

การจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน
โดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน
โดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIMULATION OF INDIRECT INTERNAL REFORMING SOFC FUELLED

BY GLYCEROL



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIRMENTS

FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACEDEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง

โดย นางสาวปุณยาวีร์ คงกะพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง
โดย นางสาวปุณยาวิร์ คงกะพันธ์
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิงด้วยโปรแกรม Aspen Plus V9 เพื่อหาภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุด หรือได้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด โดยการคำนวณทางไฟฟ้าเคมีพิจารณา ศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย 3 ชนิด ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวล และยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองกับการทดลองที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมโดยเปรียบเทียบจากค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆ พบว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ และมีค่าความผิดพลาด 10 เปอร์เซ็นต์ จึงศึกษาผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิง อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอล และอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า และการผลิตแก๊สสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง ในขณะที่อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สสังเคราะห์ลดลง แต่อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ผลการจำลองพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ศึกษามีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 67 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัตราการใช้เชื้อเพลิง 0.85 อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1 และอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบเท่ากับ 1 ที่ความดันบรรยากาศ และได้แก๊สสังเคราะห์ (แก๊สไฮโดรเจน 62 และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 38 เปอร์เซ็นต์โดยโมล) ที่อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.1 อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1 และอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบเท่ากับ 1 ที่ความดันบรรยากาศ

Report Title Simulation of Indirect Internal Reforming SOFC Fuelled
by Glycerol
By Miss Punyawee Kongkapan
Degree Bachelor of Engineering
Program Chemical Engineering
Year 2018
Advisor Asst. Prof. Dr. Yaneeporn Patcharavorachot

Abstract

This project applied Aspen Plus V9 simulator to study the performance of indirect internal reforming solid oxide fuel cell (SOFC) fuelled by glycerol. The optimal operating conditions of the SOFC to obtain the maximum SOFC efficiency or the maximum H₂:CO molar ratio were examined. The electrochemical calculations took into account three voltage losses, i.e., activation, ohmic, and concentration losses. The simulation results were validated with the experimental data from the literature with respect to their operating cell voltage at different current density and temperature. The model is acceptable with the error of 10 %. Subsequently, the effects of fuel utilization, SOFC temperature, steam to glycerol (S/G) molar ratio, and glycerol to crude glycerol molar ratio on SOFC efficiency and syngas production were studied. The simulation results indicated that the SOFC efficiency increased with the increase in fuel utilization and SOFC temperature. However, the increase in fuel utilization resulted in lower hydrogen molar ratio in syngas but higher carbon monoxide molar ratio. As a result, the electrical efficiency of 67 % was attained at fuel utilization of 0.85, SOFC temperature of 900 °C, S/G molar ratio of 1, glycerol to crude glycerol molar ratio of 1 and atmosphere pressure. While syngas consisting of H₂ 77.8 % and CO 22.2 % (mol%) was attained at fuel utilization of 0.1, SOFC temperature of 700°C, S/G molar ratio of 1, glycerol to crude glycerol molar ratio of 1 and atmosphere pressure.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จด้วยดีจากการได้รับคำแนะนำ คำปรึกษา และความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา และกรรมการบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเคมี ทั้งนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

ผศ.ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาทางด้านวิชาการ ตลอดจนแนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาที่ประสบระหว่างการจัดทำปริญญาานิพนธ์ รศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ และ ดร.ธัชนันต์ สมานมุลย์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เสนอความคิดเห็นเพิ่มเติม ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้โอกาสศึกษาเล่าเรียนในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและคอยให้กำลังใจตลอดมา

คุณงามความดีและประโยชน์อันใดที่เกิดขึ้นจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

นางสาวบุญยวีร์ คงกะพันธ์



สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
สัญลักษณ์	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)	4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC)	5
2.3 การคำนวณสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	6
2.4 รูปแบบการดำเนินการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	11
2.5 เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	17
3.1 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม	17
3.2 ขั้นตอนการจำลองกระบวนการ	20

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	22
4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
4.2 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและการผลิตแก๊สสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน	23
4.3 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและการผลิตแก๊สสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน	26
4.4 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน	28
4.5 สรุปภาวะการดำเนินงาน	30
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	31
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	31
5.2 ข้อเสนอแนะ	32
เอกสารอ้างอิง	33
ภาคผนวก ก	36
ประวัติผู้วิจัย	41

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยตรง	16
ตารางที่ 3.1	แบบจำลองและภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน	18
ตารางที่ 3.2	ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองกระบวนการที่ภาวะเริ่มต้น	21
ตารางที่ ก.1	การเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าจริงที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับผลที่ได้จากการทดลองของ Zhao และคณะ [12]	38
ตารางที่ ก.2	ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน ที่ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1	39
ตารางที่ ก.3	ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1	40
ตารางที่ ก.4	ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ	40
ตารางที่ ก.5	ผลของอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.1	42
ตารางที่ ก.6	ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1	42

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	6
รูปที่ 2.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง	11
รูปที่ 2.3	การรีฟอร์มมิงแบบภายนอกเซลล์เชื้อเพลิง	12
รูปที่ 2.4	การรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง	13
รูปที่ 2.5	การรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยอ้อม	13
รูปที่ 3.1	แบบจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม	17
รูปที่ 3.2	แผนผังจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม	20
รูปที่ 4.1	การเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าจริงที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับผลที่ได้จากการทดลองของ Zhao และคณะ [12]	23
รูปที่ 4.2	ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1	24
รูปที่ 4.3	ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1	25
รูปที่ 4.4	ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอล (S/G) ต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ	27
รูปที่ 4.5	ผลของอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.1	27
รูปที่ 4.6	ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1	29

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิงในขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารตั้งต้น	m^2
$D_{eff,anode}$	สัมประสิทธิ์การแพร่จริงของแก๊สที่ขั้วแอโนด (Effective diffusion coefficient in anode)	m^2/s
$D_{eff,cathode}$	สัมประสิทธิ์การแพร่จริงของแก๊สที่ขั้วแคโทด (Effective diffusion coefficient in cathode)	m^2/s
E^0	ศักย์ไฟฟ้าที่ภาวะความดันมาตรฐาน	V
E^{OCV}	ศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี (Theoretical potential)	V
$E_{electrode}$	ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	J/mol
F	ค่าคงที่ฟาราเดย์	C/mol
F_{fuel}	อัตราการไหลเชิงโมลของกระแสเชื้อเพลิงภายในเซลล์เชื้อเพลิง	mol/s
i	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density)	A/m^2
$i_{0,electrode}$	ค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนที่ขั้ว	A/m^2
$k_{electrode}$	ค่าคงที่ pre-exponential สำหรับไฟฟ้าเคมี	A/m^2
LHV_{H_2}	ค่าความร้อนต่ำของแก๊สไฮโดรเจน	J/mol
n	จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกถ่ายโอน	
P	ความดัน	atm
P_i	ความดันย่อยขององค์ประกอบ i	atm
P_i^l	ความดันย่อยขององค์ประกอบ i ที่ขอบเขต 3 เฟส	atm
P_{SOFC}	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (Power density)	W
R	ค่าคงที่ของแก๊ส	J/mol K

R_{ohm}	ความต้านทานภายในเฉพาะพื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง	$\Omega \text{ m}^2$
T	อุณหภูมิในดำเนินการของเซลล์เชื้อเพลิง	$^{\circ}\text{C}$
U_f	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel utilization)	
V	ศักย์ไฟฟ้าจริง (Actual voltage)	V
X_{H_2}	อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนในขั้วแอโนด	

สัญลักษณ์กรีก	ความหมาย	หน่วย
----------------------	-----------------	--------------

α	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุ	
ϵ_p	ความเป็นรูพรุนของขั้วอิเล็กโทรด	
ϵ_{SOFC}	ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (SOFC electrical efficiency)	%
η_{act}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Activation loss)	V
η_{ohm}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic loss)	V
η_{conc}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวล (Concentration loss)	V
σ_{anode}	ค่าการนำไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด	$1/\Omega \text{ m}$
$\sigma_{cathode}$	ค่าการนำไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด	$1/\Omega \text{ m}$
$\sigma_{electrolyte}$	ค่าการนำไอออนของวัสดุอิเล็กโทรไลต์	$1/\Omega \text{ m}$
τ_i	ความหนาของขั้วไฟฟ้า i ภายในเซลล์เชื้อเพลิง	m

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าในปัจจุบันสามารถผลิตได้จากเชื้อเพลิงหลากหลายประเภทตามความเหมาะสมของแหล่งเชื้อเพลิงที่มีเพียงพอ ราคาและความเสถียรของเชื้อเพลิง ความสามารถควบคุมมลพิษที่ปลดปล่อยออกมาให้อยู่ในระดับมาตรฐานคุณภาพ และการใช้ทรัพยากรหรือพลังงานภายในประเทศที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งได้มีการศึกษาเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) โดยการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรเจนและออกซิเจนให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยไม่ผ่านปฏิกิริยาการเผาไหม้ เป็นแหล่งพลังงานสะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษ มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงกว่าการใช้อุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าทั่วไป นอกจากนี้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย และดูแลรักษาง่าย ไม่เกิดเสียงดัง [1]

เซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่และสามารถผลิตไฟฟ้าได้มาก ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC) มีลักษณะที่น่าสนใจคือ ทำงานที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส) จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ส่วนได้อุณหภูมิสูงที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการนี้ สามารถนำไปใช้ปั่นกังหันเพื่อผลิตไฟฟ้าหรือให้พลังงานความร้อนแก่ส่วนอื่นๆ ในระบบต่อไป ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้น [2] นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีบทบาทหลักในการผลิตไฟฟ้าแล้ว ผลพลอยได้จากกระบวนการมักมีแก๊สเหลือออกมาด้วย ซึ่งแก๊สที่เหลือออกมานี้ส่วนใหญ่มักเป็นแก๊สสังเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าหรือกระบวนการผลิตอื่นๆ ต่อไปได้ [3]

