

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงจากเซลล์เชื้อเพลิง

1. ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ตฤณ แสงสุวรรณ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงแบบใหม่เพื่อใช้ทำหน้าที่แทนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจริงในขั้นตอนการออกแบบและทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง ภาคกำลังของวงจรที่นำเสนอประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงและวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง ด้วยการทำงานร่วมกันของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้งสองและเทคนิคการควบคุมที่เหมาะสม วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถเลียนแบบผลตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงได้ทุกชนิด อีกทั้งมีแรงดันและกระแสขาออกที่มีคุณภาพสูง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การจำลองพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้ในประเทศไทยสองชนิด นั่นคือ ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและแบบออกไซด์ของแข็ง

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอ วิธีการวิเคราะห์ วิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีการควบคุมสำหรับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและสำหรับระบบการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ระบบต้นแบบสำหรับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและระบบการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกจัดสร้างขึ้นเพื่อยืนยันสมรรถนะของภาคกำลังและประสิทธิภาพของภาคควบคุมตามที่นำเสนอ ผลการทดลองที่สำคัญชี้ให้เห็นว่าการทำงานโดยรวมของวงจรที่นำเสนออยู่ในเกณฑ์ที่ดีและสอดคล้องกับวิธีการที่นำเสนอ

Abstract

This research proposes a new fuel cell emulator used to replace a real fuel cell system during the development stage of a fuel-cell inverter system. The power stage of this new fuel cell emulator consists of a current source converter (buck rectifier) and a dc-to-dc buck converter. With the collaboration of these two power electronics circuits and the anticipated control technique, the proposed fuel cell emulator effectively provides both correctly emulated responses for various types of fuel cells and the high-quality output voltage and current. This research mainly focuses on emulating the behavior of two well-known types of fuel cell systems suitable to be applied in Thailand, i.e. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) and Solid Oxide Fuel Cells (SOFC).

This report presents analysis, modeling and control strategy for the proposed systems. To verify their performance, hardware prototypes of the emulator, as well as the inverter system, have been implemented. The experiment results showed that the performance of the proposed fuel cell emulation is exceptional and is consistent with the proposed concept.

สรุปสำหรับผู้บริหาร

Executive Summary

แหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนที่ดีควรส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด สามารถควบคุมได้ และใช้วัตถุดิบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หนึ่งในแหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ เซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงถือได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีความเป็นไปได้สูงที่จะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ปัจจุบันได้ อย่างไรก็ตามตัวเซลล์เชื้อเพลิงเองไม่สามารถที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ กล่าวคือพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งยากต่อการจัดการ ยกตัวอย่างเช่น การแปลงระดับแรงดันไฟตรงให้สูงขึ้นหรือต่ำลงนั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ อีกทั้งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับบ้านพักอาศัย กิจกรรมทางการเกษตร และโรงงานอุตสาหกรรม จะอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพ จะเป็นตัวการสำคัญในการเพิ่มมูลค่าให้กับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงในประเทศไทยนั้นยังถือว่าน้อยมาก ทำให้ต้องมีการนำเข้าตัวเซลล์เชื้อเพลิงจากต่างประเทศซึ่งมีราคาที่สูงรวมทั้งค่าซ่อมบำรุงที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากอายุของอุปกรณ์ต่างๆที่สั้น ทำให้การศึกษาพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงในเมืองไทยทำได้ยาก

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทำให้การวิจัยและพัฒนาระบบที่สามารถเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง รวมถึงระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพเป็นที่สนใจอย่างมาก ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวงจรอิเล็กทรอนิกส์แนวใหม่ที่ออกแบบเพื่อให้สามารถเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงได้หลายชนิด รวมถึงนำเสนอวิธีการควบคุมที่มีเสถียรภาพ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะจัดการในเรื่องของการแปลงผันรูปแบบของพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้และเพิ่มคุณภาพของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้ดีขึ้น รวมไปถึงการจัดการเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้ในขบวนการให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงโดยรวม

สำหรับภาคกำลังของวงจรที่นำเสนอนี้ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงและวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง ด้วยการทำงานร่วมกันของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้งสองและเทคนิคการควบคุมที่เหมาะสม วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถเลียนแบบผลตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงได้ทุกชนิด อีกทั้งมีแรงดันและกระแสขาออกที่มีคุณภาพสูง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การจำลองพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงสอง

ชนิดที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ประเทศไทย ดังนั้นคือ ชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและแบบออกไซด์ของแข็ง วิธีการวิเคราะห์ วิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีการควบคุมสำหรับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและสำหรับระบบการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกนำเสนอในรายงานฉบับนี้ ระบบต้นแบบสำหรับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและระบบการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกจัดสร้างขึ้นเพื่อยืนยันสมรรถนะของภาคกำลังและประสิทธิภาพของภาคควบคุมตามที่นำเสนอ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการทำงานโดยรวมของวงจรที่นำเสนอเป็นไปตามความคาดหวัง

ผลงานของโครงการวิจัยนี้คือ ระบบต้นแบบของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง วิธีการควบคุมแบบใหม่ และระบบต้นแบบสำหรับการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการทำงานร่วมกับตัวประจุความจุสูง ซึ่งผลงานทั้งหมดนี้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการวิจัยพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบต่อไป

สารบัญ

1	บทนำ.....	1
1.1	ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์.....	2
1.3	สรุปย่อ (Summary).....	2
2	เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells) และวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Emulator)	4
2.1	เซลล์เชื้อเพลิง	4
2.1.1	ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	8
2.1.2	เซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย.....	41
2.2	คุณลักษณะของพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง.....	43
2.3	วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Emulator)	46
2.3.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง	47
2.3.2	วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ	61
2.3.3	ระบบต้นแบบของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ	75
3	กระบวนการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel-Cell Electrical Energy Conversion).....	84
3.1	ภาคกำลัง (Power Stage)	84
3.1.1	ระบบการแปลงและควบคุมไฟตรง (DC-DC Converter)	84
3.1.2	เปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย	96
3.1.3	ระบบการแปลงไฟกระแสตรงเป็นไฟกระแสสลับ (DC-AC Inverter)	101
3.1.4	เปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย	109
3.1.5	ระบบการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage).....	110
3.1.6	อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage Device)	110
3.2	วงจรจัดการพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ.....	126
3.3	ระบบต้นแบบ	127
3.3.1	การออกแบบระบบการแปลงพลังงาน	127
4	ระบบต้นแบบและผลการทดลอง	142
4.1	ระบบต้นแบบ	142
4.2	วิธีการทดลองและผลการทดลอง	143
4.2.1	กรณีที่ 1	143
4.2.2	กรณีที่ 2	146
4.2.3	สรุปผลการทดลอง	147
5	ทฤษฎีและข้อมูลเทคนิคที่เกี่ยวข้อง	148

6	บทสรุป	161
	บรรณานุกรม.....	162
	ผลงานที่ได้จากโครงการ.....	164

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 แสดงลักษณะและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจากการทดลองของเซอร์ วิลเลียม โรเบิร์ต โกรฟ (ก) เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (ข) มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น (ที่มา http://www.tfic.kmitnb.ac.th)	5
รูปที่ 2 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง	5
รูปที่ 3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในเซลล์เชื้อเพลิง	6
รูปที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกันเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (ก) การต่ออนุกรมเซลล์เชื้อเพลิง (ที่มา www.sgcarbon.com/sgl_t) (ข) ชุดของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่มา www.generalhydrogen.com)	7
รูปที่ 5 แสดงลักษณะของแผ่นอิเล็กโทรด (ที่มา www.sgcarbon.com/sgl_t)	8
รูปที่ 6 ข้อดีและความแตกต่างการประยุกต์ใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด	11
รูปที่ 7 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ขนาด 1.5 kW ที่ใช้น้ำมันอากาศยานพอลโล (ที่มา www.corrosion-doctors.org)	12
รูปที่ 8 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ขนาด 12 kW ที่ใช้น้ำมันอากาศยานโดยมีน้ำหนัก 120kg มีเซลล์ ภายใน 32 เซลล์แต่ละเซลล์ให้แรงดันไฟฟ้า 0.875 โวลต์ (ที่มา www.fuelcelltoday.com)	13
รูปที่ 9 การเกิดปฏิกิริยาเคมีเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์	13
รูปที่ 10 โครงสร้างภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ (ที่มา www.fctec.com)	14
รูปที่ 11 แสดงระบบโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Mobile Electrolyte	15
รูปที่ 12 ระบบโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Static Electrolyte Alkaline Fuel Cell	16
รูปที่ 13 แสดงโครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Dissolved Fuel Alkaline Fuel Cell	17
รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิด DMFC กับ PEMFC	18
รูปที่ 15 โครงสร้างและระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด DMFC	19
รูปที่ 16 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรงกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ (ก) เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ (ที่มา www.dcvviews.com/press/images/Toshiba-Methanol-Fuel-Cell.jpg) (ข) เครื่องเล่น MP3 (ที่มา www.anythingbutipod.com/archives/images/toshiba-methanol%20.jpg) (ค) เครื่อง PDA (ที่มา www.batteriesdigest.com/4cf40400.png) (ง) เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา (ที่มา www.capital.lv/pics/news/toshiba-f1.jpg)	20
รูปที่ 17 โครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC (ที่มา www.fctec.com)	21
รูปที่ 18 ลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC (ก) เซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ (ข) เซลล์ เชื้อเพลิงในลักษณะ Stack (ค) ลักษณะทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง (ที่มา www.eere.energy.gov)	22
รูปที่ 19 การประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า (ก) เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 กิโลวัตต์ โดยบริษัท ONSI ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็น UTC (ที่มา members.aol.com/fuelcells/10.htm) (ข) เซลล์เชื้อเพลิง Toshiba-UTC PC25 (ที่มา www.fuelcell.no)	23
รูปที่ 20 การเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด MCFC	24
รูปที่ 21 แสดงโครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด MCFC (ที่มา www.teenet.tei.or.th)	25
รูปที่ 22 MTU "Hot Module" (ที่มา www.innovation-brennstoffzelle.de/bzelle/haupt7.html)	25
รูปที่ 23 โรงไฟฟ้าขนาด 2 เมกกะวัตต์ที่แคลิฟอร์เนีย (ที่มา www.moea.state.mn.us.htm)	26
รูปที่ 24 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนและออกซิเจนของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด (ก) แสดงการเกิดปฏิกิริยาภายใน เซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC ใช้เชื้อเพลิงที่เป็นไฮโดรเจน (ข) แสดงการเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์ เชื้อเพลิงชนิด SOFC ใช้เชื้อเพลิงที่เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์	27

รูปที่ 25 โครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC (ที่มา www.teenet.tei.or.th).....	28
รูปที่ 26 ลักษณะโครงสร้างภายในของ Tubular SOFC (ที่มา www.powergeneration.siemens.com/en/fuelcells/technology/tubular/index.cfm)	29
รูปที่ 27 เซลล์เชื้อเพลิง Stack โดยมี 24 ท่อ มีรัศมี 2.0 เซนติเมตรและมีความยาวประมาณ 150 เซนติเมตร (ที่มา www.powergeneration.siemens.com/en/fuelcells/technology/modular/index.cfm)	29
รูปที่ 28 ระบบการไหลเวียนเชื้อเพลิงภายใน.....	30
รูปที่ 29 เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าขนาด 100 กิโลวัตต์ที่ เนเธอร์แลนด์ (ที่มา http://evworld.com/view.cfm)	30
รูปที่ 30 ลักษณะเซลล์เชื้อเพลิง SOFC แบบ Planer (ที่มา www.aki.che.tohoku.ac.jp/~koyama/html/research/SOFC.html)	31
รูปที่ 31 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC แบบหมุนเวียน ขนาด 300 กิโลวัตต์ทำงานที่ความดัน 10 bar (ที่มา www.ept.ntnu.no/te/pix/SOFC.jpg)	32
รูปที่ 32 แผนผังการทำงานระบบหมุนเวียน.....	32
รูปที่ 33 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ Tubular Solid Oxide โดย Siemens Westinghouse (ที่มา www.moea.state.mn.us.htm)	33
รูปที่ 34 การเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM.....	34
รูปที่ 35 โครงสร้างภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (ที่มา www.fctec.com).....	34
รูปที่ 36 ลักษณะชั้นคาร์บอน (ที่มา http://www.tfic.kmitnb.ac.th)	35
รูปที่ 37 ลักษณะ MEA (Membrane Electrode Assembly) (ที่มา http://www.tfic.kmitnb.ac.th).....	36
รูปที่ 38 ลักษณะแผ่น Bipolar Plate (ที่มา http://www.tfic.kmitnb.ac.th)	37
รูปที่ 39 ลักษณะล่องแบบต่างๆของแผ่นเพลตที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (ก) Parallel (ข) Serpentine (ค) Parallel serpentine (ง) Grid (จ) Long parallel.....	37
รูปที่ 40 ส่วนประกอบของ Fuel cell stack (ที่มา www.sglcarbon.com/sgl_t).....	38
รูปที่ 41 ระบบแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง	39
รูปที่ 42 ระบบแรงดันแบบรีฟอร์มเมอร์	40
รูปที่ 43 ลักษณะของแรงดันที่มีผลต่อพลังงานไฟฟ้า	40
รูปที่ 44 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (ก) เครื่องต้นแบบขนาด 5 กิโลวัตต์ที่ผลิตโดย UTC Fuel Cell ของอเมริกา (ข) เครื่องยนต์ขับเคลื่อนสำหรับรถบัสกำลังขับ มอเตอร์ 205 กิโลวัตต์ (ค) การประยุกต์ใช้งานในรถบัสและรถยนต์ (ที่มา www.fuelcelltoday.com)	42
รูปที่ 45 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงทั่วไป	43
รูปที่ 46 Tafel plots ความแตกต่างปฏิกิริยาเคมีช้าและเร็ว	44
รูปที่ 47 ระบบรวมของแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง	48
รูปที่ 48 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง	48
รูปที่ 49 แผนผังการทำงานของวงจรจำลองการทำงานเซลล์เชื้อเพลิง	49
รูปที่ 50 วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	50
รูปที่ 51 ผลที่ได้จากวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (ก) ผลที่ได้จากการจำลองบนคอมพิวเตอร์ (ข) ผลที่ได้จากการทดลองจริง.....	51
รูปที่ 52 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน 1 เซลล์	51

รูปที่ 91 โครงร่างของวงจรจัดการพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	127
รูปที่ 92 วงจรรวมของระบบแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง	128
รูปที่ 93 ตัวเก็บประจุความจุสูงขนาดความจุ 400 ฟาห์ตแรงดัน 2.7 โวลต์	130
รูปที่ 94 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจากแกน ETD44949	134
รูปที่ 95 (ก) วงจรตรวจจับสนะแสง (ข) วงจรตรวจจับสนะแสงไฟฟ้า และ (ค) แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรตรวจจับสนะแสงและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	137
รูปที่ 96 (ก) วงจรตรวจจับสนะแสงและ (ข) แผ่นวงจรพิมพ์วงจรตรวจจับสนะแสงไฟฟ้ากระแสตรง (Dc-link)	138
รูปที่ 97 (ก) วงจรตรวจจับสนะแสงอุณหภูมิแผ่นระบายความร้อน (ข) สวิตช์ความร้อน 90 องศาและ (ค) แผ่นวงจรพิมพ์วงจรตรวจจับสนะแสงความร้อน	139
รูปที่ 98 ระบบการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อประกอบลงกล่องแล้ว	140
รูปที่ 99 (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลังของระบบแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง	141
รูปที่ 100 ระบบต้นแบบของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและระบบต้นแบบของการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง	142
รูปที่ 101 ระบบที่ใช้ในการทดลองกรณี 1	143
รูปที่ 102 ผลการทดลอง แรงดันขาออกของวงจรที่ค่ากระแสโหลดต่างกัน กรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: Mode: XY, $V_{FC}(t)$: 10V/DIV, $i_{Load}(t)$: 5A/DIV)	144
รูปที่ 103 ผลการทดลอง แรงดันขาออกของวงจรที่ค่ากระแสโหลดต่างกัน กรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์ (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: Mode: XY, $V_{FC}(t)$: 10V/DIV, $i_{Load}(t)$: 5A/DIV)	144
รูปที่ 104 ผลการทดลอง แรงดันขาออกของวงจรที่ค่ากระแสโหลดต่างกัน กรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: Mode: XY, $V_{FC}(t)$: 10V/DIV, $i_{Load}(t)$: 5A/DIV)	145
รูปที่ 105 ผลการทดลอง แรงดันขาออกของวงจรที่ค่ากระแสโหลดต่างกัน กรณีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: Mode: XY, $V_{FC}(t)$: 10V/DIV, $i_{Load}(t)$: 5A/DIV)	145
รูปที่ 106 ผลการทดลองการตอบสนองของแรงดันขาออกของวงจรต้นแบบเมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 A ไปที่ 45 A และในทางกลับกัน โดยมีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากับ 100% (การตั้งค่าออสซิลโลสโคป: $V_{FC}(t)$: 10V/DIV, $i_{Load}(t)$: 10A/DIV, t: 5ms/DIV)	146

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ความแตกต่างของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด (ที่มา www.rmi.org)	9
ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานระหว่างเมทิลแอลกอฮอล์กับไฮโดรเจน	18
ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของสวิตช์กับกระแสและแรงดัน	66
ตารางที่ 4 คุณสมบัติของมอสเฟตสำหรับแรงดันอินพุต 12 โวลต์จากบริษัท IR	98
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรทั้งสามแบบ	100
ตารางที่ 6 ตารางเทียบขนาดเป็นเท่าระหว่างแบบพุกพุกกับทั้งสองแบบ	101
ตารางที่ 7 คุณสมบัติของไอจีบีทีเบอร์ STGP3NB60	105
ตารางที่ 8 ตารางคุณสมบัติของไอจีบีทีเบอร์ STGP7NB60	108
ตารางที่ 9 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรแบบครึ่งคลื่นและเต็มคลื่น	109
ตารางที่ 10 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวเก็บประจุความจุสูงที่ติดตั้งอยู่ระหว่างด้านแรงดันต่ำและ ด้านแรงดันสูง	117
ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแบตเตอรี่กับเปอร์เซ็นต์การประจุ	120
ตารางที่ 12 ราคาโดยประมาณของแบตเตอรี่ชนิดแห้งสำหรับเครื่องสำรองไฟ (UPS) ยี่ห้อลิอ็อซ	120
ตารางที่ 13 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการติดตั้งแบตเตอรี่ที่ด้านแรงดันต่ำและด้านแรงดันสูง สำหรับระบบแปลงพลังงานขนาด 1.5 กิโลวัตต์	122
ตารางที่ 14 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุความจุสูง	125

1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อาจกล่าวได้ว่าชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์คงจะสะดวกสบายไปไม่ได้ หากขาดแคลนพลังงานไฟฟ้า นอกจากนั้นแล้วพลังงานไฟฟ้ายังเป็นกลไกส่วนสำคัญในการผลักดันให้เกิดการพัฒนาทางด้านการเกษตรและทางอุตสาหกรรม ประสิทธิภาพของการดำเนินงานที่ดีขึ้น เป็นผลทำให้การพัฒนาในทุกๆด้านเป็นไปอย่างยั่งยืน สอดคล้องมาทำให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้น โดยส่วนใหญ่การได้มาของพลังงานไฟฟ้าเป็นการเผาผลาญน้ำมันเชื้อเพลิงหรือถ่านหินให้เกิดความร้อนเพื่อใช้ต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำความดันสูง มีพลังงานสูงพอที่จะหมุนกังหันที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ เป็นที่ทราบกันดีว่าการเผาผลาญน้ำมันเชื้อเพลิงหรือถ่านหินนั้นก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งทางตรงและทางอ้อม อีกทั้งปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงและถ่านหินที่มีตามธรรมชาติก็นับวันจะน้อยลงทุกที ทำให้มีเชื้อเพลิงดังกล่าวมีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลให้การแสวงหาแหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนทวีความสำคัญมากขึ้นทุกขณะ

แหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนที่ดีควรจะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ควบคุมได้ ใช้วัตถุดิบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หนึ่งในแหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells) เซลล์เชื้อเพลิงถือได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีความเป็นไปได้สูงที่จะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ใช้อยู่ปัจจุบันได้ตั้งแต่กำลังการผลิตระดับต่ำไปจนถึงระดับสูง นอกจากนั้นเซลล์เชื้อเพลิงยังสามารถที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ กล่าวคือพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งยากต่อการจัดการเช่น การแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าตรงให้สูงขึ้นหรือต่ำลงนั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กันในบ้านพักอาศัย กิจกรรมทางการเกษตร และโรงงานอุตสาหกรรม จึงอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพ จะเป็นตัวการสำคัญในการเพิ่มมูลค่าให้กับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง

อย่างไรก็ตามการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงในประเทศไทยนั้นถือว่ายังน้อยมาก ทำให้ยังต้องมีการนำเข้าตัวเซลล์เชื้อเพลิงจากต่างประเทศซึ่งมีราคาที่สูงกว่า รวมทั้งค่าซ่อมบำรุงที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากอายุของอุปกรณ์ต่างๆที่สั้น ทำให้การศึกษาพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงในเมืองไทยทำได้ยาก

ด้วยเหตุผลหลายประการดังกล่าวข้างต้น ทำให้การวิจัยและพัฒนาระบบที่สามารถเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง รวมถึงระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพเป็นที่สนใจอย่างมาก ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบเพื่อให้สามารถเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงได้หลายชนิด รวมถึงนำเสนอวิธีการควบคุมที่มีเสถียรภาพ นอกจากนี้โครงการวิจัยนี้ยังได้นำเสนอระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะจัดการในเรื่องของการแปลงผันรูปแบบของพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้และเพิ่มคุณภาพของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังรวมไปถึงการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้ในขบวนการให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงโดยรวม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง
- 2) ศึกษาและออกแบบวงจรเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง
- 3) ศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจของพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง
- 4) ศึกษาแนวทางการนำเอาพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงมาเป็นแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อประโยชน์ในกิจการภายในประเทศ
- 5) จัดสร้างระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบเพื่อรองรับการวิจัยแบบบูรณาการร่วมกับโครงการวิจัยและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบภายในประเทศ

1.3 สรุปย่อ (Summary)

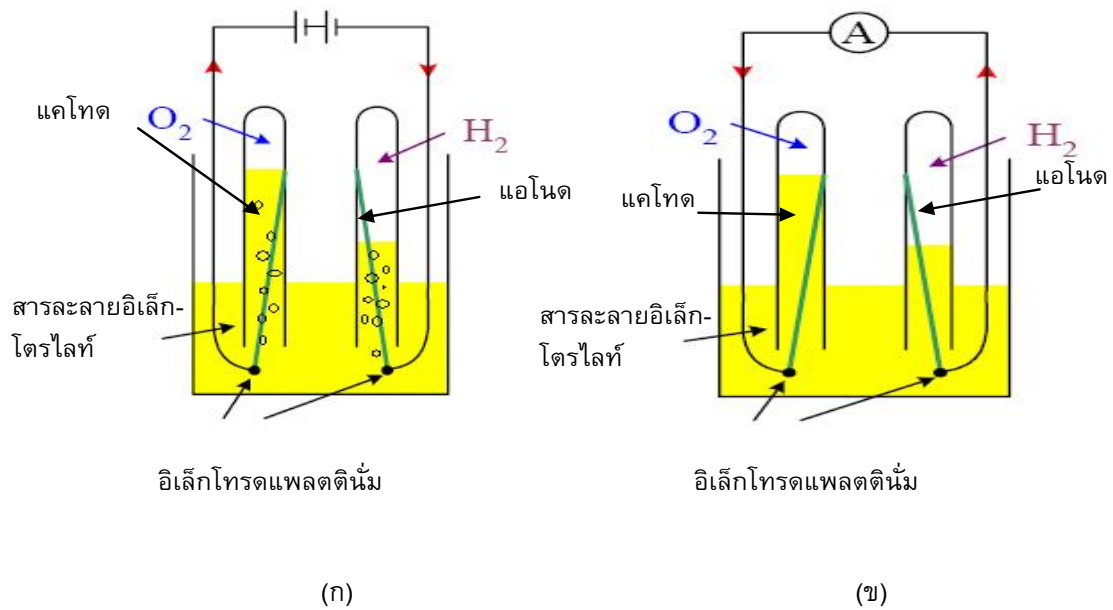
โครงการวิจัยนี้เพื่อการศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงและปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจของพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ศึกษาและออกแบบวงจรเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง รวมถึงการหาแนวทางการนำเอาพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงมาเป็นแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อประโยชน์ในกิจการภายในประเทศ จัดสร้างระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบเพื่อรองรับการวิจัยแบบบูรณาการร่วมกับโครงการวิจัยและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบภายในประเทศ

การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากศึกษาถึงโครงสร้างและคุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีใช้ใน ปัจจุบัน ซึ่งมีด้วยกันทั้งสิ้น 6 ชนิดหลักๆ คือ ชนิดแอลคาไลน์ ชนิดป้อนสารเมทานอลโดยตรง ชนิดกรดฟอสฟอริก ชนิดเกลือคาร์บอนेटหลอม ชนิดออกไซด์ของแข็ง และชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งจากผลการศึกษาทำให้ทราบว่าสองชนิดหลังนั้นมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดย่อมและบ้านพักอาศัยในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี เนื่องจากในปัจจุบันตัวเซลล์เชื้อเพลิงยังคงมีราคาแพง ดังนั้นการจำลองพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ จึงได้มีการเปลี่ยนแผนงานวิจัยโดยเพิ่มการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งยังมีจำนวนไม่มากนัก จากการศึกษาจากงานวิจัยที่ได้ดำเนินการในต่างประเทศ ทั้งสิ้น 3 ผลงาน ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่แก้ไขข้อเสียจากงานวิจัยทั้งสาม โดยมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีขึ้นเนื่องจากใช้รอบทำงานที่มีค่าสูงขึ้น มีความยืดหยุ่นของจุดทำงานที่ดีขึ้น นั่นคือใช้ได้กับเซลล์เชื้อเพลิงทุกชนิด และมีไม่มีความซับซ้อนในการสร้างวงจรขึ้นใช้งานจริง วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลักๆ ดังนี้คือ ส่วนภาคกำลัง และส่วนควบคุม สำหรับภาคกำลังนั้นแบ่งออกเป็นสองวงจรย่อยคือ วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง (Buck Rectifier) และวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง (Buck Converter) วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงจะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันกระแสสลับสามเฟสให้เป็นแรงดันกระแสตรงที่ปรับค่าได้ เหตุผลที่ใช้อินพุตเป็นแรงดันสามเฟสนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายพลังงานที่สูงขึ้นและเพื่อลดแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage) วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงนำมาใช้ในการเลียนแบบพฤติกรรมของแรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณและความดันเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) ที่เซลล์เชื้อเพลิงได้รับ ในส่วนของวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลงนั้น นำมาใช้ในการเลียนแบบพฤติกรรมของแรงดันเอาต์พุตที่เป็นไปตามลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน (V-I Characteristic) ส่วนสุดท้ายคือวงจรควบคุม ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการทำงานของภาคกำลังทั้งสองวงจร โดยการส่งสัญญาณสวิตซ์ที่เหมาะสมไปยังอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังของวงจรทั้งสองเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเป็นไปตามต้องการและคงที่ด้วยการป้อนแรงดันและกระแสเอาต์พุตกลับมายังวงจรควบคุม เนื่องจากในวงจรควบคุมระบบเซลล์เชื้อเพลิงจริงนั้นจะมีการรับคำสั่งจากภายนอกในการเพิ่มลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมา ดังนั้นวงจรควบคุมของวงจรเลียนแบบจึงมีส่วนการรับสัญญาณคำสั่งดังกล่าว ตัวอย่างเช่น อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจน อุณหภูมิการทำงาน เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงและวงจรควบคุม อาศัยผลการพิจารณาการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรที่เกี่ยวข้องต่างๆ ในการออกแบบภาคกำลังของระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงไฟกระแสตรงให้สูงขึ้น วงจรการแปลงแรงดันสูงกระแสตรงให้เป็นแรงดันสูงกระแสสลับ และส่วนสำรองพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ตัวประจุความจุสูง

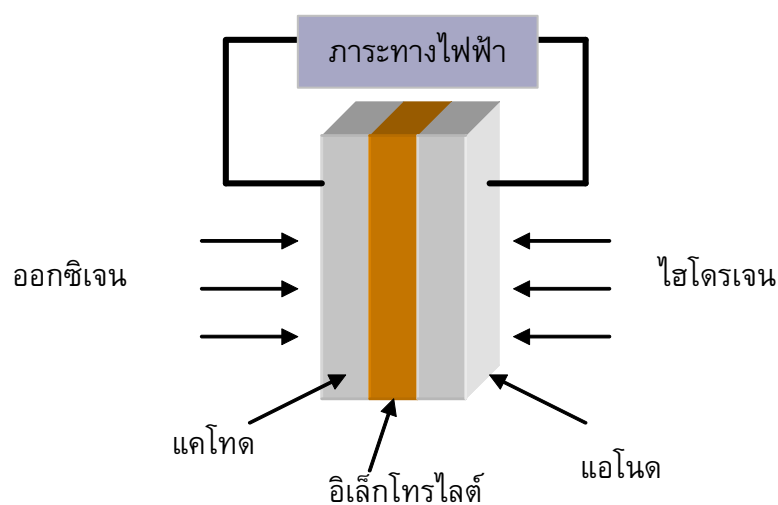
2 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells) และวงจรเลียนแบบพฤติกรรม เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Emulator)

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจนทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า เซลล์เชื้อเพลิงถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 โดยเซอร์วิลเลียม โรเบิร์ต โกรฟ (Sir William Robert Grove) นักวิทยาศาสตร์และทนายความชาวอังกฤษ หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นคล้ายกับแบตเตอรี่แต่จะแตกต่างตรงที่ไม่มีการประจุไฟใหม่และสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ตลอดเวลาตราบเท่าที่ยังคงมีการจ่ายเชื้อเพลิงให้กับตัวเซลล์เชื้อเพลิง ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงที่เด่นชัดคือไม่มีกระบวนการเผาไหม้หรือสันดาปภายใน จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงนี้ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ อีกทั้งมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ 1 ถึง 3 เท่า เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดแบบขึ้นอยู่กับสารที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเช่น เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน-ออกซิเจน, ไฮโดรเจน-ไฮโดรคาร์บอน และโพรเพน-ออกซิเจน เป็นต้น โดยลักษณะและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองของเซอร์วิลเลียม โรเบิร์ต โกรฟนั้น จะนำเอาแท่งอิเล็กโทรดที่เคลือบด้วยแพลตตินัม (Platinum Electrodes) สองแท่งคือ แท่งแอโนดและแท่งแคโทด ใส่ในหลอดแก้วที่อัดด้วยแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และ ออกซิเจน (O_2) จุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Dilute Acid Electrolyte) ดังรูปที่ 1(ก) และ (ข) ซึ่งอธิบายการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและทางไฟฟ้าตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้นั้นยังได้กระแสไฟฟ้าออกมาจำนวนน้อยมากเนื่องจากว่ามีบริเวณพื้นที่หน้าสัมผัสน้อยระหว่างแก๊ส อิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดรวมไปถึงอิเล็กโทรไลต์ที่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้มีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยทำให้อิเล็กโทรดมีขนาดที่แบนเรียบและชั้นของอิเล็กโทรไลต์ที่มีความบาง ดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในปัจจุบัน



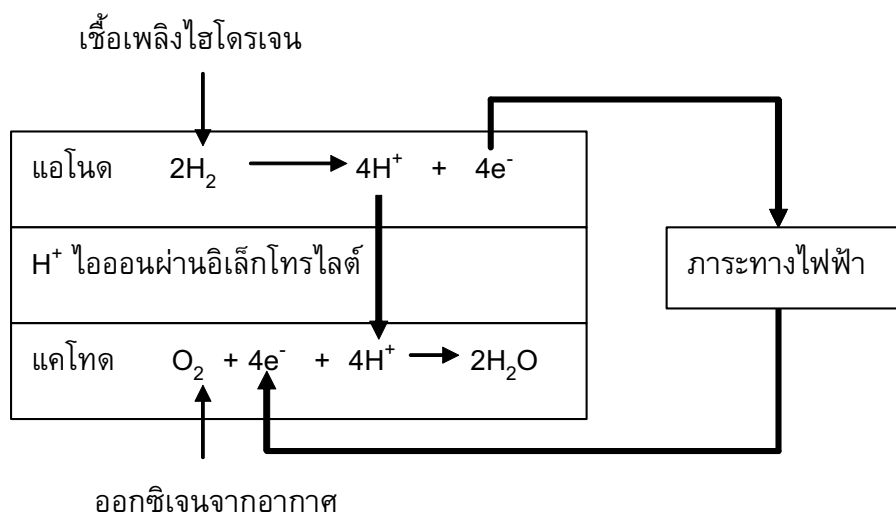
รูปที่ 1 แสดงลักษณะและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจากการทดลองของเซอร์ วิลเลียม โรเบิร์ต กรอฟ
(ก) เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (ข) มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น (ที่มา <http://www.tfic.kmitnb.ac.th>)



รูปที่ 2 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิง

การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าออกมานั้น เมื่อป้อนไฮโดรเจนเข้าที่ขั้วแอโนด ไฮโดรเจนจะสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งเคลือบอยู่ที่อิเล็กโตรดและแตกตัวเป็นโปรตอนไฮโดรเจน (H^+) และอิเล็กตรอน (e^-) ออกมา อิเล็กโตรไลต์จะมีคุณสมบัติพิเศษคือจะยอมให้โปรตอน (H^+) ผ่านไปได้แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงไหลผ่านวงจรด้านนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังโหลด ด้านขั้ว

แคโทดจะทำการป้อนออกซิเจน (O_2) ที่ปนอยู่ในอากาศ เมื่อโปรตอน (H^+) ผ่านอิเล็กโทรไลต์มายังแคโทดและอิเล็กตรอนที่ผ่านวงจรภายนอกมายังแคโทดจะสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดน้ำขึ้น ปฏิกิริยาทั้งหมดจะเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์ซึ่งสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 0.7 โวลต์ (ธนารัฐ สิงหา :2545) การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3



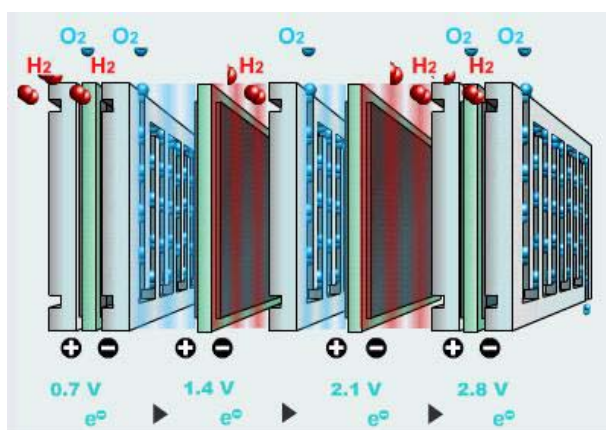
รูปที่ 3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในเซลล์เชื้อเพลิง

โดยปฏิกิริยาทางเคมีตัวอย่างดังรูปที่ 3 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดโปรตอนแลกเปลี่ยนเมมเบรนที่มีโครงสร้างเป็นที่นิยมนำมาใช้งานและมีหลักการทำงานที่เข้าใจง่าย สำหรับส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงและหน้าที่ของแต่ละส่วนประกอบนั้นมี 4 ส่วน คือ

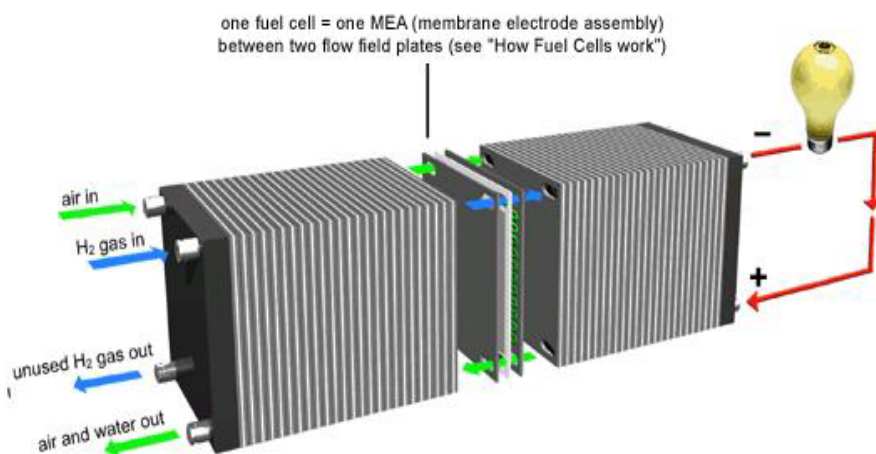
1. แอโนด (Anode) เป็นขั้วลบของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อิเล็กตรอนและโปรตอน (H^+) แยกตัวออกจากไฮโดรเจน อิเล็กตรอนที่ได้จะเคลื่อนที่ไปสู่วงจรภายนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจ่ายไปยังโหลดจากนั้นจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกหรือแคโทด
2. แคโทด (Cathode) เป็นขั้วบวกของเซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหมือนกับแอโนด เป็นส่วนที่จะมีการเกิดปฏิกิริยารวมกันของโปรตอน (H^+), อิเล็กตรอนของไฮโดรเจนและออกซิเจน (O_2) จากอากาศ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นน้ำและความร้อนขึ้น
3. อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Polymer Electrolyte Membrane หรือ Proton Exchange Membrane) จะคล้ายแผ่นพลาสติกใส มีคุณสมบัติคือยอมให้โปรตอน (H^+) ของไฮโดรเจนผ่านได้แต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่านได้

4. ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เป็นสารพิเศษที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาของออกซิเจนและไฮโดรเจน ซึ่งโดยทั่วไปทำมาจากแร่แพลตตินัม

กระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงมีความต่างศักย์ได้ประมาณ 0.7 โวลต์ซึ่งมีระดับต่ำกว่าที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ เพื่อให้ได้ระดับความต่างศักย์ตามที่ต้องการ จึงต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงมาเรียงต่อกันและเรียกว่าเป็นชุดของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel-cell Stack) ซึ่งมีลักษณะการต่อกันของเซลล์ย่อยเป็นแบบอนุกรม โดยที่ขั้วแอโนดจะเชื่อมต่อไปยังขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงตัวถัดไปแสดงดังรูปที่ 4(ก) และ 4(ข)



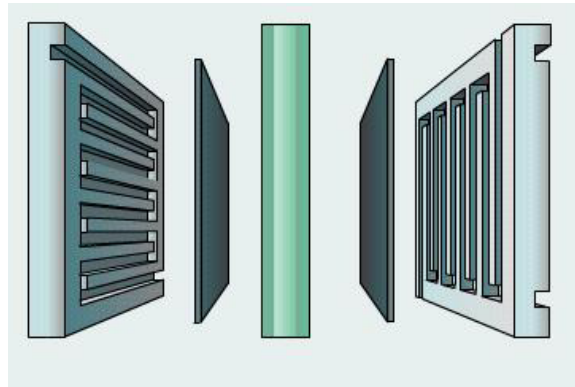
(ก)



(ข)

รูปที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อกันเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (ก) การต่ออนุกรมเซลล์เชื้อเพลิง (ที่มา www.sglcarbon.com/sgl_t) (ข) ชุดของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่มา www.generalhydrogen.com)

รูปที่ 5 แสดงลักษณะของตัวแผ่นอิเล็กโทรดนั้นจะทำให้บริเวณหน้าสัมผัสกับแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นร่อง เพื่อให้เชื้อเพลิงที่จ่ายเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถไหลผ่านไปยังอิเล็กโทรดได้อย่างทั่วถึงและให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5 แสดงลักษณะของแผ่นอิเล็กโทรด (ที่มา www.sgcarbon.com/sgl_t)

2.1.1 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดและสามารถแบ่งออกตามปัจจัยต่างๆ ที่นำมาพิจารณาเช่น แบ่งตามประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้ อุณหภูมิในขบวนการเคมีไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น โดยเซลล์เชื้อเพลิงทุกชนิดจะให้พลังงานไฟฟ้าในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) ในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการวิจัยอย่างต่อเนื่องและนำมาใช้งานได้จริงนั้น แบ่งออกได้เป็น 6 ชนิดใหญ่ๆ ได้ดังนี้คือ

- 6) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ (Alkaline)
- 7) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol)
- 8) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid)
- 9) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate)
- 10) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide)
- 11) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane - PEM)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 6 ชนิด นั่นคือ เชื้อเพลิงที่ใช้ (Anode Gas), อิเล็กโทรไลต์, แก๊สที่แคโทด, อุณหภูมิ และประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 ความแตกต่างของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด (ที่มา www.rmi.org)

Fuel Cell Type	Electrolyte	Anode Gas	Cathode Gas	Temperature	Efficiency
Alkaline	Potassium hydroxide	hydrogen	pure oxygen	below 80°C	50–70%
Proton Exchange Membrane	Solid polymer membrane	hydrogen	pure or atmospheric oxygen	75°C (180°F)	35–60%
Direct Methanol	Solid polymer membrane	methanol solution in water	atmospheric oxygen	75°C (180°F)	35–40%
Phosphoric Acid	Phosphorous	hydrogen	atmospheric oxygen	210°C (400°F)	35–50%
Molten Carbonate	Alkali-Carbonates	hydrogen, methane	atmospheric oxygen	650°C (1200°F)	40–55%
Solid Oxide	Ceramic Oxide	hydrogen, methane	atmospheric oxygen	800–1000°C (1500–1800°F)	45–60%

นอกจากคุณสมบัติภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความแตกต่างกันแล้ว ในส่วนของการนำมาประยุกต์ใช้งานก็ถือว่าเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันด้วยเช่น

เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline) เป็นชนิดแรกที่มีการสร้างขึ้นมาถูกใช้ในโครงการอวกาศของสหรัฐในช่วงปี 1960 แต่เนื่องจากระบบไวต่อการปนเปื้อนมาก จึงจำเป็นต้องใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์เท่านั้น ทำให้ระบบมีราคาสูงมาก ดังนั้นส่วนใหญ่จะใช้เฉพาะบนอวกาศ เช่น บนยานอวกาศอพอลโล เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงสุด อุณหภูมิขณะที่ทำงานอยู่ต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ของเสียที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงคือน้ำซึ่งนักบินอวกาศสามารถใช้บริโภคได้ ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่มีคุณค่า

เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol - DMFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ถูกพัฒนาจากเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน มีอุณหภูมิในการทำงานค่อนข้างต่ำและให้พลังงานไฟฟ้าที่น้อยมาก จึงเหมาะที่จะใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเช่น โทรศัพท์มือถือ เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา เป็นต้น

เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid - PAFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแรกที่สามารถสร้างขึ้นในเชิงพาณิชย์ มีระดับอุณหภูมิในการทำงานประมาณ 210 องศาเซลเซียส สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 200 กิโลวัตต์ มักนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าในสถานที่ขนาดเล็กต่างๆ เช่น โรงแรมและสำนักงานต่างๆ เป็นต้น

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate - MCFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่สำหรับจำหน่ายไฟฟ้า มีอุณหภูมิการทำงานที่สูงมากประมาณ 650 องศาเซลเซียส สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 2 เมกกะวัตต์ และยังให้อุณหภูมิความร้อนสูงออกมาและสามารถนำมาช่วยผลิตกระแสไฟฟ้าในลักษณะความร้อนร่วมได้อีกด้วย เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมสูงขึ้นถึง 85 เปอร์เซ็นต์ และเนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า SOFC ทำให้ไม่ต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ จึงทำให้ระบบโดยรวมมีราคาต่ำกว่า

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide - SOFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีอุณหภูมิในการทำงานที่สูงมากประมาณ 800–1000 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับโรงงานไฟฟ้าขนาดใหญ่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น มีอัตราอุณหภูมิสูงเป็นผลผลิตจากกระบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถนำไปใช้ปั่นกังหันแก๊สได้หรือช่วยผลิตกระแสไฟฟ้าในลักษณะความร้อนร่วมได้นั่นเอง ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสำหรับในระบบที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงมากๆ นั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งจะมีราคาถูกกว่าระบบที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane PEM) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ได้รับความนิยมมากในการนำมาประยุกต์ใช้งานเนื่องจากมีอุณหภูมิในการทำงานที่ไม่สูงมากนักและราคาที่ไม่แพงเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น รวมถึงมีประสิทธิภาพที่สูง ปัจจุบันนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น เป็นแหล่งพลังงานขับเคลื่อนสำหรับรถยนต์หรือรถสาธารณะ แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อใช้ภายในที่อยู่อาศัย เป็นต้น

รูปที่ 6 แสดงข้อดีและการประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 6 ชนิด ซึ่งจะเห็นได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับพลังงานที่กว้าง เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งจะถูกใช้กับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงมากๆ ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดนี้

Typical applications	Portable electronics equipment			Cars,boats and domestic CHP		Distributed power generation CHP , also buses		
POWER In Watts	1	10	100	1k	10k	100k	1M	10M
Main advantages	Higher energy Density than batteries Faster recharging			Potential for zero missions Higher efficiency		Higher efficiency Less pollution quiet		
Range of Application of The different Type of Fuel cell	DMFC			AFC		MCFC		
	PEMFC					SOFC		
						PAFC		

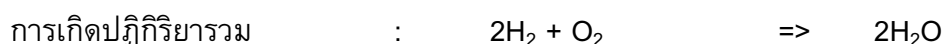
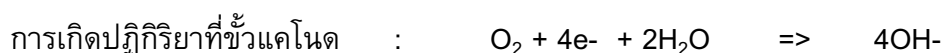
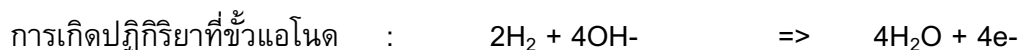
รูปที่ 6 ข้อดีและความแตกต่างการประยุกต์ใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด

ก. เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline)

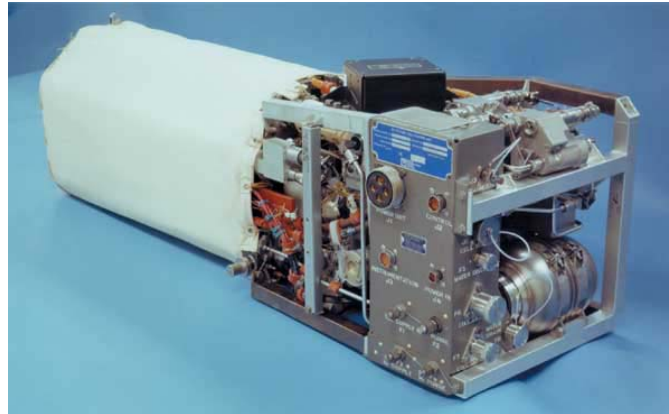
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการพัฒนารุ่นแรกๆ และเป็นชนิดแรกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโครงการอวกาศของสหรัฐอเมริกา ดังตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและน้ำดื่มบนยานอวกาศ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ประสิทธิภาพของ AFC ก่อนข้างสูงซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์ จากการใช้งานในอวกาศได้แสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ให้ประสิทธิภาพประมาณ 70% อย่างไรก็ตามข้อด้อยของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือเสียหาย

ง่ายด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในความเป็นจริงแค่ CO₂ เพียงเล็กน้อยในอากาศก็สามารถมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ ความไวต่อ CO₂ นี้มีผลต่ออายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้จำเป็นต้องใช้ทั้งไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์เท่านั้น ซึ่งกระบวนการที่ทำให้แก๊สทั้งสองชนิดนี้ให้บริสุทธิ์มีราคาที่สูง

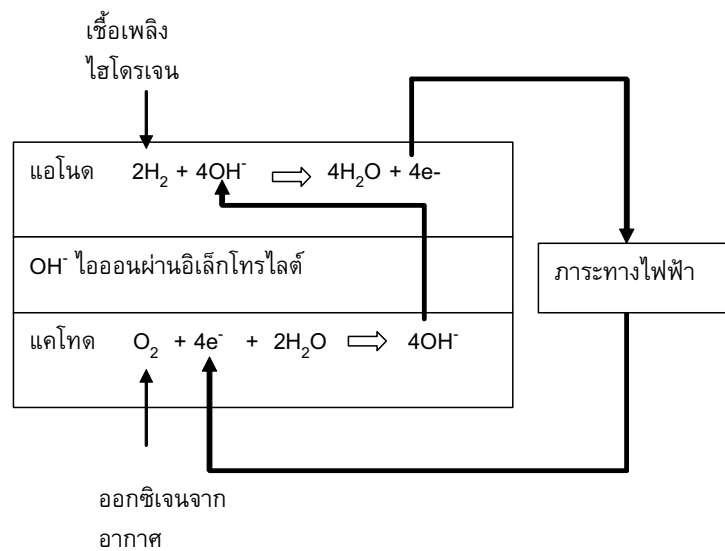
การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์คล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน หากแต่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ รูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นโดยที่ไฮดรอกซิลไอออน (OH⁻) เคลื่อนที่จากขั้วลบไปยังขั้วบวก และทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้น้ำและอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกนี้ใช้เป็นพลังงานไฟฟ้าให้กับวงจรไฟฟ้าภายนอกเซลล์และกลับไปขั้วลบภายในเซลล์ ที่ขั้วลบนี้ อิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำเพื่อผลิตไฮดรอกซิลไอออนเพิ่มขึ้น



