

การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกันของแก๊สชีวภาพสำหรับ
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

COMPARATIVE STUDY OF DIFFERENT BIOGAS REFORMING PROCESSES
FOR A PROTON-CONDUCTING SOFC



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-220-007

การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกันของแก๊สชีวภาพสำหรับ
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

COMPARATIVE STUDY OF DIFFERENT BIOGAS REFORMING PROCESSES
FOR A PROTON-CONDUCTING SOFC



อัญริญจน์ ปัดภัย
AUNYARIN PADPAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-220-007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPARATIVE STUDY OF DIFFERENT BIOGAS REFORMING PROCESSES
FOR A PROTON-CONDUCTING SOFC



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-220-007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกันสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

Thesis Title Comparative Study of Different Biogas Reforming Processes for a Proton-Conducting SOFC

นักศึกษา นางสาวอัญญิณจน์ ปัดภัย

รหัสประจำตัว 56601213

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ญาณิพร พ็ชรวรโชติ

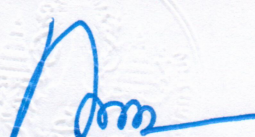
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-220-007

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.แดง	แซ่เป้	แดง แซ่เป้
ผศ.ดร.พรสวรรค์	อัคราแสงรัตน์	อัคราแสงรัตน์
ดร.ธนวรรณ	พิณรัตน์	อานนท์ นิ่งไพบ.
ผศ.ดร.วัลย์รัตน์	จันทร์อัมพร	อลังชัช จันทร์อัมพร
ผศ.ดร.ญาณิพร	พ็ชรวรโชติ	ญาณิพร พ็ชรวรโชติ

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.
 สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น **ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์** ขอสงวนสิทธิ์ในด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้าง **วันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2559** การนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกันสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน
นักศึกษา	นางสาวอัญญิณณ์ ปัดภัย
รหัสประจำตัว	56601213
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ญาณิพร พัชรวรโชติ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สนใจศึกษากระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน 3 กระบวนการ คือ การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ การออกซิเดชันบางส่วน และการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง โดยทำการออกแบบและจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen plus เวอร์ชัน 7.3 เพื่อหากระบวนการรีฟอร์มมิงที่เหมาะสมกับระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ผลการจำลองกระบวนการพบว่า อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพที่เหมาะสมเท่ากับ 6 และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่เหมาะสมเท่ากับ 0.1 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้สูงที่สุดตามมาด้วย กระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง และกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน จากนั้นจะทำการศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนเมื่อป้อนด้วยแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบต่างๆ ผลการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงจะให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงที่สุด ตามมาด้วย ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน นอกจากนี้ผลจากการจำลองกระบวนการยังแสดงให้เห็นว่าระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำต้องการพลังงานมากกว่าระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง ในขณะที่ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนเป็นระบบที่ให้ความร้อนสำหรับการเกิดคาร์บอนที่ทางออกของเชื้อเพลิง (นอกจากแอนอด) พบว่าในช่วงที่ดำเนินงานไม่เกิดคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Comparative study of different biogas reforming processes for a proton conducting solid oxide fuel cell
Student	Miss Nathitapar Padpai
Student ID.	56601213
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Yaneeporn Patcharavorachot

ABSTRACT

In this research, the power generation from a proton conducting solid oxide fuel cell (SOFC-H⁺) system integrated with different biogas reforming processes, i.e., steam reforming (SR), partial oxidation (POX) and autothermal reforming (ATR) were investigated to identify the favorable reforming process for an SOFC-H⁺ system using design and process simulation program with Aspen plus version 7.3. The simulation results showed that steam to biogas molar ratio of 6 and oxygen to biogas molar ratio of 0.1 were the optimum ratio. Considering the operation of reforming processes on hydrogen production, it was found that SR provides the highest amount of hydrogen product, followed by ATR and POX, respectively. Then, the electrical efficiency of the SOFC-H⁺ system fuelled by the synthesis gas obtained from reforming process is examined. The simulation results showed that the SOFC-H⁺ system integrated with ATR has the highest electrical efficiency, followed by the SOFC-H⁺ system integrated with SR and POX, respectively. Furthermore, the simulation results revealed that the SOFC-H⁺ system integrated with SR requires higher heat consumption than that with ATR, whereas the SOFC-H⁺ system integrated with POX provides heat to the surrounding. There were no carbon formation on the anode support in operate simulated studied range.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ ท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ และยังให้การสนับสนุนจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อมรชัย อภรณ์วิชานพ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม Aspen Plus ในการทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ ผศ.ดร.วลัยรัตน์ จันทระอัมพร ผศ.ดร.ธนวรรณ พิณ รัตน์ และ ผศ.ดร.แดง แซ่เบ๊ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะ และให้คำปรึกษาในการ จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าว นามที่อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุนทั้งร่างกายและแรงใจตลอดมา หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาด ประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับและขออภัยไว้ ณ ที่นี้ คุณความดีใดที่จะเกิดจากงานนี้ ขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุก ท่าน

อัญญิณณ์ ปัตถ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
รายการสัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง	4
2.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง	4
2.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	4
2.3.1 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	5
2.3.2 ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์	5
2.3.3 อิเล็กโทรไลต์	5
2.4 การหาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง	7
2.4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี	7
2.4.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าจริง	8
2.4.3 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	8
2.4.4 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร	8
2.4.5 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า	8
2.4.6 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง	9
2.5 การดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	11
2.5.1 การรีฟอร์มมิงแบบภายในของเซลล์เชื้อเพลิง	11
2.5.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าจริง	11
2.6 แก๊สชีวภาพ	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากแก๊สชีวภาพ.....	12
2.7.1 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ.....	12
2.7.2 กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน	13
2.7.3 กระบวนการอโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง	13
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	17
3.1 กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจน.....	17
3.2 กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบ นำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพ	19
3.3 วิธีการจำลองกระบวนการ	20
3.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	21
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการจำลองกระบวนการ	25
4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนกับงานวิจัยที่อ้างอิง	25
4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพและออกซิเจนต่อ แก๊สชีวภาพที่ส่งผลต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน	27
4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อการผลิต แก๊สไฮโดรเจน.....	29
4.4 การเปรียบเทียบแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน ทั้ง 3 กระบวนการ	29
4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพและออกซิเจนต่อ แก๊สชีวภาพที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง.....	31
4.6 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพและออกซิเจน ต่อแก๊สชีวภาพที่มีต่อค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติงาน	33
4.7 ค่าความร้อนรวมของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ	36
4.8 การเกิดคาร์บอนของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและ กระบวนการรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน	37
4.9 สภาพการดำเนินงานที่เหมาะสม	37
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	39
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก	42
ภาคผนวก ก	43
ประวัติผู้เขียน	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และไม่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง.....	6
2.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการผลิตไฮโดรเจนในแต่ละกระบวนการ.....	13
3.1 รายละเอียดของแบบจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมและสภาวะที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ	18
3.2 สภาวะการดำเนินงานที่ใช้ในการศึกษากระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการชนิดต่างๆ	20
3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	23
4.1 สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพแบบต่างๆ แสดงผลของประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ค่าความร้อน และโอกาสในการเกิดคาร์บอนของระบบร่วมเมื่อใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงที่ต่างชนิดกัน	38
ก.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่ส่งผลต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิเครื่องรีฟอร์มเมอร์ 873 เคลวิน.....	45
ก.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน.....	46
ก.3 ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน.....	47
ก.4 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ	48
ก.5.1 ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ	49
ก.5.2 ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันรีฟอร์มมิง มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ	49
ก.5.3 ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ	50
ก.5.4 ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันรีฟอร์มมิง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ	50
ก.6 ค่าความร้อนรวมของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ	51
ก.7.1 การเกิดคาร์บอนของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.7.2 การเกิดคาร์บอนของระบบรวมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการ ออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1)...53	
ก.7.3 การเกิดคาร์บอนของระบบรวมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการ ออกซิเดชันบางส่วน.....54	
ก.7.4 การเกิดคาร์บอนของระบบรวมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการ ออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6)55	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1. หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง:	
(ก) อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออน และ (ข) อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน.....	7
2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า.....	10
2.3 การรีฟอร์มมิงแบบภายในของเซลล์เชื้อเพลิง	10
2.4 การรีฟอร์มมิงแบบภายนอกของเซลล์เชื้อเพลิง	10
3.1 แบบจำลองการผลิตแก๊สไฮโดรเจน.....	18
3.2 ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพ.....	19
3.3 วิธีการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน	24
4.1 เปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองกระบวนการของ Chiodo และคณะ [20] (สัญลักษณ์สีฟ้า) กับผลการจำลองกระบวนการงานวิจัยนี้ (สัญลักษณ์สีชมพู) ของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ	26
4.2 เปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองกระบวนการของ Chiodo และคณะ [20] (สัญลักษณ์สีฟ้า) กับผลการจำลองกระบวนการงานวิจัยนี้ (สัญลักษณ์สีชมพู) ของกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน	26
4.3 เปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองกระบวนการของ Chiodo และคณะ [20] (สัญลักษณ์สีฟ้า) กับผลการจำลองกระบวนการงานวิจัยนี้ (สัญลักษณ์สีชมพู) ของกระบวนการออกซิเดชันของรีฟอร์มมิง.....	27
4.4 ผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำแก๊สชีวภาพที่มีต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน.....	28
4.5 ผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่มีต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน.....	28
4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน.....	30
4.7 ผลผลิตที่ได้ออกมาจากการจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน.....	30
4.8 ผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ 873 เคลวิน	32
4.9 ผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ 873 เคลวิน.....	32
4.10 (ก) ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ X ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 (ข) ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพของระบบรวมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1).....	34
4.10 (ค) ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพของระบบรวมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน.....	35
4.10 (ง) ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพของระบบรวมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6).....	35
4.11 ค่าความร้อนรวมของแต่ละหน่วยปฏิบัติการในระบบรวมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบต่างๆ.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และXต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T	อุณหภูมิ	เคลวิน
P	ความดัน	บาร์
R	ค่าคงที่ของแก๊ส	กิโลจูลต่อกิโลโมล เคลวิน
F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์	คูลอมบ์ต่อโมล
E^{OCV}	ศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี	โวลต์
E^{O}	ศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะความดันมาตรฐาน	โวลต์
V	ศักย์ไฟฟ้าจริง	โวลต์
i	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	แอมแปร์ต่อตารางเมตร
$i_{\text{O,anode}}$	ความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนที่ขั้วแอโนด	แอมแปร์ต่อตารางเมตร
$i_{\text{O,cathode}}$	ความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนที่ขั้วแคโทด	แอมแปร์ต่อตารางเมตร
P_i	ความดันย่อยของแก๊สองค์ประกอบ i	บาร์
P_i^t	ความดันย่อยของแก๊สองค์ประกอบ i ณ บริเวณที่เกิดปฏิกิริยา	บาร์
$D_{\text{a,eff}}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สทางด้านขั้วแอโนด	ตารางเมตรต่อวินาที
$D_{\text{c,eff}}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สทางด้านขั้วแคโทด	ตารางเมตรต่อวินาที
P_w	กำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง	วัตต์ต่อตารางเมตร
A	พื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง	ตารางเมตร
LHV	ค่าเอนทาลปีที่การเผาไหม้ขั้นต่ำ	กิโลจูลต่อโมล
\dot{n}_i	อัตราการไหลเชิงโมลของสาร i	กิโลโมลต่อชั่วโมง
η_{act}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	โวลต์
η_{ohm}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า	โวลต์
η_{conc}	ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร	โวลต์
η_{SOFC}	ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง	เปอร์เซ็นต์
$\sigma_{\text{electrolyte}}$	การนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์	1ต่อโอห์ม เมตร
τ_{anode}	ความหนาของขั้วแอโนด	ไมโครเมตร
τ_{cathode}	ความหนาของขั้วแคโทด	ไมโครเมตร
$\tau_{\text{electrolyte}}$	ความหนาของอิเล็กโทรไลต์	ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และXlต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้มีการศึกษาและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) กันมากขึ้น เนื่องจากการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในประเทศอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น จีน มาเลเซีย อินเดีย รวมถึงประเทศไทย เซลล์เชื้อเพลิงมีหลากหลายชนิดโดยนิยมแบ่งตามอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel cell, AFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEM) เซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้เมทานอลโดยตรง (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) เป็นต้น [1]

ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง เนื่องจากเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ดำเนินงานด้วยอุณหภูมิสูง (ประมาณ 1,073 ถึง 1,273 เคลวิน) จึงมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น นอกจากนี้ยังไม่จำเป็นต้องใช้โลหะราคาแพงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และสามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถใช้อิเล็กโทรไลต์ได้สองแบบ คือ อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออน (Oxygen-ion conducting electrolyte) และอิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอน (Proton conducting electrolyte) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออน (Oxygen-ion conducting SOFC, SOFC-O²⁻) อิเล็กโทรไลต์จะมีการนำไอออนได้ดีในช่วงอุณหภูมิสูง มีเสถียรภาพทางเคมีและมีความต้านทานต่ำ [2] แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากน้ำจะเกิดขึ้นทางด้านขั้วแอโนดทำให้ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนเจือจาง ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีลดลง นอกจากนี้ยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำเชื้อเพลิงที่เหลืกลับมาใช้ประโยชน์ ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน (Proton-conducting SOFC, SOFC-H⁺) อิเล็กโทรไลต์จะมีการนำไอออนได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 573 ถึง 973 เคลวิน) ทำให้สามารถเลือกใช้วัสดุได้หลากหลาย ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิง อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น [3] โดยในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงชนิด ออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน เนื่องจากน้ำได้ถูกผลิตขึ้นทางด้านขั้วแคโทด ทำให้ด้านขั้วแอโนดมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีความศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออน

ในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งไม่จำเป็นต้องใช้แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงเท่านั้น แต่ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เช่น แก๊สธรรมชาติ เมทานอล เอทานอลและแก๊สชีวภาพ เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยในงานวิจัยนี้สนใจใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง เนื่องจากแก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงหมุนเวียนที่หาง่ายภายในประเทศ สามารถลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก [4] นอกจากนี้แก๊สชีวภาพประกอบด้วยแก๊สมีเทนประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สอื่นๆ (ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย น้ำ ออกซิเจน และไฮโดรเจน [5] ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามก่อนที่จะนำแก๊สชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิด

ออกไซด์แข็ง ควรทำการเปลี่ยนรูปแก๊สชีวภาพให้เป็นแก๊สไฮโดรเจนก่อนป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนจะถูกนำมาใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

กระบวนการเปลี่ยนรูปในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกัน 3 กระบวนการ คือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming, SR) กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation, POX) และกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (autothermal reforming, ATR) ซึ่งแต่ละกระบวนการใช้อุณหภูมิในการดำเนินงานแตกต่างกัน ให้ชนิดและปริมาณของแก๊สสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้กระบวนการทั้ง 3 กระบวนการ มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งการเลือกใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงจึงมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพ โดยจะพิจารณาสถานะการดำเนินงานและเปรียบเทียบผลของการใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน 3 กระบวนการ เพื่อวิเคราะห์หาสถานะการดำเนินงานและกระบวนการรีฟอร์มมิงที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษากระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน 3 กระบวนการ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สร้างแบบจำลองและจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน 3 กระบวนการ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus เวอร์ชัน 7.3 โดยใช้สารตั้งต้นเป็นแก๊สชีวภาพซึ่งประกอบด้วยแก๊สมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์

1.3.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่ส่งผลต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

1.3.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ส่งผลต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

1.3.4 เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงทั้ง 3 กระบวนการ

1.3.5 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

1.3.6 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่ส่งผลต่อค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ ได้แก่ เครื่องทำความร้อน (Heater) เครื่องรีฟอร์มเมอร์ (Reformer) และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

1.3.7 เปรียบเทียบค่าความร้อนรวมของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ ได้แก่ เครื่องทำความร้อน (Heater) เครื่องรีฟอร์มเมอร์ (Reformer) และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

1.3.8 ศึกษาการเกิดคาร์บอนบนขั้วแอโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถออกแบบและจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบรวมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบต่างๆได้

