

รวบรวมของกระบวนการวิจัยร่วมและเซลล์เชื้อเพลิง
ชนิดกักไฮโดรเจนแบบความดันสูง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

ระบบร่วมของกระบวนการรีฟอร์มมิงและเซลล์เชื้อเพลิง
ชนิดออกไซด์แข็งแบบความดันสูง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ขึ้นและต้องแจ้งให้เจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

INTEGRATED SYSTEM OF REFORMING PROCESS AND
PRESSURIZED SOLID OXIDE FUEL CELL



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง ระบบร่วมของกระบวนการรีฟอร์มมิงและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบความดันสูง
โดย นางสาวปพิชญากรณ์ ต้นถาวร
นางสาวพิมพ์ประไพ อุไรเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ญาณิพร พัทรวรโชติ
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



.....กรรมการ
(ดร.ญาณิพร พัทรวรโชติ)

.....กรรมการ
(รศ.ดร.ดวงกมล ฉนวนอง)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง ระบบร่วมของกระบวนการรีฟอร์มมิงและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบความดันสูง
โดย นางสาวปพิชญาภรณ์ ต้นถาวร
นางสาวพิมพ์ประไพ อุไรเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ญานีพร พ็ชรวรโชติ
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการนี้สนใจศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตของกลีเซอรอลและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ความดันสูงกว่าบรรยากาศ โดยระบบร่วมดังกล่าวจะถูกออกแบบและจำลองกระบวนการโดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Aspen Plus องค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงสามารถคำนวณโดยใช้วิธีการหาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ที่ต่ำที่สุด ส่วนการคำนวณสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบร่วมจะใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นในโปรแกรม Aspen Plus ร่วมกับสมการทางไฟฟ้าเคมีที่พิจารณาคักยไฟฟ้าสูญเสียทั้ง 3 ชนิด (ได้แก่ คักยไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ความต้านทานไฟฟ้า และผลของการถ่ายโอนมวล) แบบจำลองที่สร้างขึ้นจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาผลของสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอล) และสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (อุณหภูมิ ความดัน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า) ที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาจากคักยไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพของระบบการผลิตไฟฟ้า จากผลการจำลองกระบวนการพบว่าเมื่อกำหนดให้ระบบร่วมผลิตกำลังไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ คือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บรรยากาศ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 90 ซึ่งให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจน 67.1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28.3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ไอน้ำ 4.4 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ก๊าซมีเทน 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 86 พีพีเอ็ม ส่วนสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งคือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บรรยากาศ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ภายใต้สภาวะการดำเนินงานดังกล่าว ระบบร่วมจะได้คักยไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 1.003 โวลต์ จำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 36 เซลล์ อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 75.03 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60.14 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของระบบเท่ากับ 68.41 เปอร์เซ็นต์

Thesis Title Integrated system of reforming process and pressurized solid oxide fuel cell
By Paphitchayakorn Tanthaworn
Pimprapai Urailert
Advisor Dr.Yaneeporn Patcharavorachhot
Report for Bachelor Degree in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

This project aims to investigate the power generation from an integrated system of glycerol supercritical water reforming and pressurized solid oxide fuel cell (SOFC). This integrated system was designed and simulated by using AspenPlusTM. The equilibrium composition of synthesis gas obtained from reforming process can be calculated based on the method of Gibbs free energy minimization. In order to compute the performance of integrated system, a flowsheet simulator in AspenPlusTM was applied with the electrochemical equations taking into account all voltage losses (i.e. activation, concentration and ohmic losses). The developed model was employed to study the effect of operating conditions of the reformer (i.e. temperature, pressure and supercritical water to glycerol ratio) and the operating conditions of the SOFC (i.e. temperature, pressure and current density) on the performance of the integrated system in terms of cell voltage, number of SOFC stack, fuel utilization, SOFC electrical efficiency and system electrical efficiency. The simulation results indicate that when the desired power generation of integrated system is set as 10 kW, the optimal operating conditions of the reformer are 800 °C, 200 atm and supercritical water to glycerol ratio of 90. The product stream consists of 67.1mol% of hydrogen, 28.3mol% of carbon dioxide, 4.4mol% of steam, 0.2mol% of methane and 86 ppm of carbon monoxide. While, the optimal operating conditions of the SOFC are 900 °C, 4 atm and current density of 7,000 A/m². Under these operating conditions, the integrated system can provide the cell voltage of 1.003 V, number of SOFC stack of 36, fuel utilization of 75.03%, SOFC electrical efficiency of 60.14% and system electrical efficiency of 68.41%.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการแก้ไขปัญหาต่างๆในระหว่างการทำกรวิจัย ตลอดจนแก้ไขและเพิ่มเติมรายละเอียดของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนเป็นที่สมบูรณ์

ท้ายที่สุดนี้กราบขอบพระคุณผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนาม บิดา มารดาที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยไว้ ณ ที่นี้



ปพิชญากรณ์ ต้นถาวร
พิมพ์ประไพ อูไรเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	VIII

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell).....	4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell).....	5
2.3 เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง.....	10
2.4 การผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen production).....	10
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	14
3.1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอล.....	14
3.2 เซลล์เชื้อเพลิง.....	16
3.3 วิธีการจำลองกระบวนการ.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการจำลองกระบวนการ.....	24
4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับผลการทดลอง	24
4.2 ผลของสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์.....	26
4.3 ผลของสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง.....	32
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองกระบวนการและข้อเสนอแนะ	38
5.1 สรุปผลการจำลองกระบวนการ	38
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
เอกสารอ้างอิง.....	40
ภาคผนวก.....	43
ภาคผนวก ก ผลการจำลองกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกลีเซอรอล และไอน้ำเหนือวิกฤต.....	44
ภาคผนวก ข เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานและหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	6
รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า.....	9
รูปที่ 2.3 กระบวนการรีฟอร์มมิงภายใน (a) และกระบวนการรีฟอร์มมิงภายนอก (b).....	12
รูปที่ 3.1 แบบจำลองกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิง ด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอล	14
รูปที่ 3.2 แบบจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	16
รูปที่ 3.3 แบบจำลองกระบวนการของระบบร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิง กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	21
รูปที่ 3.4 วิธีการจำลองกระบวนการของระบบร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิง กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	22
รูปที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับผลจากการทดลองระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 873 973 และ 1,073 เคลวิน.....	25
รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับผลจากการทดลองระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 873 973 และ 1,073 เคลวิน	25
รูปที่ 4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ที่มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง.....	33
รูปที่ 4.4 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ที่มีผลต่อจำนวนเซลล์เชื้อเพลิง.....	33
รูปที่ 4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ที่มีผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง.....	34
รูปที่ 4.6 ผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง.....	36
รูปที่ 4.7 ผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อ จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง.....	37
รูปที่ 4.8 ผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิง ของเซลล์เชื้อเพลิง.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แบบจำลองสภาวะการดำเนินงานของกระบวนการรีฟอร์มมิง.....	15
ตารางที่ 3.2 แบบจำลองสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	17
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ.....	23
ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์	30
ตารางที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอล.....	31
ตารางที่ ก.1 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 30	45
ตารางที่ ก.2 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 50	46
ตารางที่ ก.3 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 70	47
ตารางที่ ก.4 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 90	48
ตารางที่ ก.5 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 110.....	49
ตารางที่ ข.1 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิง และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	51
ตารางที่ ข.2 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิง และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร	52
ตารางที่ ข.3 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิง และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 7,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$D_{\text{eff, anode}}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซทางด้านขั้วแอโนด	m^2/s
$D_{\text{eff, cathode}}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซทางด้านขั้วแคโทด	m^2/s
E	ศักย์ไฟฟ้าจริง	V
E^0	ศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะความดันมาตรฐาน	V
E^{OCV}	ศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี	V
E_{anode}	พลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของขั้วแอโนด	kJ/mol
E_{cathode}	พลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของขั้วแคโทด	kJ/mol
F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์	C/mol
i	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	A/m^2
$i_{0, \text{anode}}$	ความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนที่ขั้วแอโนด	A/m^2
$i_{0, \text{cathode}}$	ความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนที่ขั้วแคโทด	A/m^2
k_{anode}	ค่าคงที่ pre-exponential สำหรับไฟฟ้าเคมีของขั้วแอโนด	A/m^2
k_{cathode}	ค่าคงที่ pre-exponential สำหรับไฟฟ้าเคมีของขั้วแคโทด	A/m^2
L	ความยาวของเซลล์	m
LHV	ค่าเอนทาลปีที่การเผาไหม้ขั้นต่ำ	kJ/mol
n	จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง	
\dot{n}	อัตราการไหลเชิงโมล	mol/s
P	ความดัน	atm
p_i	ความดันย่อยของก๊าซองค์ประกอบ i	atm
$p_{i, \text{TPB}}$	ความดันย่อยของก๊าซองค์ประกอบ i ณ ขอบเขต 3 เฟส	atm
P_{SOFC}, P_W	กำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง	W
R	ค่าคงที่ของก๊าซ	kJ/kmol K
R_{ohm}	ความต้านทานของโอห์ม	$\Omega \text{ m}^2$
S/G	อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำเห็นอวิกฤตต่อกลีเซอรอล	
T	อุณหภูมิ	K
V	ศักย์ไฟฟ้าในการดำเนินงาน	V
W	ความกว้างของเซลล์	m
U_f	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	
y_i	เศษส่วนโมลของก๊าซองค์ประกอบ i	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่ลงนิตยสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์กรีก	ความหมาย	หน่วย
η_{act}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	V
η_{con}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากผลการถ่ายโอนมวล	V
η_{ohm}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า	V
η_{invert}	ประสิทธิภาพการแปลงหน่วยกระแสไฟฟ้า	%
η_{SOFC}	ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง	%
η_{sys}	ประสิทธิภาพของระบบ	%
σ_{anode}	การนำไฟฟ้าของขั้วแอโนด	$1/\Omega \cdot m$
$\sigma_{cathode}$	การนำไฟฟ้าของขั้วแคโทด	$1/\Omega \cdot m$
$\sigma_{electrolyte}$	การนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์	$1/\Omega \cdot m$
τ_{anode}	ความหนาของขั้วแอโนด	μm
$\tau_{cathode}$	ความหนาของขั้วแคโทด	μm
$\tau_{electrolyte}$	ความหนาของอิเล็กโทรไลต์	μm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการเติบโตของอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องและประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีความต้องการในการใช้พลังงานเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้ามากขึ้นตามไปด้วย โดยแหล่งเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นพลังงานหลักมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่รู้จักกันทั่วไปคือถ่านหิน น้ำมัน และ ก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัด และการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเหล่านี้ทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จึงมีการค้นคว้าหาแหล่งพลังงานใหม่ขึ้นเพื่อนำมาใช้ทดแทนการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน ทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจและน่าจับตามองคือ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิงที่พัฒนาขึ้นในปัจจุบันมีหลายชนิด โดยเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ คือ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC) เนื่องจากเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ดำเนินงานด้วยอุณหภูมิสูง จึงมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ควรเป็นก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ แต่เนื่องจากเป็นสารที่ติดไฟง่ายจึงเกิดปัญหาด้านการขนส่ง [1] ในระบบการผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์เชื้อเพลิงส่วนใหญ่จึงใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิง การเลือกใช้เชื้อเพลิงในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณา เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มของการลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิลดังที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว การใช้เชื้อเพลิงจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะช่วยลดปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคตและปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

โดยปกติแล้วการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสำหรับใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำได้ 2 วิธีคือ (1) กระบวนการรีฟอร์มมิงภายนอก (External reforming) โดยก๊าซไฮโดรเจนจะถูกผลิตในเครื่องรีฟอร์มเมอร์แล้วจึงป้อนก๊าซสังเคราะห์ที่ได้เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงและ (2) กระบวนการรีฟอร์มมิงภายใน (Internal reforming) ซึ่งวิธีนี้สามารถป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงได้โดยตรง แล้วกระบวนการรีฟอร์มมิงจะเกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง แม้ว่าการดำเนินการแบบกระบวนการรีฟอร์มมิงภายในจะมีข้อดีในด้านการให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูง แต่เนื่องจากกระบวนการรีฟอร์มมิงเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนสูงมาก ในขณะที่ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นคายความร้อน จึงทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นทำให้เซลล์เชื้อเพลิงอาจแตกหักได้ นอกจากนี้ยังสามารถเกิดโค้ก (Coke) ที่ขั้วแอโนดภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้ [2] สำหรับการดำเนินการแบบกระบวนการรีฟอร์มมิงภายนอก แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่า แต่เนื่องจากการแยกการทำงานของทั้งสองกระบวนการ จึงสามารถควบคุมความร้อนของระบบได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถนำความร้อนที่เหลือจากระบบไปใช้ประโยชน์ต่อได้ ดังนั้นโครงการนี้จึงสนใจศึกษาการทำงาน

ของระบบร่วมระหว่างกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สนใจคือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจาก กลีเซอรอล (Glycerol supercritical water reforming) เนื่องจากการเติบโตของอุตสาหกรรม การผลิตไบโอดีเซล (Biodiesel) ส่งผลให้กลีเซอรอลดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้มีปริมาณมากและมีราคาถูก อีกทั้งการใช้น้ำเหนือวิกฤตแทนไอน้ำหรือน้ำที่สภาวะมาตรฐานจะช่วยลดพลังงานในเครื่องปฏิกรณ์ และคุณสมบัติเด่นของไอน้ำเหนือวิกฤตที่สามารถละลายเข้าได้ดีกับสารอินทรีย์ซึ่งมีสมบัติไม่มีขี้ ทำให้ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาของสารลดลง [3]

เมื่อพิจารณาการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยทั่วไปจะดำเนินงานที่ อุณหภูมิสูงและความดันบรรยากาศ แต่จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่อเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดออกไซด์แข็งที่ดำเนินงานที่ความดันสูงกว่าบรรยากาศ (Pressurized solid oxide fuel cell) จะมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น [4] ซึ่งจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เหนือวิกฤตจากกลีเซอรอลสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่มีอุณหภูมิสูงและความดันสูง จึงสามารถใช้ เป็นเชื้อเพลิงสำหรับป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งได้โดยไม่ต้องมีหน่วยเพิ่มอุณหภูมิและ ลดความดันก่อนป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นโครงการนี้จึงนำกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เหนือวิกฤตจากกลีเซอรอลทำงานร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ความดันสูงกว่าบรรยากาศ เพื่อผลิตไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและลดปัญหาด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ออกแบบและจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการทำงานของระบบร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอลกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ความดันสูงกว่าบรรยากาศ และศึกษาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตไฟฟ้า โดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Aspen Plus

