

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าคอมโพสิต  $\text{LaSr}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง

Development of  $\text{LaSr}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  composites as Electrode for Solid oxide fuel cell



โดย

นายวัชรพล พัตยนตร์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

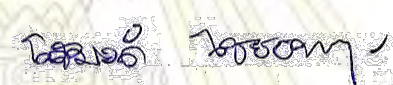
ปีการศึกษา 2558


ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เรื่อง การพัฒนาซ้ำไฟฟ้าคอมโพสิต  $\text{LaSr}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง  
โดย นายวัชรพล พัดยন্ত্র  
ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


คณะกรรมการสอบโครงการ

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวรักษ์ เพ็องสวัสดิ์)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสมวดี ไชยอนันต์สุจริต)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.เจนจิรา ปานชมพู่)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

วันที่ 10 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2559

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ  ดีมาก  ดี  พอใช้

ชื่อโครงการ                      การพัฒนาขั้วไฟฟ้าคอมโพสิต  $\text{LaSr}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์  
ของแข็ง

ชื่อนิสิตในโครงการ            นายวัชรพล พัฒนตร์            เลขประจำตัว 5533149223

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา            ผศ.ดร.โสมวดี ไชยอนันต์สุจริต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2558

### บทคัดย่อ

สารประกอบเพอรอฟสไกต์ออกไซด์แบบสามชั้นของ  $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa0.3) และ  $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa0.5) สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีในเตרתซิเตรตประยุกต์ และนำไปพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าคอมโพสิตแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วแคโทดคอมโพสิตชนิดต่างๆ ที่มี LSGM เป็นอิเล็กโทรไลต์ และ  $\text{NiO-Fe}_2\text{O}_3$  เป็นขั้วแอโนด จากค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ ผลการศึกษาพบว่า เซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิตร่วม LSCa0.3-LSCa0.5 ในอัตราส่วน 50:50% โดยน้ำหนัก และเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นของ LSCa0.3-LSCa0.5 ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดเดียวของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 นอกจากนี้ยังให้ค่าความต้านทานจำเพาะต่อพื้นที่ผิวต่ำกว่าด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคและการนำออกไซด์ไอออนของสารที่ดี ในขณะที่เซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิตของ LSCa0.3-LSGM ในอัตราส่วน 50:50% โดยน้ำหนัก และขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิตของ LSCa0.5-LSGM ในอัตราส่วน 50:50% โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าต่ำ และมีค่าความต้านทานจำเพาะต่อพื้นที่ผิวสูง เนื่องจากสมบัติการนำอิเล็กตรอนที่น้อยของ LSGM และการยึดเกาะระหว่างขั้วแคโทดและอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ดี ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นของ LSCa0.3-LSCa0.5 โดยการเคลือบ LSCa0.3 ลงบนชั้นของ LSCa0.5 จะให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด เท่ากับ 465.39 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และเซลล์มีอายุการใช้งานประมาณ 120 นาที

คำสำคัญ: สารประกอบเพอรอฟสไกต์แบบสามชั้น เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง ขั้วแคโทด คอมโพสิต

Title: Development of  $\text{LaSr}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  composites as Electrode for Solid oxide fuel cell

Student name: Mr. Wutcharapon Putyon ID 5533149223

Advisor name: Assist. Prof. Dr. Soamwadee Chaianansutcharit

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2015

### Abstract

Triple layer perovskite oxide intergrowth structure of  $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa0.3) and  $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa0.5) were synthesized *via* a Nitrate-Citrate route and developed as composite cathode for solid oxide fuel cell (SOFC). The single cell performance of composite cathodes with LSGM electrolyte and  $\text{NiO-Fe}_2\text{O}_3$  anode were investigated using power density and impedance measurement. Among composite cathodes examined, a 50:50%wt LSCa0.3-LSCa0.5 composite cathode and double layered LSCa0.3-LSCa0.5 cathodes exhibited higher maximum power density and lower specific area resistance than single cathodes, LSCa0.3 and LSCa0.5. This may be attributed to the improvement in microstructure and oxide ion conductivity of materials. In contrast, cell using the 50:50%wt LSCa0.3-LSGM composite cathode and 50:50%wt LSCa0.5-LSGM composite cathode exhibited low power density and high value of area specific resistance due to a poor electronic conductivity of LSGM and a poor adhesion between cathode and electrolyte. In this work, the maximum power density of  $465.39 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$  at  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  was achieved from the double layered cathode coated LSCa0.3 on the top of LSCa0.5 layer and the stability of this cell can be prolonged for 120 minutes.

Keyword: triple layer perovskite intergrowth structure, solid oxide fuel cell, cathode, composite

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการพัฒนาขั้วไฟฟ้าคอมโพสิต  $\text{LaSr}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง ได้รับความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการคือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสมวดี ไชยอนันต์สุจริต ที่สละเวลาอันมีค่าให้คำปรึกษาแก่ผู้วิจัย ทั้งยังคอยให้ความรู้และคอยชี้แนะอย่างใกล้ชิดตลอดระยะเวลาที่ดำเนินงานวิจัย สิ่งที่อาจารย์ได้สั่งสอนมิได้เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเท่านั้น แต่ยังมีประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิตอีกด้วย นอกจากนี้ยังได้รับความอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวรักษ์ เฟื่องสวัสดิ์ และ อาจารย์ ดร.เจนจิรา ปานชมพู ที่สละเวลามาเป็นคณะกรรมการพิจารณาโครงการวิจัยนี้

ข้อมูลเบื้องต้นภายในงานวิจัยซึ่งช่วยสนับสนุนทำให้งานวิจัยนี้เกิดขึ้นและประสบความสำเร็จซึ่งทำการศึกษาเบื้องต้นโดย นางสาวณิชารีย์ วงศ์สวัสดิ์กุล นิสิตปริญญาเอกคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งไม่เพียงแต่ให้การสนับสนุนข้อมูลการวิจัยเบื้องต้น แต่ยังให้คำปรึกษา และคอยชี้แนะในเรื่องต่างๆ อีกด้วย

การดำเนินงานวิจัยยังได้รับความช่วยเหลือจากนิสิตปริญญาโทภาควิชาเคมี ได้แก่ นางสาวยุพดี อึ้งอาภรณ์ และ นายกิตติวัฒน์ กำลังเสือ ที่คอยให้คำแนะนำ และสนับสนุนการวิจัยอย่างดีมาโดยตลอด

โครงการวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ประจำปี การศึกษา 2558 คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมี ผ.ศ.ดร.วัลภา เอื้องไมตรีภิมย์ เป็นผู้ประสานงานรายวิชา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ที่ได้เอ่ยนามมาในข้างต้นทั้งหมดและจะระลึกถึงตลอดไป

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตารางประกอบ .....	ญ
สารบัญรูปภาพประกอบ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
1.3 วัตถุประสงค์ .....	7
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี .....	
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) .....	8
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell; SOFC).....	9
2.2.1 ขั้วแคโทด (Cathode).....	9
2.2.2 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) .....	10
2.2.3 ขั้วแอโนด (Anode) .....	10
2.2.4 การขึ้นรูปเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวโดยวิธีเซรามิกส์ฟิล์ม .....	11
2.3 สารประกอบเพอรอฟสไกต์ออกไซด์.....	11
2.3.1 การนำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic conductivity) .....	12
2.3.2 การนำไฟฟ้าแบบไอออน (Ionic conductivity) .....	13
2.4 สารประกอบเพอรอฟสไกต์ออกไซด์แบบสามชั้น (triple layer perovskite intergrowth) .....	13
2.5 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์ .....	14

2.5.1 เทคนิคเอกซเรย์พาวเดอร์ดิฟแฟรกชัน (X-ray powder diffraction; XRD)..... 14

2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)..... 15

2.5.3 การหาค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า (Power density) ..... 16

2.5.4 การหาค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance; Z) ..... 17

**บทที่ 3 การทดลอง**

3.1 สารเคมีที่ใช้ ..... 20

3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ ..... 21

3.3 วิธีการทดลอง ..... 22

3.3.1 การสังเคราะห์สารประกอบ  $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa0.3) และ  $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa0.5) ด้วยวิธี โนเตรตซิเตรตประยุกต์ ..... 22

3.3.2 การสังเคราะห์สารประกอบ  $\text{La}_{0.80}\text{Sr}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{Mg}_{0.20}\text{O}_3$  (LSGM) ด้วยวิธี Solid State reaction เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ของเซลล์เชื้อเพลิง ..... 23

3.3.3 การเตรียมสารประกอบ  $\text{NiO-Fe}_2\text{O}_3$  ด้วยวิธี Modified impregnation สำหรับใช้เป็นขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง ..... 23

3.3.4 การเตรียมแผ่นเมมเบรนของ LSCa0.3 และ LSCa0.5..... 24

3.3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างและความบริสุทธิ์ของสารที่สังเคราะห์ได้..... 24

3.3.5.1 การวิเคราะห์ด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) ..... 24

3.3.5.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM)..... 24

3.3.6 การขึ้นรูปเซลล์ไฟฟ้าเดี่ยว (Single cell)..... 24

3.3.6.1 การเตรียมแผ่นอิเล็กโทรไลต์จาก LSGM ที่สังเคราะห์ได้ ..... 24

3.3.6.2 การเตรียมสารส่วนผสมของเหลวกับสารที่สังเคราะห์ได้ (slurries) เพื่อใช้เป็น Cathode paste สำหรับการขึ้นรูปเซลล์เดี่ยว ..... 24

3.3.6.3 การเตรียมสารส่วนผสมของเหลวกับ  $\text{NiO-Fe}_2\text{O}_3$  (slurry) เพื่อใช้เป็น Anode paste สำหรับการขึ้นรูปเซลล์เดี่ยว..... 25

3.3.6.4 การขึ้นรูปเซลล์เดี่ยวด้วยเทคนิคพิมพ์สกรีน (screen printing)..... 25

3.3.7 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว ..... 27

3.3.7.1 การวัดค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า (Power density; P) ของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว  
ที่สังเคราะห์ได้ ..... 27

3.3.7.2 การวัดค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับ (Impedance; Z) ..... 28

3.3.7.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของสารที่ใช้ขึ้นรูปเป็นเซลล์เดี่ยวหลังการทำปฏิกิริยาด้วยกล้อง  
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (SEM) ..... 28

3.3.7.4 การวัดความคงตัว (Stability) ของเซลล์เดี่ยวเทียบกับเวลา ที่อุณหภูมิ 800 องศา  
เซลเซียส ..... 28

**บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง** ..... 29

4.1 การทดลองเบื้องต้นภายในหน่วยวิจัย ..... 29

4.2 การสังเคราะห์สารประกอบ  $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa0.3) และ  $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa0.5) .... 30

4.2.1 การระบุเอกลักษณ์ของสารด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)  
..... 30

4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด  
(Scanning electron microscopy; SEM) ..... 32

4.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray  
Spectrometry (EDS) ..... 32

4.3 การสังเคราะห์สารประกอบ  $\text{La}_{0.80}\text{Sr}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{Mg}_{0.20}\text{O}_3$  (LSGM) เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์  
(Electrolyte) ของเซลล์เชื้อเพลิง ..... 34

4.3.1 การระบุเอกลักษณ์ของสารด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)  
..... 35

4.4 การเตรียมสารประกอบ  $\text{NiO-Fe}_2\text{O}_3$  ด้วยวิธี สำหรับใช้เป็นขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง ..... 35

4.4.1 การระบุเอกลักษณ์ของสารด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)  
..... 36

4.5 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยว ..... 36

4.5.1 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.3 ..... 37

4.5.2 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.5 ..... 39

4.5.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต LSCa0.5-LSCa0.3 ใน .....  
อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ..... 42



4.5.4 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้น ของ LSCa0.5 (บน) และ LSCa0.3 (ล่าง) ..... 44

4.5.5 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้น ของ LSCa0.3 (บน) และ LSCa0.5 (ล่าง) ..... 46

4.5.6 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าคอมโพสิต LSCa<sub>x</sub>-LSGM โดยที่ X= 0.3 และ 0.5 อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก..... 48

4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ..... 51

4.7 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ในด้านความคงตัว (Stability) ของเซลล์เดี่ยวเทียบกับเวลา ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส..... 51

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....

เอกสารอ้างอิง ..... 62

ประวัติผู้วิจัย ..... 65

ภาควิชาเคมี  
 คณะวิทยาศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตารางประกอบ

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ .....	7
ตารางที่ 3.1 รายการและข้อมูลจำเพาะของสารเคมีที่ใช้ .....	19
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	20
ตารางที่ 3.3 น้ำหนักของสารในการสังเคราะห์สารประกอบ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ปริมาณ 5 กรัม.....	21
ตารางที่ 3.4 น้ำหนักของสารในการสังเคราะห์สารประกอบ LSGM ปริมาณ 5 กรัม .....	22
ตารางที่ 3.5 น้ำหนักของสารที่จะใช้เป็นขั้วแคโทดในการเตรียม Cathode paste .....	24
ตารางที่ 3.6 องค์ประกอบของเซลล์เดี่ยวที่ถูกเตรียมขึ้นในงานวิจัย.....	25
ตารางที่ 4.1 สมบัติด้านการนำไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าและเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ลดลงจากเทคนิค TGA ของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 .....	29
ตารางที่ 4.2 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ และ ปริมาตรของหน่วยเซลล์ ของสารประกอบ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีในเตาตรติเตตรตประยุกต์ .....	31
ตารางที่ 4.3 สัดส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ที่สังเคราะห์ได้.....	33
ตารางที่ 4.4 สัดส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของแผ่นอัดประกบ LSCa0.3 – LSCa0.5 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส จากตำแหน่งต่างๆ ในรูปที่ 4.4 .....	34
ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.3 ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส.....	38
ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิกและค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.5 ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส.....	40
ตารางที่ 4.7 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต LSCa0.5-LSCa0.3 ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส .....	43
ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นของ LSCa0.5 (บน) และ LSCa0.3 (ล่าง) ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส.....	45
ตารางที่ 4.9 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นของ LSCa0.3 (บน) และ LSCa0.5 (ล่าง) ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส.....	47

- ตารางที่ 4.10 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้  
ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิตของ LSCa0.3-LSGM ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 800 องศา  
เซลเซียส ..... 49
- ตารางที่ 4.11 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้  
ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิตของ LSCa0.5-LSGM ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 800 700  
และ 600 องศาเซลเซียส..... 50
- ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า ความต้านทานโอห์มมิก ค่าความต้านทานโพลาริเซชัน  
และ ASR ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วแคโทดชนิดต่างๆ..... 53



ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพประกอบ

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบ 3 ชั้น (triple layer perovskite intergrowth).....	2
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง (SOFC) .....	9
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสารประกอบเพอโรฟสไกต์ออกไซด์ .....	11
รูปที่ 2.3 การซ้อนทับกันของออร์บิทัล P ของออกซิเจนภายในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ออกไซด์ .....	12
รูปที่ 2.4 ช่องว่างของออกซิเจน (oxygen vacancies) และการเคลื่อนที่ของออกไซด์ไอออนภายในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ออกไซด์ .....	13
รูปที่ 2.5 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ออกไซด์แบบ 3 ชั้น .....	13
รูปที่ 2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ .....	15
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) .....	16
รูปที่ 2.8 ลักษณะวงจรไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง .....	17
รูปที่ 2.9 กราฟแบบไนจิส (Nyquist plot) .....	18
รูปที่ 3.1 เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว .....	25
รูปที่ 3.2 แผนภาพการติดตั้งเซลล์เดี่ยวสำหรับวัดความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าและการวัดค่าอิมพีแดนซ์ ....	26
รูปที่ 4.1 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตแกรมของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี ในเตระตชิเตรตประยุกต์ ..	31
รูปที่ 4.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดง ลักษณะพื้นผิวของ LSCa0.3 (บน) ลักษณะพื้นผิวของ LSCa0.5 (ล่าง).....	32
รูปที่ 4.3 EDS spectra จากแผ่นเมมเบรน (ก) LSCa0.3 และ (ข) LSCa0.5.....	33
รูปที่ 4.4 บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนแผ่นเมมเบรนที่อัดประกอบระหว่าง LSCa0.3 (บน) และ LSCa0.5 (ล่าง).....	33
รูปที่ 4.5 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตแกรมของ LSGM ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Solid state reaction .....	35
รูปที่ 4.6 เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตแกรมของ NiO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี Modified impregnation .....	36
รูปที่ 4.7 กราฟระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้า ความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.3 ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส.....	37
รูปที่ 4.8 กราฟไนจิสแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจริง (Z') และค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจินตภาพ(Z'') ของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.3 ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส .....	38



รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดชนิดต่างๆที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	49
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบการยึดเกาะบนพื้นผิวระหว่างอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่.....	51
รูปที่ 4.22 ภาพตัดขวางเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นของเซลล์ที่เคลือบ LSCa0.3 ไว้ด้านล่าง (ซ้าย) และเซลล์ที่เคลือบ LSCa0.5 ไว้ด้านล่าง (ขวา).....	52
รูปที่ 4.22 ลักษณะพื้นผิวและภาพตัดขวางของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวหลังทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส .....	53



ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการใช้ถ่านหิน พีโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลักสำหรับผลิตพลังงาน ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้อีกไม่นานก็จะหมดไป ในระยะหลังพบว่าเชื้อเพลิงข้างต้นก่อให้เกิดมลภาวะต่อโลกเป็นอย่างมาก จึงมีความพยายามอย่างต่อเนื่องที่จะหาแหล่งพลังงานชนิดใหม่ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า และแหล่งพลังงานที่กำลังเป็นที่สนใจมากในขณะนี้ก็คือ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) มีหลักการทำงานคือการเปลี่ยนพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเซลล์เชื้อเพลิงมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ ขั้วแอโนด ขั้วแคโทด และอิเล็กโทรไลต์ ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงแบ่งออกเป็นหลายชนิดตามอุณหภูมิที่เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดสามารถทำงานได้ เช่น alkaline fuel cell (AFC), direct methanol fuel cell (DMFC), phosphoric acid fuel cell (PAFC), proton-exchange membrane fuel cell (PEMFC), molten carbonate fuel cell (MCFC) และ solid Oxide Fuel Cell (SOFC) (1, 2) เป็นต้น

เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell) หรือ SOFC เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความทนทานเนื่องจากใช้วัสดุเซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ มีสมบัติในการพาไอออนที่มีประจุลบซึ่งในที่นี้คือออกไซด์ไอออนจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดซึ่งมีไฮโดรเจนอยู่ แล้วทำปฏิกิริยากันได้ผลผลิตคือน้ำและอิเล็กตรอนเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลภายในเซลล์ (2) ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ ประสิทธิภาพในการให้พลังงานสูงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น นอกจากนี้การที่ SOFC สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600-1000 องศาเซลเซียส จะทำให้ CO ที่เกิดขึ้นจากการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ถูกกำจัดไป ดังนั้น SOFC จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นพลังงานทดแทนที่ดีในอนาคต

วัสดุที่ใช้ทำส่วนประกอบของ SOFC ส่วนใหญ่ต้องพาออกไซด์ได้ดี ปัจจุบันมีวัสดุหลายชนิดที่นำมาทำเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาวัสดุสำหรับขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง พบว่ามีสารหลายชนิดที่ถูกพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด เช่น LSMs ( $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3-\delta}$ ) LSCFs ( $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$ ) และ BSCFs ( $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_y$ ) ซึ่งเป็นสารที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์และมีสูตรอย่างง่ายคือ  $\text{ABO}_3$  โดยในระยะหลังพบว่าโครงสร้างดังกล่าวให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนที่สูง ทั้งยังมีคุณสมบัติหลายประการที่ไม่เหมาะกับการนำมาเป็นขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์

เชื้อเพลิงโดยการพัฒนาขั้วไฟฟ้าแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงจากสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์แบบสามชั้น (triple layer perovskite intergrowth)



รูปที่ 1.1 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบ 3 ชั้น (triple layer perovskite intergrowth) (3)

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารประกอบ  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  มีโครงสร้างที่เรียกว่าเพอโรฟสไกต์แบบสามชั้น และมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างในรูปแบบที่เรียกว่า Ruddlesden-Popper series ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจนจำนวนมากเมื่อเทียบกับโครงสร้างอื่นๆที่เคยนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง จึงถือว่าเป็นสารที่มีแนวโน้มจะเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงที่ดี และจากการศึกษาเบื้องต้นภายในกลุ่มงานวิจัย พบว่า การแทนที่  $\text{Sr}^{2+}$  ในตำแหน่ง A-site ของ  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  ด้วย  $\text{Ca}^{2+}$  ในสัดส่วนต่างๆ จะได้สารชนิดใหม่ 2 ชนิดที่มีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่  $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  ซึ่งมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า (electronic conductivity) ที่ดีที่สุด และ  $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า (power density) สูงสุดเมื่อนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้  $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  และ  $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  เป็นองค์ประกอบหลัก โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การสังเคราะห์และยืนยันคุณสมบัติเบื้องต้นของสารดังกล่าว และการนำสารดังกล่าวไปพัฒนาเป็นขั้วแคโทดคอมโพสิต (composite) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกันหรือร่วมกับสารอื่นๆ และทำการวัดค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าและความต้านทานโพลารไรเซชันของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้างดังกล่าวที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียสเพื่อศึกษาและเป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงของแข็งในอนาคตต่อไป

## 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการพัฒนาวัสดุที่ใช้เป็นขั้วแคโทด โดยทั่วไปวัสดุที่นำมาใช้เป็นขั้วแคโทด ได้แก่ LSMs ( $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3-\delta}$ ) เพราะมีสมบัติในการนำไอออนได้ดี และมีการบิดเบี้ยวของโครงสร้างที่ทำให้เกิดช่องว่างที่ออกซิเจนสามารถเคลื่อนผ่านไปได้ดี แต่มีข้อเสียคืออุณหภูมิสำหรับการปฏิบัติงานสูงถึง 1150 องศาเซลเซียส และพื้นผิวมีการนำไฟฟ้าต่ำ (4) ต่อมาได้มีการพัฒนา LSCFs ( $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$ ) โดยการเติม Co และ Fe ลงในโครงสร้างพบว่าทำให้ประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าและไอออนดีขึ้นและสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิประมาณ 600-800 องศาเซลเซียส (5) ซึ่งต่ำกว่า LSMs แต่มีข้อเสียคือความไม่เสถียรของ Fe และ Co หลังจากนั้นจึงได้มีการพัฒนา BSCFs ( $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_y$ ) ขึ้นโดยการเติม Ba ลงไปในโครงสร้างทำให้มีช่องว่างของออกซิเจนในโครงสร้างมากขึ้นและสารมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น (6) แต่ข้อเสียคือ Ba เป็นสารที่มีราคาแพงและมีความเป็นพิษ จะเห็นได้ว่าการพัฒนาวัสดุในระยะแรกนั้น สารประกอบที่นำมาศึกษาจะมีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์  $\text{ABO}_3$  ดังนั้น ต่อมาในระยะหลังจึงได้มีการรายงานการพัฒนาสารที่มีโครงสร้างอื่นๆ มาใช้เป็นขั้วแคโทดเช่นกัน โดยโครงสร้างหนึ่งที่น่าสนใจคือ สารในกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์ออกไซด์แบบชั้น (perovskite-related intergrowth oxides) หรือ  $\text{AO}(\text{ABO}_3)_n$  โดยที่ n คือ จำนวนชั้นของเพอโรฟสไกต์

ในปี ค.ศ. 2005 Lee K. T. (7) และคณะ ได้รายงานผลการพัฒนา  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_{3-y}\text{Co}_y\text{O}_{10-\delta}$  ซึ่งเป็นสารที่มีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์ออกไซด์แบบชั้นในการใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งที่ทำงาน

