



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การเพิ่มประสิทธิภาพของ LSGM อิเล็กโทรไลต์ สำหรับใช้งานในเซลล์
เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

Development of LSGM electrolyte material for increasing
efficiency of solid oxide fuel cells

ชื่อนิสิต นางสาวนวรรตน์ คำศรี

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2559

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเพิ่มประสิทธิภาพของ LSGM อิเล็กโทรไลต์ สำหรับใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

Development of LSGM electrolyte material for increasing efficiency of
solid oxide fuel cells

โดย

นางสาวนวรรตน์ คำศรี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2559

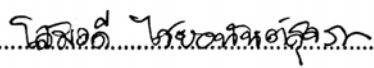
โครงการ การเพิ่มประสิทธิภาพของ LSGM อิเล็กโทรไลต์ สำหรับใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์
แข็ง

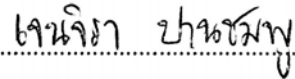
โดย นางสาวนวิรัตน์ คำศรี

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

.....  ประธานโครงการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ประไพรัชสิทธิ์)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภณดี ไชยอนันต์สุจริต)

.....  กรรมการ
(อาจารย์ ดร.เจนจิรา ปานชมพู)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

.....หัวหน้าภาควิชาเคมี

(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)

วันที่ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ ดีมาก ดี พอใช้

ชื่อโครงการ การเพิ่มประสิทธิภาพของ LSGM อิเล็กโทรไลต์ สำหรับใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

ชื่อนิติในโครงการ นางสาววรัตน์ คำศรี เลขประจำตัว 5633094423

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภณ ไซยอนันต์สุจริต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

$\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (LSGM) ถูกใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส เพื่อลดความต้านทานทางไฟฟ้าของเซลล์ จึงทำการพัฒนาอิเล็กโทรไลต์ LSGM ให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นโดยทำการเคลือบสาร LSGM ที่มีรูพรุนบนพื้นผิวของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับรูพรุนได้แก่ ผลของวิธีการเคลือบผิวไฟฟ้าบนรูพรุน อัตราส่วนของสารเกิดรูพรุนคือผง LSGM และ rice starch และอุณหภูมิที่ใช้ในการ sintering เพื่อเกิดรูพรุน การพิสูจน์เอกลักษณ์และลักษณะทางกายภาพของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ทำการพัฒนา ด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์พาวเดอร์ดิฟแฟรกชัน (XRD), การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (EIS) และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (SEM) จากผลการทดลองพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ผ่านการพัฒนาพื้นผิวของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ด้วย 40 เปอร์เซ็นต์ rice starch และ sintering ที่ 1450 องศาเซลเซียส มีค่าความต้านทานต่ำสุดประมาณ 3.56 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ในการวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 649.37 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่ได้ทำการเพิ่มพื้นที่ผิวบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 319.91 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

คำสำคัญ: เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง, เพอรอฟสไกต์, สารอิเล็กโทรไลต์ LSGM

Project Title Development and synthesis of electrolyte material for increasing efficiency of solid oxide fuel cells

Student Name Miss Nawarat Khamsri Student ID 5633094423

Advisor Name Assistant Professor Dr. Soamwadee Chaianansutcharit

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2016

Abstract

The solid electrolyte material $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (LSGM) perovskite oxide is a potential electrolyte for intermediate-temperature solid oxide fuel cells (SOFCs). To reduce polarization resistance in fuel cell, porous LSGM was developed by adding porous LSGM structure onto the surface of dense LSGM. The influencing factors such as electrode coating technique, a variation of porous former and the sintering temperature were investigated. The characterization of porous LSGM material included x-ray powder diffraction (XRD), electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and scanning electron microscopy (SEM). The lowest polarization resistance of $3.56 \Omega\cdot\text{cm}^2$ was achieved from the porous LSGM material made from 40% rice starch and 1450°C sintering temperature in asymmetric cell. The single cell performance test of the optimized porous LSGM was reported as $649.37 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ which is higher than a maximum power density of cell with a regular LSGM as $319.91 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ at 800°C .

