

การวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ออกไซด์แข็งและเซลล์
เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์และตัวรองรับแตกต่างกัน

PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL AND SOLID
OXIDE FUEL CELL WITH DIFFERENT TYPES OF ELECTROLYTES AND SUPPORTS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-220-113

การวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งและเซลล์
เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์และตัวรองรับแตกต่างกัน

PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL AND SOLID
OXIDE FUEL CELL WITH DIFFERENT TYPES OF ELECTROLYTES AND SUPPORTS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562
KMITL-2019-EN-M-220-113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL AND SOLID
OXIDE FUEL CELL WITH DIFFERENT TYPES OF ELECTROLYTES AND SUPPORTS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-EN-M-220-113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ออกไซด์แข็งและเซลล์เชื้อเพลิง
ชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์และตัวรองรับแตกต่างกัน
Thesis Title Performance Analysis of Solid Oxide Electrolysis Cell and Solid Oxide Fuel
Cell with Different Types of Electrolytes and Supports
นักศึกษา นายเชาวณัฐ ตั้งกุลจิต
รหัสประจำตัว 61601001
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ญาณิพร พ็ชรวรโชติ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2019-EN-M-220-113

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.แดง	แซ่เบ็	แดง แซ่เบ็
ผศ.ดร.ธนวรรณ	พิณรัตน์	ธนาภา พิณรัตน์
ผศ.ดร.พรสวรรค์	อศวแสงรัตน์	พรสวรรค์ อศวแสงรัตน์
ผศ.ดร.วลัยรัตน์	จันทร์อัมพร	วลัยรัตน์ จันทร์อัมพร
ผศ.ดร.ญาณิพร	พ็ชรวรโชติ	ญาณิพร พ็ชรวรโชติ

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 30 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมภาควิชาวิศวกรรมเคมี ชั้น 4 อาคาร CCA

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

วันที่ 30 กรกฎาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์และตัวรองรับแตกต่างกัน
นักศึกษา	นายเชาวณัฐ ตั้งกุลจิต
รหัสประจำตัว	61601001
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ญาณิพร พ็ชรวรโชติ

บทคัดย่อ

เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีสำหรับการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำผ่านการใช้กระแสไฟฟ้า ขณะเดียวกันเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งก็เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับเปลี่ยนไฮโดรเจนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์ทั้ง 2 ชนิดสามารถใช้อิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกันได้ 2 แบบ ได้แก่ อิเล็กโทรไลต์แบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำและแบบมีโปรตอนเป็นตัวนำ ซึ่งการใช้อิเล็กโทรไลต์แต่ละแบบจะมีตำแหน่งของสายป้อน (feed line) และตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ที่ถูกผลิตออกมานั้นต่างกัน เป็นผลให้คุณภาพและปริมาณของการผลิตไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้านั้นแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้เซลล์แต่ละชนิดยังสามารถมีตัวรองรับที่แตกต่างกันได้ถึง 3 แบบ คือตัวรองรับแอโนด แคโทด และอิเล็กโทรไลต์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์และตัวรองรับที่แตกต่างกัน ผ่านโปรแกรมจำลองกระบวนการ Aspen Plus แบบจำลองไฟฟ้าเคมีซึ่งพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียทุกชนิด ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียจากความต้านทาน ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียจากความเข้มข้น และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ถูกนำไปเขียนในกล่องการคำนวณ (calculator block) ที่อยู่ในโปรแกรม Aspen Plus เพื่อคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนและพลังงานไฟฟ้า เมื่อทำการศึกษานิตตัวรองรับที่เหมาะสมในเซลล์แต่ละแบบ พบว่าการใช้ตัวรองรับแบบแอโนดเหมาะสมกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนและแบบนำโปรตอน ส่วนการใช้ตัวรองรับชนิดแคโทดจะเหมาะสมกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน จากนั้นจะทำการศึกษาผลของสภาวะการดำเนินงาน ได้แก่ อุณหภูมิและความดัน ที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะทำงานได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1050 เคลวิน และแบบนำออกซิเจนไอออนจะทำงานได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 1050 เคลวิน ขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะทำงานได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 823 เคลวิน และแบบนำออกซิเจนไอออนจะทำงานได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 823 เคลวิน เนื่องจากความสามารถในการนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองชนิดในแต่ละช่วงอุณหภูมิต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่า การนำเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนไปใช้งานร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนนั้นเหมาะสมที่สุด เพราะการดำเนินงานร่วมกันดังกล่าวจะได้กระแสไฟฟ้าเหลือออกมา และสุดท้ายที่สมรรถนะเท่ากันอัตราส่วนจำนวนเซลล์ของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนต่อแบบนำออกซิเจนไอออนจะเป็น 1.8 ต่อ 1 และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนต่อแบบนำออกซิเจนไอออนจะเป็น 2.8 ต่อ 1

Thesis	PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL AND SOLID OXIDE FUEL CELL WITH DIFFERENT TYPES OF ELECTROLYTES AND SUPPORTS
Student	Mr. Chawanut Tangkusonjit
Student ID.	61601001
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Yaneeporn Patcharaworachot

ABSTRACT

Solid oxide electrolysis cell (SOEC) is one of technologies for hydrogen production through the water splitting by electricity. Solid oxide fuel cell (SOFC) is device that can convert chemical energy of hydrogen into the electricity. In general, there are two types of electrolyte (i.e., oxygen-ion and proton conducting electrolytes) that can be used in the SOEC and SOFC. The difference of both electrolyte types is the location of feed line and production line. Consequently, it is expected that the quality and quantity of the hydrogen and electricity produced are different. Moreover, both SOEC and SOFC can be designed by using three supports that include anode, cathode and electrolyte supports. In this work, the performances of SOEC and SOFC with different types of electrolytes and supports were analyzed through Aspen Plus simulator. The electrochemical model which takes into account all overpotentials (i.e., ohmic, concentration and activation overpotentials) was implemented in the calculator block to calculate the cell potential. Firstly, the suitable supports for the SOEC and SOFC with difference types of electrolytes are investigated. The results showed that the anode-support is suitable for an oxygen ion conducting SOEC (O-SOEC), an oxygen ion conducting SOFC (O-SOFC) and a proton conducting SOFC (H-SOFC), while the cathode-support is suitable for a proton conducting SOEC (H-SOEC). Then, the impact of key operating conditions (i.e., temperature and pressure) on cell potential was further examined. The simulation results indicated that the H-SOEC is suitable for operation at below 1050 K whereas the high temperature operation is recommended for O-SOEC. In the same way, the H-SOFC is suitable for operation at below 823 K whereas the O-SOFC is recommended for above 873 K. The integration of O-SOEC and O-SOFC are the best configuration since it can provide the electricity. Finally, it was found that as same performance, the ratio of cells between H-SOEC and O-SOEC is 1.8 to 1 and H-SOFC and O-SOFC is 2.8 to 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 II
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความรู้ ประสบการณ์ต่างๆ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จ

สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณ ผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนาม รวมไปถึงมารดา บิดา พี่สาวของข้าพเจ้าที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า หากมีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขออภัย ณ ที่นี้

เชาวณัฐ ตั้งกุลลิจิต



สารบัญ

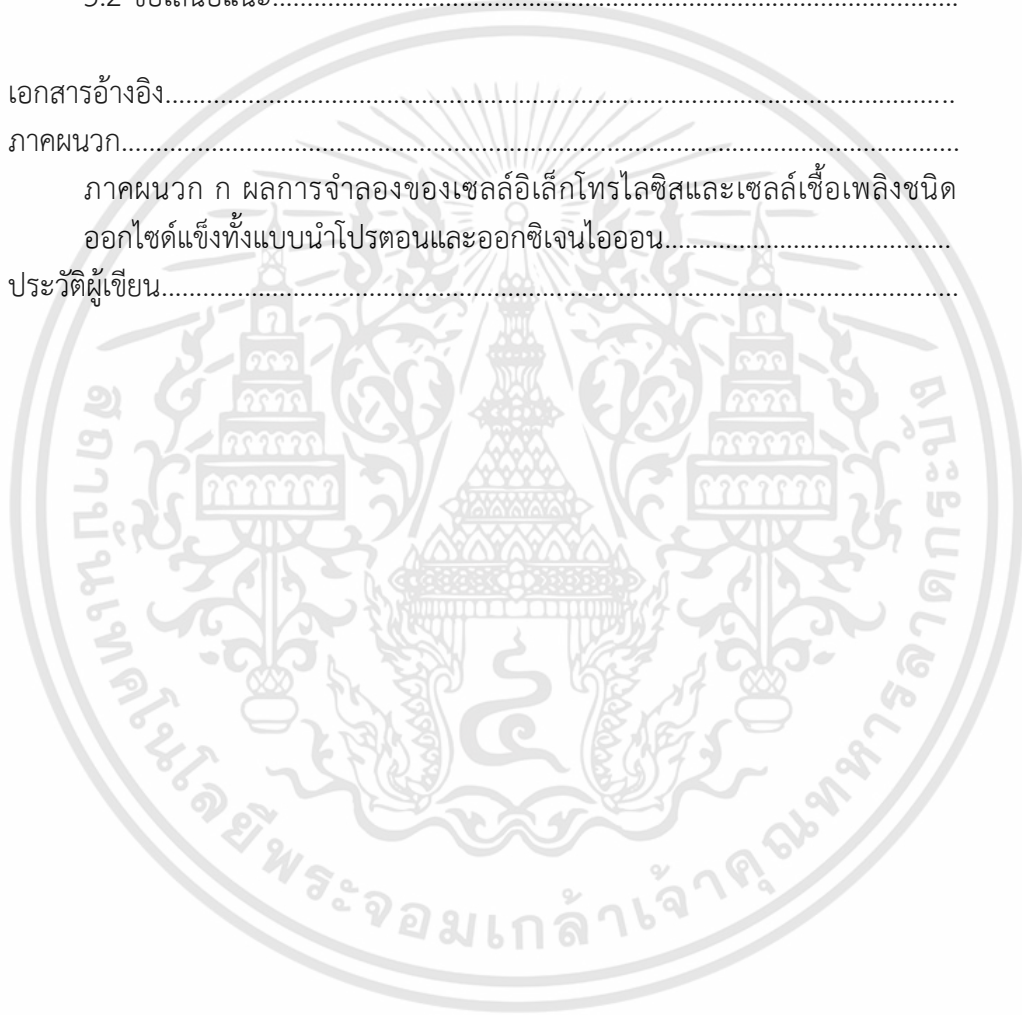
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็ง.....	5
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง.....	6
2.3 แบบจำลองไฟฟ้าเคมี.....	8
2.3.1 ศักย์ไฟฟ้าผันกลับ.....	9
2.3.2 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า.....	10
2.3.3 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี.....	10
2.3.4 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น.....	12
2.4 การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาการของน้ำและไฮโดรเจน.....	15
2.5 การออกแบบชนิดรองรับ.....	15
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.6.1 แบบจำลองไฟฟ้าเคมีของการผลิตไฮโดรเจนจากตัวอิเล็กโทรไลต์ เซอร์สตรึมชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	16
2.6.2 การศึกษาตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดออกไซด์แข็ง.....	16
2.6.3 การศึกษาตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ชนิดออกไซด์แข็ง.....	17
2.6.4 การออกแบบจำลองและการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ชนิดแบบนำโปรตอน และการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเพิ่ม มูลค่า.....	18

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	19
3.1 การออกแบบแบบจำลองกระบวนการ.....	19
3.1.1 เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	21
3.1.2 เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน.....	21
3.1.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	22
3.1.4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน.....	22
3.2 การจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาชนิดตัวรองรับ	23
3.3 การจำลองกระบวนการเพื่อเลือกช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงาน.....	23
3.4 การจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ.....	24
3.5 การจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาผลกระทบของความดัน.....	25
3.6 การจำลองกระบวนการของระบบร่วมระหว่างเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง.....	26
3.7 การจำลองกระบวนการเพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน.....	27
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการจำลองกระบวนการ.....	28
4.1 การตรวจสอบแบบจำลอง.....	28
4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง.....	29
4.1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง.....	29
4.2 การศึกษาการเลือกใช้ตัวรองรับสำหรับเซลล์แบบต่างๆ.....	32
4.2.1 การศึกษาชนิดตัวรองรับที่เหมาะสมของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	32
4.2.2 การศึกษาชนิดตัวรองรับที่เหมาะสมของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน.....	33
4.2.3 การศึกษาชนิดตัวรองรับที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	34
4.2.4 การศึกษาชนิดตัวรองรับที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน.....	35
4.2.5 การศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียของตัวรองรับแต่ละชนิด.....	36
4.3 การศึกษาช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงาน.....	40
4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิ.....	42
4.4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิของเซลล์อิเล็กโทรไลซิส.....	43
4.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง.....	44
4.5 ผลกระทบของความดัน.....	45

สารบัญ (ต่อ)

4.5.1 ผลกระทบของความดันของเซลล์อิเล็กโทรไลซิส.....	46
4.5.2 ผลกระทบของความดันของเซลล์เชื้อเพลิง.....	47
4.6 การศึกษาการนำเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ร่วมกัน.....	48
4.7 การปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก ผลการจำลองของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิด ออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและออกซิเจนไอออน.....	57
ประวัติผู้เขียน.....	63



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าระดับของพลังงานกระตุ้นค่าสัมประสิทธิ์หน้าสมการเอ็กโพเนนเชียลที่ ซีวแอโนดและแคโทด.....	11
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ถูกใช้ในการตรวจสอบและใช้ในการจำลอง.....	20
ตารางที่ 4.1 ค่าศักย์ของเซลล์และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์แต่ละชนิด.....	48
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบจำนวนเซลล์ของเซลล์อิเล็กโทรไลซิส.....	51
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบจำนวนเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง.....	51
ตารางที่ ก.1 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองสำหรับการผลิตไฮโดรเจนของ เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ที่อุณหภูมิ 873 เคลวิน.....	58
ตารางที่ ก.2 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองสำหรับการผลิตไฮโดรเจนของ เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ที่อุณหภูมิ 923 เคลวิน.....	58
ตารางที่ ก.3 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองสำหรับการผลิตไฮโดรเจนของ เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน..	59
ตารางที่ ก.4 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองสำหรับการผลิตไฮโดรเจนของ เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน..	59
ตารางที่ ก.5 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองสำหรับการผลิตไฮโดรเจนของ เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน..	59
ตารางที่ ก.6 ผลการสำรวจช่วงอุณหภูมิ.....	60
ตารางที่ ก.7 ผลการสำรวจความดันของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็ง.....	61
ตารางที่ ก.8 ผลการสำรวจความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง.....	61
ตารางที่ ก.9 ผลการสำรวจชนิดแบบรองรับของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบ นำโปรตอน.....	62
ตารางที่ ก.10 ผลการสำรวจชนิดแบบรองรับของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็ง แบบนำออกซิเจนไอออน.....	62

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบและการดำเนินงานพื้นฐานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมี (ก) โพรตอนเป็นตัวนำ (ข) ออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ.....	6
2.2 ส่วนประกอบและการดำเนินงานพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมี (ก) โพรตอนเป็นตัวนำ (ข) ออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ.....	7
2.3 แบบจำลอง ก) ตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ ข) ตัวรองรับชนิดแอโนด และ ค) ตัวรองรับชนิดแคโทด.....	16
3.1 แบบจำลองของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	21
3.2 แบบจำลองของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน.....	21
3.3 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	22
3.4 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน.....	22
3.5 แผนผังการนำเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ร่วมกัน.....	26
4.1 ผลการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองกระบวนการและค่าที่ได้จากการทดลอง (ก) เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ P.A. Stuart (ข) เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออน เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ A. Momma...	30
4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองกระบวนการและค่าที่ได้จากการทดลอง (ก) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน เปรียบเทียบกับการทดลองของ P.A. Stuart (ข) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ เปรียบเทียบกับการทดลองของ M. Ni.....	31
4.3 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ใช้ตัวรองรับชนิดแอโนด (A-HS) ชนิดแคโทด (C-HS) และชนิดอิเล็กโทรไลต์ (E-HS).....	33
4.4 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ใช้ตัวรองรับชนิดแอโนด (A-HS) ชนิดแคโทด (C-HS) และชนิดอิเล็กโทรไลต์ (E-HS).....	34
4.5 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่มีตัวรองรับชนิดแอโนด (A-OS) ตัวรองรับชนิดแคโทด (C-OS) และตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ (E-OS).....	35
4.6 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนที่มีตัวรองรับชนิดแอโนด (A-OS) ตัวรองรับชนิดแคโทด (C-OS) และตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ (E-OS).....	36
4.7 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียแต่ละชนิดของที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนและมีตัวรองรับชนิด (ก) แอโนด (ข) แคโทด และ (ค) อิเล็กโทรไลต์.....	38
4.8 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียแต่ละชนิดของที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออนและมีตัวรองรับชนิด (ก) แอโนด (ข) แคโทด และ (ค) อิเล็กโทรไลต์.....	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำ (ก) โพรตอน และ (ข) ออกซิเจนไอออน.....	41
4.10 ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่อุณหภูมิต่างๆของเซลล์ที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมี (ก) โพรตอนเป็นตัวนำ (ข) ออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ.....	42
4.11 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็ง.....	43
4.12 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง.....	44
4.13 ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ความดันต่างๆของเซลล์ที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมี (ก) ออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ (ข) โพรตอนเป็นตัวนำ.....	45
4.14 ผลกระทบของความดันที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งทั้งสองแบบ.....	46
4.15 ผลกระทบของความดันที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งสองแบบ.....	47
4.16 แผนผังการนำเซลล์อิเล็กโทรไลต์และเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ร่วมกัน.....	49

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำจำกัดความ	Unit
V	ศักย์ของเซลล์	V
E	ศักย์ไฟฟ้าผันกลับ	V
η_{ohm}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน	V
$\eta_{conc,anode}$	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นที่ขั้วแอโนด	V
$\eta_{conc,cathode}$	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นที่ขั้วแคโทด	V
$\eta_{act,anode}$	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วแอโนด	V
$\eta_{act,cathode}$	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วแคโทด	V
E^0	ศักย์ไฟฟ้าพื้นฐาน	V
R	ค่าคงที่ของแก๊ส	8.314 J/K·mol
T	อุณหภูมิปฏิบัติการ	K
F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์	9.6485×10^4 C/mol
P_i	ค่าดันย่อยของสารแต่ละชนิด	bar
j	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	Am/m ²
R_{ohm}	ค่าความต้านทาน	$\Omega \cdot m^2$
$\tau_{electrode}$	ความหนาของขั้วอิเล็กโทรด	100×10^{-6} m
$\tau_{electrolyte}$	ความหนาของชั้นอิเล็กโทรไลต์	100×10^{-6} m
$\rho_{electrolyte}$	ค่าความสามารถในการนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์	$7.66 \times 10^6 / (T \cdot \exp(-8.74 \times 10^3 / T))$ $\Omega^{-1} m^{-1}$
P_i^{TPB}	ค่าความดันย่อยของสารแต่ละชนิดที่ผิวสัมผัสที่ขอบของสถานะสาร 3 เฟส	bar
D_i^{eff}	ความสามารถในการแพร่ของสารชนิดต่างๆ	m ² s ⁻¹
P	ความดันปฏิบัติการ	bar
ϕ	ความคัตเคี้ยวของอิเล็กโทรด	$(1.5-0.5E)^{1/2}$
ξ	ความเป็นรูพรุนของอิเล็กโทรด	0.3
$D_{i,j}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารสองชนิด	m ² s ⁻¹
$D_{i,K}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ Knudsen ของสารชนิดต่างๆ	m ² s ⁻¹
n_{te}	จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกส่งผ่าน	-
X_i	อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารชนิดต่างๆ	-
A	พื้นที่ของเซลล์	m ²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำจำกัดความ	Unit
$j_{0,cathode}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนที่ขั้วแคโทด	A/m^2
$j_{0,anode}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนที่ขั้วแอโนด	A/m^2
k_{anode}	ค่าสัมประสิทธิ์หน้าสมการเอ็กโพเนนเชียลที่ขั้วแอโนด	$2.802 \times 10^5 \Omega^{-1} \cdot m^{-2}$
$k_{cathode}$	ค่าสัมประสิทธิ์หน้าสมการเอ็กโพเนนเชียลที่ขั้วแคโทด	$8.569 \times 10^5 \Omega^{-1} \cdot m^{-2}$
E_a	ค่าระดับพลังงานกระตุ้นที่ขั้วแอโนด	$53.123 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
E_c	ค่าระดับพลังงานกระตุ้นที่ขั้วแคโทด	$56.739 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
n_i	อัตราการไหลของสารชนิดต่างๆ	kmol/h



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลังงานไฟฟ้าส่วนมากที่ใช้ในปัจจุบันนั้นมาจากแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงถ่านหิน ซึ่งเป็นวิธีที่มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในปริมาณมาก โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีปริมาณมากเป็นหนึ่งในแก๊สเรือนกระจกที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผลกระทบนั้นมีตั้งแต่เกิดมลพิษทางอากาศไปจนถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกและระดับน้ำทะเล โดยภาพรวมของปัญหาเหล่านี้จะกลายเป็นปัญหาใหญ่ที่เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) อย่างไรก็ตามพลังงานไฟฟ้ายังสามารถผลิตได้จากแหล่งพลังงานทางเลือกซึ่งจะประกอบไปด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานพื้นพิภพ พลังงานคลื่น พลังงานชีวมวล และพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งพลังงานทางเลือกเหล่านี้มีอุปสรรคในการเอาไปใช้งานโดยตรง [1] ดังนั้นวิธีการผลิตไฟฟ้าจากวิธีเหล่านี้จึงกำลังอยู่ในช่วงทำการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง นอกจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเก็บพลังงานได้โดยการเก็บพลังงานไว้ในรูปของสารเคมี โดยไฮโดรเจนถือว่าเป็นตัวเก็บพลังงานที่น่าสนใจคล้ายกับแบตเตอรี่ เพราะเมื่อไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับกับแก๊สออกซิเจนแล้ว ทำให้เกิดเป็นพลังงานไฟฟ้าและได้เพียงน้ำออกมาเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระบวนการนี้แทบจะไม่มีการปลดปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมเลย

แม้ว่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากไฮโดรเจนจะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ 96 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานที่ใช้ในปัจจุบันยังคงเป็นการผลิตพลังงานที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเช่น กระบวนการรีฟอร์มมิงแก๊สธรรมชาติ (Natural gas reforming) และกระบวนการแปรสภาพถ่านหินเป็นแก๊ส (Coal gasification) ซึ่งยังคงปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อม [2] มีเพียง 4 เปอร์เซ็นต์ หรือ 8 กิกะวัตต์ เท่านั้นที่เป็นการผลิตพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [3] ซึ่งการใช้วิธีการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าจะใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อที่จะแยกน้ำให้กลายเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน นอกจากนี้ถ้ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกน้ำ ถูกผลิตจากแหล่งพลังงานทางเลือกตามที่กล่าวไว้ข้างต้น จะถือว่าวิธีนี้เป็นเทคโนโลยีในการผลิตไฮโดรเจนที่สะอาดอีกด้วย

ในบรรดาวิธีการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide electrolysis cell, SOEC) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้พลังงานต่ำและมีประสิทธิภาพสูง [4] โดยปกติเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งจะสามารถใช้อิเล็กโทรไลต์ได้ 2 ชนิด คือ อิเล็กโทรไลต์แบบที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออน (oxygen ion conducting SOEC, O-SOEC) และแบบที่มีความสามารถในการนำโปรตอน (proton conducting SOEC, H-SOEC) โดยเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบที่อิเล็กโทรไลต์มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออนจะสามารถดำเนินงานได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 973 ถึง 1273 เคลวิน โดยไม่ต้องใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยาราคาแพงและมีประสิทธิภาพดี [4] ส่วนเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบที่อิเล็กโทรไลต์มีความสามารถในการนำโปรตอนจะเหมาะกับการดำเนินงานในช่วงอุณหภูมิประมาณ 573 ถึง 973 เคลวิน ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้งาน [5]

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการนำไฮโดรเจนไปใช้เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า พบว่าการนำไฮโดรเจนไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น มีขั้นตอนที่น้อยจึงทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูง และยังเป็นวิธีที่ค่อนข้างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพราะใช้แค่ไฮโดรเจนกับอากาศเท่านั้น ในงานวิจัยนี้สนใจเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC) เพราะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถปฏิบัติการที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะสมกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะสามารถใช้อิเล็กโทรไลต์ได้ 2 ชนิดเช่นเดียวกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง นั่นคือ อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออน (oxygen ion conducting SOFC, O-SOFC) และแบบที่มีความสามารถในการนำโปรตอน (proton conducting SOFC, H-SOFC) ซึ่งการใช้อิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกันจะนำมาสู่อุณหภูมิที่ใช้ในการดำเนินงานและประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกันด้วย

จากที่กล่าวไปข้างต้นจะเห็นได้ว่าทั้งเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกันจะมีข้อดีและข้อเสียในการดำเนินงานแตกต่างกันด้วย ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสมรรถนะการดำเนินงานของเซลล์ดังกล่าว โดยอาศัยการจำลองกระบวนการผ่านโปรแกรม Aspen Plus สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนจะศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าหรือค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการใช้ในการผลิตไฮโดรเจน ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนจะพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าหรือค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเปลี่ยนไฮโดรเจนเป็นกระแสไฟฟ้า และจะศึกษาการออกแบบเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนที่ใช้ตัวรองรับต่างชนิดกัน ได้แก่ การใช้แอโนด (anode-support) แคโทด (cathode-support) และอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte-support) เป็นตัวรองรับ เพื่อหาการออกแบบชนิดตัวรองรับที่เหมาะสมในเซลล์แต่ละแบบ จากนั้นจะทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์สูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาการออกแบบระบบรวมระหว่างเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง เนื่องจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งเป็นอุปกรณ์ในการผลิตไฮโดรเจน ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งได้ และกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงก็ยังสามารถนำไปใช้สำหรับการแยกน้ำในเซลล์อิเล็กโทรไลซิสได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาสมรรถนะการดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน โดยอาศัยการจำลองกระบวนการผ่านโปรแกรม Aspen Plus

1.2.2 ศึกษาบทบาทของตัวรองรับสำหรับการออกแบบเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน

1.2.3 ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์สูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเซลล์

1.2.4 ศึกษาการดำเนินงานของระบบร่วมระหว่างเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 พัฒนาแบบจำลองไฟฟ้าเคมีสำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน ผ่านโปรแกรม Aspen plus

1.3.2 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับผลการทดลองจริงที่ได้จากวรรณกรรม

1.3.3 ศึกษาชนิดตัวรองรับที่เหมาะสมสำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนแต่ละชนิด ซึ่งตัวรองรับที่ศึกษาจะประกอบไปด้วย anode-support, cathode-support และ electrolyte-support

1.3.4 ศึกษาปัจจัยในการดำเนินงานที่สำคัญ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิและความดัน ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน

1.3.5 พิจารณาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน

1.3.6 ออกแบบแบบจำลองของระบบร่วมระหว่างเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งชนิดออกไซด์แข็งทั้งหมด 4 แบบ ดังนี้

- เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (H-SOEC) ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (H-SOFC)

- เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (H-SOEC) ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน (O-SOFC)

- เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน (O-SOEC) ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน (O-SOFC)

- เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน (O-SOEC) ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (H-SOFC)

1.3.7 พิจารณาระบบร่วมที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.4.1 ทราบสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน

1.4.2 ทราบการเลือกใช้ตัวรองรับที่เหมาะสมของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน

1.4.3 ทราบการออกแบบระบบของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งชนิดออกไซด์แข็งที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าได้



บทที่ 2

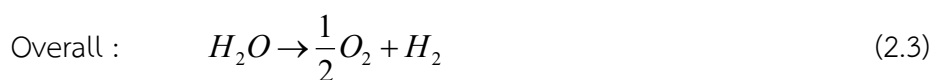
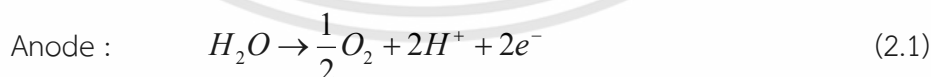
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง

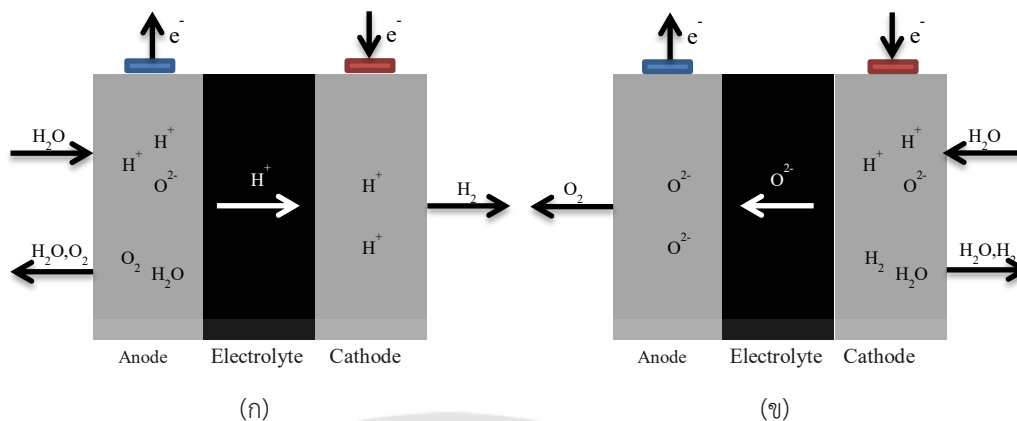
เซลล์อิเล็กโทรไลซิส คือหน่วยปฏิบัติการที่สามารถผลิตไฮโดรเจนจากน้ำ โดยใช้หลักการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (electrolysis) ซึ่งเซลล์อิเล็กโทรไลซิสนั้นมีหลายแบบยกตัวอย่างเช่น แอลคาไลน์ โพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน และเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะเลือกทำการจำลองของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง เนื่องจากเป็นชนิดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ ซึ่งพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรนแม้จะดีกว่าแบบแอลคาไลน์ตรงที่กำลังผลิตสูงกว่า วัสดุที่นำมาใช้ถูกกว่า และอายุการใช้งานยาวกว่า [7] แต่เมื่อเทียบกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งนั้น พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน ใช้อุณหภูมิที่ต่ำมาก (70 – 80 องศาเซลเซียส) ซึ่งจะทำให้ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโลหะมีสกุล ซึ่งจะส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายสูง [8]

เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งประกอบไปด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ขั้วแอโนด ชั้นแคโทด และอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ก็จะแตกต่างกันไป สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบมีโปรตอนเป็นตัวนำ ในงานวิจัยนี้จะใช้ Pt และ $BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{3-\delta}$ (BCY10) เป็นขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ตามลำดับ รูปที่ 2.1ก จะแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบพื้นฐานและการดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบมีโปรตอนเป็นตัวนำ ชั้นแรกน้ำจะถูกป้อนเข้าไปทางด้านขั้วแอโนดและแตกตัวกลายเป็นแก๊สออกซิเจน โปรตอนและอิเล็กตรอน เนื่องจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบมีโปรตอนเป็นตัวนำจะมีความสามารถในการนำโปรตอน โปรตอนจึงสามารถเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดผ่านอิเล็กโทรไลต์ได้ ซึ่งโปรตอนกับอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากันที่ขั้วแคโทดกลายเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน สมการที่ (2.1) ถึง (2.3) จะแสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาเคมีที่ออกมาจากขั้วแอโนด แคโทด และปฏิกิริยาโดยรวมของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบมีโปรตอนเป็นตัวนำ ตามลำดับ



ในกรณีของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ วัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทด อิเล็กโทรไลต์ และแอโนด คือ Ni-YSZ, YSZ และ LSM-YSZ ตามลำดับ โดยรูปที่ 2.1ข จะแสดงส่วนประกอบและการดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ หลักการทำงานขั้นแรกคือ น้ำจะถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแคโทดและทำปฏิกิริยากับ



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบและการดำเนินงานพื้นฐานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมี (ก) โปรตอนเป็นตัวนำ (ข) ออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ

อิเล็กตรอน ทำให้เกิดเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนไอออน หลังจากนั้นออกซิเจนไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด และเกิดปฏิกิริยากลายเป็นแก๊สออกซิเจน โดยปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วแคโทดและแอโนดจะถูกแสดงในสมการที่ (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ ส่วนปฏิกิริยาโดยรวมจะเหมือนกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบมีโปรตอนเป็นตัวนำ



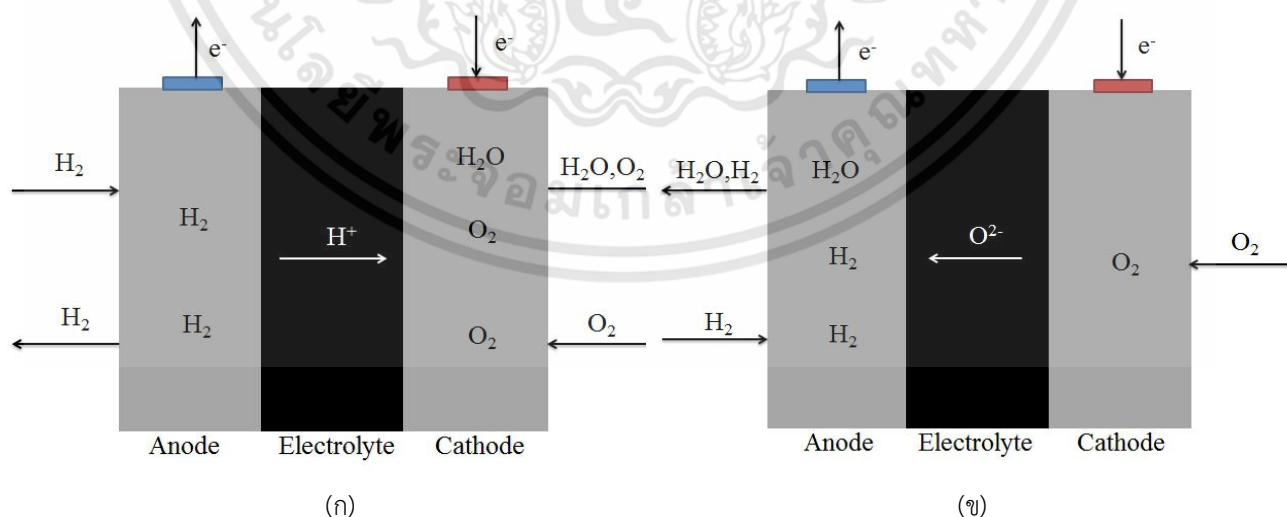
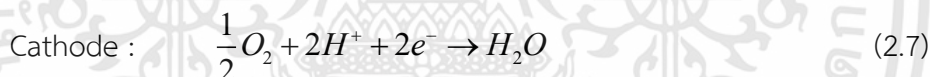
จากการดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งทั้งสองแบบ จะเห็นได้ว่า มีความแตกต่างกันอยู่ที่ตำแหน่งของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ไอน้ำที่ป้อนเข้าไปในเซลล์และไอน้ำที่เหลือโดยไฮโดรเจนที่ได้ของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะออกมาที่ขั้วแคโทดเพียงสารเดียว ส่วนเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนจะได้ไฮโดรเจนที่ออกมาพร้อมกับน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด ซึ่งจะทำให้ไฮโดรเจนที่ผลิตออกมาจะมีความบริสุทธิ์น้อยกว่า

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

เซลล์เชื้อเพลิง คือหน่วยปฏิบัติการที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากไฮโดรเจน โดยใช้เพียงไฮโดรเจนกับออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาเพียงเท่านั้น ซึ่งเซลล์เหล่านี้มีหลายแบบยกตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (PEM) และเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถผลิตไฮโดรเจนจากวิธีอื่นได้ด้วย เช่น การผลิตไฮโดรเจนจากถ่านหินและการผลิตไฮโดรเจนจากแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น แต่วิธีการผลิตแบบนี้จะเป็นการผลิตที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและใช้พลังงานสูง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะถูกใช้ในงานวิจัยนี้ นอกจากจะหน่วยปฏิบัติการที่สามารถแปลงเป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์ได้แล้ว ยังเป็นชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูง ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนในกระบวนการน้อย และเหมาะกับการใช้ในโรงงานขนาดใหญ่

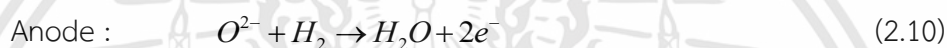
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งประกอบไปด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ขั้วแอโนด ชั้นแคโทด และอิเล็กโทรไลต์เช่นเดียวกับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์ และวัสดุที่นำมาใช้ก็จะเหมือนกันนั่นคือ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบมีโปรตอนเป็นตัวนำในงานวิจัยนี้จะใช้ Pt และ $\text{BaCe}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ (BCY10) เป็นอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ตามลำดับ รูปที่ 2.2 จะแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบพื้นฐานและการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบมีโปรตอนเป็นตัวนำ ชั้นแรกไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าไปทางด้านขั้วแอโนดและแตกตัวกลายเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอนที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วแอโนดกับอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบมีโปรตอนเป็นตัวนำจะมีความสามารถในการนำโปรตอน โปรตอนจึงสามารถเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดผ่านอิเล็กโทรไลต์ได้ ซึ่งโปรตอนกับอิเล็กตรอนและแก๊สออกซิเจนที่ป้อนเข้าไปทางขั้วแคโทด จะทำปฏิกิริยากันที่ขั้วแคโทดกลายเป็นน้ำและกระแสไฟฟ้าในที่สุด สมการที่ (2.6) ถึง (2.8) จะแสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาเคมีที่ออกมาจากขั้วแอโนด แคโทด และปฏิกิริยาโดยรวมของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบมีโปรตอนเป็นตัวนำ ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบและการดำเนินงานพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมี (ก) โปรตอนเป็นตัวนำ (ข) ออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ วัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทด อิเล็กโทรไลต์ และแอโนดจะทำมาจาก Ni-YSZ, YSZ และ LSM-YSZ ตามลำดับ โดยรูปที่ 2.2 จะแสดงส่วนประกอบและการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ หลักการทำงานขั้นแรกคือ อากาศจะถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแคโทดและแตกตัวกลายเป็นออกซิเจนไอออนที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ หลังจากนั้นออกซิเจนไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์และไปทำปฏิกิริยาไฮโดรเจนที่ถูกป้อนเข้าไปทางขั้วแอโนด กลายเป็นน้ำที่ขั้วแอโนดและกระแสไฟฟ้าออกมา ปฏิกิริยาโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำจะคล้ายกับแบบที่มีโปรตอนเป็นตัวนำและปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วแคโทดและแอโนดจะถูกแสดงในสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ



จากการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งสองแบบ จะเห็นได้ว่า มีความแตกต่างกันอยู่ที่ตำแหน่งของไอออนที่ได้จากปฏิกิริยา ไฮโดรเจนที่ถูกป้อนเข้าไปและไฮโดรเจนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยไอออนที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะออกมาที่ขั้วแคโทด ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนจะได้ไอออนที่ออกมาที่ขั้วแอโนดที่เป็นขั้วเดียวกันกับไฮโดรเจนสายป้อน ซึ่งส่งผลให้ไฮโดรเจนที่จะไปทำปฏิกิริยาเจือจาง

2.3 แบบจำลองไฟฟ้าเคมี

แบบจำลองไฟฟ้าเคมีสามารถทำนายสมรรถนะการทำงานของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบมีโปรตอนและออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำได้ ซึ่งจะแสดงอยู่ในความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (j) และศักย์ไฟฟ้า (V) ไม่เพียงแต่สภาวะการปฏิบัติการ (เช่น อุณหภูมิ ความดัน และองค์ประกอบของสายป้อน) แต่ตัวแปรของโครงสร้างต่างๆ (เช่น ความหนาแน่นของแต่ละส่วนประกอบ) ยังมีความสำคัญต่อความสามารถในการทำงานของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งอีกด้วย

การคำนวณสมรรถนะในการดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งจะมีรูปแบบคล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ซึ่งจะประกอบไปด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยา ซึ่งค่าต่างๆจะถูกอธิบายในหัวข้อย่อยต่อไปนี้

2.3.1 ศักย์ไฟฟ้าผันกลับ (Reversible potential)

ศักย์ไฟฟ้าผันกลับ (E_r) สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ซีซีชนิดออกไซด์แข็งคือค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดที่เซลล์ต้องการจะใช้ ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการของ Nernst ดังสมการที่ (2.11) ถึง (2.14) ขณะที่ค่าศักย์ไฟฟ้าผันกลับในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเรียกอีกอย่างว่าศักย์ไฟฟ้าสมดุล ซึ่งหมายถึงศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่มากที่สุดที่เซลล์สามารถให้ได้ภายใต้สภาวะ ความดันและอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการของ Nernst ดังสมการที่ ()

$$E_{r,H-SOEC} = E^0 + \frac{RT}{n_{te}F} \ln \left(\frac{P_{H_2,ca} P_{O_2,an}^{0.5}}{P_{H_2O,an}} \right) \quad (2.11)$$

$$E_{r,O-SOEC} = E^0 + \frac{RT}{n_{te}F} \ln \left(\frac{P_{H_2,ca} P_{O_2,an}^{0.5}}{P_{H_2O,ca}} \right) \quad (2.12)$$

$$E_{r,H-SOFC} = E^0 + \frac{RT}{n_{te}F} \ln \left(\frac{P_{H_2,an} P_{O_2,ca}^{0.5}}{P_{H_2O,ca}} \right) \quad (2.13)$$

$$E_{r,O-SOFC} = E^0 + \frac{RT}{n_{te}F} \ln \left(\frac{P_{H_2,an} P_{O_2,ca}^{0.5}}{P_{H_2O,an}} \right) \quad (2.14)$$

ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าพื้นฐาน (E^0) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.15) [6]

$$E^0 = 1.253 - 0.00024516T \quad (2.15)$$

ขณะที่	E^0	คือค่าศักย์ไฟฟ้าพื้นฐาน
	R	คือค่าคงที่ของแก๊ส
	T	คืออุณหภูมิในการปฏิบัติการ
	n_{te}	คือจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกส่งผ่าน
	F	คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ มีค่าเท่ากับ 96480 คูลอมป์ต่อโมล
	P_i	คือความดันย่อยของสารแต่ละชนิด

2.3.2 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic overpotential)

ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าหมายถึงศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานภายในเซลล์ ซึ่งจะรวมไปถึงศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรด (แอโนดและแคโทด) และความต้านทานการถ่ายโอนที่ขั้วอิเล็กโทรด

ในความเป็นจริงแล้ว ความสามารถในการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดและแอโนดจะมีค่าสูงกว่าความสามารถในการเหนี่ยวนำไอออนที่อิเล็กโทรดอย่างมาก ดังนั้นในการคำนวณศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (Ohmic overpotential) สามารถละการคำนวณที่เป็นส่วนของอิเล็กโทรดได้ [9] ซึ่งศักย์ไฟฟ้าสูญเสียจะถูกคำนวณมาจากกฎของโอห์ม ดังสมการที่ (2.16) ถึง (2.17) ซึ่งเซลล์อิเล็กโทรไลต์และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนจะมีการคำนวณศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานเหมือนกัน แต่จะต่างกันตรงความสามารถในการนำไอออนเท่านั้น

$$\eta_{ohm} = j \times R_{ohm} \quad (2.16)$$

$$R_{ohm} = \frac{\tau_{electrolyte}}{\rho_{electrolyte}} \quad (2.17)$$

ซึ่งค่าความนำโปรตอนจะได้มาจากวรรณกรรมของ P.A. Stuart [10] และค่าความนำออกซิเจนไอออนจะได้มาจากวรรณกรรมของ Y. Patcharavorachot [11]

$$\rho_{H-electrolyte} = \frac{7.66 \times 10^6}{T} \times \exp\left(\frac{-8.74 \times 10^3}{T}\right) \quad (2.18)$$

$$\rho_{O-electrolyte} = 33.4 \times 10^3 \times \exp\left(\frac{-10.3 \times 10^3}{T}\right) \quad (2.19)$$

ขณะที่ j คือค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

$\tau_{electrolyte}$ คือค่าความหนาของอิเล็กโทรด

$\rho_{electrolyte}$ คือค่าความนำไอออนของอิเล็กโทรด

2.3.3 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Activation overpotential)

ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี เป็นศักย์ไฟฟ้าสูญเสียที่มาจากปฏิกิริยาโคเนติกที่อิเล็กโทรด ซึ่งสมการของ Butler-Volmer จะถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียนี้

$$\eta_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{j}{n_{ie} j_{0,i}} \right), \quad i = \text{anode, cathode} \quad (2.20)$$

ขณะที่ $j_{0,ca}$ และ $j_{0,an}$ คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนที่ขั้วแคโทดและแอโนด

ทั่วไปแล้วความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนจะถูกนิยามได้หลายหลาก โดยอาจจะเป็นค่าคงที่ [9] หรือเป็นค่าที่แปรผันไปตามสภาวะการปฏิบัติการก็ได้ แต่เนื่องจากสภาวะการดำเนินงานจะส่งผลต่อสมรรถนะในการทำงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนจะมีค่าเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิในการดำเนินงาน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ Arrhenius ดังนี้

$$j_{0,i} = \frac{RT}{n_{ie} F} k_i \exp \left(- \frac{E_{a,i}}{RT} \right), \quad i = \text{anode, cathode} \quad (2.21)$$