ได้ที่อุณหภูมิปานกลาง (600-800°C) โดยสามารถสังเคราะห์สารดังกล่าวได้ด้วยวิธี solid-state reaction โดยการแทนที่ Fe ในโครงสร้างดังกล่าวด้วย Co ในสัดส่วนที่แตกต่างกันไปคือ  $0 \leq y \leq 1.5$  และพบว่าค่าการนำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ (electronic conductivity) ของสารดังกล่าวที่อุณหภูมิมากกว่า 500 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่า 100 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้สำหรับวัสดุที่จะใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง นอกจากนี้ยังพบว่า การเติม Co ในโครงสร้างในสัดส่วนที่มากขึ้นจะช่วยเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้า (conductivity) ให้สูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างมีพันธะที่มีความเป็นโควาเลนต์มากขึ้น แต่ทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของสาร (thermal expansion coefficient; TEC) มีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะสปิน (spin) ของ  $\text{Co}^{3+}$  และการเพิ่มขึ้นของช่องว่างออกไซด์ไอออน (oxide ion vacancies) ภายในโครงสร้าง นอกจากนี้ได้นำสารดังกล่าวไปขึ้นรูปเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว โดยมี  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_{3-y}\text{Co}_y\text{O}_{10-\delta}$  เป็นขั้วแคโทด,  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{2.8}$  (LSGM) เป็นอิเล็กโทรไลต์  $\text{NiO-Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$  เป็นขั้วแอโนด และ  $\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$  เป็นตัวเชื่อม (interlayer) ระหว่างขั้วแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการใช้ขั้วแคโทด  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{3-\delta}$  ซึ่งเป็นสารที่มีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์ ที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ออกไซด์แบบชั้นยังมีข้อดีคือมีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ปกติ

ต่อมาในปี ค.ศ. 2009 Torres-Garibay C. และคณะ (8) ได้รายงานผลการพัฒนาขั้วแคโทด  $\text{Sr}_{2.7}\text{La}_{0.3}\text{Fe}_{1.4}\text{Co}_{0.6}\text{O}_{7-\delta}$  และ  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_{10-\delta}$  ซึ่งมีโครงสร้างเป็น Intergrowth perovskite oxide และ  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$  ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์ออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์สารทั้ง 3 ชนิดโดยวิธี solid-state reaction หลังจากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวด้วยเทคนิคพิมพ์สกรีน (screen printing) โดยมี yttria-stabilized zirconia (YSZ) เป็นอิเล็กโทรไลต์ YSZ-Ni เป็นขั้วแอโนด และมี Gadolinium doped ceria (GDC) เป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้วแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_{10-\delta}$  (LSCFO10) เป็นขั้วแคโทด ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.75 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่  $\text{Sr}_{2.7}\text{La}_{0.3}\text{Fe}_{1.4}\text{Co}_{0.6}\text{O}_{7-\delta}$  และ  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$  (LSCF) ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกันคือ 0.4 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ทั้งๆ ที่ค่าการนำไฟฟ้าของ LSCFO10 มีค่าต่ำกว่า LSCF ซึ่งผู้วิจัยได้อธิบายว่าอาจเป็นผลจากโครงสร้างมีการเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่าหรืออาจเป็นเพราะลักษณะโครงสร้างภายในของสาร ซึ่งต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

และในปีเดียวกันนี้ Guoguang Z. และคณะ (9) ได้รายงานผลการศึกษาสมบัติของ  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_3\text{O}_{10-\delta}$  ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์ออกไซด์แบบสามชั้นในการใช้เป็นเยื่อเลือกผ่านของออกซิเจน หรือ ใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง โดยสารดังกล่าวถูกสังเคราะห์ด้วยวิธี citrate-acid ผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่ความดันตั้งแต่  $10^{-2}$ - $1 \times 10^5$  ปาสคาล ด้วยเทคนิค AC four probes และวัดค่าสัมประสิทธิ์ seebeck พบว่าสารดังกล่าวมีรูปแบบการนำไฟฟ้าชนิด p-type conductor นอกจากนี้ผู้วิจัยได้รายงานถึงผลของอุณหภูมิต่อการนำไฟฟ้าของสารดังกล่าวซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสัดส่วน

ของออกซิเจนภายในโครงสร้างจะมากขึ้นส่งผลให้การพาประจุแบบ p-type ลดน้อยลง ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารดังกล่าวลดลง นอกจากนี้ผู้วิจัยยังรายงานค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ( $D_{chem.}$ ) ของออกซิเจนภายในโครงสร้างดังกล่าวพบว่ามีค่าเท่ากับ  $2.4 \times 10^{-5}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาทีและมีค่าพลังงานกระตุ้นการแพร่ของออกซิเจนเท่ากับ 61.4 กิโลจูลต่อโมล

ในปี ค.ศ. 2010 Kim J. H. และคณะ (10) ได้รายงานผลการพัฒนา  $\text{Ln}(\text{Sr}, \text{Ca})_3(\text{Fe}, \text{Co})_3\text{O}_{10}$  โดยที่ Ln คือ La Nd หรือ Gd พบว่าสามารถเตรียมสารที่มีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ออกไซด์แบบชั้นที่แตกต่างกันได้ทั้งหมด 6 ชนิดด้วยวิธี Solid-state reaction ดังนี้  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_3\text{O}_{10}$ (LSF),  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_{10}$ (LSFC),  $\text{NdSr}_3\text{Fe}_3\text{O}_{10}$ (NSF)  $\text{NdSr}_3\text{Fe}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_{10}$ (NSFC),  $\text{NdSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_{10}$  (NSCFC) และ  $\text{GdSr}_3\text{Fe}_3\text{O}_{10}$ (GSF) โดยสารทั้งหมดมีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอล  $I4/mmm$  ที่บริสุทธิ์ยกเว้น GSF ซึ่งพบโครงสร้างอื่นปนอยู่ด้วยและเมื่อนำสารทั้งหมดไปขึ้นรูปเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวโดยมี LSGM เป็นอิเล็กโทรไลต์ พบว่าการแทนที่ Fe ในโครงสร้างด้วย Co จะทำให้เกิดการหลุดออกของออกซิเจนในโครงสร้างเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของสารเพิ่มมากขึ้นนอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นอีกด้วยโดยเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้  $\text{NdSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_{10}$  (NSCFC) เป็นขั้วแคโทดโดยการแทนที่ Sr ในโครงสร้างด้วย Ca ในสัดส่วนเล็กน้อย จะให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีที่สุด โดยผู้วิจัยให้เหตุผลว่าการแทนที่ดังกล่าวทำให้การบิดเบี้ยวของแลตทิซในชั้นเพอรอฟสไกต์ลดน้อยลงซึ่งเป็นผลดีสำหรับการนำออกไซด์ไอออน

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะพัฒนาขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งจากสารที่มีโครงสร้างเป็นเพอรอฟสไกต์ออกไซด์แบบชั้นที่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของสารโดยการเติม Ca ลงในโครงสร้างแล้วมาพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าในลักษณะคอมโพสิต ซึ่งได้มีตัวอย่างงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาการใช้ขั้วคอมโพสิตไปแล้วดังต่อไปนี้

ปี ค.ศ. 2002 Armstrong T. J. และคณะ (11) ได้รายงานผลการพัฒนาขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิตสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งของสารประกอบเพอรอฟสไกต์  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_{3-\delta}$  และ  $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\lambda}$  (LSGM) ในสัดส่วน LSM:LSGM เท่ากับ 70:30 50:50 และ 30:70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมี Ni<sup>2+</sup>-yttria stabilized zirconia (YSZ) เป็นขั้วแอโนด และ YSZ เป็นอิเล็กโทรไลต์ พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วแคโทดคอมโพสิต LSM:LSGM ในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ดีที่สุดคือ ให้ค่าความต้านทานจำเพาะของพื้นผิวเท่ากับ 0.18 โอห์มตารางเซนติเมตร และให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 1.4 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับที่เคยมีการศึกษามาก่อนหน้านี้

และในปี ค.ศ. 2012 Ko J. H. และคณะ (12) ได้รายงานผลการพัฒนาคอมโพสิตร่วม (dual composite)  $(\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2})\text{MnO}_3(\text{LSM})$ -Yttria-stabilized zirconia (YSZ) กับ GDC สำหรับเป็นขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง โดยสารทั้งสามชนิดสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีพอลิเมอร์ (polymerizable complex) พบว่าที่

อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสขั้วแคโทด LSM/GDC-YSZ ให้ค่าความต้านทานโพรลาไรเซชันเท่ากับ 0.266 โอห์ม ตารางเซนติเมตร และเมื่อนำ LSM/GDC-YSZ ไปขึ้นรูปเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่มี YSZ เป็นอิเล็กโทรไลต์ และ Ni-YSZ เป็นขั้วแอโนด โดยมีไฮโดรเจน เป็นเชื้อเพลิงพบว่าให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 0.65 วัตต์ต่อ ตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสอีกด้วย

นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 2012 Ko J. H. และคณะ (13) ได้รายงานผลการพัฒนาคอมโพสิตร่วม  $(La_{0.6}Sr_{0.4})(Co_{0.2}Fe_{0.8})O_3(LSCF) - Y_{0.16}Zr_{0.92}O_{1.96} (YSZ) - Gd_{0.1}Ce_{0.9}O_{2-\delta} (GDC)$  เพื่อใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง โดยสารทั้งสามชนิดถูกเตรียมด้วยวิธีพอลิเมอร์ และนำมาเตรียมเป็นเพส (paste) ร่วมกันหลังจากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวเพื่อวัดประสิทธิภาพ พบว่าค่าความต้านทานโพรลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้คอมโพสิตร่วมดังกล่าวเป็นขั้วแคโทดเท่ากับ 0.075 โอห์มตารางเซนติเมตร ซึ่งพบว่ามีความต่ำกว่าขั้วแคโทด LSM/GDC-YSZ ที่ได้มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ เนื่องจาก LSCF เป็นวัสดุที่การนำไฟฟ้าแบบอิเล็กตรอน และการนำไฟฟ้าแบบไอออนสูง นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ได้ยังให้ค่าความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 0.5 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และ 1.24 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

นอกจากรายงานการพัฒนาสารในลักษณะคอมโพสิตเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแล้ว พบว่ามีรายงานการพัฒนาขั้วแคโทดโดยการเคลือบสารในลักษณะ 2 ชั้นก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงได้ โดยมีตัวอย่างของงานที่พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงด้วยวิธีดังกล่าวดังนี้

ในปี ค.ศ. 2013 Liu Z. และคณะ (14) ได้รายงานผลการพัฒนา  $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta} (LSCF)$  โดยการเคลือบฟิล์มบาง  $La_{0.85}Sr_{0.15}MnO_{3-\delta} (LSM)$  ลงบนพื้นผิวของ LSCF เพื่อใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง โดยเมื่อนำสารดังกล่าวไปขึ้นรูปเป็นเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมี GDC เป็นอิเล็กโทรไลต์และ LSM-coated LSCF เป็นขั้วแคโทดพบว่าขั้วแคโทดดังกล่าวให้ค่าความต้านทานโพรลาไรเซชันที่ต่ำลง และ มีความเสถียรมากกว่าขั้วแคโทด LSCF ที่ไม่มีการเคลือบด้วย LSM นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ LSM-coated LSCF มีค่าเท่ากับ 1.07 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้ว LSCF ถึง 24 เปอร์เซ็นต์

จากรายงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า สารประกอบในกลุ่มเพอรอฟสไกต์ออกไซด์แบบชั้นมีสมบัติที่โดดเด่นในด้านการเกิดช่องว่างออกไซด์ไอออนดีกว่าสารประกอบในกลุ่มเพอรอฟสไกต์และยังมีผู้ทำการศึกษาวิจัยไม่มากนักโดยเฉพาะการพัฒนาสารประกอบเพอรอฟสไกต์ออกไซด์แบบชั้นในรูปแบบคอมโพสิตร่วมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะพัฒนาสารในกลุ่มดังกล่าวเป็นขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงโดยการทำเป็นสารประกอบคอมโพสิต และการทำเป็นขั้ว 2 ชั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

### 1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เตรียมคอมโพสิตออกไซด์แคโทดชนิดใหม่สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจากเพอรอฟสไกต์แบบชั้น  $\text{LaSr}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  ( $x = 0.3$  และ  $0.5$ )

1.3.2 วัดประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้าคอมโพสิตที่เตรียมได้โดยการวัดค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า (Power density) ค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับ (Impedance) และความบริสุทธิ์ของขั้วไฟฟ้าโดยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน



## บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

### 2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)

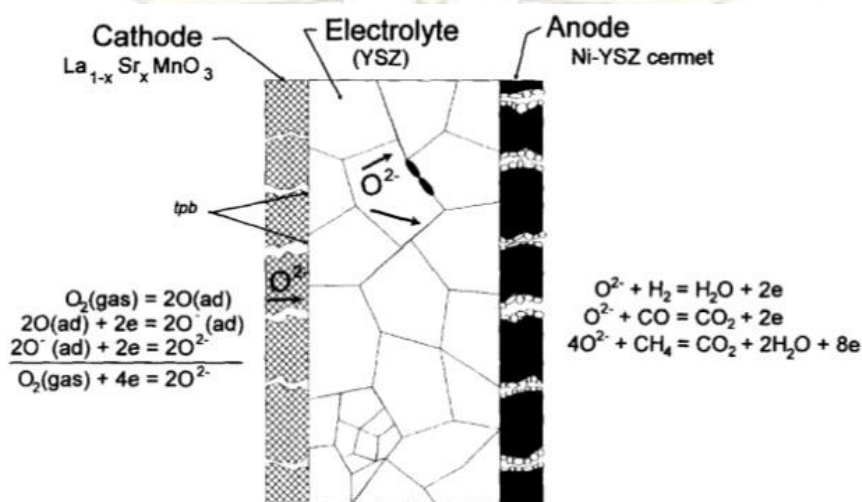
เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานในรูปของปฏิกิริยาเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยเซลล์เชื้อเพลิงมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ขั้วแคโทด ขั้วแอโนด และ อิเล็กโทรไลต์ ทั้งนี้เซลล์เชื้อเพลิงมีหลักการทำงานคร่าวๆ คือ เมื่อแก๊สที่เป็นเชื้อเพลิง เช่น  $H_2$  ทำปฏิกิริยากับแก๊สที่เป็นตัวออกซิไดซ์ เช่น  $O_2$  ผ่านอิเล็กโทรไลต์ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไอออนที่ดีและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้ไหลผ่านวงจรภายนอกก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น (1) โดยปัจจุบันสามารถแบ่งเซลล์เชื้อเพลิงออกได้หลายชนิดตามอุณหภูมิที่เซลล์เชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยา ชนิดของสารที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ และ ชนิดของสารที่เป็นเซลล์เชื้อเพลิงได้ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ (1)

ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง	อิเล็กโทรไลต์	อุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยาเคมี ( $^{\circ}C$ )	เชื้อเพลิง
Alkaline fuel cell (AFC)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	50-200	$H_2$ หรือ $N_2H_4$
Direct methanol fuel cell (DMC)	สารโพลีเมอร์	60-200	$CH_3OH$
Phosphoric acid fuel cell (PAFC)	กรดฟอสฟอริก	160-210	$H_2$ จากไฮโดรคาร์บอน หรือ แอลกอฮอล์
Sulphuric acid fuel cell (SAFC)	กรดซัลฟิวริก	80-90	แอลกอฮอล์ หรือ $H_2$ ไม่บริสุทธิ์
Proton-exchange membrane fuel cell (PEMFC)	สารโพลีเมอร์ หรือ เยื่อเลือกผ่านโปรตรอน	50-80	$H_2$
Molten carbonate fuel cell (MCFC)	เกลือไนเตรต เกลือซัลเฟต หรือ เกลือคาร์บอเนต	630-650	$H_2$ $CO$ $C_3H_7$
Solid oxide fuel cell (SOFC)	สารประกอบ $ZrO_2$ หรือ	600-1000	แก๊สธรรมชาติ หรือ $C_3H_7$
Solid polymer fuel cell (SPFC)	สารประกอบซัลโฟเนต โพลีสไตรีน	90	$H_2$

## 2.2 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell; SOFC)

เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่ใช้วัสดุประเภทเซรามิกส์ที่มีคุณสมบัติในการพาไอออนที่มีประจุลบได้ดีเป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้นิยมใช้ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิ 600-1000 องศาเซลเซียสโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แสดงดังรูปที่ 2.1

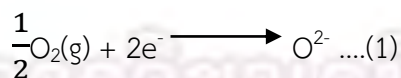


รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง (SOFC) (2)

โดยเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบเดี่ยว (single cell) มีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วนคือ ขั้วแคโทด ขั้วแอโนด และ อิเล็กโทรไลต์

### 2.2.1 ขั้วแคโทด (Cathode)

ขั้วแคโทดเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนจากบรรยากาศ เกิดเป็นออกไซด์ไอออนดังสมการ



#### คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแคโทด

- มีขนาดของโพรงช่องว่างภายในโครงสร้างที่พอเหมาะและเหมาะสมกับการแพร่ของออกไซด์ไอออน
- ต้องมีความเข้ากัน และไม่ทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบอื่นๆ ภายในเซลล์เชื้อเพลิง เช่น ไม่เกิดปฏิกิริยากับตัวเชื่อม และอิเล็กโทรไลต์
- ค่าการขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion coefficient; TEC) ต้องมีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบอื่นๆ ภายในเซลล์เชื้อเพลิง

- ง. โครงสร้างต้องมีความทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในบรรยากาศ
- จ. มีความสามารถสูงในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน
- ฉ. มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์และการนำไฟฟ้าแบบไอออนที่ดี
- ช. มีความสามารถในการยึดติดกับอิเล็กโทรไลต์

ในปัจจุบันมีสารหลายชนิดที่ถูกพัฒนาเป็นขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ สารที่มีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์ออกไซด์ ( $ABO_3$ ) และสารที่มีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์ออกไซด์แบบชั้น ( $AO-(ABO_3)_n$ ) เช่น Lanthanum strontium ferrate oxide ( $LaSr_3Fe_3O_{10}$ ; LSFO) ที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

### 2.2.2 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

อิเล็กโทรไลต์แทรกอยู่ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการพาไอออนที่ดี มีหน้าที่หลักคือการเป็นตัวนำไอออน ซึ่งในที่นี้คือออกไซด์ไอออนจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด

#### คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์

- ก. เป็นตัวนำออกไซด์ไอออนที่ดีและมีค่า conductivity ไม่ต่ำกว่า  $10^{-2}$  ซีเมนต่อตารางเซนติเมตร
- ข. ไม่มีสมบัติเป็นตัวนำอิเล็กทรอนิกส์หรือเป็นตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ที่แย่
- ค. มีความหนาแน่นสูง
- ง. มีความเสถียรต่ออุณหภูมิและความดันของแก๊สออกซิเจน
- จ. ค่าการขยายตัวทางความร้อนต้องมีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบอื่นๆภายในเซลล์เชื้อเพลิงและไม่เกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบอื่นๆภายในเซลล์เชื้อเพลิง

ในปัจจุบันมีวัสดุหลายชนิดที่ถูกใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ yttria-stabilized zirconia (YSZ) และ Lanthanum strontium gallium magnesium oxide ( $La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.8}Mg_{0.2}O_3$ ; LSGM)

### 2.2.3 ขั้วแอโนด (Anode)

ขั้วแอโนดเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเชื้อเพลิงซึ่งส่วนใหญ่คือแก๊สไฮโดรเจนด้วยออกไซด์ไอออน และปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระ ดังสมการ



#### คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนด

- ก. มีความสามารถสูงในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเชื้อเพลิง
- ข. เสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน
- ค. มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์และการนำไฟฟ้าแบบไอออนที่ดี
- ง. มีอนุภาคขนาดเล็กและมีรูพรุนมาก



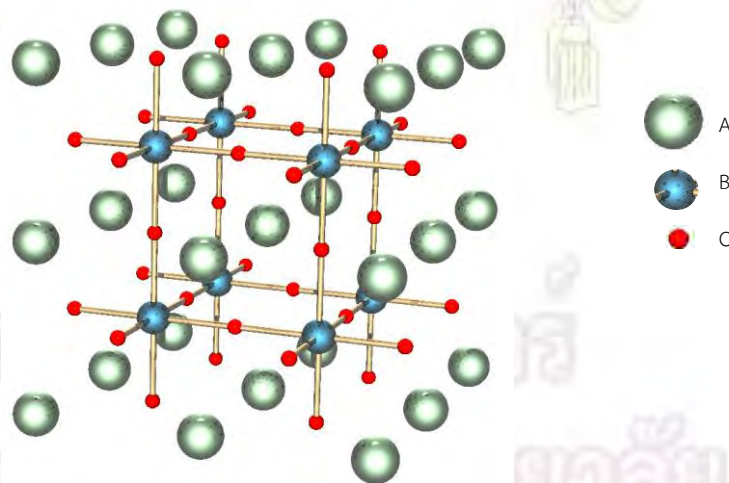
ในปัจจุบันมีวัสดุหลายชนิดที่ถูกพัฒนาเป็นขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง ได้แก่ Ni-YSZ และ  $\text{NiO}_2\text{-FeO}_3$  ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นต้น

## 2.2.4 การขึ้นรูปเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวโดยวิธีเซรามิกส์ฟิล์ม

ในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง จะทำการศึกษาประสิทธิภาพเบื้องต้นของเซลล์โดยการขึ้นรูปเซลล์เดี่ยวที่ประกอบด้วยขั้วแคโทด ขั้วแอโนด และอิเล็กโทรไลต์ ก่อนที่จะนำเซลล์เดี่ยวแต่ละเซลล์ไปเชื่อมต่อกันโดยใช้วัสดุเชื่อมต่อ โดยในการขึ้นรูปเซลล์เดี่ยวนิยมใช้วิธีการเตรียมเซรามิกส์ฟิล์ม โดยวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดและแอโนด จะถูกบดให้เป็นผงละเอียดและผสมกับตัวยึดเกาะ (binder) และตัวทำละลาย (solvent) เพื่อให้เป็นของเหลวผสม (slurry) หลังจากนั้นจึงนำของเหลวผสมที่ได้ไปเคลือบบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์บางๆ โดยวิธีต่างๆ เช่น การทำพิมพ์สกรีน (screen printing) (15) เป็นต้น

## 2.3 สารประกอบเพอโรฟสไกต์ออกไซด์ (16)

สารประกอบเพอโรฟสไกต์ออกไซด์เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น  $\text{ABO}_3$  นิยมนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง เนื่องจากมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic conductivity) และ คุณสมบัติการนำไฟฟ้าแบบไอออน (Ionic conductivity) ได้ดี กล่าวคือ โครงสร้างของเพอโรฟสไกต์จะประกอบไปด้วย แคทไอออน A และ B และมี O ซึ่งก็คืออะตอมของออกซิเจน โดยมีการจัดโครงสร้างในรูปแบบ Face center cubic (FCC) ซึ่งแคทไอออน A เป็นโลหะที่มีขนาดอะตอมใหญ่ มีประจุ +2 หรือ +3 เช่น  $\text{La}^{3+}$  หรือ  $\text{Sr}^{2+}$  จะถูกจัดอยู่ในตำแหน่งมุมของหน่วยเซลล์ลูกบาศก์ (unit cell) แคทไอออน B เป็นโลหะที่มีอะตอมขนาดเล็ก มีประจุ +3 หรือ +4 เช่น  $\text{Fe}^{3+}$  หรือ  $\text{Mn}^{4+}$  จะถูกจัดอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของหน่วยเซลล์ลูกบาศก์ ดังรูปที่ 2.2 โดยโลหะ A และ B จะมีเลขโคออร์ดิเนชัน เท่ากับ 12 และ 6 ตามลำดับ

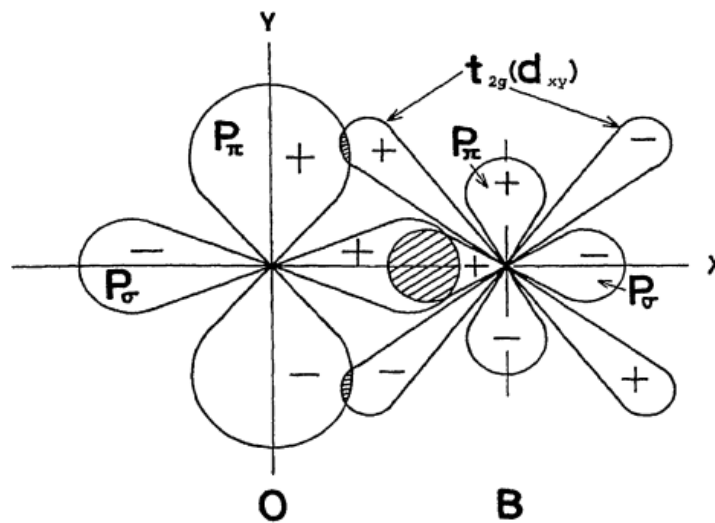


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสารประกอบเพอโรฟสไกต์ออกไซด์ (17)