เชื้อเพลิงที่จะนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจะผ่านการรีฟอร์มมิงเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่นำเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งการรีฟอร์มมิงสามารถทำได้ 2 แบบ ได้แก่ การรีฟอร์มมิงแบบภายนอก (External reforming) โดยแก๊สไฮโดรเจนจะถูกผลิตในเครื่องรีฟอร์มเมอร์แล้วจึงป้อนแก๊สสังเคราะห์ที่ได้เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง และการรีฟอร์มมิงแบบภายใน (Internal reforming) โดยวิธีการนี้จะป้อนเชื้อเพลิงไปที่ขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง แล้วปฏิกิริยารีฟอร์มมิงจะเกิดภายในเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์เชื้อเพลิง จึงสามารถนำไปใช้ในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงได้ การรีฟอร์มมิงแบบภายในมีข้อดีมากกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงแบบภายนอก คือ มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงกว่า และมีผลพลอยได้ของแก๊สสังเคราะห์มากกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายนอก สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ แบบแรกคือการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยตรง (Direct internal reforming) โดยเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแอโนดโดยตรงและปฏิกิริยารีฟอร์มมิง

จะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง แต่เนื่องจากความแตกต่างกันมากของอุณหภูมิส่วนการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งและส่วนของเซลล์เชื้อเพลิง จึงอาจทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเสื่อมสภาพได้ง่าย ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงได้ ส่วนแบบที่สองคือการรีฟอร์มมิ่งแบบภายในโดยอ้อม (Indirect internal reforming) บริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งจะอยู่ติดกับเซลล์เชื้อเพลิงที่ขั้วแอโนด ดังนั้นส่วนการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งและส่วนของเซลล์เชื้อเพลิง จึงไม่มีผลกระทบทางกายภาพต่อกัน [4]

โครงการนี้สนใจการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งด้านประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า และผลพลอยได้ของแก๊สสังเคราะห์ที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป จึงศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิ่งแบบภายในโดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลที่เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงดีเซล [5]

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิ่งแบบภายในโดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง

1.2.2 ศึกษาภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุด หรืออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1.3.1 ออกแบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิ่งแบบภายในโดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Aspen Plus V9

1.3.2 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิ่งแบบภายในโดยอ้อมกับผลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

1.3.3 ศึกษาภาวะดำเนินงานต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าหรือผลิตแก๊สสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการใช้เชื้อเพลิง อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอล และอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบ

1.3.4 พิจารณาภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุดหรืออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 แบบจำลองการทำงานเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยใช้ออมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง

1.4.2 ภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยใช้ออมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง ที่มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุดและได้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด

1.4.3 เป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขของการผลิตไฟฟ้าหรือแก๊สสังเคราะห์ในกระบวนการจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)

2.1.1 เซลล์เชื้อเพลิง [4]

เซลล์เชื้อเพลิง คือ อุปกรณ์ที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยการเปลี่ยนพลังงานของโมเลกุลไฮโดรเจนและออกซิเจนให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า เกิดน้ำและความร้อนเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา เซลล์เชื้อเพลิงเป็นพลังงานสะอาดเพราะผลิตไฟฟ้าโดยไม่ผ่านปฏิกิริยาการเผาไหม้ จึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศหรือสิ่งแวดล้อม และมีประสิทธิภาพสูง เซลล์เชื้อเพลิงมีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลัก คือ แอโนด (Anode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุลบกับเซลล์เชื้อเพลิง ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนออกไปทางขั้วไฟฟ้า ส่วนที่สองคือ แคโทด (Cathode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุบวกกับเซลล์เชื้อเพลิง ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนมารวมกับอะตอมของแก๊สออกซิเจน และส่วนที่สามคือ อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ทำมาจากวัสดุที่ยอมให้อิออนเคลื่อนที่ผ่าน โดยเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์จะประกอบรวมกันแบบอนุกรมบรรจุอยู่ในสแต็กเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell stack) แต่ละสแต็กเซลล์เชื้อเพลิงสามารถบรรจุเซลล์เชื้อเพลิงไว้หลายร้อยเซลล์เพื่อผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอสำหรับการใช้งาน

2.1.2 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง [2]

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถแบ่งได้ 5 ประเภท ตามชนิดของอิเล็กโทรไลต์

1) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้พอลิเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีประสิทธิภาพในการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ 53-58 เปอร์เซ็นต์ ทำงานที่อุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส เป็นระบบที่มีการนำไปทดลองใช้ในรถยนต์ต้นแบบหลายยี่ห้อ

2) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์หรือแบบด่าง (Alkaline fuel cell, AFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งใช้ไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ทำงานที่อุณหภูมิ 100-250 องศาเซลเซียส เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์มีต้นทุนต่ำ เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทโลหะมีตระกูล และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

3) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric-acid fuel cell, PAFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นเป็นอิเล็กโทรไลต์ มีประสิทธิภาพการทำงานที่ 40-80 เปอร์เซ็นต์ ทำงานที่อุณหภูมิ 150–220 องศาเซลเซียส เป็นระบบที่ต้องใช้เวลาในการอุ่นระบบนาน ไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในรถยนต์ ทดลองนำไปใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดเล็ก

4) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอม (Molten carbonate fuel cell, MCFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารลิเทียมคาร์บอเนต หรือโซเดียมคาร์บอเนตที่หลอมเหลวเป็นอิเล็กโทรไลต์ มีประสิทธิภาพการทำงานที่ 60-80 เปอร์เซ็นต์ ทำงานที่อุณหภูมิ 600–700 องศาเซลเซียส เป็นระบบที่สามารถผลิตไอน้ำอุณหภูมิสูงเพื่อใช้ในการช่วยผลิตไฟฟ้าได้

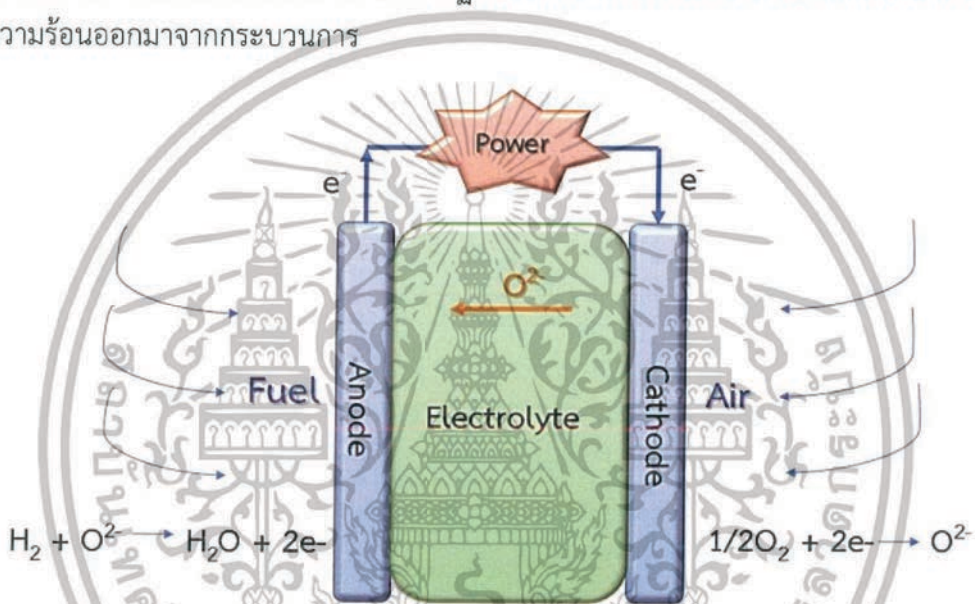
5) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารประกอบของโลหะกับเซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ทำงานอุณหภูมิระหว่าง 800–1,000 องศาเซลเซียส เป็นระบบที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่ และสามารถนำไอน้ำอุณหภูมิสูงที่ได้จากกระบวนการนี้ ใช้ในการช่วยผลิตไฟฟ้าได้

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC) [6]

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ใช้วัสดุประเภทเซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ จึงไม่เกิดปัญหาการกัดกร่อนของวัสดุภายในเซลล์ มีอุณหภูมิในการทำงานประมาณ 800–1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งข้อดีของการทำงานที่อุณหภูมิสูงคือ ทำให้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิงเกิดได้เร็ว โดยไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยอิเล็กโทรดซึ่งเป็นโลหะมีตระกูลราคาแพง และความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ในระบบได้อีก นอกจากนี้ขั้วแอโนดในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งนิยมใช้สารประกอบของโลหะกับเซรามิกได้แก่ นิกเกิล/เซอร์โคเนียเซอร์เมท (Nickel/zirconia cermet, Ni/YSZ) วัสดุที่นิยมใช้ในขั้วแคโทด ได้แก่ แลนทานัมที่เจือด้วยสตรอนเทียมแมงกานาไนต์ (Strontium doped lanthanum-manganite, LSM) ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดทำจากวัสดุที่มีรูพรุน เพื่อให้แก๊สเชื้อเพลิงสามารถผ่านไปยังผิวสัมผัสระหว่างขั้วแอโนดและชั้นอิเล็กโทรไลต์เพื่อทำปฏิกิริยาเคมี ส่วนอิเล็กโทรไลต์วัสดุที่ใช้จะมีลักษณะหนาแน่น เพื่อป้องกันแก๊สเชื้อเพลิงเคลื่อนผ่านไปที่ขั้วแคโทด และออกซิเจนเคลื่อนไปที่ขั้วแอโนด แต่ไอออนออกซิเจนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ ได้แก่ เซอร์โคเนียที่ทำให้เสถียรด้วยยิตเรียม (Yttria-stabilized zirconia, YSZ)

2.2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 2.1 เกิดขึ้นได้เมื่อมีการป้อนเชื้อเพลิง ซึ่งคือแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปที่ขั้วแอโนด และป้อนแก๊สออกซิเจน (จากอากาศ) เข้าไปที่ขั้วแคโทด แก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกเซลล์ไปที่ขั้วแคโทดเพื่อรีดิวซ์แก๊สออกซิเจนจากอากาศที่ถูกป้อนเข้าที่ขั้วแคโทด การที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกจากขั้วแอโนดไปขั้วแคโทด ทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น ที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นไอออนออกซิเจน (O^{2-}) แล้วไอออนออกซิเจน จะเคลื่อนจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดผ่านอิเล็กโทรไลต์ และไอออนออกซิเจน จะเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจน ได้ผลผลิตเป็นน้ำที่ขั้วแอโนด และมีความร้อนออกมาจากกระบวนการ



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง [4]

2.3 การคำนวณสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [4]

2.3.1 ศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี (Theoretical potential หรือ Open-circuit voltage, E^{OCV}) เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ยังไม่ได้เกิดการจ่ายกระแสไฟฟ้า จึงเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตได้ สามารถคำนวณด้วยสมการของ Nernst ดังนี้

$$E^{OCV} = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \right) \quad (2.1)$$