1.4.2 ทราบสถานะและกระบวนการรีฟอร์มมิงที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินงานผลิตไฟฟ้าจากระบบรวมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกันได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงคืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงผันพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) และ ออกซิเจนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเซลล์เชื้อเพลิงมีหลักการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่แตกต่างจาก แบตเตอรี่ คือกำลังของเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ลดลงและไม่มีการประจุไฟใหม่ เซลล์เชื้อเพลิงจะให้กระแสไฟฟ้า ความร้อน และน้ำตราบเท่าที่เชื้อเพลิงและออกซิเจนยังป้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง [3] ซึ่งกระบวนการ เปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานเคมีมีประสิทธิภาพในการแปรรูปพลังงานสูงกว่า กระบวนการผลิต ไฟฟ้าแบบดั้งเดิมซึ่งจะดำเนินการโดยนำเชื้อเพลิงมาเผาให้ความร้อน นำความร้อนไปขับเคลื่อนเครื่องยนต์ และพลังงานกลจากเครื่องยนต์ถูกนำไปใช้ในการปั่นไฟฟ้า ซึ่งทุกขั้นตอนของการแปรรูปพลังงานจาก รูปแบบหนึ่งไปอีกรูปแบบหนึ่งมีการสูญเสียพลังงาน ดังนั้นการแปรรูปพลังงานผ่านกระบวนการ เคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง ช่วยลดขั้นตอนเหล่านี้ลง จึงช่วยลดการสูญเสียและความซับซ้อนของกระบวนการ [6] นอกจากนี้ยังช่วยลดการใช้เชื้อเพลิง และยังสามารถลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็น สาเหตุการเกิดแก๊สเรือนกระจก ของเสียที่จะเกิดขึ้นจากการแปรรูปพลังงานจะมีเพียงความร้อนและน้ำ เท่านั้น ดังนั้นถ้านำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ในการยานยนต์จะช่วยลดปริมาณแก๊สเรือนกระจกที่ปล่อยออก จากท่อไอเสียยานยนต์อย่างมาก

2.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการใช้งานปัจจุบันมีหลายชนิด โดยสามารถแบ่งประเภทได้จากการพิจารณา ชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีความ แตกต่างกัน โดยลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

2.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความ น่าสนใจ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงในช่วง 873 ถึง 1,273 เคลวิน จึง เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ โดยข้อดีของ การดำเนินงานที่อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง จะทำให้ปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดเกิดขึ้น ได้อย่างรวดเร็ว จึงไม่จำเป็นต้องใช้โลหะราคาแพงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังสามารถเลือกใช้ เชื้อเพลิงได้หลากหลาย กล่าวคือ ไม่จำเป็นต้องใช้เพียงแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิง แต่ยังใช้ แก๊สไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่น เช่น แก๊สธรรมชาติ เมทานอล เอทานอลและแก๊สชีวภาพ เป็นเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากสามารถเกิดการรีฟอร์มมิงภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้ นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ แข็งยังสามารถดำเนินงานร่วมกับกังหันแก๊สซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เพิ่มขึ้น [7] อย่างไรก็ตามการดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งอาจพบปัญหา หลายประการ เช่น เซลล์เชื้อเพลิงอาจเกิดการแตกหักเนื่องจากเกิดความเค้นภายในหรือเกิดการ ขยายตัวทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ภายในเซลล์ นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุที่สามารถทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

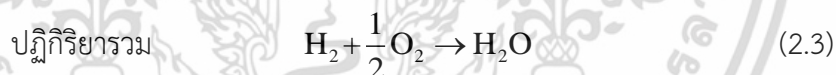
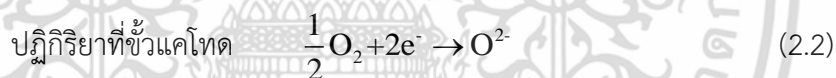
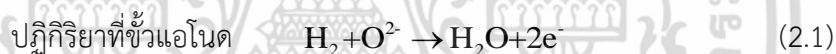
อุณหภูมิสูงได้ ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงสูงตามไปด้วย และการดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงอาจมีผลต่ออายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง [4] โดยเซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ

2.3.1 ขั้วแอโนด (Anode) คือ ขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุลบกับเซลล์เชื้อเพลิง โดยหลักการทำงานคือแก๊สไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้ามาขั้วแอโนดและถูกออกซิไดซ์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ได้อิเล็กตรอนเป็นผลิตภัณฑ์ โดยอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดผ่านวงจรภายนอกไปยังขั้วแคโทดทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าออกมา

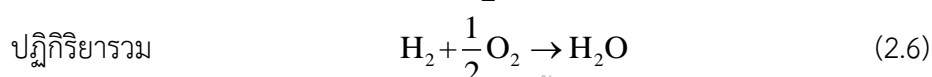
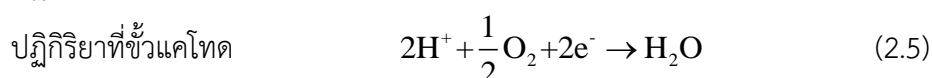
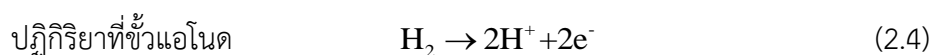
2.3.2 ขั้วแคโทด (Cathode) คือขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุบวกกับเซลล์เชื้อเพลิง โดยแก๊สออกซิเจนจะถูกป้อนเข้ามาขั้วแคโทด เมื่อรับอิเล็กตรอนจากวงจรภายนอกเข้ามาจะถูกรีดิวซ์เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) ของออกซิเจนที่บริเวณพื้นผิวระหว่างแคโทดกับอิเล็กโตรไลต์

2.3.3 อิเล็กโตรไลต์ (Electrolyte) มีหน้าที่ถ่ายโอนไอออนจากขั้วไฟฟ้าด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง โดยทั่วไปเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถใช้อิเล็กโตรไลต์ได้ 2 ประเภท คือ

1) อิเล็กโตรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออน (Oxygen-ion conducting electrolyte) อิเล็กโตรไลต์ชนิดนี้จะมีเสถียรภาพทางเคมีสูงและมีความต้านทานต่ำ หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโตรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออนแสดงดังรูปที่ 2.1(ก) และเกิดปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาที่ (2.1) ถึง (2.3) จากรูปที่ 2.1(ก) จะเห็นว่าน้ำเกิดขึ้นด้านขั้วแอโนด จึงทำให้ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนเจือจางลง ส่งผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีที่ลดลง นอกจากนี้ยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำเชื้อเพลิงที่เหลือกลับมาใช้ประโยชน์ [4]



2) อิเล็กโตรไลต์แบบนำโปรตอน (Proton conducting electrolyte) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนได้รับความสนใจมากขึ้นในปัจจุบันสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากพบว่าอิเล็กโตรไลต์ชนิดนี้มีการนำไอออนได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำลง ทำให้สามารถเลือกใช้วัสดุได้หลากหลายมากขึ้น จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิง อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น [8] โดยรูปที่ 2.1(ข) แสดงหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโตรไลต์แบบนำโปรตอน และเกิดปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาที่ (2.4) ถึง (2.6) อิเล็กโตรไลต์ชนิดนี้แม้จะมีความต้านทานไฟฟ้าสูง แต่การที่น้ำได้ถูกผลิตขึ้นทางด้านขั้วแคโทด ทำให้น้ำไม่สามารถไปเจือจางแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนด ส่งผลให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีสูงขึ้น [3,9]

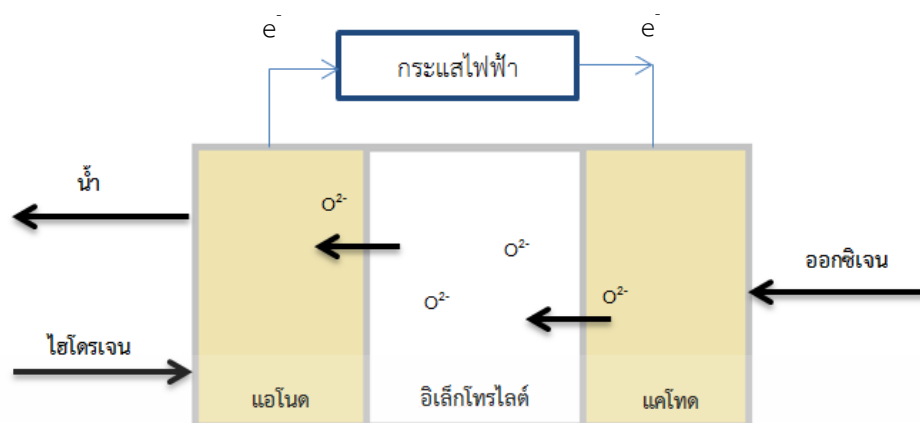


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

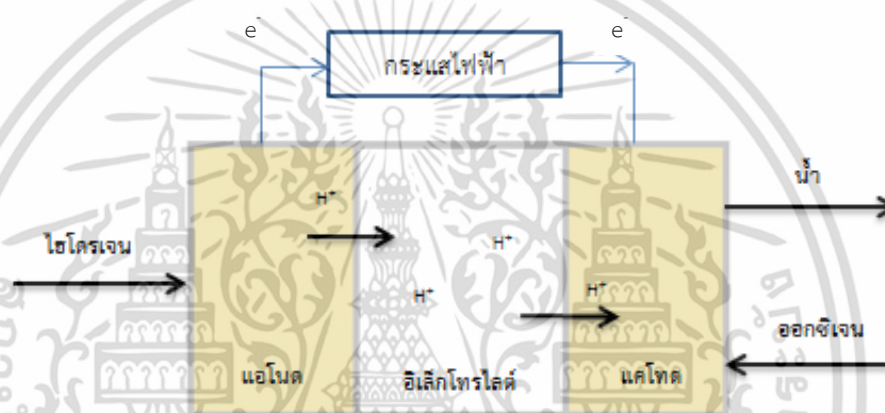
ตารางที่ 2.1 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง [8]

ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง	อิเล็กโทรไลต์	อุณหภูมิ (เคลวิน)	เชื้อเพลิง
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด แอลคาไลน์ (Alkaline fuel cell, (AFC))	โพแทสเซียมไฮดรอก- ไซด์	323 – 473	ไฮโดรเจนหรือ ไฮโดรคาร์บอน
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด ใช้เมทานอลโดยตรง (Direct methanol fuel cell, (DMFC))	โพลีเมอร์	333 – 473	เมทานอล
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cell (PAFC))	กรดฟอสฟอริก	433 – 483	ไฮโดรเจนจาก ไฮโดรคาร์บอนและ แอลกอฮอล์
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด กรดซัลฟูริก (Sulphuric acid fuel cell, (SAFC))	กรดซัลฟูริก	353 – 363	แอลกอฮอล์หรือ ไฮโดรเจน
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด เยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton-exchange membrane fuel cell, (PEMFC))	แผ่นเยื่อบางๆทำจากพอลิ เมอร์ชนิดฟลูออโร- ซิลโฟเนต	323 – 353	ไฮโดรเจนจาก ไฮโดรคาร์บอนหรือ เมทานอล
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด คาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten carbonate fuel cell, (MCFC))	เกลือคาร์บอเนต เช่น โซเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียม- คาร์บอเนต	903 – 923	ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สธรรมชาติ โพรเพน
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด ออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell, (SOFC))	สารประกอบ เซอร์โคเนียออกไซด์ และ เพอร์อฟสไกต์	873 – 1,273	แก๊สธรรมชาติ โพรเพน แก๊สชีวภาพ
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด โพลีเมอร์แข็ง (Solid polymer fuel cell, (SPFC))	ซิลโฟเนต โพลีสเตอร์รีน	363	ไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง: (ก) อิเล็กโทรไลต์แบบนำออกซิเจนไอออน และ (ข) อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน

2.4 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

2.4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี (Theoretical open-circuit voltage, E^{OCV}) ของเซลล์เชื้อเพลิง เป็นการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้ารอบวงจรไฟฟ้า สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7)

$$E^{OCV} = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2O(ca)}}{P_{H_2(an)} P_{O_2(ca)}^{0.5}} \right) \quad (2.7)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าจริง (Operating cell voltage or actual fuel cell voltage, V) โดยทั่วไปแล้วค่าศักย์ไฟฟ้าจริงจะมีค่าต่ำกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี เนื่องจากภายในเซลล์เกิดความต้านทานและมีการสูญเสียศักย์ไฟฟ้า (ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นของสาร) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.9)

$$V = E^{\text{OCV}} - (\eta_{\text{act}} + \eta_{\text{ohm}} + \eta_{\text{conc}}) \quad (2.9)$$

2.4.3 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Activation overpotential, η_{act}) เกิดจากการที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยสารที่เข้าทำปฏิกิริยามีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้น สามารถหาได้จากสมการของ Butler-Volmer ดังสมการที่ (2.10) และ สมการที่ (2.11)

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

$$\eta_{\text{act,cathode}} = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{i}{2i_{0,\text{cathode}}} + \sqrt{\left(\frac{i}{2i_{0,\text{cathode}}}\right)^2 + 1} \right) \quad (2.11)$$

2.4.4 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic overpotential, η_{ohm}) เกิดจากการไหลของไอออนในอิเล็กโทรไลต์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนาและการนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าสามารถแสดงได้ในเทอมของคุณสมบัติของอิเล็กโทรไลต์ตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) ดังสมการที่ (2.12)

$$\eta_{\text{ohm}} = i \frac{\tau_{\text{electrolyte}}}{\sigma_{\text{electrolyte}}} \quad (2.12)$$

2.4.5 ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร (Concentration overpotential, η_{conc}) เกิดจากเชื้อเพลิงถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วในการทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่บริเวณผิวระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างความเข้มข้นของเชื้อเพลิงระหว่างที่ช่องทางเข้าและบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14)

$$\eta_{\text{conc,anode}} = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{P_{\text{H}_2(\text{an})}}{P_{\text{H}_2(\text{an})}^1} \right) \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta_{\text{conc,cathode}} = \frac{RT}{F} \ln \left(\left(\frac{p_{\text{O}_2(\text{ca})}}{p_{\text{O}_2(\text{ca})}^I} \right)^2 \frac{p_{\text{H}_2\text{O}(\text{ca})}^I}{p_{\text{H}_2\text{O}(\text{ca})}} \right) \quad (2.14)$$

เมื่อค่า $p_{\text{H}_2(\text{an})}^I$ คือค่าความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจนที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วแอโนดและอิเล็กโทรไลต์ $p_{\text{O}_2(\text{ca})}^I$ และ $p_{\text{H}_2\text{O}(\text{ca})}^I$ คือค่าความดันย่อยของออกซิเจนและน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2.15) ถึง (2.17) [9]

$$p_{\text{H}_2}^I = P - (P - p_{\text{H}_2(\text{an})}) \exp \left(\frac{iRT\tau_{\text{anode}}}{2FD_{\text{a,eff}}P} \right) \quad (2.15)$$

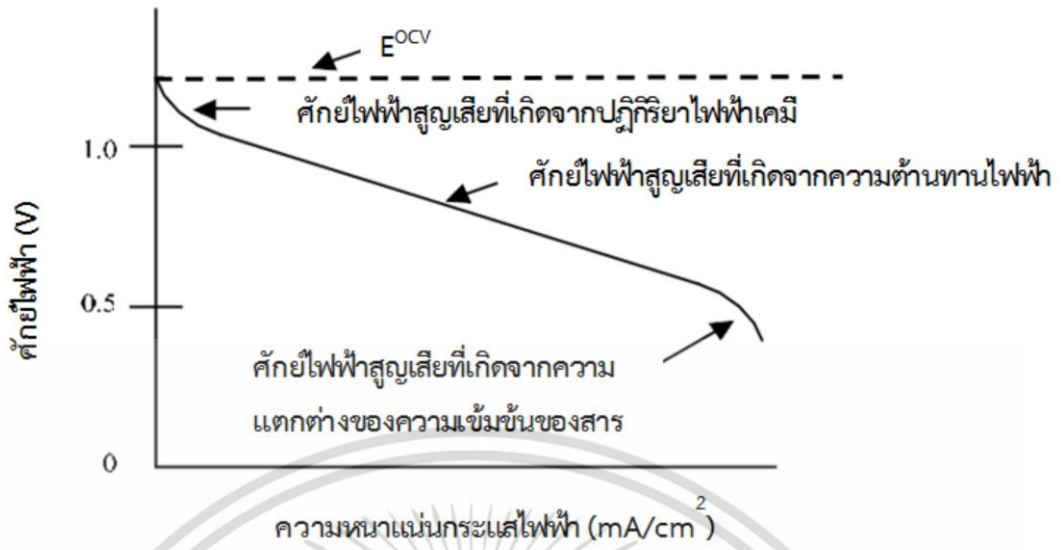
$$p_{\text{O}_2}^I = p_{\text{O}_2(\text{ca})} - \left(\frac{iRT\tau_{\text{cathode}}}{2FD_{\text{c,eff}}} \right) \quad (2.16)$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}}^I = p_{\text{H}_2\text{O}(\text{ca})} + \left(\frac{iRT\tau_{\text{cathode}}}{4FD_{\text{c,eff}}} \right) \quad (2.17)$$