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. จำลองกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอล โดยศึกษาผลของสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (อุณหภูมิและความดันในการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนของไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอล) ที่มีต่อการผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน
2. ออกแบบระบบร่วมของกระบวนการรีฟอร์มมิงและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ความดันสูงกว่าบรรยากาศ โดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Aspen Plus
3. จำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยใช้ก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตเป็นเชื้อเพลิง และศึกษาผลของสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (อุณหภูมิและความดันในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบและจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการทำงานของระบบร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอลกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ความดันสูงกว่าบรรยากาศ
2. ทราบสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตไฟฟ้า
3. เป็นแนวทางการผลิตไฟฟ้าสำหรับการกระบวนการจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)

2.1.1 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง (ก๊าซไฮโดรเจน) และอากาศ (ก๊าซออกซิเจน) เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง มีน้ำและความร้อนเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเผาไหม้จึงเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง โดยเซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถเก็บพลังงานเคมีได้เหมือนกับแบตเตอรี่ จึงทำให้ทราบได้ที่ยังมีการใส่เชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิงนี้พลังงานไฟฟ้าก็จะถูกผลิตออกมาตลอด โดยเซลล์เชื้อเพลิงมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วนหลัก คือ แอโนด (Anode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุลบกับเซลล์เชื้อเพลิง มีหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนออกไปทางขั้วไฟฟ้า ส่วนหลักที่สองคือ แคโทด (Cathode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุบวกกับเซลล์เชื้อเพลิง มีหน้าที่ต่อเข้ากับสายไฟภายนอก รับอิเล็กตรอนมารวมกับอะตอมของก๊าซออกซิเจนกับก๊าซไฮโดรเจนกลายเป็นโมเลกุลของน้ำ และส่วนหลักสุดท้ายคืออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ทำจากวัสดุต่างๆ เช่น สารละลายแผ่นพลาสติก มีหน้าที่คือยอมให้อิออน (บวกหรือลบ) เคลื่อนที่ผ่าน สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์จะประกอบรวมกันแบบอนุกรมบรรจุอยู่ในสแต็กเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell stack) โดยแต่ละสแต็กเซลล์เชื้อเพลิงอาจบรรจุเซลล์เชื้อเพลิงไว้หลายร้อยเซลล์เพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าที่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้งาน

2.1.2 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง [5]

โดยทั่วไปเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจำแนกได้ 5 ประเภท ตามชนิดของอิเล็กโทรไลต์

1) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) หรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่ออิเล็กโทรไลต์พอลิเมอร์ (Polymer electrolyte membrane, PEM) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้โพลิเมอร์แข็งเป็นอิเล็กโทรไลต์ ดำเนินงานที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 80 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในการขนส่งและจะถูกนำไปใช้กับรถยนต์ในอนาคต

2) เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline fuel cell, AFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ดำเนินงานที่อุณหภูมิระหว่าง 100 ถึง 250 องศาเซลเซียส เชื้อเพลิงที่ใช้ต้องเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เท่านั้น ทำให้ระบบมีราคาสูงมาก ไม่สามารถนำมาขายในท้องตลาดได้ ทำให้การใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จำกัดอยู่เฉพาะงานในด้านอวกาศเท่านั้น

3) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cell, PAFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 100 เป็นอิเล็กโทรไลต์ ดำเนินงานที่อุณหภูมิระหว่าง 150 ถึง 220 องศาเซลเซียส นำไปใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนร่วมกัน แต่มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์ชนิดอื่น

4) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten carbonate fuel cell, MCFC) เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้สารลิเทียมคาร์บอเนต หรือโซเดียมคาร์บอเนต หรือโปแตสเซียมคาร์บอเนตที่หลอมเหลวเป็น อิเล็กโทรไลต์ ดำเนินงานที่อุณหภูมิระหว่าง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส นำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าและสามารถให้อุณหภูมิสูงเพื่อนำมาช่วยผลิตไฟฟ้า แต่ให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าไม่สูงมากนัก

5) เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC) เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ของแข็งที่เป็นสารผสมระหว่างโลหะกับเซรามิก เช่น เซอร์โคเนียออกไซด์ เป็นอิเล็กโทรไลต์ ดำเนินงานที่อุณหภูมิระหว่าง 800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส นำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าและสามารถนำอุณหภูมิสูงที่ได้จากกระบวนการนี้ใช้ปั่นกังหันก๊าซได้ ทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างมาก

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC)

2.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

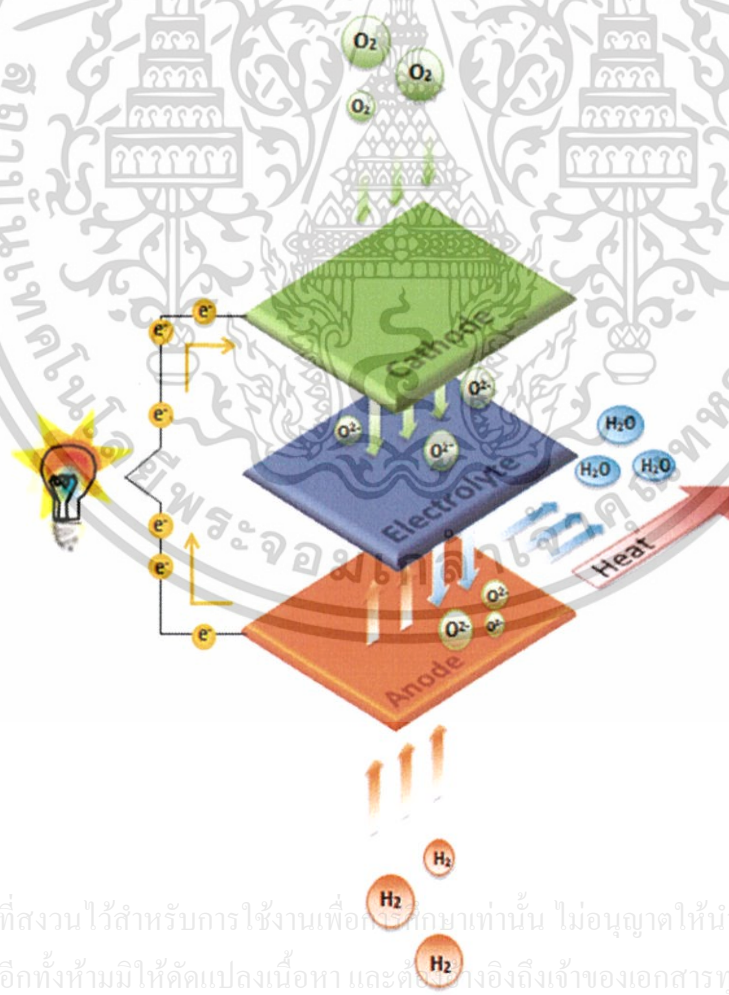
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูง และคาดว่าจะสามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสำหรับโรงผลิตไฟฟ้าในอนาคตเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้ของแข็งจำพวกเซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ทำให้สามารถดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส โดยข้อดีของการดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงคือ สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย เช่น ก๊าซธรรมชาติ หรือก๊าซชีวมวล และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม อีกทั้งยังทำงานร่วมกับกังหันก๊าซเพื่อเพิ่มการผลิตไฟฟ้า [1] โดยเซลล์เชื้อเพลิงมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน [6] คือ

1) ขั้วแอโนด (Anode) โลหะที่ใช้ทำเป็นขั้วแอโนด ได้แก่ Ni Co Ru และ Pt โดยโลหะ Ru จะทำหน้าที่เป็นแอโนดได้ดีเพราะมีความเสถียร แต่มีราคาแพง จึงนิยมใช้ Ni ซึ่งมีราคาถูก ทำหน้าที่เป็นแอโนดได้ดีพอสมควรและอยู่ในเกณฑ์เป็นที่ยอมรับได้ นอกจากนี้เพื่อคงไว้ซึ่งคุณลักษณะของความพรุน จึงใช้แอโนดในรูป Cermet ของโลหะกับ Stabilized zirconia ซึ่งจากการวิจัยพบว่า Ni/yttria-zirconia เป็นวัสดุที่ใช้ทำแอโนดได้ดีที่สุดในขณะนี้

2) ขั้วแคโทด (Cathode) โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งคือ Doped La-manganite (LaMnO_3) มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ปัจจุบันนิยมใช้ Sr doped La-manganite (LSM) มากที่สุด แต่การเติม Sr มีทั้งข้อดีและข้อเสียคือ ทำให้การนำไฟฟ้าดี ขณะเดียวกันสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแคโทดก็มากขึ้นด้วย ส่งผลทำให้เกิด

การเปลี่ยนแปลงที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแคโทดและ อิเล็กโทรไลต์ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมี และยิ่งเมื่อเวลาผ่านไปมากเท่าไรการเปลี่ยนแปลงก็มากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้การแพร่ผ่านของก๊าซ ลดน้อยลง

3) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) สารที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่ดีที่สุดในเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดออกไซด์แข็งคือ Zirconia (ZrO_2) ที่ Doped ด้วย Trivalent metal oxide เช่น Y_2O_3 Yb_2O_3 Sc_2O_3 หรือ Divalent metal oxide เช่น CaO MgO เป็นต้น ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้ในทางการค้าเชิงพาณิชย์จะใช้ร้อยละ 8 Yttria-stabilized zirconia (YSZ) เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยสามารถดำเนินงานได้ที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ปัญหาหลักของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดออกไซด์แข็งคืออุณหภูมิที่เซลล์ทำงานสูงเกินไป ถ้าสามารถหาวัสดุทดแทนที่ทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยลดต้นทุนของอิเล็กโทรด และวัสดุที่เป็นตัวเชื่อมต่อของเซลล์เข้าด้วยกัน ทำให้มีการวิจัยเพื่อ มุ่งเน้นหาแนวทางที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งดำเนินงานได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งอาจทำได้ โดยการใช้อิเล็กโทรไลต์ของแข็ง เช่น Ceria (CeO_2) Doped ด้วย CaO Y_2O_3 Sm_2O_3 Gd_2O_3 และ Lanthanum gallate หรือทำให้ความหนาของอิเล็กโทรไลต์บางลง เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานและหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

2.2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

ก๊าซไฮโดรเจนถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกให้ไฟฟ้ากระแสตรง ขณะเดียวกันอากาศถูกป้อนเข้าที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยรับอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อก๊าซออกซิเจน (O_2) แตกตัวเป็นออกซิเจนไอออน (O^{2-}) ที่อิเล็กโทรไลต์ ออกซิเจนไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำที่ขั้วแอโนดและมีความร้อนเกิดขึ้น สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีดังนี้



2.2.3 การหาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง [7]

ศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี (Reversible cell voltage หรือ Theoretical open-circuit potential, E^{OCV}) ขยับเคลื่อนประจุไฟฟ้ารอบวงจรไฟฟ้า โดยเกิดจากความแตกต่างระหว่างศักย์ของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า (Electrode) สามารถแสดงได้ด้วยสมการของเนินส์ (Nemst equation) ดังนี้

$$E^{OCV} = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}} \right) \quad (2.4)$$

โดยที่ E^0 คือศักย์ไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศ (Standard pressure) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่สถานะดำเนินงาน ดังสมการ

$$E^0 = 1.253 - 2.4516 \times 10^{-4} T(K) \quad (2.5)$$

ศักย์ไฟฟ้าจริง (Actual fuel cell voltage, E) จะมีค่าน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี เนื่องจากมีความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง และการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction) ที่บริเวณพื้นผิวระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ที่เกิดปฏิกิริยา (Electrode-electrolyte interface)

$$E = E^{OCV} - (\eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conc}) \quad (2.6)$$

1) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Activation overpotential, η_{act}) เป็นการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ซึ่งต้องมีพลังงานการเกิดปฏิกิริยามากกว่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy, E_a) จึงทำให้มีการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ดังสมการ

$$\eta_{act} = \eta_{act,anode} + \eta_{act,cathode} \quad (2.7)$$

$$\eta_{act,anode} = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{i}{2i_{0,anode}} + \sqrt{\left(\frac{i}{2i_{0,anode}} \right)^2 + 1} \right) \quad (2.8)$$

$$i_{0,anode} = \frac{RT}{2F} k_{anode} \exp \left(-\frac{E_{anode}}{RT} \right) \quad (2.9)$$

$$\eta_{act,cathode} = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{i}{2i_{0,cathode}} + \sqrt{\left(\frac{i}{2i_{0,cathode}} \right)^2 + 1} \right) \quad (2.10)$$

$$i_{0,cathode} = \frac{RT}{2F} k_{cathode} \exp \left(-\frac{E_{cathode}}{RT} \right) \quad (2.11)$$

2) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic overpotential, η_{ohm}) เป็นการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า และความต้านทานการไหลของประจุไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์ ดังสมการ

$$\eta_{ohm} = iR_{ohm} \quad (2.12)$$

$$R_{ohm} = \frac{\tau_{anode}}{\sigma_{anode}} + \frac{\tau_{electrolyte}}{\sigma_{electrolyte}} + \frac{\tau_{cathode}}{\sigma_{cathode}} \quad (2.13)$$

3) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากผลของการถ่ายโอนมวล (Concentration overpotential, η_{conc}) เป็นค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากการลดลงของความเข้มข้นของก๊าซเชื้อเพลิงที่เข้าทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีบริเวณพื้นผิวระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ (Electrode-electrolyte interface) มีความต้านทานของการถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer) เกิดขึ้น ดังสมการ

$$\eta_{conc} = \eta_{conc,anode} + \eta_{conc,cathode} \quad (2.14)$$

$$\eta_{conc,anode} = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2O,TPB}}{p_{H_2O}} \frac{p_{H_2}}{p_{H_2,TPB}} \right) \quad (2.15)$$

$$\eta_{conc,cathode} = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{p_{O_2}}{p_{O_2,TPB}} \right) \quad (2.16)$$

