

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊สชีวภาพระหว่าง
การใช้รีฟอร์มมิงภายนอกและรีฟอร์มมิงภายใน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊สชีวภาพระหว่าง
การใช้รีฟอร์มมิงภายนอกและรีฟอร์มมิงภายใน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

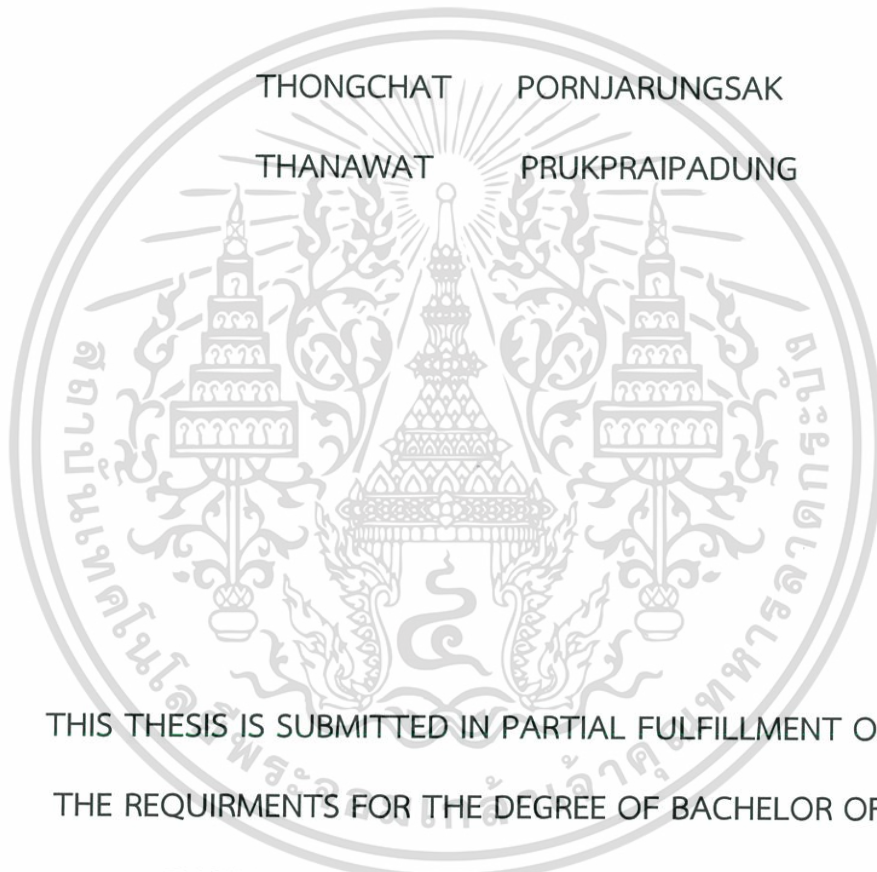
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOFC RUNNING ON STEAM REFORMING OF BIOGAS

: EXTERNAL AND INTERNAL REFORMING



THONGCHAT PORNJARUNGSAK

THANAWAT PRUKPRAIPADUNG

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIRMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF

ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADGRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊สชีวภาพระหว่าง
การใช้รีฟอร์มมิงภายนอกและรีฟอร์มมิงภายใน
โดย นายธงฉัตร พรจรุงศักดิ์
นายธนวัฒน์ พฤกษ์ไพรมดวง
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ญาณิพร พัชรวรโชติ
ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



(ดร.ญาณิพร พัชรวรโชติ)

ประธานกรรมการ

อนาทร นิกนัท

กรรมการ

(ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์)

กรรมการ

(ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊สชีวภาพระหว่างการใช้รีฟอร์มมิงภายนอกและรีฟอร์มมิงภายใน	
โดย	นายธงฉัตร	พรจรุงศักดิ์
	นายธนวัฒน์	พฤกษ์ไพรมดวง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ญาณิพร	พัชรวรโชติ
ปริญญาานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์นี้สนใจศึกษาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง โดยมีจุดประสงค์ในการเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอกกับการรีฟอร์มมิงภายใน ในโครงการนี้จะออกแบบกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus องค์ประกอบของแก๊สที่สภาวะสมดุลในเครื่องรีฟอร์มเมอร์และของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งถูกคำนวณโดยใช้วิธีการคำนวณโดยการหาพลังงานอิสระของกิบส์ที่ต่ำที่สุด ส่วนสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าจะสามารถคำนวณได้จากสมการไฟฟ้าเคมี ซึ่งประกอบไปด้วยการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย 3 ชนิด คือ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวล เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่นำเสนอ ผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการที่ได้จากการจำลองของเครื่องรีฟอร์มเมอร์และของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Zhao และ Virkar จากนั้นจะทำการจำลองกระบวนการการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอกกับการรีฟอร์มมิงภายใน สำหรับการรีฟอร์มมิงภายนอก จะศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (อุณหภูมิ ความดัน และอัตราการป้อนของไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้า) และสภาวะดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง ที่มีผลต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้า ส่วนการรีฟอร์มมิงภายใน จะศึกษาผลของสภาวะดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง ซึ่งประกอบด้วย อัตราการป้อนของไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้า อุณหภูมิและความดันของของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการพบว่าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายในนั้นให้สมรรถนะการผลิตไฟฟ้าทั้งค่าศักย์ไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพ สูงกว่ากรณีที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก โดยสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงแบบภายใน คือ อัตราส่วนสารป้อนเข้าระหว่างไอน้ำต่อมีเทน เท่ากับ 0.5 อุณหภูมิ 1,173 เคลวิน ความดัน 3 บรรยากาศ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งจะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.821 โวลต์ กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 226.60 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพเท่ากับ 96.81 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title SOFC running on steam reforming of biogas
: External and internal reforming
By Thongchat Pornjarungsak
Thanawat PrukpraiPadung
Advisor Dr.Yaneeporn Patcharavorachot
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 electrical performance of solid oxide fuel cell (SOFC) fuelled by biogas. The purpose of project is to compare the performance between external reforming SOFC and internal reforming SOFC. The SOFC process was designed by using software Aspen Plus. The equilibrium composition of gas in reformer and SOFC can be calculated based on the method of Gibbs free energy minimization. The performance of SOFC can be computed from the electrochemical equation that includes the calculation of cell voltage and three losses, i.e., activation, ohmic and concentration losses. In order to ensure reliability of proposed model, the simulation results obtained from reformer and SOFC were compared with the Zhao and virkar's experimental results. Then, the external reforming SOFC and internal reforming SOFC were simulated. In case of external reforming SOFC, the effect of changing operating conditions in both reformer (temperature, pressure and steam-to-methane feed ratio (S/C)) and SOFC (temperature, pressure and current density) was investigated in terms of hydrogen production and SOFC performance. For internal reforming SOFC, the influence of SOFC operating conditions, i.e., S/C, temperature, pressure and current density was examined. The simulation results indicate that internal reforming SOFC has higher performance (cell voltage, power and efficiency) than external reforming SOFC. The best operation conditions for internal reforming SOFC are S/C of 0.5, temperature of 1,173 K, pressure of 3 atm, and current density of 5,000 A/m². Under these operating conditions, it can provide cell voltage of 0.821 V, power of 226.60 kW and SOFC efficiency of 96.81%

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.ญาณิพร พัชรวรโชติ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำปรึกษา สั่งสอน เพิ่มพูนความรู้ และให้ข้อเสนอแนะในการแก้ไขปัญหาในระหว่างการทำวิจัยด้วยดี มาตลอดทั้งปีการศึกษานี้ รวมถึงชี้แนะ ปรับปรุง และแก้ไขในรายละเอียดหรือข้อบกพร่อง จนงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จ ลุล่วงมาได้

ขอขอบคุณ ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์ และดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ กรรมการตรวจสอบปริญญา นิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะในส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อทั้งงานวิจัยและตัวผู้วิจัยเอง และได้ให้คำชี้แนะ ในส่วนที่ขาดตกบกพร่องไปในมุมมองใหม่ๆทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อมรชัย อารมณ์วิชาณพ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ที่ปรแกรม Aspen PlusTM ที่ใช้ในงานวิจัยใน ครั้งนี้ด้วย

และสุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีพระคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ข้างต้น รวมถึงบิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ได้ให้กำลังใจในยามที่เหนื่อยล้า อีกทั้งสนับสนุนให้ได้มีการศึกษาและการทำวิจัยในครั้งนี้ ด้วยดีตลอดมา หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

รณจักร พชรจรงค์ศักดิ์

ธนวัฒน์ พฤกษ์ไพรมดวง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	VIII
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell).....	3
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง.....	5
2.2.1 คุณสมบัติเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง.....	5
2.2.2 การดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง.....	5
2.3 เชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการ.....	6
2.3.1 ไฮโดรเจน.....	6
2.3.2 แก๊สชีวภาพ.....	6
2.4 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ.....	7
2.5 การดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง.....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดของแข็งออกไซด์แบบรีฟอร์มมิงภายนอก	8
2.5.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแข็งออกไซด์แบบรีฟอร์มมิงภายใน.....	8
2.6 การหาสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิง	9
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแก๊สชีวภาพ	12
2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง	12
บทที่ 3 การออกแบบและวิธีดำเนินงาน	13
3.1 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก	13
3.1.1 สารตั้งต้น.....	13
3.1.2 เครื่องรีฟอร์มเมอร์	13
3.1.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง	14
3.2 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายใน	14
3.2.1 สารตั้งต้น.....	14
3.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายใน	15
3.3 วิธีการจำลองกระบวนการ	18
3.3.1 การจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิง ภายนอก.....	18
3.3.2 การจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายใน	18
3.3.3 วิธีการคำนวณสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus™	19
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการจำลองกระบวนการ	23
4.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองกระบวนการและผลการทดลอง	24
4.1.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองกระบวนการและการทดลองจริงของ แบบจำลองเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง	24
4.1.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองกระบวนการและการทดลองจริงของแบบจำลอง เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง	25
4.2 ผลการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก	27

4.2.1 ผลของสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์	27
4.2.2 ผลของสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง	30
4.3 ผลการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การ รีฟอร์มมิงภายใน ..	34
4.3.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้า	34
4.3.2 ผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ ของแข็ง	35
4.3.3 ผลของความดันและอุณหภูมิของระบบดำเนินการ	36
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก	43
ภาคผนวก ก ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกระบวนการกับการทดลองจริง	44
ภาคผนวก ข ผลการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้ รีฟอร์มมิงภายนอก	47
ภาคผนวก ค ผลการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้ รีฟอร์มมิงภายใน	53

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การทำงานภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง	5
รูปที่ 2.2 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแข็งออกไซด์แบบรีฟอร์มมิงภายนอก	8
รูปที่ 2.3 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแข็งออกไซด์แบบรีฟอร์มมิงภายใน	9
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (Cell voltage) และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density)	9
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอกด้วยโปรแกรม Aspen Plus	16
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายในด้วยโปรแกรม Aspen Plus	17
รูปที่ 3.3 แผนผังจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก	20
รูปที่ 3.4 แผนผังจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่มีการรีฟอร์มมิงภายใน	21
รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนเชิงโมลของสารต่างๆหลังผ่านเครื่องรีฟอร์มเมอร์ระหว่างผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการและการทดลองของ Philipp และ Christoph	25
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่างผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการและการทดลองของ Zhao และ Virkar	26
รูปที่ 4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อเศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจน	27
รูปที่ 4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าที่มีต่อเศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนและค่ากำลังไฟฟ้า	30
รูปที่ 4.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ	31
รูปที่ 4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง	34
รูปที่ 4.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ	35

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงความแตกต่างระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด	4
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเริ่มจำลองกระบวนการ	22
ตารางที่ 4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อเศษส่วนโมลของแก๊สต่างๆ ศักย์ไฟฟ้า และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง	29
ตารางที่ 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงแบบภายนอก	33
ตารางที่ 4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงแบบภายใน	37
ตารางที่ ก.1 ผลการเปรียบเทียบกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊สชีวภาพ ระหว่างการจำลองกระบวนการกับการทดลองจริง	45
ตารางที่ ก.2 ผลการเปรียบเทียบกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง ระหว่างการจำลองกระบวนการกับการทดลองจริง	46
ตารางที่ ข.1 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายนอก	48
ตารางที่ ข.2 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของรีฟอร์มเมอร์ ในแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายนอก	50
ตารางที่ ข.3 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนในแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายนอก	51
ตารางที่ ข.4 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายนอก	52
ตารางที่ ค.1 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายใน	54
ตารางที่ ค.2 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายใน	55
ตารางที่ ค.3 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนในแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายใน	56

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่ผิวที่ทำปฏิกิริยา	m^2
$D_{eff,anode}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ของขั้วแอโนด	A/m^2
$D_{eff,cathode}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ของขั้วแคโทด	A/m^2
E_{anode}	พลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของขั้วแอโนด	kJ/mol
$E_{cathode}$	พลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของขั้วแคโทด	kJ/mol
E	ศักย์ไฟฟ้าจริง	V
E^0	ศักย์ทฤษฎีที่สภาวะความดันมาตรฐาน	V
E^{ocv}	ศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี	V
F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์	C/mol
K_{anode}	ค่าคงที่ pre-exponential สำหรับไฟฟ้าเคมีของขั้วแอโนด	A/m^2
$K_{cathode}$	ค่าคงที่ pre-exponential สำหรับไฟฟ้าเคมีของขั้วแคโทด	A/m^2
i	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	A/m^2
$i_{0,electrolyte}$	ค่าความหนาแน่นของการแลกเปลี่ยนกระแสของขั้วไฟฟ้า	A/m^2
LHV_i	ค่าเอนทัลปีของการเผาไหม้ขั้นต่ำของ i	kJ/mol
\dot{n}	อัตราการไหลเชิงโมลของ i	mol/s
P	ความดัน	atm
P_i	ความดันย่อยของก๊าซ i	atm
$P_{i,TPB}$	ความดันย่อยของก๊าซ i ณ ขอบเขตสามเฟส	atm
Q_{heat}	พลังงานความร้อน	$Joule$
R	ค่าคงที่ของก๊าซ	$kJ/kmol \cdot K$
S/C	อัตราส่วนระหว่างไอน้ำและมีเทนของสายป้อนเข้า	
T	อุณหภูมิ	K
W_{elec}	งานที่ได้ทางไฟฟ้า	$Joule$