2.4.6 กราฟสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถพิจารณาได้จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) กับศักย์ไฟฟ้า (Cell voltage) ดังรูปที่ 2.2 เส้นประแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีซึ่งเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าสูงที่สุดที่สามารถเป็นไปได้ เส้นทึบแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าจริง จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิง ค่าศักย์ไฟฟ้าจริงของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าลดลงจากค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี ซึ่งการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้านี้เกิดจากค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย 3 ช่วง ตามปริมาณกระแสไฟฟ้า โดยกราฟในช่วงแรกเกิดการสูญเสียค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นหลัก เนื่องจากเป็นช่วงที่เซลล์เชื้อเพลิงต้องใช้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีมากกว่าพลังงานกระตุ้น จะส่งผลให้ในช่วงนี้ส่งผลกระทบต่อศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีมากที่สุด ส่วนช่วงที่สองเกิดการสูญเสียค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าเป็นหลัก เพราะเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงมีการผลิตกระแสไฟฟ้าในปริมาณที่สูงขึ้น จะส่งผลทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเกิดการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ไปกับการเคลื่อนที่ของไอออนภายในอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นในช่วงนี้จึงส่งผลกระทบต่อศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้ามากที่สุด และกราฟในช่วงที่สามจะเกิดการสูญเสียค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารเป็นสำคัญ ซึ่งเกิดขึ้นได้เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงมีการผลิตกระแสไฟฟ้าในปริมาณสูงมากๆ ทำให้ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงมีการลดลงอย่างมากในการเข้าทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งในช่วงนี้จะส่งผลกระทบต่อค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารมากที่สุด

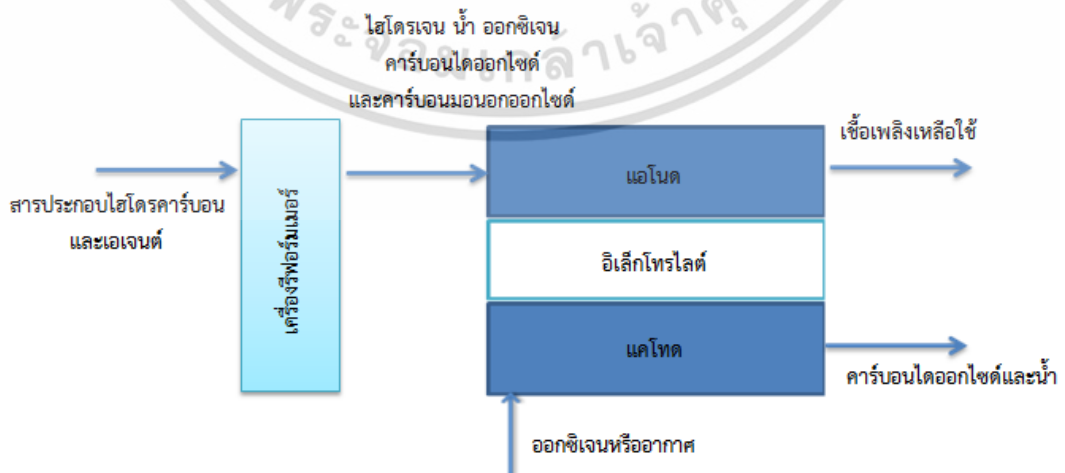
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า [10]



รูปที่ 2.3 การรีฟอร์มมิงแบบภายในของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 2.4 การรีฟอร์มมิงแบบภายนอกของเซลล์เชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

ในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ

2.5.1 การรีฟอร์มมิงแบบภายในของเซลล์เชื้อเพลิง (Internal reforming) รูปที่ 2.3 แสดงการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิง โดยการดำเนินงานดังกล่าวจะสามารถป้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนร่วมกับเอเจนต์เข้าที่ขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งได้โดยตรง ซึ่งอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิง (873 ถึง 1,273 เคลวิน) เป็นช่วงอุณหภูมิเดียวกับการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ดังนั้นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจึงสามารถเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สไฮโดรเจนภายในเซลล์เชื้อเพลิง จากนั้นแก๊สไฮโดรเจนจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีการป้อนแก๊สออกซิเจนเข้าที่ขั้วแคโทด ข้อดีของการรีฟอร์มมิงแบบภายในเซลล์เชื้อเพลิง คือ สามารถรวมเครื่องรีฟอร์มเมอร์กับเซลล์เชื้อเพลิงเข้าเป็นหน่วยปฏิบัติการเดียวทำให้ลดต้นทุนในการดำเนินงาน และให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยรวมสูง อย่างไรก็ตามการรีฟอร์มมิงภายในเซลล์เชื้อเพลิงยังทำให้เกิดการสะสมตัวของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพลงได้ [3]

2.5.2 การรีฟอร์มมิงแบบภายนอกของเซลล์เชื้อเพลิง (External reforming) รูปที่ 2.4 แสดงการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการรีฟอร์มมิงแบบภายนอกของเซลล์เชื้อเพลิง โดยจะทำการป้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกับเอเจนต์เข้าไปยังเครื่องรีฟอร์มเมอร์ก่อน เพื่อเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน ไอน้ำ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังเซลล์เชื้อเพลิงที่ขั้วแอโนด ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีต่อไปเมื่อมีการป้อนแก๊สออกซิเจนเข้าที่ขั้วแคโทด

โดยปกติในงานวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้การรีฟอร์มมิงแบบภายในเพราะมีประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสูงกว่าการรีฟอร์มมิงแบบภายนอก แต่จากศึกษาของ Arpornwichanop และคณะ [8] ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่มีการรีฟอร์มมิงของมีเทนแบบภายใน พบว่า ภายใต้สภาวะการดำเนินงานที่อุณหภูมิ 1,073 เคลวิน ความดัน 1 บรรยากาศ ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์ (ได้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 0.34 วัตต์ต่อตารางเมตรและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง 47 เปอร์เซ็นต์) ที่ทางออกของช่องเชื้อเพลิง (ออกจากแอโนด) มีปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เจือปนอยู่สูงประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน น้ำที่ผลิตได้เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด ทำให้ที่ขั้วแอโนดไม่มีน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันแก๊สซิงกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่หลงเหลืออยู่ ส่งผลให้ที่ขั้วแอโนดจึงยังมีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ค่อนข้างมาก ซึ่งแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีโอกาสที่จะเกิดเป็นคาร์บอน ดังสมการของ Boudouard ($2CO \rightarrow C + CO_2$) [2] ที่ด้านขั้วแอโนด ซึ่งการสะสมของคาร์บอนบนขั้วแอโนดอาจก่อให้เกิดการขัดขวางบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง รวมทั้งมีอายุการใช้งานสั้นลงด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการรีฟอร์มมิงแบบภายนอกเพื่อป้องกันปัญหาการเกิดคาร์บอนบนขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง

2.6 แก๊สชีวภาพ (Biogas)

แก๊สชีวภาพ คือ แก๊สที่เกิดจากหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียและของเสีย โดยอาศัยกลุ่มของจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้เกิดกลุ่มแก๊สขึ้นขณะที่เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เปลี่ยนรูปเป็นแก๊สชีวภาพ องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพประกอบด้วยแก๊สมีเทนประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สอื่นๆ (ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย น้ำ ออกซิเจน และไฮโดรเจน) [5]

แก๊สชีวภาพสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น เป็นแก๊สใช้สำหรับการหุงต้ม ใช้สำหรับเป็นแสงสว่างและให้ความร้อน ใช้เป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในภาคอุตสาหกรรม หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงงานผลิตไฟฟ้า [11-12]

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าแก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงหมุนเวียนที่หาได้ง่ายภายในประเทศ มีแก๊สมีเทนประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นปะปนออกมากับแก๊สไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ออกมาน้อยกว่าใช้สารตั้งต้นชนิดอื่น จึงเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการทำให้แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ [13]

2.7 กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากแก๊สชีวภาพ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน คือ กระบวนการทางความร้อน ซึ่งมีกระบวนการหลักอยู่ 3 กระบวนการ คือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงโดยข้อดีและข้อเสียของแต่ละกระบวนการแสดงดังตารางที่ 2.2

2.7.1 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ โดยสารตั้งต้นที่ใช้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเบา เช่น มีเทน กลีเซอรอล และแก๊สชีวภาพ เป็นต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำประกอบด้วย

1) ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงระหว่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกับไอน้ำที่อุณหภูมิสูง เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการที่ (2.18)

2) ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (Water-gas shift Reaction) เป็นการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำที่เหลือกับคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการที่ (2.19)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation, POX)

กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน เป็นกระบวนการที่ทำปฏิกิริยาระหว่างสารไฮโดรคาร์บอนกับออกซิเจน กระบวนการนี้มีข้อได้เปรียบที่ไม่จำเป็นต้องป้อนพลังงานจากภายนอก เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบคายความร้อนทำให้เกิดพลังงานขึ้นภายในระบบ แต่ข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือ ปริมาณออกซิเจนที่ป้อนเข้าสู่ระบบต้องไม่สูงจนเกินไปเนื่องจากออกซิเจนที่เหลือจากกระบวนการจะกลับมาทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนที่ผลิตได้กลายเป็นน้ำ ทำให้สูญเสียผลผลิตไฮโดรเจน ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนหรือบางครั้งเรียกว่าแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) โดยทั่วไปจะทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 973 เคลวิน อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้มีประสิทธิภาพน้อยกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เนื่องจากได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตน้อยกว่า



2.7.3 กระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (Autothermal reforming)

กระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง เป็นกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและออกซิเดชันบางส่วน ซึ่งเป็นกระบวนการใหม่ที่น่าข้อดีของแต่ละกระบวนการมารวมไว้ด้วยกัน โดยป้อนทั้งไอน้ำและออกซิเจนในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เนื่องจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนเป็นแบบคายความร้อนจึงช่วยลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำได้ ในปัจจุบันกระบวนการดังกล่าวกำลังเป็นที่นิยมแต่กำลังอยู่ในขั้นวิจัย ปฏิกิริยาออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงแสดงได้ดังสมการที่ (2.22)

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการผลิตไฮโดรเจนในแต่ละกระบวนการ [14-16]

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming)	<ul style="list-style-type: none"> ได้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้สูง ใช้อย่างแพร่หลายในเชิงพาณิชย์ 	<ul style="list-style-type: none"> ต้องใช้พลังงานสูงในการทำปฏิกิริยา เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาก
ออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation)	<ul style="list-style-type: none"> ปฏิกิริยาสามารถดำเนินได้อย่างรวดเร็ว ปฏิกิริยาเป็นแบบคายความร้อน 	<ul style="list-style-type: none"> ได้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้น้อย ต้องควบคุมปริมาณอากาศให้มีความพอดี
ออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (Autothermal reforming)	<ul style="list-style-type: none"> อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยต่ำกว่าการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้มากกว่าการออกซิเดชันบางส่วน 	<ul style="list-style-type: none"> กระบวนการอยู่ในขั้นวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Piroonlerkgul และคณะ [17] ได้ศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้เอเจนต์ในการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน (ได้แก่ ไอน้ำ อากาศ และไอน้ำร่วมกับอากาศ) ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อหากระบวนการรีฟอร์มมิงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง และยังพิจารณาการเกิดคาร์บอนที่เครื่องรีฟอร์มเมอร์ของแต่ละกระบวนการรีฟอร์มมิงเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาพิจารณาสถานะการดำเนินที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป ในการศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความเข้มกำลังไฟฟ้า) จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพและอัตราส่วนของเอเจนต์ต่อแก๊สชีวภาพ โดยพบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะดีขึ้นเมื่อมีปริมาณของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพสูงขึ้น และในการศึกษานี้ยังพบว่าไอน้ำเป็นเอเจนต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ป้อนเข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง เนื่องจากให้ค่าความเข้มกำลังไฟฟ้าสูงกว่าการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าจะต่ำกว่าเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มไอน้ำในระบบที่ป้อนอากาศเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งซึ่งเป็นกรณีของการป้อนไอน้ำกับอากาศร่วมกัน ผลที่ได้คือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีความเข้มกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น แต่ประสิทธิภาพทางไฟฟ้ากลับมีค่าต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับป้อนอากาศเข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเพียงอย่างเดียว ซึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบที่มีการป้อนไอน้ำเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะทำให้เกิดการแยกแก๊สชีวภาพ โดยพบว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่สูงขึ้น แม้ว่าการดำเนินงานดังกล่าวส่งผลทำให้ได้ค่าความเข้มกำลังไฟฟ้าจะลดลง แต่ค่าความเข้มกำลังไฟฟ้ายังสูงกว่ากรณีที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

Shiratori และคณะ [18] ได้ศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่เกิดการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพแบบภายใน ที่ดำเนินงานที่อุณหภูมิ 1,073 เคลวิน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 200 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยที่ขั้วแอโนดใช้วัสดุเป็นสแกนเดียมเซอร์โคเนีย (Scandia-stabilized Zirconia, ScSZ) อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือของผสมระหว่างนิกเกิลออกไซด์กับเซอร์โคเนีย สำหรับขั้วแคโทดวัสดุที่ใช้คือแลนทานัมสตรอนเทียมแมงกานีส (Lanthanum Strontium Manganite, LSM) เมื่อกำหนดให้ กรณีที่ 1 อัตราส่วนของแก๊สชีวภาพประกอบด้วยแก๊สมีเทนเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ($\text{CH}_4:\text{CO}_2:\text{O}_2:\text{N}_2=30:20:0:50$) โดยทำการเปรียบเทียบกับ กรณีที่ 2 อัตราส่วนของแก๊สชีวภาพที่ประกอบด้วยแก๊สมีเทนเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แก๊สออกซิเจนเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ($\text{CH}_4:\text{CO}_2:\text{O}_2:\text{N}_2=30:20:10:40$) จากผลการจำลองกระบวนการพบว่า กรณีที่ 2 ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์จะเป็นการลดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดเนื่องจากมีแก๊สออกซิเจน ซึ่งแก๊สออกซิเจนจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำลง ส่วนแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการทดลองนั้นได้ผ่านกระบวนการกำจัดซัลเฟอร์ออก (โดยใช้ FeO) พบว่ายังมีการเจือปนของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ปริมาณ 1 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบภายในของแก๊สชีวภาพ เมื่อดำเนินงานที่อุณหภูมิ 1,273 เคลวิน แต่สำหรับที่อุณหภูมิ 1,073 เคลวิน ไม่เหมาะสมเพราะมีโอกาสเกิดคาร์บอนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวแอโนดจากแก๊สไฮโดรเจนเซลล์ไฟต์ นอกจากนี้จากงานวิจัยพบว่ากระบวนการกำจัดซัลเฟอร์มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการดำเนินงานในดำเนินงานที่อุณหภูมิต่ำ

Alves และคณะ [19] ทำการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากแก๊สชีวภาพและการประยุกต์ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้ในกระบวนการรีฟอร์มมิ่ง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในกระบวนการรีฟอร์มมิ่งคือนิกเกิล นอกจากนี้ยังได้สนใจศึกษาผลกระทบทที่มีต่อตัวเร่งปฏิกิริยา การทำให้แก๊สชีวภาพบริสุทธิ์จะสามารถทำให้ลดหรือกำจัดกรดซัลฟูริกซึ่งเป็นสาเหตุการกัดกร่อนนับว่าเป็นขั้นตอนที่จำเป็น จากการศึกษาพบว่าปัญหาหลักที่พบในการรีฟอร์มมิ่งแก๊สชีวภาพนั้น คือ การเกิดโค้ก (Coke) บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดพิษจากกำมะถันซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ และส่งผลให้การผลิตแก๊สไฮโดรเจนลดลง อย่างไรก็ตามในเซลล์เชื้อเพลิงการทำให้แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นหน้าที่ของทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาและ อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ซึ่งจะสามารถดำเนินงานและประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิสูง (เช่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง) นอกจากนี้ยังศึกษาเรื่องประสิทธิภาพในการใช้ไฟฟ้าที่สูงขึ้น เมื่อมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (50 ส่วนในล้านส่วน) เซลล์เชื้อเพลิงนี้มีการศึกษาหลายอย่างที่แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไบเมทัลลิก (นอกเหนือจากแพลตตินัมและนิกเกิล) ลดแนวโน้มการเกิดโค้กได้ ในการผลิตแก๊สชีวภาพภายในรีฟอร์มมิ่งของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง การเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงมากกว่า 50 ส่วนในล้านส่วน สามารถทำให้เกิดการสะสมตัวของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา สิ่งจำเป็นในการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของแก๊สชีวภาพขาเข้า นอกเหนือจากน้ำและอากาศเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพและโปรโมเตอร์ องค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยา อิเล็กโทรนิกส์เป็นความคิดริเริ่มที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการทำลายของอิเล็กโทรไลต์และลดการสะสมของการเกิดคาร์บอน