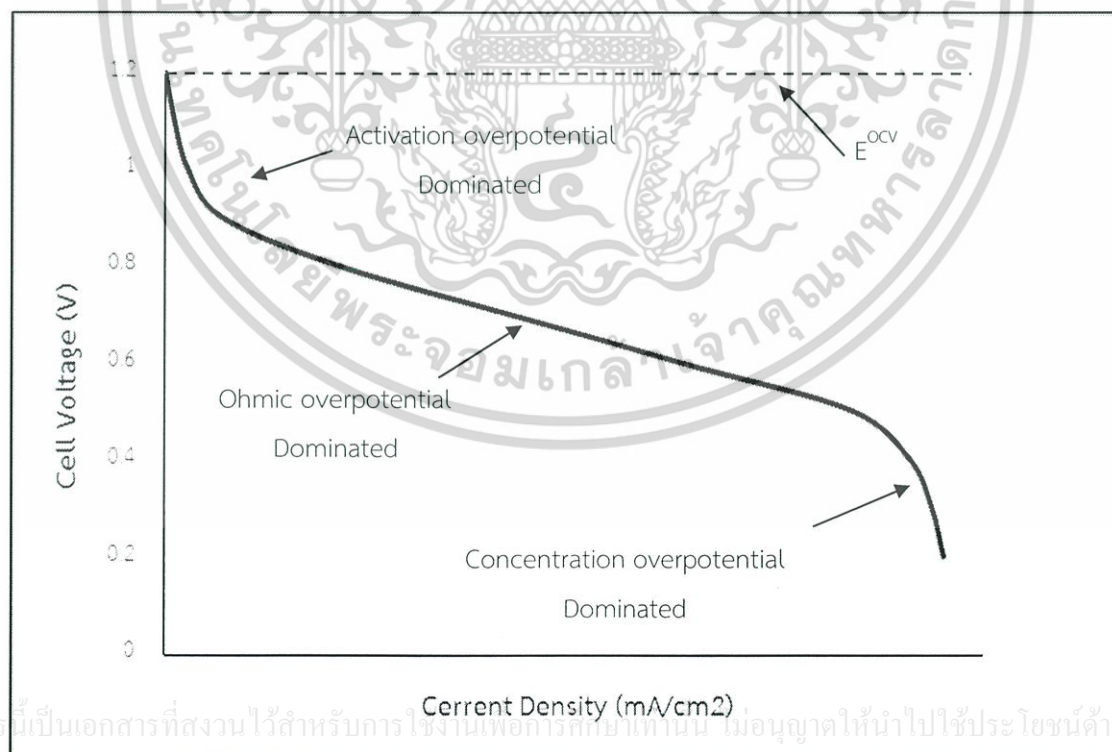
$$p_{H_2,TPB} = p_{H_2} - \frac{RT\tau_{anode}}{2FD_{eff,anode}} i \quad (2.17)$$

$$p_{H_2O,TPB} = p_{H_2O} - \frac{RT\tau_{anode}}{2FD_{eff,anode}} i \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.19) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถดูได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) กับศักย์ไฟฟ้า (Cell voltage) แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยเส้นประคือศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีซึ่งก็คือค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เป็นไปได้ และเส้นทึบคือศักย์ไฟฟ้าจริงเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรจะเกิดการสูญเสียศักย์ไฟฟ้า (Voltage loss) จาก 3 ส่วนหลัก คือ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ความต้านทานไฟฟ้า และผลของการถ่ายโอนมวลสาร ซึ่งตลอดการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะเห็นว่ากราฟแบ่งเป็น 3 ช่วง ตามปริมาณกระแสไฟฟ้า โดยกราฟในช่วงแรกศักย์ไฟฟ้าสูญเสียจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีส่งผลมากที่สุด เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงยังไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี จึงต้องใช้พลังงานการเกิดปฏิกิริยาให้มากกว่าพลังงานกระตุ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า เมื่ออิเล็กตรอนผ่านอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้าไปยังวงจรภายนอก การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีสมการเป็นเส้นตรงดังสมการที่ (2.12) จึงส่งผลให้กราฟในช่วงกลางนั้นเป็นเส้นตรง และในช่วงสุดท้ายการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากผลของการถ่ายโอนมวลสาร มีผลมากที่สุดเนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใกล้หมดไป ดังนั้นในการพิจารณาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง จึงสามารถดูได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า โดยถ้าต้องการดำเนินงานให้เซลล์เชื้อเพลิงมีสมรรถนะที่ต้นนั้นสามารถทำได้โดยปรับสภาวะการดำเนินงานหรือการออกแบบให้เส้นกราฟศักย์ไฟฟ้าจริงเข้าใกล้ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีมากที่สุด



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า

2.3 เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งคือก๊าซไฮโดรเจน นอกจากนี้สามารถใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซมีเทน เอทานอล เมทานอล เป็นต้น เป็นเชื้อเพลิงได้เช่นกัน แต่ต้องถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปก๊าซไฮโดรเจนก่อนนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง และใช้ก๊าซออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ที่จากปฏิกิริยาเคมีคือน้ำและความร้อน

2.4 การผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen production)

2.4.1 ก๊าซไฮโดรเจน

ก๊าซไฮโดรเจนเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานทางเลือกที่มีศักยภาพและคุณภาพที่สามารถใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงปิโตรเลียมได้ดี โดยการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงมีหลายวิธี เช่น การแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolysis of water) ซึ่งใช้ไฟฟ้าเพื่อแยกน้ำเพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน การออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) ซึ่งจำกัดปริมาณอากาศหรือก๊าซออกซิเจนในการเผาไหม้เพื่อไม่ให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ และการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) เป็นการทำปฏิกิริยาร่วมกับไอน้ำและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เมื่อพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของการผลิตก๊าซไฮโดรเจน การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการที่น่าสนใจเพราะได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรเจนสูง ดังนั้นโครงการนี้จึงสนใจการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

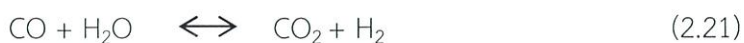
2.4.2 การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming)

ปัจจุบันเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน คือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เป็นเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ และส่งต่อสู่กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งได้ [1] โดยมีสารตั้งต้นเป็นก๊าซธรรมชาติ เอทานอล หรือก๊าซชีวมวล เป็นต้น ซึ่งกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1) การทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นกับไอน้ำที่อุณหภูมิ 750 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือก๊าซสังเคราะห์ (ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน) ดังสมการ



2) ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (Water-gas shift reaction, WGS) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจากขั้นตอนที่ 1 ระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการ



แม้ว่าในปัจจุบันการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นวิธีที่นิยมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เนื่องจากสามารถให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรเจนสูง [8] แต่การใช้น้ำเหนือวิกฤตแทนการใช้น้ำจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรเจนมีอุณหภูมิสูงและความดันสูง จึงสามารถป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งได้โดยไม่ต้องมีหน่วยเพิ่มอุณหภูมิและลดความดันก่อนป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นน้ำเหนือวิกฤตจึงถือเป็นทางเลือกใหม่ที่กำลังนิยมอยู่ในตอนนี้

2.4.3 น้ำเหนือวิกฤต [3]

น้ำในสถานะของเหลวที่สภาวะปกติ (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความดัน 1 บรรยากาศ) เป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุดสำหรับสารประกอบที่มีขั้วและเกลืออนินทรีย์ แต่เมื่ออยู่ในสภาวะภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงที่เหนือจุดวิกฤตของน้ำ (อุณหภูมิวิกฤต 373.95 องศาเซลเซียส และความดันวิกฤต 22.05 เมกะปาสคาล) ทำให้คุณสมบัติของน้ำเหนือวิกฤตนี้ บางลักษณะเหมือนก๊าซ บางลักษณะเหมือนของเหลว เช่น ความหนืดของน้ำเหนือวิกฤตมีค่าต่ำกว่าน้ำที่สภาวะปกติและค่าการถ่ายเทมวลสาร การควบคุมการแพร่ รวมถึงค่าการนำความร้อนของน้ำเหนือวิกฤตก็สูงขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้มีคุณสมบัติที่ดีในการถ่ายเทความร้อนเพื่อช่วยลดพลังงานที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำได้

2.4.4 ก๊าซเซอร์คอล [9]

ก๊าซเซอร์คอลดิบเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งก๊าซเซอร์คอลดิบมีสิ่งเจือปนอยู่มากจึงมีราคาค่อนข้างถูก การนำก๊าซเซอร์คอลไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม ก๊าซเซอร์คอลที่ใช้ควรเป็นก๊าซเซอร์คอลบริสุทธิ์ ซึ่งการนำก๊าซเซอร์คอลดิบไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ จะมีค่าดำเนินการค่อนข้างสูง ในปัจจุบันนักวิจัยจึงสนใจเพิ่มมูลค่าให้กับก๊าซเซอร์คอลดิบ โดยการนำก๊าซเซอร์คอลดิบไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งสามารถนำก๊าซเซอร์คอลดิบมาใช้ในการผลิตได้เลยโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทำให้เป็นก๊าซเซอร์คอลบริสุทธิ์

2.4.5 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง [2]

รูปแบบการใช้เชื้อเพลิงที่มาจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง มีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ กระบวนการรีฟอร์มมิงภายใน และกระบวนการรีฟอร์มมิงภายนอก โดยแต่ละรูปแบบมีรายละเอียดดังนี้

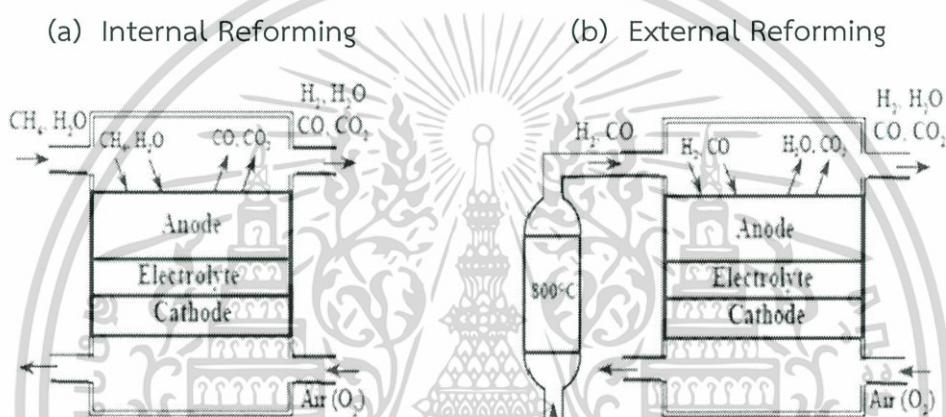
1) กระบวนการรีฟอร์มมิงภายใน (Internal reforming)

ปฏิกิริยาดูดความร้อนจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและปฏิกิริยาคายความร้อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นพร้อมกันภายในเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างสองกระบวนการได้ดี ซึ่งการถ่ายเทความร้อนนี้คล้ายกับการดำเนินงานแบบออโตเทอร์มอล (Autothermal operation) นั่นคือ ไม่จำเป็นต้องรับพลังงานจากภายนอก เนื่องจากสามารถนำความร้อนจากปฏิกิริยาคายความร้อนให้กับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงได้โดยตรง แต่ความร้อนที่ต้องการสำหรับ

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงอาจไม่เหมาะสมกับความร้อนที่ได้จากส่วนของเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิงจึงเกิดการเสื่อมสภาพและการแตกหักได้ ลักษณะการดำเนินงานของกระบวนการรีฟอร์มมิงภายในแสดงดังรูปที่ 2.3(a)

2) กระบวนการรีฟอร์มมิงภายนอก (External reforming)

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงจะเกิดขึ้นที่หน่วยรีฟอร์มเมอร์ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนก่อนป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงไม่มีการถ่ายเทความร้อนโดยตรงระหว่างการดำเนินงานของทั้งสองหน่วยแต่สามารถนำความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้กับหน่วยอื่นได้ ลักษณะการดำเนินงานของกระบวนการรีฟอร์มมิงภายนอกแสดงดังรูปที่ 2.3(b)



รูปที่ 2.3 กระบวนการรีฟอร์มมิงภายใน (a) และกระบวนการรีฟอร์มมิงภายนอก (b)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอล

ณพัทธ์ เฉยรอด และสิริรัตน์ นุชพงศ์ (2012) [10] ศึกษาการดำเนินงานของกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลโดยใช้ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตเพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนมากที่สุด พบว่าการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสและความดัน 230 บรรยากาศ ส่วนอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลดิบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 90 ซึ่งจะให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจน 65 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 23 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และไอน้ำ 12 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และศึกษาสภาวะการดำเนินงานของเครื่องแยกก๊าซ-ของเหลว เพื่อทำให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าที่สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมคืออุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

และความดัน 20 บรรยากาศ ซึ่งจะให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจน 74 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และก๊าซอื่นๆ 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

2.5.2 การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบความดันสูง

Recknagle P.K. และคณะ (2010) [11] สร้างแบบจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเมื่อดำเนินงานที่ความดันสูง เพื่อคาดการณ์การกระจายของอัตราการรีฟอร์มมิงภายใน อุณหภูมิ และกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการดำเนินงานที่ความดันสูง การจำลองผลการดำเนินงานที่ความดันสูงแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพความร้อนและไฟฟ้าให้ดีขึ้น พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดของเซลล์ลดลงร้อยละ 3 หรือ 20 องศาเซลเซียส และศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 9 เมื่อดำเนินงานที่ความดันเพิ่มขึ้นจาก 1 บรรยากาศถึง 10 บรรยากาศ

Seidler S. และคณะ (2010) [4] ศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งดำเนินงานที่ความดันสูงกว่าบรรยากาศร่วมกับเครื่องกักเก็บก๊าซโดยการทดลองและสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลในการดำเนินงานที่ความดัน 1.4 บาร์ ถึง 3 บาร์ ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่มีขั้วแอโนดเป็นโครงสร้างรองรับ 5 เซลล์สแต็ก พบว่าประสิทธิภาพของการทำงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อดำเนินงานที่ความดันสูงขึ้น โดยกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 248 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความดัน 1.4 บาร์ เป็น 307 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความดัน 2 บาร์ และ 323 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความดัน 3 บาร์ โดยศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.9 โวลต์ อัตราส่วนของไฮโดรเจนและไนโตรเจนที่เข้าขั้วแอโนดเท่ากับ 1:1 อากาศเข้าที่ขั้วแคโทด และดำเนินงานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