ขณะที่ $E_{a,an}$ และ $E_{a,ca}$ คือระดับของพลังงานกระตุ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทด ตามลำดับ

k_i คือค่าสัมประสิทธิ์หน้าสมการเอ็กโพเนนเชียล

โดยค่าระดับของพลังงานกระตุ้นและค่าสัมประสิทธิ์หน้าสมการเอ็กโพเนนเชียลที่ขั้วแอโนดและแคโทดจะนำมาจากรวบรวมของ Y. Patcharavorachot [11] และ L. Namwong [9] ซึ่งจะถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าระดับของพลังงานกระตุ้นค่าสัมประสิทธิ์หน้าสมการเอ็กโพเนนเชียลที่ขั้วแอโนดและแคโทด

H-SOEC, H-SOFC [9]	
$E_{a,an}$	53.123 kJ/mol
$E_{a,ca}$	56.739 kJ/mol
k_{an}	$2.802 \times 10^5 \Omega^{-1} m^{-2}$
k_{ca}	$8.569 \times 10^5 \Omega^{-1} m^{-2}$
O-SOEC, O-SOFC [11]	
$E_{a,an}$	137 kJ/mol
$E_{a,ca}$	140 kJ/mol
k_{an}	$235 \times 10^9 \Omega^{-1} m^{-2}$
k_{ca}	$654 \times 10^9 \Omega^{-1} m^{-2}$

2.3.4 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration overpotential)

ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น คือความต้านทานการส่งผ่านมวลที่ของแก๊สแต่ละชนิดที่พื้นที่ผิวสัมผัสที่ติดกันของอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ (Triple Phase Boundary, TPB) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมีโปรตอนเป็นตัวนำสามารถคำนวณจากสมการ (2.22) และ (2.23) ขณะที่ค่าดังกล่าวของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.24) และ (2.25) ส่วนศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมีโปรตอนเป็นตัวนำสามารถคำนวณจากสมการ (2.26) และ (2.27) ขณะที่ค่าดังกล่าวของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.28) และ (2.29)

- เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมีโปรตอนเป็นตัวนำ

$$\eta_{conc,an} = \frac{RT}{n_{te}F} \ln \left[\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^{TPB}} \right) \left(\frac{P_{O_2}^{TPB}}{P_{O_2}} \right)^{0.5} \right] \quad (2.22)$$

$$\eta_{conc,ca} = \frac{RT}{n_{te}F} \ln \left[\left(\frac{P_{H_2}^{TPB}}{P_{H_2}} \right) \right] \quad (2.23)$$

- เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ

$$\eta_{conc,an} = \frac{RT}{n_{te}F} \ln \left[\left(\frac{P_{O_2}^{TPB}}{P_{O_2}} \right)^{0.5} \right] \quad (2.24)$$

$$\eta_{conc,ca} = \frac{RT}{n_{te}F} \ln \left[\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^{TPB}} \right) \left(\frac{P_{H_2}^{TPB}}{P_{H_2}} \right) \right] \quad (2.25)$$

- เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมีโปรตอนเป็นตัวนำ

$$\eta_{conc,an} = \frac{RT}{n_{te}F} \ln \left[\left(\frac{P_{H_2O}^{TPB}}{P_{H_2O}} \right) \left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2}^{TPB}} \right) \right] \quad (2.26)$$

$$\eta_{conc,ca} = \frac{RT}{n_{te}F} \ln \left(\frac{P_{H_2}}{P_{H_2}^{TPB}} \right) \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ

$$\eta_{conc,an} = \frac{RT}{n_{ie}F} \ln \left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2}^{TPB}} \right) \quad (2.28)$$

$$\eta_{conc,ca} = \frac{RT}{n_{ie}F} \ln \left[\left(\frac{P_{H_2O}^{TPB}}{P_{H_2O}} \right) \left(\frac{P_{H_2}}{P_{H_2}^{TPB}} \right) \right] \quad (2.29)$$

ความดันเฉพาะส่วนของ ไอน้ำ ออกซิเจน และไฮโดรเจนที่ TPB ของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งคำนวณมาจากกฎของ Fick แต่เนื่องจากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองแบบมีโครงสร้างไม่เหมือนกัน จึงมีสมการในการคำนวณความดันเฉพาะส่วนที่ต่างกัน เพราะว่าตำแหน่งสายป้อนและสายผลิตของเซลล์ทั้งสองชนิดต่างกัน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.30) ถึง (2.40) [13]

- สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็ง

$$P_{H_2O,SOEC}^{TPB} = P_{H_2O} - \frac{RT\tau_{an}}{n_{ie}FD_{H_2O}^{eff}} j \quad (2.30)$$

$$P_{O_2,H-SOEC}^{TPB} = P_{O_2} - \frac{RT\tau_{an}}{n_{ie}FD_{O_2}^{eff}} j \quad (2.31)$$

$$P_{H_2,H-SOEC}^{TPB} = P - (P - P_{H_2}) \exp \left(- \frac{RT\tau_{ca}}{n_{ie}FD_{H_2}^{eff}} j \right) \quad (2.32)$$

$$P_{H_2,O-SOEC}^{TPB} = P_{O_2} + \frac{RT\tau_{ca}}{n_{ie}FD_{O_2}^{eff}} j \quad (2.33)$$

$$P_{O_2,O-SOEC}^{TPB} = \sqrt{P_{O_2}^2 + \frac{RT\tau_{an}\mu}{n_{ie}FB_p}} \quad (2.34)$$

- สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

$$P_{H_2O,SOFC}^{TPB} = P_{H_2O} + \frac{RT\tau_{an}}{n_{ie}FD_{H_2O}^{eff}} j \quad (2.35)$$

$$P_{O_2,O-SOFC}^{TPB} = P - (P - P_{O_2}) \exp \left(\frac{RT\tau_{ca}}{n_{ie}FD_{O_2}^{eff}} j \right) \quad (2.36)$$

$$P_{H_2,O-SOFC}^{TPB} = P_{H_2} - \frac{RT\tau_{an}}{n_{ie}FD_{H_2}^{eff}} j \quad (2.37)$$

$$P_{H_2,O,H-SOFC}^{TPB} = P_{H_2O} + \frac{RT\tau_{ca}}{n_{ie}FD_{H_2O}^{eff}} j \quad (2.38)$$

$$P_{O_2,H-SOFC}^{TPB} = P_{O_2} - \frac{RT\tau_{ca}}{n_{ie}FD_{O_2}^{eff}} j \quad (2.39)$$

$$P_{H_2,H-SOFC}^{TPB} = P - (P - P_{H_2}) \exp\left(\frac{RT\tau_{an}}{n_{ie}FD_{H_2}^{eff}} j\right) \quad (2.40)$$

$$\frac{1}{D_i^{eff}} = \frac{\phi}{\xi} \left(\frac{1}{D_{i,j}} + \frac{1}{D_{i,k}} \right) \quad (2.41)$$

ขณะที่ D_i^{eff} คือสัมประสิทธิ์ประสิทธิผลการแพร่ของแก๊สชนิด i

μ คือความหนืดของแก๊สออกซิเจน

B_p คืออัตราการไหลที่สามารถผ่านได้

ϕ คือค่าความคดเคี้ยวของอิเล็กโทรด

ξ คือความเป็นรูพรุนของอิเล็กโทรด

$D_{i,j}, D_{i,k}$ คือสัมประสิทธิ์ประสิทธิผลการแพร่ของ Knudsen

จากค่าศักย์ไฟฟ้าผันกลับ ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น สามารถเขียนรวมเป็นศักย์ของเซลล์ได้ดังสมการ (2.42) และ (2.43) โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งจะหมายถึงศักย์ที่เซลล์ต้องการใช้ที่ช่วงสภาวะนั้นๆ ส่วนศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะหมายถึงศักย์ที่เซลล์สามารถให้ได้ที่ช่วงสภาวะนั้นๆ

$$V = E_r + \eta_{conc,anode} + \eta_{conc,cathode} + \eta_{act,anode} + \eta_{act,cathode} + \eta_{ohm} \quad (2.42)$$

$$V = E_r - \eta_{conc,anode} - \eta_{conc,cathode} - \eta_{act,anode} - \eta_{act,cathode} - \eta_{ohm} \quad (2.43)$$

ขณะที่ V คือศักย์ของเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาการใช้น้ำและใช้ไฮโดรเจน (conversion)

เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งจะมีการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาการใช้น้ำ (conversion) ที่เซลล์ใช้ในการผลิตไฮโดรเจน ซึ่งจะถูกแสดงอยู่ในรูปของอัตราการใช้น้ำ (Steam utilization) ขณะเชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะมีการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาการใช้เชื้อเพลิงหรือการใช้ไฮโดรเจน (conversion) ที่เซลล์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะถูกแสดงอยู่ในรูปของอัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel utilization) โดยจะเป็นไปตาม Y. Fu และคณะ [12] ดังสมการที่ (2.44) และ (2.45) ตามลำดับ

$$X_u = \frac{jAN_{cell}}{2F\dot{n}_{H_2O,Feed}} \quad (2.44)$$

$$X_f = \frac{jAN_{cell}}{2F\dot{n}_{H_2,Feed}} \quad (2.45)$$

ขณะที่ X_u และ X_f คือ อัตราการใช้น้ำและไฮโดรเจนตามลำดับ

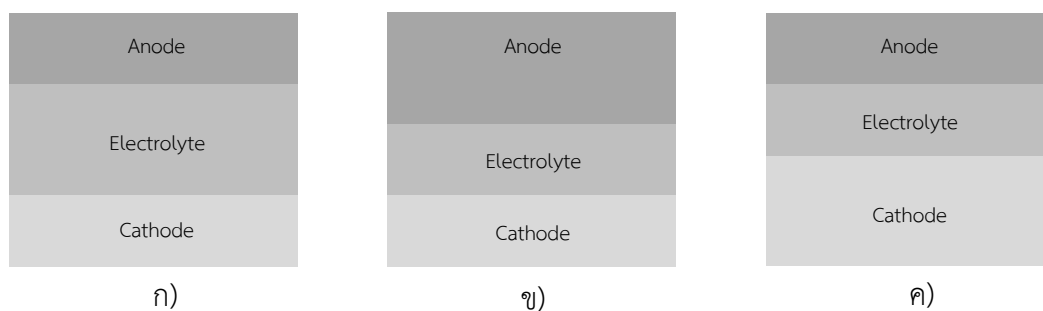
A คือ พื้นที่ของเซลล์

N_{cell} คือ จำนวนของเซลล์

$\dot{n}_{H_2O,Feed}$ คือ อัตราการไหลของน้ำที่สายป้อน

2.5 การออกแบบชนิดรองรับ

เซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจน ไอออนสามารถมีโครงสร้างตัวรองรับในตัวเองได้ 3 ชนิด ได้แก่ ตัวรองรับชนิดแอโนด ตัวรองรับชนิดแคโทด และตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ การใช้ตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์จำเป็นต้องดำเนินการที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส การปฏิบัติการที่อุณหภูมิสูงสามารถช่วยลดศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าได้ เพราะตัวรองรับชนิดนี้จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าที่สูงมาก ขณะที่ตัวรองรับอีกสองชนิด นั่นคือ ตัวรองรับชนิดแอโนดและตัวรองรับชนิดแคโทด จะเหมาะสมกับการดำเนินการที่อุณหภูมี่ปานกลาง เนื่องจากการลดความหนาของชั้นอิเล็กโทรไลต์ลง จะส่งผลให้เกิดศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานลดลง เลยไม่จำเป็นต้องดำเนินการที่อุณหภูมิสูงเท่าตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ [14]



รูปที่ 2.3 แบบจำลอง ก) ตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ ข) ตัวรองรับชนิดแอโนด และ ค) ตัวรองรับชนิดแคโทด

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 แบบจำลองไฟฟ้าเคมีของการผลิตไฮโดรเจนจากตัวอิเล็กโทรไลต์เซอร์สตรึมชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

Meng Ni และคณะ [15] ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองไฟฟ้าเคมีเพื่อที่จะศึกษาลักษณะในรูปความสัมพันธ์ของศักย์ของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ของตัวอิเล็กโทรไลต์เซอร์สตรึมชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตไฮโดรเจน โดยจะประกอบไปด้วยศักย์ไฟฟ้าสูญเสียที่สำคัญต่างๆ ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งทั้งหมดจะถูกนำไปพิจารณาในการสร้างแบบจำลอง แบบจำลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงและผลที่ได้จากการจำลองนั้นก็จะเป็นไปตามข้อมูลของการทดลองจริงในวรรณกรรม นอกจากนี้ยังพบว่าการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด และการปฏิบัติการของตัวอิเล็กโทรไลต์เซอร์สตรึมชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนนั้นแทบจะแตกต่างกับตัวอิเล็กโทรไลต์เซอร์สตรึมชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนโดยสิ้นเชิง สำหรับการออกแบบตัวอิเล็กโทรไลต์เซอร์สตรึมชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน ตัวรองรับชนิดแอโนด จะเป็นชนิดที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้พบว่า ตัวรองรับชนิดแคโทด นั้นมีประสิทธิภาพสูงที่สุดสำหรับตัวอิเล็กโทรไลต์เซอร์สตรึมชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าของตัวอิเล็กโทรไลต์เซอร์สตรึมชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน สามารถถูกทำให้ดีขึ้นจากการปฏิบัติการที่อุณหภูมิหรือสัดส่วนความเข้มข้นของไอน้ำที่สูงขึ้น

2.6.2 การศึกษาตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

Meng Ni และคณะ [16] ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองไฟฟ้าเคมีเพื่อที่จะศึกษาลักษณะในรูปความสัมพันธ์ของศักย์ของเซลล์กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง สมการของ Butler-Volmer โมเดลของ Fick และกฎของ Ohm ได้ถูกใช้คำนวณหาค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียต่างๆได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทางไฟฟ้าตามลำดับ ความสำคัญของแบบจำลองนี้คือทั้งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนและสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สจะขึ้นกับโครงสร้างระดับไมโครของเซลล์ (ความเป็นรูพรุนและขนาดของรูพรุน) และตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติการ (อุณหภูมิ ความดัน และองค์ประกอบของแก๊ส) ผลการจำลองจะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงจากรวบรวม ซึ่งผลจากทั้งสองแบบนี้ออกมาใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบค่าของขนาดรูพรุนของอิเล็กโทรดและความเป็นรูพรุนที่เหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงสุดอีกด้วย ทั้งศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาและความต้านทานทางไฟฟ้านั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นถูกพบว่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์ที่ไม่คาดคิดนี้เกิดจากความหนาแน่นของก๊าซลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้นแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็ตาม นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนในสายเชื้อเพลิงและการเพิ่มความดันในการปฏิบัติการเป็นวิธีที่เป็นไปได้ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานของเชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง การวิเคราะห์เชิงพารามิเตอร์ให้ข้อมูลเชิงลึกในการดำเนินงานของเชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง และชี้แจงความเข้าใจที่คลุมเครือของศักย์ไฟฟ้าสูญเสียต่างๆในเชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง และแบบจำลองในปัจจุบันยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการออกแบบการเพิ่มประสิทธิภาพเชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

2.6.3 การศึกษาตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็ง

Meng Ni และคณะ [17] แบบจำลองเชิงทฤษฎีได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งสำหรับการผลิตไฮโดรเจน ซึ่งค่าการศักย์ไฟฟ้าสูญเสียจากปฏิกิริยาเคมีและความเข้มข้นที่ขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกินค่าโอห์มมิกที่อิเล็กโทรไลต์นั้นถือเป็นค่าสำคัญในการทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย โดยสมการ Butler-Volmer แบบจำลองของ Fick และกฎของโอห์มถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายลักษณะของการเกิดศักย์ไฟฟ้าสูญเสียต่างๆ ซึ่งแบบจำลองทางทฤษฎีได้รับการตรวจสอบความถูกต้องจากข้อมูลผลการรวบรวมแล้ว ในการศึกษาผลกระทบขององค์ประกอบของความหนาแน่น การกำหนดค่าโครงสร้างของตัวรองรับชนิดแอโนด ของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็ง ถูกระบุว่าเป็นการออกแบบที่ดีที่สุด โดยการวิเคราะห์เพิ่มเติมที่เกี่ยวกับตัวแปรนั้นได้ดำเนินการศึกษาผลของคุณสมบัติวัสดุและสภาวะในระบบปฏิบัติการที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งตัวรองรับชนิดแอโนด จากผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มจำนวนรูพรุนของอิเล็กโทรดและขนาดรูพรุนสามารถลดศักย์ไฟฟ้าสูญเสียได้ โดยในการดำเนินการเพิ่มทั้งอุณหภูมิและสัดส่วนโมลของไอน้ำนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็ง ซึ่งความดันควรถูกควบคุมโดยความหนาแน่นของกระแส ทั้งนี้แบบจำลองทางไฟฟ้าเคมีสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าใจถึงหลักการผลิตไฮโดรเจนของ เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง ได้อย่างละเอียดถี่ถ้วนและยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบเซลล์และระบบเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งได้อีกด้วย

2.6.4 การออกแบบจำลองและการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบนำโปรตอน และการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเพิ่มมูลค่า

Lawit Namwong และคณะ [9] ได้ทำการออกแบบจำลองทางไฟฟ้าเคมีเพื่อทำนายพฤติกรรมและการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับการผลิตไฮโดรเจนและซินแก๊ส ซึ่งซินแก๊สจะถูกผลิตผ่านปฏิกิริยาออกเตอร็อกซิฟิเคชันแบบย้อนกลับ ผลการจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ได้จากแบบจำลองที่พิจารณาศักย์ไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด (ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น) โดยการจำลองได้ถูกทำในโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus เพื่อที่จะคำนวณศักย์ของเซลล์ อัตราการผลิตไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยวิธี Respones surface (RSM) ได้ถูกใช้เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าเป็นค่าทางสถิติและจะได้สมการความสัมพันธ์ออกมา นอกจากนี้ผลการจำลองได้ถูกวิเคราะห์ออกมาว่า อัตราการไหลของไอน้ำที่ 7.71 กิโลโมลต่อชั่วโมง อุณหภูมิที่ 650 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ นั้นเป็นค่าที่ดีที่สุดสำหรับการปฏิบัติการที่จะให้อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 1.94 กิโลโมลต่อชั่วโมงและได้ศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดเป็น 4.73 โวลต์

จากวรรณกรรมทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่ายังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าตัวแปรหลักที่จะส่งผลกระทบต่อเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน และยังไม่มีการรวมไดนามิกส์ของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์มาใช้งานต่อกันเพื่อหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการผลิตไฮโดรเจนและนำไปใช้เป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องให้ละเอียดมากขึ้นนั่นคือทำการศึกษา อุณหภูมิ ความดัน และชนิดของตัวรองรับที่นำมาใช้ (anode, cathode and electrolyte-support) เพื่อหาสถานะและโครงสร้างที่จะได้ประสิทธิภาพออกมาดีที่สุด หลังจากนั้นจึงนำเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่สถานะและโครงสร้างที่ดีที่สุดมาต่อกันแบบวงจร เพื่อหากระบวนการผลิตไฮโดรเจนและนำไปใช้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ดีที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการศึกษาสมรรถนะของการดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน ถูกแบ่งเป็น 7 ส่วนหลัก ได้แก่ 3.1 การออกแบบแบบจำลองกระบวนการ 3.2 การจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาชนิดตัวรองรับ 3.3 การจำลองกระบวนการเพื่อเลือกช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงาน 3.4 การจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ 3.5 การจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาผลกระทบของความดัน 3.6 การจำลองกระบวนการของระบบรวมระหว่างเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง และ 3.7 การจำลองกระบวนการเพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน

3.1 การออกแบบแบบจำลองกระบวนการ

ในการจำลองกระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งและการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง จะดำเนินการผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus ซึ่งใช้แบบจำลองเทอร์โมไดนามิก (thermodynamic model) แบบแก๊สอุดมคติ (ideal gas) เนื่องจากระบบที่เราจะใช้จะใช้อุณหภูมิในการปฏิบัติการที่สูง ความดันต่ำและสารอยู่ในสถานะแก๊ส นอกจากนี้ยังใช้ calculator block จากโปรแกรมแอสเพนพลัส (Aspen Plus) ในการสร้างแบบจำลองไฟฟ้าเคมี ซึ่งสามารถช่วยคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ได้ ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียจากความต้านทานทางไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยา และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นเป็นต้น โดยจะถูกแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อตารางเมตร (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) กับศักย์ของเซลล์ (โวลต์) ซึ่งมีสารที่ถูกใช้ในการจำลองทั้งหมดอยู่ 4 สาร ได้แก่ น้ำ ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน นอกจากนี้ยังมีค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ ซึ่งจะถูกระบุแสดงอยู่ในตารางที่ 3.1 และเซลล์ทุกแบบจะมีการออกแบบหรือมีการกำหนดค่าร่วมกันดังนี้

- 1) อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์ทุกชนิดจะใช้แบบจำลองหอยแยก (separation unit)
 - 2) น้ำที่ป้อนเข้ามาจะมีสถานะเดียวกันคือที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน และความดัน 1 บาร์
 - 3) ในสายป้อนที่เป็นออกซิเจนจะมีสัดส่วนของไนโตรเจน 79 เปอร์เซ็นต์ และออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 5 กิโลโมลต่อชั่วโมง และความดัน 1 บาร์
- นอกจากนี้สมมุติฐานที่ใช้ในการดำเนินการมีดังนี้

- 1) เป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับเวลา (steady state)
- 2) อุณหภูมิที่ขั้วแคโทด แอโนด และอิเล็กโทรไลต์เท่ากัน
- 3) แก๊สอุดมคติ (ideal gas)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ประสิทธิภาพของปั๊ม (pump) และเครื่องทำความร้อน (heater) เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้คิดพลังงานสูญเสีย

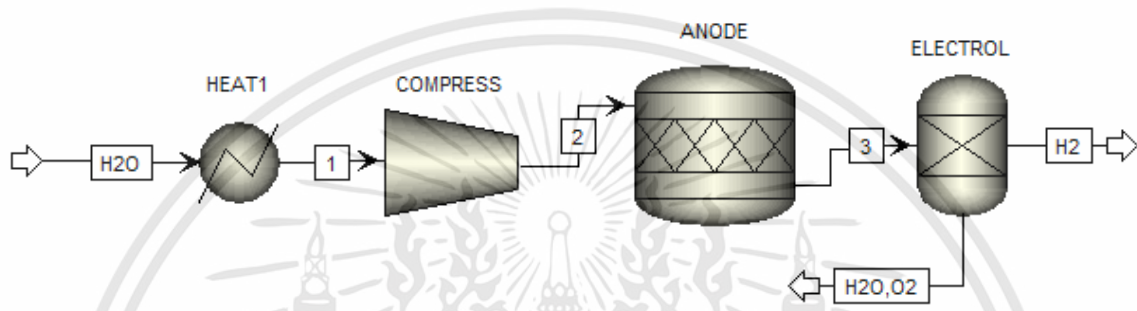
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการตรวจสอบและใช้ในการจำลอง

