



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบออโตเทอร์มัลของเอทานอล  
Hybrid system of a proton-conducting SOFC with autothermal reforming of ethanol

ดร.ญาณิพร พ็ชรวรโชติ

RCH  
ธ. 2515  
255๖



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **137857**  
รับเดือนปี **13** ค.ศ. 255๘

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากแหล่งเงินงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบออโตเทอร์มัลของเอทานอล

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2556

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ ตุลาคม 2555 ถึง กันยายน 2556

หัวหน้าโครงการ ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาสมรรถนะและการออกแบบระบบการผลิตไฟฟ้าของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับเครื่องรีฟอร์มเมอร์แบบภายนอก แม้ว่าการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ระบบร่วมระหว่างเครื่องรีฟอร์มเมอร์ภายนอกและเซลล์เชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่าแบบการรีฟอร์มมิงแบบภายใน แต่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะผลิตก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับหน่วยปฏิบัติการอื่น ๆ ที่ต้องการความร้อน ซึ่งจะนำไปสู่การลดลงของความต้องการพลังงานความร้อนจากภายนอกได้ โดยในงานวิจัยนี้สนใจศึกษากระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบออโตเทอร์มัลของเอทานอลสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อออกแบบระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนและกระบวนการการเกิดรีฟอร์มมิงแบบออโตเทอร์มัลของเอทานอล การจำลองกระบวนการของระบบร่วมทำได้โดยอาศัยแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง 1 มิติ ร่วมกับแบบจำลองทางไฟฟ้าเคมีแบบละเอียด องค์ประกอบที่สภาวะสมดุลของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากเครื่องรีฟอร์มเมอร์ของเอทานอลหาได้โดยการใช้วิธีการแก้ปัญหาค่าที่น้อยที่สุดของพลังงานอิสระของกิปปี้ (Gibbs free energy minimization method) โดยจะศึกษาผลของสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (อุณหภูมิและอัตราส่วนการป้อนเชื้อเพลิง) และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (อุณหภูมิ) ที่มีต่อจำนวนเซลล์เชื้อเพลิงและปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิง ผลจากการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการการเกิดรีฟอร์มมิงแบบออโตเทอร์มัลของเอทานอลที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 25 กิโลวัตต์สามารถเป็นระบบที่ผลิตได้ทั้งพลังงานและก๊าซสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงมีผลต่อจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงมากที่สุด ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอลจะมีผลต่อปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิงมากที่สุด

คำสำคัญ : เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง; อิเล็กโทรไลต์แบบนำโปรตอน; รีฟอร์มมิงแบบออโตเทอร์มัล; เอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Hybrid system of a proton-conducting SOFC with autothermal reforming of ethanol

Researcher: Dr.Yaneeporn Patcharavorachot

Faculty: Engineering

Department: Chemical Engineering

## ABSTRACT

This study presents a performance investigation and design of a power system consisting of proton-conducting solid oxide fuel cell (SOFC-H<sup>+</sup>) integrated with an external reformer. Although the efficiency of the integrated external reforming and SOFC system is lower than the internal reforming system, SOFC-H<sup>+</sup> always provides a high-temperature exhaust gas which can be used for other heat-requiring units in the SOFC system, leading to a decrease in the external energy demand. In this study, an autothermal reforming of ethanol is employed for the production of hydrogen for SOFC. The aim is to design the SOFC-H<sup>+</sup> system integrated with the autothermal reforming of ethanol. Simulations of the system are performed based on a one-dimension fuel cell model coupled with detailed electrochemical models. The equilibrium composition of the synthesis gas from ethanol reformer is determined by using the total Gibbs free energy minimization method. The effect of operating conditions of reformer (temperature and feed ratio) and SOFC-H<sup>+</sup> (temperature) on number of cell SOFC-H<sup>+</sup> stack and CO content were examined. The simulation results indicated that the 25 kW SOFC-H<sup>+</sup> system can be both power generation and synthesis production units. In addition, it was found that SOFC temperature has strongly impact on the number of cell SOFC-H<sup>+</sup> stack whereas the steam to ethanol ratio affects on the CO content.

**Keywords :** Solid oxide fuel cell; Proton-conducting electrolyte; Autothermal reforming; Ethanol

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “ระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล” ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 โดยงานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้โดยได้รับความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.อมรชัย อภรณ์วิชานพ ซึ่งให้คำแนะนำและเป็นพี่ปรึกษาในการทำวิจัย

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังขอขอบคุณคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัย ณ ประเทศอิตาลี ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The Fifth European Fuel Cell Technology & Applications Conference - Piero Lunghi Conference (EFC13) ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 11 ถึง 13 ธันวาคม พ.ศ. 2556

ดร.ญาณิพร พ็ชรวรโชติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง.....	5
2.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิง.....	8
2.4 การผลิตไฮโดรเจนจากเอทานอล.....	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....</b>	<b>13</b>
3.1 ระบบรวมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบ ออโตเทอร์มัลของเอทานอล.....	13
3.2 การคำนวณองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ในกระบวนการรีฟอร์มมิง.....	15
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอน.....	15
3.4 การคำนวณหาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบรวม.....	21
3.5 การตรวจสอบแบบจำลอง.....	22
<b>บทที่ 4 ผลการจำลองกระบวนการและการอภิปรายผล.....</b>	<b>24</b>
4.1 การศึกษากระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาออโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิงของเอทานอล.....	25
4.2 การศึกษาสมรรถนะของระบบรวมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับ กระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบออโตเทอร์มัลของเอทานอล.....	28
4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดำเนินงานของระบบรวมทั้งต่อจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงและ ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิง.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	31
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	31
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	31
บทที่ 6 ผลงานวิจัยที่ผลิตได้.....	32
เอกสารอ้างอิง.....	33
ภาคผนวก .....	36
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัย.....	37
ประวัตินักวิจัย .....	39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ .....	5
2.2 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนทั้ง 3 วิธี .....	10
4.1 สภาวะการดำเนินงานเบื้องต้นและช่วงในการศึกษาของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ .....	23
4.2 สภาวะการดำเนินงานเบื้องต้นและช่วงในการศึกษาของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิง .....	23
4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน .....	23
4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ (อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอล = 2 และอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเอทานอล = 0.5) .....	26
4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอลที่ป้อนเข้าเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ (อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ = 600 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเอทานอล = 0.5) .....	26
4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเอทานอลที่ป้อนเข้าเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ (อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ = 600 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอล = 2) .....	27
4.7 รูปแบบการจัดเรียงเซลล์เชื้อเพลิงที่เป็นไปได้ .....	28
4.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดำเนินงานที่มีต่อจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงและปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิง .....	30

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออน .....	7
2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอน .....	8
3.1 แผนภาพแสดงระบบรวมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบออโตเทอร์มัลของเอทานอล.....	14
3.2 แผนภาพการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน.....	14
3.3 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่แท้จริง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่อุดมคติ และค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียที่ความเข้มข้นกระแสต่างๆ .....	17
3.4 ขั้นตอนการคำนวณหาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบรวม .....	21
3.5 การเปรียบเทียบลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ได้จากการจำลองกระบวนการและข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Taherparvar และคณะ (2003).....	23
4.1 ปริมาณของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้ภายใต้สภาวะการดำเนินงานมาตรฐาน .....	29

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้อุณหภูมิสูงในช่วง 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ทำให้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงมาก (ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์) เหมาะกับการนำไปใช้ในโรงงานไฟฟ้าทดแทนการผลิตไฟฟ้าแบบดั้งเดิมในปัจจุบัน โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่อเล็กโทรไลต์มีความสามารถในการนำโปรตอน (Proton-conducting electrolyte: SOFC-H<sup>+</sup>) เริ่มเข้ามามีบทบาทในการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ซึ่งข้อดีของการเลือกใช้อเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอนก็คือน้ำที่ผลิตจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจะเกิดทางด้านขั้วแคโทด ทำให้ทางด้านขั้วแอโนดมีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าประสิทธิภาพทางทฤษฎีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาของผู้วิจัยและคณะในโครงการวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ดำเนินงานภายใต้สภาวะการรีฟอร์มมิงของก๊าซมีเทนภายใน พบว่าในช่องการไหลของเชื้อเพลิงมีปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ปรากฏอยู่ปริมาณมาก ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดการสะสมของคาร์บอนและลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในขั้วแอโนด (Arpornwichanop และคณะ, 2010) และเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงแบบออโตเทอร์มัลของเอทานอลในเครื่องรีฟอร์มเมอร์ภายนอกร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน เพื่อเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงเอทานอลให้เป็นก๊าซสังเคราะห์ที่เต็มไปด้วยก๊าซไฮโดรเจนก่อนป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง

เมื่อพิจารณาจากศักยภาพของประเทศไทยพบว่า การนำเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงมีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากเอทานอลสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักของชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติและยังสามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ เช่น มันสำปะหลัง อ้อย เป็นต้น นอกจากนี้เอทานอลยังมีคุณสมบัติที่มีความเหมาะสมที่จะเป็นเชื้อเพลิงเพราะมีสถานะเป็นของเหลวที่สถานะความดันบรรยากาศ ทำให้เก็บรักษาง่ายและปลอดภัยในการขนส่งอีกด้วย และเมื่อพิจารณากระบวนการเปลี่ยนรูปของก๊าซเชื้อเพลิง (reforming process) ทั้ง 3 แบบ คือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming) กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) และกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบออโตเทอร์มัล (autothermal reforming) พบว่าการเลือกใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงแบบออโตเทอร์มัลมีความน่าสนใจ เนื่องจากให้ผลได้ของก๊าซไฮโดรเจนสูงกว่ากระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ทั้งยังไม่ต้องการผลิตพลังงานภายนอกที่ใช้การผลิตไฮโดรเจนสูงมากเหมือนในกรณีของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

แม้ว่าการออกแบบระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยเครื่องรีฟอร์มเมอร์ภายนอกและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะมีความซับซ้อน และอาจยังมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าโดยรวมต่ำ แต่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีการผลิตก๊าซที่อุณหภูมิสูงซึ่งมีศักยภาพในการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในระบบได้โดยการป้อนความร้อนที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้กับเครื่องรีฟอร์มเมอร์แบบภายนอกหรืออุปกรณ์อื่นๆภายในระบบ ส่งผลให้สามารถลดพลังงานความร้อนที่จำเป็นต้องป้อนให้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งการแลกเปลี่ยนพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในระบบนี้จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบร่วมเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงมากขึ้น โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการออตเทอร์มัลของเอทานอลร่วมกับการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนยังมีความน่าสนใจ เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนมีการใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้อย่างสมบูรณ์ทำให้อาจจะไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องเผาไหม้ (afterburner) ก๊าซที่เหลือจากเซลล์เชื้อเพลิง ส่งผลให้ระบบร่วมดังกล่าวจะยังมีความซับซ้อนน้อยลงและสามารถจัดการสมดุลพลังงานภายในระบบที่ง่ายขึ้นอีกด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะออกแบบ วิเคราะห์และปรับปรุงสมรรถนะของระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบออตเทอร์มัลของเอทานอล ซึ่งในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบร่วมเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวจะทำโดยใช้การจำลองกระบวนการ โดยแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์กระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงแบบออตเทอร์มัลของเอทานอลจะใช้การวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อคำนวณหาปริมาณของสารในระบบที่สถานะสมดุลด้วยวิธีการหาค่าพลังงานเสรีของกิบส์ต่ำสุด (minimization of Gibbs free energy) ในขณะที่ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 1 มิติที่สถานะคงตัว ที่พัฒนามาจากสมการสมดุลมวล สมดุลพลังงาน และแบบจำลองทางไฟฟ้าเคมี เพื่อศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซ รวมถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิง โดยการวิเคราะห์จะพิจารณาการออกแบบ และสถานะที่ใช้ในการดำเนินงาน (เช่น อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ สัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซสายป้อน (ก๊าซมีเทน:น้ำ:อากาศ) ที่ป้อนเข้าเครื่องรีฟอร์มเมอร์ และอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง) ที่มีผลต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบระบบการผลิตไฟฟ้าของระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบออตเทอร์มัลของเอทานอล
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมรรถนะของระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบออตเทอร์มัลของเอทานอล

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษากระบวนการรีฟอร์มมิงแบบออตเทอร์มัลของเอทานอลสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์ ในโปรแกรม Aspen Plus
- 1.3.2 ศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนโดยใช้เชื้อเพลิงที่ได้มาจากกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบออตเทอร์มัลของเอทานอล ในโปรแกรม MATLAB
- 1.3.3 ศึกษาผลของสถานะที่ใช้ในการดำเนินงานของที่มีต่อสมรรถนะการผลิตก๊าซไฮโดรเจน
- 1.3.4 ศึกษาผลของสถานะที่ใช้ในการดำเนินงานของที่มีต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาหลักการพื้นฐานของกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงของเอทานอล ปฏิบัติการที่เกี่ยวข้อง และการออกแบบระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่ดำเนินงานร่วมกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิง รวมถึงรวบรวมข้อมูลและตรวจสอบผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 พัฒนา flowsheet ของกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล ในโปรแกรม Aspen Plus
- 1.4.3 จำลองกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล และปรับเปลี่ยนสภาวะการดำเนินงาน เช่น อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนของก๊าซสายป้อน
- 1.4.4 พัฒนาแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอน จากสมการดุลมวล สมการดุลพลังงาน และสมการปฏิบัติการไฟฟ้าเคมีภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงตัว และทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองกับข้อมูลผลการทดลองที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ
- 1.4.5 จำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอน ในโปรแกรม MATLAB
- 1.4.6 ศึกษาผลของการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิง และสภาวะการดำเนินงาน ที่มีต่อสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าและพลังงานที่เกิดขึ้นภายในระบบ
- 1.4.7 วิเคราะห์และสรุปผล และจัดเตรียมรายงานและบทความวิชาการเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการดำเนินงานของระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล ซึ่งเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าภายในประเทศได้
- 1.5.2 ได้ทราบถึงสมรรถนะในการผลิตกระแสไฟฟ้าของระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล
- 1.5.3 ได้ทราบถึงผลของสภาวะการดำเนินงานต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของก๊าซเชื้อเพลิงและก๊าซออกซิเจนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง จึงไม่มีการสูญเสียระหว่างการเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นพลังงานความร้อน จากพลังงานความร้อนเป็นพลังงาน และพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงไปเป็นกระแสไฟฟ้าในช่วง 45-60% นอกจากนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นเพียงน้ำบริสุทธิ์และความร้อนเท่านั้น การปล่อยของเสียจึงเป็นศูนย์ (zero emission) ซึ่งเป็นข้อดีหลักเมื่อนำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ในยานพาหนะ

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นระบบที่มีความไม่สลับซับซ้อนเพราะประกอบไปด้วยองค์ประกอบเพียง 3 ส่วนเท่านั้น ได้แก่ สารพาประจุหรืออิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) คั่นอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (electrode) 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนด (anode) และขั้วแคโทด (cathode) และเนื่องจากไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ จึงไม่มีการสั่นที่ก่อให้เกิดเสียงดัง ซึ่งในส่วนนี้ยังเป็นผลดีต่อการนำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบพกพาอีกด้วย

เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการพัฒนาขึ้นมาในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ตามวัสดุที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell: AFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cell: PAFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell: PEMFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเตลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cell: MCFC) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC) ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดข้อมูลของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภท

จะเห็นว่าชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจากซ้ายไปขวา มีช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงานเพิ่มขึ้นจากน้อยที่สุดไปยิ่งมากที่สุด โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนจะสามารถดำเนินงานด้วยอุณหภูมิต่ำที่สุดประมาณ 80 องศาเซลเซียส ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงานสูงที่สุดประมาณ 1000 องศาเซลเซียส โดยช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงานจะสามารถบอกถึงชนิดของตัวนำประจุ (charge carrier) รวมไปถึงชนิดของก๊าซเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ดำเนินงานด้วยอุณหภูมิต่ำ (PEMFC, AFC และ PAFC) จำเป็นต้องใช้ไฮโดรเจนเป็นก๊าซเชื้อเพลิงเท่านั้น ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงที่ดำเนินงานด้วยอุณหภูมิสูง (MCFC และ SOFC) สามารถประยุกต์ใช้ก๊าซเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เช่น ก๊าซธรรมชาติ มีเทน เมทานอลและเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงได้ โดยเชื้อเพลิงเหล่านี้จะสามารถเปลี่ยนรูปเป็นไฮโดรเจนได้ในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมานี้สามารถบ่งบอกถึงความทนทานต่อสิ่งเจือปนของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดด้วย และเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิในการดำเนินงานและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถนำไปใช้งานอย่างหลากหลาย เซลล์เชื้อเพลิงที่ดำเนินงานด้วยอุณหภูมิต่ำ ได้แก่ PEMFC และ AFC ให้กำลังไฟฟ้าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น จึงมักนำไปเป็นแบตเตอรี่สำหรับโน้ตบุ๊ค โทรศัพท์มือถือและเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดพกพา นอกจากนี้ PEMFC ยังเหมาะสำหรับการใช้งานในยานพาหนะเพราะการดำเนินงานที่อุณหภูมิต่ำทำให้สามารถเริ่มเดินเครื่องได้เร็ว ในขณะที่ PAFC มีอุณหภูมิในการทำงานที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

	ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง				
	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Temperature	50-85 <sup>0</sup> C	50-250 <sup>0</sup> C	160-220 <sup>0</sup> C	630-650 <sup>0</sup> C	800-1000 <sup>0</sup> C
Electrolyte	Ion exchange membrane	Alkaline	Phosphoric acid	Alkaline Carbonate mixtures	Stabilized zirconia (ZrO <sub>2</sub> )
Charge carrier	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	O <sup>3-</sup>
Fuel	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Synthesis gas, CH <sub>4</sub>	Synthesis gas, CH <sub>4</sub>
Contaminant tolerance	<50 ppm No Sulfur	No CO, CO <sub>2</sub> No Sulfur	< 1-2% CO <50 ppm Sulfur	< ppm Sulfur	< 10-100 ppm Sulfur
Corrosion	None	None	High	High	No
Size (MW)	0.25	Very small	11	2	1-2
Application	Transportation, small appliances	Small power in aerospace	Power generation, CHP	Power generation, CHP	Power generation, CHP
Efficiency	<40 %	>60 %	40-45 %	50-60 %	50-60 %

## 2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell: SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีโครงสร้างเป็นของแข็งทั้งหมด (all-solid-state) ตลอดจนการดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีข้อดีและมีความน่าสนใจมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ดังนี้

- ปฏิกริยาที่อเล็กโทดเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะที่มีราคาแพง
- เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถดำเนินงานได้โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนหรือเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่เหมาะสม เช่น ถ่านหิน ก๊าซชีวมวล แก๊สโซลีน เอทานอล และก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากการดำเนินงานด้วยอุณหภูมิสูงเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้สามารถเปลี่ยนรูปเป็นไฮโดรเจนได้ภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งไม่ต้องการใช้เครื่องรีฟอร์มเมอร์ภายนอก (external reformer)
- เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถใช้คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง เพราะเชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถทนทานต่อสิ่งเจือปนในเชื้อเพลิงได้สูง นอกจากนี้คาร์บอนมอนอกไซด์ยังไม่เป็นพิษต่อเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

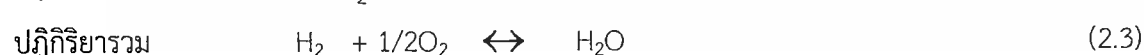
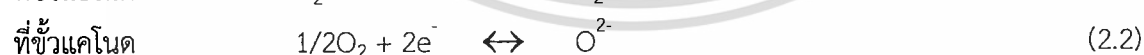
- เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งผลิตก๊าซเสียอุณหภูมิสูงที่เป็นประโยชน์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในงานในกระบวนการผลิตความร้อนร่วมและนำไปใช้ต่อไปในอุปกรณ์อื่นๆ โดยประสิทธิภาพโดยรวมของระบบจะเพิ่มขึ้นเมื่อนำก๊าซเสียดังกล่าวมาใช้
- เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็ง จึงไม่มีปัญหาในด้านการกัดกร่อนของเซลล์และการจัดการน้ำที่เกิดขึ้น

แต่อย่างไรก็ตามการทำงานที่อุณหภูมิสูงของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งอาจก่อให้เกิดความท้าทายในการพัฒนา เช่น เซลล์เชื้อเพลิงอาจเกิดการแตกหักและต้องใช้การซีลที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ยังเป็นระบบการทำงานที่ต้องการการควบคุมกำลังไฟฟ้าอีกด้วย

โครงสร้างหนึ่งหน่วยของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (single SOFC cell) ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดแบบมีรู (porous electrode) 2 ขั้ว ได้แก่ แอโนดและแคโทด แยกออกจากกันโดยอิเล็กโทรไลต์ของแข็งแบบแน่น (dense) โดยปกติแล้วอิเล็กโทรไลต์ที่สามารถใช้ได้มีในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมี 2 แบบ คืออิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออน (Oxygen ion conducting) และอิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอน (Proton conducting) รูปที่ 2.1 และ 2.2 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออนและแบบที่มีความสามารถในการนำโปรตอน ตามลำดับ ความแตกต่างหลักระหว่างอิเล็กโทรไลต์ทั้งชนิดคือตำแหน่งของน้ำที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตได้ สำหรับอิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออนน้ำจะเกิดขึ้นในด้านขั้วแอโนด ในขณะที่อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอนน้ำจะเกิดขึ้นในด้านขั้วแคโทด

เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออนภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะเกิดออกซิเจนไอออน ( $O^{2-}$ ) ขึ้นที่ขั้วแคโทด ซึ่งไอออนนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังพื้นผิวระหว่างขั้วแอโนดกับอิเล็กโทรไลต์ (anode|electrolyte interface) ณ บริเวณนี้ออกซิเจนไอออนจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมเลกุลของน้ำและอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) ออกมา โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรภายนอก แล้ววนกลับเข้ามาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ขั้วแคโทด ณ พื้นผิวระหว่างขั้วแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ (cathode|electrolyte interface) ทำให้เกิดออกซิเจนไอออนอีกครั้งหนึ่ง (ดังรูปที่ 2.1)

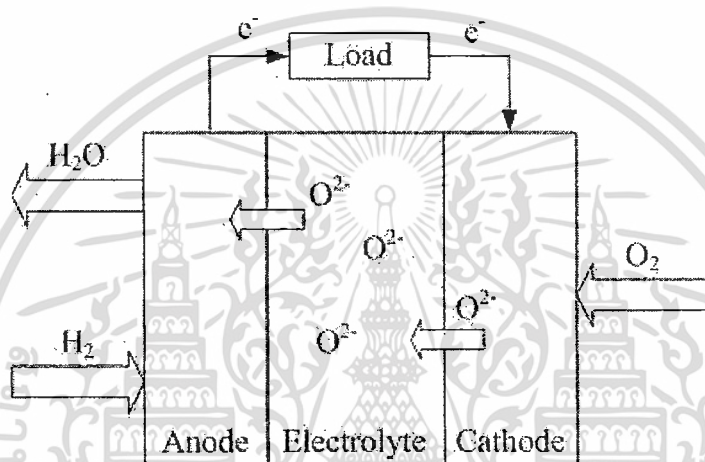
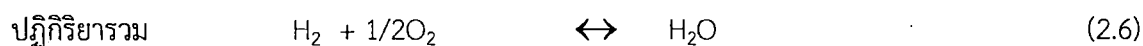
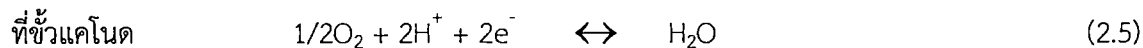
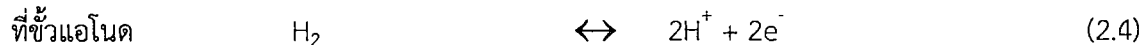
ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออน มีดังนี้



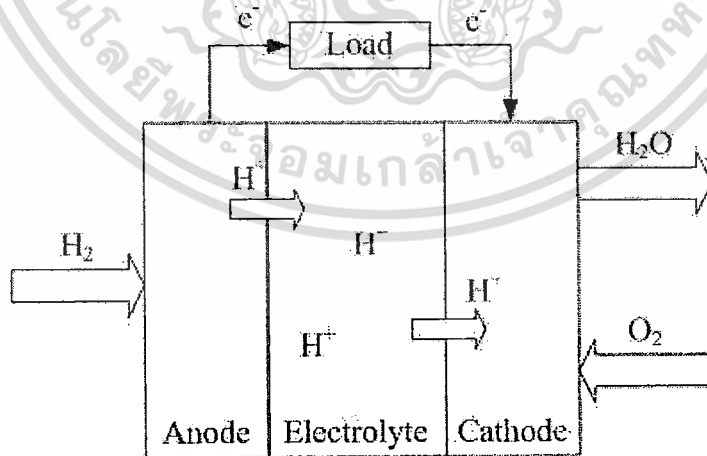
ในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอน ก๊าซไฮโดรเจนที่ป้อนเข้าทางด้านขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็นอิเล็กตรอนและโปรตอน ( $H^+$ ) โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรภายนอกแล้วจะวนกลับมายังขั้วแคโทด เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแคโทด แล้วจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ป้อนเข้ามาทางด้านขั้วแคโทดและอิเล็กตรอนที่มาจากวงจรภายนอก เกิดเป็นโมเลกุลของน้ำขึ้นมา ดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเมื่อใช้ไอเล็กโตรไลต์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอน แสดงดังสมการที่ (2.4)-(2.5)



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเมื่อใช้ไอเล็กโตรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออน



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเมื่อใช้ไอเล็กโตรไลต์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติแล้วนักวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่อิเล็กโทรไลต์มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออนเพราะมีความเสถียรภาพทางเคมีและมีความต้านทานการไหลของไอออนต่ำ (Aguiar และคณะ, 2004; Assabumrungrat และคณะ, 2004; Hussain และคณะ, 2006; Ni และคณะ, 2007; Patcharavorachot และคณะ, 2008; Arpornwichanop และคณะ, 2009; Saebea และคณะ, 2012) อย่างไรก็ตามผลของน้ำที่เกิดขึ้นทางด้านขั้วแอโนด จะทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเจือจางลง ส่งผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้น้อยลง นอกจากนี้ยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำเชื้อเพลิงที่เหลือกลับมาใช้ประโยชน์ แต่เมื่อมีการพัฒนาวัสดุที่เป็นออกไซด์แข็งที่มีความสามารถในการนำโปรตอนเกิดขึ้น ก็เริ่มมีนักวิจัยบางส่วน (Taherparvar และคณะ, 2003; Potter และ Baker, 2006; Jamsak และคณะ, 2007; Epifanio และคณะ, 2008; Ni และคณะ, 2008; Zamfirescu และ Dincer, 2009; Arpornwichanop และคณะ, 2010; Patcharavorachot และคณะ, 2010) หันมาสนใจศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอน เพราะนอกจากจะไม่ปัญหาเรื่องเชื้อเพลิงถูกเจือจางแล้ว น้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดจะสามารถปรับปรุงค่าศักย์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงได้อีกด้วย

### 2.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิง

เมื่อพิจารณาจากศักยภาพของประเทศไทยพบว่า การนำเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงมีความเป็นไปได้ เนื่องจากเอทานอลสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักของชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติและยังสามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ เช่น มันสำปะหลัง อ้อย เป็นต้น นอกจากนี้เอทานอลมีคุณสมบัติที่มีความเหมาะสมที่จะเป็นเชื้อเพลิงเพราะมีสถานะเป็นของเหลวที่สภาวะความดันบรรยากาศ ทำให้เก็บรักษาได้ง่ายและปลอดภัยในการขนส่ง โดยในงานของ Douvartzides และคณะ (2003) ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบเชื้อเพลิงหลายๆชนิด เพื่อหาเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง โดยวิธีวิเคราะห์จะพิจารณาจากอุณหพลศาสตร์และวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐศาสตร์ จากผลของการศึกษาพบว่าเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงจะทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพเป็นอันดับสองรองจากการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง แต่เมื่อพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงจะมีความเหมาะสมมากที่สุด และเนื่องจากการดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง เมื่อป้อนเอทานอลเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง เอทานอลจะเกิดการเปลี่ยนรูป (reform) ภายในเซลล์เชื้อเพลิงทางด้านขั้วแอโนด ได้เป็นก๊าซสังเคราะห์ที่เต็มไปด้วยก๊าซไฮโดรเจนซึ่งจำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยเรียกการดำเนินการเช่นนี้ว่าการเกิดรีฟอร์มมิงของเชื้อเพลิงภายในเซลล์เชื้อเพลิง (internal reforming SOFC: IR-SOFC) ซึ่งข้อดีของการดำเนินงานในลักษณะดังกล่าวจะทำให้ต้นทุนการผลิตและระบบการผลิตมีความซับซ้อนลดลง ทั้งยังให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้งานวิจัยส่วนใหญ่สนใจศึกษาการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่เกิดการรีฟอร์มมิงภายในเซลล์เชื้อเพลิง (Aguiar และคณะ, 2004; Assabumrungrat และคณะ, 2004; Hussain และคณะ, 2006; Arpornwichanop และคณะ, 2009; Arpornwichanop และคณะ, 2010)