โดยที่ E^o คือ ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน มีหน่วย โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หาได้จากสมการ } E^{\circ} = 1.253 - 2.4516 \times 10^{-4} T \quad (2.2)$$

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ $8.314 \text{ จูล โมล}^{-1} \text{ เคลวิน}^{-1}$

T คือ อุณหภูมิในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง มีหน่วย เคลวิน

F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ มีค่าเท่ากับ $9.6485 \times 10^4 \text{ คูลอมบ์ โมล}^{-1}$

p_i คือ ความดันย่อยขององค์ประกอบ มีหน่วย บรรยากาศ

2.3.2 ศักย์ไฟฟ้าจริง (Actual voltage หรือ Operating voltage, V)

ค่าศักย์ไฟฟ้าจริงจะมีค่าต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีเสมอ เนื่องจากขณะที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่เซลล์เชื้อเพลิง จะเกิดความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงและศักย์ไฟฟ้าสูญเสียภายในเซลล์เชื้อเพลิง 3 ชนิด ได้แก่ 1) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Activation loss, η_{act}) 2) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic loss, η_{ohm}) 3) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวล (Concentration loss, η_{conc}) คำนวณได้จากสมการ

$$V = E^{ocv} - (\eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conc}) \quad (2.3)$$

1) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี คือการสูญเสียเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ซึ่งต้องมีพลังงานการเกิดปฏิกิริยามากกว่าพลังงานกระตุ้น คำนวณได้จากสมการ

$$i = i_{0,electrode} \left[\exp\left(\frac{\alpha nF}{RT} \eta_{act,electrode}\right) - \exp\left(\frac{(1-\alpha)nF}{RT} \eta_{act,electrode}\right) \right] \quad (2.4)$$

โดยที่ i คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า มีหน่วย แอมแปร์ ตารางเมตร⁻¹

α คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุ

n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกถ่ายโอน

$i_{0,electrode}$ คือ ค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยน มีหน่วย แอมแปร์ ตารางเมตร⁻¹

$$i_{0,electrode} = \frac{RT}{nF} k_{electrode} \exp\left(-\frac{E_{electrode}}{RT}\right) \quad (2.5)$$

โดย electrode \in {anode, cathode}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$k_{electrode}$ คือ ค่าคงที่ pre-exponential สำหรับไฟฟ้าเคมี มีหน่วย แอมแปร์ ตารางเมตร⁻¹

$E_{electrode}$ คือ ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี มีหน่วย จูล โมล⁻¹

2) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า คือ การสูญเสียเนื่องจากเกิดความต้านทานทางไฟฟ้า (Electronic conductivity) ของขั้วอิเล็กโทรด และความต้านทานการไหลของไอออน (Ionic conductivity) ในอิเล็กโทรไลต์ คำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{ohm} = iR_{ohm} \quad (2.6)$$

$$R_{ohm} = \frac{\tau_{anode}}{\sigma_{anode}} + \frac{\tau_{electrolyte}}{\sigma_{electrolyte}} + \frac{\tau_{cathode}}{\sigma_{cathode}} \quad (2.7)$$

โดยที่ R_{ohm} คือ ความต้านทานภายในในเฉพาะพื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง มีหน่วย โอห์ม ตารางเมตร

τ_i คือ ความหนาของขั้วไฟฟ้า i ภายในเซลล์ มีหน่วย เมตร

$\sigma_{anode}, \sigma_{cathode}$ คือ ค่าการนำไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด มีหน่วย 1 ต่อโอห์ม เมตร

$\sigma_{electrolyte}$ คือ ค่าการนำไอออนของวัสดุอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วย 1 ต่อโอห์ม เมตร

3) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวล คือ การสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลสารเชื้อเพลิงผ่านอิเล็กโทรดที่มีรูพรุน ทำให้ความเข้มข้นของสารในช่องการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่เข้าทำปฏิกิริยาและบริเวณผิวสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์มีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2O} p_{H_2}}{p_{H_2O} p_{H_2}} \right) + \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{p_{O_2}}{p_{O_2}} \right) \quad (2.8)$$

โดยพจน์แรกทางด้านขวามือของสมการ คือ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลที่ขั้วแอโนด ส่วนพจน์ที่สองทางด้านขวามือของสมการ คือ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลที่ขั้วแคโทด โดยค่าความดันย่อยของไฮโดรเจน น้ำ และออกซิเจน บริเวณผิวสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ คำนวณได้จากสมการ

$$p'_{H_2} = p_{H_2} - \frac{RT\tau_{anode}}{2FD_{eff,anode}} i \quad (2.9)$$

$$p'_{H_2O} = p_{H_2O} - \frac{RT\tau_{anode}}{2FD_{eff,anode}} i \quad (2.10)$$

$$p'_{O_2} = P - (P - p_{O_2}) \exp\left(\frac{RT\tau_{cathode}}{4FD_{eff,cathode}P} i\right) \quad (2.11)$$

โดยที่ P คือ ความดัน มีหน่วย บรรยากาศ

p'_i คือ ความดันย่อยขององค์ประกอบ i ที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วย บรรยากาศ

$D_{eff,anode}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่จริงของแก๊สที่ขั้วแอโนด มีหน่วย ตารางเมตร วินาที⁻¹

$D_{eff,cathode}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่จริงของแก๊สที่ขั้วแคโทด มีหน่วย ตารางเมตร วินาที⁻¹

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จริงของแก๊ส (Effective diffusion coefficient) ที่ขั้วอิเล็กโทรด คำนวณได้จากสมการ

$$D_{eff,elethode} = \frac{\varepsilon_p}{\tau_{tortuosity}} D_{molecular,i} \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{D_{molecular,i}} = \frac{1}{D_{bulk,i}} + \frac{1}{D_{knudsen,i}} \quad (2.13)$$

$i \in \{H_2, H_2O, O_2\}$

โดยที่ ε_p คือ ความเป็นรูพรุนของขั้วอิเล็กโทรด

2.3.3 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Power density, P_{SOFC}) คำนวณได้จากสมการ

$$P_{SOFC} = iV \quad (2.14)$$

โดยที่ i คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า มีหน่วย แอมแปร์ ตารางเมตร⁻¹

V คือ ศักย์ไฟฟ้าจริง มีหน่วย โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (SOFC electrical efficiency, \mathcal{E}_{SOFC})

บอกถึงความสามารถของเซลล์เชื้อเพลิงในการเปลี่ยนพลังงานเคมีในแก๊สไฮโดรเจนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการ

$$\mathcal{E}_{SOFC} = \frac{P_{SOFC} A}{x_{H_2} LHV_{H_2} F_{fuel}} \times 100\% \quad (2.15)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารตั้งต้น

LHV_{H_2} คือ ค่าความร้อนต่ำของแก๊สไฮโดรเจน มีหน่วย จูล โมล⁻¹

F_{fuel} คือ อัตราการไหลเชิงโมลของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง มีหน่วย โมล วินาที⁻¹

x_{H_2} คือ อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง

2.3.5 อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel utilization, U_f)

เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการพิจารณาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยอัตราการใช้เชื้อเพลิงเป็นค่าที่แสดงสัดส่วนระหว่างไฮโดรเจนที่ถูกใช้ไปในเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าและแก๊สไฮโดรเจนที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง คำนวณได้จากสมการ

$$U_f = \frac{H_{2,consume}}{H_{2,input}} \quad (2.16)$$

$$U_f = \frac{iA}{2F x_{H_2} F_{fuel}} \quad (2.17)$$

2.3.6 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถพิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าจริงและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (V-I curve) ดังรูปที่ 2.2 โดยเส้นประ คือ ศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี เส้นทึบ คือ ศักย์ไฟฟ้าจริง จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลครบภายในวงจร ศักย์ไฟฟ้าจริงจะมีค่าลดลงจากศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย 3 ชนิด ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวล ในช่วงแรกของกราฟจะเป็นผลของการเกิดศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีคือปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดที่ขั้วแอโนด และปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดที่ขั้วแคโทด ทำให้ต้องมีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งในการทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ เพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น ช่วงกลางของกราฟจะเป็นผลของการเกิดศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า

คือ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนผ่านขั้วอิเล็กโทรด และไอออนเคลื่อนผ่านอิเล็กโทรไลต์ จะทำให้เกิดความต้านทานทางไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรด และความต้านทานการไหลของไอออนในอิเล็กโทรไลต์ และในช่วงสุดท้ายของกราฟจะเป็นผลของการเกิดศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลคือการถ่ายโอนมวลสารเชื้อเพลิงผ่านอิเล็กโทรดที่มีรูพรุน ทำให้ความเข้มข้นของสารเชื้อเพลิงในช่องการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่เข้าทำปฏิกิริยาและบริเวณผิวสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน



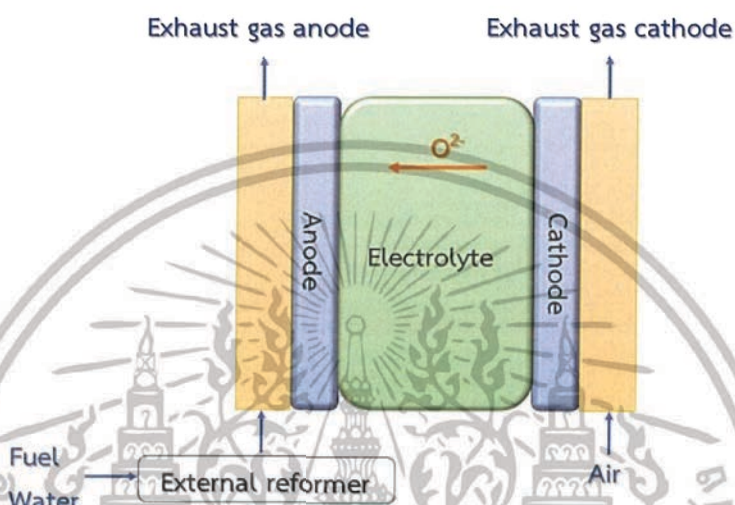
รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง [4]

2.4 รูปแบบการดำเนินการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง [4]

เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีอุณหภูมิในการดำเนินงานค่อนข้างสูง เชื้อเพลิงที่สามารถใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจึงมีความหลากหลาย และสามารถใช้อาหารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ เช่น แก๊สธรรมชาติ มีเทน เอทานอล และเมทานอล เป็นต้น โดยปกติแล้วก่อนนำเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง จะต้องนำเชื้อเพลิงเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปหรือการรีฟอร์มมิงเพื่อเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สไฮโดรเจนก่อน แล้วจึงป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป หรือที่เรียกว่าการรีฟอร์มมิงแบบภายนอกเซลล์เชื้อเพลิง โดยมีรายละเอียดดังหัวข้อที่ 2.4.1 แต่เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีอุณหภูมิในการดำเนินงานช่วงเดียวกันกับการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ จึงสามารถป้อนเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเข้าไปยังเซลล์เชื้อเพลิง แล้วเชื้อเพลิงจะเกิดการเปลี่ยนรูปได้ภายในเซลล์เชื้อเพลิง หรือที่เรียกว่าการรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ การรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง และการรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยอ้อม โดยมีรายละเอียดแสดงดังหัวข้อที่ 2.4.2

2.4.1 การรีฟอร์มมิงแบบภายนอกเซลล์เชื้อเพลิง (External reforming)

รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพของการรีฟอร์มมิงแบบภายนอกเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่จะเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเชื้อเพลิงให้ได้เป็นแก๊สไฮโดรเจน จะแยกออกจากตัวเซลล์ซึ่งกระบวนการทำงานทั้งสองหน่วยที่แยกออกจากกัน ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบได้ดีกว่า และความร้อนที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถนำไปใช้ในระบบต่อไปได้



รูปที่ 2.3 การรีฟอร์มมิงแบบภายนอกเซลล์เชื้อเพลิง [4]

2.4.2 การรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิง (Internal reforming)

การรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิง แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง และการรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยอ้อม

1) การรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง สามารถป้อนเชื้อเพลิงไปยังขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยตรง ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ส่วนปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นจึงนำความร้อนที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงได้ แต่เนื่องจากความแตกต่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด จึงทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิง หากไม่มีการควบคุมความแตกต่างของอุณหภูมิหรือควบคุมไม่ดี อาจทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเสียหายได้

2) การรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยอ้อม จะเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงอยู่ติดกับเซลล์เชื้อเพลิงที่ขั้วแอโนด ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งส่วนของการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงและส่วนของเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่มีผลกระทบทางกายภาพต่อกันเนื่องจากผลของความร้อน แต่ในส่วนของการเปลี่ยนเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนไปเป็นไฮโดรเจนจะเกิดได้น้อยกว่าการเกิดรีฟอร์มมิงภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง



รูปที่ 2.4 การรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง [4]

รูปที่ 2.5 การรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยอ้อม [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง [5]

จากที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4 ว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย ซึ่งโครงการนี้นั้นสนใจใช้กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นเชื้อเพลิง โดยกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล กลีเซอรอลมีปริมาณมากและราคาถูก นอกจากนี้ยังปลอดภัย และไม่เลกุลของกลีเซอรอลมีอะตอมไฮโดรเจนอยู่ถึง 8 อะตอม ซึ่งมากกว่ามีเทนที่เป็นส่วนประกอบหลักในแก๊สธรรมชาติกลีเซอรอลเป็นของเหลว ขนส่งง่าย ไม่เป็นพิษ กลีเซอรอลดิบมีราคาถูก มีสารเจือปนอยู่ เช่น เมทานอล สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ปริมาณและชนิดของสารเจือปนขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล กลีเซอรอลดิบจะมีความบริสุทธิ์ประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณผลผลิตไฮโดรเจนที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลที่นำมาใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การศึกษาประสิทธิภาพและสิ่งแวดล้อมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งพิจารณาความแตกต่างของรูปแบบการรีฟอร์มมิง

Chatrattanawet N. และคณะ [3] ศึกษาภาวะในการดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง โดยพิจารณาถึงความแตกต่างของรูปแบบการรีฟอร์มมิงแบบภายนอกและการรีฟอร์มมิงแบบภายใน จากการศึกษาผ่านการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus พบว่าการรีฟอร์มมิงแบบภายนอก ควรดำเนินงานในส่วนเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และอัตราส่วนโมลของไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 0.5 และเมื่อพิจารณาการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งพบว่า การรีฟอร์มมิงแบบภายนอกและการรีฟอร์มมิงแบบภายใน มีภาวะในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมมีค่าเหมือนกัน คือที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดัน 3 บรรยากาศ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งภายใต้ภาวะการดำเนินงานเดียวกันนี้ การรีฟอร์มมิงแบบภายในมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าดีกว่าที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายนอก และเมื่อพิจารณาการปลดปล่อยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์จากหัวแอโนด เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในมีปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 7.4 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนมอนอกไซด์ 37.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายนอกคือมีปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 1.9 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 32.5 เปอร์เซ็นต์

2.6.2 การศึกษาการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง

Aline L.S. และคณะ [7] ศึกษาภาวะในการดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง เมื่อทำการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้การหาค่าต่ำสุดของพลังงานอิสระของกิบส์ พบว่าแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการไพโรไลซิสของกลีเซอรอล และเมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส พบว่า ความเข้มข้นของคาร์บอนที่เกิดขึ้นลดลงจาก 26.3 ไปจนถึง 3.34 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 564, 392, 159 และ 36 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Aline L.S. และคณะ [8] ศึกษาภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ดำเนินงานในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Intermediate temperature) มีการรีฟอร์มมิงของเชื้อเพลิงกลีเซอรอลแบบภายในโดยตรง โดยพิจารณาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้ไอเล็กโตรไลต์ต่างกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยใช้การหาค่าต่ำสุดของพลังงานอิสระของกิบส์ พบว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง และชนิดของไอเล็กโตรไลต์ที่ใช้ มีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สที่ขั้วแอโนด ตลอดจนขอบเขตเกิดการสะสมของคาร์บอน จากการศึกษาพบว่า ภาวะดำเนินงานที่อุณหภูมิระหว่าง 500-800 องศาเซลเซียส และอัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 99.99 เปอร์เซ็นต์ เป็นภาวะที่ไม่ทำให้เกิดการสะสมของคาร์บอน และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ดำเนินงานในช่วงอุณหภูมิปานกลางจะมีประสิทธิภาพในทางทฤษฎีค่อนข้างสูง โดยประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งใช้ไอเล็กโตรไลต์เป็นไอออนออกซิเจนจะมีค่าอยู่ในช่วง 80.7-89.9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งใช้ไอเล็กโตรไลต์เป็นโปรตอนจะมีค่าประมาณ 90.3-96.7 เปอร์เซ็นต์

2.6.3 ภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยตรง ดังตารางที่ 2.1 พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งนอกจากมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าแล้ว แก๊สที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงยังมีองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สอื่นๆ ในปริมาณค่อนข้างสูง และสามารถนำไปใช้ต่อได้ ซึ่งเป็นมูลเหตุจูงใจในการศึกษาของโครงการงานนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยตรง

งานวิจัย	เชื้อเพลิง	ภาวะดำเนินงาน	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง	แก๊สผลิตภัณฑ์
Aguiar P. et al. [9]	มีเทน	$T_{\text{cell}} = 1,023 \text{ K}$ $P_{\text{cell}} = 1 \text{ bar}$ $i_{\text{ave}} = 0.5 \text{ A/cm}^2$ $U_f = 75 \%$	$V = 0.66 \text{ V}$ $P_{\text{SOFC}} = 0.33 \text{ W/cm}^2$ $\text{Eff} = 47 \%$	H_2O 65 % CO 4 % H_2 15 % CO_2 16 %
Pacharavorachot Y. et al. [10]	มีเทน	$T_{\text{cell}} = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_{\text{cell}} = 1 \text{ atm}$ $V = 0.65 \text{ V}$	$i_{\text{ave}} = 0.74 \text{ A/cm}^2$ $P_{\text{SOFC}} = 0.48 \text{ W/cm}^2$ $\text{Eff} = 33.84 \%$	H_2O 55 % CO 7.3 % H_2 25.2 % CO_2 12.5 %
Chaichana K. et al. [11]	มีเทน	$T_{\text{cell}} = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_{\text{cell}} = 1 \text{ atm}$ $V = 0.64 \text{ V}$	$i_{\text{ave}} = 0.728 \text{ A/cm}^2$ $P_{\text{SOFC}} = 0.466 \text{ W/cm}^2$ $\text{Eff} = 58.61 \%$ $U_f = 80.54 \%$	H_2O 68.9 % CO 3.9 % H_2 11.1 % CO_2 16.0 % CH_4 0.1 %

หมายเหตุ

Eff คือ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง มีหน่วย เปอร์เซ็นต์

i_{ave} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย มีหน่วย แอมแปร์ ตารางเซนติเมตร⁻¹

P_{cell} คือ ความดันในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง มีหน่วย บาร์

P_{SOFC} คือ ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า มีหน่วย วัตต์ ตารางเซนติเมตร⁻¹

T_{cell} คือ อุณหภูมิในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง มีหน่วย เคลวิน

U_f คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง มีหน่วย เปอร์เซ็นต์

V คือ ศักย์ไฟฟ้าจริง มีหน่วย โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

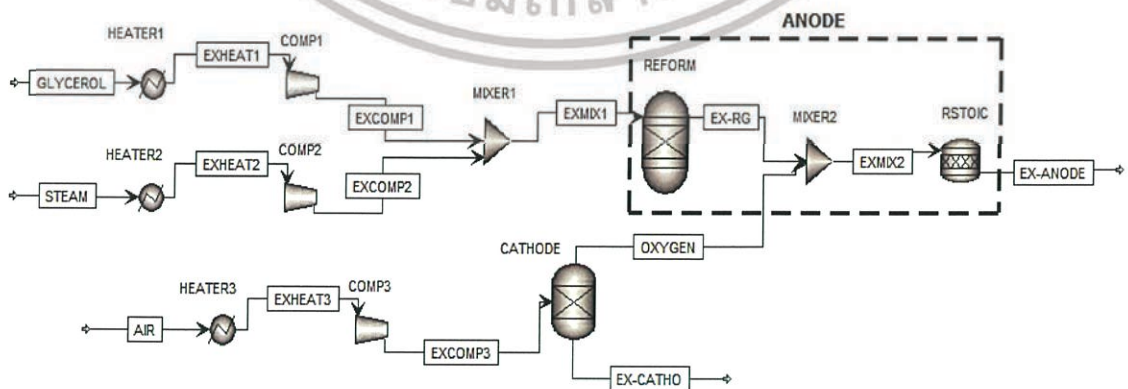
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้ศึกษาภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง โดยการสร้างแบบจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus V9 สำหรับใช้ศึกษาผลของตัวแปรต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยจะพิจารณาหาภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิง ที่จะทำได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุด หรือได้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด หัวข้อที่ 3.1 แสดงแบบจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง แสดงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ต่างๆ จนทำให้ได้ไฟฟ้า และหัวข้อที่ 3.2 จะแสดงขั้นตอนการดำเนินงานในแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้น เพื่อหาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง

3.1 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม

รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม กระบวนการเริ่มจากกลีเซอรอล (GLYCEROL) และไอน้ำ (STEAM) จะถูกให้ความร้อนโดยเครื่องให้ความร้อน และเพิ่มความดันโดยคอมเพรสเซอร์ เพื่อปรับอุณหภูมิและความดันให้เหมาะสม แล้วนำมารวมกันในเครื่องผสม (MIXER1) ก่อนป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ขั้วแอโนด (ANODE) และป้อนอากาศ (AIR) ซึ่งถูกให้ความร้อนและเพิ่มความดันก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงทางด้านขั้วแคโทด (CATHODE) ซึ่งออกซิเจน (OXYGEN) ในอากาศจะถูกแยกออกโดยเครื่องแยกสาร และเคลื่อนไปยังขั้วแอโนดเพื่อทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยรายละเอียดของแบบจำลองและภาวะการดำเนินงานของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แบบจำลองและภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม

หน่วยปฏิบัติการ	แบบจำลอง	ภาวะการดำเนินงาน	
		มาตรฐาน	ช่วงที่ศึกษา
HEATER1	Heater	700 องศาเซลเซียส	700 – 1,000 องศาเซลเซียส
HEATER2			
HEATER3			
COMP1	Compressor	1 บรรยากาศ	1 – 3 บรรยากาศ
COMP2			
COMP3			
MIXER1	Mixer	1 บรรยากาศ	-
MIXER2			
CATHODE	Sep	สัดส่วนการแยก (ออกซิเจน) = 0.21	-
REFORM	Rgibbs reactor	800 องศาเซลเซียส 1 บรรยากาศ	700 – 1,000 องศาเซลเซียส 1 – 3 บรรยากาศ
RSTOIC	Rstoxic reactor	800 องศาเซลเซียส 1 บรรยากาศ ค่าแปลงผัน = 0.1	700 – 1,000 องศาเซลเซียส 1 – 3 บรรยากาศ

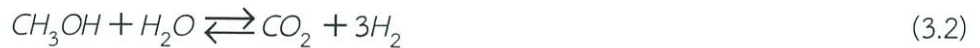
3.1.1 สารตั้งต้น

สารตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่ขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ได้แก่ ก๊าซเซอร์อล 100 เปอร์เซ็นต์ และไอน้ำ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยมีอัตราการไหลของแต่ละสายเท่ากับ 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง ดังนั้นในการจำลองกระบวนการเบื้องต้นค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อก๊าซเซอร์อลจะมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนอากาศซึ่งประกอบไปด้วยออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์ และไนโตรเจน 79 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนนี้จะทำการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อก๊าซเซอร์อล โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของไอน้ำที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยที่การป้อนของสารอื่นๆ มีค่าคงที่

3.1.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม [6]

เมื่อก๊าซเซอร์อลและไอน้ำถูกป้อนเข้ามาในกระบวนการ เริ่มแรกจะเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงซึ่งอยู่ติดกับตัวเซลล์เชื้อเพลิงที่ขั้วแอโนด อุณหภูมิการดำเนินงานอยู่ที่ 800 องศาเซลเซียส โดยปฏิกิริยารีฟอร์มมิงระหว่างก๊าซเซอร์อลและเมทานอล (กรณีที่ใช้ก๊าซเซอร์อลดิบ) กับไอน้ำ แสดงดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากนั้นแก๊สไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาข้างต้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่บริเวณขั้วแอโนด ได้เป็นอิเล็กตรอนและน้ำ ดังสมการ



ด้านขั้วแคโทด แก๊สออกซิเจนในอากาศจะถูกรีดิวซ์ด้วยอิเล็กตรอนที่มาจากขั้วแอโนด เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังสมการที่ (3.4) ได้ไอออนออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด



โดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีรวมจะแสดงดังสมการที่ (3.5) ผลผลิตคือน้ำจะเกิดที่ขั้วแอโนด

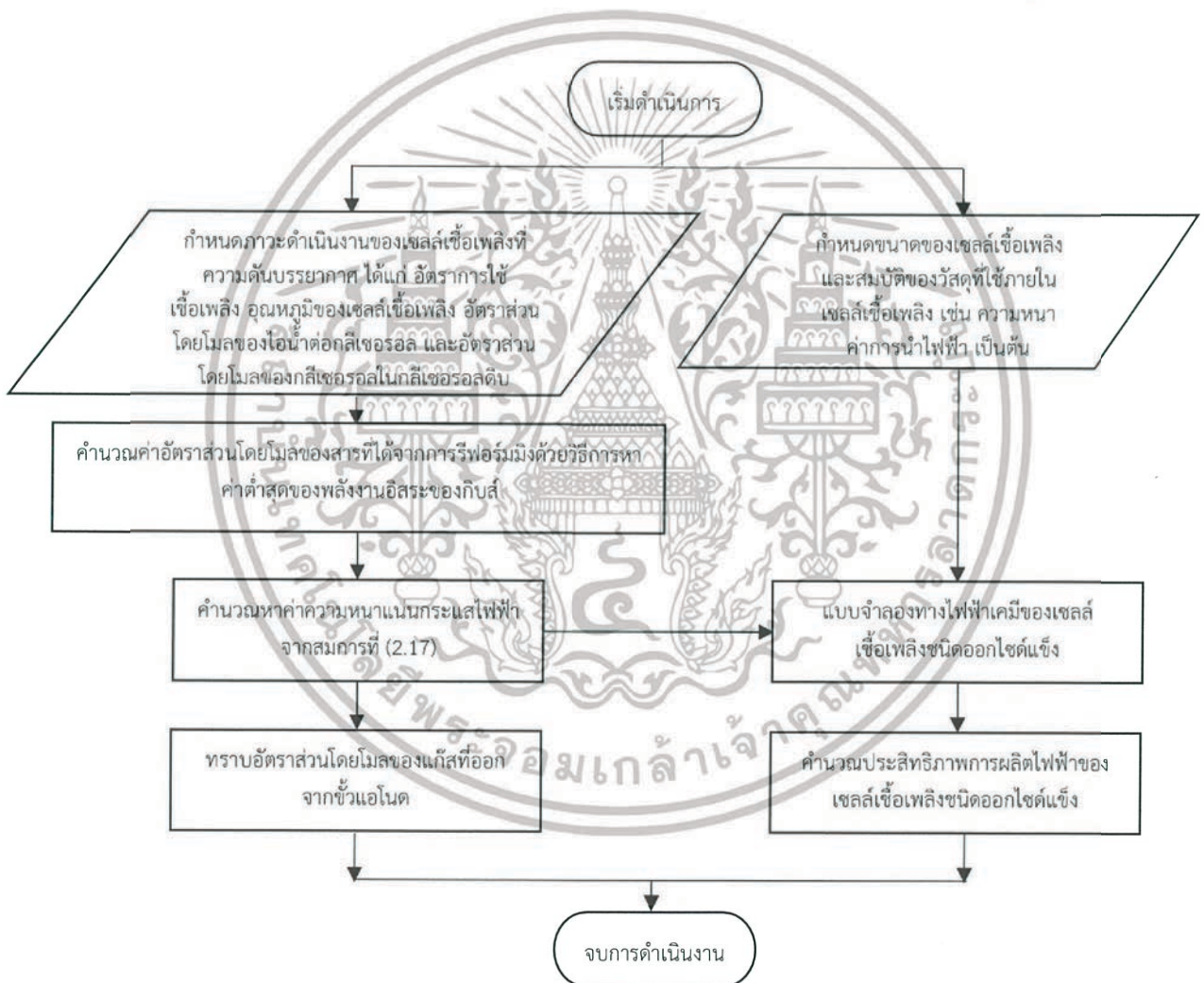


ในการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus V9 ทางด้านขั้วแอโนด สำหรับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์จะใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบ RGibbs และบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจะใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบ RStoic เพื่อที่จะสามารถกำหนดค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงได้ ผ่านการกำหนดค่าแปลงผัน (Conversion) ของแก๊สไฮโดรเจน สำหรับด้านขั้วแคโทดจะใช้แบบจำลองเครื่องแยกสาร Sep เพื่อแยกออกซิเจนออกจากอากาศสำหรับการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เนื่องจากโปรแกรมจำลองกระบวนการ Aspen Plus V9 ไม่สามารถจำลองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเซลล์ดังสมการที่ (3.3) และ (3.4) ได้ จึงพิจารณาว่าปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีรวม (สมการที่ (3.5)) เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด

ในการจำลองกระบวนการจะศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและการผลิตแก๊สสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีปฏิกิริยารีดอกซ์แบบภายใน ซึ่งก็คือการเปลี่ยนอุณหภูมิของแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบ RGibbs และ RStoic ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงคือการเปลี่ยนแปลงค่าแปลงผันของแก๊สไฮโดรเจนในแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบ RStoic

3.2 ขั้นตอนการจำลองกระบวนการ

โครงการนี้เป็นการศึกษาจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยใช้ออมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus V9 เพื่อหาภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าที่สูงที่สุด หรือการผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้มากที่สุด โดยในการจำลองกระบวนการใช้สมการภาวะ (Equation of State) คือ Peng-Robinson เนื่องจากเป็นสมการภาวะที่ใช้กับแก๊สจริงและของเหลวในอุดมคติ ในการจำลองกระบวนการนี้ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง และเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในสถานะของเหลวเป็นสารไม่มีขั้ว จึงสามารถใช้สมการภาวะนี้ในการจำลองกระบวนการได้ และขั้นตอนการจำลองกระบวนการแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยใช้ออม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการจำลองกระบวนการเริ่มจากการกำหนดค่าภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดออกไซด์แข็งที่ความดันบรรยากาศ ได้แก่ อัตราการใช้เชื้อเพลิง อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอล อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบ และกำหนดสมบัติของวัสดุที่ใช้ ยกตัวอย่างเช่น ความหนาของขั้วไฟฟ้าภายในเซลล์เชื้อเพลิง พื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง และค่าการนำไฟฟ้า เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 3.2 ส่วนที่เกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงจะเกิดในเครื่องปฏิกรณ์แบบ RGibbs คำนวณโดยใช้วิธีการหาค่าต่ำสุดของพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy minimization) เพื่อหองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากปฏิกิริยารีฟอร์มมิง (EX-RG) หลังจากนั้น แก๊สเชื้อเพลิงจะเข้าไปในส่วนการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีซึ่งจำลองโดยแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบ RStoic โดยการกำหนดค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงคือการกำหนดค่าแปลงผันของแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งจะทำการทราบปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกจากขั้วแอโนด (EX-ANODE) จากการกำหนดค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง จะทำให้ทราบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ ดังสมการที่ (2.17) แล้วจึงสามารถคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าจริงดังสมการที่ (2.1) – (2.13) เมื่อทราบค่าศักย์ไฟฟ้าจริง ก็สามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดังสมการที่ (2.15)

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองกระบวนการที่ภาวะเริ่มต้น [3]

ตัวแปร	
ความหนาของขั้วแอโนดภายในเซลล์เชื้อเพลิง (τ_{anode} , m)	1.00×10^{-3}
ความหนาของขั้วแคโทดภายในเซลล์เชื้อเพลิง ($\tau_{cathode}$, m)	2.00×10^{-5}
ความหนาของอิเล็กโทรไลต์ภายในเซลล์เชื้อเพลิง ($\tau_{electrolyte}$, m)	8.00×10^{-6}
ค่าการนำไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด (σ_{anode} , $1/\Omega \cdot m$)	12,575
ค่าการนำไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด ($\sigma_{cathode}$, $1/\Omega \cdot m$)	29,944
ค่าการนำไอออนของวัสดุอิเล็กโทรไลต์ ($\sigma_{electrolyte}$, $1/\Omega \cdot m$)	8.44×10^{-1}
พื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง (A , m^2)	55.2
ค่าคงที่ pre-exponential สำหรับไฟฟ้าเคมีขั้วแอโนด (k_{anode} , A/m^2)	6.54×10^{11}
ค่าคงที่ pre-exponential สำหรับไฟฟ้าเคมีขั้วแคโทด ($k_{cathode}$, A/m^2)	2.35×10^{11}
สัมประสิทธิ์การแพร่จริงของแก๊สที่ขั้วแอโนด ($D_{eff,anode}$, m^2/s)	3.66×10^{-5}
สัมประสิทธิ์การแพร่จริงของแก๊สที่ขั้วแคโทด ($D_{eff,cathode}$, m^2/s)	1.37×10^{-5}
ค่าความร้อนต่ำของแก๊สไฮโดรเจน (LHV_{H_2} , J/mol)	242,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

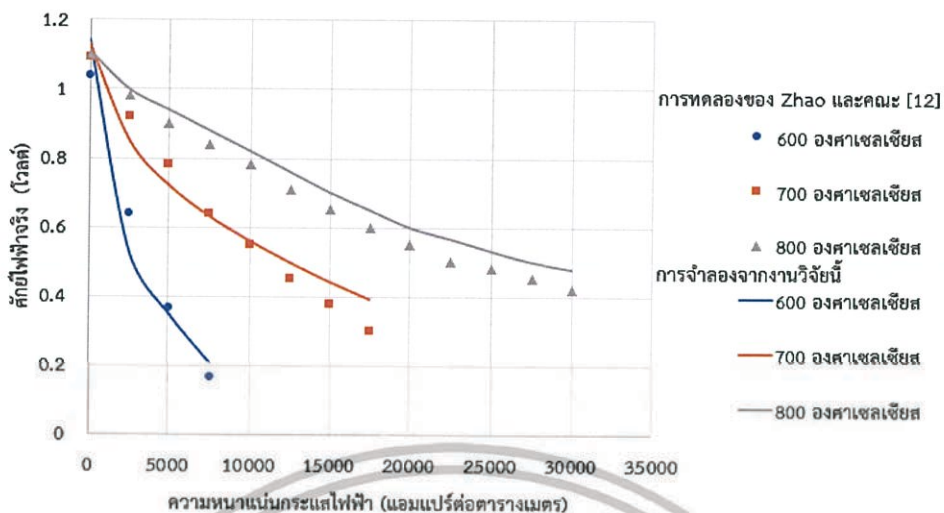
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

โครงการนี้ศึกษาการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน โดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง ผ่านการจำลองกระบวนการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus V9 เพื่อศึกษาหาภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุด หรือได้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด โดยในหัวข้อที่ 4.1 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการ จากนั้นจะศึกษาผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิง อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอล และอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและแก๊สสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิง ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ส่วนหัวข้อที่ 4.5 เป็นการนำเสนอภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสำหรับการผลิตไฟฟ้าสูงสุด หรือได้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด

4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นในโปรแกรม Aspen Plus V9 ก่อนนำแบบจำลองที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 มาใช้ในการศึกษา จึงต้องทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับผลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยของ Zhao และคณะ [12] โดยการทดลองของ Zhao และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าจริงของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิต่างๆ ในการทดลอง ใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน 97 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และน้ำ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งประกอบไปด้วยขั้วแอโนด ขั้วแคโทด และอิเล็กโทรไลต์ ที่มีความหนา 1,000 ไมโครเมตร 20 ไมโครเมตร และ 8 ไมโครเมตร ตามลำดับ และในการทดลองเซลล์เชื้อเพลิงจะดำเนินงานที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส เมื่อทำการจำลองกระบวนการโดยใช้องค์ประกอบของแก๊สที่ป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิง สมบัติของวัสดุ และภาวะในการดำเนินงานเดียวกันกับการทดลอง และนำค่าศักย์ไฟฟ้าจริงที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่ได้จากการจำลองกระบวนการมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จะได้ผลดังรูปที่ 4.1 จากรูปจะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าจริงที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่ได้จากการจำลองกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลองของ Zhao และคณะ [12] ซึ่งมีความผิดพลาด (Error) เฉลี่ยประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 จึงสามารถนำมาใช้ในการศึกษาโครงการนี้ได้



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าจริงที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับผลที่ได้จากการทดลองของ Zhao และคณะ [12]

4.2 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและการผลิตแก๊สสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม

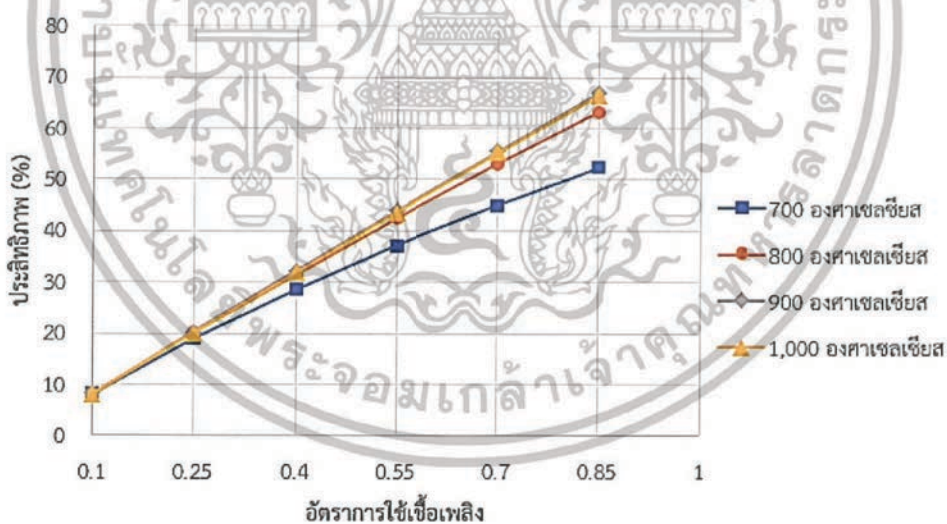
ในการศึกษาผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและการผลิตแก๊สสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง จะกำหนดค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอล (S/G) เท่ากับ 1 เซลล์เชื้อเพลิงดำเนินงานที่ความดันบรรยากาศ และจะทำการปรับเปลี่ยนอัตราการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด 6 ค่า ได้แก่ 0.10, 0.25, 0.40, 0.55, 0.70 และ 0.85 และอุณหภูมิในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.2 แสดงผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า เมื่อพิจารณาผลของการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ ที่อัตราการใช้เชื้อเพลิงในการดำเนินงานคงที่เท่ากับ 0.85 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงจะมีค่ามากขึ้น ทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีจึงมีค่าเพิ่มขึ้นดังสมการ (2.1) และการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนทำให้ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลมีค่าลดลง นอกจากนี้การดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง การนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การเกิดความต้านทานไฟฟาลดลง และการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดได้ดีขึ้น ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจึงลดลงส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าจริงเพิ่มขึ้น จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งซึ่งแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย 3 ชนิดต่อค่าศักย์ไฟฟ้าจริงดังสมการที่ (2.3) เมื่อศักย์ไฟฟ้าจริงมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (2.15) และเมื่อพิจารณาผลของการปรับเปลี่ยนอัตราการใช้เชื้อเพลิงในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะเห็นได้จากรูปที่ 4.2 เมื่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงในการดำเนินงานเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงสูงขึ้น แก๊สไฮโดรเจนที่ได้ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงจะถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น กล่าวคือการเพิ่มอัตราการใช้ไฮโดรเจนจะเป็นการเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่ามากขึ้นด้วย นอกจากนี้จากรูปที่ 4.2 จะสังเกตได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการดำเนินงานจาก 900 เป็น 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้ประสิทธิภาพมีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าจริงลดลง ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจึงลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dokmaingam P. และคณะ [13]

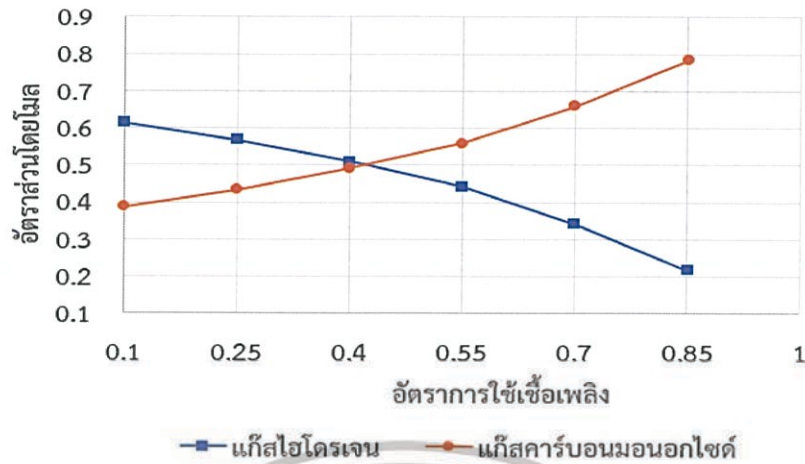
จากผลการจำลองกระบวนการซึ่งแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสและค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.85 จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงสูงที่สุดเท่ากับ 67 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.2 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิและต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1

นอกจากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่อประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าแล้ว ในโครงการนี้ยังสนใจศึกษาผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ที่พิจารณาประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เท่านั้น โดยเมื่อพิจารณาผลของการปรับเปลี่ยนอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิในการดำเนินงานต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิดำเนินงานที่ทำให้ได้แก๊สสังเคราะห์มากกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ แสดงผลการจำลองกระบวนการดังตารางที่ ก.3 ดังนั้นรูปที่ 4.3 แสดงผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จากผลการจำลองกระบวนการจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการใช้เชื้อเพลิงจะส่งผลต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิง โดยอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนจะมีค่าลดลง ในขณะที่อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยการลดลงของแก๊สไฮโดรเจนสามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงสูงขึ้น แก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงจะถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น จึงส่งผลให้แก๊สไฮโดรเจนที่เหลือจากกระบวนการมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dokmaingam P. และคณะ [13] ส่วนการเพิ่มขึ้นของอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่มีผลทำให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีอัตราส่วนโดยโมลเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแก๊สไฮโดรเจนที่เหลือจากกระบวนการเป็นสาเหตุมาจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีมีเพียงแก๊สไฮโดรเจนเท่านั้น ดังนั้นปริมาณหรืออัตราการไหลโดยโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จึงเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้มาจากการรีฟอร์มมิง ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอัตราการไหลเชิงโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าเกือบจะคงที่ เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งดำเนินงานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แต่เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลแล้วจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น

จากผลการจำลองกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1 และอัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.1 จะทำให้ได้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด ซึ่งจะได้แก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 62 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 38 เปอร์เซ็นต์



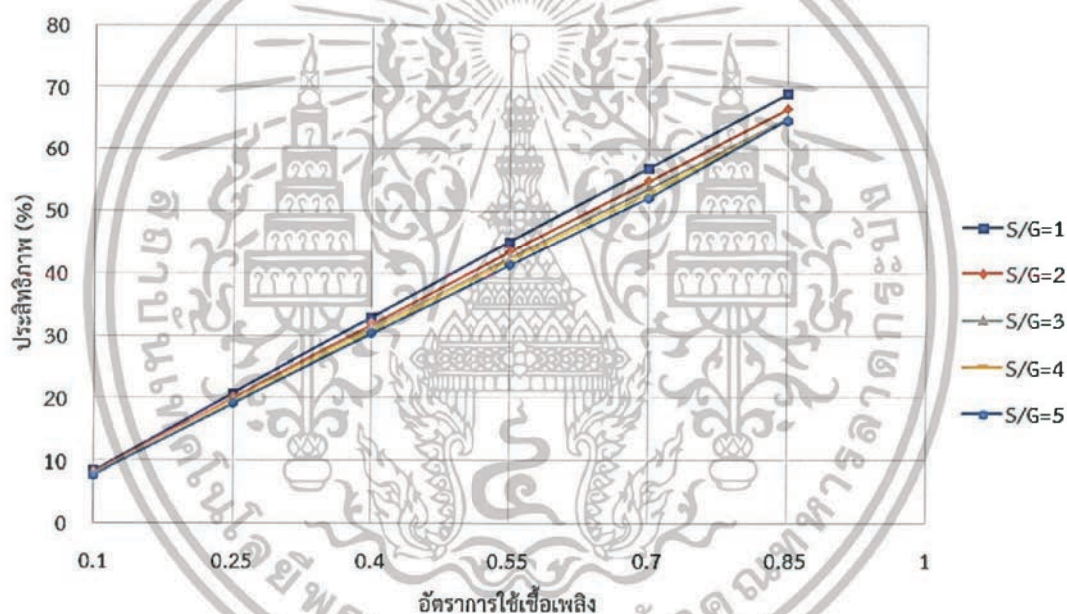
รูปที่ 4.3 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1

4.3 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและการผลิตแก๊สสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม

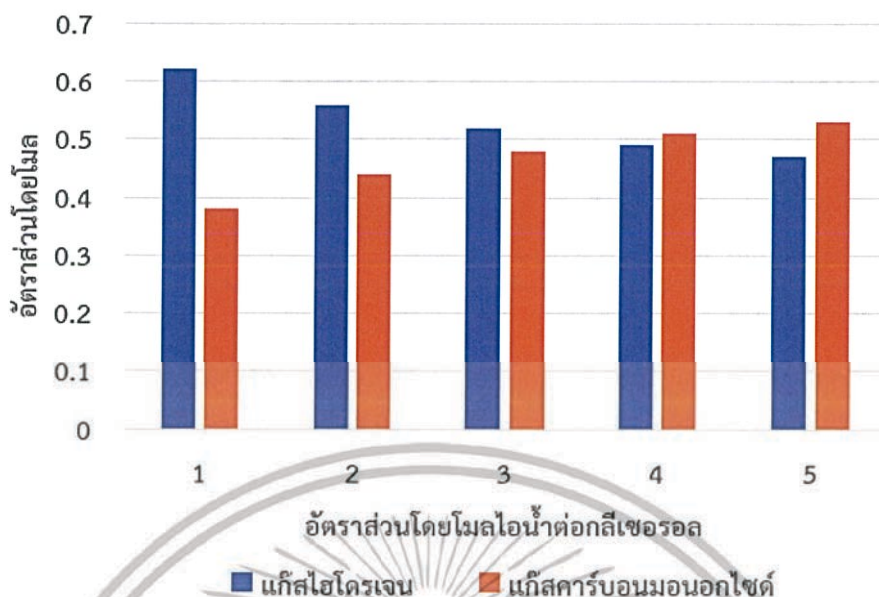
ในการศึกษาผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและการผลิตแก๊สสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม กำหนดอุณหภูมิในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ 900 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุด แสดงผลการจำลองกระบวนการดังตารางที่ ก.4 เซลล์เชื้อเพลิงดำเนินงานที่ความดันบรรยากาศ และทำการปรับเปลี่ยนอัตราการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด 6 ค่า ได้แก่ 0.10, 0.25, 0.40, 0.55, 0.70 และ 0.85 และอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลทั้งหมด 5 ค่า ตั้งแต่ 1 ถึง 5

รูปที่ 4.4 แสดงผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม เมื่อพิจารณาผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1 แนวโน้มของผลเป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 4.2 กล่าวคือ การเพิ่มอัตราการใช้เชื้อเพลิง จะทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จึงได้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ส่วนผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอล ที่อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.85 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าลดลง แม้ว่าในความเป็นจริงแล้วการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอล ซึ่งเป็นการเพิ่มน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยา

รีฟอร์มมิงจะทำให้ได้การผลิตของแก๊สไฮโดรเจนมากขึ้น แต่การใช้อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลที่มากขึ้นเท่ากับมีไอน้ำเหลือจากการทำปฏิกิริยาเหลือมากขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนโดยโมล จึงพบว่าไอน้ำส่วนเกินจะทำให้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาไฟฟาลดลง ซึ่งส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีลดลงด้วย และการมีแก๊สไฮโดรเจนเข้าสู่บริเวณการทำปฏิกิริยาลดลงจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dokmaingam P. และคณะ [13] จากผลการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีและการเพิ่มขึ้นของค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวล จึงส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าจริงลดลง ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจึงมีค่าลดลงไปด้วย อย่างไรก็ตามจากผลการจำลองกระบวนการในรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลมีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าน้อยมาก โดยที่อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.85 และอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1 จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงสูงที่สุดเท่ากับ 67 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.4 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอล (S/G) ต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.1

ในการพิจารณาผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.1 เนื่องจากเป็นภาวะการดำเนินงานที่ทำให้ได้แก๊สสังเคราะห์มากที่สุด แสดงผลการจำลองกระบวนการดังตารางที่ ก.5 ซึ่งจะได้แก๊สสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน 62 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 38 เปอร์เซ็นต์ โดยรูปที่ 4.5 แสดงผลอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม จากผลการจำลองกระบวนการจะเห็นว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1 จะทำให้ได้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลอื่นๆ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอล เป็นการใช้อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลที่มากขึ้นเท่ากับมีไอน้ำเหลือจากการทำปฏิกิริยาเหลือมากขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลจึงพบว่าไอน้ำส่วนเกินจะทำให้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dokmaingam P. และคณะ [13] เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงให้มีค่าคงที่ ทำให้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากข้าวแอนโดมีค่าลดลง ในขณะที่อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแก๊สไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม

ในการศึกษาผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อม กำหนดภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1 เนื่องจากภาวะดังกล่าวจะทำให้ได้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุด แสดงผลการจำลองกระบวนการดังตารางที่ ก.6 ในการศึกษาจะทำการปรับเปลี่ยนอัตราการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด 6 ค่า ได้แก่ 0.10, 0.25, 0.40, 0.55, 0.70 และ 0.85 และศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบ 2 ค่า ได้แก่ 0.8 (กลีเซอรอล 80 เปอร์เซ็นต์ เมทานอล 20 เปอร์เซ็นต์) และ 1 (กลีเซอรอลบริสุทธิ์ 100 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 4.6 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1

รูปที่ 4.6 แสดงผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบ ที่อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.85 จะเห็นได้ว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบที่ 0.8 และ 1 มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่างกันน้อยมากอย่างไม่มีนัยสำคัญ แม้ว่ากรรีฟอร์มมิงของกลีเซอรอลดิบซึ่งประกอบไปด้วยกลีเซอรอล 80 เปอร์เซ็นต์ และเมทานอล 20 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าน้อยกว่ากลีเซอรอล 100 เปอร์เซ็นต์ เพราะการรีฟอร์มมิงของเมทานอลจะได้ไฮโดรเจนออกมาน้อยกว่าการรีฟอร์มมิงของกลีเซอรอล แต่จากการจำลองกระบวนการพบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีนั้นมีความแตกต่างกันน้อยมาก โดยปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีค่าไม่ต่างกัน ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์อื่นๆยังมีค่าคงที่ จึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่างกันน้อยมากอย่างไม่มีนัยสำคัญ จากผลการจำลองกระบวนการแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.85 และอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบเท่ากับ 1 หรือการใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงสูงที่สุดเท่ากับ 67 เปอร์เซ็นต์

4.5 สรุปภาวะการดำเนินงาน

จากการศึกษาการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน โดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง ผ่านการจำลองกระบวนการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus V9 วัตถุประสงค์ของโครงการนี้มุ่งเน้นศึกษาหาภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าที่สูงที่สุด หรือได้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด จากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบไม่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงใช้ผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการของการใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ (กลีเซอรอล 100 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งจากการศึกษาข้างต้นพบว่า ภาวะการดำเนินงานที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ศึกษามีประสิทธิภาพสูงที่สุด คือ เซลล์เชื้อเพลิงควรดำเนินงานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.85 และอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1 ซึ่งทำให้ได้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 67 เปอร์เซ็นต์ และภาวะการดำเนินงานที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ศึกษามีอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด คือ เซลล์เชื้อเพลิงควรดำเนินงานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.1 และอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1 ซึ่งได้แก๊สสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 62 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 38 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยใช้ออมที่โซลิดเซอร์โรลเป็นเชื้อเพลิง ออกแบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่โซลิดเซอร์โรลเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Aspen Plus V9 เพื่อหาภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุดและผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้มากที่สุด

เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นในโปรแกรม Aspen Plus V9 จึงทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับผลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยของ Zhao และคณะ [12] พบว่า มีค่าความผิดพลาด (Error) เฉลี่ยประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งนี้ จึงสามารถนำมาใช้ในการศึกษาโครงการนี้ต่อไป

จากนั้นทำการศึกษาผลของภาวะดำเนินงานต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและแก๊สสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยใช้ออมที่โซลิดเซอร์โรลเป็นเชื้อเพลิง โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการใช้เชื้อเพลิง อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอร์โรล และอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอร์โรลในกลีเซอร์โรลดิบ ผลการจำลองกระบวนการพบว่า ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิในการดำเนินงาน ส่วนการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอร์โรลจะมีผลให้ค่าประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ามีค่าลดลง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอร์โรลในกลีเซอร์โรลดิบไม่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการใช้เชื้อเพลิงจะทำให้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สสังเคราะห์มีค่าลดลง ในขณะที่อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มขึ้นของอัตราการใช้เชื้อเพลิงหมายถึงแก๊สไฮโดรเจนถูกใช้ในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้มีแก๊สไฮโดรเจนที่ออกจากหัวแอดนอยลง

ดังนั้นจากการจำลองกระบวนการพบว่า เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงดำเนินงานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.85 และอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอร์โรลเท่ากับ 1 จะได้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุด มีค่าเท่ากับ 67 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงดำเนินงานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.1 และอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอร์โรลเท่ากับ 1 จะทำให้ได้อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วยแก๊สไฮโดรเจน 62 และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 38 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลของภาวะดำเนินงานต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและแก๊สสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการเกิดการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิง ควรศึกษาการจำลองกระบวนการในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันสูงขึ้น 2-5 บรรยากาศ เนื่องจากในงานวิจัยของของ Chatrattanawet N. และคณะ [3] ได้ทำการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีทั้งการรีฟอร์มมิงแบบภายนอกและการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่ใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง ดำเนินงานที่อุณหภูมิ 800 – 1,000 องศาเซลเซียส ความดัน 1, 3 และ 5 บรรยากาศ พบว่าการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่ความดัน 5 บรรยากาศ มีค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุด ดังนั้นควรมีการศึกษาภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในโดยอ้อมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิงที่ความดัน 2-5 บรรยากาศ เพื่อหาภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น หรือ อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ญาณีพร พัชรวรโชติ และคณะ. “พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง” วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี, ปีที่ 42, 2559. หน้า 50-54.
- [2] พลากร พรหมเมศร์. “เซลล์เชื้อเพลิงพลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต.” วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, 2558. หน้า 157-170.
- [3] Chatrattanawet N. et al. “Performance and environmental study of a biogas-fuelled solid oxide fuel cell with different reforming approach” Energy, 2018, 146: 131-140.
- [4] อมรชัย อภรณ์วิชานพ. “ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าสะอาด” กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561.
- [5] สุธิดา อรรถยานันท์. “ทำความเข้าใจกับกลีเซอรอล ว่าที่แหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต” วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี, ปีที่ 39, 2556. หน้า 49-52.
- [6] ญาณีพร พัชรวรโชติ. “ระบบร่วมของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเหนือวิกฤตของกลีเซอรอลและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบความดันสูง” วารสารวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
- [7] Aline L.S. et al. “Operation of solid oxide fuel cell on glycerol fuel: A thermodynamic analysis using the Gibbs free energy minimization approach” Journal of Power Sources, 2010, 195: 5637-5644.
- [8] Aline L.S., et al. “Thermodynamic study on glycerol-fuelled intermediate-temperature solid oxide fuel cell (IT-SOFCs) with different electrolytes” Hydrogen Energy, 2010, 35: 5580-5593.
- [9] Aguiara P. et al. “Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: model-based steady-state performance” Power Sources, 2004, 138: 120-136.
- [10] Patcharavorachot Y. et al. “Performance evaluation of combined solid oxide fuel cells with different electrolytes” Hydrogen Energy, 2010, 35: 4301-4310.
- [11] Chaichana K. et al. “Neural network hybrid model of a direct internal reforming solid oxide fuel cell” hydrogen Energy, 2012, 37: 249-2508.
- [12] Zhao F. et al. “Dependence of polarization in anode supported solid oxide fuel cells on various cell parameters” Journal Power Sources, 2005, 141: 79-95.
- [13] Dokmaingam P. et al. “Modeling of IT-SOFC with indirect internal reforming operation fueled by methane: effect of oxygen adding as autothermal reforming” Internal Journal of Hydrogen Energy, 2008, 35: 13271-13279

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

(ผลการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าและแก๊สสังเคราะห์)

ตารางที่ ก.1 การเปรียบเทียบค่าศักยภาพไฟฟ้าจริงที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับผลที่ได้จากการทดลองของ Zhao และคณะ [12]

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์/ตาราง เมตร)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)		ความคลาด เคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)
		จากการจำลอง กระบวนการ	จากผลการทดลองของ Zhao และคณะ	
600	0	1.14	1.04	9.62
	2,500	0.63	0.64	1.56
	5,000	0.35	0.37	5.41
	7,500	0.16	0.17	5.88
700	0	1.13	1.09	3.67
	2,500	0.85	0.92	7.17
	5,000	0.72	0.78	7.56
	7,500	0.63	0.64	1.41
	10,000	0.56	0.55	1.64
	12,500	0.50	0.45	10.44
	15,000	0.40	0.38	5.26
	17,500	0.32	0.30	6.67
800	0	1.11	1.10	0.91
	2,500	1.00	0.98	2.04
	5,000	0.94	0.90	4.44
	7,500	0.88	0.84	4.76
	10,000	0.82	0.78	5.13
	12,500	0.76	0.71	7.04
	15,000	0.70	0.65	7.83
	17,500	0.65	0.60	8.33
	20,000	0.60	0.55	8.91
	22,500	0.57	0.50	10.20
	25,000	0.53	0.48	10.63
	27,500	0.50	0.45	10.89
	30,000	0.40	0.42	4.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน ที่ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	ประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)
700	0.10	8.13
	0.25	18.90
	0.40	28.50
	0.55	37.10
	0.70	45.00
	0.85	52.40
	800	0.10
0.25		20.10
0.40		31.50
0.55		42.50
0.70		53.10
0.85		63.30
900		0.10
	0.25	20.20
	0.40	32.10
	0.55	43.90
	0.70	55.50
	0.85	67.00
	1,000	0.10
0.25		19.90
0.40		31.70
0.55		43.50
0.70		55.30
0.85		66.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1

อัตราการใช้เชื้อเพลิง	อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจน	อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์
0.10	0.62	0.38
0.25	0.57	0.43
0.40	0.52	0.48
0.55	0.45	0.55
0.70	0.35	0.65
0.85	0.21	0.79

ตารางที่ ก.4 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ

อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลีเซอรอล	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)
1	0.10	8.30
	0.25	20.70
	0.40	32.90
	0.55	45.00
	0.70	57.00
	0.85	67.00
	2	0.10
0.25		20.00
0.40		31.80
0.55		43.50
0.70		55.00
0.85		66.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลิเซอรอลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ (ต่อ)

อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อกลิเซอรอล	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)
3	0.10	7.89
	0.25	19.60
	0.40	31.15
	0.55	42.56
	0.70	53.82
	0.85	64.90
4	0.10	7.77
	0.25	19.30
	0.40	30.67
	0.55	41.89
	0.70	52.95
	0.85	64.80
5	0.10	7.77
	0.25	19.06
	0.40	30.29
	0.55	41.36
	0.70	52.26
	0.85	64.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อก๊าซเซอร์บอลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายใน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 0.1

อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อก๊าซเซอร์บอล	อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจน	อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์
1	0.62	0.38
2	0.56	0.44
3	0.52	0.48
4	0.49	0.51
5	0.47	0.53

ตารางที่ ก.6 ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนโดยโมลของก๊าสเซอร์บอลในก๊าสเซอร์บอลดิบต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อก๊าซเซอร์บอลเท่ากับ 1

อัตราส่วนโดยโมลของก๊าสเซอร์บอลในก๊าสเซอร์บอลดิบ	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)
0.8	0.10	8.28
	0.25	20.61
	0.40	32.81
	0.55	44.87
	0.70	56.82
	0.85	66.76
1	0.10	8.12
	0.25	20.20
	0.40	32.10
	0.55	43.90
	0.70	55.50
	0.85	67.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล นางสาวปุณยาวีร์ คงกะพันธ์
 วันเกิด 31 ธันวาคม 2539
 ที่อยู่ 265/25 หมู่ 6 ตำบล นาเกลือ อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี 20150
 e-mail mintsee_18959@hotmail.com
 โทรศัพท์ 080 - 4519741
 ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2552 – 2557 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนบางละมุง
- พ.ศ. 2558 – ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์

- นักศึกษาฝึกงาน แผนก Quality Assurance บริษัท ฟงซาน อินเตอร์เนชั่นแนล (ไทยแลนด์) จำกัด ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2561 ถึงวันที่ 31 กรกฎาคม 2561



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้