ตัวแปร	ค่า
ความดันในการปฏิบัติการ, P	1 bar
พื้นที่ผิวสัมผัสของเซลล์, A	0.04 m^2
จำนวนของเซลล์, N_{cell}	500 cells
สำหรับเซลล์ชนิดโปรตอน	
ไอน้ำขาเข้า, $\dot{n}_{H_2O,Feed}$	1 kmol/h
องค์ประกอบของไอน้ำ	95 mol% H_2O /5 mol% H_2
ความสามารถในการนำของอิเล็กโทรไลต์	$7.66 \times 10^6 / T \times \exp(-8.74 \times 10^3 / T) \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$
, $\rho_{electrolyte}$ [10]	
ความหนาของขั้วแคโทด, $\tau_{cathode}$	$200 \times 10^{-6} \text{ m}$
ความหนาของอิเล็กโทรไลต์, $\tau_{electrolyte}$	$100 \times 10^{-6} \text{ m}$
ความหนาของขั้วแอโนด, τ_{anode}	$100 \times 10^{-6} \text{ m}$
พลังงานกระตุ้น [9]	
$E_{a,an}$	53.123 kJ/mol
$E_{a,ca}$	56.739 kJ/mol
Pre-exponential factor [9]	
k_{an}	$2.802 \times 10^5 \Omega^{-1} \text{ m}^{-2}$
k_{ca}	$8.569 \times 10^5 \Omega^{-1} \text{ m}^{-2}$
สำหรับเซลล์ชนิดออกซิเจนไอออน	
ไอน้ำขาเข้า, $\dot{n}_{H_2O,Feed}$	5 kmol/h
องค์ประกอบของไอน้ำ	60 mol% H_2O /40 mol% H_2
ความสามารถในการนำของอิเล็กโทรไลต์	$33.4 \times 10^3 \times \exp(-10.3 \times 10^3 / T) \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$
, $\rho_{electrolyte}$ [11]	
ความหนาของขั้วแคโทด, $\tau_{cathode}$	$50 \times 10^{-6} \text{ m}$
ความหนาของอิเล็กโทรไลต์, $\tau_{electrolyte}$	$10 \times 10^{-6} \text{ m}$
ความหนาของขั้วแอโนด, τ_{anode}	$500 \times 10^{-6} \text{ m}$
พลังงานกระตุ้น [11]	
$E_{a,an}$	137 kJ/mol
$E_{a,ca}$	140 kJ/mol
Pre-exponential factor [11]	
k_{an}	$235 \times 10^9 \Omega^{-1} \text{ m}^{-2}$
k_{ca}	$654 \times 10^9 \Omega^{-1} \text{ m}^{-2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

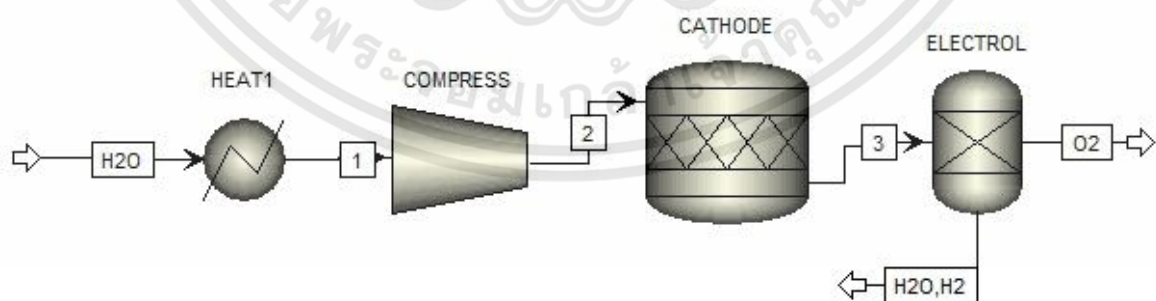
แบบจำลองของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน จะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3.1 โดยที่ซัวโนดจะใช้หน่วยปฏิบัติการเป็น RStoic เหตุผลที่เลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Rstoic เพราะการจำลองจำเป็นต้องคิดอัตราการไหลของไอน้ำและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพื่อเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการใช้ น้ำซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.44) โดยผลิตภัณฑ์ที่ออกจากอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยกระแสของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และกระแสของน้ำกับออกซิเจน (H_2O, O_2)



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

3.1.2 เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน

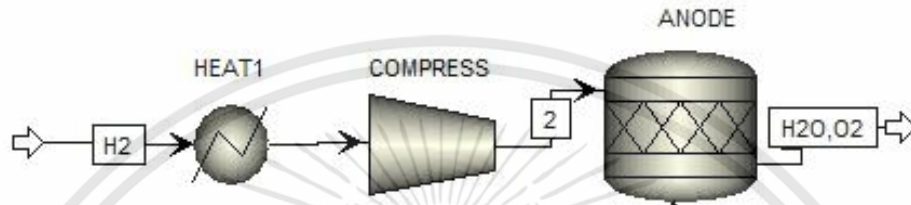
แบบจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน จะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3.2 โดยที่ซัวแคโทดจะใช้หน่วยปฏิบัติการเป็น RStoic เหตุผลที่เลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Rstoic เพราะการจำลองจำเป็นต้องคิดอัตราการไหลของไอน้ำและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพื่อเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการใช้ น้ำซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.44) โดยน้ำกับไฮโดรเจนจะออกมาด้วยกันในสายแรก (H_2O, H_2) และออกซิเจนจะออกมาในสายที่สอง (O_2)



รูปที่ 3.2 แบบจำลองของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน

3.1.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

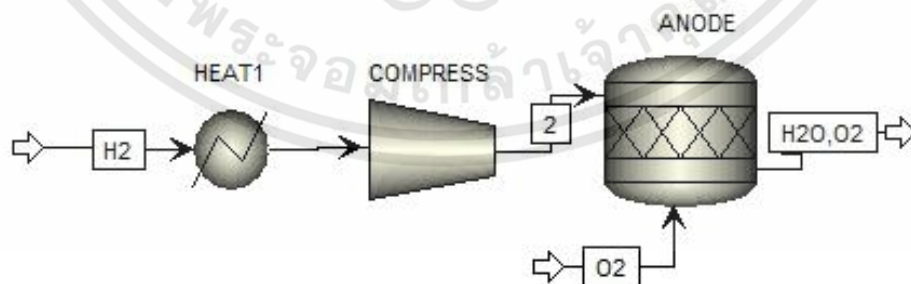
แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน จะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3.3 โดยที่ ซัวแอนด์จะใช้หน่วยปฏิบัติการเป็น RStoic เหตุผลที่เลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ RStoic เพราะการจำลองจำเป็นต้องคิดอัตราการไหลของไฮโดรเจนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพื่อเป็นตัวกำหนดอัตราการใช้ไฮโดรเจนในปฏิกิริยาการ ซึ่งได้จากการคำนวณได้จากสมการที่ (2.45) โดยจะได้น้ำกับออกซิเจนจะออกมา (H_2O, O_2)



รูปที่ 3.3 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

3.1.4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน

แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน จะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3.4 โดยที่ซัวแอนด์จะใช้หน่วยปฏิบัติการเป็น RStoic เหตุผลที่เลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ RStoic เพราะการจำลองจำเป็นต้องคิดอัตราการไหลของไฮโดรเจนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพื่อกำหนดอัตราการใช้ไฮโดรเจนในปฏิกิริยา ซึ่งได้จากการคำนวณได้จากสมการที่ (2.45) โดยจะได้น้ำกับออกซิเจนจะออกมา (H_2O, O_2)



รูปที่ 3.4 แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน

3.2 การจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาชนิดตัวรองรับ

เซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน สามารถออกแบบให้มีชนิดตัวรองรับได้ 3 ชนิด นั่นคือตัวรองรับชนิดแคโทด แอโนด และอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในหัวข้อนี้จะทำการจำลองเพื่อหาตัวรองรับที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากตัวรองรับที่สามารถใช้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดสำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิส ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงจะพิจารณาจากตัวรองรับที่สามารถให้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามากที่สุด ในการจำลองกระบวนการจะกำหนดให้ตัวรองรับส่วนที่หนาที่สุดมีความหนา 500 ไมโครเมตร ส่วนอีก 2 ชนิดที่เหลือจะกำหนดให้มีความหนาเป็น 50 ไมโครเมตร ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบเซลล์ให้มีตัวรองรับเป็นแบบแคโทด ดังนั้นที่ขั้วแคโทดจะมีความหนา 500 ไมโครเมตร ส่วนขั้วแอโนดและอิเล็กโทรไลต์จะมีความหนา 50 ไมโครเมตร โดยใช้อุณหภูมิ 873 เคลวิน และความดัน 1 บาร์ ในการศึกษา

การจำลองกระบวนการ เพื่อศึกษาหาชนิดของตัวรองรับที่ดีที่สุดนั้น มีขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดชนิดของเซลล์ที่ต้องการศึกษา ซึ่งประกอบด้วย เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน และเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน
- 2) กำหนดชนิดตัวรองรับที่ต้องการศึกษา โดยการกำหนดความหนาเป็นไปตามที่อธิบายไว้ข้างต้น
- 3) จำลองกระบวนการ โดยการคำนวณค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ
- 4) นำข้อมูลมาสร้างกราฟที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า
- 5) ทำซ้ำในข้อที่ 2)-3) โดยเปลี่ยนชนิดของตัวรองรับ แล้วนำข้อมูลมาเขียนลงในกราฟเดียวกับข้อที่ 4)
- 6) ทำซ้ำในข้อที่ 1)-5) โดยเปลี่ยนชนิดของเซลล์ที่ต้องการศึกษา

3.3 การจำลองกระบวนการเพื่อเลือกช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงาน

เนื่องจากการเลือกใช้อิเล็กโทรไลต์ที่ต่างชนิดกัน จะสามารถดำเนินการได้ในช่วงที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งอิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนที่ทำจาก BCY10 สามารถดำเนินงานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 600 ถึง 873 เคลวิน [15] ส่วนอิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออนที่ทำจาก YSZ นั้นสามารถปฏิบัติการได้ในช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1423 เคลวิน [18]

นอกจากอุณหภูมิในการดำเนินงานของเซลล์แล้ว ยังมีสภาวะการดำเนินงานอื่น ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์ เช่น ความดัน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลของสายป้อน (น้ำและไฮโดรเจน) ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดขีดจำกัดของกระแสไฟฟ้าได้ โดยงานวิจัยนี้จะใช้ความดัน 1 บาร์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของสายป้อน 600 โมลต่อชั่วโมง จึงทำการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง เนื่องจากสามารถเห็นจุดที่ไม่สามารถให้กระแสไฟฟ้าออกมาได้อย่างชัดเจน ขณะที่เซลล์อิเล็กโทรไลต์ซิสจะไม่นำมาศึกษาเนื่องจากเซลล์ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้ไม่สามารถจุดที่ต้องการไฟฟ้าได้อย่างชัดเจนเพราะจะมีค่าเข้าสู่อินันต์ แต่สามารถนำผลการจำลองจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมาใช้ได้ เนื่องจากใช้อิเล็กโทรไลต์ชนิดเดียวกัน โดยอุณหภูมิที่นำมาใช้ในการศึกษาเซลล์ที่อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 873 เคลวิน ขณะที่เซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออนจะใช้ในช่วงอุณหภูมิที่ 700 ถึง 1423 เคลวิน

3.4 การจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการดำเนินงานที่มีต่อค่าศักย์ของเซลล์ของเซลล์อิเล็กโทรไลต์และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน เนื่องจากเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ชนิดเดียวกัน หากดำเนินงานภายใต้อุณหภูมิและความดันเดียวกันจะมีศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะมีศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิในการดำเนินงานที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียชนิดต่างๆ (ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานภายในเซลล์ ความเข้มข้น และปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี) จะแสดงเป็นกราฟแท่งเพียง 2 กราฟ คือ กราฟของเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน

การศึกษาผลของอุณหภูมิในการดำเนินงานที่มีต่อค่าศักย์ของเซลล์ของเซลล์แต่ละชนิด มีขั้นตอน ดังนี้

- 1) จำลองกระบวนการโดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 773 ถึง 1373 เคลวิน โดยกำหนดให้ความดันมีค่าเท่ากับ 1 บรรยากาศ อัตราการไหลของน้ำสายป้อนมีค่าเท่ากับ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีค่าเท่ากับ 2680 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
- 2) นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองกระบวนการมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน ที่อุณหภูมิต่างๆ
- 3) จำลองกระบวนการโดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 773 ถึง 1373 เคลวิน ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อัตราการไหลของไฮโดรเจนสายป้อน 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ 2680 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
- 4) นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองกระบวนการมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน ที่อุณหภูมิต่างๆ

3.5 การจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาผลกระทบของความดัน

งานวิจัยนี้ดำเนินงานเพื่อศึกษาผลกระทบของความดันที่มีต่อค่าศักย์ของเซลล์ของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.4 เนื่องจากเซลล์ที่ใช้วัสดุแบบเดียวกันจะมีศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเท่ากัน ดังนั้นจึงแสดงกราฟแห่งของศักย์ไฟฟ้าสูญเสียต่างๆ (ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานภายในเซลล์ ความเข้มข้น และปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี) ที่ความดันต่างๆ ขึ้นมาเพียง 2 กราฟ คือ กราฟของเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน

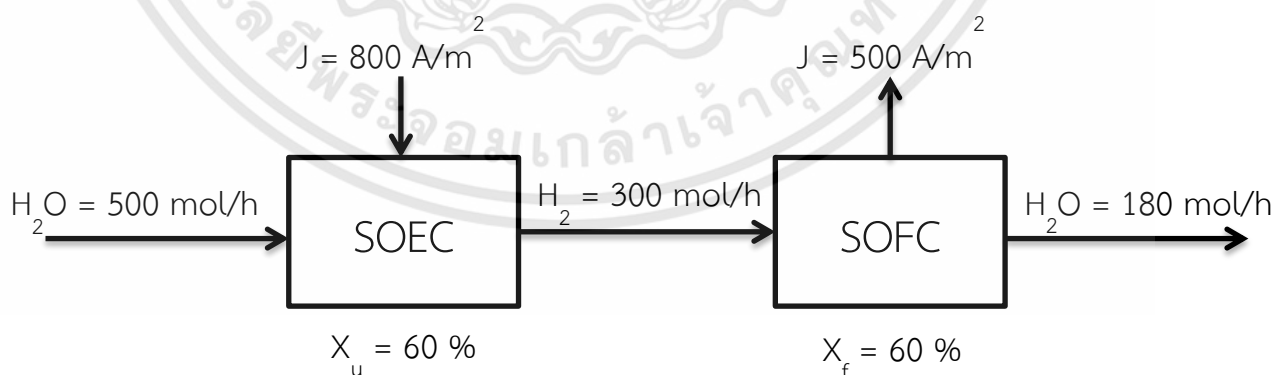
การศึกษาผลของความดันในการดำเนินงานที่มีต่อค่าศักย์ของเซลล์แต่ละชนิด มีขั้นตอน ดังนี้

- 1) จำลองกระบวนการโดยการปรับเปลี่ยนความดันในการดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน ในช่วงความดันตั้งแต่ 1 ถึง 20 บาร์ โดยกำหนดให้อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 1073 เคลวิน อัตราการไหลของน้ำสายป้อนมีค่าเท่ากับ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีค่าเท่ากับ 2680 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
- 2) นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองกระบวนการมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน ที่ความดันต่างๆ
- 3) จำลองกระบวนการโดยการปรับเปลี่ยนความดันในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน ในช่วงความดันตั้งแต่ 1 ถึง 20 บาร์ โดยกำหนดให้อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 1073 เคลวิน อัตราการไหลของไฮโดรเจนสายป้อน 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ 1000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
- 4) นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองกระบวนการมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน ที่ความดันต่างๆ

3.6 การจำลองกระบวนการของระบบร่วมระหว่างเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

การจำลองกระบวนการในหัวข้อนี้ ทำขึ้นเพื่อจะหาระบบร่วมระหว่างเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะดูจากค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า การศึกษาในส่วนนี้จะกำหนดให้เซลล์แต่ละชนิดใช้การออกแบบที่ดีที่สุดซึ่งได้มาจากการศึกษาในหัวข้อ 3.2 ช่วงอุณหภูมิที่สามารถทำให้ศักย์ของเซลล์สูงที่สุดจากหัวข้อ 3.3 และ 3.4 และเลือกความดันที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 3.5 รูปที่ 3.5 แสดงการดำเนินงานร่วมกันของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง สำหรับการศึกษาการดำเนินงานของระบบร่วม มีขั้นตอนดังนี้

- 1) สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน จะใช้ตัวรองรับชนิดแคโทด อุณหภูมิ 873 เคลวิน ความดัน 1 บาร์
- 2) สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน จะใช้ตัวรองรับชนิดแอโนด อุณหภูมิ 1423 เคลวิน ความดัน 1 บาร์
- 3) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน จะใช้ตัวรองรับชนิดแอโนด อุณหภูมิ 873 เคลวิน ความดัน 1 บาร์
- 4) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน จะใช้ตัวรองรับชนิดแอโนด อุณหภูมิ 1423 เคลวิน ความดัน 1 บาร์
- 5) จำลองกระบวนการ โดยกำหนดให้น้ำป้อนเข้ามายังเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งด้วยอัตราการไหล 500 โมลต่อชั่วโมง และกำหนดเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งมีการใช้น้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีอัตราการใช้ไฮโดรเจนเพื่อผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 60 เปอร์เซ็นต์ เท่ากัน เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลอง
- 6) คำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของแต่ละเซลล์แต่ละชนิด



รูปที่ 3.5 แผนผังการนำเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ร่วมกัน

3.7 การจำลองกระบวนการเพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน

เนื่องจากการเลือกใช้อิเล็กโทรไลต์ที่ต่างชนิดกัน มีผลให้เซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนที่ทำมาจากวัสดุ BCY10 และเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออนที่ทำมาจากวัสดุ YSZ มีสมรรถนะไม่เท่ากัน ในการปรับปรุงให้เซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนมีสมรรถนะเทียบเคียงกับเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออน ในวิจัยนี้เสนอให้มีการเพิ่มจำนวนเซลล์ของเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน โดยจะคำนวณหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมที่ทำให้เซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนมีสมรรถนะเทียบเท่ากับเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออน ในการศึกษาทั้งเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนจะดำเนินการที่อุณหภูมิ 873 เคลวิน ความดัน 1 บาร์ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งจะถูกเปรียบเทียบกันในรูปแบบของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ โดยจะทำการเป็นขั้นตอนดังนี้

- 1) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน จะใช้ตัวรองรับชนิดแอโนด จำนวนเซลล์ที่ใช้คือ 500 เซลล์ ทำการจำลองกระบวนการเพื่อคำนวณหาศักย์ไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้า
- 2) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกโปรตอน จะใช้ตัวรองรับชนิดแอโนด จำนวนเซลล์ที่ใช้คือ 500 ถึง 1400 เซลล์ ทำการจำลองกระบวนการเพื่อคำนวณหาศักย์ไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้า
- 3) สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน จะใช้ตัวรองรับชนิดแอโนด จำนวนเซลล์ที่ใช้คือ 500 เซลล์ ทำการจำลองกระบวนการเพื่อคำนวณหาศักย์ไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้า
- 4) สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกโปรตอน จะใช้ตัวรองรับชนิดแคโทด จำนวนเซลล์ที่ใช้คือ 500 ถึง 900 เซลล์ ทำการจำลองกระบวนการเพื่อคำนวณหาศักย์ไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้า
- 5) เปรียบเทียบผลของค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละเซลล์

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการจำลองกระบวนการ

ผลการจำลองกระบวนการเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนถูกแบ่งเป็น 7 ส่วนหลัก ได้แก่ 4.1 การตรวจสอบแบบจำลอง (Validation) 4.2 การศึกษาการเลือกใช้ตัวรองรับสำหรับเซลล์แบบต่างๆ 4.3 การศึกษาช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงาน 4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิ 4.5 ผลกระทบของความดัน 4.6 การศึกษาการนำเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ร่วมกัน และ 4.7 การปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน

4.1 การตรวจสอบแบบจำลอง (Validation)

การตรวจสอบแบบจำลองจะถูกดำเนินการเพื่อยืนยันว่าผลการจำลองกระบวนการสามารถทำนายสมรรถนะการทำงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนได้จริง โดยการตรวจสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อย โดยการเลือกวัสดุที่นำมาใช้ในส่วนประกอบของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนนั้น ซึ่งจะส่งผลต่อค่าการนำ (conductivity) ทำให้แนวโน้มของค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้านั้นต่างกันด้วย ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้จะเป็นดังนี้

วัสดุที่นำมาใช้ในเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

- 1) ขั้วแอโนด : Pt ความหนา 100 ไมโครเมตร
- 2) ขั้วแคโทด : Pt ความหนา 200 ไมโครเมตร
- 3) อิเล็กโทรไลต์ : $\text{BaCe}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\alpha}$ (BCY10) ความหนา 100 ไมโครเมตร