Keywords: Solid oxide fuel cells, Perovskite, LSGM electrolyte

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและรายงานฉบับนี้ สำเร็จไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์อย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภณดี ไชยอนันต์สุจริต ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ รวมไปถึงได้ให้แนวคิดในการทำงานและแก้ปัญหาตลอดช่วงระยะเวลาในการทำวิจัย อีกทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขรายงานฉบับนี้ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ประไพรัชสิทธิ์ และอาจารย์ ดร.เจนจิรา ปานชมพู ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าให้เกียรติในการเป็นประธานกรรมการและกรรมการในการสอบงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี ที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (solid oxide fuel cells) นิสิตปริญญาเอกและนิสิตปริญญาโท ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และให้ความรู้เกี่ยวกับงานวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
1.3.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)	4
1.3.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFCs).....	5
1.3.3 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite structure).....	8
1.3.4 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ	10
บทที่ 2 วิธีการทดลอง	14
2.1 สารเคมี.....	14
2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	14
2.2.1 เตาเผา (Furnace).....	14
2.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)	14
2.2.3 เครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer).....	15
2.2.4 เครื่องเอกซเรย์พาวเดอร์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray powder diffractometer, XRD).....	15
2.3 วิธีการทดลอง	15
2.3.1 การสังเคราะห์สารเพอโรฟสไกต์และเตรียมแผ่นเมมเบรนเพอโรฟสไกต์ที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์	15
2.3.2 การเตรียมพื้นผิวอิเล็กโทรไลต์ที่มีรูพรุน	16
2.3.3 การตรวจสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นเมมเบรนเพอโรฟสไกต์	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	19
3.1 การสังเคราะห์แผ่นอิเล็กโทรไลต์.....	19
3.1.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM.....	19
3.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิค XRD.....	20
3.1.3 การตรวจสอบพื้นผิวและภาพตัดขวางด้วยเทคนิค SEM	21
3.2 การศึกษาผลของวิธีการเคลือบสารผสมระหว่างสารเกิดรูพรุนและผง LSGM ลงบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ ..	21
3.2.1 การตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)	21
3.2.2 การวัดค่าความต้านทานของเซลล์.....	24
3.3 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างสารเกิดรูพรุนและผง LSGM.....	25
3.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่มีรูพรุนด้วยเทคนิค XRD	26
3.3.2 การตรวจสอบพื้นผิวและพื้นที่ตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM).....	27
3.3.3 การวัดค่าความต้านทานของเซลล์.....	28
3.4 การศึกษาอุณหภูมิในการ sintering ที่มีผลต่อรูพรุน	31
3.4.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นอิเล็กโทรไลต์หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	31
3.4.2 การตรวจสอบพื้นผิวและพื้นที่ตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM).....	33
3.4.3 การวัดค่าความต้านทานของเซลล์	34
3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว.....	35
3.5.1 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเดี่ยว.....	35
บทที่ 4 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	37
4.1 สรุปผลการทดลอง.....	37
4.2 ข้อเสนอแนะ	38
เอกสารอ้างอิง	39
ประวัติผู้วิจัย.....	41

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง.....	5
ตารางที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	14
ตารางที่ 2.2 ปริมาณของสารที่ใช้ในการสังเคราะห์สารเพอโรฟสไกต์ $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$	15
ตารางที่ 2.3 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์สารเพอโรฟสไกต์ $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ ที่มีรูพรุน.....	16
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากการเคลือบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธี impregnation และ screen-print ที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส	25
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความต้านทานของเซลล์เมื่อใช้ rice starch ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	29
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความต้านทานของเซลล์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	30
ตารางที่ 3.4 แสดงค่าความต้านทานของเซลล์ผ่านการ sintering ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เมื่อใช้อุณหภูมิขณะวัดที่ 800 องศาเซลเซียส	34
ตารางที่ 3.5 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่เพิ่มพื้นที่ผิวและแผ่นอิเล็กโทรไลต์ปกติ โดยวัดค่าที่ อุณหภูมิในช่วง 600-800 องศาเซลเซียส	36