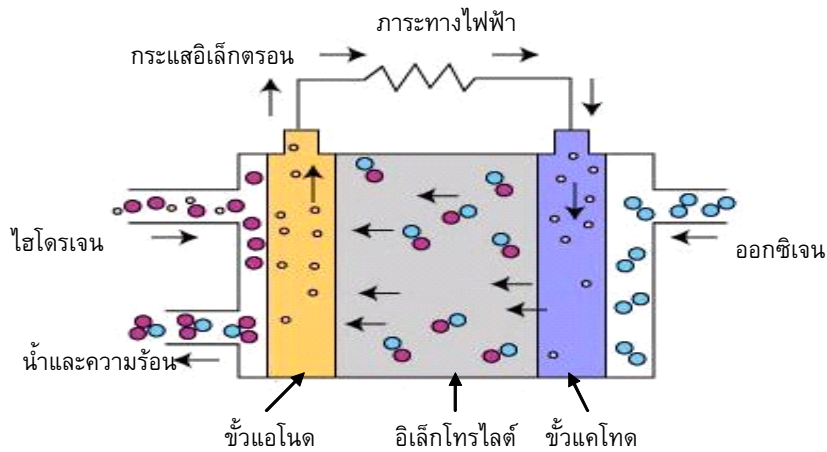
รูปที่ 7 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ขนาด 1.5 kW ที่ใช้นยานอวกาศอพอลโล
(ที่มา www.corrosion-doctors.org)



รูปที่ 8 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ขนาด 12 kW ที่ใช้บนกระสวยอวกาศโดยมีน้ำหนัก 120kg มีเซลล์ภายใน 32 เซลล์แต่ละเซลล์ให้แรงดันไฟฟ้า 0.875 โวลต์ (ที่มา www.fuelcelltoday.com)



รูปที่ 9 การเกิดปฏิกิริยาเคมีเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์



รูปที่ 10 โครงสร้างภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ (ที่มา www.fctec.com)

ข. ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์

เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์นี้สามารถแบ่งออกได้ อีก 3 ชนิด คือ

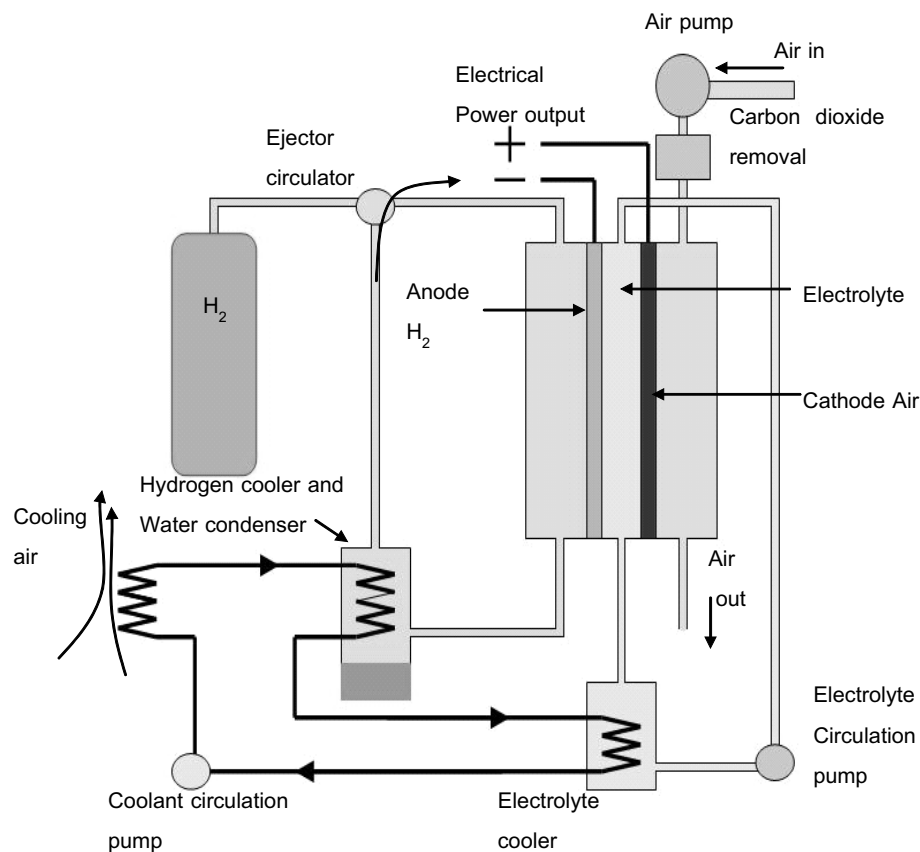
- 12)แบบ Mobile Electrolyte
- 13)แบบ Static Electrolyte Alkaline Fuel Cell
- 14)แบบ Dissolved Fuel Alkaline Fuel Cell

● แบบ Mobile Electrolyte

ลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้จะมีลักษณะใช้หลักการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรไลต์ภายในแสดงดังรูปที่ 11 จะมีปั๊มอยู่รอบๆ ตัวเซลล์เชื้อเพลิง โดยไฮโดรเจนจะส่งไปยังขั้วแอโนดแบบหมุนเวียนแต่ขณะเดียวกันจะเกิดไอน้ำขึ้นซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการแล้วจะถูกทำให้กลั่นตัวเป็นน้ำ เชื้อเพลิงจะได้มาจากถังเก็บไฮโดรเจนและจากการหมุนเวียนไฮโดรเจนในระบบด้วย Ejector Circulator

ลักษณะเด่นของเซลล์เชื้อเพลิงแอลคาไลน์ชนิดนี้คือมีอิเล็กโทรไลต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ที่ต้องทำเช่นนี้เนื่องจากว่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ความหนาแน่นของไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ลดลงและถูกแทนที่ด้วยคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานภายในเซลล์เชื้อเพลิง วิธีในการแก้ไขปัญหาในจุดนี้คือการทำให้ออกซิเจนในอากาศปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แต่ในความเป็นจริงไม่สามารถที่จะกำจัดออกได้หมด อิเล็กโทรไลต์

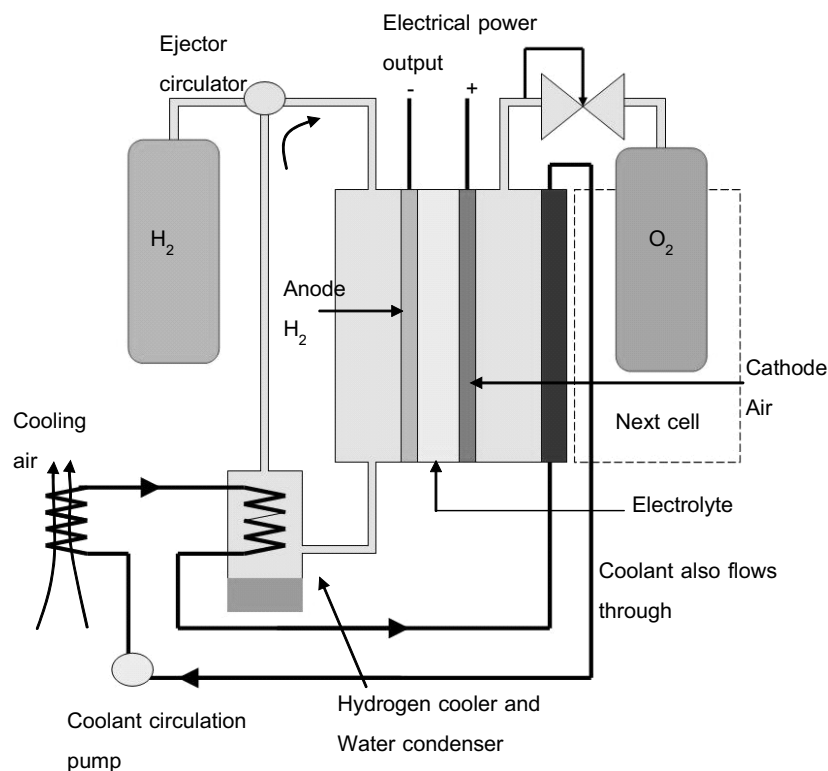
จึงเสื่อมเร็ว ดังนั้นจึงใช้วิธีการให้อิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่โดยมีระบบปั๊มส่งไปยัง Electrolyte Cooler เพื่อทำการฟอกลดการปนเปื้อนของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศทำให้อายุการใช้งานของตัวเซลล์นานขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานบนยานอวกาศพอลโล



รูปที่ 11 แสดงระบบโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Mobile Electrolyte

- **แบบ Static Electrolyte Alkaline Fuel Cell**

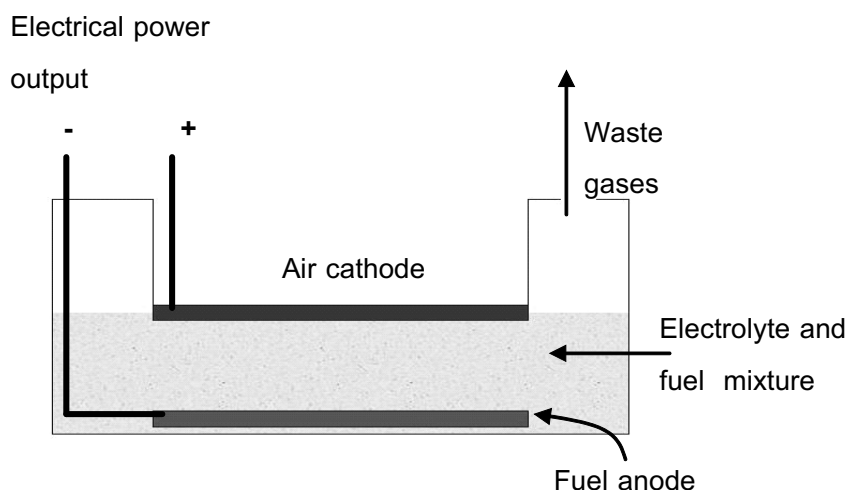
ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะเหมือนกับแบบ Mobile electrolyte แต่จะไม่มีระบบหมุนเวียนของอิเล็กโทรไลต์และต้องใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เพื่อป้อนไปยังขั้วแคโทดดังรูปที่ 12 อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงนี้จะทำมาจากแร่ใยหิน (Asbestos) เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงป้องกันการสึกกร่อนและลักษณะการซึมผ่านที่ดี ในระบบจะมีการใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเพราะถ้าอิเล็กโทรไลต์เสื่อมจะไม่สามารถใช้งานได้ และมีความยุ่งยากอย่างมากในการเปลี่ยน



รูปที่ 12 ระบบโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Static Electrolyte Alkaline Fuel Cell

- **แบบ Dissolved Fuel Alkaline Fuel Cell**

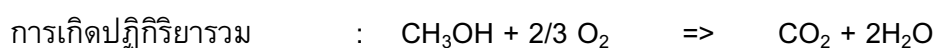
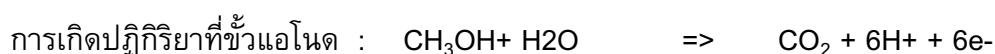
เป็นเซลล์เชื้อเพลิงอีกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะโครงสร้างไม่ซับซ้อนและกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากแต่ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสำหรับงานที่ต้องการกำลังงานสูง อิเล็กโทรดที่แอโนดจะใช้แพลตตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่แคโทดจะไม่ใช้ ดังนั้นปฏิกิริยาเคมีที่แคโทดจะช้ามาก รูปที่ 13 แสดงให้เห็นว่าอิเล็กโทรไลต์ผสมกับเชื้อเพลิงแล้วใส่เข้าไปในตัวเซลล์บริเวณแท่งแคโทดและแอโนดจะสัมผัสเชื้อเพลิงชนิดเดียวกัน กระบวนการในการเติมเชื้อเพลิงจึงค่อนข้างง่ายกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ ต้นทุนต่ำ มีขนาดกะทัดรัด มีโครงสร้างที่ง่าย ข้อเสียคือ เชื้อเพลิงที่ใช้ค่อนข้างมีอันตรายเพราะเป็นสารเคมีที่มีผลทำให้เกิดมะเร็งและอาจทำให้เกิดการระเบิดได้



รูปที่ 13 แสดงโครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Dissolved Fuel Alkaline Fuel Cell

ค. เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีลักษณะเหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน แต่จะใช้เมทิลแอลกอฮอล์ (CH_3OH) 25 เปอร์เซ็นต์ผสมกับน้ำเป็นเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่ขั้วแอโนดโดยตรง ในตัวเมทิลแอลกอฮอล์จะประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไฮดรอกซิล เป็นตัวทำปฏิกิริยา ส่วนออกซิเจนนั้นจะป้อนเข้าที่ขั้วแคโทด ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือไม่มีปัญหาเกี่ยวกับถังเก็บเชื้อเพลิงที่พบในเซลล์เชื้อเพลิงบางชนิดและราคายังถูกกว่า นอกจากนี้ความหนาแน่นของพลังงานที่ได้จากเมทิลแอลกอฮอล์ยังสูงกว่าไฮโดรเจน ดังรายละเอียดในตารางที่ 2

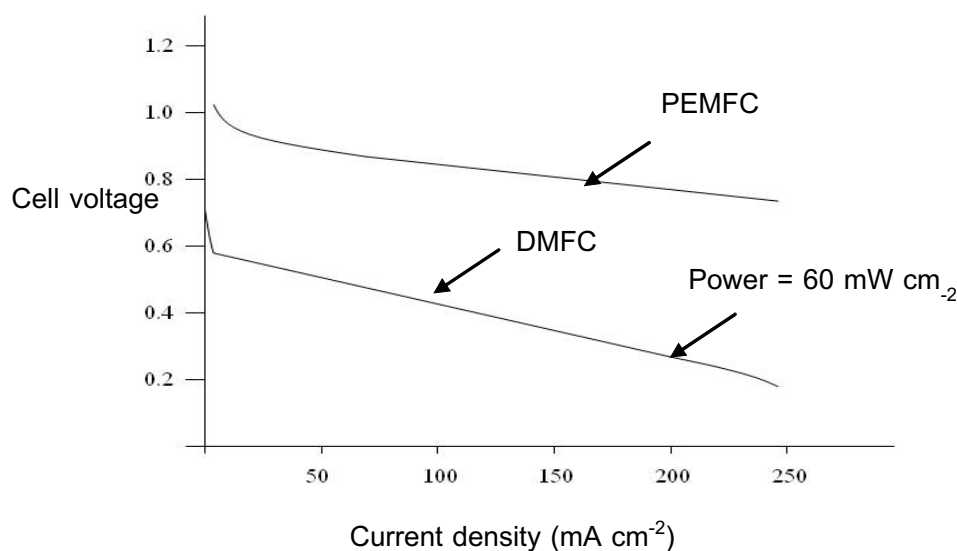


แม้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะมีข้อดีหลายประการซึ่งเป็นปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ใช้ในการตัดสินใจในการเลือกใช้งาน แต่ก็มีข้อเสียคือการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้เมทิลแอลกอฮอล์ที่บริเวณขั้วแอโนดนั้นจะช้ากว่าไฮโดรเจนและการเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันกับออกซิเจนที่ขั้วแคโทดที่สลับซับซ้อนกว่า จึงส่งผลให้ระบบของการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมแล้วช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาใน

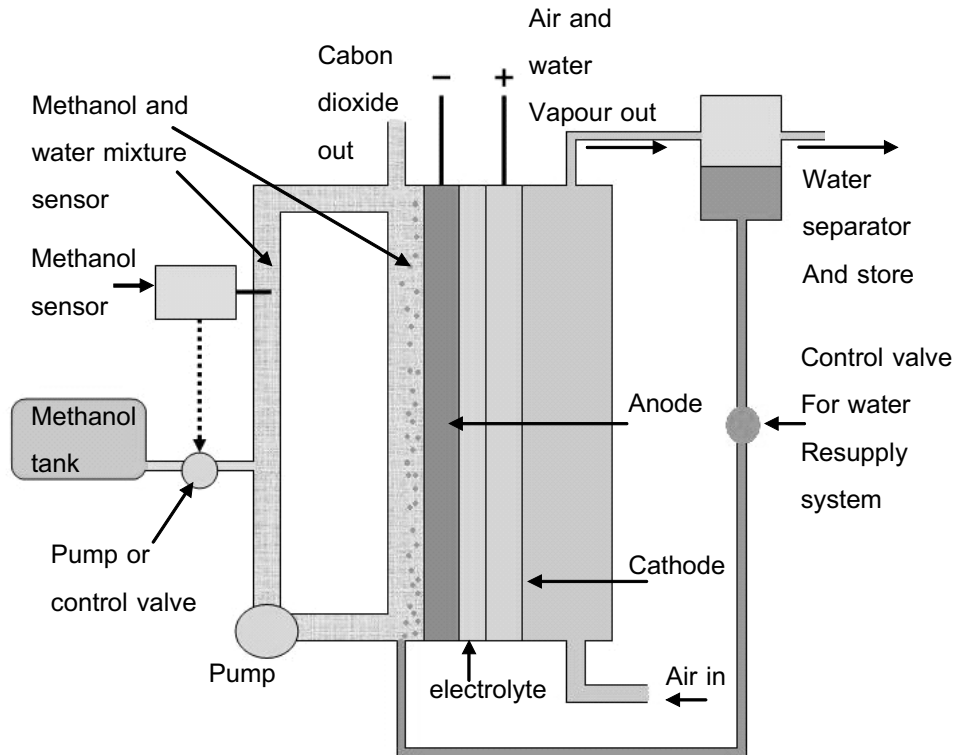
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ มาก นั้นเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้มีต่ำกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ในรูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้ากับเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ส่วนในรูปที่ 15 แสดงโครงสร้างภายในของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานระหว่างเมทิลแอลกอฮอล์กับไฮโดรเจน

Storage method	Energy density Of fuel	Storage efficiency (%)	Net energy density
H ₂ at 300 bar pressure in composite cylinders	119.9MJ kg ⁻¹ 33.3 kWh kg ⁻¹	0.6	0.72MJ kg ⁻¹ 0.20 kWh kg ⁻¹
H ₂ in metal hydride cylinders	119.9MJ kg ⁻¹ 33.3 kWh kg ⁻¹	0.65	0.78MJ kg ⁻¹ 0.22 kWh kg ⁻¹
H ₂ from methanol – indirect methanol	119.9MJ kg ⁻¹ 33.3 kWh kg ⁻¹	6.9	8.27MJ kg ⁻¹ 2.3 kWh kg ⁻¹
Methanol in strong plastic Tanks for direct use as fuel	19MJ kg ⁻¹ 5.54 kWh kg ⁻¹	95	18.9MJ kg ⁻¹ 5.26 kWh kg ⁻¹



รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิด DMFC กับ PEMFC



รูปที่ 15 โครงสร้างและระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด DMFC

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรงนั้นน้ำถือเป็นส่วนผสมสำคัญสิ่งจำเป็นอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยาเพราะเมธิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถใช้ได้ในการบวนการ จึงจำเป็นต้องมีระบบหมุนเวียนของน้ำเพื่อเติมให้กับเมธิลแอลกอฮอล์ตลอดเวลาในอัตราส่วนที่พอเหมาะ ของเสียที่จะมาจากอิเล็กโทรดทั้งสองด้านโดยด้านขั้วแอโนดจะได้ของเสียเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และขั้วแคโทดของเสียที่ได้จะเป็นอากาศและไอน้ำ

ในการประยุกต์ใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ค่อนข้างมีขีดจำกัดเนื่องมาจากพลังงานไฟฟ้าที่ได้ออกมาต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงๆ ได้ แต่เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานสูงจากเชื้อเพลิงที่ใช้จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าต่อเนื่องเป็นเวลานาน เช่น โทรศัพท์มือถือ เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา หรือ เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ เป็นต้นดังแสดงในรูปที่ 16(ก)-(ง)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 16 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรงกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

(ก) เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ (ที่มา www.dcvviews.com/press/images/Toshiba-Methanol-Fuel-Cell.jpg)

(ข) เครื่องเล่น MP3 (ที่มา www.anythingbutipod.com/archives/images/toshiba-methanol%20.jpg)

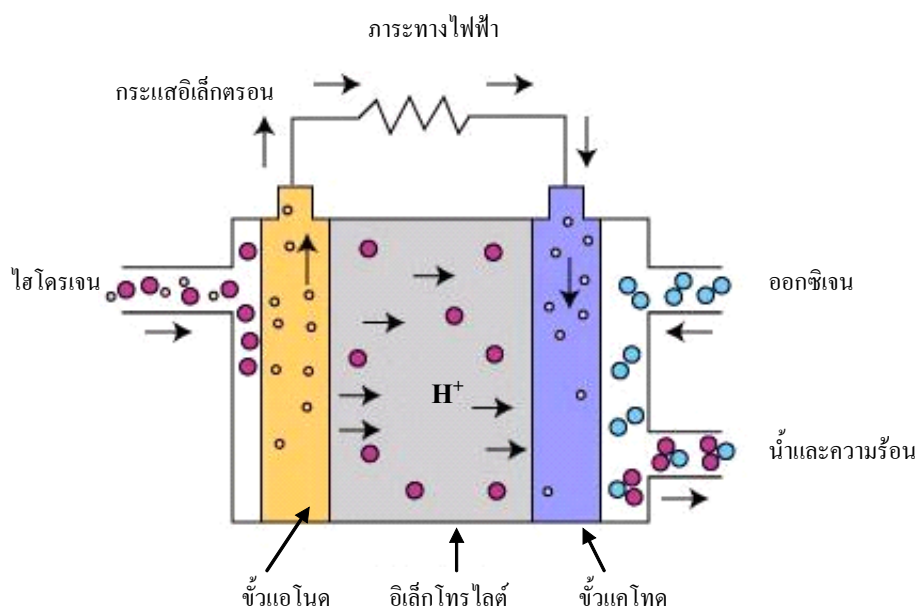
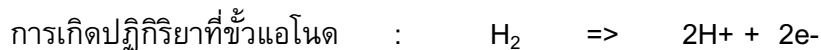
(ค) เครื่อง PDA (ที่มา www.batteriesdigest.com/4cf40400.png)

(ง) เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา (ที่มา www.capital.lv/pics/news/toshiba-f1.jpg)

ง. เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid - PAFC)

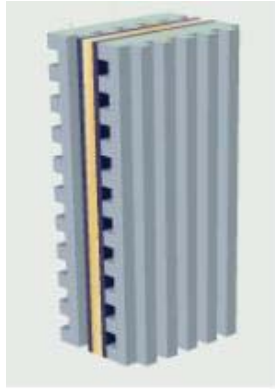
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีลักษณะการทำงานที่เหมือนกับชนิด PEM โดยโปรตอน(+) จะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์รวมไปถึงปฏิกิริยาเคมีบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดด้วย โดยใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูง 150 ถึง 220 องศาเซลเซียสได้อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนั้นยังทนทานต่อคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดขึ้นอีกด้วย อิเล็กโทรดที่ใช้เหมือนกับแบบ PEM โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแพลตตินั่มเคลือบอยู่บนกระดาษที่ทำจากคาร์บอน ในปัจจุบันจะใช้แพลตตินั่มเคลือบประมาณ 0.05 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่ขั้วแคโทดและ 0.10 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่

ขั้วแอโนด แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะทำให้เกิดความเสียหายที่บริเวณขั้วแอโนดซึ่งเป็นผลมาจากการกระบวนการรีฟอร์มเมอร์ภายในระบบแต่สามารถที่ทำให้บริเวณขั้วแอโนดนั้นลดการดูดซับ CO ได้โดยการทำงานที่อุณหภูมิสูง การทำงานจะแสดงดังรูปที่ 17

