

การศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข

กัณฑ์ณ ชัยเสนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาคณิตศาสตร์ศึกษา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สิงหาคม 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ กัณฑ์ณ ชัยเสนา ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาคณิตศาสตร์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินีนากู ศรีมงคล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัชระ คงนวน)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินีนากู ศรีมงคล)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงกมล ผลเต็ม)

..... กรรมการ  
(ดร.ศรันย์ กิบาลชนม์)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาคณิตศาสตร์ศึกษาของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่ 14 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2561

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินีนานู ศรีมงคล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูคุณเวทิตาแด่ บุพการี บุรพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

กัณฑ์กน ชัยเสนา

54990041: สาขาวิชา: คณิตศาสตร์ศึกษา; วท.ม. (คณิตศาสตร์ศึกษา)

คำสำคัญ: การจำลองเชิงตัวเลข / เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง / ความพรุน / การซึมผ่าน

กัณฑ์ชาน ชัยเสนา: การศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งโดยใช้

แบบจำลองเชิงตัวเลข (INVESTIGATION OF OXIDE FUEL CELL PERFORMANCE USING NUMERICAL SIMULATION) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สินีนาฏ ศรีมงคล, ปร.ด. 77 หน้า.

ปี พ.ศ. 2561.

ในการวิจัยนี้ นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง สมการควบคุมประกอบด้วย Maxwell–Stefan สมการสำหรับการถ่ายเทมวล สมการดุลมวล และ สมการ Brinkman สำหรับการไหลในรูพรุน โดเมนคำนวณอยู่ในสามมิติ มีการศึกษา 4 กรณีศึกษา กรณีที่หนึ่ง ปรับโดเมนสองโดเมนที่มีขนาดแตกต่างกันและเลือกใช้โดเมนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการศึกษาเพิ่มเติม กรณีที่สอง ผลของอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  มี ประสิทธิภาพดีกว่า  $1000^{\circ}\text{C}$  กรณีสาม วิเคราะห์ผลของโครงสร้างตาข่ายโดยใช้โครงสร้างตาข่ายที่แตกต่างกันสามขนาด ผลลัพธ์ พบว่าคำตอบมีความแตกต่างกันน้อยมากแสดงถึงความเสถียรของคำตอบ กรณีที่สี่ ศึกษาผลของความพรุนและซึมผ่าน จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มความพรุนหรือการซึมผ่านค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสและพลังงานเซลล์เชื้อเพลิงเฉลี่ยเพิ่มขึ้น

54990041: MAJOR: MATHEMATICS EDUCATION ; M.Sc. (MATHEMATICS EDUCATION)

KEYWORDS: NUMERICAL SIMULATION / SOLID OXIDE FUEL CELLS / POROSITY /  
PERMEABILITY

KANTAPON CHAISENA : INVESTIGATION OF OXIDE FUEL CELL PERFORMANCE USING  
NUMERICAL SIMULATION. ADVISORY COMMITTEE: SINEENART SRIMONGKOL, Ph.D.  
77 P. 2018.

In this research, a mathematical model of solid oxide fuel cell is presented. Governing equations consist of Maxwell – Stefan equations for chemical transport, current balance equations, and Brinkman equations for flow in porous media. Computational domains are in three-dimensions. The investigation is organized in four schemes. First, two domains with different sizes are solved and the domain with the highest performance is used for further study. Second, the effect of temperature is found that temperature,  $800^{\circ}\text{C}$  has the better performance than temperature,  $1000^{\circ}\text{C}$ . Third, the mesh sensitivity is analysed using three different mesh sizes. The results show that the solutions have small difference. It is indicated that the numerical results are stable. Finally, the effect of porosity and permeability is studied. The numerical results show that increasing porosity or permeability, the average current density and average cell power is increased.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิง.....	6
เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง.....	15
การพัฒนาวัสดุของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง.....	24
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
หลักการและทฤษฎี.....	35
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	35
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
กรณีศึกษาโดเมนที่ส่งผลต่อค่าพลังงาน.....	41
กรณีศึกษาอุณหภูมิที่ส่งผลต่อโดเมนแต่ละโดเมน.....	44
กรณีศึกษาการแบ่งเอลิเมนต์ของเซลล์เชื้อเพลิง.....	45

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
กรณีศึกษาค่า permeability กับค่า porosity .....	53
5 สรุปและอภิปรายผล.....	62
สรุปผลการวิจัย.....	62
ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก .....	69
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	77

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กรอบแนวคิดในการวิจัย .....	4
2 แสดงการนำเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละยูนิตเซลล์สำหรับประกอบร่วมกัน .....	9
3 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	17
4 Stack Design ของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง.....	23
5 แสดงโดเมนที่ใช้ในการทดลองแบบที่1.....	43
6 แสดงโดเมนที่ใช้ในการทดลองแบบที่2.....	44
7 โครงสร้างตาข่ายรูทรงหกหน้าแบบปกติของจำลองเซลล์เชื้อเพลิง จำนวน 2748 เอลิเมนต์.....	46
8 โครงสร้างตาข่ายรูทรงสี่หน้าแบบหยาบของจำลองเซลล์เชื้อเพลิง จำนวน 144,943 เอลิเมนต์.....	47
9 โครงสร้างตาข่ายรูทรงสี่หน้าแบบหยาบของจำลองเซลล์เชื้อเพลิง จำนวน 707,828 เอลิเมนต์.....	48
8 การกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทด.....	50
9 การกระจายตัวของไฮโดรเจนในแอโนด.....	50
10 กราฟแสดงการโพลาไรเซชันซึ่งเป็น ลักษณะของกระแสไฟฟ้า (แกนX) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (แกนY).....	51
11 กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้า(แกนY) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แกนX).....	52
12 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่กระจายตัวอยู่ในอิเล็กโทรไลต์.....	52
13 เป็นกราฟโพลาไรเซชัน โดยที่มีค่า Permeability ที่ $1.16 \times 10^{-9}$ และค่า Porosity 0.45.....	54
14 เป็นกราฟโพลาไรเซชัน โดยที่มีค่า Permeability ที่ $1.98 \times 10^{-10}$ และค่า Porosity ที่ 0.55.....	54
15 เป็นกราฟพลังงานกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยที่มีค่า Permeability ที่ $1.16 \times 10^{-9}$ และค่า Porosity ที่ 0.45.....	55



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	เป็นกราฟพลังงานกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยที่มีค่า Permeability ที่ $1.98 \times 10^{-10}$ และค่า Porosity ที่ 0.45.....	55
17	การกระจายตัวของไฮโดรเจนในแอโนด.....	56
18	การกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทด ซึ่งมีค่า Permeability ที่ $1.16 \times 10^{-9}$ และค่า Porosity ที่ 0.45.....	57
20	เป็นการกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทด ซึ่งมีค่า Permeability ที่ $1.16 \times 10^{-9}$ และค่า Porosity ที่ 0.55.....	57
21	เป็นการกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทด Permeability ที่ $1.98 \times 10^{-10}$ และค่า Porosity ที่ 0.45.....	58
22	เป็นการกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทด Permeability ที่ $198 \times 10^{-10}$ และค่า Porosity ที่ 0.45.....	58
24	เป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อ Permeability ที่ $1.16 \times 10^{-9}$ และค่า Porosity ที่ 0.45.....	59
25	เป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อ Permeability ที่ $116 \times 10^{-9}$ และค่า Porosity ที่ 0.55.....	59
26	เป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อ Permeability ที่ $1.98 \times 10^{-10}$ และค่า Porosity ที่ 0.45.....	60
27	เป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อ Permeability ที่ $1.98 \times 10^{-10}$ และค่า Porosity ที่ 0.55.....	60

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการทำงานและสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ	13
2	ขนาดของส่วนประกอบในแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง แบบที่ 1.	40
3	ขนาดของส่วนประกอบในแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง แบบที่ 2.	42
4	ตารางเปรียบเทียบการประมวลผลของโดเมนทั้งสองขนาด.....	42
5	ตารางแสดงอุณหภูมิ และ Permeability.....	43
6	ตารางแสดงผลการแบ่งเอลิเมนต์.....	44
7	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง.....	45
8	ผลของค่าพลังเมื่อมีการเปลี่ยนค่า Permeability กับค่า Porosity.....	49

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเชื้อเพลิงที่เราใช้กันอยู่นั้นวันจะยิ่งลดน้อยลงไปตามกำลังการใช้ที่เพิ่มขึ้นตามอัตราประชากรที่เพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ จึงได้มีความพยายามศึกษา ค้นคว้า วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ ให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้สะดวก และมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อช่วยประหยัดพลังงาน และช่วยลดค่าใช้จ่าย โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของการพึ่งพาพลังงานจากแหล่งพลังงานในท้องถิ่น และแหล่งพลังงานภายในประเทศ สามารถผลิตและใช้พลังงานอย่างยั่งยืน ซึ่งจะเป็หนทางหนึ่งที่จะช่วยลดการทำลายทรัพยากรที่กำลังเกิดขึ้นอย่างมากมาย และรุนแรงในปัจจุบัน ช่วยรักษาสมดุลของธรรมชาติ อันเป็นภัยคุกคามอย่างร้ายแรงต่อ โลก และมนุษยชาติ นอกจากนี้ยังเชื่อว่าพลังงานทดแทนจะเป็นหนทางหนึ่งของการแก้ไขวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อมของโลกได้ เชลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพราะเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ

เชลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในแล้วจะให้พลังงานไฟฟ้าออกมาอย่างมีประสิทธิภาพ เชลล์เชื้อเพลิงให้กำเนิดกระแสไฟฟ้าได้โดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งคล้ายกับหลักการทำงานของแบตเตอรี่ เพียงแต่แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่แน่นอน ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ และจ่ายประจุ ในการใช้งานจึงต้องทำการชาร์จไฟก่อนนำไปใช้งาน และต้องชาร์จไฟใหม่เมื่อหมดแรงดัน กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเชลล์เชื้อเพลิงนั้นมาจากการเกิดออกซิเดชันและรีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าแต่ละด้าน เมื่อต่อขั้วไฟฟ้าจะก่อให้เกิดการไหลเวียนของอิเล็กตรอน โดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิง (Fuel) ที่เป็นตัวอย่างของปฏิกิริยาเคมีคือ ก๊าซไฮโดรเจน และมีก๊าซออกซิเจนเป็นสารออกซิแดนต์ (Oxidant) ปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซออกซิเจนนั้นเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดและปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดอิเล็กตรอนจึงไหลจากขั้วแอโนดผ่านวงจรไปที่ขั้วแคโทดเพื่อทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาของเชลล์เชื้อเพลิงนั้นมีการรายงานครั้งแรกโดยศาสตราจารย์คริสเตียน เฟรเดอริก เซอโนบาย (Christian Friedrich Schoenbein) ในปี ค.ศ. 1839 ว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยใช้กรดซัลฟูริก และลวดแพลตินัม เซอร์วิลเลียม โกรว์ฟ (Sir William Grove) รายงาน

ในอีก 1 เดือนถัดมาถึง แบตเตอรี่ที่ใช้แพลตตินัมและสังกะสี เมื่อใช้กรดซัลฟริกและไนตริกเป็น อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งถือว่าเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเครื่องแรกในโลก หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาขึ้นมาอย่างรวดเร็วอีกครั้งในกลางศตวรรษที่ 20 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นได้จากประสิทธิภาพทางเคมี โดยอาศัยหลักการทางเทอร์โมไดนามิก ไม่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot Cycle) ที่เป็นตัวควบคุมประสิทธิภาพการทำงานในเครื่องกำเนิดพลังงานจากความร้อน เช่น ระบบกังหัน ก๊าซ และเครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง ประสิทธิภาพการทำงานจึงสูงถึง 85% ในทางทฤษฎี ทั้งนี้เชื้อเพลิงที่นำมาใช้จะต้องนำมาคิดหา ค่าประสิทธิภาพที่แท้จริงด้วยหากต้องมีการแปรสภาพก่อนการใช้งาน เซลล์เชื้อเพลิงจำแนกออกได้ หลายระบบ ขึ้นอยู่กับอิเล็กโทรไลต์ โดยทั่วไปแล้วจะจำแนกได้เป็น 5 ประเภท คือ Alkaline Fuel Cell (AFC) Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) (กิตติภูมิ ก่องวารานนท์, 2558)

เซลล์เชื้อเพลิงที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีอยู่ 2 แบบ คือ PEMFC และ SOFC เซลล์เชื้อเพลิงแบบแรกนั้นเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถใช้ในรถยนต์ได้ ไม่เพียงแต่สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซไฮโดรเจนเท่านั้น แต่ยังสามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่เป็นของเหลว เช่น เมทานอลหรือเอทานอล ซึ่งเป็นข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ เพราะการใช้เซลล์ PEMFC สามารถใช้ของเหลวเป็นเชื้อเพลิง จะทำให้ง่ายต่อการจัดเก็บและขนส่ง นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวใน PEMFC ยังเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าได้ค่อนข้างไวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ค่าใช้จ่ายไม่สูงจนเกินไปและไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบที่ 2 นั้นสามารถใช้งานที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงในช่วง 800 - 1000 องศาเซลเซียสเซลล์ชนิดนี้จะให้ประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าได้ถึง 80% และถ้านำความร้อนที่เหลือทิ้งกลับมาใช้ร่วมด้วยประสิทธิภาพจะเพิ่มเป็น 85% เนื่องจากเซลล์ทำงานที่อุณหภูมิสูงทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้โลหะราคาแพงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และการปรับปรุงเชื้อเพลิงเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ ทำให้สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย โดยไม่ต้องเพิ่มตัวปรับปรุงเชื้อเพลิงภายนอกเข้ากับระบบ ซึ่งช่วยให้ราคาของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งลดลง นอกจากนี้ SOFC ยังเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ทนต่อกำมะถันมากที่สุดและไม่ถูกทำลายด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดังนั้น ก๊าซถ่านหินสามารถใช้ได้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ การทำงานที่อุณหภูมิสูงของเซลล์ทำให้เกิดข้อเสียคือ เริ่มต้นจ่ายพลังงานได้ช้า ต้องการฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อน เหมาะสำหรับเป็น โรงไฟฟ้าที่ตั้งอยู่กับที่ไม่

เหมาะกับการขนส่งหรือเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องมีการเคลื่อนย้าย นอกจากนั้นยังทำให้วัสดุที่ใช้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงมีอายุการใช้งานสั้นลง (ศศิธร งามแพรวพราว และคณะ, 2557)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell : *SOFC*) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจและกำลังมีการพัฒนากันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถดำเนินงานได้ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 600 ถึง 1000 องศาเซลเซียส จึงมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายตั้งแต่การผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ในครัวเรือน ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม หรืออาจจะเป็นโรงผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่สามารถแจกจ่ายไฟฟ้าให้ทั้งชุมชนก็ได้ ข้อดีของการดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง คือ ปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะที่มีราคาแพง สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย (เช่น ก๊าซธรรมชาติ มีเทน เอทานอล เมทานอล แอมโมเนีย หรือน้ำมันดีเซล) และยังสามารถนำก๊าซที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีอุณหภูมิสูงมาใช้งานในกระบวนการผลิตพลังงานความร้อนร่วม หรือนำมาใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการผลิตไฟฟ้าได้ (Hussain et al., 2006)

เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์โดยปกติให้แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 1 โวลต์เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าเพียงพอต่อการใช้งานจึงต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์ต่อกันเป็นอนุกรมเป็นชุดเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชุดเซลล์เชื้อเพลิงที่นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์เชื้อเพลิง กระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวทั้งหมดของแต่ละเซลล์ ชุดเซลล์เชื้อเพลิงหรือชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่นิยมใช้มีอยู่ 2 แบบ ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบแผ่น (Planer Stack) และชั้นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบท่อ (Tubular Stack) ทั้งสองแบบมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน แต่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบแผ่น (Planar Stack) ประหยัดเนื้อที่และมีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าต่อปริมาตรสูง (สมนึก บุญพาไสว, 2548)

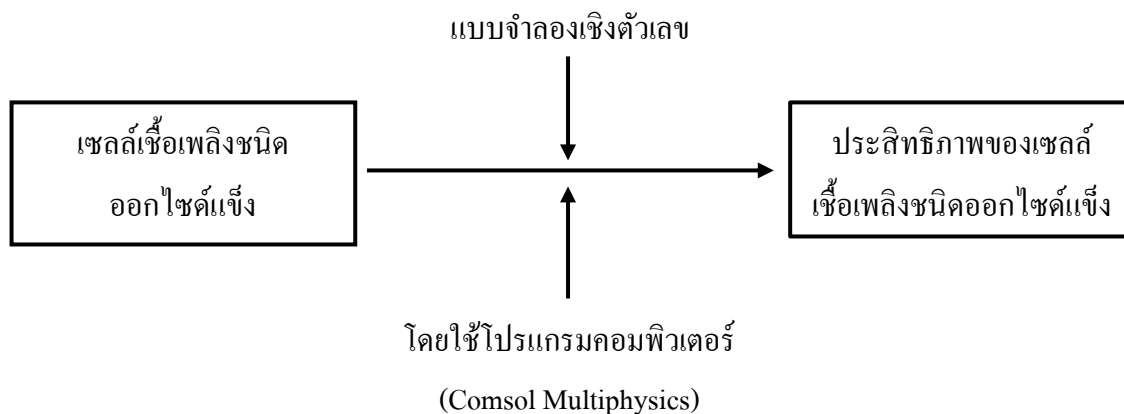
การจะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลได้แก่ วัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นขั้วแคโทด ปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง, ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง รวมถึงเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ผู้วิจัยจึงอาศัยแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Simulations) ยืนยันประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงโดยแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Simulations) ที่พัฒนาขึ้นนั้นจะนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่จะนำมาทดสอบประสิทธิภาพของของเซลล์เชื้อเพลิง
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง
3. เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาการผลิตเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

### กรอบแนวคิดในการวิจัย

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถนำเสนอกรอบแนวคิดการวิจัยได้ดังนี้



ภาพที่ 1-1 กรอบแนวคิดวิจัย

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำผลที่ได้จากการศึกษาไปช่วยในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง และเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งได้

### ขอบเขตของการวิจัย

1. พัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่จะนำมาทดสอบที่อุณหภูมิ 800 และ 1000 °C และมีการเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้สมการดุลมวล สมการดุลพลังงาน สมการปฏิกิริยาเคมี
2. ศึกษาผลของสภาวะการดำเนินการของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น อุณหภูมิ ความพรุน การซึมผ่านได้ ที่มีต่อสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

**ข้อจำกัดของการวิจัย**

ผู้วิจัยไม่มีการทดลองจริงเพื่อทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ เนื่องจากการทดลองดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูง

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง มีการทดลองอยู่หลายลักษณะทั้งทดลองจริงเพื่อให้เห็นผลลัพธ์และประสิทธิภาพอย่างชัดเจน แต่ว่าเนื่องจากว่าการทดลองจริงนั้นค่อนข้างที่จะสิ้นเปลืองทรัพยากรและงบประมาณ ฉะนั้นจึงมีนักคณิตศาสตร์พยายามที่จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ในการศึกษาเรื่องเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งครั้งนี้ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในเรื่องของเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง รวมไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังหัวข้อต่อไปนี้

1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิง
2. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง
3. การพัฒนาวัสดุของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของก๊าซเชื้อเพลิงและ ก๊าซออกซิเจนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง จึงไม่มีการสูญเสียระหว่างการเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นพลังงาน ความร้อน จากพลังงานความร้อนเป็นพลังงาน และพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ทำให้เซลล์เชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงไปเป็นกระแสไฟฟ้าในช่วง 45 – 60% (Minh and Takahashi, 1995) นอกจากนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นเพียงน้ำบริสุทธิ์ และความร้อนเท่านั้น การปล่อยของเสียจึงเป็นศูนย์ (Zero Emission) ซึ่งเป็นข้อดีหลักเมื่อนำเซลล์เชื้อเพลิง ไปใช้ในยานพาหนะ(Singhal, 2002) (Larminie & Dicks, 2003) ยิ่งไปกว่านั้นเซลล์เชื้อเพลิงเป็นระบบที่มีความไม่สลับซับซ้อนเพราะประกอบไปด้วยองค์ประกอบเพียง 3 ส่วน ได้แก่ สารพาประจุหรืออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) คั่นอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) และเนื่องจากไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ จึงไม่มีการสั่น ที่ก่อให้เกิดเสียงดัง ซึ่งในส่วนนี้ยังเป็นผลดีต่อการนำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้า แบบพกพาอีกด้วย (Barbir, 2005) (Hayre et al., 2006)

เซลล์เชื้อเพลิงที่มีการพัฒนาขึ้นมาในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ตามวัสดุที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ซึ่งจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิง



แบบแอลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell : *AFC*) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cell : *PAFC*) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell : *PEMFC*) เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเหลว (Molten Carbonate Fuel Cell : *MCFC*) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell : *SOFC*) โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นและแลกเปลี่ยนโปรตอน มีช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงานต่ำที่สุดประมาณ 80 องศาเซลเซียส ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงานสูงที่สุดประมาณ 1000 องศาเซลเซียส โดยช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงานจะสามารถบ่งชี้ชนิดของก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ดำเนินงานด้วยอุณหภูมิต่ำ (*PEMFC*, *AFC* และ *PAFC*) ต้องใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงเท่านั้น ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงที่ดำเนินงานด้วยอุณหภูมิสูง (*MCFC* และ *SOFC*) สามารถประยุกต์ใช้ก๊าซเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เช่น ก๊าซธรรมชาติมีเทนเมทานอลและเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงได้ โดยเชื้อเพลิงเหล่านี้จะสามารถเปลี่ยนรูปเป็นไฮโดรเจนได้ ภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมานี้สามารถบ่งบอกถึงความทนต่อสิ่งเจือปนของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดด้วย

### 1.1 ความหมายของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง คือ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีซึ่งลักษณะการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่มีข้อดีกว่าแบตเตอรี่ตรงที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงในรูปของเหลวหรือก๊าซเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ และไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงคือ น้ำและความร้อน ก๊าซที่ปล่อยออกจากเซลล์เชื้อเพลิง จะมีปริมาณของ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ต่ำกว่าระดับมาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนดโดยกองควบคุมมลพิษ (กิตติ์ธณภูมิ ว่องวรานนท์, 2556)

จากรายงานการวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี กล่าวว่า เซลล์เชื้อเพลิงหรือ Fuel Cell คืออุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกี่ยวกับอิเล็กตรอนมาเป็นกระแสไฟฟ้า (Electrochemical Energy Conversion Device) โดยจะทำการเปลี่ยนไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) หรือโปรตอนและออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ให้กลายเป็นน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีการผลิตไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยเซลล์เชื้อเพลิงทั่ว ๆ ไปนั้นปฏิกิริยาเคมีจะผลิตไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าสองขั้วคือด้านของเชื้อเพลิง (Anode) และ Oxidant (Cathode) (ศิริวรรณ โชคคำ, 2554)

ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงคือตัวผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องผ่านการเผาไหม้โดยใช้การเกิดปฏิกิริยาของไฟฟ้าเคมีทำให้ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและยังเป็นมิตร

ต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วยเพราะผลผลิตของปฏิกิริยาที่ได้คือพลังงานไฟฟ้ากับน้ำทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดที่สุดอีกประเภทหนึ่งอีกด้วย

## 1.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงแบ่งโครงสร้างเป็น 3 ส่วนหลักคือ

### 1.1.1 ขั้วแอโนด (Anode) เป็นขั้วลบมีหน้าที่ส่งอิเล็กตรอนออกจากขั้ว

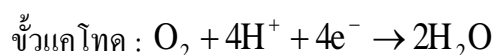
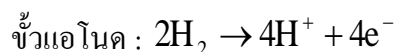
โดยอิเล็กตรอนได้จากปฏิกิริยา  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$  โดยที่ขั้วจะมีช่องที่ติดกับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งฉาบอยู่บนผิวหน้าของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยปฏิกิริยาจะเกิดเมื่อผ่านก๊าซไฮโดรเจนเข้าไป

### 1.1.2 ขั้วแคโทด (Cathode) เป็นขั้วบวกมีช่องติดกับเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน

ทำหน้าที่รับโปรตอนและก๊าซออกซิเจนซึ่งถูกปล่อยออกมาที่ผิวหน้าของเยื่อซึ่งฉาบตัวเร่งปฏิกิริยาเอาไว้และทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนกลับมาจากวงจรภายนอกเพื่อรวมกันเป็นน้ำดังปฏิกิริยา  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

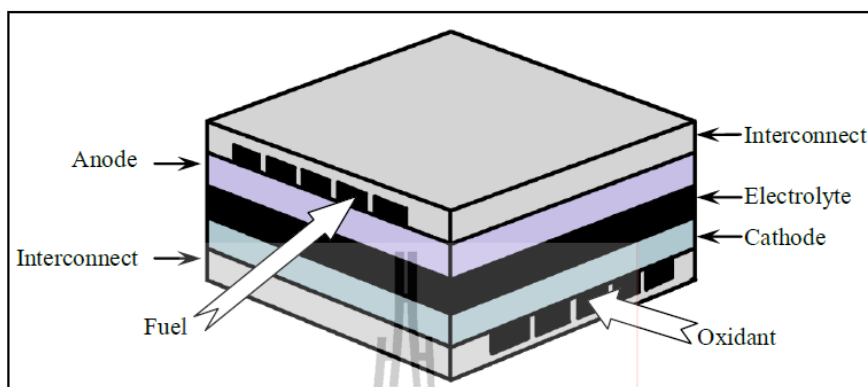
1.1.3 สารพาประจุ (Electrolyte) เป็นส่วนที่มีความสำคัญเพราะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่าง ๆ และเป็นส่วนที่เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทแตกต่างกันโดยประเภทที่เรากล่าวถึงอยู่นี้สารพาประจุจะเป็นเพียงเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane) เท่านั้นซึ่งมีลักษณะเหมือนแผ่นพลาสติกในการทำครัวโดยจะให้โปรตอนผ่านได้แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน

ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, นั้ทมน คุณแสง และอภิรัตน์ เลาห์บุตรี (2553) ได้กล่าวว่า ส่วนประกอบพื้นฐานภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบไปด้วยชั้นของวัสดุอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) จะอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทั้งสองนั่นคือแอโนด (Anode) และแคโทด (Cathode) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความพรุนในตัวโดยเชื้อเพลิงจะถูกส่งเข้าไปยังแอโนด และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นและปล่อยอิเล็กตรอนออกสู่วงจรภายนอกเซลล์ในขณะที่สารออกซิแดนซ์จะถูกส่งเข้าไปยังแคโทดและรับอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากวงจรภายนอกทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันกระแสไฟฟ้าตรงเกิดขึ้นจากการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังแคโทดนอกจากนี้ยังมีความร้อนเกิดขึ้นด้วยส่วนอิเล็กโทรไลต์จะมีหน้าที่หลักคือเป็นตัวนำพาไอออนผ่านระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองแต่จะไม่เป็นตัวนำอิเล็กตรอน ซึ่งทั้งขั้วแอโนดและขั้วจุ่มหรือสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) โดยอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือของแข็งที่ก๊าซไฮโดรเจนป้อนเข้าทางแอโนดและก๊าซออกซิเจนป้อนเข้าทางแคโทดสามารถแสดงสมการเคมีการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 2 ขั้วได้ดังนี้



โดยสมการเคมีแสดงการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วแอโนดแสดงปฏิกิริยาออกซิเดชัน และ สมการเคมีแสดงการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วแคโทดจะแสดงปฏิกิริยรีดักชัน

โดยปกติแล้วเมื่อมีการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องมีการประกอบกันหลายหน่วยแสดง ได้ดังภาพที่ ๒-๑ โดยการต่อบนุกรมกันเป็นชั้น (Stack) ซึ่งจะมีตัวเชื่อมต่อ (Interconnect) ระหว่างขั้วแอโนดของหน่วยเซลล์หนึ่งกับขั้วแคโทดของอีกหน่วยเซลล์เชื้อเพลิงชุดถัดไปและจำนวนชั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของโวลต์ทั้งหมดที่ต้องการซึ่งพื้นที่ผิวของแต่ละชั้นจะเป็นตัวกำหนดปริมาณกระแสทั้งหมดโดยผลคูณที่เกิดระหว่างปริมาณของโวลต์และกระแสจะเป็นตัวบ่งบอกถึงกำลังไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถผลิตขึ้นได้ (Pham, 2002 อ้างถึงใน ศิริวรรณ โชคคำ, 2554)



ภาพที่ 2-1 แสดงการนำเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละหน่วยเซลล์สำหรับประกอบรวมกัน (Pham, 2002 อ้างถึงใน ศิริวรรณ โชคคำ, 2554)

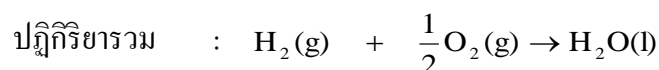
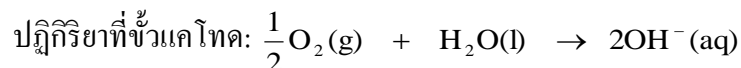
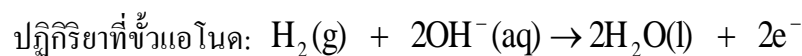
### 1.3 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

Wolk (2009), Rajashekara (2005), Blomen and Mugerwa (1993), Pecan, Yildiz, and Baltaci (2007) และ Ural, Gencoglu and Gumus (2007) กล่าวถึงเซลล์เชื้อเพลิงว่าสามารถจำแนกได้หลายรูปแบบตามองค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น อุณหภูมิชนิดของเชื้อเพลิง หรือสารพาประจุ แต่ที่นิยมมากที่สุด คือ จำแนกด้วยชนิดของสารพาประจุซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 6 ชนิด คือเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์หรือแบบด่าง (Alkaline Fuel Cell : *AFC*) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell : *PEMFC*) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cell : *PAFC*) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cell: *MCFC*) เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell : *SOFC*) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้เมทัลแอลกอฮอล์โดยตรง

(Direct Methanol Fuel Cell : *DMFC*) โดยนอกเหนือจากการจำแนกชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงตามรูปแบบของสารพาประจุทั้ง 6 ชนิดที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีรูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงอีกแบบหนึ่งที่ได้มีการพัฒนากระบวนการทำปฏิกิริยาย้อนกลับแบบปิดจะเรียกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับ (Regenerative Fuel Cell : *RFC*) ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1.3.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์

เมตตา บันเทิงสุ, วีระพล จิรประดิษฐกุล และบุญส่ง เกิดกลาง (2549) กล่าวว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์หรือแบบด่างเป็นเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการพัฒนารุ่นแรก ๆ และเป็นชนิดแรกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโครงการอวกาศของสหรัฐอเมริกาในช่วงปี ค.ศ. 1960 เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและน้ำบนยานอวกาศ Apollo เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide: KOH) เป็นสารพาประจุไฟฟ้าเนื่องจากมีสมบัติในการพาประจุได้สูงที่สุดในบรรดาสารไฮดรอกไซด์ของธาตุกลุ่มแอลคาไลน์และใช้แก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากระบบไวต่อการปนเปื้อนมากทำให้ระบบนี้มีราคาสูง การใช้งานจึงจำกัดอยู่ในงานด้านอวกาศ อุณหภูมิการทำงานจะอยู่ในช่วง 60 - 120 องศาเซลเซียสโดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้คือ



### 1.3.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเรียกอีกอย่างว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่ออิเล็กโทรไลต์พอลิเมอร์ (Polymer Electrolyte Membrane) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ใช้แผ่นพอลิเมอร์ (Polymer) บางๆเป็นตัวพาประจุจึงไม่เกิดการรั่วซึมซึ่ง Vaishampayan, Vangari, and Shah (2014) กล่าวว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนมีประสิทธิภาพในการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ 53 - 58% และประสิทธิภาพในการใช้งานร่วมกับระบบยานยนต์หรือรถไฟฟ้าที่ 35 - 42% มีอุณหภูมิการทำงานที่ 40 - 80 องศาเซลเซียสแต่ต้องใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่มีความสะอาดและมีขั้วไฟฟ้าที่ต้องทำจากแพลตินัมจึงยังมีราคาค่อนข้างสูงเป็นระบบที่มีการนำไปทดลองใช้ในรถยนต์ต้นแบบแล้วหลายยี่ห้อเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะไหลเข้าสู่เซลล์ทางขั้วบวกของเซลล์ (Anode) และถูกแยกออกไปเป็นไฮโดรเจนไอออน (โปรตอน) และอิเล็กตรอนไฮโดรเจนไอออนซึมผ่านอิเล็กโทรไลต์ข้ามไปยังขั้วลบในเซลล์ (Cathode) ขณะที่อิเล็กตรอนไหลผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกป้อนกำลังให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าออกซิเจน

ในรูปแบบของอากาศจะถูกป้อนเข้าขั้วลบในเซลล์และรวมเข้ากับอิเล็กตรอนและไฮโดรเจนไอออน กลายเป็นน้ำ

### 1.3.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก

กรดฟอสฟอริกจะถูกใช้เป็นตัวนำอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้โดยที่กรดฟอสฟอริกถูกบรรจุในเมทริกซ์ของซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide) ปฏิกิริยาในตัวกลางที่มีฤทธิ์เป็นกรดอุณหภูมิการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้มีค่าอยู่ระหว่างในช่วง  $170 - 200^{\circ}\text{C}$  สภาพแวดล้อมดังกล่าวสารอิเล็กโทรไลต์จะมีความเสถียรซึ่งจะทำงานโดยสามารถใช้อากาศที่มีก๊าซ  $\text{CO}_2$  อยู่ การที่เซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้มีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูงปานกลางจะช่วยลดความเป็นพิษของก๊าซ  $\text{CO}_2$  ที่มีผลต่อตัวกะตะลิสต์ลง จากการทดสอบพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PAFC นี้มีอายุการใช้งานได้นานถึง 40,000 ชั่วโมงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามากกว่า 40% และใช้น้ำที่ผลิตได้ 85% ในระบบผลิตความร้อนร่วมอุณหภูมิในการทำงานระหว่าง  $300 - 400^{\circ}\text{F}$  ( $150 - 200^{\circ}\text{C}$ ) ปัจจุบันมีขนาดใช้งานที่ 1 kW และ 1 MW นักวิจัยที่ Los Alamos National Laboratory ได้ศึกษาเพื่อนำไปพัฒนาขีปนาวุธไฟฟ้ามหาวิทยาลัย Georgetown พัฒนาเพื่อใช้ในรถประจำทางขนส่ง ซึ่งให้กำลังไฟฟ้า 50 kW และ ในปี 1990 สามารถผลิตที่ให้กำลังไฟฟ้า 100 kW แต่ต้องอุ่นเครื่องก่อนใช้ ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้กับรถยนต์ส่วนบุคคล

### 1.3.4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอมเหลว

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้สารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือสารลิเทียมคาร์บอเนต ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) ผสมกับโปแตสเซียมคาร์บอเนต ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) หรือโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) โดยใช้นิกเกิลออกไซด์ ( $\text{NiO}$ ) เป็นวัสดุแคโทดและโลหะนิกเกิลนำมาใช้เป็นวัสดุแอโนดโดยอุณหภูมิที่ใช้งานจะอยู่ที่ประมาณ  $650^{\circ}\text{C}$  ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมมาใช้กับก๊าซธรรมชาติและถ่านหินสำหรับโรงไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้าจ่ายให้กับบ้านเรือนและใช้ในหน่วยงานทหาร โดยสามารถประยุกต์ใช้แก๊สเชื้อเพลิงได้หลายชนิด เช่น แก๊สไฮโดรเจนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นต้นปัญหาสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้คือการกัดกร่อนเนื่องจากอิเล็กโทรไลต์เป็นของเหลวทำให้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง

### 1.3.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงอีกชนิดที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่ ใช้สารเซรามิกเป็นสารพาประจุซึ่งสารที่ใช้มากคือ สารประกอบเซอร์โคเนียออกไซด์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานในช่วงอุณหภูมิ 650 – 1000 °C ดังนั้นสารไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ จึงสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้และออกซิเจนในอากาศสามารถนำมาใช้เป็นออกซิเจนแคตโอดได้ ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือสามารถนำไอน้ำอุณหภูมิสูงที่เป็นผลผลิตของกระบวนการนี้ไปใช้ปั่นกังหันไอน้ำต่อได้ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก

โดยสรุปแล้วเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 5 ชนิดแบ่งได้เป็นสองประเภทได้แก่ประเภทที่ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำคือ AFC , PAFC และ PEMFC ซึ่งต้องใช้แพลตตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงและประเภทที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงเช่น MCFC และ SOFC ซึ่งสามารถใช้สารไฮโดรคาร์บอนเป็นเชื้อเพลิงได้และไม่ต้องใช้แพลตตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 1.3.6 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทิลแอลกอฮอล์โดยตรง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใหม่โดยจะมีลักษณะคล้ายเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC คือ ใช้โพลีเมอร์เมมเบรนเป็นอิเล็กโทรไลต์ อย่างไรก็ตามในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ตัวของเซลล์เชื้อเพลิงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยดึงเอาไฮโดรเจนออกจากเมธานอลเหลว (Liquid Methanol) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ถูกคาดว่าจะมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 40 อุณหภูมิการใช้งานประมาณ 50 - 80 องศาเซลเซียสและหากต้องการให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นต้องเพิ่มอุณหภูมิใช้งานให้สูงขึ้น

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใหม่อีกชนิดหนึ่งสิ่งที่น่าสนใจของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ คือ การเกิดวัฏจักรปิด (Closed Loop) ในขั้นตอนการกำเนิดกำลังงาน (Power Generation) กล่าวคือ น้ำจะถูกทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนด้วย Solar-Powered Electrolyser จากนั้นทั้งไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกปล่อยเข้าไปที่ตัวเซลล์เชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นน้ำความร้อนและกระแสไฟฟ้าขึ้นมาน้ำที่ได้จะถูกส่งย้อนกลับไปที่ Solar-Powered Electrolyser อีกเพื่อทำให้แตกตัวซึ่งปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ NASA และกลุ่มวิจัยอื่น ๆ ทั่วโลกสนใจศึกษาอยู่

โดยทั่วไปแล้วในปัจจุบันมีเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ 5 ชนิดเท่านั้นที่ได้รับความสนใจและประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ กันไป

### 1.3.7 เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับ

แนวความคิดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับเป็นเรื่องค่อนข้างใหม่ที่นักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มทั่วโลก รวมทั้งนักวิทยาศาสตร์ที่ NASA กำลังทำการวิจัยเทคโนโลยี

นี้ทำงานบนพื้นฐานเดียวกันกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ที่กล่าวมาแล้วคือ ใช้ไฮโดรเจน และออกซิเจนในการผลิตกระแสไฟฟ้า ความร้อนและน้ำ สิ่งที่แตกต่างกัน เชื้อเพลิงแบบป้อนกลับ มีกระบวนการทำปฏิกิริยาย้อนกลับหรือการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าด้วย โดยส่งน้ำที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง ไปยังอุปกรณ์แยกน้ำด้วยไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ น้ำจะถูกแยกเป็นไฮโดรเจน และออกซิเจนแล้วส่งไปยังถังเก็บเพื่อป้อนกลับเข้าเซลล์เชื้อเพลิงด้วยวิธีการนี้เมื่อสร้างเป็นระบบไฮโดรเจนที่ผลิตจากภายนอกก็ไม่มีควมจำเป็น

ตารางที่ 2-1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการทำงานและสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	ไอออนที่เคลื่อนที่	อุณหภูมิในการใช้งาน	ลักษณะการใช้งาน	ข้อดี	ข้อเสีย
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์	$\text{OH}^-$	60 - 120	ใช้ในงานด้านอวกาศ	- ประสิทธิภาพสูงเนื่องจากแคโทดทำปฏิกิริยาได้เร็ว - ใช้ตัวเร่งที่เกรดไม่สูงมาก	- ตอบสนองต่อ $\text{CO}_2$ เร็วทำให้อายุการใช้งานสั้น - ต้นทุนเพิ่มเนื่องจากต้องทำให้ $\text{H}_2, \text{O}_2$ บริสุทธิ์
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก	$\text{H}^+$	170 - 200	สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าขนาด 200 กิโลวัตต์	- ประสิทธิภาพสูง - ใช้ไฮโดรเจนที่ไม่บริสุทธิ์ได้	- สารเร่งมีราคาสูง - ขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก

ตารางที่ 2-1 (ต่อ)

ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	ไอออนที่เคลื่อนที่	อุณหภูมิในการใช้งาน	ลักษณะการใช้งาน	ข้อดี	ข้อเสีย
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนคัทโหลมเหลว	$\text{CO}_3^{2-}$	500 - 650	ไฟฟ้าขนาดกลางถึงขนาดใหญ่	- ประสิทธิภาพสูง - ใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด - ใช้สารเร่งได้หลากหลาย	- เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย - อายุการใช้งานสั้น - ส่วนประกอบชำรุดง่าย - เริ่มทำงานได้ช้า
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	$\text{O}^{2-}$	650 - 1000	เหมาะสำหรับระบบทุกขนาด	- ประสิทธิภาพสูง - ใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด - เกิดการกัดกร่อนน้อย	- ส่วนประกอบชำรุดง่าย - เริ่มทำงานได้ช้า
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอ็ล	$\text{H}^+$	50 - 100	ยานพาหนะและอุปกรณ์พกพาชนิดต่างๆ	- เกิดการกัดกร่อนน้อย - ทำงานที่อุณหภูมิต่ำ - เริ่มทำงานได้เร็ว	- สารเร่งมีราคาแพง - ตอบสนองต่อสารที่ไม่บริสุทธิ์ได้เร็ว



#### 1.4 ประโยชน์ของเซลล์เชื้อเพลิง

การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงมีประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้งานในที่ห่างไกล เช่น ในยานอวกาศ สถานีตรวจอากาศที่ห่างไกล ชนบท และการประยุกต์ใช้ทางการทหาร เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และดูแลรักษาง่าย การประยุกต์ใช้ในอนาคตอันใกล้นี้คงเป็นระบบไฟฟ้าและพลังงานความร้อน (Combined Heat And Power : *CHP*) สำหรับอาคารสำนักงานและโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งระบบนี้จะผลิตไฟฟ้าในอัตราคงที่สามารถขายไฟฟ้าคืนสู่ระบบได้เมื่อไม่ใช้งาน และในปัจจุบันยังมีการประยุกต์นำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ในรถยนต์ซึ่งจะได้เป็นรถยนต์ไฟฟ้า รถยนต์ไฮโดรเจน และการเติมเชื้อเพลิง สถานีบริการไฮโดรเจนแห่งแรกอยู่ใน Reykjavik Iceland เปิดให้บริการในเดือนเมษายน ปี 2003 ซึ่งให้บริการกับรถบัสสามคันสร้างโดย Daimler ซึ่งให้บริการแก่สาธารณชนโดยทั่วไปในเขต Reykjavik สถานีไฮโดรเจนแห่งนี้ผลิตไฮโดรเจนด้วยตนเองโดยใช้การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าผลิตโดย Norsk Hydro ซึ่งไม่ต้องการอะไรมากไปกว่าน้ำและไฟฟ้า Shell เป็นอีกหนึ่งในผู้ร่วมโครงการ สถานีบริการแห่งนี้ไม่มีหลังคาเพื่อให้ไฮโดรเจนที่อาจรั่วไหลออกไปสู่บรรยากาศได้

จากเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 5 ชนิด จะเห็นว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ให้พลังงานไฟฟ้าสูง ถึง 85% และเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูง จึงไม่จำเป็นต้องใช้โลหะแพลทตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นผู้วิจัยจึงพยายามที่จะใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อช่วยในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง

#### 2. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งใช้เซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ซึ่งทำจากออกไซด์ของโลหะ เช่น เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium Oxide) ที่เจือด้วยยทริเทียม (Yttrium) จำนวนเล็กน้อย นอกจากนี้มีคู่ออกไซด์อื่นที่ใช้ทำเป็นอิเล็กโทรไลต์ได้อีกเช่นเซอร์โคเนียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ อิเล็กโทรไลต์แข็งเคลือบด้วยวัสดุพอร์ซเลนชนิดพิเศษทั้งสองข้างทำเป็นขั้วไฟฟ้า เซลล์ชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1000 องศาเซลเซียสประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้ถึง 60% และถ้านำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ร่วมด้วยประสิทธิภาพจะเพิ่มเป็น 85% เนื่องจากเซลล์ทำงานที่อุณหภูมิสูงทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้โลหะราคาแพงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและการปรับปรุงเชื้อเพลิงเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ทำให้สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายโดยไม่ต้องเพิ่มตัวปรับปรุงเชื้อเพลิงภายนอกเข้ากับระบบซึ่งช่วยให้ราคาของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบ

ออกไซด์แข็งลดลง นอกจากนี้ *SOFC* ยังเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ทนต่อกำมะถันมากที่สุดและไม่ถูกทำลายด้วยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ดังนั้น ก๊าซจากถ่านหินสามารถใช้ได้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ (สมนึก บุญพาไสว, 2548)

ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์กำลังพัฒนา *SOFC* ที่ทำงานที่อุณหภูมิต่ำโดยทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $800^{\circ}\text{C}$  ซึ่งทำให้ปัญหาเกี่ยวกับอายุการใช้งานและราคาของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง แต่ก็อาจทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่ได้จะลดลง

จากประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 5 ชนิด จะเห็นได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell: *SOFC*) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความน่าสนใจเพราะการใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็ง (เซรามิก) จะทำให้ไม่มีปัญหาการกัดน้ำที่เกิดขึ้นและปัญหาเซลล์เกิดการกัดกร่อน นอกจากนี้การดำเนินงานที่อุณหภูมิต่ำในช่วง  $800$  ถึง  $1000^{\circ}\text{C}$  ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น และมีข้อดีต่าง ๆ ตามมา ได้แก่ ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นได้ดีโดยไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะที่มีราคาแพง สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย เช่น มีเทน เมทานอล เอทานอล เพราะเชื้อเพลิงจะสามารถเกิดการรีฟอร์มมิ่งได้ภายในเซลล์เชื้อเพลิง มีความทนทนต่อสิ่งเจือปนสูง แม้ว่าจะใช้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ก็ตาม และสามารถนำก๊าซที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีอุณหภูมิสูงมาใช้งานในกระบวนการผลิตพลังงานความร้อนร่วม

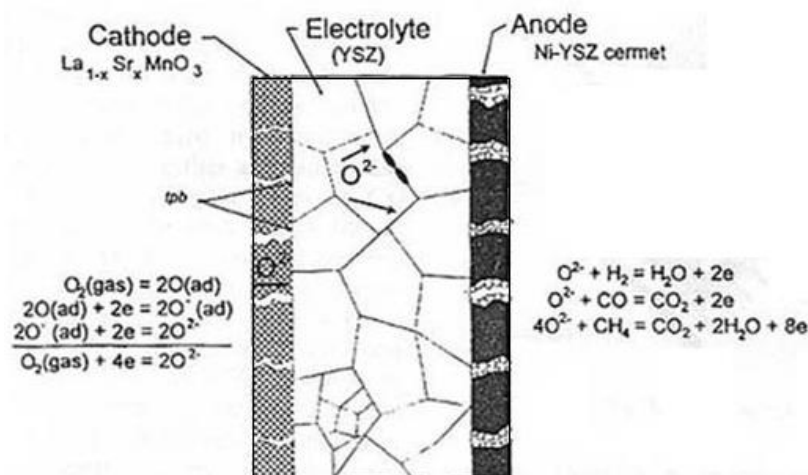
โครงสร้างหนึ่งหน่วยของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดแบบมีรูพรุน (Porous Electrode) 2 ขั้ว ได้แก่ แอโนดและแคโทด แยกออกจากกัน โดยอิเล็กโทรไลต์ของแข็งแบบแน่น (Dense) โดยปกติแล้วอิเล็กโทรไลต์ที่สามารถใช้ได้ภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมี 2 แบบ คือ อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออน (Oxygen Ion Conducting) และอิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอน (Proton Conducting) ความแตกต่างหลักระหว่างอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 2 ชนิด คือ ตำแหน่งของน้ำที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตได้ สำหรับอิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออน น้ำจะเกิดขึ้นในด้านขั้วแอโนด ในขณะที่อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอนน้ำจะเกิดขึ้นในด้านขั้วแคโทดเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออนภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะเกิดออกซิเจนไอออน ( $\text{O}_2^-$ ) ขึ้นที่ขั้วแคโทด ซึ่งไอออนนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังพื้นผิวระหว่างขั้วแอโนดกับอิเล็กโทรไลต์ ณ บริเวณนี้ออกซิเจนไอออนจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมเลกุลของน้ำ และอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) ออกมาโดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรภายนอก แล้ววนกลับเข้ามาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ขั้วแคโทด ณ พื้นผิวระหว่างขั้วแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์

(Cathode-Electrolyte Interface) ทำให้เกิดออกซิเจนไอออนอีกครั้งหนึ่งโดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรภายนอกแล้วจะวนกลับมายังขั้วแคโทด เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแคโทด แล้วจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ 10 ป้อนเข้ามาทางด้านขั้วแคโทดและอิเล็กตรอนที่มาจากวงจรภายนอก เกิดเป็นโมเลกุลของน้ำขึ้นมา

## 2.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง

เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้วัสดุเซรามิกเป็นอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเซรามิกนี้จะเป็นสารประกอบออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นตัวนำไอออน (Ion Conductor) โดยไอออนที่มีประจุลบ เช่นออกซิเจนไอออน ( $O_2^-$ ) สามารถเคลื่อนที่จากแคโทดผ่านเซรามิกนี้ไปยังแอโนด ทำให้เกิดการรวมตัวกับโปรตอนเกิดน้ำขึ้น (Badwel, and Foger, 1996)

ปัจจุบัน เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ประกอบด้วย Ni/ZrO<sub>2</sub> Cermet (สารผสมระหว่างเซรามิกกับโลหะ) เป็นแอโนด และ La-manganite เป็นแคโทดระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมี Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped ZrO<sub>2</sub> (YSZ) เป็นอิเล็กโทรไลต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวนำออกซิเจนดังในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2-2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง SOFC

(อภิรัตน์ เลาหบุตรี และนัทธมน ภูณแสง, 2547)

ที่แคโทดออกซิเจนจากอากาศจะแตกตัวเป็นออกซิเจนไอออน ( $O^{2-}$ ) เคลื่อนที่ผ่าน

อิเล็กโทรไลต์เข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแอโนดกับอิเล็กโทรไลต์ (ดูภาพที่ 2-2) ความต่างศักย์ผันกลับ (Reversible Voltage,  $E_r$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_r = - \frac{\Delta G}{nF}$$

$$E_r = \text{ความต่างศักย์ผันกลับ}$$

$$\Delta G = \text{พลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิงที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน}$$

$$n = \text{จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน}$$

$$F = \text{ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday's Constant)}$$

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวเพียงเซลล์เดียว ความต่างศักย์  $E_r$  ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1.1 – 1.2 โวลต์ในกรณีที่เซลล์ทำงานหนักความต่างศักย์ของเซลล์จะลดลงเป็น 0.6 – 0.9 โวลต์มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 800 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตรในความเป็นจริงแล้วเซลล์เชื้อเพลิงจะมีการสูญเสียพลังงานซึ่งเกิดจากความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์ ( $IR$ ) และความต่างศักย์เกินตัว (Overvoltage,  $\eta$ ) ที่บริเวณผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรไลต์ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง ดังนั้นความต่างศักย์ที่ได้ออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิง ( $E$ ) จึงมีค่าเป็นดังนี้

$$E = E_r - IR - \eta$$

$$\text{และ } \frac{E}{E_r} = \phi_E$$

$$\text{เมื่อ } E = \text{ความต่างศักย์ที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง}$$

$$E_r = \text{ความต่างศักย์ผันกลับ}$$

$$IR = \text{ความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์}$$

$$\eta = \text{ความต่างศักย์เกินตัว}$$

$$\phi_E = \text{ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า}$$

และจากความสัมพันธ์

$$\phi_F = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

$$\text{เมื่อ } \phi_F = \text{ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง}$$

$$\Delta G = \text{พลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิงที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน}$$

$$\Delta H = \text{เอนทัลปีที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิงที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน}$$