แต่ปัญหาหลักที่พบในการดำเนินการที่เกิดรีฟอร์มมิงภายในเซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่ด้วยกัน 2 ข้อคือ (1) อุณหภูมิแตกต่างกันภายในเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนที่รุนแรง ซึ่งอาจนำไปสู่การแตกหักของเซลล์ได้ และ (2) เกิดการสะสมของคาร์บอนที่ขั้วแอโนดซึ่งอาจทำให้ขั้วอุดตันและมีสมรรถนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการดำเนินงานแย่ง ในปี 2007 Laosiripojana และ Assabumrungrat ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งโดยตรง พบว่าไม่ควรป้อนเอทานอลเข้าสู่เซลล์โดยตรง เนื่องจากการเกิดรีฟอร์มมิงของเอทานอลที่ไม่สมบูรณ์บนตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/YSZ ที่ด้านแอโนดจะทำให้เอทานอลเปลี่ยนรูปได้เป็นอีเทน (ethane) และเอทาลีน (ethylene) ซึ่งสารทั้งสองนี้จะสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นคาร์บอนได้ง่าย แม้ว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงของเอทานอลจะดำเนินงานโดยใช้อัตราส่วนในการป้อนไอน้ำต่อเอทานอลมากขึ้นหรือดำเนินการที่อุณหภูมิสูงที่ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมเพื่อป้องกันให้เกิดคาร์บอนก็ตาม แต่การใช้เชื้อเพลิงเอทานอลก็ยังคงมีโอกาสในการเกิดคาร์บอนได้ง่าย ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีอายุในการใช้งานลดลง (Assabumrungrat และคณะ, 2004) ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ดำเนินงานภายใต้สภาวะการรีฟอร์มมิงของก๊าซมีเทนภายใน (Direct internal reforming: DIR-SOFC) ที่วิเคราะห์ได้จากผลงานของผู้วิจัยและคณะ (Arpornwichanop และคณะ, 2010) พบว่าภายใต้การดำเนินงานที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง 0.7 โวลต์ ในช่องการไหลของเชื้อเพลิงมีปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ปรากฏอยู่ปริมาณมาก (ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดการสะสมของคาร์บอนและลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในขั้วแอโนด

ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาดังกล่าว ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้เครื่องรีฟอร์มเมอร์ภายนอก (external reformer: ER-SOFC) ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน เพื่อเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงเอทานอลให้เป็นก๊าซสังเคราะห์ที่เต็มไปด้วยก๊าซไฮโดรเจนก่อนป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง แม้ว่าการออกแบบระบบรวมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของเอทานอลจะมีความซับซ้อน และมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าโดยรวมต่ำ แต่การดำเนินงานแยกกันระหว่างหน่วยผลิตก๊าซไฮโดรเจนและหน่วยผลิตกระแสไฟฟ้าจะทำให้สามารถจัดการสมดุลพลังงานภายในระบบที่ง่ายขึ้น และการออกแบบการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในระบบอย่างมีประสิทธิภาพ จะทำให้ระบบรวมของเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงขึ้น

## 2.4 การผลิตไฮโดรเจนจากเอทานอล

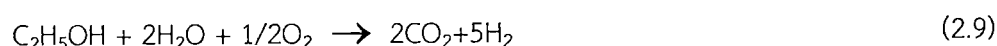
2.4.1 ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ เป็นกระบวนการที่นำสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมาทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 750-800°C ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน



2.4.2 ปฏิกิริยา Partial Oxidation ด้วยอากาศ ก๊าซเชื้อเพลิงจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไฮโดรเจน โดยมีอากาศเป็นก๊าซออกซิแดนซ์ เมื่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นและมีอุณหภูมิสูงขึ้น



2.4.3 ปฏิกิริยาอโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิง เป็นกระบวนการใหม่ที่นำข้อดีของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนมารวมกันโดยการป้อนทั้งน้ำและออกซิเจนเพื่อทำปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนทั้ง 3 วิธี

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
รีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ	-ได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรเจนสูง	-ต้องการพลังงานสูงในการเกิดปฏิกิริยา
ออกซิเดชันบางส่วน	-กระบวนการดำเนินเร็วเพราะเกิดการคายความร้อน -ตอบสนองอย่างรวดเร็ว -ไม่ต้องระมัดระวังเรื่องความร้อน	-ได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรเจนที่มีความเข้มข้นน้อย -เกิดมลพิษออกมามาก (HCs, CO)
ออโตเทอร์มัล รีฟอร์มมิง	-ไม่ต้องใช้พลังงานสูงในการเกิดปฏิกิริยา -ลดความต้องการของพลังงาน -กระบวนการเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว	-ได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรเจนที่มีความเข้มข้นต่ำ -ต้องระมัดระวังในเรื่องการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างจุดความร้อนและคายความร้อนให้สมดุลกัน

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนทั้ง 3 วิธี ซึ่งพบว่าการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำจะสามารถให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรเจนสูงที่สุด แต่ต้องการพลังงานจากภายนอกสูงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ในขณะที่ปฏิกิริยาออโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิง จะเป็นกระบวนการที่เป็นกลางทางความร้อน เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ผลิตได้จากการออกซิเดชันบางส่วนสามารถนำมาใช้ในการรีฟอร์มมิงแบบไอน้ำได้ ทำให้ช่วยลดปริมาณพลังงานภายนอกที่ต้องป้อนให้แก่เครื่องปฏิกรณ์ได้ นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวยังมีข้อดีหลายด้าน เช่น สามารถเลือกใช้วัสดุได้หลากหลาย ค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ และยังง่ายต่อการเริ่มต้นระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และยังได้ผลได้ของก๊าซไฮโดรเจนสูงกว่ากระบวนการออกซิเดชันบางส่วนด้วย ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีออโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิง

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

งานวิจัยในปัจจุบันให้ความสนใจเกี่ยวกับการนำเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศต่ำ การเลือกใช้เชื้อเพลิงที่หาได้ง่ายในประเทศ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจะเป็นแนวทางหนึ่งที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงยิ่งกลายเป็นเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก การศึกษาเกี่ยวกับการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิงมีดังนี้

Tsiakaras และ Demin (2001) ศึกษาสมรรถนะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้เชื้อเพลิงเอทานอล ซึ่งเชื้อเพลิงเอทานอลจะเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงในเครื่องรีฟอร์มเมอร์ภายใน โดยพิจารณาความแตกต่างของตัวออกซิแดนซ์ ได้แก่ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming) ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (dry reforming) และปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนด้วยอากาศ (partial oxidation) การคำนวณที่สถานะสมดุลจะกระทำในช่วงที่ไม่มีการเกิดคาร์บอน นั่นคือช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิระหว่าง 800 และ 1200 เคลวิน โดยสมมติให้อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเอทานอลที่จุดเริ่มต้นมีค่าต่างๆกัน จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิการดำเนินงานน้อยกว่า 950 และมากกว่า 1100 เคลวิน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ป้อนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของเอทานอลให้ประสิทธิภาพสูงสุด ในขณะที่การดำเนินงานในช่วงอุณหภูมิปานกลาง ควรป้อนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกริยารีฟอร์มมิงด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เพราะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าปฏิกริยาอื่นๆ

Douvartzides et al. (2003) ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบเชื้อเพลิงหลายชนิด เพื่อหาเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง โดยวิธีวิเคราะห์จะพิจารณาจากอุณหพลศาสตร์และวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐศาสตร์ จากผลของการศึกษาพบว่าเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงจะทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพเป็นอันดับสองรองจากการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง แต่เมื่อพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงจะมีความเหมาะสมมากที่สุด

Assabumrungrat และคณะ (2004) วิเคราะห์รายละเอียดทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อทำนายขอบเขตของการเกิดคาร์บอนในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีการเกิดรีฟอร์มมิงของเชื้อเพลิงเอทานอลแบบภายใน จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อเอทานอลที่ป้อนเข้าเซลล์ เชื้อเพลิงสามารถลดการเกิดคาร์บอนได้

Laosiripojana และ Assabumrungrat (2007) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งโดยตรง จากผลการศึกษาพบว่าไม่เหมาะที่จะใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่เซลล์โดยตรง เนื่องจากการเกิดรีฟอร์มมิงของเอทานอลที่ไม่สมบูรณ์บน Ni/YSZ ที่ด้านแอโนด จะทำให้เอทานอลเปลี่ยนรูปได้เป็นอีเทน (ethane) และเอทาลีน (ethylene) ซึ่งสารทั้งสองนี้จะสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นคาร์บอนได้ง่าย แม้ว่าอัตราส่วนในการป้อนไอน้ำต่อเอทานอลจะมีค่ามากหรือดำเนินการที่อุณหภูมิสูงที่ซึ่งเป็นสถานะที่เหมาะสมเพื่อป้องกันให้เกิดคาร์บอน แต่การใช้เชื้อเพลิงเอทานอลก็ยังคงมีโอกาสในการเกิดคาร์บอนได้ง่าย ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีอายุในการใช้งานลดลง

#### 2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของเอทานอล

Arteaga-Perez และคณะ (2009) ศึกษาการจำลองกระบวนการของระบบที่มีการร่วมกันระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งและกระบวนการรีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วยไอน้ำ โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิ ( $723 < T < 873$  K), อัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อเอทานอล ( $3 < RAE < 6$ ) และสัมประสิทธิ์การใช้เชื้อเพลิง ( $0.7 < FUC < 0.9$ ) โดยก๊าซที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกนำมาผสมและป้อนเข้าสู่เครื่องเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนไปยังหน่วยอื่นๆในกระบวนการ งานวิจัยนี้ยังได้ออกแบบโครงข่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger network) ทั้งหมด 2 แบบ โดยพบว่าระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถดำเนินงานได้โดยไม่ต้องป้อนพลังงานจากภายนอก (self-sustain process) ก็ต่อเมื่อระบบดำเนินงานโดยมีสัมประสิทธิ์การใช้เชื้อเพลิงเป็น 0.8 อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์เป็น 823 K และอัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อไอน้ำเป็น 1.5:5

Hernandez และ Kafarov (2009) ทำการออกแบบกระบวนการร่วมสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของเชื้อเพลิงไปโอเอทานอลและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าการออกแบบระบบรวมของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการแลกเปลี่ยนทั้งความร้อนและมวลโดยการรีไซเคิลก๊าซ ออกทางด้านซ้ายแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงบางส่วน นำก๊าซบางส่วนมาเข้าแก๊สเทอร์ไบน์ และการเผาไหม้ก๊าซที่เหลือเพื่อนำไปอุ่นสารตั้งต้น เป็นการออกแบบที่ดีที่สุด ซึ่งได้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเป็น 52.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลของสถานะในการดำเนินงานพบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการรีฟอร์มมิงและอัตราส่วนโดยโมลของไบโอเอทานอลต่อน้ำ

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าทั้งการศึกษากระบวนการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงเอทานอล และการศึกษาาระบบดังกล่าวร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง จะนิยมใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นหลัก ในขณะที่การประยุกต์ใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงแบบออกไซด์เทอร์มัลก็มีความน่าสนใจ และน่าจะช่วยลดปัญหาการเกิดการสะสมของคาร์บอนภายในเครื่องรีฟอร์มเมอร์เอง รวมถึงยังมีความเป็นไปได้ในการจัดการสมดุลทางความร้อนง่ายขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาเกี่ยวกับการศึกษาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอน งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปยังการสังเคราะห์และวิเคราะห์ลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุออกไซด์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอนเท่านั้น (Taherparvar และคณะ 2003; Fukada และคณะ 2006; Potter และ Baker, 2006, Suksamai และ Metcalfe 2007) มีงานวิจัยบางส่วนเท่านั้นที่สนใจศึกษาสมรรถนะการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนโดยใช้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน (มีเทน แอมโมเนีย และเอทานอล) (Jamsak และคณะ, 2007; Ni และคณะ, 2008; Arpornwichañop และคณะ, 2009) รวมถึงการศึกษาที่ร่วมกับกระบวนการรีฟอร์มมิงของเอทานอลด้วย

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

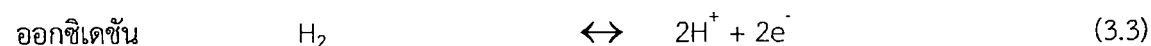
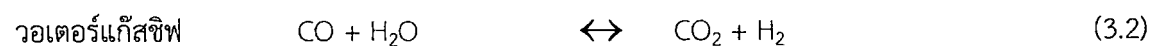
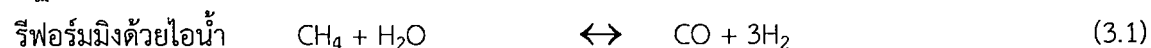
งานวิจัยนี้สนใจศึกษาระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล ดังนั้นในส่วนของวิธีการดำเนินงานจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก โดยหัวข้อที่ 3.1 จะอธิบายภาพรวมของระบบร่วม หัวข้อที่ 3.2 จะนำเสนอวิธีการคำนวณองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ในกระบวนการรีฟอร์มมิง หัวข้อที่ 3.3 จะแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอน หัวข้อที่ 3.4 จะอธิบายถึงขั้นตอนการคำนวณหาสมรรถนะของระบบร่วม และ หัวข้อที่ 3.5 จะแสดงการตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอน

#### 3.1 ระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล

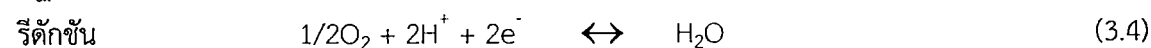
รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพของระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล โดยเริ่มจากสารตั้งต้นซึ่งได้แก่ เอทานอล น้ำ และอากาศ ถูกให้ความร้อนบางส่วน จากนั้นจะป้อนเข้าสู่เครื่องรีฟอร์มเมอร์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาอโตเทอร์มัล จากนั้นก๊าซสังเคราะห์ที่ออกจากเครื่องรีฟอร์มเมอร์ซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) น้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จะถูกเพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งตามอุณหภูมิดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง หลังจากก๊าซสังเคราะห์มีอุณหภูมิสูงขึ้นก็就会被ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงทางด้านขั้วแอโนด ในขณะที่อากาศจะถูกป้อนเข้าทางขั้วแคโทด

ที่ขั้วแอโนดก๊าซมีเทนจะทำปฏิกิริยากับน้ำโดยอาศัยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (สมการที่ (3.1)) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซสังเคราะห์จะทำปฏิกิริยากับน้ำต่อไปโดยอาศัยปฏิกิริยาอวเตอรแก๊สซิฟ (สมการที่ (3.2)) โดยก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซสังเคราะห์และที่ผลิตได้จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (สมการที่ (3.3)) ได้โปรตอนและอิเล็กตรอนออกมา โดยโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกไปยังขั้วแคโทด ส่วนอากาศที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (สมการที่ (3.4)) กับโปรตอนและอิเล็กตรอน และน้ำออกมา ส่วนการไหลของอิเล็กตรอนในวงจรภายนอกจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดจะผลิตกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนทั้งทางด้านแอโนดและแคโทด สามารถสรุปได้ดังนี้