วัสดุที่นำมาใช้ในเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน

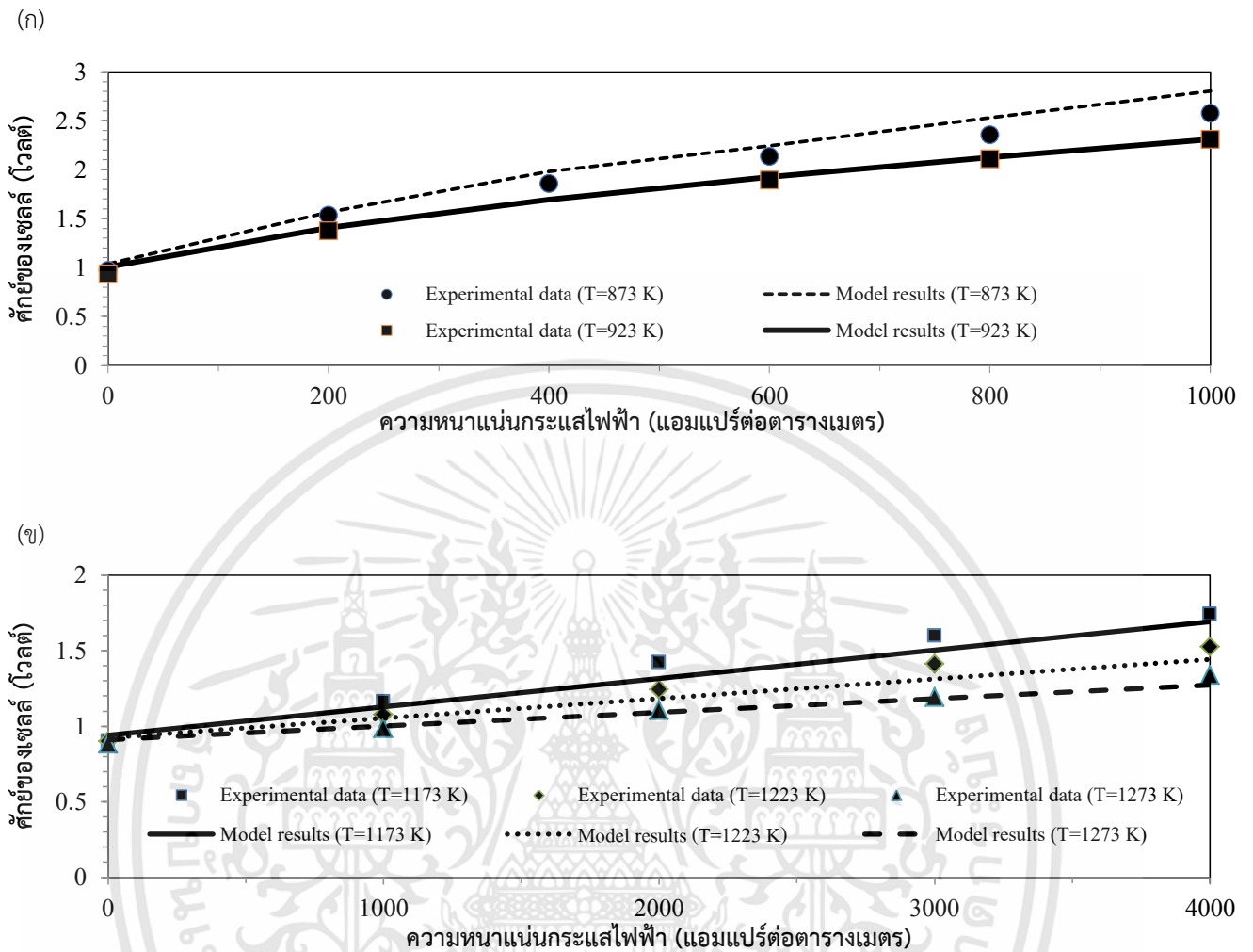
- 1) ขั้วแอโนด : Ni ความหนา 500 ไมโครเมตร
- 2) ขั้วแคโทด : LaMnO_3 (LSM) ความหนา 50 ไมโครเมตร
- 3) อิเล็กโทรไลต์ : Y_2O_3 (YSZ) ความหนา 10 ไมโครเมตร

4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็ง

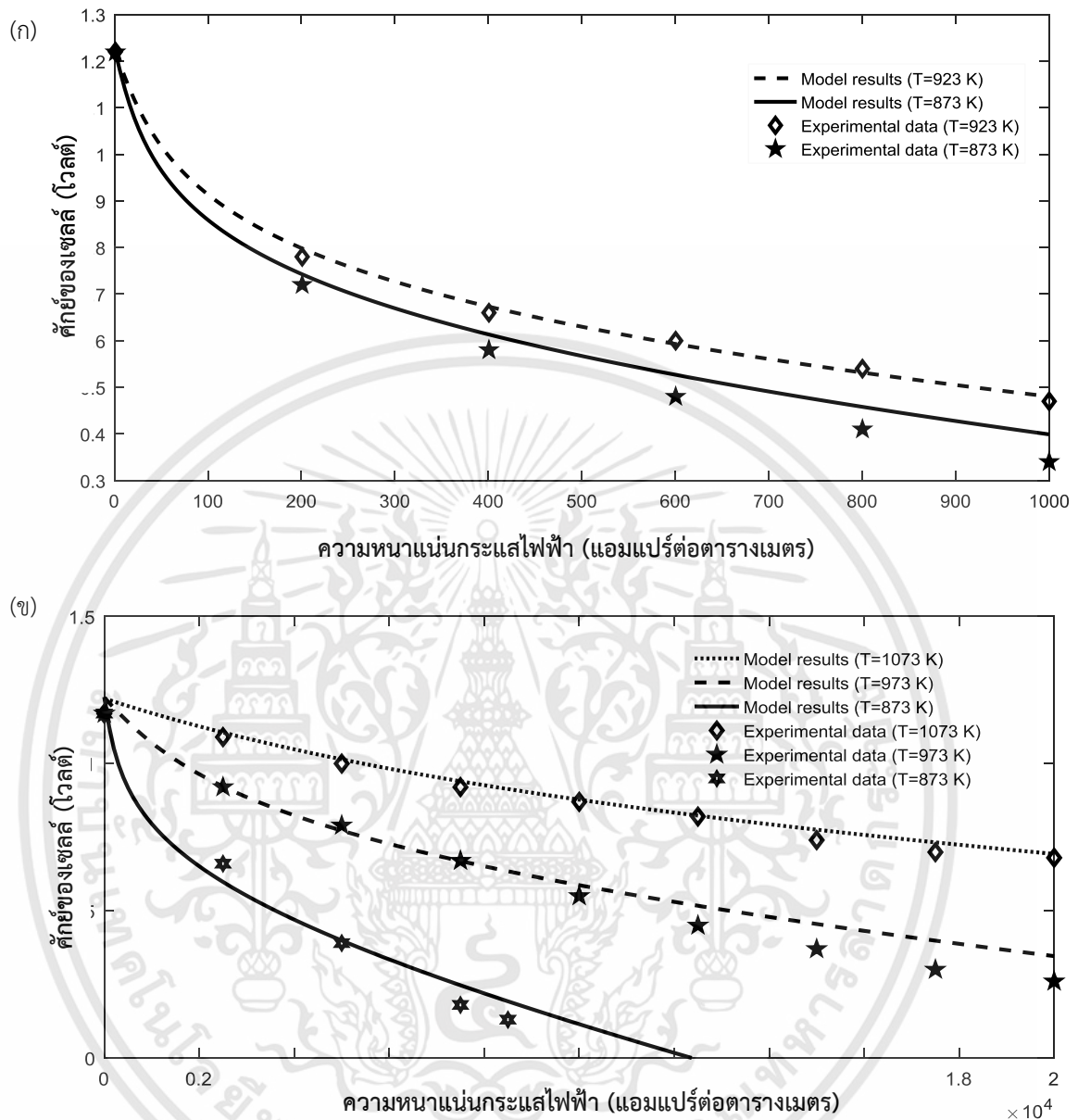
การทดลองของ P.A. Stuart [10] (อัตราการป้อนน้ำเท่ากับ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง และความดันในการดำเนินงานเท่ากับ 1 บาร์) และ A. Momma [19] (อัตราการป้อนน้ำเท่ากับ 5 กิโลโมลต่อชั่วโมง และความดันในการดำเนินงานเท่ากับ 1 บาร์) ถูกนำมาใช้สำหรับการตรวจสอบแบบจำลองเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนตามลำดับ ซึ่งรูปที่ 4.1 จะแสดงผลการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ระหว่างผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับผลที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิดำเนินงานต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างระหว่างผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบกันนั้นมีค่าไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานี้มีความเหมาะสมที่จะใช้เพื่อทำการศึกษการผลิตไฮโดรเจนผ่านเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งทั้งสองแบบ ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่นำมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งสำหรับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบมีโปรตอนเป็นตัวนำจะนำมาจากงานวิจัยของ L. Namwong และคณะ [9] ส่วนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำจะนำมาจากงานวิจัยของ Y. Patcharavorachot และคณะ [11]

4.1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

การทดลองของ P.A. Stuart [10] (โดยจะใช้ไฮโดรเจน 1 กิโลโมลต่อชั่วโมงและความดัน 1 บาร์) และ การทดลองของ F. Zhao และ AV. Virkar [20] (โดยจะใช้ไฮโดรเจน 1 กิโลโมลต่อชั่วโมงและความดัน 1 บาร์) ถูกนำมาใช้สำหรับการตรวจสอบแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนตามลำดับ ซึ่งรูปที่ 4.2 จะแสดงผลการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับผลจากการทดลองที่อุณหภูมิดำเนินงานต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างระหว่างผลการจำลองกระบวนการกับผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบกันนั้นมีค่าน้อยมาก ซึ่งถือว่าสามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานี้มีความเหมาะสมที่จะใช้เพื่อทำการศึกษการผลิตไฮโดรเจนผ่านเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งทั้งสองแบบ ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่นำมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งสำหรับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้แบบเดียวกับหัวข้อ 4.1.1



รูปที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองกระบวนการและค่าที่ได้จากการทดลอง (ก) เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ P.A. Stuart [10] (ข) เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออน เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยของ A. Momma [19]



รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองกระบวนการและค่าที่ได้จากการทดลอง (ก) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้ไอเล็กโทโรไลต์แบบนำโปรตอน เปรียบเทียบกับการทดลองของ P.A. Stuart [10] (ข) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้ไอเล็กโทโรไลต์แบบออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ เปรียบเทียบกับการทดลองของ F. Zhao และ AV. Virkar [20]

4.2 การศึกษาการเลือกใช้ตัวรองรับสำหรับเซลล์แบบต่างๆ

ในการออกแบบเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน สามารถออกแบบให้มีตัวรองรับได้ 3 ชนิด คือ ตัวรองรับชนิดแคโทด (cathode supported) แอโนด (anode supported) และอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte supported) ซึ่งตัวรองรับที่ดีที่สุดของเซลล์แต่ละชนิดจะถูกนำเสนอในหัวข้อย่อย 4.2.1-4.2.4 เนื่องจากผลกระทบที่ส่งต่อการเลือกใช้ตัวรองรับทั้งหมดนั้นมีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงแสดงผลการวิเคราะห์ไว้ในหัวข้อย่อยที่ 4.2.5 โดยจะกำหนดค่าคงที่ต่างๆ ดังนี้

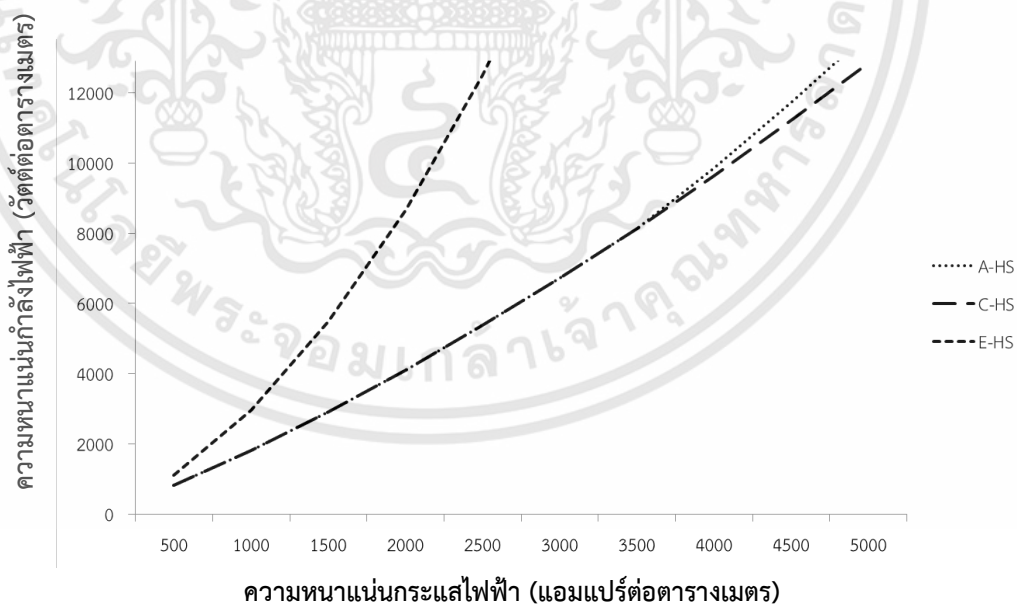
- 1) อุณหภูมิในการดำเนินงานของเซลล์ 873 เคลวิน
- 2) ความดันในการดำเนินงานของเซลล์ 1 บาร์
- 3) จำนวนเซลล์ 500 เซลล์
- 4) พื้นที่ผิวสัมผัส 0.04 ตารางเมตร
- 5) ชั้นที่เป็นตัวรองรับจะกำหนดให้มีความหนา 500 ไมโครเมตร ส่วนอีกสองชั้นที่เหลือจะกำหนดให้แต่ละชั้นมีความหนา 50 ไมโครเมตรเท่ากัน

4.2.1 การศึกษาชนิดตัวรองรับที่เหมาะสมของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

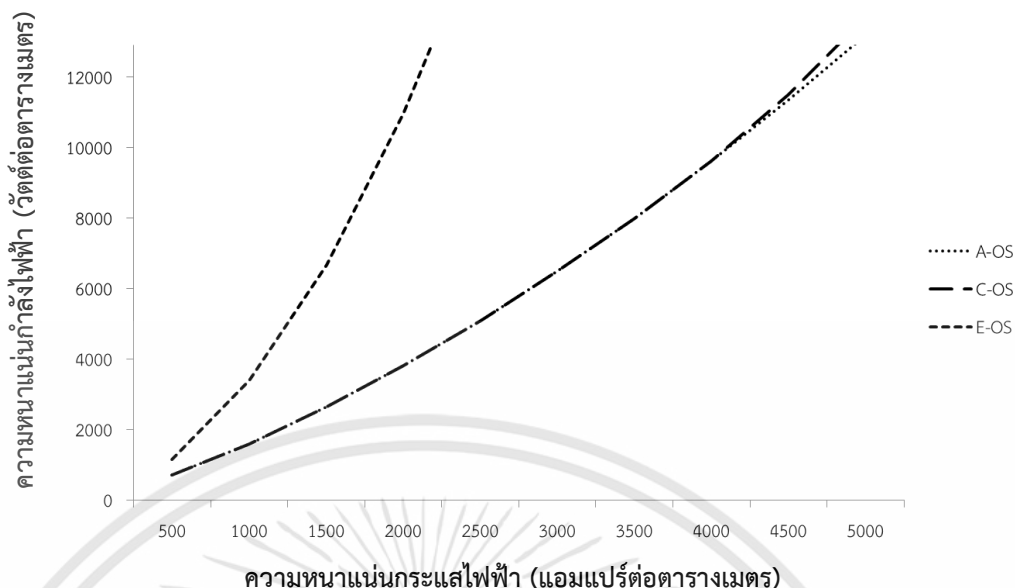
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน เมื่อใช้ตัวรองรับแบบต่างๆกัน จากรูปจะเห็นได้ว่าเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ใช้ตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์จะต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงมากในการดำเนินงานเมื่อเทียบกับการใช้ตัวรองรับชนิดแอโนดและแคโทด และเมื่อตัวรองรับชนิดแอโนดเปรียบเทียบกับตัวรองรับชนิดแคโทด พบว่าในการดำเนินงานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ที่ขั้วแอโนดจะมีการแพร่ของไอน้ำและเกิดออกซิเจนที่ได้จากการทำปฏิกิริยา ทำให้เมื่อด้านแอโนดมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ขั้วแคโทด มีเพียงแคไฮโดรเจนเท่านั้น ถึงแม้จะออกแบบให้ขั้วแคโทดมีความหนาเพิ่มขึ้นก็ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นเท่ากับการเพิ่มความหนาของขั้วแอโนด และจากการจำลองกระบวนการนี้พบว่าการใช้ตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าสูงมาก ส่งผลให้ต้องใช้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงที่สุด ดังนั้นจากการศึกษาจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ตัวรองรับชนิดแคโทดจะเหมาะสมที่สุดสำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน เนื่องจากจะใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด

4.2.2 การศึกษาชนิดตัวรองรับที่เหมาะสมของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน

ในหัวข้อนี้จะคล้ายกับหัวข้อที่แล้ว (หัวข้อที่ 4.2.1) แต่จะเปลี่ยนมาวิเคราะห์การเลือกใช้ตัวรองรับของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน ซึ่งจากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเลือกใช้ตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ นั้นไม่เหมาะสมกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำออกซิเจนไอออนเพื่อผลิตไฮโดรเจน เช่นเดียวกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอน เพราะค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าสูงนั้นส่งผลให้ต้องใช้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ามากขึ้น ส่วนตัวรองรับที่เหมาะสมสำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำออกซิเจนไอออน คือ ตัวรองรับชนิดแอโนด ซึ่งในการดำเนินงานนี้พบว่าเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน ที่ขั้วแคโทดจะมีการแพร่ของไอน้ำและเกิดไฮโดรเจนที่ได้จากการทำปฏิกิริยา ทำให้เมื่อด้านแคโทดมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นจะมีความมากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ขั้วแอโนด มีเพียงแคแก๊สออกซิเจนที่เกิดจากการรวมตัวของออกซิเจนไอออนเท่านั้น ซึ่งถ้าเทียบจำนวนโมลที่ทำปฏิกิริยาจากขั้วแคโทดและขั้วแอโนด พบว่าจำนวนโมลในฝั่งขั้วแอโนดนั้นน้อยกว่ามาก ถึงแม้จะออกแบบให้ขั้วแอโนดมีความหนาแน่นมากขึ้นก็ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นเท่ากับการเพิ่มความหนาแน่นของขั้วแคโทด ดังนั้นจากการศึกษาจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ตัวรองรับชนิดแอโนดจะเหมาะสมที่สุดสำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน เนื่องจากจะใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด



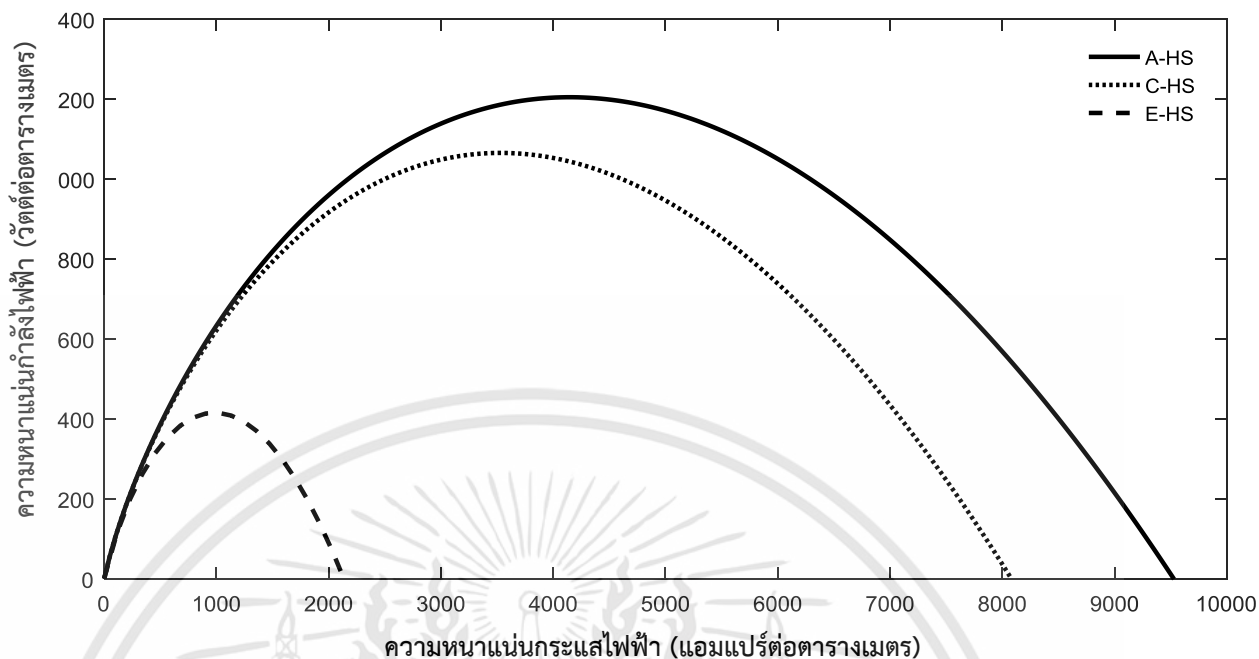
รูปที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ใช้ตัวรองรับชนิดแอโนด (A-HS) ชนิดแคโทด (C-HS) และชนิดอิเล็กโทรไลต์ (E-HS) ที่อุณหภูมิ 873 เคลวิน และความดัน 1 บาร์



รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ใช้ตัวรองรับชนิดแอนโอด (A-HS) ชนิดแคโทด (C-HS) และชนิดอิเล็กโทรไลต์ (E-HS) ที่อุณหภูมิ 873 เคลวิน และความดัน 1 บาร์

4.2.3 การศึกษาชนิดตัวรองรับที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

การศึกษาตัวรองรับที่เหมาะสมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งนั้นจะแตกต่างกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิส โดยตัวรองรับที่เหมาะสมคือตัวรองรับที่ให้กำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นไฟฟ้ามากที่สุด จากรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน เมื่อใช้ตัวรองรับแบบต่างๆ จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวรองรับชนิดแอนโอดมีความเหมาะสมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนเพื่อนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากไฮโดรเจนมากที่สุด เพราะได้กำลังไฟฟ้าสูงที่สุดและยังสามารถดำเนินงานในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากว้างที่สุดด้วย โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวรองรับชนิดแคโทดพบว่าในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ขั้วแคโทดจะมีการแพร่ของทั้งออกซิเจนและน้ำที่ได้จากการทำปฏิกิริยา ทำให้เมื่อด้านแคโทดมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านมวลจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ขั้วแอนโอด มีเพียงแคไฮโดรเจนเท่านั้น ถึงแม้จะออกแบบให้ขั้วแอนโอดมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นก็ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นเท่ากับการเพิ่มความหนาแน่นของขั้วแคโทด และจากการจำลองกระบวนการพบว่าการใช้ตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าสูงมาก ส่งผลให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำมากที่สุด