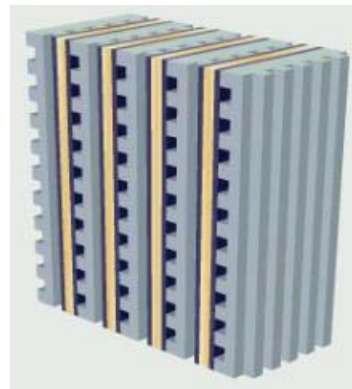


รูปที่ 17 โครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC (ที่มา www.fctec.com)

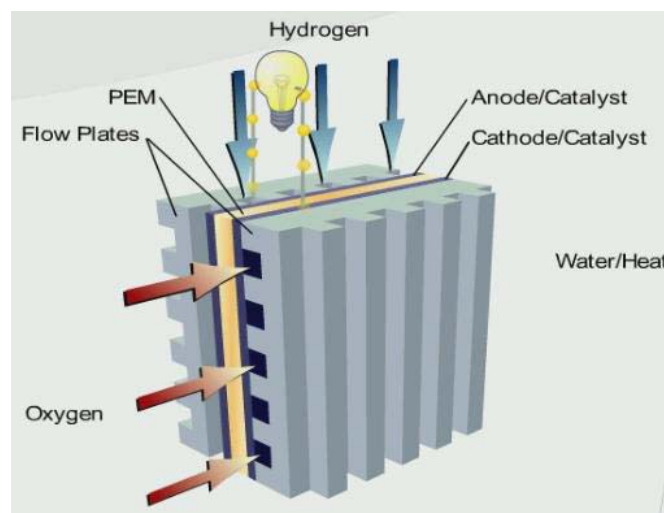
เซลล์ที่นำมาต่อเป็น Stack นั้นจะคล้ายกับแบบ PEM ซึ่งก็จะประกอบด้วย แผ่นเพลต (Bipolar Plate) ขั้วแอโนดและแคโทด และอิเล็กโตรไลต์ โดยปกติจะต่อเรียงกันประมาณ 50 เซลล์ต่อ Stack หรือมากกว่านั้นแล้วแต่ขนาดพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการ แผ่นเพลตที่ใช้จะมี 2 ด้านโดยแต่ละด้านจะทำเป็นลักษณะร่องที่แตกต่างกันเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง ซึ่งด้านที่ทำเป็นช่องลักษณะแนวตั้งจะเป็นทางไหลของไฮโดรเจนและอีกด้านเป็นแนวนอนเป็นช่องลักษณะแนวนอนจะเป็นทางไหลของออกซิเจนดังรูปที่ 18(ก)-(ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 18 ลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC (ก) เซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ (ข) เซลล์เชื้อเพลิงในลักษณะ Stack (ค) ลักษณะทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง (ที่มา www.eere.energy.gov)

ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC ถูกผลิตออกมาใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นถึง 85 เปอร์เซ็นต์ถ้านำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบความร้อนร่วม (CHP, Combined Heat and Power) ซึ่งอุณหภูมิในการทำงานจัดอยู่ในระดับกลาง รูปที่ 19(ก) และ (ข) แสดงตัวอย่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PAFC ซึ่งนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับงานด้านต่างๆ เช่น โรงผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับชุมชน สำนักงาน บริษัท และโรงพยาบาล เป็นต้น



(ก)



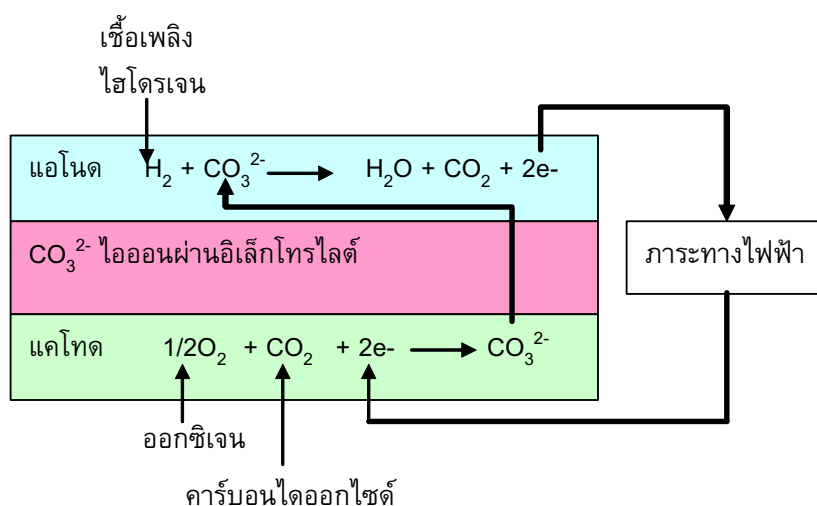
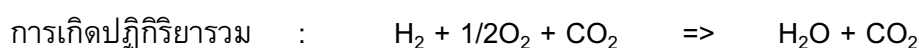
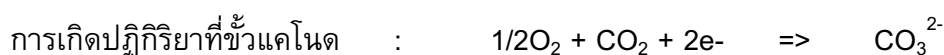
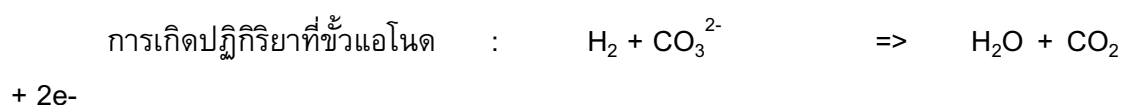
(ข)

รูปที่ 19 การประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า (ก) เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 200 กิโลวัตต์ โดยบริษัท ONSI ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็น UTC (ที่มา members.aol.com/fuelcells/10.htm)
(ข) เซลล์เชื้อเพลิง Toshiba-UTC PC25 (ที่มา www.fuelcell.no)

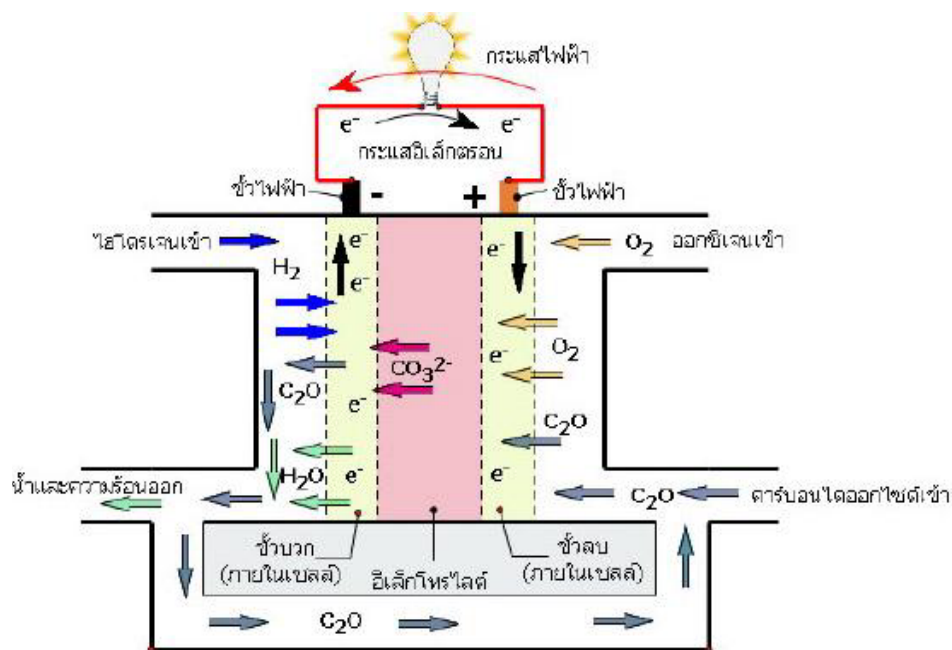
จ. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate - MCFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้เกลือลิเทียมโพแทสเซียมคาร์บอเนตหรือลิเทียมโซเดียมคาร์บอเนตหลอมละลายเป็นอิเล็กโทรไลต์ซึ่งจะบรรจุในเมตริกซ์เซรามิกลิเทียมออกไซด์ (LiAlO_2) (สมนึก บุญพาไสว : 2548) ใช้โลหะนิเกิลที่ขั้วแอโนดและโลหะนิเกิลออกไซด์ที่ขั้วแคโทดซึ่งทนความร้อนสูงนอกจากนี้ยังมีราคาถูกกว่าแพลตตินัมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ออกคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดดังรูป

ที่ 20 และรูปที่ 21 เชื้อเพลิงที่ใช้จ่ายไปยังเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือไฮโดรเจนซึ่งจะจ่ายไปยังขั้วแอโนดและออกซิเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์จ่ายไปยังขั้วแคโทด ของเสียที่ได้จากกระบวนการจะเป็นน้ำ ความร้อนและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งสามารถนำกลับเข้ามาใช้ใหม่ได้ด้วยกระบวนการรีฟอร์มเมอร์ภายใน (Internal Reforming) ที่สามารถใช้ความร้อนภายในตัวเซลล์มาทำการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ทำให้ประหยัดต้นทุน ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้อยู่ที่ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์และถ้านำมาผลิตไฟฟ้าแบบความร้อนร่วมก็จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 20 การเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด MCFC



รูปที่ 21 แสดงโครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด MCFC (ที่มา www.teenet.tei.or.th)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิสูงมากจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในที่อยู่อาศัยหรือยานพาหนะ โดยปกติแล้วจะนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ตัวอย่างที่มีการสร้างใช้งานจริงจะเป็นของ MTU 'Hot Module' ที่มีขนาด 250 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 22 และโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 2 เมกกะวัตต์ดังรูปที่ 23



รูปที่ 22 MTU "Hot Module" (ที่มา www.innovation-brennstoffzelle.de/bzelle/haupt7.html)

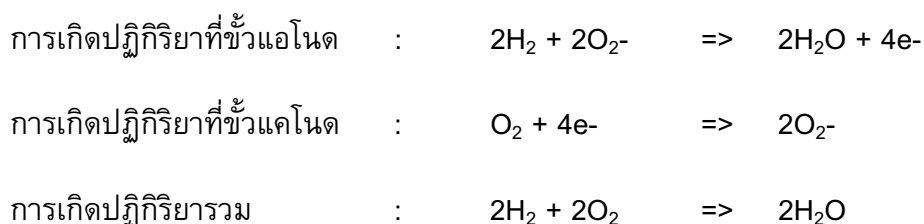


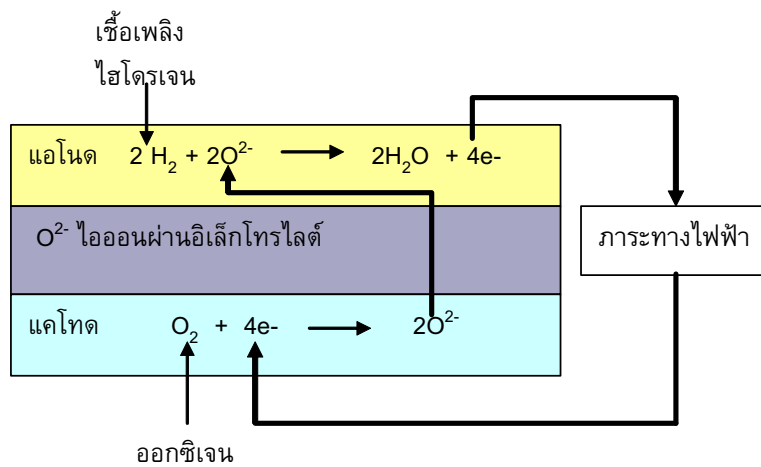
รูปที่ 23 โรงไฟฟ้าขนาด 2 เมกกะวัตต์ที่แคลิฟอร์เนีย (ที่มา www.moea.state.mn.us.htm)

ฉ. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide - SOFC)

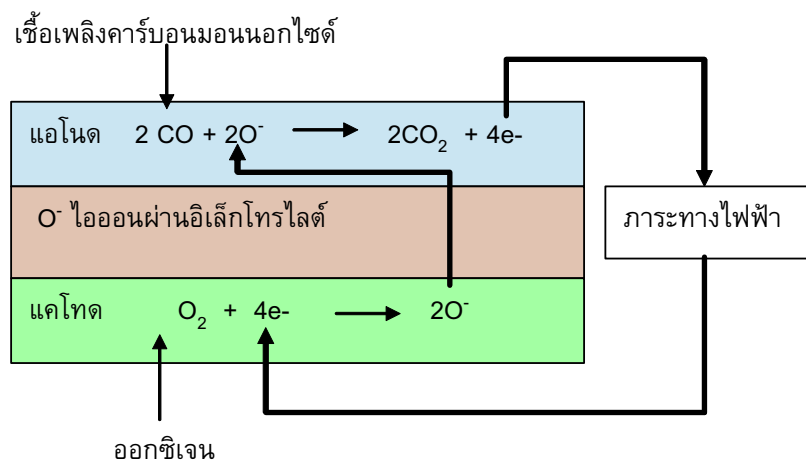
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดในการทำงานประมาณ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส สามารถให้ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ พลังงานความร้อนที่แผ่ออกมาของ SOFC สามารถที่จะนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าแบบความร้อนร่วมได้ ซึ่งจะส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยรวมทั้งระบบเพิ่มขึ้นได้ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC นี้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชนิด PAFC และ PEM นอกจากจะให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตที่ดีกว่าแล้ว เซลล์เชื้อเพลิงยังสามารถใช้ได้ทั้ง ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนนอกไซด์ แอลกอฮอล์และไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นจึงสามารถนำเอาแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์จากถ่านหินเข้ามาใช้ร่วมได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับ SOFC นั้นยังมีราคาที่ถูกกว่าเนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิสูงสามารถใช้โลหะที่ไม่มีค่าทำเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC ยังมีเสถียรภาพการทำงานสูงและอายุการใช้งานของเซลล์นานเนื่องจากส่วนประกอบนั้นเป็นของแข็ง

ส่วนประกอบหลักของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC จะประกอบด้วย ขั้วแอโนด, อิเล็กโทรไลต์, ขั้วแคโทดและตัวเชื่อมต่อ (Interconnect) การทำงานจะจ่ายอากาศไปยังขั้วแคโทดเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารวมตัวกันของอากาศ ส่วนเชื้อเพลิงจะจ่ายไปยังขั้วแอโนดแสดงดังรูปที่ 24(ก)-(ข) และรูปที่ 25 เมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูงออกซิเจนไอออนสามารถวิ่งผ่านอิเล็กโทรไลต์ได้เพื่อไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่ขั้วแอโนดทำให้ได้ของเสียคือความร้อนกับน้ำและอิเล็กตรอนออกมาส่งไปยังโหลดไฟฟ้าและไหลกลับมายังขั้วแคโทดเพื่อทำปฏิกิริยากับอากาศเพื่อให้ได้ออกซิเจนไอออนออกมา



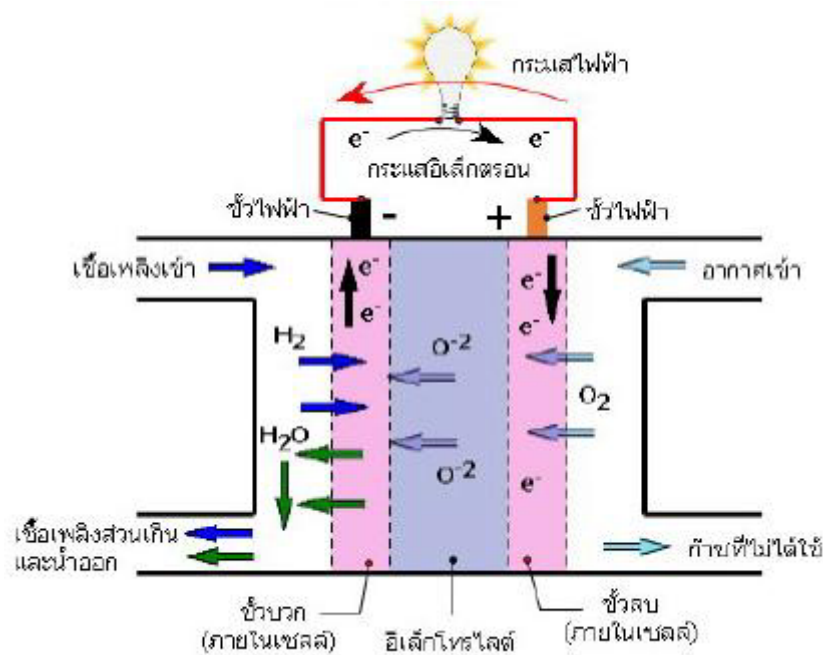


(ก)



(ข)

รูปที่ 24 การเกิดปฏิกิริยาขั้วแอโนดและแคโทดของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด (ก) แสดงการเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC ใช้เชื้อเพลิงที่เป็นไฮโดรเจน (ข) แสดงการเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC ใช้เชื้อเพลิงที่เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 25 โครงสร้างการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC (ที่มา www.teenet.tei.or.th)

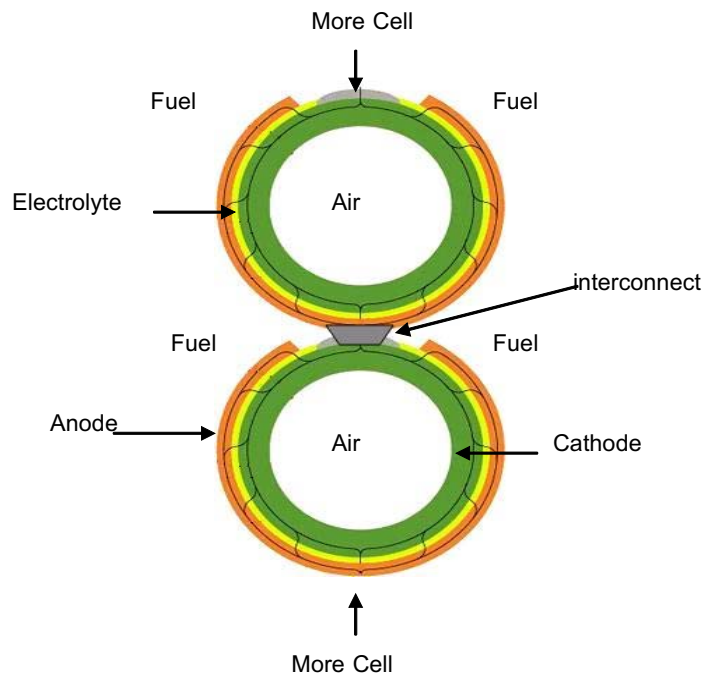
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC จะใช้เซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ซึ่งทำมาจากสารเซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium Oxide) ที่เจือด้วยยิตเรียม (Yttria) จำนวนเล็กน้อยบางครั้งเรียกว่า YSZ (Yttria Stabilized Zirconia) นอกจากนี้ยังทำมาจากคู่ของออกไซด์อื่นเช่น เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium Oxide) และแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) (สมนึก บุญพาไสว : 2548) เซอร์โคเนียมให้เสถียรภาพการทำงานสูงและยังลดออกไซด์ที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วแอโนดและแคโทดอีกด้วย นอกจากนี้ยังเป็นตัวนำที่ดีเพื่อให้ไอออนออกซิเจนไหลผ่านได้ และยังสามารถทำให้อิเล็กโทรไลต์มีความบางมากประมาณ 25-50 ไมโครเมตร อิเล็กโทรดซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางด้านขั้วแอโนดทำจากนิกเกิลผสมกับ YSZ และขั้วแคโทดจะทำจากโลหะผสมเช่น โคบอลต์ แมงกานีส และเซอร์โคเนียม คุณสมบัติของอิเล็กโทรดนั้นจะต้องเสถียรต่ออุณหภูมิที่สูง เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและความแข็งแรง ตัวเชื่อมต่อ (Interconnect) เป็นตัวที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อเซลล์ที่อยู่ใกล้ๆ เข้าด้วยกันจะต้องมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีทนความร้อนสูง มีความแข็งแรงไม่เป็นตัวนำไอออนและน้ำจะทำมาจากโลหะเช่น Cr-5Fe-1Y2O3

- **ลักษณะการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC**

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถออกแบบได้ 2 วิธีคือ แบบ Tubular และแบบ Planar

1) แบบ Tubular

เซลล์เชื้อเพลิงแบบ Tubular SOFC ได้มีการพัฒนาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1970 โดยบริษัท Siemens Westinghouse Power Corporation มีลักษณะเป็นท่อซึ่งจะทำมาจากเซอร์โคเนียมพูนดรูบที่ 26 และรูปที่ 27 ซึ่งเป็นมาตรฐานในการผลิตเป็นต้นมา โดยด้านในสุดของท่อจะเป็นชั้นของขั้วแคโทดที่จะสัมผัสกับอากาศภายในและผิวนอกท่อจะเป็นชั้นขั้วแอโนดที่จะสัมผัสกับเชื้อเพลิงและบริเวณชั้นกลางระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองจะเป็นชั้นของอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 26 ลักษณะโครงสร้างภายในของ Tubular SOFC

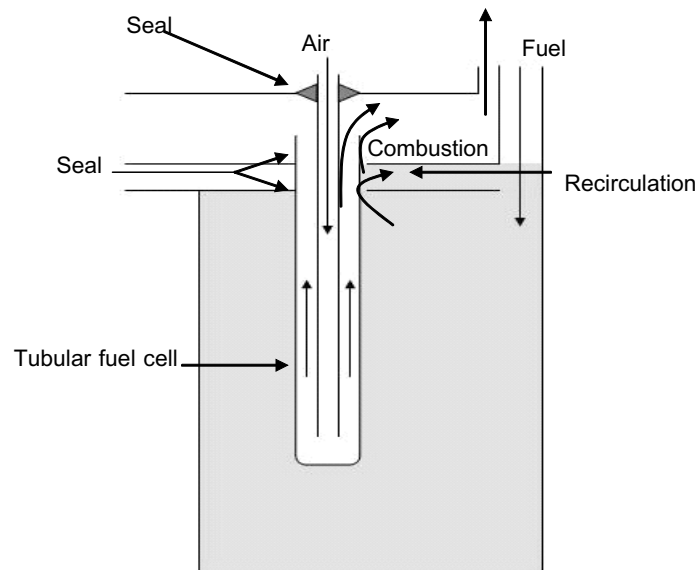
(ที่มา www.powergeneration.siemens.com/en/fuelcells/technology/tubular/index.cfm)



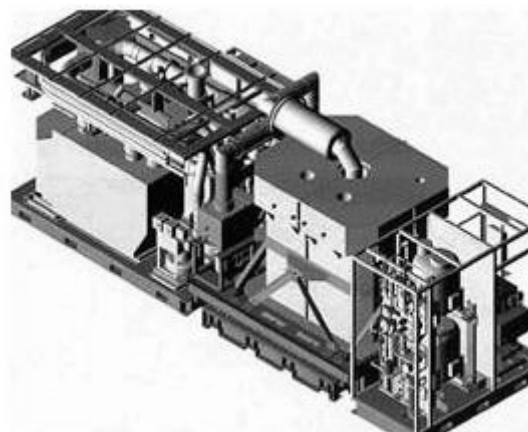
รูปที่ 27 เซลล์เชื้อเพลิง Stack โดยมี 24 ท่อ มีรัศมี 2.0 เซนติเมตรและความยาวประมาณ 150 เซนติเมตร

(ที่มา www.powergeneration.siemens.com/en/fuelcells/technology/modular/index.cfm)

ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าต่ำเนื่องจากมีสถานะของการสูญเสียแบบ Ohmic เกิดขึ้นและกระบวนการผลิตยุ่งยากและมีราคาแพงมาก ข้อดีคือระบบการไหลเวียนแก๊สภายในที่มีระบบป้องกันที่แน่นหนาของเสียกับอากาศที่เข้าไปได้อย่างมีประสิทธิภาพดังรูปที่ 28 ได้มีการนำเซลล์ในลักษณะนี้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าขนาด 100 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 29



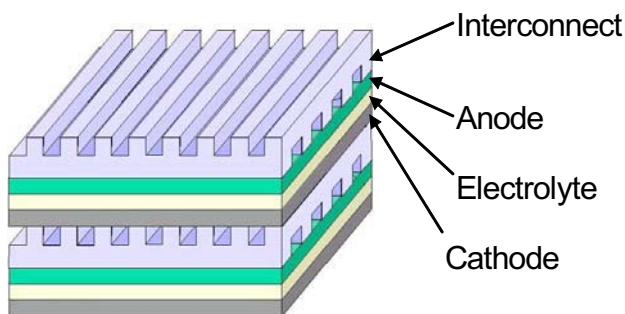
รูปที่ 28 ระบบการไหลเวียนเชื้อเพลิงภายใน



