

ผลของภาวะที่ไม่คงตัวต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

นายวุฒินันท์ เพชรเพ็ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

EFFECT OF DYNAMIC LOADS ON THE EFFICIENCY OF PEM FUEL CELL SYSTEM

Mr. Wutthinan Petchpeng

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของภาระที่ไม่คงตัวต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์ เชื้อเพลิงชนิด PEM
โดย	นายวุฒินันท์ เพชรเพ็ง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังคิรี ศรีภคากกร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรฤวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังคิรี ศรีภคากกร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)

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

วุฒินันท์ เพชรเพ็ง : ผลของภาระที่ไม่คงตัวต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (EFFECT OF DYNAMIC LOADS ON THE EFFICIENCY OF PEM FUEL CELL SYSTEM) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. อังศิรั ศิริภคากร, 126 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว เพื่อระบุถึงต้นเหตุหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงทั้งในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว พร้อมระบุแนวทางการออกแบบระบบเสริมได้แก่ คอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศ การศึกษานี้นำเสนออัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในรูปตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า normalized power slew rate ที่สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกสภาพไม่คงตัวของภาระและใช้อ้างอิงได้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดอื่นด้วย การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวอ้างอิงภาระตามวัฏจักรขับที่จำนวน 4 วัฏจักรได้แก่ modified FTP75, NYCC, ECE15 และ HWFET นอกจากนี้ยังได้ทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้ภาระแบบไซนัสที่มีความถี่แตกต่างกัน ผลการทดสอบสมรรถนะของเซลล์แถวด้วยภาระแบบไซนัสสามารถระบุได้ถึงช่วงของ normalized power slew rate ที่ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์แถวแตกต่างจากสภาวะคงตัวอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของเซลล์แถวภายใต้วัฏจักรขับที่พบว่าแตกต่างจากสภาวะคงตัวน้อยมาก (ประมาณ 1%) เนื่องจากวัฏจักรขับที่มี normalized power slew rate อยู่ในช่วงที่ไม่สูงพอที่จะให้เกิดความแตกต่างจากสภาวะคงตัวอย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของทั้งระบบเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าแตกต่างจากสภาวะคงตัวมากขึ้น (ประมาณ 3%) โดยเฉพาะช่วงภาระสูง สาเหตุเกิดจากการทำงานของคอมเพรสเซอร์ที่ทำหน้าที่ไล่น้ำที่ตกค้างในช่องทางการไหลเมื่อระบบตรวจวัดพบว่าเซลล์แถวเกิดสภาวะน้ำท่วมในช่วงการไล่น้ำประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะลดต่ำลงจากสภาวะคงตัวอย่างชัดเจน สำหรับแนวทางการออกแบบระบบเสริมได้พิจารณาในแง่มุมของขนาดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศ โดยประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าจากสองส่วนคือ กำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก และการสูญเสียในมอเตอร์จากการทดสอบในสภาวะไร้ภาระ ผลการเปรียบเทียบการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้ากับผลการทดลองพบว่าแนวทางดังกล่าวนี้มีความแม่นยำเพียงพอที่จะใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบเสริมได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5270839321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : FUEL CELL / EFFICIENCY / TRANSIENT

WUTTHINAN PETCHPENG : EFFECT OF DYNAMIC LOADS ON THE EFFICIENCY OF PEM FUEL CELL SYSTEM. ADVISOR : ASST. PROF. ANGKEE SRIPAKAGORN, Ph.D., 126 pp.

This thesis investigated the difference in the performance of proton exchange membrane fuel cell system under steady state and transient operations. The main causes that affect the performance of the fuel cell system are identified in both steady state and transient operations. Guidelines for the sizing of auxiliary systems including air compressor and air blower are devised. The normalized power slew rate is used as a parameter indicative of the degree of transient fuel cell operation compared to the transient nature of automotive driving cycles. The fuel cell system is put under 4 standardized driving cycles, including 1) modified FTP75 2) NYCC 3) ECE15 and 4) HWFET. To reveal the underlining dynamics of the operation, the fuel cell is also put under sinusoidal loads with different frequencies. The normalized power slew rate was found to be able to distinguish the steady-state-like behavior from transient behavior. The polarization curve indicated that the stack performance under driving cycles is very similar to the steady-state behavior. The influence of the transient operation to the average stack efficiency over the four driving cycles is minimal (about 1%). The system-level efficiency, however, show a more pronounced difference (about 3%) in the transient operation from the steady-state operation especially at larger load. Periods of water flushing are observed in the compressor power and the air flow rate. Snapshots of the stack voltage reveal that the intermittent peak in compressor power related to the flooding phenomena in the fuel cell stack is responsible for the discrepancy in the transient operation from the steady-state operation. Guidelines for component sizing were considered in terms of power consumption of the air compressor and the air blower. The power consumption was determined from two parts; the shaft power from isentropic model and the loss in the motor from no load test condition. It was experimentally validated that this approach is suitably accurate as a guideline for the system design.

Department : Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study : Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2012

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังคิรี ศรีภคกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือในทุกเรื่องอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ ประธานกรรมการ ที่กรุณารับเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำและเสนอแนะแนวทางในการทดสอบงานวิจัย อีกทั้งกรุณาให้ผู้วิจัยได้ยื่นอุปกรณ์การวัดในวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ กรรมการ ที่กรุณารับเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เทอดไทย วัฒนธรรม กรรมการ ที่กรุณารับเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณภวิน อาจารย์ภาควิชาไฟฟ้า ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิธีการใช้อุปกรณ์การวัดทางไฟฟ้า

ขอกราบขอบพระคุณครูวิไลพร วิบูลย์เลิศ ครูสอนปฏิบัติการทางวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการสอบเทียบเครื่องมือวัดความดัน และครูนิติต ไสยลักษณ์ ครูสอนปฏิบัติการทางวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการใช้เครื่องมือช่าง

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (EN276B)

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์การทดสอบหลักได้แก่ ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM และชุดรับภาระทางไฟฟ้า

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	13
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	13
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานโดยสรุป	13
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	15
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน	15
2.2 สมดุลพลังงานในระบบเซลล์เชื้อเพลิง.....	18
2.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในรูปพารามิเตอร์ไร้มิติ	22
บทที่ 3 การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิง.....	25
3.1 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย	25
3.1.1 ระบบจ่ายไฮโดรเจน	26
3.1.2 ระบบจ่ายอากาศ	27
3.1.3 ระบบจัดการความร้อน.....	27
3.1.4 ระบบควบคุม.....	27

	หน้า
3.2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง.....	27
3.3 การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัว	29
3.4 การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัว	30
3.4.1 การกำหนดภาวะตามวัฏจักรขับที่.....	31
3.4.2 การกำหนดภาวะแบบไซน์.....	37
บทที่ 4 ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิง	41
4.1 ผลการทดสอบในสภาวะคงตัว	42
4.1.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แกวและระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัว	42
4.1.2 การทำงานของคอมเพรสเซอร์ในสภาวะคงตัว	43
4.1.3 การทำงานของชุดพัดลมระบายอากาศในสภาวะคงตัว.....	44
4.2 ผลการทดสอบในสภาวะไม่คงตัว	45
4.2.1 ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวตามภาวะแบบไซน์.....	46
4.2.2 ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวตามวัฏจักรขับที่.....	51
บทที่ 5 แนวทางการออกแบบระบบเสริม.....	63
5.1 แนวทางการออกแบบคอมเพรสเซอร์	64
5.2 แนวทางการออกแบบชุดพัดลมระบายอากาศ	72
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	79
6.1 บทสรุป.....	79
6.2 ข้อเสนอแนะ	84
รายการอ้างอิง	85
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก การวัดและอุปกรณ์การวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้า.....	91
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบเบื้องต้น.....	100
ภาคผนวก ค การเปรียบเทียบอัตราการใช้ไฮโดรเจน	104

ภาคผนวก ง ช่วงเวลาการได้นำของคอมเพรสเซอร์เพิ่มเติมในวัฏจักร s-moFTP75, s-NYCC และ s-ECE15	106
ภาคผนวก จ การวัดและอุปกรณ์การวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์และ ชุดพัฒนาระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก	111
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงและตัวอย่างการคำนวณ	117
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	126

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3-1 ลักษณะเฉพาะของระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA [35]	26
ตารางที่ 3-2 ค่าตัวแปรเบื้องต้นของรถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก [2].....	34
ตารางที่ ก-1 ข้อมูลการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA ที่แสดงผลทางหน้าต่างโปรแกรม NexaMon OEM 2.0 [17]	93
ตารางที่ ก-2 ลักษณะเฉพาะของเซ็นเซอร์ตรวจจับกระแสรุ่น ACS 714	95
ตารางที่ ก-3 ลักษณะเฉพาะของไฮโดรเจนโซลีนอยด์วาล์ว	98
ตารางที่ ก-4 ลักษณะเฉพาะของวาล์วไล่แก๊ส	98
ตารางที่ ก-5 ลักษณะเฉพาะของรีเลย์	98
ตารางที่ จ-1 ลักษณะเฉพาะของเซ็นเซอร์วัดผลต่างความดันรุ่น ASDX030.....	113
ตารางที่ ฉ-1 ข้อมูลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้สภาวะคงตัว	118
ตารางที่ ฉ-2 ข้อมูลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้วัฏจักร s-modified FTP75	119
ตารางที่ ฉ-3 ข้อมูลการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์	122
ตารางที่ ฉ-4 ข้อมูลการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศ	123

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1-1 ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงและเครื่องยนต์ดีเซลในวัฏจักรขับเคลื่อน NEDC [1]..	1
ภาพที่ 1-2 แผนภาพ Sankey ของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 2 กิโลวัตต์ [3]	2
ภาพที่ 1-3 ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงต่อเวลาภายใต้ภาระแบบผสม [11].....	4
ภาพที่ 1-4 ก) ตัวอย่างความต้องการกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในบ้านพักอาศัย ข) กราฟประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในบ้านพักอาศัยในงานวิจัยของ Aki [12]	5
ภาพที่ 1-5 ความเร็วและลักษณะภาระตามวัฏจักรขับเคลื่อน ก) HWFET ข) UDDS [13]	6
ภาพที่ 1-6 กราฟประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงตามวัฏจักรขับเคลื่อน HWFET และ UDDS ในการศึกษาของ Ryu [13]	6
ภาพที่ 1-7 กราฟประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัวและอัตราการบริโภคไฮโดรเจนของระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 กิโลวัตต์ [14]	7
ภาพที่ 1-8 การเปรียบเทียบอัตราการบริโภคไฮโดรเจนระหว่างการจำลองและการทดลองในแต่ละวัฏจักรขับเคลื่อน [14].....	8
ภาพที่ 1-9 กราฟประสิทธิภาพของเซลล์แก๊วและระบบเซลล์เชื้อเพลิงตามภาระที่อ้างอิงจากวัฏจักรขับเคลื่อนแบบสุ่ม [4].....	8
ภาพที่ 1-10 ผลการศึกษาของ Zhao ก) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในกรณีความดันย้อนกลับ (Pr) ที่เหมาะสมและมีค่าเป็น 2, 1.5 และ 1.1 บรรยากาศ ข) การเปรียบเทียบอัตราการประหยัดเชื้อเพลิงในแต่ละวัฏจักรขับเคลื่อน [16]	9
ภาพที่ 1-11 กราฟประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง ก) ในสภาวะคงตัว ข) ในสภาวะไม่คงตัวตามวัฏจักรขับเคลื่อน FUDS ในการศึกษาของ Ahluwalia [15].....	10
ภาพที่ 1-12 พฤติกรรม undershoot และ overshoot ของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แก๊วภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระแบบขั้น [21].....	11
ภาพที่ 1-13 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แก๊วในช่วงที่เกิดสภาวะน้ำท่วมและเซลล์แห้ง [22]..	11
ภาพที่ 1-14 Polarization curve ที่แสดงลักษณะ hysteresis effect ของเซลล์ ก) เมื่อเกิดสภาวะน้ำท่วม [24] และ ข) เมื่อเกิดสภาวะเซลล์แห้ง [25]	12
ภาพที่ 2-1 องค์ประกอบของเซลล์เดี่ยว [29]	16
ภาพที่ 2-2 แผนภาพการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [30]	17

ภาพที่ 2-3 การประกอบเซลล์เชื้อเพลิงเป็นเซลล์แถว [31]	17
ภาพที่ 2-4 แผนภาพ Sankey ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย	18
ภาพที่ 2-5 แผนภาพอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วในระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA [32].....	20
ภาพที่ 3-1 แผนผังระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA [35]	25
ภาพที่ 3-2 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิง	28
ภาพที่ 3-3 แผนผังตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า.....	29
ภาพที่ 3-4 วัฏจักรขับที่ Federal Test Procedure (FTP75)	32
ภาพที่ 3-5 วัฏจักรขับที่ European ECE cycle (ECE15)	32
ภาพที่ 3-6 วัฏจักรขับที่ New York city cycle (NYCC).....	33
ภาพที่ 3-7 วัฏจักรขับที่ Highway Fuel Economy Test (HWFET).....	33
ภาพที่ 3-8 ภาระขับเคลื่อนหลังจากปรับลดกำลังไฟฟ้าในวัฏจักรขับที่ ก) modified FTP75 ข) ECE15 ค) NYCC และ ง) HWFET	35
ภาพที่ 3-9 การกระจายตัวของ n-slew rate ในแต่ละวัฏจักรขับที่.....	36
ภาพที่ 3-10 การกระจายตัวของ n-slew rate ในวัฏจักร modified FTP75 ที่ใช้ทดสอบระบบ เซลล์เชื้อเพลิงขนาดพิกัด 1.2 กิโลวัตต์และขนาดพิกัด 90 กิโลวัตต์	37
ภาพที่ 3-11 การกระจายตัวของ n-slew rate ของภาระแบบไซน์ที่มีความถี่ 0.01Hz.....	38
ภาพที่ 3-12 ลักษณะภาระแบบไซน์ที่มีความถี่และ n-slew rate แตกต่างกัน	39
ภาพที่ 3-13 ลักษณะภาระแบบครึ่งไซน์ล่างและบนที่ n-slew rate แตกต่างกัน.....	40
ภาพที่ 4-1 Polarization curve ภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัว	43
ภาพที่ 4-2 อัตราการบริโภคเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเซลล์แถว และประสิทธิภาพของระบบ เซลล์เชื้อเพลิงภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัว	43
ภาพที่ 4-3 การบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ ภายใต้ การทำงานในสภาวะคงตัว.....	44
ภาพที่ 4-4 การบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศที่อุณหภูมิของเซลล์แถวต่างๆ ภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัว	45
ภาพที่ 4-5 Polarization curve ภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัวตามภาระแบบไซน์.....	48
ภาพที่ 4-6 Polarization curve ภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัวตามภาระแบบครึ่งไซน์.....	50
ภาพที่ 4-7 Polarization curve ภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัวตามวัฏจักรขับที่ ก) s-modified FTP75 ข) s-NYCC ค) s-ECE15 และ ง) s-HWFET	52

ภาพที่ 4-8 ช่วงการไล่น้ำของคอมเพรสเซอร์ในวัฏจักร ก) s-modified FTP75 ข) s-NYCC	55
ภาพที่ 4-8 (ต่อ) ช่วงการไล่น้ำของคอมเพรสเซอร์ในวัฏจักร ค) s-ECE15 และ ง) s-HWFET	56
ภาพที่ 4-9 ส่วนขยายช่วงเวลากการไล่น้ำครั้งแรกในวัฏจักร s-modified FTP75	57
ภาพที่ 4-10 ประสิทธิภาพของเซลล์แกวและระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวตามวัฏจักร ซ้ำที่ต่างๆทั้ง 4	59
ภาพที่ 4-11 คุณสมบัติของเซลล์แกวและการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัฒนาระบายอากาศ ในวัฏจักร s-modified FTP75	60
ภาพที่ 4-12 ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงระยะเวลาที่คอมเพรสเซอร์ไล่น้ำ และไม่ไล่น้ำในวัฏจักร ก) s-modified FTP75 ข) s-NYCC	61
ภาพที่ 4-12 (ต่อ) ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงระยะเวลาที่คอมเพรสเซอร์ไล่น้ำ และไม่ไล่น้ำในวัฏจักร ค) s-ECE15	62
ภาพที่ 5-1 กำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิก และการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์จากการทดลอง	66
ภาพที่ 5-2 แผนภาพ Sankey แจกแจงการสูญเสียในมอเตอร์ชนิด BLDC	67
ภาพที่ 5-3 แผนภาพ Sankey แจกแจงการสูญเสียในมอเตอร์ชนิด BLDC ขณะทดสอบใน สภาวะไร้ภาระ	68
ภาพที่ 5-4 ก) กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ ข) อัตราการไหลของอากาศที่ความเร็วรอบต่างๆ	69
ภาพที่ 5-5 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์ที่อัตราการไหลของอากาศ ต่างๆ	69
ภาพที่ 5-6 การประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์เทียบกับผลการทดลอง	70
ภาพที่ 5-7 กำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัฒนาระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก และการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัฒนาระบายอากาศจากการทดลอง	74
ภาพที่ 5-8 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก, สูญเสียทางกล และสูญเสียในขดลวดทองแดงใน มอเตอร์ของชุดพัฒนาระบายอากาศที่ความเร็วรอบต่างๆ	76
ภาพที่ 5-9 ก) กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของชุดพัฒนาระบายอากาศที่ความเร็วรอบต่างๆ ข) อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นที่ความเร็วรอบต่างๆ	76
ภาพที่ 5-10 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของชุดพัฒนาระบายอากาศที่อัตราการไหลของ อากาศหล่อเย็นต่างๆ	76

ภาพที่ 5-11 การประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศเทียบกับผลการทดลอง	77
ภาพที่ ก-1 หน้าต่างโปรแกรม NexaMon OEM 2.0	92
ภาพที่ ก-2 ก) ชุดรับภาระทางไฟฟ้า รุ่น PLZ1004W พิกัด 1 กิโลวัตต์ ข) ชุดเพิ่มภาระทางไฟฟ้า รุ่น PLZ 2004WB พิกัด 2 กิโลวัตต์	94
ภาพที่ ก-3 ตำแหน่งของอุปกรณ์เสริมและตำแหน่งที่มีการจ่ายไฟฟ้าเข้าและออกแผงควบคุม	94
ภาพที่ ก-4 เซ็นเซอร์ตรวจจับกระแสรุ่น ACS 714	95
ภาพที่ ก-5 อุปกรณ์ตรวจวัด	96
ภาพที่ ก-6 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับกระแสของชุดพัดลมระบายอากาศ	97
ภาพที่ ก-7 แผงผังตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้า	99
ภาพที่ ข-1 การบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมในสภาวะคงตัว	101
ภาพที่ ข-2 การบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ ชุดพัดลมระบายอากาศ และอุปกรณ์อื่นๆ ในสภาวะคงตัว	102
ภาพที่ ข-3 การการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ในงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยอื่น	103
ภาพที่ ค-1 อัตราการบริโภคไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แกวภายใต้การทดสอบ ในวัฏจักร s-ECE-15	105
ภาพที่ ค-2 อัตราการบริโภคไฮโดรเจนที่แสดงผลโดยซอฟต์แวร์และคำนวณจากสมการที่ 2-5 ภายใต้การทดสอบในวัฏจักร s-ECE-15	105
ภาพที่ ง-1 ส่วนขยายช่วงเวลากการไล่น้ำครั้งที่สองในวัฏจักร s-modified FTP75	107
ภาพที่ ง-2 ส่วนขยายช่วงเวลากการไล่น้ำครั้งที่สามในวัฏจักร s-modified FTP75	108
ภาพที่ ง-3 ส่วนขยายช่วงเวลากการไล่น้ำครั้งที่สี่ในวัฏจักร s-modified FTP75	108
ภาพที่ ง-4 ส่วนขยายช่วงเวลากการไล่น้ำครั้งที่ห้าในวัฏจักร s-modified FTP75	109
ภาพที่ ง-5 ส่วนขยายช่วงเวลากการไล่น้ำครั้งแรกและครั้งที่สองในวัฏจักร s-NYCC	109
ภาพที่ ง-6 ส่วนขยายช่วงเวลากการไล่น้ำครั้งที่สามในวัฏจักร s-NYCC	110
ภาพที่ ง-7 ส่วนขยายช่วงเวลากการไล่น้ำครั้งแรกในวัฏจักร s-ECE15	110
ภาพที่ จ-1 ตำแหน่งการวัดอัตราการไหลของอากาศ ความดันขาออกและความดันขาเข้า คอมเพรสเซอร์	112
ภาพที่ จ-2 เซ็นเซอร์วัดผลต่างความดันรุ่น ASDX030	113
ภาพที่ จ-3 กราฟการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดผลต่างความดัน	113
ภาพที่ จ-4 อัตราส่วนความดันขาออกและเข้าคอมเพรสเซอร์ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ ..	114

ภาพที่ ๑-5 อัตราส่วนความดันขาออกและเข้าคอมเพรสเซอร์ในงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยของ Kennedy [41].....	114
ภาพที่ ๑-6 ตำแหน่งการวัดความเร็วของอากาศหล่อเย็น ความดันขาออกและความดันขาเข้า ชุดพัดลมระบายอากาศ	115
ภาพที่ ๑-7 ตำแหน่งการวัดความเร็วของอากาศหล่อเย็นด้วยวิธี Log-Tchebycheff.....	116
ภาพที่ ๑-8 ความดันตกในช่องระบายอากาศที่อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นต่างๆ	116
ภาพที่ ๑-1 ลักษณะภาวะตามวัฏจักรซิปซี s-modified FTP75 ในช่วง 50 ถึง 100 วินาที.....	124

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_{duct}	พื้นที่หน้าตัดท่อ (m^2)
$c_{p,air}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอากาศ ($kJ/kg\ K$)
EW	น้ำหนักโมเลกุลของเมมเบรน (kg/mol)
F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์
I	ความหนาแน่นกระแสสูงสุด (A/cm^2)
I_{st}	กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แกว (A)
LHV_{H_2}	ค่าความร้อนต่ำ (lower heating value) ของก๊าซไฮโดรเจน (J/kg)
M_{air}	น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ (kg/mol)
$\dot{m}_{air,cool}$	อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็น (kg/s)
$\dot{m}_{air,in}$	อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิง (kg/s)
$\dot{m}_{H_2,in}$	อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่เข้าสู่ระบบ (kg/s)
$\dot{m}_{H_2,purge}$	อัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา (kg/s)
$\dot{m}_{H_2,react}$	อัตราการไหลของไฮโดรเจนที่เข้าทำปฏิกิริยา (kg/s)
N_{cell}	จำนวนเซลล์แกว
P_{aux}	กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบเสริม (W)
P_{blower}	การบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศ (W)
P_{comp}	การบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ (W)
P_{net}	กำลังไฟฟ้าสุทธิ (W)
P_{others}	การบริโภคกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์อื่นๆ (W)
P_{rated}	กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้ (W)
P_{stack}	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แกว (W)
$P_{b,in}$	ความดันขาเข้าชุดพัดลมระบายอากาศ (Pa)
$P_{b,out}$	ความดันขาออกชุดพัดลมระบายอากาศ (Pa)
$P_{c,in}$	ความดันขาเข้าคอมเพรสเซอร์ (Pa)
$P_{c,out}$	ความดันขาออกคอมเพรสเซอร์ (Pa)
\dot{Q}_{cool}	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการระบายด้วยอากาศหล่อเย็น (W)
\dot{Q}_{ex}	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ปล่อยออกจากเซลล์เชื้อเพลิงจากอากาศขาทิ้ง (W)
$\dot{Q}_{H_2,in}$	อัตราพลังงานขาเข้าระบบเซลล์เชื้อเพลิง (W)
$\dot{Q}_{H_2,purge}$	อัตราพลังงานที่สูญเสียจากปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา (W)

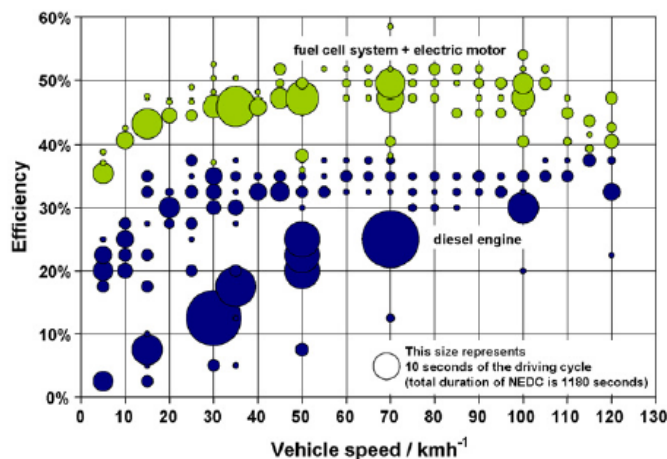
\dot{Q}_{heat}	อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบเซลล์เชื้อเพลิง (W)
\dot{Q}_{nat}	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพาโดยธรรมชาติ (W)
\dot{Q}_{rad}	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี (W)
T_{amb}	อุณหภูมิของบรรยากาศ (K)
$T_{cool,out}$	อุณหภูมิขาออกของอากาศหล่อเย็น (K)
$\bar{v}_{air,cool}$	ความเร็วเฉลี่ยของอากาศหล่อเย็นในหน้าตัดท่อ (m/s)
x_{O_2}	เศษส่วนโมลของอากาศ
η_{blower}	ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของชุดพัดลมระบายอากาศ
η_{comp}	ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของคอมเพรสเซอร์
η_{stack}	ประสิทธิภาพของเซลล์แกว
η_{system}	ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง
τ_p^*	อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในรูปพารามิเตอร์ไร้มิติ (normalized power slew rate)
τ_s	time scale ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง (s)
dP / dt	อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (W/s)
δ_m	ความหนาของเมมเบรน (mm)
γ	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของอากาศ
λ	air stoichiometry
$\Delta\lambda$	ปริมาณน้ำในเมมเบรน
ρ	ความหนาแน่นของเมมเบรน (kg/m ³)
ρ_{air}	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m ³)

บทที่ 1

บทนำ

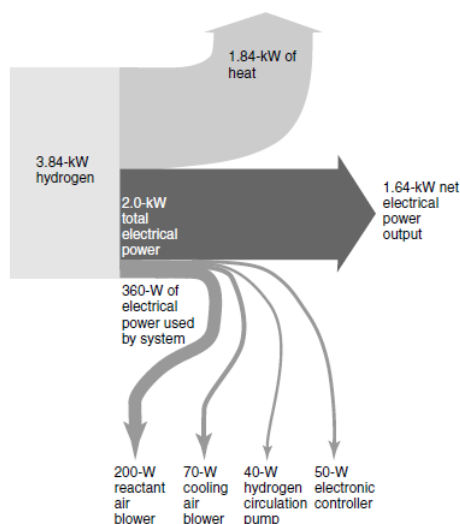
1.1 ที่มาและความสำคัญ

ยานยนต์ในปัจจุบันใช้พลังงานจากการสันดาบน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสันดาปคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ รวมถึงยังมีมลภาวะทางเสียงจากเครื่องยนต์ ด้วยปัญหาดังกล่าวอุตสาหกรรมยานยนต์จึงได้มีการปรับตัวเพื่อแก้ไขปัญหา โดยการพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แหล่งพลังงานหนึ่งที่มีความสนใจก็คือไฮโดรเจน โดยนำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง หนึ่งในข้อได้เปรียบสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงก็คือ เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายใน ดังแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบเซลล์เชื้อเพลิงและเครื่องยนต์ดีเซลภายใต้วัฏจักรขับชี่ NEDC ดังภาพที่ 1-1 [1] พบว่าเครื่องยนต์ดีเซลมีประสิทธิภาพต่ำมากที่ภาระการทำงานต่ำ ในขณะที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างชัดเจน ลักษณะพิเศษนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากกำลังขับเคลื่อนที่ต้องการสำหรับยานยนต์โดยเฉพาะในการขับชี่ในเมือง โดยส่วนมากคิดเป็นเพียง 10-20% ของภาระสูงสุดเท่านั้น [2] นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงยังเป็นอุปกรณ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแปรรูปพลังงานจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีคือความร้อนและน้ำ ซึ่งปราศจากมลภาวะโดยสิ้นเชิง เซลล์เชื้อเพลิงที่นิยมนำมาใช้ในยานยนต์คือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane fuel cell; PEMFC) เนื่องจากมีอุณหภูมิการทำงานต่ำ (60-80°C) มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ระบบไม่ซับซ้อน เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ



ภาพที่ 1-1 ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงและเครื่องยนต์ดีเซลในวัฏจักรขับชี่ NEDC [1]

อย่างไรก็ตามการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้แทนเครื่องยนต์สันดาปภายใน ยังประสบปัญหาในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเซลล์แล้ว ยังขึ้นอยู่กับระบบเสริมของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากระบบเสริมมีการบริโภคกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แล้ว ถ้าระบบเสริมบริโภคกำลังไฟฟ้าในปริมาณมาก จะส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเซลล์เชื้อเพลิงลดลง จากตัวอย่างแผนภาพ Sankey ดังภาพที่ 1-2 ของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 2 กิโลวัตต์ พบว่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียให้กับระบบเสริมคิดเป็น 18% ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แล้ว จากการบริโภคกำลังไฟฟ้าในระบบเสริมพบว่าคอมเพรสเซอร์ในระบบจ่ายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้ามากที่สุดมีค่า 200 วัตต์ รองลงมาคือชุดพัดลมระบายอากาศในระบบจัดการความร้อนมีค่า 70 วัตต์ คิดเป็น 55% และ 19.4% ของกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมตามลำดับ [3] นอกจากนี้ข้อมูลเบื้องต้นจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดพิกัด 70 กิโลวัตต์ที่ใช้ในยานยนต์ของ Daimler Chrysler Nocar 4 ก็ระบุในทำนองเดียวกันว่าการบริโภคกำลังไฟฟ้าในระบบเสริมมีค่ามากถึง 16% ของอัตราพลังงานขาเข้าและคอมเพรสเซอร์เป็นอุปกรณ์หลักที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุด [4] จึงเป็นประเด็นที่หลายงานวิจัยให้ความสำคัญกับระบบเสริมที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูง ได้แก่ ระบบจ่ายอากาศ [5-7] และระบบจัดการความร้อน [8-10]



ภาพที่ 1-2 แผนภาพ Sankey ของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 2 กิโลวัตต์ [3]

ระบบจ่ายอากาศนิยมใช้คอมเพรสเซอร์ ซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่ป้อนอากาศให้เพียงพอต่อความต้องการในการเกิดปฏิกิริยาเคมีแล้ว ยังทำหน้าที่ในการไล่น้ำที่ตกค้างในช่องทางไหลเพื่อป้องกันการเกิดน้ำท่วมภายในเมมเบรน หลายงานวิจัยระบุถึงปัญหาจากการใช้คอมเพรสเซอร์ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบเสริม [5-7] Ch. Na Ranaong [5] ศึกษา

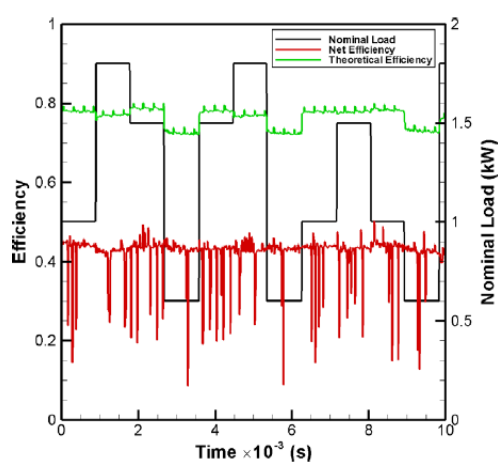
การบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมภายใต้สภาวะคงตัว ระบุว่าคอมเพรสเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดคิดเป็น 48% ของกำลังไฟฟ้าของระบบเสริม Haubrock [6] ศึกษาการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ในสภาวะคงตัวและระบุว่า การลดอัตราส่วนสมมูลอากาศจาก 4 เป็น 2 คอมเพรสเซอร์จะมีการบริโภคกำลังไฟฟ้าที่ลดลง ส่งผลให้ระบบเสริมมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 28% เป็น 34% อย่างไรก็ตามการศึกษาของโสพิส [7] ได้ระบุถึงผลกระทบของการใช้อุปกรณ์เพิ่มความชื้นต่อการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และพบว่าคอมเพรสเซอร์มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 9% ของกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่อุปกรณ์เสริมบริโภค และเมื่อเทียบกับการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แก๊วได้พบว่า การบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์มีค่าน้อยกว่า 2% ของกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่เซลล์แก๊วผลิตได้ คอมเพรสเซอร์จึงไม่ใช่อุปกรณ์ที่บริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์เสริมอื่น จึงเกิดประเด็นที่ว่าถ้าคอมเพรสเซอร์ไม่ใช่อุปกรณ์ที่มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบเสริมดังที่งานวิจัย [5-6] ได้ศึกษา แล้วจะมีอุปกรณ์ใดในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่เป็นต้นเหตุของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบเสริม

ระบบจัดการความร้อนนับเป็นอีกระบบหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากเซลล์แก๊วจะมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิทำงานระหว่าง 60-80 °C ถ้าอุณหภูมิการทำงานของเซลล์แก๊วสูงเกินไปส่งผลให้เมมเบรนแห้ง และถ้าต่ำเกินไปจะส่งผลให้เมมเบรนเกิดน้ำท่วม ซึ่งล้วนแล้วแต่ทำให้อายุการใช้งานของเมมเบรนสั้นลงและเสื่อมสภาพได้ เซลล์เชื้อเพลิงจึงต้องมีระบบระบายความร้อนที่สามารถจัดการความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยิ่งไปกว่านั้นในปัจจุบันมีการพัฒนาเชื้อเพลิงแบบ open cathode เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้พัฒนาเป็นอุปกรณ์ในการป้อนอากาศและระบายความร้อนไปพร้อมๆกัน นอกจากนี้ยังไม่ใช้อุปกรณ์เพิ่มความชื้น ดังนั้นการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จึงต้องให้ความสำคัญกับพัดลมระบายอากาศเป็นหลัก จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาแนวทางการออกแบบพัดลมระบายอากาศ [8-10] Kim [8] เริ่มจากการประเมินความร้อนสูญเสียทั้งหมดจากเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นที่เพียงพอในการระบายความร้อน จากนั้นประเมินการสูญเสียความดันของระบบจากช่องทางการไหลต่างๆ และจึงนำข้อมูลที่ได้มาประเมินขนาดของพัดลมระบายอากาศที่เหมาะสมจาก performance curve ซึ่ง Yu [9] และ Sasmito [10] ได้ใช้แนวทางนี้เช่นเดียวกัน ผลการศึกษา ระบบเสริมดังที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการศึกษาที่จำกัดอยู่ในข้อมูลการทำงานในสภาวะคงตัวและไม่ได้ศึกษาในแง่ของประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

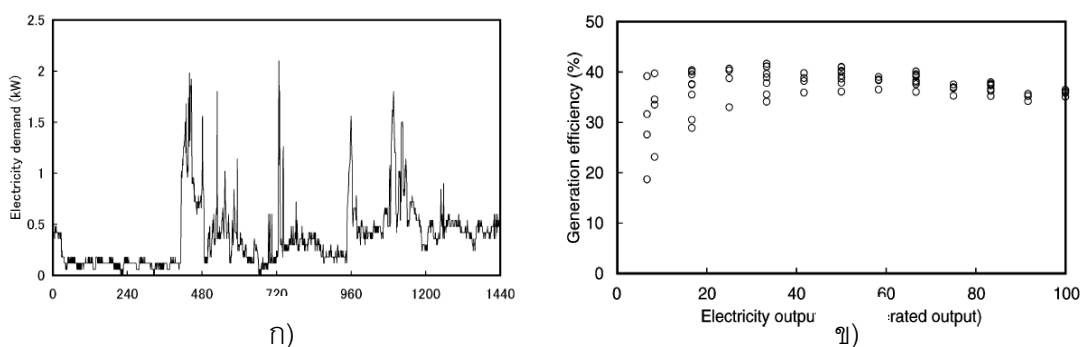
โดยทั่วไปแล้วระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนนั้นนิยมนำมาใช้งานในการผลิตไฟฟ้าในครัวเรือนและในยานยนต์ ซึ่งการใช้งานในลักษณะดังกล่าวนี้ย่อมมีลักษณะภาระ (load profile) ที่แตกต่างจากการใช้งานในสภาวะคงตัว จากลักษณะภาระในบ้านพักอาศัย

ดังภาพที่ 1-4 ก และในยานยนต์ที่อ้างอิงตามวัฏจักรขับซึ่งดังภาพที่ 1-5 เห็นได้ว่าลักษณะของภาระไม่ได้คงที่ตลอดช่วงการทำงาน มีบางช่วงที่ต้องการภาระต่ำ บางช่วงต้องการภาระสูง นอกจากนี้ลักษณะการใช้งานในครัวเรือนส่วนใหญ่แล้วจะมีช่วงที่ภาระคงที่มากกว่าการใช้งานในยานยนต์ ซึ่งลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลให้พฤติกรรมของระบบเซลล์เชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงไรนั้น จะเห็นได้จากงานวิจัยที่ศึกษาระบบเซลล์เชื้อเพลิงในครัวเรือน [11-12] และในยานยนต์ [13-16] ดังต่อไปนี้

สำหรับการใช้งานในครัวเรือน Venturelli [11] ทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้ภาระคงที่ (constant load) และภาระแบบขั้น (step load) ดังภาพที่ 1-3 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าในบางช่วงเวลาประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงลดต่ำลงอย่างมาก อันเป็นผลมาจากการระบายก๊าซไฮโดรเจนส่วนเกินออก แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของระบบเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างภาระคงที่และภาระแบบขั้นพบว่าไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามลักษณะภาระแบบขั้นที่ใช้ในการศึกษาของ Venturelli อาจเป็นลักษณะภาระที่ไม่แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างสภาวะคงตัวและไม่คงตัวได้เท่าใดนัก Aki [12] ทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาดพิกัด 1.2 กิโลวัตต์โดยอ้างถึงการใช้งานในบ้านพักอาศัย ซึ่งลักษณะของภาระนั้นมีบางช่วงคงที่และไม่คงที่ดังภาพที่ 1-4 ก จากผลการทดสอบพบว่าในช่วงการใช้งานที่ภาระต่ำค่าประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงกระจายตัวอยู่ระหว่าง 20-40% และมีแนวโน้มจะกระจายตัวน้อยลงจนประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่ในช่วงภาระที่สูงขึ้นดังภาพที่ 1-4 ข จากการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจากการใช้งานในสภาวะไม่คงตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างฉับพลันนั้น แสดงให้เห็นความแตกต่างจากการใช้งานในสภาวะคงตัวอย่างชัดเจน

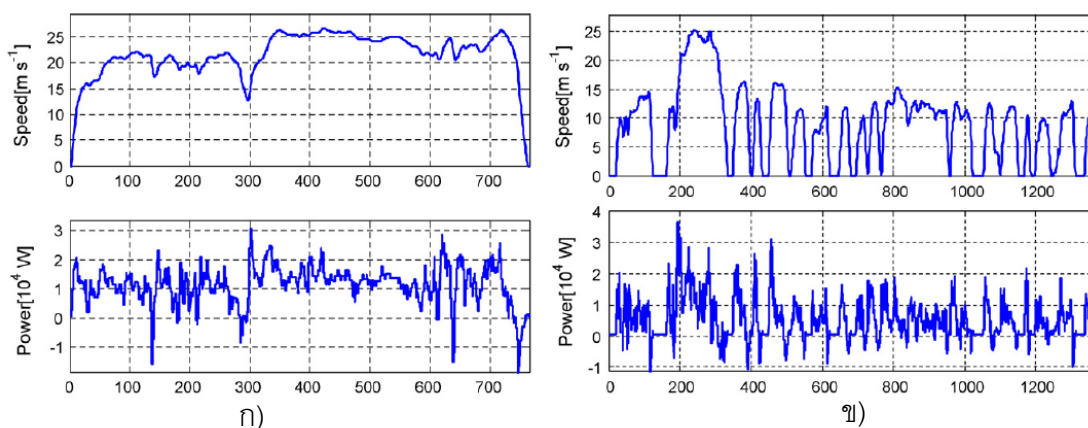


ภาพที่ 1-3 ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงต่อเวลาภายใต้ภาระแบบผสม [11]

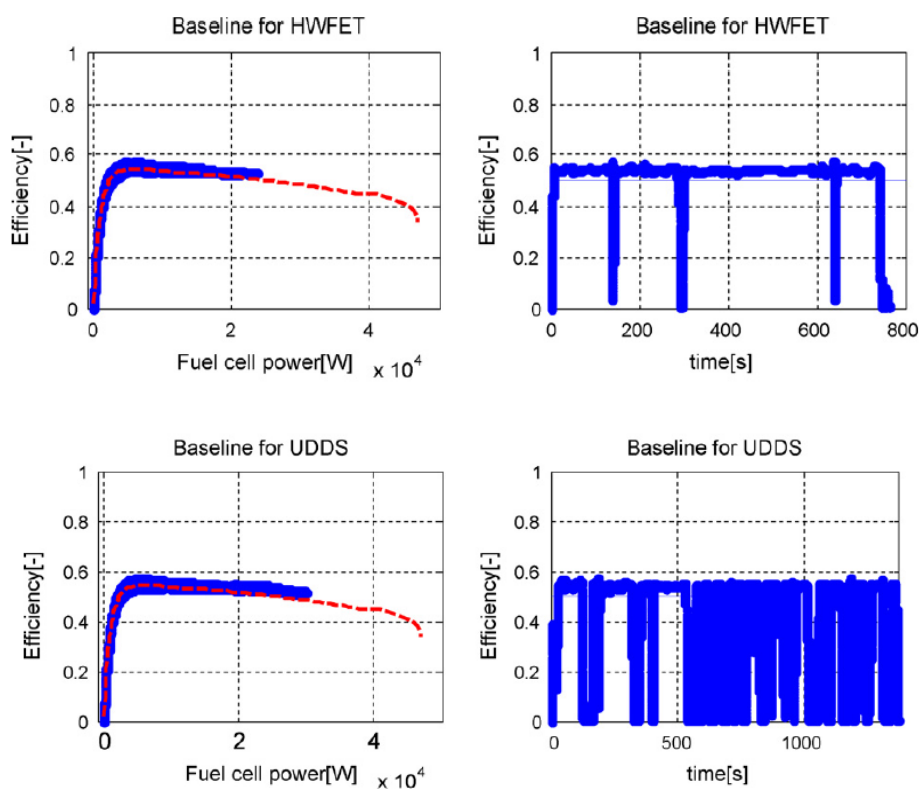


ภาพที่ 1-4 ก) ตัวอย่างความต้องการกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในบ้านพักอาศัย ข) กราฟประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในบ้านพักอาศัยในงานวิจัยของ Aki [12]

สำหรับการใช้งานในยานยนต์ ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องสามารถปรับให้เข้ากับสภาพการใช้งานซึ่งมักจะมีการเริ่ม หยุด หรือเปลี่ยนแปลงภาระอย่างฉับพลัน โดยนิยมใช้ภาระตามวัฏจักรขับซึ่ง ซึ่งเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงความเร็วรถในช่วงเวลาต่างๆ และสามารถใช้เป็นข้อมูลการจำลองระบบเพื่อหาภาระในการขับเคลื่อน ดังภาพที่ 1-5 แสดงตัวอย่างวัฏจักรขับ ก) HWFET และ ข) UDDS [13] วัฏจักรทั้งสองนี้มีลักษณะแตกต่างกัน โดยวัฏจักร UDDS นั้นมีลักษณะของภาระที่ไม่คงที่มากกว่า และโดยเฉลี่ยจะใช้งานอยู่ในช่วงภาระที่ต่ำกว่าวัฏจักร HWFET หลายงานวิจัยได้พัฒนาแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อหาประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ดีที่สุดของระบบเซลล์เชื้อเพลิง โดยปรับให้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในช่วงภาระที่มีประสิทธิภาพสูง [13-15] Ryu [13] ศึกษา ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ยานยนต์จากแบบจำลอง ซึ่งอิงข้อมูลโดยใช้กราฟประสิทธิภาพ (efficiency curve) ในสภาวะคงตัว ภาพที่ 1-6 แสดงกราฟประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงตามวัฏจักรขับ HWFET และ UDDS ซึ่งพบว่าในวัฏจักร UDDS นั้นมีช่วงที่ประสิทธิภาพลดลงมากกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นข้อมูลที่แสดงให้เห็นว่าการใช้งานในช่วงภาระต่ำส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีการแปรเปลี่ยนไปมากกว่าการใช้งานในช่วงภาระสูง อีกข้อสังเกตหนึ่งในการศึกษาของ Ryu จากภาพที่ 1-6 นั้นพบว่ากราฟประสิทธิภาพจากการจำลองในวัฏจักรขับทั้งสอง (เส้นทึบ) นั้นมีแนวโน้มเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพในสภาวะคงตัว (เส้นประ) ซึ่งแตกต่างจากลักษณะของกราฟประสิทธิภาพจากการทดลองของ Aki ดังภาพที่ 1-4 ข ที่มีการกระจายตัวของค่าประสิทธิภาพอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะการใช้งานในช่วงภาระต่ำ เป็นที่น่าสังเกตว่าผลจากการจำลองของ Ryu นั้นอาจมีข้อผิดพลาดได้ ซึ่งผลการศึกษายังไม่ได้เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดสอบจริง จึงทำให้ไม่เห็นข้อผิดพลาดดังกล่าว



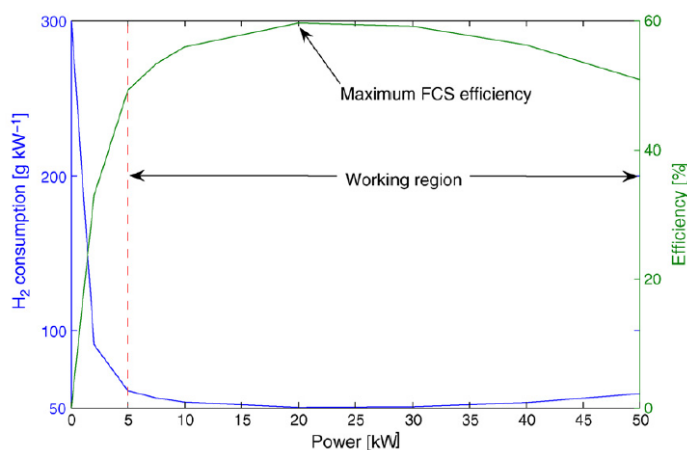
ภาพที่ 1-5 ความเร็วและลักษณะภาระตามวัฏจักรขับขี่ ก) HWFET ข) UDDS [13]



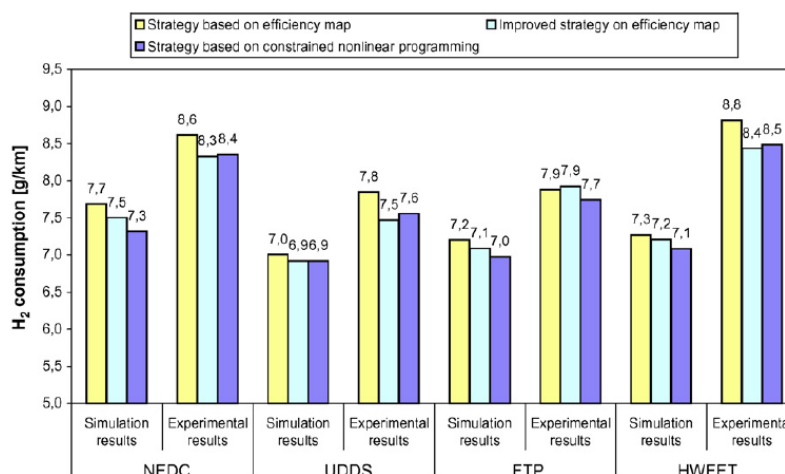
ภาพที่ 1-6 กราฟประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงตามวัฏจักรขับขี่ HWFET และ UDDS
ในการศึกษาของ Ryu [13]

นอกจากนี้ในการศึกษาของ Feroldi [14] ได้ใช้ข้อมูลจากกราฟประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสถานะคงตัวมาประเมินประสิทธิภาพในสถานะไม่คงตัวในลักษณะเดียวกับกับ Ryu ดังภาพที่ 1-7 Feroldi ได้พัฒนาแบบจำลองกลยุทธ์การจัดการพลังงานในระบบเซลล์เชื้อเพลิงในยานยนต์ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของระบบจากการประเมินอัตราการบริโภคไฮโดรเจน โดยนำข้อมูลประสิทธิภาพในสถานะคงตัวไปใช้ในการระบุขอบเขตการทำงานเพื่อให้

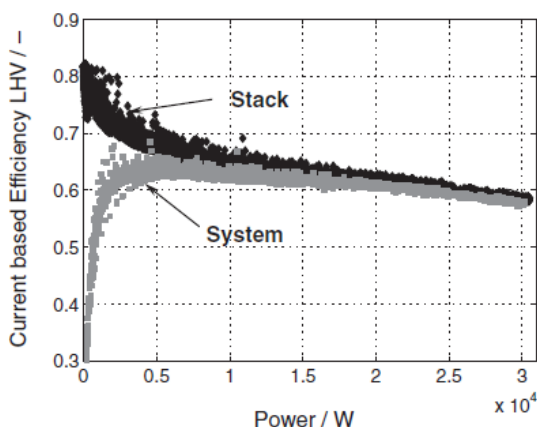
ระบบเซลล์เชื้อเพลิงทำงานอยู่ในขอบเขตภาวะที่มีประสิทธิภาพสูง และเปรียบเทียบการทำงานจากวัฏจักรขับเคลื่อนที่แตกต่างกัน 4 วัฏจักรคือ NEDC, UDDS, FTP และ HWFET นอกจากนี้ผลของอัตราการบริโภคไฮโดรเจนจากการจำลองยังได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดพิกัด 1.2 กิโลวัตต์ ผลการเปรียบเทียบดังภาพที่ 1-8 พบว่าผลจากการจำลองในวัฏจักร NEDC, UDDS และ FTP มีอัตราการบริโภคไฮโดรเจนต่ำกว่าผลจากการทดลองอยู่ประมาณ 10% และมีความแตกต่างมากถึง 17% ในวัฏจักร HWFET จากความแตกต่างของผลการจำลองและผลการทดลองดังกล่าว เป็นสิ่งที่บ่งชี้ได้ว่าการนำข้อมูลประสิทธิภาพในสภาวะคงตัวมาพิจารณาการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่คงตัวตามวัฏจักรขับเคลื่อนนั้นอาจมีข้อผิดพลาด ไม่ครอบคลุมการทำงานจริงของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในยานยนต์ที่มักอยู่ในช่วงภาวะต่ำ ซึ่งเป็นการใช้งานในเมืองที่มีการจราจรคับคั่ง ดังนั้นถ้าพิจารณาการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงนี้แล้ว ค่าประสิทธิภาพย่อมมีการแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วงต่ำมากกว่าการทำงานในช่วงภาวะสูง อย่างไรก็ตามผลการศึกษาข้างต้นนั้นเป็นเพียงข้อมูลจากแบบจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิง จากผลการศึกษาของ Buchi [4] แสดงให้เห็นถึงข้อมูลประสิทธิภาพของเซลล์แกวและระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวตามวัฏจักรขับเคลื่อนแบบสุ่มจากการทดลองขับเคลื่อนที่จริง ดังภาพที่ 1-9 ทั้งในส่วนของคุณภาพของเซลล์แกวและระบบเซลล์เชื้อเพลิงนั้นพบว่าค่าประสิทธิภาพมีการกระจายตัวอยู่ในช่วงกว้าง โดยเฉพาะในช่วงภาวะต่ำจะกระจายตัวค่อนข้างชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากลักษณะของกราฟประสิทธิภาพในสภาวะคงตัวที่ข้อมูลมีลักษณะเป็นค่าคงที่ ดังภาพที่ 1-6 และ 1-7 ในการศึกษาของ Ryu และ Feroldi ตามลำดับ