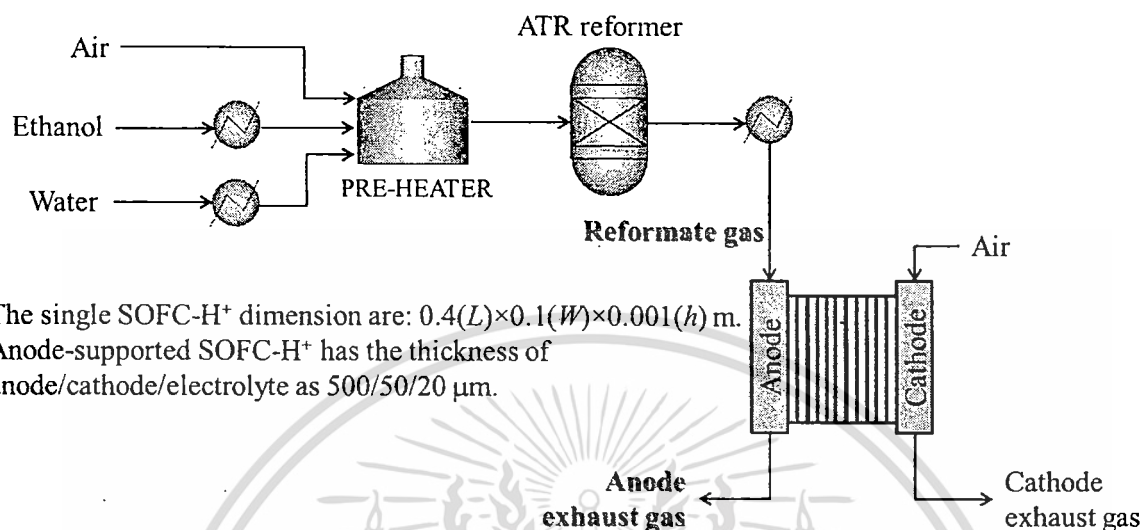
#### ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทางด้านขั้วแอโนด



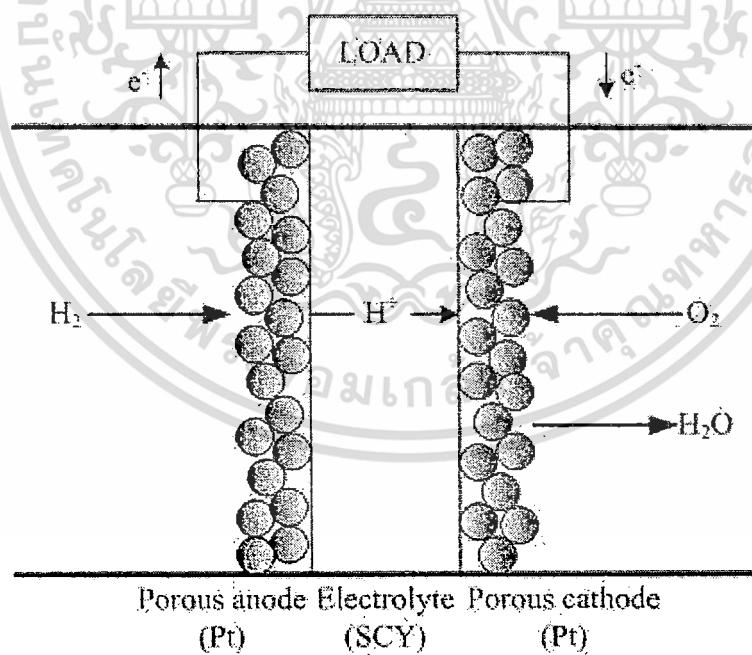
#### ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทางด้านขั้วแคโทด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงระบบรวมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล



รูปที่ 3.2 แผนภาพการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การคำนวณองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ในกระบวนการรีฟอร์มมิง

ในการคำนวณองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ในเครื่องรีฟอร์มเมอร์จะอาศัยการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการออกซิเดชันรีฟอร์มมิงของเอทานอล ซึ่งจะทำโดยใช้ซอฟต์แวร์ทางการค้า Aspen Plus เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานต่างๆ เช่น อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอล และอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเอทานอล ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน องค์ประกอบที่สภาวะสมดุลของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากเครื่องรีฟอร์มเมอร์จะพิจารณาโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาค่าที่น้อยที่สุดของพลังงานอิสระของกิบส์ โดยสมการสภาวะ (equation of state) ที่ใช้ในการคำนวณมาจากวิธีของ Peng-Robinson Stryjek-Vera (PRSV)

### 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนหนึ่งหน่วยที่มีรูปร่างแบบแผ่นประกอบด้วยขั้วแอโนดและขั้วแคโทดที่ถูกแยกออกจากกันโดยอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 3.2 โดยวัสดุที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ คือ Yb-doped SrCeO<sub>3</sub> (SrCe<sub>0.95</sub>Yb<sub>0.05</sub>O<sub>3-α</sub> หรือ SCYb) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการนำโปรตอนโดยที่มีจำนวนการถ่ายโอนโปรตอนสูง ส่วนวัสดุที่นำมาใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดคือแพลตินัม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งประกอบด้วยสมการสมดุลมวลรอบๆช่องการไหลของเชื้อเพลิงและช่องการไหลของอากาศ และสมการที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งสัมพันธ์กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและอากาศและอุณหภูมิที่มีค่าศักย์ไฟฟ้า ค่าความแน่นกระแสไฟฟ้า และตัวแปรอื่นๆที่มีความเกี่ยวข้องกัน ในการพัฒนาแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบแผ่นที่มีการไหลของก๊าซในเส้นทางเดียวกัน และมีการรีฟอร์มมิงของก๊าซมีเทนภายใน จะใช้สมมติฐานต่างๆดังนี้

- เซลล์เชื้อเพลิงดำเนินงานที่สภาวะคงตัว (steady-state) และอุณหภูมิคงที่ (isothermal)
- แบบจำลองที่ใช้มีลักษณะ 1 มิติ (one-dimension) คือค่าพารามิเตอร์ต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงตามเส้นทางการไหลของก๊าซในแนวแกน x เพียงแกนเดียว
- ก๊าซทุกชนิดมีลักษณะเป็นก๊าซอุดมคติ
- สร้างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งในลักษณะแบบแผ่น
- ใช้ก๊าซมีเทนเป็นเชื้อเพลิงและกำหนดให้เกิดการรีฟอร์มมิงภายในเซลล์เชื้อเพลิง
- กำหนดให้ก๊าซมีเทนสามารถเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น และมีเพียงก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- ค่าความแตกต่างทางความดันมีค่าน้อยมากๆ

#### 3.3.1 สมการสมดุลมวล (Mass balance equation)

เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งดำเนินงานแบบที่เกิดการรีฟอร์มมิงของก๊าซเชื้อเพลิงภายใน จะมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมด 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยารีฟอร์มมิง วอเตอร์แก๊สชิฟ และปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ช่องการไหลของเชื้อเพลิงจะประกอบด้วยมีเทน น้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับทั้งเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออนและนำโปรตอน ในขณะที่ทางช่องการไหลของอากาศนั้น ก๊าซที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาคือออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จากสมมติฐานข้างต้นสามารถสร้างสมการสมดุลมวลโดยอาศัยสมการอนุพันธ์ (differential equations) ที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซต่างๆในช่องการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศตลอดความยาวของเซลล์เชื้อเพลิง ได้ตั้งสมการต่อไปนี้

- ช่องการไหลของเชื้อเพลิง

$$\frac{dC_{\text{CH}_4}}{dx} = \frac{1}{u_f h_f} (-R_{\text{ref}}) \quad (3.5)$$

$$\frac{dC_{\text{H}_2\text{O}(\text{an})}}{dx} = \frac{1}{u_f h_f} (-R_{\text{ref}} - \dot{R}_{\text{WGS}}) \quad (3.6)$$

$$\frac{dC_{\text{CO}}}{dx} = \frac{1}{u_f h_f} (R_{\text{ref}} - R_{\text{WGS}}) \quad (3.7)$$

$$\frac{dC_{\text{H}_2}}{dx} = \frac{1}{u_f h_f} (3R_{\text{ref}} + R_{\text{WGS}} - R_{\text{ele}}) \quad (3.8)$$

$$\frac{dC_{\text{CO}_2}}{dx} = \frac{1}{u_f h_f} (R_{\text{WGS}}) \quad (3.9)$$

- ช่องการไหลของอากาศ

$$\frac{dC_{\text{O}_2}}{dx} = \frac{1}{u_a h_a} (-0.5R_{\text{ele}}) \quad (3.10)$$

$$\frac{dC_{\text{N}_2}}{dx} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{dC_{\text{H}_2\text{O}(\text{ca})}}{dx} = \frac{1}{u_a h_a} (R_{\text{ele}}) \quad (3.12)$$

$$C_{i,a} \Big|_{x=0} = C_{i,a}^0 \quad (3.13)$$

โดยที่ “an” และ “ca” แสดงถึงด้านแอโนดและแคโทด ตามลำดับ  $C_{i,f}$  และ  $C_{i,a}$  แสดงความเข้มข้นของก๊าซชนิด  $i$  ในช่องการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ ตามลำดับ

### 3.3.2 สมการปฏิกิริยาเคมี

จากที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 3.1 ก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากเครื่องรีฟอร์มเมอร์ประกอบไปด้วย ก๊าซมีเทน ก๊าซไฮโดรเจน น้ำ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อพิจารณาการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่เกิดการรีฟอร์มมิงของมีเทนภายในเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อก๊าซเชื้อเพลิงข้างต้นถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงทางช่องการไหลของเชื้อเพลิง ก๊าซมีเทนจะเกิดการรีฟอร์มมิงภายในเซลล์เชื้อเพลิงผ่านปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำบนขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง ตั้งสมการที่ (3.1) ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนที่ดำเนินไปได้ค่อนข้างช้า ดังนั้นจึงสมมติว่าอัตราการปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่มีเขตจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการปฏิกิริยาฟอรัมมิง ( $R_{ref}$ ) บนขั้วแอโนดที่ทำจาก Ni-YSZ สามารถแสดงดังสมการ (Achenbach and Riensche 1994)

$$R_{ref} = k_0 p_{CH_4} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

เมื่อ  $k_0$  and  $E_a$  คือค่าคงที่ pre-exponential และค่าพลังงานกระตุ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $4274 \text{ mol s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ bar}^{-1}$  และ  $82 \text{ kJ mol}^{-1}$  ตามลำดับ

จากนั้นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากปฏิกิริยาฟอรัมมิงด้วยไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับน้ำที่เหลือ ผ่านปฏิกิริยาอวเทอร์แก๊สซิฟ ได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการที่ (3.2) ปฏิกิริยาอวเทอร์แก๊สซิฟเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งจะถูกสมมติว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นภายใต้สภาวะสมดุลเคมี โดยสมการที่แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาอวเทอร์แก๊สซิฟ ( $R_{WGS}$ ) ที่ใช้ในงานนี้พัฒนาขึ้นมาจากงานของ Herberman และ Young (2004)

$$R_{WGS} = k_{WGS} \times \tau_{an} \times \left( p_{CO} p_{H_2O} - \frac{p_{CO_2} p_{H_2}}{K_{eq}} \right)$$

$$k_{WGS} = 0.0171 \exp\left(-\frac{103191}{RT}\right)$$

$$K_{eq} = \exp\left(-0.2935Z^3 + 0.6351Z^2 + 4.1788Z + 0.3169\right), Z = \frac{1000}{T(K)} - 1$$

เมื่อ  $k_{WGS}$  คือ pre-exponential factor ( $\text{mol m}^{-3} \text{ Pa}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) และ  $K_{eq}$  คือค่าคงที่ของสมดุลสำหรับปฏิกิริยาอวเทอร์แก๊สซิฟ

กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) จะมีความสัมพันธ์กับฟลักซ์ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี จากกฎของฟาราเดย์และเมื่อมีเพียงก๊าซไฮโดรเจนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดปฏิกิริยาเพียงก๊าซเดียว ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนที่ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณของน้ำที่ผลิตขึ้นตลอดการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (สมการที่ (4.7) และ สมการที่ (4.8)) จะสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density,  $i$ ) ที่ถูกผลิตขึ้นโดยเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ( $R_{ele}$ ) จะสามารถเขียนได้ ดังนี้สมการ

$$R_{ele} = \frac{i}{2F}$$

### 3.3.3 สมการที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Model)

สำหรับการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันของเชื้อเพลิงที่ขั้วแอโนด และการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซออกซิแดนซ์ที่ขั้วแคโทด โดยความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดจะทำให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผันกลับได้ (reversible voltage) หรือ ศักย์ไฟฟ้าขณะวงจรเปิด (open-circuit voltage:  $E^{OCV}$ ) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเนิสต์ (Nernst equation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E^{\text{OCV}} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{\text{H}_2(\text{a})} P_{\text{O}_2(\text{c})}^{0.5}}{P_{\text{H}_2\text{O}(\text{c})}} \right) \quad (3.14)$$

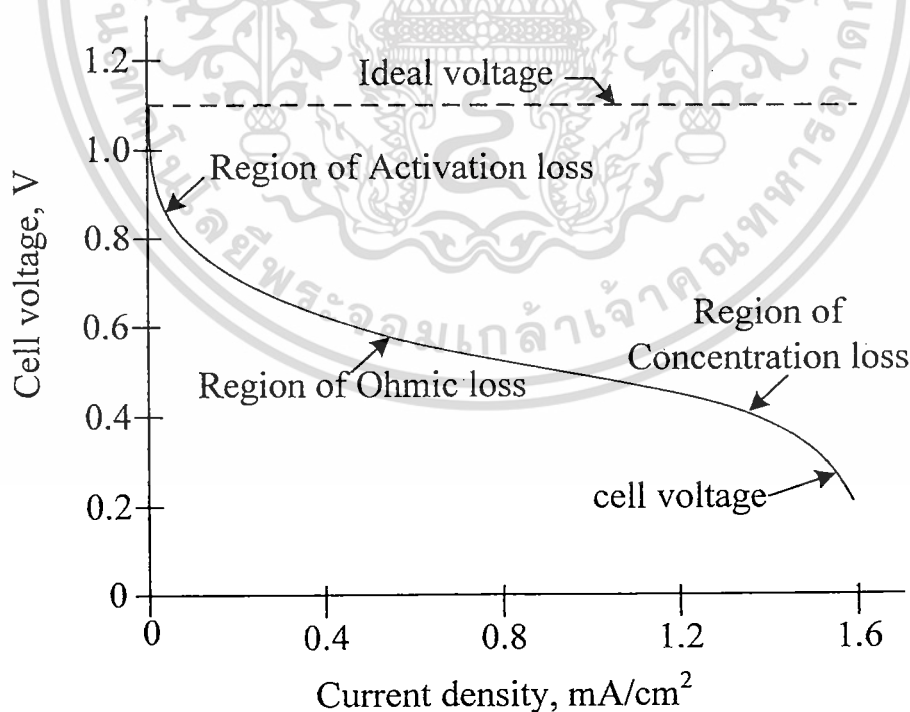
โดยที่ “a” และ “c” แสดงถึงด้านแอโนดและแคโทด ตามลำดับ  $E^0$  คือศักย์ศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะความดันมาตรฐาน ซึ่งจะมีค่าเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในการดำเนินงานดังกล่าวของ Ni และคณะ (2007):

$$E^0 = 1.253 - 2.4516 \times 10^{-4} T \quad (3.15)$$

อย่างไรก็ตามในการดำเนินงานจริงของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อมีกระแสไฟผ่านเซลล์เชื้อเพลิง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่แท้จริงหรือค่าศักย์ในการดำเนินงาน (operating voltage) จะมีค่าน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีเสมอ ดังแสดงในสมการที่ (3.16) เนื่องจากการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจะทำให้เกิดความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง (internal resistance) และค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่พื้นผิวระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ (overpotential losses)

$$V = E^{\text{OCV}} - iR_{\text{ohm}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{conc}} \quad (3.16)$$