สารประกอบเพอรอฟสไกต์มีคุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งคือ เมื่อทำการแทนที่แคทไอออนในตำแหน่ง A ภายในโครงสร้างด้วยแคทไอออนที่มีเลขออกซิเดชันต่ำกว่าจะทำให้โครงสร้างสูญเสียสมดุลของประจุ โครงสร้างจะมีการปรับโครงสร้างเพื่อชดเชยประจุ (charge compensation) โดยการเพิ่มประจุบวกที่โลหะในตำแหน่ง B หรือการปลดปล่อยประจุลบซึ่งในที่นี้คือ ออกไซด์ไอออน เพื่อให้โครงสร้างมีความสมดุลในประจุ ดังนั้นสารประกอบเพอรอฟสไกต์ออกไซด์จึงมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ทั้งแบบอิเล็กทรอนิกส์ (electronic conductivity) และ แบบไอออน (ionic conductivity)

### 2.3.1 การนำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic conductivity)

การนำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์เกิดขึ้นเนื่องจากการซ้อนทับกันของออร์บิทัล P ของอะตอมออกซิเจนที่อยู่กับแคทไอออนในตำแหน่ง B ภายในโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ ได้แก่  $d_{xy}$ ,  $d_{xz}$  และ  $d_{yz}$  ดังรูปที่ 2.3 จึงทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ระหว่างโลหะในตำแหน่ง B ผ่านออร์บิทัล P ของออกซิเจน

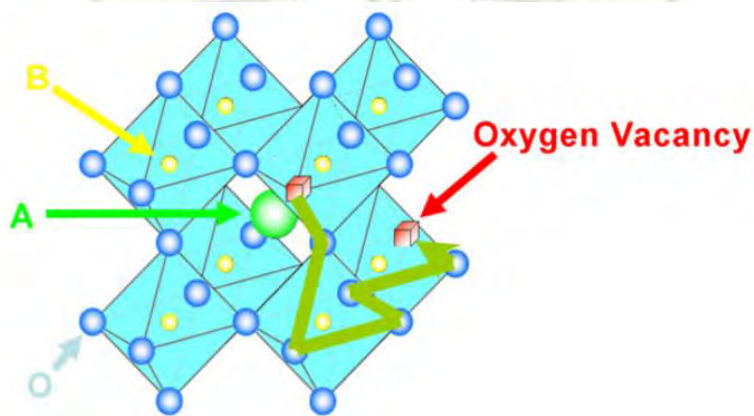


รูปที่ 2.3 การซ้อนทับกันของออร์บิทัล P ของออกซิเจนภายในโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ออกไซด์ (18)

เมื่อมีการเพิ่มเลขออกซิเดชันของแคทไอออนในตำแหน่ง B เพื่อชดเชยประจุโดยการปลดปล่อยอิเล็กตรอน จะทำให้เกิดช่องว่างของอิเล็กตรอน (Electron hole) ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น สารประกอบเพอรอฟสไกต์ออกไซด์จึงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ดี และเรียกการนำไฟฟารูปแบบนี้ว่า p-type semiconductor

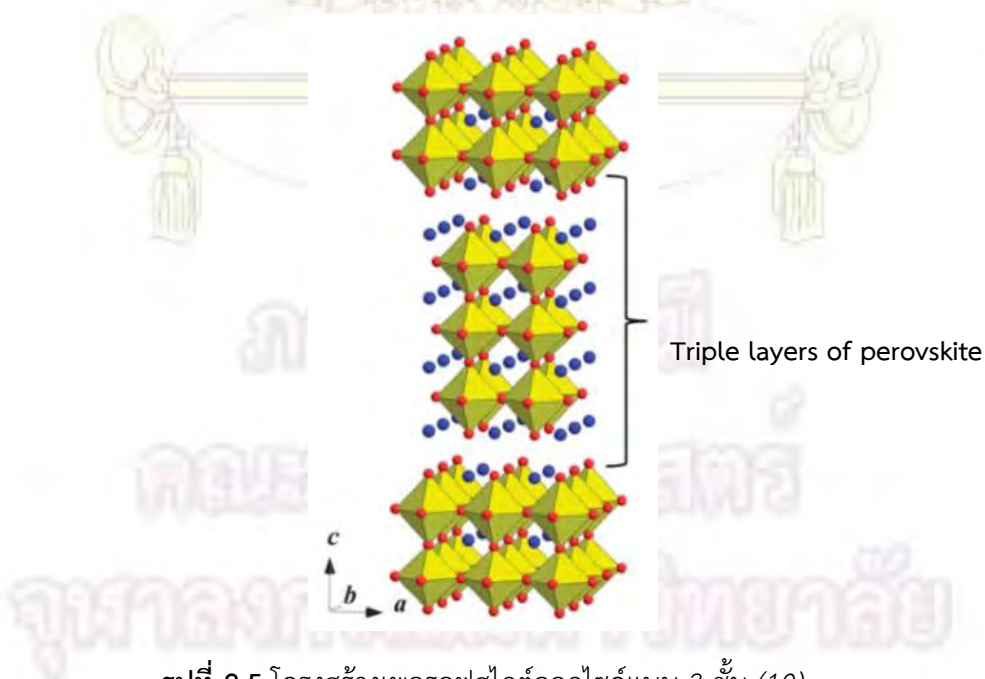
### 2.3.2 การนำไฟฟ้าแบบไอออน (Ionic conductivity)

การนำไฟฟ้าแบบไอออนของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์เกิดจากการชดเชยประจุโดยการลดประจุลบ โครงสร้างจะปลดปล่อยแอนไอออนซึ่งก็คือ ออกไซด์ไอออนทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจน (Oxygen vacancies) ขึ้นดังรูปที่ 2.4 ทำให้ออกไซด์ไอออนสามารถเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างได้ง่ายขึ้น สารประกอบเพอโรฟสไกต์ ออกไซด์จึงมีความสามารถในการนำไอออนที่ดี



รูปที่ 2.4 ช่องว่างของออกซิเจน (oxygen vacancies) และการเคลื่อนที่ของออกไซด์ไอออนภายในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ออกไซด์ (19)

### 2.4 สารประกอบเพอโรฟสไกต์ออกไซด์แบบสามชั้น (triple layer perovskite intergrowth)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ออกไซด์แบบ 3 ชั้น (10)

สารประกอบเพอโรฟสไกต์ออกไซด์แบบ 3 ชั้น เป็นสารประกอบที่มีสูตรทางเคมีเป็น  $(AO)(ABO_3)_3$  หรือ  $AA_3B_3O_{10}$  กล่าวคือมีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ 3 ชั้น สลับกับโครงสร้างแบบเกลือหิน (Rock salt) ดังรูปที่ 2.5 จากการจัดเรียงตัวของโครงสร้างในรูปแบบดังกล่าวพบว่า จำนวนช่องว่างของออกซิเจนมีมากกว่าโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ออกไซด์ปกติ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่นิยมใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นโครงสร้างดังกล่าวจึงมีคุณสมบัติในการนำออกไซด์ไอออนได้ดีกว่า จึงมีแนวโน้มที่จะนำมาพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งได้ดี

โดยทั่วไปสารประกอบที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ออกไซด์แบบสามชั้นที่มีผู้สนใจศึกษาและพัฒนาจะมีองค์ประกอบของ Fe และ Sr เป็นหลัก เช่น  $LaSr_3Fe_3O_{10}$  และ  $LaSr_3Fe_{3-y}Co_yO_{10}$  เป็นต้น

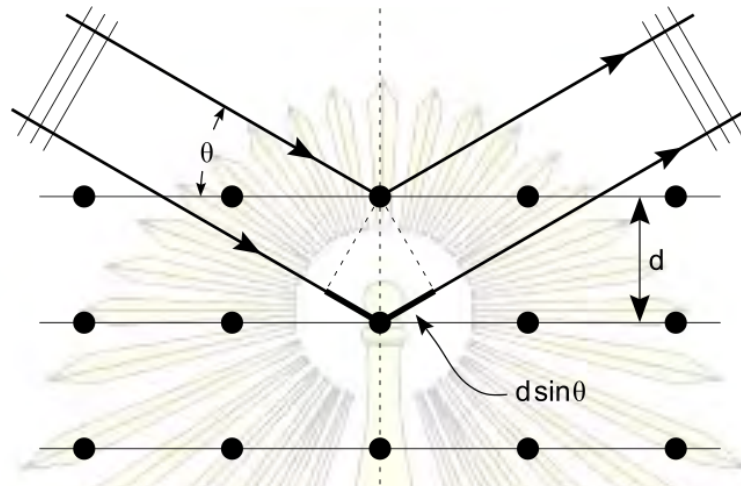
## 2.5 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์

การตรวจสอบเอกลักษณ์ และการทดสอบคุณสมบัติของสารผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้น ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่อไปนี้

### 2.5.1 เทคนิคเอกซเรย์พาวเดอร์ดิฟแฟรกชัน (X-ray powder diffraction; XRD)

เอกซเรย์พาวเดอร์ดิฟแฟรกชันเป็นเทคนิคทางเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารประกอบที่มีความเป็นผลึกหรือมีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง หลักการทำงานของเทคนิคเอกซเรย์พาวเดอร์ดิฟแฟรกชัน อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ กล่าวคือเมื่อรังสีตกกระทบผลึกหรือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบจะเกิดการสะท้อนบนระนาบของผลึกดังรูปที่ 2.6 ซึ่งผลึกแต่ละชนิดจะให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนแตกต่างกันไปทำให้สามารถระบุชนิดโครงสร้างของสารได้ไม่ว่าสารเหล่านั้นจะประกอบไปด้วยธาตุที่เป็นองค์ประกอบกี่ชนิดก็ตาม ซึ่งการเลี้ยวเบนดังกล่าวจะเป็นไปตามกฎของแบร็ก (Bragg's law) ดังสมการที่ (3) โดยที่ผลต่างระยะทางที่รังสีเอ็กซ์สะท้อนบนระนาบแต่ละชั้นจะมีค่าเป็นจำนวนเท่า (n) ของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ ( $\lambda$ ) และสามารถคำนวณหาค่าระยะห่างของระนาบการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้าง (d) เมื่อทราบมุมที่เกิดการเลี้ยวเบน ( $\theta$ )

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (20)

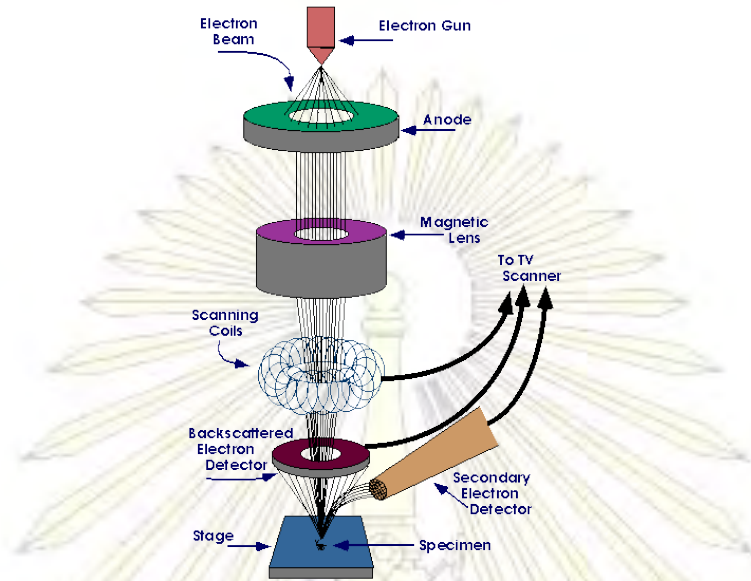
$$2d\sin\theta = n\lambda \dots (3)$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์พาวเดอร์ดิฟแฟรคชันในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารประกอบทุกชนิดที่สังเคราะห์ได้ โดยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรแกรม จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนกับค่าความเข้มสัมพัทธ์ซึ่งมีความจำเพาะในสารประกอบแต่ละชนิด หลังจากนั้นจึงนำเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรแกรมที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรแกรมของสารมาตรฐาน (the joint committee on powder diffraction standard; JCPDS) จะทำให้สามารถระบุรูปแบบโครงสร้างของสารได้

### 2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ ในด้านภาพลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง การกระจายตัว และปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ โดยภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเกิดจากการฉาย หรือส่องกราดลำอิเล็กตรอนไปยังพื้นผิวของตัวอย่าง แล้วตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับจากตัวอย่าง ทำให้ได้ภาพในลักษณะที่เป็น 3 มิติ โดย SEM มีส่วนประกอบพื้นฐาน 5 ส่วน ดังนี้

- ก) แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน (electron gun)
- ข) เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (electromagnetic lens) และ ขดลวดควบคุมการเคลื่อนของลำแสงอิเล็กตรอน (scan coil)
- ค) ช่องใส่สารตัวอย่าง (specimen Chamber)
- ง) อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (collector & Scintillator)
- ค) อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (imaging photographic devices)



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (21)

สารตัวอย่างที่ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการตรวจพิสูจน์จะต้องแห้งเพื่อป้องกันการระเหยในระบบสุญญากาศซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อเครื่องมือ นอกจากนี้สารตัวอย่างต้องมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า กล่าวคือ อิเล็กตรอนจะต้องสามารถเคลื่อนที่เข้าและออกภายในโครงสร้างของตัวอย่างได้ง่าย ในการทดลองนี้จะให้สารตัวอย่างที่เป็น perovskite intergrowth ซึ่งมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี จึงเหมาะสมในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการศึกษาลักษณะพื้นผิว เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสารดังกล่าวสำหรับใช้เป็นขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง

### 2.5.3 การหาค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า (Power density)

ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า โดยนิยาม คือ สัดส่วนค่าของกำลังไฟฟ้า (P) ต่อพื้นที่ของพื้นผิวที่กระแสไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (A) กำลังไฟฟ้า (P) คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ หรือ เครื่องใช้ไฟฟ้า ในเวลาหนึ่งๆ มีหน่วยเป็นจูลต่อวินาทีหรือวัตต์ และมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้า (I) มีหน่วยเป็น แอมป์แปร์ กับ ความต่างศักย์ (V) มีหน่วยเป็นโวลต์ ดังสมการ 4

$$P = IV \dots(4)$$

ดังนั้นความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสามารถหาได้จาก

$$\text{Power density} = \frac{P}{A} = \frac{IV}{A} \dots(5)$$

โดยเราเรียก  $\frac{I}{A}$  ว่า Current density มีหน่วยเป็น แอมป์แปร์ต่อหน่วยพื้นที่และ power density มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

โดยในงานวิจัยนี้เราสามารถหาค่าความหนาแน่นของพลังงานได้จากการต่อวงจรของเซลล์ไฟฟ้าเข้ากับเครื่องกัลวานอสแตท/โพเทนชิโอสแตท แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้เมื่อมีการให้ความต่างศักย์ในช่วง 0.0-1.0 โวลต์ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณดังสมการที่ 5 จะได้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าออกมา ซึ่งใช้อธิบายว่าเซลล์ไฟฟ้าชนิดไหนสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ได้มากกว่า

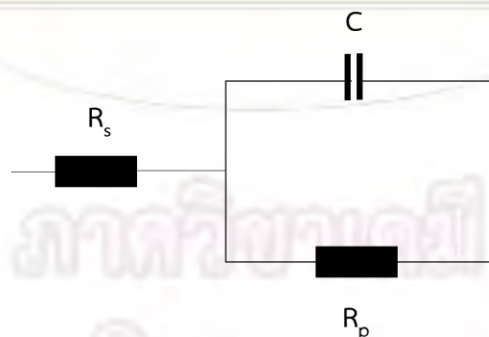
#### 2.5.4 การหาค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance; Z) (22)

โดยทั่วไปเป็นที่ทราบกันดีว่า ความต้านทานกระแสไฟฟ้า (R) เป็นสัดส่วนระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร (I) ตามกฎของโอห์ม (Ohm's law)

$$V = IR \dots (6)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานนั้นไม่ขึ้นกับความถี่ และความสัมพันธ์ของสมการนี้จะสอดคล้องกันเมื่อให้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) แก่วงจรเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงพบว่า หากให้กระแสไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ (AC) ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปโดยเรียกความต้านทานใหม่นี้ว่าอิมพีแดนซ์

อิมพีแดนซ์ (Z) คือค่าความต้านทานชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานสองชนิด คือ ความต้านทานที่ไม่ขึ้นกับความถี่ เรียกว่า รีซิสแทน (resistance; R) และความต้านทานที่ขึ้นกับความถี่ เรียกว่า รีแอกแทน (reactant; X) โดยที่ รีแอกแทน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ ตัวเก็บประจุ (capacitor; C) และ ตัวเหนี่ยวนำ (inductor;  $X_L$ ) กล่าวโดยรวมคือ Z เป็นความต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวงจรของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งจะประกอบไปด้วยความต้านทาน 3 ชนิดคือ ความต้านทานโอห์มมิก (ohmic resistant;  $R_s$ ) ความต้านทานโพลาไรเซชัน (polarization resistance;  $R_p$ ) และ ตัวเก็บประจุ (capacitor; C) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะวงจรไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง (23)

ในวงจรไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งเราจะพบว่า ขนาดอนุภาคของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า การไหลของแก๊ส หรือปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดภายในเซลล์ไฟฟ้า เปรียบได้กับ Capacitor (C) ซึ่งส่งผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า โดยที่นิยามของ Capacitor (C) เป็นดังสมการ

$$C = 1/j\omega C_p \dots (7)$$

โดยที่  $j = \sqrt{-1}$  และ  $\omega = 2\pi f$

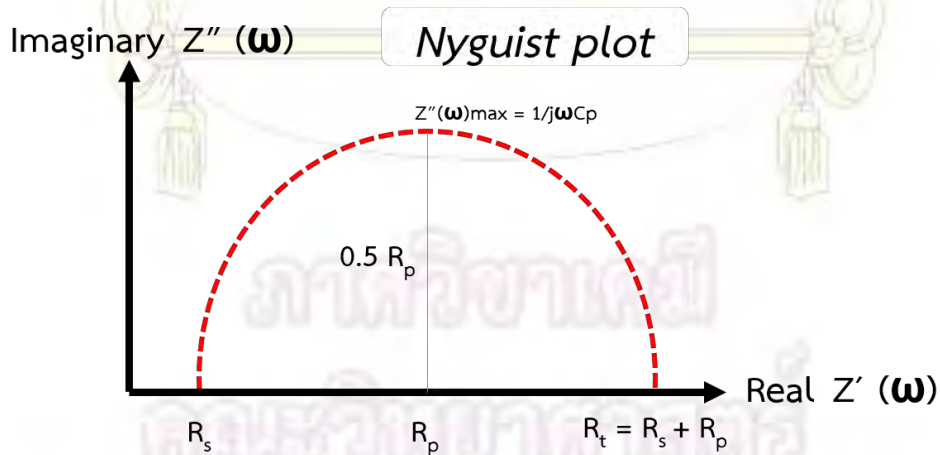
โดยที่  $\omega$  คือความถี่เชิงมุม  $C_p$  คือ capacitance และ  $f$  คือความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ และจึงสามารถเขียนสมการแสดงความต้านทานรวมของวงจรได้ตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's law) ได้ดังสมการ

$$z = R_s + \frac{R_p}{1 + (j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_p \cdot C_p)} \dots (8)$$

จะเห็นได้ว่า C มีส่วนประกอบของจำนวนจินตภาพ ( $\sqrt{-1}$ ) จึงสามารถเขียน Z ในรูปแบบใหม่ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นจำนวนจริง ( $Z_{re}$ ) และ ส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ ( $Z_{im}$ ) ได้ดังสมการ

$$\left(\frac{R_p}{2}\right)^2 = \left(Z_{re} - R_s - \left(\frac{R_p}{2}\right)\right)^2 + Z_{im}^2 \dots (9)$$

และสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  และ  $-Z''$  (เป็น  $-Z''$  เพื่อให้แกนจินตภาพอยู่บนแกน Y ด้านบวก) เรียกว่า กราฟแบบไนจิส (Nyquist plot) ซึ่งได้กราฟในลักษณะที่เป็น ครึ่งวงกลม (semi-circle) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟแบบไนจิส (Nyquist plot) (24)



โดยจุดตัดแกน X ที่ความถี่ต่ำ คือ ความต้านทานโอห์มมิก ( $R_s$ ) ซึ่งเป็นความต้านทานที่มักเกี่ยวข้องกับ การแพร่ของแก๊สภายในเซลล์ไฟฟ้า จุดตัดแกน x ที่ความถี่สูง คือ ความต้านทานรวมของระบบ ( $R_t$ ) และผลต่างของจุดตัดแกน x ที่ความถี่สูงและต่ำ คือ ความต้านทานโพลาริเซชัน ( $R_p$ ) ซึ่งหมายถึง ความต้านทานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ และมีผลมาจากหลายปัจจัย เช่น การแพร่ของเชื้อเพลิงขณะเริ่มปฏิกิริยา (Open circuit potential) โพลาริเซชันของการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์ (Activation Polarization) เป็นต้น

ซึ่งในการทดลองนี้จะวัดค่า อิมพีแดนซ์ โดยการให้กระแสไฟฟ้าในช่วงความถี่ 1-200 กิโลเฮิร์ต และคำนวณหาค่าความต้านทานโพลาริเซชัน ( $R_p$ ) ของสารจากกราฟไนจิสเพื่อใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว



ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**บทที่ 3**  
**การทดลอง**

**3.1 สารเคมีที่ใช้**

ตารางที่ 3.1 รายการและข้อมูลจำเพาะของสารเคมีที่ใช้

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	ความบริสุทธิ์ (ร้อยละ)	บริษัทผู้ผลิต
1	Lanthanum oxide	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	325.81	99.99	Waken
2	Gallium(III) oxide	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	187.44	99.99	ALDRICH
3	Magnesium oxide	MgO		98.00	Fluka
4	Strontium carbonate	SrCO <sub>3</sub>	147.63	99.99	ALDRICH
5	Strontium nitrate	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	211.63	99.00	SIGMA- ALDRICH
6	Iron(III) nitrate nonahydrate	FeN <sub>3</sub> O <sub>9</sub> .9H <sub>2</sub> O	404.00	98.00	SIGMA- ALDRICH
7	Calcium nitrate	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	236.15	99.99	Ajax Finechem
8	Lanthanum(III) nitrate hexahydrate	LaN <sub>3</sub> O <sub>9</sub> .6H <sub>2</sub> O	324.92	99.00	Fluka
9	Ethyl cellulose	-	-	-	Fluka
10	Citric acid	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	192.124	99.5-100.5	CARLO ERBA
11	2,2,4-Trimethyl-1,3- pentanediol monoisobutyrate	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>3</sub>	216.32	99.00	SIGMA- ALDRICH

### 3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัย

ลำดับ	ชื่ออุปกรณ์	ยี่ห้อ	รุ่น	สถานที่
1	เตาเผา	Lenton	PO Box 2031	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
2	เตาเผา	Nabertherm	GmbH	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
3	เอ็กซ์เรย์พาวเดอร์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray powder diffractometer; XRD)	DMAX Rigaku	2200 Ultima	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
4	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด(Scanning electron microscope; SEM)	JEOL	JSM-6610 LV	ศูนย์เครื่องมือ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
5	โพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat)	HOKUTO DENKO	HA-151B	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
6	มัลติมิเตอร์ (Multimeter)	Agilent Technologies	U3402A	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การสังเคราะห์สารประกอบ $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$ (LSCa0.3) และ $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$ (LSCa0.5) ด้วยวิธี โนเตรตซีเตรตประยุกต์(25)

ชั่งเกลือโนเตรต  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$   $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$   $\text{LaN}_3\text{O}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{FeN}_3\text{O}_9 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ตามน้ำหนักที่คำนวณไว้ดังตาราง 3.3 ลงในปิกเกอร์ที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาณเล็กน้อยแล้วคนจนสารละลายหมดบน เครื่องคนแม่เหล็ก (magnetic stirrer) เตรียมสารละลายของกรดซิตริกซึ่งเป็นสารก่อคีเลต (chelate) โดยสารละลายของกรดซิตริกสามารถเตรียมได้จากการชั่งกรดซิตริกในปริมาณเป็นสองเท่าของโลหะทั้งหมดโดยโมลแล้วเติมน้ำปริมาณ 3 มิลลิลิตรและคนจนสารละลายหมด หลังจากเติมกรดซิตริกลงในปิกเกอร์คนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารละลายที่ได้ไปเติมด้วยสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร เพื่อปรับ pH ของสารละลายให้มีค่า pH ประมาณ 9 หลังจากนั้นคนอย่างต่อเนื่องอีก 30 นาที จะได้ของเหลวใสสีเหลือง แล้วนำไปให้ความร้อนเพื่อเผาไหม้จนได้ของแข็งสีดำที่แห้งสนิท หลังจากนั้นจึงนำสารที่ได้ไปเผา (calcination) เพื่อไล่  $\text{CO}_2$  ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง นำสารที่ได้มาบดให้ละเอียดแล้วนำไปเผาอีกครั้งที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงภายใต้ความดันบรรยากาศ ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเปลี่ยนอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้าง จะได้สารผลิตภัณฑ์เป็นผงละเอียดสีดำ