Chiòdo และคณะ [20] ทำการประเมินการใช้แก๊สชีวภาพในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยทำการศึกษาทางทฤษฎีซึ่งได้รองรับโดยการเปรียบเทียบกับทดลอง การประเมินทางทฤษฎีกระทำขึ้นโดยการพิจารณากระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และกระบวนการออกซิเดชันเต็มแก๊สรีฟอร์มมิ่ง โดยการสะสมตัวของคาร์บอนถูกใช้เป็นแนวทางในการเลือกสภาวะดำเนินการที่เหมาะสม เนื่องจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและการเกิดโค้กมีความสำคัญในกระบวนการทางอุตสาหกรรม จากการศึกษาเครื่องรีฟอร์มเมอร์ พบว่ากระบวนการออกซิเดชันบางส่วนจะให้การผลิตแก๊สไฮโดรเจนต่ำที่สุด เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแก๊สซิฟแบบย้อนกลับ ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเกิดจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของแก๊สมีเทนแบบแห้งเมื่อมีการเติมแก๊สออกซิเจนเข้าในสายแก๊สชีวภาพ ในทางตรงกันข้ามปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาออกซิเดชันเต็มแก๊สรีฟอร์มมิ่งที่เกิดขึ้นมีอัตราการแปลงผันของแก๊สมีเทนและความเข้มข้นของไฮโดรเจนใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่มีต่อการเลือกกระบวนการรีฟอร์มมิ่งที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการศึกษาพบว่ากระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด เนื่องจากแก๊สชีวภาพไม่ถูกออกซิไดซ์ในเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ในขณะที่กระบวนการออกซิเดชันบางส่วนและกระบวนการออกซิเดชันเต็มแก๊สรีฟอร์มมิ่งต้องใช้แก๊สออกซิเจน (อากาศ) เป็นส่วนหนึ่งของเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง และจากการศึกษาพบว่าการดำเนินการเครื่องรีฟอร์มเมอร์และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่อุณหภูมิ 1,073 เคลวิน กระบวนการออกซิเดชันเต็มแก๊สรีฟอร์มมิ่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ประสิทธิภาพจะลดลงเหลือประมาณ 52 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thanomjit และคณะ [21] ศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งร่วมกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของเอทานอลที่แตกต่างกัน (กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และกระบวนการโอโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง) เพื่อหากระบวนการรีฟอร์มมิงของ เอทานอลที่เหมาะสมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งภายใต้สภาวะสมดุล ในการศึกษาวิจัยพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสีย (ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นของสาร) ที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ซึ่งจากผลการจำลองกระบวนการพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในเครื่องรีฟอร์มเมอร์และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งส่งผลให้สมรรถนะทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเพิ่มขึ้น และยังพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ร่วมกับกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบไอน้ำมีสมรรถนะทางไฟฟ้าสูงสุด เพราะว่าการรีฟอร์มมิงแบบไอน้ำให้ผลผลิตไฮโดรเจนสูงที่สุด แต่เนื่องจากกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สมีเทนสามารถเกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ดังนั้นสมรรถนะทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งร่วมกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของเอทานอล แต่ละกระบวนการจึงมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพทางความร้อนพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งร่วมกับกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบออกซิเดชันบางส่วนมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงชนิดอื่น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อเอทานอล และลดอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะออกแบบและจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพ หัวข้อที่ 3.1 แสดงรายละเอียดการออกแบบกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพ หัวข้อที่ 3.2 แสดงรายละเอียดการออกแบบกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน หัวข้อที่ 3.3 แสดงวิธีการจำลองกระบวนการ ส่วนหัวข้อที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

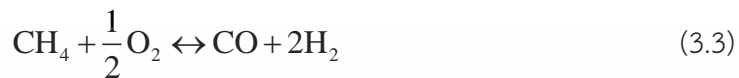
แผนภาพแบบจำลองการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากแก๊สชีวภาพ ก่อนจะถูกป้อนเป็นเชื้อเพลิงเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยการทำงานเริ่มจากแก๊สชีวภาพ (BIOGAS) ที่ประกอบไปด้วยมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และคาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (เลือกใช้สัดส่วนของแก๊สชีวภาพนี้เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมและเพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Chiodo และคณะ [20] ซึ่งอยู่ในหัวข้อ 4.1) ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องผสม (MIXER) ด้วยอัตราการป้อน 1 กิโลโมลต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 298 เคลวิน และความดัน 1 บรรยากาศ ร่วมกับเอเจนต์ (AGENTS) ซึ่งก็คือไอน้ำและหรือออกซิเจน (ขึ้นกับกระบวนการรีฟอร์มมิงที่ต้องการศึกษา) ที่มีความบริสุทธิ์ 100 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ถูกป้อนเข้าด้วยอุณหภูมิ 298 เคลวิน และความดัน 1 บรรยากาศ สำหรับการศึกษาระบบการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ไอน้ำจะถูกป้อนเข้ามายังเครื่องผสมด้วยอัตราการไหล 2 กิโลโมลต่อชั่วโมง ส่วนการศึกษาระบบการออกซิเดชันบางส่วน ออกซิเจนจะถูกป้อนด้วยอัตราการไหล 0.1 กิโลโมลต่อชั่วโมง และกระบวนการออกไซด์เทอร์มอลรีฟอร์มมิง ไอน้ำและออกซิเจนจะถูกป้อนเข้ามายังกระบวนการด้วยอัตราการไหล 2 และ 0.1 กิโลโมลต่อชั่วโมงตามลำดับ (สำหรับการพิจารณาเลือกใช้อัตราส่วนของไอน้ำและหรือออกซิเจนที่นำมาใช้ในการดำเนินการนั้นนำมาจากงานวิจัยอื่น [21]) จากนั้นแก๊สผสมจะถูกนำไปเพิ่มอุณหภูมิโดยเครื่องทำความร้อน (HEATER) ซึ่งกำหนดให้อุณหภูมิเท่ากับ 673 เคลวิน เพื่อให้ได้อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิในกระบวนการรีฟอร์มมิง หลังจากนั้นแก๊สผสมที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจะถูกป้อนเข้าไปยังเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (REFORMER) ซึ่งดำเนินการที่อุณหภูมิ 873 เคลวิน ความดัน 1 บาร์ โดยภายในเครื่องรีฟอร์มเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาที่แสดงในสมการที่ (3.1) และ (3.2) สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ สมการที่ (3.3) และ (3.4) สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และสมการที่ (3.1) ถึง (3.4) สำหรับกระบวนการออกไซด์เทอร์มอลรีฟอร์มมิง และจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ (SYNGAS1) ซึ่งประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ ไอน้ำ ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของแบบจำลองและสภาวะที่ใช้ในการจำลองกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

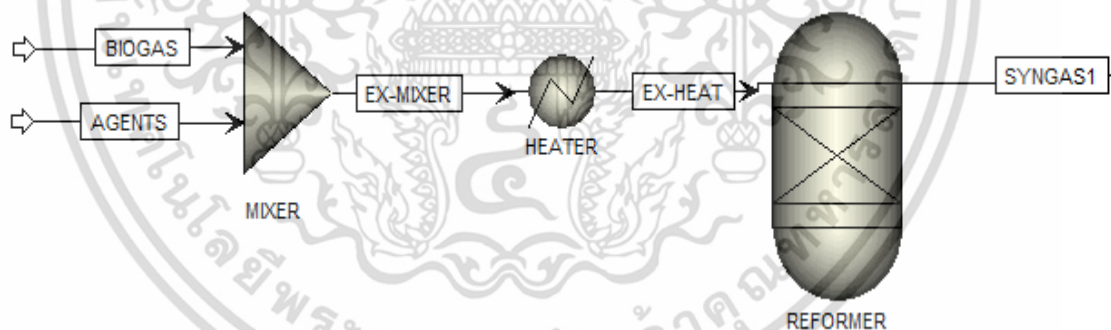
การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ:



การออกซิเดชันบางส่วน:



ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ RGIBBS แทนเครื่องรีฟอร์มเมอร์ เนื่องจากระบบที่ศึกษาดำเนินการที่สภาวะสมดุล โดยแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ RGIBBS จะทำการคำนวณองค์ประกอบของแก๊สที่สภาวะสมดุลโดยใช้การหาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ที่ต่ำที่สุด (Gibbs free minimization) ซึ่งเมื่อกำหนดความดันและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา แบบจำลองจะทำนายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น และสามารถหาค่าองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ได้

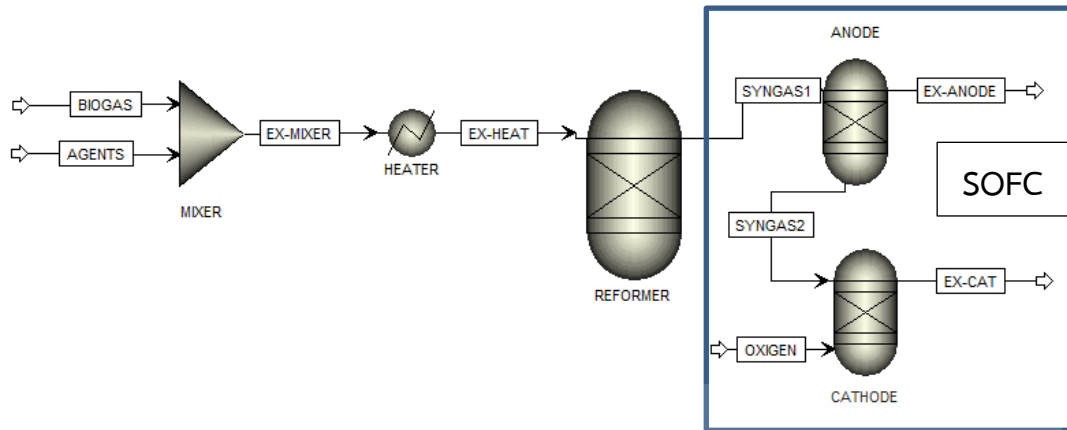


รูปที่ 3.1 แบบจำลองการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของแบบจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมและสภาวะที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ

หน่วยปฏิบัติการ	แบบจำลอง	สภาวะการดำเนินงานมาตรฐาน	
		อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความดัน (บาร์)
MIXER	MIXER	-	-
HEATER	HEATER	673	1
REFORMER	RGIBBS	873	1
ANODE	RGIBBS	973	5
CATHODE	RGIBBS	973	5

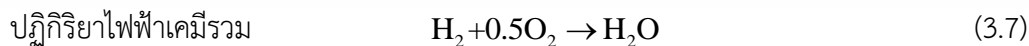
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพ

3.2 กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพ

รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพแบบจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพ โดยแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิง (SYNGAS 1) จะถูกป้อนเข้ามายังเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนทางด้านขั้วแอโนด (ANODE) ซึ่งใช้แบบจำลองแบบ RGIBBS ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถคำนวณค่าอัตราการผลิตเชิงโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยวิธีการหาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ที่ต่ำที่สุด (Gibbs free energy minimization) เนื่องจากแก๊สสังเคราะห์ที่เข้ามายังขั้วแอโนดประกอบไปด้วยแก๊สไฮโดรเจน น้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ดังนั้นที่ขั้วแอโนดจึงมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทน และปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟ แสดงดังสมการที่ (3.5) และ (3.6) ซึ่งจะทำให้แก๊สสังเคราะห์ที่ออกจากขั้วแอโนด (SYNGAS2) มีปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้น จากนั้นแก๊สสังเคราะห์ที่ออกจากขั้วแอโนดจะถูกป้อนเข้าไปยังขั้วแคโทดซึ่งใช้แบบจำลองแบบ RGIBBS พร้อมๆกับการป้อนแก๊สออกซิเจน (OXYGEN) เพื่อเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีดังสมการที่ (3.7) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นกระแสไฟฟ้าและน้ำออกมา โดยตารางที่ 3.1 ได้แสดงรายละเอียดของแบบจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมและสภาวะที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ



ในความเป็นจริงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทางด้านขั้วแอโนดและขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ แต่เนื่องจากในโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus เวอร์ชัน 7.3 ไม่สามารถจำลองการเกิดปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ได้ ดังนั้นจึงทำการจำลองกระบวนการโดยใช้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีรวมดังสมการที่ (3.7) ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นด้านขั้วแคโทดเนื่องจากเป็นด้านที่มีน้ำออกมาเป็นผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สภาวะการดำเนินงานที่ใช้ในการศึกษากระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการชนิดต่างๆ

สภาวะการดำเนินงาน	SOFC-SR	SOFC-POX	SOFC-ATR
อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	1	1	1
อัตราการไหลของน้ำ (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	2-10	-	2-10
อัตราการไหลของออกซิเจน (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	-	0.1-0.9	0.1-0.9
อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (เคลวิน)	673-1,273	673-1,273	673-1,273

หมายเหตุ

SOFC-SR คือ ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ
 SOFC-POX คือ ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน
 SOFC-ATR คือ ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันของรีฟอร์มมิ่ง

ในการศึกษาสภาวะการดำเนินงานที่มีผลต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าของระบบร่วมจะทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ (Steam to Biogas molar ratio, S/B) และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ (Oxygen to Biogas molar ratio, O/B) โดยตารางที่ 3.2 แสดงช่วงของสภาวะการดำเนินงานที่สนใจศึกษา

3.3 วิธีการจำลองกระบวนการ

ในการศึกษากระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิ่งของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen plus เวอร์ชัน 7.3 เพื่อหาสภาวะดำเนินงานและกระบวนการรีฟอร์มมิ่งที่เหมาะสมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน โดยรูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิ่งของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน ในส่วนของกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งทั้ง 3 กระบวนการ จะเริ่มจากการกำหนดสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (ความดันและอุณหภูมิ) และอัตราส่วนระหว่างเอเจนต์ต่อแก๊สชีวภาพ ซึ่งจะสามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยวิธีการหาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ที่ต่ำที่สุด และใช้สมการของ Soave-Redlich-Kwong (SRK) เป็นสมการสภาวะ (Equation of state) ซึ่งเหมาะสมกับระบบที่มีไอน้ำและของเหลว โดยอัตราการไหลเชิงโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์ (แก๊สไฮโดรเจน แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ) ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งจะนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ขาเข้าสำหรับการคำนวณหาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

สำหรับการจำลองกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง จะเริ่มจากการกำหนดสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (อุณหภูมิ (T) และความดัน (P) ในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (i)) ร่วมกับคุณสมบัติของวัสดุและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (เช่น ความหนาของขั้วแอโนด (τ_{anode}) ขั้วแคโทด (τ_{cathode}) และอิเล็กโทรไลต์ ($\tau_{\text{electrolyte}}$) สัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สที่ขั้วแอโนด ($D_{\text{a,eff}}$) ขั้วแคโทด ($D_{\text{c,eff}}$) และความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยน ($i_{0,\text{anode}}$) เป็นต้น) โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแสดงดังตารางที่ 3.3 โดยจากการทราบค่าอัตราการไหลเชิงโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจน จะทำให้คำนวณหาองค์ประกอบของแก๊สที่เข้ามายังเซลล์เชื้อเพลิงได้ ซึ่งการทราบค่าองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนที่เข้าในเซลล์เชื้อเพลิง จะสามารถคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีจากสมการที่ (2.7) และค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียทั้ง 3 ชนิดจากสมการที่ (2.10) ถึง (2.17) จากนั้นจะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าจริงและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งเซลล์เชื้อเพลิงดังสมการที่ (2.9) และ (3.8) ตามลำดับ โดยสมการทางไฟฟ้าเคมีดังกล่าวจะถูกเขียนในรูปแบบ FORTRAN ใน Calculator block ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในโปรแกรม Aspen Plus เวอร์ชัน 7.3

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (SOFC electrical efficiency, η_{SOFC}) เป็นแปดเตอร์ที่ใช้พิจารณาสมรรถนะของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและกระบวนการรีฟอร์มมิง ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงในการเปลี่ยนองค์ประกอบของสารต่างๆที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงที่เกิดปฏิกิริยาเคมีแล้วเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยสามารถพิจารณาได้จากสัดส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อพลังงานทางเคมีของเชื้อเพลิงขาเข้า ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3.9) สำหรับงานวิจัยนี้เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงแล้วสามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้แก่ มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งมีเทนจะเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟิเคชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนจะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้

$$P_w = iV \quad (3.8)$$

$$\eta_{\text{SOFC}} = \frac{P_w A}{\dot{n}_{\text{CH}_4, \text{in}} \text{LHV}_{\text{CH}_4} + \dot{n}_{\text{H}_2, \text{in}} \text{LHV}_{\text{H}_2} + \dot{n}_{\text{CO}_m} \text{LHV}_{\text{CO}}} \times 100\% \quad (3.9)$$