รูปที่ 3.3 เป็นกราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่แท้จริง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่อุดมคติ และค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียที่ความเข้มกระแสต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียแต่ละชนิดจะมีความสำคัญที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งความหนาแน่นกระแสมีความหมายว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของเซลล์เชื้อเพลิง โดยการเกิดศักย์ไฟฟ้าคงตัวที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่แท้จริง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่อุดมคติ และค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียที่ความเข้มกระแสต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Activation overpotential:  $\eta_{act}$ ) เป็นความสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่พื้นผิวของอิเล็กโทรดที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด นั้นคือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของก๊าซไฮโดรเจนและการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ตามลำดับ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของแต่ละขั้วอิเล็กโทรดจะสามารถคำนวณได้จากสมการไม่เชิงเส้นของบัตเลอร์-วอลเมอร์ (Butler-Volmer) ดังนี้

$$i = i_{0,\text{electrode}} \left[ \exp\left(\frac{\alpha nF}{RT} \eta_{\text{act,electrode}}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha)nF}{RT} \eta_{\text{act,electrode}}\right) \right] \quad (3.17)$$

electrode  $\in$  {anode,cathode}

โดยที่  $\alpha$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทประจุ (transfer coefficient)  $n$  คือจำนวนของอิเล็กตรอนที่ถ่ายโอนในขั้นตอนกำหนดปฏิกิริยา และ  $i_{0,\text{electrode}}$  คือค่าความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยน (exchange-current density,  $A/m^2$ )

(2) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า เกิดขึ้นเนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะพื้นที่ (area specific resistance =  $R_{ohm}$ ) ที่มาจากการไหลของไอออนในอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะมีค่าขึ้นกับความหนาของอิเล็กโทรไลต์ ( $\tau$ ) และค่าการนำไอออน (ionic conductivity) ของอิเล็กโทรไลต์ ( $\sigma$ ) เมื่อประยุกต์ใช้กฎของโอห์มจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานจำเพาะพื้นที่และคุณสมบัติของอิเล็กโทรไลต์ได้ ดังนี้

$$R_{Ohm} = \frac{\tau_{\text{electrolyte}}}{\sigma_{\text{electrolyte}}} \quad (3.18)$$

โดยปกติแล้วที่ขั้วอิเล็กโทรดจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์มาก ๆ ดังนั้นจึงสามารถละทิ้งผลการนำไฟฟ้าในอิเล็กโทรดได้

(3) ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวล (Concentration overpotential:  $\eta_{conc}$ ) เป็นความสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนของก๊าซสารตั้งต้นตลอดขั้วอิเล็กโทรด โดยความสูญเสียดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากการลดลงของความเข้มข้นของก๊าซเชื้อเพลิงที่เข้าทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ณ บริเวณพื้นผิวระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ และความสูญเสียนี้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อก๊าซเชื้อเพลิงและออกซิแดนซ์ที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงถูกเจือปนด้วยก๊าซชนิดอื่น หรือเกิดขึ้นมาจากฟลักซ์ขาเข้าของสารตั้งต้นและฟลักซ์ขาออกของผลิตภัณฑ์เกิดได้ช้ากว่าการปล่อยกระแสไฟฟ้า

ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการการถ่ายโอนมวล สามารถคำนวณได้จากความแตกต่างระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าขณะวงจรเปิดในช่องการไหล (bulk) และค่าศักย์ไฟฟ้าขณะวงจรเปิดที่พื้นผิวระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ (I) ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการการถ่ายโอนมวลของเชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออนและโปรตอนจึงมีค่า ดังนี้

$$\eta_{\text{conc,anode}} = \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{H_2(a)}}{P_{H_2(a)}^1}\right) \quad (3.19)$$

$$\eta_{\text{conc,cathode}} = \frac{RT}{2F} \ln\left(\left(\frac{P_{O_2(c)}}{P_{O_2(c)}^1}\right)^{0.5} \frac{P_{H_2O(c)}^1}{P_{H_2O(c)}}\right) \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $p_{H_2}^I$ ,  $p_{O_2}^I$  และ  $p_{H_2O}^I$  คือ ความดันย่อยของไฮโดรเจนที่พื้นผิวระหว่างขั้วแอโนดและอิเล็กโทรไลต์ และ ความดันย่อยของออกซิเจนและน้ำที่พื้นผิวระหว่างขั้วแคโทดและอิเล็กโทรไลต์ ตามลำดับ

ในการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการการถ่ายโอนมวล จำเป็นต้องรู้ค่าความดันย่อยของไฮโดรเจน น้ำ และอากาศ ที่พื้นผิวระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ ในงานนี้ได้สมมติว่า อัตราของการถ่ายโอนมวลของก๊าซในขั้วอิเล็กโทรดจะสามารถอธิบายได้โดยการแพร่ของก๊าซในรูพรุนโดยใช้กฎของฟิค (Fick's law) ซึ่งกำหนดให้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นที่พื้นผิวระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ และอัตราการแพร่ของสารตั้งต้นไปยังพื้นผิวดังกล่าวมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี จากนิยามดังกล่าวสามารถเขียนสมการแสดงความดันย่อยของไฮโดรเจน น้ำ และอากาศ ที่พื้นผิวระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ (Chan และคณะ, 2001; Suwanwarangkul และคณะ, 2003; Hernandez-Pacheco และคณะ, 2005b; Bird และคณะ, 2006) ได้ดังนี้

$$p_{H_2}^I = P - \left( P - p_{H_2(a)} \right) \exp \left( \frac{iRT\tau_{anode}}{2FD_{a,eff}P} \right) \quad (3.21)$$

$$p_{O_2}^I = p_{O_2(c)} - \frac{jRT\tau_{cathode}}{2FD_{c,eff}} \quad (3.22)$$

$$p_{H_2O}^I = p_{H_2O(c)} + \frac{jRT\tau_{cathode}}{4FD_{c,eff}} \quad (3.23)$$

โดยที่  $D_{a,eff}$  และ  $D_{c,eff}$  แทนสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (effective diffusivity coefficient) ของก๊าซที่ด้านขั้วแอโนดและขั้วแคโทดซึ่งถูกอธิบายโดยสัมประสิทธิ์การแพร่แบบ ordinary และ Knudsen diffusions (Chan และคณะ, 2001; Bird และคณะ, 2006) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลทางด้านแอโนดคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซไฮโดรเจนและน้ำ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางด้านขั้วแคโทดคำนวณมาจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจน ในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่มีความสามารถในการนำโปรตอน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลทางด้านแอโนดคำนวณมาจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซไฮโดรเจน ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางด้านขั้วแคโทดคำนวณมาจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซออกซิเจนและน้ำ โดยค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การแพร่จะขึ้นกับสัดส่วนโดยโมลของก๊าซทั้งสองด้วย

$D_{a,eff}$  คำนวณมาจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซไฮโดรเจน (สมการที่ (3.24)) ในขณะที่  $D_{c,eff}$  คำนวณมาจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซ 3 ชนิด คือ ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ (สมการที่ (3.25)) และเนื่องจากการถ่ายโอนมวลของก๊าซทางด้านแคโทดค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากมีก๊าซ 3 องค์ประกอบแพร่อยู่ในขั้วแคโทด ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลโดยรวมจึงคำนวณมาจากความสัมพันธ์ของ Stefan-Maxwell (Suwanwarangkul และคณะ, 2005) ดังสมการที่ (3.26) ถึง (3.27)

$$\frac{1}{D_{a,eff}} = \frac{1}{D_{H_2-H_2O,eff}} + \frac{1}{D_{H_2k,eff}} \quad (3.24)$$

$$D_{c,eff} = \left( \frac{p_{H_2O}}{P} \right) D_{O_2,eff} + \left( \frac{p_{O_2}}{P} \right) D_{H_2O,eff} \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

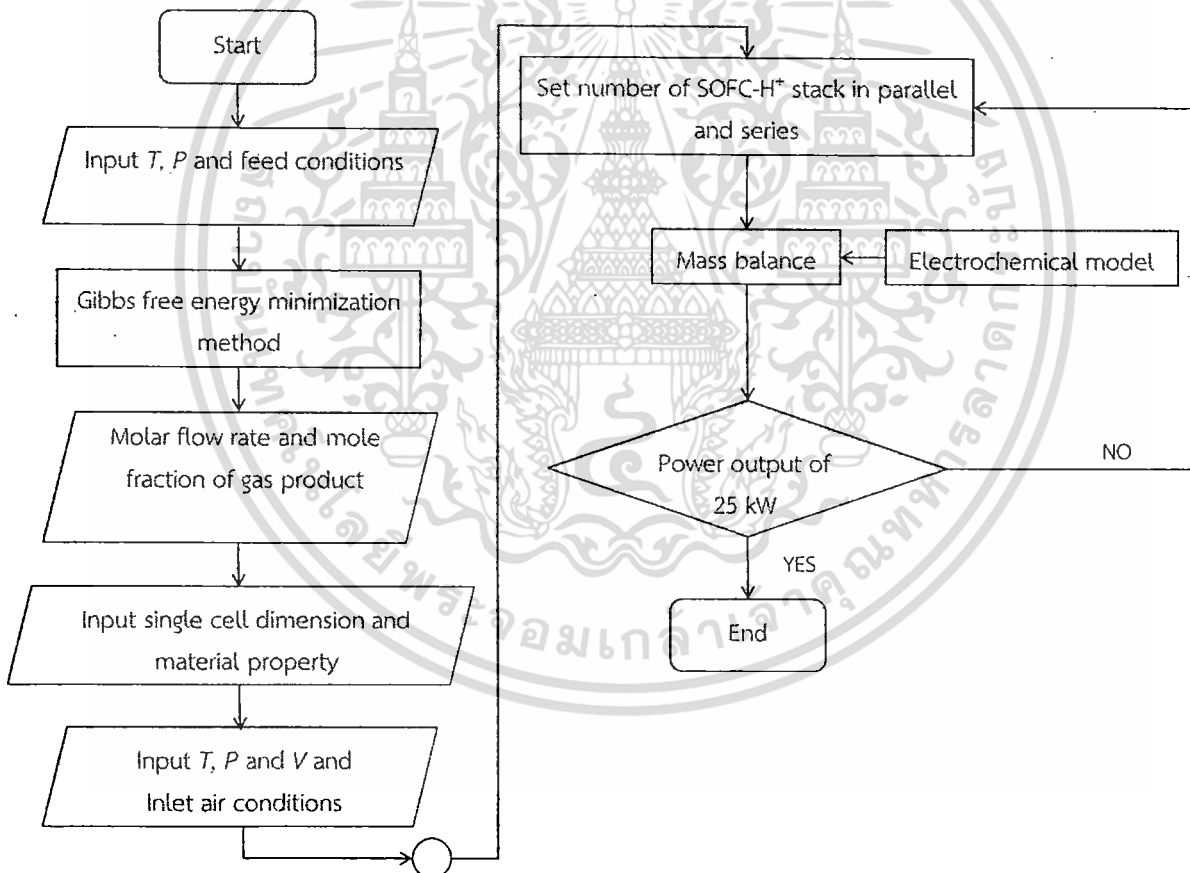
โดยที่

$$\frac{1}{D_{O_2,eff}} = \frac{1}{D_{O_2,k,eff}} + \frac{1}{D_{O_2-N_2,eff}} + \left( \frac{1}{D_{O_2-H_2O,eff}} - \frac{1}{D_{O_2-N_2,eff}} \right) (1 - y_{N_2}) \quad (3.26)$$

$$\frac{1}{D_{H_2O,eff}} = \frac{1}{D_{H_2O,k,eff}} + \frac{1}{D_{H_2O-N_2,eff}} + \left( \frac{1}{D_{O_2-H_2O,eff}} - \frac{1}{D_{H_2O-N_2,eff}} \right) (1 - y_{N_2}) \quad (3.27)$$

ซึ่ง  $D_{O_2,eff}$  และ  $D_{H_2O,eff}$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลระหว่าง  $O_2$  และ  $H_2O$  ในก๊าซไนโตรเจน ตามลำดับ และ  $y_{N_2}$  คือเศษส่วนโมลของไนโตรเจนที่ปรากฏอยู่ในก๊าซผสม

### 3.4 การคำนวณหาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบรวม



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการคำนวณหาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบรวม

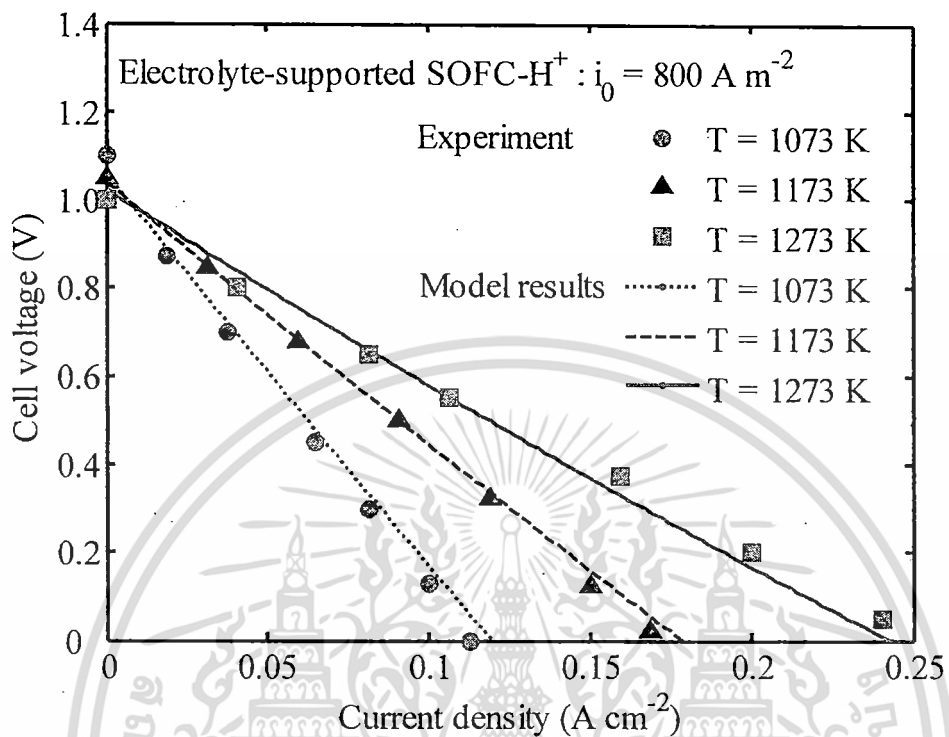
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพขั้นตอนการคำนวณหาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบร่วม โดยการคำนวณแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือการคำนวณหาองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากเครื่องรีฟอร์มเมอร์ โดยเริ่มจากการกำหนดสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และ อัตราส่วนการป้อนเชื้อเพลิง และทำการคำนวณหาองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ที่สภาวะสมดุลโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาค่าที่น้อยที่สุดของพลังงานอิสระของกิบป์ ซึ่งจะได้อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซชนิดต่างๆ ส่วนที่สองคือการคำนวณหาสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ซึ่งเริ่มจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของเซลล์เชื้อเพลิง คือ อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซชนิดต่างๆ (ได้จากเครื่องรีฟอร์มเมอร์) อัตราการไหลโดยโมลของอากาศ ขนาดของเซลล์ 1 หน่วย และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ และสภาวะการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และค่าศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากการคำนวณจะกำหนดกำลังไฟฟ้าขาออกเซลล์เชื้อเพลิงไว้ที่ 25 กิโลวัตต์ ดังนั้นต้องทำการคำนวณหาการจัดเรียงจำนวนเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสม โดยในการคำนวณจะกำหนดจำนวนเซลล์เชื้อเพลิงทั้งแบบอนุกรมและขนาน และเมื่อใช้สมการสมดุลมวลร่วมกับสมการทางไฟฟ้าเคมีแล้วจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าออกมา จากนั้นทำการตรวจสอบค่ากำลังไฟฟ้าว่าตรงกับที่ต้องการหรือไม่ ถ้าตรงก็สิ้นสุดการคำนวณ แต่ถ้าไม่ก็ทำการปรับเปลี่ยนจำนวนเซลล์เชื้อเพลิงแล้วทำการคำนวณซ้ำใหม่

