื่องอัดอากาศ โดยมีเครื่องสร้างความชื้น ที่เพิ่มภาระให้กับเครื่องอัดอากาศด้วย อย่างไรก็ตาม การทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 2 ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การปลดอุปกรณ์ป้อนอากาศเหล่านี้ลดความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ทั้งระบบต่ำกว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบปรกติ ซึ่งแสดงให้เห็นโดยนัยอีกว่า การป้อนอากาศมีบทบาทที่สำคัญต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก และเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ที่มีการป้อนอากาศโดยอากาศการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (natural convection) สูญเสียความเป็นไปได้ในการใช้งานในงานภาระหนักไปโดยปริยาย เนื่องจากข้อจำกัดในการป้อนอากาศนี้เอง

เมื่อกล่าวถึงการป้อนอากาศในเซลล์เชื้อเพลิง ปัจจัยที่ต้องนึกถึงเป็นสำคัญ คือ วิธีการป้อนและช่องทางการไหลของอากาศ เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode มักใช้พัดลมแบบ axial เพื่อการป้อนอากาศสำหรับการผลิตไฟฟ้าและระบายความร้อน ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้เรียกว่าแบบ forced air ด้วยกายภาพของพัดลม ที่สามารถสร้างความดันได้ต่ำกว่าเครื่องอัดอากาศ ทำให้รูปแบบ flowfield ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ forced air ถูกปรับให้เป็นแบบช่องตรง (straight) เพื่อลดความดันตกในช่องทางการไหลและลดภาระแก่พัดลม

รูปร่างช่องทางการไหลอากาศถูกระบุว่ามีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมาก ทั้งแบบทั่วไปและแบบ open-cathode การศึกษาเกี่ยวกับช่องทางการไหลอากาศสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบปรกติมีอยู่มากมายและผลสรุปเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดช่องทางการไหลยิ่งเล็กยิ่งดีต่อสมรรถนะ ช่องทางการไหลอากาศที่เล็กมีการระบายความร้อนที่ดีกว่า และช่องทางการไหลที่กว้างช่วยให้ออกซิเจนซึมเข้าสู่ MEA ได้สะดวกขึ้น ดังกล่าวไปแล้วในบทที่ 2 แต่สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode ซึ่งการศึกษาส่วนใหญ่กระทำบนเซลล์เชื้อเพลิงแบบพาความร้อนโดยธรรมชาติ ที่มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาต่อยอดเพื่อการใช้งานจริงต่ำ ให้ผลสรุปเกี่ยวกับขนาดช่องทางการไหลที่แตกต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงแบบปรกติอยู่พอสมควร ทำให้ไม่สามารถชี้ชัดได้ว่า สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ในการใช้งานจริงขึ้นอยู่กับปัจจัยในช่องทางการไหลอากาศใดบ้าง วิทยานิพนธ์นี้จึงเกิดขึ้นด้วยแรงจูงใจนี้เอง

### 8.1.1 พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ forced-air open-cathode

นอกจากความสำเร็จในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode และการศึกษาเกี่ยวกับราคาต้นทุนการผลิตและวัสดุทดแทน Normalized slew rate หรือตัวแปรไร้มิติเพื่อระบุความไม่คงตัวของภาระทางไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงหนึ่ง ๆ มีความสามารถตอบสนองได้ถูกนำมาประยุกต์ให้เข้ากับการทดลอง โดยการกำหนดให้ภาระไม่คงตัวที่ใช้ในการทดสอบทดแทนภาระของยานยนต์ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 0.3$  ของ N-slew rate จากการทดสอบให้เซลล์เชื้อเพลิงรับภาระแบบไซโนในช่วงความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ ที่ความถี่ที่แตกต่างกัน และคิดเป็น N-slew rate ที่แตกต่างกัน พบว่า hysteresis loop ที่เกิดจากการรับภาระแบบไม่คงตัวนี้มีขนาดที่แปรผันอย่างสอดคล้องกับค่า N-slew rate มากกว่าค่าความถี่ของภาระไฟฟ้า ทำให้ N-slew rate ได้รับการสนับสนุนว่าเป็นดัชนีที่เหมาะสมเพื่อระบุความไม่คงตัวของภาระของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode เช่นกัน

แผ่นรูพรุนที่ถูกประดิษฐ์ขึ้น โดยได้แรงบันดาลใจมาจากแผ่นแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-slit ได้ถูกศึกษาต่อยอด แผ่นรูพรุนในวิทยานิพนธ์นี้ มีรูพรุนแบบกลม เรียงตัว 60 องศา ต่อกัน ซึ่งเป็นรูปแบบพื้นฐานในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นโลหะมีรู รูปแบบของรูมีความแตกต่างกันได้จากการปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูและระยะพิตซ์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มพื้นที่เปิดให้แก่แผ่นรูพรุน โดยการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูและคงระยะพิตซ์ ช่วยเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แม้แผ่นรูพรุนจะช่วยลดการรั่วของไฮโดรเจนและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดแก่แผ่น MEA จากความแตกต่างของความดันระหว่างด้านแคโทดและแอโนด แต่แผ่นรูพรุนก็กีดขวางการซึมเข้าสู่แผ่น MEA ของอากาศ อย่างไรก็ตาม แผ่นรูพรุนยังมีประโยชน์ต่อเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแผ่นสองชั้นที่ผลิตจากกระดาษคาร์บอน ทำให้การศึกษานี้เป็นประโยชน์ต่อเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบเดียวกันหรือรูปแบบอื่นได้ด้วย

### 8.1.2 ศึกษาผลของสัดส่วนของช่องทางการไหลบนแผ่น flowfield ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode

เมื่อการทดสอบดำเนินจนเสร็จสิ้น ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า ช่องทางการไหลอากาศที่มีสัดส่วนรูปร่างมากกว่า ช่วยให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode ดีกว่า ทั้งในสภาวะรับภาระแบบคงตัวและไม่คงตัว โดยกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยจากชุดทดสอบที่มีสัดส่วนรูปร่างเป็น 1.25 มีค่ามากกว่าชุดทดสอบที่มีสัดส่วนรูปร่างเป็น 0.80 ประมาณ 18% เหตุผลเบื้องหลังพฤติกรรมนี้ถูกอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM ที่เกิดจากการสูญเสียจากการเกิดปฏิกิริยา การสูญเสียตามกฎของโอห์ม และการสูญเสียจากการถ่ายเทมวล

เนื่องจากพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่แตกต่างกันในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง จึงสรุปได้ว่า ช่องทางการไหลที่มีสัดส่วนรูปร่างสูงกว่า ช่วยลดการสูญเสียจากการถ่ายเทมวล เนื่องจากเพิ่มพื้นที่ให้ออกซิเจนได้ซึมเข้าสู่ MEA โดยเฉพาะเมื่อรับภาระแบบไม่คงตัว ซึ่งสอดคล้องกับวรรณกรรมในอดีต ขณะที่พื้นที่หน้าตัดช่องทางการไหลไม่มีผลสำคัญต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งสนับสนุนว่า การป้อนอากาศมีความสำคัญยิ่ง และควรถูกคำนวณ ออกแบบ และสร้างขึ้น เพื่อให้เกิดการป้อนอากาศอย่างเพียงพอต่อภาระที่เซลล์เชื้อเพลิงจะได้รับ อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode สามารถทำงานได้ดีขึ้นเมื่อ stoichiometry ของอากาศมีค่าสูงกว่าความต้องการของเซลล์เชื้อเพลิง

ถึงแม้ช่องทางการไหลที่มีสัดส่วนรูปร่างสูงกว่า ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode สูงขึ้น แต่ค่าสัดส่วนรูปร่างที่แนะนำในวิทยานิพนธ์นี้ควรมีค่าสูงกว่า 1 เพียงเล็กน้อยด้วยข้อจำกัดด้านวัสดุ แผ่นแกรไฟต์ ซึ่งเป็นวัสดุพื้นฐานในการผลิตแผ่นสองขั้วมีความเปราะสูงและปฏิกิริยาเคมีในการสร้างไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน จึงเกิดความร้อนสะสมและความเค้นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิในเซลล์เชื้อเพลิงตลอดการทำงาน การกัดร่องแผ่นแกรไฟต์ให้มีช่องทางการไหลกว้างมากโดยที่ขนาด rib เล็กมากจะเพิ่มความเค้นแก่ rib ทำให้เกิดการแตกหักของแผ่นแกรไฟต์หรือกดทับจนแผ่น MEA เสียหายหรือสร้างกระแสไฟฟ้าต่ำลงได้ และหากออกแบบให้ rib กว้างมากก็อาจเกิด under-rib effect จากการที่ออกซิเจนซึมเข้าไม่ถึงถึงและสม่ำเสมอทั้งแผ่น MEA ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดด้านวัสดุนี้จะแตกต่างกันเมื่อวัสดุทางเลือกได้ถูกนำมาใช้แทนวัสดุดั้งเดิม ซึ่งเป็นเรื่องที่ควรได้รับการศึกษาต่อไป

ผลสรุปของการทดสอบ ทำให้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ตระหนักถึงขั้นตอนการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงอีกครั้งหนึ่ง เซลล์เชื้อเพลิงถูกนึกถึงในฐานะของผลผลิตจากศาสตร์ทางด้านเคมี ตลอดเวลาหลายทศวรรษที่ผ่านมา ความรู้เกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงถูกเผยแพร่จากนักเคมีแทบทั้งสิ้น รวมทั้งความรู้ในด้านการออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิง ทั้งที่เซลล์เชื้อเพลิงมีความเกี่ยวข้องกับศาสตร์หลายสาขา ได้แก่ เคมี วัสดุ เครื่องกล และไฟฟ้า ศาสตร์ทางด้านเครื่องกลจะมีบทบาทสำคัญในส่วนของระบบเสริมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง และช่องทางการไหล/ท่อของไฮโดรเจนและอากาศ ซึ่งทั้งหมดมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพรวมของระบบเซลล์เชื้อเพลิง การออกแบบช่องทางการไหลมักถูกลำดับให้อยู่ในขั้นตอนต่อมาภายหลังขั้นตอนที่เกี่ยวกับแผ่น MEA จากนั้น พัดลมและอุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบเสริมการทำงานจะถูกเลือกในลำดับถัดมา และลำดับขั้นตอนการออกแบบทั้งหมดจะถูกปรับแก้ทำซ้ำอีกครั้งตามลำดับ เพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้บรรลุสมรรถนะที่ต้องการ เนื่องจากว่า ช่องทางการไหลอากาศที่เล็กต้องการพัดลมแรงอัดสูงกว่าช่องทางการไหลที่ใหญ่ เพื่อการป้อนอากาศปริมาตรหนึ่ง ๆ และพัดลมแรงอัดสูงนี้บริโภคกำลังไฟฟ้าสูง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงไม่สูงเท่าที่ควรได้ ขั้นตอนการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจึงควรถูกแยกและลำดับใหม่ ขั้นตอนการออกแบบ

ช่องทางการไหลและระบบเสริมการทำงานควรแยกออกจากขั้นตอนการผลิตแผ่น MEA เนื่องจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นแล้วว่า ช่องทางการไหลและ MEA มีความสัมพันธ์ต่อกัน ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง แค่เพียงเชิงกายภาพ (การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากการถ่ายเทมวล) ซึ่งรูปแบบ flowfield ที่เหมาะสมตามหลักกลศาสตร์ของไหลจะถูกจำกัดความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงด้วยคุณสมบัติของวัสดุพื้นฐานในแต่ละส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงอีกทีหนึ่ง กำลังสูญเสียเพื่อการทำงานของระบบเสริมการทำงานจึงควรถูกระบุไว้ตั้งแต่ต้น รายการอุปกรณ์เสริมการทำงานที่เหมาะสมจะถูกจำกัดลงได้ตั้งแต่ต้นเช่นกันด้วยอัตราการบริโภคกำลังไฟฟ้านี้ และจากนั้น ขั้นตอนการกำหนดขนาดของช่องทางการไหล/ท่อ (โดยพิจารณาจากปัจจัยทางกลและวัสดุ) และเลือกอุปกรณ์เสริมการทำงาน จะสำเร็จโดยง่ายและรวดเร็วขึ้น เนื่องจากการทบทวนทำซ้ำเพื่อเลือกแบบสุดท้ายมีขั้นตอนที่สั้นลงและแบบทางเลือกที่ต้องพิจารณามีจำนวนน้อยกว่า

## 8.2 ข้อเสนอแนะ

- ส่วนประกอบต่าง ๆ ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM ควรได้รับการสนับสนุนจากสมาชิกในศูนย์วิจัยเซลล์เชื้อเพลิงมากกว่านี้ เพื่อเพิ่มศักยภาพ ทั้งของแต่ละสาขาวิชาที่เป็นสมาชิก และของศูนย์วิจัยเอง เพื่อพัฒนาเป็นศูนย์วิจัยแบบครบวงจรที่สามารถร่วมกันผลิตเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM เองได้โดยพึ่งหน่วยงานภายนอกให้น้อยที่สุด ศูนย์วิจัยควรมีแหล่งข้อมูลกลางเพื่อเป็นศูนย์รวมความรู้ที่แต่ละสาขาวิชาได้ค้นพบ เพื่ออำนวยความสะดวกให้แก่สมาชิกที่สนใจในการศึกษาความรู้เกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิง PEM ในด้านสาขาวิชาอื่น ๆ ซึ่งตนไม่เชี่ยวชาญได้
- ความรู้เกี่ยวกับการเตรียมและเก็บรักษาแผ่น MEA ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม เพราะแผ่น MEA เป็นส่วนประกอบที่ราคาสูงสุดในเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM และมีส่วนกำหนดอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง
- ระบบการป้อนอากาศควรทำงานแปรผันตามขนาดของภาระที่เซลล์เชื้อเพลิงได้รับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยเฉพาะในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์แกวซึ่งต้องการอากาศป้อนเข้าสู่สูงกว่าเซลล์เดี่ยว
- ระบบตรวจวัดควรได้รับการพัฒนาทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ เนื่องจากความถี่ในการบันทึกผลยังต่ำและเซ็นเซอร์ในห้องปฏิบัติการมีข้อจำกัดในการใช้งานหรือไม่พร้อมใช้งาน
- การไล่น้ำควรกระทำในสภาวะที่เกิดน้ำท่วมในเซลล์เชื้อเพลิง ระบบการไล่น้ำแบบอัตโนมัติที่สามารถตรวจจับสภาวะน้ำท่วมผ่านทางศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงควรได้รับการศึกษาและสร้างอย่างเหมาะสม

- แบบจำลองพฤติกรรมหรือสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความแม่นยำควรได้รับการพัฒนาขึ้น เพื่อให้การศึกษาเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงดำเนินไปได้โดยสะดวกและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น
- วัสดุทดแทนในส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มความเป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิงในเชิงการตลาดและเพิ่มศักยภาพในการต่อสู้กับแหล่งพลังงานสะอาดอื่น ๆ เพื่อทดแทนแหล่งพลังงานแบบเก่า ซึ่งมีราคาสูงขึ้นเรื่อย ๆ และทำลายธรรมชาติ