จากค่าของ  $\phi_E$  และ  $\phi_F$  สามารถหาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงได้ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ ผลคูณระหว่างประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง (Fuel Efficiency,  $\phi_F$ ) และประสิทธิภาพทางไฟฟ้า

(Electric Efficiency,  $\phi_E$ ) ส่วนพลังงานเคมีที่เหลือจะอยู่ในรูปของความร้อนซึ่งมีปริมาณสูงมากสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มกำลังผลิตไฟฟ้าได้อีก

การทำงานที่อุณหภูมิสูงของเซลล์สามารถทำให้เกิดข้อเสียได้คือเริ่มต้นจ่ายพลังงานได้ช้าต้องการฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนและป้องกันคนเหมาะสำหรับเป็นโรงงานไฟฟ้าที่อยู่กับที่ไม่เหมาะสำหรับการขนส่งหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องมีการเคลื่อนย้ายนอกจากนั้นยังทำให้วัสดุที่ใช้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงมีอายุการใช้งานสั้นลงซึ่งปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์กำลังค้นคว้าหาทางพัฒนา SOFC ที่ทำงานที่อุณหภูมิต่ำโดยทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $800^{\circ}\text{C}$  ซึ่งทำให้ปัญหาเกี่ยวกับอายุการใช้งานและราคาของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงแต่กำลังไฟฟ้าที่ได้จะลดลงด้วย

## 2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง

เนื่องจากการทำงานเซลล์เชื้อเพลิง SOFC จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ( $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแก๊สออกซิเจนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ได้ดีที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น วัสดุที่ใช้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ต้องแข็งแรงทนทานและเสถียรต่อสภาพแวดล้อมภายในเซลล์ เช่น ทนต่อความดันของแก๊สออกซิเจน ( $> 20$  กิโลปาสกาล) ที่เข้าไปในเซลล์ที่เคโทดอุณหภูมิสูงได้ดี มีการขยายตัวน้อย มีความดันไอต่ำเพื่อเลี่ยงการสูญเสียวัสดุ ต้องสามารถใช้งานได้นาน และควรมีราคาถูก ทำให้ปัจจุบันมีการวิจัยอย่างมากที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวัสดุที่เหมาะสมที่ใช้สำหรับสร้างเซลล์เชื้อเพลิง SOFC ซึ่งจะกล่าวต่อไป (Stamboul & Traversa, 2002) (Badwel & Foger, 1996)

### 2.2.1 อิเล็กโทรไลต์

สารเซรามิกที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อทำเป็นวัสดุอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งคือ Ytria Stabilized  $\text{ZrO}_2$  (YSZ) แต่เนื่องจาก YSZ จะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $800^{\circ}\text{C}$  จึงได้มีการศึกษาสารประกอบอื่นๆที่จะใช้แทน YSZ สารที่นักวิจัยกำลังให้ความสนใจในปัจจุบันคือ  $\text{CeO}_2\text{LaGaO}_3$  LAMOX และ  $\text{BaCeO}_3$  เป็นต้น โดยสารประกอบที่เหมาะสมกับการนำมาทำเป็นวัสดุอิเล็กโทรไลต์ต้องคำนึงถึงสมบัติดังต่อไปนี้

2.2.1.1 เป็นตัวนำไอออนแบบออกซิเจน (Oxygen Conductor) หรือแบบโปรตอน (Proton Conductor) ที่ดีกล่าวคือการนำไฟฟ้าของวัสดุเป็นการนำด้วยไอออน (Ionic Conductivity) และไม่ยอมให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่านอิเล็กโทรไลต์เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุด

2.2.1.2 สามารถทนการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีขนาดและรูปร่างได้ทั้งในสภาวะรีดิวซ์และออกซิไดส์

2.2.1.3 มีความหนาแน่นสูงเพื่อป้องกันแก๊สเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิแดนซ์แพร่ผ่านไปยังอิเล็กโทรดอีกด้านหนึ่งในขณะใช้งาน

2.2.1.4 มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่พอเหมาะกับส่วนประกอบอื่น ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งในช่วงการเผาหลังขึ้นรูปและระหว่างการใช้งาน

## 2.2.2 แคลโทด

เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีขึ้นในอากาศและทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนขึ้นออกซิเจนในสถานะแก๊สถูกรีดิวซ์เป็นไอออนของออกซิเจนโดยการรับอิเล็กตรอนจากภายนอกของเซลล์โดยทั่วไปวัสดุที่นิยมนำมาเป็นแคลโทดได้แก่ Doped Lanthanum Manganite ( $\text{LaMnO}_3$ ) และสารเจือที่นิยมใช้มากคือ Sr แต่การใช้ Sr เป็นสารเจือก็มักพบทั้งข้อดีและข้อเสียต่อการใช้งานเนื่องจากทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุดีขึ้นแต่ขณะเดียวกันก็ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุมากขึ้นด้วยจึงได้มีการศึกษาหาสารอื่นทดแทนเช่น La – Sr – Cobaltite ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่า Sr Doped Lanthanum Manganite แต่ก็เกิดปัญหาด้านสัมประสิทธิ์การขยายตัวและความไม่เสถียรภาพของวัสดุ ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีงานวิจัยเพื่อหาสารประกอบใหม่ๆ เพื่อใช้เป็นวัสดุแคลโทดโดยสารประกอบที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุแคลโทดต้องคำนึงถึงสมบัติดังต่อไปนี้

2.2.2.1 มีค่าการนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนสูง

2.2.2.2 ทนต่อสถานะออกซิไดส์ได้

2.2.2.3 มีเสถียรภาพที่ดีทั้งทางเคมีรูปร่างและขนาดไม่เปลี่ยนแปลงในสถานะอุณหภูมิและบรรยากาศขณะใช้งานรวมถึงการเผาหลังขึ้นรูปเช่นเดียวกับวัสดุแอโนด

2.2.2.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวและหดตัวเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจะต้องเหมาะสมเข้ากันได้กับส่วนประกอบอื่นของเซลล์เชื้อเพลิง

2.2.2.5 ความพรุนตัวต้องมีพอให้ออกซิเจนหรืออากาศที่เป็นสารออกซิแดนซ์ผ่านเข้าไปได้ถึงบริเวณที่ต่อกันระหว่างแคลโทดและอิเล็กโทรไลต์

## 2.2.3 แอโนด

เป็นส่วนที่แก๊สเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีขึ้นอิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกจากแอโนดไปยังแคลโทดโดยวิ่งผ่านวงจรภายนอกในช่วงเริ่มแรกของการศึกษาได้มีการนำโลหะแพลทตินัม (Pt) และโลหะนิกเกิล (Ni) มาใช้เป็นวัสดุแอโนดแต่ก็มักพบปัญหาที่ตามมาหลังจากมีการใช้งาน คือ โลหะแพลทตินัมจะเกิดการหลุร่อนส่วนที่อุณหภูมิสูงพบว่าจะเกิดการรวมตัวเป็นก้อนของโลหะนิกเกิลทำให้แก๊สเชื้อเพลิงผ่านเข้าไปในระบบได้น้อยลงจึงได้มีงานวิจัยเพื่อปรับปรุงวัสดุ

แอโนดขึ้นเป็นจำนวนมากโดยสารที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นวัสดุแอโนดควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

2.2.3.1 ทนสภาพรีดิวส์ได้

2.2.3.2 มีเสถียรภาพที่ดีทั้งทางเคมีรูปร่างและขนาดไม่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารที่ใช้ทำเป็นแอโนดในขณะที่ทำการเผาหลังจากขึ้นรูปแล้วหรือแม้แต่ในขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง

2.2.3.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวและการหดตัวเมื่อได้รับความร้อนต้องเข้ากันได้กับส่วนประกอบอื่นๆของเซลล์เชื้อเพลิง

2.2.3.4 มีการนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอน (Electron Conductivity)

2.2.3.5 มีความพรุนตัวที่เหมาะสมเพื่อยอมให้แก๊สเชื้อเพลิงผ่านเข้าไปถึงบริเวณรอยต่อของแอโนดและอิเล็กโทรไลต์เพื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้น

2.2.3.6 ต้องมีความเป็นคาตาลิติกที่ไวเพียงพอ

#### 2.2.4 วัสดุเชื่อมต่อระหว่างเซลล์

วัสดุเชื่อมต่อระหว่างเซลล์มีหน้าที่หลักคือเชื่อมระหว่างแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งกับแอโนดของอีกเซลล์เชื้อเพลิงถัดไปและเป็นตัวกั้นระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงกับสารออกซิแดนต์ของแต่ละเซลล์โดยวัสดุที่มีการศึกษาเพื่อทำเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเซลล์มีทั้งวัสดุทางเซรามิกและโลหะผสมดังนั้นสารที่เหมาะสมกับการนำมาทำเป็นตัวเชื่อมต่อต้องมีสมบัติดังนี้

2.2.4.1 มีการนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนเพื่อให้อิเล็กตรอนจากแอโนดวิ่งผ่านเข้าไปสู่แคโทดของอีกเซลล์หนึ่งได้

2.2.4.2 ทนได้ทั้งสภาวะรีดิวส์และออกซิไดส์

2.2.4.3 มีเสถียรภาพที่ดีทั้งทางด้านเคมีรูปร่างและขนาดไม่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารทั้งในขณะที่ทำการเผาหลังจากขึ้นรูปแล้วและในขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง

2.2.4.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวและหดตัวเมื่อได้รับความร้อนต้องเข้ากันได้กับส่วนประกอบอื่นของเซลล์เชื้อเพลิง

2.2.4.5 มีความหนาแน่นสูงเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรั่วผ่านตัวเชื่อมต่อ

2.2.4.6 มีความแข็งแรงเชิงกลสูงในระหว่างที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง

### 2.2.5 วัสดุเชื่อมปิดรอยต่อ

วัสดุเชื่อมปิดรอยต่อทำหน้าที่ปิดรอยต่อระหว่างเซลล์เพื่อป้องกันการรั่วซึมของแก๊สเชื้อเพลิงเข้าสู่เซลล์หรือออกจากเซลล์ซึ่งวัสดุเชื่อมปิดรอยต่อที่ใช้ในปัจจุบันได้แก่แก้วที่สามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นและกลาสเซรามิก (Glass-Ceramic) ดังนั้นสารที่เหมาะสมสำหรับทำเป็นวัสดุเชื่อมปิดรอยต่อควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

2.2.5.1 ปราศจากรูพรุนเพื่อป้องกันการรั่วซึมเข้าหากันของแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศ

2.2.5.2 เป็นฉนวนไฟฟ้าเพื่อป้องกันการลัดวงจร

2.2.5.3 มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเข้ากันได้กับส่วนประกอบอื่นๆภายในเซลล์

2.2.5.4 มีความเสถียรทางเคมีนั้นคือไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเซลล์

2.2.5.5 มีความเสถียรทางขนาดและรูปทรงในอุณหภูมิและสภาวะการทำงาน

2.2.5.6 สามารถทนต่อสภาวะรีดิวซ์และออกซิไดซ์ได้ดี

2.2.5.7 สามารถทนต่อการขึ้นลงของอุณหภูมิในระหว่างการทำงานได้หลายครั้ง

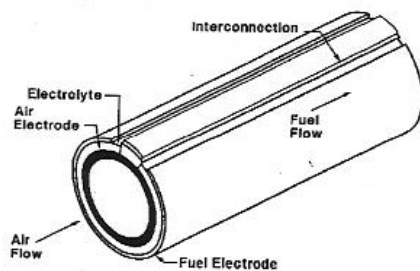
### 2.3 รูปแบบของ Stack Designs สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง

โดยปกติแล้วค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงเซลล์เดียวจะมีค่าน้อยกว่า 1 โวลต์ ดังนั้น ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงก็จำเป็นต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงเซลล์เดี่ยวมาต่อกันแบบอนุกรมเพื่อที่จะทำให้ได้ศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งจะเรียกการนำเซลล์มาต่ออนุกรมกันนี้ว่า สแตค (Stack) ในปัจจุบันการออกแบบรูปร่าง (Geometry) ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งมีได้หลายชนิดแต่ที่ได้รับความนิยมมี 2 ชนิดคือแบบท่อ (Tubular) และแบบแผ่น (Planar) ดังแสดงในภาพที่ 2-3 เนื่องจากความแตกต่างในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละรูปแบบนั้นจะก่อให้เกิดความแตกต่างในเส้นทางการไหลของกระแสและความต้องการ การออกแบบรูปร่างภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงแบบที่มีโครงสร้างรองรับ (Self-Supported) สามารถสร้างได้ 2 แบบ คือ แบบที่ใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นโครงสร้างรองรับ (Electrolyte-Supported) และใช้อิเล็กโทรดเป็นโครงสร้างรองรับ (Electrode-Supported) แบบแรกเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นโครงสร้างรองรับจะออกแบบให้ชั้นอิเล็กโทรไลต์มีความหนามากที่สุด (มากกว่า 150 ไมโครเมตร) ในขณะที่ขั้วอิเล็กโทรดมีความหนาไม่มาก ซึ่งชั้นอิเล็กโทรไลต์ที่หนาขึ้นก่อให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจาก

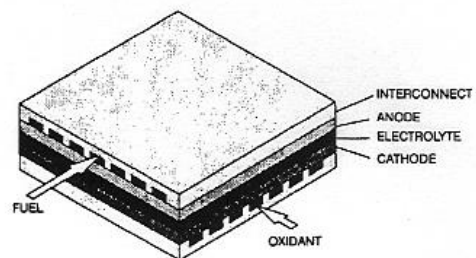


ความต้านทานไฟฟ้าตามไปด้วย เพื่อลดค่าความสูญเสียนี้ เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ไอเล็กโตรไลต์เป็นโครงสร้างรองรับจึงควรดำเนินงานภายใต้อุณหภูมิสูง ๆ ประมาณ 1000 องศาเซลเซียส ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ไอเล็กโตรไลต์เป็นโครงสร้างรองรับ ขั้วแอโนดหรือขั้วแคโทด จะมีความหนามากที่สุด (ประมาณ 2 มิลลิเมตร) ในขณะที่ชั้นไอเล็กโตรไลต์จะเป็นองค์ประกอบ ที่บางที่สุด ทำให้สามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าลงได้ โดยเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ไอเล็กโตรไลต์เป็นโครงสร้างรองรับจะเหมาะสำหรับการดำเนินงานในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Virkar et al., 2000) และเมื่อสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาสมรรถนะทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่ใช้ขั้วแอโนดเป็นตัวรองรับ (Aguiar et al., 2004) (Amornchai et al., 2009) (Amornchai et al., 2010) (Patcharavorachot et al., 2010) เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วแอโนดเป็นโครงสร้างรองรับจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากผลของการถ่ายโอนมวลต่ำกว่า ทำให้สามารถดำเนินงานเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะความหนาแน่นกระแส (Current Density) ได้สูงกว่า ส่งผลให้ได้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Power Density) ที่มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีโครงสร้างแบบอื่น ๆ ด้วย (Patcharavorachot et al., 2008) (Patcharavorachot et al., 2010) รูปแบบการเรียงต่อกันของเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์ที่นิยมมี 2 แบบคือ เซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์แบบแผ่น (Planar Stack)

#### • TUBULAR



#### • FLAT PLATE



ภาพที่ 2-3 Stack Designs ของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง (Badwal & Foger, 1996)

ส่วนประกอบทุกส่วนในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นแผ่นเรียบ มีอินเตอร์คอนเนคทำหน้าที่เป็นขั้วเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้คือ ประหยัดเนื้อที่และมีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าต่อปริมาตรสูง แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือ การป้องกันการรั่วของก๊าซระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองต้องใช้วัสดุกันรั่วที่เป็นฉนวน ทนอุณหภูมิสูงได้โดยไม่ทำปฏิกิริยาทั้งกับเชื้อเพลิง อากาศ และวัสดุอื่น ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนใกล้เคียงกับส่วนอื่น ๆ

ของเซลล์ และคงรูปได้ทั้งตอนลดและเพิ่มอุณหภูมิการทำงาน ปัญหาที่ยากที่สุดในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์แบบแผ่นนี้คือการสรรหาวัสดุกันรั่วที่มีคุณสมบัติครบถ้วนและราคาถูก เซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์แบบท่อ (Tubular Stack)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้เพื่อแก้ปัญหาของวัสดุกันรั่วของเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งออกไซด์แบบแผ่น รูปร่างของท่อเป็นท่อกวางโดยมีขั้วแคโทดอยู่ด้านในและขั้วแอโนดอยู่ด้านนอก และมีอิเล็กโทรไลต์กั้นอยู่ระหว่างขั้ว เชื้อเพลิงจะถูกส่งผ่านไปที่ท่อด้านนอกและก๊าซออกซิเจนส่งผ่านไปที่ท่อด้านใน เซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้มีประสิทธิภาพการทำงานที่คงที่เป็นระยะเวลานานกว่าแบบแผ่น แต่เซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้มีค่าใช้จ่ายสูงและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่และต่อปริมาตรต่ำกว่าแบบแผ่น

### 3. การพัฒนาวัสดุของเซลล์เชื้อเพลิงของแข็ง

#### 3.1 การพัฒนาวัสดุอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง

##### 3.1.1 วัสดุอิเล็กโทรไลต์ชนิด $ZrO_2$ - based

$ZrO_2$  ถือเป็นวัสดุทางเซรามิกชนิดหนึ่งที่มีความเหนียวในตัวเมื่อเทียบกับวัสดุทางเซรามิกประเภทอื่นที่มีความแข็งแต่เปราะ โดยความเหนียวของ  $ZrO_2$  มาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อได้รับความร้อนโดยเกิดการเปลี่ยนเฟสจากโมโนคลินิก (Monoclinic) ไปเป็นเฟสแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ที่อุณหภูมิ  $1170^\circ C$  จะมีการหดตัวของปริมาตรสูงประมาณ 3–5% และจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นคิวบิกที่อุณหภูมิประมาณ  $2370^\circ C$  ซึ่งโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการนำไฟฟ้าแบบออกไซด์ไอออนคือโครงสร้างแบบคิวบิก ดังนั้นการที่จะทำให้โครงสร้างคิวบิกมีความเสถียรที่อุณหภูมิห้องนั้นจะสามารถทำได้โดยการแทนที่สารเจือบางส่วนใน Zr

สารเจือที่ใช้ในการแทนที่ลงใน Zr ได้แก่ธาตุอัลคาไลน์เอิร์ท (Alkaline Earth Element) เช่นธาตุ Ca Mg และ Sr หรือธาตุแรร์เอิร์ท (Rare-Earth Element) เช่น Sc และ Y เป็นต้นนอกจากนี้การเติมสารเจือด้วยไอออนบวกที่มีประจุ + 2 และ + 3 แทนที่ในตำแหน่งของ  $Zr^{4+}$  จะช่วยทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจน (Oxygen Vacancy) ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารประกอบสูงขึ้นด้วย

ดังนั้น สารที่นิยมใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ในปัจจุบันคือ  $ZrO_2$  ที่โด๊ป  $Y_2O_3$  เรียกว่า YSZ และเมื่อทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $1000^\circ C$  พบว่าวัสดุ YSZ มีค่าการนำไฟฟ้า

สูงสุดเมื่อเติมสารเจือ  $Y_2O_3$  ในปริมาณ 8 โมลเปอร์เซ็นต์และเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมสารเจือมากขึ้นจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงถึงแม้ว่าวัสดุ SCSZ (Scandia Stabilized Zirconia) จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าส่วนผสมอื่น (Nomura, Mizutani, Kawai, Nakamura, & Yamamoto, 2000) แต่นักวิจัยพัฒนาส่วนใหญ่ยังไม่ให้ความสนใจกับ SCSZ มากนักซึ่งเป็นเพราะสารเจือชนิด SC มีราคาสูงหาได้ยากและเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นเตตระโกนอลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าต่ำลงมากกว่า YSZ16

### 3.1.2 วัสดุอิเล็กโทรไลต์ชนิด $CeO_2$ - based

สาร  $CeO_2$  เป็นวัสดุที่มีผู้ศึกษาวิจัยเพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งที่อุณหภูมิต่ำลงมาแต่เนื่องจาก Pure  $CeO_2$  จะมีการเปลี่ยนแปลงของ Oxygen Stoichiometry ที่ขึ้นกับอุณหภูมิและบรรยากาศของออกซิเจนจึงอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุแคทไอออนนั่นคือเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $Ce^{4+}$  ไปเป็น  $Ce^{3+}$  ได้อย่างง่ายดายภายใต้บรรยากาศแบบบริดจ์จึงทำให้วัสดุชนิดนี้แสดงค่าการนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าแบบไอออนลดลง โดยทั่วไปจึงไม่นิยมนำสาร Pure  $CeO_2$  มาใช้เป็นวัสดุอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งเนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าแบบไอออนของ Pure  $CeO_2$  จะมีค่าต่ำเช่นเดียวกับอิเล็กโทรไลต์ชนิด  $ZrO_2$  ดังนั้น เพื่อปรับปรุงความเสถียรและค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ  $CeO_2$  ให้ดีขึ้นจึงต้องทำการแทนที่ตำแหน่งแคทไอออนของ  $CeO_2$  ด้วยประจุบวกของธาตุอัลคาไลน์เอิร์ทหรือธาตุแรร์เอิร์ทซึ่งจะสามารถทำให้โครงสร้างแบบฟลูออไรท์ควิบิกมีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำและที่สำคัญการเติมสารเจือจะช่วยเพิ่มช่องว่างของออกซิเจนส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าดีขึ้น สำหรับสารประกอบออกไซด์ที่นิยมศึกษาเพื่อนำมาใช้เป็นสารเจือใน  $CeO_2$  ได้แก่สารประกอบออกไซด์จำพวกแลนทานัม ( $La_2O_3$ ) สมารียม ( $Sm_2O_3$ ) ยิทเทรียม ( $Y_2O_3$ ) และกาโดลิเนียม ( $Gd_2O_3$ ) ซึ่งสารเจือดังกล่าวจะมีประจุบวก 3 ส่วนสารประกอบออกไซด์ของแคทไอออนที่มีประจุบวก 2 และนิยมศึกษานำมาเป็นสารเจือใน  $CeO_2$  ได้แก่ แคลเซียม (CaO) และสตรอนเทียม (SrO) เป็นต้นทั้งนี้การเติมสารเจือลงไปใน  $CeO_2$  จะช่วยปรับปรุงค่าการนำไฟฟ้าให้สูงกว่าวัสดุ  $ZrO_2$  Based โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำแต่ปัญหาที่มักพบสำหรับการเลือกใช้  $CeO_2$  เป็นวัสดุอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งก็คือเมื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุที่อุณหภูมิสูงมากกว่า  $600^\circ C$  จะมีค่าการนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงจากเดิม (Dalslet et al., 2006) แต่การนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $600^\circ C$  วัสดุอิเล็กโทรไลต์ชนิดนี้จึงเหมาะกับการใช้งานสำหรับรถยนต์เพราะจะให้ประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่าการใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเชื้อเพลิงเปลี่ยนโปรตอน

### 3.1.3 วัสดุอิเล็กโทรไลต์ชนิด $\text{LaGaO}_3$ – based

สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite,  $\text{ABO}_3$ ) ได้เริ่มมีการศึกษาเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งเนื่องจากสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $850^\circ\text{C}$  โดยสารประกอบที่มีผู้ให้ความสนใจกันอย่างแพร่หลายตัวหนึ่งก็คือแลนทานัมแกลเลท (Lanthanum Gallate,  $\text{LaGaO}_3$ )

สารประกอบ  $\text{LaGaO}_3$  จะแสดงโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิกที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $145^\circ\text{C}$  และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $145^\circ\text{C}$  จะมีโครงสร้างแบบบอโรไมโครและเพื่อปรับปรุงค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ  $\text{LaGaO}_3$  ให้ดีขึ้นจึงได้มีการเติมสารเจือลงในตำแหน่ง  $A$  หรือ  $B$  ของโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์  $\text{ABO}_3$  ซึ่งประโยชน์ของการเติมสารเจือคือจะช่วยให้เกิดช่องว่างของออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น (Oxygen Vacancy) ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุเพิ่มขึ้นด้วยทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของแกทไอออนที่เป็นสารเจือด้วย

โดยตัวอย่างของสารเจือที่เติมลงในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์คือ  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ga}_{1-y}\text{Mg}_y\text{O}_3$  (LSMG) และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าแบบออกไซด์ไอออนของสาร LSMG กับวัสดุอิเล็กโทรไลต์ชนิดอื่นพบว่าวัสดุ LSMG จะมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าสารอิเล็กโทรไลต์ชนิดอื่นเมื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิ  $650 - 1000^\circ\text{C}$  ถึงแม้ว่าสารประกอบ LSMG จะมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีก็ตามแต่ก็มักพบข้อเสียคือเมื่ออยู่ในสภาวะบรรยากาศแบบบริควิสต์จะเกิดการรีดิวซ์ของ Ga ซึ่งทำให้เกิดการนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนและเมื่อประกอบเข้าภายในยูนิตเซลล์จะเกิดปฏิกิริยากับส่วนประกอบอื่นภายในเซลล์จึงอาจทำให้เกิดความเสียหายของเซลล์และลดอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงให้ลดลง

### 3.1.4 วัสดุอิเล็กโทรไลต์แบบเรียมซีเรียมออกไซด์ (Barium Cerium Oxide,

$\text{BaCeO}_3$ )

แบบเรียมซีเรียมออกไซด์ ( $\text{BaCeO}_3$ ) เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์และถูกนำมาใช้เป็นวัสดุอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งเนื่องจากการนำไฟฟ้าด้วยโปรตอน (Proton Conductor) ซึ่งแตกต่างจากวัสดุอิเล็กโทรไลต์ชนิดอื่นที่มีการนำไฟฟ้าด้วยไอออนของออกซิเจน (Oxygen Ion Conductor) แต่เนื่องจาก  $\text{BaCeO}_3$  จะต้องใช้ อุณหภูมิในการเผาผลาญที่สูงและค่าการนำไฟฟ้าที่ไม่ค่อยดีนักจึงได้มีงานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมสารเจือเข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าและลดอุณหภูมิการเผาผลาญของวัสดุซึ่งจะทำให้สารมีสมบัติที่ดีเหมาะกับการนำไปใช้งานต่อไป

### 3.2 การพัฒนาวัสดุแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง

เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบดั้งเดิมจะทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1000 องศาเซลเซียส ดังนั้นวัสดุที่นำมาทำขั้วแคโทด จึงต้องเป็นวัสดุที่สามารถทำงานได้ดีในสภาวะออกซิไดซ์ และมีความเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสารที่มีสมบัติเหมาะกับการนำมาใช้เป็นวัสดุแคโทดในยุคแรก คือ โลหะแพลทินัม (Platinum, Pt) ถึงแม้ว่าโลหะแพลทินัมจะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงในช่วงอุณหภูมิการใช้งาน แต่ก็ไม่เหมาะกับการนำมาใช้งานทางการค้า เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาแพง ดังนั้นจึงได้เกิดการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ขึ้นมาแทนที่โลหะแพลทินัม นั่นคือสารประกอบออกไซด์

ปัจจุบัน อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์ชนิดนี้คือเซรามิกของแข็งที่มีรูพรุน เช่น  $Y_2O_3$  stabilized  $ZrO_2$  ซึ่งมีสภาพนำ  $O^{2-}$  สูง ขั้วแอโนด ได้แก่  $CO-ZrO_2$  หรือ  $Ni-ZrO_2$  ขั้วแคโทดคือ  $Sr$ -doped  $LaMnO_3$

#### 3.2.1 วัสดุแคโทดที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์

วัสดุแคโทดแบบดั้งเดิม คือ สารประกอบออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite Structure) ซึ่งมีสูตรเคมีทั่วไปคือ  $ABO_3$  โดยอะตอมของธาตุ A อยู่ที่ตำแหน่งมุม (Corner) ทั้งแปดมุมของลูกบาศก์ส่วนอะตอมของธาตุ B อยู่ที่กึ่งกลางของลูกบาศก์ (Body Center) และอะตอมของธาตุ O อยู่ที่กึ่งกลางหน้าของลูกบาศก์ (Face Center) ทั้งหมด

วัสดุแคโทดที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ วัสดุแคโทดแบบดั้งเดิม คือ สารประกอบออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite Structure) ซึ่งมีสูตรเคมีทั่วไปคือ  $ABO_3$  โดยอะตอมของธาตุ A อยู่ตำแหน่งมุม (Corner) ทั้งแปดมุมของลูกบาศก์ส่วนอะตอมของธาตุ B อยู่ที่กึ่งกลางของลูกบาศก์ (Body Center) และอะตอมของธาตุ O อยู่ที่กึ่งกลางหน้าของลูกบาศก์ (Face Center) ทั้งหมด การจัดเรียงอะตอมของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ สารประกอบ LSM เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด  $p$ -type นั่นคือการนำไฟฟ้าที่เกิดจากเคลื่อนที่ของโฮล (Hole Hopping) ระหว่าง  $Mn^{2+}$  กับ  $Mn^{3+}$  โดยค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity,  $\sigma$ ) ของสารประกอบ LSM จะขึ้นอยู่กับปริมาณของ Sr ที่เติมเข้าไปและอุณหภูมิการใช้งาน กล่าวคือ การนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Sr และอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งมีงานวิจัยกล่าวไว้ดังต่อไปนี้

3.2.1.1 เติม Sr ปริมาณ 20 โมลเปอร์เซ็นต์ได้ค่าการนำไฟฟ้าประมาณ  $100-200 S/cm$  (Basu, 2007)

3.2.1.2 เติม Sr ปริมาณ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ได้ค่าการนำไฟฟ้าประมาณ  $250 S/cm$  (Kawada & Mizusaki, 2003)

3.2.1.3 เติม Sr ปริมาณ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ได้ค่าการนำไฟฟ้าประมาณ  $294 S/cm$  (Basu, 2007)

อย่างไรก็ตามการใช้งานจริงของวัสดุแคโทด จำเป็นต้องขึ้นรูปให้มีรูพรุนเพื่อให้สามารถป้อนแก๊สออกซิเจนเข้าสู่ออกซิเจนได้สะดวก ดังนั้นจึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงด้วยอีกทั้งการเติมสารเจือ Sr ในปริมาณที่มากขึ้น มีผลทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion Coefficient, *TEC*) มีค่ามากขึ้นด้วย (Li, 2006) (Malkow, 2008) ซึ่งผลเสียที่ตามมาคือเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงวัสดุแคโทดมีการขยายตัวที่ไม่เข้ากับส่วนประกอบอื่นในเซลล์ อาจทำให้เซลล์แตกหักเสียหายได้อีกทั้งการใช้งาน LSM ที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดปฏิกิริยากับ YSZ เกิดเป็นสารประกอบซึ่งเป็นฉนวนทางไฟฟ้า เช่น  $La_2Zr_2O_7$  และ  $SrZrO_3$  ขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่าง LSM และ YSZ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงอีกทั้งยังทำให้เกิดความเค้นทาง ความร้อน (Thermal Stress) ขึ้นระหว่างรอยต่อของ LSM และ YSZ ทำให้เซลล์เกิดการแยกตัวออกจากกัน (Basu, 2007) (Kawada & Mizusaki, 2003) ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาสารประกอบชนิดใหม่ ที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูง และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิปานกลาง (Intermediate Temperature) และวัสดุที่ได้รับความสนใจคือวัสดุ  $La_{n+1}NiO_{3n+1}$  ซึ่งมีโครงสร้างแบบ Ruddlesden-Popper (*RP structure*)

### 3.2.2 วัสดุแคโทดที่มีโครงสร้างแบบ Ruddlesden-Popper

วัสดุแคโทดสมัยใหม่ที่มีโครงสร้างแบบ Ruddlesden-Popper (*RP*) ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1958 โดย Ruddlesden และ Popper ซึ่งวัสดุ *RP* จะมีสูตรเคมีทั่วไปคือ  $A_{n+1}B_nO_{3n+1}$  ( $n=1,2,3$  และ  $\infty$ ) ซึ่ง *A* เป็นไอออนบวกที่อยู่ในตำแหน่งที่มีอะตอมของออกซิเจนล้อมรอบอยู่ 12 อะตอม โดยมักจะเป็นไอออนของธาตุแอลคาไลน์เอิร์ท (Alkaline Earth) หรือเรร์เอิร์ท (Rare Earth) ส่วน *B* เป็นไอออนบวกที่อยู่ในตำแหน่งที่มีอะตอมของออกซิเจนล้อมรอบอยู่ 6 อะตอม ซึ่งมักจะเป็นโลหะทรานซิชัน (Transition Metal) โครงสร้างแบบ *RP* จะประกอบไปด้วย *n* ชั้นของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ ( $ABO_3$ ) สลับกับโครงสร้างแบบ Rock salt (*AO*) จำนวน 1 ชั้นสลับกันไป เช่นนี้ตามแนวแกน *C* (*C-axis*) (Greenblatt, 1997) ส่วนในระนาบ *ab* จะเชื่อมกันด้วยโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์หรือแบบ Rock Salt ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบเดียวกันในชั้นนั้นๆ เนื่องจากโครงสร้าง Ruddlesden-Popper เป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนโดยมีการเรียงตัวของ 2 โครงสร้าง นั่นคือโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ และ โครงสร้าง Rock salt ดังนั้นจึงสามารถเขียนสูตรเคมีได้อีกแบบหนึ่งคือ  $AO(ABO_3)_n$  ซึ่ง *n* คือจำนวนชั้นของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์และสามารถเขียนสูตรได้ดังต่อไปนี้  $n=1$  มีสูตรทั่วไปคือ  $A_2BO_4$  เป็นโครงสร้าง *RP* ที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ 1 ชั้น สลับกับโครงสร้าง Rock salt 1 ชั้น เรียง

ตัวตามแนวแกน  $C$  ซึ่งวัสดุ  $\text{La}_2\text{NiO}_{4+\delta}$  ที่สังเคราะห์ในบรรยากาศปกติมักพบว่าเกิดออกซิเจนเกินเข้ามาในโครงสร้าง (Oxygen Excess,  $\delta$ ) ซึ่งจะมีค่า  $\delta$  ประมาณ 0.15 โดยที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุ  $\text{La}_2\text{NiO}_{4+\delta}$  จะมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด  $p$ -type เนื่องจากการ Hopping ของ  $\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}^{3+}$  (Kharton et al., 2004) แต่ที่อุณหภูมิสูงค่าการนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนจากสารกึ่งตัวนำไปเป็นแบบโลหะเนื่องจากโครงสร้างเกิดการสูญเสียออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง  $n=2$  มีสูตรทั่วไปคือ  $\text{A}_3\text{B}_2\text{O}_7$  เป็นโครงสร้าง  $RP$  ที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ 2 ชั้น สลับกับโครงสร้าง Rock salt 1 ชั้น เรียงตัวตามแนวแกน  $C$  วัสดุ  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7\delta$  ที่สังเคราะห์ในบรรยากาศปกติมักพบว่า มีออกซิเจนขาดหายไปจากโครงสร้าง (Oxygen Deficient,  $\delta$ ) โดยมักจะเกิดการขาดหายไปของออกซิเจนที่ตำแหน่งของจุดเชื่อมระหว่าง 16 ชั้นของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์สองชั้นที่อยู่ติดกัน (Apical Oxygen) (Poltavets et al., 2006)  $n=3$  มีสูตรทั่วไปคือ  $\text{A}_4\text{B}_3\text{O}_{10}$  เป็นโครงสร้าง  $RP$  ที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ 3 ชั้น สลับกับโครงสร้าง Rock salt 1 ชั้น เรียงตัวตามแนวแกน  $C$  สารประกอบ  $n=3$   $RP$  เป็นสารที่สังเคราะห์และทำให้เกิดวัฏภาคเดี่ยวยาก  $n=4$  มีสูตรทั่วไปคือ  $\text{A}_5\text{B}_4\text{O}_{13}$  เป็นโครงสร้าง  $RP$  ที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ 4 ชั้น สลับกับโครงสร้าง Rock salt 1 ชั้น เรียงตัวตามแนวแกน  $C$  นอกจากนี้ สารประกอบ  $n=4$   $RP$  ยังเป็นสารที่สังเคราะห์ให้ได้วัฏภาคเดี่ยวยาก เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียรแต่อาจพบในลักษณะที่เป็นสารเจือปนในสารประกอบ  $RP$  ที่มีค่า  $n < 4$  มีสูตรทั่วไปคือ  $\text{ABO}_3$  หรือ สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์  $\text{LaNiO}_3$   $\text{La}_2\text{NiO}_4$   $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$   $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$   $\text{LaNiO}_3$   $n=\infty$   $n=3$   $n=2$   $n=1$  17

#### 4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### 4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

เมื่อพิจารณาสมการการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพบว่ามีการนำเสนอสมการที่ใช้อธิบายศักย์ไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทั้ง 3 ชนิด (ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากผลของการถ่ายโอนมวล) ค่อนข้างหลากหลาย สำหรับค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ 3 รูปแบบ ได้แก่ สมการไม่เชิงเส้นของบัทเลอร์-วอลเมอร์ (Butler-Volmer) สมการทาเฟล (Tafel Equation) และสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง (Semicorrelation) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการอธิบายค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ได้จากสมการทั้ง 3 รูปแบบแล้วพบว่า สมการไม่

เชิงเส้นของบูธเลอร์-วอลเมอร์ให้ความถูกต้องมากที่สุด (Hernandez-Pacheco et al., 2004) ในส่วน  
 ของค่าความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน (Exchange Current Density) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ  
 ในการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีนั้น งานวิจัยส่วนหนึ่งได้กำหนดให้เป็น  
 เป็นค่าคงที่ (Chan et al., 2001) (Li & Chyu, 2003) (Burt et al., 2004) ในขณะที่บางงานวิจัยได้  
 นำเสนอว่าค่าความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนเป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ค่าพลังงานกระตุ้น  
 และค่าความดันย่อยของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ (Costamagna et al., 2004)  
 (Hernandez-Pacheco et al., 2004) (Qi et al., 2005) นอกจากนี้ค่าความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า  
 แลกเปลี่ยนยังสามารถได้มาจากความสัมพันธ์แบบกึ่งการทดลองซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิและค่า  
 พลังงานกระตุ้นของขั้วอิเล็กโทด (Aguiar et al., 2004) สำหรับค่าความต้านทานไฟฟ้า  
 (Ohmic resistance) ซึ่งอธิบายค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้านั้น ในบาง  
 งานวิจัยได้มีการกำหนดไว้เป็นค่าคงที่ (Nagata et al., 2001) (Haynes, 2002) (Burt et al., 2004)  
 อย่างไรก็ตามเนื่องจาก ค่าความต้านทานไฟฟ้านี้มีความสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิเป็นอย่างมาก ดังนั้น  
 งานวิจัยส่วนใหญ่ได้พิจารณาว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิเป็นสำคัญ  
 (Ferguson et al., 1996) (Aguiar et al., 2004) (Ni et al., 2007) โดย Aguiar et al. (2004)  
 และ Ni et al. (2007) นำเสนอว่า ค่าความต้านทานของอิเล็กโทโรไลต์เท่านั้นที่ขึ้นกับอุณหภูมิ  
 ในขณะที่ Ferguson et al. (1996) ได้นำเสนอว่าค่าความต้านทานของอิเล็กโทโรดและอิเล็กโทโรไลต์  
 มีค่าขึ้นกับอุณหภูมิต่างกันค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากผลของการถ่ายโอนมวลที่เกิดจากผลการแพร่  
 ของก๊าซภายในรูพรุนของแอโนดและแคโทดสามารถอธิบายได้ทั้งสมการการถ่ายโอนมวลภายในรู  
 พรุน (Aguiar et al., 2004) (Qi et al., 2005) หรือโดยการกำหนดความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าจำกัด  
 (Burt et al., 2004) ก็ได้โดยปกติแล้วการถ่ายโอนมวลตลอดอิเล็กโทโรดที่มีรูพรุนสามารถอธิบาย  
 โดยแบบจำลองของฟิค (Fick's Model) แบบจำลองคัสตี้แก๊ส (Dusty Gas Model) หรือแบบจำลอง  
 สเตฟาน-แมกซ์เวล (Stefan Maxwell Model) เมื่อพิจารณาแบบจำลองทั้ง 3 สมการพบว่าไม่นิยมใช้  
 แบบจำลองสเตฟาน-แมกซ์เวลเพราะไม่รวมผลการแพร่ของก๊าซด้วยกลไก Knudsen  
 (Knudsen diffusion) เข้าไปในสมการ ถ้าก๊าซแพร่ผ่านรูพรุนด้วยกลไก Knudsen เป็นสำคัญ  
 การทำนายการแพร่ของก๊าซผ่านรูพรุนด้วยแบบจำลองคัสตี้แก๊สจะมีความถูกต้องมากกว่า  
 แบบจำลองของฟิค Suwanwarangkul et al. (2003) ได้รายงานเอาไว้ว่าแบบจำลองคัสตี้แก๊สเป็น  
 แบบจำลองที่เหมาะสมกับระบบก๊าซ  $H_2 - H_2O$  และ  $CO - CO_2$  มากที่สุดและแนะนำให้ใช้ใน  
 ระบบหลายองค์ประกอบอย่าง  $H_2 - H_2O - CO - CO_2$  ด้วย โดย Suwanwarangkul et al. ได้  
 ยืนยันว่าแบบจำลองคัสตี้แก๊สนี้จะมีความถูกต้องมากขึ้นเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงดำเนินงานภายใต้สภาวะ  
 ความเข้มข้นสูง ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ และรูพรุนของขั้วอิเล็กโทดมีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม



ก็ตามแม้ว่าแบบจำลองคัสตี้แก๊สจะสามารถทำนายการแพร่ของก๊าซภายในรูพรุนได้ถูกต้องมากกว่าแบบจำลองของฟิคก็ตาม แต่แบบจำลองของฟิคก็นิยมถูกนำมาใช้มากกว่าและนำมาใช้ได้ง่ายกว่าแบบจำลองคัสตี้แก๊ส เพราะสมการในการวิเคราะห์เป็นแบบชัดเจน (Explicit Expression) จึงสามารถอธิบายการแพร่ของก๊าซได้ง่ายกว่า ในการสร้างแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการถ่ายโอนของก๊าซภายในอิเล็กโทรดที่มีรูพรุนโดยใช้แบบจำลองของฟิค (Chan et al., 2001) (Aguilar et al., 2004) (Ni et al., 2007)

#### 4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

ศิริวรรณ โชคคำ (2554) ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุอิเล็กโทรไลต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง  $BaCO_3$  เมื่อเติมสารเจือลงในตำแหน่ง *A-Site* และ *B-Site* ของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์โดยการสังเคราะห์สารแบบ Citrate Gel และ Solid State Reaction ในด้านของการสังเคราะห์สารจะเห็นว่าวิธีการที่แตกต่างกันจะส่งผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์ การสังเคราะห์ด้วยวิธีแบบ Citrate Gel จะใช้อุณหภูมิต่ำกว่าแบบ Solid State Reaction ส่วนด้านโครงสร้างจุลภาคของ  $BaCO_3$  พบว่า ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Citrate Gel จะมีความพรุนตัวสูง โดยมีความหนาแน่นประมาณ  $4.93-5.03 \text{ g/cm}^3$  และมีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ  $4-5 \mu\text{m}$  แต่เมื่อเติมสาร Sr Ca และการเจือสารระหว่าง Sr กับ Y จะทำให้ความพรุนตัวลดลง ความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ที่สังเคราะห์ด้วย Solid State Reaction ซึ่งงานมีความพรุนและความหนาแน่นประมาณ  $4.76-4.98 \text{ g/cm}^3$  เมื่อเจือสารจะทำให้ความพรุนตัวลดลงความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

Xie et al. (2009) ได้ศึกษาความเสถียรภาพของสาร  $BaCe_{0.8-x}Nb_xSm_{0.2}O_3$  ที่ใช้ทำเป็นอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งโดยที่ ( $x = 0, 0.05, 0.1$ ) สังเคราะห์ด้วยวิธีดั้งเดิมแบบ Solid State Reaction และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ  $1300^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในบรรยากาศปกติจากนั้นทำการศึกษาวงจรของสารประกอบด้วยเทคนิค XRD ที่อุณหภูมิห้องพบว่าผงตัวอย่างทั้งสามมี Peak เกิดขึ้นที่ 2 Theta และ Intensity ที่เหมือนกันซึ่งตรงตามสารประกอบพื้นฐาน  $BaCeO_3$  ดังนั้น ผงตัวอย่างทั้งสามจึงแสดงความเป็นวัฏภาคเดียว หลังจากนั้นนำไปทดสอบเกี่ยวกับความเสถียรภาพโดยใช้ XRD DTA ในการวิเคราะห์พบว่าผงตัวอย่าง ที่มีการเติม Nb ( $x = 0.1$ ) จะมีเสถียรภาพในบรรยากาศ  $CO_2$  และ น้ำได้ดีกว่าผงตัวอย่างตัวอื่น ๆ เพราะเมื่อนำผงตัวอย่างที่ผ่านการทดลองความเสถียรภาพมาวิเคราะห์ด้วย XRD ยังคงพบวัฏภาคแบบ Single Phase หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุโดยทดสอบในช่วงอุณหภูมิ  $500-800^\circ\text{C}$  ในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยไฮโดรเจนพบว่าชิ้นงาน  $BaCe_{0.7}Nb_{0.1}Sm_{0.2}O_3$  จะแสดงค่าการนำไฟฟ้าที่สูงประมาณ  $2.6 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$  ที่อุณหภูมิ

700 °C จึงอาจสรุปได้ว่าชิ้นงาน  $BaCe_{0.7}Nb_{0.1}Sm_{0.2}O_3$  ไม่เพียงแต่มีความเสถียรที่ดีแล้ว ค่าการนำไฟฟ้าก็ดีเช่นกัน

Liou and Yang (2008) ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางด้านความหนาแน่น และ ค่าการนำไฟฟ้า ของ สารประกอบ  $Sr_{0.995}Ce_{0.95}Y_{0.05}O_{3-\delta}$  และ  $BaCe_{0.9}Nd_{0.1}O_{3-\delta}$  ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธี Solid State Reaction เพื่อใช้เป็นวัสดุอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งพบว่าสารประกอบ  $Sr_{0.995}Ce_{0.95}Y_{0.05}O_{3-\delta}$  ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจะให้ค่าความหนาแน่นที่สูงถึง 98.4% และนอกจากนี้เมื่อทำการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1500 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและนำมาวัดค่าการนำไฟฟ้าพบว่ามีความหนาแน่นประมาณ  $1.42 \times 10^{-3} S/cm$  ที่อุณหภูมิ 900 °C ส่วนสารประกอบ  $BaCe_{0.9}Nd_{0.1}O_3$  ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงเมื่อทำวัดค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 900 °C จะให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงประมาณ  $11.54 \times 10^{-3} S/cm$  แต่ความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับชิ้นงาน  $Sr_{0.995}Ce_{0.95}Y_{0.05}O_{3-\delta}$  และเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความหนาแน่นของชิ้นงาน  $BaCe_{0.9}Nd_{0.1}O_3$  จะต้องใช้อุณหภูมิในการเผาชิ้นงานที่สูงถึง 1500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นให้มีค่าสูงเท่ากับ 91.7%

ศศิธร งามแพรวพราว และคณะ (2557) ได้ศึกษา ผลของความหนาแน่นชั้นแอโนดและแคโทดต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ผลปรากฏว่าถ้าเพิ่มความหนาแน่นแอโนดเป็น 300  $\mu m$  เซลล์เชื้อเพลิงจะให้พลังงานสูงสุดเป็น 1944.29  $A/m^2$  แต่เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของชั้น แอโนดขึ้น กลับทำให้ประสิทธิภาพลดลง แต่ในชั้น แคโทดนั้น ที่ความหนาแน่น 30  $\mu m$  จะให้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดเป็น 1489.70  $A/m^2$  และพอเพิ่มความหนาแน่น ประสิทธิภาพก็จะเพิ่มขึ้น นั่นคือถ้าจะเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ควรจะเพิ่มเพิ่มความหนาแน่นชั้นแคโทด

Patcharavorachot et al. (2010) นำเสนอแบบจำลองทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งแบบที่นำโปรตอนอย่างละเอียดซึ่งพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมด ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากความต้านทานไฟฟ้า จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร แบบจำลองของฟิสิกส์ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายการแพร่ของก๊าซในอิเล็กโทรดที่มีรูพรุน นอกจากนี้ยังได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลจากผลการทดลองที่รายงานในงานวิจัยที่ผ่านมา โดยแบบจำลองดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งแบบระนาบที่อิเล็กโทรไลต์มีความสามารถในการนำโปรตอน ซึ่งพิจารณาผลของการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิง (เช่น การใช้โครงสร้างสนับสนุนเป็นชั้นแอโนดชั้นแคโทด และอิเล็กโทรไลต์) รูปร่าง

(เช่น ความหนาขององค์ประกอบของเซลล์) และพารามิเตอร์เกี่ยวกับการดำเนินงาน (เช่น อุณหภูมิ ความดัน และองค์ประกอบของก๊าซ) ที่มีต่อลักษณะทางไฟฟ้าของเชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่อิเล็กโทรไลต์มีความสามารถในการนำโปรตอนถูกตรวจสอบ ผลจากการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบที่นำโปรตอนซึ่งใช้ขั้วแอโนดเป็นโครงสร้างสนับสนุนแสดงสมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุดภายใต้อุณหภูมิในการดำเนินงาน 1073 เคลวินและความดันบรรยากาศ โดยความสูญเสียจากความต้านทานไฟฟ้าเป็นศักย์ไฟฟ้าสูญเสียหลักในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดชนิดนี้ เนื่องจากค่าการนำโปรตอนของอิเล็กโทรไลต์มีค่าค่อนข้างต่ำ

Corbel and Lacorre (2006) ได้ศึกษาการใช้งานวัสดุแคโทดชนิด  $\text{La}_2\text{NiO}_{4+\delta}$  ร่วมกับวัสดุอิเล็กโทรไลต์  $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$  โดยการเตรียมสารประกอบ  $\text{La}_2\text{NiO}_{4+\delta}$  ด้วยวิธี Nitrate Method โดยเอาสารตั้งต้นชนิดออกไซด์มาละลายด้วยกรดไนตริกแล้วให้ความร้อนจนตัวทำละลายระเหยหมดไป แล้วเกิดการเผาไหม้จากนั้นนำไปเผาแคลไซน์และเมื่อนำผง  $\text{La}_2\text{NiO}_{4+\delta}$  และ  $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$  มาผสมกันแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า สารประกอบทั้งสองจะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่คือ  $\text{La}_2\text{MoO}_6$  และ  $\text{NiO}$  ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ดังนั้น อาจสรุปได้ว่าวัสดุแคโทดชนิด  $\text{La}_2\text{NiO}_{4+\delta}$  ไม่เหมาะกับการใช้งานร่วมกับวัสดุอิเล็กโทรไลต์ชนิด  $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$

Jamsak et al. (2007) ศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเมื่อใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิง โดยพิจารณาผลของชนิดอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ (อิเล็กโทรไลต์ที่นำไอออนและนำโปรตอน) จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Jamsak et al., 2006) พบว่าสมรรถนะทางทฤษฎีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอนให้สมรรถนะที่ดีกว่าการใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออนแต่เพื่อทำการวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่แท้จริงในงานวิจัยนี้พวกเขาจึงศึกษาถึงผลของความสูญเสียเนื่องจากการต้านทานไฟฟ้าความสูญเสียเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและความสูญเสียอื่นๆ ที่มีต่อเซลล์เชื้อเพลิงด้วยการศึกษาพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำออกซิเจนไอออน ( $\text{Ni-YSZ|YSZ|YSZ-LSM}$ ) กลับให้สมรรถนะที่แท้จริงดีกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการนำโปรตอน ( $\text{Pt|SCY|Pt}$ ) โดยค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ 16

Monder, Nandakumar, and Chuang (2006) ได้เสนอรูปแบบทำนaylorการทำงานของ SOFC แบบ Button Cell  $\text{H}_2\text{S}$  เซลล์เดี่ยว ที่ใช้ศึกษาในการทดลองโดยใช้โลหะซัลไฟด์เป็นตัวคะตะไลต์ที่ขั้วแอโนดใน  $\text{H}_2\text{S-AirSOFC}$  เป็นเซลล์แบบแผ่นที่ประกอบด้วยตัวอิเล็กโทรด