รูปที่ 29 เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าขนาด 100 กิโลวัตต์ที่ เนเธอร์แลนด์ (ที่มา <http://evworld.com/view.cfm>)

2) แบบ Planer

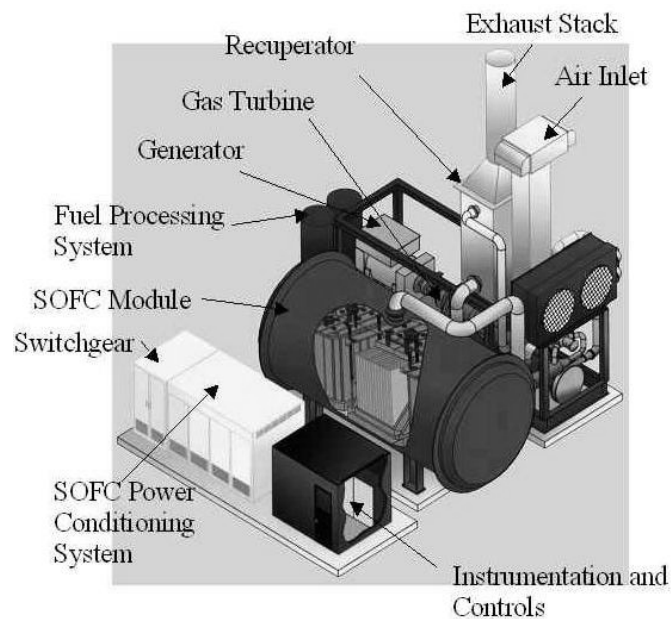
มีลักษณะเป็นแผ่นของเซลล์เชื้อเพลิงซ้อนทับกันเหมือนกับชนิด PEM และ PAFC ซึ่งมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่สลับซับซ้อน โดยประกอบด้วยแผ่นเพลตประกบกัน 2 ข้างของเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 30 การเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ทำได้ง่ายกว่า ลักษณะของแผ่นเพลตนั้นจะมีความบางทำให้สภาวะของการสูญเสียแบบ Ohmic ต่ำกว่าแบบ Tubular ดังนั้นจึงมีความหนาแน่นของพลังงานสูงกว่า ข้อดีคือกระบวนการผลิตจะง่ายและต้นทุนต่ำกว่า ข้อเสียคือการป้องกันการรั่วไหลของแก๊สทำได้ยากนอกจากนั้นแล้วตัวเซลล์ต้องมีความแข็งแรงสูงเพื่อรองรับการต่อเซลล์เป็นชั้นๆ ดังนั้นการมาประยุกต์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีปัญหาทางเทคนิคมาก



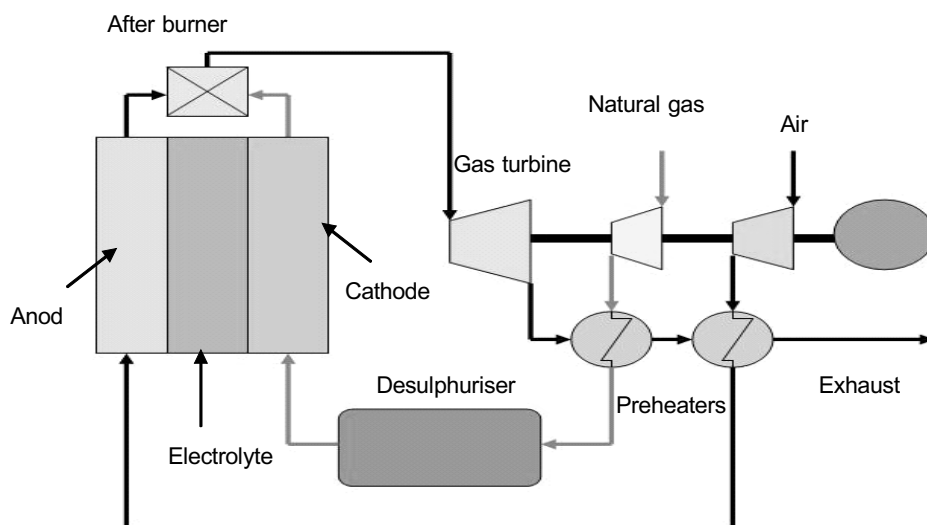
รูปที่ 30 ลักษณะเซลล์เชื้อเพลิง SOFC แบบ Planer
(ที่มา www.aki.che.tohoku.ac.jp/~koyama/html/research/SOFC.html)

- ระบบหมุนเวียนภายในเซลล์เชื้อเพลิง SOFC

เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อุณหภูมิสูงจึงมีการนำเอาระบบหมุนเวียนเข้ามาใช้เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยสามารถใช้ทั้งแก๊สและไอน้ำที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีนำมาป้อนกลับให้กับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า บริษัท Siemens Westinghouse เป็นผู้คิดค้นระบบหมุนเวียนนี้ขึ้น โดยสามารถพัฒนาออกให้จนสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จากเซลล์ที่มีพลังงานไฟฟ้าเพียง 220 กิโลวัตต์ ให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 300 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 31 และรูปที่ 32 แสดงบล็อกการทำงานภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้



รูปที่ 31 ระบบเซลล์เชื้อเพลิง SOFC แบบหมุนเวียน ขนาด 300 กิโลวัตต์ทำงานที่ความดัน 10 bar
(ที่มา www.ept.ntnu.no/te/pix/SOFC.jpg)



รูปที่ 32 แผนผังการทำงานระบบหมุนเวียน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด SOFC มีอุณหภูมิในการทำงานสูงมากซึ่งไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในพื้นที่ที่ใกล้คน จึงได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ดังรูปที่ 33 สำหรับแจกจ่ายหรือสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่



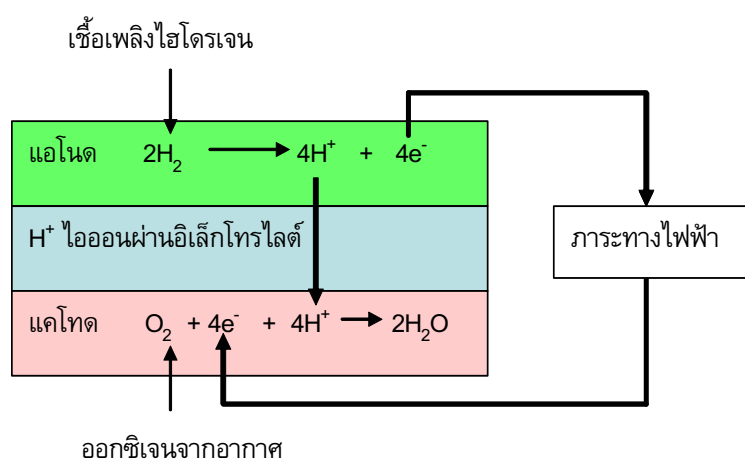
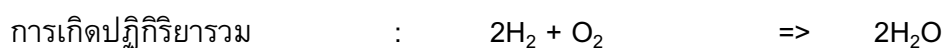
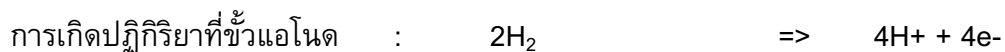
รูปที่ 33 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ Tubular Solid Oxide โดย Siemens Westinghouse
(ที่มา www.moea.state.mn.us.htm)

ข. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane PEM)

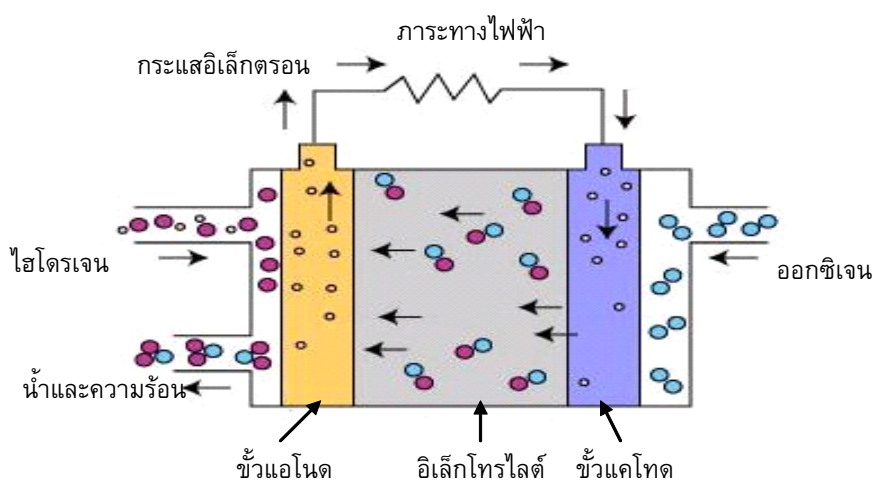
เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane :PEM) หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่ออิเล็กโทรไลต์พอลิเมอร์ (Polymer electrolyte membrane: PEM) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการพัฒนาครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1960 เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในยานอวกาศขององค์การ NASA ส่วนของอิเล็กโทรไลต์ใช้พอลิเมอร์แข็งซึ่งจะทำงานที่อุณหภูมิที่ต่ำประมาณ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อดีคือจะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถเข้าสู่สภาวะการทำงานปกติได้ในระยะเวลาอันสั้น อีกทั้งแต่ละเซลล์ยังมีขนาดเล็กที่บาง ส่งผลให้น้ำหนักโดยรวมค่อนข้างเบา นอกจากนั้นแล้วการสึกกร่อนของตัวเซลล์ยังมีน้อย มีการนำเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพราะสามารถใช้เป็นแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กไปจนถึงแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้เช่น เซลล์เชื้อเพลิงที่มีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าน้อยๆ สามารถนำไปใช้กับโทรศัพท์มือถือหรือเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา ขนาดเป็นกิโลวัตต์จะนำไปใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในอาคารที่พักอาศัย ขนาดสิบกิโลวัตต์จะนำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในรถไฟฟ้า ถ้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีขนาดสูงถึง 100 กิโลวัตต์แล้วก็เหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถบัสหรือรถโดยสารได้

สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาคือ ไฮโดรเจนและออกซิเจนจากอากาศดังในรูปที่ 34 และรูปที่ 35 โดยจะทำการป้อนไฮโดรเจนเข้าทางด้านซ้ายแอโนด ทำให้เกิดการแตกตัวได้โปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอน โดยโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปตามสายไฟสู่อุปกรณ์ไฟฟ้า (ภาระทางไฟฟ้า) และ

ไหลกลับมายังขั้วแคโทด ส่วนออกซิเจนที่ทำการป้อนที่ขั้วแคโทดจะเป็นตัวทำให้เกิดการรวมตัวกันของโปรตอนและอิเล็กตรอนของไฮโดรเจน ได้ผลลัพธ์เป็นน้ำและความร้อนออกมาดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 34 การเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM



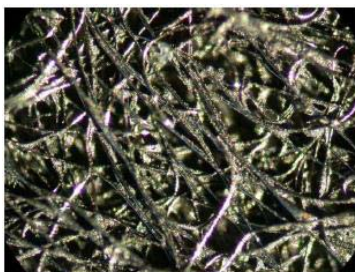
รูปที่ 35 โครงสร้างภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (ที่มา www.fctec.com)

- โครงสร้างของโพลิเมอร์

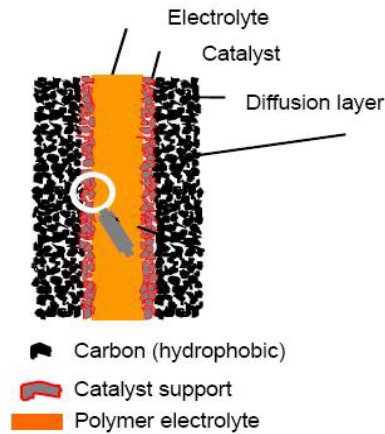
โครงสร้างของโพลิเมอร์ที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนนั้น เป็นพลาสติกสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งมีลักษณะเป็นโมเลกุลยาว จากนั้นจะทำการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของโพลิเมอร์ให้เป็น PTFE (Polytetrafluoroethylene) ซึ่งการเปลี่ยนโครงสร้างในลักษณะนี้เป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี สามารถทำให้อิเล็กโทรไลต์มีความบางได้ถึง 50 ไมโครเมตรและโปรตอนของเชื้อเพลิงยังไหลผ่านได้ดี โดยมีประโยชน์ต่อเซลล์เชื้อเพลิงหลายชนิดเช่น ชนิดแอลคาไลน์ ชนิดกรดฟอสฟอริก และชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นต้น

- โครงสร้างของอิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดที่ใช้ทั้งขั้วแอโนดและแคโทดนั้นจะเป็นแพลตตินัม ซึ่งถือว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี ในช่วงแรกๆ อัตราส่วนที่ใช้คือ 28 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรเป็นอัตราส่วนที่สูง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อราคาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการลดจำนวนลงเหลือเพียง 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแพลตตินัมนั้นจะประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ ที่เคลือบบนกระดาษหรือผ้าที่ทำมาจากคาร์บอนอิเล็กโทรดเมื่อเคลือบแล้วจะลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระเป็นคุณสมบัติที่ให้โปรตอนสามารถซึมผ่านได้ ซึ่งเป็นบริเวณที่แก๊สจะมากระทบที่พื้นผิวดังรูปที่ 36 ชั้นส่วนต่างๆ ของอิเล็กโทรดเมื่อเคลือบเป็นชั้นแล้วก็จะนำมาประกอบติดทั้งสองข้างของโพลิเมอร์บางครั้งเรียกว่า MEA (Membrane Electrode Assembly) แสดงดังรูปที่ 37 อัตราส่วนความหนาที่มีการออกแบบนั้น ที่เยื่อเมมเบรนจะมีความหนาประมาณ 0.05-0.1 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดมีความหนาประมาณ 0.03 มิลลิเมตรและชั้นคาร์บอนจะมีความหนา 0.2-0.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 36 ลักษณะชั้นคาร์บอน (ที่มา <http://www.tfic.kmitnb.ac.th>)



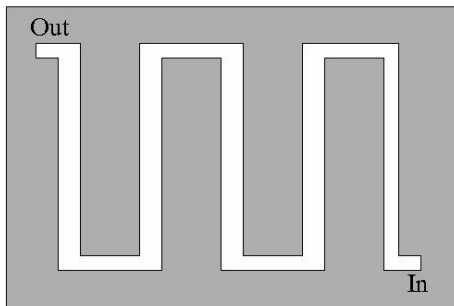
รูปที่ 37 ลักษณะ MEA (Membrane Electrode Assembly) (ที่มา <http://www.tfic.kmitnb.ac.th>)

- **แผ่นเพลต (Bipolar Plate) ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM**

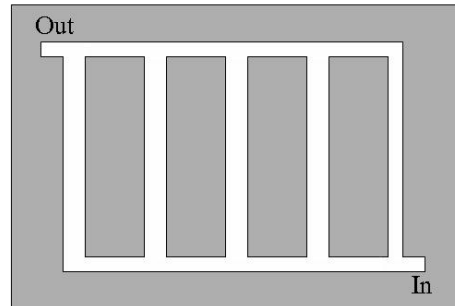
แผ่นเพลตหรือ Bipolar Plate คือแผ่นที่ใช้สำหรับกำหนดทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงที่ป้อนทั้งด้านแคโทดและด้านแอโนด เพื่อให้ตัวเชื้อเพลิงสัมผัสโดนตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ได้อย่างทั่วถึงโดยจะมีลักษณะเป็นร่องทั้งสองด้านของแผ่นเพลตดังรูปที่ 38 ลักษณะของร่องที่อยู่บนแผ่นเพลตจะมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานข้อดีของแต่ละแบบก็จะแตกต่างกันไปด้วยดังรูปที่ 39(ก) ถึง (จ)



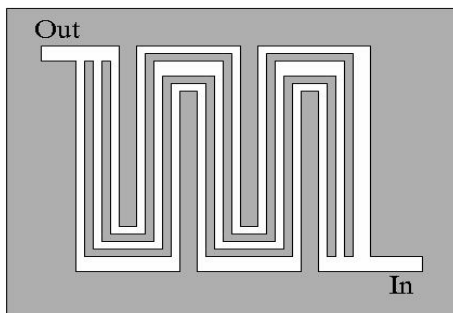
รูปที่ 38 ลักษณะแผ่น Bipolar Plate (ที่มา <http://www.tfic.kmitnb.ac.th>)



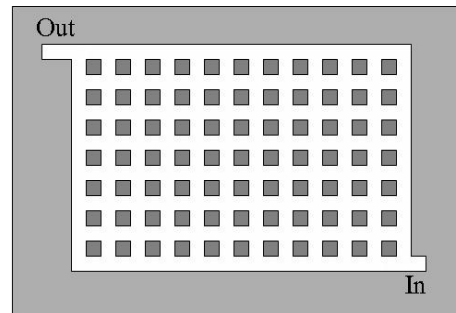
(ก)



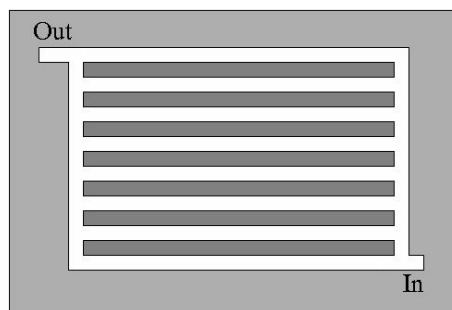
(ข)



(ค)



(ง)

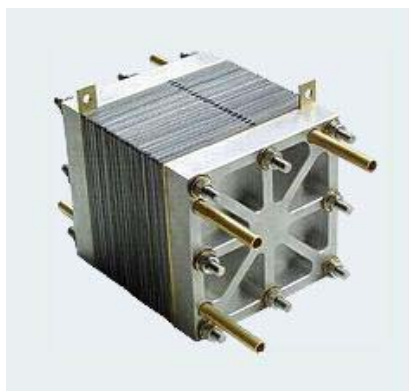


(จ)

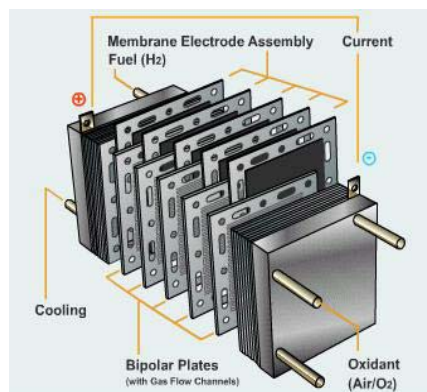
รูปที่ 39 ลักษณะช่องแบบต่างๆของแผ่นเพลตที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM (ก) Parallel (ข) Serpentine (ค) Parallel serpentine (ง) Grid (จ) Long parallel

ข้อดีของร่องบนแผ่นเพลตในแต่ละแบบจะมีข้อดีและเหมาะในการใช้งานเฉพาะ ยกตัวอย่างชนิด (ก) จะเหมาะกับการไหลเวียนของน้ำ แต่ไม่เหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องเคลื่อนที่แบบ (ข) จะเหมาะสำหรับงานที่ต้องเคลื่อนย้ายไปมา แบบ (ค) ช่องข้างที่จะสลับซับซ้อนทำให้ต้องใช้แรงดันสูงในการขับแก๊สให้ไหลทั่วแผ่น แบบ (ง) เป็นแบบที่แก๊สสามารถไหลผ่านอิเล็กโทรดได้อย่างทั่วถึงแต่อัตราการไหลของแก๊สภายในจะไม่สม่ำเสมอ ความลึกและความกว้างของร่องนั้นจะกำหนดให้น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำมีหลายชนิดเช่น คาร์บอน วัสดุผสมคาร์บอนหรือโพลิเมอร์ เหล็ก เป็นต้น

แผ่นเพลตนอกจากจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลให้กับเชื้อเพลิงแล้วยังเป็นช่วยในการต่อเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์เข้าด้วยกันเป็นชั้นๆ เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Fuel Cell Stack) ให้แน่นหนาแล้วมีความแข็งแรงดังรูปที่ 40(ก) และ (ข)



(ก)



(ข)

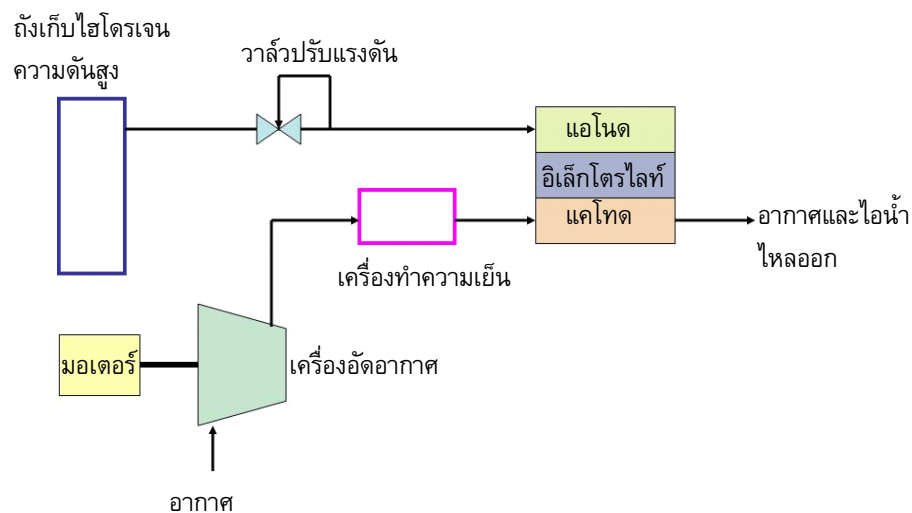
รูปที่ 40 ส่วนประกอบของ Fuel cell stack (ที่มา www.sglcarbon.com/sgl_t)

● ระบบแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง

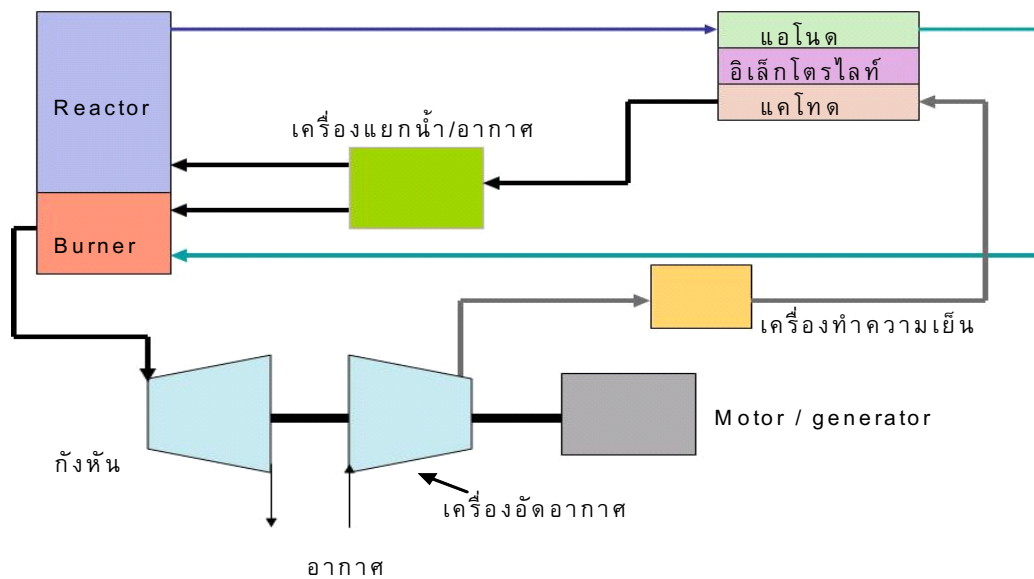
แรงดันที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นระบบขนาดใหญ่หรือขนาดเล็กเป็นปัจจัยอีกข้อหนึ่งที่มีผลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจากตัวเซลล์ ในระบบแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบด้วยถังเก็บไฮโดรเจนแรงดันสูงซึ่งจะถูกควบคุมแรงดันด้วยวาล์วเพื่อจ่ายไปยังหัวแอดในอัตราที่เหมาะสม ทางด้านหัวแคโทดจะถูกป้อนด้วยอากาศที่มาจากเครื่องอัดอากาศซึ่งใช้กำลังการขับเคลื่อนจากมอเตอร์ไฟฟ้า ดังนั้นจะต้องมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์ตลอดโดยจะใช้ไฟฟ้าจากตัวของเซลล์เชื้อเพลิงเองเช่น ในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีพลังงานไฟฟ้า 100

กิโลวัตต์ พลังงานที่ต้องใช้ขับเคลื่อนนั้นจะใช้ไปประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นระบบที่มีข้อเสีย ในจุดนี้ดังรูปที่ 41

การแก้ไขปัญหาพลังงานสูญเสียในการอัดอากาศในระบบจัดการแรงดันคือการใช้ รี-ฟอร์มเมอร์ (Reformer) ซึ่งเป็นกระบวนการสกัดเชื้อเพลิงที่มีไฮโดรเจนผสมอยู่ เช่น ไฮโดรคาร์บอนและมีเทน เป็นต้น ในรูปที่ 42 เป็นระบบที่นำเอาน้ำหรือไอน้ำซึ่งเป็นของเสียจากระบบมาเข้ากระบวนการแยกไฮโดรเจนสำหรับเป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ของเสียที่ได้ยังนำไปผ่านการเผาไหม้เพื่อให้เกิดแรงดันสำหรับปั่นกังหันที่ใช้ในกระบวนการอัดอากาศในระบบ ในช่วงแรกจะใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนเพื่ออัดอากาศแต่หลังจากระบบทำงานสมบูรณ์แล้วมอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแทน ระบบการรีฟอร์มเมอร์ ถือว่าเป็นระบบที่มีความสมดุลสูง

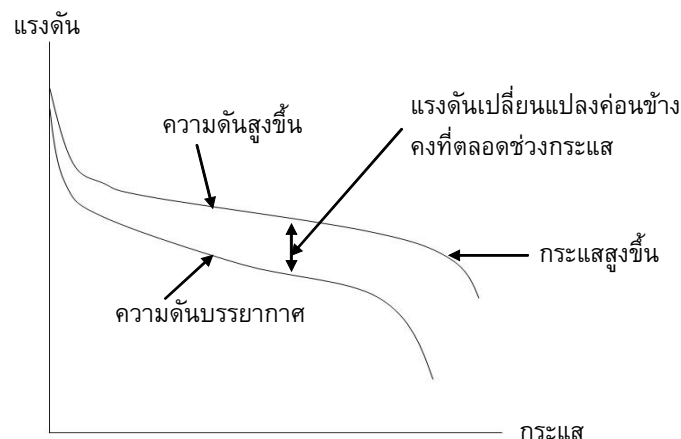


รูปที่ 41 ระบบแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 42 ระบบแรงดันแบบปรีฟอร์มเมอร์

แรงดันนอกจากจะเป็นตัวส่งเชื้อเพลิงไปยังส่วนต่างๆ ของระบบแล้วยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลถึงพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมาอีกด้วย โดยถ้าต้องการให้มีพลังงานไฟฟ้าออกมามากขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการทางไฟฟ้า สามารถทำได้โดยเพิ่มแรงดันในการขับเคลื่อนเชื้อเพลิงไปยังเซลล์เชื้อเพลิง ดังเห็นได้จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีแรงดันเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันในรูปที่ 43



รูปที่ 43 ลักษณะของแรงดันที่มีผลต่อพลังงานไฟฟ้า

- การประยุกต์ใช้งาน

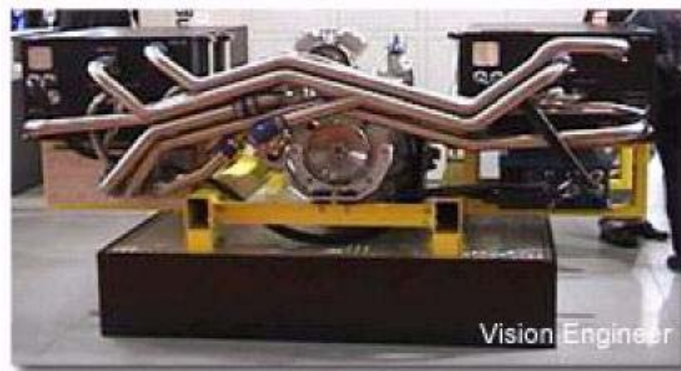
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนนี้ถือว่าการนำมาประยุกต์ใช้งานมากที่สุดเพราะสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 12 วัตต์ จนถึง 250 กิโลวัตต์ รวมไปถึงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่สูงและอุณหภูมิในการทำงานที่ค่อนข้างต่ำจนสามารถนำมาใช้ในที่อยู่อาศัยได้ ในปัจจุบันเริ่มมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมรถยนต์มากขึ้น เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและไม่ต้องใช้พลังงานจากน้ำมันแต่จะใช้พลังงานที่ได้จากไฮโดรเจนกับออกซิเจนแทนเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ตัวอย่างที่มีการนำเอาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมาใช้งานเช่น แหล่งพลังงานไฟฟ้าในที่อยู่อาศัย แหล่งพลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถยนต์หรือรถบัส เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 44 (ก) ถึง (ค)

2.1.2 เซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย

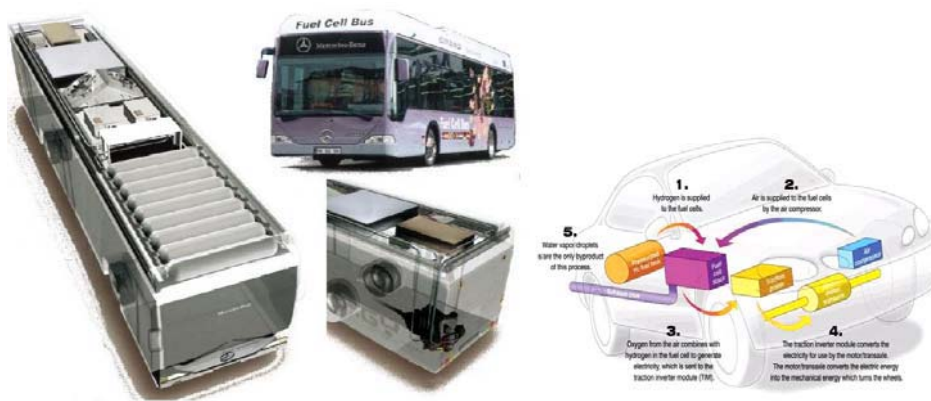
จากการศึกษาคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดทำให้สามารถสรุปได้ว่า ชนิดออกไซด์ของแข็ง และชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในยานยนต์ โรงงานอุตสาหกรรมขนาดย่อม และบ้านพักอาศัยในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเน้นศึกษาระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดนี้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 44 การประยุกต์ใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (ก) เครื่องต้นแบบขนาด 5 กิโลวัตต์ที่ผลิตโดย UTC Fuel Cell ของอเมริกา (ข) เครื่องยนต์ขับเคลื่อนสำหรับรถบัสกำลังขับเคลื่อน 205 กิโลวัตต์ (ค) การประยุกต์ใช้งานในรถบัสและรถยนต์ (ที่มา www.fuelcelltoday.com)

2.2 คุณสมบัติของพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

ค่าของแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากปฏิกิริยาทางเคมีนั้นในขณะที่ไม่มีการต่อภาระทางไฟฟ้าภายนอกแรงดันไฟฟ้าจะได้ดังสมการ

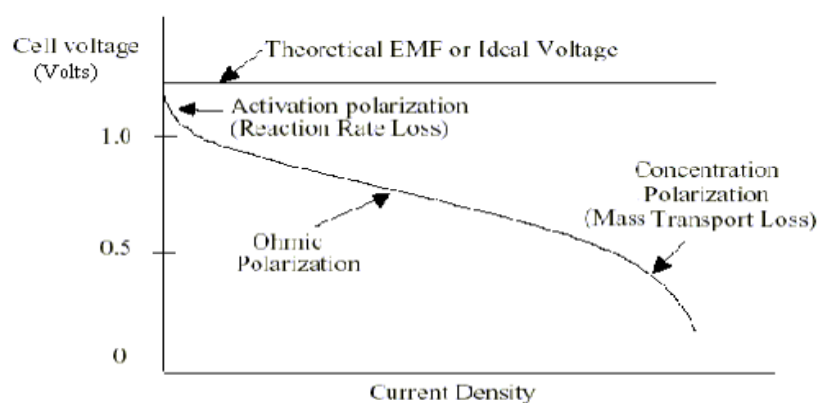
$$E = \frac{-\Delta \bar{g}f}{2F} \quad (1)$$

โดยที่ E คือ ค่าของแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

$-\Delta \bar{g}f$ คือ พลังงานที่ปล่อยออกมาจากการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ซึ่งเท่ากับ 96485 คูลอมบ์

ค่าของแรงดันที่ได้จะมีค่าโดยประมาณ 1.2 โวลต์ทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสแต่เมื่อได้ทำการต่อภาระทางไฟฟ้าภายนอกเข้ามาใช้งาน ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าลดลงซึ่งจะมีค่าแปรผกผันตามค่าของกระแสที่เพิ่มขึ้น กระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีลักษณะดังรูปที่ 45

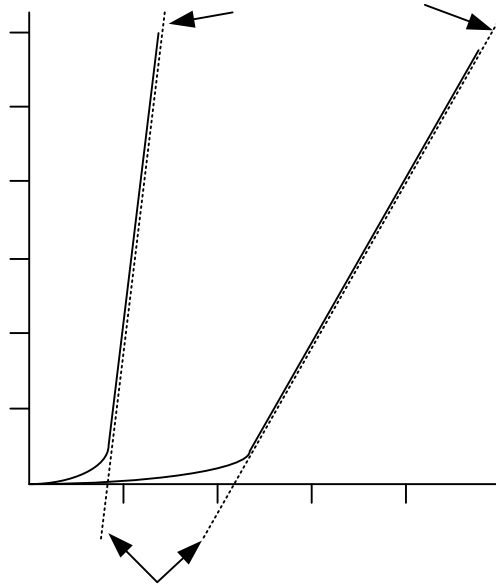


รูปที่ 45 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงทั่วไป

สาเหตุที่ทำให้ลักษณะของกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะดังรูปที่ 45 เนื่องมาจากค่าความสูญเสียภายใน (โพลาริเซชัน : Polarization) ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยหลายอย่างด้วยกันดังเช่น ปฏิกิริยาเคมี สารเคมีที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิในการทำงาน วัสดุที่ใช้ในการสร้าง ความดันก๊าซในระบบ เป็นต้น สาเหตุหลักของค่าความสูญเสียสามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะด้วยกันคือ 1) โพลาริเซชันการกระตุ้น (Activation Polarization) 2) โพลาริเซชันจากความต้านทาน (Ohmic Polarization) และ 3) โพลาริเซชันจากความเข้มข้นของเชื้อเพลิง (Concentration Polarization)

ก. โพลาริเซชันการกระตุ้น (Activation Polarization หรือ Activation Losses)

เกิดจากผลของปฏิกิริยาทางเคมีบริเวณพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองที่ทำให้แรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงไม่เป็นตามอุดมคติ และจะมีส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ตกในช่วงแรก ปฏิกิริยาบริเวณขั้วไฟฟ้าจะค่อนข้างช้าโดยสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 46 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 46 Tafel plots ความแตกต่างปฏิกิริยาเคมีช้าและเร็ว

สามารถเขียนเป็นสมการความแตกต่างของแรงดันบริเวณแรงดันความสูญเสียการกระตุ้นได้ดังนี้

$$\Delta V_{act} = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right)$$

(2)

โดยที่ ΔV_{act} = แรงดันสูญเสียจากการกระตุ้น

A = ค่าคงที่ในสมการ Tafel

i = ความหนาแน่นของกระแส (mAcm^{-2})

i_0 = ความหนาแน่นของกระแสที่เปลี่ยนแปลง (mAcm^{-2})

0.6

จากรูปที่ 46 ช่วงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงที่ปฏิกิริยาเคมีช้าแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจะลดลงมากกว่าการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เร็ว กล่าวโดยสรุปคือถ้ายิ่งเร่งให้มี

0.5

ปฏิกิริยาบริเวณขั้วไฟฟ้าเร็วเท่าไร การสูญเสียของแรงดันไฟฟ้าในส่วนของการกระตุ้นก็จะมีค่าลดลง

ข. โพลาริเซชันจากความต้านทาน (*Ohmic Polarization*)

โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเป็นความสูญเสียแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งได้รับผลกระทบมาจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการสร้างมีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าไม่ดีและความต้านทานการไหลของไอออนผ่านแผ่นเยื่ออิเล็กโทรไลต์ จากทั้งหมดสามารถเขียนเป็นสมการความสูญเสียจากความต้านทานได้ดังนี้

$$\Delta V_{Ohm} = ir \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } V_{Ohm} &= \text{แรงดันสูญเสียจากความต้านทาน} \\ i &= \text{ความหนาแน่นของกระแส (mAcm}^{-2}\text{)} \\ r &= \text{ความต้านทานของพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา (k}\Omega\text{cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

ดังนั้นการที่จะลดความสูญเสียจากความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำได้ขึ้นได้โดยการเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าให้มีค่าความนำของกระแสไฟฟ้าที่สูงเพื่อลดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน นอกจากนี้ในส่วนของเยื่อแผ่นอิเล็กโทรไลต์นั้นควรจะมีการออกแบบให้มีขนาดบางที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้เพื่อให้ไอออนของเชื้อเพลิงสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้เร็วขึ้น

ค. โพลาริเซชันจากความเข้มข้นของเชื้อเพลิง (*Concentration Polarization*)

การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่จ่ายให้กับเซลล์เชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเพลิงในขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งบริเวณขั้วแคโทด ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนก็จะมีปริมาณลดลงและที่บริเวณขั้วแอโนด ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนก็ลดลงเช่นกัน การลดลงของความเข้มข้นของสารนี้ทำให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงสูญเสียไปโดยจะเห็นได้ชัดในช่วงที่มีการดึงกระแสในปริมาณสูงสามารถเขียนให้ออกมาอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\Delta V_{trans} = m \exp(ni) \quad (4)$$

$$\text{โดยที่ } \Delta V_{trans} = \text{แรงดันสูญเสียจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิง}$$

m และ n = ค่าของการถ่ายเทมวลสาร

จากสมการ (1) ถึง (4) สามารถนำมาคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อนำมาต่อใช้งานกับภาระทางไฟฟ้าภายนอก ซึ่งมีค่าแปรผันตามขนาดของความหนาแน่นของกระแสจะได้เป็นความสัมพันธ์ตามสมการ (5)

$$V = E - \Delta V_{Ohm} - \Delta V_{Act} - \Delta V_{trans} \quad (5)$$

2.3 วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Emulator)

ในส่วนนี้เป็นการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองและวงจรเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิง รวมถึงนำเสนอวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงแนวใหม่ที่กำหนดในการงานวิจัยนี้ แบบจำลองและการเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบวงจรป้อนกลับสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้จัดการพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับการเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์ของเชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้คือ แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง และวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง โดยมีหลักการ ข้อดี-ข้อเสีย ดังต่อไปนี้คือ

- **แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง**

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นการบรรยายพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปแบบความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุต โดยอาศัยสมการคณิตศาสตร์จุดประสงค์หลักของการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น เพื่อใช้ในการออกแบบวงจรควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งโดยทั่วไปมีความเหมาะสมอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้จำลองการทำงานของระบบกำเนิดพลังงานไฟฟ้าบนคอมพิวเตอร์ เนื่องจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีความถูกต้องและความแม่นยำที่สูง อย่างไรก็ตามในการนำเอาแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังกล่าวไปใช้สร้างวงจรจริงเพื่อใช้เลียนแบบเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเป็นไปได้ยากเนื่องจากความซับซ้อนของสมการทางคณิตศาสตร์

- **วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง**

เนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้จำเป็นต้องหาวิธีการที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า ในขณะที่ยังคงความถูกต้องของพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงเอาไว้ จึงมีการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะเฉพาะใกล้เคียงกับพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงมาประกอบกันขึ้นให้ทำงานเป็นวงจรที่เลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์

เชื้อเพลิง จุดประสงค์หลักของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงคือการนำมาใช้เป็นตัวแทนของเซลล์เชื้อเพลิงจริงๆ ซึ่งมีราคาที่สูงมาก โดยเฉพาะในประเทศไทยที่ยังไม่มีการผลิตขึ้น งานวิจัยในปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้คือ วงจรเลียนแบบโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน และวงจรเลียนแบบโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทั้งสองประเภทมีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกันไปซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการใช้งาน ข้อดีของวงจรเลียนแบบที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานคือความง่าย ไม่สลับซับซ้อน หากแต่มีข้อเสียคือมีความยืดหยุ่นน้อย นั่นคือใช้สำหรับเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงได้ในขอบเขตที่จำกัด เนื่องจากพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่ใช้มีค่าที่ค่อนข้างคงที่ เป็นผลให้ช่วงของจุดทำงานของวงจรเลียนแบบดังกล่าวค่อนข้างแคบ ในทางกลับกันวงจรเลียนแบบที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้นจะมีความยืดหยุ่นสูงกว่า สามารถเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงได้หลายประเภท และช่วงจุดทำงานที่กว้างกว่า อย่างไรก็ตามวงจรเลียนแบบที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีความซับซ้อนกว่า มีราคาที่สูงกว่า

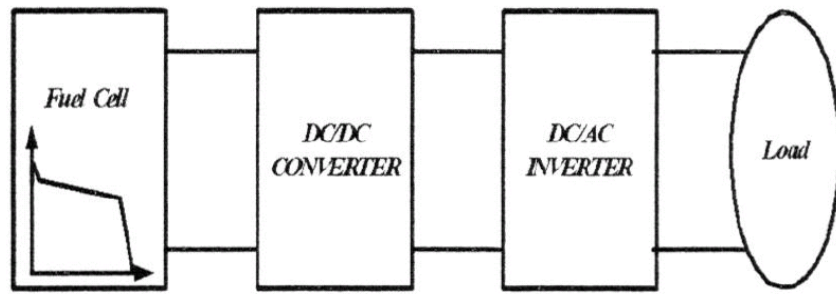
ในงานวิจัยนี้จะเน้นการสร้างวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดและมีความยืดหยุ่นสำหรับการเลียนแบบพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่กว้างที่สุด

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง

จากผลการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง มีงานวิจัยที่น่าสนใจด้วยกันสามผลงานดังนี้คือ

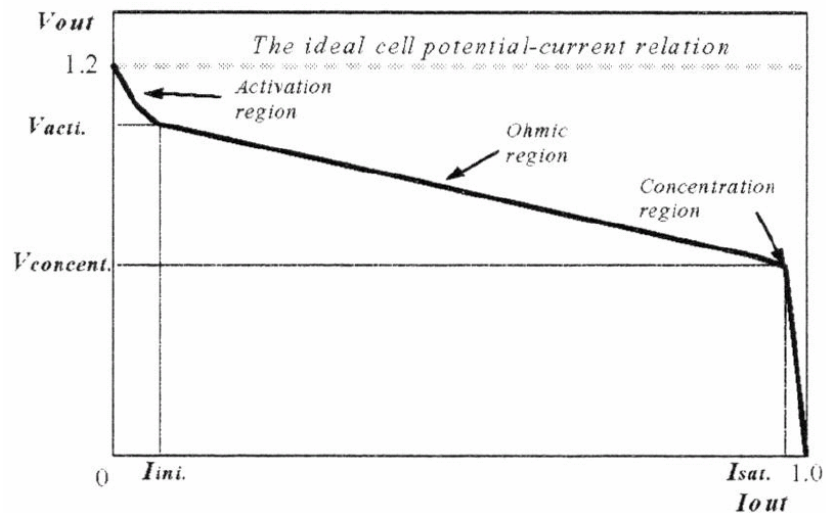
ก. งานวิจัยที่ 1

Tae Won lee และคณะ ได้เสนองานวิจัยเรื่องแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 3 กิโลวัตต์โดยใช้ตัวจำลองพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิง ระบบที่นำเสนอประกอบด้วย 3 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 47 คือ วงจรจำลองเซลล์เชื้อเพลิง, วงจรแปลงไฟตรงแบบฟูลบริดจ์ และวงจรอินเวอร์เตอร์ จุดประสงค์หลักในงานวิจัยก็คือเพื่อควบคุมพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อจ่ายไปยังโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการควบคุมทั้ง 3 ส่วนจะใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะใช้หลักการของวงจรแปลงไฟตรงแบบแปลงลง มาใช้เพื่อให้ได้ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าออกมาได้เหมือนเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยมีขนาด 3 กิโลวัตต์ แรงดันที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะอยู่ในช่วง 39 ถึง 72 โวลต์

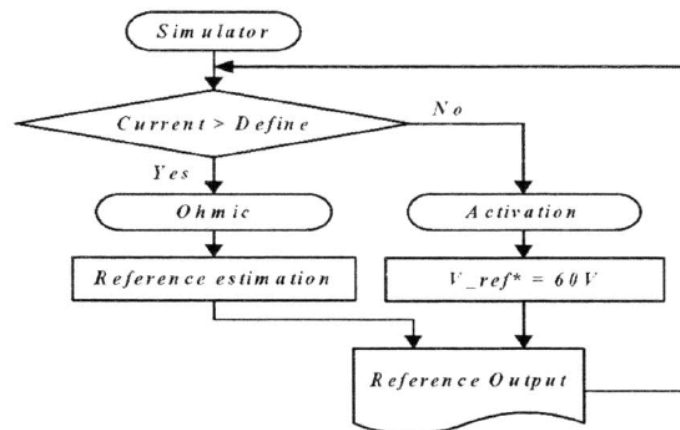


รูปที่ 47 ระบบรวมของแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงจะมีลักษณะความสัมพันธ์เฉพาะของกระแสและแรงดันดังรูปที่ 48 ซึ่งเกิดจากค่าความสูญเสียภายใน ได้แก่ Activation, Ohmic และ Concentration แต่สำหรับการออกแบบวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้จะใช้ความสูญเสียภายใน Activation และ Ohmic มาพิจารณาในการออกแบบเท่านั้น



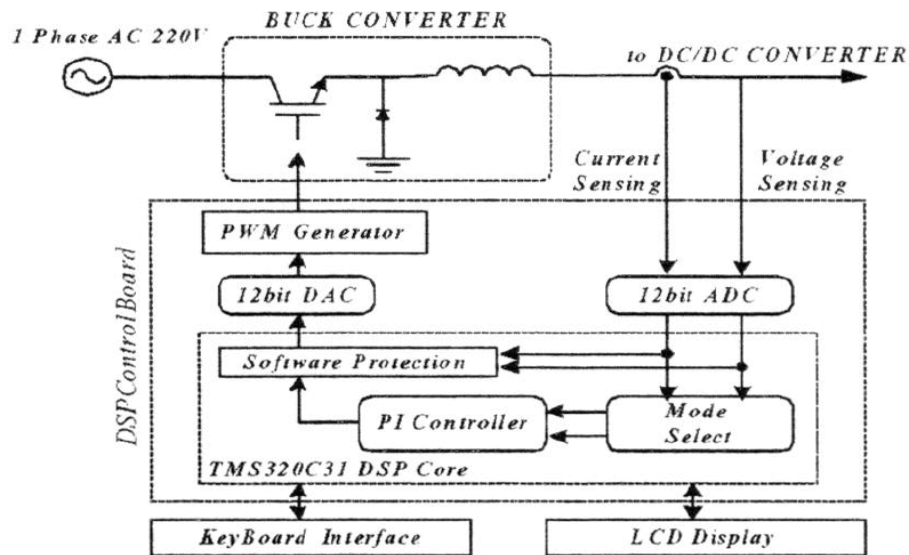
รูปที่ 48 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 49 แผนผังการทำงานของวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

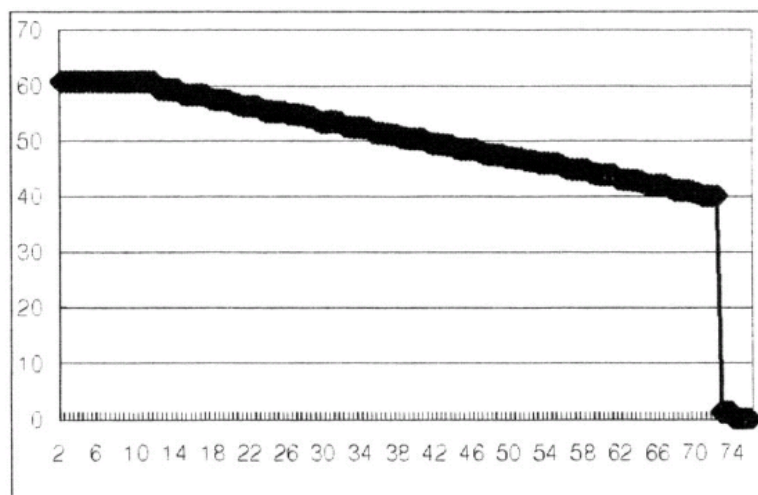
รูปที่ 49 แสดงวิธีการควบคุมวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้ ซึ่งแสดงเป็นแผนผังการทำงานของตัวโปรแกรมภายในซึ่งจะมีการกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงเช่น ค่ากระแส, แรงดัน, ความสูญเสียภายใน Activation, Ohmic และ Concentration เป็นต้น เริ่มแรกจะทำการรับค่าเข้ามาที่ได้จากการวัดกระแสและแรงดันจากนั้นจะทำการตรวจสอบว่าค่าของกระแสที่ได้นั้นมากกว่าค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้ามากกว่า การควบคุมในส่วนของ Ohmic ก็จะเริ่มทำงานทำให้แรงดันและกระแสมีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเชิงเส้น แต่ถ้ากระแสที่วัดได้ไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนด ส่วนควบคุมจะทำงานในส่วน Activation เพื่อกำหนดให้ค่าแรงดันอ้างอิงเป็น 60 โวลต์แล้วส่งกลับทำการตรวจสอบจนกว่าจะได้เข้าสู่โหมดการทำงานของ Ohmic

วงจรแปลงไฟตรงแบบแปลงลงที่ใช้จะถูกควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ให้เป็นไปตามลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 3 กิโลวัตต์ที่กำหนดไว้ข้างต้น รายละเอียดของวงจรที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 50 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่ใช้คือ TMS320C31 ส่วนของการตรวจวัดกระแสและแรงดันจะใช้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter) เพื่อแปลงสัญญาณกระแสและแรงดันในรูปแบบแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณแบบดิจิทัลและส่งไปยังตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ออกมาแล้วนำไปแปลงเป็นสัญญาณแอนะล็อกเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยมในส่วนของวงจรสร้างรูปคลื่นมอดูเลชันความกว้างพัลส์ (PWM Generator) สัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบจะนำไปขับสวิตช์ในวงจรแปลงไฟตรงแบบแปลงลง ทำให้แรงดันที่ได้ออกมามีลักษณะเหมือนเซลล์เชื้อเพลิง

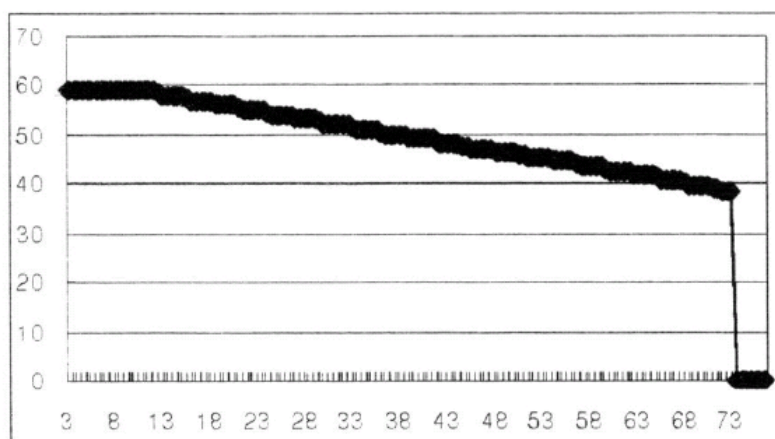


รูปที่ 50 วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ผลการทดลองที่ได้จากการจำลองในคอมพิวเตอร์กับผลที่ได้จากการทดสอบของวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 51(ก) และ (ข) แรงดันที่ได้ในช่วงของ Activation จะมีค่าประมาณ 60 โวลต์ในช่วงกระแสไหลดจาก 0 ถึง 12 แอมป์ จากนั้นแรงดันจะลดลงอยู่ในช่วงจาก 60 ถึง 39 โวลต์ ในลักษณะเชิงเส้นเมื่อกระแสไหลดเพิ่มขึ้นในช่วงของ Ohmic



(ก)

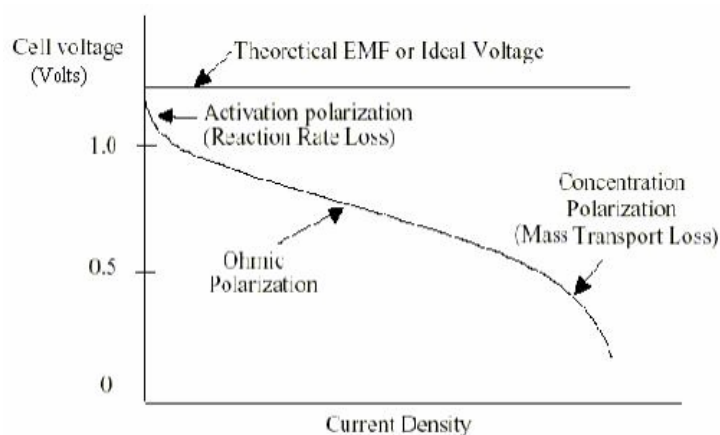


(ข)

รูปที่ 51 ผลที่ได้จากวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง
(ก) ผลที่ได้จากการจำลองบนคอมพิวเตอร์ (ข) ผลที่ได้จากการทดลองจริง

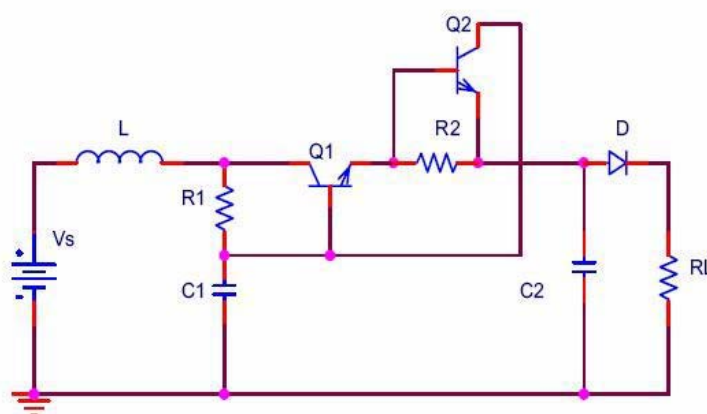
ข. งานวิจัยที่ 2

S. Yuvarajan และ Dachuan Yu ได้เสนองานวิจัยเรื่องคุณลักษณะและการจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยงานวิจัยจะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามาใช้เลียนแบบพฤติกรรมและสภาวะการทำงานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.2 กิโลวัตต์ เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมีของไฮโดรเจนกับออกซิเจนทำงานภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ ลักษณะเฉพาะของแรงดันและกระแสแสดงดังรูปที่ 52 ซึ่งจะเห็นว่า มีลักษณะที่แปรผันที่ไม่เป็นเชิงเส้น ปัจจัยที่มีผลต่อการแปรผันของแรงดันนั้นเกิดมาจากค่าความสูญเสียภายในซึ่งได้แก่ Activation Polarization, Ohmic Polarization และ Concentration Polarization (Mass Transportation Losses)



รูปที่ 52 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน 1 เซลล์

วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น ตัวต้านทาน, ทรานซิสเตอร์ (BJT), ตัวเหนี่ยวนำ, ไดโอด และ ตัวเก็บประจุ เป็นต้น พฤติกรรมเฉพาะตัวของอุปกรณ์เหล่านี้นำมาใช้แทนสภาวะลพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิง รูปที่ 53 แสดงรายละเอียดของวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM



รูปที่ 53 รูปวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ใช้แทนสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

- **Activation Polarization**

ในส่วนนี้เป็นสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของอิเล็กโทรดเพื่อที่จะได้อิเล็กตรอนออกมา โดยปฏิกิริยานี้จะเริ่มและดำเนินไปค่อนข้างช้า เป็นสาเหตุที่ทำให้มีการสูญเสียเกิดขึ้น ส่งผลให้แรงดันในตัวเซลล์เชื้อเพลิงลดลง จากลักษณะของพฤติกรรมในช่วง Activation จะเห็นได้ว่าไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่จะใช้แทนสภาวะการทำงานดังกล่าว เนื่องจากไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีชั้นรอยต่อพีเอ็น (P-N Junction) นั่นคือในการที่ไดโอดจะนำกระแสไฟฟ้าได้นั้นจะต้องมีแรงดันตกคร่อมไดโอดมากกว่าแรงดันเริ่มเปลี่ยน (Threshold Voltage) ค่าหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ไดโอดมีคุณสมบัติเป็นตัวนำเป็นและแรงดันเริ่มเปลี่ยนดังกล่าวคือสาเหตุที่ทำให้มีแรงดันส่วนหนึ่งหายไปในตัวของไดโอด

- **Ohmic Polarization**

ความสูญเสียภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิงที่เกิดจากมีความต้านการไหลของอิเล็กตรอนที่บริเวณอิเล็กโทรดไปจนถึงการเชื่อมต่อกับระบบภายนอกและยังรวมถึงความต้านทานการไหล

ของโปรตอนเคลื่อนที่ผ่านชั้นอิเล็กโทรไลต์ด้วย ความต้านทานของไดโอดจึงเป็นองค์ประกอบที่สามารถนำมาแทนสภาวะการทำงานนี้ได้ ซึ่งทำให้ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตและกระแสของเซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะแปรผกผันที่เป็นเชิงเส้น

● Concentration Polarization

สภาวะของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงนี้เกิดจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่จ่ายให้เซลล์เชื้อเพลิงลดลงที่บริเวณอิเล็กโทด เมื่อเชื้อเพลิงได้ถูกใช้ไปจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั้งขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงอย่างรวดเร็ว ในกรณีนี้ได้นำเอาทรานซิสเตอร์สองตัว คือ Q1 และ Q2 มาประกอบกันเป็นวงจรจำกัดกระแส โดยที่ใช้ตัวต้านทาน R2 เป็นตัวตรวจจับกระแสเอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงว่าอยู่ในช่วงบริเวณปกติหรือไม่ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน R2 มากกว่าค่าที่กำหนดไว้ ทรานซิสเตอร์ Q2 จะนำกระแสส่งผลให้แรงดันที่ขาเบส Q1 ลดลง เป็นผลให้แรงดันออกที่ขาเอมิเตอร์ลดลง

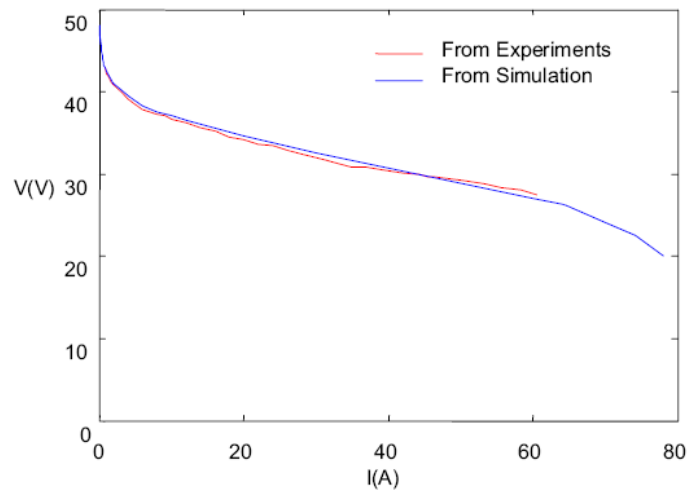
● The Charge Double Layer

เป็นผลมาจากการแพร่ (Diffusion) และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแคโทดและอิเล็กโทรไลต์ ในเซลล์เชื้อเพลิงจะมีชั้นที่เรียกว่า Charge Double อยู่บริเวณรอบๆ แคโทด ซึ่งมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของตัวเก็บประจุ นั่นคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลตัวอย่างฉับพลัน แรงดันเอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงจะใช้เวลาช่วงหนึ่งในการเข้าสู่จุดสถานะคงตัว

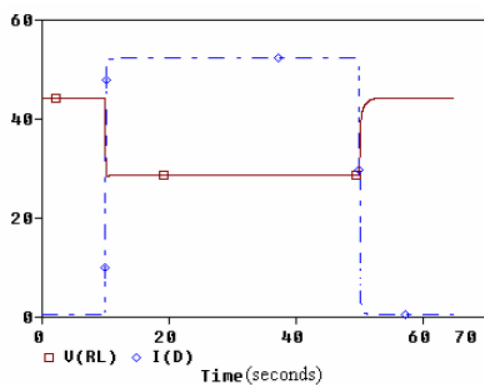
● Undershoot in Stack Voltage

ผลการตอบสนองของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณสูงจะทำให้อัตราการไหลของอากาศสูงขึ้นประมาณ 5 วินาทีส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แรงดันออกมาต่ำกว่าแรงดันอุดมคติ พฤติกรรมนี้จะเหมือนกับตัวเหนี่ยวนำซึ่งสามารถนำมาใช้แทนสภาวะการทำงานนี้ได้

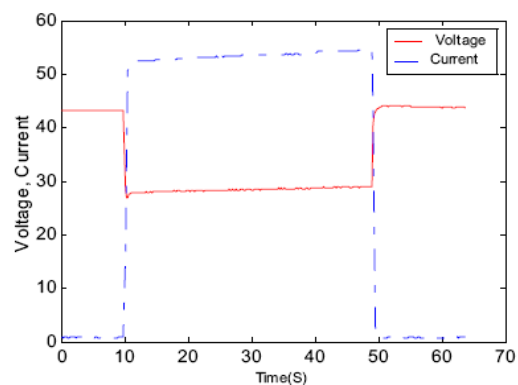
โดยวงจรจำลองจะเลียนแบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดเป็นโมดูลที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ถึง 1.2 กิโลวัตต์ภายใต้แรงดัน 72 psi แรงดันสามารถแปรผันได้ตั้งแต่ 43 โวลต์ ถึง 26 โวลต์และมีค่าของกระแสไฟฟ้าปกติที่ 46 แอมแปร์ ทดสอบกับภาระไฟฟ้าที่ปรับค่าได้จาก 0.5 โอห์ม – 100 โอห์ม การทดสอบเปรียบเทียบผลโดยวงจรจำลองเซลล์เชื้อเพลิงกับการทดสอบกับเซลล์เชื้อเพลิงจริงแสดงดังรูปที่ 54 นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบกับโหลดในกรณีที่โหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเพื่อเปรียบเทียบผลทางพลวัต ในที่นี้จะทดสอบกับโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 108 โอห์มเป็น 0.55 โอห์มซึ่งจะเห็นได้ว่าให้ผลออกมาที่เหมือนกันดังรูปที่ 55



รูปที่ 54 การเปรียบเทียบผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิง



(ก)



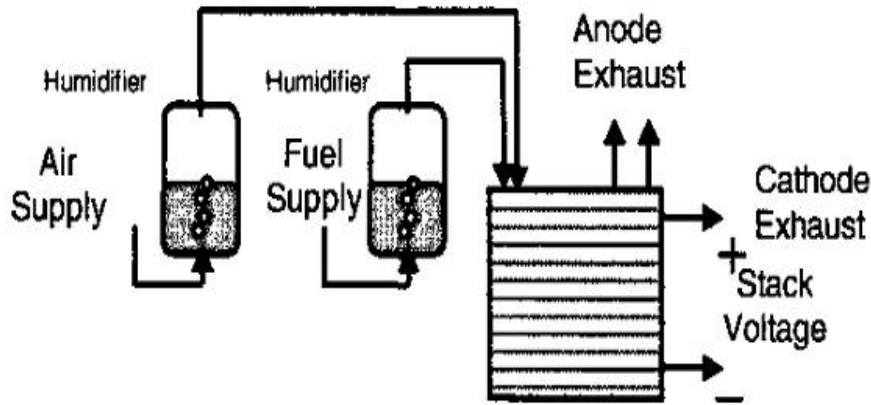
(ข)

รูปที่ 55 ผลการเปรียบเทียบสภาวะการเปลี่ยนแปลงของโหลด (ก) ผลจากแบบจำลอง
(ข) ผลจากการทดลองจริง

ค. งานวิจัยที่ 3

Parviz Famouri และคณะ เสนอวงจรจำลองปฏิกิริยาเคมีภายในของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM โดยจะจำลองการทำงานในส่วนต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิงเช่น ขั้วแคโทด, ขั้วแอโนด, เชื้อเพลิง, อากาศ เป็นต้น แล้วนำส่วนที่จำลองมาประกอบรวมกันเป็นวงจรจำลองการทำงาน ของเซลล์เชื้อเพลิง มีประโยชน์ที่จะนำมาออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM และการวิเคราะห์ ทดสอบกับภาระโหลดกับตัวเซลล์เชื้อเพลิงทำให้สามารถนำมาออกแบบระบบควบคุมพลังงาน

ไฟฟ้าเพื่อใช้กับที่พักอาศัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการในการจำลองจะใช้สมการทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยซึ่งจะแทนสภาวะการทำงานต่างๆ ภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิงดังรูปที่ 56



รูปที่ 56 โครงสร้างและองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง

การจำลองสภาวะการทำงานในตัวเซลล์เชื้อเพลิงจะให้ข้อมูลหุภูมิการทำงานอยู่ที่ 350 องศาเซลเซียสและแรงดันอยู่ที่ 101 kPa เชื้อเพลิงที่จ่ายไปยังขั้วแอโนดและแคโทดจะมีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$P_{anode} = P_{H_2} + P_{H_2O} \quad (6)$$

$$P_{cathode} = P_{O_2} + P_{H_2O} + P_{N_2} \quad (7)$$

จะเห็นได้ว่าที่บริเวณขั้วแอโนดจะได้รับเชื้อเพลิงเป็นไฮโดรเจนและไอน้ำเข้ามาและบริเวณขั้วแคโทดจะได้รับอากาศ, ไนโตรเจนจากอากาศ, ไอน้ำ นอกจากนี้แล้วยังสามารถคำนวณแรงดันที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงที่เป็นแบบ Stack ได้จากสมการ (8) นี้

$$V_{stack} = N \left[E_o + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) - ZI - h_e - h_o \right] \quad (8)$$

ปฏิกิริยาทางเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงที่เข้ามายังอิเล็กโทรดทั้งสองจะสามารถนำมาจำลองได้เช่นกันซึ่งจะเป็นดังสมการดังต่อไปนี้

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด

$$\left(\frac{V_a}{RT} \right) \frac{dP_{H_2}}{dt} = m_{H_2_in} - (\rho_{H_2} UA)_{out} - \frac{1}{2F} \quad (9)$$

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด

$$\left(\frac{V_c}{RT} \right) \frac{dP_{O_2}}{dt} = m_{O_2_in} - (\rho_{O_2} UA)_{out} - \frac{1}{4F} \quad (10)$$

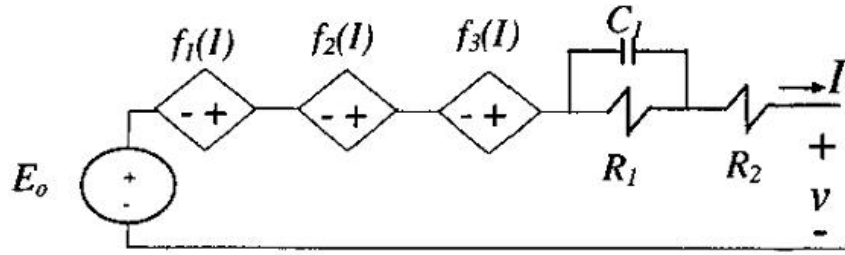
อัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ไหลเข้าเซลล์เชื้อเพลิงทั้งขั้วแอโนดและแคโทดเป็นดังนี้

$$m_{in} = \rho K \Delta P = \rho UA \quad (11)$$

โดยที่ ΔP เป็นความดันที่หายไปส่วนหนึ่งจากเครื่องทำความร้อนไปยังเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแรงดันที่เครื่องทำความร้อนบริเวณแคโทดและแอโนดสามารถแสดงได้ดังสมการ (12)

$$\frac{dP_h}{dt} = \frac{RT_h}{V_h} (m_{ih} - m_{oh}) \quad (12)$$

วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 57 ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบของวงจรที่ไม่เป็นเชิงเส้น ($f_1(I), f_2(I), f_3(I)$), วงจร RC และความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 57 วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

โดยวงจรที่ไม่เป็นลักษณะเชิงเส้นจะมีสมการที่สามารถอธิบายได้ดังนี้

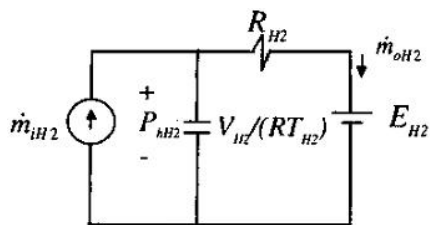
$$f_1(I) = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (13)$$

$$f_2(I) = \frac{-RT}{2F} \ln \left(\frac{I}{I_o} \right) \quad (14)$$

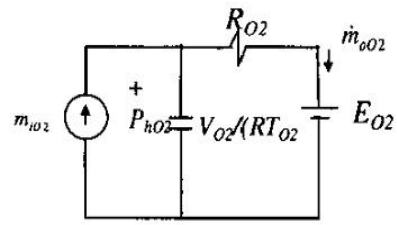
$$f_3(I) = \frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{\max}} \right) \quad (15)$$

จากสมการ (12) สามารถนำมาพัฒนาเป็นวงจรจำลองการทำงานของอัตราของมวลเชื้อเพลิงและอากาศของแหล่งจ่ายจากเครื่องทำความร้อนที่จ่ายให้แก่เซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่

58



(ก)

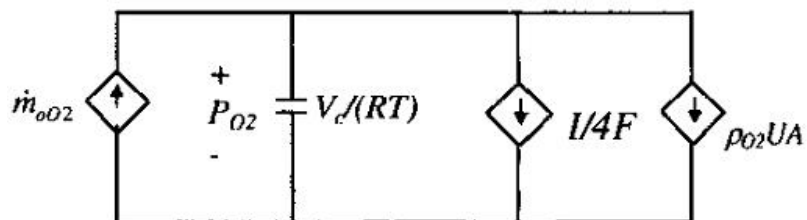


(ข)

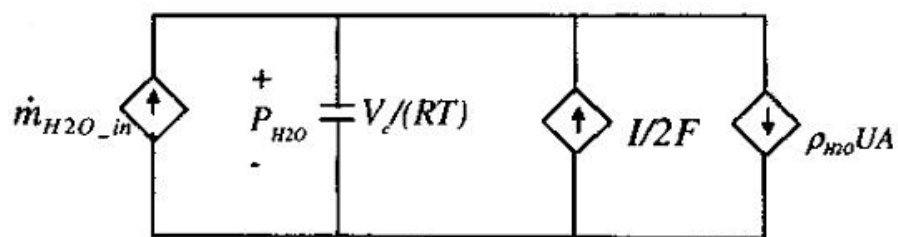
รูปที่ 58 (ก) เชื้อเพลิง (ข) อากาศของวงจรจำลองเครื่องทำความร้อน

วงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกสร้างขึ้นตามสภาวะการทำงานต่างๆ โดยใช้โปรแกรม PSpice ดังรูปที่ 60 ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นถึงแรงดันที่ออกมาในระยะเวลาของความไม่มีเสถียรภาพของแรงดันอยู่ประมาณ 20 วินาที ดังรูปที่ 61 โดยใช้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงภายใน 100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังได้เสนอลักษณะของอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อแรงดันและกระแสที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ดังรูปที่ 62

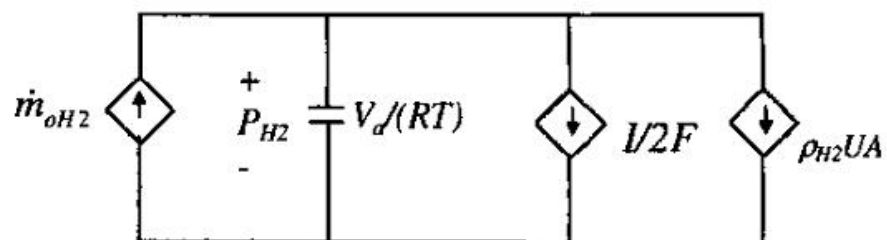
วงจรจำลองที่ได้จากสมการ (8) และ (9) แสดงดังรูปที่ 59 ซึ่งจะจำลองการทำงานของมวลของออกซิเจน, ไฮโดรเจน และน้ำ



(ก)

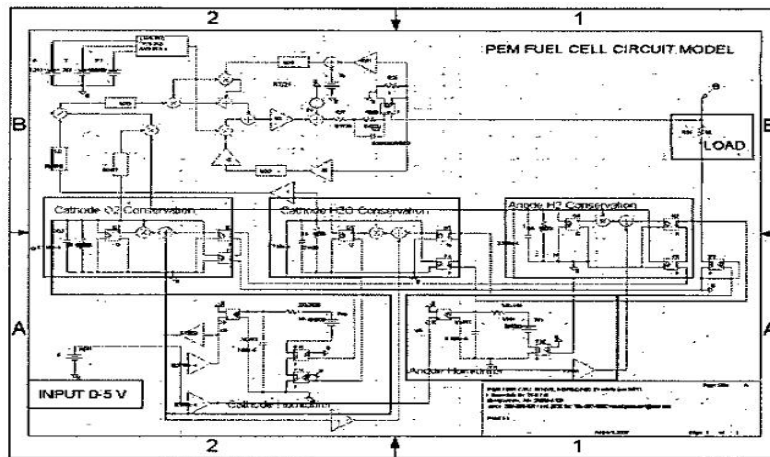


(ข)

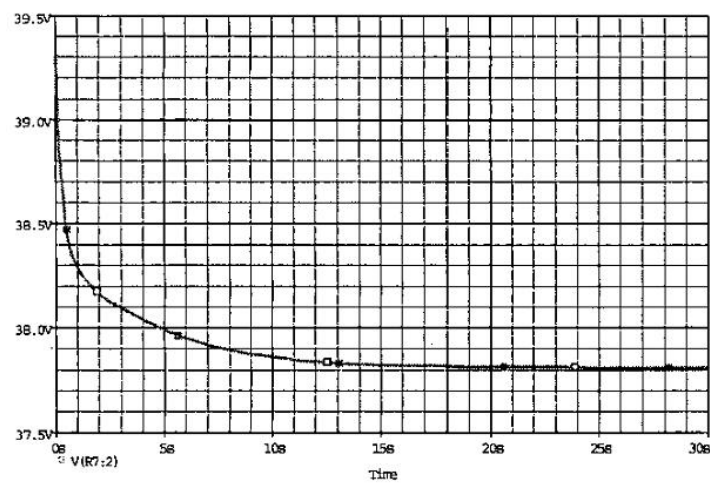


(ค)

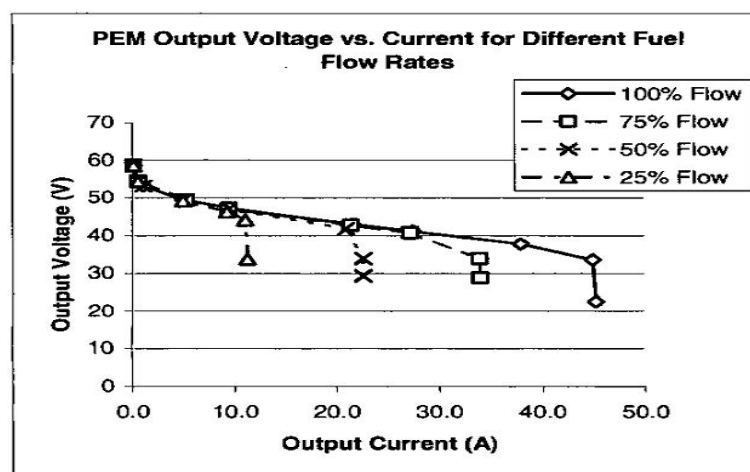
รูปที่ 59 วงจรจำลองการทำงานของ (ก) ออกซิเจน (ข) น้ำ (ค) ไฮโดรเจน



รูปที่ 60 การออกแบบวงจรจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้โปรแกรม PSpice



รูปที่ 61 ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1.6 กิโลวัตต์



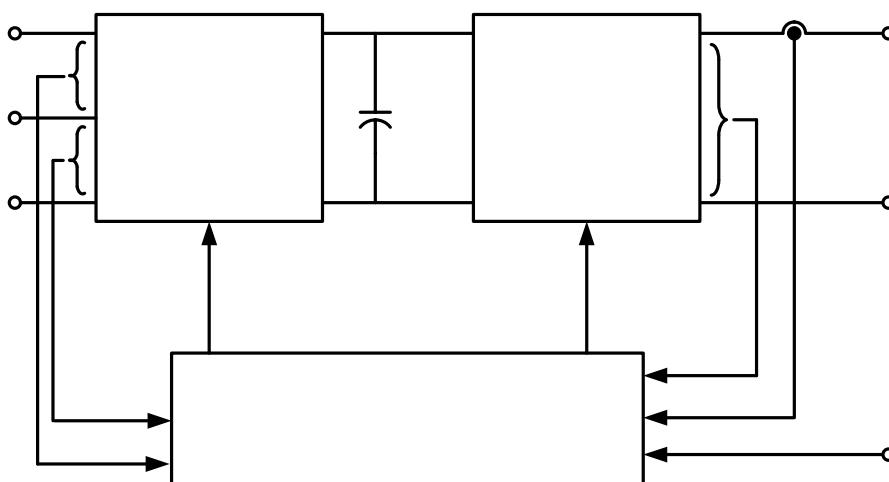
รูปที่ 62 ความแตกต่างของแรงดันที่มีผลต่อกระแสและอัตราการไหลของเชื้อเพลิง

2.3.2 วงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้ศึกษามานี้ ยัง มีจุดด้อยอยู่หลายประการด้วยกันกล่าวคือ ในงานวิจัยที่ 1 นั้นแรงดันสูงสุดมีค่าประมาณ 311 โวลต์ในขณะที่แรงดันไฟตรงขาออกของวงจรแปลงไปกระแสตรงแบบแปลงลงมีค่าในช่วง 20 ถึง 50 โวลต์ ซึ่งหมายความว่ารอบทำงานของวงจรแปลงไปกระแสตรงแบบแปลงลงจะมีค่า ในช่วง 0.06 ถึง 0.16 ตามหลักการแล้วที่รอบทำงานในช่วงดังกล่าวถือได้ว่ามีค่าต่ำมาก ผลที่ ตามมาคือประสิทธิภาพของวงจรโดยรวมจะมีค่าต่ำ รวมถึงคลื่นรบกวนที่เกิดจากการสวิตช์ซึ่งจะมี ค่าค่อนข้างสูงและรบกวนสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยที่ 2 นั้นอาศัยพฤติกรรมของอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่มีใช้อยู่โดยทั่วไป ข้อดีคือง่ายหากแต่มีข้อเสียคือไม่มีความยืดหยุ่นใน การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของวงจร เช่น หากต้องการเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่ อัตราเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน จำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบและหาค่าของอุปกรณ์พื้นฐานต่าง ๆ ใหม่ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ยุ่งยากมากในทางปฏิบัติ ส่วนงานวิจัยที่ 3 นั้นข้อดีคือมีความแม่นยำสูง สามารถเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่างถูกต้อง หากแต่มีข้อเสียคือมีความซับซ้อน อย่างมากในขั้นตอนการทำให้เป็นวงจรใช้งานจริง

งานวิจัยจึงนำเสนอวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่แก้ไขข้อเสียจากงานวิจัย ทั้งสาม โดยมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีขึ้นเนื่องจากใช้รอบทำงานที่สูงขึ้น มีความ ยืดหยุ่นของจุดทำงานที่ดีขึ้น และไม่มีความซับซ้อนในการสร้างวงจรขึ้นใช้งานจริง แผนภาพ บล็อกอย่างง่ายของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 63 ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนหลักๆ ดังนี้คือ ส่วนภาคกำลัง และส่วนควบคุม สำหรับภาคกำลัง นั้นแบ่งออกเป็นสองวงจรย่อยคือ วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง (Buck Rectifier) และวงจร แปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง (Buck Converter) วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงจะทำหน้าที่ ในการแปลงแรงดันกระแสสลับสามเฟสให้เป็นแรงดันกระแสตรงที่ปรับค่าได้ เหตุผลที่ใช้อินพุต เป็นแรงดันสามเฟสนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการจ่ายพลังงานที่สูงขึ้นและเพื่อลดแรงดัน ระบาย (Ripple Voltage) กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟส ซึ่งม ีความถี่ของแรงดันระลอกขนาดเท่ากับ สองเท่าของความถี่มูลฐาน นั่นคือ 100 Hz สำหรับ ประเทศในแถบเอเชียและยุโรป และ 120 Hz สำหรับประเทศในแถบอเมริกาเหนือ ในขณะที่ วงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสจะมีความถี่ของแรงดันระลอกเท่ากับ หกเท่าของความถี่มูลฐาน นั่นคือ 300 Hz สำหรับประเทศในแถบเอเชียและยุโรป และ 360 Hz สำหรับประเทศในแถบ อเมริกาเหนือ ดังนั้นหากใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเท่ากัน แรงดันระลอกในวงจรเรียงกระแสแบบ สามเฟสจะมีขนาดต่ำกว่าในวงจรเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟสประมาณสามเท่า วงจรเรียงกระแส แบบแปลงลงนำมาใช้ในการเลียนแบบพฤติกรรมของแรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงปริมาณและความดันเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) ที่เซลล์เชื้อเพลิงได้รับ ในส่วนของวงจร แปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลงนั้น นำมาใช้ในการเลียนแบบพฤติกรรมของแรงดันเอาต์พุตที่

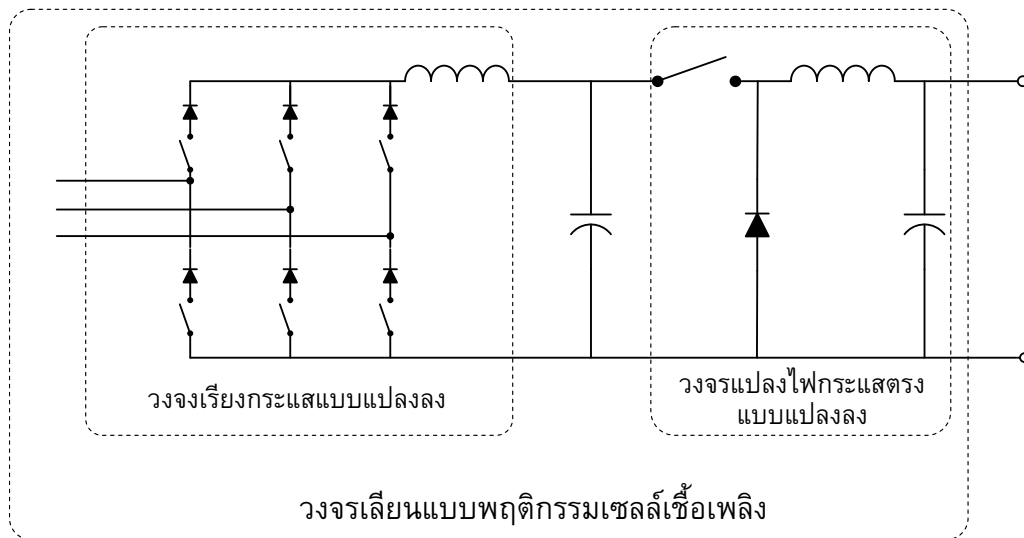
เป็นไปตามลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน (V-I Characteristic) ส่วนสุดท้ายคือวงจรควบคุม ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงและวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง โดยการส่งสัญญาณสวิตซ์ซึ่งที่เหมาะสมไปยังอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง (Power Semiconductor Device) ของวงจรทั้งสองเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเป็นไปตามที่ต้องการและรักษาระดับให้คงที่ด้วยการป้อนกลับแรงดันและกระแสเอาต์พุตกลับมายังวงจรควบคุม จังหวะการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงจะควบคุมให้สมวาร (Synchronous) กับระบบแรงดันสามเฟสโดยการวัดแรงดันสายถึงสายทางด้านอินพุต เนื่องจากในวงจรควบคุมระบบเซลล์เชื้อเพลิงจริงนั้นจะมีการรับคำสั่งจากภายนอกในการเพิ่มลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมา ดังนั้นวงจรควบคุมของวงจรเลียนแบบจึงมีส่วนการรับสัญญาณคำสั่งดังกล่าว ตัวอย่างเช่น แรงดันของไฮโดรเจน อุณหภูมิการทำงาน (Operation Temperature) เป็นต้น โดยคำสั่งเหล่านี้จะถูกปรับให้อยู่ในสเกลที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้กับวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่น่าเสนอ



รูปที่ 63 แผนภาพบล็อกของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่น่าเสนอ

ก. ภาคกำลังของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่น่าเสนอ

ภาคกำลังของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่น่าเสนอประกอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสองวงจรคือ 1) วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงและ 2) วงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 64



รูปที่ 64 ส่วนประกอบในภาคกำลังของวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ

- วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง

วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงในวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนออาศัยการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งกำเนิดกระแส (Current Source Inverter) ในลักษณะที่เป็นวงจรเรียงกระแส กล่าวคือมีการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากด้านกระแสตรงไปด้านกระแสสลับ วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงประกอบด้วยตัวนำสวิตช์ แต่ละสวิตช์ต่ออนุกรมกับไดโอดเพื่อป้องกันการไหลกลับทิศของกระแส ขนาดของแรงดัน V_{DC} สามารถควบคุมได้ด้วยรอบทำงานของสวิตช์ทั้งหก ตัวเหนี่ยวนำ L_{BR} ทำหน้าที่ลดขนาดของกระแสระลอก (Ripple Current) และเพิ่มค่าคงที่เวลา (Time Constant) ให้มีค่านานขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับค่าคงที่เวลาในการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตของภาคควบคุมของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

- วงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง

วงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลงทำหน้าที่แปลงแรงดันเอาต์พุต V_{FC} ให้สอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันเอาต์พุต (ยกตัวอย่างเช่นในรูปที่ 62) ซึ่งสามารถดำเนินการได้เป็นอย่างดีเนื่องจากวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลงมีการตอบสนองที่รวดเร็ว

ข. ภาคควบคุมวงจรเลียนแบบพฤติกรรมเซลล์เชื้อเพลิงที่นำเสนอ

ส่วนควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนควบคุมวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงและส่วนควบคุมวงจรแปลงไฟกระแสตรงแบบแปลงลง

- ส่วนควบคุมวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง

การออกแบบวงจรควบคุมในส่วนนี้เริ่มต้นจากการหาแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ การสร้างแบบจำลองสวิตช์ จากนั้นใช้ตัวปฏิบัติการเฉลี่ยหาแบบจำลองเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง จากนั้นแปลงแบบจำลองเฉลี่ยในพิกัด abc เป็นแบบจำลองเฉลี่ยในพิกัด dqo จากวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงดังรูปที่ 65 ด้านกระแสสลับเป็นการควบคุมแบบแรงดันในขณะที่ด้านกระแสตรงเป็นการควบคุมแบบกระแส สวิตช์ทั้ง 6 ยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทิศทางเดียวในขณะที่ยอมให้แรงดันตกคร่อมได้สองทิศทางคือทั้งบวกและลบ หลักการทำงานของสวิตช์มีข้อกำหนดดังนี้คือ

$$s_{ak} + s_{bk} + s_{ck} = 1; \quad k \in \{p, n\}$$

โดยที่ s_{ak} s_{bk} และ s_{ck} มีค่าเป็น 0 เมื่อเปิด และเป็น 1 เมื่อปิด

นั่นคือ ณ เวลาหนึ่ง อย่างน้อยหนึ่งในสามสวิตช์ต้องปิดเพื่อที่จะสร้างเส้นทางการไหลของกระแสไหลกลับ หากกำหนดให้

$$s_a = s_{ap} - s_{an}$$

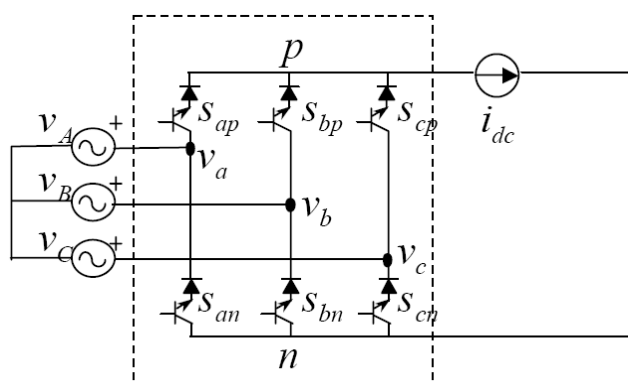
$$s_b = s_{bp} - s_{bn}$$

$$s_c = s_{cp} - s_{cn}$$

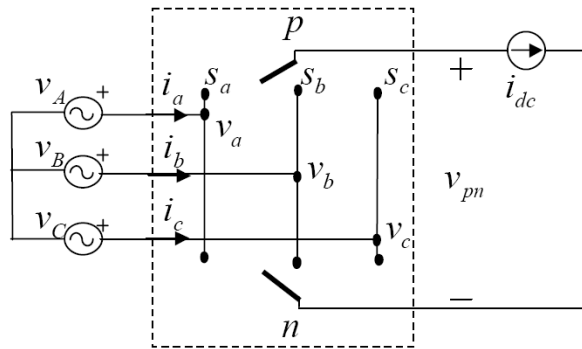
ดังนั้น

$$s_a + s_b + s_c = s_{ap} + s_{bp} + s_{cp} - (s_{an} + s_{bn} + s_{cn}) = 1 - 1 = 0$$

วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงจึงสามารถแทนได้ด้วยแบบจำลองสวิตช์ดังรูปที่ 66

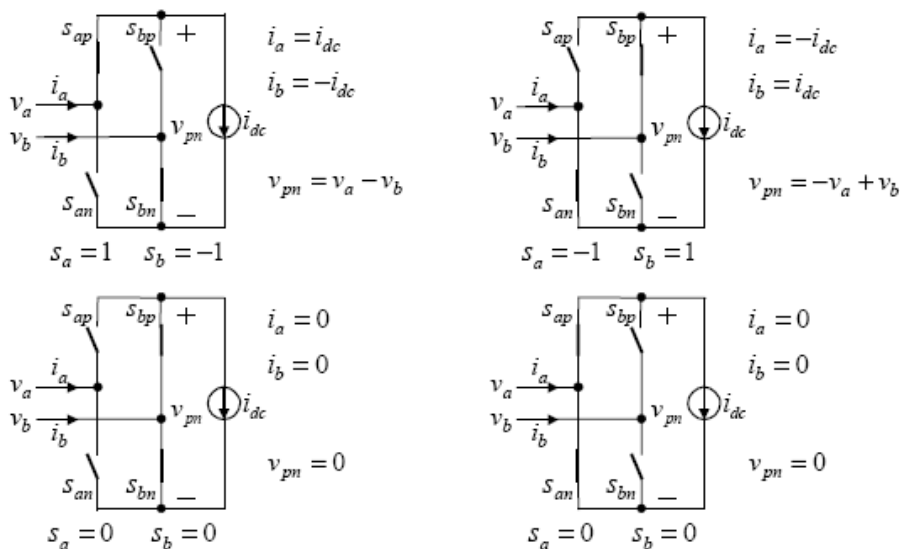


รูปที่ 65 วงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง



รูปที่ 66 แบบจำลองสวิตช์ชิ่งของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง

รูปที่ 67 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันทั้งทางด้านกระแสลบและกระแสตรงของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงแบบหนึ่งเฟส ซึ่งเมื่อรวมเอาสวิตช์ที่ห้าและหกเข้าด้วยกันแล้วก็จะสามารถสรุปการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงเป็นตารางความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 3



รูปที่ 67 สถานะการปิด-เปิดของสวิตช์และความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของสวิตช์กับกระแสและแรงดัน

p	n	s_a	s_b	s_c	i_a	i_b	i_c	v_{pn}
a	a	0	0	0	0	0	0	0
a	b	1	-1	0	i_{dc}	$-i_{dc}$	0	$v_a - v_b$
a	c	1	0	-1	i_{dc}	0	$-i_{dc}$	$v_a - v_c$
b	a	-1	1	0	$-i_{dc}$	i_{dc}	0	$-v_a + v_b$
b	b	0	0	0	0	0	0	0
b	c	0	1	-1	0	i_{dc}	$-i_{dc}$	$v_b - v_c$
c	a	-1	0	1	$-i_{dc}$	0	i_{dc}	$-v_a + v_c$
c	b	0	-1	1	0	$-i_{dc}$	i_{dc}	$-v_b + v_c$
c	c	0	0	0	0	0	0	0

จากตารางที่ 3 เราสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันทั้งทางด้านกระแสสลับและกระแสตรงได้ดังนี้คือ

$$\vec{i}_{abc} = \vec{s}_{abc} \cdot i_{dc}$$

$$v_{pn} = \vec{s}_{abc}^T \cdot \vec{v}_{abc}$$

(16)

โดยที่

$$\vec{i}_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \vec{s}_{abc} = \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{ap} - s_{an} \\ s_{bp} - s_{bn} \\ s_{cp} - s_{cn} \end{bmatrix} \quad \vec{v}_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

พิจารณาวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลงที่เสนอในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 68 และสมการที่ (16) ใช้ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า เราสามารถเขียนสมการบรรยายพฤติกรรมของแบบจำลองสวิตช์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \cdot i_{dc} \quad \text{และ} \quad v_{pn} = L \frac{di_{dc}}{dt} + v_{dc}$$

$$i_{dc} = C \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{v_{dc}}{R}$$

(17)

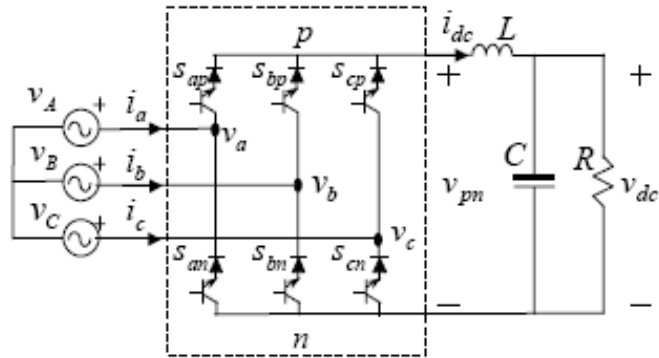
ดังนี้

$$\vec{i}_{abc} = \vec{s}_{abc} \cdot i_{dc}$$

$$\vec{s}_{abc}^T \cdot \vec{v}_{abc} = L \frac{di_{dc}}{dt} + v_{dc}$$

$$i_{dc} = C \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{v_{dc}}{R}$$

(18)



รูปที่ 68 วงจรเรียงกระแสแบบแปลงที่ใช้ในงานวิจัย

ใช้ตัวปฏิบัติการเฉลี่ยกับสมการที่ (18) เพื่อหาแบบจำลองเฉลี่ย ซึ่งสามารถแสดงได้

ดังนี้

$$\frac{1}{T} \int_{t-T}^t \vec{i}_{abc}(\tau) d\tau = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \vec{s}_{abc}(\tau) \cdot i_{dc}(\tau) d\tau$$

$$\frac{1}{T} \int_{t-T}^t \vec{s}_{abc}^T(\tau) \cdot \vec{v}_{abc}(\tau) d\tau = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t (L \frac{di_{dc}}{dt} + v_{dc}) d\tau$$

$$\frac{1}{T} \int_{t-T}^t i_{dc}(\tau) d\tau = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t (C \frac{dv_{dc}(\tau)}{dt} + \frac{v_{dc}(\tau)}{R}) d\tau$$

(19)

ดังนั้น

$$\bar{i}_{abc} = \bar{d}_{abc} \cdot \bar{i}_{dc}$$

$$\bar{d}_{abc}^T \cdot \bar{v}_{abc} = L \frac{d\bar{i}_{dc}}{dt} + \bar{v}_{dc}$$

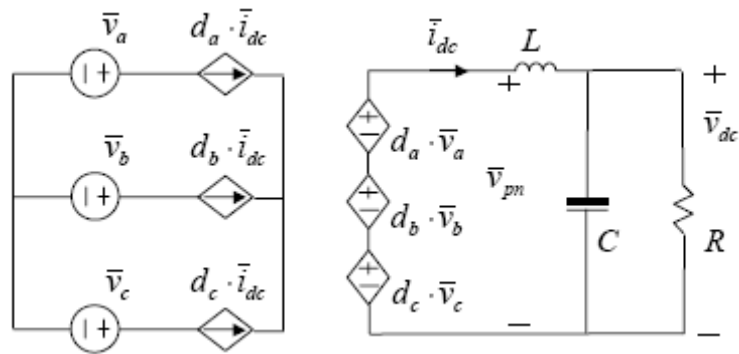
$$\bar{i}_{dc} = C \frac{d\bar{v}_{dc}}{dt} + \frac{\bar{v}_{dc}}{R}$$

(20)

โดยที่

$$\bar{d}_{abc} = \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{s}_a \\ \bar{s}_b \\ \bar{s}_c \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (20) แบบจำลองเฉลี่ยสามารถวาดได้ดังรูปที่ 69



รูปที่ 69 แบบจำลองเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสแบบแปลงลง

ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\bar{i}_{abc} = \bar{d}_{abc} \cdot \bar{i}_{dc}$$

$$\bar{v}_{pn} = \bar{d}_{abc}^T \cdot \bar{v}_{abc}$$

(21)