### 3.5 การตรวจสอบแบบจำลอง

เนื่องจากแบบจำลองทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนยังมีการพัฒนาไม่เทียบเท่ากับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำออกซิเจนไอออน ดังนั้นพารามิเตอร์บางตัว เช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนจึงยังไม่มีรายงานในเอกสารทางวิชาการ และเนื่องจากสมการการที่นำมาใช้ในการหาค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนมวลได้มาจากสมการการถ่ายโอนมวลที่อธิบายจากแบบจำลองของฟิสิกส์ก็มีความคลุมเครือ ดังนั้นแบบจำลองทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (สมการที่ (3.14) ถึง (3.27)) ที่นำเสนอในงานนี้จึงต้องนำมาตรวจสอบความถูกต้องกับข้อมูลที่ ได้จากการทดลองของ Taherparvar และคณะ (2003) โดยในการทดลองของ Taherparvar และคณะ วัสดุที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนสำหรับทำเป็นขั้วแอโนด อิเล็กโทรไลต์ และแคโทด คือ Pt|SCY|Pt ที่ความหนา 50 500 และ 50 ไมโครเมตร ตามลำดับ ก๊าซเชื้อเพลิงและออกซิแดนซ์ที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานของ Taherparvar และคณะ คือ ก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ (มีน้ำประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์) และอากาศแห้ง (มีน้ำเจือปนน้อยกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ รูปที่ 3.5 แสดงผลการทำนายลักษณะทางไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ได้จากแบบจำลองและจากการทดลองซึ่งดำเนินงานภายใต้อุณหภูมิ 3 ระดับ (1073 1173 และ 1273 เคลวิน) ความดันบรรยากาศ จากผลการศึกษาพบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าตรงกันกับค่าที่ได้จากการทดลองก็ต่อเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนของขั้วอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากับ 800 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ได้จากการจำลองกระบวนการและข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Taherparvar และคณะ (2003)

## บทที่ 4

### ผลการจำลองกระบวนการและการอภิปรายผล

การวิเคราะห์สมรรถนะการผลิตไฟฟ้าจากระบบรวมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล จะมุ่งเน้นศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์และเซลล์เชื้อเพลิง ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ปริมาณการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ และจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ โดยสภาวะการดำเนินงานเบื้องต้นและช่วงในการศึกษาของเครื่องรีฟอร์มเมอร์และเซลล์เชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ส่วนตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

ตารางที่ 4.1 สภาวะการดำเนินงานเบื้องต้นและช่วงในการศึกษาของเครื่องรีฟอร์มเมอร์

Parameters	Standard condition	Operational range
Preheater	400°C	-
Reformer temperature	600°C	600-1000°C
Reformer pressure	1.0 atm	-
Ethanol molar flow rate	0.25 kmol/hr	-
Steam to ethanol ratio	2	2-5
Oxygen to ethanol ratio	0.5	0.1-1.0

ตารางที่ 4.2 สภาวะการดำเนินงานเบื้องต้นและช่วงในการศึกษาของเครื่องเซลล์เชื้อเพลิง

Parameters	Standard condition	Operational range
Operating temperature	750°C	600-800°C
Operating pressure	1 atm	-
Cell voltage	0.7 V	-
Power output	25 kW	-

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน

Parameters	Value
Cell width, $W$	0.1 m
Cell length, $L$	0.4 m
Channel height, $h$	0.001 m
Anode thickness, $\tau_{\text{anode}}$	500 $\mu\text{m}$
Cathode thickness, $\tau_{\text{cathode}}$	50 $\mu\text{m}$
Electrolyte thickness, $\tau_{\text{electrolyte}}$	20 $\mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (ต่อ)

Parameters	Value
Electrolyte conductivity, $\sigma_{\text{electrolyte}}$	$225.92 \exp(-6.3 \times 10^3/T) \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$
Electrode porosity, $\varepsilon$	0.4
Electrode pore radius, $r$ ( $\mu\text{m}$ )	0.5 $\mu\text{m}$
Electrode tortuosity, $\xi$	5.0
Electrode exchange current density, $i_{0,\text{electrode}}$	800 $\text{A m}^{-2}$

#### 4.1 การศึกษากระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาออกโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิงของเอทานอล

การศึกษาผลของการจำลองกระบวนการในหัวข้อนี้ จะพิจารณาเพียงส่วนกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาออกโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิงของเอทานอลเพียงกระบวนการเดียว โดยจะทำการศึกษาค่าผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ สภาวะการดำเนินงานที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนการนำต่อเอทานอล และอัตราส่วนการป้อนอากาศต่อเอทานอล ในที่นี้จะไม่ศึกษาผลของความดัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันมีผลต่อปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้น้อยมาก

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในช่วง 600 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆในตารางที่ 4.1 มีค่าคงที่จากการจำลองกระบวนการจะเห็นได้ว่าภายใต้การดำเนินงานที่สภาวะสมดุล เอทานอลจะถูกใช้อย่างสมบูรณ์ในทุกๆช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา (ไม่ปรากฏปริมาณของเอทานอลในก๊าซผลิตภัณฑ์) ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของก๊าซไฮโดรเจนนั้นเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (reverse methanation reaction) ซึ่งจะเห็นได้ว่าก๊าซมีเทนมีปริมาณลดลง เมื่อพิจารณาเศษส่วนโมลของไฮโดรเจนพบว่าในช่วงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์เพิ่มจาก 600 เป็น 800 องศาเซลเซียส ก๊าซไฮโดรเจนจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่านี้เศษส่วนโมลของไฮโดรเจนกลับมามีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาออกโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิงเกิดการผันกลับ ดังจะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นและคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอลที่ป้อนเข้าเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ แสดงดังตารางที่ 4.5 โดยปกติแล้วการป้อนน้ำในปริมาณมากเกินไปจะช่วยให้ปฏิกิริยาออกโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิง ซึ่งจะทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนปริมาณสูงขึ้น แต่จากผลการจำลองกระบวนการพบว่า แม้อัตราการไหลของก๊าซผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอลก็ตาม แต่เศษส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซสังเคราะห์ที่ได้กลับมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะเข้าไปเจือจางปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน และจากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการป้อนน้ำเข้าไปยังเครื่องรีฟอร์มเมอร์มากขึ้นเพราะน้ำจะช่วยทำให้ปฏิกิริยาออกโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิงเกิดได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ (อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอล = 2 และอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเอทานอล = 0.5)

Mole fraction	Reformer temperature (°C)				
	600	700	800	900	1000
CH <sub>4</sub>	0.0686	0.0099	0.0008	0.0001	0.0000
H <sub>2</sub> O	0.2405	0.1963	0.1997	0.2139	0.2239
CO	0.1033	0.1746	0.1999	0.2137	0.2238
H <sub>2</sub>	0.4346	0.5123	0.5141	0.5004	0.4904
CO <sub>2</sub>	0.1531	0.1069	0.0855	0.0720	0.0619
Total flow (kmol/hr)	1.539	1.7159	1.7472	1.7497	1.7500

ตารางที่ 4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอลที่ป้อนเข้าเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ (อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ = 600 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเอทานอล = 0.5)

Mole fraction	Steam to ethanol ratio				
	2	3	4	5	
CH <sub>4</sub>	0.0686	0.0416	0.0258	0.0163	
H <sub>2</sub> O	0.2405	0.2988	0.3494	0.3946	
CO	0.1033	0.0801	0.0641	0.0521	
H <sub>2</sub>	0.4346	0.4304	0.4169	0.3989	
CO <sub>2</sub>	0.1531	0.1490	0.1438	0.1381	
Total flow (kmol/hr)	1.539	1.846	2.139	2.421	

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเอทานอลที่ป้อนเข้าเครื่องฟอร์มเมอร์ที่มีต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ (อุณหภูมิของเครื่องฟอร์มเมอร์ = 600 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอล = 2)

Mole fraction	Oxygen to ethanol ratio					
	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0	
CH <sub>4</sub>	0.1098	0.0876	0.0686	0.0525	0.0389	
H <sub>2</sub> O	0.1925	0.2162	0.2405	0.2656	0.2920	
CO	0.1124	0.1082	0.1033	0.0975	0.0911	
H <sub>2</sub>	0.4590	0.4480	0.4346	0.4187	0.4001	
CO <sub>2</sub>	0.1263	0.1399	0.1531	0.1657	0.1780	
Total flow (kmol/hr)	1.435	1.489	1.539	1.584	1.624	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเอทานอลที่ป้อนเข้าเครื่องรีฟอร์มเมอร์ที่มีต่อก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ตารางที่ 4.6) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเอทานอลไม่เพียงแต่ลดสัดส่วนของก๊าซไฮโดรเจน แต่ยังคงสัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซสังเคราะห์อีกด้วย โดยปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาเผาไหม้เกิดได้ดีขึ้น แต่ก็จะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิง ส่งผลให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนมีปริมาณลดลงไป ส่วนปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลงเนื่องจากน้ำที่ถูกผลิตจากปฏิกิริยาเผาไหม้จะช่วยให้ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น นอกจากนี้จากการจำลองกระบวนการยังจะเห็นได้ว่าไม่มีก๊าซออกซิเจนปรากฏอยู่ในก๊าซสังเคราะห์ในทุกๆสภาวะการดำเนินงาน ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นว่าก๊าซออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยากับเอทานอลผ่านปฏิกิริยาเผาไหม้ และเอทานอลที่เหลือก็จะทำปฏิกิริยากับน้ำต่อไปในปฏิกิริยารีฟอร์มมิง

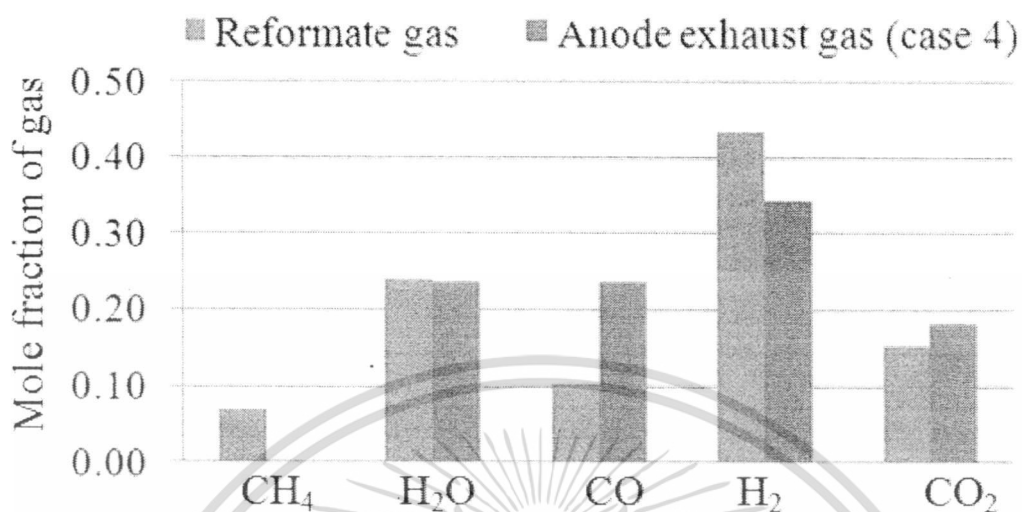
#### 4.2 การศึกษากระบวนการรวมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำไปปรตอกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล

ภายใต้สภาวะการดำเนินงานมาตรฐานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำไปปรตอก ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง 1 หน่วย ให้มีค่าเท่ากับ 0.7 โวลต์ จะสามารถคำนวณความเข้มกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยออกมาได้ และเนื่องจากในการจำลองกระบวนการจะกำหนดเป้าหมายของกำลังไฟฟ้าที่ต้องไว้ให้มีค่าเท่ากับ 25 กิโลวัตต์ ดังนั้นจะสามารถหาจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการจัดเรียงในแบบอนุกรมและแบบขนานได้ ตารางที่ 4.7 แสดงรูปแบบการจัดเรียงเซลล์เชื้อเพลิงที่เป็นไปได้ ซึ่งมีทั้งหมด 4 กรณี จากผลจากการจำลองกระบวนการพบว่าการจัดเรียงเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีผลต่อพื้นที่ในการติดตั้งของเซลล์เชื้อเพลิง โดยภายใต้สภาวะการดำเนินงานมาตรฐานดังกล่าวพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงเป็นกระแสไฟฟ้า 31 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.7 รูปแบบการจัดเรียงเซลล์เชื้อเพลิงที่เป็นไปได้

Case	Number of SOFC-H <sup>+</sup> stack			Required area (m <sup>2</sup> )
	in parallel	in series	total	
1	65	3	195	~7.80
2	48	4	192	~7.68
3	38	5	190	~7.60
4	18	10	180	~7.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ปริมาณของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้ภายใต้สภาวะการดำเนินงานมาตรฐาน

รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (เรียกวาร์ฟอร์มเมต) และที่ได้จากทางออกของขั้วแอโนด ผลจากการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่า ภายใต้สภาวะการดำเนินงานมาตรฐานที่กำหนดให้ระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบออกไซด์ของเอทานอลผลิตกำลังไฟฟ้า 25 กิโลวัตต์ ระบบร่วมดังกล่าวจะสามารถผลิตได้ทั้งกำลังไฟฟ้าและยังผลิตก๊าซสังเคราะห์ที่มีคุณภาพออกมาปริมาณสูง จากรูปที่ 4.1 เนื่องจากระบบร่วมที่ศึกษาเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน ซึ่งน้ำจะถูกผลิตขึ้นทางด้านขั้วแคโทด ทำให้มีน้ำทางด้านขั้วแอโนดลดน้อยลง โดยปริมาณของน้ำที่น้อยลงจะไม่เพียงพอที่จะเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจน (ปฏิกิริยาออกซิเดชันแก๊สซิฟ) ดังนั้นจึงสังเกตเห็นว่าก๊าซขาออกที่ขั้วแอโนดยังคงมีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ปริมาณสูง (มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งอาจจะทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนมีค่าลดลง เนื่องจากการมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณมากนั้นอาจมีโอกาสการเกิดคาร์บอนสะสมอยู่บนขั้วแอโนดได้

#### 4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดำเนินงานของระบบร่วมที่มีต่อจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงและปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิง

จากหัวข้อที่ 4.2 จะเห็นว่าปัจจัยสำคัญในการออกแบบระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบออกไซด์ของเอทานอล คือ จำนวนของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากมีผลต่อพื้นที่ในการติดตั้งเซลล์เชื้อเพลิง ภายใต้การกำหนดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน นอกจากนี้ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิงก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณา เพราะถ้าหากเซลล์เชื้อเพลิงมีโอกาสเกิดคาร์บอนสะสมอยู่บนขั้วแอโนด ก็จะมีผลต่ออายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้อายุการใช้งานลดลง ตารางที่ 4.8 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดำเนินงานที่มีต่อจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงและปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดำเนินงานที่มีต่อจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงและปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิง

Parameters	Operational range	Results	
		Number of Cell	CO content
Reformer temperature	600-1000°C	No difference	Very slightly increased
Steam to ethanol molar ratio	2-5	No difference	Strongly decreased
Oxygen to ethanol molar ratio	0.1-1.0	No difference	Slightly decreased
SOFC temperature	600-800°C	Strongly decreased	Slightly increased

เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (600 ถึง 1000 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอล (2 ถึง 5) และอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเอทานอล (0.1 ถึง 1) ที่มีต่อจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงและปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิง จากผลการจำลองกระบวนการจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงปัจจัยดังกล่าวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทั้ง 3 ปัจจัย เป็นการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณก๊าซสังเคราะห์ที่เข้ามายังเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อระบบรวมถูกกำหนดให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าในปริมาณที่เท่ากันนั้น ปริมาณของเชื้อเพลิงที่เข้ามายังเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีผลต่อจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงน้อยมาก จนแทบไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง แต่จะมีผลต่อปริมาณของก๊าซสังเคราะห์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง จากผลการจำลองกระบวนการในตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์จะทำให้มีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซสังเคราะห์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อนำมาใช้ในระบบรวมที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่สูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอลและอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเอทานอลจะทำให้ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอล เพราะการเพิ่มน้ำเข้าไปยังระบบจะทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนได้มากขึ้น

ปัจจัยสุดท้ายที่พิจารณาคืออุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นที่รู้กันดีว่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลสมรรถของเซลล์เชื้อเพลิง จากตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า ภายใต้การกำหนดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการเดียวกัน การใช้อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถผลิตความเข้มกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น ในขณะที่ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ดังนั้นจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีค่าลดลงอย่างมาก อย่างไรก็ตามจากการจำลองกระบวนการพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง มีผลให้ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาอวเทอร์แก๊สซิฟที่ทำหน้าที่เปลี่ยนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนยังเกิดขึ้นได้น้อยลง เพราะปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งจะเกิดขึ้นได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาสมรรถนะและการออกแบบระบบการผลิตไฟฟ้าของระบบร่วมระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนและกระบวนการการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล โดยปัจจัยที่สนใจศึกษา คือ ผลของสภาวะการดำเนินงานของเครื่องรีฟอร์มเมอร์ (อุณหภูมิและอัตราส่วนการป้อนเชื้อเพลิง) และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอน (อุณหภูมิ) ที่มีต่อจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงและปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิง ผลจากการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอลที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 25 กิโลวัตต์ สามารถเป็นระบบที่ผลิตได้ทั้งพลังงานและก๊าซสังเคราะห์ ภายใต้สภาวะการดำเนินงานมาตรฐาน คือ อุณหภูมิของเครื่องรีฟอร์มเมอร์เท่ากับ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอลเท่ากับ 2 อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเอทานอลเท่ากับ 0.5 และอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 750 องศาเซลเซียส พื้นที่ที่ต้องการในการติดตั้งเซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 25 กิโลวัตต์ ประมาณ 7 ถึง 8 ตารางเมตร โดยรูปแบบการจัดเรียงเซลล์เชื้อเพลิงในแนวนานหรืออนุกรมจะขึ้นกับพื้นที่ที่สามารถติดตั้งได้ นอกจากนี้จากการจำลองกระบวนการยังพบว่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงมีผลต่อจำนวนของเซลล์เชื้อเพลิงมากที่สุด ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเอทานอลจะมีผลต่อปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของเซลล์เชื้อเพลิงมากที่สุด

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรวิเคราะห์พลังงานที่เกิดขึ้นภายในระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อปรับปรุงการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อให้ระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงมีการจัดการสมดุลทางด้านพลังงานอย่างเหมาะสม

บทที่ 6  
ผลงานวิจัยที่ผลิตได้

โครงการวิจัยเรื่อง “ระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิงแบบอโตเทอร์มัลของเอทานอล” ได้รับการเผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติภายใต้ชื่อการประชุม The Fifth European Fuel Cell Technology & Applications Conference - Piero Lunghi Conference (EFC13) ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 11 ถึง 13 ธันวาคม พ.ศ. 2556 รายละเอียดของผลงานวิจัยที่ผลิตได้อยู่ในภาคผนวก ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

Achenbach, E., Three-dimensional and time-dependent simulation of a planar solid oxide fuel cell stack. *Journal of Power Sources* 49 (1994) : 333–348.

Achenbach, E., and Riensche, E., Methane/steam reforming kinetics for solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources* 52 (1994) : 283–288.

Aguiar, P., Adjiman, C.S., and Brandon, N.P., Anode-supported intermediate-temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I : Model-based steady-state performance. *Journal of Power Sources* 138 (2004) : 120-136.

Arpornwichanop, A., Chalermpanchai, N., Patcharavorachot, Y., Assabumrungrat S. and Tade, M., Performance of an anode-supported solid oxide fuel cell with direct-internal reforming of ethanol. *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (2009): 7780-7788.

Arpornwichanop, A., Patcharavorachot, Y. and Assabumrungrat, S., Analysis of a proton-conducting SOFC with direct internal reforming, *Chemical Engineering Science* 65 (2010): 581-589.

Arteaga-Pereza, L.E., Casas, Y., Peralta, L.M., Kafarov, V., Dewulf, J., and Giunta, P., An auto-sustainable solid oxide fuel cell system fueled by bio-ethanol: Process simulation and heat exchanger network synthesis. *Chemical Engineering Journal* 150 (2009) : 242–251.

Assabumrungrat, S., Pavarajarn, V., Charojrochkul, S., and Laosiripojana, N., Thermodynamic analysis for a solid oxide fuel cell with direct internal reforming fueled by ethanol. *Chemical Engineering Science* 59 (2004) : 6015-6020.

Authayanun, S., Arpornwichanop, A., Paengjuntuek, W. and Assabumrungrat, S., Thermodynamic study of hydrogen production from crude glycerol autothermal reforming for fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (2010) : 6617-6623

Douartzides, S.L., Coutelieris, F.A., and Tsiakaras, P.E., On the systematic optimization of ethanol fed SOFC-based electricity generating systems in terms of energy and exergy. *Journal of Power Sources* 114 : (2003) 203-212.

Epifanio, A., Fabbri, E., Bartolomeo, E.D., Licocchia, S., and Traversa, E., Design of  $\text{BaZr}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\alpha}$  Protonic Conductor to Improve Electrochemical Performance in Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells (IT-SOFCs). *Fuel Cells* 1 (2008) : 69-76.

Fukada, S., Suemori, S., and Onoda, K., Proton transfer in  $\text{SrCeO}_3$ -based oxide with internal reformation under supply of  $\text{CH}_4$  and  $\text{H}_2\text{O}$ . *Journal of Nuclear Materials* 348 (2006) : 26–32.

Haberman, B.A., and Young, J.B., Three-dimensional simulation of chemically reacting gas flows in the porous support structure of an integrated-planar solid oxide fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2004) : 3617–3629.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hernandez, L., and Kafarov, V., Use of bioethanol for sustainable electrical energy production. International Journal of Hydrogen Energy 34 (2009) : 7041–7050.

Hoang, D.L. and Chan, S.H., Experimental investigation on the effect of natural gas composition on performance of autothermal reforming. International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) : 548-556.

Hussain, M.M., Li, X., and Dincer, I., Mathematical modeling of planar solid oxide fuel cells. Journal of Power Sources 161 (2006) : 1012–1022.

Jamsak, W., Assabumrungrat, S., Douglas, P.L., Laosiripojana, N., Suwanwarangkul, R., Charojrochkul, S., and Croiset, E., Performance of ethanol-fuelled solid oxide fuel cells : Proton and oxygen ion conductors. Chemical Engineering Journal 133 (2007) : 187–194.

Laosiripojana, N., and Assabumrungrat, S., Catalytic steam reforming of methane, methanol, and ethanol over Ni/YSZ: The possible use of these fuels in internal reforming SOFC. Journal of Power Sources 163 (2007) : 943-951.

Ni, M., Leung, M.K.H., and Leung, D.Y.C., Parametric study of solid oxide fuel cell performance. Energy conversion and Management 48 (2007) : 1525-1535.

Ni, M., Leung, D.Y.C., and Leung, M.K.H., Mathematical modeling of ammonia-fed solid oxide fuel cells with different electrolytes. International Journal of Hydrogen Energy 33 (2008) : 5765-5772.

Patcharavorachot, Y., Arpornwichanop, A. and Chuachuensuk, A., Electrochemical study of a planar solid oxide fuel cell: Role of support structures. Journal of Power Sources 177 (2008) : 254-261.

Patcharavorachot, Y., Brandon, N.P., Paengjuntuek, W., Assabumrungrat, S. and Arpornwichanop, A., Analysis of Planar Solid Oxide Fuel Cells based on Proton-Conducting Electrolyte. Solid State Ionics 181 (2010) : 1568-1576.

Potter, A.R., and Baker, R.T., Impedance studies on Pt|SrCe<sub>0.95</sub>Yb<sub>0.05</sub>O<sub>3</sub>|Pt under dried and humidified air, argon and hydrogen. Solid State Ionics 177 (2006) : 1917–1924.

Saebea, D., Patcharavorachot, Y., and Arpornwichanop, A., Analysis of an ethanol-fuelled solid oxide fuel cell system using partial anode exhaust gas recirculation. Journal of Power Sources 208 (2012) : 120-130.

Suksamai, W., and Metcalfe, I.S., Measurement of proton and oxide ion fluxes in a working Y-doped BaCeO<sub>3</sub> SOFC. Solid State Ionics 178 (2007) : 627–634.

Taherparvar, H., Kilner, J.A., Baker, R.T., and Sahibzada, M., Effect of humidification at anode and cathode in proton-conducting SOFCs. Solid State Ionics 162– 163 (2003) : 297–303.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wang, H.M., Experimental studies on hydrogen generation by methane autothermal reforming over nickel-based catalyst. Journal of Power Sources 177 (2008) : 506-511.

Zamfirescu, C., and Dincer, I., Thermodynamic performance analysis and optimization of a SOFC-H<sup>+</sup> system. Thermochimica Acta 486 (2009) : 32-40.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## INTEGRATED SYSTEM OF A PROTON-CONDUCTING SOFC AND ETHANOL AUTOETHERMAL REFORMER: DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION

D. Saebea\*, A. Arpornwichanop\*\* and Y. Patcharavorachot\*\*\*

\*Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi 20131, Thailand

\*\* Computational Process Engineering, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

\*\*\*School of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

**Abstract** – In this study, an integrated system of SOFC-H<sup>+</sup> and ethanol autothermal reformer is proposed. The optimal design and operating parameters are carefully determined to obtain the best possible performance of the integrated SOFC-H<sup>+</sup> system satisfying a desired power output of 25 kW.

**Keywords** - Autothermal reforming, Ethanol, Proton-conducting SOFC, Performance evaluation

### I. NOMENCLATURE

$h$	Cell channel height, m	$T_s$	SOFC temperature, °C
$L$	Cell length, m	$W$	Cell width, m
$T_r$	Reformer temperature, °C		

### II. INTRODUCTION

A proton-conducting solid oxide fuel cell (SOFC-H<sup>+</sup>) in which the electrolyte made of a proton conductor becomes the most promising fuel cell technology for power generation. In SOFC-H<sup>+</sup>, water vapor is generated at the cathode side and this factor can improve the open-circuit voltage and electrical efficiency of cell [1]. In general, there are two approaches to incorporate a fuel processor in the SOFC operation: external reforming and internal reforming. Although the internal reforming system has higher efficiency than the external one, this approach faces some difficulties: the possibility of carbon formation on the anode and the presence of a large thermal gradient within SOFC stack [2]. Thus, a power system consisting of SOFC-H<sup>+</sup> integrated with an ethanol autothermal reformer is proposed in this study. The attractive feature of this system is that the SOFC-H<sup>+</sup> always provides a high-temperature exhaust gas which can be used for other heat-requiring units in

the SOFC system, leading to a decrease in the external energy demand.

The present study is aimed at designing the integrated system by considering the SOFC-H<sup>+</sup> stack configuration and operating parameters where a desired power output is 25 kW.

### III. SOFC-H<sup>+</sup> SYSTEM INTEGRATED WITH ETHANOL AUTOETHERMAL REFORMER

Fig. 1 demonstrated the integrated system of SOFC-H<sup>+</sup> and ethanol autothermal (ATR) reformer. Ethanol, water and air are fed to a preheater. In the ATR reformer, a consecutive reaction pathways of the steam reforming and the partial oxidation are carried out. The equilibrium composition of the synthesis gas from the ATR reformer is determined by using the total Gibbs free energy minimization method. Then, the reformat gas consisting of CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, and CO<sub>2</sub> is preheat to the SOFC operating temperature before it is fed to the SOFC-H<sup>+</sup>. At the anode side of SOFC-H<sup>+</sup>, the residual CH<sub>4</sub> can further react with H<sub>2</sub>O via the steam reforming reaction and CO can convert to H<sub>2</sub> via water gas-shift reaction within the

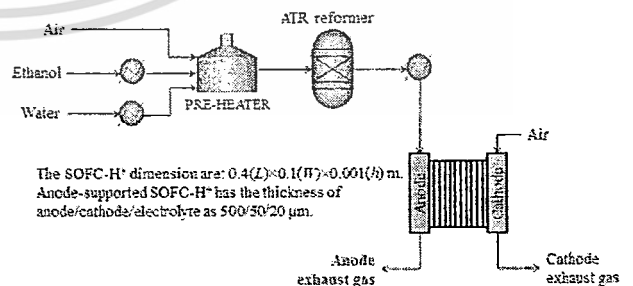


Fig. 1. Schematic of a proton-conducting SOFC with ethanol autothermal.