แบบ Disc เชื้อเพลิงและอากาศจะไหลทะลุมายังท่อกระบอกเป้าหมายคือการศึกษาปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าร่วมกับการถ่ายเทมวลการไหลของของไหล และการกระจายของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในตัวอิเล็กโทรไลต์ Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) ขณะทำงานช่วง  $750 - 850^{\circ}\text{C}$  ซึ่งใช้คำนวณค่าความเข้มข้นและการสูญเสียความต้านทาน รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ ถูกคำนวณพบว่าสามารถช่วยในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิง  $\text{H}_2\text{S}$  ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในอนาคตทั้งสี่-รูปแบบที่ได้เพิ่มเติมความซับซ้อนขึ้นมาได้ถูกเสนอและเปรียบเทียบสำหรับ *SOFC* ที่ใช้  $\text{H}_2\text{S}$  เป็นเชื้อเพลิง สมการกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เชิงเส้น (Non - Linear Least Squares) ได้ถูกนำมาใช้หาค่าตัวแปรทางปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าทางจลน์ของแบบจำลองทั้งหมด การชี้เฉพาะรูปแบบที่กำหนดในตัวแปร ต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับแบบจำลองทั้งสี่แบบและประสิทธิภาพของการทำงาน *SOFC* ซึ่งได้นำเสนอแบบจำลองสองมิติ ด้วยสมการ Maxwell-Stefan เพื่อใช้หาค่าการถ่ายเทมวล ถูกใช้ศึกษาในแบบจำลองเพราะเป็นหนึ่งในการคำนวณความต้านทานไฟฟ้า การถ่ายเทมวล และค่าความต้านทานไฟฟ้าในสถานะกระตุ้น รูปแบบนี้ได้ประมาณค่าสำหรับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า จากการศึกษาลักษณะและรายละเอียดของอิเล็กโทรด พบว่าแสงที่ทะลุผ่านบางส่วนบนปฏิกิริยาจะแสดงค่าเบตเตอร์ที่ได้จากการศึกษาคุณสมบัติของ *SOFC* รูปแบบสองมิติที่ไม่เสถียร พิจารณาการแปลงคาร์บอน สมการ Navier-Stoke เพื่อใช้หาค่าการถ่ายเทความร้อน การเปลี่ยนแปลงมวลและการถ่ายเทประจุและอิเล็กตรอน ถูกคำนวณโดยใช้ *COMSOL3.5* ในแบบจำลองเชิงตัวเลขซึ่งคำนวณขณะที่ทำงานในอุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  เฟสก๊าซของความเร็วทางปฏิกิริยาเคมีที่ถูกทำนายปริมาณค่าของคาร์บอน มากไปกว่านั้นยังดูความพรุนตัวที่ขั้วแอโนดและการนำไฟฟ้า ซึ่งเป็นที่มาของการสลายคาร์บอนที่ถูกคำนวณ จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขพบว่า ความพรุนตัวที่ขั้วแอโนดบนแท่ง *SOFC* อยู่ประมาณ 7% ดังนั้นจำเป็นต้องพิจารณาความแตกต่างของความพรุนตัวในวัสดุขั้วแอโนดเพื่อแก้ปัญหาการสลายค่าคาร์บอนของ *SOFC* การเพิ่มอัตราของน้ำต่อมีเทนขาเข้าสามารถจำกัดการสลายคาร์บอนได้ แต่ความหนาแน่นของกระแสไฟจะลดลงด้วย

องค์ความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 นี้ เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบบจำลองเชิงตัวเลขและสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งซึ่ง ผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้น ถือเป็นเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัย สำหรับการท้าวิจัย และการพัฒนาประสิทธิภาพของแบบจำลองทางตัวเลขและการวิเคราะห์ สมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงแข็งชนิดออกไซด์ให้เพิ่มมากขึ้น

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

##### 1. หลักการและทฤษฎี

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากการเปลี่ยนพลังงานทางเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าซึ่งหลักการที่ใช้คือการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการลำเลียงอิเล็กตรอนและไอออนนำมาต่อกันเป็นวงจรปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นจาก 3 สปีชีส์คือ  $H_2, H_2O, O_2$  สามารถแสดงให้เห็นดังสมการ

ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด



ได้เป็นปฏิกิริยาเคมี



##### 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งอยู่บนพื้นฐานของสมการอนุรักษ์มวลโมเมนต์พลังงานไฟฟ้า และสปีชีส์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงการจำลองที่สำคัญได้แก่ สมการการไหลสมการปฏิกิริยาเคมีและสมการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นสมการควบคุม ดังนี้

###### 2.1 การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์

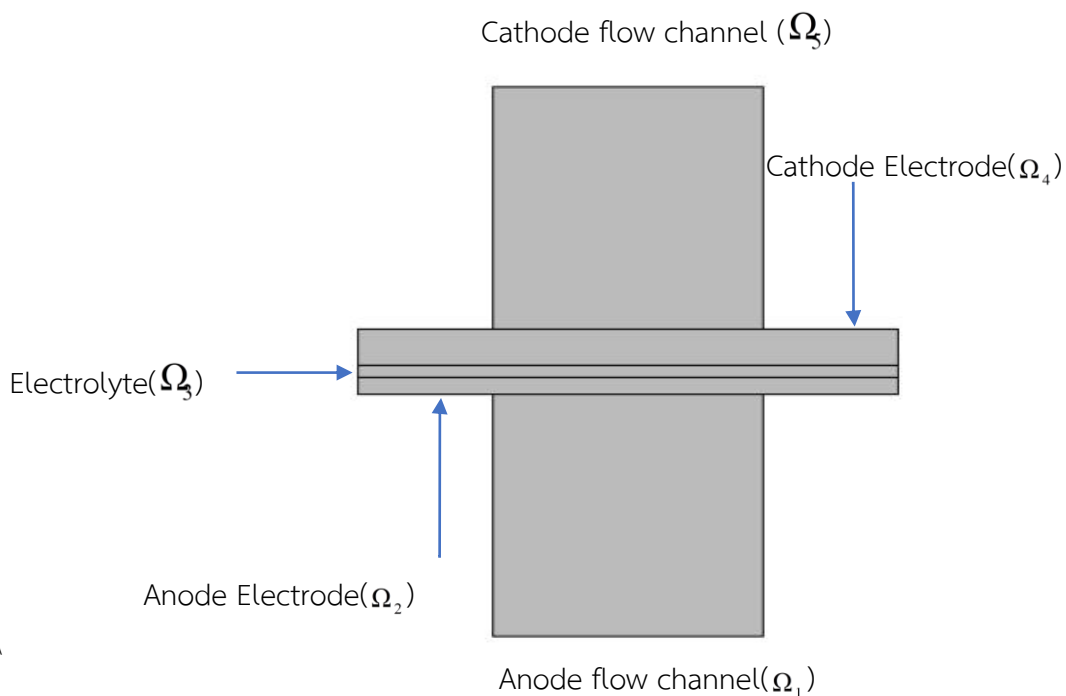
การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์ กำหนดได้ดังสมการ

$$\nabla \cdot J = Q, \quad \text{in } \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4 \quad (4)$$

โดยที่  $\Omega_2$  แทน แอโนดอิเล็กโทรด  $\Omega_3$  แทน อิเล็กโทรไลต์  $\Omega_4$  แทน แคโทดอิเล็กโทรด

และ  $J$  แทน เวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแส  $Q$  กำหนดเป็น  $Q_{a,ct}$

และ  $Q_{c,ct}$  สำหรับแอโนดและแคโทด ดังสมการ (๕) และ (๖) ตามลำดับ



ภาพที่ 3-1 แสดงโดเมนที่ใช้ในการทดลอง

### 2.1.1 ปฏิริยาออกซิเดชันของเชื้อเพลิงภายในขั้วแอโนด

ปฏิริยาเคมีสามารถอธิบายได้จากสมการการถ่ายเทมวลขององค์ประกอบของก๊าซผ่านวัสดุพอร์นจากสมการของ Stefan - Maxwell ซึ่งเป็นแบบ Multi - Component Species และการแพร่ของ Knudsen เพื่ออธิบายการชนของอนุภาคกับผนังที่มีผลต่อการแพร่ โดยมีสมการของ Butler - Volmer เป็นสมการควบคุมเกี่ยวกับปฏิริยาไฟฟ้าเคมี การเกิดปฏิริยาออกซิเดชันจะต้องอาศัยอัตราการเกิดปฏิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงดังสมการ

$$Q_{a,c} = Q_{0,a} \left( \frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}} \exp\left(\frac{0.5F}{RT} \eta\right) - \frac{C_{H_2O}}{C_{H_2O,ref}} \exp\left(\frac{-1.5F}{RT} \eta\right) \right) \quad (5)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} Q_{0,a} &= \text{ค่ากระแสไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด (A/m}^2\text{)} \\ C_{H_2O} &= \text{ความเข้มข้นโดยมวลของน้ำ (mol/m}^3\text{)} \\ C_t &= \text{ผลรวมของความเข้มข้นทั้งหมด (mol/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

$C_{H_2,ref}$	=	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่จุดอ้างอิง ( $mol/m^3$ )
$C_{H_2O,ref}$	=	ความเข้มข้นของน้ำที่จุดอ้างอิง ( $mol/m^3$ )
$F$	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ ( $C/mol$ )
$R$	=	ค่าคงที่แก๊ซ ( $J/(mol \cdot K)$ )
$T$	=	อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง ( $K$ )
$\eta$	=	ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ )

เนื่องจากข้อจำกัดของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของไฮโดรเจนที่ขั้วไฟฟ้าแอโนด เขียนในรูปสมการ

$$\eta = \phi_{electronic} - \phi_{ionic} - \Delta\phi_{eq} \quad (6)$$

เมื่อ	$\Delta\phi_{eq}$	=	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสมดุล ( $V$ )
	$\phi_{ionic}$	=	ค่าไอออนิก ( $V$ )
	$\phi_{electronic}$	=	ค่าอิเล็กทรอนิกส์ ( $V$ )

### 2.1.2 ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนภายในขั้วแคโทด

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งที่ขั้วแคโทด สามารถเขียนแทนด้วยสมการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้ดังนี้

$$Q_{c,c_t} = Q_{0,c} \left( \exp\left(\frac{3.5F}{RT}\eta\right) - X_{O_2} \frac{C_t}{C_{H_2O,ref}} \exp\left(\frac{-0.5F}{RT}\eta\right) \right) \quad (7)$$

โดยที่

$Q_{0,c}$	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด ( $A/m^2$ )
$X_{O_2}$	=	สัดส่วนโดยมวลของแก๊ซออกซิเจน

บริเวณทางเข้าที่ขั้วแอโนด (Inlet Boundary) กำหนดให้ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ขั้วแคโทดมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ( $V_{cell}$ ) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$V_{cell} = \Delta\phi_{eq,c} - \Delta\phi_{eq,a} - V_{pol} \quad (8)$$

เมื่อ

$V_{cell}$	=	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ( $V$ )
$V_{pol}$	=	ค่าโพลาริเซชัน ( $V$ )

$\Delta\phi_{eq,c}$  = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสมดุลที่ขั้วแคโทด

$\Delta\phi_{eq,a}$  = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสมดุลที่ขั้วแอโนด

### 3.3 การถ่ายเทมวลของก๊าซแต่ละชนิด

การคำนวณการถ่ายเทมวลของก๊าซ จะคำนวณบริเวณขั้วแคโทดและช่องการไหลแคโทดโดยมีสมการควบคุมดังนี้

#### 3.2.1 สมการถ่ายเทมวล

$$\nabla \cdot \mathbf{j}_i + \nabla \cdot (\rho \omega_i \mathbf{u}) = \mathbf{R}_i \quad \text{in } \Omega_1, \Omega_2, \Omega_4, \Omega_5 \quad (9)$$

เมื่อ

$\rho$  = ความหนาแน่นของก๊าซผสม

$\mathbf{u}$  = ความเร็วเฉลี่ยของก๊าซผสม

$\omega_i$  = สัดส่วนโดยมวลของก๊าซ  $i$

$\mathbf{j}_i$  = อัตราการไหลของมวล

$\mathbf{R}_i$  = อัตราการผลิตของปฏิกิริยา

#### 3.2.2 สมการการแพร่กระจายของ Maxwell - Stefan

สมการการแพร่กระจายของ Maxwell - Stefan ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการไหลของมวล คือ

$$\mathbf{j}_i = -\rho \omega_i \sum_{k=1}^o D_{ik} \mathbf{d}_k - \frac{D_i^T}{T} \nabla T \quad (10)$$

เมื่อ

$D_{ik}$  = เมตริกซ์การแพร่กระจายตามกฎข้อ 1 ของ Fick

$D_i^T$  = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความร้อน

$T$  = อุณหภูมิ ( $K$ )

$\mathbf{d}_{ik}$  = แรงขับเคลื่อนการแพร่กระจาย

ซึ่งแรงขับเคลื่อนการแพร่กระจาย  $\mathbf{d}_{ik}$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mathbf{d}_k = \nabla x_k + \frac{1}{\rho} (x_k - c_k) \nabla p \quad (11)$$

$$x_k = \frac{\omega_k}{A_k} M_n \quad (12)$$



$$M_n = \left( \sum_i \frac{\omega_i}{M_i} \right)^{-1} \quad (13)$$

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดบริเวณอิเล็กโทรไลต์ จะมีสมการการแพร่และซึมผ่านของก๊าซภายในวัสดุพอร์นมาเกี่ยวข้องซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 3.2.3 การแพร่ภายในวัสดุพอร์นที่ตัวอิเล็กโทรด (Porous Media Flow)

#### 3.2.3.1 สมการการแพร่และการซึมผ่านของก๊าซภายในวัสดุพอร์น

การถ่ายเทมวลของก๊าซชนิดต่าง ๆ เกิดขึ้นโดยการแพร่แบบไบนารี

ซึ่งมีค่าความต้านทานของการถ่ายเทมวลของก๊าซผ่านแอนโอดและแคโทด ณ ค่าของความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์โดยไม่คิดผลของการดูดซับและการคายสารที่แพร่ (Adsorption/ Desorption) และไม่คิดผลของการแพร่ที่ผิว เนื่องจากการวิเคราะห์การไหลและการกระจายตัวของก๊าซผ่านวัสดุพอร์นภายในแอนโอดและแคโทด ถูกควบคุมโดย Brinkman's Equation ซึ่งบริเวณช่องการไหลของแอนโอดและแคโทด แอนโอดอิเล็กโทรด และแคโทดอิเล็กโทรด ถูกควบคุมโดยสมการ

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad \text{in } \Omega_1, \Omega_2, \Omega_4, \Omega_5 \quad (14)$$

$$\rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \nabla \cdot \left[ -pI + \mu (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) I \right] + F \quad (15)$$

in  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_4, \Omega_5$

ส่วนบริเวณแอนโอดอิเล็กโทรด และแคโทดอิเล็กโทรด ถูกควบคุมโดยสมการ

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = Q_{br} \quad \text{in } \Omega_2, \Omega_4 \quad (16)$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \left( (\mathbf{v} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{v}}{\varepsilon} \right) = \nabla \cdot \left[ -pI + \mu (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) I \right] - \left( \frac{\mu}{K_{br}} + \beta_F |\mathbf{v}| + Q_{br} \right) \mathbf{v} + F \quad (17)$$

in  $\Omega_2, \Omega_4$

โดยที่

$\rho$	=	ความหนาแน่นในเฟสของก๊าซผสม
$\mathbf{v}$	=	ความเร็วแนวแกน $x, y, z$ ของก๊าซผสม
$\mu$	=	ค่าความหนืดของก๊าซผสม
$p$	=	ความดัน
$\varepsilon$	=	ความพอร์นของตัวอิเล็กโทรด
$K_{br}$	=	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของอิเล็กโทรด

$Q_{br}$	=	ผลผลิตที่ได้
$B_F$	=	ค่า Forchheimer Drag
$B_F v v$	=	ค่าสัดส่วนความหนืดต่อความเร็ว <sup>2</sup> ของของไหล
F	=	แรงกระทำจากภายนอก

สำหรับในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ใน 3 มิติ สำหรับ 1 เซลล์ ซึ่งประกอบด้วยบริเวณขั้วแอโนด ขั้วแคโทดและอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีสมการควบคุมดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น โดยเน้นการศึกษาวัสดุที่ทำมาใช้เป็นแอโนดและแคโทดที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ทำการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขของจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งโดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysic เพื่อช่วยในการแก้สมการควบคุมดังกล่าว

### 3.4 เงื่อนไขค่าขอบ (Boundary Condition)

กำหนดให้ช่องการไหลเชื้อเพลิงของขั้วแคโทดและขั้วแอโนดมีทิศทางการไหลสวนทางกันและให้ก๊าซไฮโดรเจนเข้าที่ขั้วแอโนดทางด้านซ้าย โดยมีสมการ Ionic Charge Balance จำนวนที่ขั้วแคโทด ขั้วแอโนดและอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งภายนอกถูกหุ้มด้วยฉนวน มีเงื่อนไขค่าขอบดังสมการ

$$-n \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (18)$$

สำหรับการถ่ายเทสปีซีในช่องการไหลแอโนด กำหนดค่าเริ่มต้นสัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนเท่ากับ 0.45 โดยเข้าทางซ้ายและออกทางขวาของช่องการไหลแอโนด ให้บริเวณขั้วแอโนดและช่องการไหลแอโนดไม่มีการไหลจากภายนอก และมีเงื่อนไขค่าขอบดังสมการ

$$-n \cdot (\mathbf{j}_i + \rho \mathbf{u} \omega_i) = 0 \quad (19)$$

โดยที่

$\mathbf{J}$	=	เวกเตอร์ความหนาแน่นกระแส
$\mathbf{j}_i$	=	อัตราการไหลของมวล
$\rho$	=	ความหนาแน่นในเฟสของก๊าซผสม
$\mathbf{u}$	=	ความเร็วเฉลี่ยของก๊าซผสม
$\omega_i$	=	สัดส่วนโดยมวลของก๊าซ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ในการศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองเป็น 4 ชุด ดังนี้

ชุดที่ 1 การศึกษา โดเมนที่ส่งผลต่อค่าพลังงาน

ชุดที่ 2 การศึกษา อุณหภูมิที่ส่งผลต่อ โดเมน

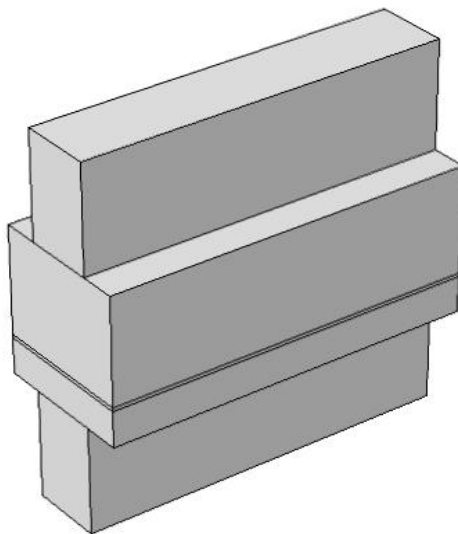
ชุดที่ 3 การศึกษา การแบ่งเอลิเมนต์ของ เซลล์เชื้อเพลิง (Mesh Sensitivity Analysis)

ชุดที่ 4 การศึกษาค่า Permeability กับค่า Porosity

- Permeability ที่เท่ากัน เมื่อค่า Porosity แตกต่างกัน
- Permeability ที่แตกต่างกัน เมื่อค่า Porosity เท่ากัน
- Permeability ที่แตกต่างกัน เมื่อค่า Porosity แตกต่างกัน

#### 1. การศึกษา โดเมนที่ส่งผลต่อค่าพลังงาน

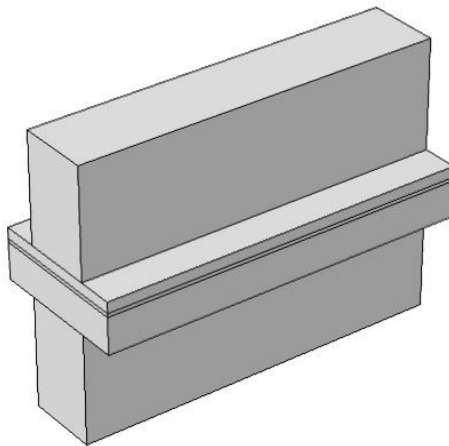
เนื่องจากมีผู้สนใจศึกษาเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งหลายท่าน ซึ่งแต่ละโดเมนที่ใช้ก็แตกต่างกันไป และต่างก็ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ผู้วิจัยทดลองจึงทดลองปรับขนาดของโดเมนจากงานวิจัยของ (Dong, 2016) โดยปรับความยาวของโดเมนความกว้างของช่องการไหล ขั้วแคโทดและแอโนด ตามงานวิจัยของ (Lui et al., 2007) ซึ่งโดเมนทั้งสองแบบที่ผู้วิจัยเลือกมานั้น คือโดเมนที่ให้ค่าพลังงาน ไฟฟ้าสูงที่สุดสองอันดับแรกดังแสดงในภาพที่ 4-1 และ 4-2 และตาราง 4-1 และ 4-2 ตามลำดับ แต่ละขนาดผู้วิจัยควบคุมการทำงานที่  $800^{\circ}\text{C}$  ใช้ชนิดเชื้อเพลิงและสถานะอื่น ๆ ที่เหมือนกัน โดเมนแต่ละขนาดให้ค่าพลังงานที่แตกต่างกันไป ดังตารางที่ 4-3



ภาพที่ 4-1 แสดงโดเมนที่ใช้ในการทดลองแบบที่ 1

ตารางที่ 4-1 ขนาดของส่วนประกอบในแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง แบบที่ 1

ส่วนประกอบ	ความหนา (mm.)	ความกว้าง (mm.)	ความยาว (mm.)
1. ชั้นแคโทด	0.3	2	10
2. ช่องการไหลแคโทด	0.2	1	10
3. ชั้นอิเล็กโทรไลต์	0.1	2	10
4. ชั้นแอโนด	0.3	2	10
5. ช่องการไหลแอโนด	0.2	1	10



ภาพที่ 4-2 แสดงโดเมนที่ใช้ในการทดลองแบบที่ 2

ตารางที่ 4-2 ขนาดของส่วนประกอบในแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง แบบที่ 2

ส่วนประกอบ	ความหนา (mm.)	ความกว้าง (mm.)	ความยาว (mm.)
1. ชั้นแคโทด	0.3	4	12
2. ช่องการไหลแคโทด	3	2	12
3. ชั้นอิเล็กโทรไลต์	0.005	4	12
4. ชั้นแอโนด	1	4	12
5. ช่องการไหลแอโนด	3	2	12

ตารางที่ 4-3 ตารางเปรียบเทียบการประมวลผลของโดเมนทั้งสองขนาด

Permeability	Porosity	ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย โดเมนแบบที่1 ( $W/m^2$ )	ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย โดเมนแบบที่2 ( $W/m^2$ )
$1.16 \times 10^{-9}$	0.45	1223.79272	1352.99255
$1.16 \times 10^{-9}$	0.55	1236.95923	1360.19421
$1.98 \times 10^{-10}$	0.45	1223.0026	1352.28369
$1.98 \times 10^{-10}$	0.55	1236.10559	1359.39648

จากการปรับขนาดของโดเมนทั้งสองโดเมนพบว่า โดเมนในแบบที่ 2 ให้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยมากกว่าโดเมนในแบบที่ 1 ในทุก ๆ ค่าของการประมวลผล จึงสรุปได้ว่าการปรับโดเมน มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ *SOFC* ซึ่งจากขนาดของโดเมนทั้งสอง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โดเมนที่ให้ค่าพลังงานสูงกว่าในการศึกษา

## 2. กรณีศึกษา อุณหภูมิที่มีผลต่อ โดเมนแต่ละโดเมน

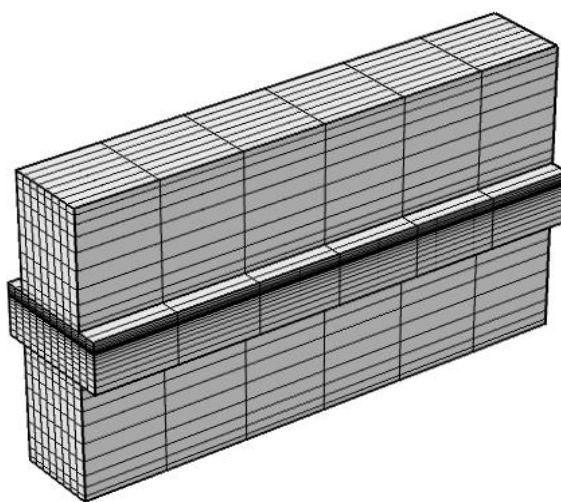
จากงานวิจัยของ (งามแพรวพราว, 2557) ที่ได้ศึกษามานั้น จะเห็นว่า อุณหภูมิที่ให้ผลที่ดีที่สุดจะเป็น  $800^{\circ}\text{C}$  แต่ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาว่าเป็นไปได้หรือไม่ว่าโดเมนหนึ่ง ๆ จะมีอุณหภูมิที่จะส่งผลต่อโดเมนที่แตกต่างกัน ผู้วิจัยจึงทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในแต่ละโดเมนที่มีค่า Permeability กับค่า Porosity ในแต่ละค่าเท่ากัน ผลปรากฏว่าในแต่ละโดเมนเมื่อใช้ค่าอุณหภูมิที่  $800^{\circ}\text{C}$  จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่า  $1000^{\circ}\text{C}$  เช่น โดเมนที่ใช้ค่า Permeability เป็น  $1.98 \times 10^{-10}$  กับค่า Porosity 0.45 เมื่อใช้ค่าอุณหภูมิเป็น  $800^{\circ}\text{C}$  จะให้ค่าพลังงานเป็น  $1445.59204 W/m^2$  แต่เมื่อใช้ค่าอุณหภูมิเป็น  $1000^{\circ}\text{C}$  ค่าพลังงานกลับลดลงเป็น  $1352.23836 W/m^2$  ดังนั้น ผลการวิจัยพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือ โดเมนจะให้พลังงานสูงสุดที่  $800^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 4-4 ตารางแสดงอุณหภูมิ และค่าพลังงานไฟฟ้า

Permeability	อุณหภูมิ (°C)	ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย ( $W/m^2$ )	ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ( $A/m^2$ )
$1.16 \times 10^{-9}$	800	1446.45239	4997.61621
$1.16 \times 10^{-9}$	1000	1352.99255	4537.00439
$1.98 \times 10^{-10}$	800	1445.59204	4993.53516
$1.98 \times 10^{-10}$	1000	1352.23836	4533.8457