## ภาคผนวก ก

### รายละเอียดอุปกรณ์เสริมในการทดสอบ

#### ก.1 เครื่องสร้างภาระไฟฟ้า

เครื่องสร้างภาระไฟฟ้ากระแสตรง (DC Electronic Load) ของ KIKUSUI รุ่น PLZ1004W (ภาพที่ 104) สามารถสร้างภาระไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุด 1000 W จากพลังงานขาเข้า คือ ไฟฟ้ากระแสสลับ 110 V ความถี่ 60 Hz การกำหนดขนาดภาระไฟฟ้าทำได้ทั้งการกำหนดขนาดในรูปของกระแสไฟฟ้า ความศักย์ไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า การกำหนดขนาดทำได้สองทาง ได้แก่ การกำหนดที่ส่วนควบคุมด้านหน้าเครื่องและการกำหนดผ่านโปรแกรม WAVY ผ่านช่อง GPIF, RS232 หรือ USB



ภาพที่ 104 KIKUSUI รุ่น PLZ1004W [71]

#### ก.2 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) ที่สามารถใช้ในการทดสอบนี้มีหลากหลายรุ่นและขนาด สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้เครื่องจ่ายไฟฟ้าทั้งหมด 2 เครื่อง หนึ่งในนั้น คือ เครื่องจ่ายไฟฟ้าของ YUGO รุ่น YG3020E (ภาพที่ 105) เป็นเครื่องจ่ายไฟฟ้าแบบดิจิทัลที่สามารถจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ความต่างศักย์สูงสุด 30 V และกระแสไฟฟ้าสูงสุด 20 A เครื่องจ่ายไฟฟ้ารับพลังงานจากภายนอกในรูปของไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 110 V ที่ความถี่ 60 Hz โหมดการปรับการจ่ายไฟฟ้ามี่ทั้งแบบความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่และกระแสไฟฟ้าคงที่ มีหน้าจอแอลซีดีแสดงขนาดไฟฟ้าที่กำลังจ่ายออกแบบ real-time ด้วยความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2.5% และมีระบบป้องกันการลัดวงจร

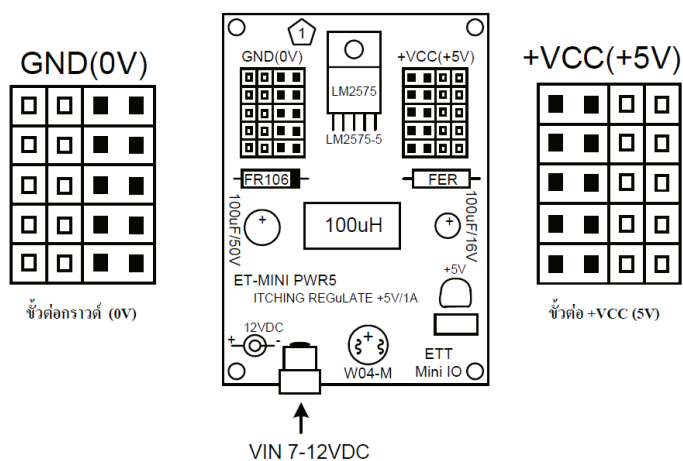




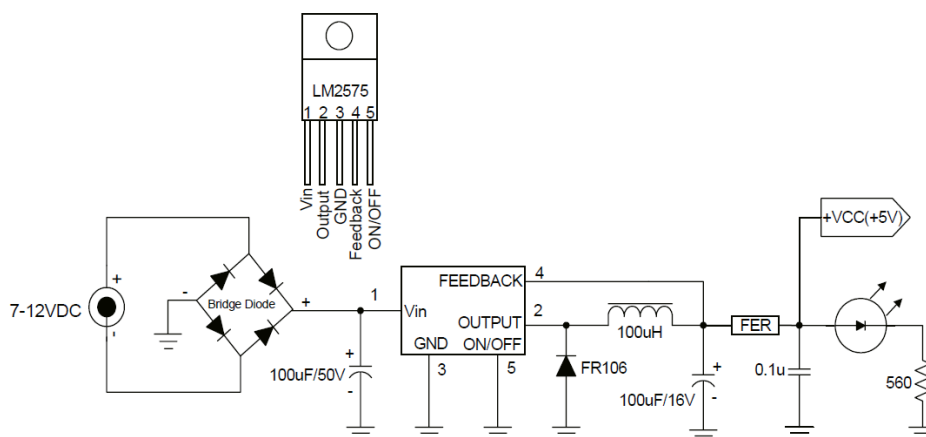
ภาพที่ 105 YUGO รุ่น TG3020E

### ก.3 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 V

วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 V (5-VDC Supply) ของ ETT รุ่น ET-MINI-PWR5 ดังภาพที่ 106 มีวงจรภายในดังภาพที่ 107 ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออกคงที่ที่ 5 V ที่กระแสไฟฟ้าสูงสุด 1 A แหล่งพลังงานของวงจรภายนอกมาจากไฟฟ้ากระแสตรง 7-12 V ทาง male jack type J ขนาด 2.5 mm จาก AC-DC adapter ของ ETT ที่สามารถแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 10 V ที่กระแสไฟฟ้าขาออก 0.85 A ทาง female jack type J ขนาด 2.5 mm



ภาพที่ 106 ET-MINI-PWR5 [72]



ภาพที่ 107 ผังวงจรของ ET-MINI-PWR5 [72]

#### ก.4 วาล์วขดลวด

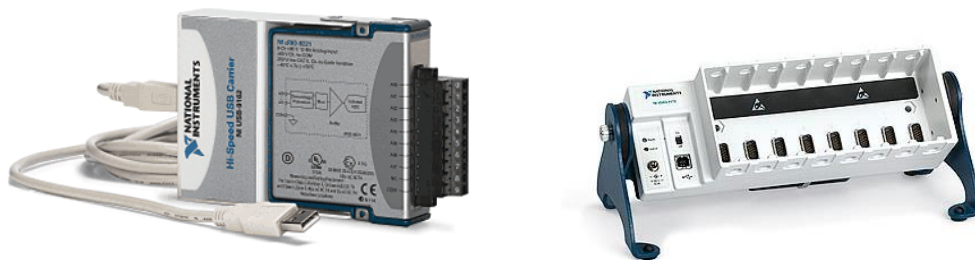
วาล์วขดลวดสองทางของ CHSFC รุ่น 2W-025-08 มีรายละเอียดดังตารางที่ 7 รายละเอียดของวาล์วขดลวด CHSFC 2W-025-08 เป็นวาล์วแบบปรกติปิด (normally closed) ซึ่งจะเปิดเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V เข้าสู่ขดลวดภายในวาล์ว

ตารางที่ 7 รายละเอียดของวาล์วขดลวด CHSFC 2W-025-08

ศักย์ไฟฟ้าทำงาน	12 V $\pm$ 10%
ขนาดรู orifice	2.5 mm
อุณหภูมิทำการ	-5°C - 80 °C
ขนาดท่อ	1/4"
ความดันทำงาน	0 – 10 kg/cm <sup>2</sup>
วัสดุ	ทองเหลือง

#### ก.5 Data Acquisition

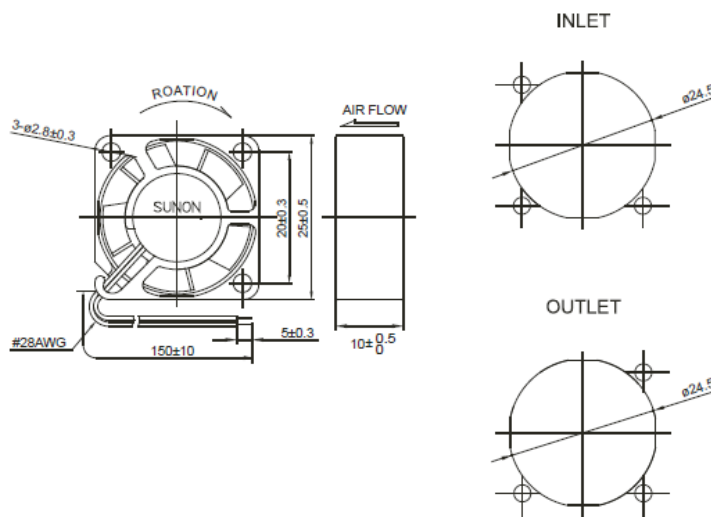
Data Acquisition (DAQ) ของ National Instrument รุ่น NI 9221 (ภาพที่ 108) รับความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ในช่วง  $\pm$ 60 V ใช้งานร่วมกับ chassis รุ่น NI cDAQ-9172 (ภาพที่ 108) ถูกใช้เพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นไดอะล็อกเข้าสู่คอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabView ผ่านสาย USB




ภาพที่ 108 NI 9221 [73] (ซ้าย) และ NI cDAQ-9172 [74] (ขวา)

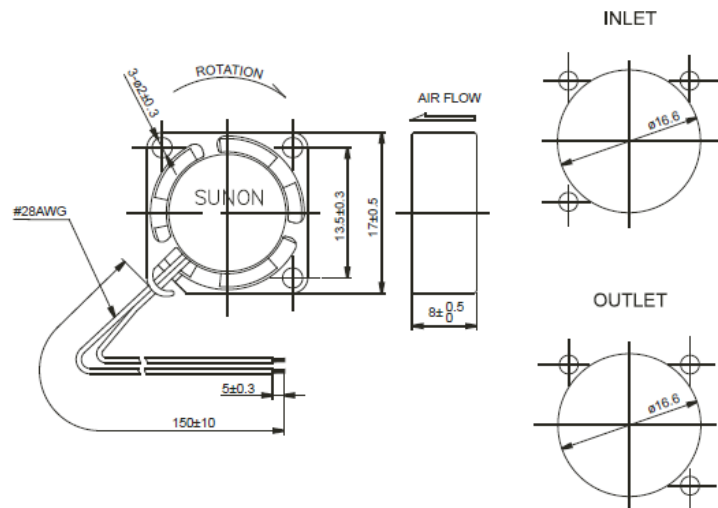
**ก.6 พัฒลมสำหรับชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว**


พัฒลมที่ใช้ในการทดสอบเซลล์เดี่ยว เป็นพัฒลมไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่าน (brushless) กระแสตรงของ SUNON® 3 รุ่น ได้แก่ MC25100V1, MC17080V1 และ MC17080V2 ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 109 และภาพที่ 110



	Bearing	Rating Voltage	Power Current	Power Consumption	Speed	Air Flow	Static Pressure	Noise	Weight
	● VAPO	(VDC)	(mA)	(WATTS)	(RPM)	(CFM)	(Inch-H <sub>2</sub> O)	(dB(A))	(g)
MC25100V1-000U-A99	●	5	120	0.60	13000	3.5	0.25	23.0	7.5

ภาพที่ 109 ขนาดและรายละเอียดของพัฒลม SUNON รุ่น MC25100V1 [62]



	Bearing	Rating Voltage (VDC)	Power Current (mA)	Power Consumption (WATTS)	Speed (RPM)	Air Flow (CFM)	Static Pressure (Inch-H <sub>2</sub> O)	Noise (dB(A))	Weight (g)
	MC17080V1-000U-A99	● VAPO	5	160	0.80	20000	0.9	0.28	25.0
MC17080V2-000U-A99	●	5	100	0.50	15000	0.7	0.17	16.0	4.36

ภาพที่ 110 ขนาดและรายละเอียดของพัดลม SUNON® รุ่น MC17080V1 และ MC17080V2 [62]

### ก.7 รถยนต์สำหรับการประเมินความเป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Open-cathode PEM ในงานยานยนต์

ข้อมูลของรถยนต์ที่นำมาใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการประเมินความเป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode PEM สำหรับการใช้งานเป็นต้นกำลังของรถยนต์ส่วนบุคคล คือ รถยนต์ TOYOTA รุ่น Corolla Altis 1.8 J ปี ค.ศ. 2011 – 2014 รายละเอียดของรถยนต์รุ่นนี้เป็นไปตามตารางที่ 8 รายละเอียดทางเทคนิคของรถยนต์ TOYOTA Corolla Altis JS Petrol

ตารางที่ 8 รายละเอียดทางเทคนิคของรถยนต์ TOYOTA Corolla Altis JS Petrol [75]

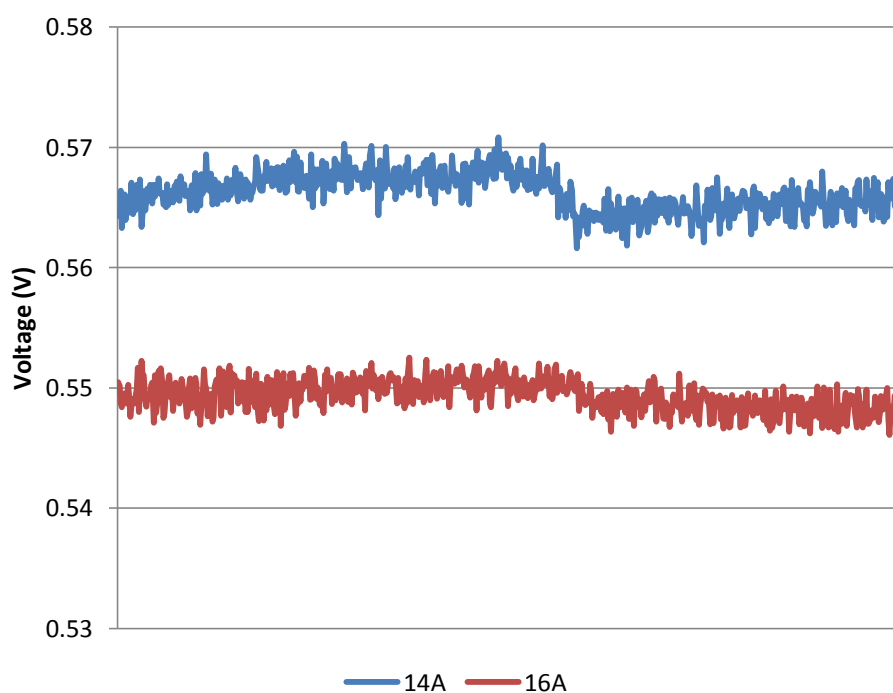
<b>Dimensions &amp; Weight</b>	
Length	4540 mm
Width	1760 mm
Height	1480 mm
Wheelbase	2600 mm
Ground Clearance	175 mm
Kerb Weight	1180 kg
<b>Capacity</b>	
Seating Capacity	5 Person
Doors	4 Doors
No of Seating Rows	2 Rows
Bootspace	475 litres
Fuel Tank Capacity	55 litres
<b>Engine &amp; Transmission</b>	
Engine Type	2ZR-FE, Gasoline, 4 cylinder inline
Displacement	1798 cc
Fuel Type	Petrol
Max Power	138 bhp @ 6400 RPM
Max Torque	173 Nm @ 4000 RPM