สัญลักษณ์กรีก	ความหมาย	หน่วย
η_{act}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	V
η_{conc}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากผลการถ่ายโอนมวล	V
η_{ohm}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า	V
η_{SOFC}	ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง	%
η_{sys}	ประสิทธิภาพของระบบ	%
τ_{anode}	ความหนาของขั้วแอโนด	μm
$\tau_{cathode}$	ความหนาของขั้วแคโทด	μm
$\tau_{electrolyte}$	ความหนาของอิเล็กโทรไลต์	μm
σ_{anode}	ค่าการนำไฟฟ้าของขั้วแอโนด	$1/\Omega m$
$\sigma_{cathode}$	ค่าการนำไฟฟ้าของขั้วแคโทด	$1/\Omega m$
$\sigma_{electrolyte}$	ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์	$1/\Omega m$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันพลังงานในโลกของเรามีการเปลี่ยนแปลงไป นโยบายการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทยเราก็เปลี่ยนไป ในปีพุทธศักราช 2557 ประเทศไทยมีเป้าหมายในการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกอยู่ที่ร้อยละ 25 ของการใช้พลังงานภายในประเทศ แต่ปัจจุบันมีการใช้พลังงานทดแทนอยู่เพียงร้อยละ 11 ของการใช้พลังงานทั้งหมดเท่านั้น ทำให้เราจะต้องนำพลังงานทดแทนมาใช้เพิ่มขึ้น [1]

พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นหนึ่งในรูปแบบการผลิตพลังงานที่น่าสนใจด้วยเหตุผลที่สามารถตอบรับกับนโยบายพลังงานทดแทนของประเทศไทยได้ดี เพราะพลังงานเซลล์เชื้อเพลิงนั้นนอกจากมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูง ยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยอีกด้วย เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนถือได้ว่าเป็นพลังงานสะอาดชนิดหนึ่ง เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะได้เพียงน้ำเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ สามารถให้พลังงานต่อหน่วยได้สูงที่สุด โดยปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้ไฮโดรเจนมาเป็นเชื้อเพลิงถึงประมาณปีละ 50 ล้านตัน [2]

เซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบันนั้นมีหลายชนิดขึ้นกับชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ โดยเซลล์เชื้อเพลิงที่สนใจศึกษานั้น คือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงในช่วง 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส จึงมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งยังสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด ไม่เพียงแต่ไฮโดรเจนแต่ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ เช่น มีเทน เอทานอล กลีเซอรอล และแก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงได้ ทำให้มีตัวเลือกในการเลือกใช้เชื้อเพลิงเพื่อลดต้นทุนหรือหาเชื้อเพลิงอื่นมาทดแทนการใช้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ซึ่งมีปัญหาด้านการขนส่ง การจัดเก็บ ความปลอดภัยและราคาได้

ในโครงการวิจัยนี้สนใจใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีวัสดุและเศษวัสดุทางการเกษตรเหลือเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถที่จะนำมาทำแก๊สชีวภาพได้อย่างดี ทำให้แก๊สชีวภาพภายในประเทศนั้นมีราคาต้นทุนที่ไม่สูงและสามารถนำมาผลิตเพื่อเป็นเชื้อเพลิงได้ง่าย

อย่างไรก็ตามก่อนนำแก๊สชีวภาพมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง แก๊สชีวภาพควรถูกเปลี่ยนรูป (Reform) ให้กลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนก่อน โดยรูปแบบการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงหรือการรีฟอร์มมิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง มีอยู่ 2 แบบใหญ่ แบบแรกคือการรีฟอร์มมิงภายนอก (External reforming) ซึ่งแก๊สชีวภาพจะถูกป้อนเข้าเครื่องรีฟอร์มเมอร์เพื่อให้ได้

แก๊สที่เต็มไปด้วยไฮโดรเจน แล้วจึงป้อนแก๊สดังกล่าวเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง ส่วนแบบที่สองคือการรีฟอร์มมิงภายใน (Internal reforming) ซึ่งแก๊สชีวภาพจะป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง และการรีฟอร์มมิงจะเกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง โดยรูปแบบการดำเนินงานทั้งสองแบบต่างมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงสนใจเปรียบเทียบรูปแบบการรีฟอร์มมิงที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งโดยใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบภายนอกและภายใน โดยใช้การจำลองกระบวนการในโปรแกรม Aspen Plus™

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ออกแบบและจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งทั้งแบบรีฟอร์มมิงภายนอกและแบบรีฟอร์มมิงภายในโดยใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊สชีวภาพในโปรแกรม Aspen Plus™
- 2) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสถานะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง เช่น อุณหภูมิ (1073-1273 เคลวิน) ความดัน (1-5 บรรยากาศ) และอัตราส่วนขาเข้าของเชื้อเพลิง (ช่วงอัตราส่วน 0.5-5) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า
- 3) เปรียบเทียบสถานะการดำเนินงานที่เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) สามารถออกแบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งทั้งกระบวนการรีฟอร์มมิงภายนอกและรีฟอร์มมิงภายในผ่านโปรแกรม Aspen Plus™
- 2) ทราบสถานะการดำเนินงานที่เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้า จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงที่ต่างกัน
- 3) สามารถนำผลการจำลองกระบวนการนี้ไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ในการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell)

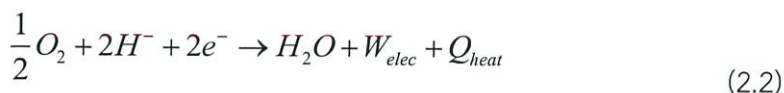
เซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกคิดค้นมานานเป็นเวลานานนับร้อยปี และแม้แต่องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ สหรัฐอเมริกา (The National Aeronautics and Space Administration, NASA) เองก็ได้มีการใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 ปัจจุบันมีเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ มากมาย แต่ก็ไม่สามารถมองข้ามเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งไปได้ด้วยที่มีคุณสมบัติที่ดีและมีประสิทธิภาพสูง ทั้งด้านวัสดุซึ่งส่วนใหญ่ใช้เป็นเซรามิกที่มีราคาไม่สูงมาก และประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าเครื่องจักรอื่นๆ จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งสามารถตอบโจทยการนำมาใช้งานได้ในปัจจุบันเป็นอย่างดี [3]

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเคมีที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เซลล์เชื้อเพลิงมีกระบวนการทำงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยังให้พลังงานสะอาดในประสิทธิภาพที่สูง นอกจากนี้ยังมีข้อดีในแง่อื่นๆ เช่น เสียงที่เบาในการทำงาน ความหลากหลายของสารป้อนเข้า วงจรทำงานที่ไม่มีหยุดจนกว่าจะหยุดป้อนสารเข้า สามารถขยายการทำงานโดยการเพิ่มจำนวนเซลล์ หรือแม้กระทั่งพกพาได้เนื่องจากไม่ได้มีขนาดใหญ่และโครงสร้างที่ซับซ้อน ทำให้มีความยืดหยุ่นมากกว่าอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ [4]

เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ ขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ขั้วแคโทด (ขั้วลบ) และอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งคั่นอยู่กลางระหว่างสองขั้วนี้ ในขั้วเชื้อเพลิงนั้นโมเลกุลของไฮโดรเจนที่ถูกส่งเข้ามาจากขาเข้าด้านขั้วแอโนดจะถูกออกซิไดซ์จนได้อิออนของไฮโดรเจน ดังสมการ



และต่อมาอิออนของไฮโดรเจนจะถูกส่ง ผ่านอิเล็กโทรไลต์มายังขั้วแคโทดเพื่อมาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจากสายเข้าของขั้วออกซิแดนซ์เกิดเป็นน้ำ และได้พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแบ่งได้เป็น 5 ชนิด ซึ่งก็คือ

- 1) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell, AFC)
- 2) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อเลือกผ่านแลกเปลี่ยนโปรตอน
(Proton Exchange Membrane Fuel Cell Membrane, PEMFC)
- 3) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric-Acid Fuel Cell, PAFC)
- 4) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)
- 5) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

จากข้อมูลของสถาบันสมิธโซเนียน (Smithsonian) ได้อธิบายเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงว่าแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันไป ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามชนิดของอิเล็กโทรไลต์และไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 [15,16]

ตารางที่ 2.1 แสดงความแตกต่างระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด

ชนิด ตัวแปร	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
อุณหภูมิ ปฏิบัติการ (เคลวิน)	353	353	473	923	1,173
วัสดุทำ อิเล็กโทรไลต์	KOH (aq)	Nafion	Conc. phosphoric acid	Carbonate salts of alkali metals	Ni
ชนิดไอออนที่ เคลื่อนที่	OH^-	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
กำลังไฟฟ้าที่ ผลิตได้ (kW)	10-100	0.1-500	<10,000	100,000	<100,000
ประเภทของ การใช้งาน	เคลื่อนที่	เคลื่อนที่	อยู่กับที่	อยู่กับที่	อยู่กับที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

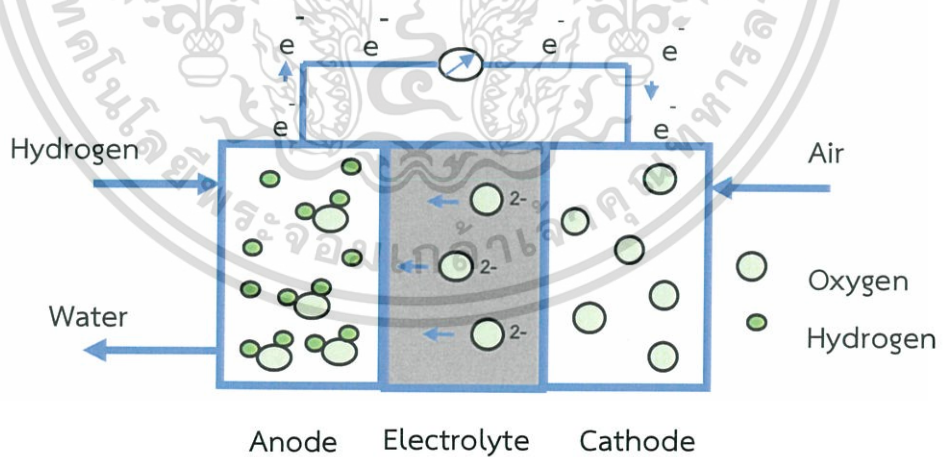
2.2.1 คุณสมบัติเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งจะปฏิบัติการในช่วงอุณหภูมิ 1,073 เคลวินขึ้นไป และเมื่อนำความร้อนที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ต่อ ก็จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบยิ่งมากขึ้น โดยข้อดีของการปฏิบัติการในอุณหภูมิสูง จึงทำให้สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิดเนื่องจากเชื้อเพลิงจะสามารถเปลี่ยนรูปได้ภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง การปฏิบัติการที่อุณหภูมิสูง ทำให้ปฏิกิริยาเคมีที่ใช้อิเล็กโทรดมีค่าสูง ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นโลหะที่มีราคาแพง [5]

สำหรับวัสดุที่ใช้ทำเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งนั้น อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) นิยมทำมาจาก เซอร์โคเนียไดออกไซด์ (ZrO_2) ส่วนชั้นแอโนด จะทำมาจากนิกเกิลผสมกับยิตเทรียสตาบิไลต์เซอโคเนีย (Yttria Stabilized Zirconia) และส่วนของขั้วแคโทด มักจะใช้แลนทานัมสตรอนเทียมแมงกานิท (Lanthanum Strontium Manganite)

2.2.2 การดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งนั้นจะมีลักษณะองค์ประกอบและการทำงานดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทำงานภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งนั้นก็จะประกอบด้วยขั้วแอโนด ขั้วแคโทด และอิเล็กโทรไลต์ โดยป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปเข้าไปทางขั้วแอโนดและป้อนอากาศเข้าไปทางขั้วแคโทด ที่ขั้วแคโทด แก๊สออกซิเจนเกิดการแตกตัวเป็นออกซิเจนไอออน ดังสมการ



โดยออกซิเจนไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด และที่ขั้วแอโนด เมื่อแก๊สไฮโดรเจนเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไอออนจะได้อิเล็กตรอนและน้ำออกมา ดังสมการ



อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้นซึ่งการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะเป็นเช่นนี้จนกว่าหยุดป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ

2.3 เชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการ

2.3.1 ไฮโดรเจน

เป็นแก๊สที่ไร้สี ไร้กลิ่น รวมตัวกันด้วยโมเลกุลไฮโดรเจนสองโมเลกุล แก๊สไฮโดรเจนนั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมแก่การนำมาเป็นเชื้อเพลิงมาก เช่น เป็นหนึ่งในแก๊สที่สามารถติดไฟได้ดีมากที่สุด มีความรุนแรงในการทำปฏิกิริยาสูง จึงเป็นเหตุผลให้แก๊สไฮโดรเจนถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงของจรวดหรือเป็นสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นต้น แก๊สไฮโดรเจนยังสามารถให้พลังงานต่อหน่วยได้สูงที่สุดอีกด้วย โดยไฮโดรเจนบริสุทธิ์นั้นมีข้อเสียในการขนส่งและจัดเก็บที่ลำบาก และอันตรายรวมไปถึงยังมีราคาสูง [7]

2.3.2 แก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพถูกพิจารณาให้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่อีกหนึ่งทางด้วยเหตุผลที่เป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติ และข้อดีต่างๆ เช่น สามารถให้พลังงาน ลดการปลดปล่อยสารประกอบประเภทคาร์บอนที่ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก และช่วยลดปริมาณขยะที่ต้องถูกกำจัดได้

แก๊สชีวภาพเป็นแก๊สผสมที่เกิดจากกระบวนการหมักของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยส่วนใหญ่สามารถใช้เศษวัสดุทางการเกษตรนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการหมัก หรือได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย จุลินทรีย์จะย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตและไขมัน ให้กลายเป็นแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ จากกระบวนการเผาผลาญอาหาร ซึ่งแก๊สเหล่านี้สามารถถูกกักเก็บไว้ในรูปแบบพลังงานสำรอง

แก๊สชีวภาพนั้นประกอบด้วยมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลักโดยแก๊สชีวภาพที่ได้มาจากต่างรูปแบบก็จะมีอัตราส่วนที่ต่างกัน เช่น จากการเกษตรจะมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของมีเทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 45:55 แต่ถ้ามาจากการย่อยเศษอาหารจะมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของมีเทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 35:65 เป็นต้น โดยสัดส่วนที่แตกต่างกันก็จะทำให้ได้ปริมาณไฟฟ้าที่แตกต่างกันไปตามจำนวนของมีเทน [6]

2.4 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam Reforming)

กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการรีฟอร์มมิงชนิดหนึ่งที่ใช้ไอน้ำร่วม ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะเป็นกระบวนการที่สามารถเปลี่ยนสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงของเราให้กลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนก่อนที่จะนำไปเข้าเซลล์เชื้อเพลิง โดยการรีฟอร์มมิงนั้นสามารถเปลี่ยนสารตั้งต้นได้หลายชนิดไม่ว่าจะเป็นมีเทน อีเทน เอทานอล และไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้กลายเป็นแก๊สไฮโดรเจน โดยหลักการของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลภายใต้อุณหภูมิสูง โดยสารตั้งต้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้อุณหภูมิที่ช่วง 1,023 ถึง 1,723 เคลวิน และมีนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาของกระบวนการรีฟอร์มมิงแสดงดังสมการ



จากสมการจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเพียงพอและภายในตัวเครื่องปฏิกรณ์ยังมีไอน้ำเหลือ ปฏิกิริยาจึงสามารถเกิดต่อไปได้ โดยคาร์บอนมอนอกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับไอน้ำ โดยเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (Water-gas shift reaction) ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และยังได้ไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นมาอีกส่วนหนึ่ง

ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ แสดงดังสมการนี้



จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรีฟอร์มมิงพบว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำนี้จะได้ผลผลิตไฮโดรเจนที่มากที่สุด เพราะมีการเกิดไฮโดรเจนทั้งจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟซึ่งจะเกิดต่อเนื่องกัน [8]

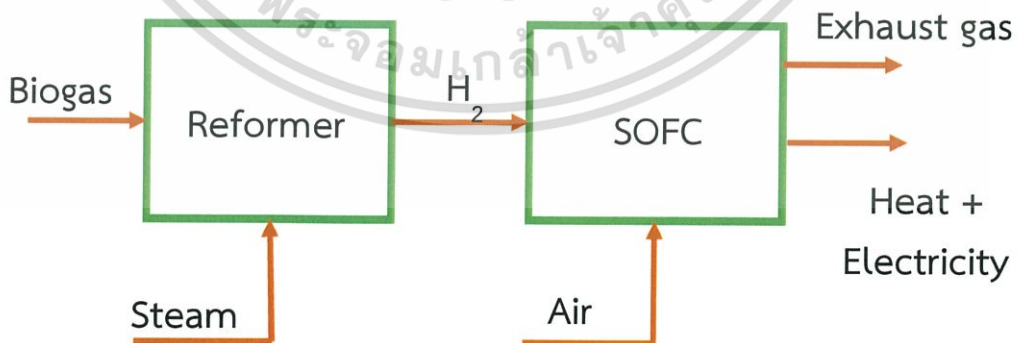
2.5 การดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

2.5.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดของแข็งออกไซด์แบบรีฟอร์มมิงภายนอก

การดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดของแข็งออกไซด์แบบที่ร่วมกับการรีฟอร์มมิงภายนอก แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าเครื่องรีฟอร์มมิงพร้อมกับไอน้ำเกิดปฏิกิริยา รีฟอร์มมิงและปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สที่เต็มไปด้วยแก๊สไฮโดรเจน และแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกป้อนเข้าไปยังเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งทางขั้วแอโนดพร้อมกับอากาศ ทางด้านขั้วแคโทดและจะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้เป็นพลังงานไฟฟ้าออกมา นอกจากนี้ยังได้น้ำและ พลังงานความร้อนเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ข้อดีของการรีฟอร์มมิงภายนอกคือ สามารถกำจัด สิ่งเจือปนก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงได้ นอกจากนี้ยังสามารถปรับอุณหภูมิได้หลายจุดทำให้ปรับค่าได้ หลากหลายขึ้น [9]

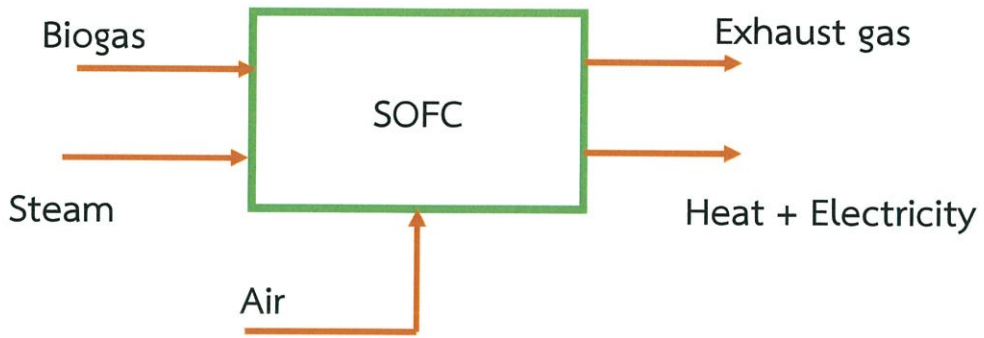
2.5.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแข็งออกไซด์แบบรีฟอร์มมิงภายใน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแข็งออกไซด์ที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.3 โดย เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแข็งออกไซด์แบบรีฟอร์มมิงภายใน เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิง ทางด้านขั้วแอโนดโดยตรงแล้วจะเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้เป็นแก๊สไฮโดรเจน แล้วแก๊สไฮโดรเจนจะถูกนำไปเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับอากาศทางด้านขั้วแคโทดอย่างต่อเนื่อง โดยการรีฟอร์มมิงแบบภายในจะมีข้อดีเหนือกว่าการรีฟอร์มมิงแบบภายนอกในด้านประสิทธิภาพการ เปลี่ยนเชื้อเพลิง เนื่องจากการรีฟอร์มมิงแบบภายในเป็นการเปลี่ยนแปลงจากเชื้อเพลิงไปเป็น พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนเดียวจึงมีประสิทธิภาพดีกว่าการรีฟอร์มมิงแบบภายนอก นอกจากนี้การรวม หน่วยรีฟอร์มเมอร์และเซลล์เชื้อเพลิงไว้ในหน่วยปฏิบัติการเดียวกันยังเป็นการลดความซับซ้อนของระบบ ทำให้ระบบปฏิบัติการง่ายขึ้นและลดค่าใช้จ่ายอีกด้วย [10]



รูปที่ 2.2 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแข็งออกไซด์แบบรีฟอร์มมิงภายนอก

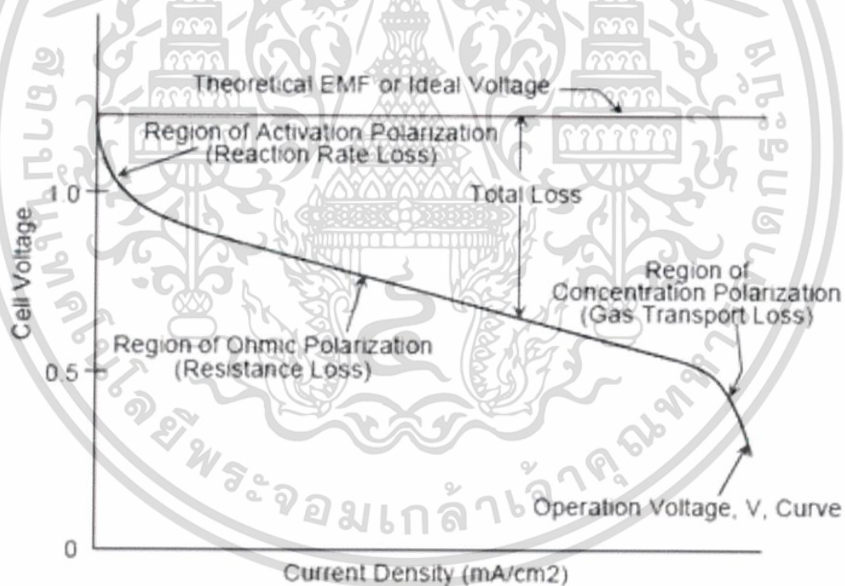
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแข็งออกไซด์แบบรีฟอร์มมิงภายใน

2.6 การหาสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิง

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะแสดงได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (Cell voltage) และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Reversible cell voltage หรือ Theoretical open-circuit potential, E^{OCV}) โดยเกิดจากอิเล็กตรอนหรือประจุไฟฟ้าไหลวนรอบวงจรไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลมาจากความต่างศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วต่างๆ โดยเราสามารถหาศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีสามารถได้จากสมการของเนิร์นสต์ (Nernst equation) ดังนี้

$$E^{\text{OCV}} = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{0.5}} \right) \quad (2.7)$$

โดย E^0 คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งจะมีค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิที่สภาวะทำงาน ดังสมการต่อไปนี้

$$E^0 = 1.253 - 2.4516 \times 10^{-4} T(K) \quad (2.8)$$

ในความเป็นจริงแล้ว ศักย์ไฟฟ้าจริงของเซลล์เชื้อเพลิง (Actual fuel cell voltage, E) จะ มีค่าน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีเสมอ เนื่องมาจากค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมี 3 ชนิด คือ

- 1) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Activation overpotential: η_{act})

เป็นค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีซึ่งต้องใช้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าพลังงานกระตุ้นที่มีจึงทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นซึ่งหาได้จากสมการ

$$\eta_{\text{act,electrode}} = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{i}{2i_{0,\text{electrode}}} + \sqrt{\left(\frac{i}{2i_{0,\text{electrode}}} \right)^2 + 1} \right) \quad (2.9)$$

และ
$$i_{0,\text{electrode}} = \frac{RT}{2F} k_{\text{electrode}} \exp\left(-\frac{E_{\text{electrode}}}{RT}\right) \quad (2.10)$$

- โดยค่า i คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m^2)
 $i_{0,\text{electrode}}$ คือ ค่าความหนาแน่นของการแลกเปลี่ยนกระแสของขั้วไฟฟ้า (A/m^2)
 α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท
 n คือ จำนวนอิเล็กตรอน
 R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($\text{kJ}/\text{kmol}\cdot\text{K}$)
 F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (C/mol)
 $k_{\text{electrode}}$ คือ ค่าคงที่ pre-exponential สำหรับไฟฟ้าเคมีของขั้วไฟฟ้า (A/m^2)
 $E_{\text{electrode}}$ คือ พลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของขั้วไฟฟ้า (kJ/mol)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic overpotential: η_{ohm})
เป็นการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้า และการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานขึ้น โดยหาได้จากสมการ

$$\eta_{ohm} = iR_{ohm} \quad (2.11)$$

โดยค่า R_{ohm} คือ ความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งหาได้จากสมการ

$$R_{ohm} = \frac{\tau_{anode}}{\sigma_{anode}} + \frac{\tau_{electrolyte}}{\sigma_{electrolyte}} + \frac{\tau_{cathode}}{\sigma_{cathode}} \quad (2.12)$$

โดยค่า τ_{anode} คือ ความหนาของขั้วแอโนด (μm)

$\tau_{electrolyte}$ คือ ความหนาของอิเล็กโทรไลต์ (μm)

$\tau_{cathode}$ คือ ความหนาของขั้วแคโทด (μm)

σ_{anode} คือ ค่าการนำไฟฟ้าของขั้วแอโนด ($1/\Omega m$)

$\sigma_{electrolyte}$ คือ ค่าการนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์ ($1/\Omega m$)

$\sigma_{cathode}$ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของขั้วแคโทด ($1/\Omega m$)

- 3) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวล (Concentration overpotential: η_{conc})
เป็นการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากการที่มีความต้านทานมวลสารเกิดขึ้นในจุดที่มีการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทำให้ความเข้มข้นของสารลดลง ซึ่งได้จากสมการ

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{p_{H_2O,TPB}}{p_{H_2O}} \frac{p_{H_2}}{p_{H_2,TPB}}\right) + \frac{RT}{4F} \ln\left(\frac{p_{O_2}}{p_{O_2,TPB}}\right) \quad (2.13)$$

โดย $p_{i,TPB}$ คือ ความดันย่อยของก๊าซ i ณ ขอบเขตสามเฟส

$$\text{ซึ่ง } p_{H_2O,TPB} = p_{H_2O} + \frac{RT\tau_{anode}}{2FD_{eff,anode}} i \quad (2.14)$$

$$p_{H_2,TPB} = p_{H_2} - \frac{RT\tau_{anode}}{2FD_{eff,anode}} i \quad (2.15)$$

$$p_{O_2,TPB} = P - (P - p_{O_2}) \exp\left(+\frac{RT\tau_{cathode}}{4FD_{eff,cathode}} i\right) \quad (2.16)$$

ดังนั้นเราสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าจริง ที่เกิดการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ ได้ดังสมการ

$$E = E^{OCV} - (\eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conc}) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแก๊สชีวภาพ

Smiadak, D.M. (2008) [9] ศึกษาความแตกต่างทางทฤษฎีของการรีฟอร์มมิงภายใน การรีฟอร์มมิงภายนอก และอิเล็กโทรออกซิเดชันโดยตรง โดยจากการศึกษาพบว่า การรีฟอร์มมิง ภายในนั้นจะมีขั้นตอนที่น้อยกว่าทำให้ปฏิบัติการได้ง่ายกว่า และยังมีประสิทธิภาพมาก ส่วนการ รีฟอร์มมิงภายนอกนั้นจะมีข้อดีที่สามารถกำจัดสิ่งเจือปนออกก่อนเข้าตัวเซลล์เชื้อเพลิงและสามารถ ปรับค่าได้จากหลายตำแหน่งได้ และสุดท้ายคือ อิเล็กโทรออกซิเดชันโดยตรง มีข้อดีในการที่เราจะ ข้ามขั้นต้นของรีฟอร์มเมอร์ได้ นอกจากนี้ยังไม่ต้องการอุปกรณ์เสริมและเรียบง่ายอีกด้วย

Roy, P.S. และคณะ (2014) [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรที่ส่งผลในการปฏิบัติการของ กระบวนการรีฟอร์มมิง โดยตัวแปรที่เลือกศึกษาคืออัตราส่วนของอากาศกับสารขาเข้า กับ อุณหภูมิ ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของอากาศกับสารขาเข้า เมื่อเพิ่มปริมาณของอากาศจะทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงของมีเทนมากขึ้น แต่อยู่ในระดับที่เล็กน้อยเท่านั้น แตกต่างกับตัวแปรอีกตัวคืออุณหภูมิที่ ส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของมีเทนอย่างชัดเจน และสำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 973 เคลวิน เนื่องจากอุณหภูมินี้มีช่วงการเพิ่มประสิทธิภาพมากที่สุดจากการทดลอง

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

Patcharavorachot, Y. และคณะ (2007) [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างและลักษณะของ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง โดยศึกษาผลของความหนาขององค์ประกอบเซลล์เชื้อเพลิงและ สภาวะการดำเนินงาน ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และ องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ ที่มีผลต่อ สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง โดยจากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า โครงสร้างเซลล์ เชื้อเพลิงที่ดีที่สุด โครงสร้างที่ใช้ขั้วแอโนดเป็นโครงสร้างรองรับ (anode-supported) กล่าวคือสร้าง ให้ขั้วแอโนดมีความหนามากที่สุด ส่วนอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีที่สุด คือ 1,273 เคลวิน และความดันที่ 3 บรรยากาศ เนื่องจากให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ดีที่สุด