ภาพที่ 1-7 กราฟประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัวและอัตราการบริโภคไฮโดรเจนของระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 กิโลวัตต์ [14]



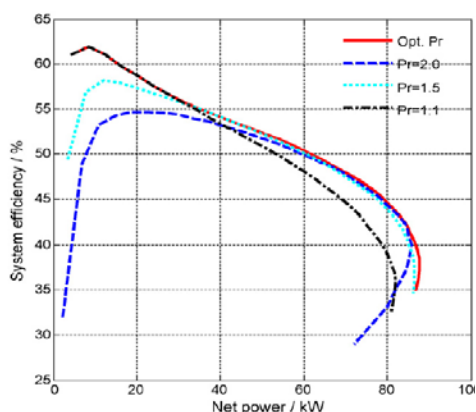
ภาพที่ 1-8 การเปรียบเทียบอัตราการบริโภคไฮโดรเจนระหว่างการจำลองและการทดลอง ในแต่ละวัฏจักรขับขี่ [14]



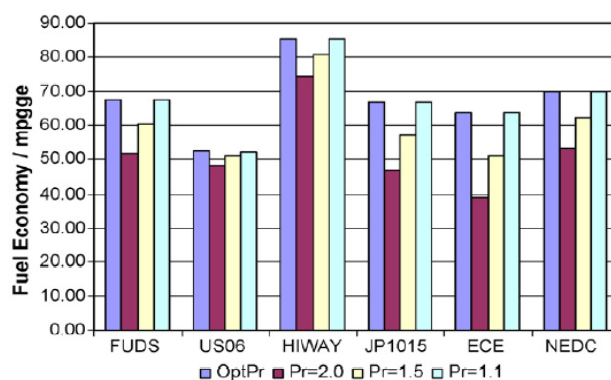
ภาพที่ 1-9 กราฟประสิทธิภาพของเซลล์แก๊วและระบบเซลล์เชื้อเพลิงตามภาระที่อ้างอิงจาก วัฏจักรขับขี่แบบสุ่ม [4]

อย่างไรก็ตาม Feroldi ยังได้ให้ข้อสังเกตในอีกประเด็นว่า พฤติกรรมพลวัตของระบบเซลล์เชื้อเพลิงโดยหลักแล้วขึ้นอยู่กับพฤติกรรมพลวัตของคอมเพรสเซอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมากในช่วงการใช้งานตามวัฏจักรขับขี่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao [16] ได้ระบุในทำนองเดียวกันว่าพฤติกรรมพลวัตที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงตัวนั้นขึ้นอยู่กับระบบจ่ายอากาศเป็นหลัก ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงมากถึง 80% Zhao จึงศึกษาพฤติกรรมพลวัตของระบบจ่ายอากาศจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการแปรเปลี่ยนค่าความดันย้อนกลับ (back pressure, Pr) ในระบบจ่ายอากาศเป็น 1.1, 1.5 และ 2 บรรยากาศตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การแปรเปลี่ยนค่าความดันย้อนกลับในระบบจ่ายอากาศส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงดังภาพที่ 1-10 ก พบว่าที่ค่าความดันย้อนกลับเป็น 2 บรรยากาศ นั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลงมาก และผลการศึกษา

อัตราการประหยัดเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันในแต่ละกรณีโดยเปรียบเทียบจากวัฏจักรขับเคลื่อนที่แตกต่างกันจำนวน 6 วัฏจักร ดังภาพที่ 1-10 ข ถ้าพิจารณาความแตกต่างของวัฏจักร ECE ที่มีลักษณะภาระค่อนข้างคงตัว และวัฏจักร FUDS ที่มีลักษณะภาระไม่คงตัวมากกว่านั้น พบว่าที่ค่าความดันย้อนกลับที่เหมาะสมอัตราการประหยัดเชื้อเพลิงมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ถ้าหากพิจารณาที่ค่าความดันย้อนกลับ 2 บรรยากาศ ซึ่งเป็นความดันย้อนกลับที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงต่ำสุดนั้น พบว่าอัตราการประหยัดเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันถึง 20% นอกจากนี้ Ahluwalia [15] ยังได้ให้ข้อสรุปในทำนองเดียวกันว่าระบบจ่ายอากาศส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง ผลการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างกราฟประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว ดังภาพที่ 1-11 ก และ 1-11 ข ตามลำดับ และอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างนั้นมาจากระบบเสริม คือ ชุดขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ (compressor expander module; CEM) ที่ทำงานในสภาวะคงตัวในแต่ละช่วงภาระนั้น CEM มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าคงที่ แต่ในสภาวะไม่คงตัวตามวัฏจักรขับเคลื่อนที่มีความเร็ว เซลล์ต้องการปริมาณอากาศเข้าทำปฏิกิริยามากขึ้น CEM จึงทำงานในรอบที่สูงขึ้นและมีการบริโภคกำลังไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวลดต่ำกว่าค่าประสิทธิภาพในสภาวะคงตัวที่ภาระเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามค่าประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวนั้นสามารถมีค่าสูงกว่าในสภาวะคงตัวได้ในช่วงที่ยานยนต์ลดความเร็ว เนื่องจากกำลังจากความเฉื่อย (inertial power) ในเพลลาของ CEM มีส่วนช่วยในการลดการบริโภคกำลังไฟฟ้า ด้วยสาเหตุดังที่กล่าวมานี้ จึงทำให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัว มีการกระจายตัวอยู่ในช่วงกว้าง และมีการแปรเปลี่ยนไปมากกว่าในสภาวะคงตัวอย่างชัดเจน



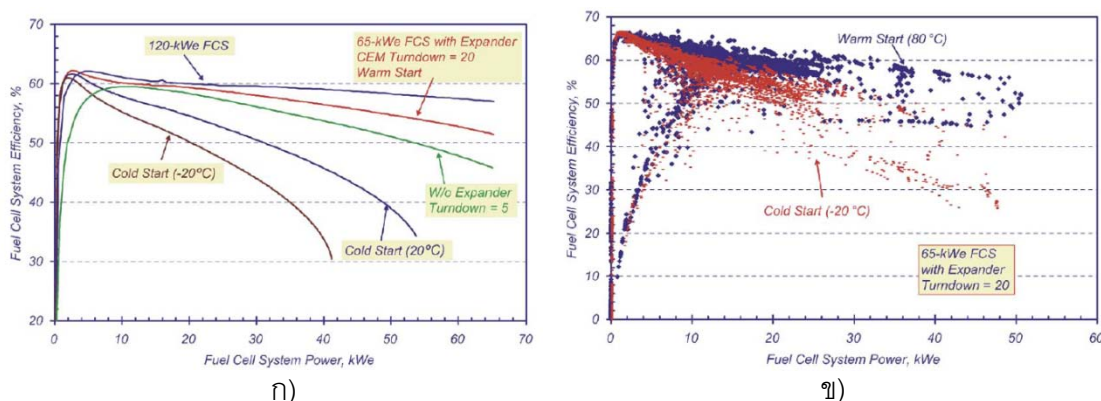
ก)



ข)

ภาพที่ 1-10 ผลการศึกษาของ Zhao ก) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในกรณีความดันย้อนกลับ (Pr) ที่เหมาะสมและมีค่าเป็น 2, 1.5 และ 1.1 บรรยากาศ

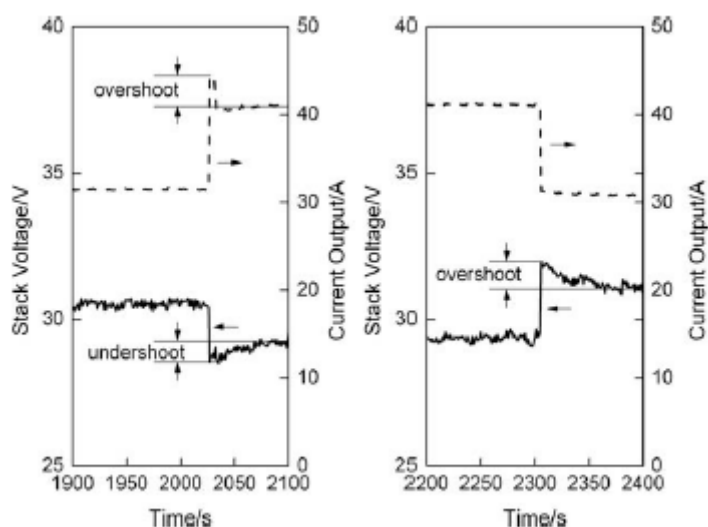
ข) การเปรียบเทียบอัตราการประหยัดเชื้อเพลิงในแต่ละวัฏจักรขับเคลื่อน [16]



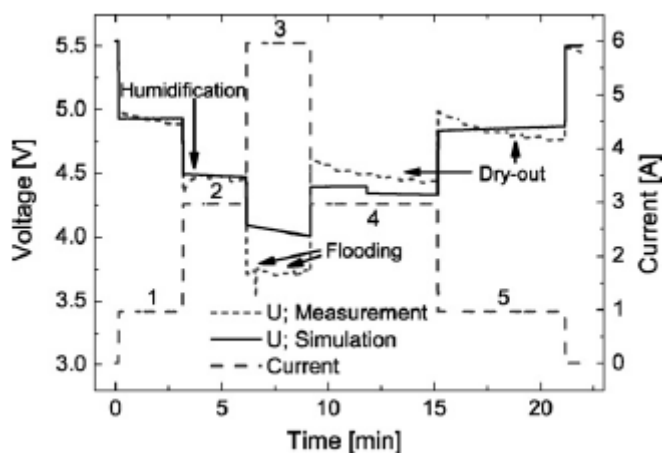
ภาพที่ 1-11 กราฟประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง ก) ในสภาวะคงตัว ข) ในสภาวะไม่คงตัว ตามวัฏจักรขับที่ FUDS ในการศึกษาของ Ahluwalia [15]

การศึกษาดังที่กล่าวมาข้างต้นระบุได้ว่าระบบเสริมที่บริโภคกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงเป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวกระจายตัวแตกต่างจากสภาวะคงตัว อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้ภาระตามวัฏจักรขับที่จากการศึกษาของ Buchi [4] ดังภาพที่ 1-9 พบว่าไม่เพียงแต่ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่กระจายตัวมากเท่านั้น แต่ยังพบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แฉกก็กระจายตัวมากเช่นเดียวกันโดยเฉพาะในช่วงภาระต่ำ ดังนั้นพฤติกรรมการตอบสนองของเซลล์แฉกต่อภาระที่ไม่คงตัว อาจเป็นสาเหตุหนึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของทั้งระบบเซลล์เชื้อเพลิงด้วยก็เป็นได้ ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยที่นำเสนอพฤติกรรมการตอบสนองของเซลล์แฉกต่อภาระในลักษณะต่างๆ ที่นอกเหนือจากภาระตามวัฏจักรขับที่ซึ่งได้แก่ ภาระแบบขั้น (step load) [17-22] และภาระแบบไซน์ (sine load) [24-28]

ผลการศึกษาพฤติกรรมของเซลล์แฉกภายใต้ภาระแบบขั้น [21] ดังภาพที่ 1-12 จากภาพเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แฉกขณะเพิ่มภาระขึ้นมีลักษณะ undershoot และขณะลดภาระลงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แฉกมีลักษณะ overshoot สาเหตุที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แฉกมีลักษณะดังกล่าวในช่วงที่เปลี่ยนแปลงภาระอย่างฉับพลันมาจากปริมาณน้ำในเมมเบรน ซึ่งจะต้องอาศัยเวลาในการปรับตัวให้มีปริมาณที่เหมาะสม ดังจะเห็นได้จากเมื่อผ่านไปช่วงระยะเวลาหนึ่งหลังจาก overshoot และ undershoot แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แฉกเริ่มปรับตัวเข้าสู่ค่าคงที่ [19,21] นอกจากนี้ขนาดของการเพิ่มหรือลดภาระที่สูงขึ้นส่งผลให้ความสูงของระยะ undershoot หรือ overshoot เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน [21] ผลการศึกษาของ Philipps [22] ดังภาพที่ 1-13 แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำในเมมเบรนส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แฉกจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า สภาวะน้ำท่วม (flooding) ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำในเมมเบรนมากเกินไป และสภาวะเซลล์แห้ง (dry-out) ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำในเมมเบรนน้อยเกินไป



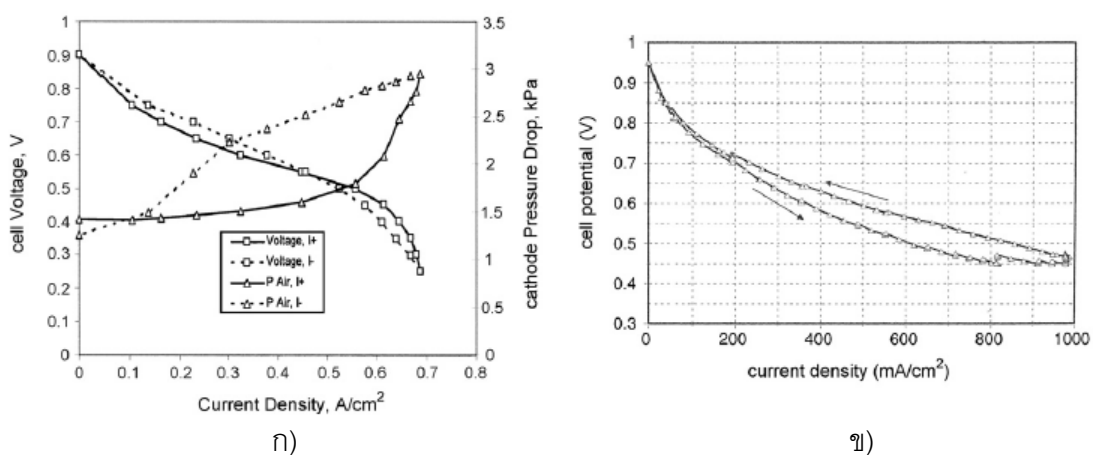
ภาพที่ 1-12 พฤติกรรม undershoot และ overshoot ของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระแบบขั้น [21]



ภาพที่ 1-13 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวในช่วงที่เกิดสภาวะน้ำท่วมและเซลล์แห้ง [22]

ผลการศึกษาพฤติกรรมของเซลล์แกวภายใต้ภาระแบบขั้น [24, 25] ดังภาพที่ 1-14 ก และ ข แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวมีลักษณะเป็นวงรอบหรือเรียกว่า hysteresis effect ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้ถึงการเกิดสภาวะน้ำท่วมในเมมเบรนและเซลล์แห้งได้ กล่าวคือ เมื่อเกิดสภาวะน้ำท่วมซึ่งสังเกตได้จากความดันตก (pressure drop) ทางด้านคาโทดเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวในช่วงลดกระแสมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงเพิ่มกระแสซึ่งพบในช่วงความหนาแน่นกระแสสูงดังภาพที่ 1-14 ก [24] ในทางตรงกันข้าม เมื่อเกิดสภาวะเซลล์แห้งซึ่งเมมเบรนต้องการน้ำมากขึ้น ดังนั้นปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นในช่วงเพิ่มกระแสจึงส่งผลดีต่อสมรรถนะของเซลล์แกว สังเกตได้จากแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวในช่วงลดกระแสมีค่าสูงกว่า

แรงดันไฟฟ้าในช่วงเพิ่มกระแส ดังภาพที่ 1-15 ข [25] นอกจากนี้ผลการศึกษาของ Talj [28] แสดงให้เห็นว่าความถี่ของการจ่ายกระแสที่แตกต่างกันส่งผลให้ hysteresis effect มีลักษณะที่ต่างกััน ซึ่งนอกจากจะมีสาเหตุมาจากปริมาณน้ำในเมมเบรนดังที่กล่าวมาแล้ว ยังมีสาเหตุจากความไวในการตอบสนองของคอมเพรสเซอร์อีกเช่นกัน



ภาพที่ 1-14 Polarization curve ที่แสดงลักษณะ hysteresis effect ของเซลล์ ก) เมื่อเกิดสภาวะน้ำท่วม [24] และ ข) เมื่อเกิดสภาวะเซลล์แห้ง [25]

การศึกษาที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว โดยในสภาวะคงตัวนั้นมีลักษณะเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งในแต่ละช่วงภาวะ แต่ในสภาวะไม่คงตัวค่าประสิทธิภาพนั้นมีการกระจายตัวไม่เป็นค่าคงที่ โดยเฉพาะการใช้งานในช่วงภาวะต่ำจะมีการกระจายตัวเป็นช่วงกว้างอย่างชัดเจน ดังนั้นการนำค่าประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัวมาใช้อ้างอิงการทำงานในสภาวะไม่คงตัวนั้นย่อมมีข้อบกพร่อง ซึ่งเห็นได้จากผลการจำลองระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่อิงค่าประสิทธิภาพในสภาวะคงตัวมีความแตกต่างจากการทดสอบจริงมากถึง 17% และยังคงแสดงให้เห็นถึงสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพในสภาวะไม่คงตัวมีการกระจายตัวไปมากนั้น เนื่องมาจากสาเหตุทั้งในส่วนของพฤติกรรมตอบสนองของเซลล์แกวต่อภาวะที่ไม่คงตัวและระบบเสริมที่บริโภคกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูง ดังนั้นจากการศึกษาต่างๆ เหล่านี้ย่อมชี้ให้เห็นแนวทางในการพัฒนาเซลล์แกวและระบบเสริมให้ดีขึ้น รวมทั้งช่วยให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้นต่อไป

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะระบุแนวทางการออกแบบระบบเสริมของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาดพิกัด 1 กิโลวัตต์ที่ออกแบบมาใช้ในยานยนต์ โดยนำแบบจำลองระบบเสริมมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและเปรียบเทียบกับผลการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมจากการทดสอบจริงทั้งในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวตามวัฏจักรขับที่

รวมทั้งระบุได้ถึงความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างการประเมินในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวตามวัฏจักรขับชี่ และระบุถึงต้นเหตุหลักของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงลดต่ำลงมากในสภาวะไม่คงตัว ในการศึกษานี้จะทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาดพิกัด 1.2 กิโลวัตต์ ที่ถูกออกแบบมาในเชิงพาณิชย์ ที่ประกอบไปด้วยระบบจ่ายไฮโดรเจน ระบบจ่ายอากาศ ระบบจัดการความร้อน และระบบควบคุม

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ระบุแนวทางการกำหนดขนาดเบื้องต้นของระบบเสริมในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาดพิกัด 1 กิโลวัตต์
2. ประเมินความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัว และไม่คงตัวตามวัฏจักรขับชี่
3. ระบุถึงระบบเสริมที่เป็นต้นเหตุหลักของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าทั้งการทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวตามวัฏจักรขับชี่ และระบุแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบดังกล่าว

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

การศึกษาการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนในวิทยานิพนธ์นี้ ดำเนินการโดยทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดพิกัด 1.2 กิโลวัตต์ ในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวตามวัฏจักรขับชี่ พร้อมทั้งแจกแจงการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมได้แก่ คอมเพรสเซอร์และชุดพัฒนาระบายอากาศ และใช้แบบจำลองระบบเสริมเป็นแนวทางในการกำหนดขนาดเบื้องต้นของระบบเสริมดังกล่าว

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานโดยสรุป

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อระบุปัญหาและข้อบกพร่องของงานวิจัยดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปเป็นหัวข้อวิจัย
2. จัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิง
3. ทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัว
4. ทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัว
5. สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แนวทางการกำหนดขนาดเบื้องต้นของระบบเสริมที่ใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในยานยนต์
2. เข้าใจพฤติกรรมในด้านประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวตามวัฏจักรขับที่
3. ทราบถึงความแตกต่างระหว่างค่าประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ประเมินในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวตามวัฏจักรขับที่
4. ระบุถึงต้นเหตุของระบบเสริมที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงได้อย่างชัดเจน พร้อมทั้งได้แนวทางในการปรับปรุงระบบเสริมดังกล่าว

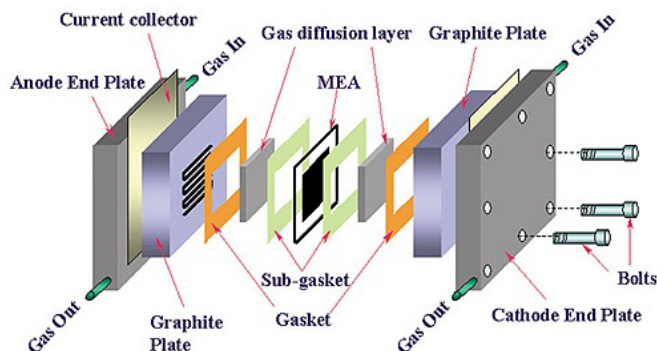
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหา 3 ส่วนหลัก ส่วนแรกมีเนื้อหาเกี่ยวกับโครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มีรายละเอียดเกี่ยวกับองค์ประกอบภายในเซลล์เดี่ยว และปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ ส่วนที่สองมีเนื้อหาเกี่ยวกับการประเมินสมมูลพลังงานในระบบเซลล์เชื้อเพลิง โดยแจกแจงอัตราพลังงานขาเข้าและออกระบบเซลล์เชื้อเพลิง และบ่งบอกแนวทางการประเมินอัตราพลังงานในแต่ละส่วนซึ่งจะช่วยให้เข้าใจบทที่ 3 ได้ดียิ่งขึ้น ส่วนสุดท้ายของบทนี้นำเสนอพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกสภาพไม่คงตัวของภาวะซึ่งจะนำไปใช้เป็นการเปรียบเทียบสภาพไม่คงตัวของภาวะที่ใช้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดแตกต่างกันได้

2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่สร้างพลังงานไฟฟ้าจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (electrochemical reaction) ภายในเมมเบรน โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นก๊าซไฮโดรเจนและตัวทำปฏิกิริยา (reactant) คือก๊าซออกซิเจนหรือใช้ก๊าซออกซิเจนในอากาศ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 60-100 องศาเซลเซียส จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานของอุปกรณ์แบบพกพา

โครงสร้างพื้นฐานภายในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบไปด้วยแผ่นเมมเบรนทำหน้าที่เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนโปรตอน หรือ อิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วยแผ่นอิเล็กโทรดด้านแอนอด (anode) และแผ่นอิเล็กโทรดด้านแคโทด (cathode) ที่มีความพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ที่มีแพลทินัม (platinum) เกาะอยู่ ส่วนทั้งหมดนี้เรียกว่าส่วนประกอบอิเล็กโทรดเมมเบรน (membrane electrode assemblies; MEA) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ถัดมาเป็นส่วนของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้ว (bipolar plate) ทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินของก๊าซและสะสมกระแสไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยาเคมี โดยมีแผ่นปะเก็น (gasket) ป้องกันการรั่วของก๊าซ ประกอบในแต่ละด้านของ MEA โดยจะเว้นช่องไว้สำหรับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (active area) ส่วนประกอบทั้งหมดนี้รวมเรียกว่าเซลล์เดี่ยว (single cell) และถัดจากแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วจะมีแผ่นปิดท้าย (end plate) ในแต่ละด้านของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเสริมความแข็งแรงอีกชั้นหนึ่ง โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์เดี่ยวแสดงดังภาพที่ 2-1

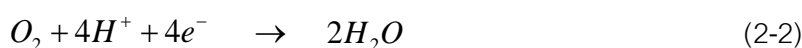


ภาพที่ 2-1 องค์ประกอบของเซลล์เดี่ยว [29]

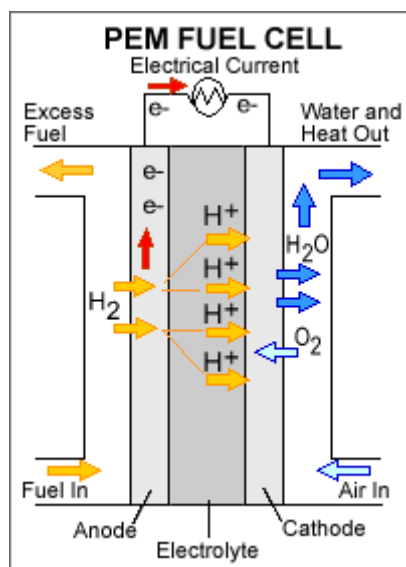
การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเริ่มจากการจ่ายก๊าซไฮโดรเจนเข้าทางแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วที่ฝั่งแอโนด และป้อนก๊าซออกซิเจนหรืออากาศเข้าสู่แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วที่ฝั่งแคโทด ที่ขั้วแอโนดก๊าซไฮโดรเจนจะไหลไปตามช่องทางไหล และมีก๊าซบางส่วนเคลื่อนที่เข้าไปยังชั้นที่มีรูพรุน เมื่อก๊าซไฮโดรเจนเดินทางมาถึงผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา จะเกิดปฏิกิริยาแยกก๊าซไฮโดรเจน เป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) และอิเล็กตรอน (e^-) ดังสมการที่ 2-1



ไฮโดรเจนไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปยังขั้วแคโทด ซึ่งเมมเบรนยอมให้เฉพาะไอออนบวกหรือโปรตอนแพร่ผ่านเท่านั้น ในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านออกไปทางชั้นที่มีรูพรุนและแผ่นสะสมกระแส ส่วนก๊าซออกซิเจนที่ถูกป้อนทางด้านขั้วแคโทด จะรวมกับอิเล็กตรอนที่ได้จากขั้วแอโนด และไฮโดรเจนไอออนที่แพร่ผ่านเมมเบรน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือน้ำดังสมการที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 แสดงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเพียงหนึ่งเซลล์ จากปฏิกิริยาดังกล่าว เซลล์เชื้อเพลิงสามารถให้ค่าแรงดันไฟฟ้าประมาณ 1 โวลต์ การเพิ่มแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำได้โดยนำเซลล์เดี่ยวมาต่ออนุกรมเข้าด้วยกันก็จะได้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2-3 เรียกเซลล์เดี่ยวที่ประกอบเข้าด้วยกันหลายๆเซลล์ว่าเซลล์แถว (stack)



ภาพที่ 2-2 แผนภาพการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน [30]

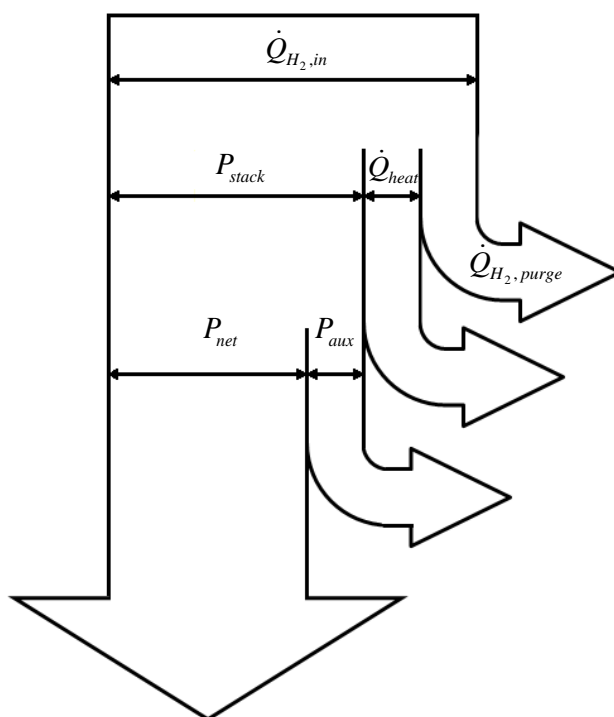


ภาพที่ 2-3 การประกอบเซลล์เชื้อเพลิงเป็นเซลล์แถว [31]

เซลล์เชื้อเพลิงจำเป็นต้องประกอบด้วยหลายระบบย่อยเพื่อการทำงานได้ เช่นระบบจ่ายไฮโดรเจน ระบบจ่ายออกซิเจน ระบบระบายความร้อน เป็นต้น เซลล์เชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยระบบย่อยดังกล่าวจะถูกเรียกว่า “ระบบเซลล์เชื้อเพลิง” สำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดซึ่งจะกล่าวไว้ในบทที่ 3

2.2 สมดุลพลังงานในระบบเซลล์เชื้อเพลิง

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงใช้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเพื่อผลิตเป็นกำลังไฟฟ้าและเกิดเป็นความร้อนสูญเสียออกจากเซลล์เชื้อเพลิง ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจำเป็นต้องทราบอัตราพลังงานเข้าและออกจากระบบเซลล์เชื้อเพลิง โดยส่วนใหญ่นิยมแสดงสมดุลพลังงานเข้าและออกด้วยแผนภาพ Sankey [3] สำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้แจกแจงสมดุลพลังงานเข้าและออกจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงออกเป็น ส่วนต่างๆ ดังนี้ อัตราพลังงานเข้าประเมินได้จากค่าความร้อนของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เข้าสู่ระบบ ($\dot{Q}_{H_2, in}$) อัตราพลังงานขาออกแบ่งออกเป็นสามส่วน ส่วนแรกคืออัตราพลังงานที่สูญเสียจากปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา ($\dot{Q}_{H_2, purge}$) ส่วนที่สองคืออัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบเซลล์เชื้อเพลิง (\dot{Q}_{heat}) ส่วนสุดท้ายคือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แถว (P_{stack}) ซึ่งกำลังไฟฟ้าในส่วนนี้จะต้องจ่ายให้กับระบบเสริมที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้า (P_{aux}) และส่วนที่เหลือจึงเป็นกำลังไฟฟ้าสุทธิ (P_{net}) โดยสามารถแจกแจงเป็นแผนภาพ Sankey ได้ดังภาพที่ 2-4 และแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2-3



ภาพที่ 2-4 แผนภาพ Sankey ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย

$$\dot{Q}_{H_2, in} = \dot{Q}_{H_2, purge} + \dot{Q}_{heat} + P_{stack} \quad (2-3)$$

ในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงสมการพื้นฐานที่จำเป็นในการประเมินสมมูลพลังงานในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งแบ่งออกเป็นการประเมินอัตราพลังงานเข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิง อัตราพลังงานที่สูญเสียจากก๊าซไฮโดรเจนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบเซลล์เชื้อเพลิง และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แกว โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 อัตราพลังงานที่เข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิง

อัตราพลังงานที่เข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถประเมินได้จากค่าความร้อนของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาดังสมการที่ 2-4 [32]

$$\dot{Q}_{H_2,in} = \dot{m}_{H_2,in} LHV_{H_2} \quad (2-4)$$

เมื่อ LHV_{H_2} คือ ค่าความร้อนต่ำ (lower heating value) ของก๊าซไฮโดรเจน (J/kg) และ $\dot{m}_{H_2,in}$ คือ อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่เข้าสู่ระบบ (kg/s) โดยสามารถเก็บค่าอัตราการบริโภคไฮโดรเจนได้จากซอฟต์แวร์ NexaMon ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์จากบริษัทผู้ผลิต อย่างไรก็ตามในการทดสอบเบื้องต้นผู้วิจัยพบว่าค่าอัตราการการบริโภคไฮโดรเจนที่แสดงผลในซอฟต์แวร์นั้นประสบปัญหาเรื่องความละเอียดของการแสดงผล ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ดังนั้นผู้วิจัยจึงประเมินอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนจากสมการที่ 2-5 [4]

$$\dot{m}_{H_2,in} = \frac{N_{cell} I_{st}}{2F} \quad (2-5)$$

เมื่อ N_{cell} คือ จำนวนเซลล์แกวในที่นี่คือ 47 [32] I_{st} คือ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แกว (A) และ F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ 96,485 C/mol

2.2.2 อัตราพลังงานที่สูญเสียจากก๊าซไฮโดรเจนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา

ในการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะมีก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา และบางส่วนไม่ได้ทำปฏิกิริยา ซึ่งถูกปล่อยออกทางวาล์วไล่ก๊าซ (purge valve) โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ของสมมูลมวลก๊าซไฮโดรเจนได้ดังสมการที่ 2-5

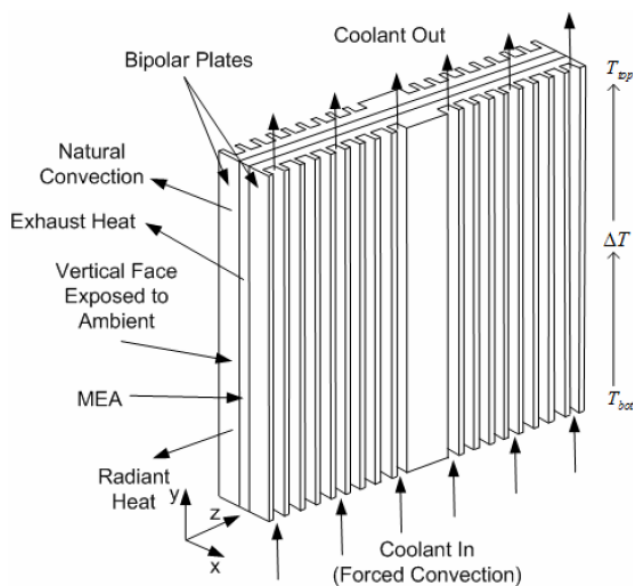
$$\dot{m}_{H_2,in} = \dot{m}_{H_2,react} + \dot{m}_{H_2,purge} \quad (2-5)$$

เมื่อ $\dot{m}_{H_2,react}$ คือ อัตราการไหลของไฮโดรเจนที่เข้าทำปฏิกิริยา (kg/s) และ $\dot{m}_{H_2,purge}$ คือ อัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา (kg/s)

อย่างไรก็ตามในหลายงานวิจัย [32-34] ได้ละทิ้งการพิจารณาอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา เนื่องจากมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่เข้าทำปฏิกิริยา (ไม่เกิน 1% ของอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่เข้าทำปฏิกิริยา [35]) รวมทั้งการวัดอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาทำได้ยาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ละทิ้งผลในส่วนนี้

2.2.3 อัตราการถ่ายเทความร้อน

หลายงานวิจัย [8,32,33] ได้ให้แนวทางในการประเมินการถ่ายเทความร้อนในระบบเซลล์เชื้อเพลิง ดังเช่นงานวิจัยของ Thomas [32] ได้ประเมินอัตราการถ่ายเทความร้อน (\dot{Q}_{heat}) ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA ดังภาพที่ 2-5 โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนได้แก่ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพาโดยธรรมชาติ (\dot{Q}_{nat}) อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี (\dot{Q}_{rad}) อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการระบายด้วยอากาศหล่อเย็น (\dot{Q}_{cool}) และอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ปล่อยออกจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงจากอากาศข้างที่ (\dot{Q}_{ex}) แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2-6 [32]



ภาพที่ 2-5 แผนภาพอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วในระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA [32]

$$\dot{Q}_{heat} = \dot{Q}_{nat} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{cool} + \dot{Q}_{ex} \quad (2-6)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อน (\dot{Q}_{heat}) สามารถประเมินได้จากผลต่างระหว่างอัตราพลังงานเข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิง ($\dot{Q}_{H_2,in}$) และกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แถวผลิตได้ (P_{stack}) (ในที่นี้ละทิ้งผลของ

อัตราพลังงานที่สูญเสียออกจากก๊าซไฮโดรเจนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา) ดังสมการที่ 2-7 [32] โดยที่อัตราพลังงานขาเข้านั้นสามารถประเมินได้จากสมการที่ 2-4 และกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แถวผลิตได้นั้นประเมินได้จากวัดโดยตรง

$$\dot{Q}_{heat} = \dot{Q}_{H_2, in} - P_{stack} \quad (2-7)$$

อย่างไรก็ตามจากสมการที่ 2-6 พบว่าการประเมินอัตราการถ่ายเทความร้อนให้ครบทุกส่วนนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากจะต้องติดตั้งอุปกรณ์การวัดเพิ่มในหลายตำแหน่ง และผลการศึกษาของ Thomas [32] ได้ระบุว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพาโดยธรรมชาติ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี และอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ปล่อยออกจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงจากอากาศขาที่ง คิดเป็นประมาณ 4.2% เมื่อเทียบกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการระบายด้วยอากาศหล่อเย็น ซึ่งพบว่ามีค่าน้อยมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาให้อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดเท่ากับอัตราความร้อนจากการระบายด้วยอากาศหล่อเย็นเพียง โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการระบายด้วยอากาศหล่อเย็นประเมินได้จาก [9,32]

$$\dot{Q}_{cool} = \dot{m}_{air, cool} c_p (T_{cool, out} - T_{amb}) \quad (2-8)$$

เมื่อ $\dot{m}_{air, cool}$ คือ อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็น (kg/s) c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอากาศ (J/kg K) $T_{cool, out}$ คือ อุณหภูมิขาออกของอากาศหล่อเย็น (K) และ T_{amb} คือ อุณหภูมิบรรยากาศ (K)

สำหรับอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นสามารถประเมินได้จากการจัดรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดและอัตราความร้อนจากการระบายด้วยอากาศหล่อเย็นจากสมการที่ 2-7 และ 2-8 ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นประเมินได้จากสมการที่ 2-9 [8, 25] ซึ่งอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นนี้จะนำไปใช้ประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัฒนาระบายอากาศจากระบบการไอเซนทรอปิก โดยจะกล่าวในบทที่ 5

$$\dot{m}_{air, cool} = \frac{\dot{Q}_{heat}}{c_p (T_{cool, out} - T_{amb})} = \frac{\dot{Q}_{H_2, in} - P_{stack}}{c_p (T_{cool, out} - T_{amb})} \quad (2-9)$$

2.2.4 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แกว

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แกว (P_{stack}) ส่วนหนึ่งจะจ่ายให้กับระบบเสริมที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้า (P_{aux}) ส่วนที่เหลือคือกำลังไฟฟ้าสุทธิ (P_{net}) โดยสามารถประเมินได้จากการวัดโดยตรง และแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$P_{stack} = P_{aux} + P_{net} \quad (2-10)$$

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถจำแนกการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมได้เป็นสามส่วน ซึ่งประกอบไปด้วย การบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ (P_{comp}) การบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศ (P_{blower}) และการบริโภคกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์อื่นๆ (P_{others}) ซึ่งได้แก่ แผงควบคุมไฟฟ้าและโซลินอยด์วาล์ว โดยแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2-11 [33] ในส่วนของรายละเอียดของอุปกรณ์และวิธีการวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมทั้งหมดจะแสดงไว้ในภาคผนวก ก

$$P_{aux} = P_{comp} + P_{blower} + P_{others} \quad (2-11)$$

จากการประเมินสมดุลพลังงานเข้าและออกระบบเซลล์เชื้อเพลิงดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมด จากหัวข้อที่ 2.2.1 ถึง 2.2.4 สามารถประเมินค่าประสิทธิภาพของเซลล์แกว และระบบเซลล์เชื้อเพลิงได้จากสมการที่ 2-12 และ 2-13 ตามลำดับ

$$\eta_{stack} = \frac{P_{stack}}{\dot{m}_{H_2, in} (LHV_{H_2})} \quad (2-12)$$

$$\eta_{system} = \frac{P_{net}}{\dot{m}_{H_2, in} (LHV_{H_2})} \quad (2-13)$$

2.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในรูปพารามิเตอร์ไร้มิติ

ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 งานวิจัยจำนวนมากศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัว โดยเฉพาะการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงในยานยนต์ที่มีสภาวะไม่คงตัวค่อนข้างมากกว่าการใช้งานในครัวเรือน ซึ่งส่งผลให้พฤติกรรมการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีความแตกต่างไปจากการทำงานในสภาวะคงตัว อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยส่วนหนึ่งให้แง่มุมที่น่าสนใจในการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวที่นอกเหนือไปจากการอ้างอิงภาวะตามวัฏจักรขับซึ่งได้แก่ภาวะแบบขึ้น [17-22] และภาวะแบบ

ไซน์ [23-28] ผลการศึกษาภายใต้ภาวะแบบขั้น [17] และผลการศึกษาภายใต้ภาวะแบบไซน์ [28] สามารถระบุได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงมีพฤติกรรมตอบสนองที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่บ่งบอกสภาพไม่คงตัวของภาวะ ได้แก่ ขนาดของการจ่ายกระแส (current step size) และความถี่ของการจ่ายกระแส (current frequency) ตามลำดับ โดยภาวะแบบขั้นที่มีขนาดของการจ่ายกระแส มาก บ่งบอกได้ว่าภาวะแบบขั้นนั้นย่อมมีสภาพไม่คงตัวมากกว่าภาวะแบบขั้นที่มีขนาดของการจ่ายกระแส น้อยกว่า ในทำนองเดียวกันกับภาวะแบบไซน์ที่มีความถี่ของการจ่ายกระแสสูง ย่อมมีสภาพไม่คงตัวมากกว่าภาวะแบบไซน์ที่มีความถี่ของการจ่ายกระแสต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม พารามิเตอร์ดังกล่าวใช้บ่งบอกสภาพไม่คงตัวได้จำกัดเฉพาะเพียงภาวะแบบขั้นและภาวะแบบไซน์ เท่านั้น ถ้าเป็นภาวะลักษณะอื่นๆ เช่น ภาวะตามวัฏจักรขับชี้ พารามิเตอร์ดังกล่าวไม่อาจใช้บ่งชี้ สภาพไม่คงตัวได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกสภาพไม่คงตัวของภาวะในรูป ของอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (power slew rate, dP/dt) โดยทำให้อยู่ในรูปของ พารามิเตอร์ไร้มิติดังนิยาม

$$\tau_p^* = \left(\frac{dP}{dt} \right) \left(\frac{\tau_s}{P_{rated}} \right) \quad (2-14)$$

เมื่อ τ_p^* คือ normalized power slew rate (ต่อไปนี้จะใช้การย่อจาก normalized power slew rate เป็น n-slew rate) dP/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (W/s) τ_s คือ time scale ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง (s) และ P_{rated} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้ (W)

จากสมการที่ 2-14 power slew rate สามารถทำให้อยู่ในรูปพารามิเตอร์ไร้มิติได้จากการ ดำเนินการด้วยพารามิเตอร์สองตัว พารามิเตอร์ตัวแรกคือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิง สามารถจ่ายได้ ซึ่งจะทำให้ n-slew rate สามารถใช้อ้างอิงได้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาด กำลังไฟฟ้าแตกต่างกันได้ พารามิเตอร์ตัวที่สองคือ time scale เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึง ระยะเวลาการตอบสนองต่อสภาวะไม่คงตัวของระบบเซลล์เชื้อเพลิง โดยแบ่งออกเป็นสามประเภท [36-39] ได้แก่ time scale ในเชิงไฟฟ้า (electrical time scale) time scale ในเชิงการส่งถ่ายก๊าซ และน้ำ (gas and water transport time scale) และ time scale ในเชิงความร้อน (thermal time scale)

เมื่อพิจารณาระยะเวลาการตอบสนองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจาก time scale ดังกล่าว นั้นพบว่า time scale ในเชิงความร้อนมีความสัมพันธ์กับค่าความจุความร้อน (thermal capacitance) ของเซลล์แกว ซึ่งใช้เวลานานที่สุด (ประมาณ 100 วินาที) [18] time scale

เชิงไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับความจุทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical capacitance) ในแผ่นเยื่อสองชั้น (double-layer) ของเซลล์ ซึ่งใช้ระยะเวลาค่อนข้างเร็ว (ประมาณ 0.1 วินาที) และ time scale ในเชิงการส่งถ่ายก๊าซและน้ำมีความสัมพันธ์กับการแพร่ของก๊าซและน้ำผ่านเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 0.1 ถึง 10 วินาที [36] ดังนั้นในการพิจารณา time scale ของการตอบสนองต่อสภาวะไม่คงตัวในการศึกษานี้จึงพิจารณาเฉพาะ time scale ในเชิงการส่งถ่ายก๊าซและน้ำเท่านั้นดังสมการที่ 2-15 [36]

$$\tau_s = \frac{(\rho \delta_m \Delta \lambda) / EW}{I / 2F} \quad (2-15)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของเมมเบรน (kg/m^3), δ_m คือ ความหนาของเมมเบรน (mm), $\Delta \lambda$ คือ ปริมาณน้ำในเมมเบรน, EW คือ น้ำหนักโมเลกุลของเมมเบรน (kg/mol), I คือ ความหนาแน่นกระแสสูงสุด (A/cm^2) และ F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ $96,485 \text{ C/mol}$

การศึกษานี้กำหนดให้ time scale ในเชิงการขนส่งก๊าซและน้ำมีค่าเท่ากับ 1 วินาที [36] เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2-15 จะเห็นได้ว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เมมเบรนชนิดเดียวกันและมีความหนาแน่นกระแสสูงสุดเท่ากันย่อมมี time scale ในเชิงการส่งถ่ายก๊าซและน้ำเท่ากัน จึงบ่งบอกได้ว่า n-slew rate สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกสภาพไม่คงตัวของภาวะที่สามารถอ้างอิงได้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงทุกขนาด อย่างไรก็ตามสมมติฐานดังกล่าวจะพิสูจน์ให้เห็นจากการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวโดยอ้างอิงภาวะแบบไซน์ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดวิธีการทดสอบในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4.2 และผลการทดสอบในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.2.1

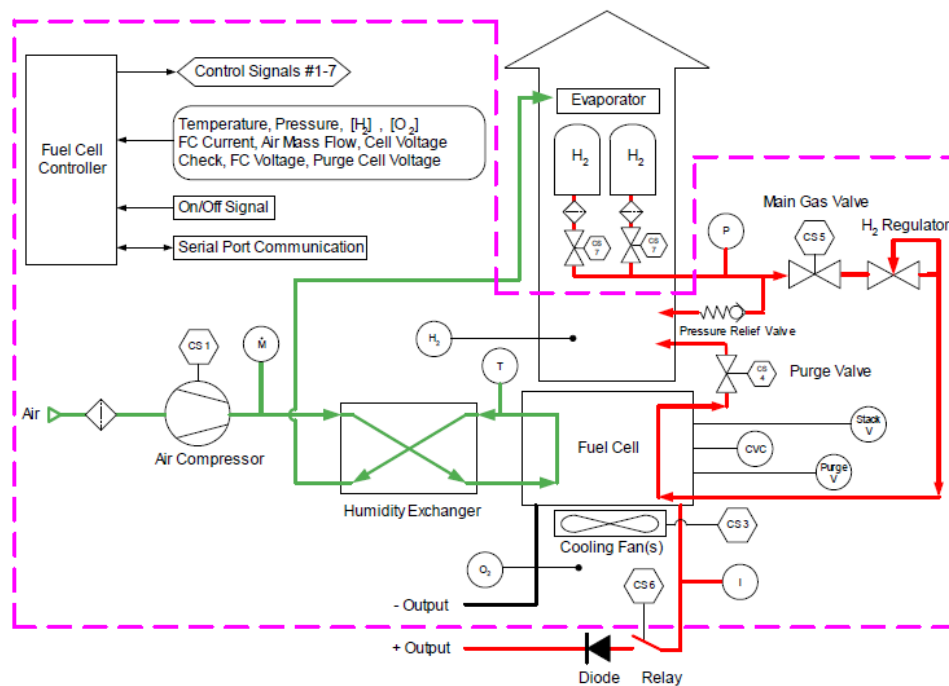
บทที่ 3

การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิง

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยรายละเอียดของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยรวมถึงหน้าที่ของระบบเสริมแต่ละระบบ การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองและอุปกรณ์การวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้า และขั้นตอนการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนรุ่น NEXA ของบริษัท Ballard มีขนาดพิกัด 1.2 กิโลวัตต์ ใช้อากาศและไฮโดรเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา ระบายความร้อนด้วยอากาศและใช้น้ำจากปฏิกิริยาในเซลล์กลับมาสร้างความชื้นให้อากาศที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจึงไม่ต้องอาศัยน้ำจากแหล่งอื่น จึงเหมาะกับการใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับระบบขับเคลื่อนในยานยนต์ ระบบเซลล์เชื้อเพลิงมาพร้อมชุดระบบเสริมที่ประกอบไปด้วย ระบบจ่ายไฮโดรเจน ระบบจ่ายอากาศ ระบบระบายความร้อน และระบบควบคุม ดังภาพที่ 3-1 โดยลักษณะเฉพาะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงนี้แสดงในตารางที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 แผนผังระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA [35]

ตารางที่ 3-1 ลักษณะเฉพาะของระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA [35]

OUTPUTS	Requirement	Definition	Quantity
Power	Rated Power	Capacity at Standard Conditions, BOL	1200 W
	Voltage	Operating voltage range	22 V to 50 V
		Voltage at Rated Power	26 V
	Start-up Time	Minimum time to achieve Rated Power from a Cold Start condition	2 minutes
Physical	Dimensions	L x W x H	56 x 25 x 33cm
	Mass	Total system mass	13 kg
INPUTS	Requirement	Definition	Quantity
fuel	Purity	Lowest acceptable concentration of hydrogen	99.99% H ₂ (vol)
	Pressure	Allowable range of inlet supply pressure	70 – 1720 kPa(g)
	Consumption	Maximum fuel consumption at Rated Power	<18.5 SLPM
DC Power Supply	Voltage	Allowable range of input voltage	18 V to 30 V
	Power	Maximum power draw during start-up	60 W
Operating Environment	Location	Acceptable locations for use	Indoors & Outdoors
	Temperature Range	Range of acceptable ambient, cooling air and oxidant air temperatures	3°C - 40°C
	Relative Humidity	Range of acceptable ambient relative humidity	0% - 95% (non-condensing)

3.1.1 ระบบจ่ายไฮโดรเจน

ระบบจ่ายไฮโดรเจนทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายก๊าซจากภาชนะบรรจุมายังเซลล์เชื้อเพลิงให้ได้ปริมาณที่พอเหมาะ นอกจากนั้นในระบบระบบจ่ายไฮโดรเจนยังมีโซลีนอยด์วาล์วทำหน้าที่ปิดกั้นระหว่างภาชนะบรรจุกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงในกรณีที่ไม่ได้เดินเครื่อง และมีวาล์วไล่ก๊าซทำหน้าที่ระบายก๊าซไฮโดรเจนส่วนเกินจากปฏิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง โดยมีเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนส่วนเกินที่ระบายออกเพื่อตรวจวัดและแจ้งเตือนเมื่อมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนมากจนถึงค่าที่กำหนดและหยุดการทำงานของระบบเพื่อป้องกันการติดไฟของก๊าซไฮโดรเจน

3.1.2 ระบบจ่ายอากาศ

ระบบจ่ายอากาศทำหน้าที่ควบคุมการไหลของอากาศที่ไหลเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงให้เหมาะสมตามความต้องการกระแสไฟฟ้าโดยการควบคุมความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์ โดยมีเซ็นเซอร์ตรวจวัดอัตราการไหลเพื่อให้ความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์นั้นมีความเหมาะสม อากาศที่ไหลเข้าระบบต้องผ่านกรองอากาศเพื่อป้องกันอุปกรณ์เสียหาย นอกจากนี้อากาศต้องไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความชื้น ซึ่งใช้ไอน้ำที่ได้จากปฏิกิริยากลับมาเพิ่มความชื้นให้อากาศเพื่อให้ภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีความชื้นที่เหมาะสม และไอน้ำส่วนที่เกินถูกระบายออกสู่บรรยากาศ