ตารางที่ 3.3 น้ำหนักของสารในการสังเคราะห์สารประกอบ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ปริมาณ 5 กรัม

สารตั้งต้น	น้ำหนักของสารในการสังเคราะห์ LSCa0.3 (กรัม)	น้ำหนักของสารในการสังเคราะห์ LSCa0.5 (กรัม)
$\text{LaN}_3\text{O}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	3.0278	3.0687
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	3.9957	3.7495
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0.4953	0.8368
$\text{FeN}_3\text{O}_9 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	8.4752	8.5894
กรดซิตริก	20.5722	20.0995

### 3.3.2 การสังเคราะห์สารประกอบ $\text{La}_{0.80}\text{Sr}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{Mg}_{0.20}\text{O}_3$ (LSGM) ด้วยวิธี solid State reaction เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ของเซลล์เชื้อเพลิง

ชั่งสารตั้งต้น  $\text{La}_2\text{O}_3$   $\text{Sr}(\text{CO}_3)$   $\text{Ga}_2\text{O}_3$  และ  $\text{MgO}$  ในสัดส่วนที่เหมาะสมดังแสดงในตาราง 3.4 แล้วเทลงในโถร้ง หิน บดสารให้เป็นเนื้อเดียวกันนาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง เพื่อไล่  $\text{CO}_2$  จะได้สารที่เป็นผงละเอียดสีขาว นำสารที่ได้มาบดอีกครั้งนาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นชั่งสารที่ได้ปริมาณ 1.6 กรัมเทใส่ในแม่พิมพ์วงกลมแล้วนำไปอัดภายใต้ความดันบรรยากาศด้วยแรงกด 2 นิวตัน นาน 4 นาที จนได้เป็นแผ่นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm หลังจากนั้นจึงนำแผ่นที่ได้ไปอัดภายใต้ความดันน้ำด้วยแรงกด 10 นิวตัน นาน 30 นาที แล้วจึงนำไปเผาภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส นาน 15 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแผ่นเซรามิกส์สีน้ำตาลอ่อน

ตารางที่ 3.4 น้ำหนักของสารในการสังเคราะห์สารประกอบ LSGM ปริมาณ 5 กรัม

สารตั้งต้น	น้ำหนัก (g)
$\text{La}_2\text{O}_3$	4.8383
$\text{SrCO}_3$	0.4872
$\text{Ga}_2\text{O}_3$	2.4742
$\text{MgO}$	0.2660

### 3.3.3 การเตรียมสารประกอบ $\text{NiO-Fe}_2\text{O}_3$ ด้วยวิธี Modified impregnation สำหรับใช้เป็นขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง

ชั่งสาร  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ หนัก 2.5289 กรัม ใส่ลงในปิกรเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตรปิดด้วยกระดาษฟิวส์ แล้วนำไปคนจนสารละลายหมดบนเครื่องคนแม่เหล็กพร้อมทั้งให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจึงเติมผง  $\text{NiO}$  4.5 กรัมในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร แล้วจึงให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนสารละลายหมด แล้วจึงนำสารละลายที่ได้ไประเหยน้ำออกให้หมดที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงละเอียดสีน้ำตาล

### 3.3.4 การเตรียมแผ่นเมมเบรนของ LSCa0.3 และ LSCa0.5

นำสารที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเตรียมได้ในหัวข้อ 3.3.1 มาขึ้นรูปเป็นแผ่นเมมเบรนจำนวน 3 แผ่นด้วยการชั่งสาร LSCa0.3 น้ก 1.6 กรัม และ LSCa0.5 น้ก 1.6 กรัม และสารผสมระหว่าง LSCa0.3 และ LSCa0.5 น้กอย่างละ 0.8 กรัม มาอัดเป็นแผ่นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร ด้วยแรงกด 2 นิวตัน นาน 4 นาที แล้วจึงนำแผ่นอัดที่ได้ไปอัดภายใต้ความดันน้ำด้วยแรงกด 10 นิวตัน นาน 30 นาที นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส ตามวิธีที่ได้แสดงในหัวข้อ 3.3.1

### 3.3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างและความบริสุทธิ์ของสารที่สังเคราะห์ได้

#### 3.3.5.1 การวิเคราะห์ด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

นำสารผลิตภัณฑ์ที่ได้แก่ LSCa0.3 LSC0.5 LSGM และ NiO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.3.1-3.3.3 มาตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ที่ใช้ CuK $\alpha$  เป็นแหล่งกำเนิดแสง และ โมโนโครเมเตอร์ แล้ววิเคราะห์ผลการทดลองจากเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์เพื่อหาโครงสร้างของสาร

#### 3.3.5.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM)

นำแผ่นเมมเบรนของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ซึ่งสังเคราะห์ได้ในหัวข้อ 3.3.4 มาตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและศึกษาการกระจายตัวกับปริมาณของธาตุจากภาพตัดขวางของแผ่นเมมเบรนของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ที่สังเคราะห์ได้

### 3.3.6 การขึ้นรูปเซลล์ไฟฟ้าเดี่ยว (Single cell)

#### 3.3.6.1 การเตรียมแผ่นอิเล็กโทรไลต์จาก LSGM ที่สังเคราะห์ได้

จากผลิตภัณฑ์ที่ได้ในหัวข้อ 3.3.2 สามารถเตรียมแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ได้โดยการนำแผ่นที่ได้ไปขัดบนแท่นขัดผงเพชรจนมีความหนา 0.3 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ได้ไปทำการโซนิเคต (sonicated) โดยใช้เอทานอลเป็นตัวละลายนาน 30 นาที เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ติดอยู่บนพื้นผิว

3.3.6.2 การเตรียมสารส่วนผสมของเหลวกับสารที่สังเคราะห์ได้ (slurries) เพื่อใช้เป็น cathode paste สำหรับการขึ้นรูปเซลล์เดี่ยว (26)

ซึ่งผงละเอียดของสารที่จะใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงลงในโถรงบดินอ่อน หลังจากนั้นเติม ethyl cellulose สำหรับเป็นสารยึดเกาะ (binder) ด้วยน้ำหนักดังตาราง 3.5 บดให้เข้ากันนาน 30 นาที หลังจากนั้นจึงเติมตัวทำละลายได้แก่ 2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol monoisobutyrate ปริมาตร 1 มิลลิลิตร บดให้เข้ากันจะได้สารผลิตภัณฑ์เป็นส่วนผสมของเหลว (slurry) ของขั้วแคโทด ดังต่อไปนี้ คือ LSCa0.3 slurries, LSCa0.5 slurries, composite LSCa0.3-LSCa0.5 (50:50 %wt) slurries, composite LSCa0.3-LSGM (50:50 %wt) slurries และ composite LSCa0.5-LSGM (50:50 %wt) slurries

ตารางที่ 3.5 น้ำหนักของสารที่จะใช้เป็นขั้วแคโทดในการเตรียม Cathode paste

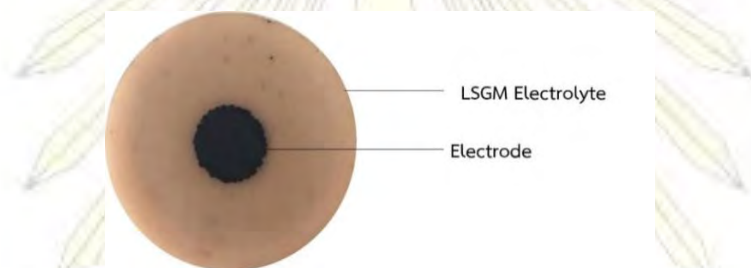
ชนิดของ slurries	น้ำหนัก LSCa0.3 (กรัม)	น้ำหนัก LSCa0.5 (กรัม)	น้ำหนัก LSGM (กรัม)	Ethyl cellulose (กรัม)
LSCa0.3slurries	0.5			0.03
LSCa0.5 slurries		0.5		
Composite LSCa0.3-LSCa0.5 (50:50 %wt) slurries	0.25	0.25		
composite LSCa0.3-LSGM (50:50 %wt) slurries	0.25		0.25	
composite LSCa0.5-LSGM (50:50 %wt) slurries		0.25	0.25	

### 3.3.6.3 การเตรียมสารส่วนผสมของเหลวกับ NiO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (slurry) เพื่อใช้เป็น anode paste สำหรับการขึ้นรูปเซลล์เดี่ยว

ซึ่งผงละเอียดของ NiO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่จะใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง 0.5 กรัมลงในโถรงบดินอ่อนแล้วเติม ethyl cellulose ปริมาณ 0.03 กรัมบดให้เข้ากันนาน 30 นาที หลังจากนั้นจึงเติมตัวทำละลายได้แก่ 2,2,4-trimethyl-1,3-pentanediol monoisobutyrate ปริมาตร 1 มิลลิลิตร บดให้เข้ากันจะได้สารผลิตภัณฑ์เป็นส่วนผสมของเหลว (slurry) ของขั้วแอโนด NiO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### 3.3.6.4 การขึ้นรูปเซลล์เดี่ยวด้วยเทคนิคพิมพ์สกรีน (screen printing)

หลังจากได้แผ่นอิเล็กโทรไลต์ของ LSGM ที่มีความหนาไม่เกิน 0.3 มิลลิเมตร ด้วยวิธีในหัวข้อ 3.3.2 และได้ แคโทดเพส และ แอโนดเพส ของสารที่จะนำมาขึ้นรูปเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว ตามวิธีในหัวข้อ 3.3.5.2 – 3.3.5.3 แล้วทำการพิมพ์สกรีน แคโทดเพส และ แอโนดเพส ผ่านแม่พิมพ์สกรีนวงกลมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 เซนติเมตรลงไปบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 3.1 โดยจะขึ้นรูปเซลล์เดี่ยวที่มีองค์ประกอบดังตาราง 3.6 สำหรับขั้วไฟฟ้าแคโทดที่มีการเคลือบสาร 2 ชั้น เช่น ขั้วแคโทด LSC0.5/LSC0.3 หมายถึงขั้วไฟฟ้าที่มีการพิมพ์สกรีน LSC0.5 ลงไปก่อนรอจนแห้งแล้วจึงเคลือบ LSCa0.3 ทั้งนี้จะใช้แทนพิมพ์สกรีนที่มีความละเอียดมากขึ้นเพื่อให้ชั้นของขั้วไฟฟ้ามีความบางลง หลังจากพิมพ์สกรีนเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำเซลล์เดี่ยวที่ได้ไปเผาที่ ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วคงอุณหภูมิไว้ที่ 900 องศาเซลเซียสนาน 30 นาที เพื่อให้สารยึดติดกับอิเล็กโทรไลต์ได้ดี



รูปที่ 3.1 เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว

ตารางที่ 3.6 องค์ประกอบของเซลล์เดี่ยวที่ถูกเตรียมขึ้นในงานวิจัย

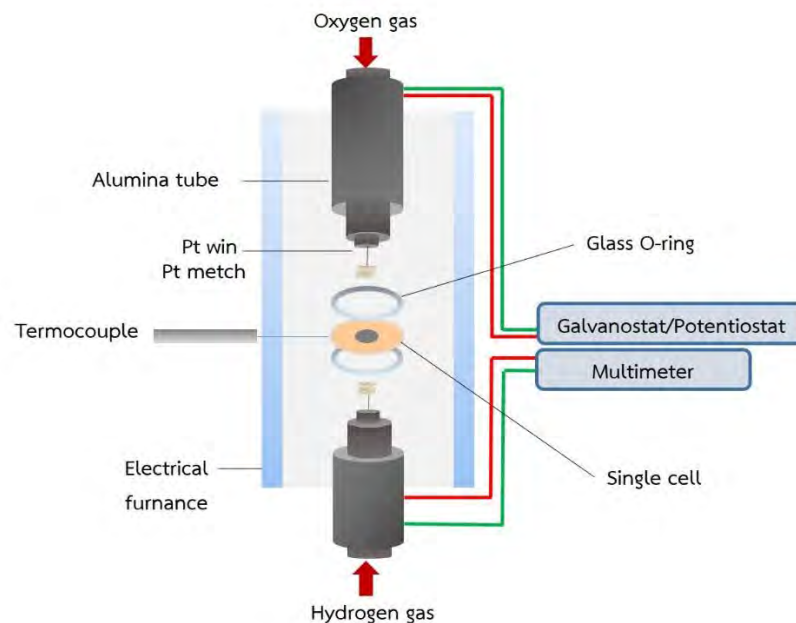
ชนิดของเซลล์เดี่ยว	สารที่ใช้เป็นขั้วแคโทด	สารที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์	สารที่ใช้เป็นขั้วแอโนด
1	$\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$		
2	$\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$		
3	composite $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$ - $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$ (50 %wt)		
4	composite $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$ -LSGM (50:50 %wt)	$\text{La}_{0.80}\text{Sr}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{Mg}_{0.20}\text{O}_3$ (LSGM)	Ni-Fe อัลลอยด์
5	composite $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$ -LSGM (50:50 %wt)		
6	$\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}/\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$		
7	$\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}/\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$		



### 3.3.7 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว

#### 3.3.7.1 การวัดค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า (Power density; P) ของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้

เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่เตรียมได้จะถูกนำมาวัดค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าโดยนำเซลล์เดี่ยวไปวางไว้ระหว่างท่ออะลูมินา โดยมีแผ่นวงแหวนแก้วบาง 0.6 มิลลิเมตรประกบทั้งสองด้านเพื่อทำหน้าที่ในการเชื่อมเซลล์เดี่ยวให้ติดกับท่ออะลูมินาดังรูปที่ 3.2 หลังจากนั้นจึงให้ความร้อนแก่ท่ออะลูมินาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง และคงความร้อนที่อุณหภูมินี้ นาน 15 นาที เพื่อให้แผ่นวงแหวนแก้วหลอมเหลวและเชื่อมท่ออะลูมินาให้ติดกับแผ่นเซลล์เดี่ยวเพื่อป้องกันการรั่วไหลของแก๊สขณะทำการทดลอง จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนเหลือ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดลงของอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ทิ้งไว้ 15 นาทีเพื่อให้วงแหวนแก้วแข็งตัว หลังจากนั้นเปิดวาล์วให้แก๊สไฮโดรเจนผ่านท่ออะลูมินาเข้ามาทางด้านซ้ายแอโนด และ แก๊สออกซิเจนเข้ามาที่ขั้วแคโทด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 30 นาทีเพื่อให้เซลล์เกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ จากนั้นทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้า (I) โดยใช้เครื่องกัลวานอสแตท รุ่น HA-151B ซึ่งต่อกับเครื่องมัลติมิเตอร์เพื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (V) ในช่วง 0.2-1.0 V หลังจากนั้นลดอุณหภูมิของปฏิกิริยาและทำเช่นเดียวกันโดยวัดค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 และ 600 องศาเซลเซียส นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า ดังสมการ (4)



รูปที่ 3.2 แผนภาพการติดตั้งเซลล์เดี่ยวสำหรับการวัดความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าและการวัดค่าอิมพีแดนซ์

### 3.3.7.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance; Z)

ทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์เดี่ยวที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียสโดยใช้โหมดโพเทนชิโอสแตทภายในเครื่องอโต้แล็บ รุ่น PGSTAT302N ซึ่งมีหลักการทำงานคือการวัดความต้านทานภายใต้วงจรเปิด (open circuit) โดยการให้กระแสไฟฟ้าสลับ (AC) ในช่วงความถี่ 200 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เฮิร์ตซ์ และทำการวัดค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียสภายใต้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน

### 3.3.7.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของสารที่ใช้ขึ้นรูปเป็นเซลล์เดี่ยวหลังการทำปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

นำแผ่นเซลล์เดี่ยวของสารที่ผ่านการวัดประสิทธิภาพของเซลล์ในหัวข้อ 3.3.6.1-3.3.6.3 มาตรวจสอบลักษณะพื้นผิว และศึกษาการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของขั้วแคโทดและระหว่างอนุภาคของขั้วแคโทดกับอนุภาคของอิเล็กโทรไลต์จากภาพตัดขวางเซลล์เดี่ยว

### 3.3.7.4 การวัดความคงตัว (stability) ของเซลล์เดี่ยวเทียบกับเวลา ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

จากผลการวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วแคโทดแตกต่างกัน ดังตารางที่ 3.6 จะนำเซลล์เดี่ยวที่ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดมาทำการศึกษาค่าความคงตัวของเซลล์เทียบกับเวลา โดยการวัดค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สออกซิเจน เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมงโดยทำการวัดและบันทึกค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าทุกๆ 30 นาที



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองเบื้องต้นภายในหน่วยวิจัย

เนื่องจากการวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องภายในกลุ่มวิจัย เพื่อที่จะพัฒนา  $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  และ  $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  สำหรับเป็นขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง โดยสารทั้งสองชนิดได้มีการศึกษาคุณสมบัติมาก่อนหน้านี้โดยนิสิตปริญญาเอกและพบว่า การแทนที่ Sr ใน  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  ด้วย Ca ในอัตราส่วนต่างๆ จะทำให้สารประกอบ  $\text{LaSr}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  ที่มีสมบัติแตกต่างกัน โดยพบว่า  $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa0.3) ให้ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ (specific conductivity) สูงสุดในบรรดาสารประกอบที่มีการแทนที่ Ca ในสัดส่วนโมล 0 - 1.0 โดยมีค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ประมาณ 180 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และ  $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa0.5) ให้ค่าการนำไฟฟ้ารองลงมาคือประมาณ 170 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ 4.1 สมบัติด้านการนำไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าและเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ลดลงจากเทคนิค TGA ของ LSCa0.3 และ LSCa0.5

	การนำไฟฟ้าจำเพาะที่อุณหภูมิ สูงสุด (ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)	ความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า สูงสุดที่ 800 องศาเซลเซียส (มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)	เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ ลดลงที่อุณหภูมิ 600 องศา เซลเซียสจากเทคนิค TGA
LSCa0.3	180.00	385.466	2.5987
LSCa0.5	170.00	295.983	3.2460

เมื่อนำสารประกอบทั้งสองไปขึ้นรูปเป็นขั้วแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง โดยมี  $\text{La}_{0.80}\text{Sr}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{Mg}_{0.20}\text{O}_3$  (LSGM) เป็นอิเล็กโทรไลต์ และ  $\text{NiO-Fe}_2\text{O}_3$  เป็นขั้วแอโนดพบว่าเซลล์ที่ใช้ LSCa0.5 เป็นขั้วแคโทดให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ 385.466 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าเซลล์ที่ใช้ LSCa0.3 เป็นขั้วแคโทดที่ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ 295.983 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่สอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาเพิ่มเติมด้วยเทคนิค Thermo Gravimetric Analysis (TGA) ซึ่งเป็นการวัดความเสถียรเชิงน้ำหนักของวัสดุที่อุณหภูมิต่างๆ กัน พบว่าที่อุณหภูมิสูง LSCa0.5 มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักสารที่มากกว่า LSCa0.3 ดัง

ตารางที่ 4.1 จึงสันนิษฐานว่า LSCa0.5 มีการสูญเสียน้ำหนักจากการปลดปล่อยออกซิเจนในโครงสร้างไปมากกว่า LSCa0.3 ซึ่งทำให้ LSCa0.5 มีช่องว่างออกซิเจน (Oxygen vacancies) มากกว่าส่งผลให้ออกไซด์ไอออนสามารถเคลื่อนที่ผ่าน LSCa0.5 ได้ดีกว่า ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ที่ใช้ LSCa0.5 เป็นขั้วแคโทดจึงมีค่าสูงกว่า เซลล์ที่ใช้ LSCa0.3 เป็นขั้วแคโทด

อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบว่า LSCa0.3 และ LSCa0.5 ต่างก็มีสมบัติในการเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งที่ดี กล่าวคือ LSCa0.3 มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด และ LSCa0.5 ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำสารทั้งสองมาพัฒนาเป็นขั้วแคโทดร่วมกันในลักษณะของการคอมโพสิตเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งต่อไปซึ่งได้ผลของการทดลองดังต่อไปนี้

#### 4.2 การสังเคราะห์สารประกอบ $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$ (LSCa0.3) และ $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$ (LSCa0.5)

สามารถสังเคราะห์สารประกอบ LSCa<sub>0.3</sub> และ LSCa<sub>0.5</sub> ด้วยวิธีในเตרתซิเตรตประยุกต์ได้สารลักษณะผงละเอียดสีดำ หลังจากนั้นจึงนำสารที่ได้ไปตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ผลดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 การระบุเอกลักษณ์ของสารด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)

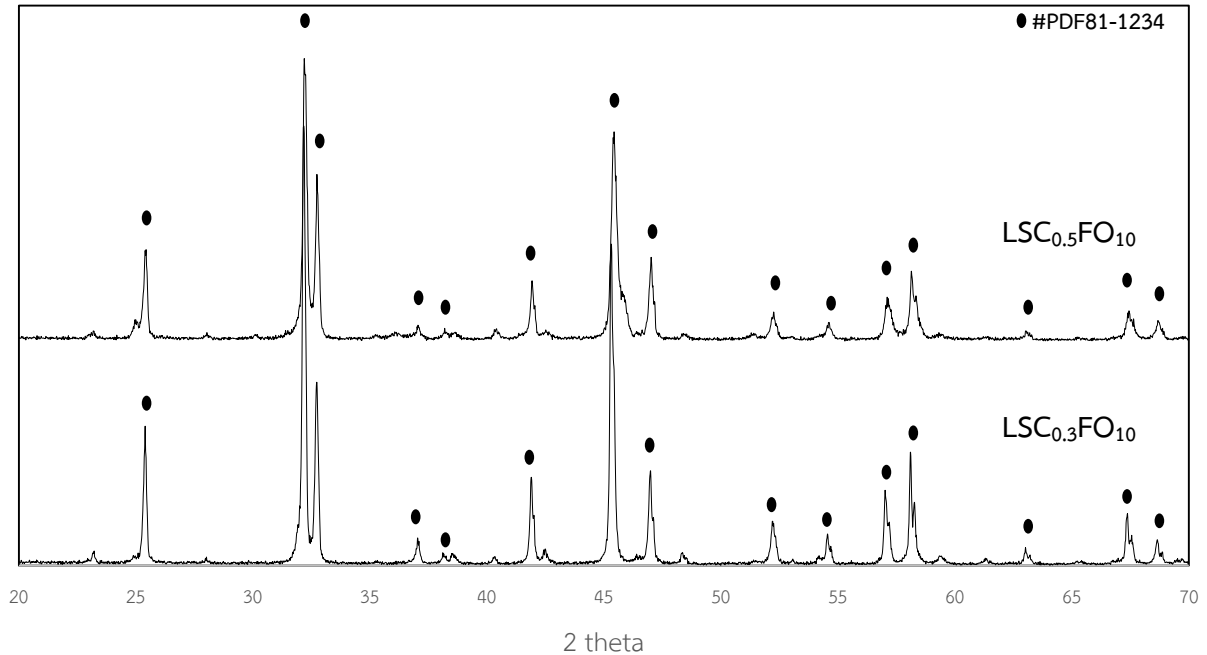
การวิเคราะห์โครงสร้างของ  $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa<sub>0.3</sub>) และ  $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa<sub>0.5</sub>) ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) จากผงของสารประกอบซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันบรรยากาศ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 กล่าวคือสารประกอบทั้งสองชนิดให้เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตแกรมเช่นเดียวกับสารมาตรฐาน  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  จากฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 81-1234 ซึ่งให้พีคที่ตำแหน่ง 2theta เท่ากับ 25 32 33 45 และ 47 องศา ซึ่งเกิดจากการหักเหระนาบแลตทิซ 008 107 110 0014 และ 200 ตามลำดับ แสดงว่าสารประกอบทั้งสองชนิดมีโครงสร้างเป็น (AO)(ABO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> และมีหน่วยเซลล์ (Unit cell) เป็นเตตระโกนอล (tetragonal unit cell) ที่มี Space group เป็น *I4/mmm* และสามารถคำนวณค่าแลตทิซพารามิเตอร์ได้จากสมการที่ (6) และขนาดของหน่วยเซลล์ได้จากสมการที่ (7) ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า LSCa0.5 มีค่าแลตทิซพารามิเตอร์และขนาดของหน่วยเซลล์เล็กกว่า LSCa0.3 ทั้งนี้เนื่องจาก Ca มีขนาดอะตอมเล็กกว่าอะตอมของ Sr (ค่า ionic radii ของ Ca เท่ากับ 174 พิกโคเมตร, Sr เท่ากับ 192 พิกโคเมตร) ดังนั้นเมื่อใส่ Ca ในปริมาณมากขึ้นจึงทำให้โครงสร้างผลึกมีการหดตัวมากขึ้น