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 มลพิษที่เกิดจากแหล่งพลังงานต่างๆ.....	4
รูปที่ 1.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง.....	7
รูปที่ 1.3 การจัดเรียงตัวของโครงสร้างเพอรอฟสไกต์	8
รูปที่ 1.4 แสดงการเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่าง p ออร์บิทัลของออกซิเจนไอออนและ d ออร์บิทัลของแคทไอออน B.....	9
รูปที่ 1.5 การเคลื่อนที่ของออกไซด์ไอออนผ่านช่องว่างออกซิเจน.....	10
รูปที่ 1.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	11
รูปที่ 1.7 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	12
รูปที่ 1.8 ตัวอย่างกราฟ Bode plot และ Nyquist plot.....	13
รูปที่ 1.9 ตัวอย่างกราฟ Nyquist plot จากการวัดค่า polarization resistance ในเซลล์เชื้อเพลิง	13
รูปที่ 2.1 การตั้งเซลล์บน reactor เพื่อวัดค่าความต้านทานและวัดความต่างศักย์ของเซลล์	18
รูปที่ 3.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นอิเล็กโทรไลต์หลังผ่านการ sintering และขัด	19
รูปที่ 3.2 เอ็กซเรย์ดิฟแฟรคโตรแกรมเปรียบเทียบระหว่าง สารมาตรฐาน $La_{0.9}Sr_{0.1}G_{0.8}Mg_{0.2}O_{3-\delta}$ และ สารอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่ได้จากการสังเคราะห์.....	20
รูปที่ 3.3 ภาพจากเทคนิค SEM ของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า	21
รูปที่ 3.4 ภาพพื้นผิวจากเทคนิค SEM ของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ผ่านการเพิ่มรูพรุนบนพื้นผิว และเคลือบด้วยข้าวด้วยวิธีที่ต่างกัน	22
รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางจากเทคนิค SEM ของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ผ่านการเพิ่มรูพรุนบนพื้นผิว และเคลือบด้วยข้าวด้วยวิธีที่ต่างกัน	23
รูปที่ 3.6 Nyquist plot จากการวัดความต้านทานของเซลล์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบระหว่างการเคลือบข้าวไฟฟ้าด้วยวิธี impregnation และ screen-print	24
รูปที่ 3.7 เอ็กซเรย์ดิฟแฟรคโตรแกรมเปรียบเทียบระหว่าง สารอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่ไม่ผ่านการเพิ่มพื้นที่ผิว และอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่ผ่านการเพิ่มพื้นที่ผิว.....	26
รูปที่ 3.8 ภาพพื้นผิวของแผ่นอิเล็กโทรไลต์เคลือบด้วยสารเกิดรูพรุนที่อัตราส่วนแตกต่างกัน	27
รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่เคลือบด้วยสารเกิดรูพรุนที่อัตราส่วนแตกต่างกัน.....	28
รูปที่ 3.10 Nyquist plot ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่มีอัตราส่วน rice starch 20, 30, 40, 50 เปอร์เซ็นต์ และแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว	29
รูปที่ 3.11 Nyquist plot ของเซลล์ที่แผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่มีอัตราส่วน Rice starch 40% วัดในช่วงอุณหภูมิ ระหว่าง 600-800 องศาเซลเซียส.....	30

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.12 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่เคลือบด้วยสารผสมระหว่าง LSGM และ rice starch 40 เปอร์เซ็นต์ หลังการ sintering ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	32
รูปที่ 3.13 ภาพตัดขวางจากเทคนิค SEM ของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ผ่านการเพิ่มรูพรุนโดยใช้อุณหภูมิในการ sintering แตกต่างกัน.....	33
รูปที่ 3.14 กราฟ Nyquist ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ sintering โดยใช้ อุณหภูมิ 1200, 1300, 1400, 1450 และ 1500 องศาเซลเซียส	34
รูปที่ 3.15 ค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่เปรียบเทียบระหว่างแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ทำการเพิ่มพื้นที่ผิว และแผ่นอิเล็กโทรไลต์ปกติโดยวัดค่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	35
รูปที่ 3.16 ค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่เพิ่มพื้นที่ผิวโดยเปรียบเทียบแต่ละ อุณหภูมิขณะวัดในช่วง 600-800 องศาเซลเซียส	36