Mileage (ARAI)	15.23 kmpl
Valve/Cylinder (Configuration)	4
Cylinders	4, Inline
Fuel System	Electronic Fuel Ingection (EFI)
Transmission Type	Manual
No of gears	6 Gears
Drivetrain	FWD
<b>Suspensions, Brakes, Steering &amp; Tyres</b>	
Suspension Front	McPherson strut front axle
Suspension Rear	Torsion beam rear axle
Front Brake Type	Disc
Rear Brake Type	Disc
Steering Type	Tilt & Telescopic Electric Power Steering
Minimum Turning Radius	5.3 metres
Front Tyres	195 / 65 R15
Rear Tyres	195 / 65 R15

## ภาคผนวก ข

### การจัดเตรียม MEA สำหรับการทดสอบ

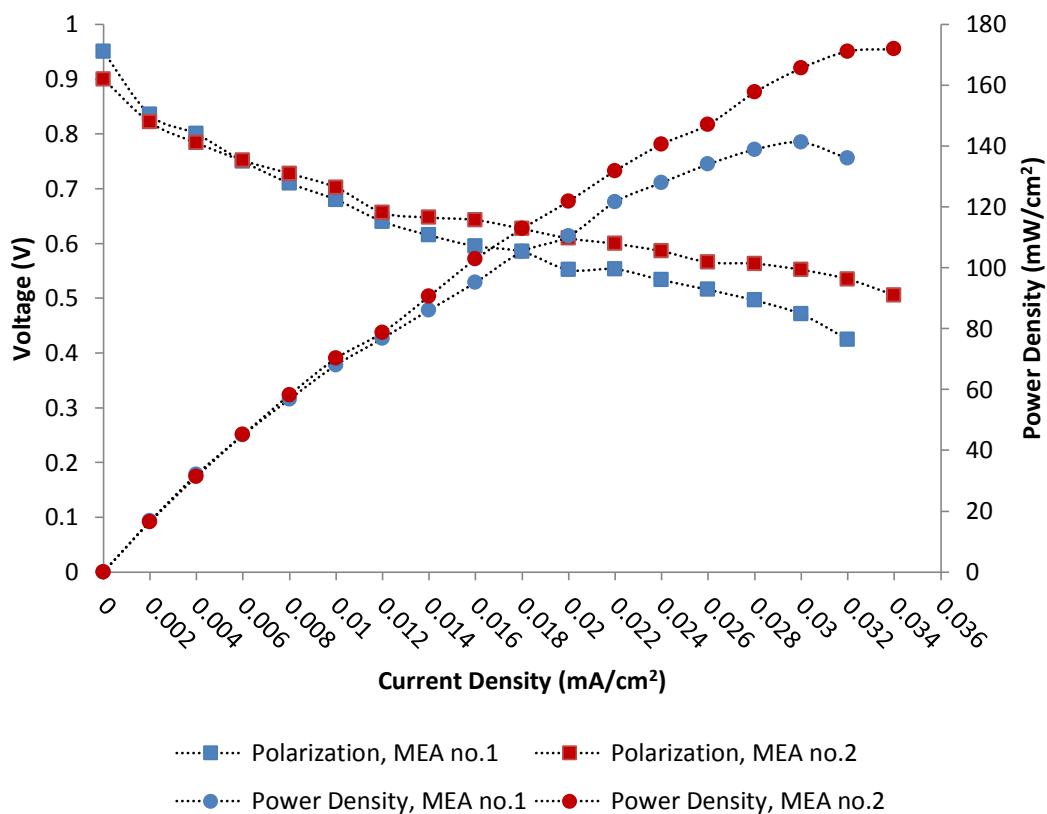
ถึงแม้ MEA ที่ใช้ในการทดสอบจะได้รับการยืนยันจากผู้ผลิตว่าสามารถใช้งานได้ทันที แต่โดยปกติแล้ว MEA ควรถูก run-in จนอยู่ในสภาพพร้อมใช้งานก่อนเสมอ ดังที่ผู้วิจัยตรวจพบความไม่เสถียรของการสร้างไฟฟ้าขาออกบ้างพอสมควร โดยมีลักษณะที่ศักย์ไฟฟ้าขาออก ซึ่งก่อนหน้านี้มีความคงที่ ค่อย ๆ สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และลดลงมาที่ค่าคงที่ดั้งเดิมอย่างฉับพลันดังแสดงในภาพที่ 111



ภาพที่ 111 ศักย์ไฟฟ้าขาออกของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ  $5 \text{ cm}^2$  สัดส่วนรูปร่าง 1.25 ขณะสร้างกระแสไฟฟ้า 14 และ 16 A

การเตรียมแผ่น MEA ก่อนการใช้งานจริง ประกอบด้วยขั้นตอนของการ “run-in” หรือการให้ MEA รับภาระทางไฟฟ้าค่าหนึ่ง ๆ ก่อนการใช้งานจริง เพื่อกระตุ้นให้ MEA อยู่ในสภาวะทำงานที่เสถียร อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยยังไม่สามารถระบุถึงเวลาที่ต้องใช้และพิกัดไฟฟ้าขาออกสำหรับการ run-in ที่เหมาะสมกับ MEA ของ FuelCellsEtc นี้ได้เนื่องจากความเสถียรที่ไม่แน่นอนของ MEA สำหรับ MEA บางแผ่น สามารถทำงานได้เสถียรตั้งแต่ใช้งานครั้งแรก ขณะที่บางแผ่น ภายหลังจาก run-in

ด้วยภาระคงตัวที่ค่าหนึ่ง ๆ แล้ว จนได้สามารถทำงานได้คงที่แล้ว เมื่อเปลี่ยนขนาดภาระ การทำงานก็กลับมาไม่เสถียรอีกครั้ง นอกจากนี้ กำลังไฟฟ้าที่ MEA แต่ละแผ่นทำได้มีความแตกต่างกันมากดังภาพที่ 112 แสดงให้เห็นถึงมาตรฐานของแผ่น MEA ที่ไม่คงที่ ทำให้ต้องเพิ่มความรอบคอบในการทดสอบมากขึ้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ



ภาพที่ 112 ความสามารถในการสร้างไฟฟ้าของแผ่น MEA ตัวอย่าง 2 แผ่น ที่ไม่คงที่

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ แผ่น MEA แผ่นที่ดีที่สุดถูกนำมาใช้ในการทดสอบชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว เมื่อการทดสอบเสร็จสิ้น แผ่น MEA จะถูกซับด้วยกระดาษทิชชูที่ไม่มีขุยและนำมาวางผึ่งบนพื้นผิวแบบ hydrophobic เช่น อะคริลิก เป็นต้น ให้แห้ง ภายในห้องทดสอบซึ่งมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60 - 70% ก่อนนำมาประกอบเข้ากับชุดทดสอบเพื่อดำเนินการทดสอบถัดไป



## ภาคผนวก ค

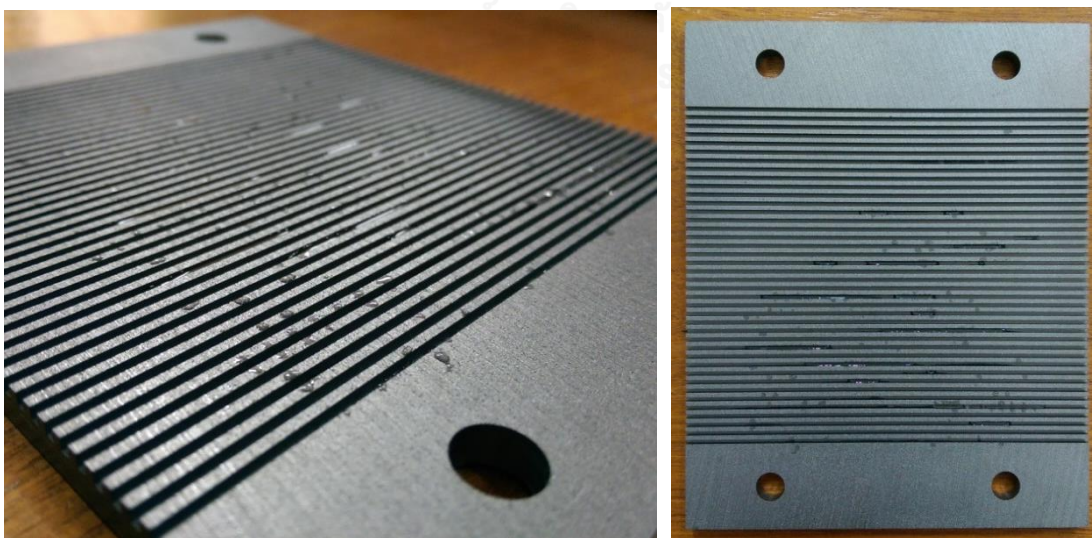
### สภาวะเซลล์แห้งและน้ำท่วมเซลล์

จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ไม่คงที่ในแต่ละครั้งที่ทำการทดสอบ ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิง แสดงพฤติกรรมที่ต้องการการจัดการน้ำที่แตกต่างกันไป ได้แก่ น้ำท่วมเซลล์และเซลล์แห้ง สภาวะการทำงานที่ไม่ปกติของเซลล์เชื้อเพลิงเหล่านี้ ถูกตรวจจับได้ผ่านศักย์ไฟฟ้า เส้นโค้ง polarization และ hysteresis loop และรวบรวมมาอภิปรายเพื่อประโยชน์ในพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงขนาดใหญ่ในอนาคต

#### ค.1 น้ำท่วมเซลล์

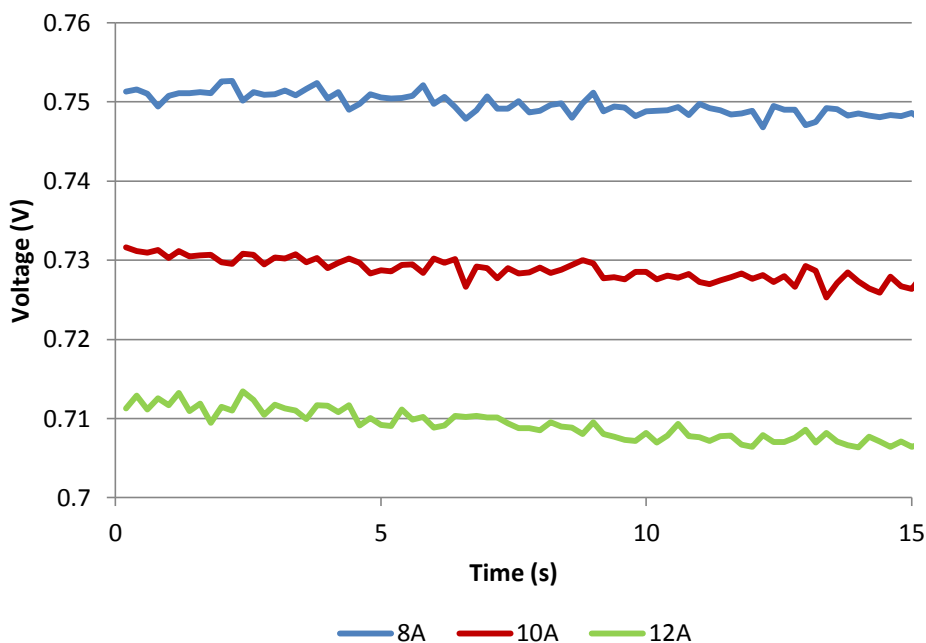
ปรากฏการณ์น้ำท่วม เป็นปรากฏการณ์หนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ช่องทางการไหลฝั่งแอโนดและแคโทด มีโอกาสเกิดน้ำท่วมทั้งสิ้น แต่สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบที่ความดันไฮโดรเจนมากกว่าอากาศมาก ๆ และไฮโดรเจนที่มีความชื้นต่ำ ความเป็นไปได้ที่จะเกิดน้ำท่วมฝั่งแอโนดจึงน้อยกว่าฝั่งแคโทดมาก

ปรากฏการณ์น้ำท่วมเซลล์ฝั่งแคโทด เกิดขึ้นเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงรับภาระทั้งแบบคงตัวและไม่คงตัว และถูกตรวจพบได้ โดยการติดตามศักย์ไฟฟ้าขาออกจากเซลล์เชื้อเพลิงและสังเกตแผ่นสองขั้วด้วยสายตา ดังภาพที่ 113



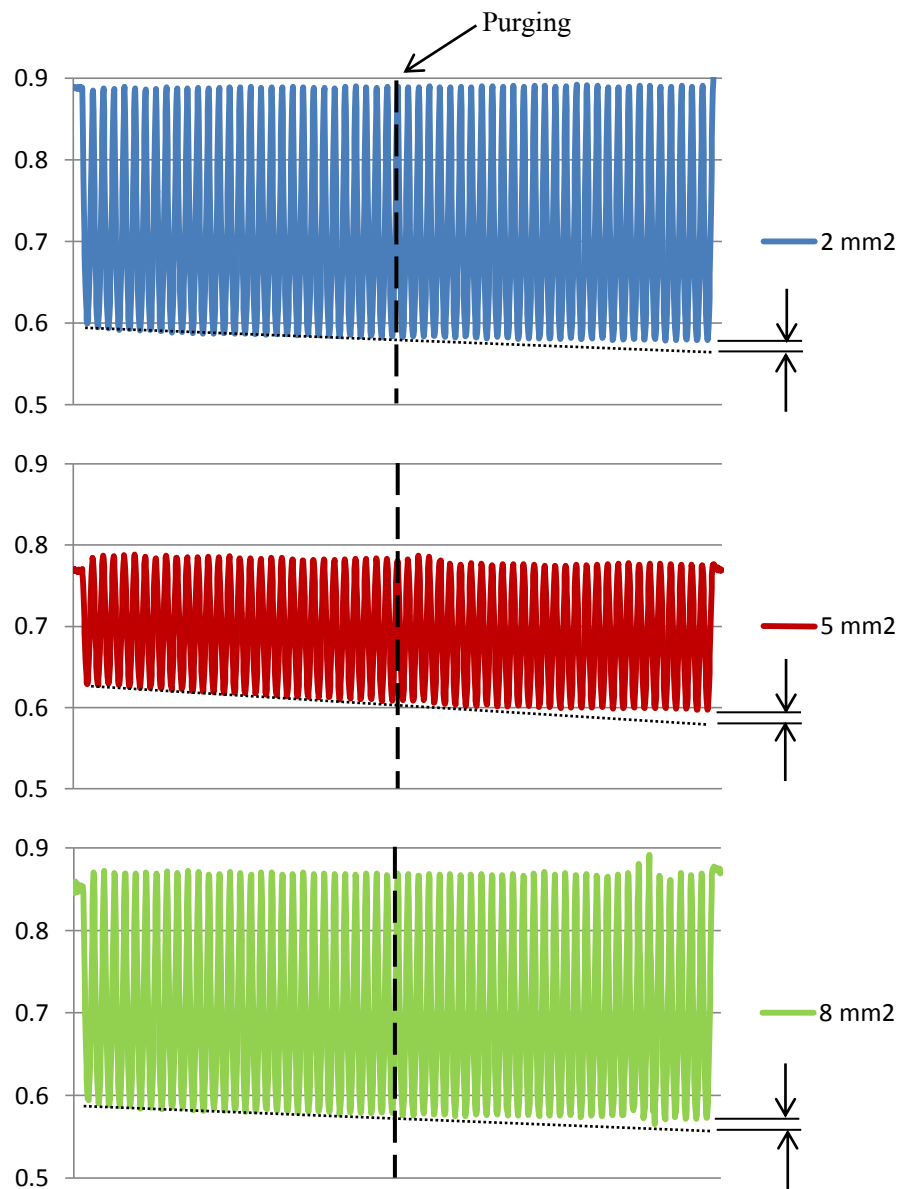
ภาพที่ 113 น้ำท่วมช่องทางการไหลอากาศ

การสังเกตปรากฏการณ์น้ำท่วมฝั่งแคโรต ผ่านการติดตามศักย์ไฟฟ้าขาออกของเซลล์เชื้อเพลิง ทำได้โดยการสังเกตการณ์ลดลงอย่างต่อเนื่องของศักย์ไฟฟ้าขาออกเมื่อสร้างกระแสไฟฟ้าคงตัวและไม่คงตัว ในภาพที่ 114 เมื่อชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว รับภาระต่ำแบบคงตัว การสะสมของน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นไปตามแบบจำลองของ Paquin ในภาพที่ 9