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \dots (6)$$

โดยที่  $d$  = ระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก (อังสตรอม)  
 $a, c$  = ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (อังสตรอม)  
 $h, k, l$  = Miller indices

$$V = a \times a \times c \dots (7)$$

โดยที่  $V$  = ขนาดของยูนิตเซลล์ (ลูกบาศก์อังสตรอม)



รูปที่ 4.1 เอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทแกรมของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี ในเตรตซีเตรตประยุกต์

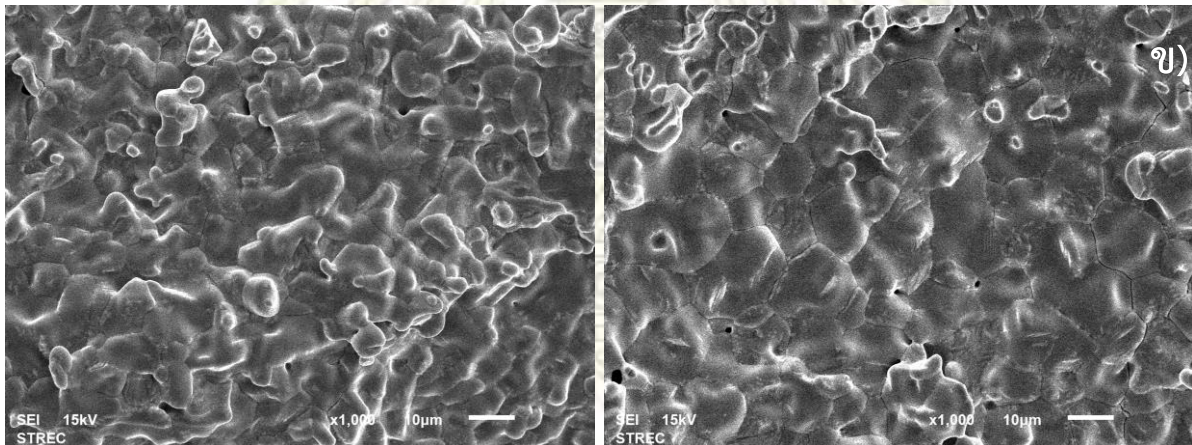
จากข้อมูลของเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทแกรมสรุปได้ว่า สามารถสังเคราะห์สารประกอบเพอร์รอฟสไกต์แบบ 3 ชั้น ที่มีโครงสร้าง  $AO(ABO_3)_3$  ได้ด้วยวิธีในเตรตซีเตรต

ตารางที่ 4.2 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ และ ปริมาตรของยูนิตเซลล์ ของสารประกอบ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี ในเตรตซีเตรตประยุกต์

สารประกอบ	แลตทิซพารามิเตอร์		V (ลูกบาศก์อังสตรอม)
	a (อังสตรอม)	c (อังสตรอม)	
LSCa0.3	3.8659	27.9916	418.3392629

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM)

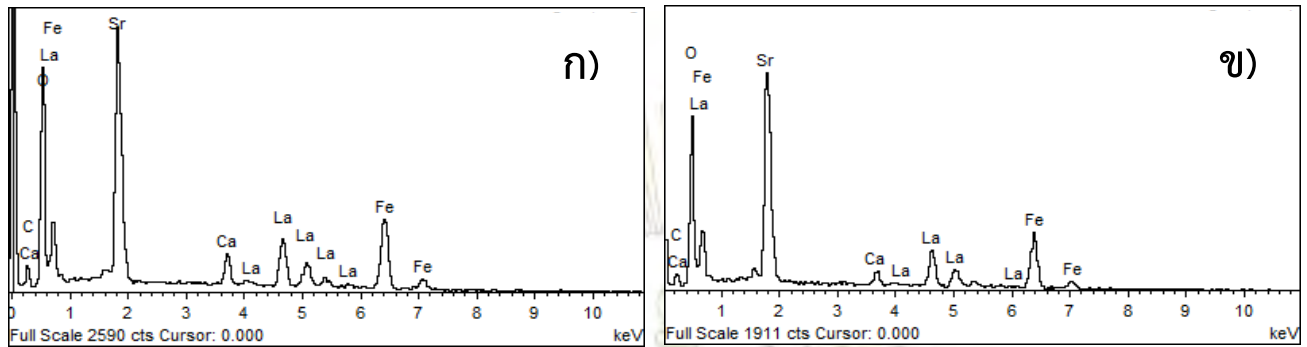
การวิเคราะห์แผ่นเมมเบรนของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้ผลดังรูปที่ 4.2 พบว่าพื้นผิวของสารประกอบ LSCa0.3 เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ในขณะที่ LSCa0.5 เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจาก Ca มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า Sr ดังนั้นการแทนที่ Ca ในปริมาณที่มากกว่าจะทำให้การหลอมเหลวของสารเกิดได้ยากขึ้น LSCa0.5 จึงมีลักษณะของพื้นผิวที่มีการเชื่อมต่อกันของอนุภาคน้อยกว่าพื้นผิวของ LSCa0.3 อย่างไรก็ตามพบว่ามีรูพรุนน้อย ซึ่งจากลักษณะพื้นผิวของสารประกอบทั้งสองชนิดผลที่ได้จึงสอดคล้องกับลักษณะการนำไฟฟ้าของสารทั้งสองที่ได้มีการศึกษาก่อนหน้านี้คือสารทั้งสองมีอนุภาคที่จัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ดี ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารประกอบทั้งสองมีค่ามาก



รูปที่ 4.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของ LSCa0.3 (ซ้าย) ลักษณะพื้นผิวของ LSCa0.5 (ขวา)

#### 4.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS)

ทำการวิเคราะห์แผ่นเมมเบรนของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ในเชิงปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS ได้ผลดังรูปที่ 4.3 พบว่ามีปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบดังตารางที่ 4.3

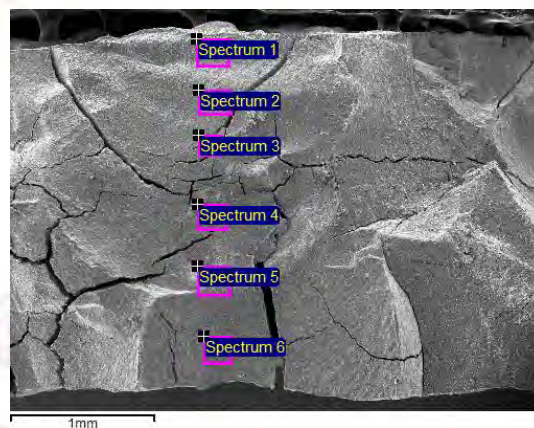


รูปที่ 4.3 EDS spectra จากแผ่นเมมเบรน (ก) LSCa0.3 และ (ข) LSCa0.5

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ที่สังเคราะห์ได้

ธาตุ	La	Sr	Ca	Fe	O
สัดส่วน(โมล) LSCa0.3	1.00	2.72	0.29	2.89	10.78
สัดส่วน(โมล) LSCa0.5	1.00	2.51	0.49	2.93	10.79

จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่าสัดส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบใกล้เคียงกับสัดส่วนโดยโมลของสารประกอบที่ต้องการ ยกเว้นปริมาณของธาตุ Fe ที่จะต่ำกว่าสัดส่วนโดยโมลเล็กน้อย ซึ่งอาจส่งผลให้สมบัติต่างๆ ของสารประกอบทั้งสองชนิดมีการเปลี่ยนแปลงไป จากนั้นนำสารประกอบทั้งสองไปทำการอัดประกบร่วมกันในลักษณะ 2 ชั้น (ด้านล่างเป็น LSCa0.5 และด้านบนเป็น LSCa0.3) เพื่อศึกษาถึงความเสถียรของสารและการโยกย้าย (migration) ของธาตุระหว่างสารประกอบทั้งสองโดยทำการวัดปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนแผ่นเมมเบรนที่อัดประกบระหว่าง LSCa0.3 (บน) และ LSCa0.5 (ล่าง) (ภาพที่กำลังขยาย 500 เท่า)

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่ตำแหน่งต่างๆ พบว่าแผ่นอัดประกบของสารทั้งสองที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียสนั้นมีความเสถียร และปริมาณของ Ca ที่เป็นองค์ประกอบไม่มีการแพร่จากชั้นของ LSCa0.3 ไปยัง LSCa0.5 สรุปได้ว่าไม่เกิดการแพร่ของธาตุ Ca Fe Sr และ La ระหว่างระหว่างชั้นของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงสามารถพัฒนาขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นในลักษณะการเคลือบ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ร่วมกันได้ โดยคุณสมบัติของสารจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของแผ่นอัดประกบ LSCa0.3 – LSCa0.5 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส จากตำแหน่งต่างๆ ในรูปที่ 4.4

สาร/ตำแหน่ง	สัดส่วนของธาตุ(โมล)					
	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 4	Spectrum 5	Spectrum 6
O	12	14	14	9.9	10	8
Ca	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4
Fe	2.7	2.8	2.8	2.7	2.8	2.8
Sr	2.5	2.7	2.6	2.1	2	1.9
La	1	1	1	1	1	1

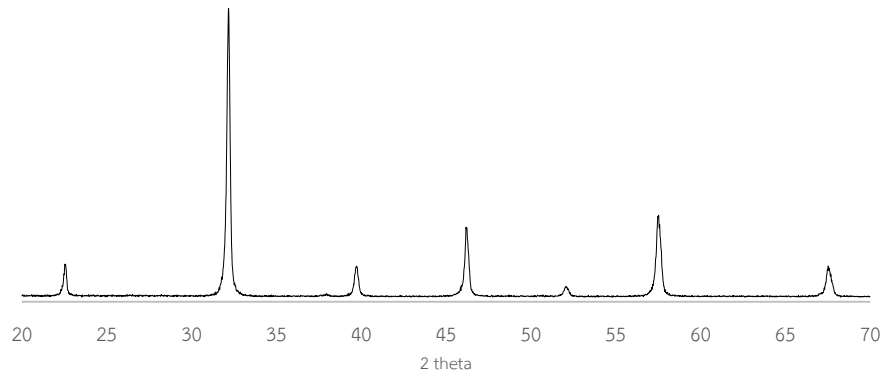
#### 4.3 การสังเคราะห์สารประกอบ $\text{La}_{0.80}\text{Sr}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{Mg}_{0.20}\text{O}_3$ (LSGM) เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ของเซลล์เชื้อเพลิง

สามารถสังเคราะห์สารประกอบ LSGM ที่มีลักษณะเป็นแผ่นเซรามิกสีม่วงกลมสีน้ำตาลอ่อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร ด้วยวิธี Solid state reaction หลังจากนั้นนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์และความบริสุทธิ์ด้วยเทคนิค XRD ได้ผลดังต่อไปนี้

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



#### 4.3.1 การระบุเอกลักษณ์ของสารด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)



รูปที่ 4.5 เอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทแกรมของ LSGM ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Solid state reaction

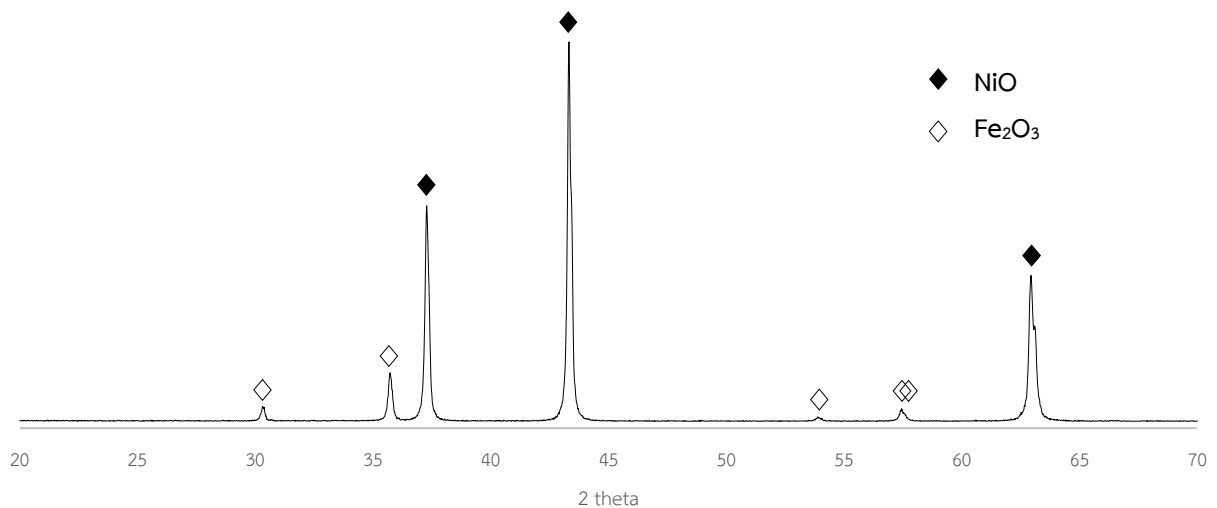
การวิเคราะห์โครงสร้างของ LSGM ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ให้ผลดังรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่า LSGM ที่สังเคราะห์ได้มีเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทแกรมสอดคล้องกับสารมาตรฐาน LSGM ในฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 52-0022 ที่มีมุม 2theta ต่างๆ ดังนี้ 23 32 40 46 52 58 และ 68 ซึ่งเกิดจากการหักเหบนระนาบแลตทิซ 100 110 111 200 210 211 และ 220 ตามลำดับแสดงว่า LSGM ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างเป็นลูกบาศก์ (cubic) ของเพอรอฟสไกต์ออกไซด์  $ABO_3$  และไม่พบฟีกของสารรบกวนอื่นๆ จึงสรุปได้ว่า สามารถสังเคราะห์แผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่มีความบริสุทธิ์ได้ด้วยวิธี solid state reaction

#### 4.4 การเตรียมสารประกอบ $NiO-Fe_2O_3$ ด้วยวิธี modified impregnation สำหรับใช้เป็นขั้วแอโนดของ เซลล์เชื้อเพลิง

สามารถสังเคราะห์สารประกอบ  $NiO-Fe_2O_3$  ด้วยวิธี modified impregnation ได้สารที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาล หลังจากนั้นนำไประบุเอกลักษณ์และความบริสุทธิ์ด้วยเทคนิค XRD ได้ผลดังนี้

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4.1 การระบุเอกลักษณ์ของสารด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)



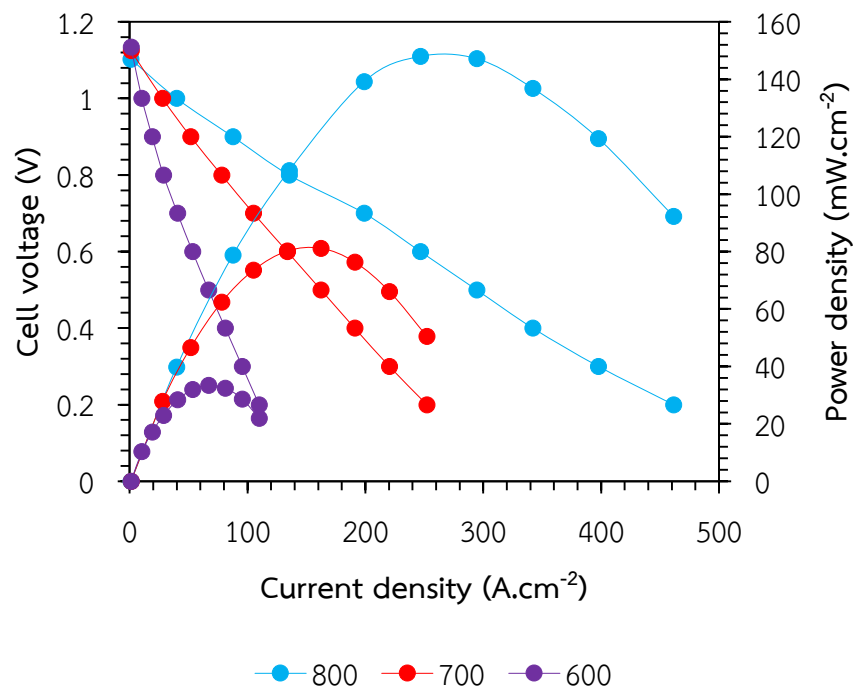
รูปที่ 4.6 เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทแกรมของ NiO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี Modified impregnation

การวิเคราะห์โครงสร้างของ NiO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ให้ผลดังรูปที่ 4.6 ซึ่งพบว่า NiO-Fe ที่สังเคราะห์ได้มีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทแกรมสอดคล้องกับสารมาตรฐานในฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 73-0603 ซึ่งเป็นของสารมาตรฐาน Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มุม 2theta ดังนี้ 33 36 56 57 และ 58 ซึ่งเกิดจากการหักเหระนาบแลตทิซ 104 110 211 122 และ 018 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับดิฟแฟร็กโทแกรมหมายเลข 75-0197 ซึ่งเป็นของสารมาตรฐาน NiO ที่มุม 2 theta ดังนี้ 37 43 และ 62 ซึ่งเกิดจากการหักเหระนาบแลตทิซ 111 200 และ 220 ตามลำดับ และไม่พบพีคของสารรบกวนต่างๆ แสดงว่า NiO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ประกอบด้วยเฟสของ NiO และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่านั้น จึงสรุปได้ว่าสามารถสังเคราะห์สารบริสุทธิ์ของ NiO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ด้วยวิธี modified impregnation

#### 4.5 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยว

จากการเตรียมเซลล์เดี่ยวชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.6 นำเซลล์เดี่ยวที่ได้ไปวัดประสิทธิภาพทางด้านไฟฟ้าเคมีโดยการวัดค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า (power density) และการวัดค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ได้ผลการทดลองดังนี้

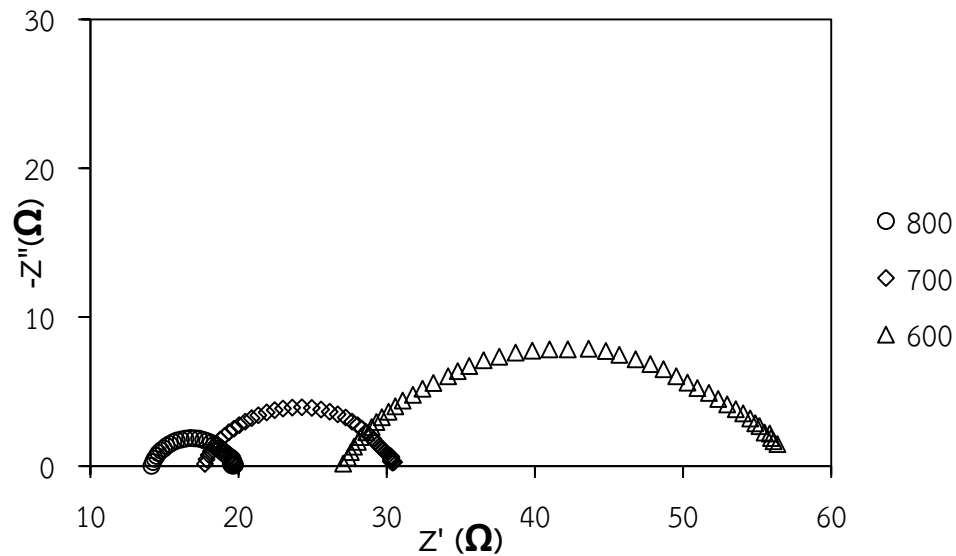
#### 4.5.1 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.3



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้า ความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.3 ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

จากการขึ้นรูปเซลล์เดี่ยวโดยใช้ LSCa0.3 เป็นขั้วแคโทด LSGM ที่สังเคราะห์ได้เป็นอิเล็กโทรไลต์ และ NiO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นขั้วแอโนด โดยมีแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สเชื้อเพลิง และแก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ พบว่าเมื่อปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 30 นาที เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวดังกล่าวให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าดังรูปที่ 4.7 โดยพบว่าค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5) มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง คือให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 147.97 81.15 และ 33.41 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวโดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเทคนิค EIS ได้กราฟไนจิสดังรูปที่ 4.8 และสามารถหาค่าความต้านทานภายในเซลล์เดี่ยวได้ดังสรุปในตารางที่ 4.5 โดยค่าความต้านทานโอห์มมิก หรือ  $R_s$  คือจุดตัดแกนเอกซ์ทางด้านซ้ายมือ ค่าความต้านทานรวม หรือ  $R_t$  คือจุดตัดแกนเอ็กซ์ทางด้านขวามือและ ค่าความต้านทานโพลาริเซชัน หรือ  $R_p$  หาได้จากผลต่างระหว่าง  $R_t$  และ  $R_s$  โดยพบว่าค่าความต้านทานทั้งสามชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



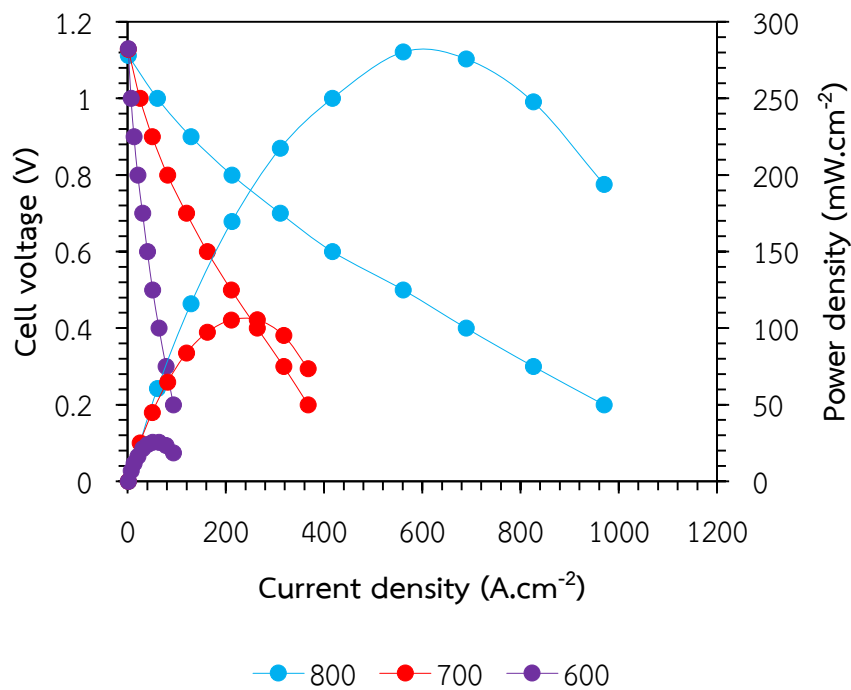
รูปที่ 4.8 กราฟไนจิสแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจริง ( $Z'$ ) และค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจินตภาพ ( $Z''$ ) ของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.3 ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพล่าไรเซชันของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.3 ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$R_t$ (โอห์ม)	$R_s$ (โอห์ม)	$R_p$ (โอห์ม)
800	19.58	14.14	5.44
700	30.39	17.73	12.66
600	56.38	27.07	29.30

จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้ามีความสอดคล้องกับค่าความต้านทานภายในเซลล์เดี่ยว คือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานจะลดลง และค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง ออกซิเจนจะหลุดออกจากโครงสร้างได้มากขึ้นเกิดเป็นช่องว่างของออกซิเจน ดังนั้นออกไซด์ไอออนจึงเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างออกซิเจนได้มากขึ้น ความต้านทานของเซลล์จึงต่ำลง ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าจึงสูงขึ้น โดยพบว่าค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดประมาณ 147.97 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