Saebae D. และคณะ (2013) [12] ศึกษาการทำงานของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งดำเนินงานที่ความดันสูงกับกังหันก๊าซ โดยใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้น พบว่าการเพิ่มความดันในการดำเนินงานสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบได้ดี โดยความดันที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4 บาร์ ถึง 6 บาร์ สามารถให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตไฟฟ้า และพบว่าความร้อนเหลือทิ้งที่ได้จากกังหันก๊าซนั้นสูงกว่าความร้อนที่ต้องการสำหรับระบบร่วม ดังนั้นระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งกับกังหันก๊าซสามารถรักษาสภาวะในการดำเนินงานได้ด้วยตัวเองภายใต้การดำเนินงานที่ความดันสูงระบบร่วมต้องการการนำความร้อนเหลือทิ้งจากขั้วแคโทดมาหมุนเวียนกลับมาใช้ในปริมาณมากเพื่อรักษาระบบให้ดำเนินงานโดยไม่ต้องมีความร้อนจากระบบอื่น แต่การเพิ่มสัดส่วนการหมุนเวียนของความร้อนเหลือทิ้งจากขั้วแคโทดทำให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

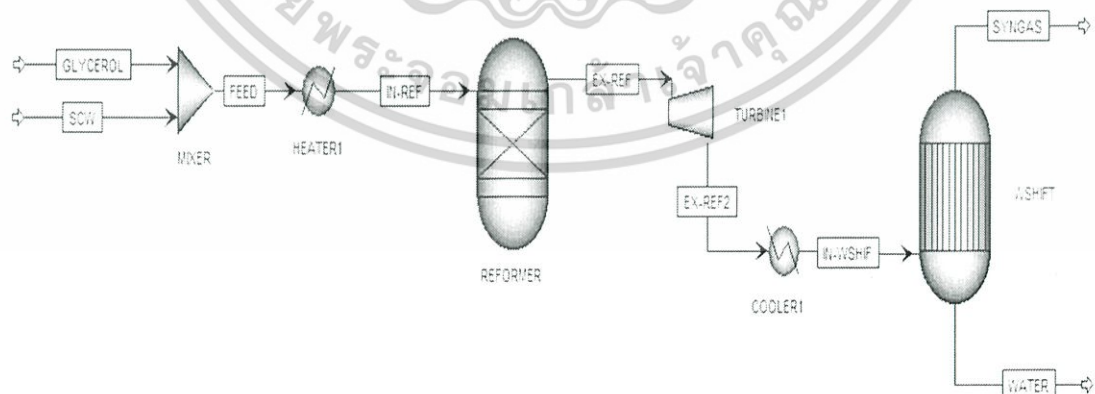
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้สนใจศึกษาสถานะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตไฟฟ้าจากการทำงานของระบบร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอลกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบความดันสูง โดยสร้างแบบจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus ซึ่งข้อดีของการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus คือสามารถออกแบบกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมและทำสมดุลมวลสารและพลังงานของกระบวนการผลิตเนื่องจากโปรแกรม Aspen Plus ช่วยให้การคำนวณที่ซับซ้อนสามารถทำได้ง่ายขึ้นและสามารถปรับเปลี่ยนปัจจัยในกระบวนการผลิตได้ง่าย ในหัวข้อที่ 3.1 แสดงการออกแบบกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอล เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง และในหัวข้อที่ 3.2 นำเสนอการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีเชื้อเพลิงคือก๊าซไฮโดรเจนจากการกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอล

3.1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอล

กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลและไอน้ำเหนือวิกฤต แสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์หลัก 2 เครื่องปฏิกรณ์ คือ เครื่องรีฟอร์มเมอร์ (Reformer) และเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาออกเตอร์แก๊สชิฟ (Water gas-shift reactor) และตารางที่ 3.1 แสดงสถานะการดำเนินงานของกระบวนการรีฟอร์มมิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.1 แบบจำลองกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอล

ตารางที่ 3.1 แบบจำลองสภาวะการดำเนินงานของกระบวนการรีฟอร์มมิง

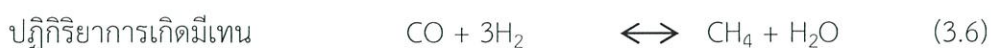
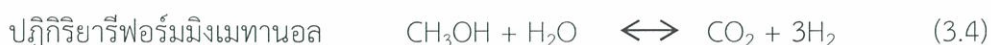
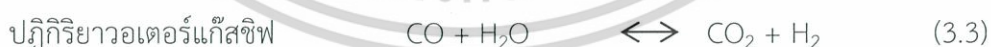
หน่วยปฏิบัติการ	แบบจำลอง	สภาวะการดำเนินงาน	
		มาตรฐาน	ช่วงที่ศึกษา
HEATER1	Heater	500 °C	-
REFORMER	RGibbs Reactor	800 °C	600 - 1,000 °C
		240 atm	200 - 280 atm
TURBINE1	Turbine	4 atm	-
COOLER1	Heater	200 °C	-
WSHIFT	REquil Reactor	60 °C	-
		4 atm	-

3.1.1 สารตั้งต้น

สารตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนประกอบด้วย 2 ส่วน คือน้ำเหนือวิกฤตและกลีเซอรอลดิบ ซึ่งประกอบด้วย กลีเซอรอล 80 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และเมทานอล 20 เปอร์เซ็นต์โดยโมล โดยน้ำเหนือวิกฤตและกลีเซอรอลจะป้อนรวมเข้ากันในเครื่องผสม (MIXER) จากนั้นถูกเพิ่มอุณหภูมิด้วยเครื่องให้ความร้อน (HEATER1) ก่อนถูกส่งไปทำปฏิกิริยาในเครื่องรีฟอร์มเมอร์

3.1.2 เครื่องรีฟอร์มเมอร์ (Reformer)

ในการจำลองกระบวนการของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RGibbs โดยปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้มีดังนี้

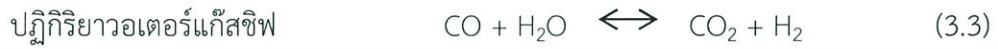


ในการศึกษาจะปรับเปลี่ยนสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส และความดัน 200 ถึง 280 บรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอ้างอิงงานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

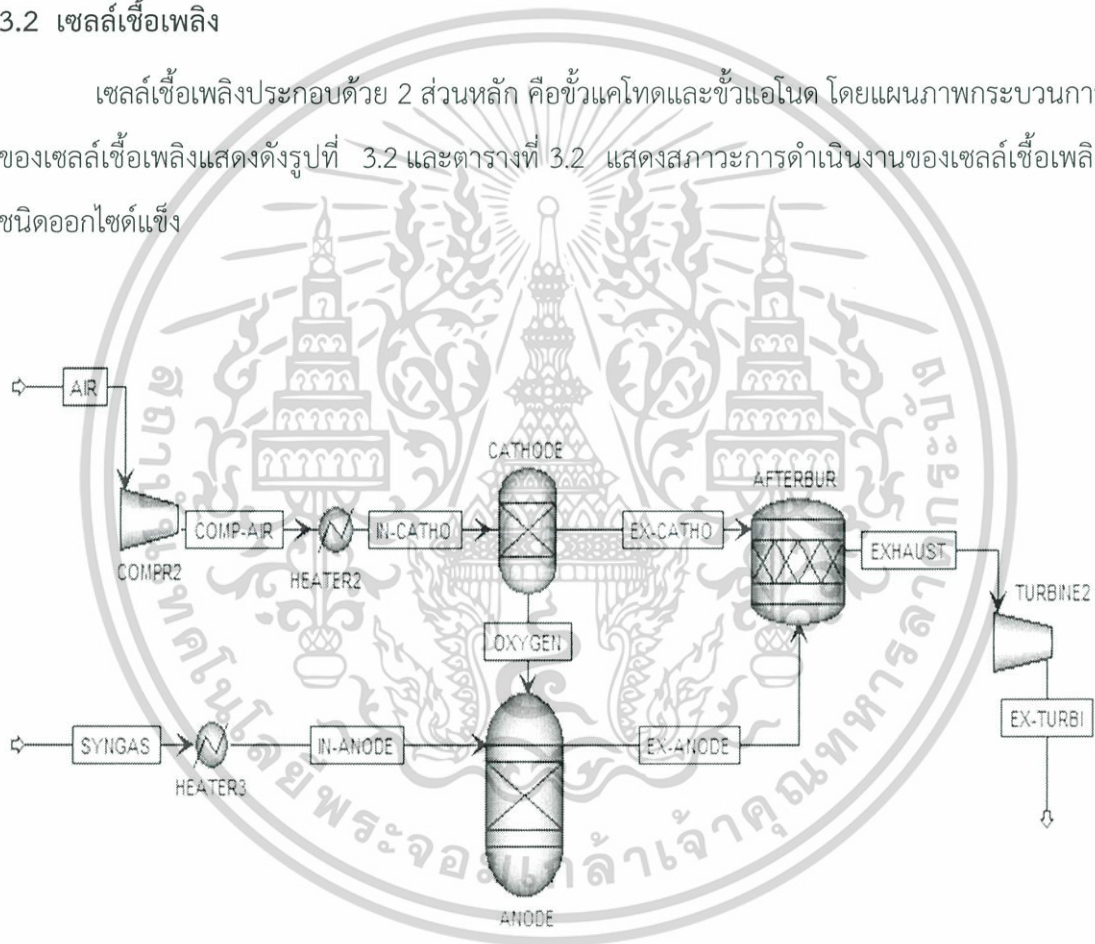
3.1.3 เครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาอวอเตอร์แก๊สชิฟ (Water gas-shift reactor)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องรีฟอร์มเมอร์จะถูกลดความดันด้วยกังหัน (TURBINE) และทำให้เย็นลงด้วยเครื่องทำความเย็น (COOLER1) แล้วส่งไปยังเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาอวอเตอร์แก๊สชิฟ โดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนี้



3.2 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนด โดยแผนภาพกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง



รูปที่ 3.2 แบบจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แบบจำลองสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

หน่วยปฏิบัติการ	แบบจำลอง	สภาวะการดำเนินงาน	
		มาตรฐาน	ช่วงที่ศึกษา
COMPR	Compressor	4 atm	4 - 8 atm
HEATER2	Heater	800 °C	-
HEATER3	Heater	400 °C	-
CATHODE	Separator	Spit fraction (Oxygen) = 0.22	-
ANODE	RGibbs Reactor	800 °C	800 - 1,000°C
		4 atm	4 - 8 atm
AFTERBUR	RStoic Reactor	1,100 °C	-
		4 atm	-
TURBINE2	Turbine	1 atm	-

3.2.1 สารตั้งต้น

สารตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ก๊าซสังเคราะห์และอากาศ โดยก๊าซสังเคราะห์เป็นก๊าซที่ได้จากการบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอล (SYNGAS) ประกอบไปด้วย ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนและน้ำ ซึ่งจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้วแอโนด (ANODE) ส่วนอากาศ (AIR) จะถูกเพิ่มความดันโดยป้อนเข้าสู่เครื่องอัดอากาศ (COMPR) และเพิ่มอุณหภูมิด้วยเครื่องให้ความร้อน (HEATER2) จากนั้นจึงเข้าสู่ขั้วแคโทด (CATHODE)

3.2.2 ขั้วแคโทด

ในการจำลองกระบวนการของขั้วแคโทดใช้แบบจำลองเครื่องแยก (Separator) แทนขั้วแคโทด เพื่อแยกก๊าซออกซิเจนให้เป็นออกซิเจนไอออน (O^{2-}) ป้อนเข้าสู่แอโนด ดังสมการ



3.2.3 ขั้วแอโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก ขั้วแอโนดใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RGibbs ในการจำลองกระบวนการที่ขั้วแอโนดก๊าซมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อยู่ในก๊าซสังเคราะห์ จะเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

และปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟกับน้ำ ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ชั่วแอโนด โดยก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ และก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซสังเคราะห์ จะเข้าทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับก๊าซออกซิเจน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ชั่วแอโนด มีดังนี้



ในการศึกษาจะปรับเปลี่ยนสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง ในช่วงอุณหภูมิ 800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส และความดัน 4 ถึง 8 บรรยากาศ

3.2.4 เครื่องอาฟเตอร์เบิร์นเนอร์ (Afterburner)

สำหรับกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เหลือจากชั่วแอโนดและออกซิเจนที่เหลือจากชั่วแคโทด จะทำปฏิกิริยาในเครื่องอาฟเตอร์เบิร์นเนอร์เพื่อนำความร้อนไปใช้กับหน่วยอื่นในการจำลองกระบวนการใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RStoic โดยภายในเครื่องปฏิกรณ์มีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



โดยกำหนดค่าแปรผันทางเคมีเท่ากับ 1 ของก๊าซไฮโดรเจน และกำหนดค่าแปรผันทางเคมีเท่ากับ 1 ของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ [13]

3.3 วิธีการจำลองกระบวนการ

โครงการนี้เป็นการศึกษาจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการทำงานร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตจากกลีเซอรอลกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus (ซึ่งมีแผนภาพของระบบรวมแสดงดังรูปที่ 3.3) เพื่อศึกษาหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยสมมติฐานที่ใช้ในการจำลองกระบวนการของระบบรวม คือ (1) ดำเนินงานที่สภาวะคงตัว (2) ไม่มีความดันลดในแต่ละอุปกรณ์ (3) ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟที่ชั่วแอโนดเกิดขึ้นที่สมดุลเคมี (4) มีเพียงก๊าซไฮโดรเจนที่ทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

วิธีการจำลองกระบวนการของระบบรวมแสดงดังรูปที่ 3.4 โดยเริ่มจากกำหนดสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (อุณหภูมิและความดันในการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์และอัตราส่วนของไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอล) เพื่อใช้ในการจำลองกระบวนการในการคำนวณ

องค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงใช้วิธีการหาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ที่ต่ำที่สุด (Gibbs free energy minimization) ซึ่งจากการจำลองกระบวนการจะได้อัตราการไหลเชิงโมลของผลิตภัณฑ์ (ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ) โดยก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงจะกลายเป็นพารามิเตอร์ขาเข้าสำหรับการคำนวณสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อกำหนดสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (อุณหภูมิและความดันในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า) และกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและโครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง เช่น ความหนาของขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ และสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซที่ขั้วไฟฟ้า เป็นต้น จะสามารถคำนวณสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นในโปรแกรม Aspen Plus ร่วมกับสมการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งต้องเขียนสมการดังกล่าวในรูปแบบ FORTRAN ใน Calculator block ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในโปรแกรม Aspen Plus

ในการคำนวณสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบรวม เมื่อกำหนดกำลังไฟฟ้าของระบบรวมเท่ากับ 10 กิโลวัตต์ (เหมาะสำหรับนำไปใช้ในครัวเรือน [14]) จะสามารถคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าต่อหนึ่งเซลล์เชื้อเพลิงได้จากสมการดังนี้

$$E = E^{OCV} - (\eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conc}) \quad (2.6)$$

$$E^{OCV} = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}} \right) \quad (2.4)$$

หรือ
$$E^{OCV} = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{x_{H_2O} P}{(x_{H_2} P)(x_{O_2} P)^{0.5}} \right)$$

โดย	x_{H_2O}	คือ เศษส่วนโมลของน้ำที่เหลือใน ANODE
	x_{H_2}	คือ เศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซสังเคราะห์และที่เกิดขึ้นใน ANODE
	x_{O_2}	คือ เศษส่วนโมลของก๊าซออกซิเจนที่เข้า ANODE

และเมื่อคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าต่อหนึ่งเซลล์เชื้อเพลิง จะสามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งเซลล์เชื้อเพลิง จากนั้นคำนวณหาจำนวนเซลล์เชื้อเพลิง อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel utilization, U_f) ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (SOFC electrical efficiency, η_{SOFC}) และประสิทธิภาพของระบบ (System electrical efficiency, η_{sys})

โดยแพ็คเกจที่ใช้ในการพิจารณาสมรรถนะของระบบรวม คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3.13) ถึง (3.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานร่วมกันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.12)

$$n = \frac{P_w}{iV} \quad (3.12)$$

อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.13)

$$U_f = \frac{iLWn}{2F(4n\text{CH}_{4,\text{in}} + n\text{CO}_{\text{in}} + n\text{H}_{2,\text{in}})} \quad (3.13)$$

ประสิทธิภาพหรือสมรรถนะการผลิตกระแสไฟฟ้าของระบบร่วมสามารถพิจารณาได้จากสมการดังนี้

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

$$\eta_{\text{SOFC}} = \frac{P_{\text{SOFC,AC}}}{n\text{CH}_{4,\text{in}}\text{LHV}_{\text{CH}_4} + n\text{CO}_{\text{in}}\text{LHV}_{\text{CO}} + n\text{H}_{2,\text{in}}\text{LHV}_{\text{H}_2}} \times 100 \quad (3.14)$$

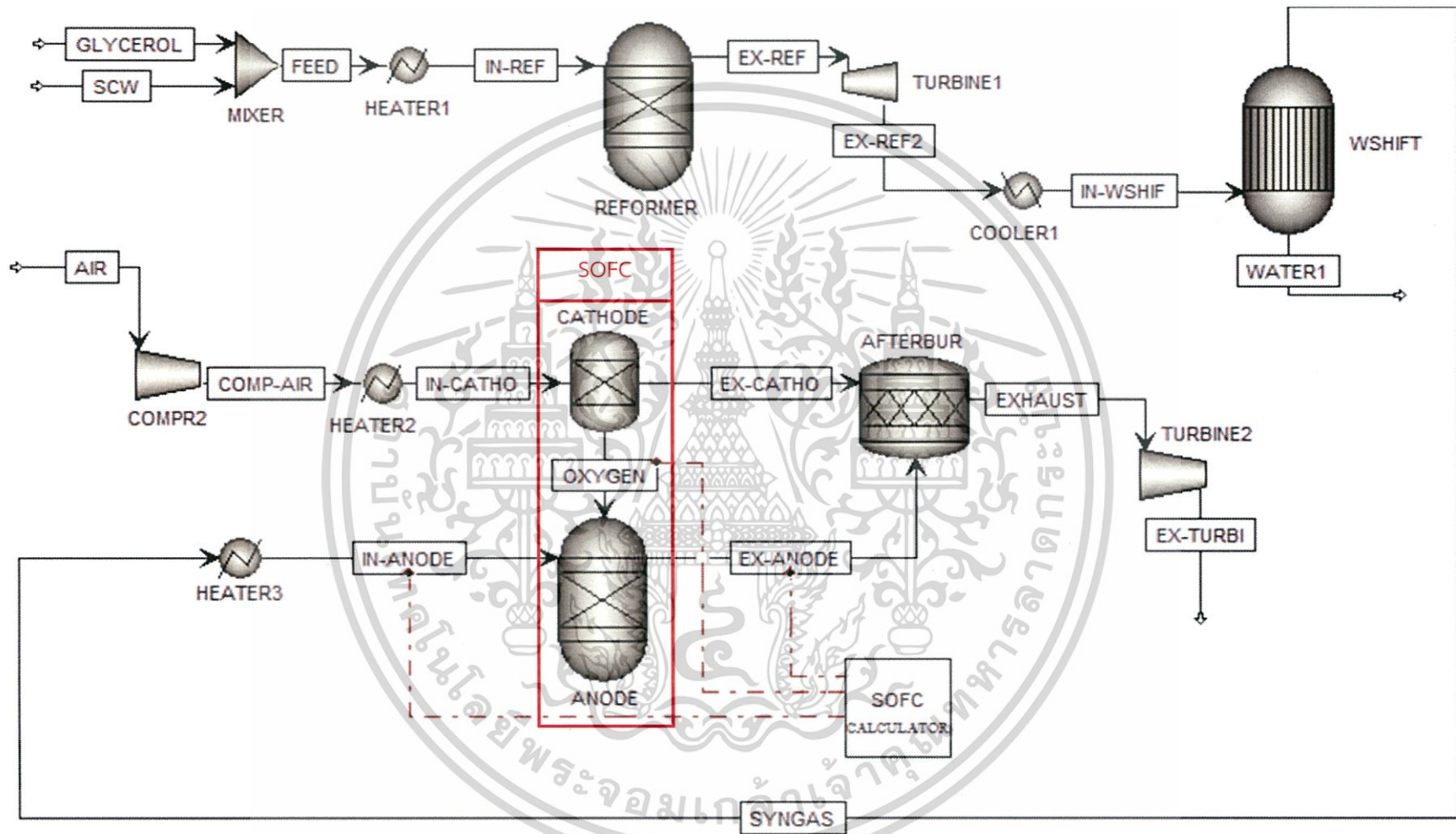
ประสิทธิภาพของระบบ

$$\eta_{\text{sys,AC}} = \frac{P_{\text{SOFC,AC}}}{n\text{Fuel}_{\text{in}}\text{LHV}_{\text{fuel}}} \times 100 \quad (3.15)$$

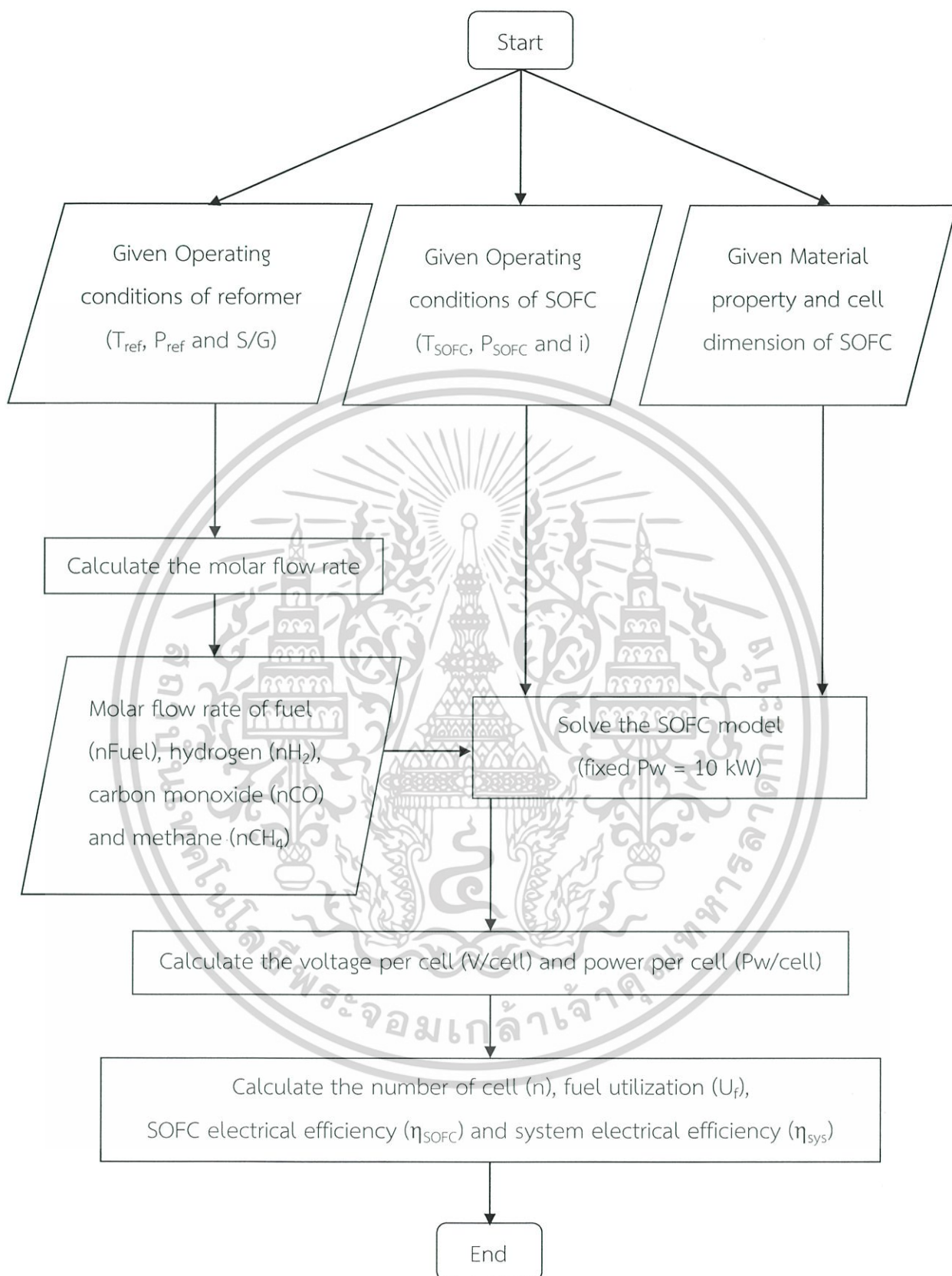
การแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current, DC) ให้เป็นกระแสไฟฟ้าสลับ (Alternating current, AC) โดยมีประสิทธิภาพการหน่วยแปลงกระแสไฟฟ้า (The dc-ac inverter efficiency, η_{invert}) เท่ากับ 0.94 [11] ดังนี้

$$P_{\text{SOFC,AC}} = P_{\text{SOFC,DC}} \times \eta_{\text{invert}} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แบบจำลองกระบวนการของระบบร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิ่งกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.4 วิธีการจำลองกระบวนการของระบบร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิ่งกับเซลล์เชื้อเพลิง
 ชนิดออกไซด์แข็ง

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ [15]

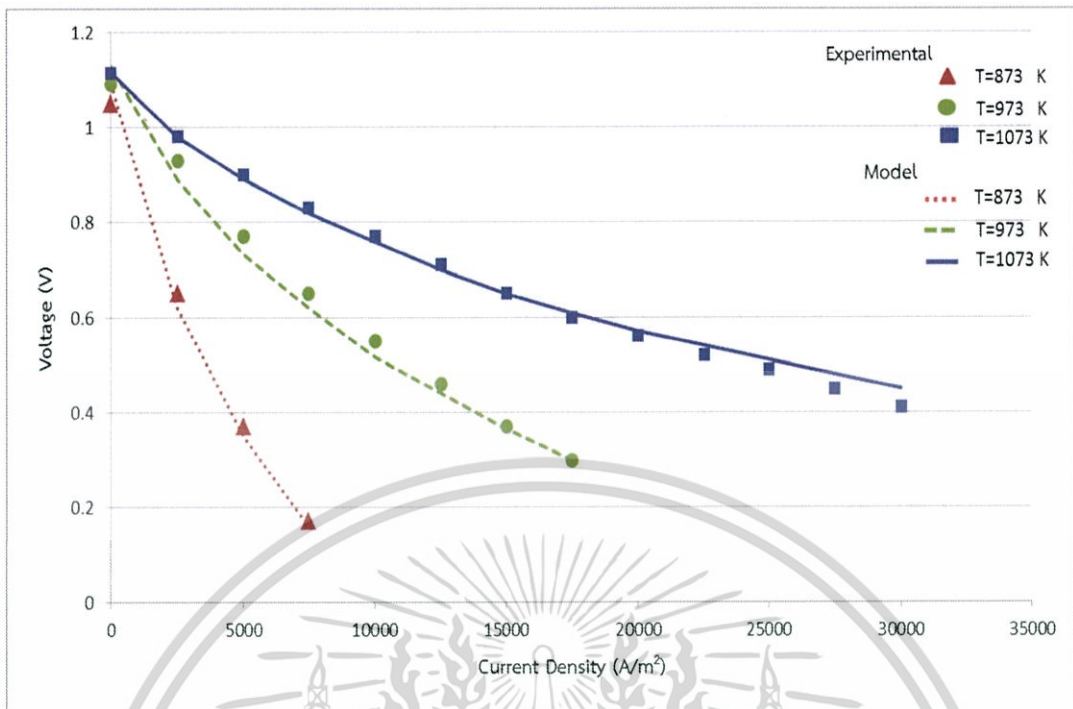
Parameters	Value
Reformer	
Temperature (T, °C)	800
Pressure (P, atm)	240
S/G	90
SOFC	
Temperature (T, °C)	800
Pressure (P, atm)	4
Current density (i, A/m ²)	5,000
Power (Pw, W)	10,000
Cell length (L, m)	0.4
Cell width (W, m)	0.1
Faraday's constant (F, C/mol)	9.65×10^4
Anode thickness (τ_{anode} , μm)	500
Cathode thickness ($\tau_{cathode}$, μm)	50
Electrolyte thickness ($\tau_{electrolyte}$, μm)	20
Pre-exponential factor of anode exchange current density (k_{anode} , A/m ²)	6.54×10^{11}
Pre-exponential factor of cathode exchange current density ($k_{cathode}$, A/m ²)	2.35×10^{11}
Activation energy of anode exchange current density (E_{anode} , kJ/mol)	140
Activation energy of cathode exchange current density ($E_{cathode}$, kJ/mol)	137
Anode diffusion coefficient ($D_{eff,anode}$, m ² /s)	3.66×10^{-5}
Cathode diffusion coefficient ($D_{eff,cathode}$, m ² /s)	1.37×10^{-5}
Anode electrical conductivity (σ_{anode} , 1/ Ωm)	$\frac{4.2 \times 10^7}{T} \exp\left(\frac{-1,200}{T}\right)$
Cathode electrical conductivity ($\sigma_{cathode}$, 1/ Ωm)	$\frac{9.5 \times 10^7}{T} \exp\left(\frac{-1,150}{T}\right)$
Electrolyte electrical conductivity ($\sigma_{electrolyte}$, 1/ Ωm)	$33.4 \times 10^3 \exp\left(\frac{-10,300}{T}\right)$

ผลและการอภิปรายผลการจำลองกระบวนการ

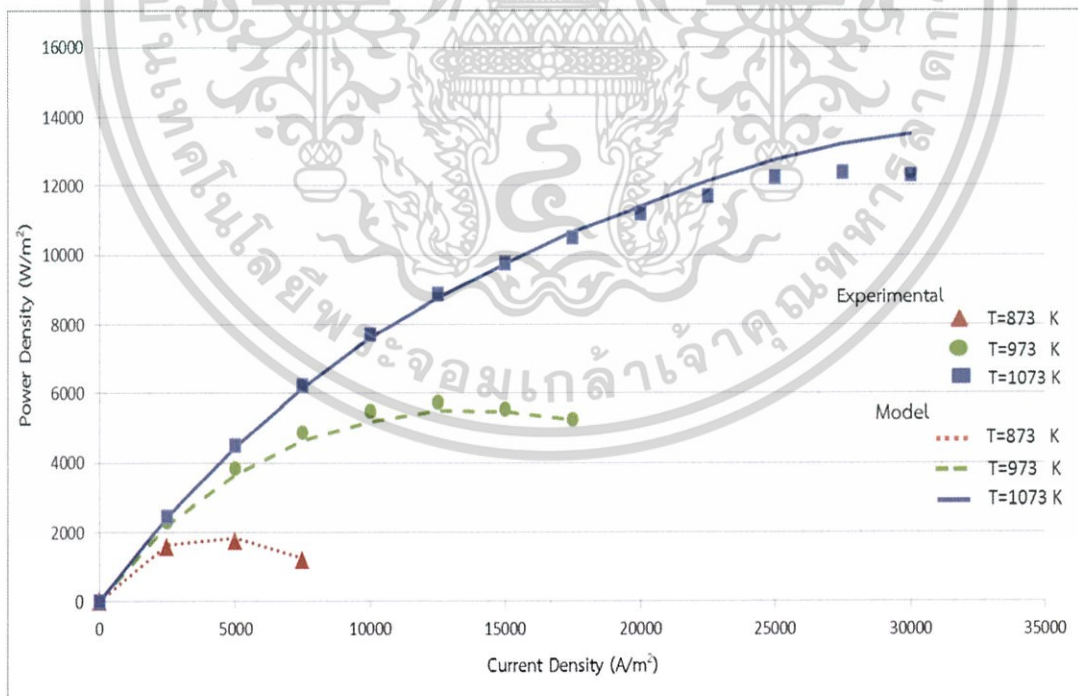
ผลจากการศึกษาโครงการนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนแรกเป็นการแสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง และในส่วนที่สองแสดงผลของกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลโดยใช้ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤต พิจารณาผลของอุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอล (S/G) ที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากกระบวนการรีฟอร์มมิง ซึ่งนำไปเป็นเชื้อเพลิงป้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป จากการศึกษาในส่วนนี้ทำให้ทราบสถานะการดำเนินงานที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และในส่วนที่สามแสดงผลของกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ที่มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของระบบ

4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับผลการทดลอง

การเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับผลการทดลอง ทำขึ้นเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.2.3 โดยเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับผลจากการทดลองในงานวิจัยของ Zhao และ Virkar [16] โดยใช้สภาวะในการดำเนินงาน องค์ประกอบของเชื้อเพลิงขาเข้า และสมบัติของวัสดุเดียวกัน คือ ที่อุณหภูมิ 873 973 และ 1,073 เคลวิน ภายใต้ความดันบรรยากาศ เชื้อเพลิงขาเข้าประกอบด้วย ก๊าซไฮโดรเจน 97 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และน้ำ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ความหนาของขั้วแอโนด 1,000 ไมโครเมตร ความหนาของขั้วแคโทด 20 ไมโครเมตร และความหนาของอิเล็กโทรไลต์ 8 ไมโครเมตร ซึ่งการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกระบวนการและผลจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง โดยในรูปที่ 4.1 ที่อุณหภูมิ 873 973 และ 1,073 เคลวิน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 0.999 และ 0.996 ตามลำดับ และในรูปที่ 4.2 ที่อุณหภูมิ 873 973 และ 1,073 เคลวิน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.989 0.996 และ 0.998 ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลองกระบวนการนี้จึงสามารถนำมาใช้ในการศึกษาโครงการนี้ต่อไปได้



รูปที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับผลจากการทดลองของ Zhao และ Virkar [16] ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 873 973 และ 1,073 เคลวิน



รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับผลจากการทดลองของ Zhao และ Virkar [16] ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 873 973 และ 1,073 เคลวิน

4.2 ผลของสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์

การจำลองกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลและไอน้ำเหนือวิกฤต กำหนดอัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 90 โดยกลีเซอรอลป้อนเข้าสู่กระบวนการด้วยอัตราการไหล 0.04 กิโลโมลต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และไอน้ำเหนือวิกฤตป้อนเข้าสู่กระบวนการด้วยอัตราการไหล 3.6 กิโลโมลต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บรรยากาศสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 240 บรรยากาศซึ่งจากการจำลองกระบวนการ พบว่าสายผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจน 67 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28.3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ไอน้ำ 4.4 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ก๊าซมีเทน 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 85 พีพีเอ็ม จากนั้นนำเชื้อเพลิงที่ได้ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบรวมกำหนดให้ระบบรวมผลิตกำลังไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ เซลล์เชื้อเพลิงดำเนินงานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บรรยากาศ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

4.2.1 ผลของอุณหภูมิในเครื่องรีฟอร์มเมอร์

การศึกษาผลของอุณหภูมิในเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ที่มีผลต่อเศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจำนวนเซลล์เชื้อเพลิง อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงผลดังตารางที่ 4.1 ในการศึกษาจะปรับเปลี่ยนเฉพาะอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ 600 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส โดยตัวแปรอื่น ๆ มีค่าคงที่ ได้แก่ ความดัน 240 บรรยากาศ อัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 90 สภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บรรยากาศ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากผลการจำลองกระบวนการจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์สูงขึ้น ส่งผลให้เศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงลดลง อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง

เนื่องจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งเกิดขึ้นได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ปฏิกิริยาเลื่อนไปข้างหน้า ส่งผลให้ได้เศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น แต่ผลการจำลองกระบวนการจะเห็นว่าอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส เศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเป็นปฏิกิริยาสมดุล ซึ่งอาจถูกจำกัดสมดุลที่อุณหภูมิช่วงนี้ เมื่อเศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากมีผลต่อความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนในสมการศักย์ไฟฟ้า

ทางทฤษฎี (สมการ (2.4)) นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของเศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจน จะทำให้การแพร่ของก๊าซไฮโดรเจนในรูพรุนไปยังพื้นผิวระหว่างขั้วไฟฟ้าดีขึ้น ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลจึงมีค่าลดลงเมื่อศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีเพิ่มขึ้น และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลลดลง (สมการ (2.15)) ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจึงเพิ่มขึ้น เป็นผลให้จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่ต้องการใช้ในการผลิตไฟฟ้าลดลง

เมื่อพิจารณาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์สูงขึ้น ทำให้อัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น อัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และอัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซมีเทนลดลง แต่อัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซไฮโดรเจน ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงจึงขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซไฮโดรเจนและจำนวนเซลล์เชื้อเพลิงเป็นหลัก เมื่อจำนวนเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ในขณะที่เศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง

และเช่นเดียวกับอัตราการใช้เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะขึ้นกับอัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซไฮโดรเจนเป็นหลัก เมื่อมีเชื้อเพลิงขาเข้ามากขึ้นแต่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้เท่าเดิม ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีค่าลดลง

แม้ว่าจากการจำลองกระบวนการจะพบว่า การดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง แต่การพิจารณาสถานะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ จะพิจารณาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเป็นหลัก จึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

4.2.2 ผลของความดันในเครื่องรีฟอร์มเมอร์

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในเครื่องรีฟอร์มเมอร์ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์คือ 800 องศาเซลเซียส ดังนั้นการศึกษาผลของความดันในเครื่องรีฟอร์มเมอร์เลือกใช้ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และปรับเปลี่ยนความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีผลต่อเศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ในการศึกษา จะปรับเปลี่ยนความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ 200 240 และ 280 บรรยากาศ และสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บรรยากาศ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยผลการจำลองกระบวนการแสดงดังตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ส่งผลให้เศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงถูกจำกัดสมดุลของปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่ง ดังนั้นปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความดันให้กับระบบ ซึ่งจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และจำนวนเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากัน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อเศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

4.2.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอล

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ พบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บรรยากาศ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจึงเลือกที่สภาวะดังกล่าวในการศึกษาผลของอัตราส่วนของไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอล (30 - 110) ที่มีผลต่อเศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง โดยผลการจำลองกระบวนการแสดงดังตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลมีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ โดยอัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลจะแปรผันตรงกับเศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจน และจะแปรผกผันกับเศษส่วนโมลของก๊าซมีเทน แต่เมื่ออัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลมากกว่า 90 เศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจน และเศษส่วนโมลของก๊าซมีเทนจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจนเกือบคงที่ แต่ไม่ส่งผลต่อเศษส่วนโมลของไอน้ำ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เนื่องจากการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงถูกจำกัดสมดุลของปฏิกิริยารีฟอร์มมิง

การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอล ทำให้มีน้ำในกระบวนการเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสมดุลของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและปฏิกิริยาออกซิเดชันแก๊สซิฟ ทำให้ปฏิกิริยาเลื่อนไปข้างหน้า จึงได้ก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มน้ำในกระบวนการจะส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดมีเทน ทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ส่งผลให้ปริมาณก๊าซมีเทนในผลิตภัณฑ์ลดลง และได้ก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณสูงขึ้น

ดังที่อธิบายในหัวข้อที่ 4.2.1 เมื่อเศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากมีผลต่อความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนในสมการศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี (สมการ (2.4)) นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของเศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนยังมีผลต่อความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนในสมการศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลที่ขั้วแอโนดทำให้มีค่าลดลง (สมการ (2.15)) ด้วยเหตุนี้จึงมีผลให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงเป็นผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีจำนวนใกล้เคียงกัน ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงจึงขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทนและ

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เท่านั้น ซึ่งค่าดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เป็นผลให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงจึงมีค่าใกล้เคียงกัน และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งขึ้นกับการไหลเชิงโมลของก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาปัจจัยทั้งหมดที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเครื่องรีฟอร์มเมอร์คือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บรรยากาศ และอัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 90 โดยประสิทธิภาพรวมของระบบรวมเท่ากับ 68.41 เปอร์เซ็นต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์

อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (องศาเซลเซียส)	ความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (บรรยากาศ)	เศษส่วนโมล			ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)	จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง
		ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์				
600	200	0.575	0.083	57 ppm	0.918	54.454 ≈ 55	82.04%	64.11%
	240	0.552	0.103	52 ppm	0.916	54.567 ≈ 55	82.16%	64.81%
	280	0.529	0.123	48 ppm	0.914	54.687 ≈ 55	82.23%	65.38%
800	200	0.671	0.002	86 ppm	0.925	54.029 ≈ 55	81.32%	60.14%
	240	0.670	0.003	85 ppm	0.925	54.032 ≈ 55	81.19%	60.10%
	280	0.668	0.004	85 ppm	0.925	54.041 ≈ 55	81.41%	60.31%
1,000	200	0.674	46 ppm	87 ppm	0.926	54.017 ≈ 55	81.21%	59.95%
	240	0.673	70 ppm	87 ppm	0.926	54.021 ≈ 55	81.33%	60.04%
	280	0.673	102 ppm	87 ppm	0.926	54.021 ≈ 55	81.31%	60.03%

หมายเหตุ ประสิทธิภาพของระบบ เท่ากับ 68.41 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอล

อัตราส่วน ระหว่างไอน้ำ เหนือวิกฤตต่อ กลีเซอรอล	เศษส่วนโมล			ศักย์ไฟฟ้าของ เซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)	จำนวน เซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์)	อัตราการใช้ เชื้อเพลิง	ประสิทธิภาพ ของเซลล์ เชื้อเพลิง
	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์				
30	0.626	0.040	220 ppm	0.922	54.219 ≈ 55	81.67%	62.24%
50	0.659	0.012	149 ppm	0.924	54.083 ≈ 55	81.52%	62.24%
70	0.668	0.004	110 ppm	0.925	54.041 ≈ 55	81.32%	60.48%
90	0.671	0.002	86 ppm	0.925	54.029 ≈ 55	81.32%	60.14%
110	0.673	0.001	70 ppm	0.926	54.020 ≈ 55	81.15%	59.95%

หมายเหตุ ประสิทธิภาพของระบบ เท่ากับ 68.41 เปอร์เซ็นต์

4.3 ผลของสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

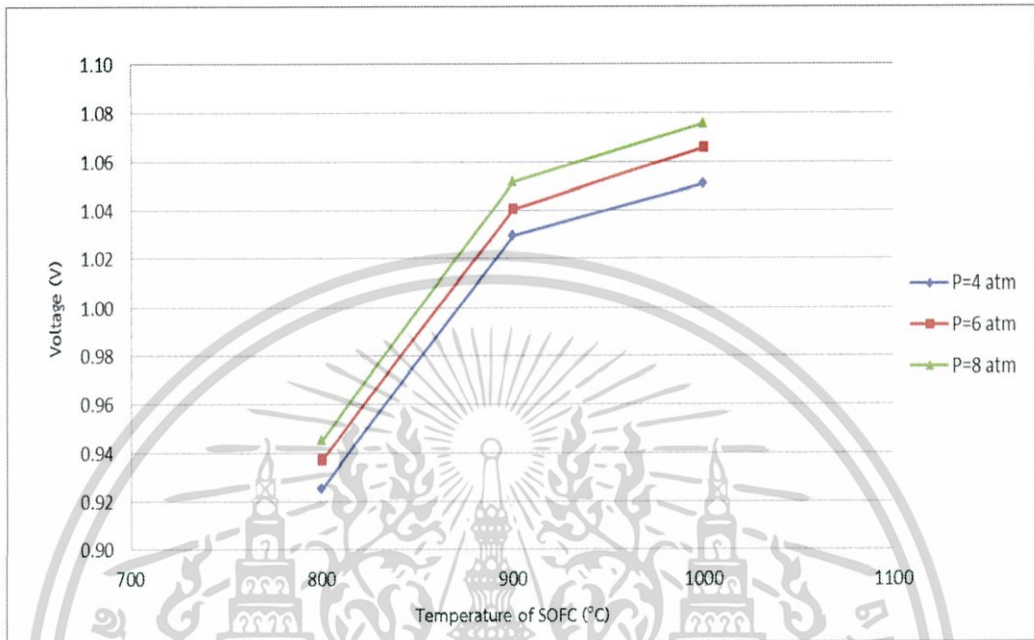
จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ พบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บรรยากาศ และอัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 90 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินงาน จึงเลือกที่สภาวะดังกล่าวมาศึกษาผลของสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งโดยกำหนดให้ระบบร่วมผลิตกำลังไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์

การจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยใช้เชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ที่ออกจากกระบวนการรีฟอร์มมิง (SYNGAS) ซึ่งมีอัตราการไหล 0.365 กิโลโมลต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บรรยากาศ และป้อนอากาศเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งด้วยอัตราการไหล 1.67 กิโลโมลต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งใช้อัตราการไหลของอากาศให้มากกว่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิง (ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิง) ประมาณ 5 เท่า [17] เนื่องจากปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การใช้อัตราการไหลของอากาศที่มากขึ้นจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อน ไม่ให้เซลล์เชื้อเพลิงมีความร้อนสูงเกินไปในการดำเนินงานสำหรับสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะดำเนินงานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บรรยากาศ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งจากการจำลองกระบวนการจะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.925 โวลต์ จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 55 เซลล์ อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 81.32 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60.14 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของระบบเท่ากับ 68.41 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง และอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง โดยในส่วนนี้จะไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์คงที่ จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าคงที่ และไม่พิจารณาประสิทธิภาพของระบบเนื่องจากอัตราการไหลของกลีเซอรอลที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการรีฟอร์มมิงคงที่ จึงทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าคงที่เช่นกัน

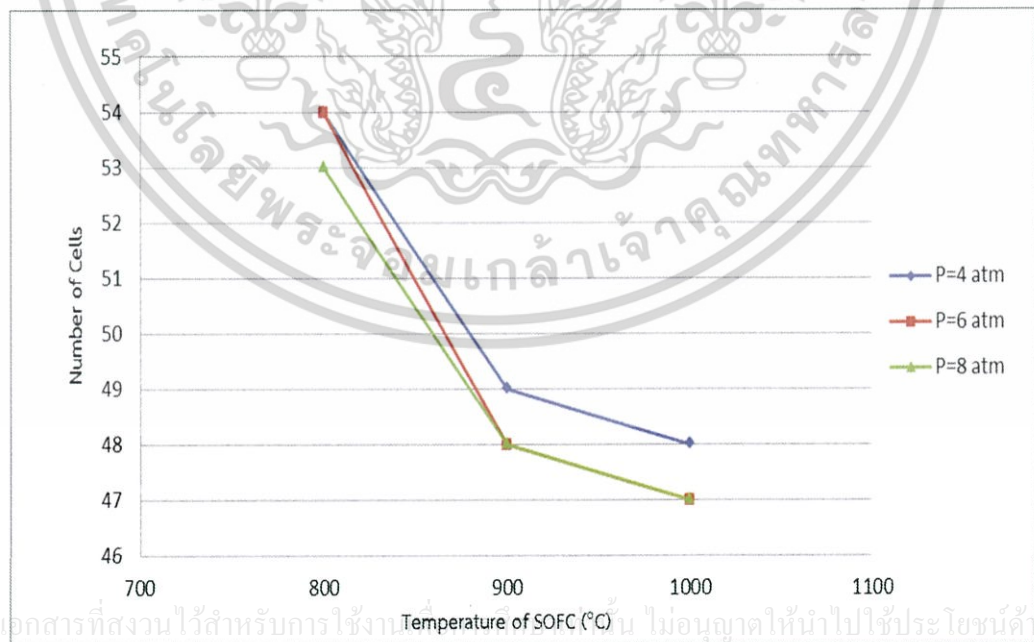
4.3.1 ผลของอุณหภูมิในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

การศึกษาผลของอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง และอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.5 ในการศึกษาจะปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่ 800 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 4 บรรยากาศ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บรรยากาศ และอัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อ

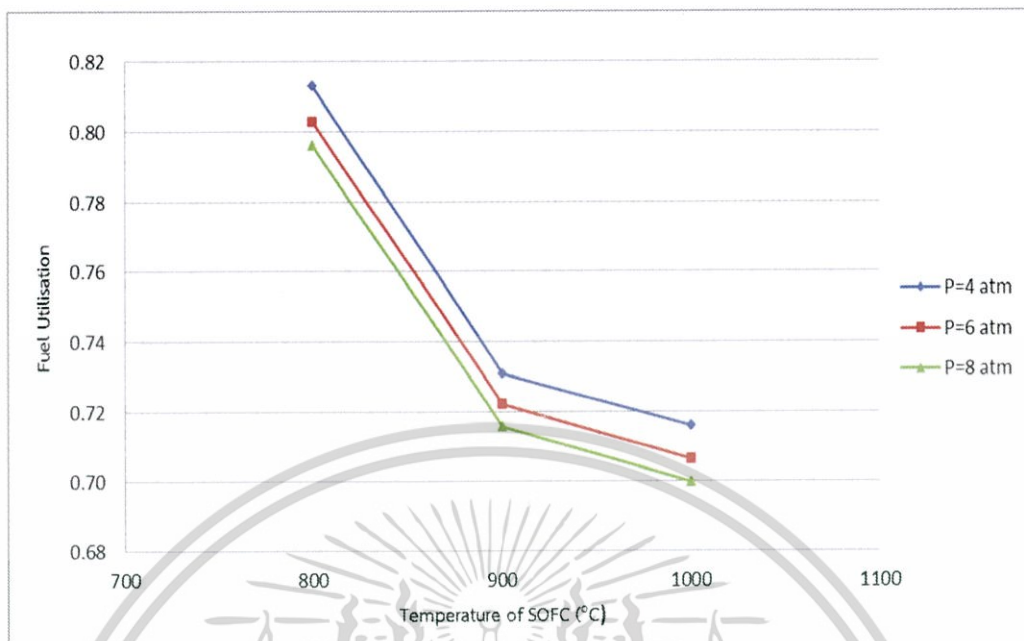
กลีเซอรอลเท่ากับ 90 ผลการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงลดลง และอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง



รูปที่ 4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีผลต่อ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีผลต่อ จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง

เมื่ออุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้นจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีมีค่าเพิ่มมากขึ้นและมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียลดลง เมื่อพิจารณา ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียทั้ง 3 ชนิด พบว่าเมื่ออุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดลดลง (สมการ (2.8) ถึง (2.11)) และส่งผลต่อการนำไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด ขั้วแคโทดและอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าลดลง (สมการ (2.13)) แต่จะส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลที่ขั้วแอโนดและแคโทดเพิ่มมากขึ้น (สมการ (2.15) ถึง (2.19)) ดังนั้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่ต้องการใช้ในการผลิตไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย

อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์เชื้อเพลิง และอัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่เนื่องจากสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์คงที่ ดังนั้นอัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งจึงไม่เปลี่ยนแปลง อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงจึงขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อจำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่ต้องการใช้ในการผลิตไฟฟ้าลดลง ทำให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงตามไปด้วย

4.3.2 ผลของความดันในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งคือ 900 องศาเซลเซียส ดังนั้น การศึกษาผลของความดันในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจึงเลือกใช้ที่อุณหภูมิดังกล่าว และปรับเปลี่ยนความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง และอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง ในการศึกษาจะปรับเปลี่ยนความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ 4 6 และ 8 บรรยากาศ โดยผลการจำลองกระบวนการ แสดงดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.5

ในความเป็นจริงแล้วการเพิ่มความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง จะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีเพิ่มขึ้น และค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลลดลงเพราะการเพิ่มความดันจะส่งผลให้การแพร่ของก๊าซดีขึ้น เมื่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่ต้องการใช้ในการผลิตไฟฟ้าลดลง และอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงตามไปด้วย แต่จากการจำลองกระบวนการพบว่าเมื่อเพิ่มความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ส่งผลให้ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง และอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการเพิ่มความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งในช่วง 4 ถึง 8 บรรยากาศ จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญ

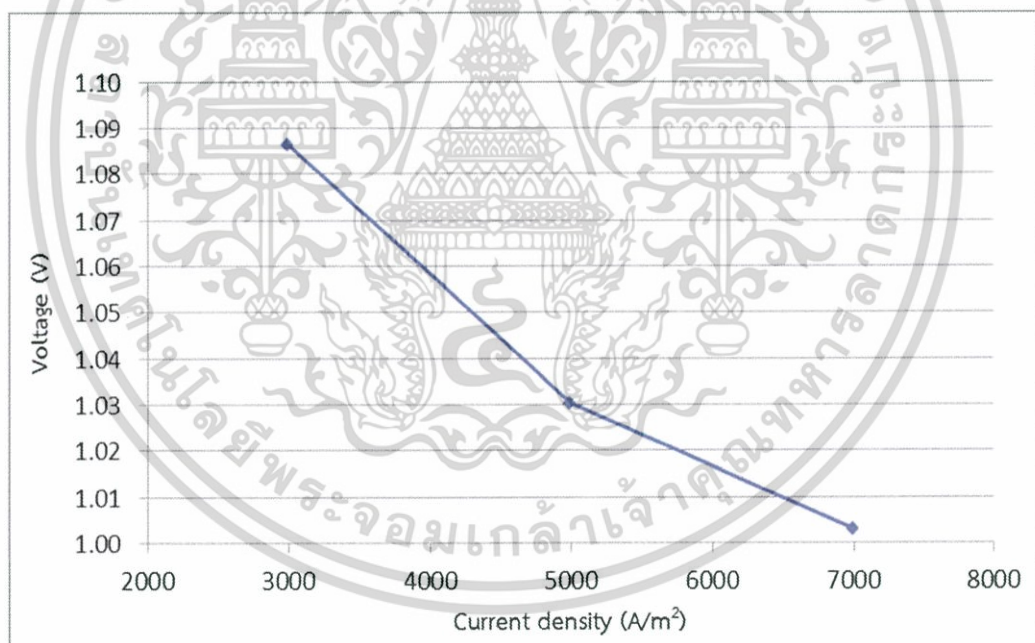
4.3.3 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

จากการศึกษาการเปลี่ยนสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง พบว่าสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ คือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บรรยากาศ โดยมีอัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤต ต่อกลีเซอร์อลเท่ากับ 90 และสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง คือ 900 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บรรยากาศ จึงเลือกที่สภาวะดังกล่าวมาศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง และอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง ในการศึกษาจะปรับเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 3,000 5,000 และ 7,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตรแสดงดังรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเล็กน้อย จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงลดลงและอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น

จากการจำลองกระบวนการพบว่าเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง เนื่องจากการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะทำให้มีศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ความต้านทานไฟฟ้า และผลของการถ่ายโอนมวลเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อกำหนดให้ระบบร่วมผลิตกำลังไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าต่อหนึ่งเซลล์

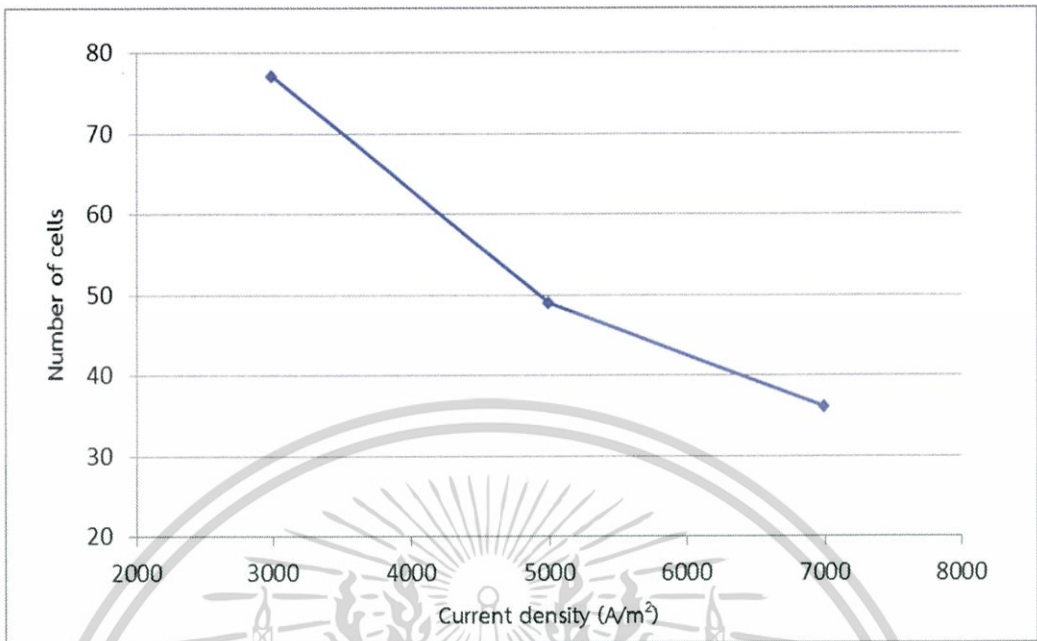
เชื้อเพลิงลดลง เป็นผลให้กำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจึงลดลง และการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านั้นหมายถึงการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในขณะที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้ามาเท่าเดิม ดังนั้นจึงทำให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาปัจจัยทั้งหมดที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเครื่องรีฟอร์มเมอร์คือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บรรยากาศ โดยมีอัตราส่วนระหว่างไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 90 และสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งคือ 900 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บรรยากาศ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งจะได้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 1.003 โวลต์ จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 36 เซลล์ อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 75.03 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60.14 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของระบบเท่ากับ 68.41 เปอร์เซ็นต์

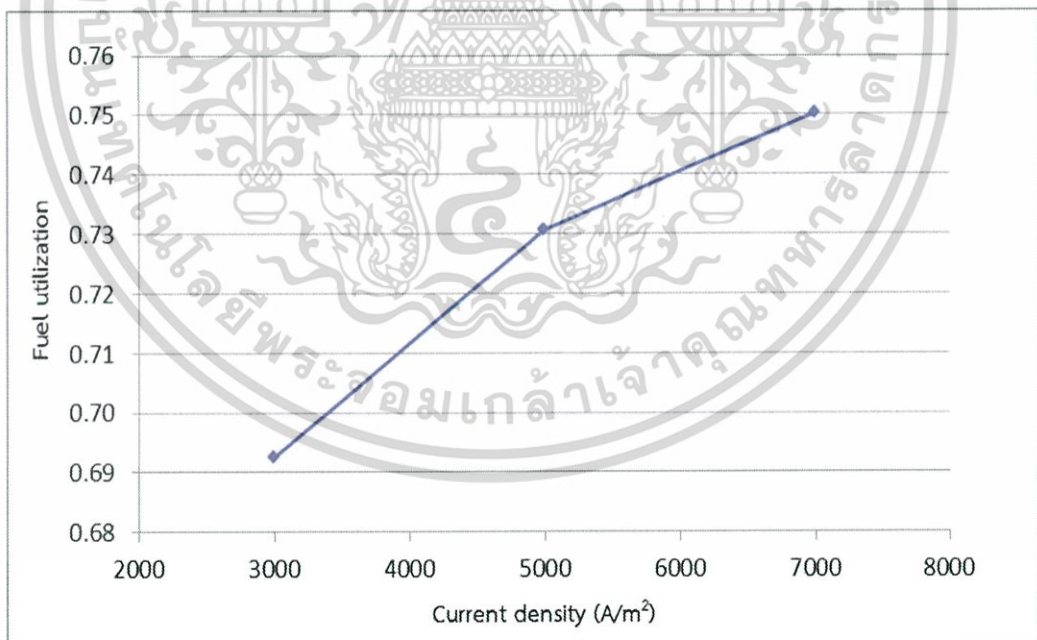


รูปที่ 4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อจำนวนเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 4.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงของ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เซลล์เชื้อเพลิง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการจำลองกระบวนการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการจำลองกระบวนการ

การพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบรวมจะพิจารณาจากสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์และสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง จากผลการศึกษาสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า เมื่อกำหนดให้ระบบรวมผลิตกำลังไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ ซึ่งพิจารณาจากองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากกระบวนการรีฟอร์มมิง ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพของระบบการผลิตไฟฟ้า พบว่าสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดคืออุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บรรยากาศ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 90 ซึ่งให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจน 67.1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28.3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ไอน้ำ 4.4 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ก๊าซมีเทน 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 86 พีพีเอ็ม โดยเมื่อกำหนดให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งดำเนินการที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บรรยากาศ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.925 โวลต์ จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 55 เซลล์ อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 81.32 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60.14 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของระบบเท่ากับ 68.41 เปอร์เซ็นต์ โดยจะนำสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ไปใช้ในการศึกษาสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

จากผลการศึกษาสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเมื่อกำหนดให้ระบบรวมผลิตกำลังไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ ซึ่งพิจารณาจากศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพของระบบการผลิตไฟฟ้า พบว่าสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตไฟฟ้าคือที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บรรยากาศ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งจะได้ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 1.003 โวลต์ จำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 36 เซลล์ อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิง

เท่ากับ 75.03 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60.14 เปอร์เซ็นต์ และ ประสิทธิภาพของระบบเท่ากับ 68.41 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าของระบบร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงกับ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง จะมีเชื้อเพลิงที่เหลือจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งสามารถนำ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงส่วนดังกล่าวมาใช้ในกังหันก๊าซ เพื่อเพิ่มกำลัง การผลิตไฟฟ้าได้อีกส่วนหนึ่ง
2. ควรมีการวิเคราะห์เกี่ยวกับการใช้พลังงานของแบบจำลองในระบบร่วมระหว่างกระบวนการ รีฟอร์มมิงกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง เพื่อให้มีการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมและ มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการผลิตไฟฟ้าในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wanchanthuek R. 2011. "Hydrogen Gas: The Expectation to be a Promising Sustainable Energy Source." *Burapha Sci.* 16(1) : 131-140.
- [2] Laosiripojanaa N., Wiyaratnb W., Kiatkittipongc W., Arpornwichanopd A., Soottitantawatd A., Assabumrungratd S. 2009. "REVIEWS ON SOLID OXIDE FUEL CELL TECHNOLOGY." *Engineering Journal*, 13(1) : 65-83.
- [3] Byrd A. J. 2011. "Hydrogen Production in Supercritical Water." A dissertation submitted to the Graduate Faculty of Auburn University.
- [4] Seidlera S., Henkea M., Kalloa J., Besslera G.W., Maierb U., Friedricha K.A. 2011. "Pressurized solid oxide fuel cells: Experimental studies and modeling." *Journal of Power Sources*.196 : 7195-7202.
- [5] U.S Department of Energy. 2011. Fuel Cell Technologies Program. [Online]. Available :<http://hydrogenandfuelcells.energy.gov>.
- [6] Stambouli A.B., and Traversa E. 2002. "Fuel cells, an alternative to standard sources of energy." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1) : 297-306.
- [7] Larminie J., and Dicks A. 2003. *Fuel Cell Systems Explained*. 2nd ed. England : John Wiley & Sons Ltd.
- [8] Hayre R.O., Cha S.W., Colell A.W., Prinz F.B. 2006. *Fuel Cell Fundamentals*. New York : John Wiley & Sons Ltd.
- [9] วรรัตน์ เลิศสนเมธากุลม. 2553. "กระบวนการผลิตก๊าสไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลคาร์บอนเนตจากกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [10] ณพัทธ์ เฉยรอด และสิริรัตน์ นุชพงศ์. 2555. "การผลิตก๊าสไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลโดยกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำเหนือวิกฤต." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Recknagle P.K., Ryan M.A., Koepfel J.B., Mahoney A.L., Khaleel A.L. 2010. "Modeling of electrochemistry and steam-methane reforming performance for simulating pressurized solid oxide fuel cell stacks." *Journal of Power Sources*.195 : 6637-6644.

[12] Saebea D., Patcharavorachot Y., Assabumrungrat S., Arpornwichanop A. 2013. "Analysis of a pressurized solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid power system with cathode gas recirculation." *International journal of hydrogen energy* : 1-12.

[13] Thanomjit C. 2011. "Performance Analysis of Solid Oxide Fuel Cell Integrated with Ethanol Reforming Process." M.Eng. Thesis of Chulalongkorn University.

[14] Choudhury A., Chandra H., Arora A. 2013. "Application of Solid Oxide Fuel Cell Technology for Power Generation." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.20 :430-442.

[15] Patcharavorachot Y., Arpornwichanop A., Chuachuensuk A. 2008. "Electrochemical Study of a Planar Solid Oxide Fuel Cell :Role of Support Structure." *Journal of Power Sources*.177 : 254-261.

[16] Zhao F., Virkar V.A. 2005. "Dependence of Polarization in Anode-Supported SolidOxide Fuel Cells on Various Cell Parameters." *Journal of Power Sources*.141 :79-95.

[17] Zhang W. 2006. "Simulation of Solid Oxide Fuel Cell-Based Power Generation Processes with CO₂ Capture." M.Eng. Thesis of University of Waterloo.

[18] อมรชัย อภรณ์วิชานพ. 2553. "เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า." *ช่างพูด*. 5(1) : 9-12.

[19] Hartley Wetwatana U. 2009. "Hydrogen-Production and Application". *The Journal of Industrial Technology*. 9(2) : 116 - 126.

[20] Cocco D., Tola V. 2006. "Comparative Performance Analysis of Internal and External Reforming of Methanol in SOFC-MGT Hybrid Power Plants." *Journal of engineering for gas turbine and power*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

- [21] Zhang W., Croiset E., Douglas P.L., Fowler M.W., Entchev E. 2005. "Simulation of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell Stack Using Aspen Plus Unit Operation Models." *Energy Conversion and Management*.46 : 181–196.
- [22] Doherty W., Reynolds A., Kennedy D. 2010. "Computer Simulation of a Biomass Gasification-Solid Oxide Fuel Cell Power System Using Aspen Plus." *Energy*.35 : 4545 – 4555.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 30

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บรรยากาศ)	อัตราการไหลเชิงโมลของสายผลิตภัณฑ์ (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	เศษส่วนโมล			
			ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	ไอน้ำ
600	200	0.184	0.389	0.240	85 ppm	0.044
	240	0.175	0.360	0.265	76 ppm	0.044
	280	0.167	0.335	0.287	68 ppm	0.044
800	200	0.315	0.626	0.040	220 ppm	0.044
	240	0.303	0.613	0.051	207 ppm	0.044
	280	0.292	0.600	0.062	196 ppm	0.044
1000	200	0.365	0.671	0.002	272 ppm	0.044
	240	0.364	0.670	0.003	261 ppm	0.044
	280	0.362	0.669	0.004	269 ppm	0.044

ตารางที่ ก.2 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 50

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บรรยากาศ)	อัตราการไหลเชิงโมลของสายผลิตภัณฑ์ (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	เศษส่วนโมล			
			ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	ไอน้ำ
600	200	0.219	0.480	0.163	189 ppm	0.044
	240	0.206	0.452	0.187	180 ppm	0.044
	280	0.196	0.426	0.210	172 ppm	0.044
800	200	0.350	0.659	0.012	149 ppm	0.044
	240	0.343	0.653	0.018	235 ppm	0.044
	280	0.335	0.646	0.023	233 ppm	0.044
1000	200	0.368	0.673	358 ppm	240 ppm	0.044
	240	0.367	0.673	542 ppm	240 ppm	0.044
	280	0.367	0.673	774 ppm	240 ppm	0.044

ตารางที่ ก.3 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 70

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บรรยากาศ)	อัตราการไหลเชิงโมลของสายผลิตภัณฑ์ (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	เศษส่วนโมล			
			ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	ไอน้ำ
600	200	0.248	0.537	0.115	64 ppm	0.044
	240	0.234	0.511	0.138	58 ppm	0.044
	280	0.221	0.486	0.159	52 ppm	0.044
800	200	0.361	0.668	0.004	110 ppm	0.044
	240	0.358	0.666	0.007	108 ppm	0.044
	280	0.354	0.662	0.010	107 ppm	0.044
1000	200	0.368	0.673	112 ppm	112 ppm	0.044
	240	0.368	0.673	171 ppm	112 ppm	0.044
	280	0.368	0.673	246 ppm	112 ppm	0.044

ตารางที่ ก.4 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 90

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บรรยากาศ)	อัตราการไหลเชิงโมลของสายผลิตภัณฑ์ (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	เศษส่วนโมล			
			ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	ไอน้ำ
600	200	0.273	0.575	0.083	57 ppm	0.044
	240	0.257	0.552	0.103	52 ppm	0.044
	280	0.243	0.529	0.123	48 ppm	0.045
800	200	0.365	0.671	0.002	86 ppm	0.044
	240	0.364	0.670	0.003	85 ppm	0.044
	280	0.362	0.668	0.004	85 ppm	0.044
1000	200	0.368	0.674	46 ppm	87 ppm	0.044
	240	0.368	0.673	70 ppm	87 ppm	0.044
	280	0.368	0.673	102 ppm	87 ppm	0.044

ตารางที่ ก.5 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนไอน้ำเหนือวิกฤตต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 110

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บรรยากาศ)	อัตราการไหลเชิงโมลของสายผลิตภัณฑ์ (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	เศษส่วนโมล			
			ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	ไอน้ำ
600	200	0.293	0.602	0.061	52 ppm	0.044
	240	0.277	0.581	0.078	48 ppm	0.044
	280	0.263	0.560	0.096	44 ppm	0.045
800	200	0.367	0.673	0.001	70 ppm	0.044
	240	0.366	0.672	0.001	70 ppm	0.044
	280	0.365	0.671	0.002	70 ppm	0.044
1000	200	0.368	0.674	22 ppm	71 ppm	0.044
	240	0.368	0.674	34 ppm	71 ppm	0.044
	280	0.368	0.674	49 ppm	71 ppm	0.044



ภาคผนวก ข

ผลการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าของระบบร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิง และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บรรยากาศ)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)	จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง
800	4	0.979	85.119 ~ 86	76.97%
	6	0.990	84.169 ~ 85	76.11%
	8	0.998	83.536 ~ 84	75.54%
900	4	1.040	80.142 ~ 81	72.47%
	6	1.052	79.210 ~ 80	71.63%
	8	1.060	78.591 ~ 79	71.07%
1,000	4	1.046	79.672 ~ 80	72.05%
	6	1.059	78.662 ~ 79	71.13%
	8	1.068	77.992 ~ 78	70.53%

หมายเหตุ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง เท่ากับ 60.14 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของระบบ เท่ากับ 68.41 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ข.2 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิง และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บรรยากาศ)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)	จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง
800	4	0.925	54.029 ~ 55	81.32%
	6	0.937	53.340 ~ 54	80.28%
	8	0.945	52.888 ~ 53	79.60%
900	4	1.030	48.553 ~ 49	73.08%
	6	1.041	48.046 ~ 49	72.31%
	8	1.052	47.532 ~ 48	71.54%
1,000	4	1.051	47.570 ~ 48	71.60%
	6	1.066	46.914 ~ 47	70.61%
	8	1.076	46.490 ~ 47	69.97%

หมายเหตุ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง เท่ากับ 60.14 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของระบบ เท่ากับ 68.41 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ข.3 ผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิง และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 7,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บรรยากาศ)	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)	จำนวนเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง
800	4	0.864	41.355 \approx 42	87.14%
	6	0.876	40.749 \approx 41	85.86%
	8	0.885	40.359 \approx 41	85.04%
900	4	1.003	35.606 \approx 36	75.03%
	6	1.017	35.105 \approx 36	73.97%
	8	1.027	34.783 \approx 35	73.29%
1,000	4	1.038	34.413 \approx 35	72.51%
	6	1.057	33.795 \approx 34	71.21%
	8	1.064	33.564 \approx 34	70.72%

หมายเหตุ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง เท่ากับ 60.14 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของระบบ เท่ากับ 68.41 เปอร์เซ็นต์