3.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.4.1 สร้างแบบจำลองและจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน 3 กระบวนการ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus เวอร์ชัน 7.3 โดยใช้สารตั้งต้นเป็นแก๊สชีวภาพซึ่งประกอบด้วยแก๊สมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์

3.4.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่ส่งผลต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ 873 เคลวิน ความดัน 1 บาร์ โดยกำหนดค่า ดังนี้

3.4.2.1 กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออกซิเดชันรีฟอร์มมิง

(กำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์กับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.2 กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (กำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6)

3.4.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ส่งผลต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่ความดัน 1 บาร์ โดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์เท่ากับ 673 773 873 973 1,073 และ 1,273 เคลวิน ส่วนอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพมีค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากข้อ 3.4.2

3.4.4 เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงทั้ง 3 กระบวนการ ณ อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่ได้มาจากข้อ 3.4.2 และอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ได้มาจากข้อที่ 3.4.3

3.4.5 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ได้มาจากข้อที่ 3.4.3 ความดัน 1 บาร์

3.4.5.1 กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (กำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1)

3.4.5.2 กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (กำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6)

3.4.6 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่ส่งผลต่อค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ ณ อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ได้มาจากข้อที่ 3.4.3 ความดัน 1 บาร์

3.4.6.1 กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (กำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1)

3.4.6.2 กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (กำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6)

3.4.7 เปรียบเทียบค่าความร้อนรวมของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ ณ อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่ได้มาจากข้อ 3.4.2 และ

3.4.8 ศึกษาการเกิดคาร์บอนบนขั้วแอโนด ณ อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ได้มาจากข้อที่ 3.4.3 ความดัน 1 บาร์

3.4.8.1 กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนเท่ากับ 673 773 873 973 1,073 และ 1,273 เคลวิน

3.4.8.2 กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1)

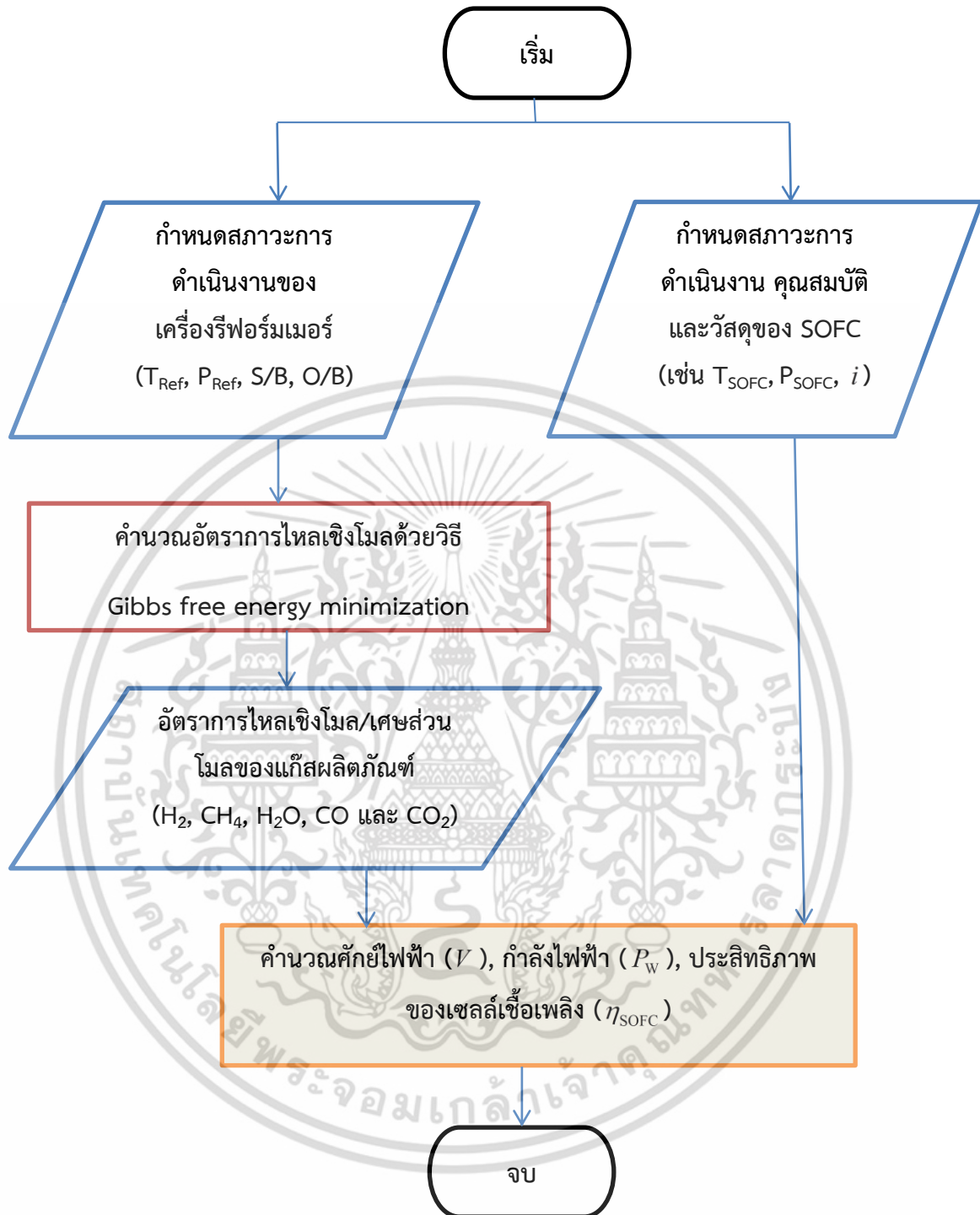
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.8.3 กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนและกระบวนการออกซิโด-เทอร์มอลรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6)

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

พารามิเตอร์	ค่า
อุณหภูมิ (T , เคลวิน)	973
ความดัน (P , บาร์)	5
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (i , แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	12,000
พื้นที่ (A , ตารางเมตร)	0.028
ค่าคงที่ฟาราเดย์ (F , คูลอมป์ต่อโมล)	9.65×10^4
ความหนาของแอโนด (τ_{anode} , ไมโครเมตร)	500
ความหนาของแคโทด (τ_{cathode} , ไมโครเมตร)	50
ความหนาของอิเล็กโทรไลต์ ($\tau_{\text{electrolyte}}$, ไมโครเมตร)	20
สัมประสิทธิ์การแพร่ของแอโนด ($D_{\text{a,eff}}$, ตารางเมตรต่อวินาที)	1.05×10^{-4}
สัมประสิทธิ์การแพร่ของแคโทด ($D_{\text{c,eff}}$, ตารางเมตรต่อวินาที)	4.49×10^{-5}
ค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนของขั้วแอโนด ($i_{0,\text{anode}}$, แอมแปร์ต่อตารางเมตร) [22]	12,000
ค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยนของขั้วแคโทด ($i_{0,\text{cathode}}$, แอมแปร์ต่อตารางเมตร) [22]	9,000
การนำไอออนของอิเล็กโทรไลต์ ($\sigma_{\text{electrolyte}}$, 1ต่อโอห์ม เมตร)	$\frac{4.47 \times 10^3}{T} \exp\left(\frac{-1,892}{T}\right)$
ค่าเอนทาลปีของการเผาไหม้ขั้นต่ำของมีเทน (LHV_{CH_4} , กิโลจูลต่อโมล)	801.6
ค่าเอนทาลปีของการเผาไหม้ขั้นต่ำของไฮโดรเจน (LHV_{H_2} , กิโลจูลต่อโมล)	240.2
ค่าเอนทาลปีของการเผาไหม้ขั้นต่ำของคาร์บอนมอนอกไซด์ (LHV_{CO} , กิโลจูลต่อโมล)	305.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 วิธีการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบบรวร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน

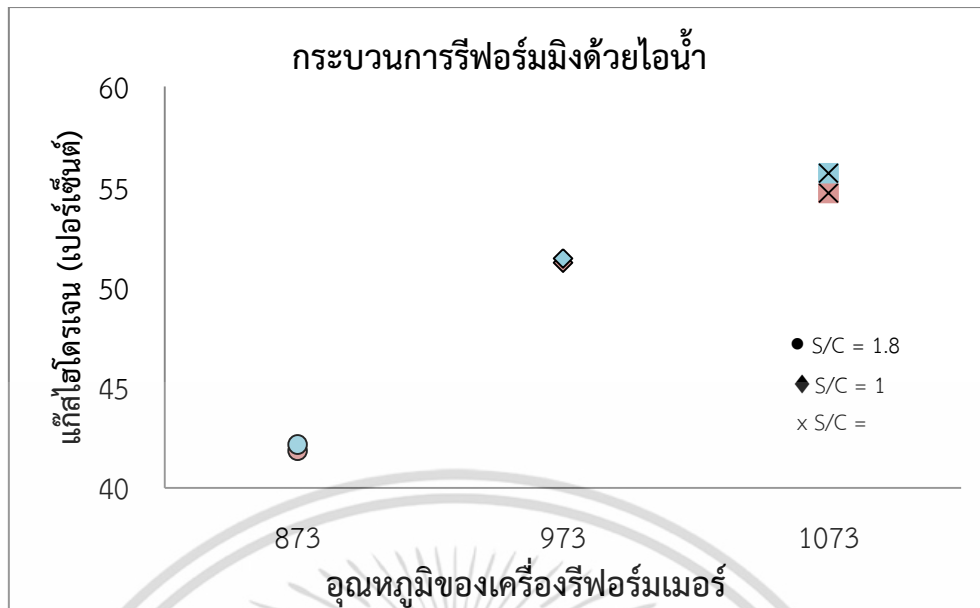
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

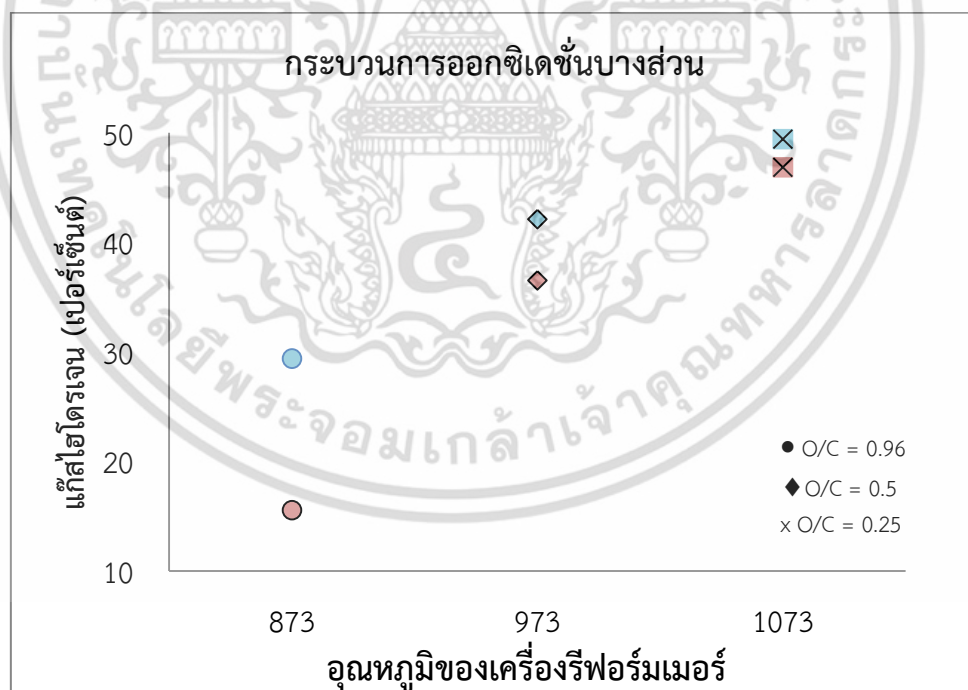
ผลและการอภิปรายผลการจำลองกระบวนการ

4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนกับงานวิจัยที่อ้างอิง

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบต่างๆ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus เวอร์ชัน 7.3 จึงทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการในงานวิจัยของ Chiodo และคณะ [20] ซึ่งทำการประเมินการใช้แก๊สชีวภาพในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยพิจารณากระบวนการรีฟอร์มมิง 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง ที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยกำหนดอัตราการส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.46 1 และ 1.8 สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.25 0.5 และ 0.96 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และ อัตราการส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอนไดออกไซด์ 0.3 0.8 และ 1.5 ร่วมกับอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.08 0.07 และ 0.96 ตามลำดับ สำหรับกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง ที่อุณหภูมิ 873 973 และ 1,073 เคลวิน จากการเปรียบเทียบการผลิตแก๊สไฮโดรเจนการจำลองกระบวนการที่ทำการศึกษากับการจำลองกระบวนการของ Chiodo และคณะ [20] ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนของไอน้ำและออกซิเจนต่อคาร์บอนเท่ากัน พบว่าผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (รูปที่ 4.1) และกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (รูปที่ 4.3) มีแนวโน้มการเกิดไฮโดรเจนใกล้เคียงกับงานวิจัยที่อ้างอิง ส่วนกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (รูปที่ 4.2) มีความแตกต่างของผลการจำลองกระบวนการระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่อ้างอิงประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้

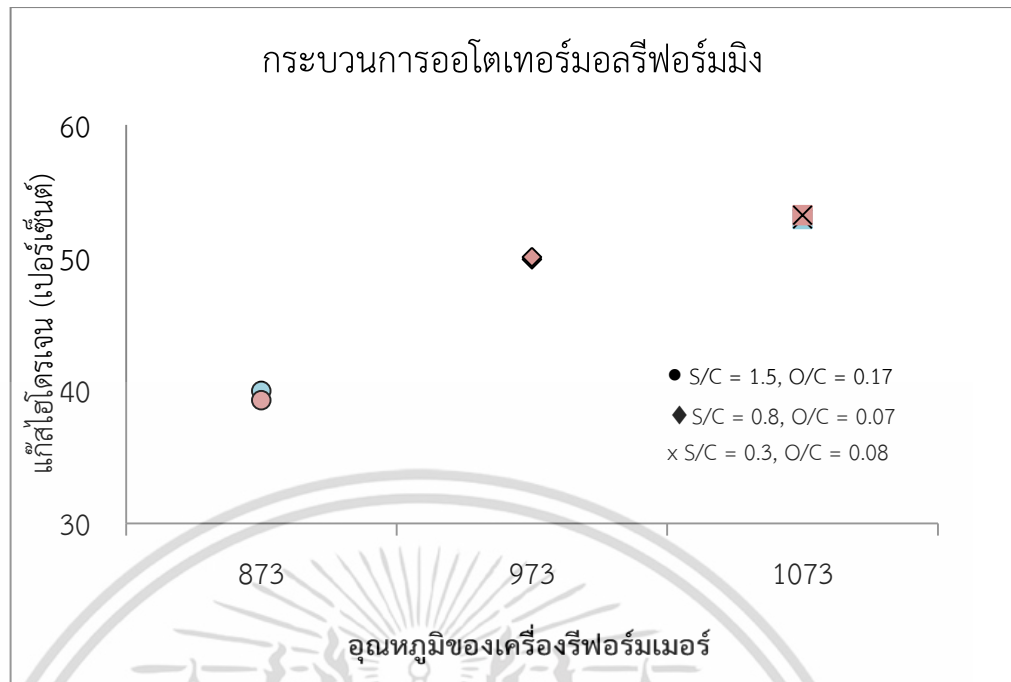


รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองกระบวนการของ Chiodo และคณะ [20] (สัญลักษณ์สี่เท้า) กับผลการจำลองกระบวนการงานวิจัยนี้ (สัญลักษณ์สี่ชมพู) ของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองกระบวนการของ Chiodo และคณะ [20] สัญลักษณ์สี่เท้า) กับผลการจำลองกระบวนการงานวิจัยนี้ (สัญลักษณ์สี่ชมพู) ของกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



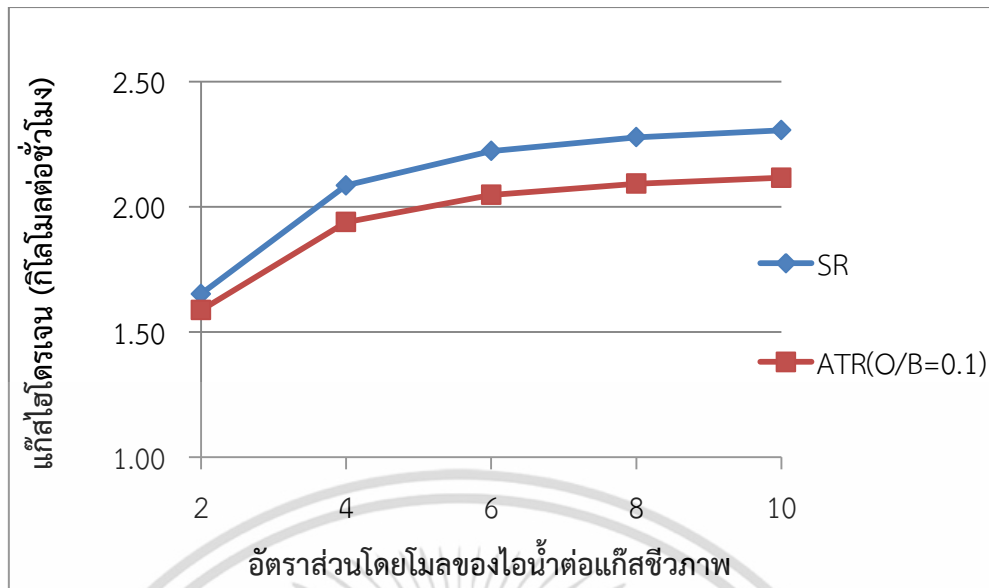
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองกระบวนการของ Chiodo และคณะ [20] สัญลักษณ์สี่เท้า) กับผลการจำลองกระบวนการงานวิจัยนี้ (สัญลักษณ์สี่ชมพู) ของกระบวนการอโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง

4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่มีต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

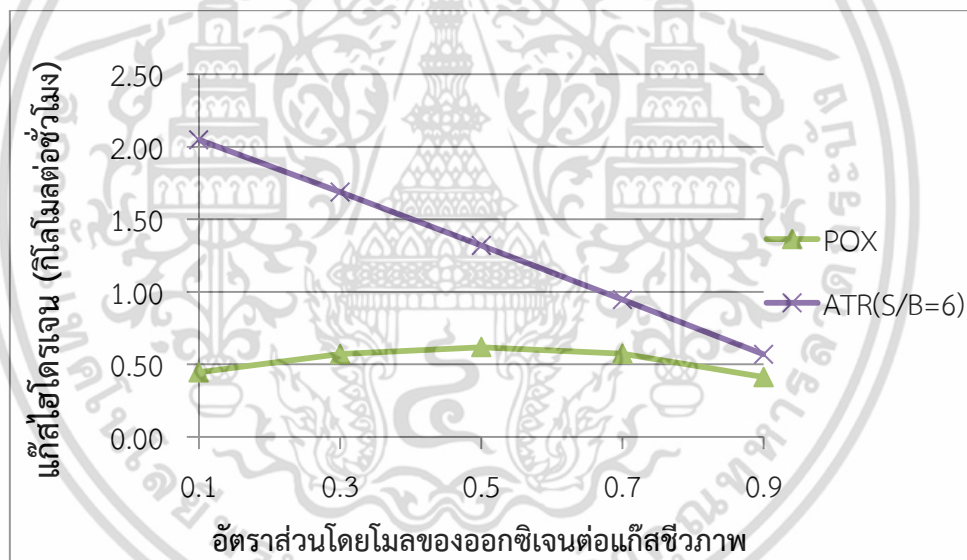
ผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่ส่งผลต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการรีฟอร์มมิงทั้ง 3 กระบวนการ ที่อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ 873 เคลวิน แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 โดยอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการอโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงจะถูกปรับเปลี่ยนอยู่ในช่วง 2 4 6 8 และ 10 และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพสำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนและกระบวนการอโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงจะถูกปรับเปลี่ยนอยู่ในช่วง 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 ในขณะที่สภาวะการดำเนินงานอื่นๆกำหนดให้มีค่าคงที่ดังตารางที่ 3.1

เมื่อพิจารณากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (รูปที่ 4.4) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพส่งผลทำให้ได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 4.4 จะสังเกตเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 6 จะสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้เท่ากับ 2.22 กิโลโมลต่อชั่วโมง ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกับค่าที่อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 8 (2.28 กิโลโมลต่อชั่วโมง) และ 10 (2.31 กิโลโมลต่อชั่วโมง) ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานจึงเลือกการดำเนินงานที่อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำแก๊สชีวภาพที่มีต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน



รูปที่ 4.5 ผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่มีต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าสำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จะลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มมากขึ้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนเกิดเป็นน้ำ ดังนั้นในการดำเนินงานจะเลือกใช้อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1

ส่วนกระบวนการออกซิเดชันแบบฟอร์มมิง เมื่อพิจารณาการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ (อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1) ดังรูปที่ 4.4 พบว่าแก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเกิดได้ดีขึ้นเหมือนกับกรณีของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ แต่จากการจำลองกระบวนการพบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจะมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น (อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวภาพคงที่เท่ากับ 6) ดังรูปที่ 4.5 เพราะแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มมากขึ้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจน เกิดเป็นน้ำเช่นเดียวกันกับกรณีของกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน

4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อปริมาณการเกิดแก๊สไฮโดรเจน แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ศึกษาจะมีค่าตั้งแต่ 673 773 873 973 1,073 และ 1,273 เคลวิน กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6 สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออกซิเดชันของรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1) และกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และกระบวนการออกซิเดชันของรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6)

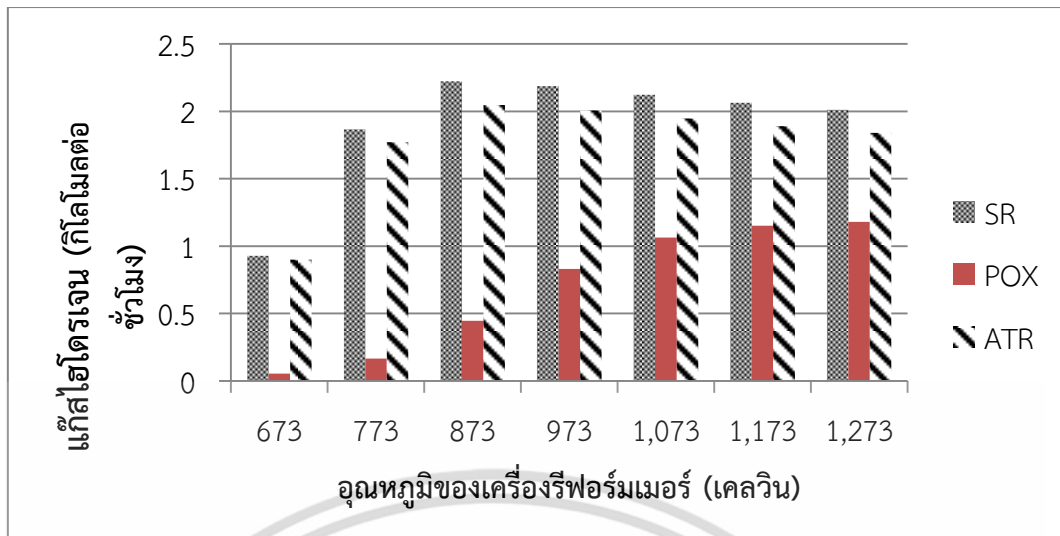
จากการศึกษาพบว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทั้ง 3 กระบวนการ (กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และกระบวนการออกซิเดชันของรีฟอร์มมิง) มีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จากการจำลองกระบวนการพบว่ากระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนทั้ง 3 กระบวนการ จะสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้สูงที่สุด ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง จากนั้นปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้จะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากข้อจำกัดทางสมดุลของปฏิกิริยา โดยผลจากการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นได้ว่า กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออกซิเดชันของรีฟอร์มมิงจะผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้สูงที่สุด ณ อุณหภูมิ 873 เคลวิน ส่วนกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนจะผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้สูงที่สุด ณ อุณหภูมิ 1,273 เคลวิน

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการดำเนินงานเดียวกันที่ 873 เคลวิน พบว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้สูงที่สุด ตามมาด้วยกระบวนการออกซิเดชันของรีฟอร์มมิง และกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ตามลำดับ

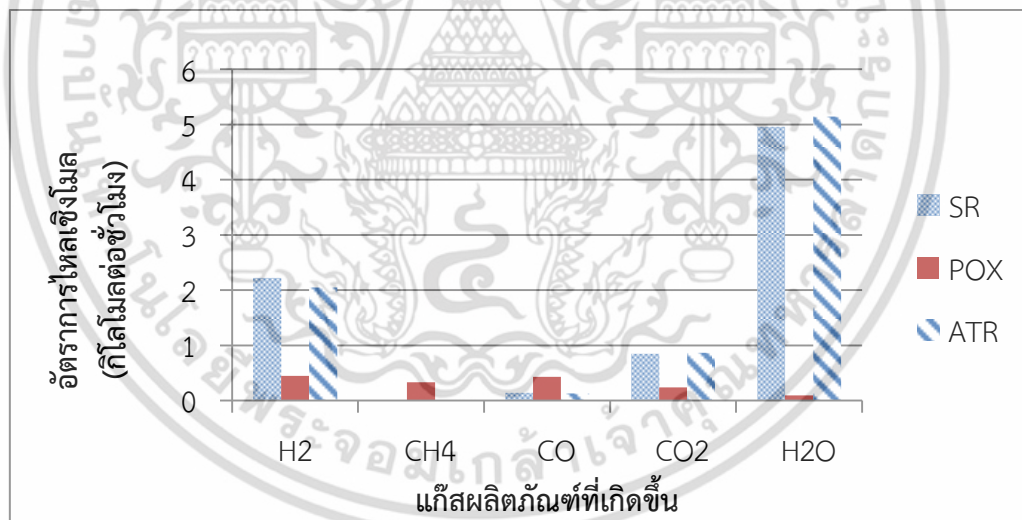
4.4 การเปรียบเทียบปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงทั้ง 3 กระบวนการ

จากการศึกษาพบว่าการใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกันจะได้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องรีฟอร์มเมอร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากการจำลองกระบวนการพบว่า กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำให้ผลผลิตเป็นแก๊สไฮโดรเจนสูงสุด ตามมาด้วยกระบวนการออกซิเดชันของรีฟอร์มมิงและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ส่วนกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนให้ผลผลิตเป็นมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด ตามด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออกซิเดชันของรีฟอร์มมิง ในขณะที่กระบวนการออกซิเดชันของรีฟอร์มมิงให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำมากที่สุด ตามมาด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอณุมหุมิของเครื่องรีฟอรมเมอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดกระแสไฮโทรเจนเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 6 สำหรับกระบวนการรีฟอรมมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการอโตเทอมอลรีฟอรมมิง (อัตราส่วนของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1) และอัตราส่วนของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนและกระบวนการอโตเทอมอลรีฟอรมมิง (อัตราส่วนโดย โมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6)



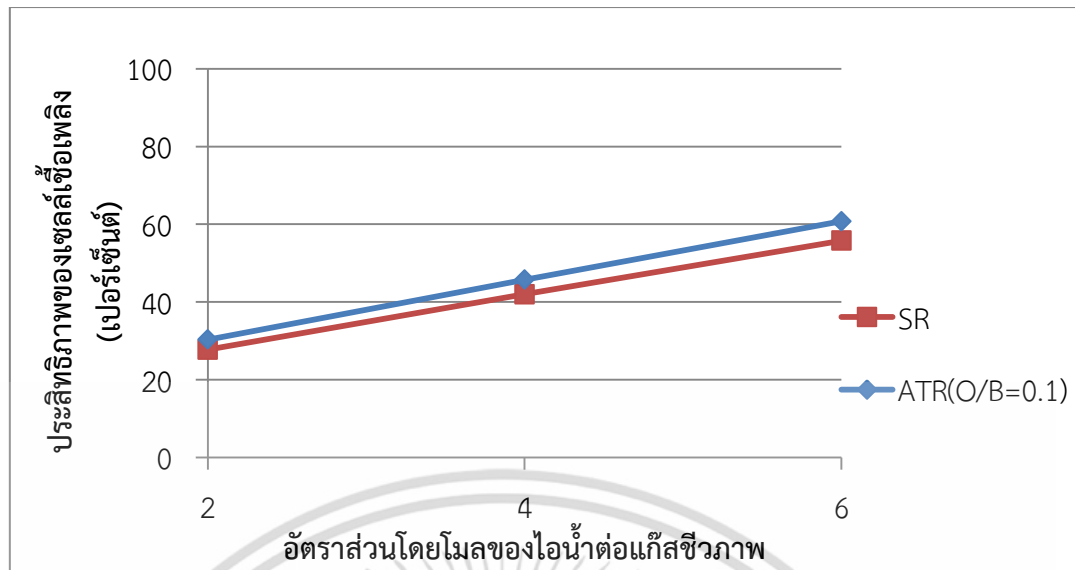
รูปที่ 4.7 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอรมมิงที่แตกต่างกัน ณ อณุมหุมิ 873 เคลวิน เมื่ออัตราส่วนโดยโมล ของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 6 สำหรับกระบวนการรีฟอรมมิงด้วย ไอน้ำและกระบวนการอโตเทอมอลรีฟอรมมิง (อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1) และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนและกระบวนการอโตเทอมอลรีฟอรมมิง (อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

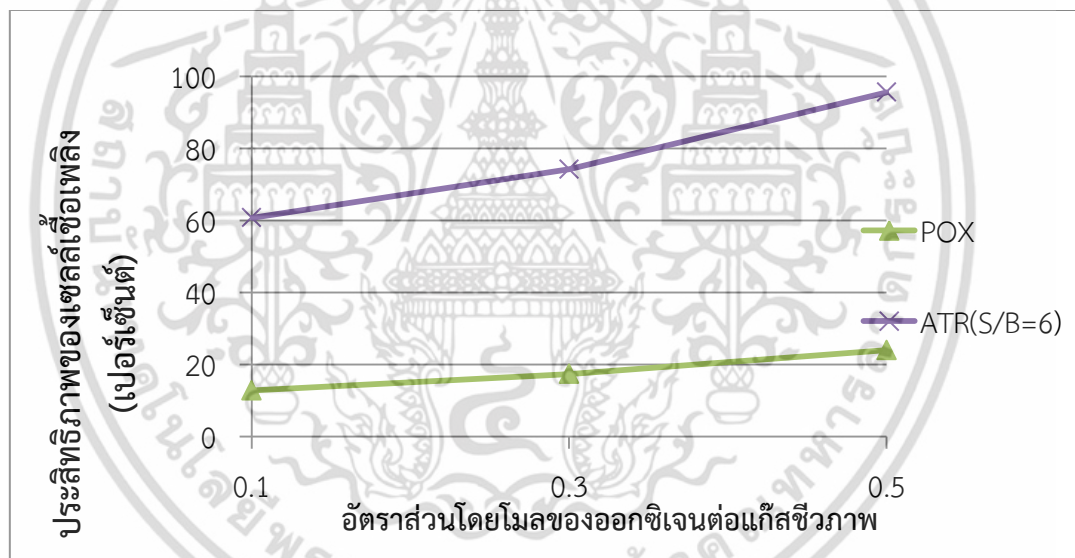
4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

รูปที่ 4.8 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพต่อแก๊สชีวภาพที่มีต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์เพลิงชนิดออกไซด์แข็ง และรูปที่ 4.9 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพต่อแก๊สชีวภาพที่มีต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์เพลิงชนิดออกไซด์แข็ง เมื่อเครื่องรีฟอร์มเมอร์ดำเนินงานที่ 873 เคลวิน ส่วนสภาวะการดำเนินงานอื่นๆเป็นไปตามตารางที่ 3.1 และ 3.3 จากการจำลองกระบวนการจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพและอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพในระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนมีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือเมื่ออัตราส่วนโดยโมล ของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพและอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จากการศึกษาก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 4.4 พบว่าลำดับของปริมาณการผลิตแก๊สไฮโดรเจน (จากมากไปน้อย) คือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ามากที่สุด เนื่องจากการป้อนแก๊สไฮโดรเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงในปริมาณที่สูงกว่า จะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีมากกว่าและยังมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารน้อยกว่าเพราะแก๊สไฮโดรเจนที่มีปริมาณมากขึ้นจะสามารถเข้าทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีบริเวณพื้นผิวระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ได้ง่ายขึ้น โดยระบบที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารองลงมาก็คือระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ตามมาด้วยระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิงดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงกว่าระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ ดังนั้นค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบดังกล่าวจึงมีค่าสูงกว่าระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ทั้งในกรณีที่มีการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ (รูปที่ 4.8) และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ (รูปที่ 4.9) ส่วนประสิทธิภาพของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนจะมีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 4.8 ผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ 873 เคลวิน



รูปที่ 4.9 ผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ 873 เคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