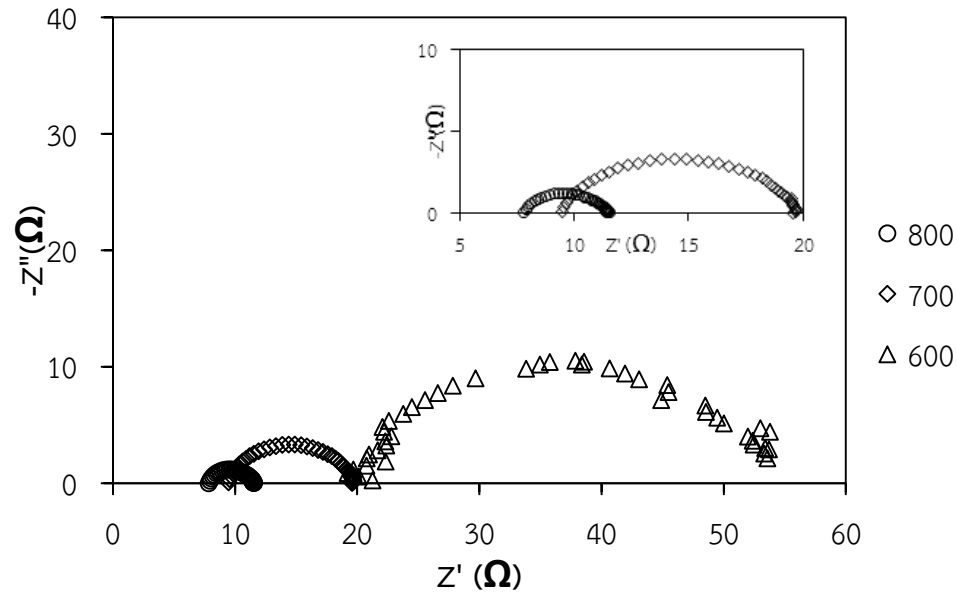
#### 4.5.2 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.5



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้า ความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.5 ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

จากการขึ้นรูปเซลล์เดี่ยวโดยใช้ LSCa0.5 เป็นขั้วแคโทด LSGM ที่สังเคราะห์ได้เป็นอิเล็กโทรไลต์ และ NiO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นขั้วแอโนด โดยมีแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สเชื้อเพลิง และแก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ พบว่าเมื่อปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 30 นาที เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวดังกล่าวให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.9 โดยพบว่าค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5) มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง คือให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 280.30 105.61 และ 25.45 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และได้ทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเทคนิค EIS โดยการสร้างกราฟไนจิสซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.10 และค่าสรุปความต้านทานภายในเซลล์เดี่ยวแสดงในตารางที่ 4.6

คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 กราฟไนจิสแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจริง ( $Z'$ ) และค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจินตภาพ ( $Z''$ ) ของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.5 ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิกและค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.5 ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$R_t$ (โอห์ม)	$R_s$ (โอห์ม)	$R_p$ (โอห์ม)
800	11.57	7.84	3.73
700	17.80	10.52	7.27
600	47.48	19.37	28.11

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีความสอดคล้องกับค่าความต้านทานภายในเซลล์เดี่ยว คือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานจะลดลง และค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น โดยพบว่าค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดประมาณ 280.30 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

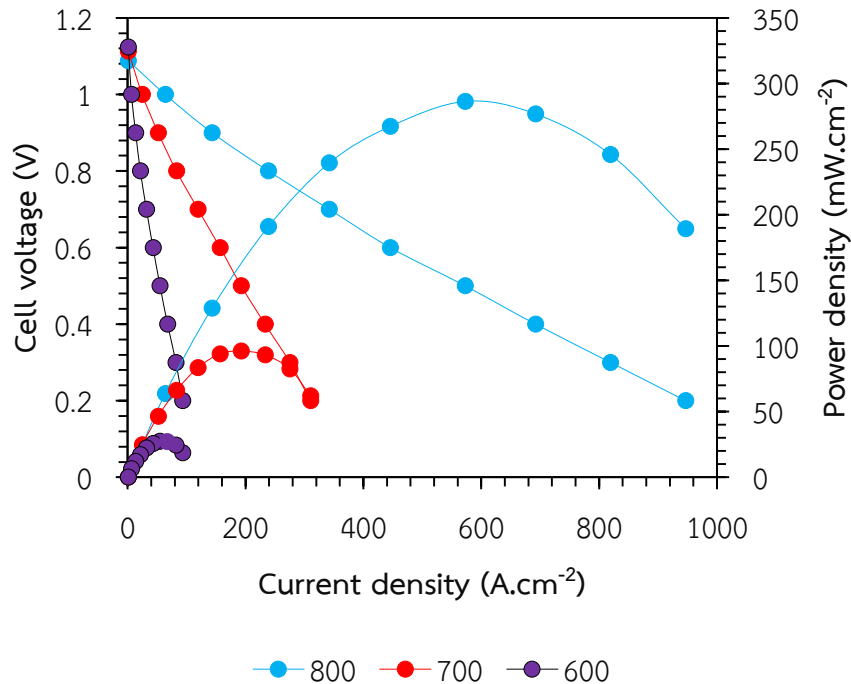
จากการวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ LSCa0.5 และ LSCa0.3 เป็นขั้วแคโทดพบว่า ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีแนวโน้มเดียวกับที่มีผู้ทำการศึกษามาก่อนหน้า ดังกล่าวในหัวข้อที่ 4.1 กล่าวคือค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของ LSCa0.5 มีค่ามากกว่า LSCa0.3 ดังนั้นจึงสรุปว่า สารประกอบ LSCa0.5 และ

LSCa0.3 ที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้มีสมบัติต่างๆ คล้ายกับสารประกอบที่ได้มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้า ค่าการขยายตัวทางความร้อน และค่าTGA จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการอภิปรายผลการทดลองการพัฒนาขั้วคอมโพสิตของ LSCa0.5 และ LSCa0.3 ในงานวิจัยนี้



ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

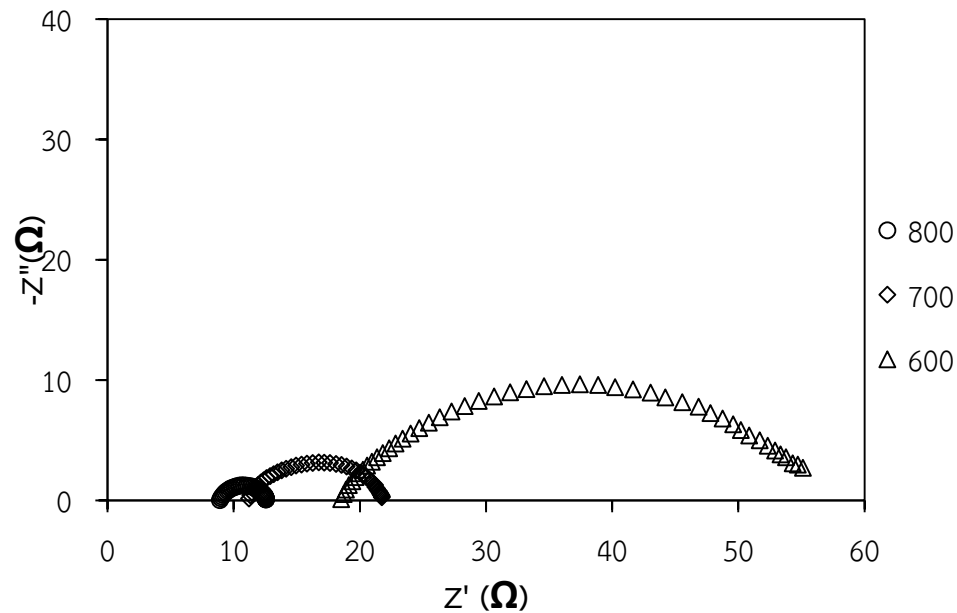
#### 4.5.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต LSCa0.5-LSCa0.3 ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้า ความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วแคโทดคอมโพสิต LSCa0.5-LSCa0.3 ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

จากคุณสมบัติที่ดีของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ดังที่ได้กล่าวมาในตอนต้น ประกอบกับแนวคิดที่จะศึกษาและพัฒนาขั้วไฟฟ้าในลักษณะคอมโพสิต ในงานวิจัยนี้จึงนำ LSCa0.3 และ LSCa0.5 มาผสมกันทางกายภาพในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักและทำการวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วดังกล่าว ผลการวัดค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.11 และกราฟโนจิสแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์แสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เดี่ยวมีค่าเท่ากับ 286.40 96.26 และ 27.45 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีค่าความต้านทานต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น และค่าความต้านทานจะมีค่าลดต่ำลง โดยเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้ขั้วแคโทดคอมโพสิต LSCa0.5-LSCa0.3 ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 286.40 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส





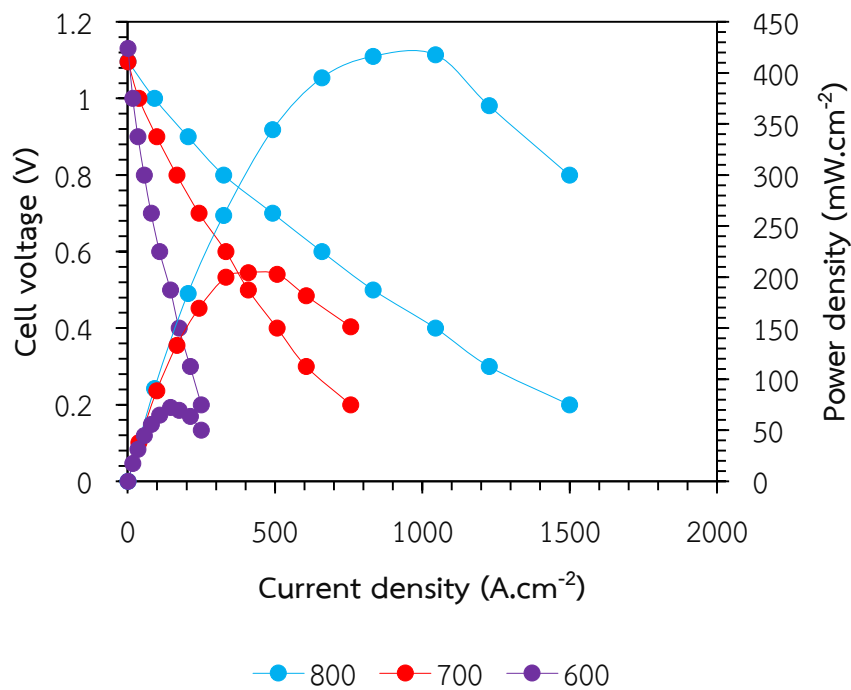
รูปที่ 4.12 กราฟไนจิสแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจริง ( $Z'$ ) และค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจินตภาพ ( $Z''$ ) ของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต  $\text{LSCa}0.5\text{-LSCa}0.3$  ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.7 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต  $\text{LSCa}0.5\text{-LSCa}0.3$  ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$R_t$ (โอห์ม)	$R_s$ (โอห์ม)	$R_p$ (โอห์ม)
800	12.54	8.90	3.64
700	21.73	11.20	10.54
600	55.11	18.52	36.59

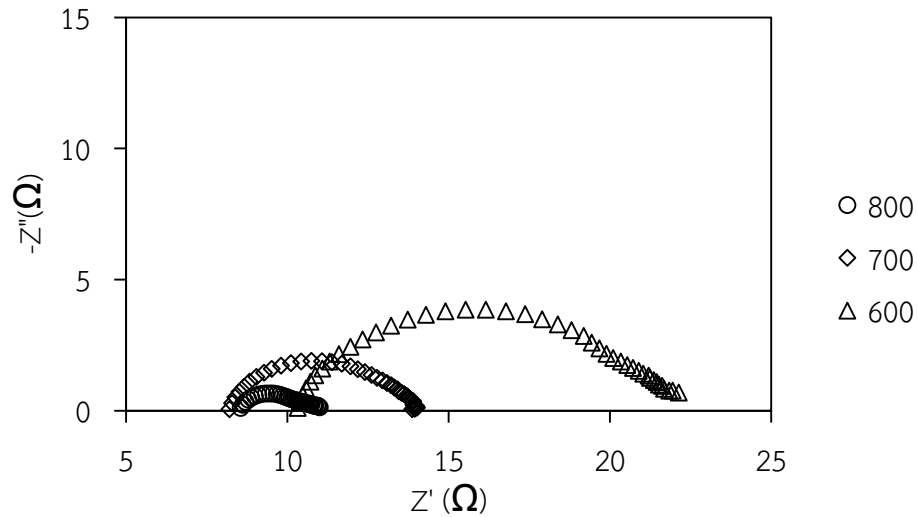
จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าคอมโพสิต  $\text{LSCa}0.5\text{-LSCa}0.3$  ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ขั้วแคโทดมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเซลล์เดี่ยวที่ใช้  $\text{LSCa}0.3$  และ  $\text{LSCa}0.5$  ในลักษณะขั้วไฟฟ้าเดี่ยวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

#### 4.5.4 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้น ของ LSCa0.5 (บน) และ LSCa0.3 (ล่าง)



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้า ความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นของ LSCa0.5 (บน) และ LSCa0.3 (ล่าง) ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

จากการรายงานผลการพัฒนาขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงในลักษณะขั้วไฟฟ้า 2 ชั้น ซึ่งให้ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ดีขึ้นของ Liu Z. และคณะ (11) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เตรียมขั้วไฟฟ้าแคโทดในลักษณะ 2 ชั้น โดยการเคลือบ LSCa0.3 ลงบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM หลังจากนั้นเคลือบ LSCa0.5 ทับลงบนชั้นของ LSCa0.3 นำขั้วดังกล่าวไปวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวได้ผลดังรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อให้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สเชื้อเพลิงและแก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สออกซิไดซ์ ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยานาน 30 นาที เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 417.87 204.39 และ 72.29 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียสตามลำดับ นอกจากนี้ทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์เดี่ยวโดยการสร้างกราฟไนจิสต์ดังรูปที่ 4.14 และได้ค่าความต้านทานชนิดต่างๆ สรุปดังตารางที่ 4.8 ซึ่งพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์จะเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานจะลดลงเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านๆ มาก่อนหน้านี้ แต่เซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นโดย LSCa0.5 อยู่ด้านบน และ LSCa0.3 อยู่ด้านล่าง ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดสูงกว่าขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยให้ค่าสูงถึง 417.87 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่ความต่างศักย์เท่ากับ 0.4 โวลต์



รูปที่ 4.14 กราฟไนจิสแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจริง ( $Z'$ ) และค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจินตภาพ ( $Z''$ ) ของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้น ของ LSCa0.5 (บน) และ LSCa0.3 (ล่าง) ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

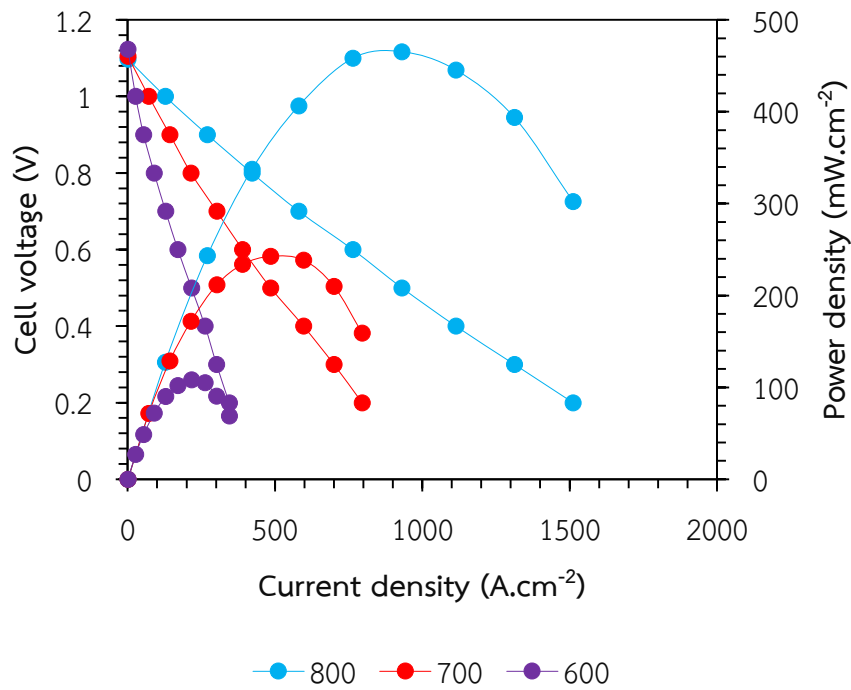
ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นของ LSCa0.5 (บน) และ LSCa0.3 (ล่าง) ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$R_t$ (โอห์ม)	$R_s$ (โอห์ม)	$R_p$ (โอห์ม)
800	11.00	8.50	2.50
700	13.86	8.20	5.66
600	22.13	10.31	11.82

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นของ LSCa0.5 (บน) และ LSCa0.3 (ล่าง) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเซลล์เดี่ยวที่ใช้ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ในลักษณะขั้วไฟฟ้าเดี่ยว

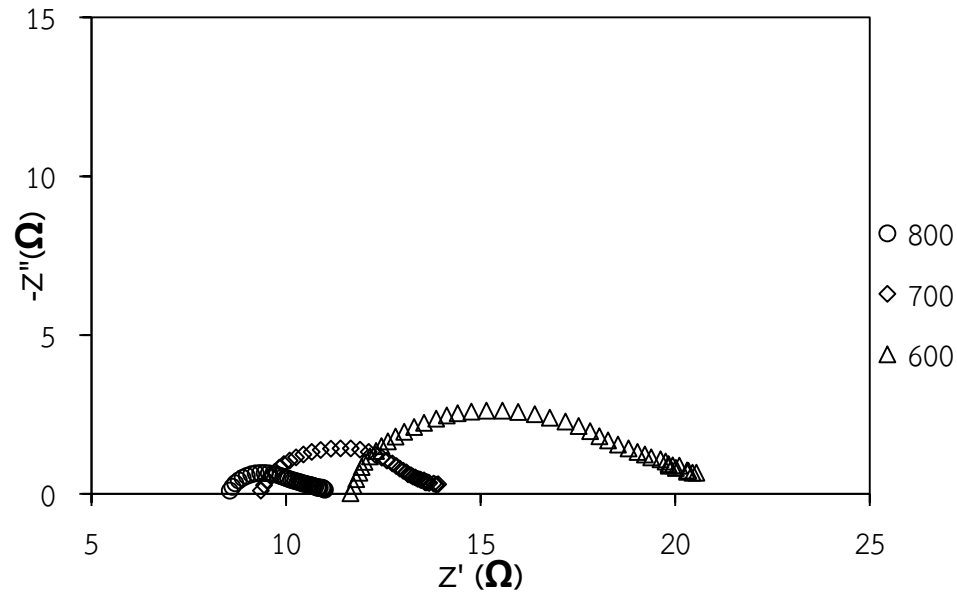
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.5.5 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้น ของ LSCa0.3 (บน) และ LSCa0.5 (ล่าง)



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้า ความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า ของเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นของ LSCa0.3 (บน) และ LSCa0.5 (ล่าง) ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

จากการพัฒนาขั้วไฟฟ้าในลักษณะ 2 ชั้นโดยการเคลือบชั้นของ LSCa0.3 ไว้ด้านล่างและเคลือบชั้นของ LSCa0.5 ทับลงไป ให้ผลที่ดีกว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าเดี่ยวทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากสมบัติในการนำไฟฟ้า และการนำไอออนของ LSCa0.5 และ LSCa0.3 ที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นลำดับของการเคลือบขั้วไฟฟ้าอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เช่นเดียวกัน ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วแคโทด 2 ชั้น โดยการเคลือบ LSCa0.5 ลงบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ก่อนแล้วจึงเคลือบ LSCa0.3 ทับลงบนชั้นของ LSCa0.5 หลังจากนั้นนำไปวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวได้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าดังรูปที่ 4.15 โดยค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 465.39 242.64 และ 108.19 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และได้ค่าอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.9 จากผลการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและค่าความต้านทานชนิดต่างๆ ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยให้ความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดสูงกว่าขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ได้ศึกษาก่อนหน้านี้โดยให้ค่าสูงถึง 465.39 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่ความต่างศักย์เท่ากับ 0.5 โวลต์



รูปที่ 4.16 กราฟไนจิสแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจริง ( $Z'$ ) และค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจินตภาพ ( $Z''$ ) ของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นของ LSCa0.3 (บน) และ LSCa0.5 (ล่าง) ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.9 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้น ของ LSCa0.3 (บน) และ LSCa0.5 (ล่าง) ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

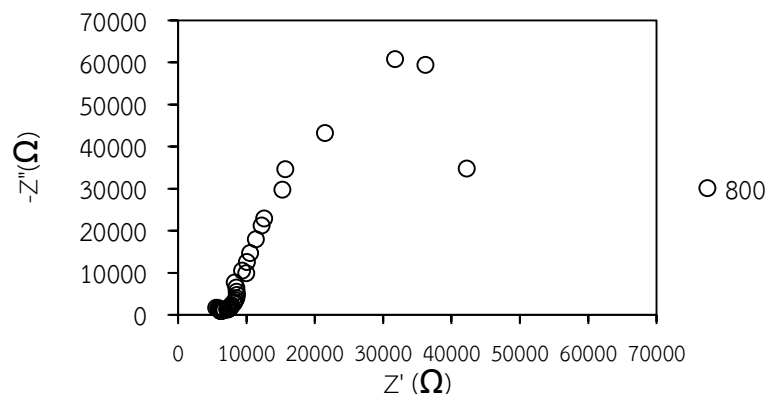
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$R_t$ (โอห์ม)	$R_s$ (โอห์ม)	$R_p$ (โอห์ม)
800	10.17	7.83	2.33
700	13.90	9.29	4.62
600	20.54	11.65	8.89

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นโดย LSCa0.3 อยู่ด้านบน และ LSCa0.5 อยู่ด้านล่าง มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าเดี่ยวของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 และให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าขั้วไฟฟ้า 2 ชั้นที่ LSCa0.5 อยู่ด้านบนและ LSCa0.3 อยู่ด้านล่าง

#### 4.5.6 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าคอมโพสิต $\text{LSCa}_x\text{-LSGM}$ โดยที่ $x = 0.5$ และ 0.3 อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก

คุณสมบัติหนึ่งของขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ดีคือ การเข้ากันได้ระหว่างขั้วแคโทดและอิเล็กโทรไลต์ หากขั้วแคโทดและอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะของโครงสร้างคล้ายคลึงกันจะทำให้ปฏิกิริยาบนพื้นผิวของแก๊สที่แพร่ผ่านมีความใกล้เคียงกัน ทำให้ค่าความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ผ่านของแก๊สจากชั้นแคโทดไปยังชั้นอิเล็กโทรไลต์มีค่าน้อยลง ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงให้ดีขึ้นได้

LSGM เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติในการพาออกไซด์ไอออนที่ดี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ LSGM เป็นอิเล็กโทรไลต์เช่นเดียวกัน จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิตระหว่าง LSGM กับ  $\text{LSCa}_{0.3}$  และคอมโพสิตระหว่าง LSGM กับ  $\text{LSCa}_{0.5}$  ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ผลการขึ้นรูปเซลล์เดี่ยวของคอมโพสิตทั้งสองชนิดพบว่าค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต  $\text{LSCa}_{0.3}$  กับ LSGM ไม่สามารถวัดค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าได้ เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้ามีค่าต่ำมาก (ค่ากระแสไฟฟ้าที่เซลล์เดี่ยวรับได้ น้อยกว่า 1 มิลลิแอมแปร์) และค่าอิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสมีค่าสูงมากดังแสดงในรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.10

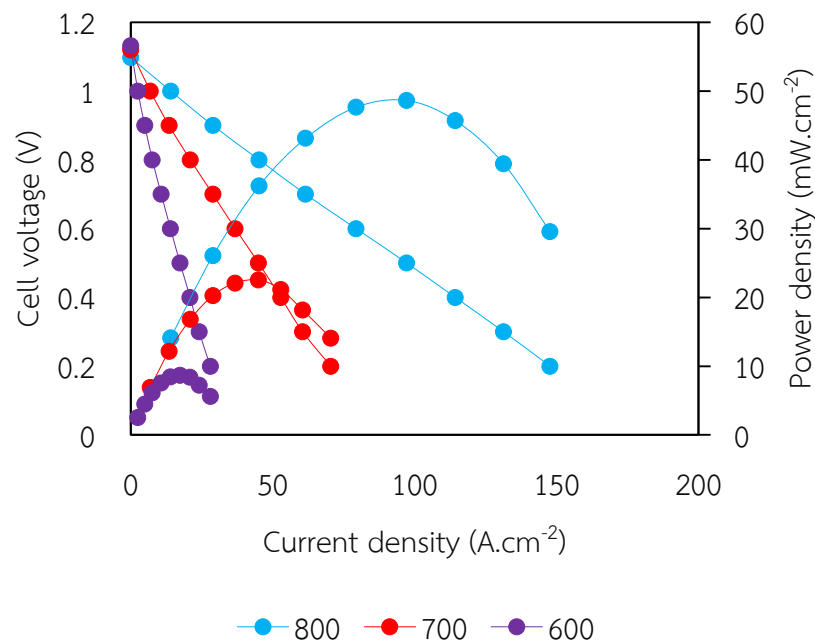


รูปที่ 4.17 กราฟไนจิสแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจริง ( $Z'$ ) และค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นจำนวนจินตภาพ ( $Z''$ ) ของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต  $\text{LSCa}_{0.3}\text{-LSGM}$  ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.10 ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพลารีเซชันของเซลล์ที่ใช้  
ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิตของ LSCa0.3-LSGM ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 800 องศา  
เซลเซียส