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและมูลเหตุจูงใจ¹⁻³

เชื้อเพลิงที่นำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเป็นสิ่งที่มนุษย์มีความต้องการ และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในอนาคต เพื่อตอบสนองกิจกรรมต่างๆ ในการดำเนินชีวิตประจำวัน ในปัจจุบันเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ที่นำมาใช้จะเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากทรัพยากรธรรมชาติ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน ซึ่งนอกจากจะไม่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้แล้วยังสร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างที่สำคัญคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นต้นเหตุของภาวะโลกร้อน ดังนั้นการค้นคว้าหาแหล่งพลังงานชนิดใหม่ที่สามารถใช้ทดแทนแหล่งพลังงานเดิมนั้นจึงเป็นเรื่องที่ควรให้ความสำคัญ เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) เป็นแหล่งพลังงานที่ได้รับความสนใจในปัจจุบันเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ไม่เกิดมลพิษ และสามารถใช้ซ้ำได้ โดยสามารถเปลี่ยนปฏิกิริยาเคมีที่อยู่ในเซลล์เชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าและได้น้ำเป็นผลผลิต

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเซลล์ที่ประกอบด้วยขั้วทางไฟฟ้าแคโทด แอโนด และสารตัวนำไฟฟ้า (electrolyte) กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) ของแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแคโทด ได้เป็นออกไซด์ไอออน (oxide ion) ซึ่งออกไซด์ไอออนดังกล่าวจะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแอโนดและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) กับแก๊สไฮโดรเจนได้ผลผลิตคือน้ำและอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า

เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะแบ่งตามชนิดของสารตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ โดยเซลล์เชื้อเพลิงที่สนใจนำมาศึกษา คือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (solid oxide fuel cells, SOFCs) ใช้ตัวนำไฟฟ้าเป็นวัสดุประเภทเซรามิกส์ และมีประสิทธิภาพในการให้กำลังไฟฟ้าประมาณ 60-85 เปอร์เซ็นต์ แต่มีข้อจำกัดในการทำงานเนื่องจากเซลล์จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1000 องศาเซลเซียส จึงทำให้วัสดุที่ใช้มีการเสื่อมสภาพเร็ว

โดยทั่วไปในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะคำนึงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในเซลล์เดี่ยวโดยต้องการที่จะลดอุณหภูมิที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน โดยการลดความต้านทานภายในเซลล์และเพิ่มการนำไฟฟ้าของเซลล์ให้ดีขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใช้ $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (LSGM) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวของ LSGM ให้มีรูพรุนเพื่อเพิ่มพื้นผิวสัมผัสให้เกิดปฏิกิริยาดีขึ้น ทั้งนี้จะทำการศึกษาหาอัตราส่วนของสารที่ใช้ทำให้เกิดรูพรุน รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดรูพรุน ศึกษาค่าความต้านทานของเซลล์เดี่ยวที่เตรียมได้ และหาค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวที่ให้ค่าความต้านทานของเซลล์ต่ำที่สุด

1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2007 Datta และคณะ³ ได้ศึกษาโครงสร้างของสาร $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ga}_{1-y}\text{Mg}_y\text{O}_{3-\delta}$ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี solid state แล้วนำไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่า สาร LaGaO_3 มีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นได้แทนที่สตรอนเทียม (Sr) ลงไปที่ตำแหน่ง A ในโครงสร้างและแมกนีเซียม (Mg) ที่ตำแหน่ง B ในโครงสร้าง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารที่แทนที่เข้าไป ที่ปริมาณสตรอนเทียมรวมกับแมกนีเซียมน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสารมีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก ที่ปริมาณสตรอนเทียมรวมกับแมกนีเซียมอยู่ระหว่าง 25-30 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิกและรอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และที่ปริมาณสตรอนเทียมรวมกับแมกนีเซียมมากกว่า 35 เปอร์เซ็นต์แล้วมีสารใดสารหนึ่งที่มีปริมาณมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าจะมีโครงสร้างเป็นแบบลูกบาศก์ (cubic)

ในปี 2011 Zhang และคณะ⁴ ได้ศึกษาการใช้สาร $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_3$ (SSC) เป็นขั้วแคโทดและใช้สาร Scandia-stabilized zirconia (ScSZ) เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยผู้วิจัยได้ทำการเคลือบสาร SSC ด้วยวิธี impregnation เปรียบเทียบกับการป้ายสาร SSC ลงบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ ทำการวัดค่าความต้านทานแบบสมมาตรระหว่างขั้วกับอิเล็กโทรไลต์ (polarization resistance, Rp) และวัดกำลังไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวโดยใช้ขั้วแอโนดเป็นโลหะนิกเกิล พบว่าสาร SSC ที่เคลือบบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ด้วยวิธี impregnation มีค่าความต้านทานระหว่างขั้วต่ำกว่า โดย SSC ที่เคลือบแบบ impregnation มีค่าความต้านทานเท่ากับ 0.13 โอห์มต่อตารางเซนติเมตรและ SSC ที่เคลือบแบบปกติ มีค่าความต้านทานเท่ากับ 0.211 โอห์มต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ค่ากำลังไฟฟ้าของ SSC ที่เคลือบด้วยวิธี impregnation ยังมีค่าสูงกว่าด้วย โดยให้ค่ากำลังไฟฟ้า 437 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และสำหรับ SSC ที่เคลือบแบบปกติให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ 281 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

ในปี 2012 Dong และคณะ⁵ ได้ศึกษาการเติมโลหะทรานซิชันเข้าไปในตำแหน่ง B ในโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ของสาร $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MO}_{3-\delta}$ โดยที่ M คือโคบอลต์ (SSC) หรือแมงกานีส (SSM) จากผลการศึกษาพบว่าสาร SSC มีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าสาร SSM 7 เท่า และเมื่อทดสอบการขยายตัวทางความร้อนเทียบกับอิเล็กโทรไลต์ Yttria-stabilized zirconia (YSZ) ที่ใช้พบว่าสาร SSM มีค่าการขยายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกับอิเล็กโทรไลต์มากกว่า SSC นอกจากนี้ในการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์ในช่วงอุณหภูมิ 450-650 องศาเซลเซียส โดยใช้ขั้วแอโนดเป็นโลหะนิกเกิล (Ni) และอิเล็กโทรไลต์เป็น Samaria doped ceria (SDC) พบว่าขั้วแคโทดที่ใช้สาร SSC มีกำลังไฟฟ้ามากกว่าสาร SSM โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 930 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการเปลี่ยนอิเล็กโทรไลต์เป็น YSZ และทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียสพบว่าสาร SSM จะมีกำลังไฟฟ้ามากกว่าสาร SSC โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 590 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

ในปี 2012 Han และคณะ⁶ ได้ศึกษาการเพิ่มพื้นที่ของการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแคโทด โดยการพัฒนา $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (LSGM) ที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นโดยทำการเคลือบสาร LSGM ที่มีส่วนผสมของ rice starch ลงบนแผ่น LSGM ที่ไม่มีรูพรุนทั้งสองด้าน จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่ทำให้ผิวของแผ่น LSGM เกิดรูพรุนขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ (จะได้แผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่มีลักษณะเป็นสามชั้นคือ ชั้นมีรูพรุน | ชั้นหนาแน่น | ชั้นมีรูพรุน) หลังจากนั้นทำการเคลือบพื้นผิวอิเล็กโทรไลต์ด้วยขั้วแคโทดที่ใช้เป็นสาร $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_3$ (SSC) ด้วยวิธี impregnation หลังจากนั้นนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าเกิดรูพรุนบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่เคลือบด้วยสาร SSC โดยพบขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 10^{-6} – 10^{-9} เมตร และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 70 นาโนเมตร และเมื่อทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์โดยใช้นิกเกิลออกไซด์ (NiO) เป็นขั้วแอโนดพบว่าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์ที่เตรียมได้แบบ 3 ชั้นมีค่าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีชั้นอิเล็กโทรไลต์ที่หนาแน่นเพียงชั้นเดียว

ในปี 2014 Salehi และคณะ⁷ ได้ทำการศึกษาการเพิ่มพื้นที่ผิวบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_3$ (LSGM) โดยทำให้แผ่น LSGM มีลักษณะเป็นสองชั้น โดยชั้นแรกมีลักษณะเป็นแผ่นหนาแน่นและอีกชั้นมีลักษณะมีรูพรุน ทำการเปรียบเทียบการเกิดรูพรุนจากสารที่ทำให้เกิดรูพรุน (porous former) ต่างชนิดกัน คือ คาร์บอน, poly(methyl methacrylate) (PMMA), และสารผสมระหว่างคาร์บอนกับ PMMA โดยนำสารที่ทำให้เกิดรูพรุนไปผสมกับ LSGM และนำไปเคลือบบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์แล้วเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นเผาอีกครั้งที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าจากอัตราส่วนของสารเกิดรูพรุนที่ศึกษา คือ 55%Carbon, 30%PMMA+25%Carbon, 40%PMMA+15%Carbon และ 55%PMMA นั้นรูพรุนที่เกิดขึ้นจากอัตราส่วนระหว่าง 40%PMMA+15%Carbon มีจำนวนมากที่สุดถึง 63 เปอร์เซ็นต์ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่มีค่ากลางอยู่ที่ 9.9 ไมโครเมตร

ในปี 2017 Han และคณะ⁸ ได้ศึกษาการใช้สาร $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1.5}\text{Mo}_{0.5}\text{O}_6$ (SFMO) เป็นขั้วแอโนด และใช้วิธี impregnation ในการเคลือบสารลงบนอิเล็กโทรไลต์ $\text{Gd}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_2$ (GDC) ที่มีพื้นที่ผิวเป็น GDC ที่มีรูพรุน ทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้สาร $\text{Ba}_{0.9}\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.2}\text{Nb}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ (BCFN) เป็นขั้วแคโทด เปรียบเทียบค่าที่ได้ระหว่างการเคลือบสาร SFMO ลงบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ด้วยวิธี physical mixing และ impregnation พบว่าการเคลือบสารด้วยวิธี impregnation มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงกว่าการเคลือบแบบ physical mixing โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 445 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ณ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) พบว่าการเคลือบด้วยวิธี impregnating ทำให้สาร SFMO มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ได้มากกว่า

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ 1.อัตราส่วนของ rice starch 2.อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดรูพรุน โดยทำการวัดค่าความต้านทานของแผ่น LSGM ที่ได้ทำการพัฒนาพื้นผิวให้มีรูพรุนโดยใช้ SSC เป็นขั้วแคโทดและ SFMO เป็นขั้วแอโนด หลังจากนั้นนำเซลล์ที่มีความต้านทานต่ำที่สุดไปวัดประสิทธิภาพของเซลล์เดี่ยวในการให้กำลังไฟฟ้าโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง

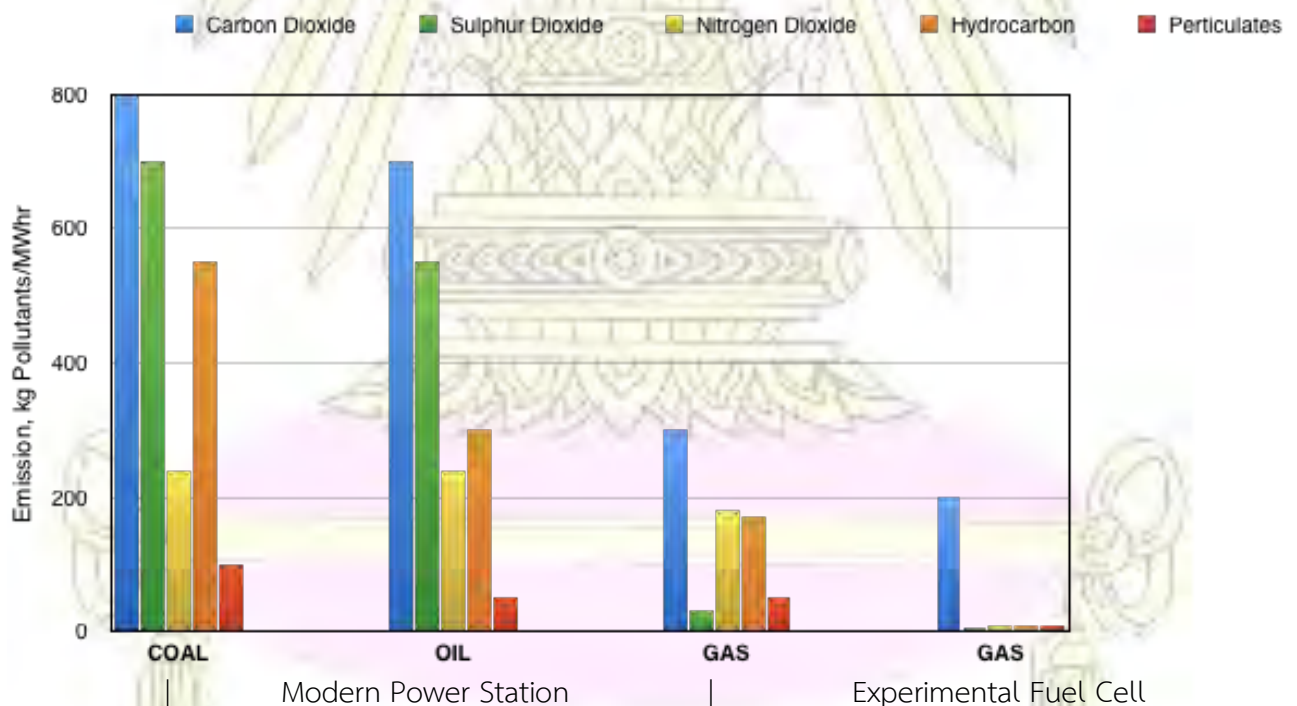
1.3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.3.1 เซลล์เชื้อเพลิง⁹⁻¹⁰ (Fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดหนึ่งซึ่งเป็นแบบกัลวานิกเซลล์ (galvanic cell) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง เช่น แก๊สไฮโดรเจน แก๊สมีเทน เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเกิดปฏิกิริยาผ่านกระบวนการทางเคมีไฟฟ้ากับตัวออกซิไดส์ (oxidant) ซึ่งนิยมใช้เป็นอากาศหรือแก๊สออกซิเจนเกิดเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงโดยไม่ต้องผ่านการเผาไหม้

ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะลักษณะคล้ายกับแบตเตอรี่ในด้านที่สามารถเกิดประจุได้เรื่อยๆ แต่เซลล์เชื้อเพลิงต้องให้เชื้อเพลิงและตัวออกซิไดส์เข้าไปในระบบอย่างต่อเนื่อง เพราะไม่สามารถเก็บพลังงานเคมีได้ และปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่สามารถย้อนกลับได้ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงให้พลังงานไฟฟ้าโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการการเผาไหม้ ดังนั้นจึงเป็นข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงเพราะไม่ก่อมลภาวะทางอากาศเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ปกติ ดังรูปที่ 1.1 ที่แสดงให้เห็นว่าสาร NO_2 และ SO_2 ที่ถูกปล่อยจากเซลล์เชื้อเพลิงออกสู่สิ่งแวดล้อมมีจำนวนน้อยมาก จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งเชื้อเพลิงชนิดอื่น

การแบ่งชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถพิจารณาได้จากสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะส่งผลให้ช่วงอุณหภูมิการทำงานและชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ต่างกัน เพื่อความสะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ที่เหมาะสม ซึ่งชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจะแสดงสรุปในตารางที่ 1.1



รูปที่ 1.1 มลพิษที่เกิดจากแหล่งพลังงานต่างๆ¹⁰

1.3.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง¹¹⁻¹² (Solid Oxide Fuel Cells, SOFCs)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นเซอร์โคเนียมออกไซด์หรือสารที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ อุณหภูมิการใช้งานจะค่อนข้างสูงในช่วง 600–1000 องศาเซลเซียส โดยสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพถึง 60-85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งนับว่าสูงเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น จึงได้รับความสนใจและนำมาพัฒนาให้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่สำคัญ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม คือมีเพียงแก๊สไฮโดรเจนและน้ำที่ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับเชื้อเพลิงหลายชนิด (fuel flexibility) และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น

ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งคือ การใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นวัสดุประเภทเซรามิกส์ จึงต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเสถียรของสารที่ใช้ ค่าการขยายตัวของสาร ความแข็งแรงของวัสดุ เพื่อให้เซลล์มีการใช้งานที่ดี