Doherty, W. และคณะ (2010) [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด ออกไซด์ของแข็งผ่านโปรแกรม Aspen Plus โดยมีเป้าหมายในการเปรียบเทียบแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับ งานทดลองจริง โดยในการจำลองกระบวนการนั้นได้เลือกใช้แบบจำลองต่างๆมาจำลองเป็น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง เนื่องจากในโปรแกรม Aspen Plus นั้น ไม่ได้มีแบบจำลองของเซลล์ เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งแบบสำเร็จรูป จึงจำเป็นที่จะต้องใช้โมเดลที่มีในโปรแกรมหลายๆชนิดมา รวมเพื่อทดแทนและรวมเป็นกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง โดยสำหรับขั้วแอโนด จะเลือกใช้แบบจำลอง RGibbs ส่วนขั้วแคโทดจะเลือกใช้แบบจำลองชนิด Sep นอกจากนี้ยังมีการใช้ แบบจำลอง เช่น แบบจำลอง Heater แบบจำลอง Compressor และแบบจำลองอื่นๆ ในการช่วย เตรียมสารก่อนเข้ากระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง นั้นมีความใกล้เคียงกับงานทดลองจริงที่ตัวผู้ทดลองได้นำมาเปรียบเทียบ ซึ่งได้เปรียบเทียบปัจจัยดังนี้ ศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นไฟฟ้า อุณหภูมิ ความดัน และส่วนประกอบของแก๊สขาเข้าและออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและวิธีดำเนินงาน

โครงการนี้สนใจเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าระหว่างการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง 2 ระบบ คือ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก และการรีฟอร์มมิงภายใน โดยอาศัยการสร้างแบบจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus™ เพื่อศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนสภาวะการดำเนินงานที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง โดยหัวข้อที่ 3.1 แสดงรายละเอียดแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก หัวข้อที่ 3.2 แสดงรายละเอียดแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายใน ส่วนวิธีการจำลองกระบวนการจะแสดงในหัวข้อที่ 3.3

3.1 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก

กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งหน่วยปฏิบัติการหลัก คือ เครื่องรีฟอร์มเมอร์และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

3.1.1 สารตั้งต้น

สารตั้งต้นเป็นแก๊สชีวภาพ ประกอบด้วยแก๊สมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ จะถูกป้อนเข้าไปยังเครื่องให้ความร้อน (HEATER1) เพื่อทำการปรับอุณหภูมิให้มีสภาวะที่ต้องการ ส่วนสายของไอน้ำที่ป้อนเข้าไป จะถูกนำไปยังเครื่องให้ความร้อน (HEATER2) เพื่อปรับอุณหภูมิให้มีอุณหภูมิเดียวกับเชื้อเพลิง จากนั้นทั้งสองสายจะถูกปรับความดันด้วยเครื่องคอมเพรสเซอร์ (COMP) ก่อนป้อนเข้าไปทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิงที่เครื่องรีฟอร์มเมอร์

3.1.2 เครื่องรีฟอร์มเมอร์

ในเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (REFORMER) แก๊สชีวภาพจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำ ซึ่งในการจำลองกระบวนการจะใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RGibbs โดยปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นมีดังนี้

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming reaction)



ปฏิกิริยาอวเทอร์แก๊สชิฟ (Water-gas shift reaction)



แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องรีฟอร์มเมอร์คือแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) ซึ่งประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจนเป็นหลักผสมกับน้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์

3.1.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (SYNGAS) จะถูกปรับอุณหภูมิให้เหมาะสมในเครื่องให้ความร้อนตัวที่สอง (HEATER3) ก่อนนำเข้ามาป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ในการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงไม่สามารถจำลองการถ่ายโอนไอออนโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ได้ ดังนั้นจึงแทนการเกิดปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ ด้วยปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง ดังสมการที่ (3.2) โดยที่ขั้วแอโนดใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบ RGibbs (PREANODE) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและอวเทอร์แก๊สชิฟซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้จริงภายในขั้วแอโนด ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบ RGibbs (ANODE) แก๊สสังเคราะห์จะป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงทางด้านขั้วแอโนด (ANODE) โดยที่ขั้วแอโนดใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบ RGibbs เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้



ส่วนอากาศ (AIR) จะถูกปรับอุณหภูมิในเครื่องให้ความร้อน (HEATER4) และปรับความดันในเครื่องคอมเพรสเซอร์ (COMP3) ก่อนป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ขั้วแคโทด (CATHODE) ที่ขั้วแคโทดจะใช้แบบจำลองเครื่องแยก (Sep) เพื่อเป็นการแยกแก๊สออกซิเจนออกจากอากาศ เพื่อมาทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนในขั้วแอโนด

3.2 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายใน

กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายใน โดยหน่วยปฏิบัติการหลักมีเพียงหน่วยเดียว คือ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง มีรูปแบบดังรูปที่ 3.2

3.2.1 สารตั้งต้น

สารตั้งต้นที่ประกอบด้วยแก๊สชีวภาพ (FEED) ซึ่งมีแก๊สมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นอัตราส่วนมาตรฐานของแก๊สชีวภาพ และน้ำ (WATER) จะถูกป้อนเข้าไปยังเครื่องให้ความร้อน (HEATER) และเครื่องคอมเพรสเซอร์ (COMP) เพื่อทำการปรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิและปรับความดันให้มีสภาวะตามที่ต้องการก่อนเข้าไปทำปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

3.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายใน

ขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (ANODE) ถูกจำลองโดยใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ RGibbs เมื่อสารตั้งต้นและน้ำถูกป้อนเข้าทางด้านขั้วแอโนด จะเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงกับไอน้ำก่อน ดังสมการ



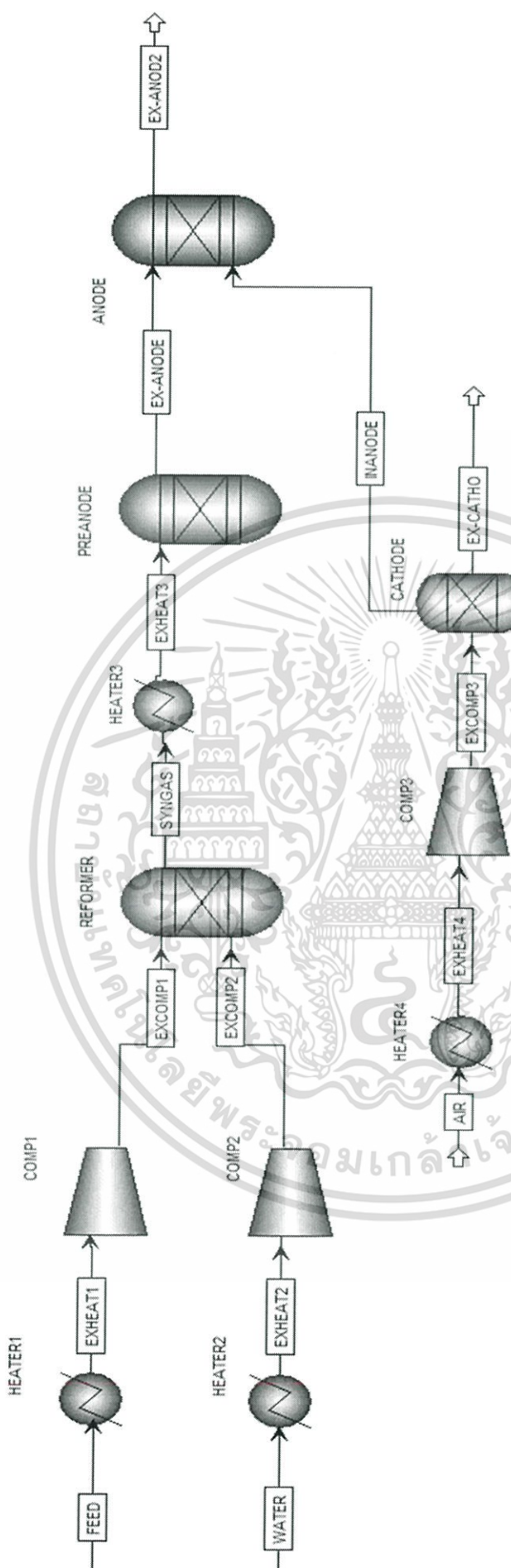
เมื่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และน้ำถูกผลิตขึ้น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำที่เหลือผ่านปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ ดังสมการ



จากนั้นแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนที่มาจากขั้วแอโนดผ่านปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ดังสมการ

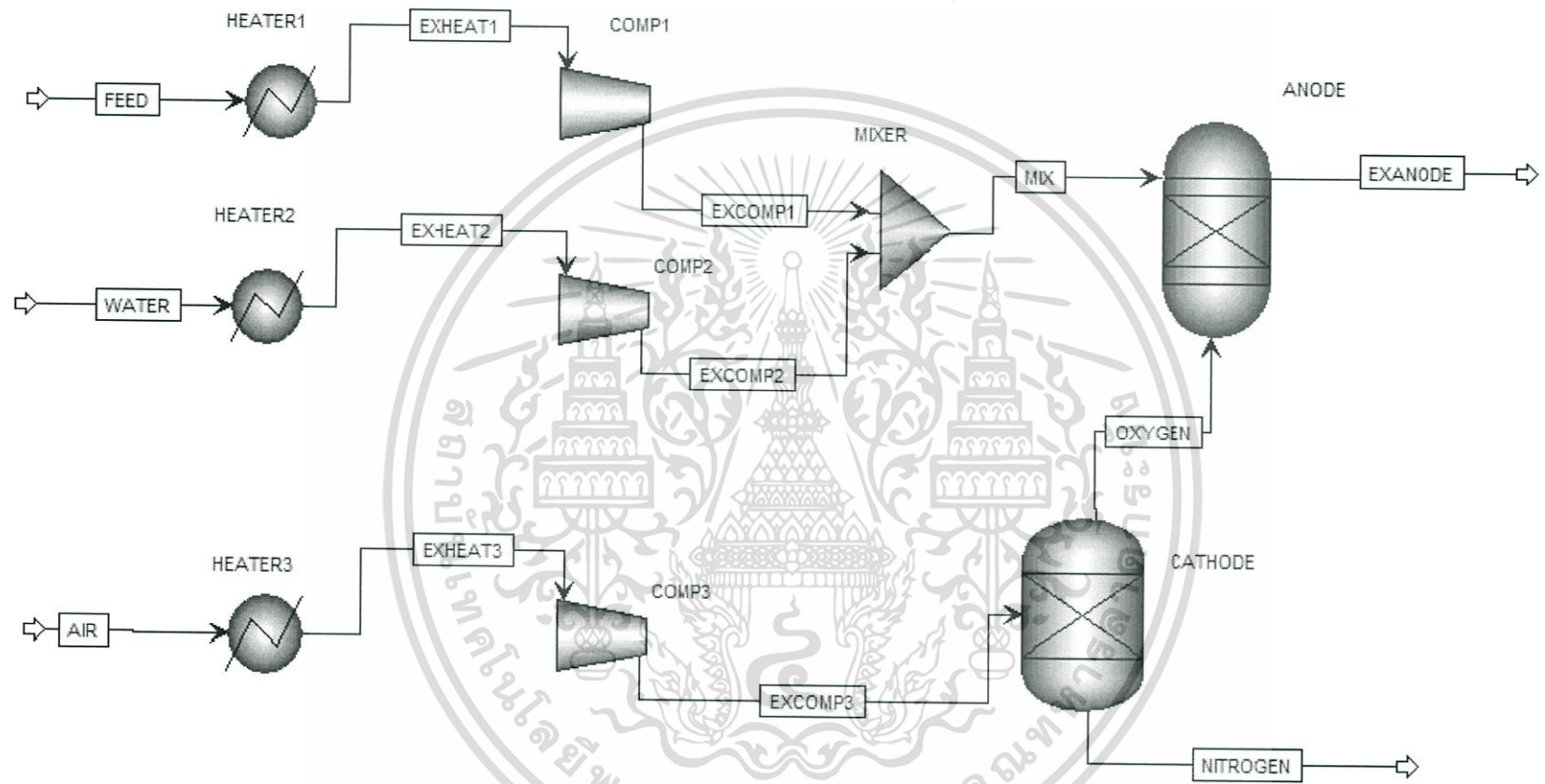


ส่วนอากาศ (AIR) จะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องให้ความร้อน (HEATER3) และเครื่องคอมเพรสเซอร์ (COMP3) เพื่อทำการปรับอุณหภูมิและความดันก่อนป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงทางด้านขั้วแคโทด (CATHODE) ที่ขั้วแคโทดจะใช้แบบจำลองเครื่องแยก Sep เพื่อแก๊สออกซิเจนออกจากอากาศ



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอกด้วยโปรแกรม Aspen PlusTM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายในด้วยโปรแกรม Aspen Plus™

3.3 วิธีการจำลองกระบวนการ

โครงการนี้เป็นการศึกษาจำลองกระบวนการเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอกและรีฟอร์มมิงภายใน โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus™ โครงการนี้จะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยใช้สมการสถานะของ Soave-Redliche-Kwong การคำนวณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่สถานะสมดุลทั้งในส่วนเครื่องรีฟอร์มเมอร์และที่ขั้วแอโนดภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง จะใช้การคำนวณด้วยวิธีการหาค่าพลังงานของกิบส์ที่ต่ำที่สุด (Minimization of Gibbs free energy)

3.3.1 การจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก

การจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอกแสดงขั้นตอนรูปที่ 3.3 โดยการคำนวณเริ่มจากการกำหนดสถานะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (ได้แก่ อุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนที่ป้อนเข้าเครื่องรีฟอร์มเมอร์) ซึ่งจากการจำลองกระบวนการโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus™ จะได้เศษส่วนโมลและอัตราการไหลเชิงโมลแก๊สผลิตภัณฑ์ที่สถานะสมดุล โดยแก๊สผลิตภัณฑ์ประกอบไปด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยเศษส่วนโมลของมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน กลายเป็นพารามิเตอร์ขาเข้าสำหรับการคำนวณสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง เมื่อกำหนดสถานะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (ได้แก่ อุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า) กำหนดชนิดวัสดุและขนาดของเซลล์เชื้อเพลิง รวมถึงคุณสมบัติต่างๆของวัสดุที่ใช้ เช่น ค่าการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า ค่าการนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์ ค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนของขั้วไฟฟ้า เป็นต้น โดยค่าสถานะดังกล่าวจะแสดงในตารางที่ 3.1 จะสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง โดยรายละเอียดการคำนวณจะแสดงในหัวข้อที่ 3.3.3

3.3.2 การจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายใน

ขั้นตอนของการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายในจะแสดงดังรูป 3.4 ซึ่งจะมีส่วนคล้ายกันกับการรีฟอร์มมิงภายนอก โดยมีความแตกต่างกันในการกำหนดสถานะการดำเนินงาน สำหรับการรีฟอร์มมิงภายในจะกำหนดสถานะการดำเนินงานเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง ได้แก่ อุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนที่ป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิง และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า แล้วจึงมีการคำนวณอื่นๆเช่นเดียวกับในกรณีของการรีฟอร์มมิงภายนอก

3.3.3 วิธีการคำนวณสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus™

การเขียนสมการหาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (สมการในหัวข้อที่ 2.6) รวมถึงการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและโครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง เช่น ความหนาของขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซที่ขั้วไฟฟ้า พื้นที่เกิดปฏิกิริยา (Active area) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า จะเขียนในรูปแบบภาษา FORTRAN ภายใน Calculator block ซึ่งเป็นฟังก์ชันหนึ่งในโปรแกรม Aspen Plus จากการจำลองกระบวนการเมื่อกำหนดสถานะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (อุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า) และทราบเศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจน น้ำ และแก๊สออกซิเจน จะสามารถคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีจากสมการที่ (2.7) ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียทั้ง 3 ชนิด จากสมการที่ (2.9) ถึง (2.16) และค่าศักย์ไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเซลล์เชื้อเพลิงตั้งสมการที่ (2.17) ได้ และจากค่าศักย์ไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเซลล์เชื้อเพลิง จะทำให้สามารถคำนวณหาแฟกเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาสมรรถนะของกระบวนการ ได้แก่ กำลังไฟฟ้า ($Power$, $Power$) และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (SOFC electrical efficiency, η_{SOFC})

สมการคำนวณหากำลังไฟฟ้า

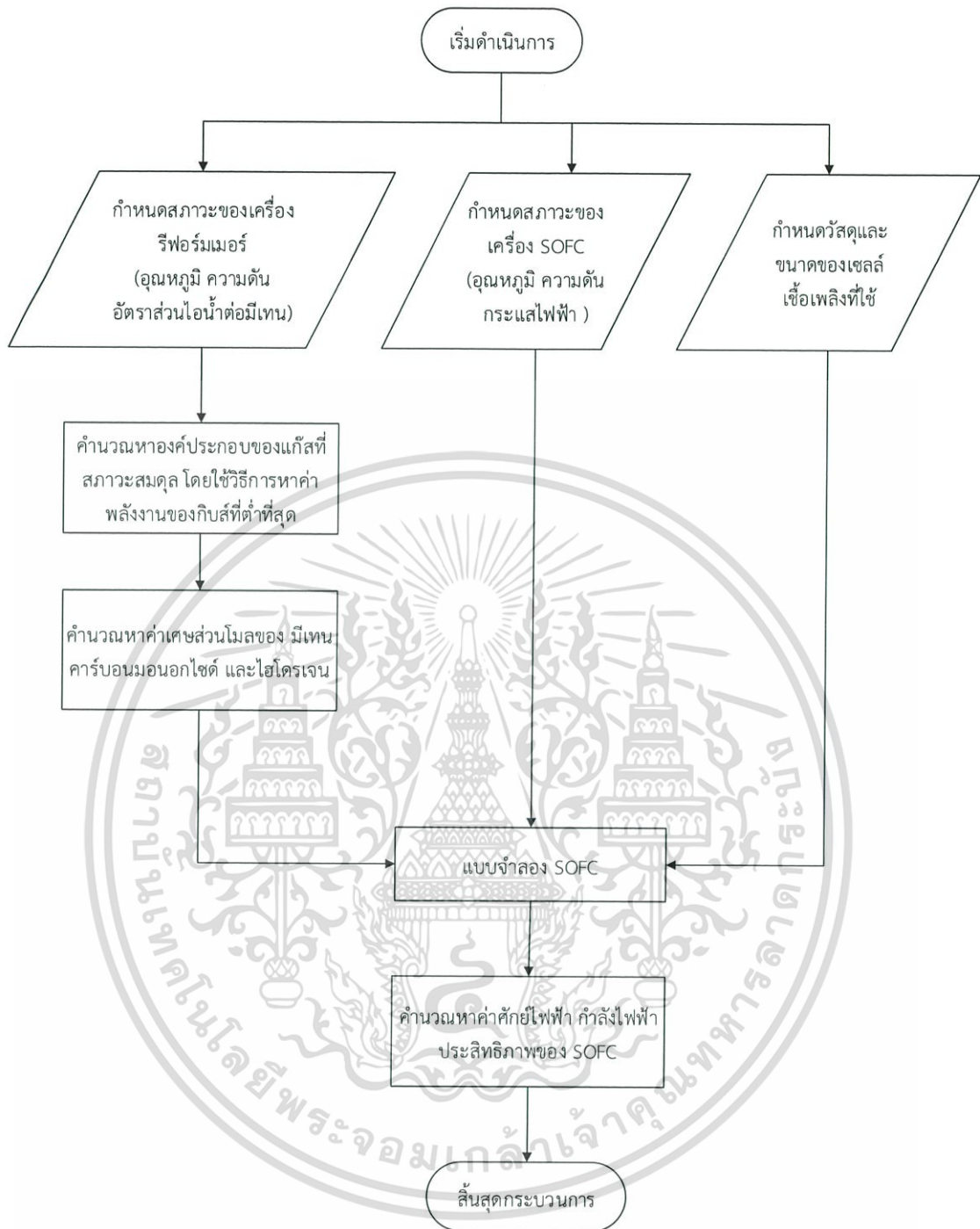
$$Power = iAV \quad (3.3)$$

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของระบบในการผลิตไฟฟ้า แสดงถึงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ที่สามารถเปลี่ยนองค์ประกอบต่างๆของสารที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง แล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยจะพิจารณาเป็นสัดส่วนของพลังงานที่ผลิตได้ต่อพลังงานขาเข้า ได้จากสมการดังนี้

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

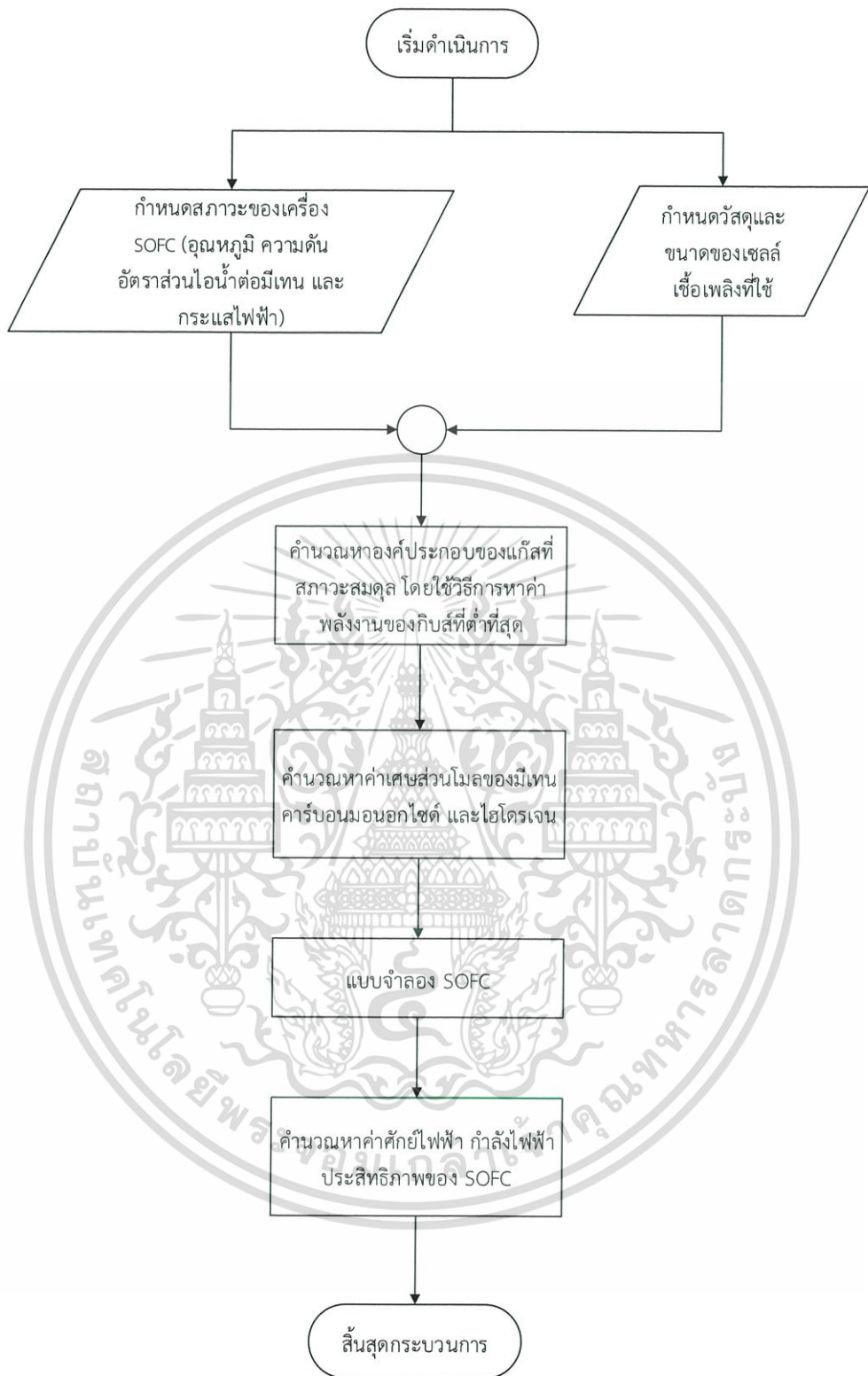
$$\eta_{SOFC} = \frac{Power}{\dot{n}_{CH_4,in} LHV_{CH_4} + \dot{n}_{CO,in} LHV_{CO} + \dot{n}_{H_2,in} LHV_{H_2}} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\eta_{SOFC-Internal} = \frac{Power}{\dot{n}_{CH_4,in} LHV_{CH_4}} \times 100 \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.3 แผนผังจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แผนผังจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่มีการรีฟอร์มมิงภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเริ่มจำลองกระบวนการ [19,20]

Parameters	Value
Reformer	
Temperature (T_{ref} , K)	973
Pressure (P_{ref} , atm)	1
S/C	0.5
SOFC	
Temperature (T_{SOFC} , K)	1,073
Pressure (P_{SOFC} , atm)	1
Current density (i , A/m ²)	5,000
Active area (A , m ²)	55.2
Faraday's constant (F , C/mol)	9.65×10^4
Anode thickness (τ_{anode} , μm)	500
Cathode thickness ($\tau_{cathode}$, μm)	40
Electrolyte thickness ($\tau_{electrolyte}$, μm)	40
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 ionic conductivity ($\sigma_{electrolyte}$, 1/ Ωm)	$33.4 \times 10^3 \exp\left(\frac{-10,300}{T}\right)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผลการจำลองกระบวนการ

ผลจากการจำลองกระบวนการ การผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอกและภายใน แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก โดยหัวข้อที่ 4.1 จะแสดงการเปรียบเทียบผลจากการจำลองกระบวนการกับผลการทดลองที่ได้มาจากการวิจัยของผู้อื่น เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่นำมาใช้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อย่อย คือ การเปรียบเทียบผลของการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำจากแก๊สชีวภาพ (หัวข้อที่ 4.1.1) และผลของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (หัวข้อที่ 4.1.2) หัวข้อที่ 4.2 แสดงผลการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก โดยจะทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ได้แก่ อุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอัตราการป้อนสารเข้าระหว่างไอน้ำต่อมีเทน (S/C or feed ratio) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจน และทำการศึกษาค้นคว้าผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง ได้แก่ อุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ส่วนหัวข้อที่ 4.3 จะแสดงผลการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายใน ซึ่งจะทำการศึกษาค้นคว้าผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง ได้แก่ อุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง อัตราการป้อนสารเข้าระหว่างไอน้ำต่อมีเทน และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ที่มีต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยแพ็คเกจที่นำมาพิจารณาความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะดูจากประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้จะยังทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงแบบภายนอกและแบบภายใน เพื่อวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันระหว่างกระบวนการทั้งสองแบบ

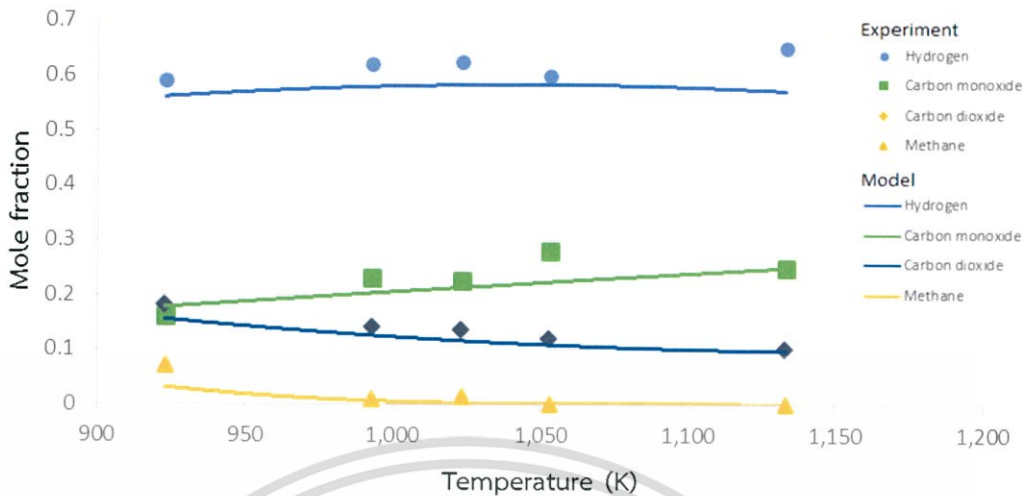
4.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองกระบวนการและผลการทดลอง

การแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองกระบวนการและผลการทดลองมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ใช้ในโครงการนี้ โดยการเปรียบเทียบแบบจำลองจำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ในส่วนแบบจำลองของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง และแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง โดยในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง จะต้องกำหนดให้มีสภาวะการดำเนินงานที่เหมือนกัน ทั้งในส่วนของชนิดและความหนาของขั้วแอโนด แคโทด และอิเล็กโทรไลต์ พื้นที่การทำปฏิกิริยา (Active area) ความดันและอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ชนิดและองค์ประกอบของเชื้อเพลิง อัตราการป้อนเข้าของเชื้อเพลิงต่ออากาศ และอัตราส่วนการป้อนเข้าของไอน้ำต่อมีเทน โดยในส่วนของแบบจำลองรีฟอร์มเมอร์จะเป็นการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Philipp และ Christoph [17] และในส่วนของแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งจะเป็นการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Zhao และ Virkar [18]

4.1.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองกระบวนการและการทดลองจริงของแบบจำลองเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง

ในการเปรียบเทียบแบบจำลองของเครื่องรีฟอร์มเมอร์นั้น ได้ทำการจำลองกระบวนการภายใต้สภาวะเดียวกันกับการทดลองของ Philipp และ Christoph [17] คือที่อุณหภูมิระหว่าง 923 ถึง 1,123 เคลวิน ความดัน 1 บรรยากาศ และอัตราส่วนป้อนสารเข้าระหว่างไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 2.2 โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบในส่วนของอัตราส่วนเชิงโมลที่ได้ของสาร 4 ชนิด คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน หลังผ่านเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ซึ่งแสดงดังกราฟในรูปที่ 4.1

จากรูปจะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองนั้นมีความแตกต่างของข้อมูลอยู่น้อยมากในทั้งสี่สาร หรือกล่าวได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ในแต่ละจุดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นในบางจุด ที่บางสภาวะในการทดลองจริงอาจมีความคลาดเคลื่อนจากแนวโน้มของผลโดยรวม ทำให้เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองกระบวนการ จึงมีค่าที่แตกต่างมากกว่าสภาวะอื่นๆไปบ้าง แต่เมื่อมองเปรียบเทียบกับแนวโน้มจะมีทิศทางไปในทางเดียวกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ใช้ในโครงการนี้ สามารถจำลองกระบวนการได้มีความน่าเชื่อถือมากพอที่จะนำไปใช้จริงได้ต่อไป

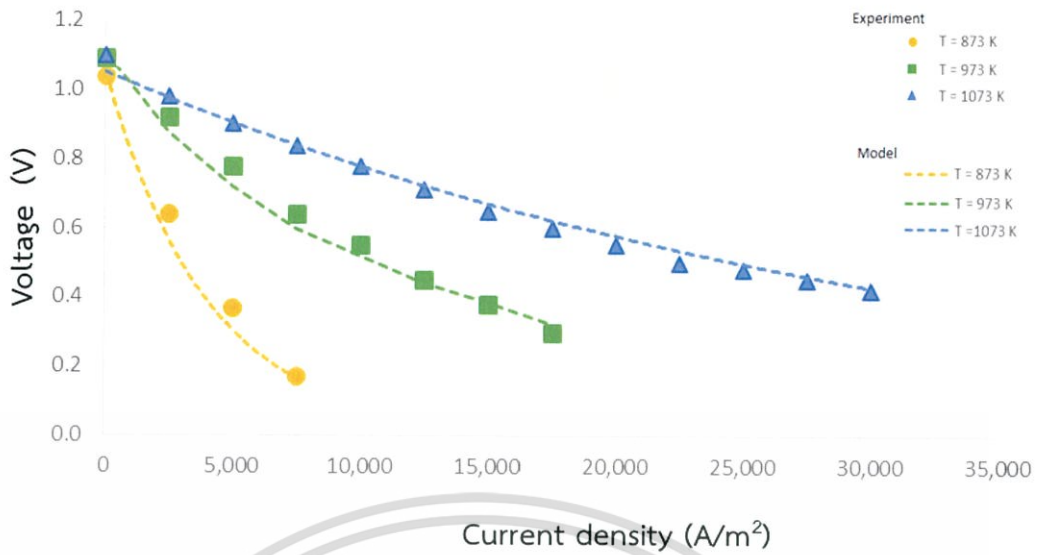


รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนเชิงโมลของสารต่างๆหลังผ่านเครื่องรีฟอร์มเมอร์ระหว่างผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการและการทดลองของ Philipp และ Christoph [17]

4.1.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจากจำลองกระบวนการและการทดลองจริงของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

ในการเปรียบเทียบแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่แสดงในหัวข้อที่ 2.6 นั้น ได้ทำการจำลองกระบวนการภายใต้สภาวะเดียวกันกับการทดลอง Zhao และ Virkar [18] คือที่อุณหภูมิที่ระหว่าง 873 ถึง 1,073 เคลวิน ความดัน 1 บรรยากาศ อัตราการป้อนไฮโดรเจนและอากาศอยู่ที่ 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาทีตามลำดับ เชื้อเพลิงขาเข้าประกอบด้วยไฮโดรเจน 97 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ 3 เปอร์เซ็นต์ ความหนาของขั้วแอโนด 1,000 ไมโครเมตร ขั้วแคโทด 20 ไมโครเมตร และ อิเล็กโทรไลต์ 8 ไมโครเมตร โดยค่าของสภาวะที่เลือกใช้เป็นไปตามข้อมูลการทดลองจริง โดยในการเปรียบเทียบเราจะเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองกระบวนการและการทดลองจริง ซึ่งแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 4.2

จากกราฟรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้ที่ได้จากการทดลองและการจำลองกระบวนการในทุกอุณหภูมิและความหนาแน่นของกระแส มีความแตกต่างกันน้อยมาก โดยมีความแตกต่างกันไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นความแตกต่างที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถนำแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งมาใช้ในโครงการที่เราศึกษาได้



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่างผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการและการทดลองของ Zhao และ Virkar [18]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

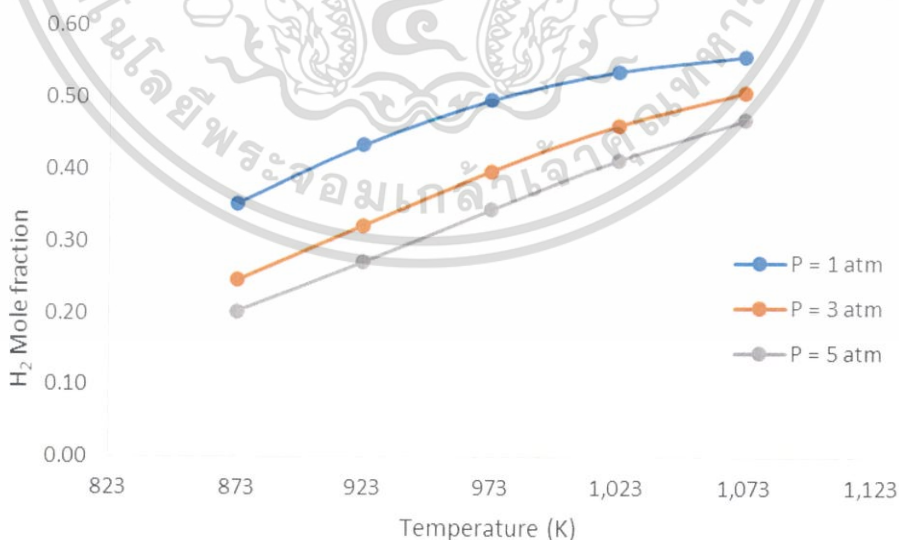
4.2 ผลการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก

ในการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก กำหนดให้อัตราการป้อนเข้าของแก๊สชีวภาพและอากาศเท่ากับ 1.75 กิโลโมลต่อชั่วโมง และใช้ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองกระบวนการดังตารางที่ 3.1 คือ อัตราส่วนการป้อนของไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 0.5 สภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ คือ อุณหภูมิ 973 เคลวิน ความดันบรรยากาศ ส่วนสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง คือ อุณหภูมิ 1,073 เคลวิน ความดันบรรยากาศ และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

4.2.1 ผลของสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์

4.2.1.1 ผลของความดันในแบบจำลองของเครื่องรีฟอร์มเมอร์

รูปที่ 4.3 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อเศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจน จากการจำลองกระบวนการพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจากความดันบรรยากาศเป็น 5 บรรยากาศ เศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าลดลง เนื่องจากหลักการของเลอชาเตอริเย เมื่อมีการเพิ่มความดันเข้าไปในระบบจะทำให้ระบบนั้นเปลี่ยนเข้าสู่สมดุลใหม่ไปในทางที่ทำให้โมลลดลงเพื่อเป็นการลดความดันในระบบที่ถูกเพิ่มขึ้น สำหรับปฏิกิริยารีฟอร์มมิงนั้นเมื่อเพิ่มความดัน จะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปทางด้านสารตั้งต้นเพื่อเป็นการรักษาสมดุล ส่งผลให้ได้เศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนลดลงด้วย ดังนั้นในโครงการนี้จึงเลือกสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อเศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 ผลของอุณหภูมิในแบบจำลองของเครื่องรีฟอร์มเมอร์

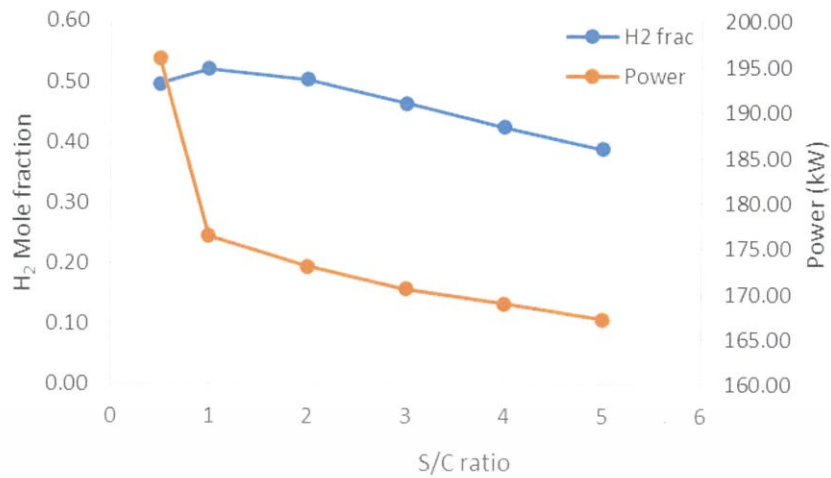
สำหรับผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่อมีการเพิ่มเพิ่มอุณหภูมิเข้าไปในระบบ ระบบจะเข้าสู่สมดุลใหม่โดยการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้ไปข้างหน้ามากขึ้นจึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนมากขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น จะทำให้ที่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการจำลองกระบวนการที่แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์จะส่งผลให้อัตราไหลโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลโดยโมลของมีเทนมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งส่งผลให้อัตราการไหลโดยรวมของเชื้อเพลิงที่เข้าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น แม้เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นแต่ก็มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้ามาตามไปด้วย เมื่อเทียบสัดส่วนระหว่างการป้อนเชื้อเพลิงและการผลิตกำลังไฟฟ้างดสมการที่ (3.4) พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าลดลง ตามการลดลงของอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ นอกจากนี้จากการจำลองกระบวนการพบว่าแม้การดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ 1,073 เคลวิน จะสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้สูงที่สุด แต่เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพเทียบกับที่อุณหภูมิ 973 เคลวิน แล้วจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นโครงการนี้จึงเลือกอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ 973 เคลวิน เพราะสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ไม่ต่างกับที่ 1,073 เคลวิน และยังให้ประสิทธิภาพที่มากกว่า นอกจากนี้การใช้อุณหภูมิต่ำลงมาในการดำเนินการนั้นย่อมหมายถึงความเสถียร การลดต้นทุน และความปลอดภัยที่ดีขึ้นในการดำเนินงานจริง

ตารางที่ 4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อเศษส่วนโมลของแก๊สต่างๆ ศักย์ไฟฟ้า และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

T _{ref} (K)	P _{ref} (atm)	Mol flow H ₂	Mol flow CH ₄	Mol flow CO	Voltage (V)	η_{SOFC} (%)
873	1	1.117	0.604	0.666	0.674	72.50
	3	0.693	0.778	0.396	0.643	71.66
	5	0.547	0.836	0.307	0.628	70.85
923	1	1.537	0.417	0.995	0.693	71.67
	3	0.999	0.638	0.647	0.663	71.65
	5	0.795	0.722	0.515	0.648	71.24
973	1	1.929	0.247	1.285	0.710	70.98
	3	1.361	0.477	0.930	0.681	71.13
	5	1.107	0.581	0.769	0.667	71.11
1,023	1	2.216	0.125	1.485	0.722	70.53
	3	1.725	0.320	1.194	0.698	70.65
	5	1.453	0.429	1.030	0.679	70.15
1,073	1	2.383	0.055	1.599	0.729	70.29
	3	2.030	0.193	1.400	0.711	70.24
	5	1.785	0.289	1.260	0.699	70.27

4.2.1.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้า

ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าที่มีต่อเศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนและค่ากำลังไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.4 จากการจำลองกระบวนการพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าตั้งแต่ 0.5 ถึง 5 จะทำให้ได้เศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนลดลง โดยการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนก็เทียบเท่ากับการเพิ่มน้ำเข้าไปในระบบ ซึ่งจะมีผลให้แก๊สไฮโดรเจนถูกเจือจาง และเมื่อแก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณลดลงในขณะที่มีน้ำเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีลดลง ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงและค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าด้วย จากผลการจำลองกระบวนการจะเห็นว่าการใช้อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าเท่ากับ 1 จะให้เศษส่วนโมลของไฮโดรเจนที่สูงกว่าการใช้อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 0.5 เพียงเล็กน้อย แต่ที่อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 0.5 จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงกว่ามาก ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าที่เลือกใช้ในการดำเนินการในโครงการนี้ก็คือ 0.5 เพราะว่าให้ค่ากำลังไฟฟ้าและเศษส่วนโมลของไฮโดรเจนในปริมาณที่เหมาะสม



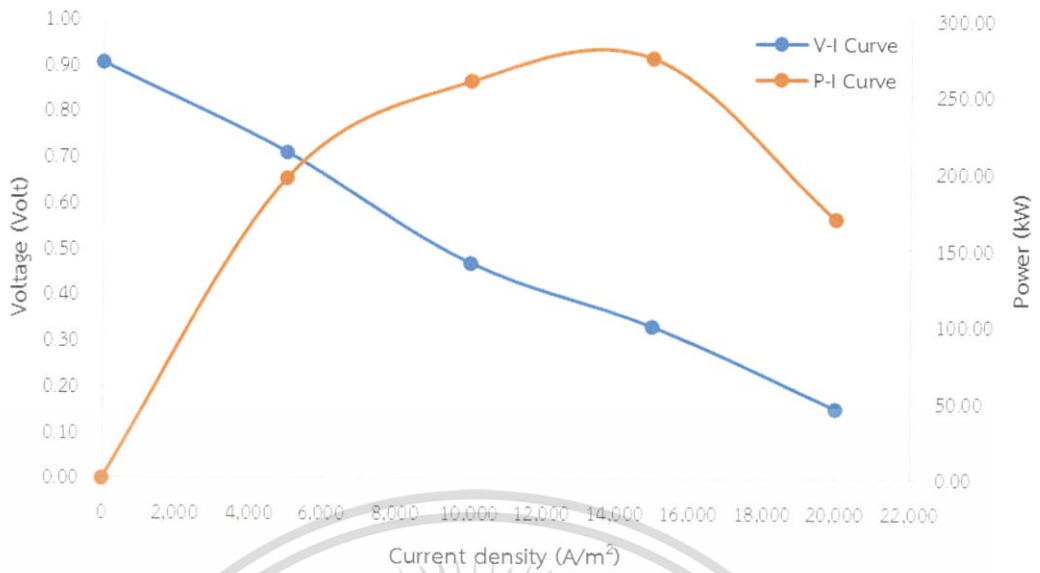
รูปที่ 4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าที่มีต่อเศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนและค่ากำลังไฟฟ้า

4.2.2 ผลของสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

4.2.2.1 ผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.5 โดยสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์คือ อุณหภูมิ 973 เคลวิน ความดันบรรยากาศ และอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนเท่ากับ 0.5 ส่วนสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งคือ อุณหภูมิ 1,073 เคลวิน ความดันบรรยากาศ จากการจำลองกระบวนการพบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะทำให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากการเพิ่มของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้านั้นจะเพิ่มค่าความสูญเสียของศักย์ไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด (ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวล) โดยเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 20,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลงจาก 0.904 เหลือ 0.154 โวลต์ จากสมการหาค่ากำลังไฟฟ้า (สมการที่ (3.1)) จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 285 กิโลวัตต์ ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 13,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากนั้นค่ากำลังไฟฟ้าก็จะค่อยๆมีค่าลดลง จากกราฟรูปที่ 4.5 แม้ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 13,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงที่สุดก็ตาม แต่ ณ จุดดังกล่าวจะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าเพียง 0.408 โวลต์ ซึ่งมีค่าน้อยเกินไป ดังนั้นในโครงการนี้สำหรับการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะเลือกใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยพบว่าจะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.71 โวลต์ และ 195.96 กิโลวัตต์ ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้เป็นค่าที่เหมาะสมและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 ผลของความดันและอุณหภูมิในแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งจาก 1,073 ถึง 1,273 เคลวิน จะทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี และค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ค่าดังกล่าวมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการปฏิกิริยาเคมีและค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าและค่าการนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จากผลดังกล่าวเมื่ออุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งเพิ่มขึ้นจึงทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อแก๊สสังเคราะห์ที่เข้ามายังเซลล์เชื้อเพลิงมีปริมาณเท่าเดิม เมื่อศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน พบว่าการเพิ่มความดันในช่วง 1 ถึง 5 บรรยากาศ จะทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยการเพิ่มความดันจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลนั้นลดลง จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นมากขึ้น และเนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่ป้อนเข้ามายังเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นประสิทธิภาพจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าศักย์ไฟฟ้าด้วย

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งจาก 1,173 เป็น 1,223 และ 1,273 เคลวิน ค่าศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพที่ได้นั้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงไม่คุ้มค่าในการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าความดัน จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งจาก 3 ไป 5 บรรยากาศ ก็ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเช่นกัน ดังนั้นในโครงการนี้จึงสรุปว่าสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง ที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 1,173 เคลวิน และความดัน 3 บรรยากาศ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ 0.89 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 245.64 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 85.26 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงแบบภายนอก

T_{sofc} (K)	P_{sofc} (atm)	Voltage (V)	Power (kW)	η_{SOFC} (%)
1,073	1	0.729	201.204	69.84
	3	0.751	207.276	71.95
	5	0.753	207.83	72.14
1,123	1	0.836	230.736	80.09
	3	0.869	239.844	83.25
	5	0.872	240.672	83.54
1,173	1	0.846	233.496	81.05
	3	0.890	245.640	85.26
	5	0.897	247.572	85.93
1,223	1	0.849	234.324	81.34
	3	0.900	248.400	86.22
	5	0.912	251.712	87.37
1,273	1	0.850	234.60	81.43
	3	0.903	249.228	86.51
	5	0.920	253.920	88.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายใน

4.3.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้า

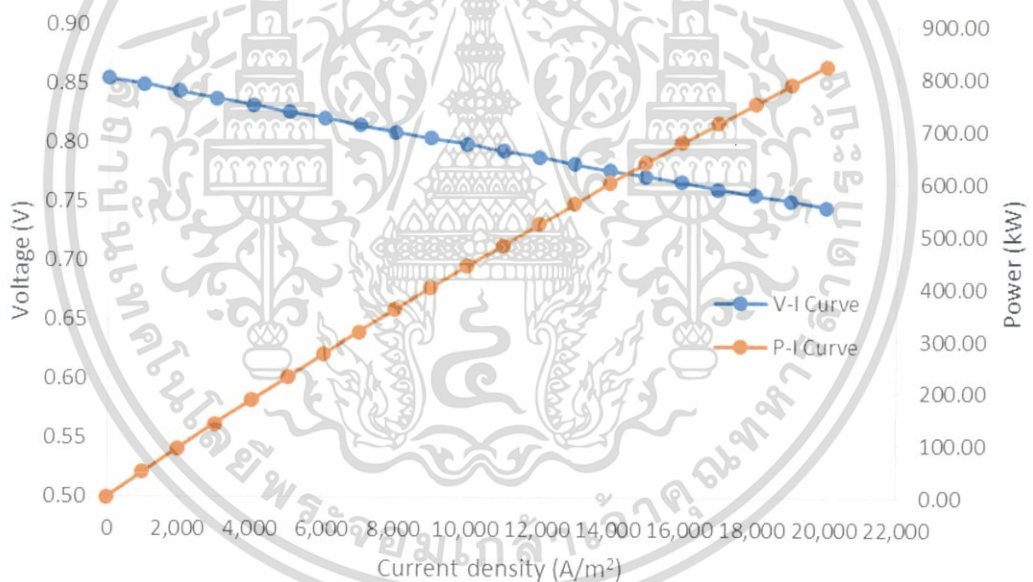
ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ 4.6 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนเป็นการเพิ่มน้ำเข้าไปในระบบ ซึ่งเป็นการเจือจางปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ดังนั้นจึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีลดลง และเป็นเหตุให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งลดลงตามไปด้วย จากการจำลองกระบวนการพบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าเท่ากับ 0.5 จะให้ศักย์ไฟฟ้าที่ดีที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.82 โวลต์



รูปที่ 4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

4.3.2 ผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 20,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จะทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลง เนื่องจากการเพิ่มของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้านั้นจะทำให้ค่าความสูญเสียของศักย์ไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนค่ากำลังไฟฟ้า ในความเป็นจริงค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่ามากเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด จากนั้นจึงมีค่าลดลงมา แต่จากการจำลองกระบวนการจะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ศึกษาจะลดลงไม่มาก จึงไม่เห็นปรากฏการณ์การลดลงของค่ากำลังไฟฟ้า จากที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 4.2.2.1 ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมจะมีค่าประมาณ 0.70 โวลต์ ซึ่งจากรูปที่ 4.7 จะได้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามากกว่า 22,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร แต่ในโครงการนี้จะเลือกความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ากับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก



รูปที่ 4.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่างๆ

4.3.3 ผลของความดันและอุณหภูมิของระบบดำเนินการ

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งระหว่าง 1,073 ถึง 1,273 เคลวิน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ได้เศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนลดลง ในขณะที่ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงแบบภายใน เมื่อป้อนแก๊สชีวภาพแล้วน้ำเข้าไปยังเซลล์เชื้อเพลิงจะเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิง ปฏิกิริยาอวอเทอร์แก๊สซิฟ และปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทางด้านขั้วแอโนด ในความเป็นจริงการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งควรส่งผลให้ได้เศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและปฏิกิริยาอวอเทอร์แก๊สซิฟ ในขณะที่แก๊สไฮโดรเจนก็จะถูกใช้ไปเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี แต่จากผลการจำลองกระบวนการพบว่าเศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าลดลงตามการเพิ่มอุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก โดยปกติแล้วปฏิกิริยารีฟอร์มมิงจะดำเนินงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 973 ถึง 1,023 เคลวิน [17] แต่การดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ศึกษานี้อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 1,073 ถึง 1,273 เคลวิน ซึ่งอาจเป็นช่วงที่เลยจุดสมดุลของปฏิกิริยาแล้ว นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้แก๊สไฮโดรเจนถูกใช้ไปทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีมากขึ้น ซึ่งปริมาณเศษส่วนโมลที่แสดงในตารางที่ 4.3 เป็นปริมาณสุทธิของแก๊สไฮโดรเจนที่อยู่ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง ดังนั้นจึงแสดงเป็นค่าที่ลดลง สำหรับค่าศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ตามการเพิ่มอุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีและค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงมาก ดังนั้นจึงส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น และเนื่องจากการป้อนเชื้อเพลิงเข้าเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าคงที่ เมื่อศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งระหว่าง 1 ถึง 5 บรรยากาศ พบว่าเมื่อเพิ่มความดันจะทำให้เศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนลดลง ในขณะที่ ศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าลดลงเนื่องจาก การเพิ่มความดันทำให้ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่ ซึ่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงจะดำเนินไปทางสารตั้งต้น ดังเหตุผลที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 4.2.1.1 แม้ว่าการเพิ่มความดันจะทำให้ได้เศษส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนลดลง แต่การเพิ่มความดันจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลนั้นลดลงเป็นสำคัญ จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นมากขึ้น

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งจาก 1,173 เคลวิน เป็น 1,223 เคลวิน จะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วนการเพิ่มความดันจาก 3 เป็น 5 บรรยากาศ ก็ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเช่นกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน รวมถึงการคำนึงถึงความปลอดภัยในกรณีที่ใช้ความสูงๆ ดังนั้นในโครงการนี้จึงสรุปว่าสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายในที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 1,173 เคลวิน และความดัน 3 บรรยากาศ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ 0.821 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 226.60 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 96.81 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงแบบภายใน

T_{SOFC} (K)	P_{SOFC} (atm)	Mol frac H_2	Voltage (V)	Power (kW)	η_{SOFC} (%)
1073	1	0.477	0.715	197.34	84.32
	3	0.46	0.745	205.62	87.86
	5	0.438	0.752	207.55	88.68
1123	1	0.472	0.764	210.86	90.10
	3	0.466	0.798	220.25	94.11
	5	0.455	0.809	223.28	95.41
1,173	1	0.467	0.784	216.38	92.46
	3	0.464	0.821	226.60	96.82
	5	0.46	0.834	230.18	98.35
1,223	1	0.462	0.788	217.49	92.93
	3	0.461	0.827	228.25	97.53
	5	0.459	0.842	232.39	99.30
1,273	1	0.457	0.74	204.24	87.27
	3	0.457	0.825	227.70	97.29
	5	0.456	0.841	232.12	99.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการจำลองกระบวนการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการจำลองกระบวนการ

จากการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งทั้งสองชนิดคือ ที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอกและรีฟอร์มมิงภายใน พบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก สำหรับเครื่องรีฟอร์มเมอร์ คือ อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนของสายป้อนเข้าเท่ากับ 0.5 อุณหภูมิเท่ากับ 973 เคลวิน และความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศ ตามลำดับ ส่วนสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิเท่ากับ 1,173 เคลวิน และความดันเท่ากับ 3 บรรยากาศ ภายใต้สภาวะการดำเนินงานดังกล่าวจะได้ ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.89 โวลต์ กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 245.64 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 85.26 เปอร์เซ็นต์

ส่วนกระบวนการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายใน จะได้สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราสารป้อนเข้าระหว่างไอน้ำและมีเทนเท่ากับ 0.5 อุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งเท่ากับ 1,173 เคลวิน และ 3 บรรยากาศ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยที่สภาวะการดำเนินงานดังกล่าวจะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.821 โวลต์ กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 226.60 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 96.81 เปอร์เซ็นต์

จากผลการจำลองกระบวนการที่สภาวะการดำเนินงานที่เท่ากันนั้น พบว่า กระบวนการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายใน จะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงไปเป็นไฮโดรเจนที่ดีกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายนอก ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายในได้รวมขั้นตอนการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน และเปลี่ยนแก๊สไฮโดรเจนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนเดียว จึงทำให้เกิดการสูญเสียระหว่างขั้นตอนน้อยกว่าการรีฟอร์มมิงภายนอก จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้การรีฟอร์มมิงภายในนั้นมีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบที่ใช้รีฟอร์มมิงภายนอก

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ใช้น้ำร้อนจากสารขาออกจากระบบนั้นยังมีส่วนที่นำกลับไปใช้ได้ควรมีระบบรีไซเคิลเพื่อในกลับไปใช้ใหม่เพื่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
- 2) ใช้น้ำร้อนจากสารขาออกนั้นเป็นสารที่มีพลังงานและความร้อนสูงซึ่งสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อีกเช่นการนำไปปั่นกังหันร้อนก็จะทำให้ได้พลังงานเพิ่มอีกทางหนึ่งซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างพลังงานอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. “แผนและการปรับค่าเป้าหมายตามแผนพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศ”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/149>. (สืบค้นข้อมูล 25 กันยายน 2557)
- [2] สำนักวิจัยและค้นคว้าพลังงาน. “เซลล์เชื้อเพลิงและหลักการทํางาน”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www2.dede.go.th/hydronet/HydrogenMain.html>. (สืบค้นข้อมูล 25 กันยายน 2557)
- [3] Bloom Energy. “Solid Oxide Fuel Cell”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.bloomenergy.com/fuel-cell/solid-oxide>. (สืบค้นข้อมูล 25 กันยายน 2557)
- [4] Sharaf, O.Z. and Orhan, M.F. “An overview of fuel cell technology : Fundamentals and applications.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32 : 810-853
- [5] Laosiripojana, N. and Assabumrungrat, S. “Catalytic Steam Reforming of methane, methanol and ethanol over Ni/YSZ: The possible use of these fuels in internal reforming SOFC.” *Journal of Power Sources*, 163 : 943-951
- [6] Clarke Energy. “Biogas”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.clarke-energy.com/biogas>. (สืบค้นข้อมูล 15 ตุลาคม 2557)
- [7] Lenntech. “Hydrogen”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/h.htm>. (สืบค้นข้อมูล 20 ตุลาคม 2557)
- [8] LeValley, T.L. Richard, A.R. and Fan, M. “The progress in water gas shift and steam reforming hydrogen production technologies.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 : 16983-17000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] Smiadak, D.M.. “Reforming - Direct Electro Oxidation, External and Internal.”
Renewable and Sustainable Energy, 2008
- [10] Alves, H.J. Junior, C.B. Niklevicz, R.R. Frigo, E.P. Frigo, M.S and
 Colimbra-Araujo, C.H. “Overview of hydrogen Production technologies from
 biogas and the applications in fuel cells.” **International Journal of Hydrogen
 Energy**, 38 : 5215-5225
- [11] Jain, R. and Mandal B. “Studies on Ideal and Actual Efficiency of Solar Polymer
 Electrolyte Fuel Cell.” **Alternative energy**, February 2007
- [12] Roy, P.S. Raj, A.S.K. and Kim, K. “Influence of S/C ratio and temperature on
 steam reforming of model biogas over a metal-foam-coated Pd-Rh/ (CeZrO₂
 -Al₂O₃) catalyst.” **Fuel**, 139 : 314-320
- [13] Patcharavorachot, Y. Arpornwichanop, A. and Chuachuensuk, A.
 “Electrochemical study of a planar solid oxide fuel cell: Role of support
 structures.” **Journal of Power Sources**, 177 : 254-261
- [14] Doherty, W. Reynolds, A. and Kennedy, D. “Computer simulation of a
 Biomass gasification-solid oxide fuel cell power system using Aspen Plus.”
Energy, 35 : 45
- [15] พิสิทธ์ราชมงคล. “Fuel Cell”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:
<http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/97/fuelcell/fuel-cell.htm>.
 (สืบค้นข้อมูล 15 มีนาคม 2558)
- [16] Smithsonian Institute. “Fuel Cell”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:
<http://americanhistory.si.edu/fuelcells/basics.htm>. (สืบค้นข้อมูล 15 มีนาคม 2558)
- [17] Kolbitsch, P. Pfeifer, C. and Hofbauer, H. “Catalytic steam reforming of model
 biogas.” **Fuel**, 87 : 701-706

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [18] Zhoa,F. and Virkar, A.V. “Dependence of polarization in anode-supported solid oxide fuel cell on various cell parameter.” **Journal of Power Sources** , 141 : 79-95
- [19] Saebea, D. Authayanun, S. Patcharavorachot,Y. Peangjuntuek, W. and Arpornwichanop, A. “Use of different renewable fuels in a steam reformer integrated into a solid oxide fuel cell: Theoretical analysis and performance comparison.” **Energy**, 511 : 305-313
- [20] ปภิชญากรณ์ ต้นถาวร และพิมพ์ประไพ อุไรเลิศ. “ระบบร่วมของกระบวนการรีฟอร์มมิงและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งแบบความดันสูง.” **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**, 2556.
- [21] Choedkiatsakul, I. Sintawarayan, K. Prawpipat, T. Soottitantawat, A. Wiyaratn, W. Kiatkittipong, w. Arpornwichanop, A. Laosiripojana, N. Charojrochkul, S. and Assabumrungrat, S. “Performance assessment of SOFC systems integrated with bio-ethanol production and purification processes.” **Engineering journal**, 14 : issue 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกระบวนการกับการทดลองจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ผลการเปรียบเทียบกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊สชีวภาพ ระหว่างการจำลองกระบวนการกับการทดลองจริง

T _{ref} (K)	Hydrogen mol fraction		Carbonmonoxide mol fraction		Carbondioxide mol fraction		Methane mol fraction	
	Experimental	Model	Experimental	Model	Experimental	Model	Experimental	Model
923	0.590	0.590	0.160	0.170	0.180	0.155	0.070	0.031
993	0.620	0.62	0.230	0.208	0.140	0.125	0.010	0.006
1023	0.625	0.625	0.225	0.218	0.135	0.114	0.015	0.003
1053	0.600	0.600	0.280	0.226	0.120	0.111	0	0.001
1133	0.650	0.650	0.250	0.243	0.100	0.097	0	0

ตารางที่ ก.2 ผลการเปรียบเทียบกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง ระหว่างการจำลองกระบวนการกับการทดลองจริง

I (A/m ²)	T = 873 K		T = 973 K		T = 1073 K	
	Voltage (V)		Voltage (V)		Voltage (V)	
	Experimental	Model	Experimental	Model	Experimental	Model
0	1.040	1.122	1.090	1.107	1.100	1.090
2,500	0.640	0.508	0.920	0.876	0.980	1.000
5,000	0.370	0.316	0.780	0.722	0.900	0.900
7,500	0.170	0.169	0.640	0.599	0.840	0.840
10,000			0.550	0.521	0.780	0.730
12,500			0.450	0.442	0.710	0.710
15,000			0.380	0.384	0.650	0.660
17,500			0.300	0.323	0.600	0.650
20,000					0.550	0.550
22,500					0.500	0.540
25,000					0.480	0.500
27,500					0.450	0.490
30,000					0.420	0.420



ภาคผนวก ข
ผลการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้
รีฟอร์มมิงภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายนอก

I (A/m ²)	Voltage (V)	Power (W/m ²)	Power (kW)
0	0.904	0.00	0.00
1,000	0.881	881.00	48.63
2,000	0.858	1,716.00	94.72
3,000	0.835	2,505.00	138.28
4,000	0.813	3,252.00	179.51
5,000	0.710	3,550.00	195.96
6,000	0.688	4,128.00	227.87
7,000	0.667	4,669.00	257.73
8,000	0.646	5,168.00	285.27
9,000	0.624	5,616.00	310.00
10,000	0.470	4,700.00	259.44
11,000	0.449	4,939.00	272.63
12,000	0.429	5,148.00	284.17
13,000	0.408	5,304.00	292.78
14,000	0.353	4,942.00	272.80
15,000	0.332	4,980.00	274.90

ตารางที่ ข.1 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายนอก (ต่อ)

I (A/m ²)	Voltage (V)	Power (W/m ²)	Power (kW)
16,000	0.312	4,992.00	275.56
17,000	0.292	4,964.00	274.01
18,000	0.271	4,878.00	269.27
19,000	0.174	3,306.00	182.49
20,000	0.154	3,080.00	170.02

หมายเหตุ

ดำเนินการที่สภาวะ

Biogas flow = 1.75 kmol/hr

Air flow = 1.75 kmol/hr

T_{ref} = 973 K

P_{ref} = 1 atm

T_{SOFC} = 1073 K

P_{SOFC} = 1 atm

S/C = 0.5

ตารางที่ ข.2 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของรีฟอร์มเมอร์ในแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายนอก

T _{ref} (K)	P _{ref} (atm)	Mol fraction					Voltage (V)	Power (W/m ²)	Power (kW)	Efficiency SOFC (%)	Efficiency system (%)
		H ₂ O	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂					
873	1	0.095	0.191	0.210	0.151	0.353	0.674	3,370.00	186.02	72.50	79.41
	3	0.133	0.276	0.140	0.204	0.246	0.643	3,215.00	177.47	71.66	75.76
	5	0.150	0.310	0.113	0.225	0.203	0.628	3,140.00	173.33	70.85	73.99
923	1	0.072	0.118	0.281	0.095	0.434	0.693	3,465.00	191.27	71.67	81.65
	3	0.113	0.206	0.209	0.150	0.322	0.663	3,315.00	182.99	71.65	78.11
	5	0.131	0.247	0.176	0.175	0.271	0.648	3,240.00	178.85	71.24	76.35
973	1	0.052	0.064	0.331	0.056	0.497	0.710	3,550.00	195.96	70.98	83.65
	3	0.090	0.139	0.272	0.100	0.398	0.681	3,405.00	187.96	71.13	80.23
	5	0.111	0.181	0.239	0.125	0.344	0.667	3,335.00	184.09	71.11	78.58
1023	1	0.039	0.030	0.360	0.034	0.537	0.722	3,610.00	199.27	70.53	85.06
	3	0.069	0.086	0.320	0.063	0.462	0.698	3,490.00	192.65	70.65	82.24
	5	0.089	0.122	0.293	0.083	0.413	0.679	3,395.00	187.40	70.15	80.00
1073	1	0.031	0.013	0.375	0.023	0.559	0.729	3,645.00	201.20	70.29	85.89
	3	0.053	0.048	0.351	0.039	0.509	0.711	3,555.00	196.24	70.24	83.77
	5	0.069	0.076	0.332	0.053	0.470	0.699	3,495.00	192.92	70.27	82.35

หมายเหตุ ดำเนินงานที่สภาวะ S/C = 0.5 T_{SOFC} = 1073 K P_{SOFC} = 1 atm และ i = 5000 A/m²

ตารางที่ ข.3 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนในแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายนอก

S/C ratio	Mol fraction					Voltage (V)	Power (W/m ²)	Power (kW)	Efficiency SOFC (%)	Efficiency system (%)
	H ₂ O	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂					
0.5	0.052	0.064	0.331	0.056	0.497	0.710	3550.00	195.96	70.98	83.65
1	0.100	0.031	0.266	0.083	0.521	0.639	3195.00	176.36	63.47	75.28
2	0.197	0.009	0.178	0.112	0.504	0.627	3135.00	173.05	62.47	73.87
3	0.283	0.004	0.125	0.123	0.465	0.618	3090.00	170.56	62.02	72.81
4	0.357	0.002	0.092	0.125	0.425	0.612	3060.00	168.91	61.84	72.10
5	0.418	0.001	0.070	0.122	0.389	0.606	3030.00	167.25	61.57	71.39

หมายเหตุ ดำเนินงานที่สภาวะ

$$T_{ref} = 973 \text{ K}$$

$$P_{ref} = 1 \text{ atm}$$

$$T_{SOFC} = 1073 \text{ K}$$

$$P_{SOFC} = 1 \text{ atm}$$

$$i = 5000 \text{ A/m}^2$$

ตารางที่ ข.4 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายนอก

T _{SOFC} (K)	P _{SOFC} (atm)	Molar flow rate (kmol/hr)					Voltage (V)	Power (kW)	Efficiency (%)
		H ₂ O	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂			
1073	1	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.729	201.204	69.84
	3	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.751	207.276	71.95
	5	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.751	207.276	72.14
1123	1	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.836	230.736	80.09
	3	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.869	239.844	83.25
	5	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.872	240.672	83.54
1173	1	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.846	233.496	81.05
	3	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.890	245.640	85.26
	5	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.897	247.572	85.93
1223	1	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.849	234.324	81.34
	3	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.900	248.400	86.22
	5	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.912	251.712	87.37
1273	1	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.847	233.772	81.43
	3	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.903	249.228	86.51
	5	0.142	0.026	1.665	0.059	2.432	0.920	253.920	88.14

หมายเหตุ ดำเนินงานที่สภาวะ T_{ref} = 973 K P_{ref} = 1 atm S/C = 0.5 และ i = 5000 A/m²



ภาคผนวก ค
ผลการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รี
ฟอร์มมิงภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายใน

I (A/m ²)	Voltage (V)	Power (W/m ²)	Power (kW)
0	0.855	0	0.00
1,000	0.85	850	46.92
2,000	0.844	1688	93.18
3,000	0.838	2514	138.77
4,000	0.833	3332	183.93
5,000	0.827	4135	228.25
6,000	0.822	4932	272.25
7,000	0.816	5712	315.30
8,000	0.81	6480	357.70
9,000	0.805	7245	399.92
10,000	0.8	8000	441.60
11,000	0.794	8734	482.12
12,000	0.789	9468	522.63
13,000	0.783	10179	561.88
14,000	0.778	10892	601.24
15,000	0.773	11595	640.04
16,000	0.768	12288	678.30
17,000	0.762	12954	715.06

ตารางที่ ค.1 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายใน

I (A/m ²)	Voltage (V)	Power (W/m ²)	Power (kW)
18,000	0.757	13626	752.16
19,000	0.752	14288	788.70
20,000	0.747	14940	824.69

หมายเหตุ สภาวะดำเนินงานที่

Biogas flow = 1.75 kmol/hr

Air flow = 1.75 kmol/hr

T_{ref} = 1,223 K

P_{ref} = 1 atm

S/C = 0.5

ตารางที่ ค.2 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายใน

T (K)	P (atm)	Mol fraction of out-anode					Voltage (V)	Power (W/m ²)	Power (kW)	Efficiency SOFC (%)	Efficiency system (%)
		H ₂ O	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂					
1,073	1	0.122	0.002	0.313	0.087	0.477	0.715	3,575	197.34	84.32	84.24
	3	0.130	0.012	0.304	0.094	0.460	0.745	3,725	205.62	87.86	87.77
	5	0.141	0.026	0.292	0.103	0.438	0.752	3,760	207.55	88.68	88.59
1,123	1	0.128	<0.001	0.32	0.079	0.472	0.764	3,820	210.86	90.10	90.01
	3	0.131	0.004	0.317	0.082	0.466	0.798	3,990	220.25	94.11	94.01
	5	0.136	0.011	0.312	0.086	0.455	0.809	4,045	223.28	95.41	95.31
1,173	1	0.133	<0.001	0.327	0.073	0.467	0.784	3,920	216.38	92.46	92.36
	3	0.134	0.002	0.325	0.074	0.464	0.821	4,105	226.60	96.82	96.72
	5	0.136	0.004	0.324	0.076	0.460	0.834	4,170	230.18	98.35	98.26
1,223	1	0.138	<0.001	0.332	0.068	0.462	0.788	3,940	217.49	92.93	92.84
	3	0.139	<0.001	0.331	0.068	0.461	0.827	4,135	228.25	97.53	97.43
	5	0.140	0.002	0.331	0.069	0.459	0.842	4,210	232.39	99.30	99.20
1,273	1	0.143	<0.001	0.336	0.064	0.457	0.74	3,700	204.24	87.27	87.18
	3	0.143	<0.001	0.336	0.064	0.457	0.825	4,125	227.70	97.29	97.20
	5	0.143	<0.001	0.336	0.064	0.456	0.841	4,205	232.12	99.18	99.08

หมายเหตุ ดำเนินงานที่สภาวะ $s/c = 0.5$ และ $i = 5000 \text{ A/m}^2$

ตารางที่ ค.3 ผลการจำลองกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทนในแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งที่ใช้รีฟอร์มมิงภายใน

S/C ratio	Mol fraction of out-anode					Voltage (V)	Power (W/m ²)	Power (kW)	Efficiency SOFC (%)	Efficiency system (%)
	Mol frac H ₂ O	Mol frac CH ₄	Mol frac CO	Mol frac CO ₂	Mol frac H ₂					
0.5	0.134	0.002	0.325	0.074	0.464	0.821	4,105.00	226.596	96.82	96.72
1	0.199	<0.001	0.264	0.093	0.443	0.800	4,000.00	220.800	94.34	94.25
2	0.306	<0.001	0.183	0.111	0.400	0.774	3,870.00	213.624	91.27	91.19
3	0.389	<0.001	0.135	0.115	0.361	0.756	3,780.00	208.656	89.15	89.07
4	0.455	<0.001	0.104	0.114	0.327	0.744	3,720.00	205.344	87.74	87.65
5	0.508	<0.001	0.082	0.110	0.299	0.734	3,670.00	202.584	86.56	86.47

หมายเหตุ ดำเนินงานที่สภาวะ T = 1,173 K P = 3 atm และ $i = 5000 \text{ A/m}^2$