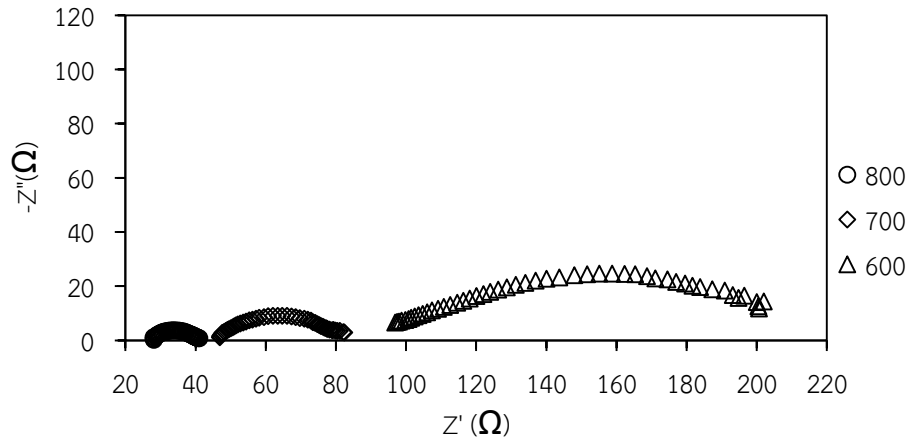
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$R_t$ (โอห์ม)	$R_s$ (โอห์ม)	$R_p$ (โอห์ม)
800	148204.00	5577.09	142626.91

ในขณะที่เซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิตระหว่าง LSCa0.5 กับ LSGM ให้ค่าความหนาแน่นของ  
พลังงานไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.18 กล่าวคือให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 48.62 22.53 และ 8.68 มิลลิ  
วัตต์ต่อตารางเมตรที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และให้ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของ  
เซลล์เดี่ยวดังรูปที่ 4.19 และค่าความต้านทานสรุุดังตารางที่ 4.11



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้า ความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นของ  
พลังงานไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าคอมโพสิต LSCa0.5-LSGM ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักที่  
อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**รูปที่ 4.19** ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าขั้วแคโทดคอมโพสิต LSCa0.5-LSGM ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

จากรูป 4.19 จะพบว่าค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้คอมโพสิต LSGM-LSCa0.3 เป็นขั้วแคโทดมีค่าสูงมาก ทำให้ไม่สามารถวัดค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าได้ ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้คอมโพสิต LSGM-LSCa0.5 เป็นขั้วแคโทดก็ให้ค่าความต้านทานที่สูงมาก เมื่อเทียบกับความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้ขั้วเดี่ยวของ LSCa0.5

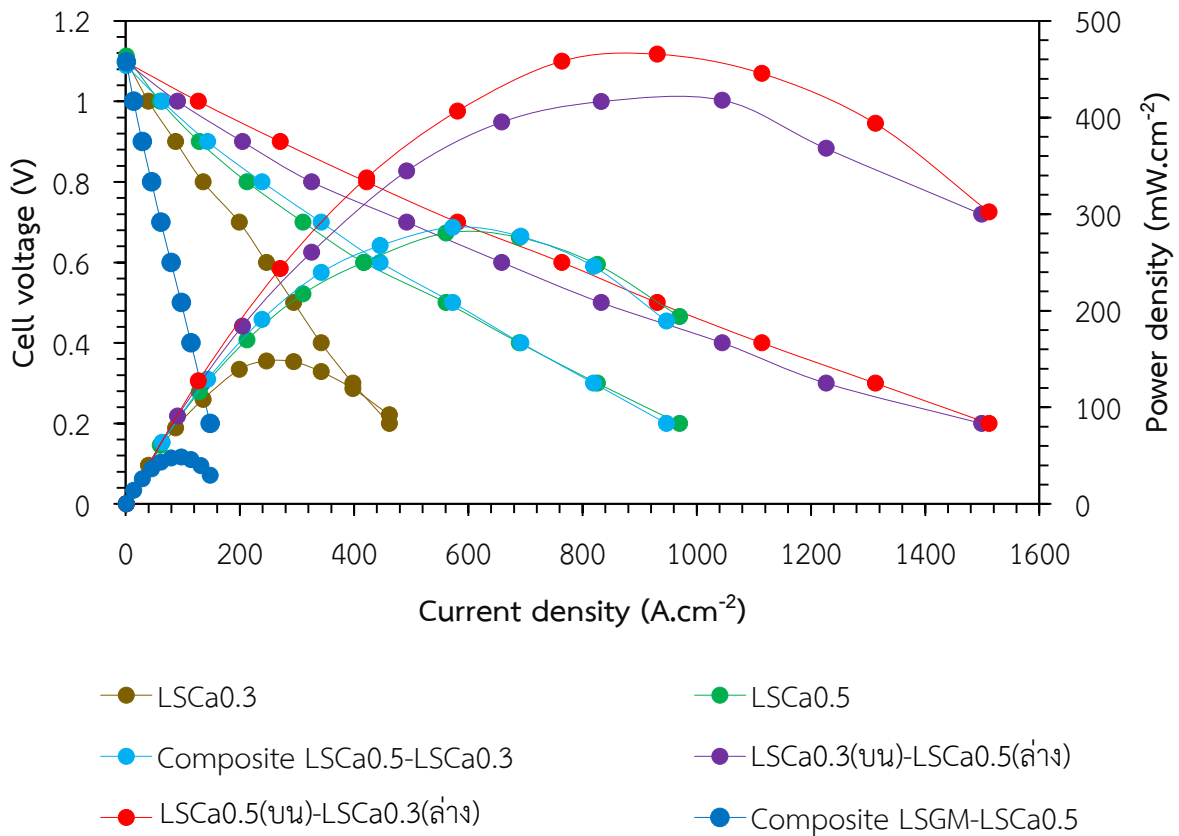
**ตารางที่ 4.11** ค่าความต้านทานรวม ค่าความต้านทานโอห์มมิก และค่าความต้านทานโพลาริเซชันของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิตของ LSCa0.5-LSGM ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$R_t$ (โอห์ม)	$R_s$ (โอห์ม)	$R_p$ (โอห์ม)
800	41.02	28.05	12.97
700	82.38	46.92	35.45
600	200.59	96.86	103.74

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วแคโทดคอมโพสิต LSGM-LSCa0.3 และ LSGM-LSCa0.5 เป็นขั้วแคโทด มีประสิทธิภาพแยกว่าเซลล์เดี่ยวที่ใช้ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ในลักษณะขั้วไฟฟ้าเดี่ยว



#### 4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

จากการวัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่อุณหภูมิ 800 700 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ทุกชนิดมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่ของแก๊สที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทำให้แก๊สออกซิเจนซึ่งเป็นแก๊สออกซิไดซ์สามารถแพร่ผ่านขั้วแคโทดผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแอโนดได้ดีขึ้น โดยพบว่าสามารถเรียงลำดับค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้ขั้วแคโทดแตกต่างกัน ดังนี้คือ ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นของ LSCa0.3(บน)-LSCa0.5(ล่าง) > ขั้ว 2 ชั้นของ LSCa0.5(บน)-LSCa0.3(ล่าง) > คอมโพสิต LSCa0.5-LSCa0.3 1:1 โดยน้ำหนัก > LSCa0.5 > LSCa0.3 >> คอมโพสิต LSGM-LSCa0.5 ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.20 ยกเว้นเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต LSGM-LSCa0.3 ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่สามารถวัดค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าได้ โดยประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวแต่ละชนิดสามารถอธิบายได้ด้วยปัจจัยต่างๆ ดังนี้

### อิมพีแดนซ์ของเซลล์เดี่ยว

จากกราฟไนจิสพบว่าสามารถแบ่งความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวได้ดังนี้ ความต้านทานโอห์มมิก ( $R_s$ ) หาได้จากจุดตัดแกน x ของกราฟไนจิสทางด้านซ้าย ความต้านทานรวม ( $R_t$ ) หาได้จากจุดตัดแกน x ของกราฟไนจิสทางด้านขวา และความต้านทานโพลาไรเซชัน ( $R_p$ ) หาได้จากผลต่างของความต้านทานรวม และความต้านทานโอห์มมิก โดยค่าความต้านทานแต่ละชนิดมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

**ค่าความต้านทานโอห์มมิก ( $R_s$ )** เกิดจากความต้านทานภายในวัสดุที่ใช้เป็นขั้วแคโทด อิเล็กโทรไลต์และขั้วแอโนด ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ ดังนี้

$$R_s = R_{\text{anode}} + R_{\text{electrolyte}} + R_{\text{cathode}}$$

ค่าความต้านทานโอห์มมิกมีความเกี่ยวข้องกับการแพร่ของแก๊สซึ่งในที่นี้คือแก๊สออกซิเจนซึ่งแพร่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดผ่านอิเล็กโทรไลต์ กล่าวคือ ค่าความต้านทานโอห์มมิกสามารถพิจารณาได้จากลักษณะของขั้วและการเชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้ากับอิเล็กโทรไลต์ หากพิจารณาค่าความต้านทานโอห์มมิกของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงทุกชนิดใช้ LSGM ที่มีความหนาเท่ากันเป็นอิเล็กโทรไลต์ และใช้  $\text{NiO-Fe}_2\text{O}_3$  เป็นขั้วแอโนดเช่นเดียวกัน ดังนั้น ความต้านทานที่ส่งผลให้ความต้านทานโอห์มมิกในเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดแตกต่างกันคือ ค่าความต้านทานของขั้วแคโทดและการยึดเกาะของขั้วแคโทดกับอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้

จากค่าความต้านทานโอห์มมิกของเซลล์เชื้อเพลิงที่แสดงดังตารางที่ 4.12 เห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่ค่าความต้านทานโอห์มมิกของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าประมาณ 7 - 8 โอห์ม ยกเว้น เซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็น  $\text{LSCa}_{0.3}$  คอมโพสิต  $\text{LSCa}_{0.3}$ -LSGM และคอมโพสิต  $\text{LSCa}_{0.5}$ -LSGM ซึ่งให้ค่าความต้านทานโอห์มมิกที่มีค่าสูง เท่ากับ 14.14 5,577.09 และ 28.05 โอห์ม ตามลำดับ และผลจากภาพภาพตัดขวางของเซลล์เชื้อเพลิงที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง SEM ในรูปที่ 4.22-4.23 พบว่าขั้วไฟฟ้าแคโทดทุกชนิดสามารถเชื่อมกับพื้นผิวของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ได้ดี ทำให้การเคลื่อนที่ของออกไซด์ไอออนจากขั้วไฟฟ้าแคโทดไปยังอิเล็กโทรไลต์เกิดได้ดี ดังนั้นค่าความต้านทานโอห์มมิกจึงต่ำและมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิง 3 ชนิดที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งอาจมีผลจากปัจจัยอื่นๆ กล่าวคือ

ในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด  $\text{LSCa}_{0.3}$  พบว่าอาจมีการหลุดร่อน (delamination) ของขั้วแคโทดออกจากแผ่นอิเล็กโทรไลต์ขณะเกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้ยังพบว่าไม่สามารถถ่ายรูปพื้นผิว และภาพตัดขวางของเซลล์ได้เพราะสารหลุดร่อนออกจากกันในขณะเตรียมสารเข้าเครื่อง SEM ทั้งนี้การหลุดร่อนอาจเกิดจากความไม่เข้ากันของ  $\text{LSCa}_{0.3}$  และ LSGM ซึ่งต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมด้วยค่าการขยายตัวทางความร้อนของสารทั้งสองชนิด โดยการหลุดร่อนดังกล่าวจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของออกไซด์ไอออนเกิดได้ยาก ทำให้ค่าความต้านทานโอห์มมิกมีค่าสูงกว่าเซลล์เดี่ยวชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า ความต้านทานโอห์มมิก ค่าความต้านทานโพลาไรเซชัน และ ASR ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วแคโทดชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

	LSCa0.3	LSCa0.5	คอมโพสิต LSCa0.3- LSCa0.5	LSCa0.5 (ล่าง) LSCa0.3 (บน)	LSCa0.3 (ล่าง) LSCa0.5 (บน)	คอมโพสิต LSGM-LSCa0.5	คอมโพสิต LSGM-LSCa0.3
ความหนาแน่น ของพลังงาน ไฟฟ้า (mW.cm <sup>-2</sup> )	147.97	280.30	286.40	417.87	465.39	48.62	-
ความต้านทาน โอห์มมิก (Ω)	14.14	7.84	8.90	7.83	8.50	28.05	5,577.09
ความต้านทาน โพลาไรเซชัน (Ω)	5.44	3.73	3.64	2.33	2.50	12.97	142,626.91
พื้นที่ผิว (cm <sup>2</sup> )	0.1257	0.1320	0.1257	0.1321	0.1257	0.1347	0.1257
ASR (Ω.cm <sup>2</sup> )	0.68	0.49	0.46	0.308	0.31	1.75	17,928.20

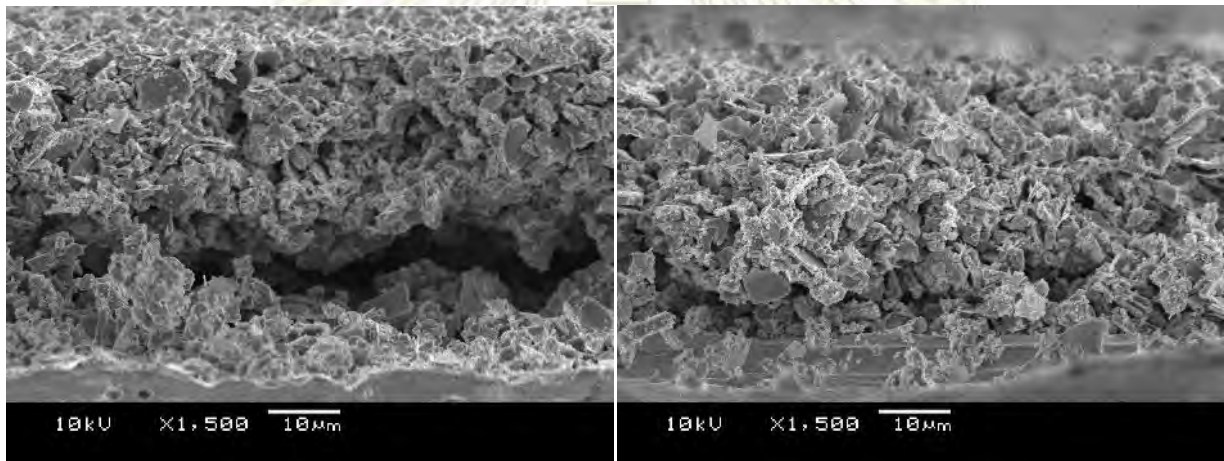
ในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต LSCa0.5 กับ LSGM พบว่า เมื่อมีการผสม LSGM ลงไป สารที่ได้จะมีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน โดย LSCa0.5 ที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะเกาะอยู่บน LSGM ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ส่งผลให้ขนาดอนุภาคโดยรวมใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคของ LSCa0.5 ที่ไม่มีการทำคอมโพสิต ดังภาพพื้นผิวของเซลล์ในรูปที่ 4.23 ซึ่งขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่นี้อาจส่งผลให้การยึดเกาะของอนุภาคกับแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM เกิดได้ไม่ดี ดังรูป 4.21 การส่งผ่านออกไซด์ไอออนจึงเกิดได้ไม่ดี ค่าความต้านทานจึงสูง



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบการยึดเกาะบนพื้นผิวระหว่างอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต LSCa0.3-LSGM ซึ่งมีค่าความต้านทานโอห์มมิกสูงที่สุดสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวมาคือ LSGM มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่เมื่อผสมรวมกับ

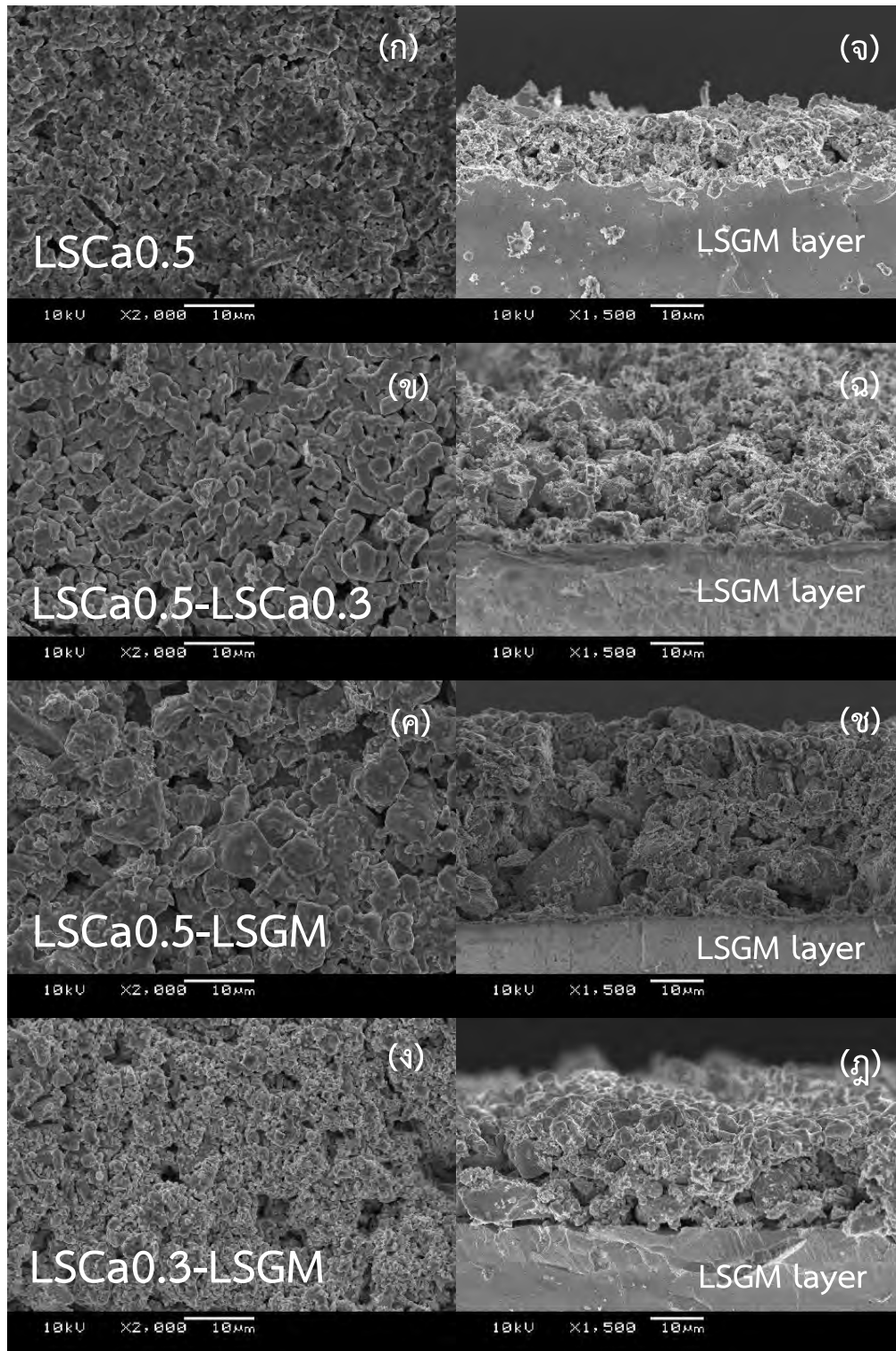
LSCa0.3 ซึ่งเดิมมีขนาดอนุภาคที่เล็กทำให้อนุภาคโดยรวมมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการยึดเกาะของอนุภาคบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าภาพพื้นผิวของคอมโพสิต LSCa0.3-LSGM นั้นมีขนาดเล็กกว่าคอมโพสิต LSCa0.5-LSGM ดังนั้นควรมีการยึดเกาะกับอิเล็กโทรไลต์ได้ดีกว่า แต่ผลการทดลองพบว่ามีค่าความต้านทานไอโอมิกสูงกว่า ทั้งนี้อาจมีผลร่วมมาจากความไม่เข้ากันทางด้านการขยายตัวทางความร้อนของ LSCa0.3 กับ LSGM นอกจากนี้สังเกตได้ว่าในกรณีของเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดสองชั้นพบว่า เซลล์ที่มีการเคลือบ LSCa0.3 ไว้ด้านล่างให้ค่าความต้านทานไอโอมิกที่สูงกว่าเซลล์ที่เคลือบ LSCa0.5 ไว้ด้านล่างและในเซลล์ที่เคลือบ LSCa0.3 ไว้ด้านล่างเกิดช่องว่าง (boundary) ขนาดใหญ่ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งยืนยันได้ว่าเกิดจากการไม่เข้ากันของ LSCa0.3 และ LSGM ทำให้ออกไซด์ไอออนเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จึงทำให้ค่าความต้านทานไอโอมิกของเซลล์ที่เคลือบ LSCa0.3 ไว้ด้านล่างมีค่าสูงกว่าเซลล์ที่เคลือบ LSCa0.5 ไว้ด้านล่าง



รูปที่ 4.22 ภาพตัดขวางเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดสองชั้นของเซลล์ที่เคลือบ LSCa0.3 ไว้ด้านล่าง (ซ้าย) และเซลล์ที่เคลือบ LSCa0.5 ไว้ด้านล่าง (ขวา)

สุดท้ายคือเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วไฟฟ้าคอมโพสิต LSCa0.3-LSCa0.5 ซึ่งพบว่ามีค่าความต้านทานไอโอมิกสูงกว่า LSCa0.5 เล็กน้อย แต่ต่ำกว่า LSCa0.3 อาจเป็นผลมาจากการผสม LSCa0.3 ลงใน LSCa0.5 ทำให้การขยายตัวทางความร้อนของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่าความต้านทานไอโอมิกจึงสูงขึ้นเล็กน้อย

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.23 ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทด (ก) LSCa0.5 (ข) คอมโพสิต LSCa0.3-LSCa0.5 (ค) คอมโพสิต LSCa0.5-LSGM (ง) คอมโพสิต LSCa0.3-LSGM และภาพตัดขวางเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด (จ) LSCa0.5 (ฉ) คอมโพสิต LSCa0.3-LSCa0.5 (ช) คอมโพสิต LSCa0.5-LSGM (ญ) คอมโพสิต LSCa0.3-LSGM หลังการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

**ค่าความต้านทานโพลาริเซชัน** เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ การเคลื่อนที่ของแก๊สผ่านอนุภาคของขั้วไฟฟ้า โดยทั่วไปมีรายงานผลของค่าความต้านทานโพลาริเซชันในลักษณะของค่าความต้านทานจำเพาะต่อพื้นที่ผิว (Area specific resistance; ASR) ในหน่วยโอห์มตารางเซนติเมตร โดยค่า ASR ของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วแคโทดชนิดต่างๆ ให้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.9

จากตารางที่ 4.9 สามารถเรียงลำดับค่า ASR ของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วแคโทดชนิดต่างๆ ดังนี้ คอมโพสิต LSGM-LSCa0.3 >> คอมโพสิต LSGM-LSCa0.5 >> LSCa0.3 > LSCa0.5 > คอมโพสิต LSCa0.5-LSCa0.3 > LSCa0.3 (ล่าง) -LSCa0.5 (บน) > LSCa0.5 (ล่าง) - LSCa0.3 (บน) ซึ่งพบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า กล่าวคือขั้วไฟฟ้าที่ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงจะต้องมีค่าความต้านทานจำเพาะต่อพื้นที่ผิวต่ำ โดยสามารถอธิบายค่าความต้านทานจำเพาะของพื้นที่ผิวของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ได้ ดังนี้