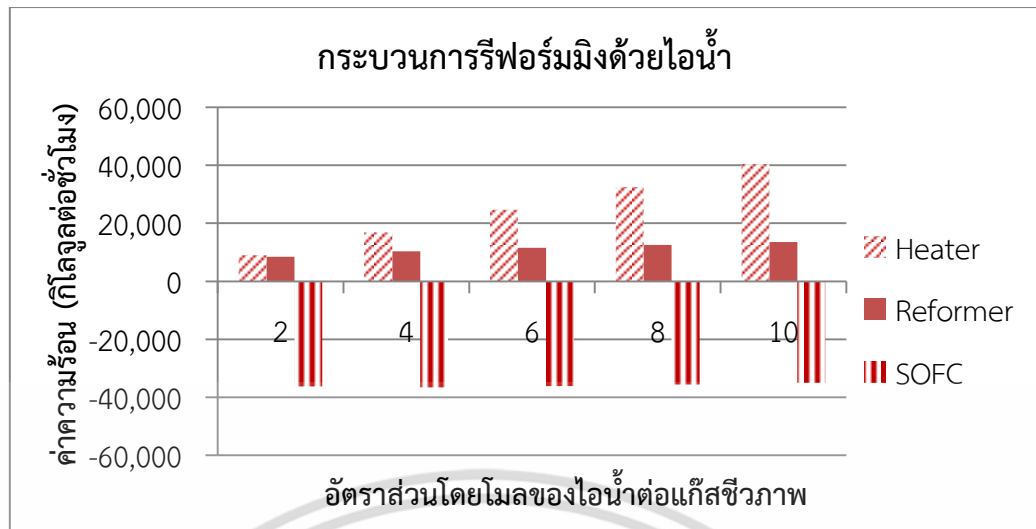
4.6 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่มีต่อค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติงาน

รูปที่ 4.10 แสดงค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนที่อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์เท่ากับ 873 เคลวิน ส่วนสภาวะการดำเนินงานอื่นๆเป็นไปตามตารางที่ 3.1 และ 3.3 ในกรณีที่ค่าความร้อนของหน่วยปฏิบัติการมีค่าเป็นบวกหมายถึงว่าหน่วยปฏิบัติการเป็นหน่วยที่ต้องการพลังงาน ส่วนค่าความร้อนของหน่วยปฏิบัติการที่มีค่าเป็นลบหมายถึงว่าหน่วยปฏิบัติการนั้นให้พลังงานออกมา

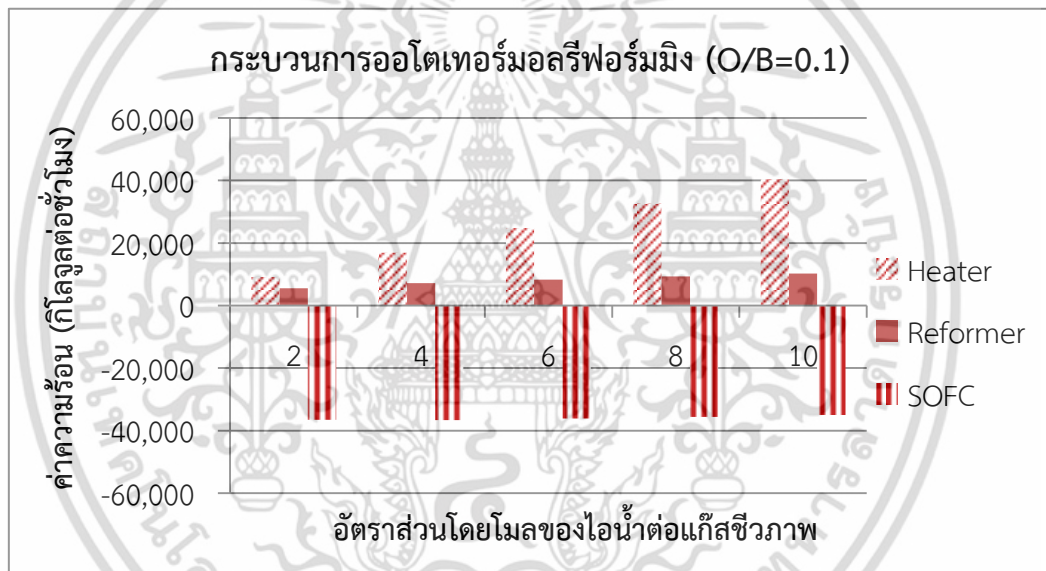
จากผลการจำลองกระบวนการในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้น เครื่องทำความร้อน (Heater) จะต้องการพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิของสารตั้งต้นมากขึ้น ดังนั้นค่าความร้อนของเครื่องทำความร้อนจึงมีค่ามากขึ้นในทุกๆกระบวนการ

สำหรับค่าความร้อนของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ จากรูปที่ 4.10 (ก) และ 4.10 (ข) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพทำให้ค่าความร้อนของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1) มีค่าเพิ่มมากขึ้น เพราะปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในการเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีปริมาณสารตั้งต้นซึ่งก็คือน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพในกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6) จะเห็นได้ว่าเครื่องรีฟอร์มเมอร์ต้องการพลังงานในการเกิดปฏิกิริยาลดลง (รูปที่ 4.10 (ค) และ 4.10 (ง)) ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

สำหรับค่าความร้อนของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งนั้นจะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนของระบบรวมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (รูปที่ 4.10 (ก) เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับกับระบบรวมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (รูปที่ 4.10 (ข)) การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพส่งผลให้ระบบรวมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (รูปที่ 4.10 (ค)) และระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (รูปที่ 4.10 (ง)) เนื่องจากที่ช่วงแอโนดเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงมีเทนและปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนจึงต้องการความร้อนในการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น



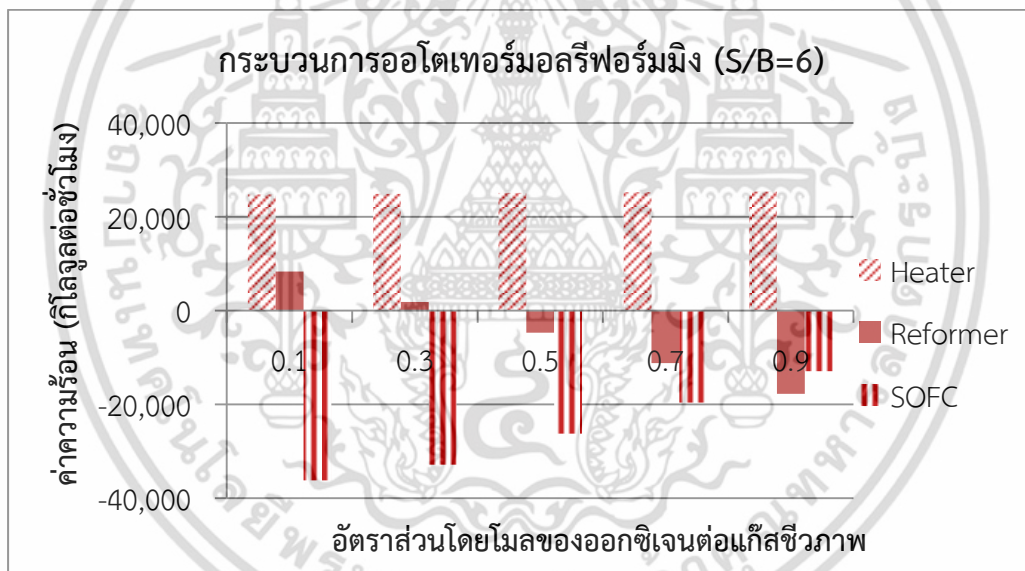
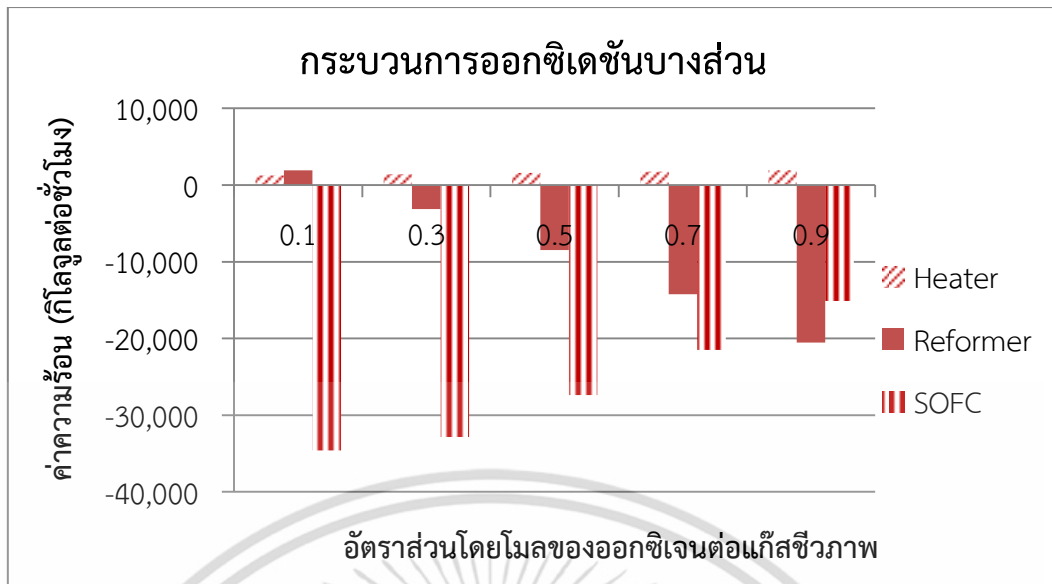
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.10 ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพของ (ก) ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (ข) ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



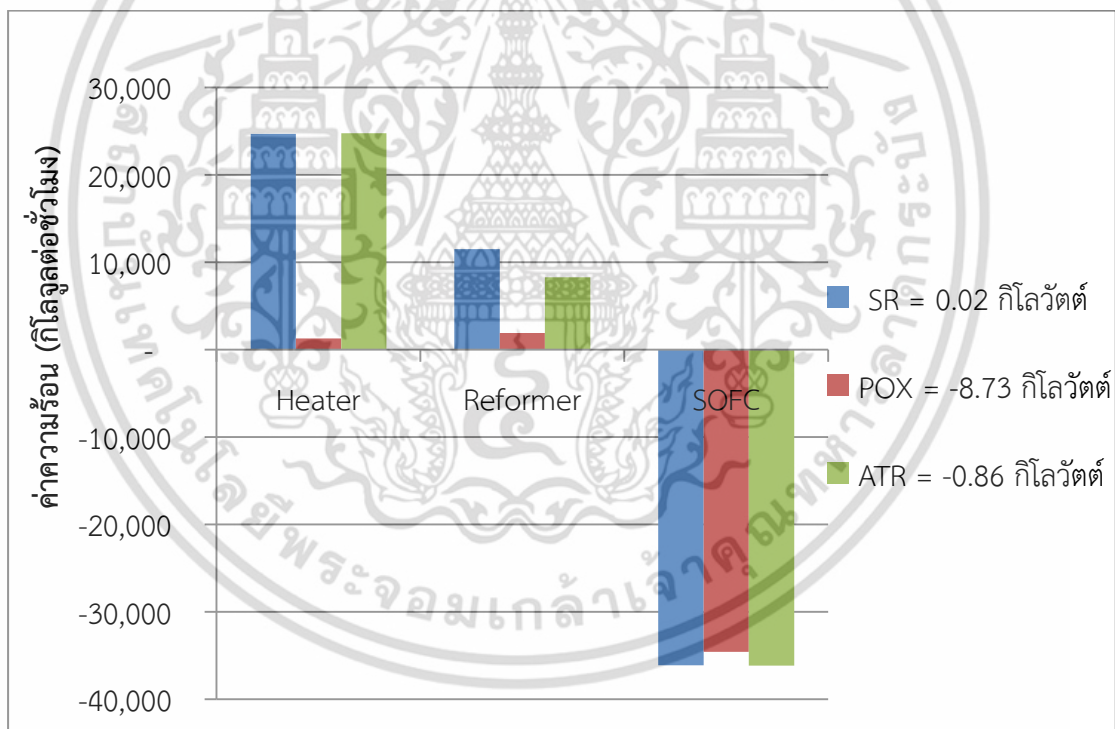
รูปที่ 4.13 (ต่อ) ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพของ (ค) ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (ง) ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการอัตโนมัติเทอร์โมลรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ค่าความร้อนรวมของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ

การศึกษาในส่วนนี้จะกำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 6 สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออกซิเดชันของไฮโดรเจน (อัตราส่วนของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1) อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน อุณหภูมิและความดันของเครื่องรีฟอร์มเมอร์เท่ากับ 873 เคลวิน และ 1 บาร์ ตามลำดับ

รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการในระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงที่แบบต่างๆ จากการจำลองกระบวนการจะเห็นได้ว่าระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นระบบที่ต้องการความร้อนมากที่สุด ซึ่งมีค่าความร้อนรวมของระบบเท่ากับ 0.02 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ส่วนระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันของไฮโดรเจนมีค่าความร้อนรวมของระบบเท่ากับ -0.86 กิโลวัตต์ และระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน มีค่าความร้อนรวมของระบบเท่ากับ -8.73 กิโลวัตต์ ซึ่งระบบทั้ง 2 เป็นระบบที่ให้ความร้อน



รูปที่ 4.11 ค่าความร้อนรวมของแต่ละหน่วยปฏิบัติการในระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบต่างๆ ณ อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ 873 เคลวิน เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 6 สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออกซิเดชันของไฮโดรเจน (อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1) และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 การเกิดคาร์บอนของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน

จากการศึกษางานที่วิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเกิดคาร์บอนบนขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายหากมีปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์หลงเหลืออยู่ที่ขั้วแอโนดมาก เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา Boudouard ($2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$) การเกิดคาร์บอนนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง กล่าวคือ เมื่อมีการสะสมตัวของคาร์บอนที่ขั้วแอโนด ทำให้มาบดบังพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง อายุการใช้งานลดลง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการดำเนินงานสูงขึ้นอัตราการเกิดคาร์บอนจะลดลง [17] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาขอบเขตในการเกิดคาร์บอน (carbon boundary) ที่เกิดขึ้นในระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบต่างๆ โดยในการจำลองกระบวนการได้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ตั้งแต่ 673 773 873 973 1,073 และ 1,273 เคลวิน และทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออกซิเดชันรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1) ตั้งแต่ 2 4 5 8 และ 10 และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนและกระบวนการออกซิเดชันรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของ ไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6) ตั้งแต่ 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 โดยเครื่องรีฟอร์มเมอร์ดำเนินงานที่อุณหภูมิ 873 เคลวิน ความดัน 1 บาร์ ส่วนสภาวะการดำเนินงานของหน่วยปฏิบัติการอื่นๆเป็นไปดังตารางที่ 3.1 และ 3.3 นอกจากนี้ยังได้กำหนดให้มีคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (ซึ่งแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ RGIBBS แบบจำลองจะทำนายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น และสามารถหาค่าองค์ประกอบของคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้) จากผลการจำลองกระบวนการพบว่าไม่เกิดคาร์บอนในช่วงที่ทำการศึกษา สำหรับค่าคาร์บอนที่เกิดขึ้นบนขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนนั้นแสดงในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก.7.1-ก.7.4

4.9 สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสม

จากผลการจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพแบบต่างๆ เมื่อพิจารณาสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์และอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพร่วมกับสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ผลต่อบริเวณที่มีการเกิดคาร์บอน สามารถสรุปสภาวะการดำเนินงานของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพแบบต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.4 นอกจากนี้ตารางที่ 4.4 ยังแสดงผลของประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ค่าความร้อน และโอกาสในการเกิดคาร์บอนของระบบร่วมเมื่อใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงที่ต่างชนิดกันด้วย

ตารางที่ 4.1 สภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง แบบนำโปรตอนและกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพแบบต่างๆ แสดงผลของ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ค่าความร้อน และโอกาสในการเกิดคาร์บอนของระบบร่วมเมื่อ ใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงที่ต่างชนิดกัน

พารามิเตอร์	SOFC-SR	SOFC-POX	SOFC-ATR
สภาวะการดำเนินงาน			
อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (เคลวิน)	873	873	873
อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ	6	-	6
อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ	-	0.1	0.1
ผลการจำลองกระบวนการ			
ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)	55.78	12.80	60.75
ผลรวมพลังงานของระบบร่วม (กิโลวัตต์)	0.02	-8.73	-0.86
โอกาสในการเกิดคาร์บอน	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด

หมายเหตุ

SOFC-SR คือ ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ
 SOFC-POX คือ ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน
 SOFC-ATR คือ ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันแบบรีฟอร์มมิง

บทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการจำลองกระบวนการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพแบบต่างๆ โดยอาศัยการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus เวอร์ชัน 7.3 โดยจะทำการศึกษากการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง เพื่อวิเคราะห์หาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน จากการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกันจะได้แก๊สไฮโดรเจน รวมถึงแก๊สผลิตภัณฑ์อื่นๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งการผลิตแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของระบบร่วมเป็นสำคัญ

เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของอัตราส่วนของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพจนถึงค่าเท่ากับ 6 สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1) จะทำให้ได้แก๊สไฮโดรเจนมากขึ้น แต่การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพมากกว่า 0.1 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6) ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จะมีค่าลดลง

สำหรับการศึกษาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบร่วมซึ่งพิจารณาจากประสิทธิภาพทางไฟฟ้า เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนดำเนินการที่ 973 เคลวิน ความดัน 5 บาร์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด ตามมาด้วยระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ตามลำดับ

เมื่อทำการศึกษากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์พบว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้มากขึ้น โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ได้แก๊สไฮโดรเจนสูงที่สุดสำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงคือ 873 เคลวิน ส่วนกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนคือ 1,273 เคลวิน และหากพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกันคือที่ 873 เคลวิน พบว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้สูงที่สุด ตามมาด้วยกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง และกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นที่ออกจากเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ณ อุณหภูมิ 873 เคลวิน พบว่าลำดับของกระบวนการที่ผลิตมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์จากมากไปน้อย คือ กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง ตามลำดับ และสำหรับกระบวนการที่ผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากไปน้อย คือ กระบวนการอโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และ กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ตามลำดับ

ส่วนระบบร่วมที่ต้องการพลังงานมากที่สุด คือ ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ตามมาด้วย ระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการอโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง และระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน เนื่องจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

จากการศึกษาการเกิดคาร์บอนที่ขึ้นตรงทางออกของเชื้อเพลิง (ออกจากแอโนด) พบว่าไม่เกิดคาร์บอนที่สภาวะการดำเนินงาน เพราะปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เหลืออยู่ที่ขั้วแอโนดน้อยมาก หรือไม่เหลือเลยทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากลายเป็นคาร์บอนได้ดังสมการของ Boudouard

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบ นำโปรตอนที่ใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพแตกต่างกัน พบว่าแต่ละกระบวนการมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกัน ทั้งนี้การนำไปใช้งานเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้นควร เลือกรูปแบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการอโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง แต่เนื่องจากกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงนั้นยังอยู่ในขั้นตอนวิจัย ไม่มีการใช้ อย่างแพร่หลาย ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาและนำไปพัฒนาเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมนึก บุญพาไสว. เซลล์เชื้อเพลิง : วิธีใช้เชื้อเพลิงในศตวรรษที่ 21. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.ipst.ac.th/design/document/Fuel_cell.pdf. 25559
- [2] Arpornwichanop, A. and Patcharavorachot, Y. Investigation of a proton-conducting SOFC with internal autothermal reforming of methane. *Chemical Engineering Research and Design*. 2013 ; 91:1508–1516.
- [3] อมรชัย อารณวิธานพ. 2553. เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า. วารสารข่าว และ ความรู้จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ฉบับที่ 1.
- [4] Authayanun, S., Aunsup, P., Patcharavorachot, Y., Arpornwichanop A. Theoretical analysis of a biogas-fed PEMFC system with different hydrogen purifications: Conventional and membrane-based water gas shift processes. *Energy Conversion and Management*. 2014 ; 86:60–69
- [5] **Biogas Composition**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.renewable-energy-concepts.com/biomass-bioenergy/biogas-basics/gas-composition.html>. 2559.
- [6] อมรชัย อารณวิธานพ. 2554. เซลล์เชื้อเพลิง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : www.chulapedia.chula.ac.th/index.php/เซลล์เชื้อเพลิง. 2559.
- [7] เก้ากัณยา สุตประเสริฐ. 2548. การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาภายในช่องแอโนดของ Planar Solid Oxide Fuel Cell ด้วยแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไทย. [Online]. เข้าถึงได้จาก : www.kmutt.ac.th/rippc/anode.htm. 2559.
- [8] Arpornwichanop, A., Patcharavorachot, Y. and Assabumrungrat, S. Analysis of a proton-conducting SOFC with direct internal reforming. *Chemical Engineering Science*. 2010 ; 65:581-589.
- [9] Patcharavorachot, Y., Brandon, N.P., Paengjuntuek, W., Assabumrungrat, S. and Arpornwichanop, A. 2010. Analysis of planar solid oxide fuel cells based on proton-conducting electrolyte. *Solid State Ionics*. 181 : 1568–1576.
- [10] มนูญ บุญยประมุข. “การออกแบบและพัฒนางจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อเลียนแบบพฤติกรรม เซลล์เชื้อเพลิง.” มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2552.
- [11] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เทคโนโลยีแก๊สชีวภาพ. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.erd.cmu.ac.th/index.php/services/view?pid=1>. 2559.
- [12] **ก๊าซชีวภาพ (Biogas)**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.siamche-mi.com/ก๊าซชีวภาพ>. 2559.
- [13] Lo Faro M, Vita A, Pino L, Arico AS. Performance evaluation of a solid oxide fuel cell coupled to an external biogas trireforming process. *Fuel Process Technol* 2013 ; 115: 238-45.
- [14] **ผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรเจน**. [Online]. เข้าถึงได้จาก http://www.kalasin3.go.th/view.php?article_id=24359. 2559.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] อุณาโลม เวทย์วัฒน์นะ ฮาร์ทลี่. 2556. ไฮโดรเจน-การผลิตและการประยุกต์ใช้. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 9(2) : 116-126.
- [16] George T. Austin. 1984. Shreve's Chemical Process Industries. 5th ed. Singapore: McGraw-Hill.
- [17] Piroonlerkgul, P., Assabumrungrat, S., Laosiripojana, N. and Adesina, A.A. Selection of appropriate fuel processor for biogas-fuelled SOFC system. **Chemical Engineering Journal**. 2008; 140:341–351.
- [18] Shiratori, Y., Ijichi, T., Oshima, T., Sasaki, K., Internal reforming SOFC running on biogas. **International Journal of Hydrogen Energy**. 2010 ; 35 : 7905-7912.
- [19] Alves, H.J., Junior, C.B., Niklevicz, R.R., Frigo, E.P., Frigo, M.S., and Coimbra-Araújo, C.H., Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells. **International Journal of Hydrogen Energy**. 2013; 38:5215-5225.
- [20] Chiodo, V., Galvagno, A., Lanzini, A., Papurello, D., Urbani, F., Santarelli, M., Freni, S. Biogas Reforming Process Investigation for SOFC Application. **Energy Conversion and Management**. 2015; 98:252–258.
- [21] Thanomjit, C., Patcharavorachot, Y. Ponpesh, P., and Arpornwichanop, A. Thermodynamic analysis of solid oxide fuel cell system using different ethanol reforming processes. **International journal of hydrogen energy**. 2015; 40: 6950-6958.
- [22] วิชาวี หนูทอง. “การจำลองระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนและเครื่องรีฟอร์มเมอร์แบบไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแตกต่างกัน.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
ผลการจำลองกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพที่ส่งผลต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิเครื่องรีฟอร์มเมอร์ 873 เคลวิน

	ชนิดของกระบวนการรีฟอร์มมิง	อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ				
		2	4	6	8	10
แก๊สไฮโดรเจน (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ	1.6513	2.0851	2.2223	2.2773	2.3057
	กระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (O/B=0.1)	1.5769	1.9387	2.0471	2.0919	2.1158
	ชนิดของกระบวนการรีฟอร์มมิง	อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ				
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
	กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน	0.4453	0.5713	0.6184	0.5734	0.4121
	กระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (S/B=6)	2.0471	1.6875	1.3194	0.9458	0.5689

ตารางที่ ก.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน โดยอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ เท่ากับ 6 สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออกไซด์เทอมัลรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1) และ อัตราส่วนของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน

	ชนิดของกระบวนการรีฟอร์มมิง	อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (เคลวิน)						
		673	773	873	973	1,073	1,173	1,273
แก๊สไฮโดรเจน (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ	0.9277	1.8663	2.2223	2.1859	2.1221	2.0625	2.0100
	กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน	0.0535	0.1660	0.4453	0.8298	1.0641	1.1505	1.1796
	กระบวนการออกไซด์เทอมัลรีฟอร์มมิง	0.8988	1.7716	2.0471	2.0060	1.9457	1.8890	1.8386

ตารางที่ ก.3 ผลิตรถยนต์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงที่แตกต่างกัน ณ อุณหภูมิ 873 เคลวิน เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ เท่ากับ 6 สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออกไซด์เทอมัลรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1) และ อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.1 สำหรับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	กระบวนการ รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ	กระบวนการ ออกซิเดชันบางส่วน	กระบวนการออกไซด์ เทอมัลรีฟอร์มมิง
แก๊สไฮโดรเจน	2.2223	0.4453	2.0471
แก๊สมีเทน	0.0089	0.3312	0.0061
แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์	0.1419	0.4299	0.1285
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	0.8491	0.2389	0.8654
น้ำ	4.9598	0.0923	5.1407

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลไอน้ำและออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ โดยที่อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์เท่ากับ 873 เคลวิน

	ชนิดของกระบวนการรีฟอร์มมิง	อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ				
		2	4	6	8	10
ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)	กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ	27.73	41.97	55.78	69.53	83.27
	กระบวนการออกซิเดชันรีฟอร์มมิง (O/B=0.1)	30.36	45.72	60.75	75.74	90.73
	ชนิดของกระบวนการรีฟอร์มมิง	อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ				
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
	กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน	12.80	17.37	23.97	34.77	58.60
	กระบวนการออกซิเดชันรีฟอร์มมิง (S/B=6)	60.75	74.19	95.55	134.00	223.74

ตารางที่ ก.5.1 ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (กิโลจูลต่อชั่วโมง) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ

หน่วยปฏิบัติการ	อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ				
	2	4	6	8	10
เครื่องทำความร้อน (Heater)	9,016	16,850	24,684	32,519	40,353
เครื่องรีฟอร์มเมอร์ (Reformer)	8,468	10,370	11,515	12,525	13,519
เซลล์เชื้อเพลิง (SOFC)	-36,219	-36,556	-36,144	-35,601	-35,043
ชีวเอโนด	1,086	1,631	2,191	2,723	3,245
ชีวแคโทด	-30,494	-31,446	-31,629	-31,639	-31,616
กำลังไฟฟ้า (วัดต่อตารางเมตร)	6,811	6,741	6,707	6,686	6,673

ตารางที่ ก.5.2 ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (กิโลจูลต่อชั่วโมง) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ

หน่วยปฏิบัติการ	อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ				
	2	4	6	8	10
เครื่องทำความร้อน (Heater)	9,096	16,931	24,765	32,599	40,434
เครื่องรีฟอร์มเมอร์ (Reformer)	5,570	7,209	8,285	9,281	10,272
เซลล์เชื้อเพลิง (SOFC)	-36,591	-36,648	-36,159	-35,596	-35,032
ชีวเอโนด	1,113	1,661	2,209	2,734	3,254
ชีวแคโทด	-30,921	-31,587	-31,675	-31,655	-31,622
กำลังไฟฟ้า (วัดต่อตารางเมตร)	6,782	6,722	6,693	6,675	6,664

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5.3 ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (กิโลจูลต่อชั่วโมง) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ

หน่วยปฏิบัติการ	อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ				
	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
เครื่องทำความร้อน (Heater)	1,263	1427	1,591	1,755	1,919
เครื่องรีฟอร์มเมอร์ (Reformer)	1,901	-3,113	-8,468	-14,250	-20,553
เซลล์เชื้อเพลิง (SOFC)	-34,581	-34,844	-27,390	-21,506	-15,097
ชีวแอมโมเนีย	774.61	802.55	805.43	776.39	825.34
ชีวแคโทด	-28,347.93	-26,705.38	-21,218.50	-15,273.37	-8,797.59
กำลังไฟฟ้า (วัดต่อตารางเมตร)	7,432.05	7,397.36	7,438.80	7,476.74	7,511.58

ตารางที่ ก.5.4 ค่าความร้อนของแต่ละหน่วยปฏิบัติการของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (กิโลจูลต่อชั่วโมง) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ

หน่วยปฏิบัติการ	อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ				
	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
เครื่องทำความร้อน (Heater)	24,765.11	24,926.61	25,088.10	25,249.60	25,411.09
เครื่องรีฟอร์มเมอร์ (Reformer)	8,282.06	1,800.73	-4,705.16	-11,220.29	-17,737.91
เซลล์เชื้อเพลิง (SOFC)	26,733.50	23,494.39	16,868.64	12,019.08	3,559.35
ชีวแอมโมเนีย	2,208.75	2,232.93	2,246	2,251.84	2,253.69
ชีวแคโทด	-31,674.68	-28,404.15	-21,776.86	-15,132.72	-8,482.13
กำลังไฟฟ้า (วัดต่อตารางเมตร)	7,149.93	7,142.69	7,156.22	7,165.48	7,176.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ค่าความร้อนรวมของแต่ละหน่วยปฏิบัติการ (กิโลจูลต่อชั่วโมง)

ชนิดของกระบวนการรีฟอร์มมิง	เครื่องทำความร้อน (Heater)	เครื่องรีฟอร์มเมอร์ (Reformer)	เซลล์เชื้อเพลิง (SOFC)
กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ	24684.378	11511.814	29414.538
กระบวนการอโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง	24765.148	8282.9313	29442.891
กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน	1263.3962	1881.3877	27579.412



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7.1 การเกิดคาร์บอนของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพและเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ	อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง (เคลวิน)						
	673	773	873	973	1,073	1,173	1,273
1	0	0	0	5.74E-31	5.02E-28	1.39E-25	1.49E-23
2	0	0	0	2.01E-31	1.84E-28	4.99E-26	5.56E-24
3	0	0	0	9.92E-32	9.44E-29	2.68E-26	3.09E-24
4	0	0	0	5.86E-32	5.79E-29	1.70E-26	2.01E-24
5	0	0	0	3.85E-32	3.92E-29	1.18E-26	1.42E-24
6	0	0	0	2.72E-32	2.83E-29	8.72E-27	1.07E-24

ตารางที่ ก.7.2 การเกิดคาร์บอนของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 0.1) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพและเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพ	อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง (เคลวิน)						
	673	773	873	973	1,073	1,173	1,273
1	0	0	0	4.07E-31	3.41E-28	9.49E-26	1.02E-23
2	0	0	0	1.51E-31	1.39E-28	3.80E-26	4.27E-24
3	0	0	0	7.69E-32	7.39E-29	2.12E-26	2.46E-24
4	0	0	0	4.62E-32	4.61E-29	1.3E-26	1.62E-24
5	0	0	0	3.07E-32	3.16E-29	9.59E-27	1.16E-24
6	0	0	0	2.19E-32	2.30E-29	7.12E-27	8.76E-25

ตารางที่ ก.7.3 การเกิดคาร์บอนของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพและเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ	อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง (เคลวิน)						
	673	773	873	973	1,073	1,173	1,273
0.1	0	0	0	2.90E-30	8.35E-27	6.21E-24	1.62E-21
0.3	0	0	0	9.36E-31	8.84E-28	2.18E-25	2.21E-23
0.5	0	0	0	3.40E-31	2.76E-28	6.74E-26	6.93E-24
0.7	0	0	0	1.16E-31	9.34E-29	2.34E-26	2.44E-24
0.9	0	0	0	2.99E-32	2.50E-29	6.45E-27	6.80E-25
1.1	0	0	0	0	0	5.84E-28	6.23E-26

ตารางที่ ก.7.4 การเกิดคาร์บอนของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการ ออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อแก๊สชีวภาพคงที่เท่ากับ 6) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพและเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อแก๊สชีวภาพ	อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง (เคลวิน)						
	673	773	873	973	1,073	1,173	1,273
0.1	0	0	0	0	2.25E-29	7.11E-27	8.76E-25
0.3	0	0	0	0	1.44E-29	4.52E-27	5.62E-25
0.5	0	0	0	0	8.16E-30	2.60E-27	3.27E-25
0.7	0	0	0	0	3.92E-30	1.27E-27	1.61E-25
0.9	0	0	0	0	1.33E-30	4.36E-28	5.60E-26
1.1	0	0	0	0	1.40E-31	4.65E-29	4.31E-27

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาว อัญริญจน์ ปัดภัย
วัน เดือน ปีเกิด	9 ตุลาคม 2534 ที่สุรินทร์
ที่อยู่	221 ถนนแฮปปี้แลนด์สาย 2 แขวงคลองจั่น เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ 10240 โทร. 02-086-3216
ประวัติการศึกษา	2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยรังสิต
ประสบการณ์ฝึกงาน	2555 ฝึกงานที่บริษัทเหรียญไทยอินเตอร์พลาสจำกัด
ผลงานวิจัย	“การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบ นำโปรตอนที่ร่วมกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน” นำเสนอแบบบรรยายในการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 ระหว่างวันที่ 8 ถึง 10 พฤศจิกายน 2558 ณ จังหวัดพัทธา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้