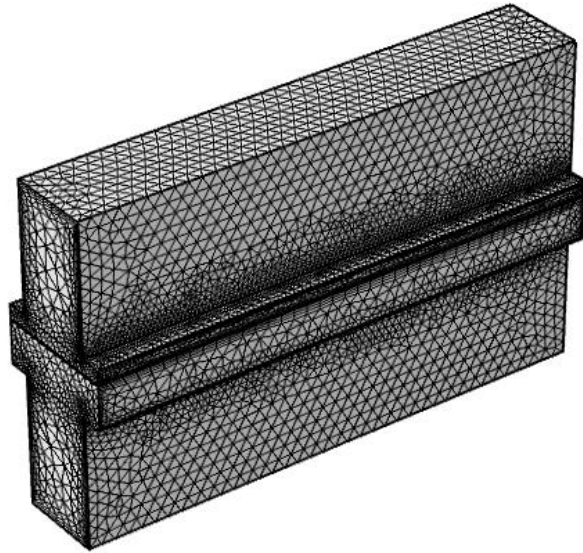
### 3. กรณีศึกษา การแบ่งเอลิเมนต์ของ เซลล์เชื้อเพลิง (Mesh Sensitivity Analysis)

จากการทดลองทั้งสามกรณี ได้ใช้ขนาดแบบจำลองตามตารางที่ 4.1 และใช้รูปแบบการแบ่งโดเมนโครงสร้างตาข่าย 3 แบบ คือ รูปทรงหกหน้า (Hexahedron) แบบปกติ (Normal) ทรงสี่หน้า (Tetrahedron) แบบหยาบ (Coarse) และทรงสี่หน้า (Tetrahedron) แบบละเอียด (Fine) ผลปรากฏว่าการแบ่งทั้งสามแบบให้ค่าพลังงานที่ใกล้เคียงกันแต่ใช้เวลาในการประมวลผลที่แตกต่างกัน โดยที่ แบบละเอียดจะใช้เวลาในการประมวลผลมากที่สุด



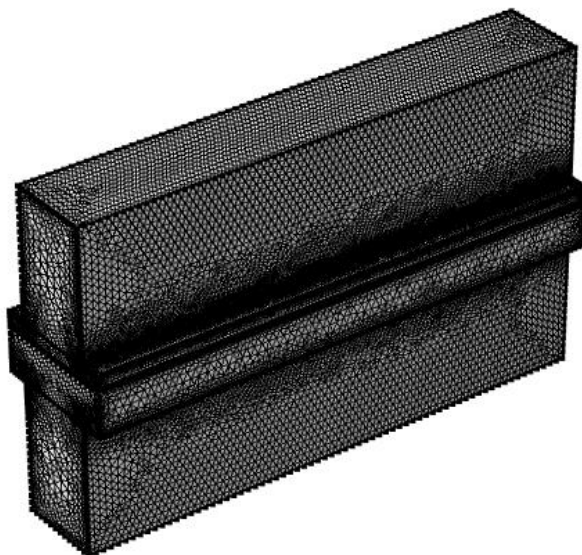
ภาพที่ 4-3 โครงสร้างตาข่ายของแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งเป็นรูปทรงหกหน้า

(Hexahedron) แบบปกติ (normal) จำนวน 2,328 เอลิเมนต์



ภาพที่ 4-4 โครงสร้างตาข่ายของแบบจำลองเซลล์เชื่อมเพดิงออกไซด์แข็งเป็นรูปทรงสี่หน้า  
(Tetrahedron) แบบหยาบ (coarse) จำนวน 144,943 เอลิเมนต์





ภาพที่ 4-5 โครงสร้างตาข่ายของแบบจำลองเซลล์สี่เหลี่ยมออกไซด์แข็งเป็นรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedron) แบบละเอียด (fine) จำนวน 707,828 เอลิเมนต์

จากลักษณะการแบ่งโดเมนของภาพที่ 4.3 เป็นการแบ่งโดเมนในระนาบ  $Y-Z$  ออกเป็น 360 เอลิเมนต์ และแบ่งตามความยาวแกน  $X$  เป็น 9 ช่องเท่า ๆ กัน สำหรับแบบจำลอง เซลล์สี่เหลี่ยมยาว 12 มิลลิเมตร 1 เซลล์ (2,328 เอลิเมนต์) ใช้เวลาในการประมวลผลเป็น 4 นาที 19 วินาที ใช้หน่วยความจำ 1.23GB ผู้วิจัยได้เลือกโครงสร้างตาข่ายเป็นแบบรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedron) ปรับจำนวนเอลิเมนต์เป็นแบบหยาบ (Coarse) และ แบบละเอียด (Fine) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ดังตาราง

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลการแบ่งเอลิเมนต์

ชนิดการแบ่งเอลิเมนต์	ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมากที่สุด ( $A/m^2$ )	ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยมากที่สุด ( $W/m^2$ )	เวลา(นาท)
ทรงหกหน้าแบบปกติ	4,567.54257	1,359.39648	4.19
ทรงสี่หน้าแบบหยาบ	4,869.46725	1,454.31055	78.26
ทรงสี่หน้าแบบละเอียด	5,411.87402	1,627.57703	326.33

จะเห็นได้ว่า การแบ่งเอลิเมนต์ทั้งสามแบบทั้งทรงหกหน้าแบบปกติ ทรงสี่หน้าแบบหยาบ และทรงสี่หน้าแบบละเอียดให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ถือว่าคำตอบที่ได้เสถียร (Mesh Sensitivity) ซึ่งได้ค่าเท่าเดิม นั่นคือ คำตอบคู่เข้า แต่ใช้เวลาในการประมวลผลที่ต่างกัน ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้โครงสร้างตาข่ายที่ใช้เวลาน้อยที่สุดในการประมวลผล

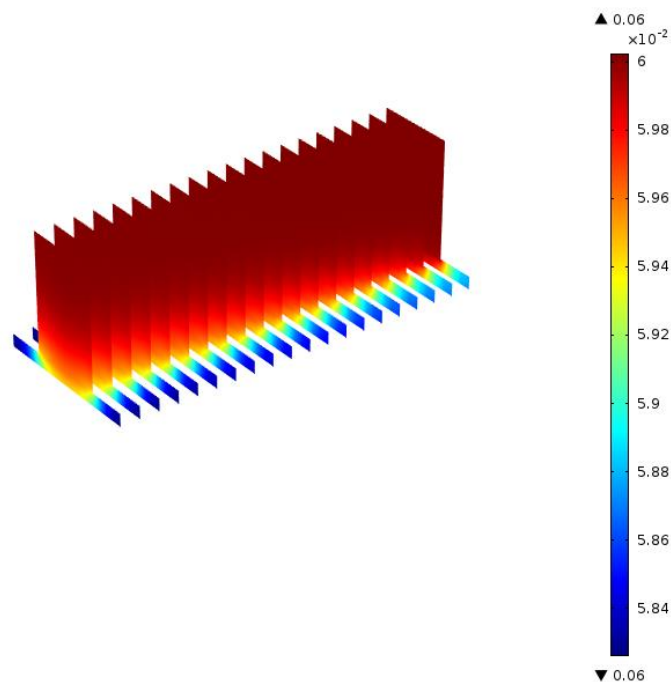
จากทั้งสามชุดการทดลอง ชุดการทดลองที่หนึ่งจะได้โดเมนที่นำมาใช้ทดลองสำหรับชุดการทดลองที่สองจะได้อุณหภูมิที่เหมาะสมกับชุดการทดลอง และชุดการทดลองที่สามจะได้การแบ่งเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับโดเมนที่ใช้ในการทดลองเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง

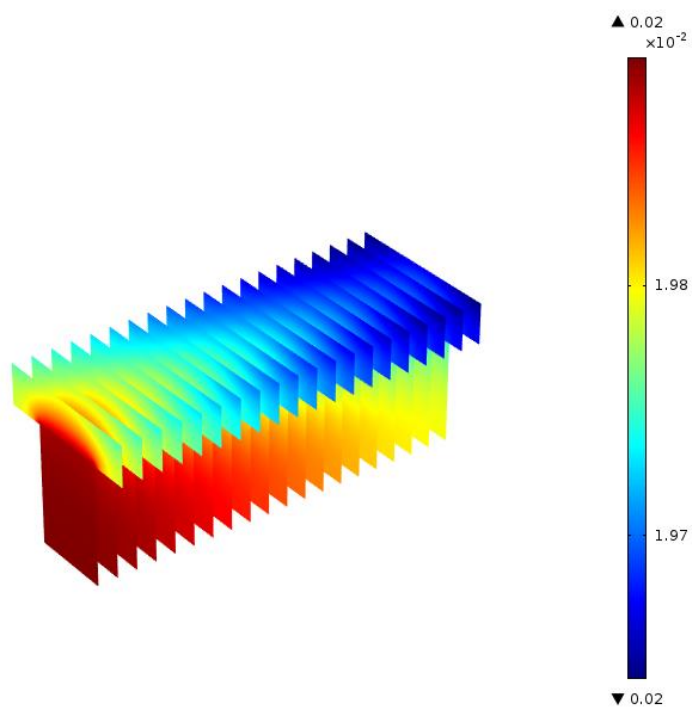
ชื่อ	ค่า	คำอธิบาย
$T$	$1000\text{ }^{\circ}\text{C}$	อุณหภูมิ
$V_{cell}$	$0.95\text{ V}$	ความต่างศักย์ไฟฟ้าในเซลล์
$X_{O_2}$	$0.032\text{ kg/mol}$	สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน
$C_t$	$9.572\text{ mol/m}^3$	ความเข้มข้นรวม
$C_{H_2,ref}$	$8.4275\text{ mol/m}^3$	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่จุดอ้างอิง
$C_{H_2O,ref}$	$1.1445\text{ mol/m}^3$	ความเข้มข้นของน้ำที่จุดอ้างอิง
$Q_{0,a}$	$0.1\text{ A/m}^2$	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด

ผลจากการใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics ประมวลผลแบบจำลองตามขนาดดังตารางที่ 4.1 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.6 ได้ผลคือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเป็น  $1,360.19421 \text{ W/m}^2$  และ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเป็น  $4,570.81201 \text{ A/m}^2$

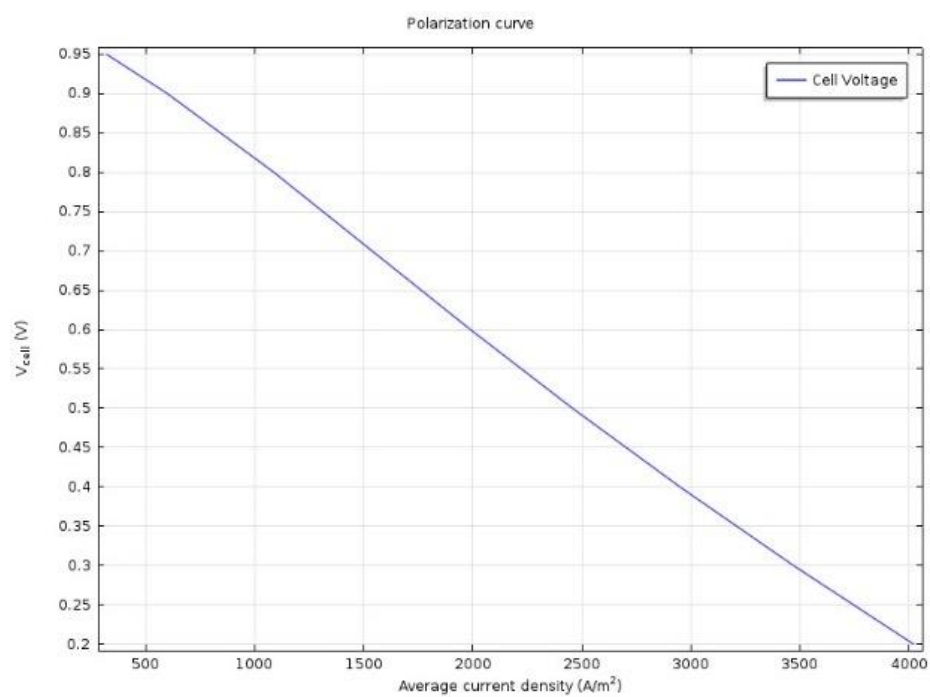
โดยให้ผลคือ การกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทดจะเห็นได้ว่าออกซิเจนมีการกระจายตัว อย่างทั่วถึงซึ่งพิจารณาได้จากสีของกราฟ โดยมีการลดลงเพียงเล็กน้อยดังภาพที่ 4-6 การกระจายตัวของไฮโดรเจนในช่องแอโนด จะเห็นว่าสีที่เปลี่ยนไปแสดงว่ามีการสูญเสียไฮโดรเจนในกระบวนการดังภาพที่ 4-7 การโพลาริเซชันซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้างภาพที่ 4-8 กราฟแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แกนX)กับค่าพลังงานไฟฟ้า (แกนY) ค่าของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ที่มีค่ามากขึ้นจะมีค่าของ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมากขึ้น ด้วยจนกระทั่งเข้าใกล้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่  $2500 \text{ A/m}^2$  ค่าของกำลังงานเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเกิน  $1200 \text{ W/m}^2$  แต่พอกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมากกว่า  $2500 \text{ A/m}^2$  จะทำให้ค่าของกำลังงานเฉลี่ยลดลง ดังภาพที่ 4-9 และ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่กระจายตัวในอิเล็กโทรไลต์ ดังภาพที่ 4-10



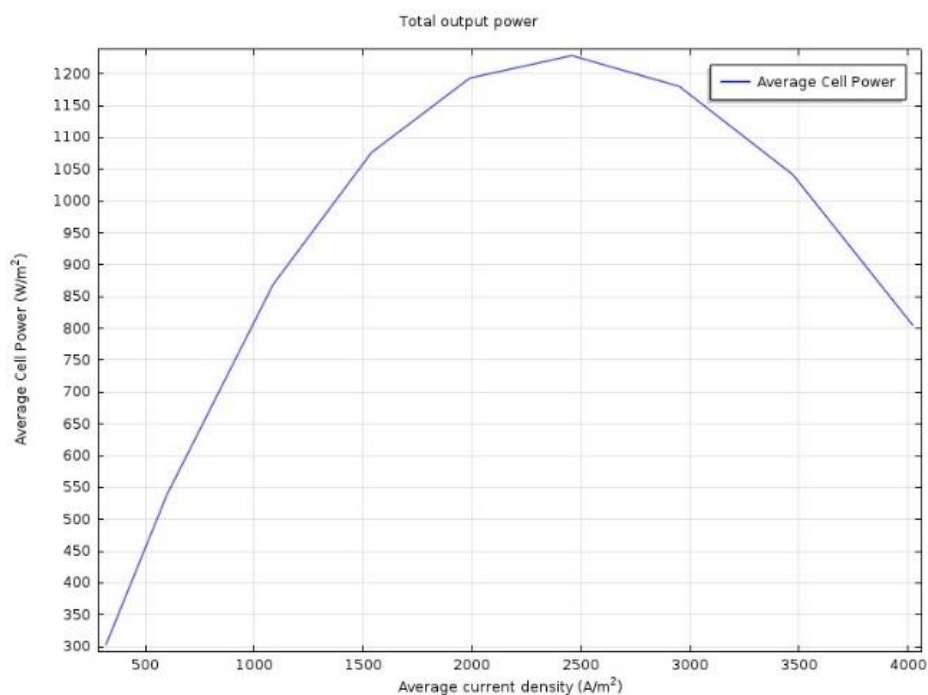
ภาพที่ 4-6 การกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทด



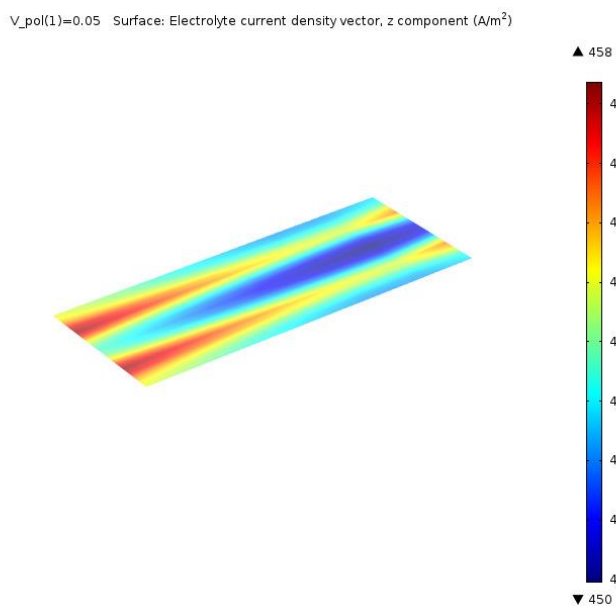
ภาพที่ 4-7 การกระจายตัวของไฮโดรเจนในช่องแอนด



ภาพที่ 4-8 กราฟแสดงการโพลาไรเซชันซึ่งเป็น ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แกนX) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (แกนY)



ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แกนX)กับค่าพลังงานไฟฟ้า(แกนY)



ภาพที่ 4-10 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่กระจายตัวอยู่ในอิเล็กโทรไลต์

#### 4. กรณีศึกษาค่า Permeability กับค่า Porosity

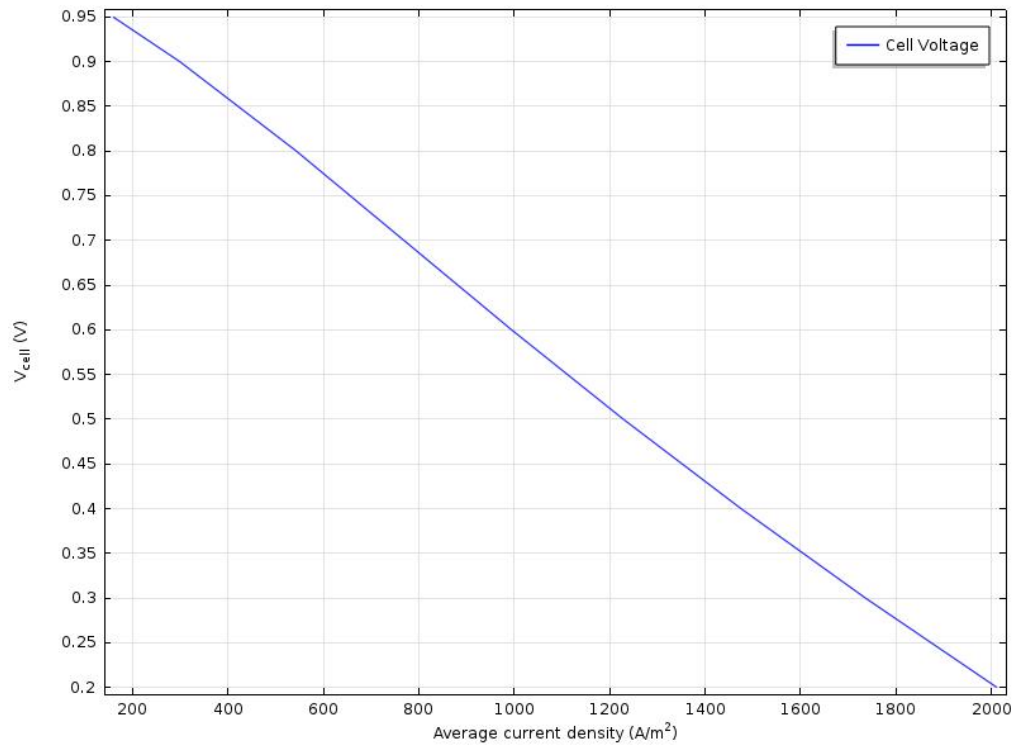
จากงานวิจัยของ Min Yan (Yan, 2015) ที่ได้กล่าวถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวล โดยการปรับค่า Permeability (ค่าการซึมผ่านได้) และค่า porosity (ความพรุน) ของวัสดุ และจากงานวิจัยของ ศศิธร งามแพรวพราว (ศศิธร งามแพรวพราว, 2557) ได้กล่าวถึงค่า Porosity (ความพรุน) ที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงให้ค่าพลังงานสูงสุด ผู้วิจัยจึงได้นำค่า Permeability (ค่าการซึมผ่านได้) และค่า Porosity (ความพรุน) มาทดลองเพื่อทดสอบผลพิจารณาผลของ Permeability (ค่าการซึมผ่านได้) และค่า Porosity (ความพรุน) ต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง โดยนำมาใส่ในโดเมนที่ได้ปรับสร้างขึ้นมาใหม่และใช้เชื้อเพลิงกับสภาวะการทำงานอื่น ๆ ที่เหมือนกันเพื่อวิเคราะห์หาค่า Permeability (ค่าการซึมผ่านได้) กับค่า Porosity (ความพรุน) ที่ให้ค่ากระแสไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้าที่มากที่สุดซึ่งได้ผล ตามตารางที่ 4.7 ได้ลักษณะเป็นกราฟโพลาริเซชัน โดยที่มีค่า Permeability ที่  $1.16 \times 10^{-9}$  และค่า porosity 0.45 ดังภาพที่ 4.11 กราฟโพลาริเซชัน โดยที่ค่า Permeability ที่  $1.98 \times 10^{-10}$  และค่า Porosity ที่ 0.55 ดังภาพที่ 4.12 กราฟพลังงานกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยที่มีค่า Permeability ที่  $116 \times 10^{-9}$  และค่า Porosity ที่ 0.45 ซึ่งให้ค่าพลังงานสูงสุดเป็น  $1,352.99255 \text{ W} / \text{m}^2$  และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดเป็น  $4533.00439 \text{ A} / \text{m}^2$  ดังภาพที่ 4.13 กราฟพลังงานกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยที่มีค่า Permeability ที่  $198 \times 10^{-10}$  และค่า Porosity ที่ 0.45 ซึ่งให้ค่าพลังงานสูงสุดเป็น  $1,352.28369 \text{ W} / \text{m}^2$  และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดเป็น  $4533.8457 \text{ A} / \text{m}^2$  ดังภาพที่ 4.14 การกระจายตัวของไฮโดรเจนในแอโนด แคโทด ซึ่งมีค่า Permeability ที่  $1.16 \times 10^{-9}$  และค่า Porosity ที่ 0.45 จะพบว่าลักษณะของสีแตกต่างกัน แสดงว่า การกระจายตัวของไฮโดรเจน มีไม่ทั่วถึง นั่นคือ เกิดการสูญเสียไฮโดรเจน ในกระบวนการ ดังภาพที่ 4.15 การกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทด ซึ่งมีค่า Permeability ที่  $1.16 \times 10^{-9}$  และค่า Porosity ที่ 0.45 จะพบว่าลักษณะของสีแตกต่างกันน้อยมาก แสดงว่า การกระจายตัวของออกซิเจนกระจายตัวอย่างทั่วถึงและมีการลดลงเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.16 การกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทด ซึ่งมีค่า Permeability ที่  $1.16 \times 10^{-9}$  และค่า Porosity ที่ 0.45 ดังภาพที่ 4.17 การกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทด Permeability ที่  $1.98 \times 10^{-10}$  และค่า Porosity ที่ 0.45 ดังภาพที่ 4.18 การกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทด Permeability ที่  $1.98 \times 10^{-10}$  และค่า Porosity ที่ 0.45 ดังภาพที่ 4.19 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อ Permeability ที่  $1.16 \times 10^{-9}$  และค่า Porosity ที่ 0.55 ดังภาพที่ 4.20 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

เมื่อ Permeability ที่  $1.16 \times 10^{-9}$  และค่า Porosity ที่ 0.55 ดังภาพที่ 4.21 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อ Permeability ที่  $1.98 \times 10^{-10}$  และค่า Porosity ที่ 0.55 ดังภาพที่ 4.22

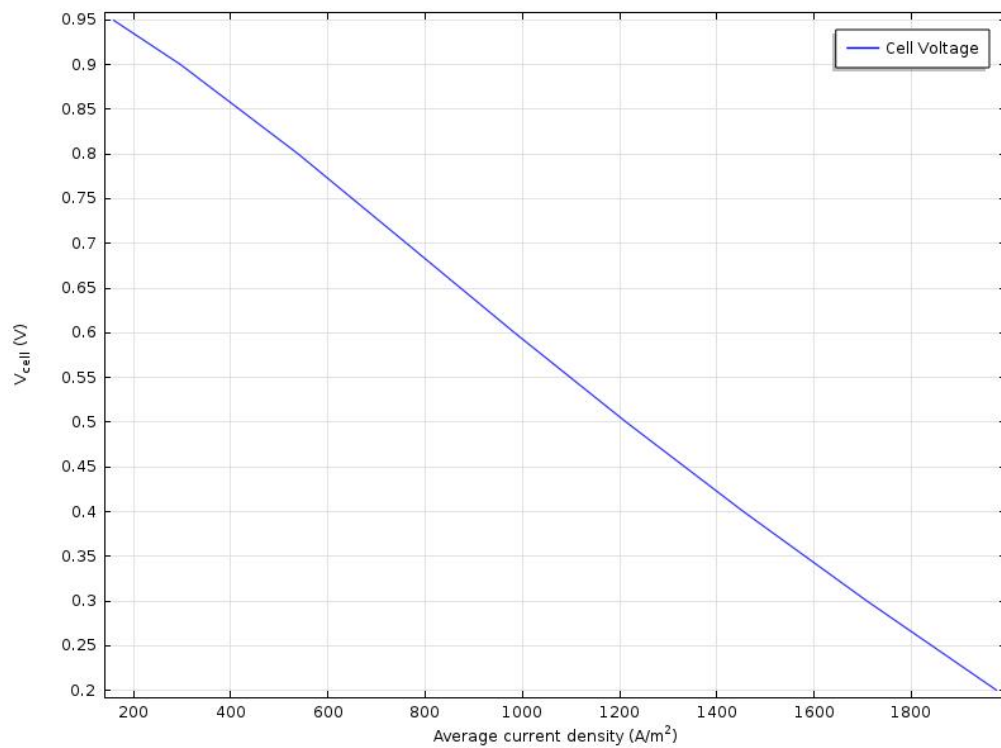
ตารางที่ 4.7 ผลของค่าพลังเมื่อมีการเปลี่ยนค่า Permeability กับค่า Porosity

Permeability	Porosity	ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย มากที่สุด ( $W/m^2$ )	ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย มากที่สุด ( $A/m^2$ )
$1.16 \times 10^{-9}$	0.45	1352.99255	4537.00439
$1.16 \times 10^{-9}$	0.55	1360.19421	4570.81201
$1.98 \times 10^{-10}$	0.45	1352.28369	4533.8457
$1.98 \times 10^{-10}$	0.55	1359.39648	4567.54297