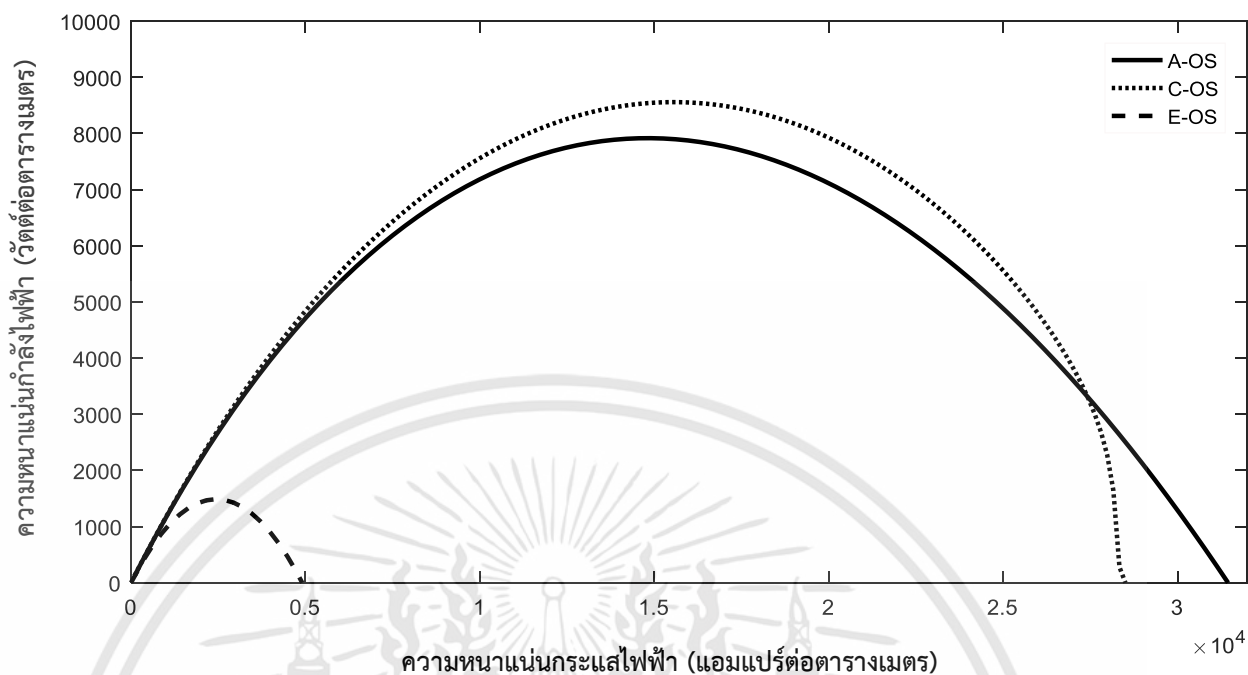


รูปที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่มีตัวรองรับชนิดแอนไอต์ (A-HS) ตัวรองรับชนิดแคโทด (C-HS) และตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ (E-HS) ที่อุณหภูมิ 873 เคลวิน และความดัน 1 บาร์

4.2.4 การศึกษาชนิดตัวรองรับที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน

ผลจากการศึกษาการใช้ตัวรองรับชนิดต่างๆ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นว่า การออกแบบเซลล์โดยใช้ตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นไฟฟ้าต่ำที่สุด เนื่องจากผลของความหนาแน่นที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวรองรับชนิดแคโทดและแอนไอต์ ผลจากการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่า ในช่วงแรกตัวรองรับชนิดแคโทดจะดำเนินงานได้ดีกว่าชนิดแอนไอต์ทั้งในแง่ของกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แต่เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น การออกแบบโดยใช้ตัวรองรับชนิดแคโทดจะเกิดค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก แม้ที่ขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนจะมีเพียงอากาศเท่านั้น แต่เมื่อเทียบกับทางด้านขั้วแอนไอต์ที่มีไฮโดรเจนกับน้ำ พบว่ามวลโมเลกุลของสารในฝั่งขั้วแคโทดนั้นมีค่ามากกว่า จึงเป็นผลให้การเพิ่มความหนาแน่นของขั้วแคโทดมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นมากกว่าการเพิ่มความหนาแน่นของขั้วแอนไอต์ จากผลการจำลองกระบวนการดังรูปที่ 4.6 จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ตัวรองรับชนิดแอนไอต์มีความเหมาะสมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนเพื่อนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากไฮโดรเจนมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนที่มีตัวรองรับชนิดแอโนด (A-OS) ตัวรองรับชนิดแคโทด (C-OS) และตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ (E-OS) ที่อุณหภูมิ 873 เคลวิน และความดัน 1 บาร์

4.2.5 การศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียของตัวรองรับแต่ละชนิด

ในหัวข้อนี้จะแสดงการวิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียแต่ละชนิดที่ส่งต่อการใช้ตัวรองรับชนิดต่างๆ ซึ่งเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบเดียวกันจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะมีศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ดังนั้นกราฟในรูปที่ 4.7 ถึง 4.8 จะใช้อธิบายค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน เมื่อใช้ตัวรองรับแบบต่างๆกัน

รูปที่ 4.7 (ก) ถึง (ค) แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียทั้ง 3 ชนิด ของเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน และออกแบบเซลล์โดยใช้ขั้วแอโนด แคโทด และอิเล็กโทรไลต์ เป็นตัวรองรับ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า พบว่าจะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียหลักที่ส่งผลกระทบต่อทุกตัวรองรับ โดยเฉพาะกับตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ เพราะความหนาของอิเล็กโทรไลต์ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความต้านทานภายในเซลล์มีมากขึ้นด้วย ส่วนศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นจะเห็นได้ว่าแทบจะไม่ส่งผลเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเลย เนื่องจากธรรมชาติของศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

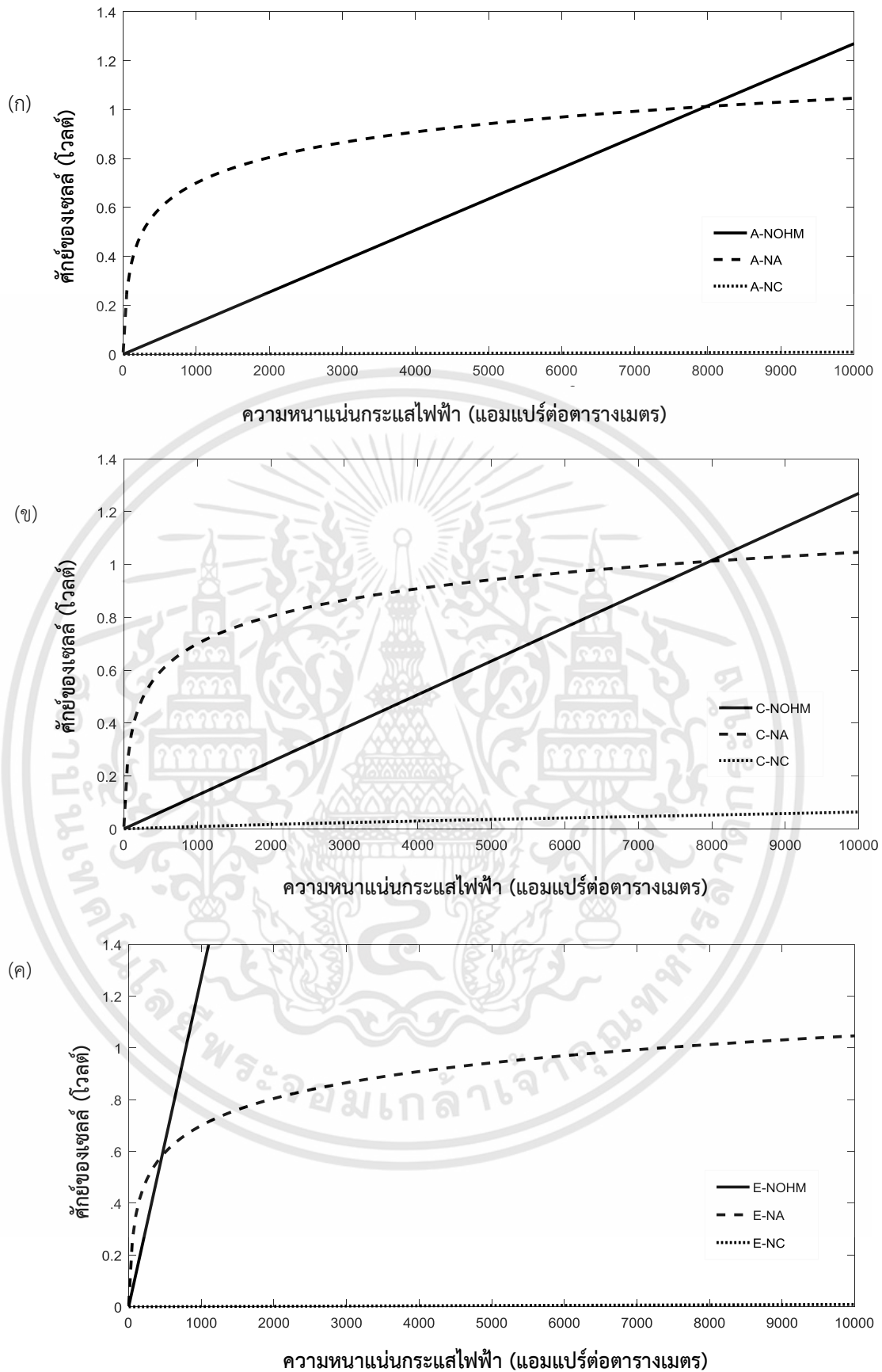
กระแสไฟฟ้ามีค่ามากพอ ซึ่งในกรณีนี้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ายังไม่มากพอที่จะเห็นผลกระทบของ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น สุดท้ายคือศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี การเพิ่มความหนาแน่นของตัวรองรับทุกชนิดจะไม่ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนแปลงไป จากเดิม มีเพียงค่าพลังงานก่อกัมมันต์ อุณหภูมิ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่านั้นที่สามารถส่งผลกระทบต่อศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี

จากรูปที่ 4.8 (ข) เมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นมากพอ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย เนื่องจากความเข้มข้นจะมีค่าสูงมาก ซึ่งธรรมชาติของศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นจะมีค่าต่ำมากเมื่อช่วงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าปกติ แต่เมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามากพอก็จะทำให้ความต้านทานในการถ่ายเทมวลมีค่าสูงขึ้นจนบางทีก็สามารถเป็นตัวแปรหลักในการกำหนดลิมิตในระบบปฏิบัติการได้

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาจะมีผลอย่างเห็นได้ชัดในช่วงที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำ ในขณะที่ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานก็ถือว่าเป็นตัวแปรหลักที่จะส่งผลกระทบต่อเนื่องตลอดช่วงความหนาแน่นไฟฟ้า โดยเฉพาะในตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานจะมีค่ามากที่สุด ส่วนศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นนั้น จะมีค่าน้อยมากหรือแทบจะไม่มี จนกระทั่งเมื่อเพิ่มความหนาแน่นไฟฟ้าจนมากพอ จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นมีค่าโดดเด่นขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัด

คำอธิบายของตัวย่อภายในกราฟ

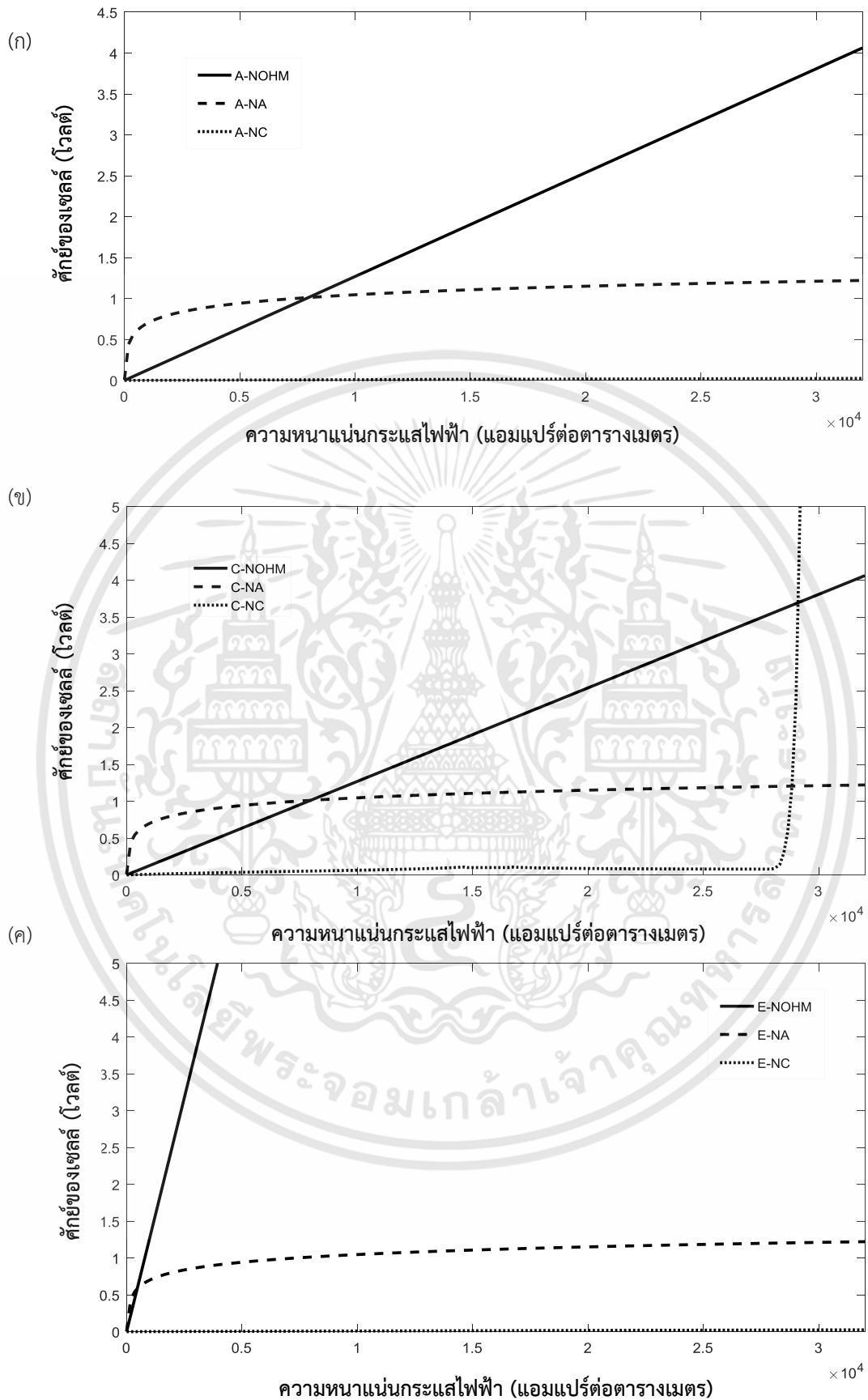
- ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของตัวรองรับชนิดแอโนด (A-NOHM)
- ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของตัวรองรับชนิดแอโนด (A-NA)
- ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นของตัวรองรับชนิดแอโนด (A-NC)
- ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของตัวรองรับชนิดแคโทด (C-NOHM)
- ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของตัวรองรับชนิดแคโทด (C-NA)
- ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นของตัวรองรับชนิดแคโทด (C-NC)
- ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ (E-NOHM)
- ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ (E-NA)
- ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นของตัวรองรับชนิดอิเล็กโทรไลต์ (E-NC)



รูปที่ 4.7 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียแต่ละชนิดของเซลล์ที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนและมีตัวรองรับชนิด

(ก) แอนโนด (ข) แคโทด และ (ค) อิเล็กโทรไลต์ ที่อุณหภูมิ 873 เคลวิน และความดัน 1 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียแต่ละชนิดของเซลล์ที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออนและมีตัวรองรับ

ชนิด (ก) แอนโอด (ข) แคโทด และ (ค) อิเล็กโทรไลต์ ที่อุณหภูมิ 873 เคลวิน และความดัน 1 บาร์

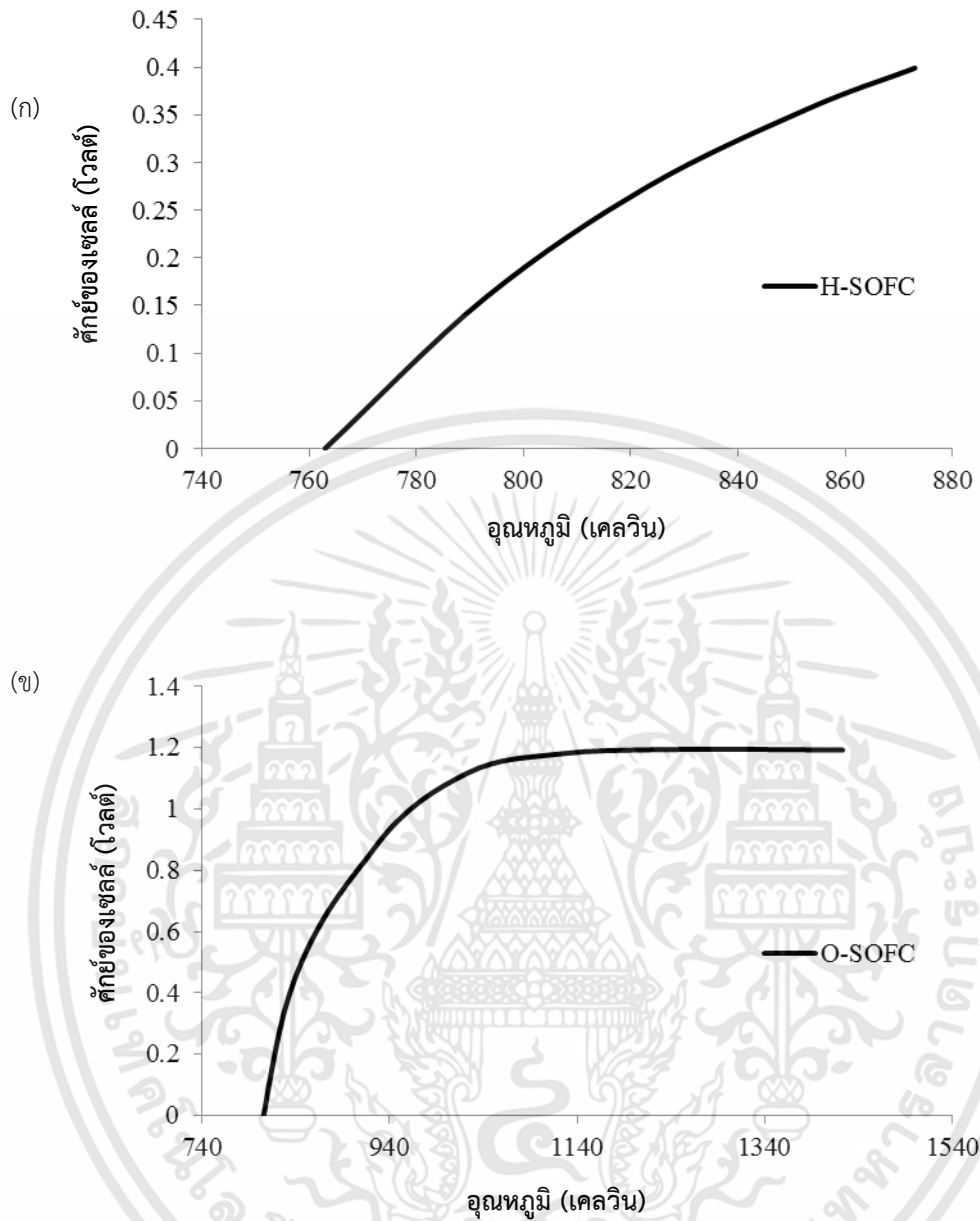
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงาน

ในการดำเนินงานจริง วัสดุแต่ละชนิดที่นำมาทำอิเล็กโทรไลต์นั้น จะสามารถดำเนินงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้เซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะใช้ อิเล็กโทรไลต์ชนิดเดียวกันนั่นคือ BCY10 ซึ่งสามารถปฏิบัติการได้ที่ช่วงอุณหภูมิที่ 600 ถึง 873 เคลวิน [15] ส่วนเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนจะใช้ YSZ เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสามารถปฏิบัติการได้ที่ 700 ถึง 1423 เคลวิน [18] ดังนั้นในหัวข้อ 4.3 จะสามารถช่วยเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปฏิบัติได้

จากการจำลอง รูปที่ 4.9 (ก) แสดงให้เห็นว่า แม้วัสดุจะสามารถทำงานได้ตั้งแต่ 600 ถึง 873 เคลวิน แต่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งมาจากการคำนวณในสมการที่ (2.47) ที่กำหนดให้อัตราการใช้ไฮโดรเจนเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำได้แค่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 760 ถึง 873 เคลวิน เท่านั้น เนื่องจากความสามารถในการให้กระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนนั้นต่ำ

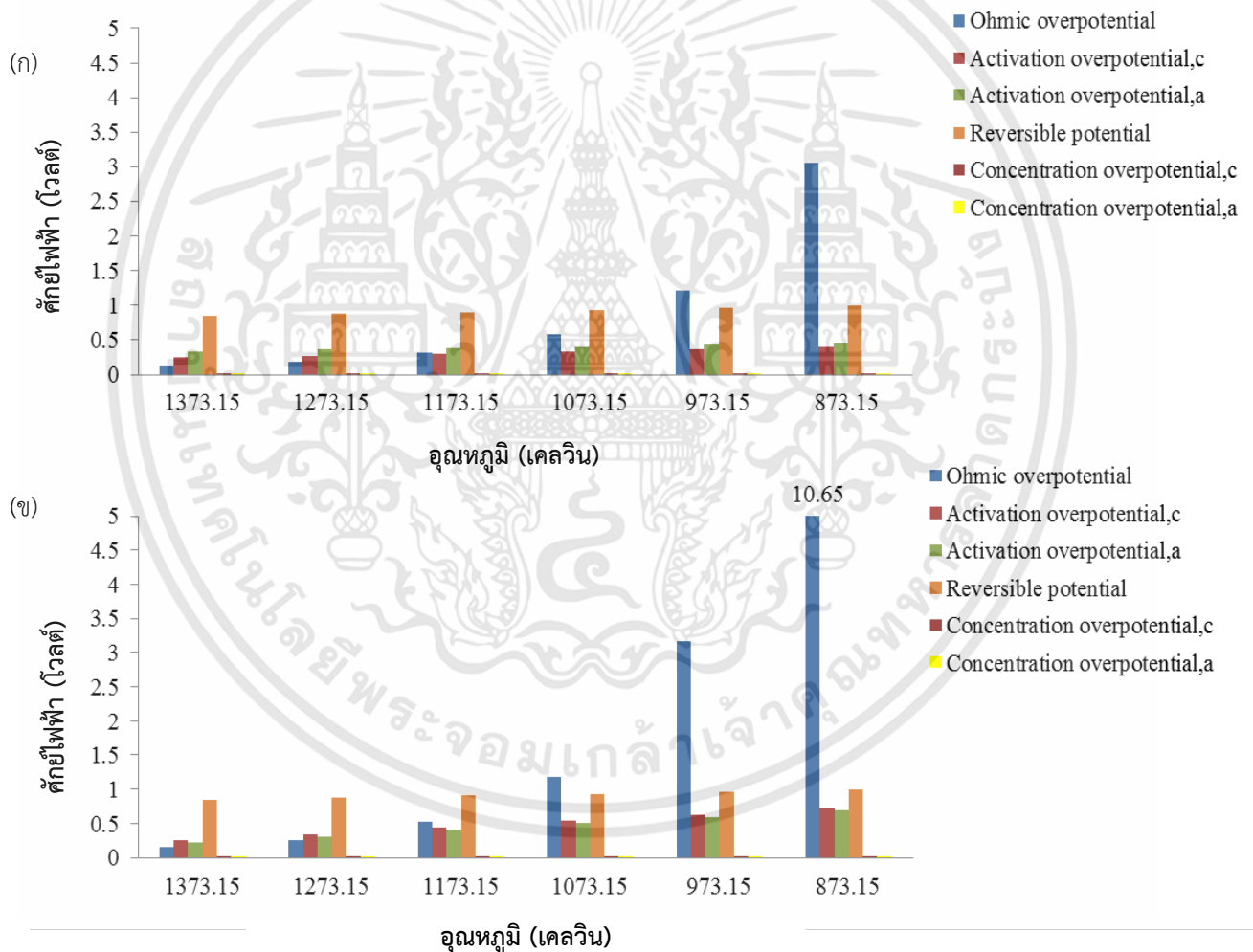
ขณะเดียวกัน ความสามารถในการปฏิบัติการที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนจะถูกแสดงอยู่ใน รูปที่ 4.9 (ข) ซึ่งเห็นได้ว่าที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 1000 ถึง 1423 เคลวิน เป็นช่วงที่ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนสูงที่สุด ขณะที่ช่วงอุณหภูมิที่ 800 ถึง 1000 จะเป็นช่วงที่ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนมีประสิทธิภาพต่ำ จึงไม่ควรนำมาใช้ในการปฏิบัติการที่ช่วงอุณหภูมินี้ ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์แบบ YSZ มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออนได้ดีที่ช่วงอุณหภูมิสูง ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนจะสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 1000 ถึง 1423 เคลวิน



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์และอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำ (ก) โปรตอน และ (ข) ออกซิเจนไอออน ที่ความดัน 1 บาร์ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิ

ในหัวข้อนี้จะอธิบายผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อเซลล์แต่ละชนิดอย่างละเอียด โดยเซลล์ที่ใช้วัสดุทำอิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรดเหมือนกัน จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเท่าๆกัน เช่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน เมื่อดำเนินงานที่สภาวะเดียวกันจะมีศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเท่ากัน โดยรูปที่ 4.10 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียแบบต่างๆที่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียทุกชนิดจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ในหัวข้อย่อยที่ 4.4.1 และ 4.4.2 จะสมมุติว่าอิเล็กโทรไลต์แต่ละแบบสามารถทำงานได้ที่ช่วงอุณหภูมิที่เท่ากัน เพื่อให้เข้าใจปรากฏการณ์ต่างๆได้อย่างชัดเจนมากขึ้น

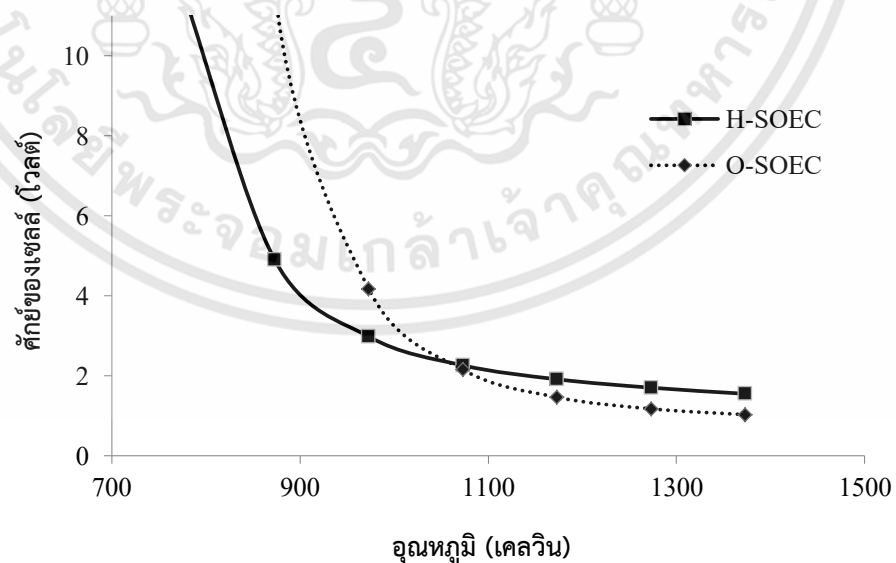


รูปที่ 4.10 ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่อุณหภูมิต่างๆของเซลล์ที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมี (ก) โปรตอนเป็นตัวนำ (ข) ออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ ที่ความดัน 1 บาร์ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2680 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิของเซลล์อิเล็กโทรไลต์

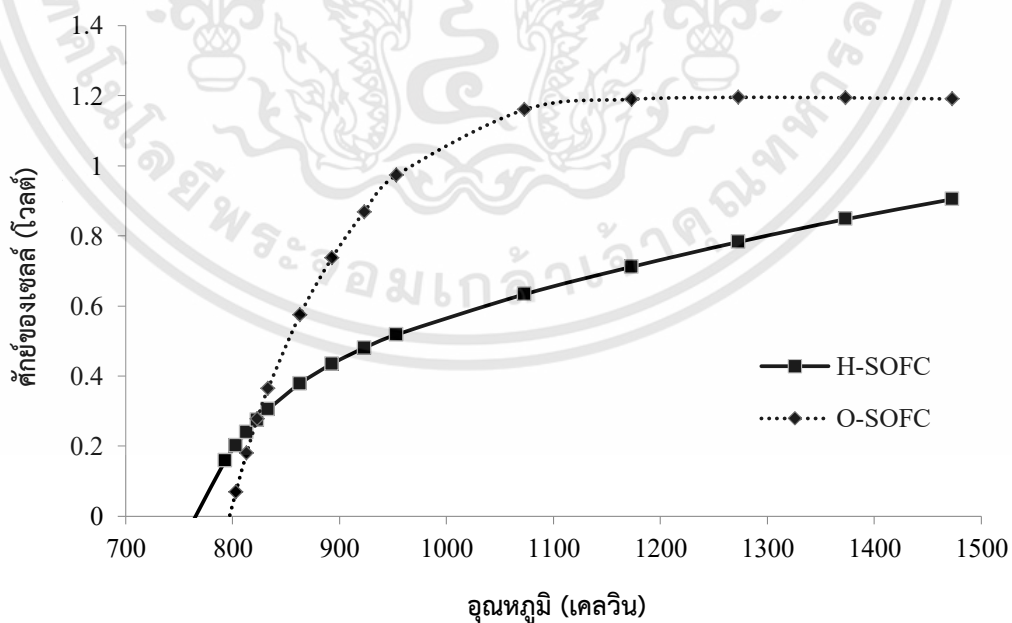
ในส่วนนี้อุณหภูมิในการปฏิบัติการของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งจะถูกสำรวจในช่วง 773 ถึง 1373 เคลวิน ในขณะที่ตัวแปรอื่น ๆ จะทำให้มีค่าคงที่ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 3.1 จากรูปที่ 4.11 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งทั้ง 2 ชนิด ผลจากการจำลองกระบวนการระบุให้เห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ของทั้ง 2 ชนิดจะลดลงเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จากการพิจารณาศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเฉพาะส่วนในรูปที่ 4.10 จะทำให้เห็นว่าอุณหภูมิในการดำเนินงานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นเพราะการนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานจะมีค่าลดลง ยิ่งไปกว่านั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการดำเนินงานจะนำไปสู่การลดลงเล็กน้อยของศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีอีกด้วย ที่น่าสนใจคือจากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1050 เคลวิน เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์น้อยกว่าเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน ในขณะที่เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์น้อยกว่าเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน เมื่อดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 1050 เคลวิน ซึ่งผลจากการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า การนำโปรตอนจะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิในการดำเนินงานต่ำๆ ส่วนการนำออกซิเจนไอออนจะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงๆ ดังนั้นจากผลการจำลองกระบวนการสามารถสรุปได้ว่า เซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะเหมาะกับการดำเนินงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1050 เคลวิน ในขณะที่การดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 1050 เคลวิน จะเหมาะสำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน



รูปที่ 4.11 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็ง ที่ความดัน 1 บาร์ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

4.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง

อุณหภูมิในการปฏิบัติการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะถูกศึกษาในช่วง 773 ถึง 1373 เคลวิน ในขณะที่ตัวแปรอื่นๆจะทำให้เป็นซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 3.1 จากรูปที่ 4.12 จะแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้ง 2 ชนิด ผลการจำลองกระบวนการระบุว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ของทั้ง 2 ชนิดจะเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จากการพิจารณาศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเฉพาะส่วนในรูปที่ 4.10 จะทำให้เห็นว่าอุณหภูมิในการดำเนินงานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นเพราะการนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานจะมีค่าลดลง ยิ่งไปกว่านั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการดำเนินงานจะนำไปสู่การลดลงเล็กน้อยของศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีอีกด้วย ที่น่าสนใจคือจากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 823 เคลวิน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มากกว่าเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน เมื่อดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 823 เคลวิน ซึ่งผลจากการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า การนำโปรตอนจะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิในการดำเนินงานต่ำๆ ส่วนการนำออกซิเจนไอออนจะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงๆ ดังนั้นจากผลการจำลองกระบวนการสามารถสรุปได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะเหมาะกับการดำเนินงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 823 เคลวิน ในขณะที่การดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 823 เคลวิน จะเหมาะสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน

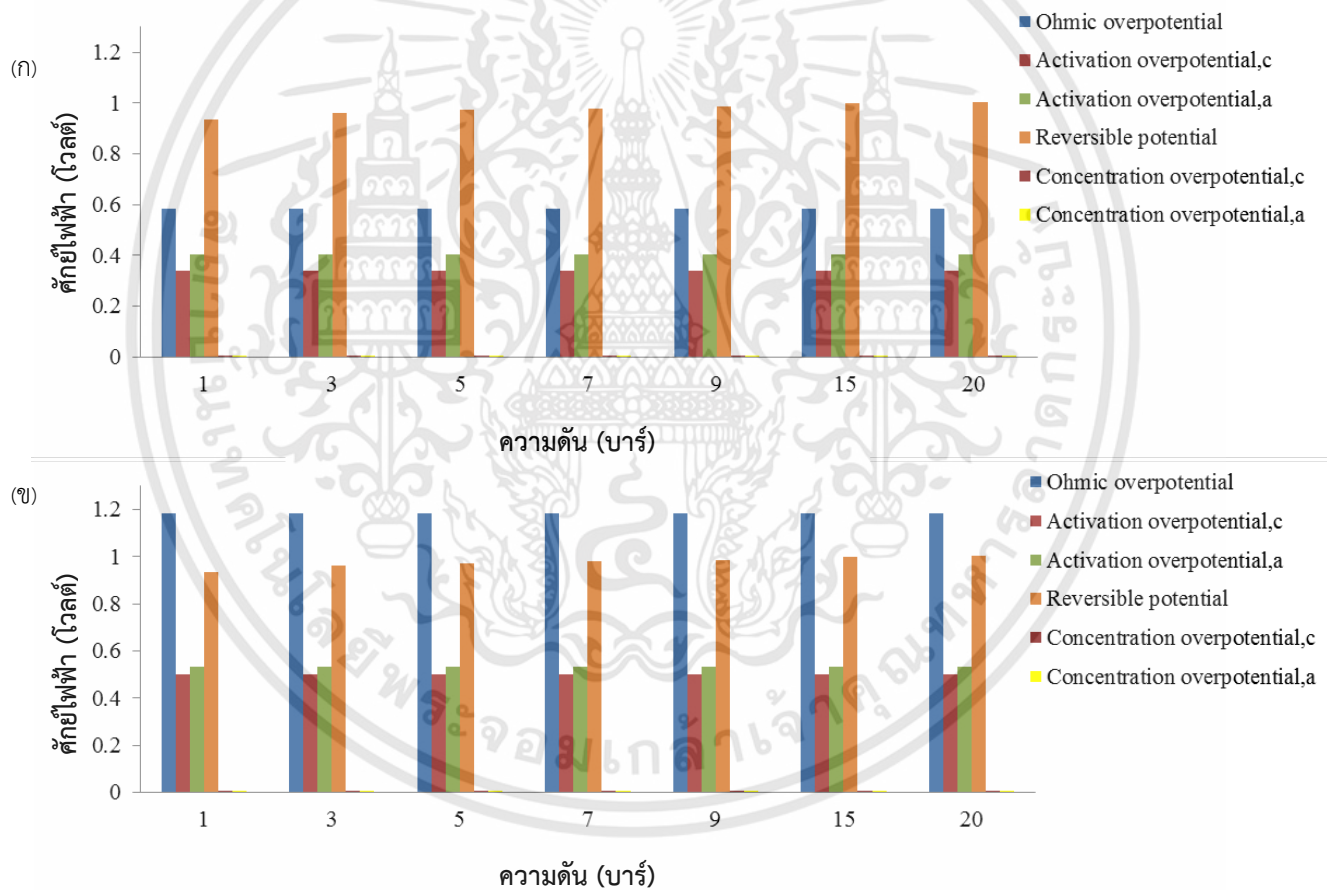


รูปที่ 4.12 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ที่ความดัน 1 บาร์ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลกระทบของความดัน

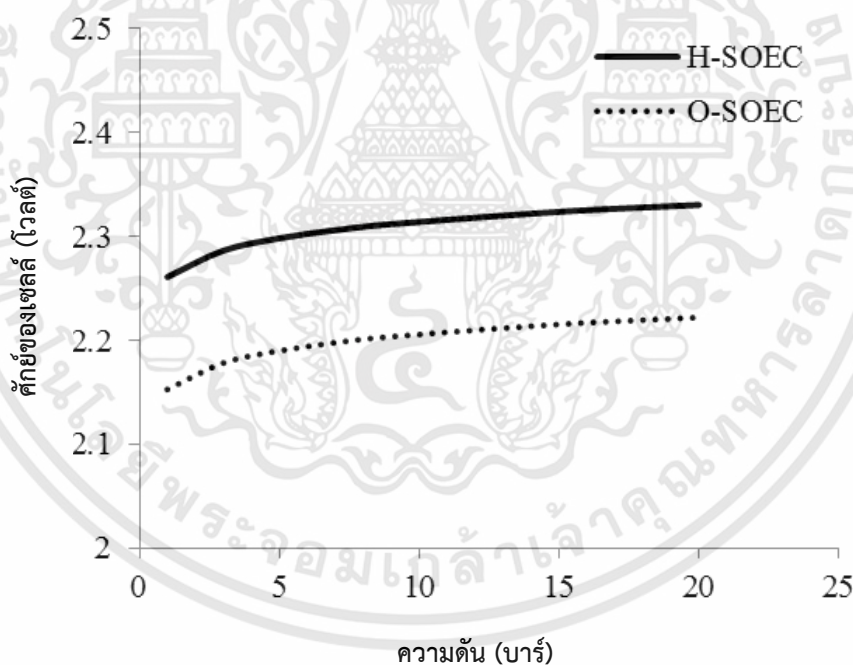
หัวข้อที่ 4.5 จะอธิบายผลกระทบของความดันที่ส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้ง 2 แบบ รูปที่ 4.13 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความดันตั้งแต่ 1 ถึง 20 บาร์ จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น โดยปกติแล้วการเปลี่ยนแปลงของความดันจะส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้และค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้น เมื่อความดันในการดำเนินงานสูงขึ้นค่าศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นจะมีค่าลดลงเนื่องจากแก๊สสามารถแพร่ผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นเมื่อเซลล์ดำเนินงานที่ความดันสูง จึงทำให้ความต้านทานในการส่งผ่านมวลนั้นลดลง



รูปที่ 4.13 ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่มีความดันต่างๆของเซลล์ที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมี (ก) ออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ (ข) โปรตอนเป็นตัวนำ ที่อุณหภูมิ 1073 เคลวิน และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 2680 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

4.5.1 ผลกระทบของความดันของเซลล์อิเล็กโทรไลซิส

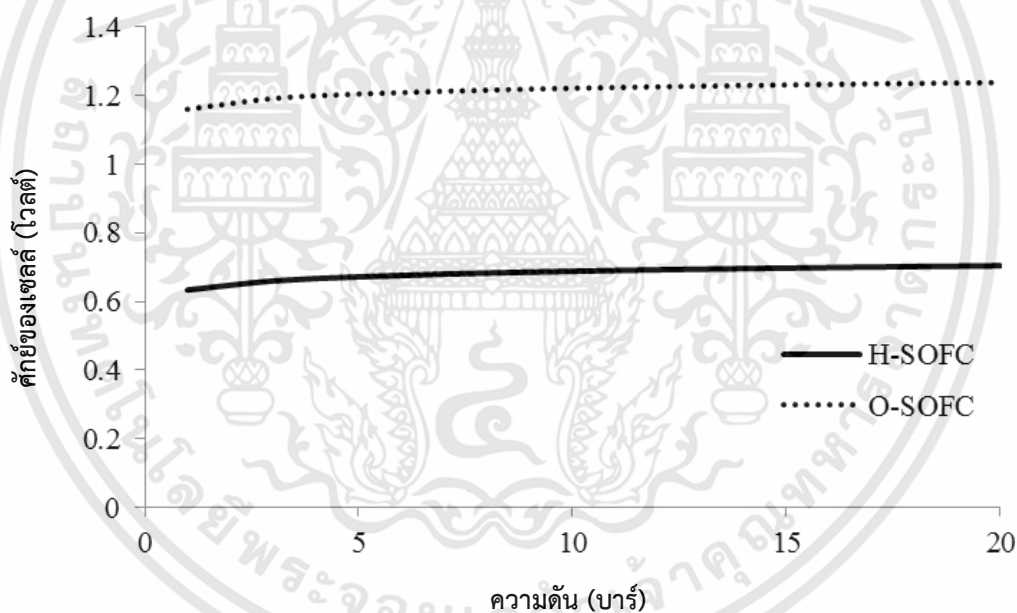
ผลของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งทั้ง 2 ชนิด ที่เป็นฟังก์ชันของความดันในการดำเนินงานซึ่งถูกปรับค่าระหว่าง 1 ถึง 20 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.14 ซึ่งในการศึกษาจะกำหนดให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ที่ 1073 เคลวิน ผลจากการจำลองกระบวนการชี้ให้เห็นได้ว่าความดันมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ทั้ง 2 ชนิด เล็กน้อย อย่างไรก็ตามผลการจำลองกระบวนการที่แสดงในรูปที่ 4.13 เผยให้เห็นว่าเมื่อเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งดำเนินงานที่ความดันสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าผันกลับพอมีผลอยู่บ้าง แต่การลดลงของศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นจะมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์น้อยมาก จากรูปที่ 4.14 จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งทั้ง 2 ชนิด ที่ความดันต่างกัน จะมีแนวโน้มแบบเดียวกัน ดังนั้นความดันที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานจะอยู่ที่ 1 บาร์ แต่เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งที่แบบนำโปรตอนจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มากกว่าแบบนำออกซิเจนไอออน ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่นำมาศึกษาคือ 1073 เคลวิน ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำมากกว่า



รูปที่ 4.14 ผลกระทบของความดันที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งทั้งสองแบบ ที่อุณหภูมิ 1073 เคลวิน และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 2680 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

4.5.2 ผลกระทบของความดันของเซลล์เชื้อเพลิง

รูปที่ 4.15 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้ง 2 ชนิด ที่เป็นฟังก์ชันของความดันในการดำเนินงานซึ่งถูกปรับค่าระหว่าง 1 ถึง 20 บาร์ เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิในการดำเนินงานคงที่ที่ 1073 เคลวิน จากการจำลองกระบวนการจะเห็นได้ว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อยังมีศักย์ของเซลล์สูงก็จะมีประสิทธิภาพดี แต่จากกราฟในรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าแม้การเพิ่มความดัน จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเมื่อเทียบกับการใส่พลังงานเข้าไปเพื่อที่จะเพิ่มความดัน อาจจะทำให้ไม่คุ้มค่าในแง่ของพลังงานและค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นความดันที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานจะอยู่ที่ 1 บาร์ และจากการศึกษายังพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มากกว่าแบบนำโปรตอน เพราะว่าการนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์แบบออกซิเจนไอออนทำได้ดีกว่าแบบโปรตอนในช่วงอุณหภูมิที่นำมาศึกษานั้นคือ 1073 เคลวิน



รูปที่ 4.15 ผลกระทบของความดันที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งสองแบบที่อุณหภูมิ 1073 เคลวิน และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 1000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

4.6 การศึกษาการนำเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ร่วมกัน

เนื่องจากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสเป็นอุปกรณ์ที่สามารถผลิตไฮโดรเจนจากการใช้ไฟฟ้าในการแยกน้ำ ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงก็เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ไฮโดรเจนในการผลิตไฟฟ้า การศึกษาในหัวข้อนี้จึงจะพิจารณาการดำเนินงานร่วมกันของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยการออกแบบจะประกอบด้วย 4 ระบบ ดังนี้

- เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (H-SOEC) ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (H-SOFC)
- เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (H-SOEC) ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน (O-SOFC)
- เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน (O-SOEC) ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน (O-SOFC)
- เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน (O-SOEC) ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (H-SOFC)

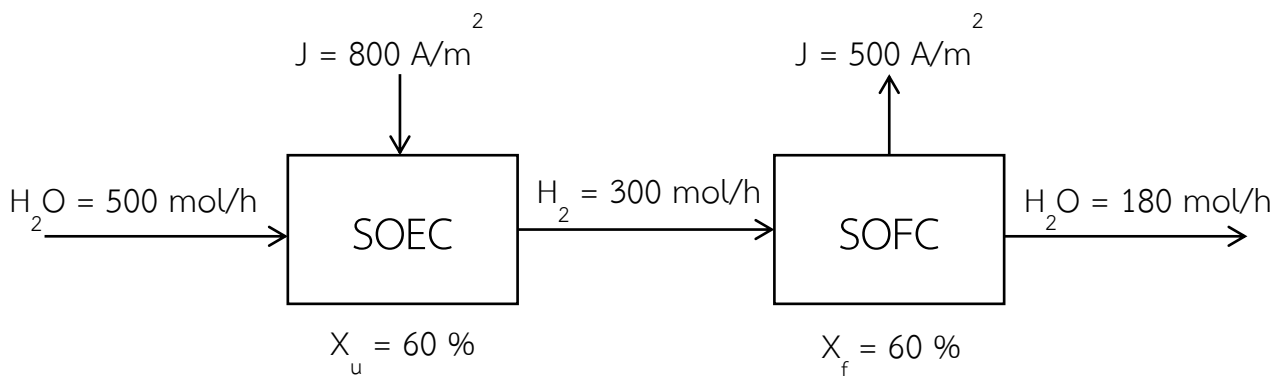
โดยการจำลองกระบวนการจะทำการหาแบบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะดูจากค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า โดยระบบที่เหมาะสมคือเซลล์เชื้อเพลิงควรมีค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้าสูงๆเพื่อที่จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากไฮโดรเจนได้มาก ขณะเดียวกันเซลล์อิเล็กโทรไลซิสก็ควรจะใช้ศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าต่ำเพื่อแสดงถึงความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ต่ำในการผลิตไฮโดรเจน

ในการดำเนินงานของระบบรวมจะกำหนดให้เซลล์แต่ละชนิดใช้ตัวรองรับตามที่ได้ศึกษาไว้ในหัวข้อที่ 4.2 กล่าวคือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนจะใช้ตัวรองรับชนิดแอโนดทั้งคู่ ส่วนเซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนจะใช้ตัวรองรับชนิดแคโทดและแอโนด ตามลำดับ และจะใช้อุณหภูมิที่ดีที่สุดที่เซลล์แต่ละแบบสามารถดำเนินงานได้ซึ่งได้จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2 สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แบบนำโปรตอนจะดำเนินงานที่อุณหภูมิ 873 เคลวิน ส่วนเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แบบนำออกซิเจนไอออนจะดำเนินงานที่อุณหภูมิ 1423 เคลวิน โดยความดันที่ใช้ในการดำเนินงานของทั้งสองระบบมีค่าเท่ากับ 1 บาร์

ตารางที่ 4.1 ค่าศักย์ของเซลล์และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์แต่ละชนิด

ชนิดของเซลล์	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (วัตต์ต่อตารางเมตร)
H-SOEC	873	1.75	1400.12
O-SOEC	1423	0.84	669.112
H-SOFC	873	0.57	283.62
O-SOFC	1423	1.2	600.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แผนผังการนำเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ร่วมกัน ที่ความดัน 1 บาร์

เมื่อกำหนดให้น้ำป้อนเข้ามายังเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งด้วยอัตราการไหล 500 โมลต่อชั่วโมง และเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งมีการใช้น้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจนอยู่ที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีอัตราการใช้ไฮโดรเจนเพื่อผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 60 เปอร์เซ็นต์ จะได้ผลการดำเนินงานของระบบรวมในแง่การผลิตไฮโดรเจนและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ ดังรูปที่ 4.16 ส่วนตารางที่ 4.1 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของแต่ละเซลล์แต่ละชนิด

จากผลการจำลองกระบวนการในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า กรณี H-SOEC ต่อกับ H-SOFC เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนใช้ไฟฟ้าถึง 1400.12 วัตต์ต่อตารางเมตร ขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนผลิตไฟได้เพียง 283.62 วัตต์ต่อตารางเมตร เท่านั้น ดังนั้นหากต้องการให้ระบบนี้สามารถดำเนินได้โดยนำกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้กับเซลล์อิเล็กโทรไลซิส จึงไม่สามารถทำได้ เพราะต้องมีการเพิ่มไฟฟ้าเข้าไปยังเซลล์อิเล็กโทรไลซิสสูงถึง 1116.5 วัตต์ต่อตาราง

กรณี H-SOEC ต่อกับ O-SOFC เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนต้องการไฟฟ้าในการผลิตไฮโดรเจนเท่ากับ 1400.12 วัตต์ต่อตารางเมตร ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนผลิตไฟได้ 669.11 วัตต์ต่อตารางเมตร ทำให้ในระบบนี้ต้องเพิ่มไฟฟ้าเข้าไปยังเซลล์อิเล็กโทรไลซิสเท่ากับ 731.01 วัตต์ต่อตารางเมตร

กรณี O-SOEC ต่อกับ O-SOFC เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 669.11 วัตต์ต่อตารางเมตร ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนผลิตไฟได้เท่ากับ 600.69 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังนั้นจึงต้องเพิ่มไฟฟ้าเข้าไปในระบบในปริมาณ 68.42 วัตต์ต่อตารางเมตร

กรณี O-SOEC ต่อกับ H-SOFC เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนใช้ไฟฟ้า 669.11 วัตต์ต่อตารางเมตร ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนผลิตไฟได้แค่ 283.62 วัตต์ เมตร² ทำให้ต้องเพิ่มไฟฟ้าเข้าไปในระบบ 385.49 วัตต์ต่อตารางเมตร

จากผลการออกแบบระบบรวมของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ทั้ง 4 แบบ จะเห็นว่า การดำเนินงานร่วมกันของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนเป็นระบบที่ดีที่สุด เพราะเป็นระบบที่ต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มเข้าไปยังเซลล์อิเล็กโทรไลซิสน้อยกว่า 3 แบบที่เหลือ ซึ่งต้องเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าไปเพียง 68.42 วัตต์ต่อตารางเมตรในการผลิตไฮโดรเจน เนื่องจากความสามารถในการถ่ายเทไอออนของเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนนั้นดีกว่าแบบนำโปรตอน และรูปแบบการจัดเรียงของเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบออกซิเจนไอออนนั้นส่งผลให้เกิดศักย์ไฟฟ้าสูญเสียน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน จึงส่งผลให้โดยรวมสมรรถนะของเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออนนั้นดีกว่าเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนนั่นเอง

4.7 การปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน

จากการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออนจะสามารถทำงานได้ดีกว่าแบบนำโปรตอน เนื่องจากความสามารถในการถ่ายเทไอออนและการจัดเรียงตัวของชั้นอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ เพื่อเป็นการปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนให้เทียบเท่ากับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออน ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการเพิ่มจำนวนเซลล์ของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน อย่างไรก็ตามเป็นที่รู้กันดีว่าการเพิ่มจำนวนเซลล์นอกจากจะทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ขึ้นแล้ว ยังเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายทั้งในการสร้างและการดำเนินงานอีกด้วย ซึ่งการศึกษาในส่วนนี้จะกำหนดให้สมรรถนะของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออนเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของน้ำเข้าและไฮโดรเจนเข้าเป็น 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนเซลล์กับค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งทั้งสองชนิด จะเห็นได้ว่าเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนที่ 500 เซลล์จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อยู่ที่ 1.6697 โวลต์ต่อ 1 เซลล์ ซึ่งจะเทียบเท่ากับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจำนวนเซลล์ 900 เซลล์ หรือเทียบเป็นอัตราส่วนของจำนวนเซลล์ของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนต่อเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนเป็น 1 ต่อ 1.8 ส่วนตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนเซลล์กับค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งสองชนิดจะเห็นได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แบบนำออกซิเจนไอออนที่ 500 เซลล์จะมีค่าศักย์ของเซลล์อยู่ที่ 0.6334 โวลต์ต่อ 1 เซลล์ ซึ่งจากการศึกษาการปรับเปลี่ยนจำนวนเซลล์

เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนตั้งแต่ 500 ถึง 1400 เซลล์ พบว่าหากต้องการให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนมีค่าศักย์ไฟฟ้าเทียบเท่ากับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน เซลล์แบบนำโปรตอนต้องใช้จำนวนเซลล์มากถึง 1400 เซลล์ เมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนของจำนวนเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบนำออกซิเจนไอออนต่อเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนเป็น 1 ต่อ 2.8 ที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนต้องการจำนวนเซลล์ที่มากกว่าเพื่อจะทำให้สมรรถนะเทียบเท่าเชื้อเพลิงแบบนำออกซิเจนไอออน เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าของเซลล์นั้นมีค่าต่างกันมาก จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้น โดยการเพิ่มจำนวนเซลล์นั่นเอง

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบจำนวนเซลล์ของเซลล์อิเล็กโทรไลซิส

ชนิด	จำนวนเซลล์	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)
O-SOEC	500	1.6697	33.39
H-SOEC	500	1.8097	36.19
	600	1.7611	35.22
	700	1.7228	34.45
	800	1.6913	33.82
	900	1.6648	33.29

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบจำนวนเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

ชนิด	จำนวนเซลล์	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (โวลต์)	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)
O-SOFC	500	0.6334	12.66
H-SOFC	500	0.3991	7.98
	600	0.4478	8.96
	700	0.4862	9.72
	800	0.5177	10.35
	900	0.5443	10.89
	1000	0.5672	11.34
	1100	0.5874	11.75
	1200	0.6053	12.11
	1300	0.6214	12.43
	1400	0.6361	12.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนผ่านเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งและใช้ไฮโดรเจนในการผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง เมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ แบบมีโปรตอนและแบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ ถูกศึกษาโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen plus ก่อนทำการศึกษา ได้ทำการตรวจสอบผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและนำออกซิเจนไอออน กับผลการทดลองที่ได้จากการทดลองจริงของผู้วิจัยท่านอื่นซึ่งรวบรวมมาจากวรรณกรรม ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการมีความแตกต่างจากการทดลองจริงมากที่สุดเพียง 8 เปอร์เซ็นต์ หลังจากทำการศึกษาเกี่ยวกับชนิดของตัวรองรับของเซลล์แต่ละชนิดพบว่าเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนเหมาะกับตัวรองรับแคโทด เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนเหมาะกับตัวรองรับชนิดแอโนด เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนเหมาะกับตัวรองรับแอโนด และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนเหมาะกับตัวรองรับแอโนด จากนั้นได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิและความดัน ที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งพบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อค่าศักย์ไฟฟ้า คือ อุณหภูมิในการปฏิบัติการ โดยจากการจำลองกระบวนการพบว่าการปฏิบัติการที่อุณหภูมิมากกว่า 1050 เคลวิน จะเหมาะสมกับการใช้งานของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมีออกซิเจนไอออนเป็นตัวนำ ในขณะที่เซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งที่มีอิเล็กโทรไลต์แบบมีโปรตอนเป็นตัวนำจะใช้งานได้ดีที่สุดในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 1050 เคลวิน เช่นเดียวกันกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนจะเหมาะสมที่อุณหภูมิมากกว่า 823 เคลวิน และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนจะเหมาะสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 823 เคลวิน โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลกระทบหลักต่อค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน เนื่องจากความสามารถในการเหนี่ยวนำของอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกวัสดุที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งจึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญ นอกจากนี้ผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการยังแสดงให้เห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถละเว้นการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นได้ ยิ่งไปกว่านั้น ผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการได้ระบุให้เห็นว่าการเพิ่มความดันในการปฏิบัติการนั้น ส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าน้อยมาก โดยการเพิ่มขึ้นของความดันจะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าผันกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นจะลดลงแต่ลดลงในปริมาณที่น้อยมากเช่นเดียวกัน การจำลองการนำเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์แข็งไปใช้ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง พบว่าการจัดเรียงแบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนใช้ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนเหมาะสมที่สุด เนื่องจากเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนนั้นมีสมรรถนะต่ำกว่าแบบนำออกซิเจนไอออนจึงทำการเพิ่มจำนวนเซลล์เพื่อสำรวจในกรณีที่มีสมรรถนะเท่ากัน ดังนั้นอัตราส่วนจำนวนของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนต่อแบบนำออกซิเจนไอออนจะเป็น 1.8 ต่อ 1 ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนต่อแบบนำออกซิเจนไอออนจะเป็น 2.8 ต่อ 1

5.2 ข้อเสนอแนะ

การปฏิบัติงานจริงอาจจะต้องปฏิบัติการที่สภาวะ อุณหภูมิ ความดัน ชนิดอิเล็กโทรไลต์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อัตราการไหลของสายป้อน และจำนวนเซลล์ ที่ต่างจากงานวิจัยนี้ ดังนั้นควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับตัวแปรเหล่านั้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. K. A. Brekken, A. Yokochi, A. Von Jouanne, Z. Z. Yen, H. M. Hapke, and D. A. Halamay, "Optimal energy storage sizing and control for wind power applications," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 2, no. 1, pp. 69–77, 2011.
- [2] Hydrogen Production Book, "Hydrogen Production & Distribution," IEA Energy Technol. essentials, no. 1, pp. 3–6, 2007.
- [3] I. Dincer and A. A. AlZahrani, 4.25 Electrolyzers, vol. 4, pp. 985-1025, 2018.
- [4] J. Udagawa, P. Aguiar and N.P. Brandon, "Hydrogen production through steam electrolysis: Model-based steady state performance of a cathode-supported intermediate temperature solid oxide electrolysis cell," J. Power Sources, vol 166, pp. 127-136, 2007.
- [5] M. Ni, M. K. H. Leung, and D. Y. C. Leung, "Energy and exergy analysis of hydrogen production by solid oxide steam electrolyzer plant," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 32, no. 18, pp. 4648–4660, 2007.
- [6] Y. Patcharavorachot, N. P. Brandon, W. Paengjuntuek, S. Assabumrungrat, and A. Arpornwichanop, "Analysis of planar solid oxide fuel cells based on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์แข็งไปใช้ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง พบว่าการจัดเรียงแบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนใช้ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออนเหมาะสมที่สุด เนื่องจากเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอนนั้นมีสมรรถนะต่ำกว่าแบบนำออกซิเจนไอออนจึงทำการเพิ่มจำนวนเซลล์เพื่อสำรวจในกรณีที่มีสมรรถนะเท่ากัน ดังนั้นอัตราส่วนจำนวนของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนต่อแบบนำออกซิเจนไอออนจะเป็น 1.8 ต่อ 1 ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนต่อแบบนำออกซิเจนไอออนจะเป็น 2.8 ต่อ 1

5.2 ข้อเสนอแนะ

การปฏิบัติงานจริงอาจจะต้องปฏิบัติการที่สภาวะ อุณหภูมิ ความดัน ชนิดอิเล็กโทรไลต์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อัตราการไหลของสายป้อน และจำนวนเซลล์ ที่ต่างจากงานวิจัยนี้ ดังนั้นควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับตัวแปรเหล่านั้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. K. A. Brekken, A. Yokochi, A. Von Jouanne, Z. Z. Yen, H. M. Hapke, and D. A. Halamay, "Optimal energy storage sizing and control for wind power applications," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 2, no. 1, pp. 69–77, 2011.
- [2] Hydrogen Production Book, "Hydrogen Production & Distribution," IEA Energy Technol. essentials, no. 1, pp. 3–6, 2007.
- [3] I. Dincer and A. A. AlZahrani, 4.25 Electrolyzers, vol. 4, pp. 985-1025, 2018.
- [4] J. Udagawa, P. Aguiar and N.P. Brandon, "Hydrogen production through steam electrolysis: Model-based steady state performance of a cathode-supported intermediate temperature solid oxide electrolysis cell," J. Power Sources, vol 166, pp. 127-136, 2007.
- [5] M. Ni, M. K. H. Leung, and D. Y. C. Leung, "Energy and exergy analysis of hydrogen production by solid oxide steam electrolyzer plant," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 32, no. 18, pp. 4648–4660, 2007.
- [6] Y. Patcharavorachot, N. P. Brandon, W. Paengjuntuek, S. Assabumrungrat, and A. Arpornwichanop, "Analysis of planar solid oxide fuel cells based on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- proton-conducting electrolyte,” *Solid State Ionics*, vol. 181, no. 35–36, pp. 1568–1576, 2010.
- [7] M. M. Rashid et al, “Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis,” *IJEAT*, vol 4, issue 3, 2015.
- [8] L. Bi, S. Boulfrad, and E.Traversa, “Steam electrolysis by solid oxide electrolysis cells (SOECs) with proton-conducting oxides,” *Royal Society of Chemistry*, 2014
- [9] L. Namwong, S. Authayanun, D. Saebea, Y. Patcharavorachot, and A. Arpornwichanop, “Modeling and optimization of proton-conducting solid oxide electrolysis cell: Conversion of CO₂ into value-added products,” *J. Power Sources*, vol. 331, pp. 515–526, 2016.
- [10] P. A. Stuart, T. Unno, J. A. Kilner, and S. J. Skinner, “Solid oxide proton conducting steam electrolyzers,” *Solid State Ionics*, vol. 179, no. 21–26, pp. 1120–1124, 2008.
- [11] Y. Patcharavorachot, S. Thongdee, D. Saebea, S. Authayanun, and A. Arpornwichanop, “Performance comparison of solid oxide steam electrolysis cells with/without the addition of methane,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 120, pp. 274–286, 2016.
- [12] Y. Fu et al., “Multicomponent Gas Diffusion in Porous Electrodes,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 162, no. 6, pp. F613–F621, 2015.
- [13] M. Ni, M.K.H. Leung and D.Y.C. Leung, “A modeling study on concentration overpotentials of a reversible solid oxide fuel cell,” *J. Power Sources*, vol. 163, pp 460–466, 2006.
- [14] อมรชัย อารณวิธานพ, “ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าสะอาด,” สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, vol 1, 2018.
- [15] M. Ni, M.K.H. Leung and D.Y.C. Leung, “Electrochemical modeling of hydrogen production by proton-conducting solid oxide steam electrolyzer,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 4040–4047, 2008.

- [16] M. Ni, M.K.H. Leung and D.Y.C. Leung, "Parametric study of solid oxide fuel cell performance," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, pp. 1525-1535, 2007.
- [17] M. Ni, M.K.H. Leung and D.Y.C. Leung, "Parametric study of solid oxide steam electrolyzer for hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 2305-2313, 2007.
- [18] C. Zhang et al, "Ionic conductivity and its temperature dependence of atmospheric plasma-sprayed yttria stabilized zirconia electrolyte," *Material Science and Engineering*, vol 137, pp.24-30, 2007.
- [19] A. Momma et al., "Experimental investigation of anodic gaseous concentration of a practical seal-less solid oxide fuel cell," *J. Power Sources*, vol. 145, no. 2, pp. 169-177, 2005.
- [20] Zhao F and Virkar AV., "Dependence of polarization in anode-supported solid oxide fuel cells on various cell parameters," *J Power Sources*, vol. 141, no. 1, pp 79-95, 2005.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

ผลการจำลองของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงชนิด
ออกไซด์แข็งทั้งแบบนำโปรตอนและออกซิเจนไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ผลการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองสำหรับการผลิตไฮโดรเจนของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ซีซชนิด ออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ที่อุณหภูมิ 873 เคลวิน

J (A/m ²)	Cell potential (V)		% error
	Experimental data (T=600°C)	Model results (T=600°C)	
0	0.97	1.04	7.58
200	1.53	1.54	0.72
400	1.85	1.89	2.12
600	2.13	2.20	3.17
800	2.35	2.48	5.45
1000	2.57	2.75	7.09

ตารางที่ ก.2 ผลการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองสำหรับการผลิตไฮโดรเจนของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ซีซชนิด ออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ที่อุณหภูมิ 923 เคลวิน

J (A/m ²)	Cell potential (V)		% error
	Experimental data (T=650°C)	Model results (T=650°C)	
0	0.93	1.01	7.99
200	1.37	1.38	0.84
400	1.65	1.65	0.12
600	1.89	1.87	0.89
800	2.10	2.07	1.45
1000	2.30	2.26	1.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ผลการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองสำหรับการผลิตไฮโดรเจนของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน ที่อุณหภูมิ 1173 เคลวิน

J (A/m ²)	Cell potential (V)		% error
	Experimental data	Model results	
0	0.90	0.98	8.90
1000	1.16	1.08	6.63
2000	1.42	1.30	8.57
3000	1.60	1.51	5.59
4000	1.74	1.71	1.58

ตารางที่ ก.4 ผลการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองสำหรับการผลิตไฮโดรเจนของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน ที่อุณหภูมิ 1223 เคลวิน

J (A/m ²)	Cell potential (V)		% error
	Experimental data	Model results	
0	0.90	0.97	7.70
1000	1.08	1.01	6.31
2000	1.24	1.17	6.07
3000	1.41	1.31	6.83
4000	1.52	1.46	4.05

ตารางที่ ก.5 ผลการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองสำหรับการผลิตไฮโดรเจนของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน ที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน

J (A/m ²)	Cell potential (V)		% error
	Experimental data	Model results	
0	0.88	0.96	8.39
1000	0.98	0.95	3.36
2000	1.11	1.07	2.95
3000	1.19	1.18	0.61
4000	1.34	1.29	3.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ผลการสำรวจช่วงอุณหภูมิ

T (K)	Cell potential (V)	
	H-SOFC	O-SOFC
763	-0.01	-0.58
793	0.16	-0.06
803	0.20	0.07
813	0.24	0.18
823	0.27	0.28
833	0.30	0.36
863	0.38	0.57
893	0.44	0.74
923	0.48	0.87
953	0.52	0.97
1073	0.63	1.16
1173	0.71	1.19
1273	0.78	1.20
1373	0.85	1.19
1473	0.90	1.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ผลการสำรวจความดันของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็ง

P (bar)	Cell potential (V)
1	1.78164778
2.5	1.79888371
4	1.80772474
5.5	1.81371503
7	1.81825143
8.5	1.82190361
10	1.82496068

ตารางที่ ก.8 ผลการสำรวจความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

P (bar)	Cell potential (V)	
	O-SOFC	H-SOFC
1	1.1604	0.6335
3	1.1917	0.6599
5	1.2048	0.6719
7	1.2131	0.6798
9	1.2192	0.6856
11	1.224	0.6903
13	1.228	0.6942
15	1.2315	0.6975
17	1.2344	0.7004
20	1.2383	0.7042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 ผลการสำรวจชนิดแบบรองรับของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

J (A/m ²)	Cell potential (V)		
	An	Elec	Ca
1	0.937143	0.93736	0.937142
500	1.38278	1.49122	1.382684
1000	1.521589	1.73847	1.521397
2000	1.608464	1.933786	1.608176
3000	1.673747	2.107509	1.673364
4500	1.727149	2.269352	1.72667
5500	1.773024	2.423667	1.772449
6000	1.813698	2.572783	1.813028

ตารางที่ ก.10 ผลการสำรวจชนิดแบบรองรับของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน

J (A/m ²)	Cell potential (V)		
	An	Elec	Ca
1	1.114765	1.114596	1.114596
500	1.178849	1.134198	1.13418
1000	1.216029	1.152508	1.152472
1500	1.2448	1.169754	1.1697
2000	1.269236	1.186096	1.186024
2500	1.290917	1.201638	1.20155
3000	1.310622	1.216455	1.21635
3500	1.328802	1.230606	1.230484
4000	1.34574	1.24414	1.244002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายเชาวณัฐ ตั้งกุลจิต
 วัน เดือน ปีเกิด 3 กันยายน พ.ศ.2538 เกิดที่กรุงเทพมหานคร
 ที่อยู่ 172 ถนนนครสวรรค์ แขวงวัดโสมนัส เขตป้อมปราบ กทม. 10100
 เบอร์โทร 086-669-3996

ประวัติการศึกษา 2561 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปิโตรเคมี
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) ออกแบบกระบวนการ
 2.) ปรับปรุงกระบวนการ
 3.) จำลองกระบวนการ

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

ฝึกงานที่ประเทศญี่ปุ่นที่ Yamagata University ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 1 สิงหาคม
 เกี่ยวกับ synthesis zinc oxide for organic solar cell

นำเสนอผลงานวิชาการ หัวข้อ Comparative study of hydrogen production from
 solid oxide electrolysis cell with different electrolyte types ในการประชุมวิชาการ The
 8th International TIChE Conference (ITICHe 2018)