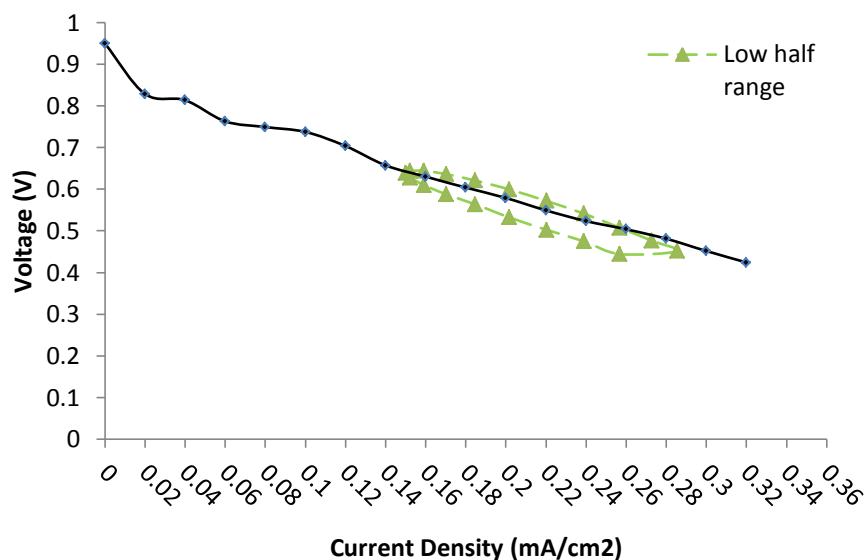


ภาพที่ 114 ศักย์ไฟฟ้าขาออกของชุดทดสอบแบบเซลล์เดี่ยว ที่มีพื้นที่หน้าตัดช่องทางการไหล  $5 \text{ mm}^2$  สัดส่วนรูปร่าง 0.80 ขณะสร้างกระแสไฟฟ้าขาออกคงตัว ขนาด 8, 10 และ 12 A

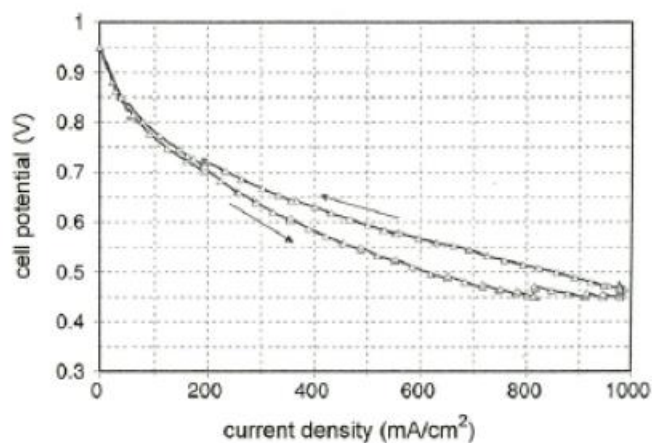
เมื่อชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวรับภาระแบบไม่คงตัวที่ครึ่งพิกัดต่ำ ศักย์ไฟฟ้าต่ำสุด ในแต่ละ loop ลดต่ำลงเรื่อย ๆ แต่ผู้วิจัยได้ทำการไล่น้ำที่ loop ที่ 30 ของทุกชุดการทดลอง ทำให้อัตราการลดของ ศักย์ไฟฟ้าช้าลงดังในภาพที่ 115 นอกจากนี้ hysteresis loop สำหรับชุดทดสอบที่มีสัดส่วนรูปร่าง 0.80 ที่รับภาระครึ่งพิกัดสูง ก็แสดงปรากฏการณ์น้ำท่วมดังตัวอย่างในภาพที่ 116 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Barbir [36] ในภาพที่ 117



ภาพที่ 115 ศักย์ไฟฟ้าขาออกของชุดทดสอบแบบเซลล์เดี่ยว  
ที่มีสัดส่วนรูปร่าง 0.80 ขณะรับภาระไม่คงตัวแบบครึ่งพิกัดต่ำ ที่ n-slew rate  $\pm 0.3$   
และทำการไล่น้ำใน loop ที่ 30

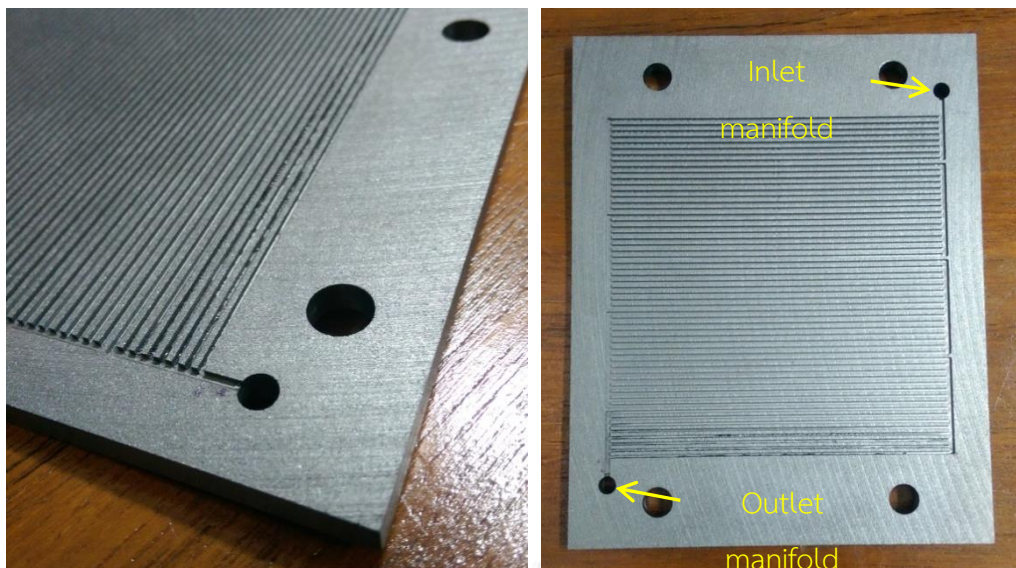


ภาพที่ 116 Hysteresis loop ของชุดทดสอบเซลล์เดี่ยว  
ขนาดพื้นที่ช่องทางไหล 8 mm<sup>2</sup> สัดส่วนรูปร่าง 0.8 ที่รับภาระครึ่งพิกัดสูง ที่ n-slew rate  $\pm 0.3$



ภาพที่ 117 Hysteresis loop ที่แสดงถึงปรากฏการณ์น้ำท่วมในเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบปรกติ [36]

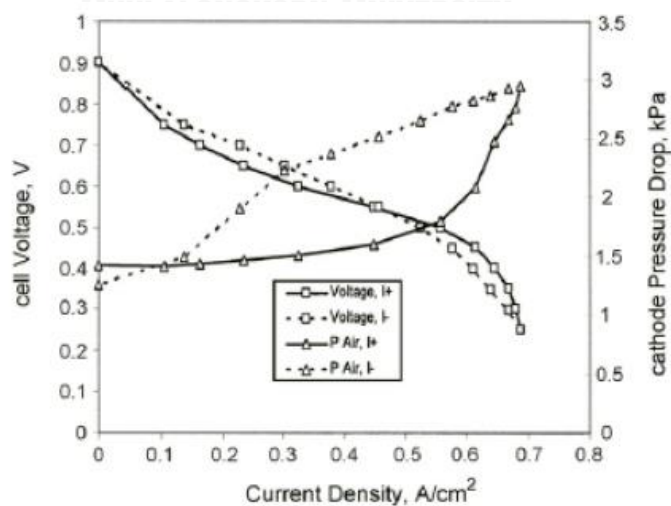
ถึงแม้โอกาสเกิดน้ำท่วมฝั่งแอโนดจะน้อยมาก แต่เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงรับภาระแบบไม่คงตัว จะพบน้ำท่วมช่องทางไหลไฮโดรเจนที่บริเวณใกล้ท่อร่วมขาออกเสมอ โดยปริมาณของน้ำที่พบน้อยกว่าทางฝั่งแคโทดมาก ดังภาพที่ 118



ภาพที่ 118 น้ำท่วมช่องทางการไหลไฮโดรเจน

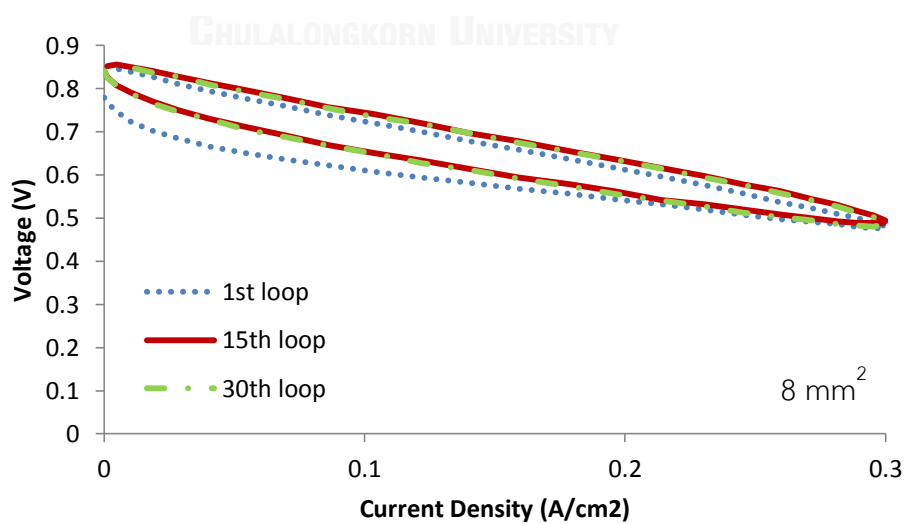
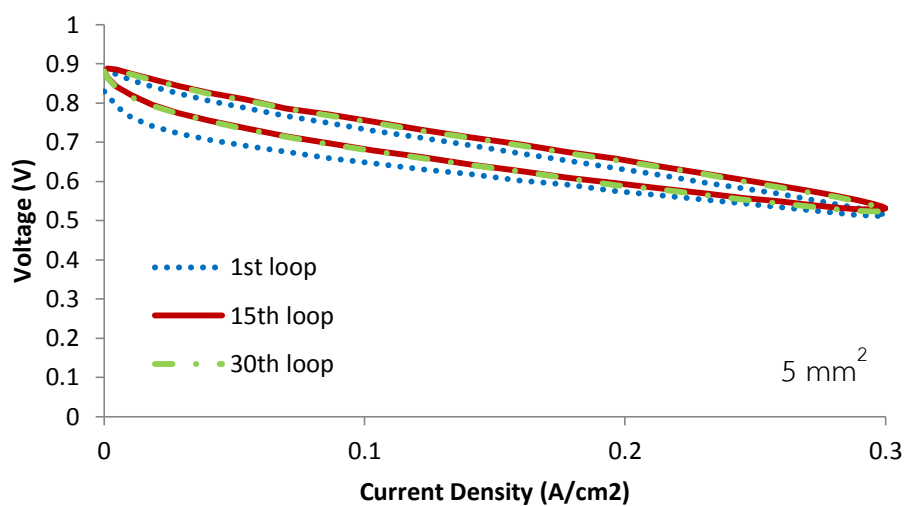
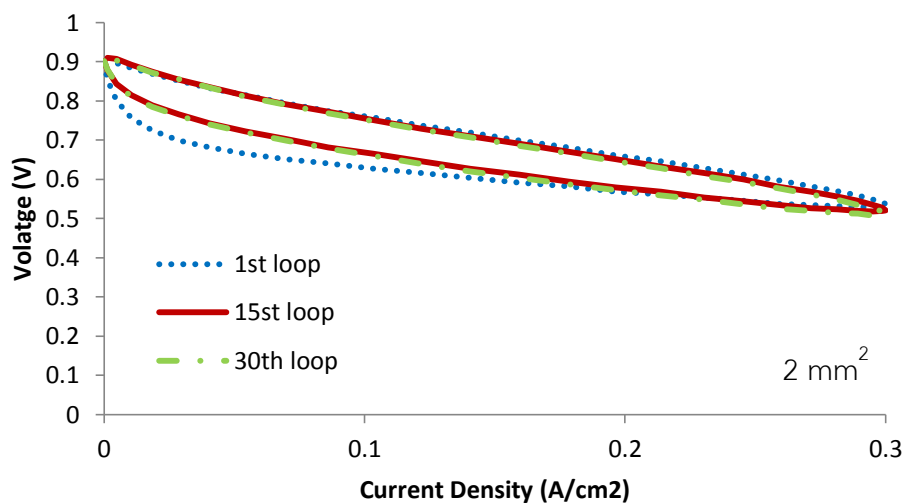
## ค.2 เซลล์แห้ง

Hysteresis loop ที่แสดงถึงสภาวะเซลล์แห้งถูกนำเสนอโดย He [76] เป็นไปดังภาพที่ 119 แต่ในการศึกษานี้ ไม่สามารถรายงานผลจากเซลล์แห้งด้วย hysteresis loop ในรูปแบบเดียวกันได้ เนื่องจากภาวะไม่คงตัวแบบเต็มพิกัด ดังกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 30 A ซึ่งไม่ใช่ค่าสูงสุดที่ชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวสร้างได้ อย่างไรก็ตาม hysteresis loop แรกของการทดสอบชุดทดสอบด้วยภาวะแบบไม่คงตัวแสดงลักษณะที่มีแนวโน้มเดียวกับภาพที่ 119 ซึ่งผู้วิจัยได้นำมารวบรวมไว้ในภาพที่ 120



ภาพที่ 119 Hysteresis loop ที่แสดงถึงปรากฏการณ์เซลล์แห้งในเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบปรกติ

[76]



ภาพที่ 120 การเปรียบเทียบ hysteresis loop ของ loop ที่ 1, 15 และ 30 จากการทดสอบชุดทดสอบที่มีสัดส่วนรูปร่าง 1.25 ด้วยภาวะไม่คงตัว แบบเต็มพิกัด