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วแคโทดคอมโพสิต LSGM-LSCa0.3 และ คอมโพสิต LSGM-LSCa0.5 ซึ่งให้ค่าความต้านทานจำเพาะต่อพื้นที่ผิวมากที่สุดเนื่องจาก LSGM เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการนำออกไซด์ไอออนได้ดี แต่มีคุณสมบัติในการนำอิเล็กตรอนที่แย่ ดังนั้นการบดผสม LSGM ลงไปทำให้การนำไฟฟ้าแบบอิเล็กตรอนของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ต่ำลง ค่าความต้านทานจึงสูงขึ้น นอกจากนี้หากพิจารณาลักษณะพื้นผิวของสารประกอบคอมโพสิต LSCa0.5-LSGM หลังการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.23 จะพบว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคเดี่ยวของ LSCa0.3 จึงทำให้การเชื่อมต่อนระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นน้อย ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและออกไซด์ไอออนเกิดได้ยากขึ้น เช่นเดียวกับลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต LSGM-LSCa0.3 ซึ่งพบว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นจำนวนมาก เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นทำให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นได้ไม่ดี ประกอบกับการไม่เข้ากันของ LSGM และ LSCa0.3 จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วแคโทดคอมโพสิต LSGM-LSCa0.3 มีค่า ASR สูงที่สุด

ในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้ขั้วแคโทดเดี่ยวของ LSCa0.3 และ LSCa0.5 พบว่าค่าความต้านทานมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่มีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้ ดังนั้นในการทดลองนี้ ค่า ASR ของ LSCa0.5 มีค่าต่ำกว่า LSCa0.3 เนื่องจากสารประกอบ LSCa0.5 มีความหนาแน่นของช่องว่างออกซิเจนภายในโครงสร้างมากกว่า ซึ่งพิจารณาจากค่า TGA ที่ได้แสดงไว้เบื้องต้น ออกไซด์ไอออนจึงเคลื่อนที่ผ่าน LSCa0.5 ได้มากกว่า ทำให้เกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์ไฟฟ้าได้ดีกว่าสารประกอบ LSCa0.3 นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังพบว่า LSCa0.3 เกิดการหลุดร่อนเนื่องจากการไม่เข้ากันของ LSCa0.3 กับ LSGM ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วแคโทด LSCa0.3 แย่ลง

ต่อมาพิจารณาเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วไฟฟ้าคอมโพสิต LSCa0.3-LSCa0.5 จะเห็นได้ว่ามีค่า ASR มีค่าน้อยกว่าเซลล์ที่ใช้ขั้วแคโทดเดี่ยว เนื่องจากอนุภาคของ LSCa0.3 ซึ่งมีขนาดเล็กและมีสมบัติในการนำไฟฟ้าแบบอิเล็กตรอนได้ดีจะไปเกาะอยู่บนอนุภาคของ LSCa0.5 ซึ่งมีขนาดใหญ่ดังรูปที่ 4.23 ทำให้จับตัวกันของอนุภาคเพิ่ม

มากขึ้น ประกอบกับ LSCa0.5 มีสมบัติในการนำออกไซด์ไอออนได้ดี ทำให้ออกไซด์ไอออนและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในโครงสร้างดังกล่าวได้ดีขึ้น ค่า ASR จึงมีค่าต่ำกว่าในขั้วแคโทดเดี่ยว

ในกรณีเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดสองชั้นพบว่า เซลล์ที่มีการเคลือบ LSCa0.5 ติดกับแผ่นอิเล็กโทรไลต์ให้ค่า ASR ต่ำกว่าเซลล์ที่เคลือบ LSCa0.3 ติดกับแผ่นอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจาก LSCa0.5 มีความหนาแน่นของช่องว่างออกซิเจนมากกว่า LSCa0.3 ดังนั้นการเคลือบ LSCa0.5 ไว้ด้านล่างจะทำให้ออกไซด์ไอออนเคลื่อนที่ผ่านขั้วแคโทดไปยังอิเล็กโทรไลต์ได้ดีกว่าในกรณีที่เคลือบ LSCa0.3 ไว้ด้านล่าง นอกจากนี้การหลุดร่อนของ LSCa0.3 เนื่องจากความไม่เข้ากันของ LSCa0.3 กับ LSGM ก็เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงที่เคลือบ LSCa0.3 ไว้ด้านล่างมีค่า ASR เพิ่มขึ้น

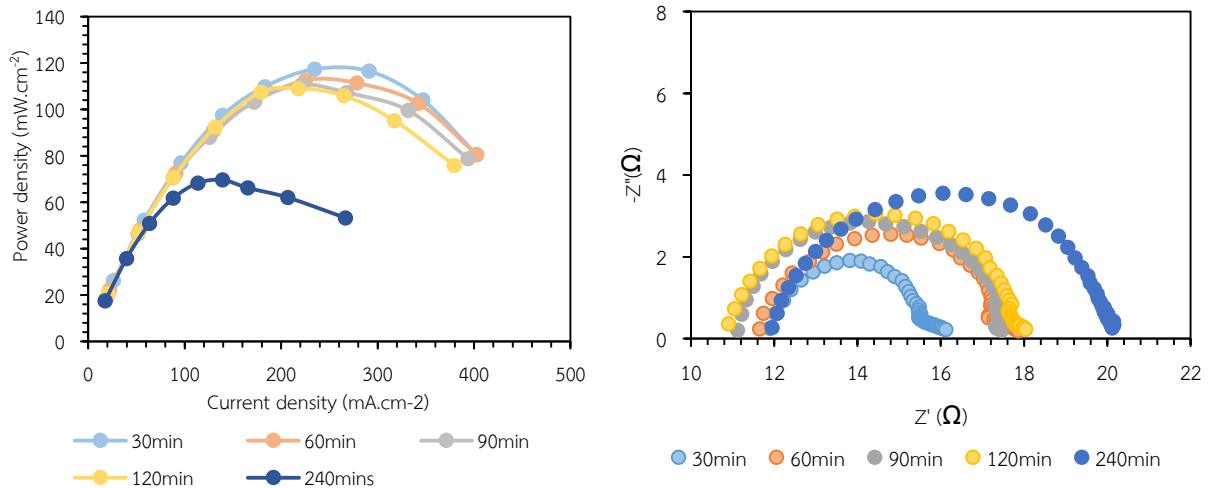
**ค่าความต้านทานรวม** พิจารณาจากค่าความต้านทานโอห์มมิก รวมกับค่าความต้านทานโพลารไรเซชัน พบว่าค่าความต้านทานรวมของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วแคโทดชนิดต่างๆ สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามนอกจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้นยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น ความต้านทานของสายไฟของเครื่องมือที่ใช้วัด ความหนาแน่นของขั้วไฟฟ้า และ อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งส่งผลต่อค่าความต้านทานโอห์มมิกของเซลล์เชื้อเพลิง รวมถึงความเร็วของแก๊สที่ผ่านเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งส่งผลต่อค่าความต้านทานโพลารไรเซชัน ซึ่งต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

อย่างไรก็ดีในการวิจัยนี้สามารถพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจาก LSCa0.3 และ LSCa0.5 ได้โดยใช้ขั้วแคโทดคอมโพสิตของสารทั้งสอง และพัฒนาขั้วแคโทดสองชั้น โดยพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด คือ เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วแคโทดสองชั้นโดยการเคลือบ LSCa0.5 ติดกับแผ่นอิเล็กโทรไลต์

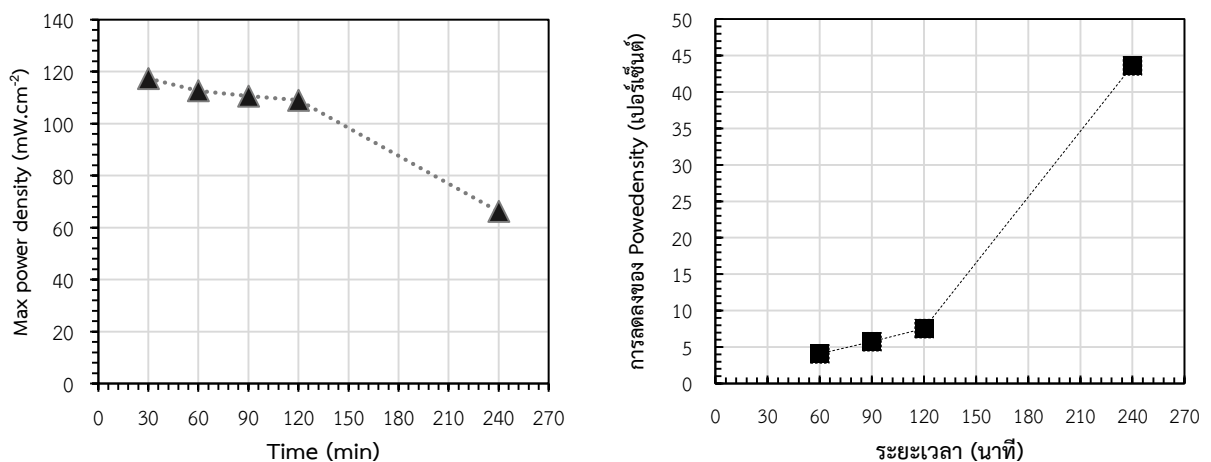
#### 4.7 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงที่สุดในด้านความคงตัว (Stability) ของเซลล์เดี่ยวเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้ว 2 ชั้นของ LSCa0.5 (ล่าง) – LSCa0.3 (บน) เป็นขั้วแคโทดให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเทียบกับเซลล์อื่นๆ ที่ได้พัฒนาขึ้น จึงมีความสนใจที่จะศึกษาความคงตัวของความหนาแน่นของพลังงานดังกล่าวเมื่อเวลาผ่านไป โดยทำการวัดค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และทำการบันทึกผลค่าความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าหลังเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เป็นเวลา 30 60 90 120 และ 240 นาที พบว่าค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.24 (ซ้าย) และค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะลดต่ำลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 240 นาทีซึ่งสันนิษฐานว่าการลดลงของค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าเกิดจากการเสื่อมคุณภาพของเซลล์ หรือการหลุดร่อน (delamination) ของสารประกอบ LSCa0.3 และ LSCa0.5 ที่ใช้เป็นขั้วแคโทด ในขณะที่ค่าอิมพีแดนซ์รูปที่ 4.24 (ขวา) แสดงให้เห็นว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเซลล์เกิดปฏิกิริยานานขึ้น แต่พบว่าค่าความต้านทานโอห์มมิก (พิจารณาจากจุดตัดกราฟในจิสทางด้านซ้ายมือ) มีค่าลดต่ำลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

ทั้งนี้อธิบายได้ว่า เมื่อปล่อยให้เซลล์เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลานานขึ้น โครงสร้างจะมีการสะสมพลังงาน และเกิดการหลุดออกของออกซิเจน ทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจนมากขึ้น ออกไซด์ไอออนจึงเคลื่อนที่ผ่านเซลล์ได้ดี ค่าความต้านทานไอห้มีค่างิ่งมีค่าต่ำ แต่ค่าความต้านทานโพลาริเซชันจะมีค่าสูงขึ้นทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกหรือขนาดอนุภาคของสาร หรือการหลุดร่อนของสารประกอบซึ่งพบว่าในช่วง 60-120 นาทีแรก สารยังมีค่าความต้านทานโพลาริเซชันใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเวลาผ่านไป 240 นาทีสารมีค่าโพลาริเซชันเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสารเกิดการหลุดร่อนทำให้ออกไซด์ไอออนเคลื่อนที่ในโครงสร้างได้ไม่ดี ค่าความต้านทานจึงสูงขึ้น



รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวที่เกิดปฏิกิริยาในระยะเวลาต่างๆ (ซ้าย) และการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์ที่ระยะเวลาต่างๆ (ขวา)



รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเทียบกับเวลาที่ปล่อยให้เซลล์เกิดปฏิกิริยา (ซ้าย) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าเทียบกับระยะเวลาที่ปล่อยให้เซลล์เกิดปฏิกิริยา (ขวา)



จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้ว 2 ชั้นของ LSCa0.5 (ล่าง) – LSCa0.3 (บน) เป็นขั้วแคโทดให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานค่อนข้างคงที่ เมื่อปล่อยให้เซลล์เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลาไม่เกิน 120 นาที (ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าลดลง 7.6 เปอร์เซ็นต์) โดยอัตราการลดลงของความหนาแน่นของพลังงานแสดงดังรูปที่ 4.25 และหลังจาก 120 นาทีค่าความหนาแน่นของพลังงานจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้อาจเนื่องจากการหลุ่ร้อนของขั้วไฟฟ้าหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบ เช่น โครงสร้างผลึก ขนาดอนุภาค เป็นต้น



## บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

สามารถสังเคราะห์สารประกอบเพอโรฟสไกต์ออกไซด์แบบ 3 ชั้นของ  $\text{LaSr}_{2.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa0.3) และ  $\text{LaSr}_{2.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Fe}_3\text{O}_{10}$  (LSCa0.5) ด้วยวิธีในเตรตซีเตรตประยุกต์โดยสารที่ได้มีหน่วยเซลล์เป็นเตตระโกนอล และพื้นผิวของแผ่นเมมเบรนของสารประกอบ LSCa0.3 เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และมีรูพรุนน้อย ส่วนพื้นผิวของแผ่นเมมเบรนของสารประกอบ LSCa0.5 เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และมีรูพรุนน้อย เช่นกัน และเมื่อวัดประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ LSCa0.3 เป็นขั้วแคโทด โดยมี LSGM เป็นอิเล็กโทรไลต์ และ  $\text{NiO-Fe}_2\text{O}_3$  เป็นขั้วแอโนด พบว่าให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 147.97 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และค่าความต้านทานจำเพาะต่อพื้นผิวเท่ากับ 0.6844 โอห์มตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าการหลุดร่อนของขั้วไฟฟ้า LSCa0.3 ออกจากแผ่นอิเล็กโทรไลต์เนื่องจากความไม่เข้ากันทางการขยายตัวทางความร้อนของวัสดุ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง ในขณะที่เซลล์เดี่ยวที่ใช้ LSCa0.5 เป็นขั้วแคโทดให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 280.30 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานจำเพาะต่อพื้นผิวเท่ากับ 0.4922 โอห์มตารางเซนติเมตร

เมื่อนำสารประกอบทั้งสองชนิดมาพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าคอมโพสิตต่างๆ พบว่า ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต LSCa0.3-LSCa0.5 ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานเพิ่มขึ้นจากขั้วไฟฟ้าเดี่ยว LSCa0.3 และ LSCa0.5 เล็กน้อย และมีค่าความต้านทานจำเพาะต่อพื้นผิวต่ำกว่าเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.3 แต่สูงกว่าเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด LSCa0.5 ซึ่งเกิดจากความไม่เข้ากันของ LSCa0.3 กับ LSGM

ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต LSCa0.3-LSGM และ LSCa0.5-LSGM ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าต่ำมาก และทำให้ค่าความต้านทานสูงขึ้นเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่ไม่มีการคอมโพสิต ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมบัติการนำอิเล็กตรอนที่แย่ของ LSGM ประกอบกับขนาดอนุภาคของ LSGM ที่มีขนาดใหญ่ส่งผลต่อการยึดเกาะบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ได้ไม่ดี จึงทำให้เซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำ

ในขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นที่ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด จะพบว่าลำดับของการเคลือบส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้า โดยเซลล์ไฟฟ้าที่เคลือบ LSCa0.5 ไว้ด้านล่างให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์ไฟฟ้าที่เคลือบ LSCa0.3 ไว้ด้านล่าง เนื่องจาก LSCa0.3 เกิดการหลุดร่อนออกจากอิเล็กโทรไลต์จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วดังกล่าวมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเล็กน้อย ประกอบกับคุณสมบัติในการนำไอออนที่ดีของ LSCa0.5 ซึ่งเมื่อเคลือบไว้ติดกับอิเล็กโทรไลต์จะทำให้ไอออนเคลื่อนที่ผ่านไปได้ดีกว่า ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้ามีค่าสูงถึง 465.39 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดของ LSCa0.3 และ LSCa0.5

จึงสรุปได้ว่าสามารถพัฒนาขั้วไฟฟ้าแคโทดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจากขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้นโดยการเคลือบ LSCa0.5 ไว้ด้านล่างแล้วเคลือบ LSCa0.3 ทับลงบนชั้นของ LSCa0.5 ซึ่งได้นำเซลล์เดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดดังกล่าวไปศึกษาความคงตัวของความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทำให้พบว่าเซลล์มีอายุการใช้งานประมาณ 120 นาทีหลังจากเกิดปฏิกิริยา หลังจากนั้นค่าความหนาแน่นของพลังงานจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากการหลุ่ร้อนของขั้วไฟฟ้าแคโทดหรือประสิทธิภาพของวัสดุเสื่อมลงเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

แนวทางการปรับปรุงและพัฒนางานวิจัยนี้ ได้แก่

1. ทำการทดลองเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าการขยายตัวทางความร้อนของสาร LSCa0.3 LSCa0.5 และ LSGM เพื่อศึกษาการเข้ากันของสารประกอบทั้ง 3 ชนิด ซึ่งอาจมีผลต่อประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าคอมโพสิต
2. ทำการทดลองปรับสัดส่วนในการคอมโพสิต เพื่อศึกษาถึงผลของสัดส่วนในการคอมโพสิตต่อประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าแคโทดคอมโพสิต
3. ทำการทดลองปรับความหนาแน่นของขั้วไฟฟ้าแคโทด 2 ชั้น เพื่อศึกษาถึงผลของความหนาแน่นต่อประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าแคโทด

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## เอกสารอ้างอิง

1. Stambouli, A. B.; Traversa, E. Fuel cells, an Alternative to Standard Sources of Energy. *Renew Sustain Energ Rev.* **2002**, *6*, 297-306
2. Badwel, S. P. S.; Foger, K. Solid Oxide Electrolyte Fuel Cell Review. *Ceram Int.* **1996**, *22*, 257-265.
3. Beznosikov, B. V.; Aleksandrov K. S. Perovskite-Like Crystals of the Ruddlesden–Popper Series<sup>1</sup>. *Crystallogr Rep+.* **2000**, *45*, 792–798.
4. Swierczek, K.; Dabrowski, B.; Suescun, L.; Kolesnik, S. Crystal Structure and Magnetic Properties of High-Oxygen Pressure Annealed  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$  ( $0 \leq x \leq 0.5$ ). *J. Solid State Chem.* **2009**, *182*, 280-288.
5. Teraoka, Y.; Zhang, H.; Furukawa, S.; Yamazoe, N. Oxygen Permeation Through Perovskite-Type Oxides. *Chem. Lett.* **1985**, *1985*, 1743-1746.
6. Shao, Z.; Halie, S. M. A. High-Performance Cathode for the Next Generation of Solid-Oxide Fuel Cells. *Nature.* **2004**, *431*, 170-173.
7. Lee, K. T.; Manthiram, A.  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_{3-y}\text{Co}_y\text{O}_{10-\delta}$  ( $0 \leq y \leq 1.5$ ) Intergrowth Oxide Cathode for Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells. *Chem. Mater.* **2006**, *18*, 1621-1626.
8. Garibay, T. C.; Kovar, D. Perovskite-Related Intergrowth Cathode Material with Thin YSZ Electrolyte for Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells. *J Power Sources.* **2009**, *192*, 396-399.
9. Guoguang, Z.; Qin, L.; Jingqian, C.; Mingjie, C. Defect structure and electrical properties of  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_3\text{O}_{10-\delta}$ . *J Rare Earth.* **2010**, *28*, 270-273.
10. Kim, J. H.; Lee, K. T. .; Kim, Y. N.; Manthiram, A. Crystal Chemistry and Electrochemical Properties of  $\text{Ln}(\text{Sr},\text{Ca})_3(\text{Fe},\text{Co})_3\text{O}_{10}$  Intergrowth Oxide Cathodes for Solid Oxide Fuel Cells. *J. Mater. Chem.* **2011**, *21*, 2482-2488.
11. Armstrong, T. J.; Virka, V. A. Performance of Solid Oxide Fuel Cells with LSGM-LSM Composite Cathode. *J. Electrochem Soc.* **2002**, *12*, A1565-A1571.

12. Ko, J. H.; Myung, J. H.; Hyun, S. H.; Chung, J. S. Synthesis of LSM–YSZ–GDC Dual Composite SOFC Cathodes for High-Performance Power-Generation Systems. *J Appl Electrochem.* **2012**, *42*, 209-215.
13. Ko, J. H.; Myung, J. H.; Lee, J. H.; Hyun, S. H.; Chung, J. S. Synthesis and evaluation of  $(\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4})(\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8})\text{O}_3$  (LSCF)– $\text{Y}_{0.08}\text{Zr}_{0.92}\text{O}_{1.96}$  (YSZ)– $\text{Gd}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_{2-\delta}$  (GDC) dual composite SOFC cathodes for high performance and durability. *Int J Hydrogen Energ.* **2012**, *37*, 17209-17216.
14. Liu, Z.; Liu, M.; Yang, L.; Liu, M. LSM-Infiltrated LSCF Cathodes for Solid Oxide Fuel Cells. *J Energy.* **2013**, *22*, 555-559.
15. Rotureau, A.; Viricelle, J. P.; Pijolat, C.; Caillol, N.; Pijolat M.; Development of a Planar SOFC Device Using Screen-printing Technology. *J European Ceramic Soc.* **2005**, *12*, 2633-2636.
16. Richter, J.; Holtappels, P.; Graule, T.; Nakamura, T.; Gauckler, L. J. Material Design for Perovskite SOFC Cathode. *Monatsh Chem.* **2009**, *140*, 985-999.
17. Navrotsky, A.; Energetics and Crystal Chemical Systematics among Ilmenite, Lithium Niobate, and Perovskite Structures. *Chem. Mater.* **1998**, *10*, 2787.
18. Richter, J.; Holtappels, P.; Graule, T.; Nakamura, T.; Gauckler, L. J. Material Design for Perovskite SOFC Cathode. *Monatsh Chem.* **2009**, *140*, 985-999.
19. Zhou, W.; Ran, R.; Shao Z. Progress in Understanding and Development of  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ -Based Cathode for Intermediate-Temperature Solid Oxide Fuel Cell A Review. *J Power Sources.* **2009**, *192*, 231-246.
20. Hydrargyrum. X-ray crystallography. [https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray\\_crystallography](https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_crystallography) (accessed April 10, 2016).
21. Nishiyama, H.; Ogura, T.; Maruyama, Y.; Koizumi, M.; Mio, K.; Kitamura, S.; Sato, C.; Atmospheric Scanning Electron Microscope Observes Cells and Tissues in Open Medium through Silicon Nitride Flim. *J Structural Biology.* **2010**, *169*, 438-449.
22. Alfred H. G., Die elektrische Impedanz von Epithelien. [http://klinphys.charite.de/themen\\_ahg/impedance\\_d.htm](http://klinphys.charite.de/themen_ahg/impedance_d.htm) (accessed April 9, 2016)
23. Electrochemistry and Corrosion Science., Nestor P., Kluwer Academic Publishers. **2004**, <http://coatings.mst.edu/newsletter%20v10/newsletter%20v10i6/> (accessed April 11, 2016).

24. Missouri S&T Coatings Institute., Yousef D., Graduate Research Student., Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). **2013**, 10

<http://coatings.mst.edu/newsletter%20v10/newsletter%20v10i6/> (accessed April 11, 2016)

25. Guoguang, Z.; Qin, L.; Jingqian, C.; Mingjie, C. Defect Structure and Electrical Properties of  $\text{LaSr}_3\text{Fe}_3\text{O}_{10-\delta}$ . *J. Rare. Earth*, **2010**, 28, 270-273.

26. Cho, P. S.; Park, S. Y.; Cho, Y. H.; Kim, S. J.; Kang, Y. C.; Mori, T.; Lee, J. H. Preparation of LSGM Powders for Low Temperature Sintering. *Solid State Ionic*. **2009**, 180, 788-791.



## ประวัติผู้วิจัย

นายวัชรพล พัตยนตร์ เกิดเมื่อวันที่ 14 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดสิงห์บุรี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวินิตศึกษา ในพระราชูปถัมภ์ฯ จังหวัดลพบุรี เมื่อปีการศึกษา 2554 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 67/31 หมู่ที่ 11 ตำบลต้นโพธิ์ อำเภอเมืองสิงห์บุรี จังหวัดสิงห์บุรี รหัสไปรษณีย์ 16000 อีเมล vtine14@gmail.com



ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย