

การเปรียบเทียบสมรรถนะการจ่ายพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้และแบบทั่วไป Power Delivery Performance Comparison of Reversible and Conventional PEM Fuel Cells

อดิศร เมธแก้ว¹ วิวรรณ สุพรรณ¹ ธวัช ชูชิต¹ ณัฐชนน ศรีสุวรรณ² ธนวัฒน์ ศรีรักษา² และ ศุภชัย แก้วพวง^{3*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ adisorn.m@tsu.ac.th wiwat.s@tsu.ac.th tawat.c@tsu.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ natchanon.s@tsu.ac.th tanawat.s@tsu.ac.th

³ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ supachai.ka@tsu.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการจ่ายพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEM ซึ่งเน้นวิเคราะห์ลักษณะแรงดันและกระแสไฟฟ้า รวมทั้งประสิทธิภาพการจ่ายพลังงานอย่างต่อเนื่องภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่สม่ำเสมอและควบคุมได้ โดยการทดลองเปรียบเทียบใช้เซลล์เชื้อเพลิง PEM สองแบบ คือ แบบย้อนกลับได้ที่สามารถสลับทิศทางการจ่ายพลังงานได้ และแบบทั่วไปที่จ่ายพลังงานได้เพียงทิศทางเดียว ซึ่งในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ โดยส่วนแรกนำเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้มาเข้าสู่กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสเพื่อกักเก็บก๊าซไฮโดรเจน ในช่วงเวลา 0-76 s และส่วนที่สองทดสอบสมรรถนะและประเมินประสิทธิภาพการจ่ายพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEM ทั้งแบบย้อนกลับได้และแบบทั่วไปในช่วงเวลา 0-205 s และ 0-318 s ตามลำดับจากผลทดสอบเมื่อเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขพลังงานขาเข้าเท่ากันที่ 341.58 J ซึ่งแบบย้อนกลับได้ให้พลังงานขาออก 23.84 J และแบบทั่วไปให้ 24.30 J มีประสิทธิภาพของแบบย้อนกลับได้ 6.98 % และแบบทั่วไป 7.11 % ทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 24.5 °C ความชื้น 52.3 % จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบทั่วไปมีสมรรถนะแปลงพลังงานได้ดีกว่าแบบย้อนกลับได้ ดังนั้นบทความนี้ได้แสดงถึงความแตกต่างด้านสมรรถนะการจ่ายพลังงานระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM ทั้งสองแบบดังกล่าว อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบแหล่งจ่ายพลังงานประเภทอื่น ๆ ยังคงต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับบริบทและข้อกำหนดเฉพาะของแต่ละระบบอีกด้วย

คำสำคัญ: เซลล์เชื้อเพลิง PEM, แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, ประสิทธิภาพการจ่ายพลังงาน

Abstract

This study examines and contrasts the power delivery capabilities of PEM fuel cells through the analysis of voltage and current patterns, as well as the efficiency and reliability of energy production under consistent and carefully controlled working conditions. Two types of PEM fuel cells were used in this comparison study: a reversible model that allowed for bidirectional energy flow and a traditional model that could only produce power in one direction. There were two main stages to the experimental process. In the first step, hydrogen gas was stored in the reversible PEM fuel cell by electrolyzing it for a duration of 0–76 s. The performance and power output efficiency of the conventional and reversible PEM fuel cells were examined in the second section during time spans of 0–318 s and 0–205 s, respectively. The reversible PEM fuel cell generated an output energy of 23.84 J, whereas the traditional

PEM fuel cell produced 24.30 J, according to test results conducted under equal input energy conditions of 341.58 J. This translates to a conventional cell efficiency of 7.11 % and a reversible cell efficiency of 6.98 %. A temperature of 24.5 °C and a relative humidity of 52.3 % were used for the experiments. These findings show that the traditional PEM fuel cell performs better at energy conversion than the reversible kind under the given circumstances. Therefore, this study highlights the differences in power delivery performance between reversible and standard PEM fuel cells. However, the practical implementation of these systems within broader energy supply infrastructures requires careful consideration of contextual factors and system-specific technical restrictions.

Keywords: PEM fuel cell, voltage, current, power delivery efficiency

1. บทนำ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาปัญหาภาวะโลกร้อนได้ทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงปัจจุบัน จึงส่งผลให้หลายประเทศทั่วโลกให้ความสำคัญกับการเลือกใช้พลังงานทางเลือกที่สะอาดและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น เพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นแหล่งสำคัญที่ก่อให้เกิดมลพิษและก๊าซเรือนกระจก [1] พลังงานไฮโดรเจนจึงเริ่มมีบทบาทในฐานะแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาดและมีศักยภาพสูง เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและที่พำนักอาศัย พร้อมทั้งสามารถใช้กับระบบขับเคลื่อนยานพาหนะ เช่น ยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเหมาะสมสำหรับระบบขนส่งที่ปลอดภัยและมีส่วนช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [2]

อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane: PEM) ที่มีจุดเด่นด้านประสิทธิภาพและความปลอดภัย รวมทั้งมีอุณหภูมิของการทำงานต่ำและความหนาแน่นพลังงานสูงที่มีพฤติกรรมเริ่มทำงานได้อย่างรวดเร็ว [3], [6] โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถแปลงพลังงานเคมีจากก๊าซไฮโดรเจนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ จึงเหมาะสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมขนส่งและระบบสำรองไฟฟ้า [4]

นอกจากนี้เทคโนโลยี PEM ยังแบ่งออกได้เป็นสองประเภทหลัก ๆ ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงแบบทั่วไป (Conventional PEM Fuel Cells) ซึ่งทำหน้าที่จ่ายพลังงานเพียงทิศทางเดียว และเซลล์เชื้อเพลิงแบบย้อนกลับได้ (Reversible PEM Fuel Cells) ซึ่งสามารถทำงานได้สองทิศทาง โดยทำหน้าที่ทั้งผลิตไฟฟ้าและทำอิเล็กโทรลิซิสแยกน้ำเพื่อกักเก็บพลังงานในรูปของไฮโดรเจน [5] ซึ่งความสามารถดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการจัดการพลังงาน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และลม [7], [11]

ด้วยเหตุนี้การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองแบบดังกล่าว จึงมีความแตกต่างกันในด้านวัตถุประสงค์และลักษณะการนำไปประยุกต์ใช้งาน

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

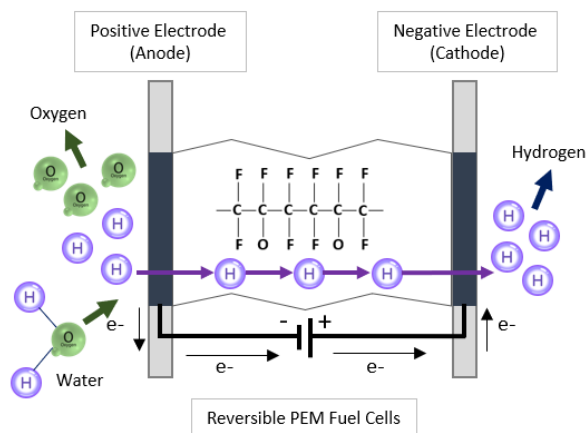
โดยเซลล์แบบทั่วไปเหมาะสำหรับระบบที่ต้องการการจ่ายพลังงานต่อเนื่องจากแหล่งเชื้อเพลิงภายนอก ในขณะที่เซลล์แบบย้อนกลับได้เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการกักเก็บพลังงานและใช้พลังงานในเวลาที่ต้องการ เช่น ระบบพลังงานแบบกระจายตัวและระบบสำรองพลังงานในอาคาร [8]

บทความนี้จึงเน้นศึกษาการเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง PEM ทั้งสองประเภทดังกล่าว โดยเน้นการวิเคราะห์ทางด้านแรงดันและกระแสไฟฟ้า พร้อมทั้งประเมินประสิทธิภาพการจ่ายพลังงานของระบบ ซึ่งผลการศึกษานี้รองรับและสนับสนุนการออกแบบระบบพลังงานที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานเฉพาะด้าน รวมทั้งเป็นฐานข้อมูลสำคัญของการนำไปประยุกต์ใช้งานในเชิงวิศวกรรมสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่างยั่งยืน

2. หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEM

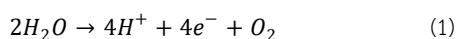
2.1 PEM แบบย้อนกลับได้

กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน PEM แบบย้อนกลับได้ ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) โดยใช้พลังงานไฟฟ้าในการแยกโมเลกุลน้ำบริสุทธิ์ (Water : H_2O) ให้ออกเป็นก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen : H_2) และก๊าซออกซิเจน (Oxygen : O_2) โดยที่ PEM ทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับถ่ายโอนโปรตอนจากขั้วบวก (Positive Electrode) ไปยังขั้วลบ (Negative Electrode) ในขณะที่อิเล็กตรอนไม่สามารถผ่าน PEM ได้ แต่ไหลผ่านวงจรไฟฟ้าที่เชื่อมต่อจากภายนอกแทน ในกระบวนการนี้เป็นระบบแบบสถานะของแข็ง (Solid Electrolyte System) มีข้อดี คือสามารถทำงานที่อุณหภูมิต่ำและตอบสนองต่อโหลดได้รวดเร็ว รวมทั้งให้สมบัติการนำไฟฟ้าของก๊าซไฮโดรเจนสูง



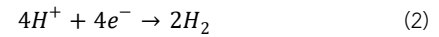
รูปที่ 1 หลักการทำงานของ PEM แบบย้อนกลับได้

ในขั้นตอนแรกน้ำบริสุทธิ์ถูกนำเข้าสู่ขั้วบวก (Anode) ของเซลล์อิเล็กโทรลิซิสและทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าบวก เมื่อมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบทำให้น้ำบริสุทธิ์เกิดการแตกตัว (Oxidation Reaction) เป็นโปรตอน (H^+) อิเล็กตรอน (e^-) และก๊าซออกซิเจน (O_2) ดังสมการที่ 1

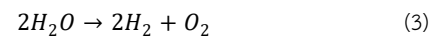


จากนั้นปฏิกิริยาในสมการที่ 1 โดยก๊าซออกซิเจนถูกปล่อยออกจากขั้วบวก และในส่วนโปรตอนที่เกิดขึ้นสามารถเคลื่อนที่ผ่าน PEM ไปยังขั้วไฟฟ้าลบ (Cathode) ในขณะที่อิเล็กตรอนที่ไม่สามารถผ่าน PEM

ได้ จึงทำให้ไหลผ่านไปยังวงจรไฟฟ้าภายนอกแทน ซึ่งสามารถนำพลังงานไฟฟ้าส่วนนี้ไปใช้หรือกักเก็บได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตามเมื่อโปรตอน (H^+) เดินทางมาถึงขั้วลบทำให้เกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่เดินทางมาจากวงจรภายนอก ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ดังสมการที่ 2



นอกจากนี้ยังมีขั้นตอนในส่วนของการแยกน้ำเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดและปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด โดยเมื่อรวมทั้งสองปฏิกิริยาเข้าด้วยกันจึงได้ปฏิกิริยารวมของเซลล์ ดังสมการที่ 3



ในการแยกน้ำด้วย PEM แบบย้อนกลับได้ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถอธิบายและวิเคราะห์ได้โดยอาศัยหลักการพื้นฐานด้านพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบวงจรไฟฟ้าตรง (DC circuit) ร่วมกับแนวคิดทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังสมการที่ 4

$$V_{cell} = V_{reverse} + V_{anode} + V_{cathode} + IR \quad (4)$$

โดยที่ V_{cell}	คือ แรงดันไฟฟ้ารวมที่ใช้กับเซลล์ (V)
$V_{reverse}$	คือ แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับของปฏิกิริยา (V)
V_{anode}	คือ แรงดันไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วลบ (V)
$V_{cathode}$	คือ แรงดันไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วบวก (V)
I	คือ กระแสไฟฟ้า (A)
R	คือ ความต้านทานรวมของเซลล์ (Ω)

โดยกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Electrolysis) กล่าวว่าปริมาณของสารที่ถูกเปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้าในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าสู่ระบบ และถ้าหากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซลล์อิเล็กโทรลิซิสเป็นระยะเวลาหนึ่ง จึงสามารถคำนวณหาจำนวนโมลของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยใช้สมการเชิงเส้นที่สัมพันธ์กับกระแสและเวลา ซึ่งแนวคิดนี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบระบบผลิตไฮโดรเจนให้มีประสิทธิภาพสูงสุด (η_{max}) ตามปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในระบบ ดังสมการที่ 5 และยังได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) กับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ($Volume_{Hydrogen}$) หน่วยเป็นลิตร (L) ในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส [9] ดังสมการที่ 6

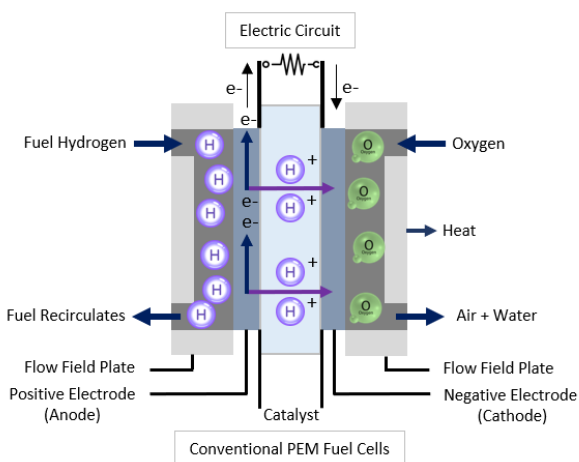
$$\eta_{max} = \left(\frac{V_{reverse}}{V_{cell}} \right) \times 100 \quad (5)$$

$$Volume_{Hydrogen} = \frac{ItR(273.15 + T)}{zFP} \quad (6)$$

โดยที่ t	คือ เวลา (s)
R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol-K)
T	คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
z	คือ จำนวนอิเล็กตรอนต่อโมลของก๊าซ (เท่ากับ 2)
F	คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96485 C/mol)
P	คือ ความดัน (atm)

2.2 PEM แบบทั่วไป

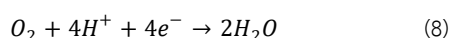
สำหรับหลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบทั่วไป ดังรูปที่ 2 โดยอาศัยการแปลงพลังงานเคมีโดยตรงจากไฮโดรเจนและออกซิเจน ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าและความร้อนผ่านกระบวนการอิเล็กโทรเคมี ซึ่งเกิดขึ้นภายในระดับเซลล์และมีส่วนประกอบ 3 ส่วนหลัก ๆ โดยส่วนแรก คือ ขั้วไฟฟ้าแอโนด ซึ่งทำหน้าที่รับไฮโดรเจนเข้าสู่เซลล์ ในส่วนที่สอง คือ ขั้วไฟฟ้าแคโทด ที่รับออกซิเจนหรืออากาศเพื่อทำปฏิกิริยา และส่วนที่สาม คือ PEM ซึ่งเป็นเยื่อบาง ๆ ที่สามารถนำโปรตอน (H^+) ให้ไหลผ่านได้และยังป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนไหลผ่าน จึงส่งผลให้อิเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นเริ่มต้นที่ขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยที่โมเลกุลไฮโดรเจน (H_2) ถูกแยกตัวออกเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 7



รูปที่ 2 หลักการทำงานของ PEM แบบทั่วไป



เมื่อโปรตอนที่ได้เคลื่อนที่ผ่านเยื่อ PEM และส่งผ่านไปยังฝั่งแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนไหลผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกไปยังแคโทด จากนั้นที่ฝั่งแคโทดทำให้โปรตอนและอิเล็กตรอน รวมทั้งออกซิเจน (O_2) ได้รวมตัวกันทำปฏิกิริยารีดอกซ์กันเพื่อก่อให้เกิดน้ำบริสุทธิ์ (H_2O) ดังสมการที่ 8



จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ป้อนเข้า (Input) กับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Output) ของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบทั่วไป สามารถเขียนในรูปแบบเชิงพลังงาน ดังสมการที่ 9

$$E_{output} = n\Delta G \quad (9)$$

โดยที่ E_{output} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (J)
 n คือ ปริมาณไฮโดรเจนที่ป้อนเข้า (mol)
 ΔG คือ พลังงานเสรีกิบส์ต่อโมลของ H_2

นอกจากนี้ในการประเมินสมรรถนะการทำงานของ PME โดยเป็นหนึ่งในตัวชี้วัดสำคัญ คือ กำลังไฟฟ้า (Power Output : P_{out}) ที่ผลิตได้ใน

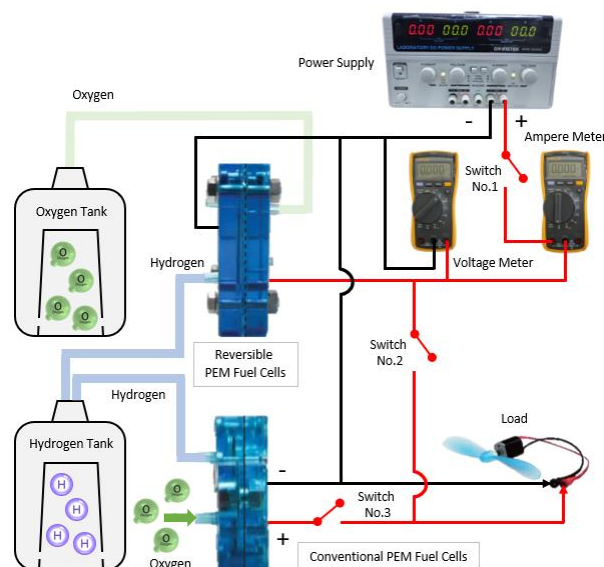
หน่วยวัตต์ (W) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของแรงดันไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (I) ที่ไหลผ่านวงจร ดังสมการที่ 10 ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกจัดเรียงในลักษณะของสแต็ก (Stack) ที่ประกอบด้วยเซลล์ย่อยจำนวน (n_{cell}) และในแต่ละเซลล์มีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (V_{cell}) โดยสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้า (P_{out_stack}) [10], [11] ดังสมการที่ 11

$$P_{out} = VI \quad (10)$$

$$P_{out_stack} = n_{cell}V_{cell}I \quad (11)$$

3. เปรียบวิธีการและการอภิปรายผล

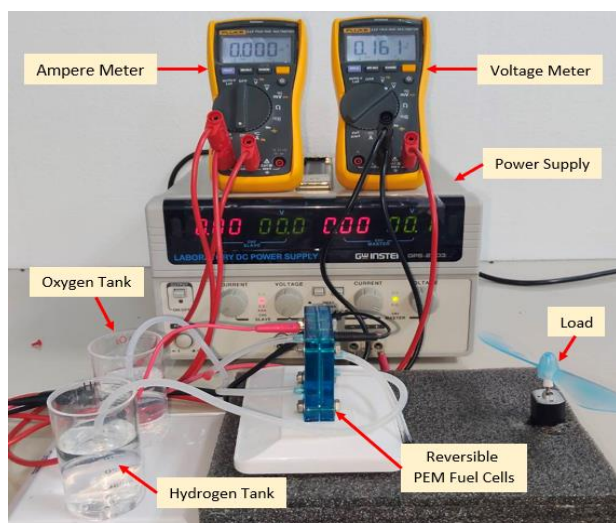
ในการทดลองของบทความนี้ใช้รูปแบบวงจรทดลองของระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้และแบบทั่วไป ดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นการทดลองผลิตและนำก๊าซไฮโดรเจนไปใช้เป็นหลัก เริ่มต้นจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Power Supply) ต่อผ่านสวิตช์หมายเลข 1 (Switch No.1) เข้าสู่จอร์ที่มีแอมป์มิเตอร์ (Ampere Meter) และโวลต์มิเตอร์ (Voltage Meter) เพื่อวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะปฏิบัติการ และเมื่อสวิตช์หมายเลข 1 ปิด (Close) เป็นกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสโดยที่กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้ เพื่อทำการแยกน้ำให้เป็นก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งนำไปเก็บไว้ในถังเก็บก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Tank) และถังเก็บก๊าซออกซิเจน (Oxygen Tank) เมื่อต้องการใช้พลังงานจากก๊าซที่ผลิตได้ ในส่วนของสวิตช์หมายเลข 2 (Switch No.2) หรือ สวิตช์หมายเลข 3 (Switch No.3) ปิด เพื่อนำก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนแปลงพลังงานเคมีในก๊าซกลับเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้โหลด (Load) โดยใช้พัลลภขนาดเล็กทดลอง ทั้งนี้ในส่วนของสวิตช์หมายเลข 3 เป็นการจ่ายไฟไปยังโหลดที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบทั่วไป ซึ่งก๊าซออกซิเจนเกิดจากสภาพแวดล้อมโดยรอบในขณะนั้น เช่น อุณหภูมิและความชื้น เป็นต้น



รูปที่ 3 วงจรการทดลองระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM สำหรับการจ่ายโหลด

สำหรับวัตถุประสงค์หลักของบทความนี้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการจ่ายพลังงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้และแบบทั่วไป โดยเน้นวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าขาเข้าและพลังงานไฟฟ้าขาออก เพื่อ

ใช้คำนวณหาประสิทธิภาพของแต่ละระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ควบคุมได้ ซึ่งในการกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสที่ใช้ระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้ ดังรูปที่ 4 โดยใช้เวลาในการกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส 0-76 s เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบลักษณะของกระแสไฟฟ้า (A) และ แรงดันไฟฟ้า (V) รวมทั้งกำลังไฟฟ้า (W) และ พลังงาน (J) ดังตารางที่ 1 ซึ่งผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าลดลงจาก 2.009 A เหลือเฉลี่ยประมาณ 1.6 A ขณะที่แรงดันคงที่เฉลี่ย 2.36 V ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าลดลงจาก 4.619 W เหลือเฉลี่ยประมาณ 3.8 W พลังงานสะสมมีแนวโน้มลดลงในช่วงต้น ก่อนจะปรับเปลี่ยนเล็กน้อยและลดลงอีกครั้งในช่วงท้ายเฉลี่ยประมาณ 38 J ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการถดถอยของกำลังจ่ายและพลวัตการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้โหลดคงที่



รูปที่ 4 การทดลองอิเล็กโทรลิซิสเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้

ตารางที่ 1 ผลทดลองอิเล็กโทรลิซิสเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้

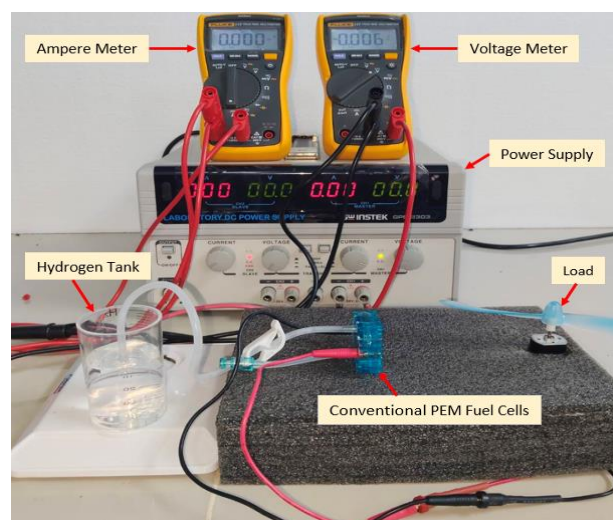
เวลา (s)	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กำลังไฟฟ้า (W)	พลังงาน (J)
0	2.009	2.299	4.619	46.187
10	1.680	2.362	3.968	39.682
20	1.635	2.367	3.870	38.700
30	1.637	2.366	3.873	38.731
40	1.619	2.368	3.834	38.338
50	1.599	2.369	3.788	37.880
60	1.676	2.362	3.959	39.587
70	1.657	2.364	3.917	39.171
76	1.642	2.365	3.883	23.300

ในขั้นตอนการวัดสมรรถนะในขณะที่ทดลองจ่ายโหลดของระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้ ซึ่งใช้อุปกรณ์สำหรับทดลองชุดเดียวกันกับการทดลองอิเล็กโทรลิซิสเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้ ดังรูปที่ 4 พบว่าผลการทดลอง ในช่วงเวลา 0-205 s ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 0.518 A และแรงดันไฟฟ้า 0.856 V ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเริ่มต้นสูงสุดที่ 0.4434 W มีพลังงานสะสม 4.4341 J จากนั้นค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงต่อเนื่อง โดยในช่วง 0-70 s โดยกำลังไฟฟ้าลดลงจาก 0.4434 W เหลือ 0.1530 W มีพลังงานสะสมลดลงจาก 4.4341 J

เหลือ 1.5305 J ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการสูญเสียสมรรถนะในการจ่ายพลังงานอย่างชัดเจน ทั้งนี้เมื่อเข้าสู่ช่วง 80-150 s ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าลดลงในอัตราต่ำลง โดยกำลังไฟฟ้าคงอยู่ในช่วง 0.0856-0.0617 W และพลังงานสะสมอยู่ในช่วง 0.8563-0.6172 J ก่อนที่ทดลองอย่างรวดเร็วช่วงปลายการทดลองที่เวลา 160-205 s เหลือเพียง 0.0079 W มีพลังงานสะสม 0.1396 J ที่เวลา 205 s ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลทดลองจ่ายโหลดของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้

เวลา (s)	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กำลังไฟฟ้า (W)	พลังงาน (J)
0	0.518	0.856	0.4434	4.4341
10	0.317	0.587	0.1861	1.8608
20	0.313	0.575	0.1800	1.7998
30	0.307	0.563	0.1728	1.7284
40	0.298	0.557	0.1660	1.6599
50	0.295	0.548	0.1617	1.6166
60	0.288	0.545	0.1570	1.5696
70	0.285	0.537	0.1530	1.5305
80	0.213	0.402	0.0856	0.8563
90	0.214	0.404	0.0865	0.8646
100	0.198	0.376	0.0744	0.7445
110	0.202	0.381	0.0770	0.7696
120	0.199	0.374	0.0744	0.7443
130	0.196	0.367	0.0719	0.7193
140	0.191	0.354	0.0676	0.6761
150	0.181	0.341	0.0617	0.6172
160	0.171	0.319	0.0545	0.5455
170	0.153	0.286	0.0438	0.4376
180	0.132	0.235	0.0310	0.3102
190	0.110	0.179	0.0197	0.1969
200	0.095	0.127	0.0121	0.1207
205	0.090	0.088	0.0079	0.1396



รูปที่ 5 การทดลองจ่ายโหลดของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบทั่วไป

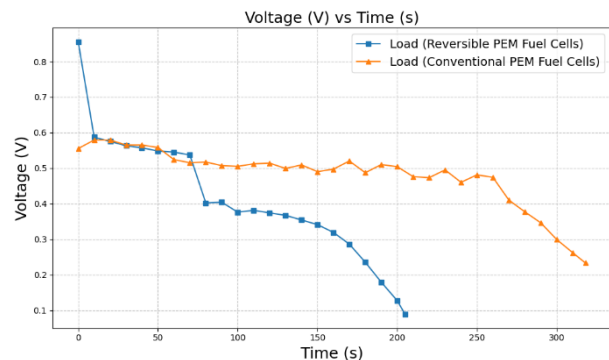
ตารางที่ 3 ผลทดลองจ่ายโหลดของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบทั่วไป

เวลา (s)	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กำลังไฟฟ้า (W)	พลังงาน (J)
0	0.207	0.555	0.1149	1.1489
10	0.133	0.579	0.0770	0.7701
20	0.128	0.579	0.0741	0.7411
30	0.165	0.565	0.0932	0.9323
40	0.135	0.565	0.0763	0.7628
50	0.14	0.558	0.0781	0.7812
60	0.167	0.524	0.0875	0.8751
70	0.174	0.515	0.0896	0.8961
80	0.175	0.517	0.0905	0.9048
90	0.178	0.507	0.0902	0.9025
100	0.178	0.505	0.0899	0.8989
110	0.17	0.512	0.0870	0.8704
120	0.155	0.514	0.0797	0.7967
130	0.177	0.499	0.0883	0.8832
140	0.169	0.509	0.0860	0.8602
150	0.179	0.49	0.0877	0.8771
160	0.171	0.497	0.0850	0.8499
170	0.152	0.52	0.0790	0.7904
180	0.172	0.487	0.0838	0.8376
190	0.151	0.51	0.0770	0.7701
200	0.149	0.504	0.0751	0.7510
210	0.164	0.476	0.0781	0.7806
220	0.161	0.473	0.0762	0.7615
230	0.144	0.495	0.0713	0.7128
240	0.151	0.46	0.0695	0.6946
250	0.136	0.481	0.0654	0.6542
260	0.132	0.474	0.0626	0.6257
270	0.134	0.41	0.0549	0.5494
280	0.124	0.377	0.0467	0.4675
290	0.116	0.346	0.0401	0.4014
300	0.106	0.299	0.0317	0.3169
310	0.099	0.262	0.0259	0.2594
318	0.096	0.233	0.0224	0.0789

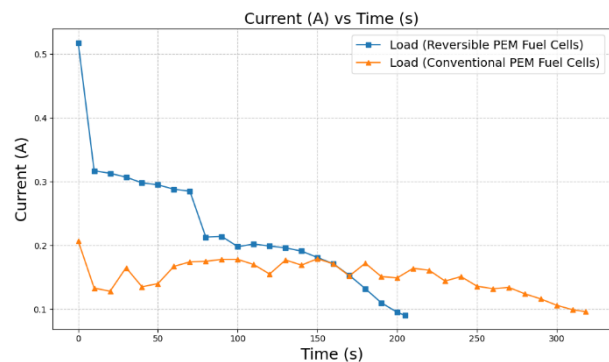
สำหรับการวัดสมรรถนะในขณะที่ทดลองจ่ายโหลดของระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบทั่วไป ดังรูปที่ 5 พบว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 24.5 °C ความชื้น 52.3 % ในช่วงเวลา 0–318 s ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 0.207 A และแรงดันไฟฟ้า 0.555 V ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเริ่มต้นมีค่า 0.1149 W มีพลังงานสะสม 1.1489 J ในช่วงเวลา 0–100 วินาที ค่ากำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและคงอยู่ในช่วง 0.0741–0.0932 W โดยแรงดันและกระแสมีความเสถียรในระดับปานกลาง ซึ่งชี้ให้เห็นถึงสมรรถนะคงที่ในระยะต้นของการทำงาน และในช่วง 110–200 s ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.075–0.088 W มีค่าลดลงเล็กน้อยของแรงดันไฟฟ้าจากประมาณ 0.51 V เหลือ 0.50 V ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการเริ่มถดถอยของเซลล์เชื้อเพลิง ในขณะที่การทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่เหลืออยู่ในช่วง 210–270 s กำลังไฟฟ้า

ลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 0.0781 W เหลือ 0.0549 W และแรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือต่ำกว่า 0.45 V ก่อนที่เข้าสู่ช่วงปลายที่ช่วงเวลา 280–318 s ซึ่งค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว เหลือกำลังไฟฟ้าเพียง 0.0224 W และพลังงานสะสม 0.0789 J ที่เวลา 318 s ดังตารางที่ 3

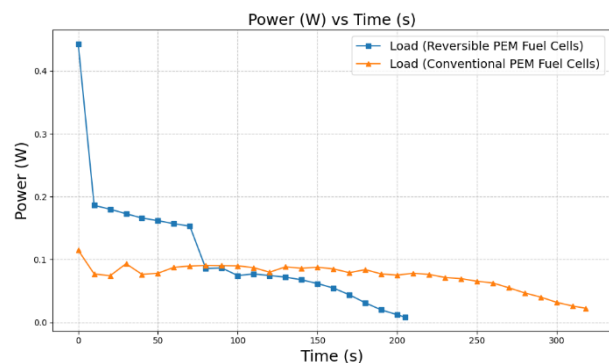
ทั้งนี้จากผลการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะในขณะที่ทดลองจ่ายโหลดของระบบเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้และแบบทั่วไป ที่สามารถสะท้อนถึงข้อจำกัดด้านพลังงานสะสมและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง PEM ของทั้งแบบย้อนกลับได้และแบบทั่วไป โดยเน้นวิเคราะห์ลักษณะของแรงดันและกระแสไฟฟ้า รวมทั้งกำลังไฟฟ้าและพลังงานทั้งขาเข้าและขาออกที่เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะการจ่ายพลังงานให้กับโหลด ดังรูปกราฟที่ 6 ถึงรูปที่ 9 ตามลำดับ รวมทั้งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งแบบย้อนกลับได้และแบบทั่วไป ดังตารางที่ 4



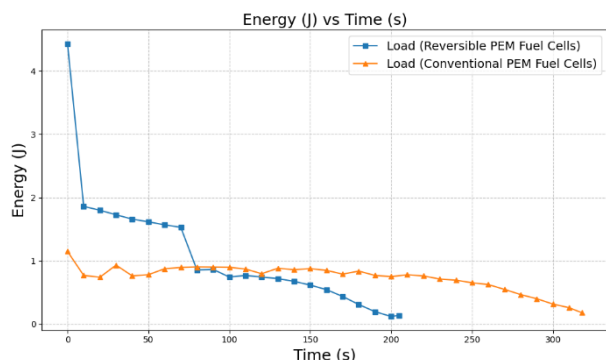
รูปที่ 6 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลาขาเข้าและขาออก



รูปที่ 7 ลักษณะกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาขาเข้าและขาออก



รูปที่ 8 ลักษณะกำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลาขาเข้าและขาออก



รูปที่ 9 ลักษณะพลังงานเทียบกับเวลาขาเข้าและขาออก

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง PEM

PEM	พลังงาน ขาเข้า (J)	พลังงาน ขาออก (J)	ประสิทธิภาพ (%)
แบบย้อนกลับได้	341.58	23.84	6.98 %
แบบทั่วไป	341.58	24.30	7.11 %

จากตารางที่ 4 พบว่าเซลล์เชื้อเพลิง PEM ของทั้งแบบย้อนกลับได้และแบบทั่วไป มีพลังงานขาเข้าเฉลี่ยเท่ากันที่ 341.58 J ในส่วนของพลังงานขาออกมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งสะท้อนไปถึงประสิทธิภาพการทำงาน โดยพบว่าเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับ มีประสิทธิภาพ 6.98 % และแบบทั่วไป 7.11 % จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบทั่วไปมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบย้อนกลับได้

นอกจากนี้ในผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิง PEM ทั้งสองแบบพบว่ายังมีประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบต่ำมี 3 ปัจจัยหลัก ๆ โดยปัจจัยแรกเกิดจากความสูญเสียโอห์มมิก (Ohmic Loss) ของความต้านทานภายในเมมเบรนและอิเล็กโทรด ปัจจัยที่สองเกิดจากความสูญเสียจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ไม่สมบูรณ์ (Activation Loss) และปัจจัยที่สามเกิดจากความสูญเสียจากการแพร่ก๊าซและการจัดการน้ำ (Mass Transport Loss) ดังนั้นแนวทางการพัฒนาต่อยอด คือ การปรับปรุงเมมเบรนและตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึงออกแบบระบบจัดการน้ำและความร้อนให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มสมรรถนะในอนาคต

4. สรุป

การเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบย้อนกลับได้และแบบทั่วไป โดยวิเคราะห์จากลักษณะแรงดันและกระแสไฟฟ้า รวมทั้งกำลังไฟฟ้าและพลังงาน ซึ่งในการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสเพื่อกักเก็บไฮโดรเจนในเซลล์แบบย้อนกลับได้ และการทดสอบการจ่ายพลังงานของทั้งสองแบบในช่วงเวลาในการทดลองต่าง ๆ จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขพลังงานขาเข้าเท่ากันที่ 341.58 J ค่าพลังงานขาออกมีความใกล้เคียงกัน โดยแบบย้อนกลับได้ให้พลังงานขาออก 23.84 J และแบบทั่วไปให้ 24.30 J และมีประสิทธิภาพของทั้งสองแบบใกล้เคียงกัน โดยแบบย้อนกลับได้ 6.98 % และแบบทั่วไป 7.11 % การทดลองดำเนินการภายใต้อุณหภูมิ 24.5 °C ความชื้น 52.3 % จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิง PEM แบบทั่วไปมีสมรรถนะแปลงพลังงานได้ดีกว่าแบบย้อนกลับได้ นอกจากนี้ผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิง PEM ทั้งสองแบบ พบว่าประสิทธิภาพยังต่ำเนื่องจากการสูญเสียโอห์มมิก การสูญเสียจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ไม่สมบูรณ์ และการสูญเสียด้านการแพร่ก๊าซและการจัดการน้ำ โดยแนวทางการพัฒนาที่สำคัญ คือ

การปรับปรุงคุณสมบัติเมมเบรนและตัวเร่งปฏิกิริยา การควบคุมในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ และออกแบบระบบจัดการน้ำและความร้อนให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มสมรรถนะ รวมทั้งข้อจำกัดในการออกแบบและพัฒนาระบบที่ใช้ทดลองสำหรับการเลือกใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งการออกแบบระบบที่เหมาะสมยังช่วยให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการเลือกวัสดุและออกแบบระบบที่มีขนาดที่จัดการจ่ายโหลดเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สอดคล้องกับบริบทการใช้งานตามสถานการณ์จริงในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะที่มิวิจัยขอแสดงความขอบคุณอย่างยิ่งต่อคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยทักษิณ ที่เอื้ออำนวยความสะดวกทั้งด้านสถานที่และอุปกรณ์สำหรับการจัดเก็บและดำเนินการทดลองในครั้งนี้เป็นอย่างดียิ่ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุธาสินี ผากา, “พลังงานทดแทนในสถานการณ์ภาวะโลกร้อน,” วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, vol. 11, no. 2, pp. 49–57, 2017.
- [2] เทพ เทพวัฒน์ปิยกุล, “พลังงานทดแทน ทางเลือกใหม่ของประเทศ,” *วารสารสหวิทยาการนวัตกรรมปริทรรศน์*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 1, หน้า 299–309, 2567.
- [3] R. Shawe, “Reversible Fuel Cells: A Comprehensive Analysis of Bidirectional Operation,” SCIRP Journal, 2025.
- [4] Z. Abidin, M. Al-Ansari, T. A. E. Khalifa, and M. A. Rosen, “Shaping the stationary energy storage landscape with reversible fuel cells,” Journal of Energy Storage, vol. 7.2, 2024.
- [5] T. Ma, H. Wang, J. Liu, and Y. Wang, “Recovery characteristics of reversible degradation for proton exchange membrane fuel cells under dynamic load,” Journal of Power Sources, vol. 597, 2024.
- [6] S. Bhogilla, M. Karthikeyan, and B. Ravindran, “Cogeneration system combining reversible PEM fuel cell and cooling with VARS,” International Journal of Hydrogen Energy, vol. 49, no. 4, pp. 1590–1601, 2024.
- [7] L. Kumar, R. Agarwal, and A. D. Dani, “Segmented Model-Based Hydrogen Delivery Control for PEM Fuel Cells: a Port-Hamiltonian Approach,” arXiv preprint, Apr. 2024.
- [8] M. Diabate, L. D. Koua, and M. Benbouzid, “Hydrogen and battery based energy storage system for future DC microgrids,” arXiv preprint, Jun. 2024.
- [9] S. S. Kumar and V. Himabindu, “Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review,” Materials Science for Energy Technologies, vol. 2, no. 3, pp. 442–454, 2019.
- [10] K. Jiao, B. Wang, Q. Du, Y. Wang, G. Zhang, Z. Yang, H. Deng, and X. Xie, “Chapter 3 - Experimental characterization and diagnostics,” in Water and Thermal Management of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, pp. 67–120, 2021.
- [11] Z. Abidin, “Shaping the stationary energy storage landscape with reversible fuel cells,” Journal of Energy Storage, vol. 86, p. 111354, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.111354.