3.1.3 ระบบจัดการความร้อน

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชุดนี้ใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิของเซลล์แถวให้ไม่เกิน 65°C ด้วยการควบคุมความเร็วรอบของพัดลม อุณหภูมิของเซลล์แถววัดได้จากอุณหภูมิของอากาศส่วนที่ระบายออกจากการทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้ชุดพัดลมระบายความร้อนยังช่วยเจือจางก๊าซไฮโดรเจนส่วนเกินที่ระบายออกเพื่อป้องกันอันตรายจากการติดไฟ

3.1.4 ระบบควบคุม

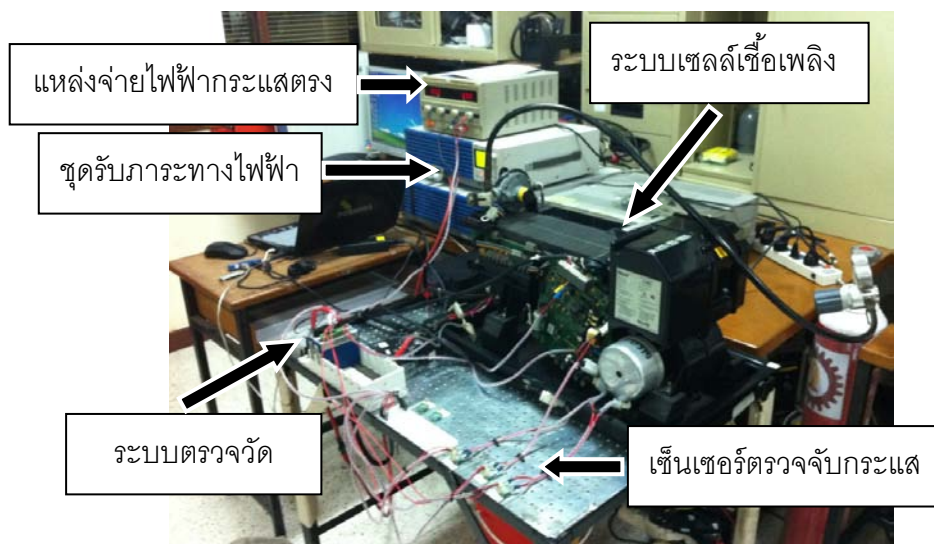
การทำงานของอุปกรณ์ภายในระบบเสริมต่าง ๆ นั้นควบคุมโดยแผงควบคุม ซึ่งควบคุมการทำงานโดยวัดค่าต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง ความดันของก๊าซไฮโดรเจน ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนที่ถูกระบายออกสู่บรรยากาศ กระแสไฟฟ้า อัตราการไหลของอากาศ และแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ ระบบควบคุมจะแจ้งเตือนหากมีค่าที่วัดได้ไม่เหมาะสมและหยุดการทำงานเพื่อป้องกันความเสียหาย นอกจากนี้ก็มีการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในอากาศเพื่อรักษาสภาวะในบริเวณทำงาน

3.2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

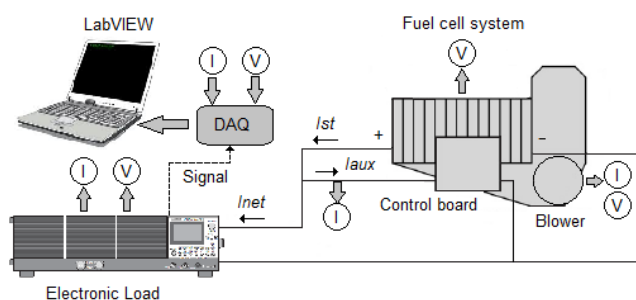
การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ทั้งในส่วนของอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิง และอุปกรณ์การวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริม โดยแสดงดังภาพที่ 3-2 ในการทำงาน ระบบเซลล์เชื้อเพลิงต้องเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แหล่งจ่ายเชื้อเพลิงซึ่งใช้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ 99.999% และชุดรับภาระทางไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการจำลองภาระในรูปแบบต่างๆ ให้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิง ชุดรับภาระทางไฟฟ้าที่ใช้ใน

การทดสอบนี้เป็นรุ่น PLZ 1004W จากผู้ผลิต Kikusui พิกัด 1 กิโลวัตต์ และทำงานร่วมกับชุดเพิ่มภาระทางไฟฟ้า (load booster) รุ่น PLZ 2004WB พิกัด 2 กิโลวัตต์ ทำให้พิกัดรวมอยู่ที่ 3 กิโลวัตต์ โดยรายละเอียดของชุดรับภาระทางไฟฟ้าแสดงในภาคผนวก ก

ระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA มีอุปกรณ์วัดค่าที่จำเป็นต่อการทำงานที่ติดตั้งมาพร้อมกับตัวระบบเซลล์เชื้อเพลิงเอง โดยอุปกรณ์เหล่านี้สั่งการด้วยแผงควบคุมที่เชื่อมต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลการทำงานที่สำคัญของระบบเซลล์เชื้อเพลิงดังตารางที่ ก-1 ในภาคผนวก ก ผ่านทางซอฟต์แวร์ NexaMon ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำเร็จรูปจากทางบริษัทผู้ผลิต อย่างไรก็ตามในการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมนั้นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์การวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าเพิ่มเติมในบางตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 3-3 (รายละเอียดตำแหน่งการวัดแสดงในภาคผนวก ก) อุปกรณ์การวัดกระแสใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับกระแสรุ่น ACS 714 สามารถวัดกระแสได้ในย่าน ± 30 แอมแปร์ และเชื่อมต่อสัญญาณทั้งหมดเข้าสู่ระบบตรวจวัด (data acquisition, DAQ) ที่สามารถบันทึกค่าเข้าสู่คอมพิวเตอร์ผ่านทางโปรแกรม LabVIEW สัญญาณดังกล่าวสามารถเทียบเวลา (synchronize) ให้ตรงกับค่าภาระที่กำหนดจากชุดรับภาระทางไฟฟ้าได้โดยการเชื่อมต่อสัญญาณ trigger จากชุดรับภาระทางไฟฟ้าเข้าสู่ระบบตรวจวัดอัตโนมัติ รายละเอียดอุปกรณ์การวัดทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นแสดงในภาคผนวก ข



ภาพที่ 3-2 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิง



ภาพที่ 3-3 แผนผังตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า

จากการทดสอบเบื้องต้นในภาคผนวก ข สามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์เสริมที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงคือ คอมเพรสเซอร์ รองลงมาคือชุดพัดลมระบายอากาศ คิดเป็น 66% และ 25% ของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบเสริมตามลำดับ ดังนั้นการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาการบริโภคกำลังไฟฟ้าเฉพาะคอมเพรสเซอร์ และชุดพัดลมระบายอากาศเพียงสองอุปกรณ์นี้เท่านั้น

3.3 การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัว

เพื่อให้ได้ข้อมูลการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัวเพื่อเปรียบเทียบกับการทำงานในสภาวะไม่คงตัว การศึกษานี้จะได้ทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้สภาวะคงตัว ขั้นตอนการทดสอบโดยสังเขป เริ่มจากเชื่อมต่อระบบเซลล์เชื้อเพลิงเข้ากับแหล่งจ่ายไฟภายนอก ภาระทางไฟฟ้า และแหล่งจ่ายไฮโดรเจน จากนั้นปรับค่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟภายนอกที่ 24 โวลต์ แหล่งจ่ายไฟภายนอกเริ่มจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับแผงควบคุม ทำให้อุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติและเซ็นเซอร์ เริ่มทำการตรวจวัดค่า และส่งสัญญาณกลับมาสู่แผงควบคุมเพื่อส่งเป็นข้อมูลแสดงผลในหน้าจอซอฟต์แวร์ NexaMon ถ้าซอฟต์แวร์ไม่แสดงข้อมูลความผิดพลาดของระบบเซลล์เชื้อเพลิง จึงสามารถเริ่มการทำงานได้ โดยเริ่มจากปรับความดันของไฮโดรเจนที่ 3 บาร์ เปิดสวิตช์เริ่มการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง Run สวิตช์จะส่งสัญญาณ 5 โวลต์มายังแผงควบคุม และสั่งการให้ไฮโดรเจนโซลินอยด์วาล์วเริ่มจ่ายไฮโดรเจนเข้าทางด้านแอนโนด วาล์วไถ่ก๊าซทำหน้าที่ไถ่ก๊าซที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเช่นไนโตรเจนที่ตกค้างอยู่ออกจากระบบ คอมเพรสเซอร์เริ่มจ่ายอากาศเข้าทางด้านคาโทด และชุดพัดลมระบายอากาศทำงาน เพื่อระบายความร้อนให้กับเซลล์ แถวและเจ็อบางก๊าซไฮโดรเจนที่ถูกปล่อยออกทางวาล์วไถ่ก๊าซ ในช่วงนี้อุปกรณ์ทั้งหมดที่ได้กล่าวมาทำงาน โดยอาศัยกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟภายนอก เป็นระยะเวลาประมาณ 10 วินาที เมื่อปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้น เซลล์แถวสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ แผงควบคุมจะตัดการใช้

กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟภายนอกมาเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แกวในการจ่ายให้กับระบบเสริม

เมื่อระบบทุกอย่างทำงานได้โดยไม่เกิดข้อผิดพลาด จึงเริ่มให้เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาระในการทดสอบที่สภาวะคงตัวนี้จะทำการปรับระดับภาระทั้งหมด 12 ระดับ เริ่มจาก 100 วัตต์ จนถึงภาระสูงสุดคือ 1200 วัตต์ เมื่อเริ่มให้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาระ คอมเพรสเซอร์เริ่มทำงานที่รอบสูงขึ้น เพื่อจ่ายอากาศให้เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา ชุดพัฒนาระบายอากาศทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเซลล์แกวให้มีค่าไม่เกิน 65°C โดยทำงานในรอบที่สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แกวมีค่าเพิ่มขึ้น ในแต่ละภาระใช้เวลาประมาณ 180-300 วินาที เซลล์แกวจะเริ่มมีอุณหภูมิแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จึงเริ่มเก็บข้อมูล

เมื่อเสร็จขั้นตอนการจ่ายภาระแล้ว จึงปลดภาระทางไฟฟ้า และปรับสวิตช์ไปที่ Stop ระบบเซลล์เชื้อเพลิงยังไม่หยุดการทำงานโดยทันที ชุดพัฒนาระบายอากาศทำงานที่ความเร็วรอบสูงขึ้น เพื่อระบายความร้อนให้กับเซลล์แกว วาล์วไต่ก๊าซทำงานเป็นจังหวะเพื่อไล่ก๊าซไฮโดรเจนที่ตกค้างออก คอมเพรสเซอร์ทำงานที่รอบสูงขึ้นเพื่อไล่ไอน้ำที่ตกค้างในช่องการไหล ในช่วงนี้จะใช้กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟภายนอก รอจนกระทั่งอุปกรณ์ทุกอย่างหยุดทำงาน ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจึงหยุดทำงาน

3.4 การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัว

การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัว เป็นการทดสอบที่ให้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาระที่ไม่คงตัวที่มีการเพิ่มหรือลดการจ่ายกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานเพียงอย่างเดียว โดยไม่ได้ทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิเช่น แบตเตอรี่หรือตัวเก็บประจุความจุสูง เนื่องจากในการกำหนดขนาดของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในรถยนต์เช่นรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงไฮบริดรุ่น FCX จาก Honda และ FCHV จาก Toyota จะกำหนดให้มีพิกัดกำลังเท่ากับกำลังของมอเตอร์ เพื่อให้สามารถรองรับการขับขีได้ทุกรูปแบบ โดยไม่ให้ความสำคัญกับขนาดของแหล่งจ่ายพลังงานทุติยภูมิมากนัก [2]

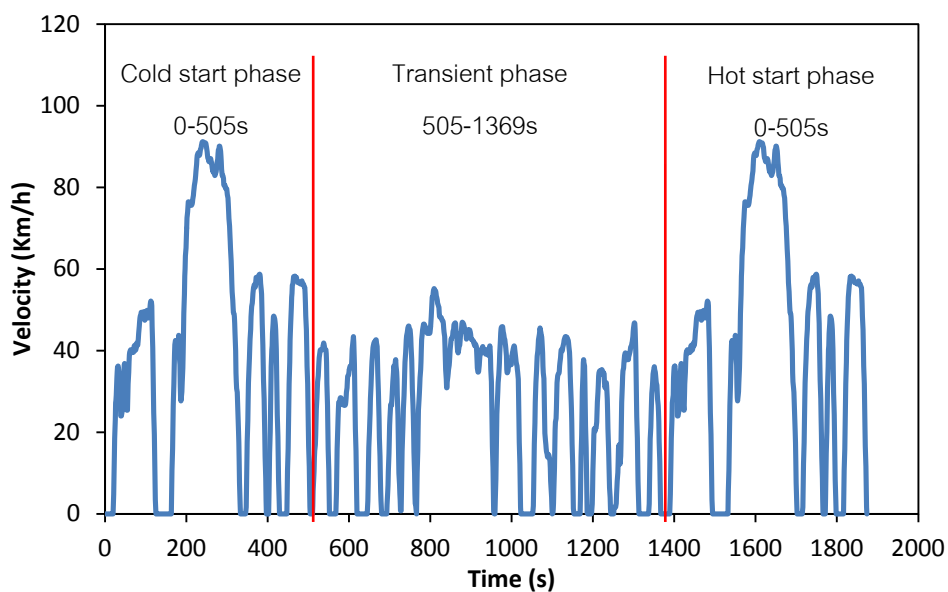
3.4.1 การกำหนดภาระตามวัฏจักรขับขี่

การทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสถานะไม่คงตัวในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงการใช้งานระบบเซลล์เชื้อเพลิงในยานยนต์ ซึ่งนิยมใช้ภาระตามวัฏจักรขับขี่เป็นตัวแทนภาระในการขับเคลื่อน วัฏจักรขับขี่เป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงความเร็วของรถในช่วงเวลาต่างๆ ที่มีการเร่ง ชะลอ และหยุดในอัตราที่แตกต่างกัน โดยมากวัฏจักรขับขี่ใช้ในการทดสอบมลพิษจากรถยนต์หรือใช้ทดสอบอัตราการใช้งานน้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์โดยทดสอบบนเครื่องไดนาโมมิเตอร์ นอกจากนี้วัฏจักรขับขี่ในแต่ละประเทศยังแตกต่างกันไป เนื่องจากลักษณะของการจราจรที่แตกต่างกันไปในแต่ละเมือง หรือวิธีการสร้างที่แตกต่างกันเช่น สร้างจากการคำนวณทางทฤษฎีหรือสร้างจากการวัดด้วยการขับขี่จริง เป็นต้น

เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถสรุปผลได้อย่างครอบคลุมการขับขี่ในลักษณะต่างๆ มากที่สุด จึงเลือกใช้วัฏจักรทดสอบ 4 รูปแบบได้แก่ 1) วัฏจักรทดสอบ modified FTP75 นำมาใช้เฉพาะส่วน transient เนื่องจากมีความเร็วที่ไม่สูงเกินไป และมีรูปแบบเป็นวัฏจักรที่มีการเร่งความเร็วสูงและบ่อยครั้งสลับกับการจอดหยุดนิ่งเพียงช่วงเวลาสั้นๆ 2) วัฏจักร ECE15 เป็นวัฏจักรที่ถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของการขับขี่ในเมืองของประเทศในยุโรป ซึ่งมีลักษณะที่ใช้ความเร็วค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับวัฏจักรขับขี่ทดสอบในเมืองอื่นๆ 3) วัฏจักร NYCC เป็นวัฏจักรขับขี่ทดสอบที่ถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของการขับขี่ในเมืองนิวยอร์ก รูปแบบนี้มีลักษณะที่ใช้ความเร็วในการขับขี่ต่ำ แต่มีการเร่งความเร็วที่สูงมากและบ่อยครั้ง และช่วงการจอดหยุดนิ่งที่ยาวนาน และ 4) วัฏจักร HWFET เป็นวัฏจักรที่อ้างอิงการขับขี่บนถนนไฮเวย์ที่ใช้ความเร็วสูงต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยข้อมูลเบื้องต้นของวัฏจักรขับขี่ทั้งสี่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1.1 วัฏจักรขับขี่ Federal Test Procedure

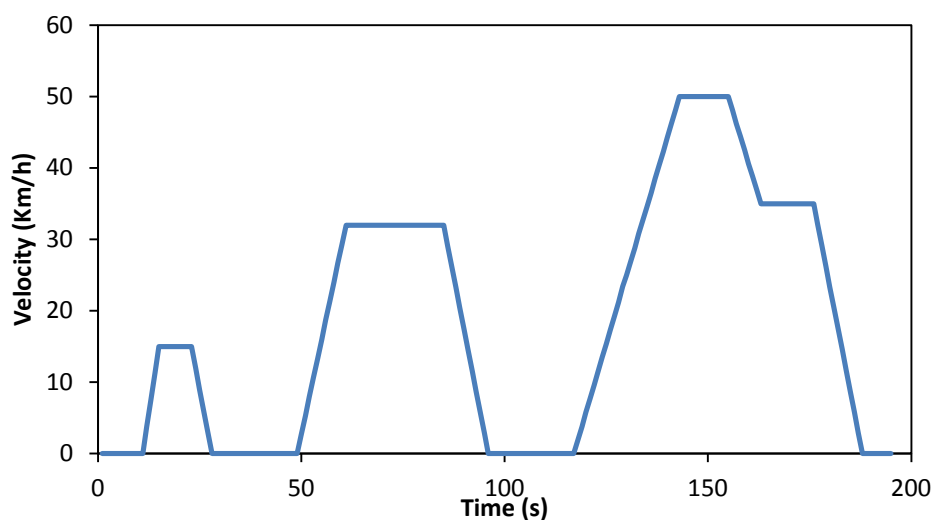
วัฏจักรขับขี่ Federal Test Procedure (FTP75) เป็นวัฏจักรขับขี่ที่พัฒนาขึ้นเพื่อทดสอบมลพิษจากรถยนต์ขนาดเล็กในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ดัดแปลงมาจากวัฏจักรขับขี่ FTP72 โดยการเพิ่มระยะความเร็วเป็น 3 ช่วงได้แก่ ระยะ cold start, ระยะ transient และ ระยะ hot start มีความเร็วสูงสุด 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วเฉลี่ย 34.1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 3-4 วัฏจักรขับขี่ Federal Test Procedure (FTP75)

3.4.1.2 วัฏจักรขับขี่ European ECE Cycle

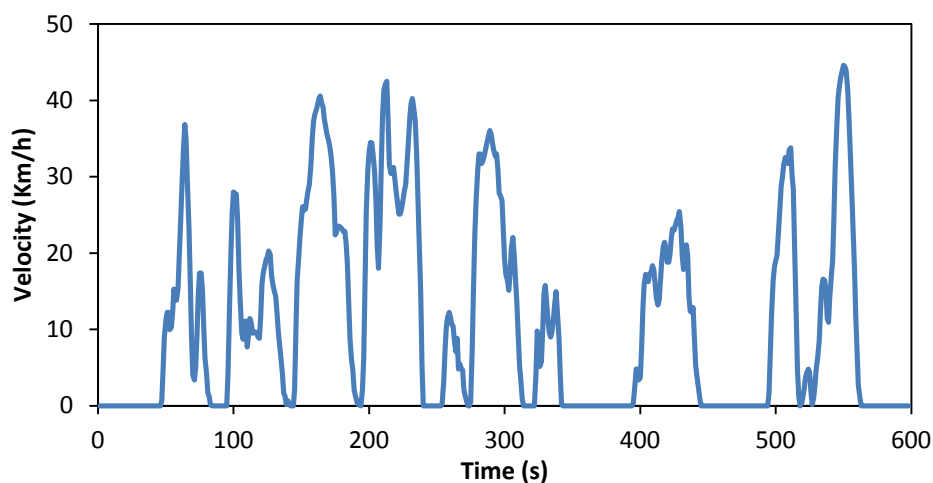
วัฏจักรขับขี่ European ECE cycle (ECE15) เป็นวัฏจักรขับขี่ที่พัฒนาขึ้นเพื่อแทนการขับขี่ในเมืองของประเทศในยุโรป มีความเร็วสูงสุด 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วเฉลี่ย 18.7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เหมาะสำหรับยานยนต์ที่มีความเร็วและภาระต่ำ



ภาพที่ 3-5 วัฏจักรขับขี่ European ECE cycle (ECE15)

3.4.1.3 วัฏจักรขับขี่ New York City Cycle

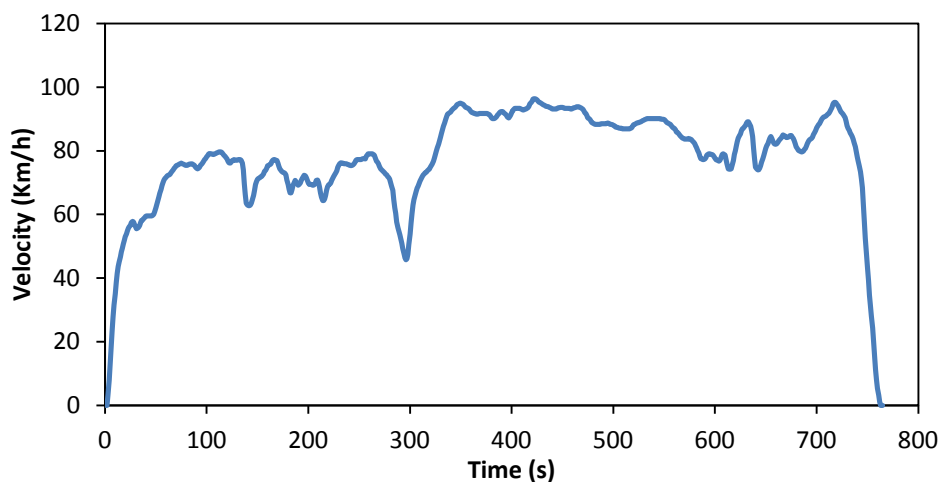
วัฏจักรขับขี่ New York City Cycle (NYCC) เป็นวัฏจักรขับขี่เพื่อแทนการขับขี่ในเมือง นวนอร์กที่มีความเร็วในการขับขี่ต่ำและสลับกับการหยุดบ่อยครั้ง มีความเร็วสูงสุด 44.6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วเฉลี่ย 11.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 3-6 วัฏจักรขับขี่ New York city cycle (NYCC)

3.4.1.4 วัฏจักรขับขี่ Highway Fuel Economy Test

วัฏจักรขับขี่ Highway Fuel Economy Test (HWFET) เป็นวัฏจักรขับขี่เพื่อแทนการขับขี่บนถนนไฮเวย์ที่ใช้ความเร็วสูงต่อเนื่องเป็นเวลานาน มีความเร็วสูงสุด 96.34 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความเร็วเฉลี่ย 77.7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 3-7 วัฏจักรขับขี่ Highway Fuel Economy Test (HWFET)

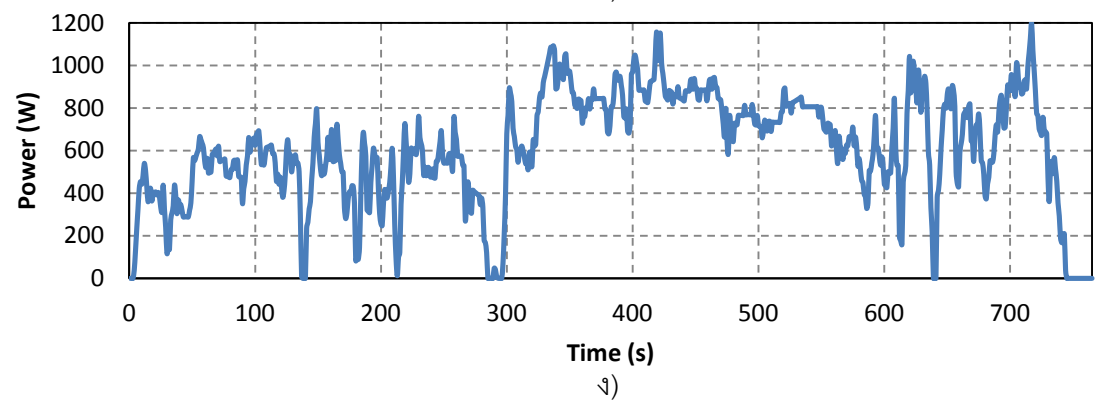
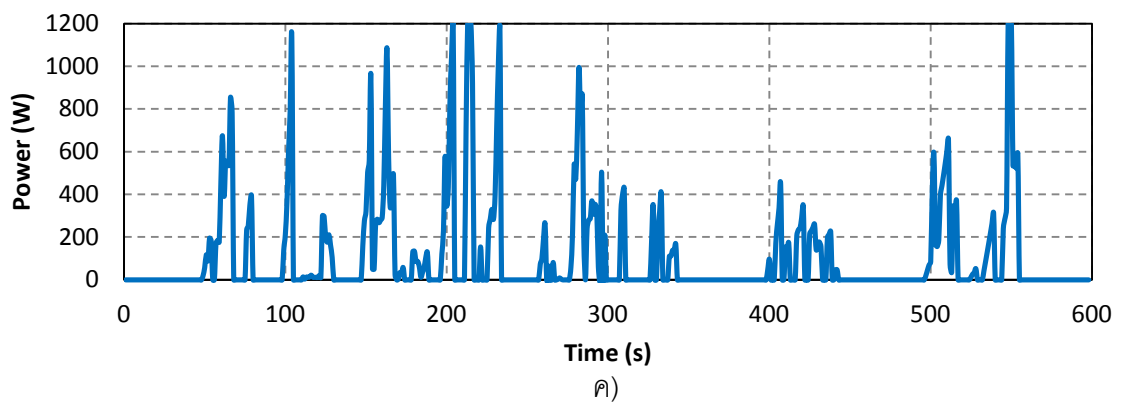
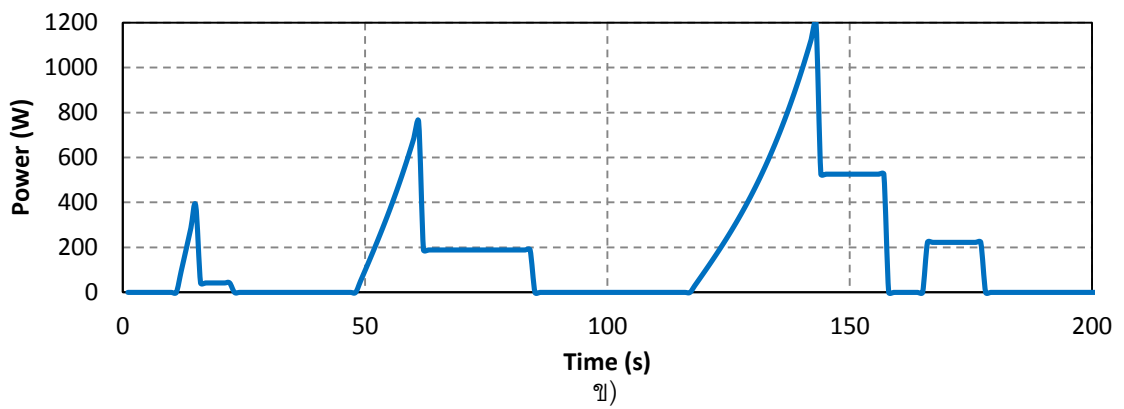
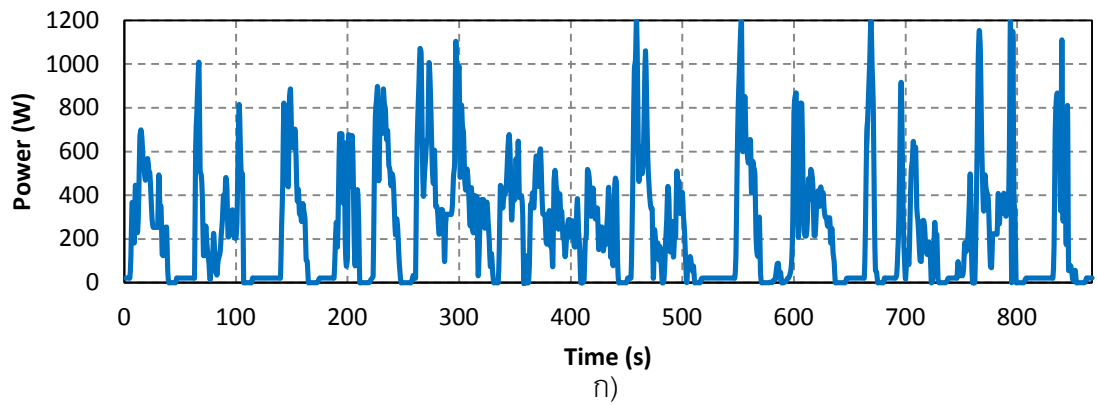
ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดพิกัด 1.2 กิโลวัตต์ เหมาะสำหรับการใช้งานในยานยนต์ขนาดเล็ก เช่น รถจักรยานยนต์ ดังนั้นการกำหนดภาระในการขับเคลื่อนยานยนต์สำหรับงานวิจัยนี้จึงอ้างอิงการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานในรถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก โดยมีค่าตัวแปรเบื้องต้นดังตารางที่ 3-2 และจำลองภาระขับเคลื่อนจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK [2] ซึ่งในแบบจำลองนี้ประกอบไปด้วยข้อมูลความเร็วต่อเวลาของยานยนต์ในวัฏจักรทดสอบ และแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนเพื่อเอาชนะแรงต้านทานต่างๆในการเคลื่อนที่ของรถ โดยแบ่งออกเป็น แรงต้านทานการกลิ้ง แรงต้านทานจากอากาศ แรงในการขึ้นทางลาดชัน และแรงเพื่อให้ความเร่ง ดังนั้นภาระในการขับเคลื่อนยานยนต์ก็คือผลคูณระหว่างความเร็วกับแรงขับเคลื่อนดังที่ได้กล่าวมา

ตารางที่ 3-2 ค่าตัวแปรเบื้องต้นของรถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก [2]

มวลรวมของรถและน้ำหนักบรรทุก m	160 กก.
ค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานการกลิ้ง f_r	0.01
ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศ C_d	0.75
พื้นที่หน้าตัดของรถ A	0.6 ตร.ม.

อย่างไรก็ตามภาระจากวัฏจักรขับขีที่ได้จากการจำลองโดยอาศัยข้อมูลรถจักรยานยนต์ขนาดเล็กนี้ยังมีภาระสูงสุดมากกว่าภาระสูงสุดที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้ จึงต้องดัดแปลงลักษณะภาระขับเคลื่อนให้เหมาะสม โดยจำกัดค่าภาระสูงสุดให้มีค่าไม่เกิน 1.2 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้โดยไม่เกิดความเสียหายต่อเซลล์เชื้อเพลิงและปรับภาระช่วงลบจาก regenerative braking ให้มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่ไม่สามารถเก็บพลังงานในส่วนนี้ได้ จึงได้ลักษณะภาระขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับขีหลังจากปรับลดภาระแล้วดังภาพที่ 3-8 (ต่อไปนี้จะใช้สัญลักษณ์ s- แทนคำว่า scaled ซึ่งหมายถึงวัฏจักรขับขีที่ปรับลดภาระแล้ว)

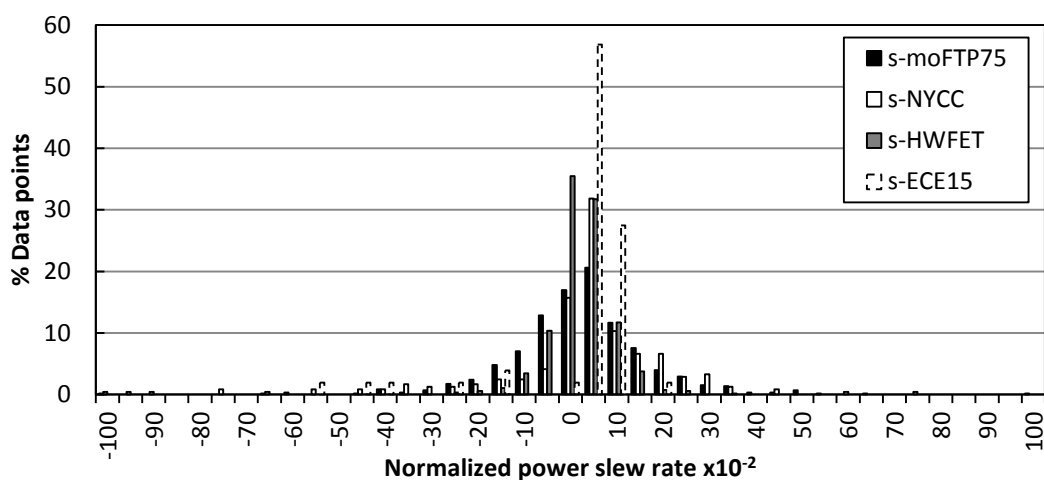
การทดสอบดำเนินการโดยให้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาระให้กับชุดรับภาระทางไฟฟ้า แทนการใช้ชุดควบคุมมอเตอร์และมอเตอร์ขับเคลื่อนกับภาระจริง ซึ่งช่วยให้การทดสอบเป็นไปได้โดยสะดวกและปลอดภัย สำหรับการทดสอบสามารถทำได้โดยนำลักษณะภาระขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับขีที่เป็นข้อมูลกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาสั่งการให้กับชุดรับภาระทางไฟฟ้า โดยสั่งการผ่านโปรแกรม Wavy ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับสร้างและถ่ายโอนข้อมูลรูปแบบของภาระที่ต้องการเข้าสู่หน่วยความจำภายในตัวชุดรับภาระทางไฟฟ้า ในการทดสอบยังได้ทดสอบเป็นจำนวนหลายรอบวัฏจักรต่อเนื่อง จนกระทั่งอุณหภูมิของเซลล์แกวมี่ค่าคงที่จึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผล



ภาพที่ 3-8 ภาระขับเคลื่อนหลังจากปรับลดกำลังไฟฟ้าในวัฏจักรขับที่

ก) modified FTP75 ข) ECE15 ค) NYCC และ ง) HWFET

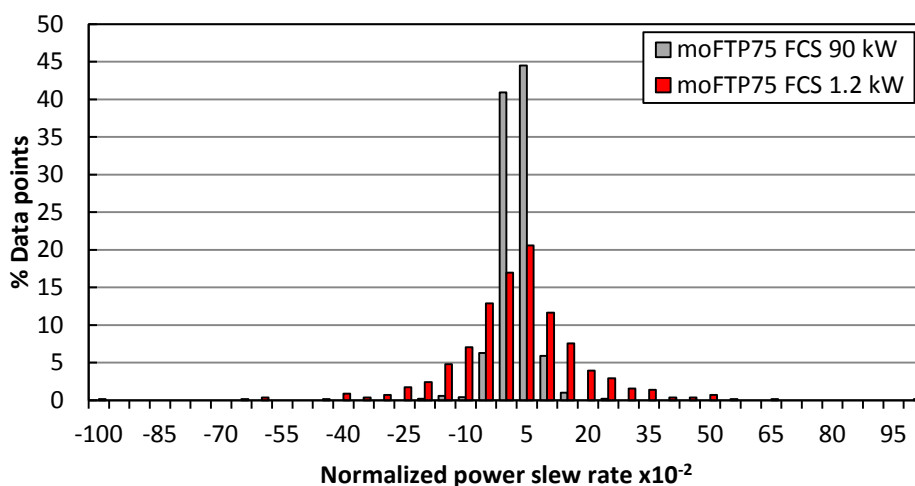
การศึกษานี้ได้นำเสนอพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกสภาพไม่คงตัวของภาระจากอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าต่อเวลาในรูปของพารามิเตอร์ไร้หน่วย (normalized power slew rate) (ต่อไปนี้จะใช้อักษรย่อ n- แทนคำว่า normalized) ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 เมื่อพิจารณาสภาพไม่คงตัวของภาระผ่านพารามิเตอร์นี้แล้ว ทำให้การเปรียบเทียบสภาพไม่คงตัวของภาระในแต่ละวัฏจักรซ้ำซึ่งเป็นไปได้ง่ายขึ้น กล่าวคือวัฏจักรซ้ำซึ่งมีการกระจายตัวของ n-slew rate มาก สามารถบ่งชี้ได้ว่าวัฏจักรนั้นมีสภาพที่ไม่คงตัวมากกว่าวัฏจักรซ้ำซึ่งมีการกระจายตัวของ n-slew rate น้อย เห็นได้จากการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ n-slew rate เปรียบเทียบกันระหว่าง 4 วัฏจักรซ้ำซึ่งมีค่าที่ 3-9 พบว่าวัฏจักร s-modified FTP75 และ s-NYCC มี n-slew rate ครอบคลุมอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันคือ ± 0.4 แต่วัฏจักร s-NYCC มีลักษณะของภาระอยู่ในช่วงต่ำและมีช่วง idle ที่ยาวนานกว่าวัฏจักร s-modified FTP75 สำหรับวัฏจักร s-HWFET และ s-ECE15 มีช่วง n-slew rate ค่อนข้างต่ำคือ ± 0.15 และ ± 0.10 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าวัฏจักรทั้งสองนี้เป็นวัฏจักรที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างฉับพลัน จากการเปรียบเทียบดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า n-slew rate สามารถนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกสภาพไม่คงตัวของภาระและใช้เป็นพารามิเตอร์ในการเปรียบเทียบลักษณะภาระที่แตกต่างกันได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 3-9 การกระจายตัวของ n-slew rate ในแต่ละวัฏจักรซ้ำ

อย่างไรก็ตามการปรับลดขนาดของภาระในวัฏจักรซ้ำซึ่งลงนั้นทำให้ n-slew rate เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้วัฏจักรซ้ำซึ่งนำมาใช้ทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้อาจไม่สามารถอ้างอิงถึงการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดพิกัดสูงได้ ดังเช่นยานยนต์ขนาดกลางเช่น Honda FCX นั้นใช้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดพิกัด 90 กิโลวัตต์ [40] เพื่อตอบคำถามดังกล่าว การศึกษานี้จึงได้เปรียบเทียบการกระจายตัวของ n-slew rate ระหว่างวัฏจักรซ้ำซึ่งผ่านการปรับลดขนาดภาระและวัฏจักรซ้ำซึ่งใช้ขับเคลื่อนยานยนต์ขนาดกลางดังภาพที่ 3-10 ในที่นี้จะ

นำเสนอเฉพาะการเปรียบเทียบในวัฏจักรข้อที่ modified FTP75 จากการเปรียบเทียบเห็นได้ว่า วัฏจักรข้อที่ผ่านการปรับลดขนาดภาระเพื่อใช้ทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดพิกัด 1.2 กิโลวัตต์ในงานวิจัยนี้มี n-slew rate ครอบคลุมวัฏจักรข้อที่ใช้กับยานยนต์ขนาดกลางทั้งช่วงบวก และช่วงลบ แสดงให้เห็นว่าวัฏจักรข้อที่ผ่านการปรับลดขนาดภาระนี้สามารถใช้อ้างอิงการทำงาน ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดใหญ่ได้



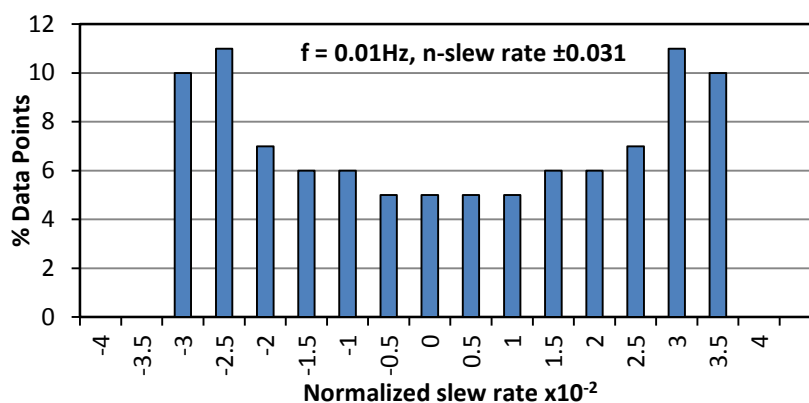
ภาพที่ 3-10 การกระจายตัวของ n-slew rate ในวัฏจักร modified FTP75 ที่ใช้ทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดพิกัด 1.2 กิโลวัตต์และขนาดพิกัด 90 กิโลวัตต์

3.4.2 การกำหนดภาระแบบไซน์

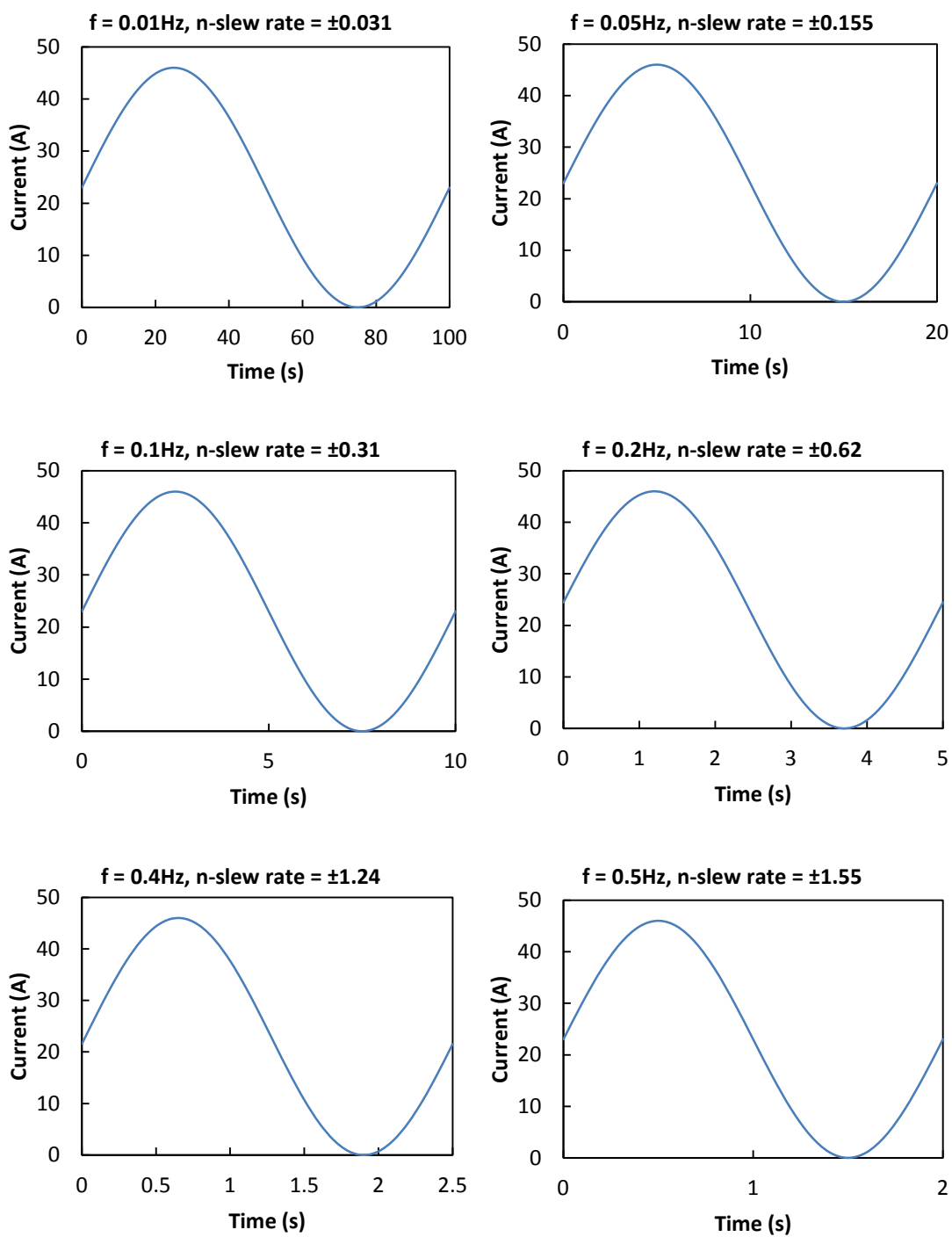
ลักษณะภาระตามวัฏจักรข้อที่เป็นลักษณะภาระที่มีความซับซ้อนและมีช่วงภาระไม่คงตัวค่อนข้างหลากหลาย อย่างไรก็ตามลักษณะภาระนี้สามารถพิจารณาให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นเมื่อพิจารณาจากแนวคิดของอนุกรมฟูเรียร์ โดยพิจารณาว่าภาระตามวัฏจักรข้อที่ซับซ้อนสามารถอธิบายโดยใช้ลักษณะภาระแบบไซน์ที่มีความถี่แตกต่างกัน การศึกษาของ Waydahl [27] และ Talj [28] ศึกษาพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้ลักษณะภาระแบบไซน์ที่ใช้เป็นการเพิ่มภาระตามกระแสไฟฟ้าจนถึงกระแสสูงสุดของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ศึกษา (46 แอมแปร์) นอกจากนี้เพื่อให้ผลการศึกษารอบคลุมถึงช่วง n-slew rate ของภาระตามวัฏจักรข้อ จึงเลือกภาระแบบไซน์ที่มีความถี่แตกต่างกันดังนี้คือ 0.01Hz, 0.05Hz, 0.1Hz, 0.2Hz, 0.4Hz และ 0.5Hz การพิจารณาช่วง n-slew rate ของภาระแบบไซน์ผู้วิจัยพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าทุกๆ 0.1 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาสั้นที่สุดที่ชุดรับภาระทางไฟฟ้าสามารถกำหนดได้ ในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะการกระจายตัวของ n-slew rate ของภาระแบบไซน์ที่มีความถี่ 0.01 Hz ดังภาพที่ 3-11 ดังนั้นภาระแบบไซน์แต่ละความถี่สามารถเปรียบเทียบได้กับ n-slew rate ในช่วง ± 0.031 , ± 0.155 , ± 0.31 , ± 0.62 , ± 1.24 และ ± 1.55 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 3-12 โดย n-slew rate

ดังกล่าวเป็นการพิจารณาจากช่วงสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งอยู่ในช่วงครอบคลุมกับช่วง n-slew rate ของวัฏจักรซึบที่ทั้งสี่ดังภาพที่ 3-9

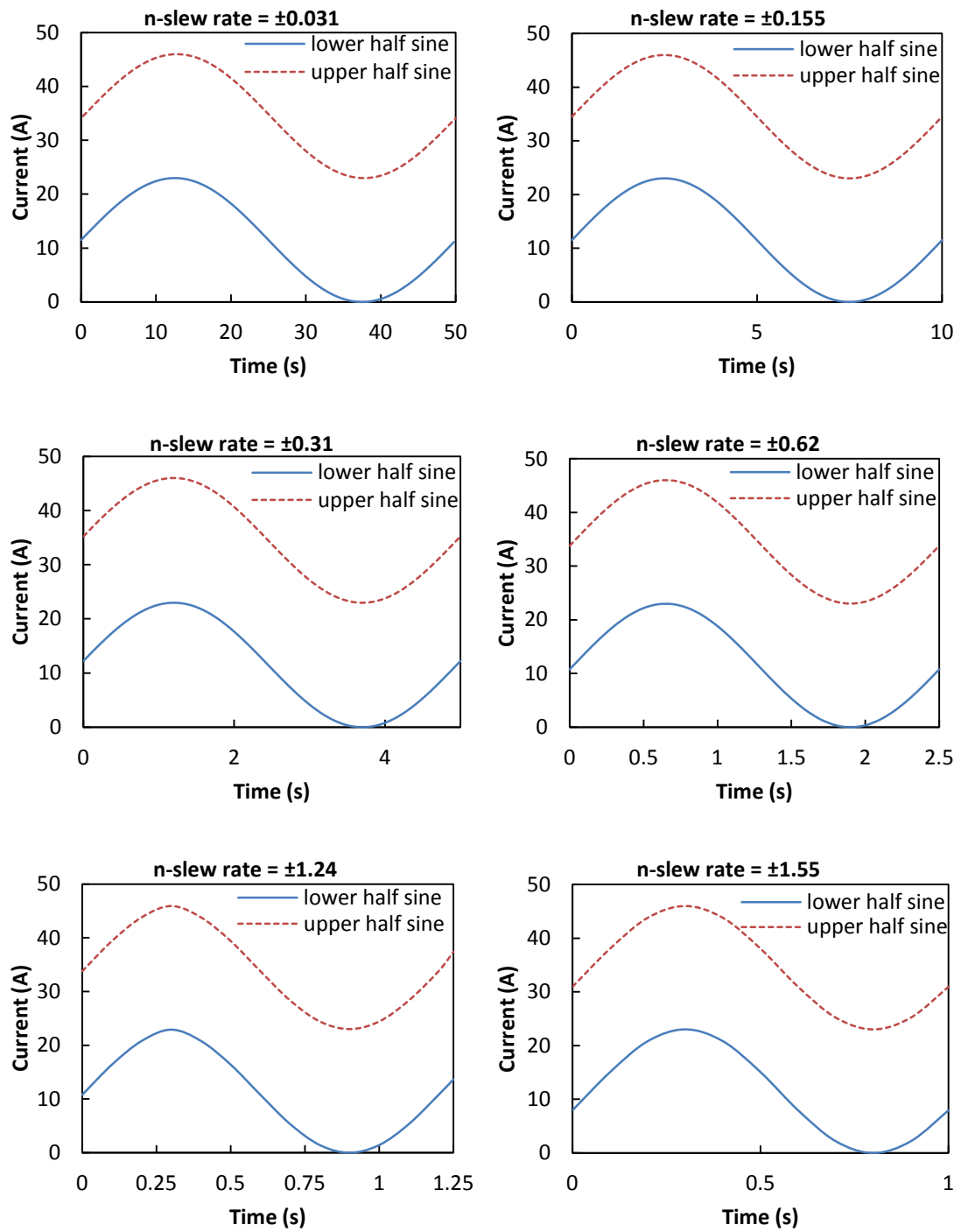
จากบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 ผู้วิจัยนำเสนออัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในรูปแบบตัวแปรไร้มิติคือ n-slew rate โดยตั้งสมมติฐานไว้ว่า n-slew rate สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้พฤติกรรมการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงต่อสภาวะไม่คงตัว อย่างไรก็ตามยังจำเป็นต้องพิสูจน์สมมติฐานดังกล่าวให้เห็นโดยอาศัยการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2-14 เห็นได้ว่า n-slew rate อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (dP/dr), time scale ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง (τ_s), และ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้ (P_{rated}) ดังนั้นการพิสูจน์ n-slew rate จึงกระทำได้โดยการพิสูจน์ผลของพารามิเตอร์ทั้ง 3 กล่าวคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า พิสูจน์โดยใช้ลักษณะภาวะที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน, time scale พิสูจน์โดยใช้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีเมมเบรนต่างกัน และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้พิสูจน์โดยใช้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแตกต่างกัน ถ้าการพิสูจน์พารามิเตอร์ทั้ง 3 นี้ ให้ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่แสดงพฤติกรรมคล้ายกัน ย่อมบ่งบอกได้ว่า n-slew rate สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้พฤติกรรมการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงต่อสภาวะไม่คงตัวได้ อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์การทดสอบ ผู้วิจัยสามารถพิสูจน์ได้เพียงผลของอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า โดยทดสอบกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเดิมภายใต้ภาวะแบบครึ่งไซน์ล่าง (lower half sine) ซึ่งเป็นการเพิ่มกระแสจาก 0 แอมแปร์จนถึง 23 แอมแปร์ และภาวะแบบครึ่งไซน์บน (upper half sine) ซึ่งเป็นการเพิ่มกระแสจาก 23 แอมแปร์จนถึง 46 แอมแปร์ ภาวะแบบครึ่งไซน์ล่างและครึ่งไซน์บนที่เลือกใช้นี้มีช่วง n-slew rate เดียวกันกับภาวะแบบเต็มไซน์ ดังภาพที่ 3-13 ผลการทดสอบจะแสดงไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2.1