ตารางที่ 4.7 จากการปรับค่า Permeability (ค่าการซึมผ่านได้) กับค่า Porosity (ความพรุน) ให้เท่ากันที่  $1.16 \times 10^{-9}$  และ  $1.98 \times 10^{-10}$  แต่ปรับค่า Porosity ให้เป็น 0.45 และ 0.55 พบว่าเมื่อค่า Permeability เท่าเดิม แต่ปรับค่า Porosity ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นและแปรผันตรงกับค่า Porosity แต่ถ้าพิจารณาค่า Permeability ที่แตกต่างกัน แต่ Porosity เท่ากัน จะเห็นว่า ค่า Permeability ที่ลดลงทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าลดลงด้วย

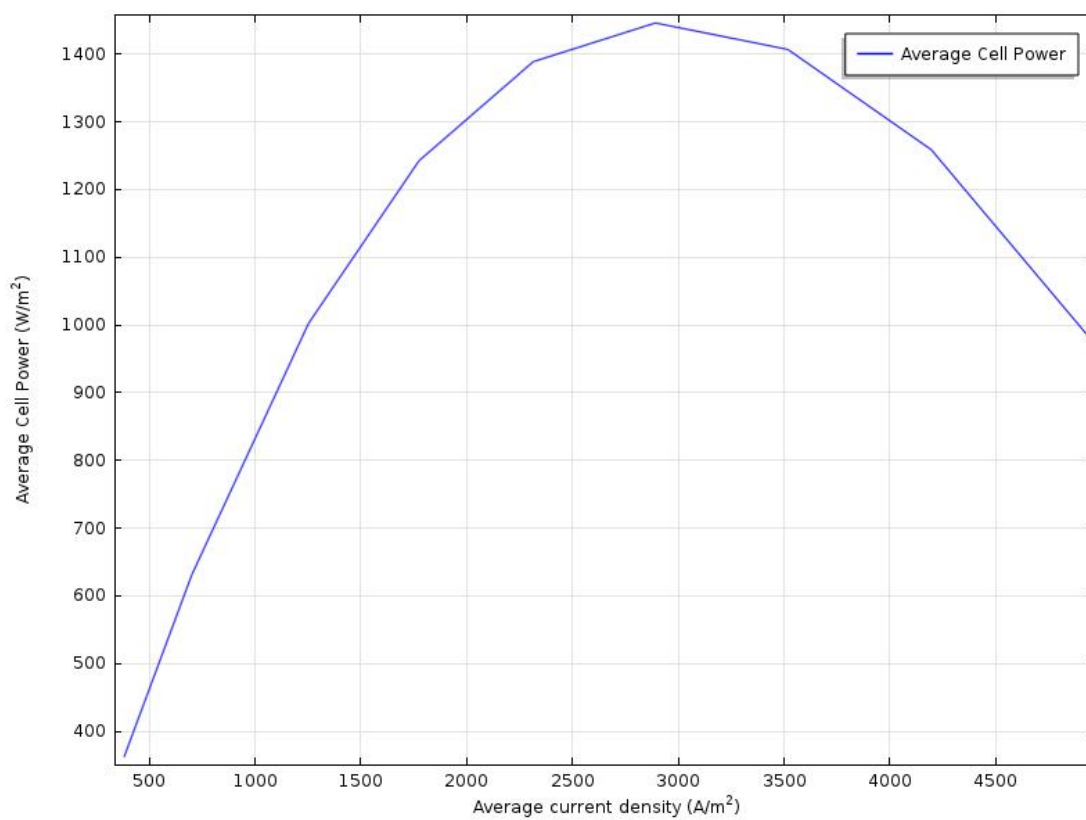


ภาพที่ 4-11 กราฟโพลาริเซชัน โดยที่มีค่า Permeability ที่  $1.16 \times 10^{-9}$   
และค่า Porosity 0.45

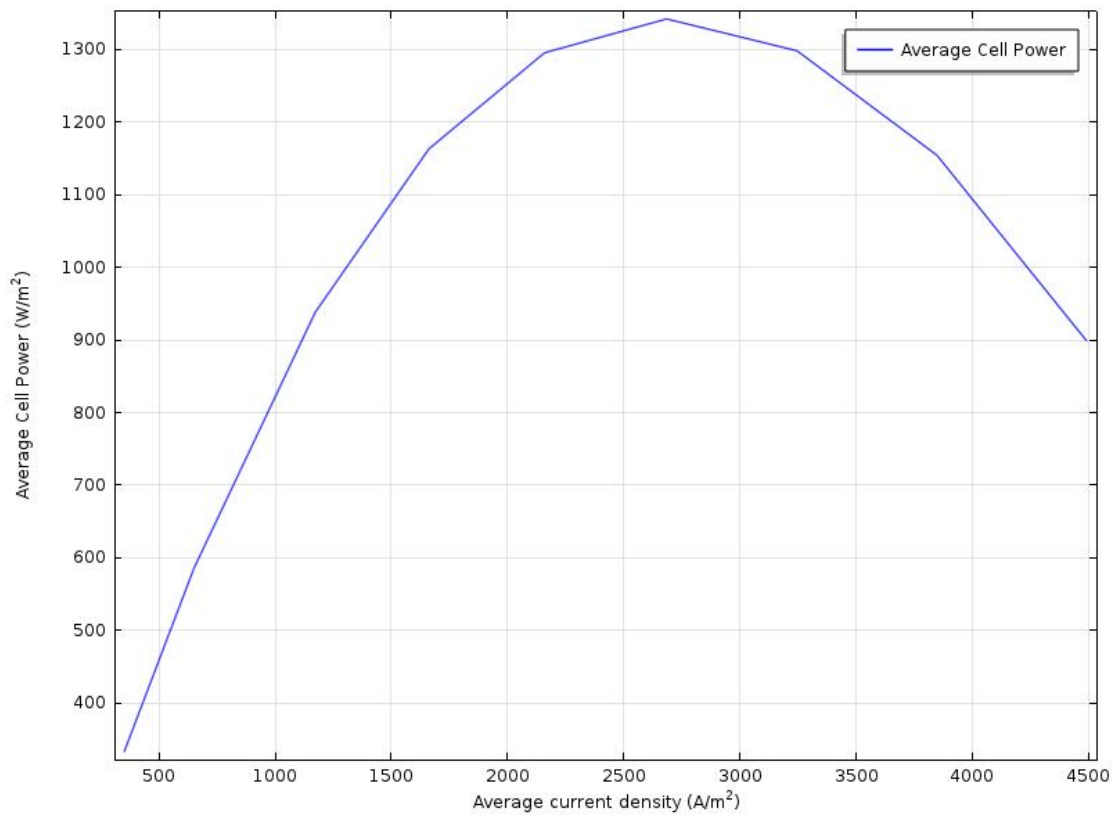


ภาพที่ 4-12 กราฟโพลาริเซชัน โดยที่มีค่า Permeability ที่  $1.98 \times 10^{-10}$  และค่า Porosity ที่ 0.55

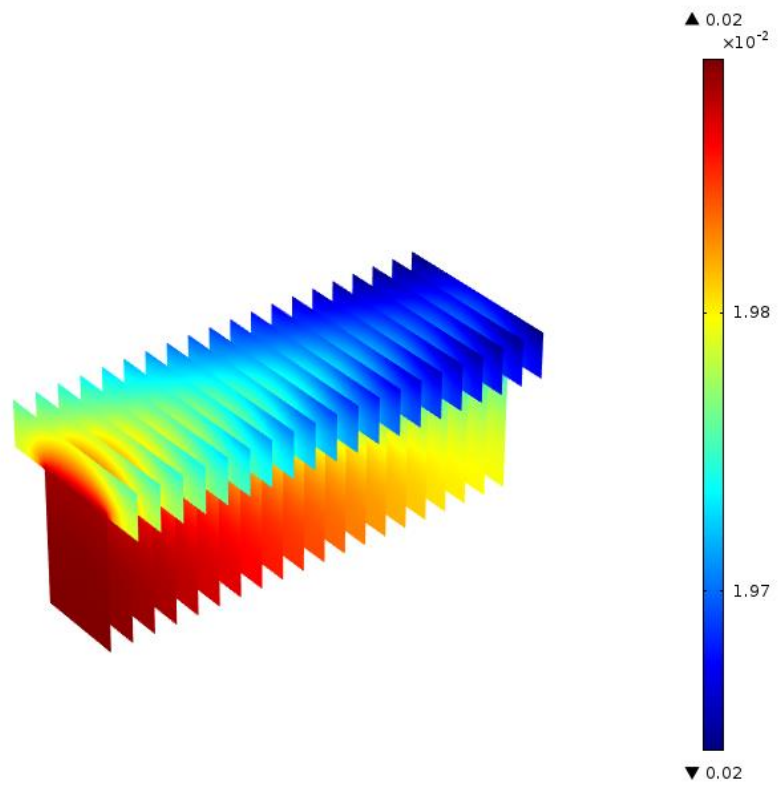




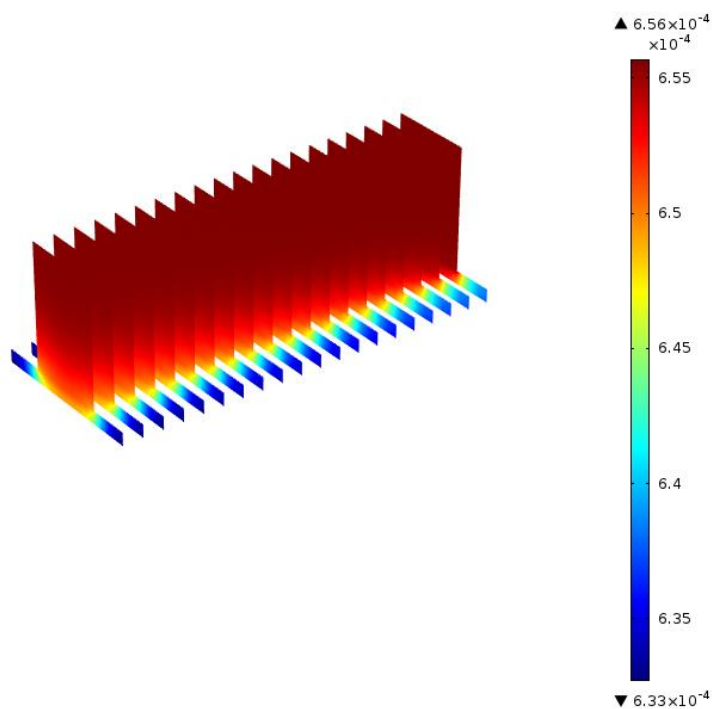
ภาพที่ 4-13 กราฟพลังงานกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยที่มีค่า Permeability  
ที่  $1.16 \times 10^{-9}$  และค่า Porosity ที่ 0.45



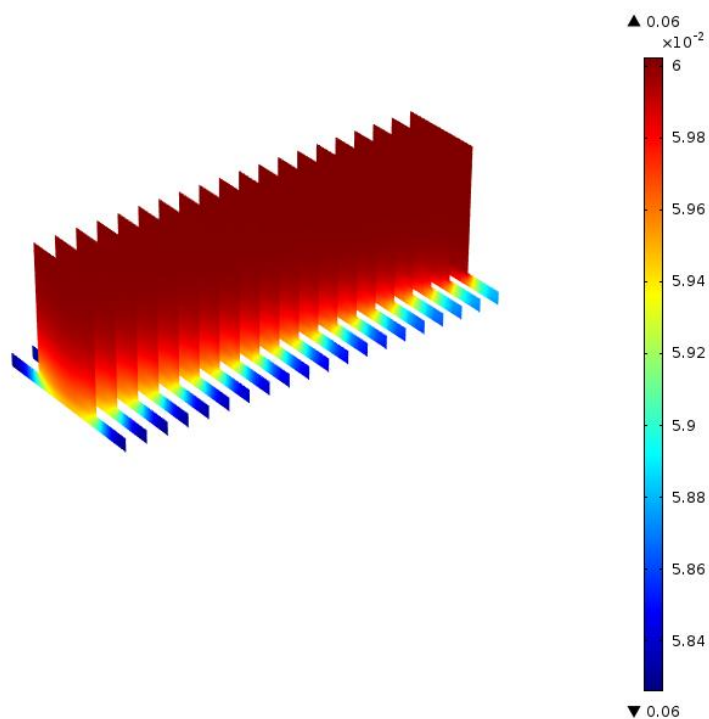
ภาพที่ 4-14 เป็นกราฟพลังงานกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยที่มีค่า Permeability ที่  $1.98 \times 10^{-10}$  และค่า Porosity ที่ 0.45



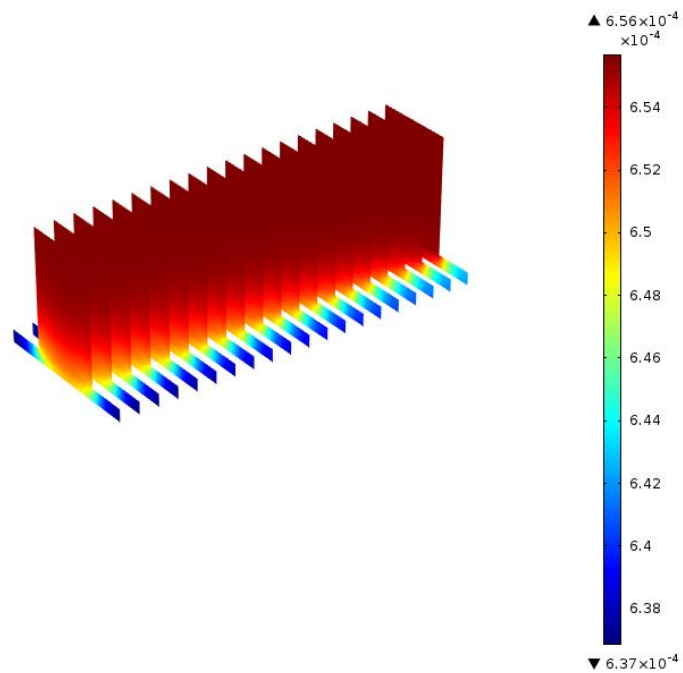
ภาพที่ 4-15 การกระจายตัวของไฮโดรเจนในแอนด แคโทด ซึ่งมีค่า Permeability  
ที่  $1.16 \times 10^{-9}$  และค่า Porosity ที่ 0.45



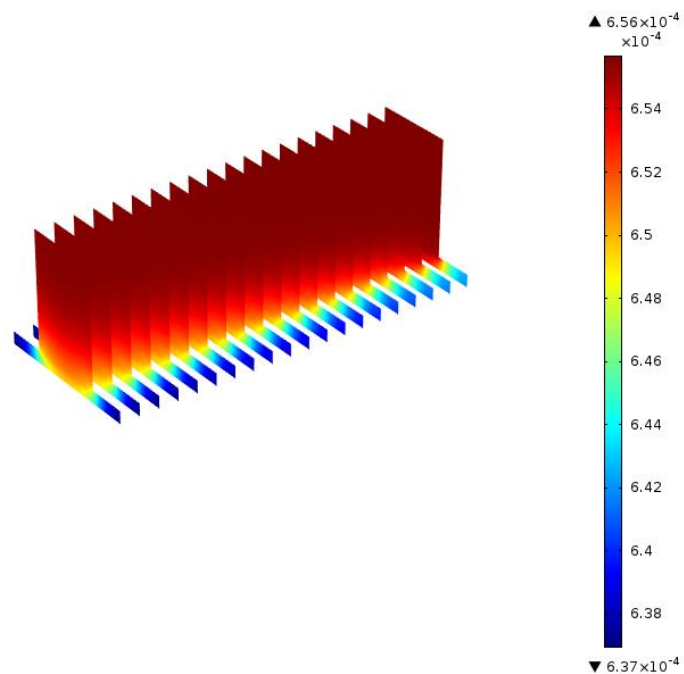
ภาพที่ 4-16 การกระจายตัวของออกซิเจนเจนในแคโทด ซึ่งมีค่า Permeability  
 ที่  $1.16 \times 10^{-9}$  และค่า Porosity ที่ 0.45



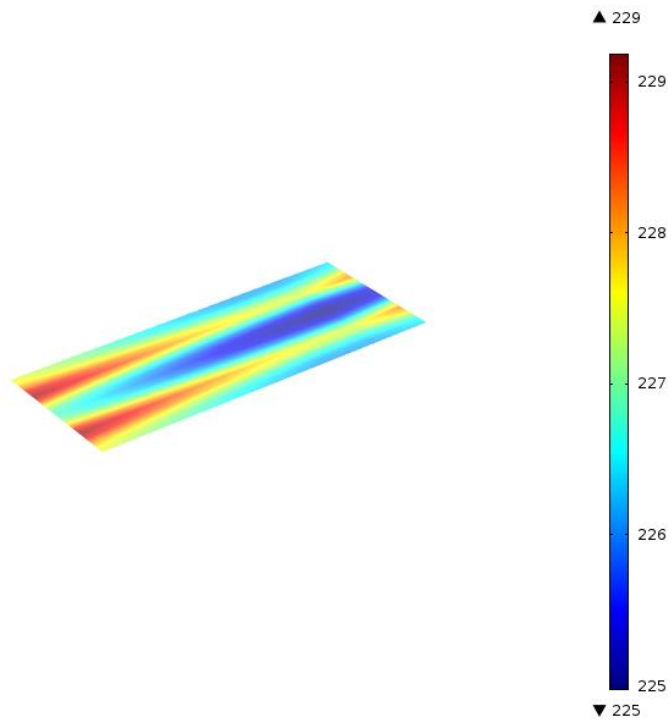
ภาพที่ 4-17 การกระจายตัวของออกซิเจนเจนในแคโทด ซึ่งมีค่า Permeability  
 ที่  $1.16 \times 10^{-9}$  และค่า Porosity ที่ 0.55



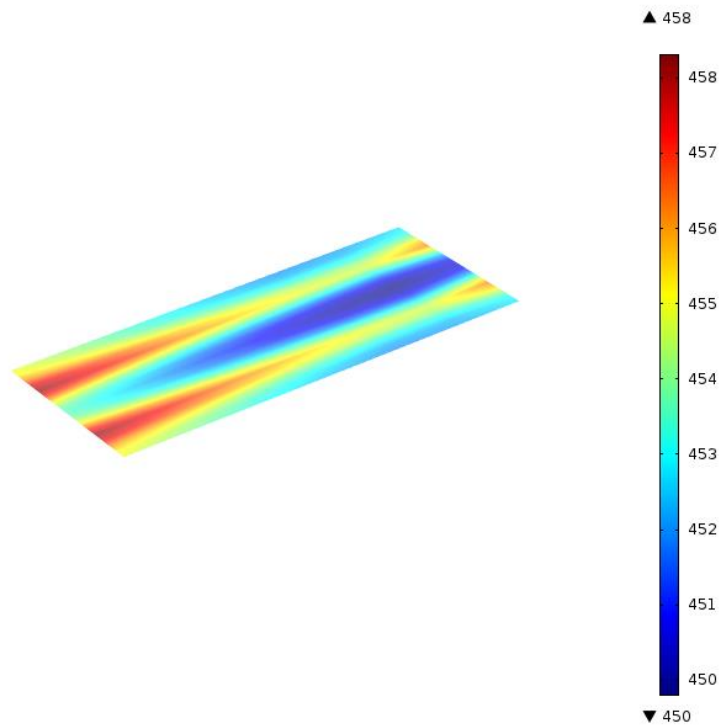
ภาพที่ 4-18 การกระจายตัวของออกซิเจนเจนในแคโทด Permeability ที่  $1.98 \times 10^{-10}$   
 และค่า Porosity ที่ 0.45



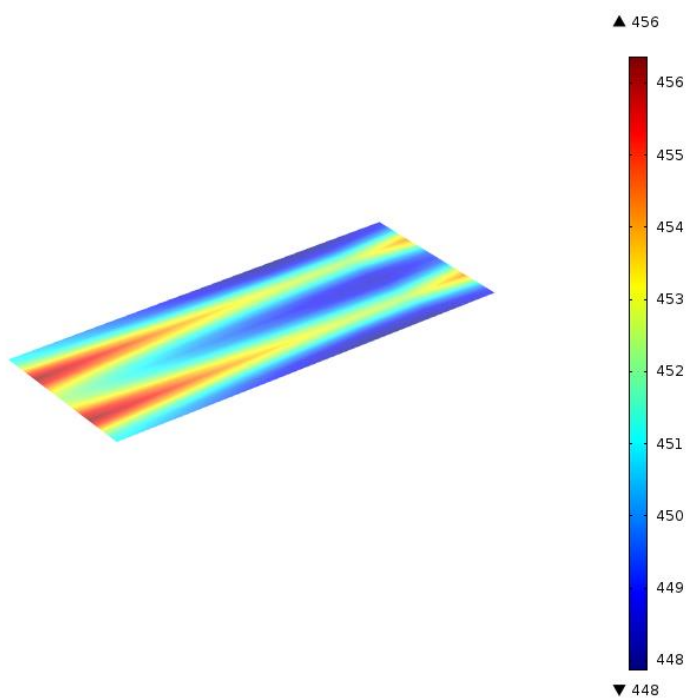
ภาพที่ 4-19 การกระจายตัวของออกซิเจนเจนในแคโทด Permeability ที่  $1.98 \times 10^{-10}$   
 และค่า Porosity ที่ 0.45



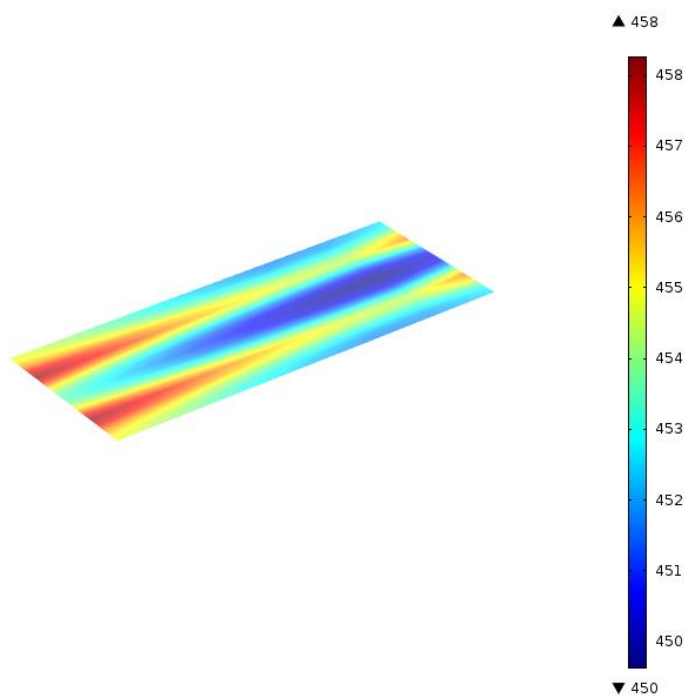
ภาพที่ 4-20 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อ Permeability ที่  $1.16 \times 10^{-9}$   
และค่า Porosity ที่ 0.45



ภาพที่ 4-21 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อ Permeability ที่  $1.16 \times 10^{-9}$   
และค่า Porosity ที่ 0.55



ภาพที่ 4-22 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อ Permeability ที่  $1.98 \times 10^{-10}$   
และค่า Porosity ที่ 0.45



ภาพที่ 4-23 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อ Permeability ที่  $1.98 \times 10^{-10}$   
และค่า Porosity ที่ 0.55

เมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าค่า เมื่อเปลี่ยนค่า Permeability และค่า Porosity จะส่งผลต่อการไหลไรเซชัน คือ ที่ Permeability ที่  $1.16 \times 10^{-9}$  และค่า Porosity 0.45 จะทำให้มีการไหลไรเซชันที่ดีกว่า Permeability ที่  $1.98 \times 10^{-10}$  และค่า Porosity ที่ 0.55 ในส่วนของค่าพลังงาน จะพบว่า การปรับ Permeability  $1.16 \times 10^{-9}$  จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่า Permeability ที่  $1.98 \times 10^{-10}$  ที่ Porosity 0.45 เท่ากัน การกระจายตัวของไฮโดรเจนในแอโนดพบว่า การปรับเปลี่ยนค่า Permeability และค่า Porosity ส่งผลต่อการกระจายตัวของไฮโดรเจนเพียงเล็กน้อย การกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทดพบว่าการปรับเปลี่ยนค่า Permeability และค่า Porosity ส่งผลต่อการกระจายตัวของออกซิเจนในแคโทดเล็กน้อย



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 1. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองเชิงตัวเลขและการศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง โดยงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการค้นคว้า เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมาเกี่ยวกับความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับออกไซด์แข็ง การพัฒนาวัสดุของออกไซด์แข็งดังกล่าว รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำแบบจำลองเชิงตัวเลขมาศึกษาสมรรถนะของออกไซด์แข็ง

การศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีการเปลี่ยนพลังงานทางเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงซึ่งแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งอยู่บนพื้นฐานของสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม พลังงานไฟฟ้า และสปีชีส์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงการจำลองที่สำคัญได้แก่ สมการการไหล การแพร่ การถ่ายเทความร้อน สมการปฏิกิริยาเคมีและสมการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นสมการควบคุม การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของเชื้อเพลิงภายในขั้วแอโนด ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนภายในขั้วแคโทด การถ่ายเทมวลของก๊าซแต่ละชนิด การแพร่ภายในวัสดุพอร์นที่ตัวอิเล็กโทรด (Porous Media Flow) ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจะประกอบเป็นประโยชน์สำหรับการศึกษเกี่ยวกับแบบจำลองเชิงตัวเลขและการศึกษาสมรรถนะของแข็งออกไซด์ ในงานวิจัย

แบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการศึกษาสมรรถนะของออกไซด์แข็ง ซึ่งสามารถหาแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีความถูกต้องของระบบได้เพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์ระบบ โดยพิจารณาออกไซด์ของแข็ง 3 มิติ 1 เซลล์ ประกอบด้วย ช่องการไหล แอโนด ช่องการไหลแคโทด ขั้วแอโนด ขั้วแคโทดและอิเล็กโทรไลต์ จำลองแบบโดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics และจำลองแบบเชิงตัวเลขโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีทั้งหมด 3 แบบ แบบหยาบ แบบปกติ และแบบละเอียด และได้ว่าแบบที่เหมาะสมกับโดเมนที่สุดคือแบบปกติ ซึ่งจะแบ่งโดเมนเป็นรูป Hexahedron จำนวน 2748 เอลิเมนต์ 3296 จุดต่อจำนวนที่อุณหภูมิ 800 และ 1000 องศาเซลเซียส 4 กรณี คือ ชุดที่ 1 กรณีศึกษา โดเมนที่ส่งผลต่อค่าพลังงาน ชุดที่ 2 กรณีศึกษา อุณหภูมิที่ส่งผลต่อโดเมน ชุดที่ 3 กรณีศึกษา เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่มีความละเอียดต่างกัน ชุดที่ 4 กรณีศึกษา ค่า Permeability กับค่า Porosity และมุ่งศึกษาสมรรถนะของออกไซด์แข็งเป็นสำคัญซึ่งผลการทดลองเป็นดังนี้

### 1.1 กรณีศึกษาโดเมนที่ส่งผลต่อค่าพลังงาน

พบว่า โดเมนในแบบที่หนึ่ง ที่มีค่า permeability เป็น  $1.16 \times 10^{-9}$  และค่า Porosity 0.45 ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด  $1223.79272 \text{ W/m}^2$  โดเมนแบบที่สอง ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด  $1352.99255 \text{ W/m}^2$  จึงสรุปได้ว่าการปรับโดเมน มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ SOFC

### 1.2 กรณีศึกษา อุณหภูมิที่มีผลต่อโดเมนแต่ละโดเมน

พบว่า ในแต่ละโดเมนเมื่อใช้ค่าอุณหภูมิ ที่ 800 องศาจะให้ค่าพลังงานที่มากกว่า 1000 องศา เช่น โดเมนที่ใช้ค่า Permeability เป็น  $1.98 \times 10^{-10}$  กับค่า Porosity 0.45 เมื่อใช้ค่าอุณหภูมิ เป็น 800 องศา จะให้ค่าพลังงานเป็น  $1445.59204 \text{ W/m}^2$  แต่เมื่อใช้อุณหภูมิเป็น 1000 องศา ค่าพลังงานกลับลดลงเป็น  $1352.23836 \text{ W/m}^2$  ดังนั้น ผลการวิจัยพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือ โดเมนจะให้พลังงานสูงสุดที่ 800 องศา

### 1.3 กรณีศึกษา การแบ่งเอลิเมนต์ของ เซลล์เชื้อเพลิง

พบว่า การแบ่งเอลิเมนต์ทั้งสามแบบทั้งแบบหยาบจะให้ค่าพลังงานไฟฟ้า เป็น  $1454.31055 \text{ W/m}^2$  ใช้เวลา 78.26 นาที แบบปกติจะให้ค่าพลังงานไฟฟ้า  $1359.39648 \text{ W/m}^2$  ใช้เวลา 4.19 นาที และแบบละเอียดให้ค่าพลังงานไฟฟ้า  $1627.57703 \text{ W/m}^2$  และใช้เวลา 326.33 นาที แต่ละโดเมนใช้เวลาในการประมวลผลที่ต่างกันแต่ให้ค่าพลังงานไม่แตกต่างกันมากนัก ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้วิธีการแบ่งที่ใช้เวลาน้อยที่สุดในการประมวลผล

### 1.4 กรณีศึกษาค่า Permeability กับค่า Porosity

จากการปรับค่า Permeability (ค่าการซึมผ่านได้) กับค่า Porosity (ความพรุน) ให้เท่ากันที่ และ แต่ปรับค่า Porosity ให้เป็น และ พบว่า เมื่อค่า Permeability เท่าเดิม แต่ปรับค่า Porosity ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นและแปรผันตรงกับค่า Porosity แต่ถ้าพิจารณา ค่า Permeability ที่แตกต่างกัน แต่ Porosity เท่ากัน จะเห็นว่า ค่า Permeability ที่ลดลงทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าลดลงด้วย

## 2. ข้อเสนอแนะ

2.1 การศึกษาวัสดุเซรามิกที่จะนำมาเป็นขั้วแอโนดแคโทดและอิเล็กโทรไลต์นั้นปัจจุบันใช้เป็นวัสดุผสมซึ่งไม่ได้ศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุไว้ก่อน ดังนั้นในการจะค่าความพรุนและค่าการซึมผ่านได้เพื่อนำมาเป็นค่าพารามิเตอร์จึงเป็นเรื่องที่ยาก

2.2 ศึกษาประสิทธิภาพของออกไซด์แข็ง ทั้งค่าการซึมผ่านได้ความพรุน และค่าอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องและจำเป็นที่ทำให้พลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุดภายใต้ สภาวะการทดลองเดียวกันซึ่งอาจจะมีสมการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

## บรรณานุกรม

- กิตติ์ชนภูมิ ว่องวรานนท์. (2556). เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) พลังงานสะอาดจาก  $H_2$ .  
วารสารกรมอุทกหารเรือประจำปี 2556, 165-169.
- ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, นัทธมน คุณแสง และอภิรัตน์ เลาห์บุตรี. (2553). การเพิ่มสภาพนำไอออน  
ของวัสดุอิเล็กโทรไลต์ออกไซด์. วารสารวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,  
23(72), 39-53.
- ญาณีพร พัชรวร โชติ และอมรชัย อภรณ์วิชานพ. (2559). พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิด  
ออกไซด์แข็ง. *Technology Promotion and Innomag Magazine*, 42(50).
- พลากร พรหมเมษฐ์. (2555). เซลล์เชื้อเพลิงพลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต.  
วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, 7(2).
- ศศิธร งามแพรวพราว, สีนินาญ ศรีมงคล, สหัทธยา รัตนะมงคลกุล และดวงกมล ผลเต็ม. (2557).  
ผลของความหนาแน่นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์  
ของแข็ง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 33(6), 537-545.
- ศิริวรรณ โชคคำ. (2011). สมบัติทางฟิสิกส์ของแลนทานัมนิเกิลเลตที่มีโครงสร้างแบบ  
*Ruddlesden-Popper* ประกอบด้วยเพอโรฟสไกต์ 3 ชั้นเพื่อใช้เป็นวัสดุแคโทดสำหรับ  
เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชา  
วิศวกรรมเซรามิก, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อภิชาติ บุญทาวัน. (2557). รายงานการวิจัยเรื่องถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง  
เอทานอล. นครราชสีมา: สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
สุรนารี.
- อภิรัตน์ เลาห์บุตรี และนัทธมน คุณแสง. (2547). Fuel Cell Research Development of Oxide  
Fuel Cell. *วิศวกรรมสาร มก*, 547(52), 66-76.
- Aguiar, P., Adjiman, C.S., & Brandon, N.P. (2004). Anode-supported intermediate-temperature  
direct internal reforming solid oxide fuel cell. I : Model-based steady-state  
performance. *Journal of Power Sources*, 2004 (138), 120-136.
- Badwal, S.P.S., & Foger, K. (1996). Solid Oxide Electrolyte Fuel Cell Review.  
*Ceramics International*, 1996(22), 257-265.

- Burt, A.C., Celik, I.B., Gemmen, R.S., & Smirnov, A.V. (2004). A numerical study of cell-to-cell variations in a sofc stack. *Journal of Power Sources*, 2004 (126), 76–87.
- Chan, S.H., Khor, K.A., & Xia, Z.T. (2001). A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness. *Journal of Power Sources*, 2001 (93), 130–140.
- Costamagna, P., Selimovic, A., Borghi, M.D., & Agnew, G. (2004). Electrochemical model of the integrated planar solid oxide fuel cell (IP-SOFC). *Chemical Engineering Journal*, 2004 (102), 61–69.
- Ferguson, J.R., Fiard, J.M., & Herbin, R.(1996). Three-dimensional numerical simulation for various geometries of solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 1996 (58), 109–122.
- Hernandez-Pacheco, E., Singh, D., Hutton, P.N., Patel, N., & Mann, M.D. (2004). A macro-level model for determining the performance characteristics of solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 138(1-2), 174–186.
- Hirschenhofer, J.H., Stauffer, D.B., & Klett, M.G. (1998). *Fuel Cell Handbook* (4<sup>th</sup>ed.). Reading:Parsons Corporation.
- Jamsak, W., Assabumrungrat, S., Douglas, P.L., Laosiripojana, N., Suwanwarangkul, R., Charojrochkul, S., & Croiset, E. (2007). Performance of ethanol-fuelled solid oxide fuel cells : Proton and oxygen ion conductors. *Chemical Engineering Journal*, 2007 (133), 187–194.
- Kawamoto, H. (2008). Research and Development Trend in Solid Oxide Fuel Cell Materials. *Science & Technology Trends*, 2008, 52-70.
- Liou, Y.C., & Yang, S.L. (2008).A simple and effective process for  $Sr_{0.995}Ce_{0.95}Y_{0.05}O_3$  and  $BaCe_{0.9}Nd_{0.103}$  solid electrolyte ceramics. *Journal of Powder Sources*, 179(2008), 553 - 559.
- Min Yan., Pei Fu, Xiang Li Min Zeng, & Qiuwang Wang.(2015). Mass transfer enhancement of a spiral-like interconnector for planer solid fuel cells. *Applied Energy*, 2015(160), 954-964.

- Ni, M., Leung, M.K.H., & Leung, D.Y.C. (2007). Parametric study of solid oxide fuel cell performance. *Energy conversion and Management*, 2007(48), 1525-1535.
- Nomura, K., Mizutani, Y., Kawai, M., Nakamura, Y., & Yamamoto, O. (2000). Aging and Raman scattering study of Scandia and yttria doped zirconia. *Solid State Ionics*, 2000(132), 235 - 239.
- Patcharavorachot, Y., Arpornwichanop, A., & Chuachuensuk, A. (2008). Electrochemical study of a planar solid oxide fuel cell : Role of support structures. *Journal of Power Sources*, 2008(177), 254-261.
- Patcharavorachot, Y., Paengjuntuek, W., Assabumrungrat, S, & Arpornwichanop, A. (2010). Performance evaluation of combined solid oxide fuel cells with different electrolytes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010(35), 4301-4310.
- Patcharavorachot, Y., Brandon, N.P., Paengjuntuek, W., Assabumrungrat, S., & Arpornwichanop, A. (2010). Analysis of Planar Solid Oxide Fuel Cells based on Proton-Conducting Electrolyte. *Solid State Ionics*, 2010(181), 1568-1576.
- Qi, Y., Biao, H., & Chuang, K.T. (2005). Dynamic modeling of solid oxide fuel cell : The effect of diffusion and inherent impedance. *Journal of Power Sources*, 2005(150), 32–47.
- Simon, W.E., & Nored, D. L. (1987). Manned Spacecraft Electrical Power Systems. *Proceeding of the IEEE*, 75(3), 277-307.
- Suwanwarangkul, R., Croiset, E., Fowler, M.W., Douglas, P.L., Entchev, E., & Douglas, M.A. (2003). Performance comparison of Fick's, dusty-gas and Stefan–Maxwell models to predict the concentration overpotential of a SOFC anode. *Journal of Power Sources*, 2003(122), 9–18.
- Wang, S., Worek, W.M., & Minkowycz, W.J. (2012). Performance comparison of the mass transfer models with internal reforming for solid oxide fuel cell anodes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 3933-3945.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

งานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

# Numerical Simulation of Solid Oxide Fuel Cell: Mesh Sensitivity Analysis

**Kantapon Chaisena**

Department of Mathematics, Faculty of Science  
Burapha University, Thailand

**Sineenart Srimongkol\***

Department of Mathematics, Faculty of Science  
Burapha University, Thailand

Copyright © 2018 Kantapon Chaisena and Sineenart Srimongkol. This article is distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## **Abstract**

Due to environmental problem from using energy and the fuel fossil is dramatic decreasing from human usage. The alternative renewal energy is maybe the solution. Solid oxide fuel cell is a fuel cell normally using yttrium stabilized zirconia (YSZ). The cost for this fuel cell is now very expensive. Therefore, the mathematical simulation is crucial. Governing equations consist of Maxwell - Stefan equations for chemical transport, current balance equations, and Brinkman equations for flow in porous media. The numerical simulation is then solved with appropriate boundary conditions. However, the verification of the solution is very important. In this research, the mesh sensitivity analysis is performed. The results show that the solutions from three different mesh are closed to each others. It is indicated that the solutions corresponding to mesh sensitivity analysis.

**Mathematics Subject Classification:** 65G99

**Keywords:** Mathematical Simulation, Mesh Sensitivity Analysis, Solid Oxide Fuel Cell

---

\* Corresponding author



## 1 Introduction

Due to global warming and limitation of fossil fuel, alternative energy is crucial. Fuel cell maybe a solution of this problem because it is produces almost no pollution. A fuel cell is a device that can convert fuel directly into electricity using chemical energy. The fuel cell will produce electricity as long as fuel is supplied. Solid oxide fuel cells (SOFCs) offer great flexibility in the choice of fuels; not only pure hydrogen, but also many reformat composition consisting of multi-component species maybe used as fuel, such as water ( $H_2O$ ), carbon-monoxide ( $CO$ ), carbondioxide ( $CO_2$ ), including biofuel. The planar design of SOFCs has the higher power density and simplicity in manufacturing than the tubular design [3, 4, 5]. Therefore, the planar SOFCs are widely used in both small and large scale applications.

Over the last decade, the number of research in solid oxide fuel has been carried out with various investigation [2, 6, 7] . In 2006, Bove and Ubertini [1] investigated the phenomena in each component of solid oxide fuel cell using a three-dimensional, time-dependent numerical model. The results show that the boundary conditions affect the accuracy of the model and represent a significant part of the computation. In 2011, Meng Ni [5] developed a two dimensional thermo-electrochemical model to studied the performance of planar solid oxide fuel cells fed ammonia by using a two dimensional computational fluid dynamics model with an electrochemical model and a chemical model. The result indicates that ammonia in the solid oxide fuel cell impacts the electric output and temperature field. Recently, numerical simulation of porous solid oxide fuel cell was carried out to solve the carbon deposition problem of solid oxide fuel cells using comsol multiphysics commercial software. The modeling result are valid with experiments [8]. However, the studied in mathematical modeling for the solid oxide fuel cell is still crucial due to demand of developing the performance of solid oxide fuel cell because of the cost of experiments. Thus, in this work, the mathematical modeling of planar solid oxide fuel cell is investigated. Moreover, the mesh analysis is performed to show the effect of mesh quality on numerical results of the model.

## 2 Mathematical Model

Solid oxide fuel cells normally produced electrical power by added cells into the stack. To model the solid oxide fuel cell, a single cell solid oxide fuel as shown in figure 1 is assumed to produce a unit of electrical power to save time and computational resources. The computational domain is created as shown in the figure 2.

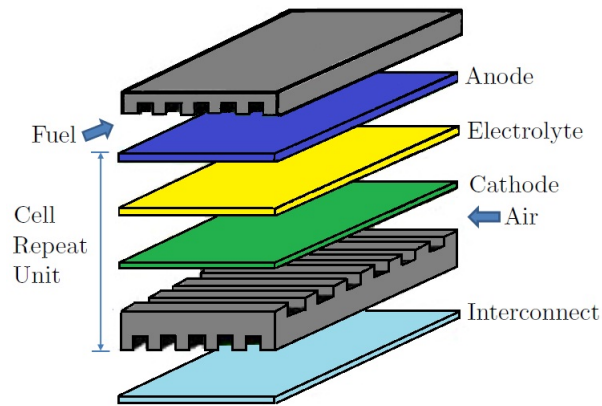


Figure 1: Three dimensional of a single cell planar solid oxide fuel cell.

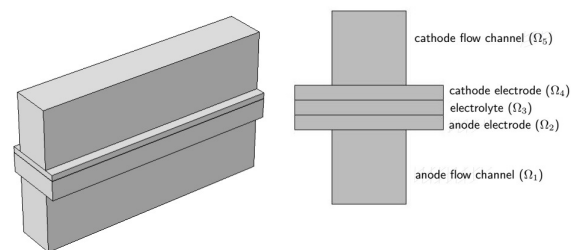


Figure 2: Configuration of a unit cell solid oxide fuel cell; anode flow channel ( $\Omega_1$ ), anode electrode ( $\Omega_2$ ), electrolyte ( $\Omega_3$ ), cathode electrode ( $\Omega_4$ ), and cathode flow channel ( $\Omega_5$ ).

## 2.1 Governing Equations

The governing equations consist of Maxwell-Stefan equations for chemical transport as shown in equation (1)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_i) + \nabla \cdot (\rho c_i \mathbf{u}) = -\nabla \cdot \mathbf{j}_i + \mathbf{R}_i \quad (1)$$

where,  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) is the mixture density,  $\mathbf{u}$  ( $m/s$ ) is the mass average velocity of the mixture,  $c_i$  is the mass fraction,  $\mathbf{j}_i$  ( $kg/(m^2s)$ ) is the mass flux relative to the mass average velocity, and  $R_i$  ( $kg/(m^3s)$ ) is the rate expression describing its production or consumption.

The current balance in the electrolyte is governed by

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \mathbf{Q}, \quad \text{in } \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4 \quad (2)$$

where  $\mathbf{J}$  denotes the current density vector in the electrolyte,  $\mathbf{Q}$  can be any source or sink. Navier-Stokes equations for describing the flow in open regions, and the Brinkman equations for the flow in porous regions are shown in equations (3)-(6).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_c) = 0, \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}_c}{\partial t} + \rho (\mathbf{u}_c \cdot \nabla) \mathbf{u}_c = \nabla \cdot \left[ -p_c \mathbf{I} + \mu \left( \nabla \mathbf{u}_c + (\nabla \mathbf{u}_c)^T \right) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}_c) \mathbf{I} \right] + \mathbf{F}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\epsilon_p \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_c) = Q_{br} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{\epsilon_p} \left( \frac{\partial \mathbf{u}_c}{\partial t} + (\mathbf{u}_c \cdot \nabla) \frac{\mathbf{u}_c}{\epsilon_p} \right) &= \nabla \cdot \left[ -p_c \mathbf{I} + \frac{\mu}{\epsilon_p} \left( \nabla \mathbf{u}_c + (\nabla \mathbf{u}_c)^T \right) - \frac{2\mu}{3\epsilon_p} (\nabla \cdot \mathbf{u}_c) \mathbf{I} \right] \\ &\quad - \left( \frac{\mu}{\kappa_{br}} + \beta_F |\mathbf{u}_c| + \frac{Q_{br}}{\epsilon_p^2} \right) \mathbf{u}_c + F \end{aligned} \quad (6)$$

where  $\mu$  ( $kg/(m \cdot s)$ ) is the dynamic viscosity,  $\mathbf{u}_c$  ( $m/s$ ) is the velocity vector,  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) is the density,  $p_c$  ( $Pa$ ) is the pressure,  $\epsilon_p$  is the porosity,  $\kappa_p$  ( $m^2$ ) is the permeability of the porous medium, and  $Q_{br}$  ( $kg/(m^3 \cdot s)$ ) is a mass source or sink.  $\beta_F |\mathbf{u}_c| \mathbf{u}_c$  is viscous force proportional to the square of the fluid velocity where  $\beta_F$  is the Forchheimer drag option ( $kg/m^4$ ).

## 2.2 Boundary Conditions

The fuel feed in the cathode and anode is counterflow, with hydrogen-rich anode gas entering from the left. For the ionic charge balance equations in cathode electrode, electrolyte, and anode electrode, the insulating boundary condition is applied on all external boundaries as shown below.

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0. \quad (7)$$

For the transport of species in anode, initial mass fraction ( $\omega_{h_2}$ ) 0.4 is used at the left of the anode flow channel. The outflow is at the right of the anode flow channel. No flux boundary condition is applied to all external boundaries of the anode electrode and the anode flow channel as given below.

$$-\mathbf{n} \cdot (\mathbf{j}_i + \rho \mathbf{u} \omega_i) = 0. \quad (8)$$

## 3 Numerical Results

There are 3 different mesh as shown in Figure 3. The numerical solutions of the fully couple equations (1) - (6) and all boundary conditions are obtained by Comsol Multiphysics.

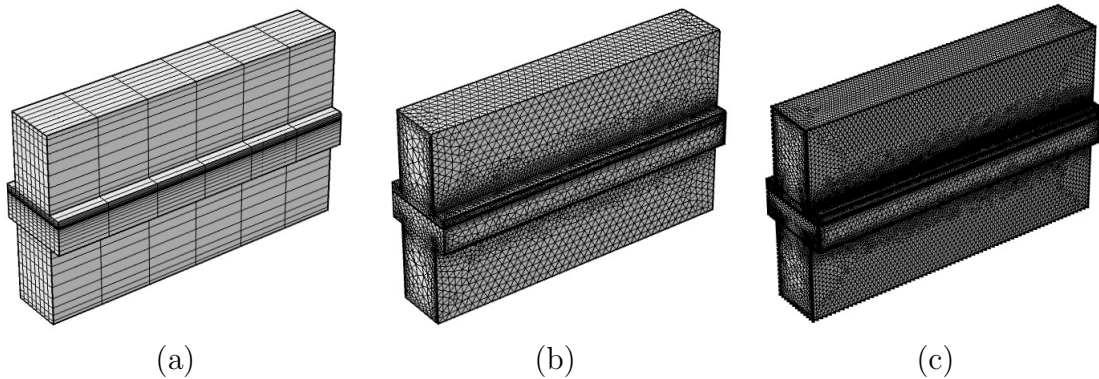


Figure 3: Computational mesh for a unit cell solid oxide fuel cell (a) 2,328 hexahedral elements (b) 144,943 tetrahedral elements (c) 707,828 tetrahedral elements.

Numerical simulation of the hexahedral elements are shown in Figure 4. The results when use different mesh are the same patterns. The values of maximum average current density and maximum average cell power are calculated as showned in Table 1. It is easy to see that time depends on number of elements. Due to the exact solution of the model still undiscovered. The average relative error ( $E_a$ ) is computed using formula as shown in equation

Table 1: Values of average current density, average cell power, and computational time of the different elements mesh.

	Elements (Number)	Average Current Density ( $A/m^2$ )	Average Cell Power ( $W/m^2$ )	Computational Time (Minute)
Hexahedral	2,328	4,567.54257	1,359.39648	4.19
Tetrahedral	144,943	4,869.31055	1,454.31055	78.26
Tetrahedral	707,828	5,411.87402	1,627.57703	326.33

(9). The average relative errors of average current density are 7.72%, 1.62%, and 9.34%, respectively. Due to the computational time and average relative errors, the governing equations with hexahedral elements as shown in figure 2 (a) should be used in further investigation of the solid oxide fuel cell.

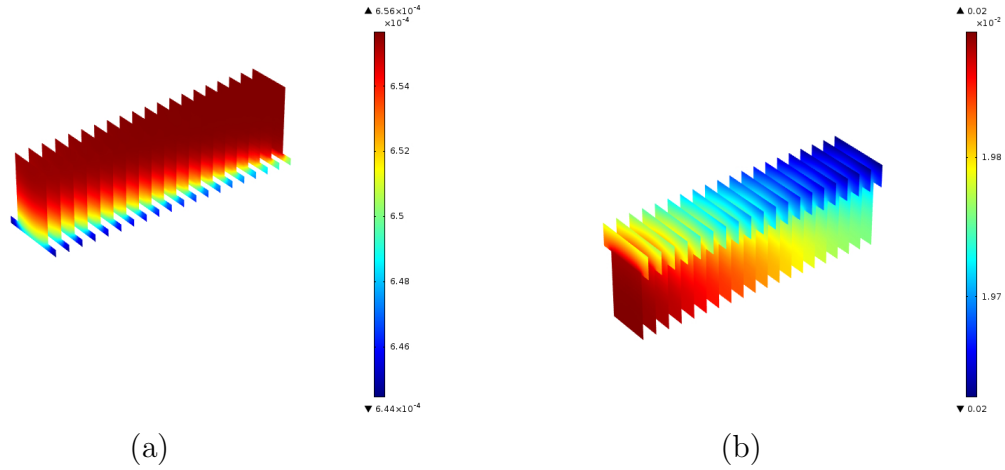


Figure 4: Surface plot of the numerical results using 2,328 hexahedral elements (a) oxygen mole fraction (b) hydrogen mole fraction.

$$E_a = \left| \frac{\text{approximate solution} - \text{average solution}}{\text{average solution}} \right| \quad (9)$$

## 4 Conclusion

From the number of research in alternative renewal energy, solid oxide fuel cell is a kind of clean energy for the future. To investigate the new design or physical property in the cell, mathematical simulation is crucial. The mesh sensitivity analysis is used to make sure that the simulation result is stable. In this paper, three different mesh sizes are investigated with average relative error and computational times. The result show that the hexahedral elements suit for solving the governing equations of the single cell solid oxide fuel cell.

## References

- [1] R. Bove and S. Uvertini, Modeling solid oxide fuel cell operation: Approaches, techniques and results, *Journal of Power Sources*, **159** (2006), 543 - 559. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.11.045>
- [2] S. Ahmad Hajimolana, M. Azlan Hussain, W.M. Ashri Wan daud, M. Soroush and A. Shamiri, Mathematical modeling of solid oxide fuel cells: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15** (2011), 1983 - 1917. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.011>
- [3] M.M. Hussain, X. Li and I. Dincer, Mathematical modeling of planar solid oxide fuel cells, *Journal of Power Sources*, **161** (2006), 1012 - 1022. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.05.055>
- [4] M.M. Hussain, X. Li and I. Dincer, Mathematical modeling of transport phenomena in porous SOFC anodes, *International Journal of Thermal Sciences*, **46** (2007), 48 - 56. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.04.004>
- [5] M. Ni, Thermo-electrochemical modeling of ammonia-fueled solid oxide fuel cells considering ammonia thermal decomposition in the anode, *International Journal of Hydrogen Energy*, **36** (2011), 3153 - 3166. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.100>
- [6] R.T. Nishida, S.B. Beale, J.G. Pharoah, L.G.J. de Haart and L. Blum, Three-dimensional computation fluid dynamics modelling and experimental validation of the jlich mark-f oxide fuel cell stack, *Journal of Power Sources*, **373** (2018), 203 - 210. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.10.030>
- [7] Z. Qu, P.V. Aravind, S.Z. Boksteen, N.J.J. Dekker, A.H.H. Janssen, N. Woudstra and A.H.M. Verkooijen, Three-dimensional computational fluid dynamics modeling of anode-supported planar SOFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, **36** (2011), 10209 - 10220. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.018>
- [8] H. Xu, B. Chen, P. Tan, W. Cai, W. He, D. Farrusseng and M. Ni, Modeling of all porous solid oxide fuel cells, *Applied Energy*, **219** (2018), 105 - 113. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.037>

**Received: May 25, 2018; Published: June 18, 2018**