SOFC stack. For the SOFC-H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub> is oxidized to produce protons and electrons. The protons migrate through the electrolyte while the electrons flow to the cathode. At the same time, oxygen in air that is fed to the cathode side is reduced and here the water is produced. Simulations of the SOFC-H<sup>+</sup> are performed based on a one-dimensional and steady-state fuel cell model coupled with detailed electrochemical models. The modeling of SOFC-H<sup>+</sup> was reported in our previous work [2].

#### IV. RESULTS AND DISCUSSION

Under the standard conditions, the inlet molar flow rate of ethanol is 0.25 kmol/hr, steam to ethanol (STE) is 2 and oxygen to ethanol (OTE) ratio is 0.5. The reformer is operated at  $T_r = 600^\circ\text{C}$  while SOFC-H<sup>+</sup> is run at  $T_s = 750^\circ\text{C}$  under atmospheric pressure. When the cell voltage is given as 0.7 V, the average current density can be computed. In order to obtain the net power output of 25 kW, the number of SOFC-H<sup>+</sup> stack is determined both in parallel and series configurations. From the simulation results, it is found that the arrangement of the SOFC-H<sup>+</sup> stack affect the required SOFC-H<sup>+</sup> area. Table I presents the possible SOFC-H<sup>+</sup> configuration. The fuel cell efficiency in all cases is ~31%.

TABLE I  
POSSIBLE SOFC-H<sup>+</sup> CONFIGURATION FOR 25 kW

Case	Number of SOFC-H <sup>+</sup> stack			Required area (m <sup>2</sup> )
	in parallel	in series	total	
1	65	3	195	~7.80
2	48	4	192	~7.68
3	38	5	190	~7.60
4	18	10	180	~7.20

The simulation results also indicate that under these conditions, the integrated system can generate both electricity and high amount of synthesis gas (Fig. 2). Due to the use of a proton-conducting electrolyte, the high content of CO (> 20%) in the anode exhaust gas may cause the carbon deposition on the anode side and thus, this issue should be concerned in the operation.

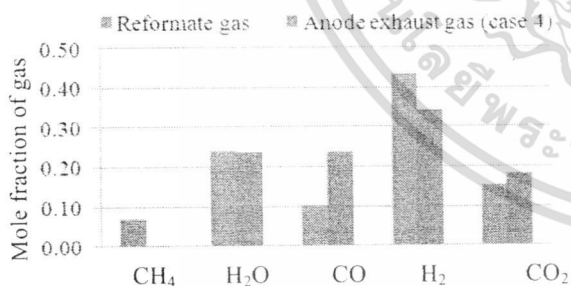


Fig. 2. Product distribution under standard condition.

Next, the impact of operating conditions on the number of cell stack and CO content is examined, as summarized in Table II. The simulation results reveal that the increasing reformer temperature results in a very slight increment of CO content

whereas it has no significantly effect on the number of cell stack. Therefore, the reformer temperature of 600°C is selected for further investigation since it requires the lowest heat input and provides the lowest amount of CO. As expected, the SOFC temperature has strongly influence on the SOFC performance. Under the same desired power, the higher temperature operation requires a lower area. As a result, the number of cell stacks is strongly decreased. However, the CO content is higher because the water gas shift reaction is unfavored at high temperature operation. Regarding the effect of feed ratio, it is found that the CO content can be reduced by increasing the STE while changes in STE and OTE have no impact on the number of cell. This is because a higher steam can convert CO to more H<sub>2</sub>.

TABLE II  
THE OPERATIONAL RANGE OF EACH PARAMETER AND SIMULATION RESULTS

Parameter	Operation range	Results	
		Number of cell	CO Content
Increase $T_r$	600-1000°C	No difference	Very slightly increased
Increase $T_s$	600-800°C	Strongly decreased	Slightly increased
Increase STE	2-5	No difference	Strongly decreased
Increase OTE	0.1-1.0	No difference	Slightly decreased

#### V. CONCLUSION

This study presents the performance evaluation and design of an integrated system of SOFC-H<sup>+</sup> and ethanol autothermal reformer. The effect of operating parameters (i.e., operating temperature and feed ratio) on SOFC-H<sup>+</sup> stack configuration and CO content was examined. The simulation results indicated that the 25 kW SOFC-H<sup>+</sup> system can be both the power generation and H<sub>2</sub> production units. Under the standard conditions ( $T_r = 600^\circ\text{C}$ ,  $T_s = 750^\circ\text{C}$ , STE = 2 and OTE = 0.5), the required area of 25 kW SOFC-H<sup>+</sup> system is 7-8 m<sup>2</sup> in which the number of cell in parallel and in series depends on an available installed area. In addition, it was found that SOFC temperature has strongly impact on the number of SOFC-H<sup>+</sup> stack, whereas the steam to ethanol ratio affects the CO content.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support from the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

#### REFERENCES

- [1] Demin, A., Tsiakaras, P., Thermodynamic analysis of a hydrogen fed solid oxide fuel cell based on a proton conductor, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 26, 2001, pp. 1103-1108.
- [2] Arpornwichanop, A., Patcharavorachot, Y., Investigation of a proton-conducting SOFC with internal autothermal reforming of methane, Chemical engineering research and design, Volume 91, 2013, pp. 1508-1516.

## ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ดร. ญาณิพร พัชวรวิโชติ  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Dr. Yaneeporn Patcharavorachot
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-1005-90002-41-8
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถ. ฉลองกรุง แขวง/เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520  
โทรศัพท์ 02-3298360-3 ต่อ 151 โทรสาร 02-3298360-3 กต 4  
E-mail: [yaneeporn.p@hotmail.com](mailto:yaneeporn.p@hotmail.com), [kpyaneep@kmitl.ac.th](mailto:kpyaneep@kmitl.ac.th)
5. ประวัติการศึกษา  
**ปริญญาตรี** มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี), 2548  
**ปริญญาเอก** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วศ.ด. (วิศวกรรมเคมี), 2553
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ  
Process simulation/Renewable energy/Hydrogen production/Solid oxide fuel cell
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำ  
วิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย  
หัวหน้าโครงการวิจัย
  - 7.2.1 การวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่มีการเกิดปฏิกิริยา  
ฟอร์มมิงไฮโดรเจนแบบภายใน ด้วยทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ 2555 ระยะเวลาการ  
ดำเนินโครงการ 1 ปี จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท
  - 7.2.2 ระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนกับกระบวนการเกิดรีฟอร์มมิง  
แบบออกไซด์ไฮโดรเจนของเอทานอล ด้วยทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ 2556 ระยะเวลาการดำเนินโครงการ 1 ปี จำนวนเงินที่ได้รับการ  
สนับสนุน 80,000 บาท
  - 7.2.3 การจำลองกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่มีการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนเดียวโดย  
การใช้ ASPEN PLUS ด้วยทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ 2557 ระยะเวลาการดำเนินโครงการ 1 ปี จำนวนเงินที่ได้รับการ  
สนับสนุน 60,000 บาท
  - 7.2.4 ระบบร่วมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบนำโปรตอนที่ทำเนื้องานด้วยความดันสูงและ  
การรีฟอร์มมิงกลีเซอรอลด้วยน้ำเหนือวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรรมใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ 2557 ระยะเวลาการดำเนินโครงการ 2 ปี จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 480,000 บาท

### 7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

#### 7.3.1 ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ (ตั้งแต่ 2010)

- 7.3.1.1 Authayanun, S., Saebea, D., Patcharavorachot, Y., and Arpornwichanop, A., Effect of different fuel options on performance of high-temperature PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) systems. *Energy* 68 (2014) 989-997.
- 7.3.1.2 Patcharavorachot, Y., Tiraset, S., Saebea, D., Paengjuntuek, W., and Arpornwichanop, A., Optimization of a Membrane-based Oxidative Coupling of Methane Reactor Using Surface Response Methodology. *Chemical Engineering Transactions* 35 (2013) : 121-126.
- 7.3.1.3 Arpornwichanop, A., and Patcharavorachot, Y., Investigation of a proton-conducting SOFC with internal autothermal reforming of methane. *Chemical Engineering Research and Design* 91 (2013) 1508-1516.
- 7.3.1.4 Saebea, D., Patcharavorachot, Y., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Analysis of a pressurized solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid power system with cathode gas recirculation. *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (2013) : 4748-4759.
- 7.3.1.5 Saebea, D., Authayanun, S., Patcharavorachot, Y., Paengjuntuek, W., and Arpornwichanop, A., Use of different renewable fuels in a steam reformer integrated into a solid oxide fuel cell: Theoretical analysis and performance comparison. *Energy* 51 (2013) : 305-313.
- 7.3.1.6 Patcharavorachot, Y., Wasuleewan, M., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Analysis of hydrogen production from methane autothermal reformer with a dual catalyst-bed configuration. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering* 46 (2012) : 658-665.
- 7.3.1.7 Thanomjit, C., Patcharavorachot, Y., and Arpornwichanop, A., Design and Thermal Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell System Integrated with Ethanol Steam Reforming. *Computer Aided Chemical Engineering* 30 (2012) : 287-291.
- 7.3.1.8 Saebea, D., Patcharavorachot, Y., and Arpornwichanop, A., Analysis of an ethanol-fuelled solid oxide fuel cell system using partial anode exhaust gas recirculation. *Journal of Power Sources* 208 (2012) : 120-130.
- 7.3.1.9 Chaichana, K., Patcharavorachot, Y., Chutichai, B., Saebea, D., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Neural network hybrid model

- of a direct internal reforming solid oxide fuel cell. International Journal of Hydrogen Energy 37 (2012) : 2498-2508.
- 7.3.1.10 Saebea, D., Arpornwichanop, A., Patcharavorachot, Y., and Assabumrungrat, S., Adsorption-membrane hybrid system for ethanol steam reforming: Thermodynamic analysis. International Journal of Hydrogen Energy 36 (2011) : 14428-14434.
- 7.3.1.11 Arpornwichanop, A., Wasuleewan, M., Patcharavorachot, Y., and Assabumrungrat, S., Investigation of a Dual-Bed Autothermal Reforming of Methane for Hydrogen Production. Chemical Engineering Transactions 25 (2011) : 929-934.
- 7.3.1.12 Authayanun, S., Arpornwichanop, A., Patcharavorachot, Y., Wiyaratn, W., and Assabumrungrat, S., Hydrogen production from glycerol steam reforming for low- and high-temperature PEMFCs. International Journal of Hydrogen Energy 36 (2010) : 267-275.
- 7.3.1.13 Patcharavorachot, Y., Brandon, N.P., Paengjuntuek, W., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Analysis of Planar Solid Oxide Fuel Cells based on Proton-Conducting Electrolyte. Solid State Ionics 181 (2010) : 1568-1576.
- 7.3.1.14 Patcharavorachot, Y., Paengjuntuek, W., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Performance evaluation of combined solid oxide fuel cells with different electrolytes. International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010) : 4301-4310.
- 7.3.1.15 Arpornwichanop, A., Patcharavorachot, Y., and Assabumrungrat, S., Analysis of a proton-conducting SOFC with direct internal reforming. Chemical Engineering Science 65 (2010) : 581-589.
- 7.3.2 ผลงานที่นำเสนอในการประชุมวิชาการ (ตั้งแต่ 2010)
- 7.3.2.1 Saebea, D., Arpornwichanop, A., and Patcharavorachot, Y., Integrated system of a proton-conducting SOFC and ethanol autothermal reformer: Design and performance evaluation, The Fifth European Fuel Cell Technology & Applications Conference - Piero Lunghi Conference (EFC13), December 11-13, 2013, Rome, Italy.
- 7.3.2.2 Patcharavorachot, Y., Chery-rod, N., and Nudchapong, S., Hydrogen Production from Glycerol Steam Reforming in Supercritical Water with CO<sub>2</sub> Absorption Unit. the 5th Regional Conference on Chemical Engineering (RCCHE2013), Feb 7-8, 2013, Pattaya, Thailand.
- 7.3.2.3 Patcharavorachot, Y., and Arpornwichanop, A., Investigation of a proton-conducting SOFC with internal autothermal reforming of methane. the

- 22nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE22), Jun 17 – 20, 2012, London.
- 7.3.2.4 Thanomjit, C., **Patcharavorachot, Y.**, and Arpornwichanop, A., Design and Thermal Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell System Integrated with Ethanol Steam Reforming. The 22nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE22), Jun 17 – 20, 2012, London.
- 7.3.2.5 Supawimon, P., **Patcharavorachot, Y.**, Assabumrungrat, S. and Arpornwichanop, A., Analysis of Steam Biomass Gasification for Synthesis Gas Production. The 4th KKU International Engineering Conference 2012 (KKU-IENC 2012), May 10-12, 2012, Khon Kaen University, Thailand.
- 7.3.2.6 Saebea, D., Authayanun, A., **Patcharavorachot, Y.**, Paengjuntuek, W., and Arpornwichanop, A., Performance Analysis of SOFC Systems Integrated with Steam Reforming of Different Renewable Fuels. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'12), Mar 28 – 30, 2012, Santiago de Compostela (Spain).
- 7.3.2.7 Tippawan, P., **Patcharavorachot, Y.**, Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Thermodynamic Evaluation of Ethanol Steam Reforming via Acetaldehyde as an Intermediate. The 21th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry International Conference (TICHE 2011), Nov. 10-11, 2011, Hatyai, Songkhla, Thailand.
- 7.3.2.8 Aunsup, P., **Patcharavorachot, Y.**, Assabumrungrat, S. and Arpornwichanop, A. (2011). Comparison of Different Hydrogen Production Processes from Biogas: Thermodynamic Analysis. The 21th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry International Conference (TICHE 2011), Nov. 10-11, 2011, Hatyai, Songkhla, Thailand.
- 7.3.2.9 Saebea, D., Arpornwichanop, A., **Patcharavorachot, Y.**, and Assabumrungrat, S., Design of a Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid Power System with Cathode Gas Recycling. 6th Asia Pacific Chemical Reaction Engineering Symposium (APCRE'11), Sep. 18-21, 2011, Beijing, China.
- 7.3.2.10 Arpornwichanop, A., Wasuleewan, M., **Patcharavorachot, Y.**, and Assabumrungrat, S., Investigation of a Dual-Bed Autothermal Reforming of Methane for Hydrogen Production. 14th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES11), May 8-11, 2011, Florence, Italy
- 7.3.2.11 Sangduan, K., **Patcharavorachot, Y.**, Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Analysis of CO<sub>2</sub> absorption for purification of hydrogen

in ethanol reforming processes. The 3rd Regional Conference on Chemical Engineering (RCCE), Jan. 20-21, 2011, Metro Manila, Philippines.

- 7.3.2.12 **Patcharavorachot, Y., Brandon, N.P., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A.,** Theoretical Study of a Planar Solid Oxide Fuel Cell Using Proton-Conducting Electrolyte. Commission on Higher Education Congress III: University Staff Development Consortium (CHE-USDC Congress III), Sep. 9-11, 2010, Chonburi, Thailand.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้