ภาพที่ 3-11 การกระจายตัวของ n-slew rate ของภาวะแบบไซน์ที่มีความถี่ 0.01Hz



ภาพที่ 3-12 ลักษณะการระแบบไซน์ที่ความถี่และ n-slew rate ต่างต่างกัน



ภาพที่ 3-13 ลักษณะภาวะแบบครึ่งไซน์โด้งและบน ที่ n-slew rate แตกต่างกัน

บทที่ 4

ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิง

การศึกษาการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงได้แบ่งออกเป็นการศึกษาการทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว และศึกษาต้นเหตุหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงทั้งในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว จากการศึกษาทางวิจัยที่ผ่านมา [4,7,28] ได้ระบุถึงปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงลดลงมาจากการสูญเสียภายในเมมเบรนได้แก่ การสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (activation loss) การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (ohmic loss) และการสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น (concentration loss) ซึ่งเป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แกว และการสูญเสียกำลังไฟฟ้าให้กับระบบเสริม (parasitic loss) ดังนั้นผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้กล่าวในบทนี้จึงจำแนกการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงออกเป็น 2 ส่วนคือ การทำงานของเซลล์แกว และการทำงานของระบบเสริมโดยจำกัดเฉพาะที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงได้แก่ระบบจ่ายอากาศคือคอมเพรสเซอร์ และระบบจัดการความร้อนคือชุดพัดลมระบายอากาศ ดังที่ได้ระบุจากผลการทดสอบเบื้องต้นในภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ผลการการทำงานของเซลล์แกวจะพิจารณาในแง่มุมของประสิทธิภาพเป็นหลัก โดยใช้การวิเคราะห์จาก polarization curve เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แกว หรืออาจบ่งบอกในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และใช้การวิเคราะห์จากกราฟประสิทธิภาพของเซลล์แกว สำหรับการวิเคราะห์ผลการการทำงานของระบบเสริมจะแบ่งออกเป็นการพิจารณาในภาพรวมของทั้งระบบโดยใช้การวิเคราะห์จากกราฟประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง และพิจารณาการทำงานของระบบเสริมได้แก่คอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศ ในการวิเคราะห์ผลยังได้เปรียบเทียบการทำงานของเซลล์แกวและระบบเสริมระหว่างการทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว เพื่อศึกษาพฤติกรรมของทั้งสามระบบต่อการทำงานในสภาวะคงตัวว่ามีความแตกต่างจากการทำงานในสภาวะไม่คงตัวมากน้อยเพียงไร โดยจะเป็นข้อมูลที่สามารถบ่งชี้ถึงต้นเหตุหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

4.1 ผลการทดสอบในสภาวะคงตัว

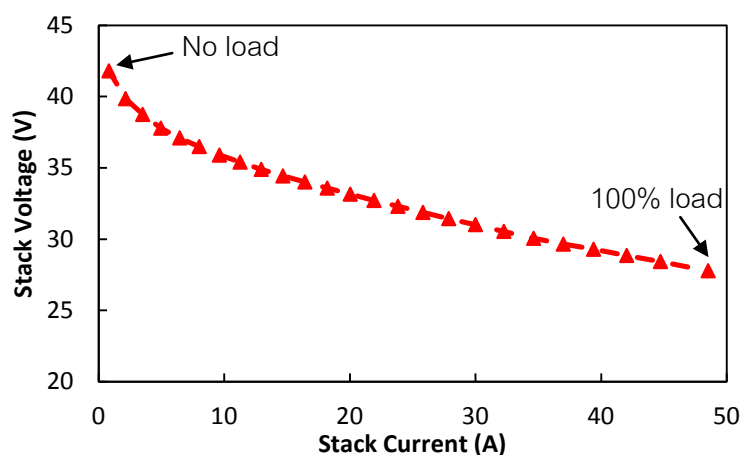
การทดสอบในสภาวะคงตัวเป็นการทดสอบโดยให้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาวะคงที่ ซึ่งระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิของเซลล์แถว แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ผลการทดสอบในสภาวะคงตัวบางส่วนได้นำเสนอในภาคผนวก ข ซึ่งเป็นเพียงการทดสอบเพื่อระบุถึงระบบเสริมที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูง ดังนั้นผลการทดสอบที่นำเสนอในส่วนนี้จึงเป็นผลการทดสอบเพิ่มเติมในส่วนของประสิทธิภาพของเซลล์แถว ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง การทำงานของคอมเพรสเซอร์ และการทำงานของชุดพัดลมระบายอากาศในสภาวะคงตัว เพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบความแตกต่างกับการทำงานในสภาวะไม่คงตัวต่อไป

4.1.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แถวและระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัว

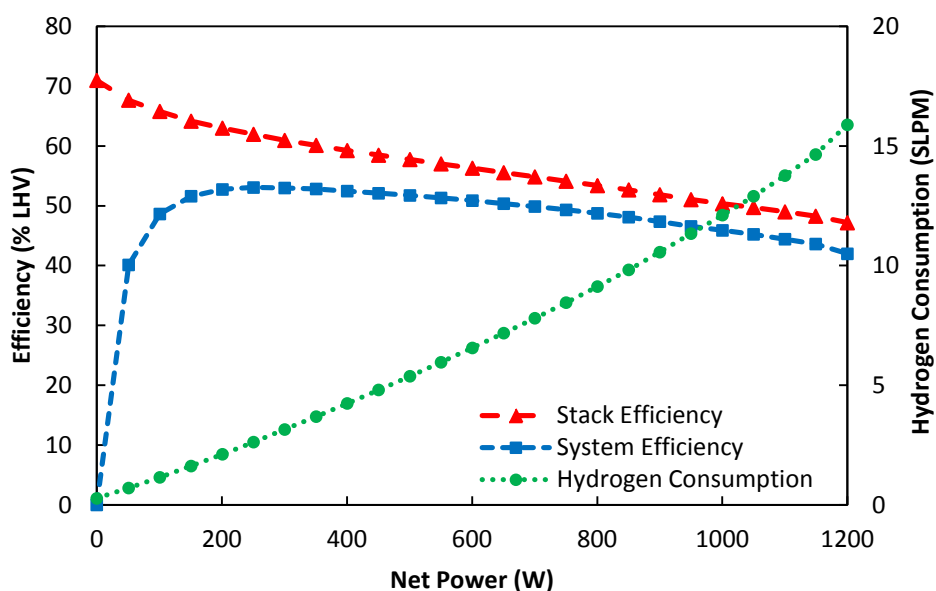
Polarization curve ของเซลล์แถวภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัวแสดงดังภาพที่ 4-1 ถึงแม้ว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงยังไม่ได้จ่ายภาวะ แต่เซลล์แถวจำเป็นต้องผลิตกระแสไฟฟ้าโดยประมาณ 0.85 แอมแปร์เพื่อจ่ายให้กับระบบเสริม เมื่อระบบเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาวะสูงสุดถึง 1200 วัตต์ เซลล์แถวผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุด 48.5 แอมแปร์หรือคิดเป็นความหนาแน่นกระแสสูงสุดประมาณ 420 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และแรงดันไฟฟ้าลดลงต่ำสุด 27.7 โวลต์ อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แถวสามารถลดลงต่ำสุดถึง 24 โวลต์เมื่อเกิดสภาวะน้ำท่วมในเมมเบรน ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อระบบเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาวะอย่างฉับพลันในการทดสอบภายใต้สภาวะไม่คงตัว ดังที่จะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.2

เมื่อพิจารณาในแง่มุมของประสิทธิภาพของเซลล์แถวดังภาพที่ 4-2 พบว่าเซลล์แถวมีประสิทธิภาพสูงสุด 70% เมื่อระบบเซลล์เชื้อเพลิงยังไม่ได้จ่ายภาวะ และประสิทธิภาพลดลงเหลือ 47% เมื่อระบบเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาวะสูงสุด เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงเกิน 50% สำหรับการใช้งานในช่วงภาวะ 200-500 วัตต์ แสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการใช้งานในช่วงภาวะต่ำ และเมื่อพิจารณาอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงพบว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดยมีค่าสูงสุด 16.8 SLPM

ผลการทดสอบในสภาวะคงตัวได้แก่ polarization curve ประสิทธิภาพของเซลล์แถว ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง และอัตราการบริโภคเชื้อเพลิง ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบกับการทำงานในสภาวะไม่คงตัว ดังที่จะกล่าวในหัวข้อที่ 4.2



ภาพที่ 4-1 Polarization curve ภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัว

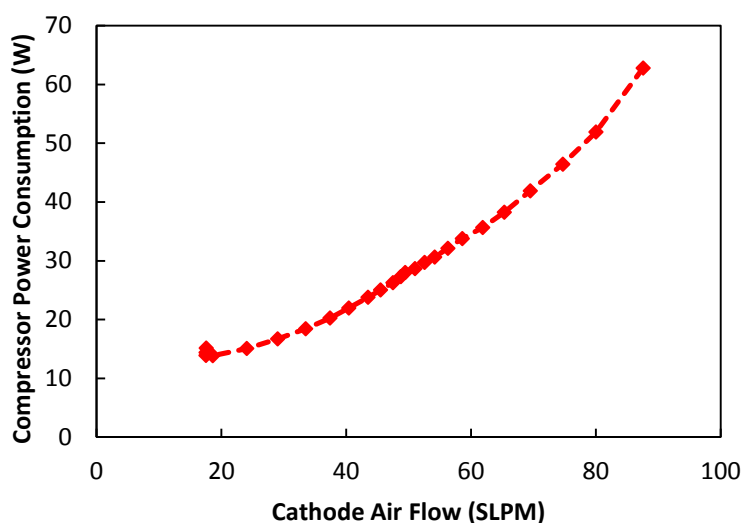


ภาพที่ 4-2 อัตราการบริโภคเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเซลล์แกว และประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัว

4.1.2 การทำงานของคอมเพรสเซอร์ในสภาวะคงตัว

คอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA เป็นชนิด centrifugal ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ BLDC 12 โวลต์ 3 เฟส [34] คอมเพรสเซอร์ทำหน้าที่จ่ายอากาศให้เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา และไล่น้ำที่ตกค้างในช่องทางการไหลเพื่อป้องกันการเกิดน้ำท่วมภายในเมมเบรน เมื่อระบบเซลล์เชื้อเพลิงต้องจ่ายกระแสมากขึ้น คอมเพรสเซอร์จะทำงานด้วยความเร็วรอบสูงขึ้น จากการส่งการผ่านทางแผงควบคุมไฟฟ้า ผลการทดสอบคอมเพรสเซอร์ภายใต้การทำงานใน

สภาวะคงตัวแสดงดังภาพที่ 4-3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์และอัตราการไหลของอากาศ ผลแสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาวะสูงสุด 1200 วัตต์ คอมเพรสเซอร์มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยเฉลี่ย 60 วัตต์ และจ่ายอากาศโดยเฉลี่ยด้วยอัตรา 87.5 SLPM อย่างไรก็ตามคอมเพรสเซอร์สามารถบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นไปถึง 120 วัตต์ เมื่อได้นำที่ตกค้างในช่องทางการไหล ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้จะอธิบายไว้ใน การทดสอบภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัวดังที่จะกล่าวในหัวข้อที่ 4.2

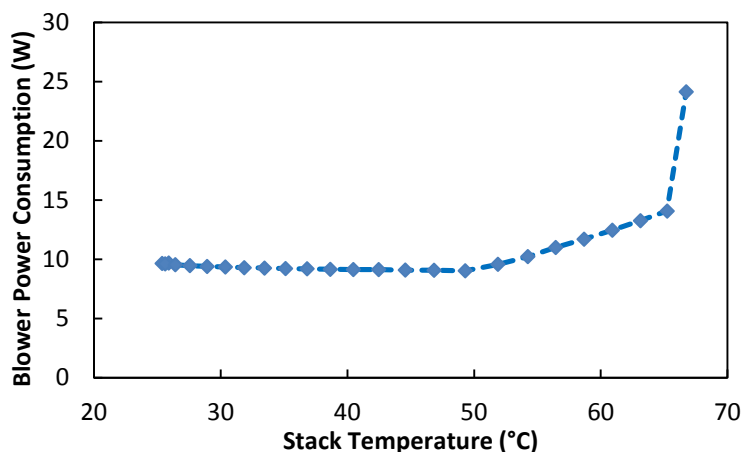


ภาพที่ 4-3 การบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ที่อัตราการไหลต่างๆภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัว

4.1.3 การทำงานของชุดพัฒนาระบายอากาศในสภาวะคงตัว

ชุดพัฒนาระบายอากาศที่ใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA ประกอบด้วยมอเตอร์ DC 12 โวลต์ต่อเข้ากับพัฒนาระบายอากาศ [34] ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับเซลล์แกวและเชื้อจากก๊าซไฮโดรเจนที่ปล่อยออกมา การทำงานของชุดพัฒนาระบายอากาศขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเซลล์แกว เมื่อเซลล์แกวมีอุณหภูมิสูงขึ้น แผงควบคุมไฟฟ้าสั่งการให้ชุดพัฒนาระบายอากาศทำงานด้วยความเร็วรอบสูงขึ้น เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเซลล์แกวให้ไม่เกิน 65 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบชุดพัฒนาระบายอากาศภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัวแสดงดังภาพที่ 4-4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของชุดพัฒนาระบายอากาศและอุณหภูมิของเซลล์แกว ผลแสดงให้เห็นว่าในช่วงที่อุณหภูมิของเซลล์แกวมีค่าน้อยกว่า 50 องศาเซลเซียส ชุดพัฒนาระบายอากาศบริโภคกำลังไฟฟ้าคงที่เฉลี่ยประมาณ 10 วัตต์ เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แกวมีค่ามากกว่า 50 องศาเซลเซียส ชุดพัฒนาระบายอากาศเริ่มทำงานในรอบที่สูงขึ้นส่งผลให้บริโภคกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แกวสูงถึง 65 องศาเซลเซียส ชุดพัฒนาระบายอากาศบริโภคกำลังไฟฟ้า

สูงขึ้นไปถึง 25-35 วัตต์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการทำงานของชุดพัดลมระบายอากาศในระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเซลล์แกวเป็นหลัก สอดคล้องกับการทดลองของ Gao [18] ที่ระบุในทำนองเดียวกัน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าชุดพัดลมระบายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่บริโภคกำลังไฟฟ้าสูงรองลงมาจากคอมเพรสเซอร์คิดเป็น 30% ของกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียให้กับระบบเสริมทั้งหมด ดังที่ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ข แต่หากพิจารณาเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แกวพบว่าการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศสูงสุดนี้มีค่าน้อยมากคิดเป็นเพียง 2.5% ของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แกวผลิตได้ แต่ผลการทดสอบนี้เป็นเพียงการทำงานในสภาวะคงตัว ซึ่งการทำงานของชุดพัดลมระบายอากาศในสภาวะไม่คงตัวอาจมีพฤติกรรมแตกต่างออกไป จึงยังไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่าควรละทิ้งการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศได้หรือไม่ ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.2.2.4



ภาพที่ 4-4 การบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศที่อุณหภูมิของเซลล์แกวต่างๆ ภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัว

4.2 ผลการทดสอบในสภาวะไม่คงตัว

การทดสอบในสภาวะไม่คงตัวได้อ้างอิงการใช้งานระบบเซลล์เชื้อเพลิงในยานยนต์จึงให้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาระตามวัฏจักรขับขี่ที่มีลักษณะแตกต่างกันจำนวน 4 วัฏจักรได้แก่ 1) วัฏจักร s-modified FTP75 2) วัฏจักร s-NYCC 3) วัฏจักร s-ECE15 และ 4) วัฏจักร s-HWFET ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวในบทที่ 3 อย่างไรก็ตามลักษณะภาระตามวัฏจักรขับขี่นั้นมีความซับซ้อน มีช่วงภาระไม่คงตัวค่อนข้างหลากหลาย อาจทำให้การอธิบายพฤติกรรมของระบบเซลล์เชื้อเพลิงเป็นไปได้ยาก ดังนั้นเพื่อให้การอธิบายพฤติกรรมของระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้น จึงเลือกลักษณะภาระแบบไซน์ที่มีความถี่ต่างกันในการช่วยอธิบายลักษณะภาระตามวัฏจักรขับขี่

ที่มีความซับซ้อน โดยอาศัยช่วง n -slew rate ที่ใกล้เคียงกันในการเปรียบเทียบลักษณะภาวะแบบไซน์กับลักษณะภาวะตามวัฏจักรซึบซี (อ้างอิงเนื้อหาบทที่ 3)

การทดสอบดำเนินการภายใต้ห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 63.5% เพื่อให้การทดสอบเป็นไปได้อย่างสะดวกและปลอดภัย จึงให้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาระให้กับชุดรับภาระทางไฟฟ้าที่สามารถจำลองภาวะตามวัฏจักรซึบซีแทนการใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ในการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัวทั้งภาวะแบบไซน์และภาวะตามวัฏจักรซึบซีจะทำการทดสอบเป็นจำนวนหลายรอบวัฏจักรต่อเนื่องจนกระทั่งเซลล์แกวมี่อุณหภูมิคงที่ จึงเริ่มนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผล

4.2.1 ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวตามภาวะแบบไซน์

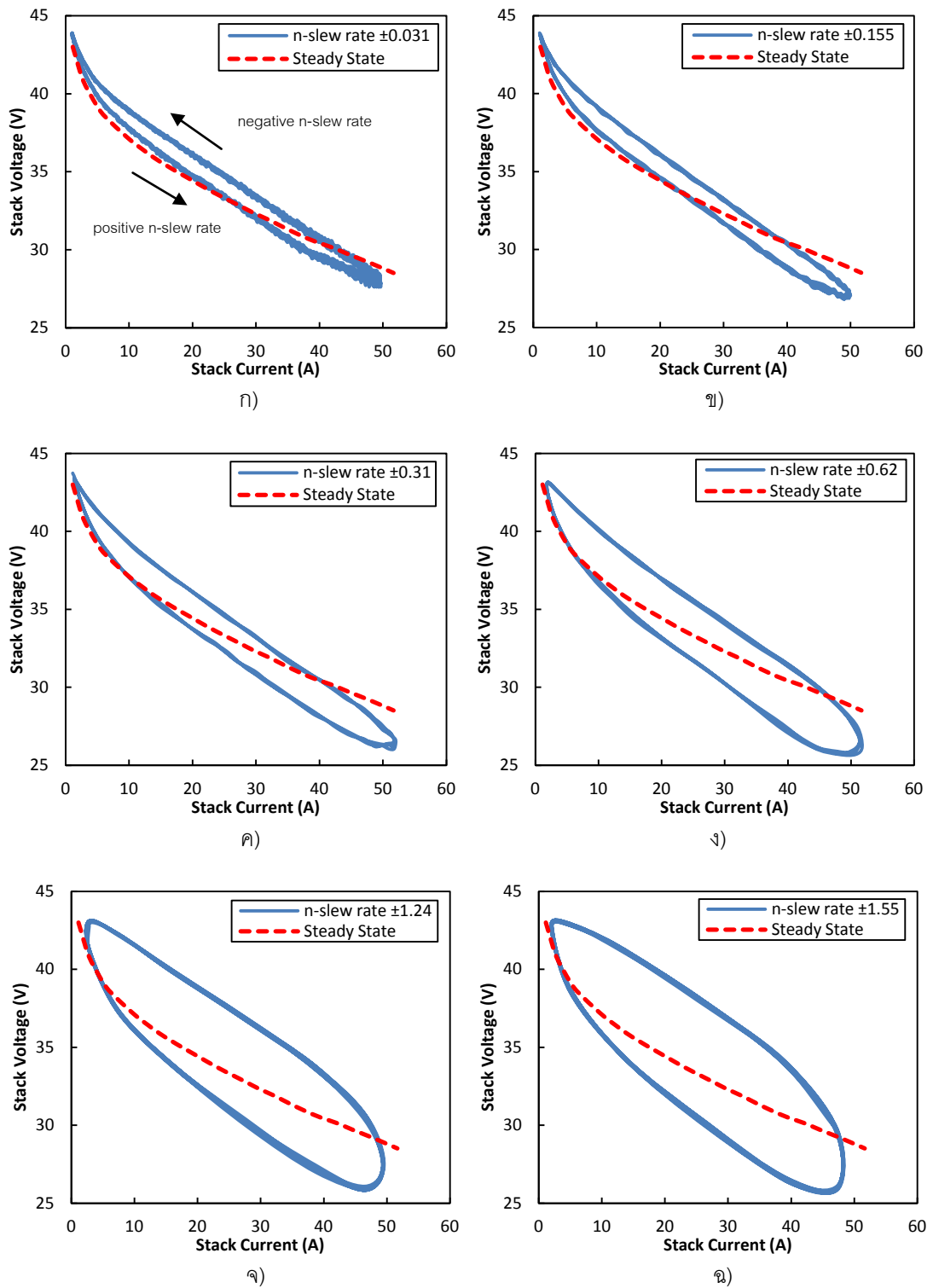
ภาพที่ 4-5 แสดงสมรรถนะของเซลล์แกวมี่ด้วย polarization curve ภายใต้การทดสอบในสภาวะไม่คงตัวตามภาวะแบบไซน์ที่ความถี่ต่างกัน และเปรียบเทียบกับ polarization curve ในสภาวะคงตัวที่แสดงดังเส้นประ เพื่อให้ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้ภาวะแบบไซน์มีความสอดคล้องกับภาวะตามวัฏจักรซึบซี ต่อจากนี้จะกล่าวถึงความถี่ของภาวะแบบไซน์ในเชิง n -slew rate (ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.4.2) ผลการทดสอบดังรูปที่ 4-5 แสดงลักษณะ polarization curve ภายใต้ภาวะแบบไซน์มีลักษณะเป็นวงรอบในทิศทวนเข็มนาฬิกา กล่าวคือเมื่อจ่ายภาระสูงขึ้นหรือ n -slew rate เป็นบวกทำให้กราฟเป็นเส้นโค้งลงจากกระแสต่ำไปยังกระแสสูง และเมื่อจ่ายภาระลดลงหรือ n -slew rate เป็นลบทำให้กราฟเป็นเส้นโค้งขึ้นจากกระแสสูงไปยังกระแสต่ำ polarization curve จึงมีลักษณะเป็นวงรอบในทิศทวนเข็มนาฬิกาดังกล่าว โดยวงรอบมีความกว้างไม่แตกต่างจากสภาวะคงตัวเท่าใดนักเมื่อ n -slew rate อยู่ในช่วง ± 0.031 ถึง ± 0.31 ดังภาพที่ 4-5 ก ถึง ค ตามลำดับ อย่างไรก็ตามวงรอบจะมีความกว้างแตกต่างจากสภาวะคงตัวอย่างเห็นได้ชัดเมื่อ n -slew rate สูงขึ้นถึง ± 0.62 , ± 1.24 และ ± 1.55 ดังภาพที่ 4-5 ง ถึง ฉ ตามลำดับ

Polarization curve ที่มีลักษณะเป็นวงรอบนี้อาจเรียกว่า hysteresis effect [23-28] เป็นลักษณะที่พบในเซลล์แกวมี่ที่ทดสอบกับภาระที่มีลักษณะเพิ่มหรือลดภาระสลับกันเป็นรอบวัฏจักร ผลการศึกษาของ Talj [28] แสดงให้เห็นว่า polarization curve มีลักษณะเป็นวงรอบสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยภาวะแบบไซน์ในงานวิจัยปัจจุบันดังภาพที่ 4.5 นอกจากนี้ Hameline [23], He [24], และ Yu [26] อธิบายถึงปัจจัยที่ส่งผลให้ polarization curve มีลักษณะเป็นวงรอบขึ้นอยู่ กับปริมาณน้ำในเมมเบรนซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการนำโปรตอนของเมมเบรน โดยปริมาณน้ำในเมมเบรนจะค่อยๆเพิ่มเมื่อความหนาแน่นกระแสสูงขึ้นและใช้ระยะเวลาานานจึงจะเข้าสู่สภาวะสมดุล กล่าวคือในช่วงการเพิ่มภาระขึ้นสูงปริมาณน้ำในเมมเบรนเริ่มเพิ่มขึ้นแต่ยังไม่มาก

พอ ส่งผลให้ความสามารถในการนำโปรตอนของเมมเบรนต่ำ polarization curve จึงมีลักษณะโค้งต่ำลง ในทางตรงกันข้ามสำหรับช่วงการลดภาระ ปริมาณน้ำในเมมเบรนมากพอที่ทำให้ความสามารถในการนำโปรตอนของเมมเบรนสูง polarization curve จึงมีลักษณะโค้งขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณน้ำในเมมเบรนมากเกินไปจะส่งผลให้เมมเบรนเกิดสภาวะน้ำท่วม (flooding) และส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์แกวต่ำลง [26] เนื่องจากปริมาณน้ำจะไปขัดขวางให้อากาศเข้าทำปฏิกิริยาได้น้อยลง

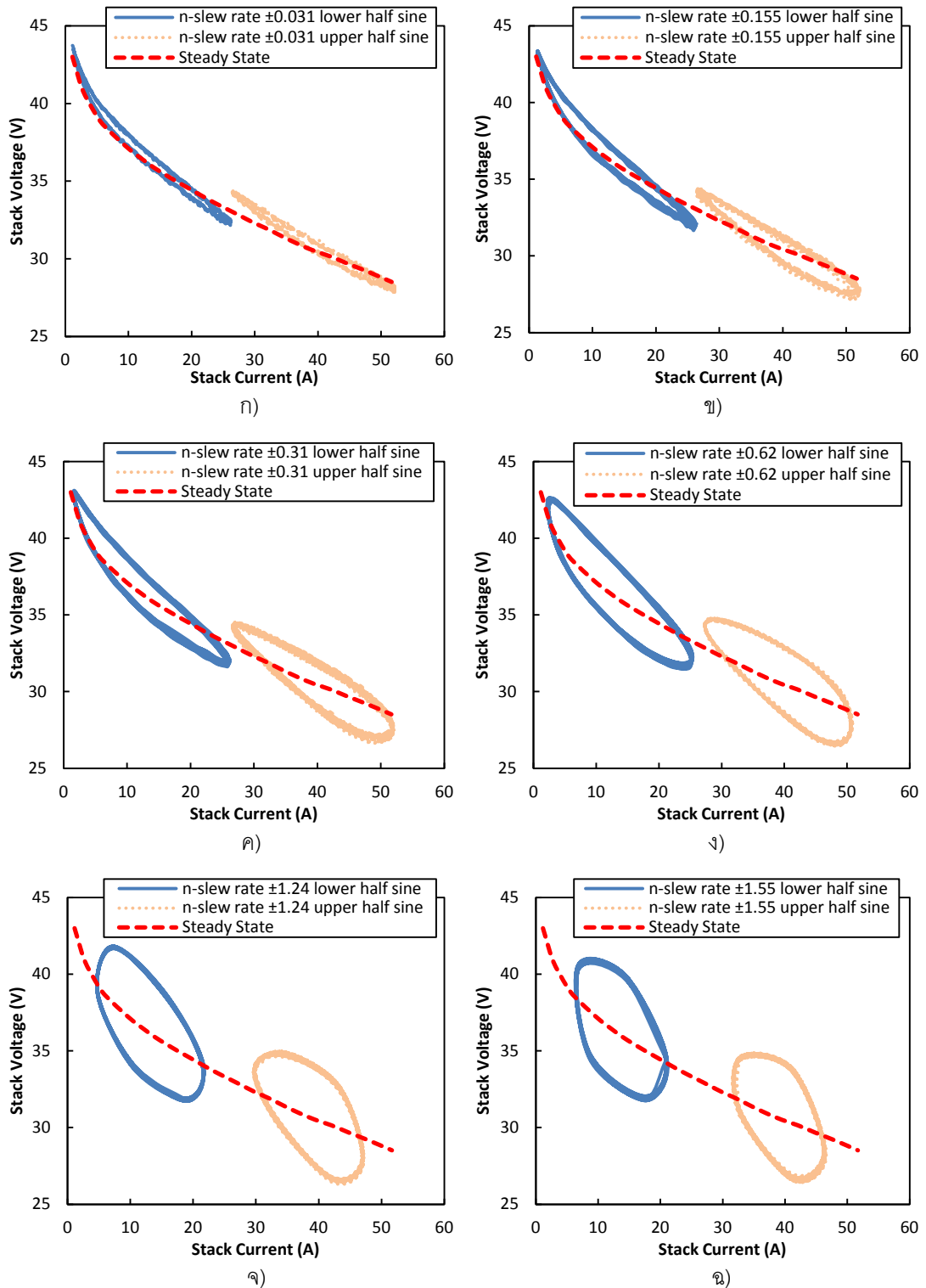
เมื่อพิจารณา n-slew rate ในช่วง ± 0.031 , ± 0.155 และ ± 0.31 พบว่าในช่วงที่กระแสต่ำกว่า 30 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวภายใต้ภาระแบบไซน์มีค่าสูงกว่าสภาวะคงตัว และเมื่อพิจารณาในช่วงกระแสสูงกว่า 30 แอมแปร์พบว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวจะเริ่มลดลงต่ำกว่าสภาวะคงตัว อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่างการทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวจะเห็นได้ชัดเมื่อ n-slew rate เพิ่มขึ้นถึง ± 0.62 แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวเริ่มลดลงต่ำกว่าสภาวะคงตัว ตั้งแต่ช่วงกระแสต่ำ แสดงให้เห็นว่า n-slew rate ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เซลล์แกวมีสมรรถนะต่ำลงจากสมรรถนะในสภาวะคงตัว ซึ่งภาระที่ใช้ทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษานี้พบว่าถ้ามี n-slew rate อยู่ในช่วงตั้งแต่ ± 0.62 ขึ้นไป ถึงจะส่งผลให้เซลล์แกวแสดงความแตกต่างของการทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว

ผลการทดสอบภาระแบบไซน์ที่ n-slew rate แตกต่างกันดังกล่าวข้างต้นมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Talj [28] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความถี่ในการจ่ายกระแสเพิ่มขึ้นทำให้วงรอบของ polarization curve มีความกว้างมากขึ้น Talj [28] ได้อธิบายว่าการเพิ่มภาระอย่างรวดเร็วนั้นส่งผลให้ปริมาณน้ำในเมมเบรนเพิ่มสูงขึ้นมากจนเกิดสภาวะน้ำท่วมเมมเบรน ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นนี้จะไปขัดขวางออกซิเจนในอากาศให้เข้าทำปฏิกิริยาได้น้อยลง แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวจึงลดต่ำลงอย่างฉับพลันในช่วงความหนาแน่นกระแสสูง ในทำนองเดียวกันการลดภาระอย่างรวดเร็วโดยที่ปริมาณน้ำในเมมเบรนยังมากอยู่นั้นส่งผลให้เซลล์แกวมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสาเหตุที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวลดลงอย่างฉับพลันคือการเกิดสภาวะน้ำท่วมในเมมเบรนจากการทดสอบในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้สังเกตการเกิดน้ำท่วมในเมมเบรนจากพฤติกรรมการทำงานของคอมเพรสเซอร์ เมื่อเกิดน้ำท่วมในเมมเบรนคอมเพรสเซอร์จะทำงานที่ความเร็วรอบสูงสุด ซึ่งบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นไปถึง 120 วัตต์และจ่ายอากาศด้วยอัตรา 140 SLPM เพื่อไล่น้ำที่ตกค้างในช่องทางการไหลโดยสังเกตเห็นปริมาณน้ำจำนวนมากไหลออกจากท่ออากาศขาทิ้ง พฤติกรรมดังกล่าวนี้พบขณะทดสอบภาระแบบไซน์ที่มี n-slew rate ในช่วงตั้งแต่ ± 0.62 ขึ้นไป ด้วยสาเหตุที่เมมเบรนเกิดน้ำท่วมดังกล่าวนี้ polarization curve ดังภาพที่ 4-5 ถึง ๘ จึงแสดงความแตกต่างของสมรรถนะของเซลล์แกวภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4-5 Polarization curve ภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัวตามภาวะแบบไซน์

นอกจากนี้เพื่อพิสูจน์ว่า n-slew rate สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้พฤติกรรมการตอบสนองของระบบเซลล์เชื้อเพลิงต่อสภาวะไม่คงตัว การศึกษานี้ได้ทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้ภาระแบบไซน์เช่นเดิมแต่ลดขนาดกระแสลงครึ่งหนึ่ง โดยทดสอบทั้งภาระแบบครึ่งไซน์ล่าง (lower half sine) ซึ่งเป็นการเพิ่มกระแสจาก 0 แอมแปร์จนถึง 23 แอมแปร์และภาระแบบครึ่งไซน์บน (upper half sine) ซึ่งเป็นการเพิ่มกระแสจาก 23 แอมแปร์จนถึง 46 แอมแปร์ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4.2 ผลการทดสอบภายใต้ภาระแบบครึ่งไซน์แสดงดังภาพที่ 4-6 สมรรถนะของเซลล์แควจาก polarization curve มีลักษณะเป็นวงรอบใกล้เคียงกับสภาวะคงตัวที่ n-slew rate ในช่วง ± 0.031 , ± 0.155 และ ± 0.31 ดังภาพที่ 4-6 ก ถึง ค และวงรอบจะมีขนาดกว้างกว่าสภาวะคงตัวมากเมื่อ n-slew rate สูงตั้งแต่ ± 0.62 ถึง ± 1.55 ดังภาพที่ 4-6 ง ถึง ฉ แสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงชุดหนึ่งๆ ไม่ว่าจะทำงานภายใต้ลักษณะภาระแบบครึ่งไซน์หรือแบบเต็มไซน์หากทำงานในช่วง n-slew rate ใกล้เคียงกันจะให้พฤติกรรมของสมรรถนะของเซลล์แควในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นผลการทดสอบจึงบ่งชี้ได้ว่า n-slew rate สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความแตกต่างของสมรรถนะของเซลล์แควภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวได้อย่างชัดเจน ด้วยข้อสรุปดังกล่าว ผลการศึกษาภาระแบบไซน์จึงสามารถนำไปใช้อธิบายผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงตามวัฏจักรขับที่ โดยอาศัยช่วง n-slew rate ที่ใกล้เคียงกัน ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



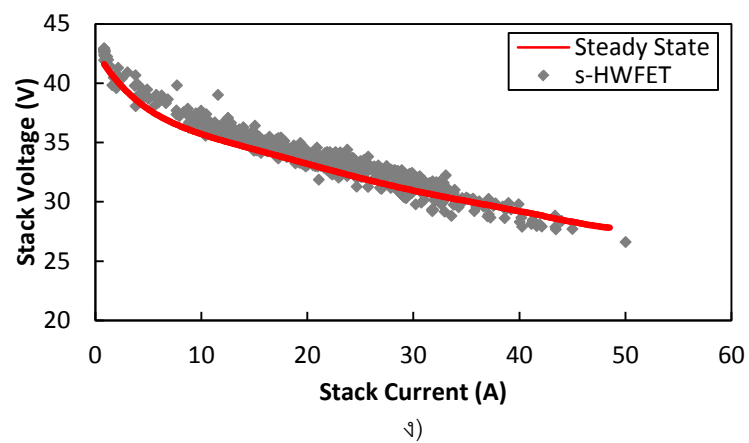
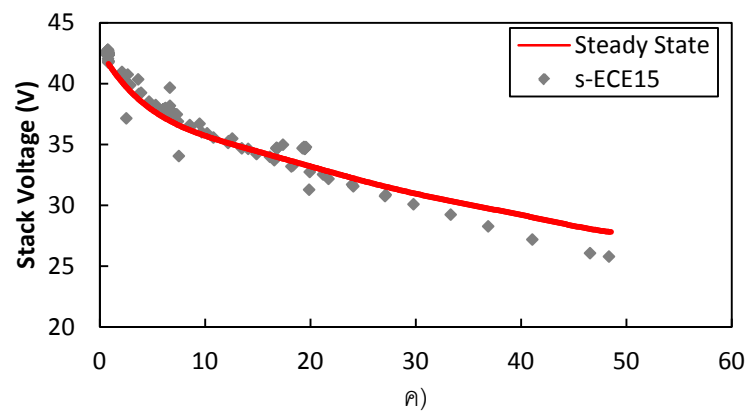
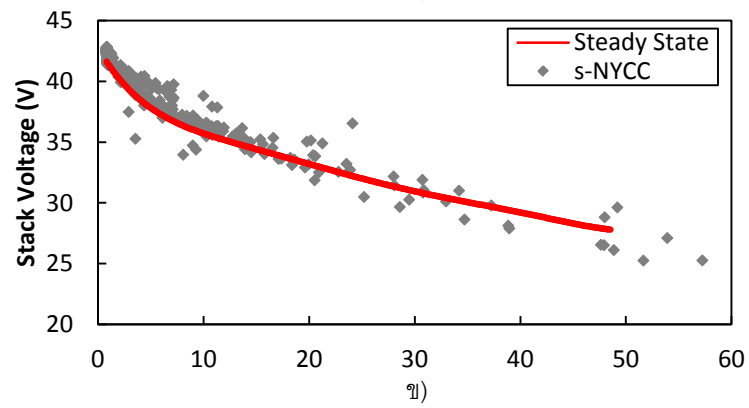
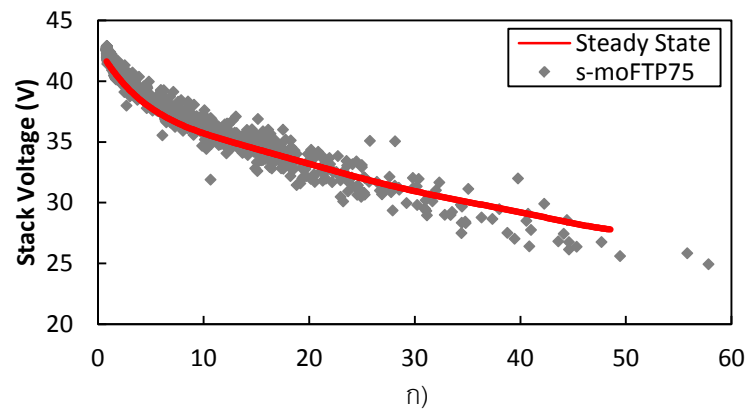
ภาพที่ 4-6 Polarization curve ภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัวตามภาระแบบครึ่งไซน์

4.2.2 ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวตามวัฏจักรขับที่

4.2.2.1 สมรรถนะของเซลล์แกวในสภาวะไม่คงตัวตามวัฏจักรขับที่

Polarization curve ดังภาพที่ 4-7 ก ถึง ง แสดงสมรรถนะของเซลล์แกวภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัวตามวัฏจักรขับที่ s-modified FTP75, s-NYCC, s-ECE15 และ s-HWFET ที่มี n-slew rate อยู่ในช่วง ± 0.4 , ± 0.4 , ± 0.10 และ ± 0.15 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบกับ polarization curve ในสภาวะคงตัวที่แสดงดังเส้นที่บ เมื่อพิจารณาสมรรถนะของเซลล์แกวในช่วงกระแสต่ำ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าข้อมูลสมรรถนะของเซลล์แกวทั้งสี่วัฏจักรมีการกระจายตัวอยู่เหนือเส้นสภาวะคงตัว พฤติกรรมเช่นนี้มีความสอดคล้องกับสมรรถนะของเซลล์แกวภายใต้ภาระแบบไซน์ที่มี n-slew rate น้อยกว่า ± 0.31 ดังภาพที่ 4-5 ก ถึง ค อย่างไรก็ตามสังเกตได้ว่าข้อมูลสมรรถนะของเซลล์แกวจากวัฏจักรขับที่ทั้งสี่วัฏจักรนี้ไม่ได้กระจายตัวแตกต่างจากสภาวะคงตัวมากดังเช่นภาระแบบไซน์ที่มี n-slew rate ในช่วงตั้งแต่ ± 0.62 ขึ้นไป ดังภาพที่ 4-5 ง ถึง ฉ เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่ในวัฏจักรขับที่ทั้งสี่วัฏจักรอยู่ในช่วง n-slew rate ไม่เกิน ± 0.4 ซึ่งเป็นช่วงที่ยังไม่ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์แกวมีความแตกต่างจากสภาวะคงตัว

เมื่อพิจารณาในช่วงกระแสสูงพบว่าข้อมูลสมรรถนะของเซลล์แกวในวัฏจักร s-modified FTP75 และ s-NYCC ดังภาพที่ 4-7 ก และ ข ตามลำดับ กระจายตัวแตกต่างจากสภาวะคงตัวมากขึ้น โดยพบว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวลดต่ำกว่าสภาวะคงตัว ในขณะที่ข้อมูลสมรรถนะของเซลล์แกวในวัฏจักร s-ECE15 และ s-HWFET ดังภาพที่ 4-7 ค และ ง ตามลำดับ กระจายตัวไม่แตกต่างจากสภาวะคงตัว เนื่องจากวัฏจักร s-modified FTP75 และ s-NYCC มี n-slew rate อยู่ในช่วงที่กว้างกว่าวัฏจักร s-ECE15 และ s-HWFET ผลการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของสมรรถนะของเซลล์แกวภายใต้ภาระแบบไซน์และวัฏจักรขับที่จากช่วง n-slew rate ใกล้เคียงกัน ผลการศึกษานี้สามารถใช้อธิบายผลสมรรถนะของเซลล์แกวภายใต้การทดสอบด้วยวัฏจักรขับที่แบบสุ่มในการศึกษาของ Buchi [4] ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ซึ่งผลการทดสอบของ Buchi [4] แสดงให้เห็นว่าในช่วงภาระต่ำข้อมูลสมรรถนะของเซลล์แกวมีการกระจายตัวค่อนข้างมาก และกระจายตัวลดลงในช่วงภาระสูงดังภาพที่ 1-9 แสดงว่าลักษณะภาระแบบสุ่มของ Buchi [4] ในช่วงภาระต่ำนั้นอาจมี n-slew rate อยู่ในช่วงกว้างมาก จึงทำให้ข้อมูลสมรรถนะของเซลล์แกวกระจายตัวแตกต่างจากสภาวะคงตัวมาก และในช่วงภาระสูงอาจมี n-slew rate ที่ไม่สูงนัก จึงทำให้ข้อมูลสมรรถนะของเซลล์แกวกระจายตัวไม่แตกต่างจากสภาวะคงตัว



ภาพที่ 4-7 Polarization curve ภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัวตามวัฏจักรขับที่

ก) s-modified FTP75 ข) s-NYCC ค) s-ECE15 และ ง) s-HWFET

จากผลการทดสอบภาวะแบบไชนิ่งบอกรให้ทราบว่าสาเหตุที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แวลลดต่ำลงในช่วงกระแสสูงนั้น เนื่องจากเมมเบรนเกิดสภาวะน้ำท่วม โดยจะเกิดขึ้นเมื่อระบบเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาวะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (n-slew rate สูง) ดังนั้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงสาเหตุที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แวลภายใต้วัฏจักรขับที่ลดต่ำลงจากสภาวะคงตัวนั้นมาจากสภาวะน้ำท่วมเช่นเดียวกันกับภาวะแบบไชนิ่ง ผู้วิจัยจึงแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมที่สอดคล้องกันระหว่างการทำงานของเซลล์แวลและการทำงานของคอมเพรสเซอร์ภายใต้การทดสอบในวัฏจักรขับที่ s-modified FTP75 s-NYCC s-ECE15 และ s-HWFET ดังภาพที่ 4-8 ก ถึง ง ตามลำดับ โดยแสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แวลในแต่ละวัฏจักร (เส้นทึบ) ควบคู่ไปกับกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ (เส้นประ) นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แวลภายใต้วัฏจักรขับที่ (เส้นทึบ) และแรงดันไฟฟ้าจากการคำนวณด้วยข้อมูลในสภาวะคงตัว (steady state simulation) (เส้นประ) เพื่อที่จะระบุได้ชัดเจนว่าช่วงเวลาใดในวัฏจักรขับที่เกิดสภาวะน้ำท่วม

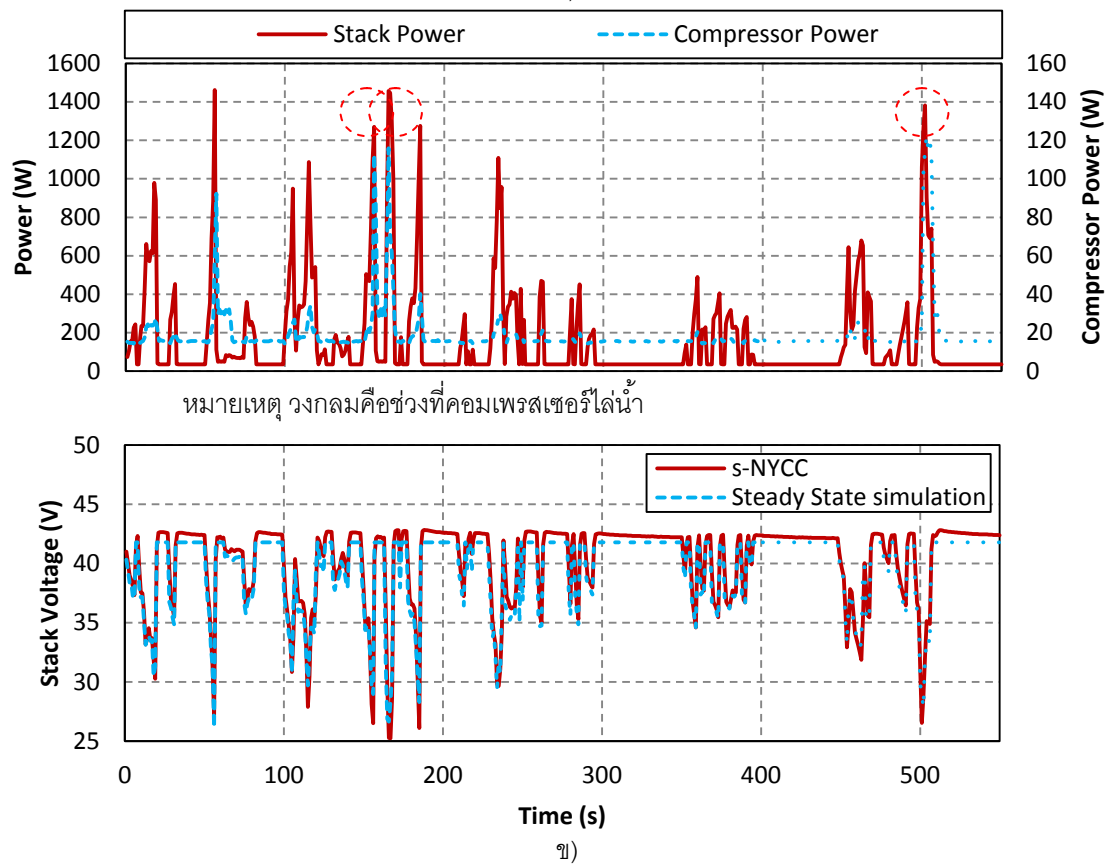
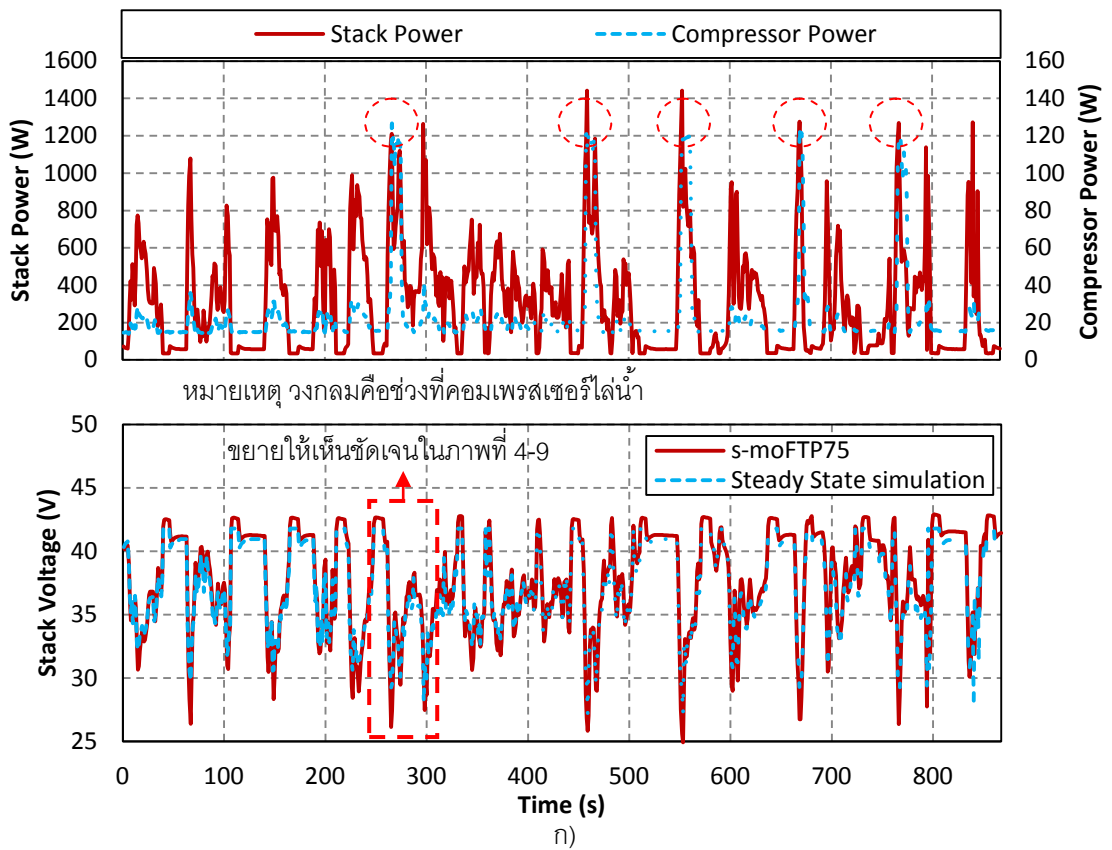
เมื่อพิจารณาช่วงการไล่น้ำของคอมเพรสเซอร์ในวัฏจักร s-modified FTP75 s-NYCC และ s-ECE15 ดังภาพที่ 4-8 ก ถึง ค ตามลำดับ พบว่าคอมเพรสเซอร์ไล่น้ำเป็นจำนวน 5 ครั้งในวัฏจักร s-modified FTP75 3 ครั้งในวัฏจักร s-NYCC และ 1 ครั้งในวัฏจักร s-ECE15 ซึ่งมักจะพบการไล่น้ำในช่วงที่เซลล์แวลผลิตกำลังไฟฟ้าขึ้นสูงอย่างรวดเร็วตั้งแต่ 1000 วัตต์ขึ้นไปดังแสดงด้วยวงกลมสีแดง ในการไล่น้ำแต่ละครั้งคอมเพรสเซอร์จะบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นถึง 120 วัตต์ ในขณะที่การทำงานในสภาวะคงตัว (ไม่ไล่น้ำ) คอมเพรสเซอร์บริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียง 60 วัตต์เท่านั้น อย่างไรก็ตามในวัฏจักร s-HWFET ดังรูปที่ 4-8 ง ไม่พบการไล่น้ำของคอมเพรสเซอร์ โดยสังเกตจากคอมเพรสเซอร์บริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียง 60 วัตต์เช่นเดียวกับการทำงานในสภาวะคงตัว

เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แวลในขณะที่คอมเพรสเซอร์ไล่น้ำ ในที่นี้ผู้วิจัยจะนำเสนอให้เห็นชัดเจนเฉพาะช่วงระยะเวลาการไล่น้ำครั้งแรกในวัฏจักร s-modified FTP75 ดังภาพที่ 4-9 ซึ่งเป็นช่วงเวลาตั้งแต่วินาทีที่ 250 จนถึงวินาทีที่ 310 สำหรับช่วงระยะเวลาการไล่น้ำอื่นๆ ในวัฏจักร s-modified FTP75, s-NYCC และ s-ECE15 จะแสดงไว้ในภาคผนวก ง เมื่อพิจารณาภาพที่ 4-9 เซลล์แวลเริ่มผลิตกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นตามภาวะจากวินาทีที่ 261 จนถึงภาวะสูงสุดในวินาทีที่ 266 ในช่วงเวลาดังกล่าวนี้นพบว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แวลเริ่มลดลงจากสภาวะคงตัวอย่างเห็นได้ชัดเมื่อถึงวินาทีที่ 265 ซึ่งเป็นวินาทีที่เกิดสภาวะน้ำท่วม หลังจากนั้นในวินาทีถัดมาคือวินาทีที่ 266 คอมเพรสเซอร์จึงทำหน้าที่ไล่น้ำโดยทันที โดยสังเกตจากการทำงานของคอมเพรสเซอร์ที่ทำงานด้วยความเร็วรอบสูงสุดและบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นถึง 120 วัตต์ เป็นระยะเวลา 10 วินาที (จากวินาทีที่ 266 ถึง 275) ระหว่างช่วงวินาทีที่คอมเพรสเซอร์ไล่น้ำ ผู้วิจัยสังเกตเห็นปริมาณน้ำจำนวนมากไหลออกมาจากท่ออากาศขาทิ้งและสังเกตได้ว่าแรงดันไฟฟ้าของ

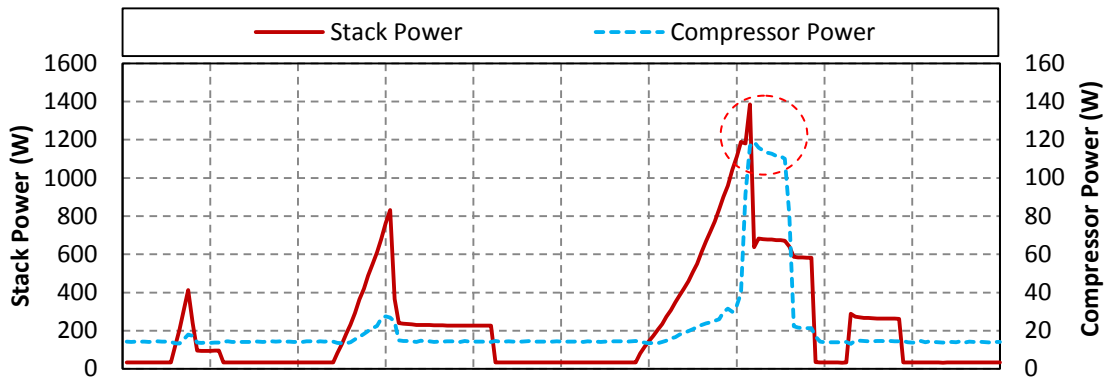
เซลล์แถมเริ่มกลับมาใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัวมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าหลังจากการไล่น้ำแล้วเซลล์แถมกลับมามีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกับสภาวะคงตัวอย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าการไล่น้ำของคอมเพรสเซอร์เกิดขึ้นเฉพาะกรณีที่เซลล์แถมผลิตกำลังไฟฟ้าขึ้นสูงเกิน 1000 วัตต์กรณีเดียวหรือไม่ ผู้วิจัยจึงได้พิจารณาช่วงเวลาหลังจากที่คอมเพรสเซอร์ไล่น้ำจากวินาทีที่ 297 ถึง 300 ถึงแม้ว่าในช่วงนี้เซลล์แถมต้องผลิตกำลังไฟฟ้าขึ้นสูงเกิน 1000 วัตต์ แต่พบว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แถมไม่แตกต่างจากแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัวและคอมเพรสเซอร์ก็ไม่ได้ทำงานด้วยความเร็วรอบสูงสุด จึงบ่งบอกได้ว่าในช่วงเวลานี้ไม่เกิดสภาวะน้ำท่วม ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แถมจาก วัฏจักร s-HWFET ดังภาพที่ 4-8 พบว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แถมมีความใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัวตลอดทั้งวัฏจักร และไม่พบการไล่น้ำของคอมเพรสเซอร์ จากผลที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการทำงานของคอมเพรสเซอร์มีความสอดคล้องกับช่วงเวลาการเกิดน้ำท่วม กล่าวคือในช่วงเวลาปกติที่ไม่เกิดสภาวะน้ำท่วม คอมเพรสเซอร์มีหน้าที่จ่ายอากาศให้เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเคมีเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อใดที่ปริมาณน้ำในเมมเบรนเพิ่มมากขึ้นจนเกิดสภาวะน้ำท่วม ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แถมลดต่ำลงจากสภาวะคงตัว ระบบเสริมซึ่งคือคอมเพรสเซอร์จะทำหน้าที่ไล่น้ำที่ตกค้างในช่องทางการไหลของอากาศโดยทันที หลังจากที่ได้ไล่น้ำแล้วเซลล์แถมจะกลับมามีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกับสภาวะคงตัวเช่นเดิม

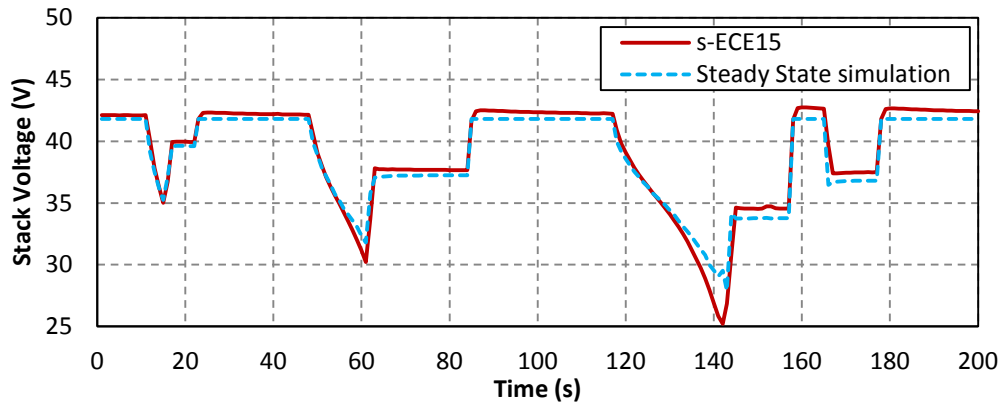
อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าวัฏจักร s-modified FTP75 และ s-NYCC มีช่วงเวลาการเกิดสภาวะน้ำท่วมที่บ่อยครั้งและส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แถมลดต่ำลงจากการทำงานในสภาวะคงตัวในช่วงกระแสสูง ดังผลการทดสอบที่แสดงมาทั้งหมดข้างต้น แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของเซลล์แถมภายใต้วัฏจักรขับขึ้นและประสิทธิภาพเฉลี่ยของเซลล์แถมจากการคำนวณด้วยข้อมูลในสภาวะคงตัว พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของเซลล์แถมภายใต้วัฏจักร s-moFTP75, s-NYCC, s-ECE15 และ s-HWFET ต่างจากสภาวะคงตัวเพียง 1.1%, 0.98%, 1.14% และ 2.1% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเซลล์แถมที่ทดสอบภายใต้วัฏจักรขับขึ้นทั้งสี่วัฏจักรแสดงพฤติกรรมที่ไม่แตกต่างจากการทำงานในสภาวะคงตัว จากผลการทดสอบดังกล่าวผู้วิจัยสามารถสรุปได้จากสาเหตุหลักสองประการ ประการแรกวัฏจักรขับขึ้นทั้งสี่วัฏจักรนั้นมีช่วง n-slew rate ไม่สูงพอที่จะส่งผลให้เซลล์แถมแสดงพฤติกรรมแตกต่างจากสภาวะคงตัว ประการที่สองระบบเสริมคือคอมเพรสเซอร์คอยทำหน้าที่ไล่น้ำโดยทันทีเมื่อพบว่าเซลล์แถมเกิดสภาวะน้ำท่วม จึงทำให้เซลล์แถมกลับมามีสมรรถนะใกล้เคียงกับสภาวะคงตัวโดยทันที



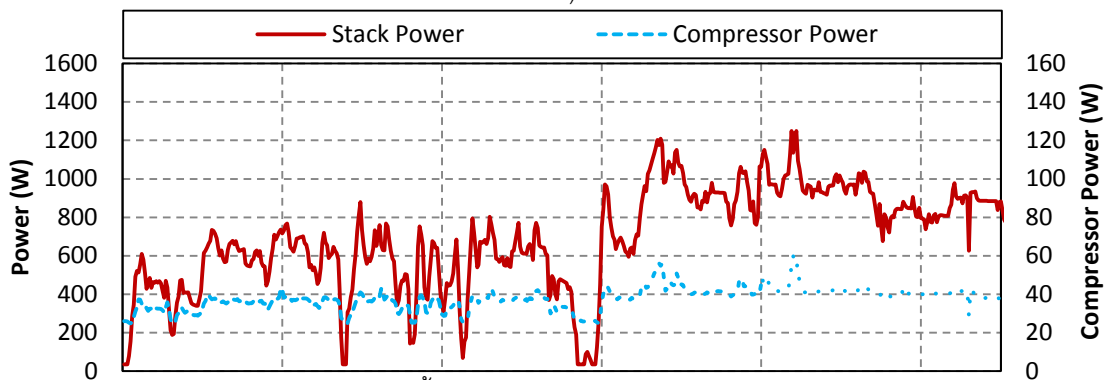
ภาพที่ 4-8 ช่วงการไล่น้ำของคอมเพรสเซอร์ในวัฏจักร ก) s-modified FTP75 ข) s-NYCC



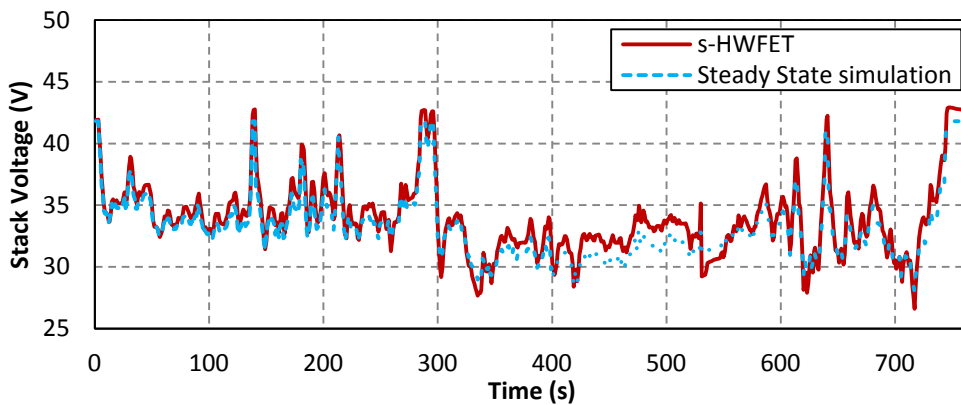
หมายเหตุ วงกลมคือช่วงที่คอมเพรสเซอร์ไล่น้ำ



ค)

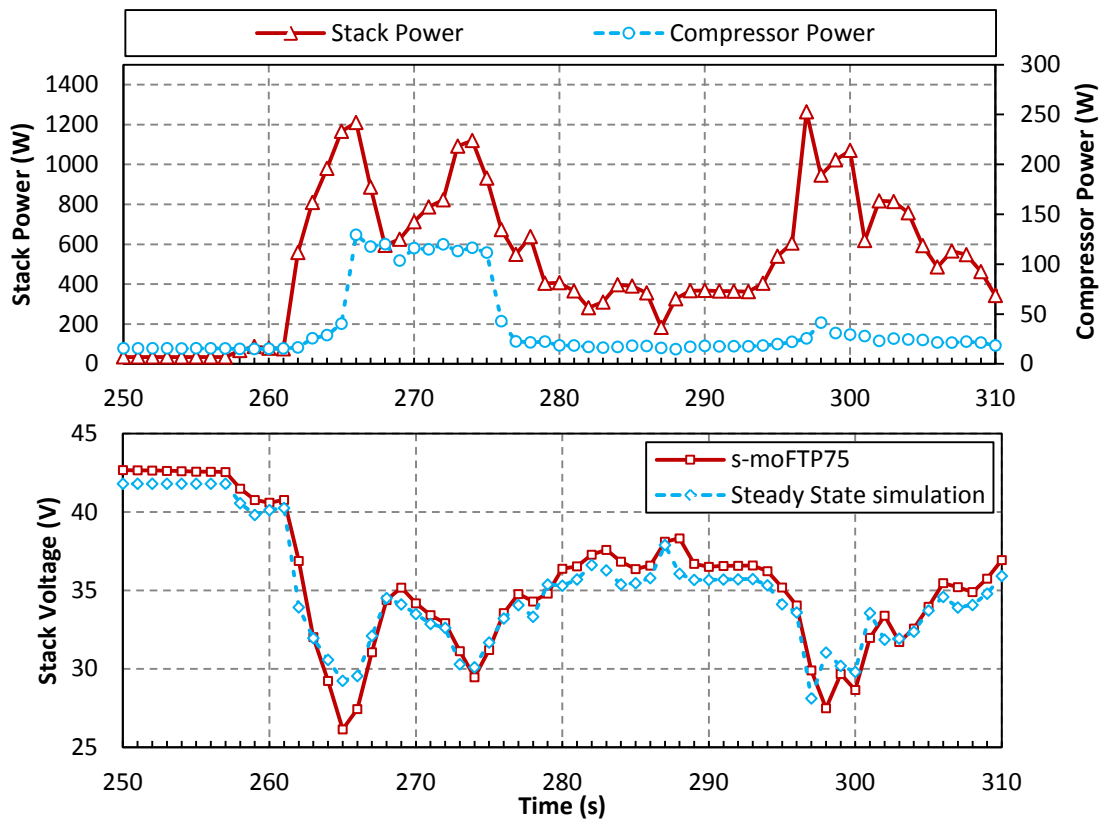


หมายเหตุ ไม่เกิดการไล่น้ำ



ง)

ภาพที่ 4-8 (ต่อ) ช่วงการไล่น้ำของคอมเพรสเซอร์ในวัฏจักร ค) s-ECE15 ง) s-HWFET



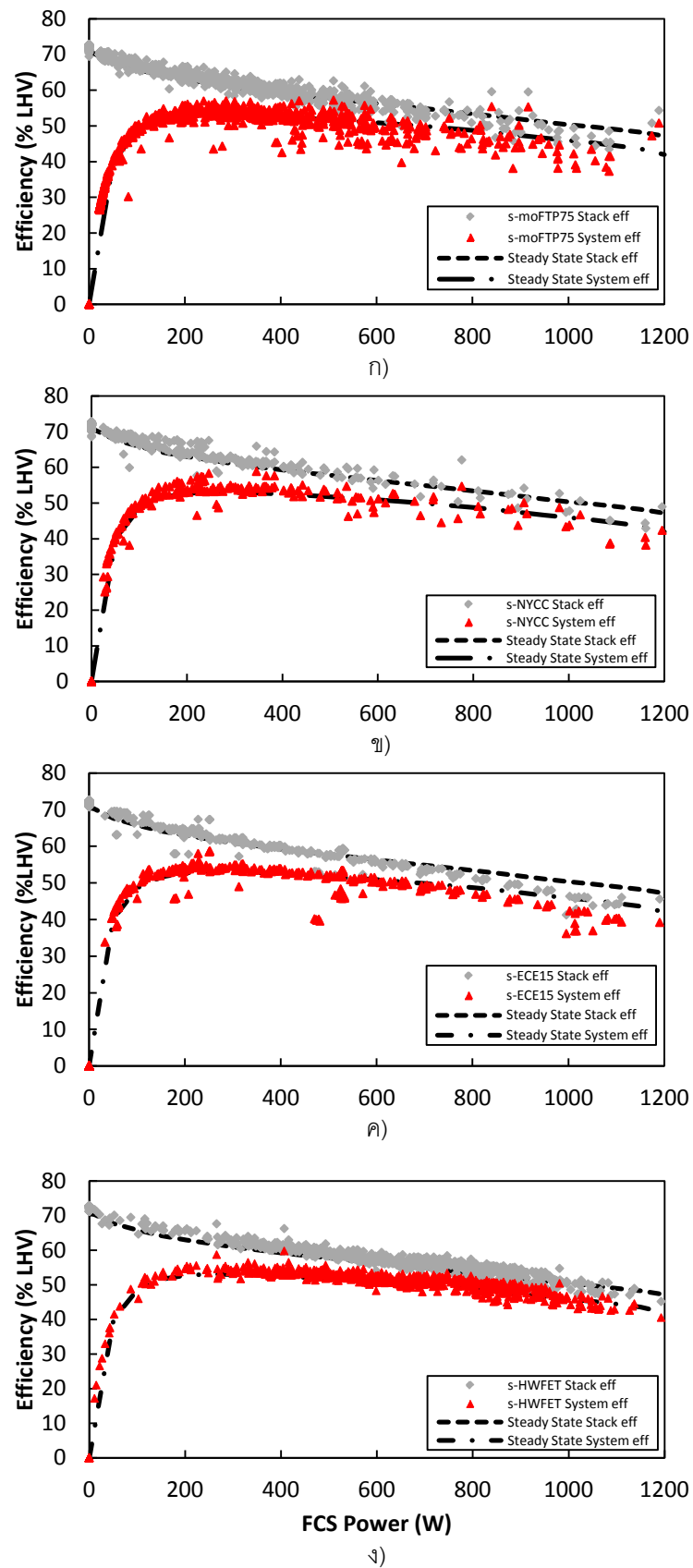
ภาพที่ 4-9 ส่วนขยายช่วงเวลาการไล่น้ำครั้งแรกในวัฏจักร s-modified FTP75

ผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4.2.2.1 เป็นผลการทดสอบที่น่าเสนอเฉพาะพฤติกรรมของเซลล์ แกวภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัว ซึ่งสรุปได้ว่าเซลล์แกวมี่พฤติกรรมที่ไม่แตกต่างจาก สภาวะคงตัวอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามยังต้องพิจารณาจากพฤติกรรมของทั้งระบบเซลล์ เชื้อเพลิงซึ่งรวมทั้งเซลล์แกวและระบบเสริมทั้งหมดด้วย จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ผลการทดสอบ ของ Aki [12] และ Buchi [4] แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการกระจาย ตัวมากในช่วงภาระต่ำ ซึ่งขัดแย้งกับผลการศึกษาของ Ryu [13] และ Feroldi [14] ที่แสดงให้เห็น ถึงประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงนั้นไม่แตกต่างจากสภาวะคงตัว ดังนั้นในงานวิจัยปัจจุบัน จึงต้องพิจารณาพฤติกรรมของทั้งระบบเซลล์เชื้อเพลิงด้วย ดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2.2.2 สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวตามวัฏจักรขับซี

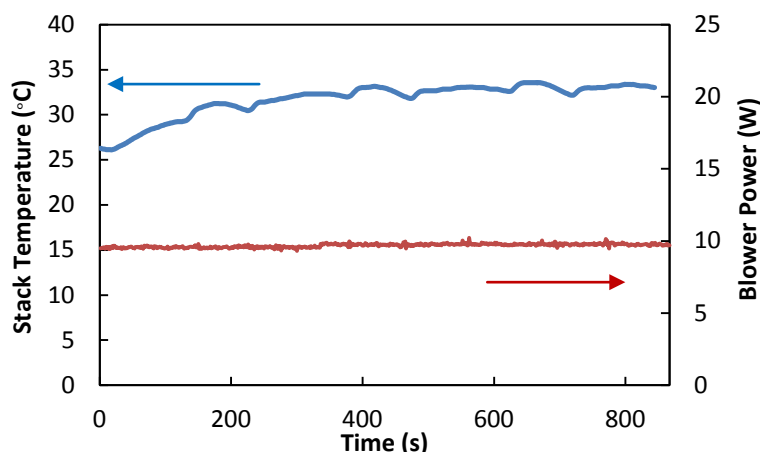
ประสิทธิภาพของเซลล์แกวและระบบเซลล์เชื้อเพลิงในวัฏจักร s-modified FTP75, s-NYCC, s-ECE15 และ s-HWFET แสดงดังภาพที่ 4-10 ก ถึง ง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบกับข้อมูลประสิทธิภาพของเซลล์แกวและระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะคงตัวที่แสดงดังเส้นประ เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4-10 ก ถึง ค แสดงให้เห็นว่าข้อมูลประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในวัฏจักร s-modified FTP75, s-NYCC และ s-ECE15 ตามลำดับ กระจายตัวแตกต่างจากสภาวะคงตัวมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการกระจายตัวของประสิทธิภาพของเซลล์แกว โดยเฉพาะในช่วงภาระสูงพบว่าประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงลดต่ำกว่าสภาวะคงตัวมาก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาวัฏจักร s-HWFET ดังภาพที่ 4-10 พบว่าประสิทธิภาพทั้งเซลล์แกวและระบบเซลล์เชื้อเพลิงกระจายตัวไม่แตกต่างจากสภาวะคงตัว ผลแสดงให้เห็นชัดเจนเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอัตราการบริโภคไฮโดรเจนในวัฏจักรขับซีและอัตราการบริโภคไฮโดรเจนในสภาวะคงตัว พบว่าอัตราการบริโภคไฮโดรเจนในวัฏจักร s-modified FTP75, s-NYCC, s-ECE15 และ s-HWFET แตกต่างจากสภาวะคงตัว 2.9%, 2.73%, 2.45% และ 0.08% ตามลำดับ

ผลการทดสอบสมรรถนะของเซลล์แกวที่ระบุว่าเซลล์แกวมีพฤติกรรมในวัฏจักรขับซีไม่แตกต่างจากสภาวะคงตัว เมื่อพิจารณาทั้งระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยเซลล์แกวและระบบเสริม เซลล์แกวจึงไม่ใช่สาเหตุที่ทำให้สมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีความแตกต่างจากสภาวะคงตัว ดังนั้นสาเหตุที่ทำให้ทำให้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีสมรรถนะแตกต่างจากสภาวะคงตัว น่าจะมาจากระบบเสริมที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงได้แก่ คอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศ ดังจะแสดงให้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4-10 ประสิทธิภาพของเซลล์แก๊สและระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัว
ตามวัฏจักรขับที่ต่างๆทั้ง 4

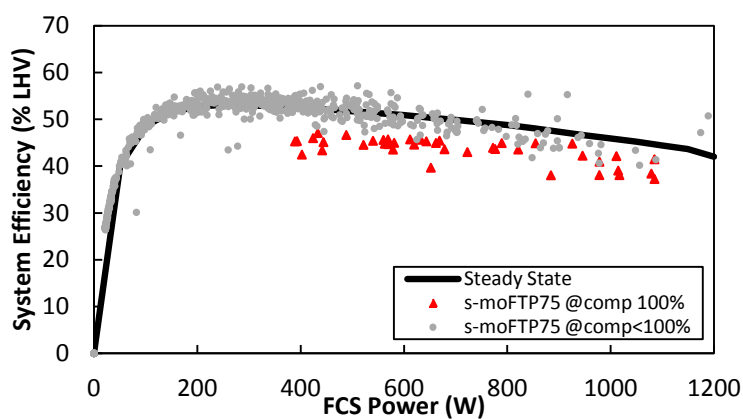
เมื่อพิจารณาการทำงานของคุณสมบัติของชุดพัดลมระบายอากาศภายใต้การทดสอบในวัฏจักรซ้ำที่พบว่าชุดพัดลมระบายอากาศทำงานด้วยความเร็วรอบคงที่อยู่ที่ 35% ตลอดระยะเวลาการทดสอบทั้งสี่วัฏจักร ซึ่งบริโภคกำลังไฟฟ้าโดยเฉลี่ยประมาณ 10 วัตต์ คิดเป็น 0.63% ของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แผลผลิตได้สูงสุดเท่านั้น ผลแสดงให้เห็นว่าชุดพัดลมระบายอากาศไม่ได้มีพฤติกรรมการทำงานตามภาระที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังเช่นคอมเพรสเซอร์ โดยชุดพัดลมระบายอากาศจะทำงานขึ้นอยู่กับการควบคุมของเซลล์แผลเท่านั้น จากผลการทดสอบในวัฏจักรซ้ำที่ทั้งสี่วัฏจักรพบว่าอุณหภูมิของเซลล์แผลจะคงที่อยู่ที่ประมาณ 30 ถึง 35 องศาเซลเซียส ดังแสดงจากภาพที่ 4-11 (เนื่องจากผลการทดสอบคล้ายกันทั้งสี่วัฏจักร ผู้วิจัยจึงนำเสนอเฉพาะวัฏจักร s-modified FTP75 เท่านั้น) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่สูงพอที่จะทำให้ชุดพัดลมระบายอากาศทำงานที่ความเร็วรอบสูงขึ้นอย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าชุดพัดลมระบายอากาศจะทำงานที่ความเร็วรอบสูงสุดซึ่งจะมีการบริโภคกำลังไฟฟ้าคิดเป็น 2.5% ของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แผลผลิตได้ ยังพบว่ามีย่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมทั้งหมด จึงสรุปได้ว่าชุดพัดลมระบายอากาศจึงไม่ใช่สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงลดลงจากสภาวะคงตัว



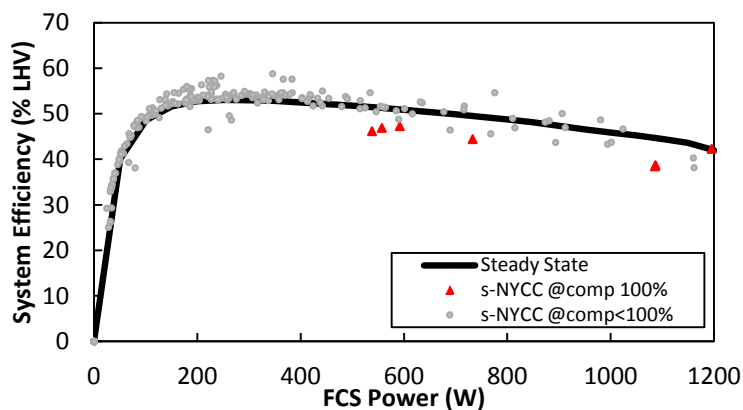
ภาพที่ 4-11 อุณหภูมิของเซลล์แผลและการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศ
ในวัฏจักร s-modified FTP75

ดังนั้นจึงเป็นที่แน่นอนว่าสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงลดลงจากสภาวะคงตัวนั้นมาจากการทำงานของคอมเพรสเซอร์ จากภาพที่ 4-12 ก ถึง ค แสดงให้เห็นข้อมูลประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในวัฏจักร s-modified FTP75 s-NYCC และ s-ECE15 ตามลำดับ โดยแยกข้อมูลประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงระยะเวลาการได้นำของคอมเพรสเซอร์ (comp = 100%) ด้วยจุดสามเหลี่ยม สำหรับข้อมูลประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงที่คอมเพรสเซอร์ไม่ได้ได้นำ (comp < 100%) แสดงด้วยจุดวงกลม จากภาพที่ 4-12

แสดงให้เห็นว่าในช่วงระยะเวลาที่คอมเพรสเซอร์ไอน้ำส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงลดต่ำกว่าการทำงานในสภาวะคงตัวอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในวัฏจักร s-modified FTP75 ดังภาพที่ 4-12 ก ที่พบการไอน้ำของคอมเพรสเซอร์บ่อยครั้งที่สุด เพื่อที่จะแสดงให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นในแง่มุมของอัตราการบริโภคไฮโดรเจน ผู้วิจัยจึงได้คำนวณอัตราการบริโภคไฮโดรเจนใหม่โดยนำข้อมูลในช่วงที่คอมเพรสเซอร์ไอน้ำออก จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบความแตกต่างกับอัตราการบริโภคไฮโดรเจนในสภาวะคงตัว ผลแสดงให้เห็นว่าอัตราการบริโภคไฮโดรเจนในวัฏจักรขับที่หลังจากนำข้อมูลในช่วงไอน้ำออกมีความแตกต่างจากสภาวะคงตัวน้อยลง โดยในวัฏจักร s-modified FTP75 ลดลงจาก 2.9% เหลือ 0.86% วัฏจักร s-NYCC ลดลงจาก 2.73% เหลือ 0.36% และในวัฏจักร s-ECE15 ลดลงจาก 2.45% เหลือ 0.48%

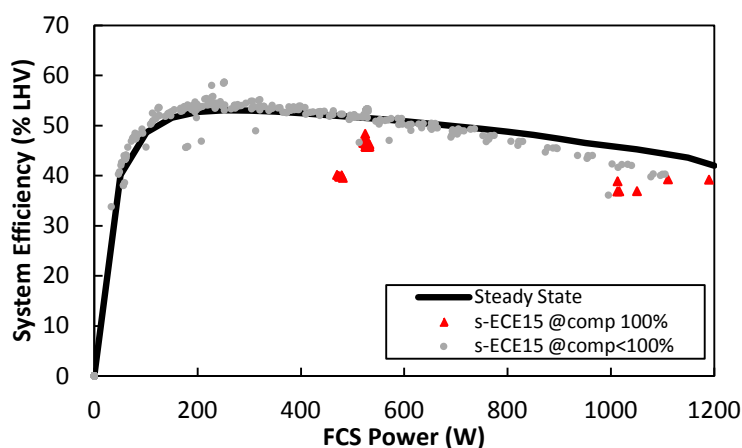


ก)



ข)

ภาพที่ 4-12 ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงระยะเวลาที่คอมเพรสเซอร์ไอน้ำ
และไม่ไอน้ำในวัฏจักร ก) s-modified FTP75 ข) s-NYCC



ค)

ภาพที่ 4-12 (ต่อ) ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงระยะเวลาที่คอมเพรสเซอร์ไอน้ำและไม่ไอน้ำในวัฏจักร ค) s-ECE15

ผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4.2.2.2 นี้ แสดงให้เห็นถึงสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงลดต่ำลงจากสภาวะคงตัว นั่นคือคอมเพรสเซอร์ โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่คอมเพรสเซอร์ไอน้ำ ในช่วงนี้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงลดต่ำลงจากสภาวะคงตัวมากอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาถึงสาเหตุหลักที่แท้จริงก็คือ การเกิดสภาวะน้ำท่วมในเมมเบรนที่ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์แถวลดต่ำลงมาก ดังนั้นในการทำงานของเซลล์แถวจึงต้องพึ่งพาระบบเสริม ทั้งในส่วนของคอมเพรสเซอร์ที่ช่วยไอน้ำในกรณีที่เกิดสภาวะน้ำท่วม และชุดพัดลมระบายอากาศที่ช่วยระบายความร้อนในกรณีที่อุณหภูมิของเซลล์แถวสูงเกินไป อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ระบุได้เพียงแค่ว่าสาเหตุที่มาจากสภาวะน้ำท่วมเท่านั้น ดังนั้นการพัฒนาระบบเซลล์เชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพดีนั้น จึงต้องคำนึงเรื่องการเกิดสภาวะน้ำท่วมในเมมเบรน ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษานี้ใช้เมมเบรนชนิด Nafion 112 ซึ่งเมมเบรนชนิดนี้ต้องอาศัยปริมาณความชื้นที่เหมาะสมโดยอาศัยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความชื้น (humidifier) จึงจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามปัญหาที่ตามมา นั่นคือ ปริมาณน้ำที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดสภาวะน้ำท่วมดังกล่าว รวมถึงราคาและความซับซ้อนของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย [7] ดังนั้นถ้าสามารถพัฒนาเมมเบรนที่ไม่ต้องอาศัยความชื้นสูงนัก ก็จะสามารถลดปัญหาการเกิดน้ำท่วมได้ นอกจากนี้การออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ open cathode ซึ่งเป็นระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ระบบเสริมเพียงพัดลมระบายอากาศทำหน้าที่ทั้งระบายความร้อนและจ่ายอากาศ โดยไม่ต้องใช้คอมเพรสเซอร์ อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาเปรียบเทียบถึงการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย ระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีระบบเสริมทั้งคอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศจะสามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลายมากกว่า

บทที่ 5

แนวทางการออกแบบระบบเสริม

ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในบทที่ 4 แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของระบบเสริมซึ่งมีหน้าที่คอยช่วยเหลือให้เซลล์แถวทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบเสริมดังกล่าวคือคอมเพรสเซอร์มีหน้าที่ป้อนอากาศให้เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาและไล่น้ำที่ตกค้างในช่องทางการไหล และชุดพัดลมระบายอากาศมีหน้าที่ระบายความร้อนอันเป็นผลจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีให้กับเซลล์แถว เพื่อไม่ให้มีอุณหภูมิที่สูงเกินไป นอกจากนี้ยังมีระบบเสริมอื่นๆ เช่น โซลีนอยด์วาล์ว วาล์วไล่น้ำ เป็นต้น ล้วนแล้วแต่เป็นระบบที่มีความสำคัญต่อการดำเนินงานของเซลล์แถวทั้งสิ้น แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะระบบเสริมที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงนั่นคือคอมเพรสเซอร์ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจากผลการทดสอบในบทที่ 4 ระบุว่าชุดพัดลมระบายอากาศมีการบริโภคกำลังไฟฟ้าน้อยมากเมื่อเทียบกับคอมเพรสเซอร์ แต่ไม่สามารถละทิ้งการพิจารณาชุดพัดลมระบายอากาศได้ เนื่องจากอุณหภูมิของเซลล์แถวถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปทำให้เมมเบรนสูญเสียน้ำไปมาก ทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรนต่ำลงรวมทั้งส่งผลให้เมมเบรนเสื่อมสภาพเร็วขึ้นด้วย [7]

วัตถุประสงค์ของการออกแบบระบบเสริมในงานวิจัยนี้คือ เพื่อกำหนดขนาดเบื้องต้นของระบบเสริมได้แก่ คอมเพรสเซอร์ และชุดพัดลมระบายอากาศ ที่ใช้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดพิกัด 1 กิโลวัตต์ โดยมีระบบเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบคือ ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนรุ่น NEXA พิกัด 1.2 กิโลวัตต์ สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำงานของระบบเสริม เพื่อให้ทราบว่าระบบเสริมที่ใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบถูกออกแบบมาให้สามารถช่วยเหลือการทำงานของเซลล์แถวได้นั้นต้องมีขนาดกำลังไฟฟ้าเท่าใด และจ่ายอากาศด้วยอัตราเท่าใดจึงจะเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในกรณีที่ เป็นคอมเพรสเซอร์ หรือจ่ายอากาศด้วยปริมาณเท่าใดถึงเพียงพอต่อการระบายความร้อนจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในกรณีที่ เป็นชุดพัดลมระบายอากาศ เมื่อทราบข้อมูลดังกล่าวจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบ ย่อมเป็นแนวทางในการออกแบบระบบเสริมเพื่อใช้กับเซลล์แถวอื่นๆต่อไป

แนวทางการออกแบบระบบเสริมจากงานวิจัยต่างๆ แบ่งออกเป็นสองแนวทางคือ 1) แนวทางการประเมินกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก (isentropic model) [32-34] ซึ่งอ้างอิงการทำงานในสภาวะคงตัวเป็นหลัก อย่างไรก็ตามแบบจำลองไอเซนทรอปิกยังมีข้อจำกัดในด้านความแม่นยำของแบบจำลอง รวมถึงจำกัดอยู่เฉพาะการทำงานในสภาวะคงตัวเป็นหลักเท่านั้น และ 2) แนวทางการประเมินกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมจากการทดสอบแล้วนำ

ข้อมูลไปสร้างแบบจำลองจากกราฟความสัมพันธ์ (curve fitting) [9,18,42] ซึ่งสามารถใช้อ้างอิงการทำงานของระบบเสริมในสถานะไม่คงตัวได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตามแบบจำลองจากการทดสอบระบบเสริมจำกัดอยู่แค่เพียงระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบเท่านั้น ไม่สามารถนำแบบจำลองไปใช้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นที่มีลักษณะที่แตกต่างออกไป

จากทั้งสองแนวทางการออกแบบระบบเสริมดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยเลือกแนวทางการออกแบบระบบเสริมจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้ได้ครอบคลุมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่หลากหลาย และผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่าระบบเสริมที่ทำงานภายใต้สถานะคงตัวและไม่คงตัวมีพฤติกรรมที่ไม่แตกต่างกันมากนัก (ไม่เกิน 5%) ดังนั้นแบบจำลองไอเซนทรอปิกจึงสามารถใช้เป็นแนวทางการออกแบบระบบเสริมในงานวิจัยนี้ได้ นอกจากนี้ผลจากแบบจำลองยังสามารถเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

5.1 แนวทางการออกแบบคอมเพรสเซอร์

จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ผู้วิจัยเลือกใช้แนวทางการออกแบบระบบเสริมจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก อย่างไรก็ตามแบบจำลองไอเซนทรอปิกยังมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำของแบบจำลองดังจะเห็นได้จากการศึกษาของ Shevock [34] ที่แสดงให้เห็นว่าการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิกมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองประมาณ 60% นอกจากนี้ผลการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิกในการศึกษาของ Shevock [34] ระบุว่าคอมเพรสเซอร์บริโภคกำลังไฟฟ้าน้อยมาก (ใกล้เคียงศูนย์) ในย่านอัตราการใช้โหลดต่ำ ในขณะที่ผลการทดลองระบุว่าคอมเพรสเซอร์บริโภคกำลังไฟฟ้าประมาณ 10 วัตต์ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองไอเซนทรอปิกเพียงอย่างเดียวนั้นมีความคลาดเคลื่อนสูง สมมติฐานในงานนี้คือ ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากไม่ได้ประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียไปในมอเตอร์ซึ่งคอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA นั้นขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ชนิด BLDC กำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งจึงสูญเสียไปเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ดังนั้นเพื่อให้แนวทางการออกแบบคอมเพรสเซอร์มีความแม่นยำมากขึ้น ผู้วิจัยจึงใช้แนวทางการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิกรวมกับการประเมินการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์ ถ้าการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าจากทั้งสองส่วนมีความใกล้เคียงกับการทดลอง ก็สามารถสรุปได้ว่าแนวทางการออกแบบคอมเพรสเซอร์ที่นำเสนอในหัวข้อนี้สามารถใช้เป็นแนวทางการออกแบบคอมเพรสเซอร์สำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิงต่อไปได้

5.1.1 การประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิก

ผลการทดสอบในบทที่ 4 ทำให้ทราบว่าคอมเพรสเซอร์มีหน้าที่จ่ายอากาศให้เพียงพอต่อปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และไอน้ำที่ตกค้างในช่องทางการไหล โดยอัตราการไหลของอากาศที่เพียงพอต่อปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีนั้นมีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่เซลล์แถวผลิตได้ อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของอากาศดังกล่าวยังต้องเอาชนะความดันตก (pressure drop) ทั้งในส่วนของช่องทางการไหลของอากาศและช่องทางการไหลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความชื้น (humidifier) ในกรณีที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความชื้นภายนอก นอกจากนี้ในขณะที่เกิดสภาวะน้ำท่วมในเมมเบรน ความดันตกในช่องทางการไหลจะเพิ่มขึ้น [43] ส่งผลให้คอมเพรสเซอร์ต้องจ่ายอากาศในอัตราสูงขึ้นและบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นมาก จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากกระบวนการไอเซนทรอปิกได้ดังสมการที่ 5-1 [9]

$$P_{comp} = \frac{\dot{m}_{air,in} c_{p,air} T_{amb}}{\eta_{comp}} \left[\left(\frac{P_{c,out}}{P_{c,in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (5-1)$$

เมื่อ $\dot{m}_{air,in}$ คือ อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิง (kg/s)

$c_{p,air}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอากาศ (kJ/kg K)

T_{amb} คือ อุณหภูมิของบรรยากาศ (K)

η_{comp} คือ ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของคอมเพรสเซอร์กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.4 [44]

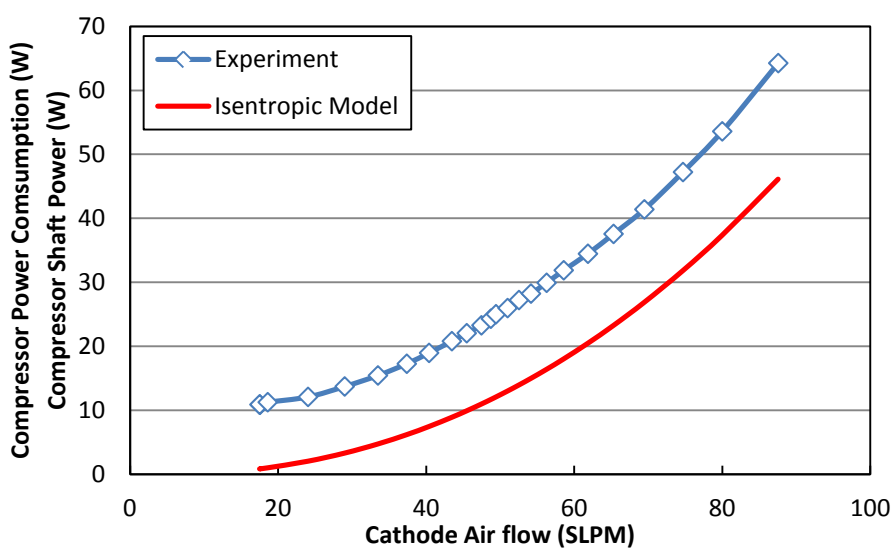
$P_{c,in}$ คือ ความดันขาเข้าคอมเพรสเซอร์

$P_{c,out}$ คือ ความดันขาออกคอมเพรสเซอร์

γ คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.4

การประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิกจากสมการที่ 5-1 จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิง ความดันขาเข้า และความดันขาออกคอมเพรสเซอร์ โดยอัตราการไหลของอากาศวัดโดยเครื่องวัดอัตราการไหล (airflow meter) ที่ติดตั้งเข้ากับระบบเซลล์เชื้อเพลิง ความดันขาเข้าและออกคอมเพรสเซอร์วัดโดยเซ็นเซอร์วัดผลต่างความดัน (pressure transducer) รุ่น ASDX030 ที่มีย่านการวัดอยู่ที่ 0 ถึง 30 psi โดยรายละเอียดอุปกรณ์การวัดและตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัดแสดงในภาคผนวก จ

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์การวัดดังกล่าวเสร็จสิ้น จึงเริ่มทดสอบการทำงานของคอมเพรสเซอร์ในสภาวะคงตัว โดยดำเนินการเช่นเดียวกับวิธีการทดสอบในหัวข้อที่ 3.3 ในบทที่ 3 เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศและความดันลดลงในช่องทางการไหลที่สภาวะการทำงานต่างๆ (แสดงผลในภาคผนวก จ) สำหรับใช้ในการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิก ผลการเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิกและการทดลองแสดงดังภาพที่ 5-1 ผลแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิกมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับการทดลอง แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 57% จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิกเพียงอย่างเดียวนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนสูง และการประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียไปในมอเตอร์ร่วมด้วยน่าจะให้ความแม่นยำที่สูงขึ้น ซึ่งผู้วิจัยจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

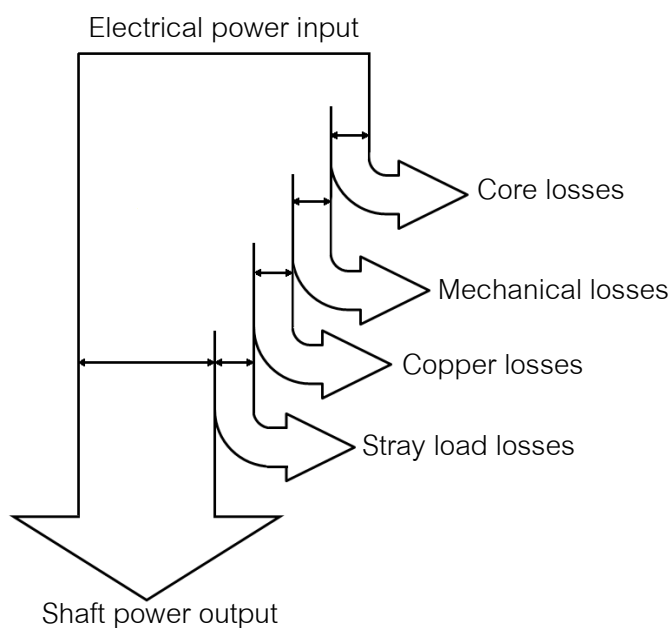


ภาพที่ 5-1 กำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิก และการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์จากการทดลอง

5.1.2 การประเมินการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์

คอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ชนิด BLDC กำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์ส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย 1) การสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses) ประกอบด้วยการสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก (hysteresis losses) และการสูญเสียจากกระแสไหลวนในวงจรแม่เหล็กของมอเตอร์

(eddy current losses) 2) การสูญเสียทางกล (mechanical losses) ประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (friction losses) เป็นการสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทานในตลับลูกปืนของมอเตอร์ และการสูญเสียจากแรงต้านของลม (windage losses) เป็นการสูญเสียเนื่องจากแรงต้านลมระหว่างส่วนที่หมุนของมอเตอร์และอากาศที่อยู่รอบๆ 3) การสูญเสียในขดลวดทองแดง (copper losses) ประกอบด้วย การสูญเสียในรูปความร้อนที่สเตเตอร์ (stator) และโรเตอร์ (rotor) เป็นผลที่เกิดจากความต้านทานของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำที่สเตเตอร์และตัวนำที่โรเตอร์ และ 4) การสูญเสียจากภาระใช้งาน (stray load losses) เป็นผลที่เกิดจากการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสของไหล การสูญเสียในส่วนนี้สามารถประเมินได้ว่ามีค่าประมาณ 1.8% ของกำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด [45] จึงสามารถทิ้งการสูญเสียจากภาระใช้งานได้ เมื่อหักลบการสูญเสียทั้งหมดออกจากกำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์ ส่วนที่เหลือคือกำลังไฟฟ้าขาออก โดยสามารถแสดงการสูญเสียในมอเตอร์ได้จากแผนภาพ Sankey ดังภาพที่ 5-2

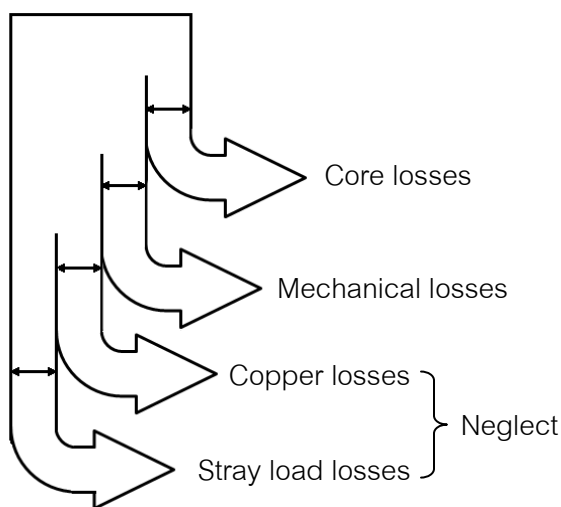


ภาพที่ 5-2 แผนภาพ Sankey แจกแจงการสูญเสียในมอเตอร์ชนิด BLDC

แนวทางการประเมินการสูญเสียในมอเตอร์สามารถทำได้สองแนวทางคือ 1) ประเมินโดยใช้แบบจำลองมอเตอร์ [44] และ 2) ประเมินโดยการทดสอบโดยตรง [45] แนวทางการประเมินการสูญเสียโดยใช้แบบจำลองมอเตอร์นั้นจะต้องทราบค่าคงที่ของมอเตอร์ เช่น ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (back EMF constant) ค่าคงที่ของแรงบิด (torque constant) ค่าคงที่ของแรงเสียดทาน (friction constant) เป็นต้น ซึ่งค่าคงที่ดังกล่าวนี้หาได้จากการทดสอบมอเตอร์หรือระบุจากผู้ผลิต อย่างไรก็ตามในกรณีนี้ไม่สามารถหาค่าคงที่ดังกล่าวได้ แนวทางการประเมินการสูญเสียในมอเตอร์โดยการทดสอบโดยตรงจึงเป็นแนวทางที่ผู้วิจัยเลือกใช้

การประเมินการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์โดยการทดสอบนั้นทำได้หลายวิธีตามมาตรฐานการทดสอบที่แตกต่างกันออกไป ในที่นี้ผู้วิจัยเลือกใช้การประเมินการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์ตามมาตรฐาน IEEE112 [45] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส (polyphase induction motors) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต่อการประเมินการสูญเสียโดยใช้วิธีการวัดโดยตรง การประเมินการสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียทางกล ทำได้โดยทดสอบมอเตอร์ในสภาวะไร้ภาระ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก สูญเสียทางกล และสูญเสียในขดลวดทองแดง (ในที่นี้ได้ละทิ้งการสูญเสียจากภาระใช้งาน) ขณะที่มอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้ภาระสามารถละทิ้งกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงได้ [45] เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในสภาวะไร้ภาระนั้นน้อยมาก ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์ในสภาวะไร้ภาระจึงเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูญเสียไปในแกนเหล็กและสูญเสียทางกลดังภาพที่ 5-3 ต่อไปนี้ผู้วิจัยจะกล่าวโดยรวมการสูญเสียทั้งสองส่วนว่าเป็นการสูญเสียรวมในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์

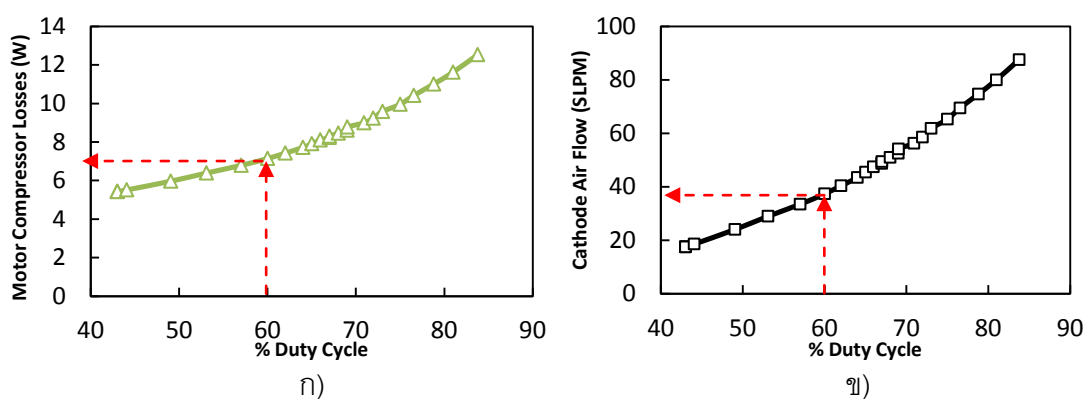
Electrical power input = Motor compressor losses



ภาพที่ 5-3 แผนภาพ Sankey แจกแจงการสูญเสียในมอเตอร์ชนิด BLDC ขณะทดสอบในสภาวะไร้ภาระ

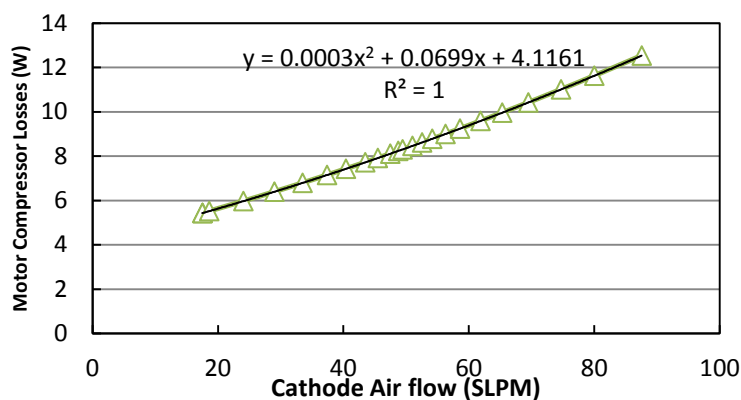
การทดสอบมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์ในสภาวะไร้ภาระกระทำโดยถอดท่ออากาศออกออกจากคอมเพรสเซอร์ ทำให้ความดันขาออกคอมเพรสเซอร์เท่ากับความดันบรรยากาศ เพื่อลดผลของกำลังไฟฟ้าจากการอัดอากาศให้น้อยที่สุด จากนั้นเริ่มทดสอบการทำงานของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ จนถึงความเร็วรอบสูงสุด บันทึกค่าความดันเข้าคอมเพรสเซอร์และอัตราการไหลของอากาศ เพื่อใช้ประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก แล้วหักลบออกจากกำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์ จึงได้ข้อมูลกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของ

คอมเพรสเซอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ ดังภาพที่ 5-4 ก ผลการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์ในภาพที่ 5-1 เทียบอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ ในขณะที่ผลการประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ในภาพที่ 5-4 ก เทียบอยู่กับความเร็วนั้น จำต้องเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศจากภาพที่ 5-4 ข และกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์จากภาพที่ 5-4 ก ที่ความเร็วรอบเดียวกัน จึงได้กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ ดังภาพที่ 5-5



ภาพที่ 5-4 ก) กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ข) อัตราการไหลของอากาศที่ความเร็วรอบต่างๆ

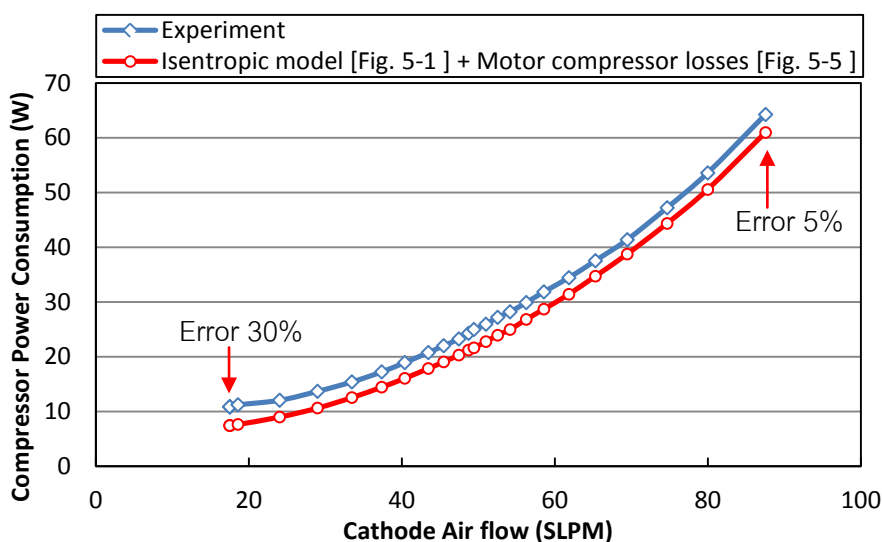


ภาพที่ 5-5 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ

หมายเหตุ % duty cycle หมายถึง สัญญาณที่สั่งการจากแผงควบคุมให้มอเตอร์หมุนตามความเร็วรอบที่ต้องการ ในสภาวะคงตัวคอมเพรสเซอร์จะทำงานที่ความเร็วรอบเริ่มต้น 43% และความเร็วรอบสูงสุดประมาณ 84% ซึ่งคอมเพรสเซอร์จะทำงาน 100% เฉพาะช่วงเวลาได้น้ำเท่านั้น โดยพบระหว่างการทำงานในสภาวะไม่คงตัวดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ทั้งนี้ในบทที่ 5 ผู้วิจัยอ้างอิงการทำงานของคอมเพรสเซอร์เฉพาะในสภาวะคงตัวเท่านั้น จึงแสดงผล % duty cycle ต่ำสุดคือ 43% และสูงสุดคือ 84% (ไม่ใช่สูงสุดที่ 100%)

5.1.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์และการทดลอง

เมื่อพิจารณาผลรวมระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิกจากภาพที่ 5-1 และกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์จากภาพที่ 5-5 จึงได้ผลการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ดังภาพที่ 5-6 ผลแสดงให้เห็นว่าเมื่อรวมกำลังไฟฟ้าทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันแล้ว ทำให้การบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มพบว่าการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ที่น่าเสนอในหัวข้อนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 30% ที่อัตราการไหลต่ำสุด และความคลาดเคลื่อนต่ำสุดประมาณ 5% ที่อัตราการไหลสูงสุด หรือคิดโดยเฉลี่ยประมาณ 15% อย่างไรก็ตามเพื่อการกำหนดขนาดของคอมเพรสเซอร์จะสนใจเฉพาะในย่านอัตราการไหลสูง จึงสรุปได้ว่าการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิกรวมกับการประเมินการสูญเสียในมอเตอร์จากการทดสอบในสภาวะไร้ภาระ สามารถนำไปใช้ประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ที่จะใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงต่อไปได้



ภาพที่ 5-6 การประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์เทียบกับผลการทดลอง

5.1.4 สรุปแนวทางการออกแบบคอมเพรสเซอร์

แนวทางการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ดังที่นำเสนอในหัวข้อข้างต้นสามารถใช้เป็นแนวทางในการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าและเลือกขนาดของมอเตอร์

สำหรับคอมเพรสเซอร์ได้ ในหัวข้อนี้จึงสรุปแนวทางการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ที่ใช้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันออกไป เช่น จำนวนเซลล์ ขนาดพื้นที่ของเซลล์ ลักษณะของช่องทางการไหลของอากาศ เป็นต้น โดยใช้วิธีประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิก ร่วมกับการสูญเสียในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์

การประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิก จำเป็นต้องทราบอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิง และความดันตกในช่องทางการไหลของอากาศ อัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิง (kg/s) สามารถประเมินได้จากสมการที่ 5-2 [33]

$$\dot{m}_{air,in} = \frac{\lambda M_{air} I_{st} N_{cell}}{4x_{O_2} F} \quad (5-2)$$

เมื่อ λ คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงและอัตราการไหลของอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (air stoichiometry) เนื่องจากใช้ออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยา จึงต้องคำนึงถึงสภาวะขาดออกซิเจน (oxygen starvation) โดยนิยามกำหนดให้ λ มีค่าเท่ากับ 2 [3], M_{air} คือ น้ำหนักโมเลกุลของอากาศมีค่าเท่ากับ 28.97×10^{-3} kg/mol, I_{st} คือ กระแสไฟฟ้าที่เซลล์แถวผลิตได้ (A), N_{cell} คือ จำนวนเซลล์ x_{O_2} คือ เศษส่วนโมลของอากาศมีค่าเท่ากับ 0.21 และ F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ 96,485 C/mol

แนวทางการประเมินความดันตกในช่องทางการไหลของอากาศที่หลายงานวิจัย [46-48] นิยมใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นสำหรับการออกแบบช่องทางการไหลของอากาศคือ วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (computational fluid dynamics, CFD) อย่างไรก็ตามความแม่นยำของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ เช่น การกำหนดคุณสมบัติของของไหล ลักษณะการไหลของของไหล ลักษณะของเงื่อนไขขอบเขต การเลือกใช้สมการการไหลให้เหมาะสม เป็นต้น ผู้วิจัยเลือกใช้แนวทางการกำหนดสมมติฐานจากงานวิจัยของ Gao [48] ได้สร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งประกอบไปด้วย แบบจำลองทางไฟฟ้า (electrical model) แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล (fluidic dynamic model) และแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ (thermal dynamic model) ในส่วนของแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลได้กำหนดสมมติฐานดังนี้ กำหนดให้ของไหลคืออากาศซึ่งประพฤติตัวเป็นก๊าซในอุดมคติที่มีลักษณะเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ ลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ ความดันตกในช่องทางการไหลเป็นผลมาจากการสูญเสียทางกลจากการไหลของอากาศ นอกจากนี้ผลจากแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงของ Gao [48] ยังได้ตรวจสอบความ

ถูกต้องกับผลจากการทดสอบด้วยเซลล์เชื้อเพลิง NEXA ซึ่งพบว่าแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนเพียง 2% สำหรับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Gao [48] เป็นการสร้างแบบจำลองขึ้นจากสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีความซับซ้อนในการเขียนโปรแกรม ดังนั้นการประเมินความดันตกในช่องทางการไหลอาจเลือกใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปสำหรับการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลดังเช่น Comsol, Fluent หรือ Ansys เป็นต้น แล้วอาศัยสมมติฐานที่อ้างอิงจากการศึกษาของ Gao [48] จึงเป็นแนวทางที่สะดวกและให้ผลที่แม่นยำ สำหรับการกำหนดขนาดเบื้องต้นของคอมเพรสเซอร์ที่ใช้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงต่อไปได้

สำหรับแนวทางการประเมินการสูญเสียในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์ ในกรณีที่ไม่ทราบค่าคงตัวของมอเตอร์ ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีประเมินโดยการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะไร้ภาระดังที่นำเสนอในหัวข้อที่ 5.1.2 ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน

5.2 แนวทางการออกแบบชุดพัดลมระบายอากาศ

แนวทางการออกแบบชุดพัดลมระบายอากาศใช้แนวทางเดียวกันกับแนวทางการออกแบบคอมเพรสเซอร์คือ ใช้แนวทางการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก ร่วมกับการประเมินการสูญเสียในมอเตอร์ของชุดพัดลมระบายอากาศ อย่างไรก็ตามสมมติฐานที่ใช้ในการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศอาจแตกต่างจากสมมติฐานที่ใช้ในการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ เนื่องจากหน้าที่การทำงานของคอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศนั้นแตกต่างกัน กล่าวคือหน้าที่หลักของชุดพัดลมระบายอากาศคือ สร้างอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นให้เพียงพอต่อการระบายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ในขณะที่หน้าที่หลักของคอมเพรสเซอร์คืออัดอากาศให้มีความดันเพียงพอต่อการไหลในช่องทางการไหล ดังนั้นปัจจัยหลักที่ส่งผลสำคัญต่อกำลังไฟฟ้าที่ประเมินจากแบบจำลองไอเซนทรอปิกของชุดพัดลมระบายอากาศและคอมเพรสเซอร์ก็คือ อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็น และความดันขาออกคอมเพรสเซอร์ ตามลำดับ นอกจากนี้มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนชุดพัดลมระบายอากาศและคอมเพรสเซอร์มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของอุปกรณ์ทั้งสองดังกล่าว

5.2.1 การประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก

ชุดพัดลมระบายอากาศมีหน้าที่ระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเซลล์แถวให้มีค่าไม่สูงเกินที่กำหนด ผลการทดสอบชุดพัดลมระบายอากาศ

จากบทที่ 4 ระบุว่า ชุดพัดลมระบายอากาศในระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA จะทำงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเซลล์แกวเป็นหลัก โดยชุดพัดลมระบายอากาศทำงานด้วยความเร็วรอบคงที่ที่ 35% duty cycle เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แกวต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แกวสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ชุดพัดลมระบายอากาศจะเริ่มทำงานด้วยความเร็วรอบสูงขึ้น และเมื่อเซลล์แกวมีอุณหภูมิสูงถึง 65 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่กำหนดไว้ ชุดพัดลมระบายอากาศจะทำงานด้วยความเร็วรอบสูงถึง 60% duty cycle

การประเมินสมมูลพลังงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงรายละเอียดอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ผู้วิจัยประเมินให้อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการระบายด้วยอากาศหล่อเย็น ชุดพัดลมระบายอากาศจะต้องผลิตอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นให้เพียงพอต่อการระบายความร้อนดังกล่าว รวมทั้งเอาชนะต่อความดันลดในช่องระบายอากาศ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากกระบวนการไอเซนทรอปิกสามารถประเมินได้จากสมการที่ 5-3 [9]

$$P_{blower} = \frac{\dot{m}_{air,cool} c_{p,air} T_{amb}}{\eta_{blower}} \left[\left(\frac{P_{b,out}}{P_{b,in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (5-3)$$

เมื่อ $\dot{m}_{air,cool}$ คือ อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็น (kg/s)

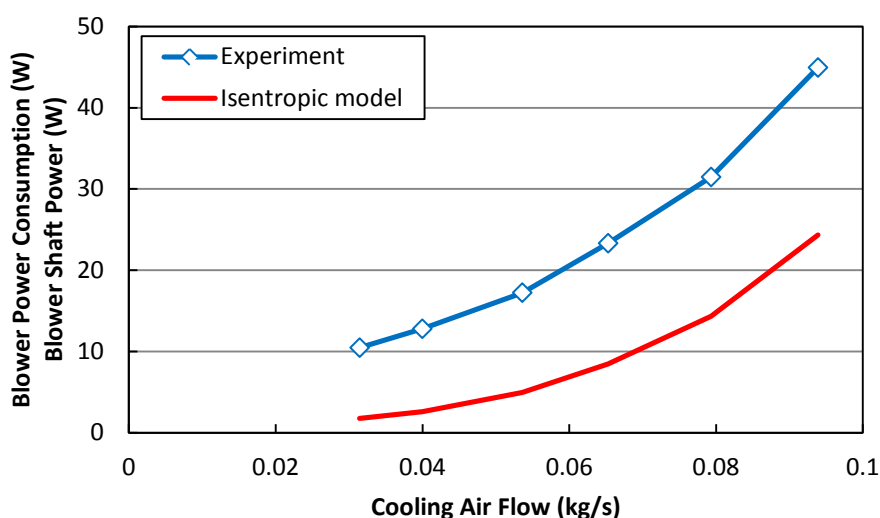
η_{blower} คือ ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของชุดพัดลมระบายอากาศ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.4 [44]

$P_{b,in}$ คือ ความดันขาเข้าชุดพัดลมระบายอากาศ

$P_{b,out}$ คือ ความดันขาออกชุดพัดลมระบายอากาศ

การประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิกจากสมการที่ 5-3 จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นความดันขาเข้า และความดันขาออกชุดพัดลมระบายอากาศ ในการศึกษานี้อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นประเมินจากการวัดความเร็วเฉลี่ยของอากาศหล่อเย็นผ่านพื้นที่หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งไว้ด้านบนเซลล์แกว โดยกำหนดตำแหน่งการวัดความเร็วของอากาศที่หลายจุดด้วยวิธี log-Tchebycheff [32] เพื่อความแม่นยำความดันขาเข้าและออกชุดพัดลมระบายอากาศวัดโดย inclined manometer รายละเอียดอุปกรณ์การวัดและตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัดแสดงในภาคผนวก จ

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์การวัดดังกล่าวเสร็จสิ้น จึงเริ่มทดสอบการทำงานของชุดพัดลมระบายอากาศในสภาวะคงตัว โดยดำเนินการเช่นเดียวกับวิธีการทดสอบในหัวข้อที่ 3.3 ในบทที่ 3 เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นและความดันลดลงในช่องทางระบายอากาศที่สภาวะการทำงานต่างๆ (แสดงผลในภาคผนวก จ) สำหรับใช้ประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก ผลการเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิกและการทดลองแสดงดังภาพที่ 5-7 ผลแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิกมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับการทดลอง แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 66% จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิกเพียงอย่างเดียวนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนสูงเช่นเดียวกับผลของคอมเพรสเซอร์ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5.1.1 และการประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียไปในมอเตอร์ร่วมด้วยน่าจะให้ความแม่นยำที่สูงขึ้น ซึ่งผู้วิจัยจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

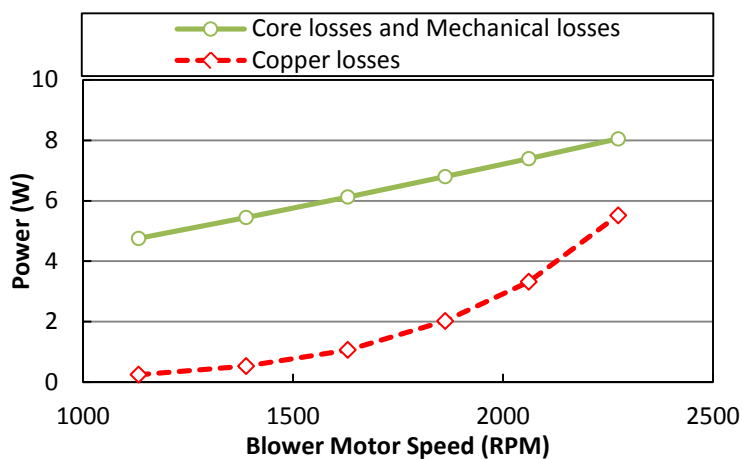


ภาพที่ 5-7 กำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิกและการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศจากการทดลอง

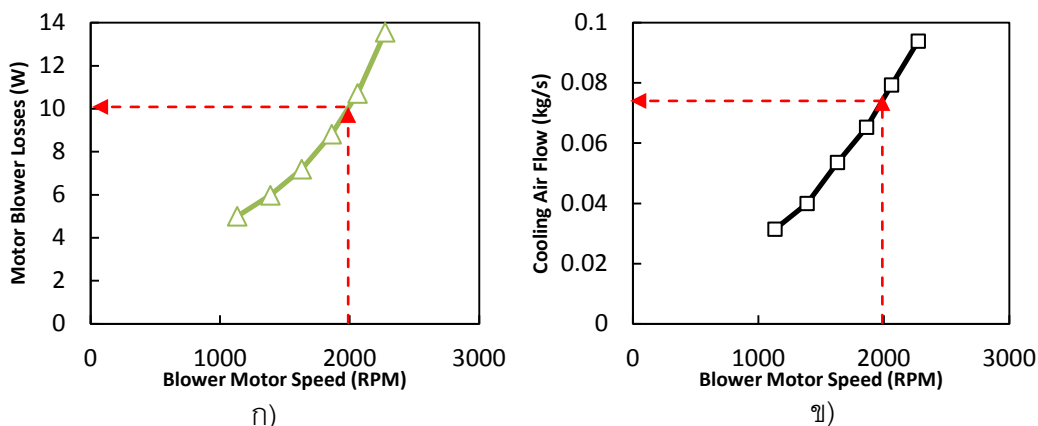
5.2.2 การประเมินการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์ของชุดพัดลมระบายอากาศ

ชุดพัดลมระบายอากาศที่ใช้ในงานวิจัยขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ชนิด BLDC ซึ่งเป็นมอเตอร์ชนิดเดียวกับมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ ดังนั้นแนวทางการประเมินการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์ของชุดพัดลมระบายอากาศจึงใช้แนวทางเดียวกันกับมอเตอร์ของ

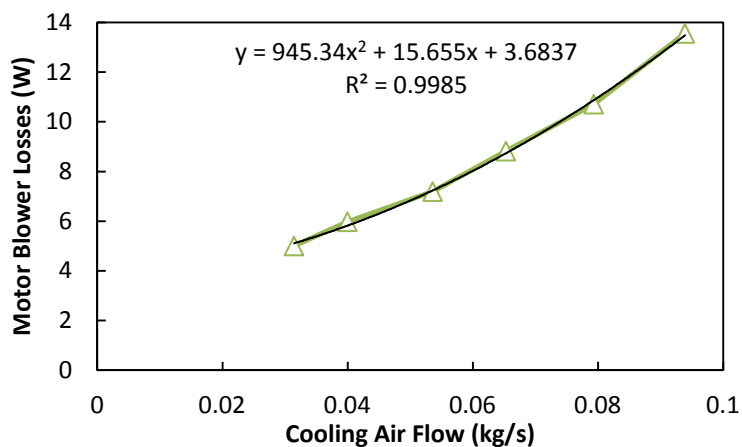
คอมเพรสเซอร์ นั่นคือประเมินโดยให้มอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้ภาระ เพื่อประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กและสูญเสียทางกล ในขั้นต้นผู้วิจัยได้ถอดพัดลมระบายอากาศออกจากมอเตอร์ จากนั้นเริ่มทดสอบการทำงานของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ จนถึงความเร็วรอบสูงสุด จึงได้ข้อมูลกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กและสูญเสียทางกลที่ความเร็วรอบต่างๆ ดังภาพที่ 5-8 อย่างไรก็ตามสมมติฐานที่ใช้ประเมินการสูญเสียในมอเตอร์ของชุดพัดลมระบายอากาศจะแตกต่างจากมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์ กล่าวคือ ในมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์ผู้วิจัยประเมินให้การสูญเสียทางกลโดยเฉพาะการสูญเสียทางกลจากแรงเสียดทานส่งผลสำคัญต่อการสูญเสียในมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์เป็นหลัก จึงละทิ้งการสูญเสียในขดลวดทองแดงและการสูญเสียจากภาระใช้งาน แต่ในมอเตอร์ของชุดพัดลมระบายอากาศ การสูญเสียทางกลจากแรงเสียดทานนั้นไม่ส่งผลสำคัญมากนัก ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 5-8 (เส้นทึบ) พบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กและสูญเสียทางกลมีค่ามากที่สุดโดยประมาณ 8 วัตต์ เมื่อนำไปรวมกับกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิกจากภาพที่ 5-7 พบว่ากำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งยังขาดหายไปโดยประมาณ 10 วัตต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงประเมินการสูญเสียในขดลวดทองแดงร่วมด้วย โดยประเมินจากผลคูณระหว่างกำลังสองของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ และความต้านทานในขดลวดของมอเตอร์ที่วัดโดยตรง จึงได้ข้อมูลการสูญเสียในขดลวดทองแดงที่ความเร็วรอบต่างๆ ดังภาพที่ 5-8 (เส้นประ) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการสูญเสียในมอเตอร์ของชุดพัดลมระบายอากาศประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก, สูญเสียทางกล และสูญเสียในขดลวดทองแดง ต่อไปนี้ผู้วิจัยจะกล่าวโดยรวมการสูญเสียทั้งสามส่วนว่าเป็นการสูญเสียรวมในมอเตอร์ของชุดพัดลมระบายอากาศ โดยแสดงการสูญเสียรวมดังภาพที่ 5-9 ก ผลการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศในภาพที่ 5-7 เทียบอยู่กับอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็น ในขณะที่ผลการประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ในภาพที่ 5-9 ก เทียบอยู่กับความเร็วยรอบ ดังนั้นจำเป็นต้องเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของชุดพัดลมระบายอากาศจากภาพที่ 5-9 ก และอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นจากภาพที่ 5-9 ข ที่ความเร็วรอบเดียวกัน จึงได้กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของชุดพัดลมระบายอากาศที่อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นต่างๆ ดังภาพที่ 5-10



ภาพที่ 5-8 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก, สูญเสียทางกล และสูญเสียในขดลวดทองแดงในมอเตอร์ของชุดพัฒนาระบายอากาศที่ความเร็วรอบต่างๆ



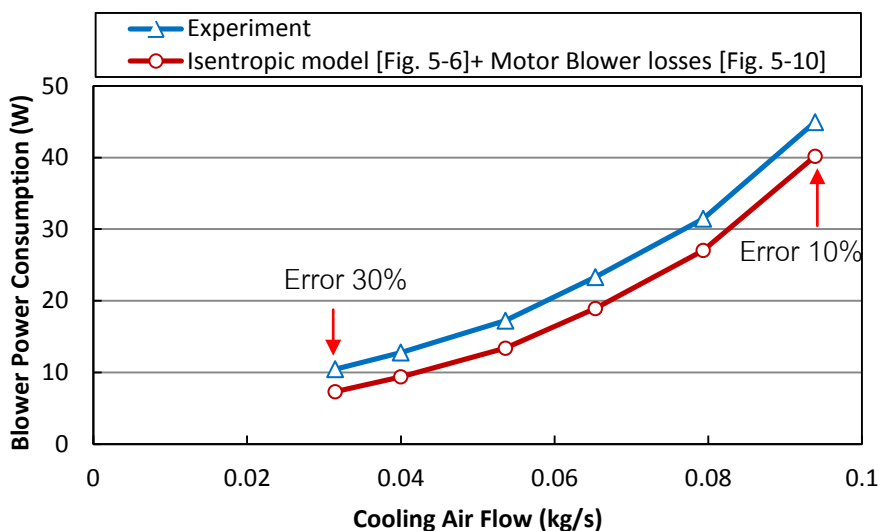
ภาพที่ 5-9 ก) กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของชุดพัฒนาระบายอากาศที่ความเร็วรอบต่างๆ
ข) อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นที่ความเร็วรอบต่างๆ



ภาพที่ 5-10 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของชุดพัฒนาระบายอากาศที่อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นต่างๆ

5.2.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศและการทดลอง

เมื่อพิจารณาให้กำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิกจากภาพที่ 5-7 รวมกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในมอเตอร์ของชุดพัดลมระบายอากาศจากภาพที่ 5-10 จึงได้ผลดังภาพที่ 5-11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อรวมกำลังไฟฟ้าทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันแล้ว ทำให้การประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มพบว่าการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศที่น่าเสนอในหัวข้อนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 30% ที่อัตราการไหลต่ำสุด และความคลาดเคลื่อนต่ำสุดประมาณ 10% ที่อัตราการไหลสูงสุด หรือคิดโดยเฉลี่ยประมาณ 20% อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนสูง แต่ผลการทดสอบในบทที่ 4 ระบุว่าชุดพัดลมระบายอากาศบริโภคกำลังไฟฟ้าน้อยมากเมื่อเทียบกับคอมเพรสเซอร์ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนนี้จึงถือว่าไม่มากนักเมื่อพิจารณาทั้งระบบเสริม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิกร่วมกับการประเมินการสูญเสียของมอเตอร์ที่ประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก, สูญเสียทางกล และสูญเสียในขดลวดทองแดง สามารถนำไปใช้ประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศที่จะใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงต่อไปได้



ภาพที่ 5-11 การประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศเทียบกับผลการทดลอง

5.2.4 สรุปแนวทางการออกแบบชุดพัดลมระบายอากาศ

แนวทางการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศดังที่นำเสนอในหัวข้อข้างต้น โดยอาศัยแนวทางเดียวกันกับการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมพิวเตอร์สามารถใช้ประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงสรุปแนวทางการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศที่ใช้กับระบบเซิร์ฟเวอร์เซิร์ฟเวอร์ที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อน ลักษณะช่องทางระบายอากาศที่แตกต่างออกไป โดยใช้วิธีประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก ร่วมกับการสูญเสียในมอเตอร์ของชุดพัดลมระบายอากาศ

การประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก จำเป็นต้องทราบอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็น และความดันตกในช่องระบายอากาศ จากสมการพลังงานที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.2.3 สามารถประเมินอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นได้จากสมการที่ 2-9 โดยจะพบว่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นคือ อุณหภูมิขาออกของอากาศหล่อเย็น [25] ซึ่งระบบเซิร์ฟเวอร์เซิร์ฟเวอร์ NEXA กำหนดให้อุณหภูมิของอากาศหล่อเย็นแตกต่างจากอุณหภูมิมัธยอากาศได้มากที่สุดประมาณ 17 องศาเซลเซียส [35] ที่การจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

แนวทางการประเมินความดันตกในช่องระบายอากาศ ผู้วิจัยเลือกใช้แนวทางเดียวกันกับการประเมินความดันตกในช่องทางการไหลของอากาศ กล่าวคือ ประเมินโดยใช้วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล โดยอาศัยสมมติฐานจากการศึกษาของ Gao [48] สำหรับแนวทางการประเมินการสูญเสียในมอเตอร์ของชุดพัดลมระบายอากาศอาศัยการประเมินจากการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะไร้อากาศดังรายละเอียดที่กล่าวในหัวข้อ 5.2.2

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นอุปกรณ์แปรรูปพลังงานไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีคือ น้ำและความร้อนเท่านั้น จึงถือได้ว่าปราศจากมลพิษโดยสิ้นเชิง เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้นิยมนำมาใช้งานในการผลิตกระแสไฟฟ้าในครัวเรือนและการขับเคลื่อนยานยนต์ เนื่องจากเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติการทำงานต่ำ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ระบบไม่ซับซ้อน การตอบสนองไว นอกจากนี้หนึ่งในข้อได้เปรียบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนคือ มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายใน อย่างไรก็ตามการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ในยานยนต์ยังประสบปัญหาด้านประสิทธิภาพ โดยพบว่าการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้สภาวะไม่คงตัวตามวัฏจักรขับขีที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างฉับพลันบ่อยครั้ง ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงกระจายตัวแตกต่างจากสภาวะคงตัวค่อนข้างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงภาระต่ำ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้สภาวะไม่คงตัวกระจายตัวแตกต่างจากสภาวะคงตัวนั้นอาจมาจากพฤติกรรมตอบสนองของเซลล์แกว่งต่อภาระที่ไม่คงตัว หรือระบบเสริมที่บริโภคกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูง ดังนั้นถ้าบ่งชี้ได้ชัดเจนถึงต้นเหตุหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง ย่อมทำให้การพัฒนาาระบบเซลล์เชื้อเพลิงเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว เพื่อที่จะระบุถึงต้นเหตุหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงทั้งในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว และระบุแนวทางการออกแบบระบบเสริมของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาดพิกัด 1 กิโลวัตต์ที่ออกแบบมาใช้ในยานยนต์ โดยใช้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนรุ่น NEXA ของบริษัท Ballard ขนาดพิกัด 1.2 กิโลวัตต์เป็นระบบเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบในการศึกษาในครั้งนี้

การทดสอบดำเนินการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงทั้งในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว การทดสอบในสภาวะคงตัวเป็นการทดสอบโดยให้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจ่ายภาระคงที่ ซึ่งระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะอยู่ในสภาวะที่มีคุณสมบัติของเซลล์แกว่ง แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การทดสอบในสภาวะไม่คงตัวได้อ้างอิงการใช้งานระบบเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งจ่ายพลังงานในรถจักรยานยนต์ขนาดเล็ก โดยใช้ภาระ

ตามวัฏจักรขับที่มีมาตรฐานที่มีลักษณะแตกต่างกันจำนวน 4 วัฏจักรได้แก่ 1) วัฏจักร modified FTP75 2) วัฏจักร NYCC 3) วัฏจักร ECE15 และ 4) วัฏจักร HWFET นอกจากนี้การระตามวัฏจักรขับที่ดังกล่าวยังต้องปรับลดขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้มีค่าไม่เกิด 1.2 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้โดยไม่เกิดความเสียหายต่อเซลล์เชื้อเพลิง

อย่างไรก็ตามการปรับลดขนาดของภาระในวัฏจักรขับซึ่งนั้น ทำให้วัฏจักรขับที่นำมาใช้ทดสอบอาจไม่สามารถอ้างอิงถึงการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในยานยนต์ขนาดกลางที่ใช้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 100 กิโลวัตต์ได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงนำเสนอพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกสภาพไม่คงตัวของภาระในรูปของอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (power slew rate) โดยทำให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์ไร้มิติ หรือ normalized slew rate (ย่อเป็น n-slew rate) หลังจากที่ใช้ n-slew rate เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้เปรียบเทียบสภาพที่ไม่คงตัวของภาระ พบว่าวัฏจักรขับที่ผ่านการปรับลดขนาดภาระในงานวิจัยนี้ได้แก่ วัฏจักร s-modified FTP75, s-NYCC, s-ECE15 และ s-HWFET มี n-slew rate อยู่ในช่วง ± 0.4 , ± 0.4 , ± 0.10 และ ± 0.15 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าช่วง n-slew rate ของภาระตามวัฏจักรขับที่ทั้งสี่ครอบคลุมวัฏจักรขับที่ใช้กับยานยนต์ขนาดกลาง (พิกัด 90 กิโลวัตต์) ทั้งช่วงบวกและช่วงลบ แสดงให้เห็นว่าวัฏจักรขับที่ผ่านการปรับลดขนาดภาระนี้สามารถใช้อ้างอิงการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดใหญ่ได้ นอกจากนี้ยังได้เลือกใช้ลักษณะภาระแบบไซน์ที่เทียบได้กับ n-slew rate ในช่วง ± 0.031 , ± 0.155 , ± 0.31 , ± 0.62 , ± 1.24 และ ± 1.55 ตามลำดับ เพื่อช่วยอธิบายลักษณะภาระตามวัฏจักรขับที่มีความซับซ้อนให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น โดยอาศัยช่วง n-slew rate ที่ใกล้เคียงกันในการเปรียบเทียบลักษณะภาระแบบไซน์กับลักษณะภาระตามวัฏจักรขับที่ได้กล่าวมา

ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงได้จำแนกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือ การทำงานของเซลล์แกว และการทำงานของระบบเสริมโดยจำกัดเฉพาะที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงได้แก่ ระบบจ่ายอากาศคือคอมเพรสเซอร์ และระบบจัดการความร้อนคือชุดพัดลมระบายอากาศ การวิเคราะห์ผลการการทำงานของเซลล์แกวจะพิจารณาในแง่มุมของประสิทธิภาพเป็นหลัก โดยการใช้การวิเคราะห์จาก polarization curve และกราฟประสิทธิภาพของเซลล์แกว การวิเคราะห์ผลการการทำงานของระบบเสริมจะแบ่งออกเป็นการพิจารณาในภาพรวมของทั้งระบบโดยการใช้การวิเคราะห์จากกราฟประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง และพิจารณาการทำงานของระบบเสริม ได้แก่คอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศ ในการวิเคราะห์ผลยังได้เปรียบเทียบการทำงานของเซลล์แกวและระบบเสริมระหว่างการทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว เพื่อศึกษาพฤติกรรมของทั้งสามระบบต่อการทำงานในสภาวะคงตัวว่าแตกต่างจากการทำงานในสภาวะไม่คงตัวมากน้อยเพียงไร

ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงในสภาวะไม่คงตัวตามภาระแบบไซน์แสดงให้เห็นถึงลักษณะ polarization curve มีลักษณะเป็นวงรอบในทิศทวนเข็มนาฬิกา หรือเรียกว่า hysteresis effect เมื่อจ่ายภาระสูงขึ้นหรือ n-slew rate เป็นบวกทำให้กราฟเป็นเส้นโค้งลงจากกระแสต่ำไปยังกระแสสูง และเมื่อจ่ายภาระลดลงหรือ n-slew rate เป็นลบทำให้กราฟเป็นเส้นโค้งขึ้นจากกระแสสูงไปยังกระแสต่ำ โดยวงรอบมีความกว้างไม่แตกต่างจากสภาวะคงตัวเท่าใดนักเมื่อ n-slew rate อยู่ในช่วง ± 0.031 ถึง ± 0.31 อย่างไรก็ตามวงรอบจะมีความกว้างแตกต่างจากสภาวะคงตัวอย่างเห็นได้ชัดเมื่อ n-slew rate สูงขึ้นตั้งแต่ ± 0.62 ขึ้นไป แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แถวเริ่มลดลงต่ำกว่าสภาวะคงตัวตั้งแต่วงกระแสต่ำ สาเหตุเกิดจากการเพิ่มภาระอย่างรวดเร็วส่งผลให้ปริมาณน้ำในเมมเบรนเพิ่มสูงขึ้นมากจนเกิดสภาวะน้ำท่วมเมมเบรน (flooding) ซึ่งผู้วิจัยสังเกตจากการทำงานของคอมเพรสเซอร์ เมื่อเกิดน้ำท่วมในเมมเบรนคอมเพรสเซอร์จะทำงานที่ความเร็วรอบสูงสุด เพื่อไล่น้ำที่ตกค้างในช่องทางการไหล และสังเกตเห็นปริมาณน้ำจำนวนมากไหลออกจากท่ออากาศขาทิ้ง ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นนี้จะไปขัดขวางออกซิเจนในอากาศให้เข้าทำปฏิกิริยาได้น้อยลง แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แถวจึงลดต่ำลงอย่างฉับพลันในช่วงความหนาแน่นกระแสสูง ในทำนองเดียวกันการลดภาระอย่างรวดเร็วโดยที่ปริมาณน้ำในเมมเบรนยังมากอยู่นั้นส่งผลให้เซลล์แถวมีประสิทธิภาพสูง พฤติกรรมดังกล่าวนี้พบขณะทดสอบภาระแบบไซน์ที่มี n-slew rate ในช่วงตั้งแต่ ± 0.62 ขึ้นไปเท่านั้น นอกจากนี้ยังได้ทดสอบกับภาระแบบครึ่งไซน์ล่าง (เพิ่มกระแสจาก 0 ถึง 23 แอมแปร์) และครึ่งไซน์บน (เพิ่มกระแสจาก 23 ถึง 46 แอมแปร์) ที่ n-slew rate เดียวกัน ผลแสดงให้เห็นว่าวงรอบ polarization curve มีขนาดแตกต่างจากสภาวะคงตัวในช่วง n-slew rate เดียวกันกับลักษณะภาระแบบเต็มไซน์ สรุปได้ว่า n-slew rate สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกความแตกต่างของการทำงานในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวได้อย่างชัดเจน ผลการศึกษาภาระแบบไซน์สามารถนำไปใช้อธิบายผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงตามวัฏจักรขับซึ่งโดยอาศัยช่วง n-slew rate ที่ใกล้เคียงกันได้ดังนี้

ผลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้วัฏจักรขับซึ่งข้อมูลสมรรถนะของเซลล์แถวจากวัฏจักรขับซึ่งวัฏจักรนี้ไม่ได้กระจายตัวแตกต่างจากสภาวะคงตัวมากดังเช่นภาระแบบไซน์ที่มี n-slew rate ในช่วงตั้งแต่ ± 0.62 ขึ้นไป เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่ในวัฏจักรขับซึ่งอยู่ในช่วง n-slew rate ไม่เกิน ± 0.4 ซึ่งเป็นช่วงที่ยังไม่ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์แถวมีความแตกต่างจากสภาวะคงตัว อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวัฏจักรขับซึ่งซึ่งพบว่ามีข้อมูลสมรรถนะของเซลล์แถวในวัฏจักร s-modified FTP75 และ s-NYCC กระจายตัวแตกต่างจากสภาวะคงตัวมากโดยเฉพาะในช่วงกระแสสูงเมื่อเทียบกับวัฏจักร s-ECE15 และ s-HWFET ในขณะที่ข้อมูลสมรรถนะของเซลล์แถวในวัฏจักร s-ECE15 และ s-HWFET กระจายตัวไม่แตกต่าง

จากสภาวะคงตัว เนื่องจากวัฏจักร s-modified FTP75 และ s-NYCC มี n-slew rate อยู่ในช่วงที่กว้างกว่าวัฏจักร s-ECE15 และ s-HWFET ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันระหว่างภาระแบบไซน์และภาระตามวัฏจักรซ้ำๆ จากช่วง n-slew rate เดียวกัน ดังนั้นในการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้ภาระไม่คงตัวตามวัฏจักรซ้ำๆ ใดๆ ในอนาคต อาจไม่จำเป็นต้องทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงโดยอ้างอิงภาระตามวัฏจักรซ้ำๆที่มีความซับซ้อน โดยทดสอบแต่เพียงภาระแบบไซน์ที่มี n-slew rate ที่สอดคล้องกันก็สามารถระบุถึงแนวโน้มความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพในสภาวะคงตัวและไม่คงตัวได้

นอกจากนี้ผลการทดสอบยังได้แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันระหว่างช่วงเวลาการเกิดน้ำท่วมในลักษณะภาระแบบไซน์และภาระตามวัฏจักรซ้ำๆ โดยพิจารณาจำนวนครั้งการไล่น้ำในวัฏจักรซ้ำๆพบว่า วัฏจักร s-modified FTP75 ซึ่งเป็นวัฏจักรที่มี n-slew rate อยู่ในช่วงสูงสุด คอมเพรสเซอร์ไล่น้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง รองลงมาคือ วัฏจักร s-NYCC 3 ครั้ง วัฏจักร s-ECE15 1 ครั้ง และวัฏจักร s-HWFET ไม่พบการไล่น้ำ ในช่วงการไล่น้ำทุกครั้งจะพบว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แวลด์ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัว หลังจากการไล่น้ำพบว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แวลด์กลับมาใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัว จึงเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อคอมเพรสเซอร์ไล่น้ำ จะช่วยให้เซลล์แวลด์กลับมามีสมรรถนะที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของเซลล์แวลด์ภายใต้วัฏจักรซ้ำๆและประสิทธิภาพเฉลี่ยของเซลล์แวลด์จากการคำนวณด้วยข้อมูลในสภาวะคงตัว พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของเซลล์แวลด์ภายใต้วัฏจักร s-moFTP75, s-NYCC, s-ECE15 และ s-HWFET แตกต่างจากสภาวะคงตัวเพียง 1.1%, 0.98%, 1.14% และ 2.1% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเซลล์แวลด์ที่ทดสอบภายใต้วัฏจักรซ้ำๆทั้งสี่วัฏจักรแสดงพฤติกรรมที่ไม่แตกต่างจากการทำงานในสภาวะคงตัว จากผลการทดสอบดังกล่าว ผู้วิจัยสามารถสรุปได้จากสาเหตุหลักสองประการ ประการแรก วัฏจักรซ้ำๆทั้งสี่วัฏจักรนั้นมีช่วง n-slew rate ไม่สูงพอที่จะส่งผลให้เซลล์แวลด์แสดงพฤติกรรมแตกต่างจากสภาวะคงตัวดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ประการที่สอง ระบบเสริมคือ คอมเพรสเซอร์คอยทำหน้าที่ไล่น้ำโดยทันทีเมื่อพบว่าเซลล์แวลด์เกิดสภาวะน้ำท่วม จึงทำให้เซลล์แวลด์กลับมามีสมรรถนะใกล้เคียงกับสภาวะคงตัวโดยทันที

ผลการทดสอบข้างต้นนำเสนอเฉพาะพฤติกรรมของเซลล์แวลด์ภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัว ซึ่งสรุปได้ว่าเซลล์แวลด์มีพฤติกรรมที่ไม่แตกต่างจากสภาวะคงตัวอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเซลล์แวลด์จึงไม่ใช่สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพในสภาวะคงตัวและไม่คงตัว อย่างไรก็ตามยังต้องพิจารณาจากพฤติกรรมของทั้งระบบเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งรวมทั้งเซลล์แวลด์และระบบเสริมทั้งหมดด้วย เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของทั้งระบบเซลล์เชื้อเพลิงจากอัตราการบริโภคไฮโดรเจน พบว่าอัตราการบริโภคไฮโดรเจนในวัฏจักร s-modified FTP75, s-NYCC,

s-ECE15 และ s-HWFET แตกต่างจากสภาวะคงตัว 2.9%, 2.73%, 2.45% และ 0.08% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของทั้งระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะเห็นความแตกต่างจากสภาวะคงตัวมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมของระบบเสริมได้แก่ ชุดพัดลมระบายอากาศ และคอมเพรสเซอร์ พบว่าชุดพัดลมระบายอากาศมีพฤติกรรมการทำงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเซลล์แกวเท่านั้น ซึ่งอุณหภูมิของเซลล์แกวระหว่างการทดสอบในวัฏจักรขับที่ทั้งสี่ไม่สูงพอที่จะทำให้ชุดพัดลมระบายอากาศทำงานที่ความเร็วรอบสูงขึ้น ถึงแม้ว่าชุดพัดลมระบายอากาศจะทำงานที่ความเร็วรอบสูงสุดซึ่งจะมีการบริโภคกำลังไฟฟ้าคิดเป็น 2.5% ของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แกวผลิตได้ ยังพบว่ามีความน้อยมากเมื่อเทียบกับการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมทั้งหมด จึงสรุปได้ว่าชุดพัดลมระบายอากาศจึงไม่ใช่สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงลดลงจากสภาวะคงตัว ดังนั้นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงลดลงจากสภาวะคงตัวนั้น มาจากการทำงานของคอมเพรสเซอร์ โดยแสดงให้เห็นจากข้อมูลประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงที่คอมเพรสเซอร์ไถ่น้ำในวัฏจักร s-modified FTP75, s-NYCC และ s-ECE15 ลดต่ำลงจากประสิทธิภาพในสภาวะคงตัวอย่างเห็นได้ชัด

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงหน้าที่การทำงานของระบบเสริมที่ส่งผลสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งปัจจัยหลักมาจากคอมเพรสเซอร์ อย่างไรก็ตามไม่สามารถละทิ้งการพิจารณาชุดพัดลมระบายอากาศได้ เนื่องจากอุณหภูมิของเซลล์แกวถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงเช่นเดียวกัน ดังนั้นแนวทางการออกแบบระบบเสริมที่จะใช้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1 กิโลวัตต์นั้น จึงพิจารณาการทำงานทั้งสองอุปกรณ์นี้ แนวทางการออกแบบระบบเสริมจะพิจารณาในแง่มุมของขนาดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศ โดยแบ่งการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ ประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก ส่วนที่สองคือ ประเมินกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อน การประเมินด้วยวิธีนี้พบว่าสามารถใช้เป็นแนวทางในการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศได้ โดยผลการประเมินมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลอง และมีความผิดพลาดประมาณ 5% และ 10% สำหรับการใช้งานในย่านอัตราการไหลสูง ในกรณีที่เป็นการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศตามลำดับ

การประเมินกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิกจำเป็นต้องทราบข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศและความดันตกในช่องทางการไหล โดยสามารถประเมินได้จากการจำลองช่องทางการไหล

ของอากาศและช่องระบายอากาศด้วยซอฟต์แวร์สำเร็จรูปสำหรับการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล และอาศัยสมมติฐานการคำนวณที่อ้างอิงจากการศึกษาของ Gao [48] สำหรับการประเมินการสูญเสียในมอเตอร์ ในกรณีที่ไม่วางค่าคงตัวของมอเตอร์ สามารถประเมินได้จากการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะไร้ภาระ วิธีนี้เป็นการประเมินการสูญเสียในมอเตอร์เฉพาะการสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียทางกลเท่านั้น โดยละทิ้งการสูญเสียในขดลวดทองแดงและการสูญเสียจากภาระใช้งาน การประเมินการสูญเสียในมอเตอร์ด้วยวิธีทดสอบในสภาวะไร้โหลดสำหรับมอเตอร์ที่ใช้ขั้วเคลื่อนคอมเพรสเซอร์จะให้ผลที่แม่นยำกว่ามอเตอร์ที่ใช้ขั้วเคลื่อนพัดลมระบายอากาศ เนื่องจากการสูญเสียในมอเตอร์ที่ใช้ขั้วเคลื่อนคอมเพรสเซอร์นั้นมาจากการสูญเสียทางกลจากแรงเสียดทานเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ไม่สามารถประเมินการสูญเสียในขดลวดทองแดงได้ การประเมินการสูญเสียในมอเตอร์ที่ใช้ขั้วเคลื่อนคอมเพรสเซอร์และพัดลมระบายอากาศด้วยวิธีทดสอบในสภาวะไร้ภาระก็สามารถเป็นแนวทางทางในเบื้องต้นได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ได้นำเสนอพารามิเตอร์ไร้มิติที่บ่งบอกสภาพที่ไม่คงตัวของภาระ เพื่อสามารถอ้างอิงการทำงานภายใต้สภาวะไม่คงตัวของระบบเซลล์เชื้อเพลิงทุกขนาดนั้นคือ n -slew rate อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์การทดสอบ ผลการศึกษานี้ยังขาดข้อมูลสนับสนุนในส่วนของการพิสูจน์ n -slew rate ด้วยการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีเมมเบรนแตกต่างกัน สำหรับพิสูจน์ผลของ time scale และระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดพิกัดสูงสุดแตกต่างกัน สำหรับพิสูจน์ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นเพื่อพิสูจน์แสดงว่า n -slew rate สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกสภาพไม่คงตัวของระบบเซลล์เชื้อเพลิงให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้น งานวิจัยต่อเนื่องควรศึกษาในแง่มุมดังกล่าวให้ชัดเจนต่อไป

รายการอ้างอิง

- [1] Mock, P., and Schmid, S.A. Fuel cells for automotive powertrains – A techno-economic assessment. Journal of Power Sources 190 (2009): 133-140.
- [2] นาดนรงค์ ลิ้มวุฒิจิไรรัฐ และ อังคีร์ ศรีภคการ. การพัฒนาระบบขับเคลื่อนเซลล์เชื้อเพลิงแบบไฮบริดสำหรับรถจักรยานยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [3] Larminie, J., and Dicks, A. Fuel Cell Systems Explained, (2nd ed.), John Wiley & Sons (2003).
- [4] Büchi, F.N., Freunberger, S.A., Reum, M., Paganelli, G., Tsukada, A., Dietrich, P., and Delfino, A. On the efficiency of an advanced automotive fuel cell system. Fuel cells 07 2 (2007): 159-164.
- [5] Na Ranong, Ch., Hapke, J., and Fieg, G. Experimental investigation of exergy losses of a PEM fuel cell system. Forsch Ingenieurwes (2009) 73: 193-203.
- [6] Haubrock, J., Heideck, G., and Styczynski, Z. Electrical efficiency losses occurred by the air compressor for PEMFC. WHEC 16 (2006)
- [7] โสพิศ สมยศ และ อังคีร์ ศรีภคการ. ผลของอุปกรณ์เพิ่มความชื้นต่อสมรรถนะของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [8] Kim, T.H., Kim, S.H., Kim, W., Lee, J.H., Cho, K.S., Park, K.W., and Choi, W. Development of the novel control algorithm for the small proton exchange membrane fuel cell stack without external humidification. Journal of Power Sources 195 (2010): 6008–6015.
- [9] Yu, S., and Jung, D. A study of operation strategy of cooling module with dynamic fuel cell system model for transportation application. Renewable Energy 35 (2010): 2525-2532.
- [10] Sasmito, A.P., Birgersson, E., Lum, K.W., and Mujumdar, A.S. Fan selection and stack design for open-cathode polymer electrolyte fuel cell stacks. Renewable Energy 37 (2012): 325-332.

- [11] Venturelli, L., Santangelo, P.E., and Tartarini, P. Fuel cell systems and traditional technologies. Part II: Experimental study ion dynamic behavior of PEMFC in stationary power generation. Applied Thermal Engineering 29 (2009): 3469-3475.
- [12] Aki, H., Yamamoto, S., Ishikawa, Y., Kondoh, J., Maeda, T., and Yamaguchi, H. Operational strategies of networked fuel cells in residential homes. IEEE Transactions on Power Systems 21 (2006): 1405-1414.
- [13] Ryu, J., Park, Y., and Sunwoo, M. Electric powertrain modeling of a fuel cell hybrid electric vehicle and development of a power distribution algorithm based on driving mode recognition. Journal of Power Sources 195 (2010) 5735–5748.
- [14] Feroldi, D., Serra, M., and Riera, J. Energy management strategies based on efficiency map for fuel cell hybrid vehicles. Journal of Power Sources 190 (2009): 387-401.
- [15] Ahluwalia, R.K., Wang, X. Direct hydrogen fuel cell systems for hybrid vehicles. Journal of Power Sources 139 (2005): 152-164.
- [16] Zhao, H., and Burke, A.F. Optimization of fuel cell system operating conditions for fuel cell vehicles. Journal of Power Sources 186 (2009): 408-416.
- [17] Loo, K.H., Wong, K.H., Tan, S.C., Lai Y.M., and Tse, C.K. Characterization of the dynamic response of proton exchange membrane fuel cells – A numerical study. International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010): 11861-11877.
- [18] Gao, F., Blunier, B., Simoes, M.G., and Miraoui, A. PEM fuel cell stack modeling for real-time emulation in hardware-in-the-loop applications. IEEE Transactions on Energy Conversion 26 (2011): 184-194.
- [19] Hou, Y., Yang, A., and Fang, X. An experimental study on the dynamic process of PEM fuel cell stack voltage. Renewable Energy 36 (2011): 325-329.
- [20] Oheda, A., Omar, B., Chai, S.C., Aseeri, A., and Savvaris, A. Experimental analysis of the dynamic performance of PEM fuel cell under various load changes. 2010 International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2010) (2010): 604-609.

- [21] Tang, Y., Yuan, W., Pan, M., Li, Z., Chen, G., and Li, Y. Experimental investigation of dynamic performance and transient responses of a kW-class PEM fuel cell stack under various load changes. Applied Energy 87 (2010): 1410-1417.
- [22] Philipps, S.P., and Ziegler, C. Computationally efficiency modeling of the dynamic behavior of a portable PEM fuel cell stack. Journal of Power Sources 180 (2008): 309-321.
- [23] Hamelin, J., Agbossou, K., Laperrier, A., Laurencelle, F. and Bose, T.K. Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications. International Journal of Hydrogen Energy 26 (2001): 625-629.
- [24] He, W., Lin G., and Nguyen, T.V. Diagnostic tool to detect electrode flooding in Proton-Exchange-Membrane fuel cells. AIChE Journal 49 (2003): 3221-3228.
- [25] Barbir, F. PEM Fuel Cells: Theory and Practice. Elsevier Academic Press, 2005.
- [26] Yu, H., and Ziegler, C. Transient behavior of a proton exchange membrane fuel cell under dry operation. Journal of The Electrochemical Society 153 (2006): A570-A575.
- [27] Weydahl, H., Thomassen, M.S., Borresen, B.T., and Moller-Holst, S. Response of a proton exchange membrane fuel cell to a sinusoidal current load. Journal of Applied Electrochemistry 40 (2010): 809-819.
- [28] Tajj, R., Azib, T., Bethoux, O., Remy, G., Marchand C., and Bertheot, E. Parameter analysis of PEM fuel cell hysteresis effects for transient load use. The European Physical Journal Applied Physics 54 (2011): 23410p1-p12.
- [29] Fuel cell design. Fuel for thought on cars of the future [Online]. Available from: http://www.scientific-computing.com/features/feature.php?feature_id=126
[2012, July 25]
- [30] Wikipedia. Proton exchange membrane fuel cell [Online]. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell
[2012, July 25]
- [31] Global Ticona Photo Database. Fuel cell stack graphic E Ticona [Online]. Available from: <https://www.ticona-photos.com/PL/Forms/DispForm.aspx?ID=716>
[2012, July 25]

- [32] Schmeister, 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. Doctor of Philosophy. Department of Mechanical Engineering. University of Victoria. 2010.
- [33] Yilanci, A., Dincer, I., and Ozturk, H.K. Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar-hydrogen system. International Journal of Hydrogen Energy 33 (2008): 7538-7552.
- [34] Shevock, B.W. System level modeling of thermal transients in PEMFC systems. Master of Science in Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic and State University, 2008.
- [35] Nexa™ (310-0027) Power Module User's Manual, Ballard Power Systems Inc
- [36] Wang, C.Y. Fundamental models for fuel cell engineering. Chemical Reviews 104 (2004): 4727-4766.
- [37] Wang, Y., and Wang, C.Y. Transient analysis of polymer electrolyte fuel cells. Electrochim Acta 50 (2005): 1307-1315.
- [38] Yan, W.M., Chu, H.S., Chen, J.Y., Soong, C.Y., and Chen, F. Transient analysis of water transport in PEM fuel cells. Journal of Power Sources 162 (2006): 1147-1156.
- [39] Tang, Y., Yuan, W., Pan, M., Li, Z., Chen, G., and Li, Y. Experimental investigation of dynamic performance and transient responses of a kW-class PEM fuel cell stack under various load changes. Applied Energy 87 (2010): 1410-1417.
- [40] Honda FCX Clarity – Official Web Site. Vehicale Specifications [Online]. Available from: <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/specifications.aspx>
[2012, July 25]
- [41] Kennedy D.M. Fuel cell cathode air filters: methodologies for design and optimization. Master of Science, Auburn University, 2007.
- [42] Ramos-Paja, C.A. A PEM fuel-cell model featuring oxygen-excess-ratio estimation and power-electronics interaction. IEEE Transactions on Industrial Electronics 57 (2010): 1914-1924.

- [43] Liu, X., Guo, H., Ye, F., and Ma, C.Y. Water flooding and pressure drop characteristics in flow channels of proton exchange membrane fuel cells. Electrochimica Acta. 52 (2007): 3607-3614.
- [44] Ozbek, M. Modeling, simulation, and concept studies of a fuel cell hybrid electric vehicle powertrain. Doctor of Engineering. Department of Mechanical and Process Engineering. University of Duisburg-Essen. 2010.
- [45] IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2004)
- [46] Chen, C.H., Jung, S.P., and Yen, S.C. Flow distribution in the manifold of pem fuel cell stack. Journal of Power Sources. 173 (2007): 249-263.
- [47] Jeon, D.H., Greenway S., Shimpalee, S., and Van Zee, J.W. The effect of serpentine flow-field designs on pem fuel cell performance. International Journal of Hydrogen Energy. 33 (2008): 1052-1066.
- [48] Gao, F., Blunier, B., Miraoui, A., and El-Moudni, A. Proton exchange membrane fuel cell multi-physical dynamics and stack spatial non-homogeneity analyses. Journal of Power Sources. 195 (2010): 7609-7626.

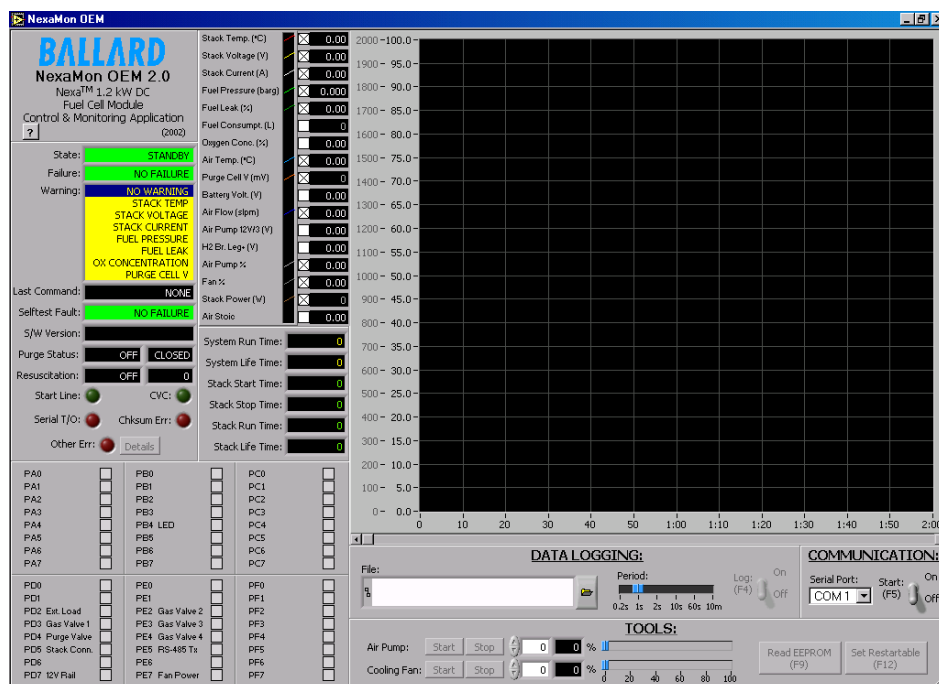
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวัดและอุปกรณ์การวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้า

ก.1 กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แถวผลิตได้

กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แถวผลิตได้ (P_{stack}) หาได้จากผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าเซลล์แถวผลิตได้ และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แถว ระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA มีอุปกรณ์วัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แถว รวมทั้งข้อมูลการทำงานที่สำคัญอื่นๆ ดังตารางที่ ก-1 แสดงผลและบันทึกค่าผ่านโปรแกรม NexaMon OEM 2.0 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำเร็จรูปจากทางบริษัทผู้ผลิตเซลล์เชื้อเพลิง จากการสอบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดโดยอุปกรณ์วัดกระแสที่ติดตั้งมากับเซลล์เชื้อเพลิง กับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดโดยแคลมป์มิเตอร์ที่มีย่านการวัดกระแสในช่วง 0 – 20 A และความละเอียด 0.01 A พบว่าค่ากระแสที่วัดจากอุปกรณ์วัดกระแสและแสดงผลในโปรแกรม NexaMon นั้นมีความคลาดเคลื่อนไปมากถึง 6.4 % ซึ่งจะส่งผลให้การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แถวผลิตได้คลาดเคลื่อนไปด้วย ดังนั้นการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แถวจึงหาค่าจากผลรวมระหว่างกระแสที่จ่ายให้กับภาระทางไฟฟ้าและกระแสที่จ่ายให้กับอุปกรณ์เสริมที่มีการวัดโดยตรง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่อ่านได้จากแคลมป์มิเตอร์ โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียง 1% เท่านั้น



ภาพที่ ก-1 หน้าต่างโปรแกรม NexaMon OEM 2.0

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA ที่แสดงผลทางหน้าต่างโปรแกรม NexaMon OEM 2.0 [17]

ข้อมูลที่แสดงผล	หน่วย
อุณหภูมิของเซลล์แกว (Stack Temperature)	°C
แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกว (Stack Voltage)	V
กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แกว (Stack Gross Current)	A
ความดันของก๊าซไฮโดรเจนขาเข้า (Fuel Pressure)	Barg
เปอร์เซ็นต์การรั่วของไฮโดรเจน (Percentage of Fuel Leak Alarm)	%
ปริมาณการบริโภคเชื้อเพลิง (Fuel Consumption)	L
ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศ (Oxygen Concentration in the ambient air)	%
อุณหภูมิของบรรยากาศ (Ambient Air Temperature)	°C
แรงดันไฟฟ้าของวาล์วไล้ก๊าซ (Purge Cell Voltage)	V
แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Battery Voltage)	V
อัตราการไหลของอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยา (Process Air-Flow)	SLPM
แรงดันไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์อัดอากาศ (Air Pump Operating Voltage)	V
แรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนในบรรยากาศ (Hydrogen Concentration Bridge Voltage)	V
รอบการทำงานของคอมเพรสเซอร์ (Process Air Pump Duty Cycle)	%
รอบการทำงานของชุดพัดลมระบายอากาศ (Cooling Air Fan Duty Cycle)	%
กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แกวผลิตได้ (Stack Gross Power)	W
อัตราส่วนสมมูลของอากาศ (Air-Flow Stoichiometry)	-

ก.2 กำลังไฟฟ้าสุทธิ

กำลังไฟฟ้าสุทธิ (P_{net}) หาได้จากผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าคร่อมภาระทางไฟฟ้า ที่วัดโดยเครื่องภาระทางไฟฟ้ายี่ห้อ KIKUSUI รุ่น PLZ1004W พิกัด 1 กิโลวัตต์ และเชื่อมต่อกับชุดเพิ่มภาระทางไฟฟ้า (load booster) รุ่น PLZ 2004WB พิกัด 2 กิโลวัตต์ ดังภาพที่ ก-2 ทำให้พิกัดรวมอยู่ที่ 3 กิโลวัตต์ ชุดรับภาระทางไฟฟ้าจะส่งการผ่านโปรแกรม Wavy ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับสร้างและถ่ายโอนข้อมูลรูปแบบของภาระ (load profile) ที่ต้องการเข้าสู่หน่วยความจำภายในตัวชุดรับภาระทางไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถบันทึกค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าออกมาในรูปแบบของไฟล์ Text



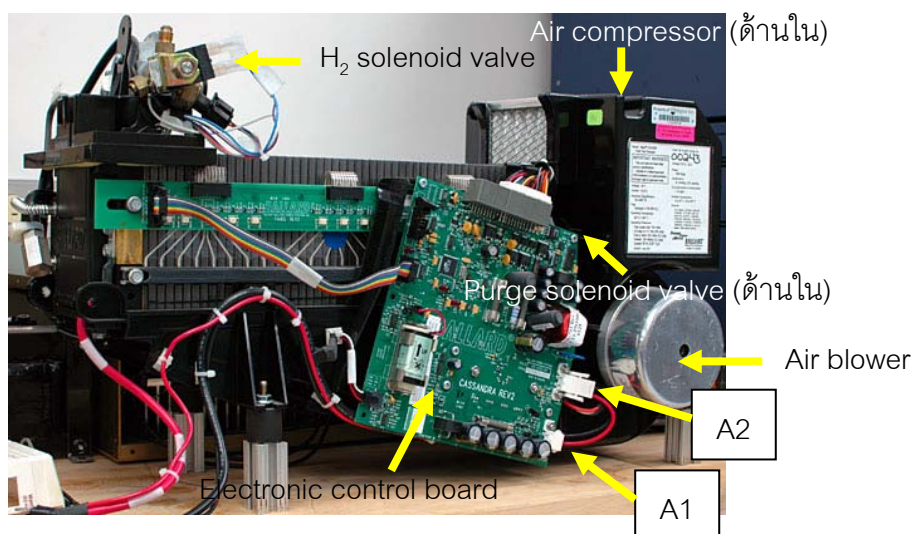
ก)

ข)

ภาพที่ ก-2 ก) ชุดรับภาระทางไฟฟ้า รุ่น PLZ1004W พิกัด 1 กิโลวัตต์ ข) ชุดเพิ่มภาระทางไฟฟ้า รุ่น PLZ 2004WB พิกัด 2 กิโลวัตต์

ก.3 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบเสริม

ระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA ใช้แผงควบคุม (electronic control board) ในการควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์เสริมแต่ละชนิด เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงยังไม่ทำงาน แผงควบคุมจะใช้กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟภายนอก (power supply) ที่ตำแหน่ง A1 เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานแล้ว แผงควบคุมจะเปลี่ยนการใช้กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟภายนอก มาเป็นใช้กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แถวผลิตได้ผ่านทางตำแหน่ง A2 ดังภาพที่ ก-3 ดังนั้นในการประเมินกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบเสริมทั้งหมด (P_{aux}) หาได้จากผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าที่วัดโดยเซ็นเซอร์ตรวจจับกระแส รุ่น ACS 714 ผลิตโดยบริษัท Allegro Microsystems ที่วัดได้ในย่าน ± 30 แอมแปร์ ดังภาพที่ ก-4 มีลักษณะเฉพาะดังตารางที่ ก-2 และค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผงควบคุมที่ตำแหน่ง A2 ดังภาพที่ ก-3 โดยต่อสายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเข้ากับอุปกรณ์ตรวจวัด (data acquisition, DAQ) ของบริษัท National Instrument รุ่น NI 9205 และ NI 9221 เชื่อมต่อกับแท่นรวมอุปกรณ์รุ่น NI cDAQ-9172 ดังภาพที่ ก-5 บันทึกค่าและคำนวณด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยระบบเสริมที่พิจารณาการบริโภคกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้



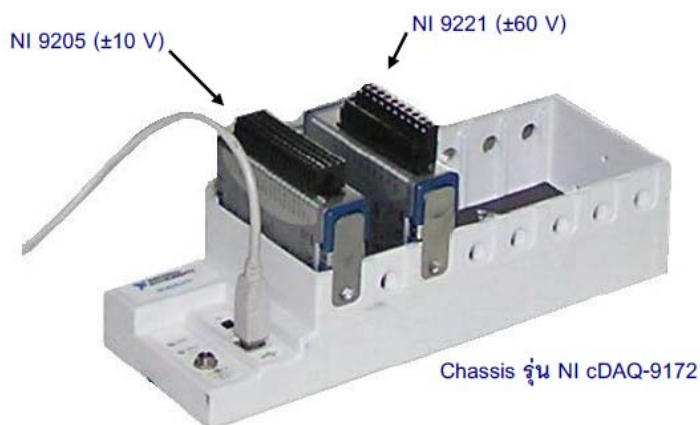
ภาพที่ ก-3 ตำแหน่งของอุปกรณ์เสริมและตำแหน่งที่มีการจ่ายไฟฟ้าเข้าและออกแผงควบคุม



ภาพที่ ก-4 เซ็นเซอร์ตรวจจับสนกระแส ACS 714

ตารางที่ ก-2 ลักษณะเฉพาะของเซ็นเซอร์ตรวจจับสนกระแส ACS 714

COMMON OPERATING CHARACTERISTICS over Range E: $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 85°C , $C_F = 1\text{ nF}$, and $V_{CC} = 5\text{ V}$					
Characteristic	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
ELECTRICAL CHARACTERISTICS					
Supply Voltage		4.5	5.0	5.5	V
Supply Current	$V_{CC} = 5.0\text{ V}$, output open	-	10	13	mA
Output Capacitance Load	VIOU to GND	-	-	10	nF
Output Resistive Load	VIOU to GND	4.7	-	-	k Ω
Primary Conductor Resistance	$T_A = 25^{\circ}\text{C}$	-	1.2	-	m Ω
Rise Time	$I_p = I_p(\text{max})$, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $C_{OUT} = \text{open}$	-	5	-	μs
Frequency Bandwidth	-3 dB, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$; I_p is 10A peak-to-peak	-	80	-	kHz
Nonlinearity	Over full range of I_p	-	1.5	-	%
Symmetry	Over full range of I_p	98	100	102	%
Zero Current Output Voltage	Bidirectional; $I_p = 0\text{ A}$, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	-	$V_{CC} \times 0.5$	-	V
Power-On Time	Output reaches 90% of steady-state level, $T_J = 25^{\circ}\text{C}$, 20 A	-	35	-	μs
Magnetic Coupling		-	12	-	G/A
Internal Filter Resistance			1.7		k Ω
PERFORMANCE CHARACTERISTICS					
Optimized Accuracy Range		-30	-	30	A
Sensitivity	Over full range of I_P , $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	64	66	68	mV/A
Noise	Peak-to-peak, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$, 66 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	7	-	mV
Zero Current Output Slope	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	-0.35	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
	$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.08	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
Sensitivity Slope	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	0.007	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
	$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.002	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
Electrical Output Voltage	$I_P = 0\text{ A}$	-30	-	30	mV
Total Output Error	$I_P = \pm 30\text{ A}$, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	-	± 1.5	-	%



ภาพที่ ก-5 อุปกรณ์ตรวจวัด

ก.3.1 คอมเพรสเซอร์

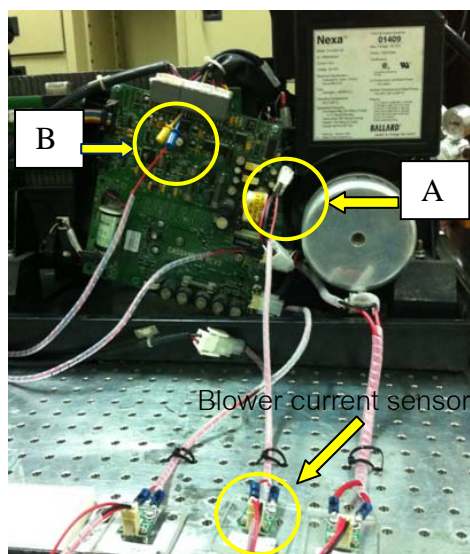
คอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง NEXA เป็นคอมเพรสเซอร์ชนิด centrifugal ขับเคลื่อนด้วย BLDC มอเตอร์ 12 โวลต์ 3 เฟส โดยแผงควบคุมทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้กับมอเตอร์ จากงานวิจัยของโสฬส [7] ทำการวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์โดยใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบดิจิตอล YOKOGAWA รุ่น WT1030 เพื่อตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่คอมเพรสเซอร์บริโภค ณ สภาวะการทำงานต่างๆ แต่ผลการศึกษพบว่าคอมเพรสเซอร์บริโภคกำลังไฟสูงสุดเพียง 14 วัตต์ คิดเป็น 2% ของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายมาจากเซลล์แกว และไม่เกิน 9% ของกำลังไฟฟ้าของระบบเสริม แต่จากงานวิจัยของ Ch. Na Ranong [5] ได้ทำการทดสอบการทำงานของคอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเดียวกัน ซึ่งพบว่าคอมเพรสเซอร์มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดถึง 70 วัตต์ ดังนั้นจึงเป็นประเด็นที่น่าสังเกตว่า ผลจากการวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์โดยใช้เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าแบบดิจิตอลในงานวิจัยของโสฬสอาจมีข้อผิดพลาดได้

ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้วิธีวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบเสริมทั้งหมด และหักลบด้วยการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัฒนาระบายอากาศ โซลินอยด์วาล์ว และแผงควบคุม จึงได้การบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์

ก.3.2 ชุดพัฒนาระบายอากาศ

ชุดพัฒนาระบายอากาศมีหน้าที่ระบายความร้อนให้กับเซลล์แกว ซึ่งจะควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงให้ต่ำกว่า 65°C ด้วยการควบคุมความเร็วรอบของพัดลม ประกอบด้วยพัดลมและขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ชนิด BLDC 12 โวลต์ ในการวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัฒนาระบายอากาศ

ระบายอากาศ ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับกระแส ACS 714 ที่ตำแหน่ง A และวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุดพัดลมระบายอากาศที่ตำแหน่ง B ดังภาพที่ ก-6



ภาพที่ ก-6 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับกระแสของชุดพัดลมระบายอากาศ

ก.3.3 อุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติ

อุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติประกอบไปด้วย ไฮโดรเจนโซลินอยด์วาล์ว (H_2 solenoid valve) วาล์วไล่ก๊าซ (purge solenoid valve) และรีเลย์ (relay) มีรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ดังนี้

- 1) ไฮโดรเจนโซลินอยด์วาล์ว ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายก๊าซไฮโดรเจนจากภาชนะบรรจุมาสู่เซลล์เชื้อเพลิงให้ได้ปริมาณที่พอเหมาะ
- 2) วาล์วไล่ก๊าซ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขับก๊าซไฮโดรเจนส่วนเกินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและสิ่งเจือปนอื่นๆที่ตกค้างอยู่ภายในเซลล์แกว เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับเมมเบรน
- 3) รีเลย์ ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดการจ่ายกำลังไฟฟ้า ป้องกันการดึงกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้ทำงาน และป้องกันกระแสไหลย้อนกลับเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจากแหล่งจ่ายไฟแหล่งอื่นที่ต่อรวม เช่น แบตเตอรี่ หรือตัวเก็บประจุ

จากข้อมูลเบื้องต้นจากทางบริษัทผู้ผลิตของอุปกรณ์ควบคุมทั้งสามชนิดดังตารางที่ ก-3 ก-4 และ ก-5 สามารถประเมินกำลังไฟฟ้าได้มีค่ามากที่สุดไม่เกิน 11 วัตต์ คิดเป็น 4.39% ของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบเสริมที่ภาระสูงสุดซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงไม่วัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์อัตโนมัติ แต่จะประเมินโดยใช้ค่าสูงสุดที่ระบุในรายละเอียดของอุปกรณ์ทั้งสามชนิด

ตารางที่ ก-3 ลักษณะเฉพาะของไฮโดรเจนโซลีนอยด์วาล์ว

ผู้ผลิต	KIP INC
Valve No.	2X1684
Orifice diameter	3/64"
MOPD	250 psi
Operating voltage	12 VDC
Power consumption	2.5 W

ตารางที่ ก-4 ลักษณะเฉพาะของวาล์วไต่แก๊ส

ผู้ผลิต	Burkert
Orifice	1/16" 1.6mm
Operating voltage	12/24 VDC
Power consumption	3.4 W
Voltage tolerance	±10%

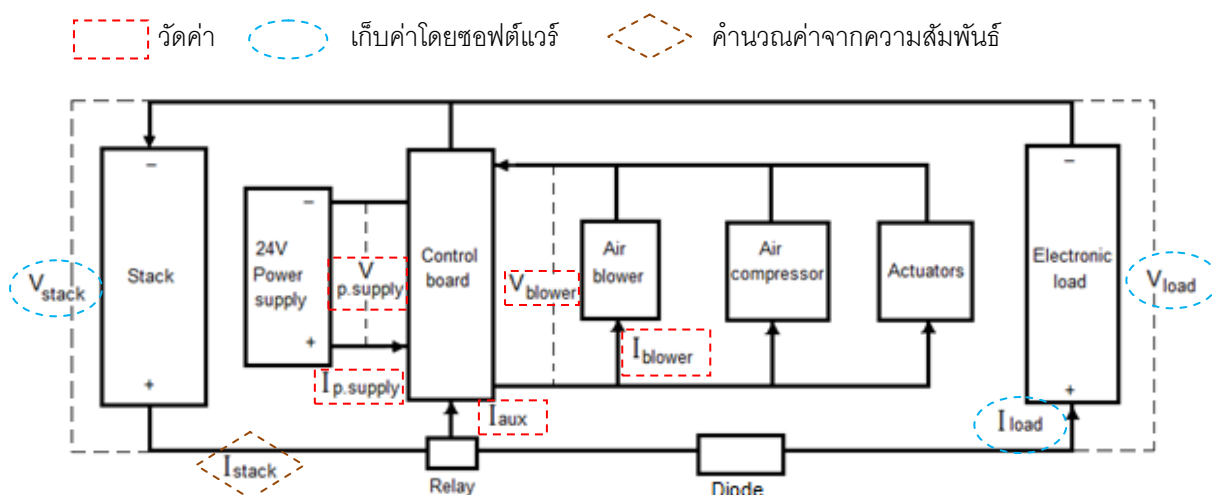
ตารางที่ ก-5 ลักษณะเฉพาะของรีเลย์

ผู้ผลิต	NAiS
Part No.	AEV16012
Type	60 A type
Coil voltage	12 VDC
Pick-up voltage (max)	9 VDC
Drop-out voltage (min)	1 VDC
Nominal coil current (±10%)	0.415 A
Operating power	Max. 5W
Max. allowable voltage	16 VDC

ก.3.4 แผงควบคุม

แผงควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ภายในระบบย่อยต่างๆ ซึ่งจะควบคุมการทำงานโดยวัดค่าต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง ความดันของก๊าซไฮโดรเจน ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนที่ถูกระบายออกสู่บรรยากาศ กระแสไฟฟ้า อัตราการไหลของอากาศ และแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ ระบบควบคุมจะแจ้งเตือนหากมีค่าที่วัดได้ไม่เหมาะสมและจะหยุดการทำงานเพื่อป้องกันความเสียหาย นอกจากนี้ก็มีการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในอากาศเพื่อรักษาสภาพะในบริเวณทำงาน

จากภาพที่ ก-3 ตำแหน่ง A1 เป็นตำแหน่งที่กระแสไฟฟ้าขาเข้าจากแหล่งจ่ายไฟภายนอกที่ตำแหน่งนี้จะติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจ่ายกระแสรุ่น ACS 714 ที่วัดได้ในย่าน ± 30 แอมแปร์ เพื่อวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟภายนอกต้องจ่ายให้กับแผงวงจรไฟฟ้าในช่วงก่อนที่เซลล์เชื้อเพลิงจะเริ่มทำงาน ในส่วนของการวัดค่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟภายนอก ตรวจวัดโดยต่อสายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับอุปกรณ์ตรวจวัดอัตโนมัติ ในการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของแผงควบคุมนั้น จะประเมินในช่วงที่เซลล์เชื้อเพลิงยังไม่เริ่มทำงาน ซึ่งกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟภายนอกจะจ่ายให้กับแผงควบคุมเท่านั้น จากผลการทดลองพบว่า แผงวงจรไฟฟ้ามีการบริโภคกำลังไฟฟ้าคงที่ทุกภาระทดสอบโดยมีค่าประมาณ 4 วัตต์ จากข้อมูลเบื้องต้นดังกล่าวสามารถเขียนเป็นแผนผังในการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้วัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าได้ดังภาพที่ ก-7

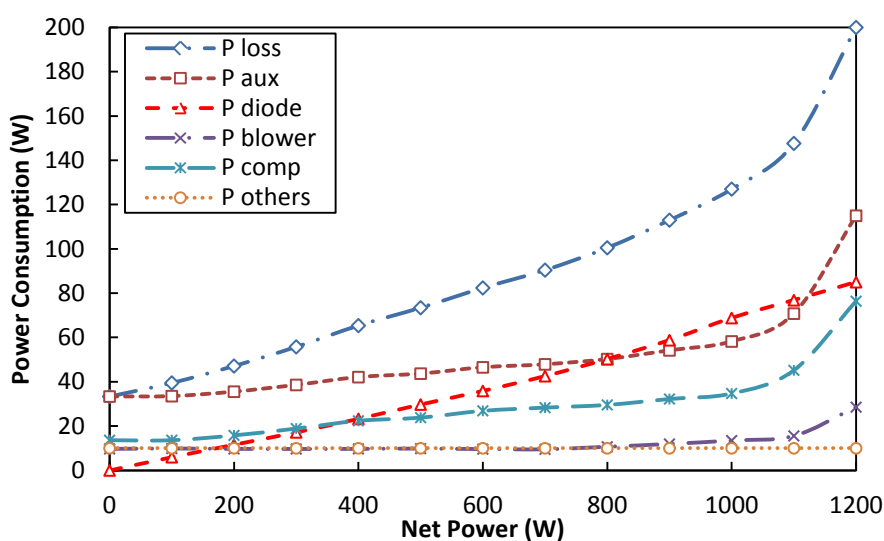


ภาพที่ ก-7 แผงผังตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้า

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบเบื้องต้น

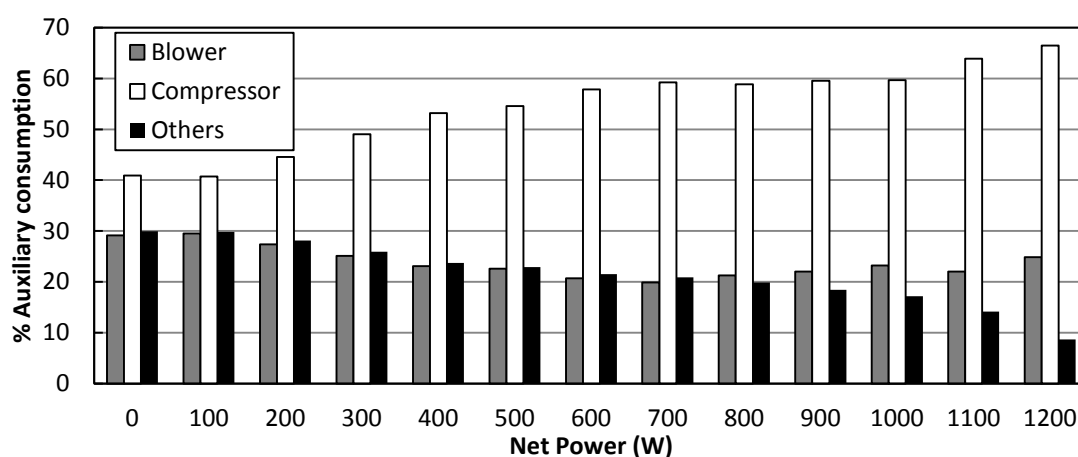
การทดสอบเบื้องต้นมีวัตถุประสงค์เพื่อแจกแจงการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมอย่างครบทุกระบบย่อย และระบุถึงต้นเหตุของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบเสริมว่าเกิดจากระบบใดเป็นหลัก การทดสอบเบื้องต้นเป็นการทดสอบภายใต้สภาวะคงตัวโดยอ้างอิงวิธีการทดสอบในสภาวะคงตัวในหัวข้อที่ 3.3

ผลการทดสอบการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมทุกอุปกรณ์กับกำลังไฟฟ้าสุทธิ (net power) ในแต่ละภาระที่สภาวะคงตัว แสดงได้ดังภาพที่ ข-1 ผลการทดสอบที่ภาระสูงสุดพบว่า กำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์เสริมทั้งหมดบริโภค (P_{aux}) มีค่า 115 วัตต์ โดยคอมเพรสเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 75 วัตต์ รองลงมาคือชุดพัดลมระบายอากาศ โดยที่ภาระ 1200 วัตต์นั้น ชุดพัดลมระบายอากาศมีการทำงานที่ไม่คงตัวโดยมีการบริโภคกำลังไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 20 ถึง 35 วัตต์ จึงคิดค่าเฉลี่ย 30 วัตต์ ในส่วนของการบริโภคกำลังไฟฟ้าของบอร์ดควบคุมไฟฟ้าและโซลินอยด์วาล์ว (P_{others}) มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าคงที่ 10 วัตต์ ทุกภาระการทดสอบ ในการทดสอบยังพบว่ามีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตก (voltage drop) ในไดโอด (P_{diode}) ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียมีค่ามากถึง 85 วัตต์ เนื่องจากปริมาณกระแสที่เซลล์จ่ายให้กับภาระทางไฟฟ้าที่ภาระสูงสุดมีค่าสูงถึง 46 แอมแปร์ จึงทำให้กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากแรงดันไฟฟ้าตกมีค่าสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในไดโอดดังกล่าวนี้เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ และหลายงานวิจัยให้ความสำคัญกับคอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบายอากาศมากกว่าที่จะให้ความสำคัญกับกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในไดโอด นอกจากนี้ผลการทดสอบสามารถระบุถึงกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียรวมทั้งหมด (P_{loss}) มีค่า 200 วัตต์ ดังนั้นถ้าต้องการให้เซลล์จ่ายภาระสุทธิ 1200 วัตต์นั้นเซลล์แถวต้องผลิตกำลังไฟฟ้าเป็นปริมาณ 1400 วัตต์ เพื่อให้เพียงพอต่อการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมทุกระบบดังกล่าว



ภาพที่ ข-1 การบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมในสภาวะคงตัว

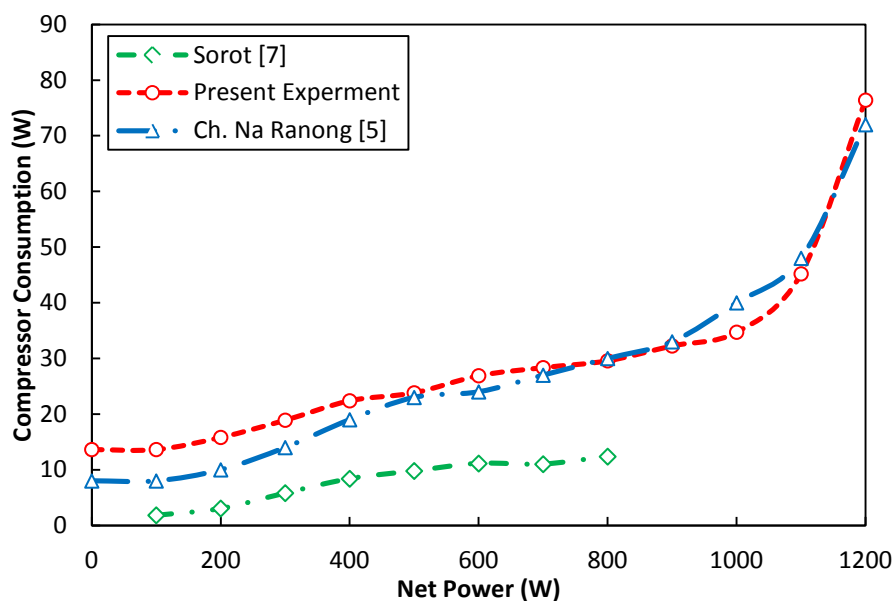
เมื่อเปรียบเทียบการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ ชุดพัดลมระบายอากาศ และ อุปกรณ์อื่นๆ กับการบริโภคกำลังไฟฟารวมของอุปกรณ์เสริมในทุกค่าภาระดังภาพที่ ข-2 พบว่าคอมเพรสเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดถึง 66% ของกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่อุปกรณ์เสริมบริโภค รองลงมาคือชุดพัดลมระบายอากาศมีค่าเฉลี่ย 25% ของกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่อุปกรณ์เสริมบริโภค ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ch. Na Ranaong [5] ที่ทำการศึกษากการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมทั้งหมดภายใต้สภาวะคงตัวของระบบเซลล์เชื้อเพลิง NEXA ผลการทดสอบได้ระบุว่าคอมเพรสเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดคิดเป็น 48% ของกำลังไฟฟ้าของระบบเสริม อย่างไรก็ตามผลการศึกษาบางส่วนของโสฬส ที่ทำการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเดียวกันนี้ ได้สรุปว่าคอมเพรสเซอร์ไม่ใช่อุปกรณ์ที่บริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์เสริมอื่นในระบบเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดสอบเบื้องต้นกับผลการศึกษาของ Ch. Na Ranong [5] ดังที่กล่าวมา เป็นที่สังเกตว่าวิธีการวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ด้วยเครื่องวัดในงานวิจัยของโสฬสน่าจะมีข้อผิดพลาดบางประการ อีกทั้งยังไม่ได้วัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศและไม่ได้ตรวจสอบผลกับงานวิจัยอื่น จึงไม่สามารถประเมินความถูกต้องของวิธีการวัดด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบดิจิทัลดังกล่าวได้



ภาพที่ ข-2 การบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ ชุดพัดลมระบายอากาศ และอุปกรณ์อื่นๆ ในสภาวะคงตัว

ผลการเปรียบเทียบการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ในสภาวะคงตัวของ การทดสอบนี้พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Ch. Na Ranong [5] แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนสูงในช่วงภาระต่ำ และผลการทดสอบของโสฬสนั้นมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพที่ ข-3 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีการวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์โดยการวัดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบเสริมทั้งหมด และหักลบด้วยกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศ

โซลินอยด์วาล์ว และแผงควบคุม ในการทดสอบนี้สามารถใช้เป็นวิธีในการประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ต่อไปได้



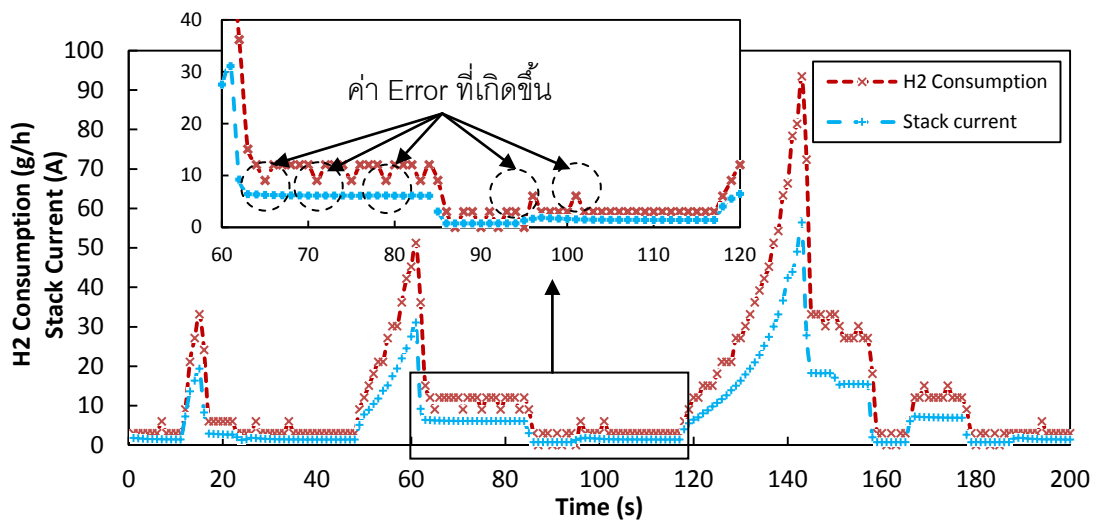
ภาพที่ ข-3 การบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ในงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยอื่น

การทดสอบเบื้องต้นเป็นการทดสอบภายใต้การทำงานในสภาวะคงตัว เพื่อแสดงการแจจแจงการบริโภคกำลังไฟฟ้าของระบบเสริมอย่างครบทุกระบบย่อยในสภาวะคงตัว นอกจากนี้ผลการทดสอบยังสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น และยังสรุปได้ว่าระบบเสริมที่มีการบริโภคกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือคอมเพรสเซอร์ รองลงมาคือชุดพัดลมระบายอากาศ ดังนั้นจึงไม่สามารถละเลยการพิจารณาการบริโภคกำลังไฟฟ้าในอุปกรณ์ดังกล่าวได้

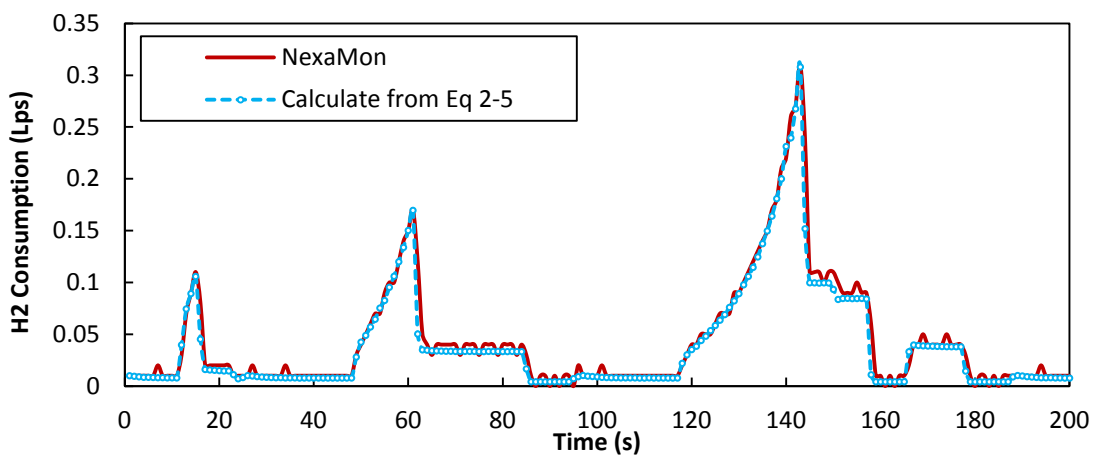
ภาคผนวก ค

การเปรียบเทียบอัตราการบริโภคไฮโดรเจน

การคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์แกวและระบบเซลล์เชื้อเพลิงจากสมการที่ 2-13 และ 2-14 นั้น จำเป็นที่จะต้องทราบอัตราการบริโภคไฮโดรเจน โดยในเบื้องต้นผู้วิจัยใช้ค่าที่แสดงผลจากโปรแกรม NexaMon ซึ่งผู้วิจัยพบว่าอัตราการบริโภคไฮโดรเจนที่แสดงผลโดยซอฟต์แวร์นั้นมีปัญหาเรื่องความละเอียดในการแสดงผล ซึ่งพบในช่วงจ่ายภาระต่ำและช่วงการเปลี่ยนแปลงภาระ โดยฉบับต้นในการทดสอบภายใต้การทำงานในสภาวะไม่คงตัว ดังภาพที่ ค-1 (ในที่นี้ยกตัวอย่างจากวัฏจักร s-ECE15) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบริโภคไฮโดรเจนที่แสดงผลโดยซอฟต์แวร์และจากการคำนวณจากสมการที่ 2-5 [4] ดังภาพที่ ค-2 นั้น พบว่ามีแนวโน้มไปในทางทิศเดียวกันและมีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การคำนวณอัตราการบริโภคไฮโดรเจนจากสมการที่ 2-5 ในการประเมินค่าประสิทธิภาพของเซลล์แกวและระบบเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป



ภาพที่ ค-1 อัตราการบริโภคไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แกวภายใต้การทดสอบในวัฏจักร s-ECE-15

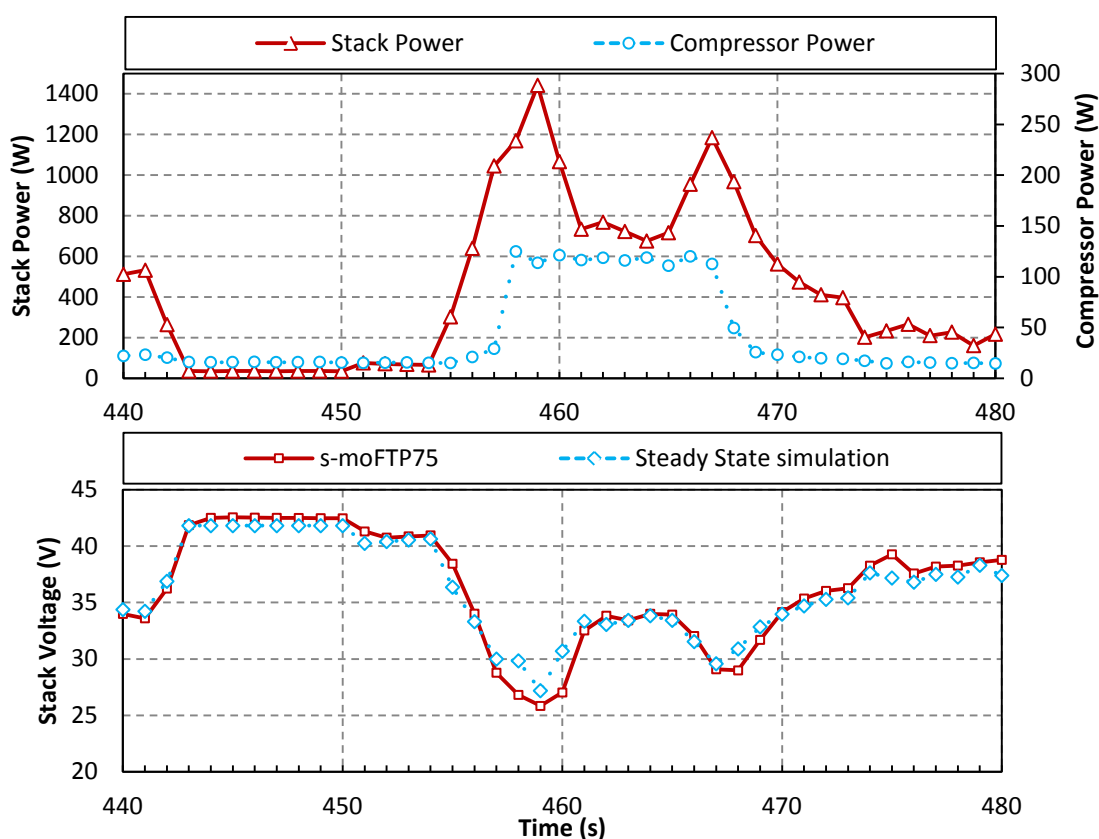


ภาพที่ ค-2 อัตราการบริโภคไฮโดรเจนที่แสดงผลโดยซอฟต์แวร์และคำนวณจากสมการที่ 2-5 ภายใต้การทดสอบในวัฏจักร s-ECE-15

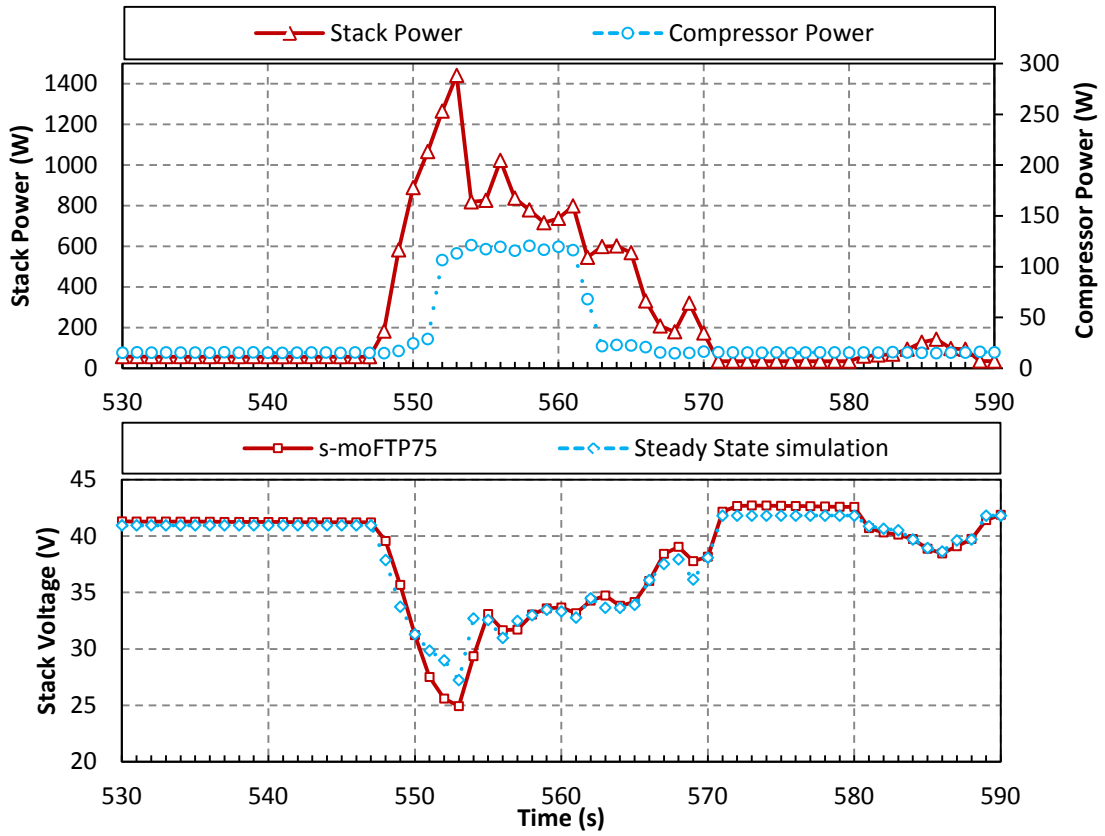
ภาคผนวก ง

ช่วงเวลาการไล่น้ำของคอมเพรสเซอร์เพิ่มเติมในวัฏจักร smoFTP75, S-NYCC
และ s-ECE15

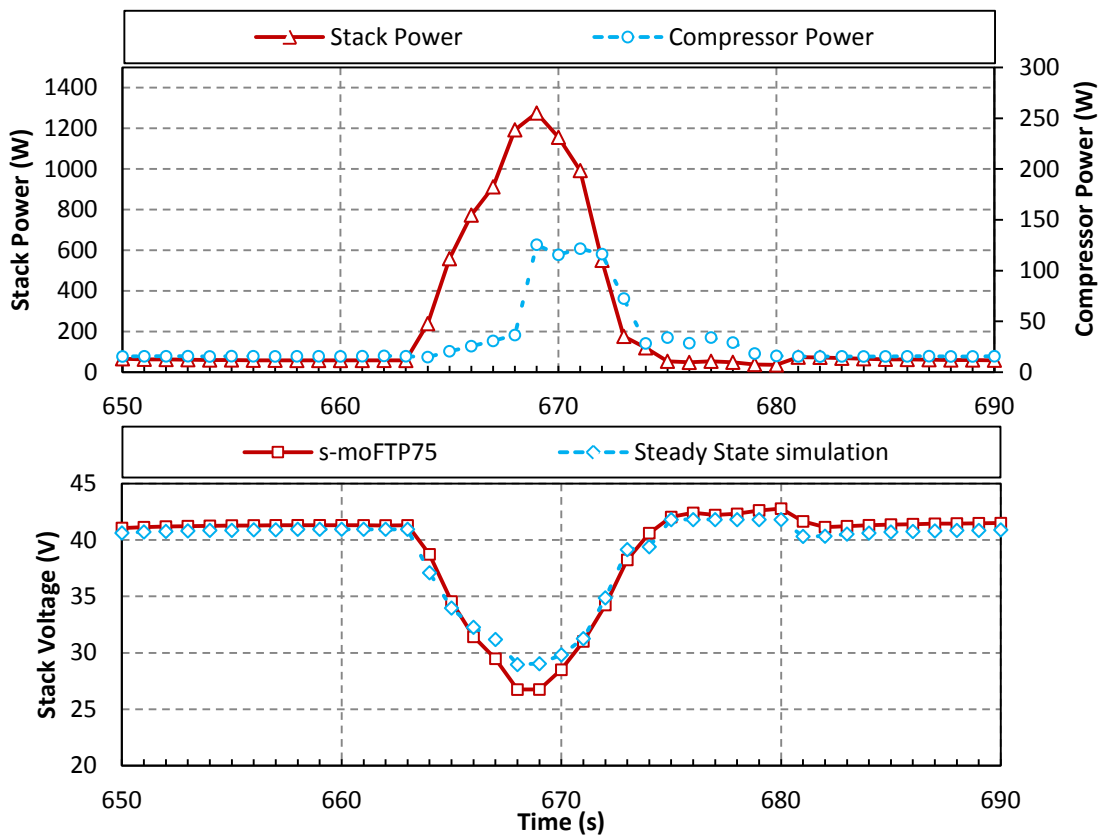
ภาพที่ ง-1 ถึง ง-7 แสดงส่วนขยายช่วงเวลาการไล่น้ำของคอมเพรสเซอร์ครั้งอื่นๆ ในวัฏจักร s-modified FTP75, s-NYCC และ s-ECE15 ตามลำดับ ซึ่งเป็นส่วนขยายของช่วงเวลาการไล่น้ำของคอมเพรสเซอร์จากภาพที่ 4-8 ที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.2.2.1 เมื่อพิจารณาส่วนขยายช่วงเวลาการไล่น้ำของคอมเพรสเซอร์ครั้งที่สองในวัฏจักร s-modified FTP75 ดังภาพที่ ง-1 พบว่าขณะที่เซลล์แกวเริ่มผลิตกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นจากวินาทีที่ 454 จนถึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดในวินาทีที่ 459 ในช่วงเวลาดังกล่าวแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวเริ่มลดลงจากสภาวะคงตัวอย่างเห็นได้ชัดในวินาทีที่ 457 เนื่องมาจากการเกิดสภาวะน้ำท่วม หลังจากนั้นในวินาทีถัดมาคือวินาทีที่ 458 คอมเพรสเซอร์จึงทำหน้าที่ไล่น้ำโดยทันที ผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับช่วงเวลาการไล่น้ำครั้งอื่นๆ ในวัฏจักร s-modified FTP75, s-NYCC และ s-ECE15 ดังภาพที่ ง-2 ถึง ง-7 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของเซลล์แกว และการทำงานของคอมเพรสเซอร์เมื่อเกิดสภาวะน้ำท่วม ซึ่งมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกันไม่ว่าจะทดสอบกับวัฏจักรขับซีใดก็ตาม



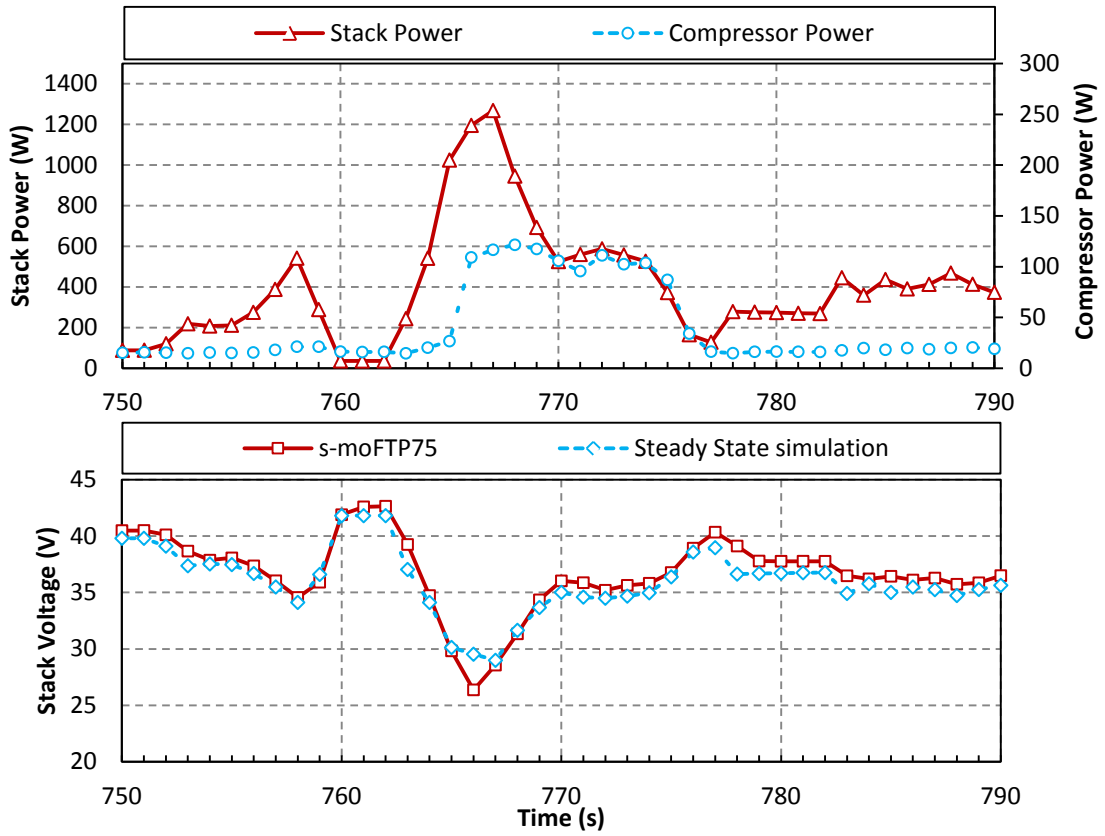
ภาพที่ ง-1 ส่วนขยายช่วงเวลาการไล่น้ำครั้งที่สองในวัฏจักร s-modified FTP75



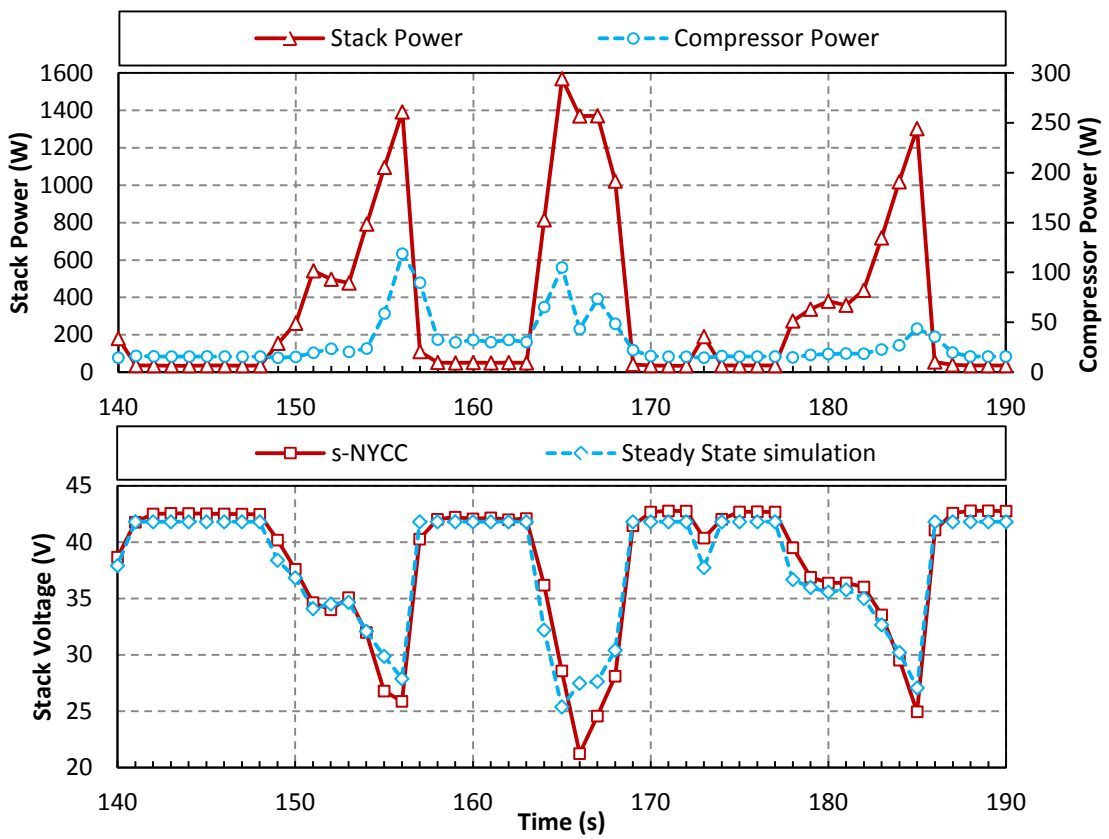
ภาพที่ ง-2 ส่วนขยายช่วงเวลาการไล่น้ำครั้งที่สามในวัฏจักร s-modified FTP75



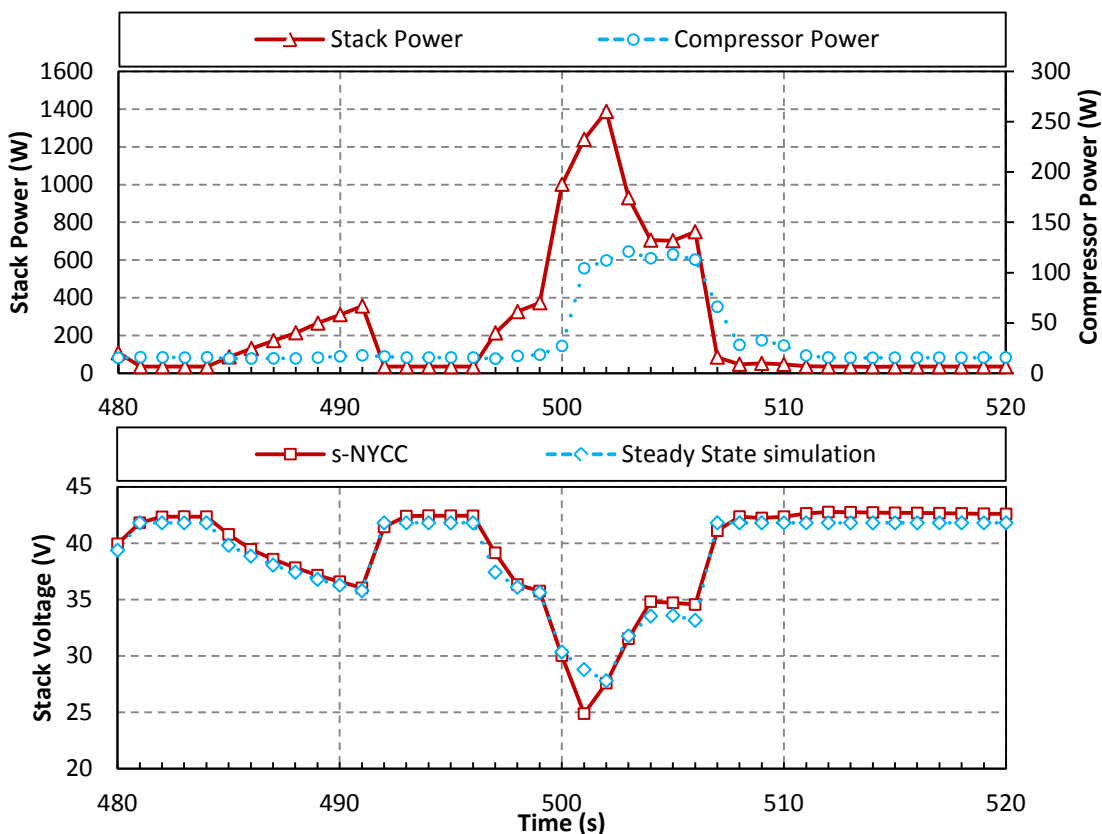
ภาพที่ ง-3 ส่วนขยายช่วงเวลาการไล่น้ำครั้งที่สี่ในวัฏจักร s-modified FTP75



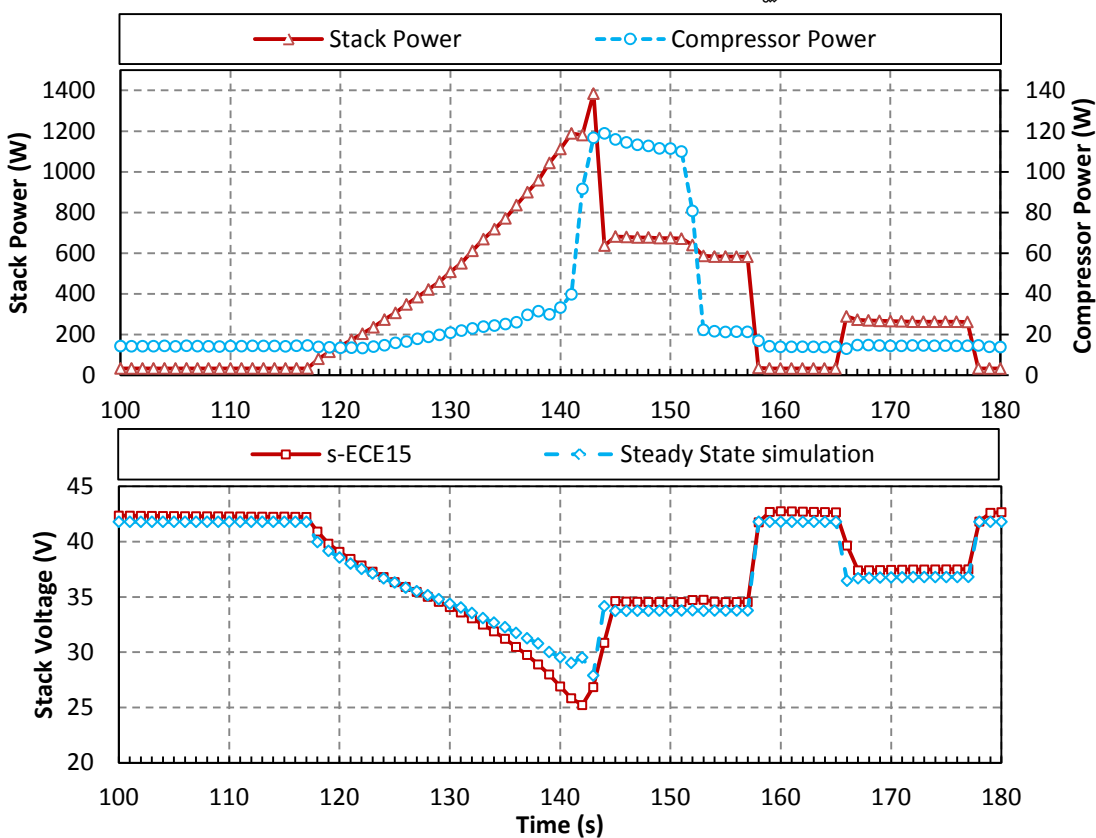
ภาพที่ ง-4 ส่วนขยายช่วงเวลาการได้น้ำครั้งที่ห้าในวัฏจักร s-modified FTP75



ภาพที่ ง-5 ส่วนขยายช่วงเวลาการได้น้ำครั้งแรกและครั้งที่สองในวัฏจักร s-NYCC



ภาพที่ ง-6 ส่วนขยายช่วงเวลาการได้นำครั้งที่สามในวัฏจักร s-NYCC



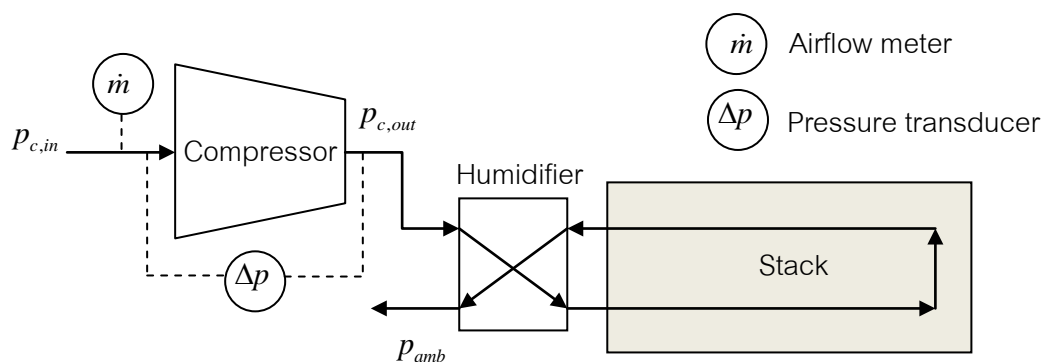
ภาพที่ ง-7 ส่วนขยายช่วงเวลาการได้นำครั้งแรกในวัฏจักร s-ECE15

ภาคผนวก จ

การวัดและอุปกรณ์การวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์และชุดพัดลมระบาย
อากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก

จ.1 การวัดและอุปกรณ์การวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์จากแบบจำลองไอเซนทรอปิก

ภาพที่ จ-1 แสดงตำแหน่งการวัดอัตราการไหลของอากาศ และอัตราส่วนความดันขาออกและเข้าคอมเพรสเซอร์ คอมเพรสเซอร์อัดอากาศจากความดันบรรยากาศจนกระทั่งความดันเพิ่มขึ้นเป็น $P_{c,out}$ ที่ขาออกคอมเพรสเซอร์ เมื่อคอมเพรสเซอร์อัดอากาศเข้าสู่เซลล์แกว อากาศขาเข้าจะต้องผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความชื้น (humidifier) ก่อนที่จะเข้าสู่เซลล์แกว อากาศขาออกจากเซลล์แกวจะนำอากาศที่มีความชื้นจากน้ำที่เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกลับเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความชื้นอีกครั้งหนึ่ง เพื่อแลกเปลี่ยนความชื้นให้กับอากาศขาเข้าเซลล์แกว จากนั้นอากาศขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความชื้นจึงปล่อยออกสู่บรรยากาศ ดังที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความชื้นถือเป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง [7] และอุปกรณ์ดังกล่าวถือเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ความดันลดลงของระบบเพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความชื้นถือเป็นส่วนหนึ่งของเซลล์แกว



ภาพที่ จ-1 ตำแหน่งการวัดอัตราการไหลของอากาศ ความดันขาออกและความดันขาเข้าคอมเพรสเซอร์

อัตราการไหลของอากาศวัดโดยเครื่องวัดอัตราการไหล (airflow meter) ที่ติดตั้งมาที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งบันทึกค่าและแสดงผลผ่านทางซอฟต์แวร์ NexaMon ความดันขาเข้าและออกคอมเพรสเซอร์วัดโดยเซ็นเซอร์วัดผลต่างความดัน (pressure transducer) รุ่น ASDX030 ที่มีย่านการวัดอยู่ที่ 0 ถึง 30 psi ดังภาพที่ จ-2 และมีลักษณะเฉพาะดังตารางที่ จ-1 ผู้วิจัยได้สอบเทียบเซ็นเซอร์วัดผลต่างความดันโดยใช้อุโมงค์ลมสำหรับการเรียนการสอนปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล บริเวณชั้น 2 ของตึกฮันส์ บันตลี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กราฟการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดผลต่างความดันแสดงดังภาพที่ จ-3 อัตราส่วนความดันขาออกและเข้าคอมเพรสเซอร์ที่อัตราการไหลต่างๆ ดังภาพที่ จ-4 นอกจากนี้ผลการประเมินอัตราส่วนความดันขาออกและเข้าคอมเพรสเซอร์ยังได้เปรียบเทียบกับ

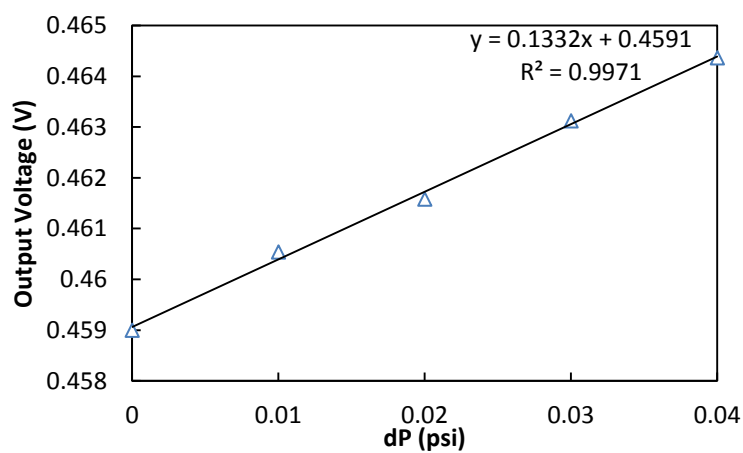
การศึกษาของ Kennedy [41] ซึ่งทดสอบคอมเพรสเซอร์ชนิดเดียวกับงานวิจัยนี้ ดังภาพที่ ๑-5 โดยพบว่ามีความโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



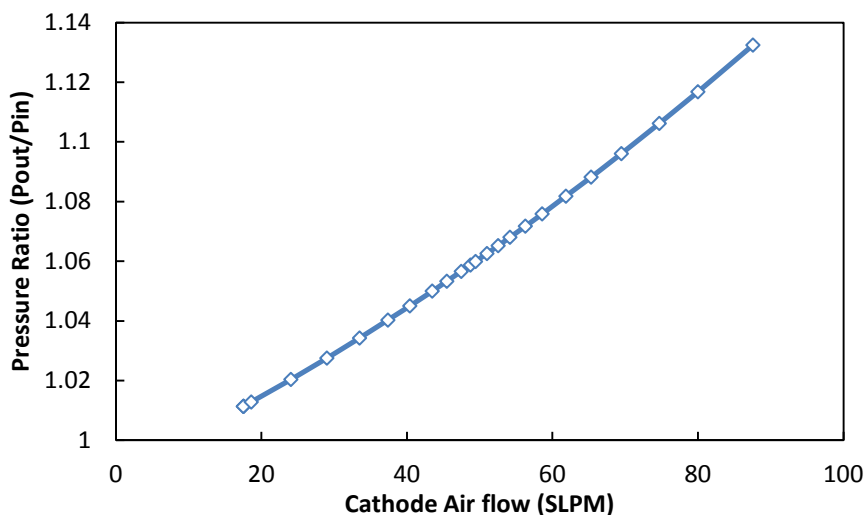
ภาพที่ ๑-2 เซ็นเซอร์วัดผลต่างความดันรุ่น ASDX030

ตารางที่ ๑-1 ลักษณะเฉพาะของเซ็นเซอร์วัดผลต่างความดันรุ่น ASDX030

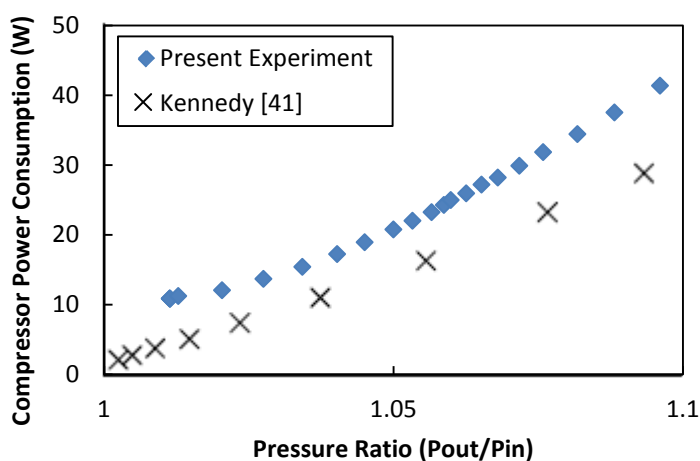
Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Units
Pressure Range		0 – 30 PSI			
Sensitivity		0.133 V/PSI			
Zero Pressure Offset	Voff	0.420	0.500	0.580	V
Full Scale Span	Vfss		4.00		V
Output at FS Pressure	Vfso	4.420	4.500	4.580	V
Accuracy	-	-	-	±2.0	%Vfss
Response Time		-	8	-	ms
Quantization Step		-	3	-	mV



ภาพที่ ๑-3 กราฟการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดผลต่างความดัน



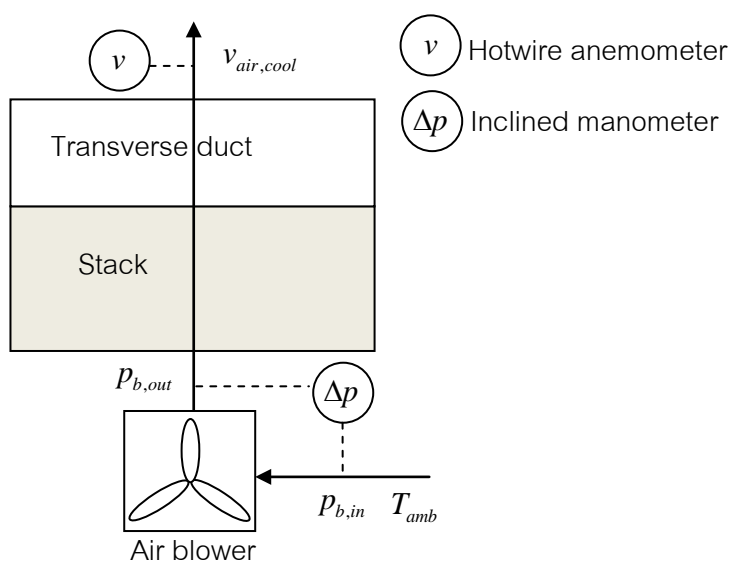
ภาพที่ ๑-4 อัตราส่วนความดันขาออกและเข้าคอมเพรสเซอร์ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ



ภาพที่ ๑-5 อัตราส่วนความดันขาออกและเข้าคอมเพรสเซอร์ในงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยของ Kennedy [41]

๑.2 การวัดและอุปกรณ์การวัดการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัฒนาระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิก

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้ใช้ชุดพัฒนาระบายอากาศทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับเซลล์แกว จากภาพที่ ๑-6 อากาศหล่อเย็นเข้าชุดพัฒนาระบายอากาศโดยมีความดันและอุณหภูมิเท่ากับบรรยากาศเป็น $p_{b,in}$ และ T_{amb} ตามลำดับ อากาศหล่อเย็นไหลผ่านชุดพัฒนาระบายอากาศจนมีความดันเพิ่มขึ้นเป็น $p_{b,out}$ จากนั้นอากาศหล่อเย็นจะไหลผ่านช่องระบายอากาศของเซลล์แกวและออกสู่บรรยากาศ



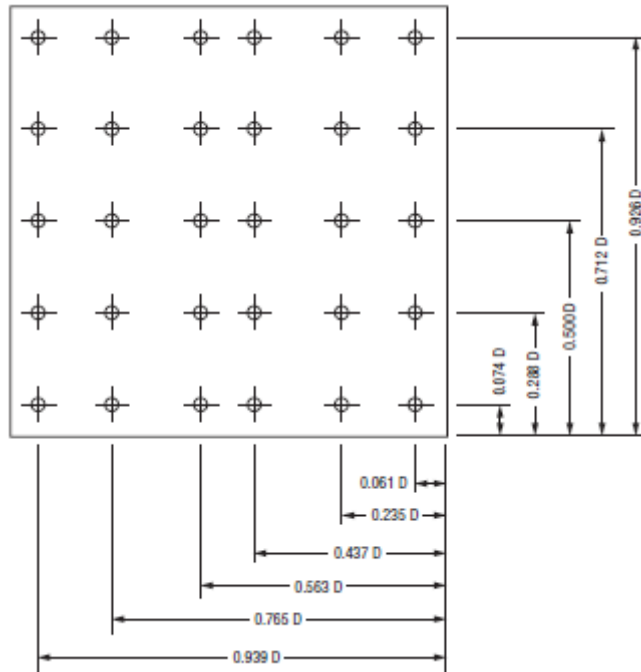
ภาพที่ ๑-6 ตำแหน่งการวัดความเร็วของอากาศหล่อเย็น ความดันขาออกและความดันขาเข้าชุดพัดลมระบายอากาศ

การประเมินการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศจากแบบจำลองไอเซนทรอปิกจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นและอัตราส่วนความดันขาออกและเข้าชุดพัดลมระบายอากาศ อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นประเมินจากสมการที่ ๑-1 โดยผู้วิจัยติดตั้งท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมไว้เหนือเซลล์แถว และวัดความเร็วของอากาศหล่อเย็นจากตำแหน่งที่อ้างอิงจากวิธี Log-Tchebycheff ดังภาพที่ ๑-7 ความเร็วของอากาศหล่อเย็นวัดโดย hotwire anemometer ยี่ห้อ AIRFLOW รุ่น TA-2-30/6k ย่านการวัด 0 ถึง 30 เมตรต่อวินาที ความดันขาเข้าและออกชุดพัดลมระบายอากาศวัดโดย inclined manometer ผลความดันตกในช่องระบายอากาศที่อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นต่างๆแสดงดังภาพที่ ๑-8

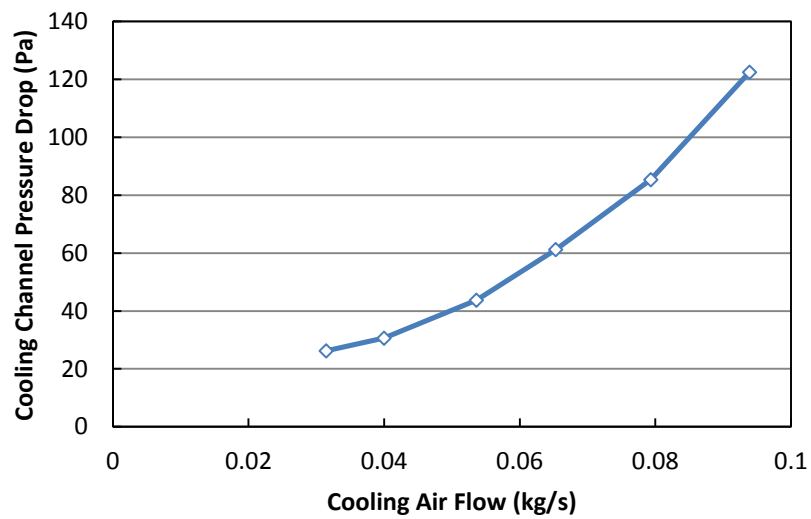
$$\dot{m}_{air,cool} = \rho_{air} A_{duct} \bar{v}_{air,cool} \quad (๑-1)$$

เมื่อ ρ_{air} คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3) A_{duct} คือ พื้นที่หน้าตัดท่อ (m^2) และ $\bar{v}_{air,cool}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศหล่อเย็นในหน้าตัดท่อ (m/s)

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของผลการทดสอบจากภาพที่ ๑-8 ที่อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นเท่ากับศูนย์ พบว่าความดันตกในช่องทางการไหลไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าความดันจาก inclined manometer และช่วงความดันการใช้งานอยู่ในช่วงต่ำมากจึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งผู้วิจัยไม่ได้แสดงให้เห็นจากภาพที่ ๑-8



ภาพที่ ๑-7 ตำแหน่งการวัดความเร็วของอากาศหล่อเย็นด้วยวิธี Log-Tchebycheff



ภาพที่ ๑-8 ความดันตกในช่องระบายอากาศที่อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นต่างๆ

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงและตัวอย่างการคำนวณ

จ.1 ข้อมูลการทดสอบภายใต้สภาวะคงตัว

ข้อมูลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้สภาวะคงตัวที่นำเสนอเป็นข้อมูลจากภาพที่ 4-1 และ 4-2 โดยจะนำไปเป็นข้อมูลเปรียบเทียบความแตกต่างกับผลการทดสอบภายใต้สภาวะไม่คงตัวต่อไป และใช้เป็นข้อมูลการคำนวณแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แกวในภาพที่ 4-8

ตารางที่ จ-1 ข้อมูลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้สภาวะคงตัว

Stack			Net	Power Consumption		Flow rate		Efficiency	
Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Power (W)	Blower (W)	Compressor (W)	Air (SLPM)	H ₂ x10 ⁻² (mol/s)	Stack (%)	System (%)
41.80	0.83	34.82	0.00	9.68	10.83	17.54	0.02	70.98	0.00
39.85	2.16	85.99	50.00	9.65	10.88	17.51	0.05	67.67	40.13
38.75	3.52	136.39	100.00	9.61	10.88	17.50	0.09	65.79	48.64
37.78	4.96	187.50	150.00	9.54	11.24	18.58	0.12	64.16	51.61
37.10	6.47	239.97	200.00	9.47	12.07	24.03	0.16	62.99	52.74
36.49	8.02	292.68	250.00	9.39	13.70	28.98	0.20	61.97	53.07
35.89	9.63	345.58	300.00	9.35	15.42	33.47	0.23	60.94	52.99
35.40	11.28	399.18	350.00	9.29	17.25	37.37	0.27	60.12	52.83
34.89	12.96	452.17	400.00	9.25	18.95	40.38	0.32	59.25	52.47
34.43	14.68	505.58	450.00	9.22	20.78	43.46	0.36	58.47	52.10
34.01	16.43	558.75	500.00	9.20	22.02	45.47	0.40	57.74	51.74
33.58	18.21	611.50	550.00	9.15	23.26	47.45	0.44	57.02	51.32
33.15	20.04	664.53	600.00	9.13	24.29	48.72	0.49	56.30	50.88
32.71	21.93	717.47	650.00	9.13	24.99	49.42	0.53	55.54	50.37
32.30	23.84	769.93	700.00	9.09	25.95	50.99	0.58	54.84	49.89
31.87	25.83	823.25	750.00	9.07	27.21	52.52	0.63	54.12	49.33
31.44	27.88	876.50	800.00	9.03	28.22	54.15	0.68	53.38	48.75
31.02	30.01	930.93	850.00	9.58	29.91	56.26	0.73	52.67	48.11
30.54	32.27	985.64	900.00	10.23	31.86	58.57	0.79	51.86	47.36
30.06	34.64	1041.22	950.00	10.99	34.45	61.84	0.84	51.04	46.57
29.65	37.00	1097.12	1000.00	11.69	37.55	65.30	0.90	50.34	45.90
29.29	39.41	1154.34	1050.00	12.45	41.38	69.46	0.96	49.73	45.24
28.85	42.05	1213.25	1100.00	13.25	47.22	74.68	1.02	48.99	44.43
28.43	44.74	1271.84	1150.00	14.07	53.58	79.98	1.09	48.27	43.62
27.78	48.53	1348.24	1200.00	24.13	64.25	87.55	1.18	47.17	41.98

จ.2 ข้อมูลการทดสอบภายใต้วัฏจักรขับที่

ข้อมูลต่อไปนี้เป็นส่วนหนึ่งจากข้อมูลการทดสอบภายใต้วัฏจักรขับที่ s-modified FTP75 โดยแสดงข้อมูลช่วงวินาทีที่ 250 ถึง 310 ซึ่งเป็นระยะเวลาการไล่น้ำครั้งแรกในวัฏจักรนี้ สำหรับข้อมูลการทดสอบในวัฏจักรอื่นๆ ผู้วิจัยได้แนบไว้ในซีดีรอมในไฟล์เดอร์ชื่อว่า Driving cycles

ตารางที่ จ-2 ข้อมูลการทดสอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้วัฏจักร s-modified FTP75

Time (s)	Stack			Net	Power Consumption		Flow rate		Efficiency*	
	Voltage (V)	Current (A)	Power* (W)	Power* (W)	Blower (W)	Compressor (W)	Air (SLPM)	H ₂ * x10 ⁻² (mol/s)	Stack (%)	System (%)
250	42.67	0.82	35.09	0.00	9.47	15.59	17.39	0.02	72.44	0.00
251	42.66	0.82	35.17	0.00	9.63	15.53	19.93	0.02	72.44	0.00
252	42.64	0.83	35.21	0.00	9.61	15.58	16.89	0.02	72.41	0.00
253	42.62	0.83	35.18	0.00	9.59	15.58	16.65	0.02	72.36	0.00
254	42.60	0.82	35.05	0.00	9.63	15.41	16.16	0.02	72.34	0.00
255	42.57	0.83	35.20	0.00	9.53	15.64	19.02	0.02	72.27	0.00
256	42.57	0.83	35.16	0.00	9.56	15.57	16.89	0.02	72.27	0.00
257	42.55	0.82	35.04	0.00	9.56	15.46	17.14	0.02	72.24	0.00
258	41.49	1.62	67.02	31.81	9.62	15.03	18.14	0.04	70.44	33.43
259	40.76	2.14	87.21	51.64	9.65	14.96	16.41	0.05	69.22	40.98
260	40.59	1.94	78.66	43.04	9.56	15.24	19.15	0.05	68.93	37.71
261	40.77	1.85	75.47	39.64	9.56	15.53	17.02	0.05	69.22	36.36
262	36.88	15.14	558.29	509.84	9.53	16.49	46.80	0.37	62.62	57.19
263	32.02	25.26	809.00	739.86	9.50	25.66	52.17	0.62	54.38	49.73
264	29.23	33.52	979.86	896.59	9.58	28.84	63.20	0.82	49.64	45.42
265	26.14	44.59	1165.77	1055.78	9.45	40.30	138.81	1.09	44.39	40.20
266	27.44	44.10	1209.89	1014.41	9.42	129.38	142.79	1.07	46.59	39.06
267	31.06	28.52	885.86	722.47	9.49	117.57	141.79	0.69	52.74	43.01
268	34.38	17.28	594.13	441.48	9.71	120.04	123.30	0.42	58.38	43.38
269	35.18	17.76	624.75	488.11	9.51	103.56	133.01	0.43	59.74	46.67
270	34.18	20.84	712.42	560.01	9.64	116.06	139.31	0.51	58.04	45.62
271	33.43	23.53	786.49	632.50	9.44	114.79	142.29	0.57	56.76	45.65
272	32.92	24.98	822.33	661.61	9.64	119.83	138.81	0.61	55.89	44.97
273	31.13	35.06	1091.37	925.50	9.53	113.14	140.29	0.85	52.86	44.82
274	29.46	38.00	1119.61	945.42	9.65	116.38	141.79	0.93	50.03	42.25
275	31.20	29.84	931.19	772.02	9.62	111.57	81.95	0.73	52.99	43.93
276	33.56	20.06	673.28	593.09	9.33	42.80	45.73	0.49	56.98	50.19

หมายเหตุ ข้อมูลที่ * คือ คำนวณจากความสัมพันธ์

Time (s)	Stack			Net	Power Consumption		Flow rate		Efficiency*	
	Voltage (V)	Current (A)	Power* (W)	Power* (W)	Blower (W)	Compressor (W)	Air (SLPM)	H ₂ * x10 ⁻² (mol/s)	Stack (%)	System (%)
277	34.77	15.79	549.03	493.26	9.55	22.51	43.24	0.38	59.04	53.04
278	34.29	18.60	637.90	580.29	9.61	21.52	45.10	0.45	58.23	52.97
279	34.80	11.61	404.17	352.62	9.53	22.33	34.56	0.28	59.09	51.55
280	36.38	11.19	407.14	359.86	9.65	18.53	36.70	0.27	61.78	54.60
281	36.54	10.01	365.77	319.83	9.57	18.42	30.03	0.24	62.04	54.25
282	37.28	7.55	281.58	239.34	9.62	17.02	24.15	0.18	63.30	53.80
283	37.59	8.24	309.84	267.87	9.54	16.29	28.46	0.20	63.82	55.17
284	36.83	10.77	396.79	351.81	9.56	16.96	34.38	0.26	62.54	55.45
285	36.36	10.73	390.17	343.73	9.56	18.22	34.38	0.26	61.74	54.39
286	36.58	9.73	355.83	310.67	9.61	17.91	29.87	0.24	62.12	54.24
287	38.11	4.80	183.02	144.29	9.54	15.98	19.28	0.12	64.70	51.01
288	38.32	8.52	326.32	285.70	9.56	14.75	28.61	0.21	65.07	56.97
289	36.70	10.00	366.91	322.42	9.52	17.10	31.17	0.24	62.31	54.75
290	36.51	10.09	368.38	322.85	9.56	18.04	32.33	0.25	61.99	54.32
291	36.56	9.99	365.11	320.05	9.59	17.55	33.17	0.24	62.08	54.42
292	36.57	9.96	364.27	319.13	9.56	17.73	33.69	0.24	62.10	54.40
293	36.59	9.90	362.23	317.22	9.61	17.65	33.35	0.24	62.13	54.41
294	36.23	11.16	404.26	357.31	9.54	18.40	38.17	0.27	61.52	54.37
295	35.19	15.34	539.72	487.25	9.48	19.84	44.68	0.37	59.75	53.94
296	34.05	17.78	605.49	548.07	9.55	22.10	49.21	0.43	57.81	52.33
297	29.90	42.25	1263.40	1173.96	9.46	25.57	80.65	1.03	50.78	47.18
298	27.49	34.41	946.04	847.71	9.56	41.35	58.24	0.84	46.68	41.83
299	29.67	34.46	1022.64	936.40	9.52	30.89	60.81	0.84	50.39	46.14
300	28.66	37.34	1070.11	980.97	9.31	29.37	59.00	0.91	48.66	44.61
301	31.98	19.34	618.34	552.44	9.56	27.90	44.26	0.47	54.30	48.51
302	33.39	24.47	816.98	751.31	9.51	23.07	54.30	0.60	56.70	52.14
303	31.71	25.66	813.76	743.50	9.63	25.34	50.56	0.63	53.85	49.20
304	32.57	23.26	757.39	690.93	9.61	24.46	49.65	0.57	55.30	50.45
305	33.96	17.45	592.73	533.51	9.60	23.98	43.24	0.43	57.66	51.90
306	35.47	13.70	485.85	433.10	9.59	21.45	41.63	0.33	60.22	53.68
307	35.21	16.07	565.86	511.21	9.50	21.32	45.73	0.39	59.79	54.01
308	34.90	15.69	547.58	492.12	9.56	22.31	43.04	0.38	59.25	53.25
309	35.75	12.94	462.46	410.92	9.57	21.34	37.24	0.32	60.71	53.94
310	36.94	9.28	342.77	297.62	9.56	18.46	32.16	0.23	62.72	54.46

หมายเหตุ ข้อมูลที่ * คือ คำนวณจากความสัมพันธ์

ตัวอย่างการคำนวณจากข้อมูล ณ วินาทีที่ 265 ซึ่งเป็นวินาทีที่คอมเพรสเซอร์เริ่มได้นำ

จ.2.1 อัตราการไหลของไฮโดรเจน จากสมการที่ 2-5

$$\dot{m}_{H_2, in} = \frac{N_{cell} I_{st}}{2F}$$

เมื่อ N_{cell} คือ จำนวนเซลล์แวนไดเออร์ที่ 47, I_{st} คือ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แวนไดเออร์ (A) อาศัยข้อมูลในคอลัมน์ที่ 3 จากตาราง จ-2 และ F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ 96,485 C/mol

$$\begin{aligned} \dot{m}_{H_2, in} &= \frac{47 \times 44.59 \text{ A}}{2 \times 96485 \frac{\text{mol}}{\text{s}}} \\ &= 1.09 \times 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{s}} \end{aligned}$$

จ.2.2 ประสิทธิภาพของเซลล์แวนไดเออร์ จากสมการที่ 2-12

$$\eta_{stack} = \frac{P_{stack}}{\dot{m}_{H_2, in} (LHV_{H_2})}$$

เมื่อ P_{stack} คือ กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แวนไดเออร์ผลิตได้ อาศัยข้อมูลในคอลัมน์ที่ 4 จากตาราง จ-2 และ LHV_{H_2} คือ ค่าความร้อนต่ำ (lower heating value) ของก๊าซไฮโดรเจน มีค่า $241.8 \times 10^3 \text{ J/mol}$

$$\begin{aligned} \eta_{stack} &= \frac{1165.77 \text{ W}}{1.09 \times 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{s}} \times 241.8 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{mol}}} \times 100\% \\ &= 44.39 \% \end{aligned}$$

จ.2.3 ประสิทธิภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิง จากสมการที่ 2-13

$$\eta_{system} = \frac{P_{net}}{\dot{m}_{H_2, in} (LHV_{H_2})}$$

เมื่อ P_{net} คือ กำลังไฟฟ้าที่สุทธิ อาศัยข้อมูลในคอลัมน์ที่ 5 จากตาราง จ-2

$$\begin{aligned} \eta_{system} &= \frac{1055.78 \text{ W}}{1.09 \times 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{s}} \times 241.8 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{mol}}} \times 100\% \\ &= 40.20 \% \end{aligned}$$

จ.3 ข้อมูลการออกแบบระบบเสริม

จ.3.1 คอมเพรสเซอร์

ตารางที่ จ-3 ข้อมูลการบริโภคกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์

Cathode air flow $\times 10^{-4}$ (kg/s)	Pressure ratio	Isentropic power (W)	Motor losses (W)	Compressor power consumption (W)
0.35	1.01	0.83	6.62	7.45
0.35	1.01	0.82	6.62	7.45
0.35	1.01	0.82	6.62	7.44
0.37	1.01	0.99	6.67	7.65
0.47	1.02	2.02	6.98	9.00
0.57	1.03	3.29	7.36	10.64
0.66	1.03	4.71	7.84	12.55
0.74	1.04	6.17	8.29	14.46
0.80	1.05	7.44	8.62	16.06
0.86	1.05	8.88	8.98	17.86
0.90	1.05	9.89	9.17	19.06
0.94	1.06	10.95	9.36	20.31
0.96	1.06	11.66	9.57	21.23
0.98	1.06	12.06	9.58	21.63
1.01	1.06	12.98	9.79	22.77
1.04	1.07	13.93	10.01	23.94
1.07	1.07	14.96	10.01	24.98
1.11	1.07	16.38	10.45	26.83
1.16	1.08	18.00	10.70	28.70
1.22	1.08	20.45	10.96	31.42
1.29	1.09	23.24	11.48	34.72
1.37	1.10	26.85	11.90	38.76
1.47	1.11	31.81	12.55	44.35
1.58	1.12	37.34	13.21	50.54
1.73	1.13	46.11	14.85	60.96

ตัวอย่างการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของคอมเพรสเซอร์ ที่อัตราการไหลของอากาศสูงสุด จากสมการที่ 5-1

$$\begin{aligned}
 P_{comp} &= \frac{\dot{m}_{air,in} c_{p,air} T_{amb}}{\eta_{comp}} \left[\left(\frac{P_{c,out}}{P_{c,in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \\
 &= \frac{1.73 \times 10^{-4} \frac{kg}{s} \times 1007 \frac{J}{kg \cdot K} \times 293.15 K}{0.4} \left[(1.13)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right] \\
 &= 46.11 W
 \end{aligned}$$

ฉ.3.2 ชุดพัดลมระบายอากาศ

ตารางที่ ฉ-4 ข้อมูลการบริโภคกำลังไฟฟ้าของชุดพัดลมระบายอากาศ

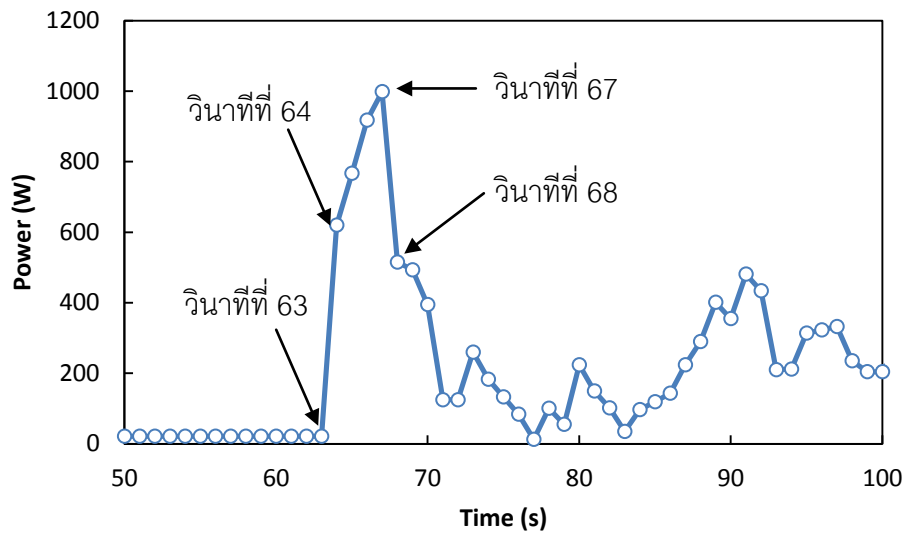
Cooling air flow $\times 10^{-2}$ (kg/s)	Pressure ratio	Isentropic power (W)	Motor losses (W)	Blower power consumption (W)
3.14	1.0002	1.75	5.56	7.30
4.00	1.0003	2.59	6.79	9.38
5.36	1.0004	4.96	8.42	13.38
6.53	1.0006	8.46	10.46	18.92
7.93	1.0008	14.32	12.71	27.04
9.39	1.0012	24.32	15.86	40.18

ตัวอย่างการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนเพลลาของชุดพัดลมระบายอากาศ ที่อัตราการไหลของอากาศหล่อเย็นสูงสุด จากสมการที่ 5-3

$$\begin{aligned}
 P_{blower} &= \frac{\dot{m}_{air,cool} c_{p,air} T_{amb}}{\eta_{blower}} \left[\left(\frac{P_{b,out}}{P_{b,in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \\
 &= \frac{9.39 \times 10^{-2} \frac{kg}{s} \times 1007 \frac{J}{kg \cdot K} \times 298.15 K}{0.4} \left[(1.0012)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right] \\
 &= 24.32 W
 \end{aligned}$$

จ.4 การคำนวณ normalized power slew rate

ตัวอย่างการคำนวณ n-slew rate จากลักษณะภาระตามวัฏจักรขับซี s-modified FTP75 อาศัยข้อมูลจากวินาทีที่ 63 ถึง 64 ซึ่ง n-slew rate เป็นบวก และวินาทีที่ 67 และ 68 ซึ่ง n-slew rate เป็นลบ ดังภาพที่ จ-1 สำหรับข้อมูลในรูปแบบของตัวเลขผู้วิจัยได้แนบไว้ในซีดีรวมในไฟล์เดอร์ชื่อ Driving cycles ชื่อไฟล์ moFTP75.xlsx ในคอลัมน์ cycle P



ภาพที่ จ-1 ลักษณะภาระตามวัฏจักรขับซี s-modified FTP75 ในช่วง 50 ถึง 100 วินาที

จากนิยามของ n-slew rate จากสมการที่ 2-14

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

เมื่อ dP/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (W/s), τ_s คือ time scale ของระบบเซลล์เชื้อเพลิง (s) กำหนดให้เท่ากับ 1 วินาที และ P_{rated} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจ่ายได้ (W) มีค่าเท่ากับ 1200 วัตต์

วินาทีที่ 64 ถึง 65

$$\begin{aligned} \tau_p^* &= \left(\frac{P_{64} - P_{63}}{t_{64} - t_{63}} \right) \left(\frac{\tau_s}{P_{rated}} \right) \\ &= \left(\frac{619.92 - 21.26}{64 - 63} \right) \left(\frac{W}{s} \right) \times \left(\frac{1 s}{1200 W} \right) \\ &= 0.4989 \end{aligned}$$

วินาทีที่ 67 ถึง 68

$$\begin{aligned}\tau_p^* &= \left(\frac{P_{68} - P_{67}}{t_{68} - t_{67}} \right) \left(\frac{\tau_s}{P_{rated}} \right) \\ &= \left(\frac{515.02 - 998.35}{68 - 67} \right) \left(\frac{W}{s} \right) \times \left(\frac{1 s}{1200 W} \right) \\ &= -0.4028\end{aligned}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวุฒินันท์ เพชรเพ็ง เกิดเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จ การศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2552 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการส่งเสริม การวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการ อุดมศึกษา (EN276B) และมีผลงานทางวิชาการที่ได้เผยแพร่ดังนี้

1. Wutthinan Petchpeng and Angkee Sripakagorn, Influence of the Driving Cycles on the Performance of Automotive Fuel Cell System, The 8th International Conference on Automotive Engineering (ICAE-8), Bangkok, Thailand, April 2-5, 2012.
2. Wutthinan Petchpeng and Angkee Sripakagorn, Effect of Transient Load on the Stack and System-level Efficiency of Automotive Fuel Cell System, The 4th KKU International Engineering Conference 2012 (KKU-IENC2012), Khon Kaen, Thailand, May 10-12, 2012.