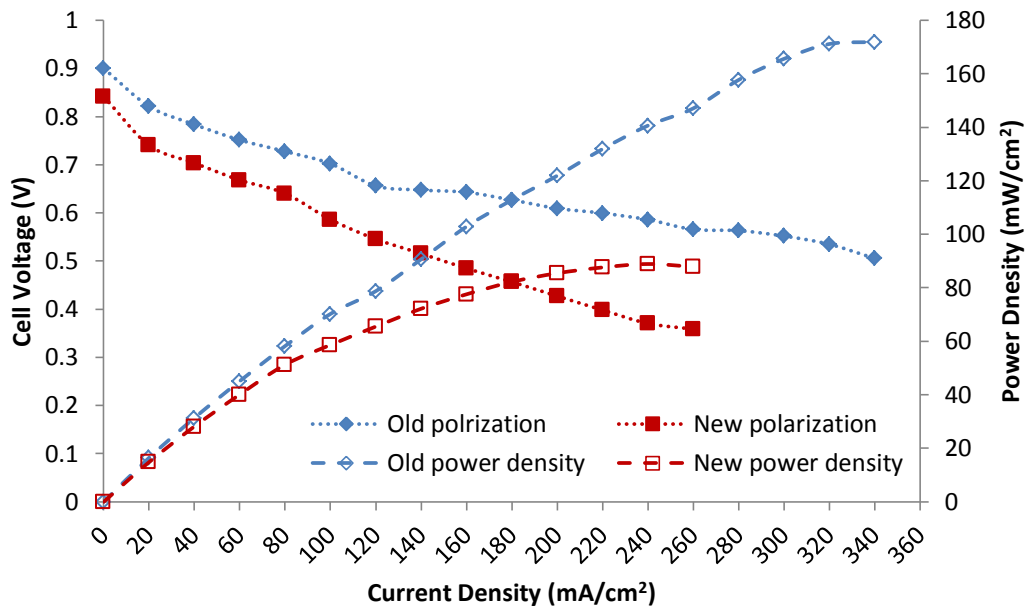
## ภาคผนวก ง

### การเสื่อมสภาพของแผ่น MEA

ถึงแม้แผ่น MEA จะถูกถอด-ประกอบอย่างระมัดระวังและเก็บรักษาเป็นอย่างดี แต่การเสื่อมสภาพของแผ่น MEA ก็เกิดขึ้นอย่างไม่คาดคิดในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ การเสื่อมสภาพสังเกตได้จากสีของเมมเบรนของแผ่น MEA ที่เปลี่ยนจากไม่มีสี (ภาพที่ 31) กลายเป็นสีเหลืองชุ่นดังภาพที่ 121 และสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงขณะทำการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบจากลักษณะรูพรุนบนแผ่นรูพรุนต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ลดลงเหลือเพียง  $100 \text{ mA/cm}^2$  ที่  $0.6 \text{ V}$  เมื่อเปรียบเทียบกับขณะทำการศึกษาผลกระทบจากขนาดเชิงกายภาพของช่องทางกรไหลอากาศต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ที่  $200 \text{ mA/cm}^2$  ขณะที่สภาวะการทำงานเหมือนกัน ดังแสดงในภาพที่ 122



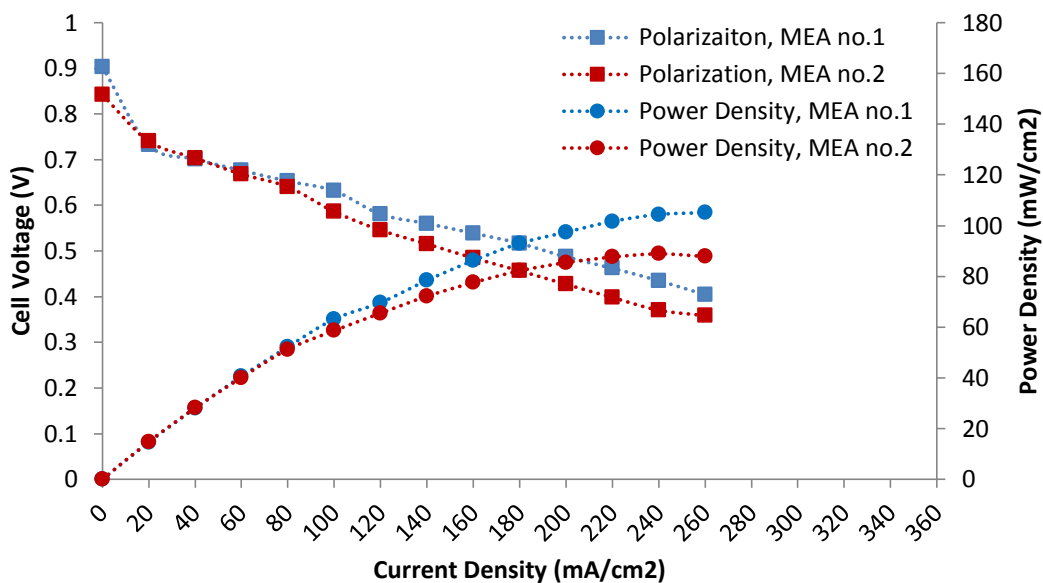
ภาพที่ 121 แผ่น MEA ก่อนทำการทดสอบ  
ผลกระทบของลักษณะรูพรุนบนแผ่นรูพรุนต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง



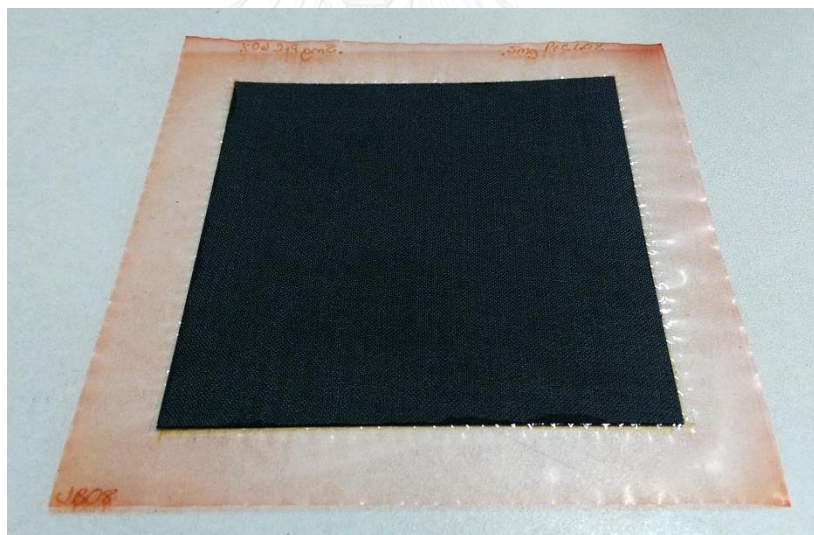
ภาพที่ 122 การเปรียบเทียบสมรรถนะของชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง  
ที่มีขนาดช่องทางการไหลอากาศ 5 mm<sup>2</sup> สัดส่วนรูปร่าง 1.25  
และแผ่นรูพรุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm พิตซ์ 2 mm  
ที่แตกต่างกันระหว่างการทดสอบครั้งแรกและครั้งต่อมา

โดยปรกติแล้ว แผ่น MEA มีอายุการใช้งานขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งาน [77-80] จากการ  
การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเปรียบเทียบกับลักษณะการใช้งานของแผ่น MEA ในวิทยานิพนธ์นี้  
พบว่า การให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานด้วยภาระแบบไม่คงตัวและ/หรือเปิด-ปิดบ่อย [78] และการใช้งาน  
ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ [80] เป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพของแผ่น MEA ที่มีความเป็นไปได้  
และไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ด้วยจุดประสงค์ของการศึกษา ถึงกระนั้นแล้ว ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์  
สันนิษฐานว่า การเสื่อมสภาพของ MEA อาจเกิดจากอายุของแผ่น MEA ที่สูงอยู่แล้ว จากการจัดการ  
แผ่น MEA ในคลังสินค้าของบริษัทผู้ค้าเอง เนื่องจากรนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับสมรรถนะของ  
ชุดทดสอบที่บรรจุแผ่น MEA อีกชุดที่ซื้อมารวมกัน พบว่าทั้งคู่มีสมรรถนะการทำงานที่ลดลงและ  
แผ่น MEA no.1 กลับให้สมรรถนะที่ดีกว่าเล็กน้อยดังแสดงในภาพที่ 123 ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการ  
ทดสอบก่อนหน้านี้ อันเป็นเหตุผลให้แผ่น MEA อีกชุดนี้ถูกคัดออกไปในเบื้องต้น เนื่องจากแผ่น MEA  
ชุดนี้เคยทำให้สมรรถนะของชุดทดสอบต่ำดังในภาพที่ 112 นอกจากนี้ สีของแผ่น MEA ที่ซื้อมา  
พร้อมกันแต่ไม่ได้ใช้งานก็เปลี่ยนไปเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 124





ภาพที่ 123 การเปรียบเทียบสมรรถนะชุดทดสอบตั้งภาพที่ 112 ซ้ำอีกครั้ง เพื่อแสดงการเสื่อมสภาพของแผ่น MEA



ภาพที่ 124 แผ่น MEA ที่ยังไม่ได้ใช้งาน

การเสื่อมสภาพของแผ่น MEA เป็นอุปสรรคสำคัญที่ขัดขวางต่อการทำงานวิจัยและความเป็นไปได้ของการใช้พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงในอนาคต เนื่องจาก MEA เป็นส่วนประกอบที่มีราคาสูงที่สุดของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้น การเสื่อมสภาพของแผ่น MEA จึงเป็นปัญหาที่สำคัญที่สุดปัญหาหนึ่งของเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงในลำดับต่อไป การเลือกใช้แผ่น MEA ต้องถูกพิจารณาอย่างรอบคอบมากขึ้น เพื่อให้ได้แผ่น MEA ที่ทำงานด้วยสมรรถนะที่เท่าเทียม

กัน มีความเป็นไปได้ต่ำที่จะมีการจัดเก็บในคลังสินค้าเป็นเวลานาน และมีแผนการทดสอบที่กระทบ  
ต่ออายุการใช้งานให้น้อยที่สุด



## ภาคผนวก จ

### ความพยายามในการศึกษาความเป็นไปได้ ของเซลล์เชื้อเพลิง Open-Cathode PEM ในยานยนต์

ถึงแม้เซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode PEM ในปัจจุบันยังมีขอบเขตการใช้งานที่จำกัด แต่การทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นว่า การออกแบบอย่างรอบคอบช่วยให้เซลล์เชื้อเพลิงที่ผลิตสามารถใช้งานให้บรรลุจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ได้ ซึ่งได้สร้างความเป็นไปได้อื่น ๆ อีกมากของการใช้เซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM ในอนาคต

ในบทนี้จึงได้รวบรวมการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงในงานลักษณะต่าง ๆ โดยเฉพาะเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM เพื่อบ่งชี้ทิศทางการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode ไปสู่ทางด้านยานยนต์ จากนั้น แบบจำลองอย่างง่าย เพื่อแสดงการไหลของอากาศเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM ขนาดใช้งานจริงในยานยนต์ จะถูกสร้างขึ้นและนำมาสรุปถึงความเป็นไปได้ในเชิงการใช้งานจริงในยานยนต์

#### ง.1 การใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงในด้านยานยนต์

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิด แตกต่างกันไปตามวัสดุที่นำมาผลิตเป็นอิเล็กโทรไลต์ ด้วยวัสดุที่แตกต่างกันนี้ ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด มีเอกลักษณ์ในการทำงานที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ เราจึงพบว่า เซลล์เชื้อเพลิงมีการใช้งานครอบคลุมหลายลักษณะงาน ดังจะสรุปพอสังเขปดังภาพที่ 125

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) คาร์บอนเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate) และออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide) มีขนาดใช้งานและอุณหภูมิทำงานที่สูง ซึ่งต้องการพื้นที่เพียงพอจัดการกับระบบเสริมการทำงาน เช่น ระบบทำความร้อน เป็นต้น และใช้เวลาใน start-up นาน ไม่เหมาะกับงานที่ต้องเปิด/ปิดระบบบ่อย จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดนี้เป็นที่นิยมสำหรับการผลิตไฟฟ้า

**Comparison of Fuel Cell Technologies**

Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temperature	Typical Stack Size	Electrical Efficiency (LHV)	Applications	Advantages	Challenges
<b>Polymer Electrolyte Membrane (PEM)</b>	Perfluoro sulfonic acid	<120°C	<1 kW - 100 kW	60% direct H <sub>2</sub> , 40% reformed fuel <sup>ii</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Backup power</li> <li>Portable power</li> <li>Distributed generation</li> <li>Transportation</li> <li>Specialty vehicles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Solid electrolyte reduces corrosion &amp; electrolyte management problems</li> <li>Low temperature</li> <li>Quick start-up and load following</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Expensive catalysts</li> <li>Sensitive to fuel impurities</li> </ul>
<b>Alkaline (AFC)</b>	Aqueous potassium hydroxide soaked in a porous matrix, or alkaline polymer membrane	<100°C	1 - 100 kW	60% <sup>iii</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Military</li> <li>Space</li> <li>Backup power</li> <li>Transportation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wider range of stable materials allows lower cost components</li> <li>Low temperature</li> <li>Quick start-up</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensitive to CO<sub>2</sub> in fuel and air</li> <li>Electrolyte management (aqueous)</li> <li>Electrolyte conductivity (polymer)</li> </ul>
<b>Phosphoric Acid (PAFC)</b>	Phosphoric acid soaked in a porous matrix or imbibed in a polymer membrane	150 - 200°C	5 - 400 kW, 100 kW module (liquid PAFC); <10 kW (polymer membrane)	40% <sup>iv</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Distributed generation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suitable for CHP</li> <li>Increased tolerance to fuel impurities</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Expensive catalysts</li> <li>Long start-up time</li> <li>Sulfur sensitivity</li> </ul>
<b>Molten Carbonate (MCFC)</b>	Molten lithium, sodium, and/or potassium carbonates, soaked in a porous matrix	600 - 700°C	300 kW - 3 MW, 300 kW module	50% <sup>v</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Electric utility</li> <li>Distributed generation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High efficiency</li> <li>Fuel flexibility</li> <li>Suitable for CHP</li> <li>Hybrid/gas turbine cycle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High temperature corrosion and breakdown of cell components</li> <li>Long start-up time</li> <li>Low power density</li> </ul>
<b>Solid Oxide (SOFC)</b>	Yttria stabilized zirconia	500 - 1000°C	1 kW - 2 MW	60% <sup>vi</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Auxiliary power</li> <li>Electric utility</li> <li>Distributed generation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High efficiency</li> <li>Fuel flexibility</li> <li>Solid electrolyte</li> <li>Suitable for CHP</li> <li>Hybrid/gas turbine cycle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High temperature corrosion and breakdown of cell components</li> <li>Long start-up time</li> <li>Limited number of shutdowns</li> </ul>

**For More Information**

More information on the Fuel Cell Technologies Office is available at <http://www.hydrogenandfuelcells.energy.gov>.

<sup>i</sup> NREL Composite Data Product 8, "Fuel Cell System Efficiency," [http://www.nrel.gov/hydrogen/docs/cdp/cdp\\_8.jpg](http://www.nrel.gov/hydrogen/docs/cdp/cdp_8.jpg)  
<sup>ii</sup> Panasonic Headquarters News Release, "Launch of New 'Ene-Farm' Home Fuel Cell Product More Affordable and Easier to Install," <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dtr/2013/01/en130117-5.html>  
<sup>iii</sup> G. Mulder et al., "Market-ready stationary 6 kW generator with alkaline fuel cells," ECS Transactions 12 (2008) 743-758  
<sup>iv</sup> ClearEdge Power PureCell® Model 400 System Specifications, <http://www.clearedgepower.com/purecell-model-400-system>  
<sup>v</sup> FuelCell Energy DFC300 Product Specifications, <http://www.fuelcellenergy.com/assets/DFC300-product-specifications1.pdf>  
<sup>vi</sup> Ceramic Fuel Cells Genmex Product Specifications, [http://www.cfdi.com.au/Assets/Files/Genmex\\_Brochure\\_%28EN%29\\_Apr-2010.pdf](http://www.cfdi.com.au/Assets/Files/Genmex_Brochure_%28EN%29_Apr-2010.pdf)

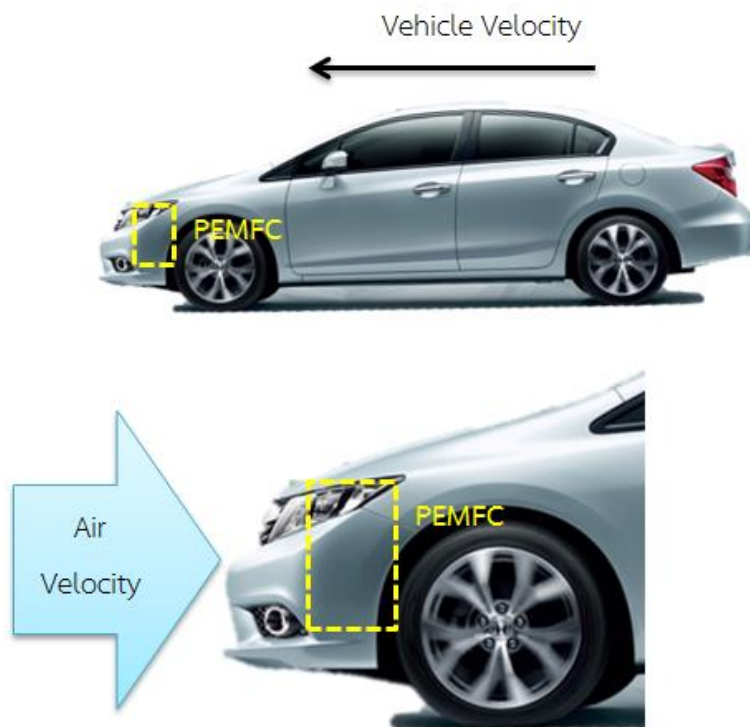
ภาพที่ 125 การเปรียบเทียบเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด [80]

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM และอัลคาไลน์ (Alkaline) มีความเหมาะสมมากกว่าสำหรับงานที่ต้องการกำลังลดหลั่นลงมา และด้วยอุณหภูมิทำงานที่ต่ำ ทำให้สามารถจัดการให้ขนาดระบบรวมเล็กลงและพกพาได้สะดวก จึงพบการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองได้ในงานหลากหลายรูปแบบ อย่างไรก็ตามก็ดี ด้วยความรวดเร็วในการตอบสนองต่อภาระภายนอกที่มากกว่า ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM มีความเป็นไปได้ในงานยานยนต์มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ อย่างไรก็ตามก็ดี รถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงคันแรกถูกพัฒนาจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นที่ไม่ใช่อัลคาไลน์และ PEM อีกทั้งรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงในยุคเริ่มแรกขโดยส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ภายหลัง เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในวงการยานยนต์

ในปี ค.ศ. 1966 บริษัท General Motors ได้สร้างรถตู้ไฟฟ้า (Electrovan) จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Union Carbide ขนาด 32 kW ที่สามารถวิ่งได้ด้วยความเร็วสูงสุด 115 km/hr เป็นระยะทาง 240 km ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 Kordesch ประยุกต์รถยนต์ Austin A40 ของตนเองให้บริโภคพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์แทนเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อใช้งานส่วนตัว ในที่สุดเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ขนาด 15 kW 3 ชุด ถูกนำมาใช้ในรถยนต์เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1993 โดย Energy Partners Consulier การศึกษาเพื่อพัฒนารถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงยังคงดำเนินอย่างต่อเนื่องเรื่อยมานับจากนั้น ทั้งทางด้านการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงอื่นแทนไฮโดรเจนและการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้ในรถชนิดต่าง ๆ จนกระทั่งรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงส่วนบุคคลได้เปิดตัวในตลาดยานยนต์ในปี ค.ศ. 2005 โดย Daimler F-Cell B-Class และปี ค.ศ. 2006 โดย Honda FCX ซึ่งใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เป็นต้นกำลังทั้งสิ้น

## ง.2 ความเป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Open-Cathode ในยานยนต์

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แบบปรกติและแบบ open-cathode มีความแตกต่างที่สำคัญ คือ การจ่ายอากาศสู่ช่องทางการไหลอากาศ ซึ่งได้ทำการทดสอบไปในข้างต้นแล้วว่า การป้อนอากาศเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ความแตกต่างนี้เป็นตัวแปรสำคัญที่จำกัดสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode อย่างไรก็ตามก็ดี เมื่อคำนึงถึงเงื่อนไขการทำงานของยานยนต์ ที่อากาศมีความเร็วสัมพันธ์กับตัวรถดังภาพที่ 126 และกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์แปรผันไปตามความเร็วและความเร่งที่ผู้ขับขี่กำหนด จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เงื่อนไขนี้เป็นให้ประโยชน์ต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode



ภาพที่ 126 ความเร็วสัมพัทธ์ของอากาศเมื่อเทียบกับตัวรถ

ความคิดในการใช้ความเร็วสัมพัทธ์ของเซลล์เชื้อเพลิงต่ออากาศโดยรอบ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode ไม่ใช่สิ่งแปลกใหม่ [22] หากแต่ปริมาณงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังน้อย ทำให้ความรู้ที่ได้จากการศึกษายังจำกัด ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะทำการจำลองการไหลของอากาศผ่านช่องทางการไหลอากาศอย่างง่าย สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แบบ open-cathode ที่มีขนาดเหมาะสมสำหรับการใช้งานยานยนต์ส่วนบุคคลขนาดเล็ก เพื่อศึกษาความเพียงพอของอากาศเพื่อการสร้างกำลังไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนรถยนต์ที่สภาพการขับขี่ในการจราจรจริง และชี้ถึงความเป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบ open-cathode สำหรับงานยานยนต์ในเบื้องต้น

### ง.3 แบบจำลองเพื่อประเมินความเป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Open-Cathode ในยานยนต์

รถยนต์ TOYOTA Corolla Altis JS Petrol ขนาด 1,800 cc ถูกนำมาพิจารณาเพื่อเป็นต้นแบบของยานพาหนะจำลอง การประเมินกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์ที่ความเร็วและความเร่งต่าง ๆ ใช้สมการ VSP [81, 82] คือ

$$VSP = v \times (1.1 \times a + g \times \sin \varphi + \text{rolling resistance}) + \text{drag coefficient} \times v^2 \quad (53)$$

เมื่อแทนค่าคงที่สำหรับยานยนต์ภาระเบา (light-duty vehicle) ลงไป [65 - 66] จะได้สมการดังนี้

$$VSP = v \times (1.1 \times a + 0.132) + 0.000302 \times v^3 \quad (54)$$

และเพื่อตรวจสอบความเพียงพอของอากาศเพื่อการขับเคลื่อนรถยนต์ที่ความเร็วคงที่ต่าง ๆ พจน์ที่เป็นผลจากความเร่งจึงถูกละทิ้ง ทำให้สมการสุดท้ายที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง คือ

$$VSP = 0.132 \times v + 0.000302 \times v^3 \quad (55)$$

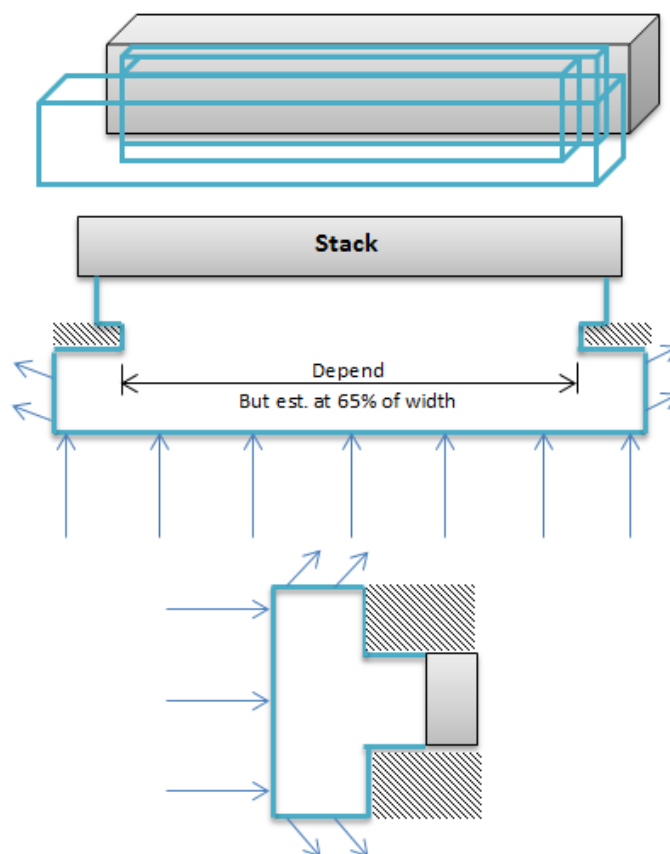
Driving cycle ถูกนำมาพิจารณาเพื่อทดแทนสภาพการขับขี่จริง โดย driving cycle ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Artemis Driving Cycles, Legislative Driving Cycles, EMPA Driving Cycles (ยกเว้น NEDC+Highway และ NEDC+BAB), Handbook Driving Cycles ฯลฯ และพบว่าความเร็วในการขับขี่จำกัดอยู่ที่ไม่เกิน 140 km/hr จึงสรุปเป็นขนาดสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงในแบบจำลองด้วยสมการ (55) ได้ที่ 48 kW

ขนาดสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM แบบ open-cathode ถูกกำหนดโดยหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดช่องทางการไหลอากาศและไฮโดรเจน และขนาด MEA ที่เลือกใช้ (พื้นที่เกิดปฏิกิริยา 200 - 600 mm<sup>2</sup>) เนื่องจากปัจจุบัน ช่องทางการไหลไฮโดรเจนได้ถูกพัฒนาให้อยู่รูปกระดาษคาร์บอน (carbon paper) เพื่อขนาดของระบบรวมที่เล็กลงได้ ในที่นี้ จึงละการพิจารณาความหนาของแผ่น flowfield ของไฮโดรเจน เมื่อนำเอาปัจจัยเหล่านี้ ศึกษาร่วมกับขนาดทางกายภาพของรถยนต์ต้นแบบและปริมาตรอากาศที่จำเป็น (สมมติให้อากาศเป็นของไหลที่ไม่อัดตัว) จึงสรุปได้ว่าขนาดของเซลล์เชื้อเพลิงสุทธิอยู่ที่ 45 cm x 143.5 cm x 17 cm มีพื้นที่เกิดปฏิกิริยา 600 mm<sup>2</sup> จำนวน 444 เซลล์

โดเมนของแบบจำลองถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม GAMBIT และนำไปใช้ต่อเพื่อการประเมินทางกลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม FLUENT เมื่อคำนึงถึงความเป็นจริงที่ว่า ตำแหน่งที่เป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open-cathode คือบริเวณรังผึ้งของรถยนต์ส่วนบุคคลทั่วไป ทำให้รูปร่างของโดเมนถูกจำกัดด้วยรูปร่างของช่องเปิดด้านหน้ารถดังแสดงในภาพที่ 127 ขนาดของช่องเปิดหน้ารถแตกต่างกันไปตามการออกแบบ อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนึงถึงความจำเป็นของการขับเคลื่อนรถยนต์ด้วยพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM ช่องเปิดนี้ควรถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่ารถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน เพื่อความสะดวกในการไหลของอากาศ จากการสุ่มประเมินอัตราส่วนความกว้างของช่องเปิดด้านหน้าต่อความกว้างรถยนต์ของรถยนต์รุ่นต่าง ๆ อัตราส่วนสูงสุดที่พบมีค่าเท่ากับ 0.65 ทำให้โดเมนของแบบจำลองถูกจำกัดความกว้างของช่องเปิดให้มีรูปร่างดังแสดงในภาพที่ 128 รูปร่างของช่องถูกปรับให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมด้านขนาน เพื่อความสะดวกในการประเมินเบื้องต้น



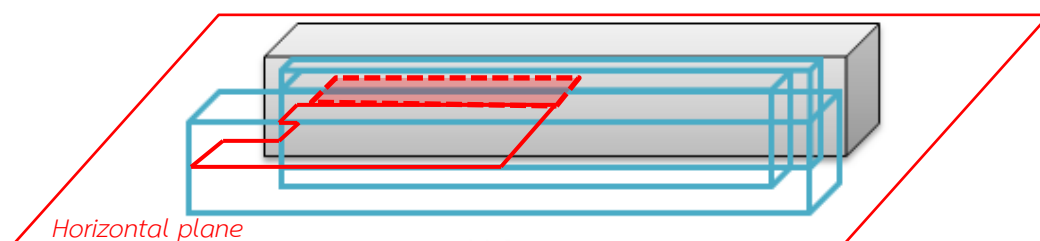
ภาพที่ 127 ช่องสำหรับอากาศที่ป้อนเข้าสู่แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM



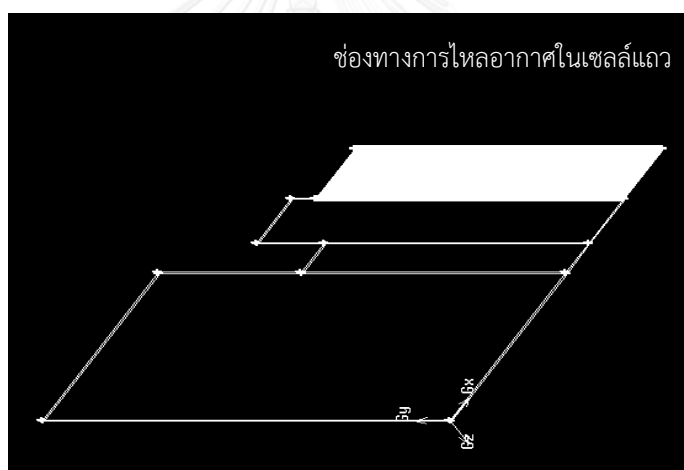
ภาพที่ 128 ภาพจำลองแสดงโดเมนของแบบจำลองเพื่อประเมินความเป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM ในงานยานยนต์



เนื่องจากความซับซ้อนของโดเมน อาจสร้างปัญหาในการประเมิน และความสามารถที่จำกัดของคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่ การประเมินจะกระทำบนโดเมน 3 มิติ ของด้านหนึ่งช่องทางไหลแถวหนึ่ง ณ กึ่งกลางของเซลล์แถว ทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง เพื่อเป็นตัวแทนของช่องทางไหลทั้งหมดของเซลล์แถวตั้งตัวอย่างของโดเมนในแนวนอนที่แสดงในภาพที่ 129 และภาพที่ 130



ภาพที่ 129 แนวคิดการสร้างโดเมนของแบบจำลองในแนวนอน



ภาพที่ 130 โดเมนของแบบจำลองแนวนอนโดยโปรแกรม GAMBIT

#### ง.4 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไขในอนาคต

เมื่อขึ้นรูปของโดเมน 3 มิติ บนโปรแกรม Gambit เรียบร้อยและทำการสร้างกริด โปรแกรมแจ้งเตือนความผิดพลาดอันเนื่องมาจากหน่วยความจำไม่เพียงพอ ความผิดพลาดเกิดขึ้นในการสร้างกริดทั้งแนวนอนและแนวตั้ง การประเมินความเป็นไปได้ของเซลล์เชื้อเพลิง open-cathode PEM จึงต้องหยุดลงแต่เพียงเท่านี้ ด้วยเหตุผลด้านความจำกัดของทรัพยากรที่มี

การสร้างกริดในแบบจำลองนี้ นอกจากต้องการคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงแล้ว ยังต้องอาศัยทักษะในการใช้โปรแกรมที่เกี่ยวข้องและความรู้ความเข้าใจด้านระเบียบวิธีทาง Finite Volume เนื่องจากกริดที่ใช้ควรมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เพื่อความแม่นยำสูง ใช้เวลาน้อย และประหยัดหน่วยความจำบนคอมพิวเตอร์ และ scheme เพื่อการประเมินควรถูกเลือกใช้อย่างเหมาะสมที่สุด



## ภาคผนวก ฉ

### ค่าใช้จ่าย

ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในวิทยานิพนธ์นี้ เมื่อคัดแยกพิจารณาเฉพาะรายการที่เกี่ยวข้องกับ ส่วนประกอบของชุดทดสอบ จะเหลือค่าใช้จ่ายในการผลิตชุดทดสอบเซลล์เดี่ยวดังตารางที่ 10 ตารางที่ 9 แสดงค่าใช้จ่ายเฉพาะเพื่อการผลิตชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงเท่านั้น และการแจกแจงราคา ต่อจำนวนชิ้นงานที่เป็นไปได้ในหนึ่งรายการจะแสดงไว้ตารางที่ 11

ตารางที่ 9 ค่าใช้จ่ายเพื่อการผลิตชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

ส่วนประกอบ	รายการค่าใช้จ่าย	จำนวนชิ้นงานที่ผลิต	ราคาสุทธิ (บาท)
แผ่นรวมกระแส	ค่าบริการชุบทองคำ	2	2,400.00
	ค่าแรงตัดชิ้นงาน	12	4,365.60
	แผ่นทองแดงหนา 2 mm	1	3,424.00
แผ่น flow field	แผ่นแกรไฟต์กั้ร่องตามแบบ	12	103,464.90
แผ่นกันซึม	แผ่นซิลิโคน	6	43,503.00
แผ่นประกบปริม	ชิ้นงานอะลูมิเนียม	12	19,902.00
แผ่นรูพรุน	ค่าบริการชุบทองคำ	2	2,000.00
	แผ่นทองแดงหนา 0.4 mm	1	689.08
	แผ่นทองแดงหนา 0.4 mm	1	640.80
	ค่าบริการชุบทองคำ	3	2,400.00
	ค่าแรงสั่งทำชิ้นงาน	6	3,402.60
	ค่าแรงสั่งทำชิ้นงาน	6	4,173.00
MEA	MEA	11	148,000.00
พัดลม	MC25100V1-0000-A99	3	5,564.00
	MC17080V1-0000-A99		
	MC25100V2-0000-A99		

## ตารางที่ 10 ค่าใช้จ่ายในโครงการ เรียงตามลำดับการซื้อ

ว	ด	ป	รายการ	ราคา (บาท)
13	1	2557	บอลวาล์วเม็ยคู่ 1/4 1อัน / PC6-02 2อัน / สายลม 6มิล-ฟ้า 2อัน / สายลม 6 มิล-ส้ม 2 อัน	170.00
18	1	2557	มือจับ scorpion 5 นิ้ว 2 ตัว	150.00
25	1	2557	สายไฟเดี่ยว 1.5 10 เมตร	120.00
27	1	2557	คีมปากแหลม 8 นิ้ว META 1อัน / คีมปาก 8 นิ้ว SOLO 1 อัน	270.00
10	3	2557	แผ่นทองแดง ชุบทอง 2 แผ่น	2,000.00
20	3	2557	สาย THN 1216 6เมตร / ทางปลา 6ตัว	468.66
20	3	2557	สกรู 8.5 50ตัว / สกรู 8.75 50 ตัว/ สกรู 8.15 100 ตัว/ หัวน็อต M8 200ตัว / แหวนเหล็ก M8 100ตัว / แหวนเหล็ก M6 100ตัว	549.98
2	4	2557	hydrogen air mea 100 cm2	148,000.00
22	4	2557	บรรทัดเหล็ก Inca 60ซม. (2.4 นิ้ว) จำนวน 1 / OLFA มีดคัทเตอร์ #PC-L จำนวน 1 / พู่กันลม I-Paint # 12 จำนวน 1	465.00
22	4	2557	พลาสติกใส 4.76มิล. 2"x3" จำนวน 1 แผ่น / พลาสติกใส 20 มิล 1"x1" จำนวน 1 แผ่น / พลาสติก 2 มิล 1"x1" สี จำนวน 1 แผ่น	1,144.90
22	4	2557	เทสโก้ ปากกาไวท์บอร์ด ดำ P1 จำนวน 1 / เทสโก้ ปากกาไวท์บอร์ด แดง P1 จำนวน 1 / เทสโก้ ปากกาไวท์บอร์ด น้ำเงิน P1 จำนวน 1 / เทสโก้ ถุงมือยาง M จำนวน 2 / TC ไม้บรรทัด พลาสติกใส 12 นิ้วหนา จำนวน 1	166.00
24	4	2557	hydrogen gases (H2) compressed gases, ultra high grade, 99.999% gas contents: 1.5 m3/cylinder จำนวน 2 ถัง	2,140.00
5	5	2557	แผ่นทองแดง ขนาด 2 มม.x16"x48" จำนวน 1 แผ่น	3,424.00
6	5	2557	พลาสติกใส 1 มิล 1'x1' จำนวน 1 / พลาสติกใส 2 มิล 1'x1' จำนวน 2 / พลาสติกใส 3 มิล 1'x1' จำนวน 2 / พลาสติกใส 4.76 มิล 1'x2' จำนวน 1	356.31
6	5	2557	graphite plate (plus payment fee / swift/ telex charge / pay in full)	103,464.90
8	5	2557	thin gauge silicon rubber 0.02" thick 12"x12" 3 แผ่น	26,700.00

ว	ด	ป	รายการ	ราคา (บาท)
8	5	2557	R1-02-0064 ค่าตัดวอเตอร์เจททองแดง 3 มม. จำนวน 12 ชิ้น	4,365.60
10	5	2557	แผ่นอคริลิก (สี) 1"x1"x3มม. จำนวน 2 แผ่น / ที่เจาะตาไก่ จำนวน 1 อัน / ไบคัดเตอร์ OLFA# PB-800 จำนวน 1 ห่อ	500.00
20	5	2557	สวิตช์ 12 V 5 ตัว / สวิตช์ไฟรถ 5 ตัว	100.00
21	5	2557	end plate 12 แผ่น	19,902.00
22	5	2557	ต่อตรงเสียบสายเกลียวนอก 6MMXM5 5 ตัว / ต่อตรงเสียบสาย เกลียวนอก 6MMX1/4" 10 ตัว	361.13
27	5	2557	หัวแล้ว 20W 220V HAKKO จำนวน 1 อัน / ที่ดูดตะกั่ว HAKODSD1D จำนวน 1 อัน / เสารองปริน 15 มม. เหลี่ยม จำนวน 3 ชุด / โฟโต้บอร์ด project board gl จำนวน 1 อัน / โฟโต้บอร์ด solderless จำนวน 1 อัน / นี้อต 3x10 จำนวน 1 ถุง / ปืนกาว จำนวน 1 อัน / กาวแท่งเล็ก จำนวน 5 อัน / กาว ร้อน จำนวน 1 หลอด	999.00
3	6	2557	หางปลา 100 ตัว / เทอมินอล	107.00
4	6	2557	ค่าอากรขาเข้าและค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม	18,020.00
4	6	2557	ค่าธรรมเนียมการผ่านพิธีการฯ	200.00
5	6	2557	ตะกั่ว 2 ม้วน	90.00
6	6	2557	CB 10 นิ้ว 100 เส้น / JP H ป20 100 ตัว / 3x15 100 ตัว	125.00
10	6	2557	ค่าบริการในการเดินพิธีการกรมศุลกากร (duty handling fee) / ค่าเช่าคลังสินค้า (reinbuse storage) / ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม (vat)	492.63
19	6	2557	โซลินอยด์ 1 ชุด	695.50
19	6	2557	MC25100V1-0000-A99 Sunon Fan จำนวน 1 / MC17080V1-0000-A99 Sunon Fan จำนวน 1 / MC25100V2-0000-A99 Sunon Fan จำนวน 1	5,564.00
3	7	2557	Low Precision Silicon Gasket (10mils), non cut sheet 12"x12	43,503.00
4	7	2557	สกรู JP (+) (SUS) M 2 X 15 จำนวน 25 ตัว / สกรู JP (+) (SUS) M 2 X 20 จำนวน 10 ตัว / หัวน็อต (SUS) M 2 จำนวน 100 ตัว	363.80

ว	ด	ป	รายการ	ราคา (บาท)
10	7	2557	แผ่นทองแดง ชุบทอง 2 แผ่น	2,400.00
14	7	2557	แผ่นทองแดง ขนาด 0.4 มิล # 27	689.08
18	7	2557	ค่าน้ำมัน	1,000.00
19	7	2557	ค่าแรงเจาะรูทองแดง 0.4x120x150มม. จำนวน 6 แผ่น / ค่าแรง ตัดทองแดง 0.4x120x150 มม. จำนวน 6 แผ่น	3,402.60
23	7	2557	เคลือบ thyoda 2-1/2x200 mmaq จำนวน 1 ตัว / เคลือบ thyoda 2-1/2x1,200 mmaq จำนวน 1 ตัว	5,307.20
24	10	2557	พลาสติก จำนวน 1	192.6
19	11	2557	registration fee for SEE 2014 on 19-21 November 2014	5,000.00
8	12	2557	แผ่นทองแดง ขนาด 0.4 มิล จำนวน 1.78 กิโลกรัม	640.8
18	12	2557	ค่าแรงเจาะรูทองแดง 0.4*120*150 mm 6 แผ่น	4,173.00
23	12	2557	ทองแดงชุบทอง จำนวน 3 แผ่น	2,400.00
			<b>รวม</b>	<b>410,183.69</b>

ตารางที่ 11 ค่าใช้จ่ายต่อหนึ่งชิ้น ของรายการค่าใช้จ่าย เพื่อการผลิตชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง (ไม่รวมพัสดุ)

ส่วนประกอบ	รายการค่าใช้จ่าย	รายละเอียด	ราคาสุทธิ (บาท)	จำนวนชิ้นต่อรายการ	ราคาต่อชิ้น
แผ่นรวมกระแส	แผ่นทองแดง	99% 2-mm-thick Cu plate	3,424.00	24	142.67
	ค่าแรงตัดชิ้นงาน	Water jet cutting	4,365.60	12	363.80
	ค่าบริการชุบทองคำ		2,400.00	2	1,200.00
	รวมทั้งหมด				1,706.47
แผ่น flow field	แผ่นแกรไฟต์กัดร่องตามแบบ	FU 4369	103,464.8963	12	8,622.07
	รวมทั้งหมด				8,622.07
แผ่นกันซึม	แผ่นซิลิโคน	10-micron-thick 12"x12" PDMA seal	43,503.00	24	1,812.625
	รวมทั้งหมด				1,812.625
แผ่นประกบปริม	ชิ้นงานอะลูมิเนียม	AL 7075	19,902.00	12	1,658.50
	รวมทั้งหมด				1,658.50

ส่วนประกอบ	รายการ ค่าใช้จ่าย	รายละเอียด	ราคาสุทธิ (บาท)	จำนวน ชิ้นต่อ รายการ	ราคาต่อหนึ่งชิ้น
แผ่นรูปทรง	แผ่น ทองแดง	99% 0.4- mm-thick Cu plate	689.08	24	28.71
	แผ่น ทองแดง	99% 0.4- mm-thick Cu plate	640.80	24	26.70
	<i>เฉลี่ย</i>				27.71
	ค่าบริการชุบ ทองคำ		2,000.00	2	1,000.00
	ค่าบริการชุบ ทองคำ		2,400.00	3	800.00
	<i>เฉลี่ย</i>	900.00			
MEA	ค่าแรงทำ ชิ้นงาน		3,402.60	6	567.10
	ค่าแรงทำ ชิ้นงาน		4,173.00	6	695.50
	<i>เฉลี่ย</i>	631.30			
	<i>รวมทั้งหมด</i>	1,559.005833			
	MEA	100-cm2 Hydrogen/Air MEA	148,000.00	13	11,384.62
	<i>รวมทั้งหมด</i>				11,384.62





## รายการอ้างอิง

1. O'Hayre, R., et al., *Fuel Cell Fundamental*. 2 ed. 2008: John Wiley & Sons.
2. Wang, Y., et al., *A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research*. *Applied Energy*, 2011. **88**(4): p. 981-1007.
3. HacknMod. *Hydrogen Fuel Cell RC Car*. [cited 2014 22/12/2014]; Available from: <http://hacknmod.com/hack/hydrogen-fuel-cell-rc-car/>.
4. Ridden, P. *PowerTrek fuel cell charger allows for power on the go*. [cited 2014 22/12/2014]; Available from: <http://www.gizmag.com/powertrek-2-in-1-battery-hydrogen-portable-charger-unveiled/17870/>.
5. Squadrito, G., et al., *Polymer electrolyte fuel cell stack research and development*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008. **33**: p. 1941-1946.
6. Bussayajarn, N., et al., *Planar air breathing PEMFC with self-humidifying MEA and open cathode geometry design for portable applications*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009. **34**(18): p. 7761-7767.
7. Kumar, P.M. and A.K. Kolar, *Effect of cathode channel dimensions on the performance of an air-breathing PEM fuel cell*. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010. **49**(5): p. 844-857.
8. SantaRosa, D.T., et al., *High performance PEMFC stack with open-cathode at ambient pressure and temperature conditions*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007. **32**(17): p. 4350-4357.
9. Paquin, M. and L.G. Frechette, *Understanding cathode flooding and dry-out for water management in air breathing PEM fuel cells*. *Journal of Power Sources*, 2008. **180**(1): p. 440-451.
10. Wang, X.D., et al., *Numerical study on channel size effect for proton exchange membrane fuel cell with serpentine flow field*. *Energy Conversion and Management*, 2010. **51**(5): p. 959-968.

11. Lopez-Sabiron, A.M., et al., *Design and development of the cooling system of a 2 kW nominal power open-cathode polymer electrolyte fuel cell stack*. International Journal of Hydrogen Energy, 2012. **37**(8): p. 7289-7298.
12. Jeong, S.U., et al., *A study on cathode structure and water transport in air-breathing PEM fuel cells*. Journal of Power Sources, 2006. **159**(2): p. 1089–1094.
13. Wu, B., et al., *The performance improvement of membrane and electrode assembly in open-cathode proton exchange membrane fuel cell*. International Journal of Hydrogen Energy, 2013. **38**(25): p. 10978–10984.
14. Liu, X., et al., *Water flooding and pressure drop characteristics in flow channels of proton exchange membrane fuel cells*. Electrochimica Acta, 2007. **52**(17): p. 3607–3614.
15. Shimpalee, S. and J.W.V. Zee, *Numerical studies on rib&channel dimension of flow-field on PEMFC performance*. International Journal of Hydrogen Energy, 2007. **32**(7): p. 842 – 856.
16. Wu, J., et al., *An air-cooled proton exchange membrane fuel cell with combined oxidant and coolant flow*. Journal of Power Sources, 2009. **188**(1): p. 199–204.
17. Honda Fuel Cell Power FCX. 2004, Honda: world.honda.com/FuelCell/FCX/FCXPK.pdf. p. 1-19.
18. Strahl, S., A. Husar, and M. Serra, *Development and experimental validation of a dynamic thermal and water distribution model of an open cathode proton exchange membrane fuel cell*. Journal of Power Sources, 2011. **196**(9): p. 4251–4263.
19. Zhang, J., et al., *PEM Fuel Cell Testing and Diagnosis*. 1 ed. 2013: Elsevier Academic Press.
20. Silva, R.A., et al., *Characterization of MEA degradation for an open air cathode PEM fuel cell*. International Journal of Hydrogen Energy, 2012. **37**(8): p. 7299-7308.

21. Jeon, D.H., et al., *The effect of serpentine flow-field designs on PEM fuel cell performance*. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY, 2008. **33**(3): p. 1052 – 1066.
22. Jung, G.B., et al., *Experimental evaluation of an ambient forced-feed air-supply PEM fuel cell*. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY, 2007. **33**(12): p. 2980–2985.
23. ความชื้นสัมพัทธ์. ความรู้อุตุนิยมหาวิทยาลัย [cited 2014 24/03/2014]; Available from: <http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=56>.
24. ภูมิอากาศประเทศไทย. ความรู้อุตุนิยมหาวิทยาลัย [cited 2014 24/03/2014]; Available from: <http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=22>.
25. Chu, D. and R. Jiang, *Performance of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) stacks: Part I. Evaluation and simulation of an air-breathing PEMFC stack*. Journal of Power Sources, 1999. **83**(1-2): p. 128–133.
26. Barreras, F., et al., *Experimental study of the pressure drop in the cathode side of air-forced Open-cathode proton exchange membrane fuel cells*. International Journal of Hydrogen Energy, 2011. **36**(13): p. 7612-7620.
27. Jamekhorshid, A., G. Karimi, and I. Noshadi, *Current distribution and cathode flooding prediction in a PEM fuel cell*. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2011. **42**(4): p. 622–631.
28. Choi, K.S., H.M. Kim, and S.M. Moon, *Numerical studies on the geometrical characterization of serpentine flow-field for efficient PEMFC*. International Journal of Hydrogen Energy, 2011. **36**(2): p. 1613-1627.
29. Tabe, Y., et al., *Effect of cathode separator structure on performance characteristics of free-breathing PEMFCs*. Journal of Power Sources, 2006. **162**(1): p. 58–65.
30. Nitta, I., O. Himanen, and M. Mikkola, *Contact resistance between gas diffusion layer and catalyst layer of PEM fuel cell*. Electrochemistry Communications, 2008. **10**(1): p. 47–51.
31. Hottinen, T. and O. Himanen, *PEMFC temperature distribution caused by inhomogeneous compression of GDL*. Electrochemistry Communications, 2007. **9**(5): p. 1047–1052.

32. *H-SERIES 10W-5kW*. Horizon Stacks [cited 2014 24/03/2014]; Available from: <http://www.horizonfuelcell.com/#!h-series-stacks/c52t>.
33. Sasmito, A.P., et al., *Computational study of forced air-convection in open-cathode polymer electrolyte fuel cell stacks*. Journal of Power Sources, 2010. **195**(17): p. 5550–5563.
34. Sasmito, A.P., et al., *Fan selection and stack design for open-cathode polymer electrolyte fuel cell stacks*. Renewable Energy, 2012. **37**(1): p. 325–332.
35. เกียรติธรรมรงค์, ส., การพัฒนาของแนวทางในการกำหนดขนาดของระบบเสริมการทำงานสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงยานยนต์ รหัส MS7. 2012, Chulalongkorn University: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
36. Barbir, F., *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. 1 ed. 2005: Elsevier Academic Press.
37. *Fuel Cell Vehicle*. Environmental Technology [cited 2014 22/08/2014]; Available from: [http://www.toyota-global.com/innovation/environmental\\_technology/fuelcell\\_vehicle/](http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/).
38. เพชรเพ็ง, ว., ผลของภาระที่ไม่คงตัวต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM, in วิศวกรรมเครื่องกล. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
39. Weydahl, H., et al., *Response of a proton exchange membrane fuel cell to a sinusoidal current load*. Journal of Applied Electrochemistry, 2010. **40**: p. 809 – 819.
40. Talj, R., Azib, T., et al., *Parameter analysis of PEM fuel cell hysteresis effects for transient load use*. The European Physical Journal Applied Physics, 2011. **54**(2): p. 23410.
41. Jung, G.B., et al., *Experimental evaluation of an ambient forced-feed air-supply PEM fuel cell*. International Journal of Hydrogen Energy, 2008. **33**(12): p. 2980–2985.
42. Larminie, J. and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*. 2 ed. 2003: John Wiley & Sons.

43. Shimpalee, S., S. Greenway, and J.W. Van Zee, *The impact of channel path length on PEMFC flow-field design*. Journal of Power Sources, 2006. **160**(1): p. 398-406.
44. Roshandel, R., F. Arbabi, and G.K. Moghaddam, *Simulation of an innovative flow-field design based on a bio inspired pattern for PEM fuel cells*. Renewable Energy, 2012. **41**: p. 86-95.
45. Chen, C.H. and S.P.J.S.C. Yen, *Flow distribution in the manifold of PEM fuel cell stack*. Journal of Power Sources, 2007. **173**(1): p. 249-263.
46. Mustata, R., et al., *Study of the distribution of air flow in a proton exchange membrane fuel cell stack*. Journal of Power Sources, 2009. **192**(1): p. 185-189.
47. Rabbani, A. and M. Rokni, *Dynamic characteristics of an automotive fuel cell system for transitory load changes*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2013. **1**: p. 34-43.
48. Husar, A., S. Strahl, and J. Riera, *Experimental characterization methodology for the identification of voltage losses of PEMFC: Applied to an open cathode stack*. International Journal of Hydrogen Energy, 2012. **37**(8): p. 7309-7315.
49. Wang, J., *Pressure drop and flow distribution in parallel-channel configurations of fuel cells: U-type arrangement*. International Journal of Hydrogen Energy, 2008. **33**(21): p. 6339-6350.
50. Wang, J., *Pressure drop and flow distribution in parallel-channel configurations of fuel cells: Z-type arrangement*. International Journal of Hydrogen Energy, 2010. **35**(11): p. 5498-5509.
51. Schemeister, T., *Determining the quality and quantity of heat produced by proton exchange membrane fuel cells with application to air-cooled stacks for combined heat and power*, in *Mechanical Engineering*. 2010, University of Victoria: Department of Mechanical Engineering, University of Victoria.
52. Yuan, X.Z., et al., *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells - From Materials to Processing*. Journal of New Materials for Electrochemical Systems, 2005. **8**: p. 257-267.
53. Yoon, W., et al., *Evaluation of coated metallic bipolar plates for polymer electrolyte*

*membrane fuel cells*. Journal of Power Sources, 2008. **179**(1): p. 265-273.

54. Richards, J. and K. Schmidt, *Review – Metallic Bipolar Plates and Their Usage in Energy Conversion Systems, Alloy Steel - Properties and Use*, in *Alloy Steel - Properties and Use*, E.V. Morales, Editor. 2011, InTech.
55. Huang, C.H., et al., *PVD Coated Bipolar Plates for PEM Fuel Cells*. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2005. **2**(4): p. 290-294.
56. Husby, H., *Carbon Based Coatings for Metallic Bipolar Plates in PEM Fuel Cells*, in *Department of Materials Science and Engineering*. 2013, Norwegian University of Science and Technology.
57. Xing, X.Q., et al., *Optimization of assembly clamping pressure on performance of proton-exchange membrane fuel cells*. Journal of Power Sources, 2010. **195**(1): p. 62-68.
58. Taymaz, I. and M. Benli, *Numerical study of assembly pressure effect on the performance of proton exchange membrane fuel cell*. Energy, 2010. **35**(5): p. 2134-2140.
59. Chang, W.R., et al., *Effect of clamping pressure on the performance of a PEM fuel cell*. Journal of Power Sources, 2007. **166**(1): p. 149-154.
60. Zhou, P., C.W. Wu, and G.J. Ma, *Influence of clamping force on the performance of PEMFCs*. Journal of Power Sources, 2007. **163**(2): p. 874-881.
61. Karvonen, S., et al., *Modeling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stack End Plates*. Journal of Power Sources, 2003. **114**(1): p. 54-62.
62. SUNONWEALTH Electric Machine Industry Co., L., *DC Brushless Fan & Blower*. 2014, SUNONWEALTH Electric Machine Industry Co., Ltd.
63. Yang, T. and P. Shi, *A preliminary study of a six-cell stack with dead-end anode and open-slits cathode*. International Journal of Hydrogen Energy, 2008. **33**(11): p. 2795-2801.
64. Kim, S.H., et al., *Air-breathing miniature planar stack using the flexible printed circuit board as a current collector*. International Journal of Hydrogen Energy, 2009. **34**(1): p. 459-466.

65. Schmitz, A., et al., *Influence of cathode opening size and wetting properties of diffusion layers on the performance of air-breathing PEMFCs*. Journal of Power Sources, 2006. **154**(2): p. 437-447.
66. Ying, W., et al., *Effects of cathode channel configurations on the performance of an air-breathing PEMFC*. International Journal of Hydrogen Energy, 2005. **30**(12): p. 1351-1361.
67. Hottinen, T., O. Himanen, and P. Lund, *Effect of cathode structure on planar free-breathing PEMFC*. Journal of Power Sources, 2004. **138**(1-2): p. 205-210.
68. CLARK PERFORATING COMPANY, I. *Perforated Metals with Round Holes Tooling to 36"*. [cited 2014 2014, July 24]; Available from: <http://www.clarkperforating.com/perforated-metals-with-round-holes-tooling-to-36.html>.
69. LIMITED, T.P.C. *Perforated Sheet Specification* [cited 2014 2014, July 24]; Available from: [http://thaiperforate.com/product\\_perforate.html](http://thaiperforate.com/product_perforate.html)
70. Juriga, J., *Hyundai Motor Group's Development of the Fuel Cell Electric Vehicle*. 2012, Hydrogen and Fuel Cell Program of U.S. Department of Energy.
71. *Kikusui PLZ1004W*. Electronic Load [cited 2015 21/01/2015]; Available from: <http://www.testwall.com/products/product.7123.0.0.Kikusui-PLZ1004W-.html>.
72. ETT Co., L., *MODULE ET-MINI KEY 4x4 ET-MINI KEY 4x4 - ETT*. ETT Co.,Ltd.
73. INSTRUMENTS, N. *NI USB-9221*. 2014, April 9]; Available from: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/201882>.
74. VALCON. *NI High Speed Data Acquisition Unit*. SERVICES 2015/01/10]; Available from: <http://www.valcon-int.com/vidinis.php?id=2&id2=10>.
75. CarWale. *Toyota Corolla Altis [2011-2014] 1.8 J Specifications*. [cited 2014 2014, September 8]; Available from: <http://www.carwale.com/toyota-cars/corolla-altis-2011-2014/18j-specifications-2440.html>.
76. He, W., L. G., and T.V. Nguyen, *Diagnostic tool to detect electrode flooding in Proton-Exchange-Membrane fuel cells*. AIChE Journal 2003. **49**: p. 3221-3228.



77. Chung, C.G., et al., *Degradation mechanism of electrocatalyst during long-term operation of PEMFC*. International Journal of Hydrogen Energy, 2009. **34**(21): p. 8974–8981.
78. Lamibrac, A., et al., *Local degradations resulting from repeated start-ups and shutdowns in Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*. Energy Procedia, 2012. **29**: p. 318–324.
79. Taniguchi, A., et al., *Analysis of degradation in PEMFC caused by cell reversal during air starvation*. International Journal of Hydrogen Energy, 2008. **33**(9): p. 2323–2329.
80. Franck-Lacaze, L., et al., *Ageing of PEMFC's due to operation at low current density: Investigation of oxidative degradation*. International Journal of Hydrogen Energy, 2010. **35**(19): p. 10472–10481.
81. Zhai, H., H.C. Frey, and N.M. Roupail, *Development of a modal emissions model for a hybrid electric vehicle*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011. **16**(6): p. 444-450.
82. Baptista, P., J. Tavares, and G. Gonçalves, *Energy and environmental impacts of potential application of fully or partially electric propulsion vehicles: application to Lisbon and São Miguel, Portugal*. Transportation Research Procedia, 2014. **3**: p. 750-759.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสรวงรัตน์ เกียรติธรรมรงค์ เกิดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2534 ที่โรงพยาบาล จุฬาลงกรณ์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับสอง จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2556 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 โดยได้รับทุนการศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนสนับสนุนงานวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (EN276B) และทุนสนับสนุนงานวิจัยจากศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (RES560530272-EN) และ Special Task Force for Activating Research (STAR) และมีผลงานทางวิชาการที่ได้เผยแพร่ ดังนี้

1. Kiattamrong, S. and Sripakagorn, A. Development of Auxiliary System Sizing Methodology for Automotive Fuel Cell. The 2013 Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies (2013AEDCEE), Bangkok, Thailand, May 30-31, 2013.

2. Kiattamrong, S. and Sripakagorn, A. Effects of the Geometry of the Air Flowfield on the Performance of an Open-Cathode PEMFC. The 5th International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2014), Bangkok, Thailand, November 19-21, 2014.

3. Kiattamrong, S. and Sripakagorn, A. Effects of the Geometry of the Air Flowfield on the Performance of an Open-Cathode PEMFC – Transient Load

Operation. The 2015 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies (2015AEDCEE), Bangkok, Thailand, May 28-29, 2015.