ตารางที่ 1.1 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง¹³

เซลล์เชื้อเพลิง	อิเล็กโทรไลต์	อุณหภูมิการใช้งาน (องศาเซลเซียส)	ชนิดของเชื้อเพลิง
Alkaline fuel cell (AFC)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	50-200	ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ไฮโดรซีน
Direct methanol fuel cell (DMFC)	พอลิเมอร์	60-200	เมทานอล
Molten carbonate fuel cell (MCFC)	เกลือหลอมเหลว (molten salt) เช่น เกลือไนเตรด, เกลือซัลเฟต	630-650	ไฮโดรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์, แก๊สธรรมชาติ, โพรเพน
Phosphoric acid fuel cell (PAFC)	กรดฟอสฟอริก	160-210	ไฮโดรเจนจากไฮโดรคาร์บอน และแอลกอฮอล์
Proton-exchange membrane fuel cell (PEMFC)	พอลิเมอร์, เยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane)	50-80	ไฮโดรเจนจากไฮโดรคาร์บอน หรือเมทานอล
Sulfuric acid fuel cell (SAFC)	กรดซัลฟิวริก	80-90	แอลกอฮอล์หรือไฮโดรเจนไม่ บริสุทธิ์
Solid polymer fuel cell (SPFC)	พอลิสไตรีน (polystyrene)	90	ไฮโดรเจน
Solid oxide fuel cell (SOFC)	เซอร์โคเนียมออกไซด์, เพอโรฟสไกต์	600-1000	แก๊สธรรมชาติ, โพรเพน

1.3.2.1 คุณสมบัติทั่วไปของวัสดุที่ใช้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง¹⁴⁻¹⁵

เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง วัสดุที่ใช้ควรมีการนำอิเล็กตรอนและไอออนที่ดี นอกจากนี้ยังทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูง ดังนั้นวัสดุที่ใช้ต้องมีความทนทานที่อุณหภูมิสูงและมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังนี้

- 1) แข็งแรงทนทานและเสถียรต่อสภาพแวดล้อมในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น ทนต่อความดันของแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เป็นต้น
- 2) มีค่าการนำไอออนสูง $\sigma_0 > 10^{-2}$ ซีเมนต์ต่อตารางเซนติเมตร ในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้งาน
- 3) มีค่าการขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion coefficient) ที่ใกล้เคียงกัน ระหว่างอิเล็กโทรไลต์และสารที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า
- 4) ไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กโทรไลต์และสารที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า
- 5) สามารถคงคุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ
- 6) ราคาถูกและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

1.3.2.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง¹⁶⁻¹⁷

- 1) อิเล็กโทรไลต์ของแข็ง (solid electrolyte)

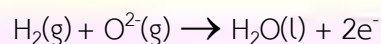
อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้จะเป็นวัสดุเซรามิกส์ที่มีความสามารถในการนำไอออนเป็นส่วนประกอบหลักของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง และยังเป็นวัสดุที่สามารถนำออกไซด์ไอออนให้เคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดได้ ทั้งนี้คุณสมบัติทั่วไปสำหรับอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้งานได้แก่

- (ก) มีความสามารถในการนำออกไซด์ไอออนประมาณ 0.01-0.1 ซีเมนต์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับความหนาของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ 1-100 ไมโครเมตร
- (ข) ไม่นำอิเล็กตรอน
- (ค) มีโครงสร้างที่เสถียรและไม่เกิดปฏิกิริยากับขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง

- 2) ขั้วไฟฟ้า

- 2.1) ขั้วแอโนด (anode)

ขั้วแอโนดเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเชื้อเพลิง สามารถเรียกอีกอย่างว่า ขั้วเชื้อเพลิง (fuel electrode) โดยทั่วไปจะใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงดังสมการ



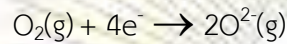
ทั้งนี้คุณสมบัติทั่วไปสำหรับขั้วแอโนดที่ใช้งานได้แก่

- (ก) มีคุณสมบัติของการซึมผ่านของเชื้อเพลิงได้ดี
- (ข) มีความสามารถในการนำอิเล็กตรอนได้ดี
- (ค) เสถียรต่อการถูกรีดิวซ์ตลอดการใช้งาน

(ง) เป็นตัวเร่งที่ดีในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเชื้อเพลิง

2.2) ขั้วแคโทด (cathode)

ขั้วแคโทดเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจน สามารถเรียกอีกอย่างว่า ขั้วออกซิแดนท์ (oxidant electrode) โดยแก๊สออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิดเป็นออกไซด์ไอออนเคลื่อนที่ผ่านขั้วแคโทดไปยังอิเล็กโทรไลต์ดังสมการ

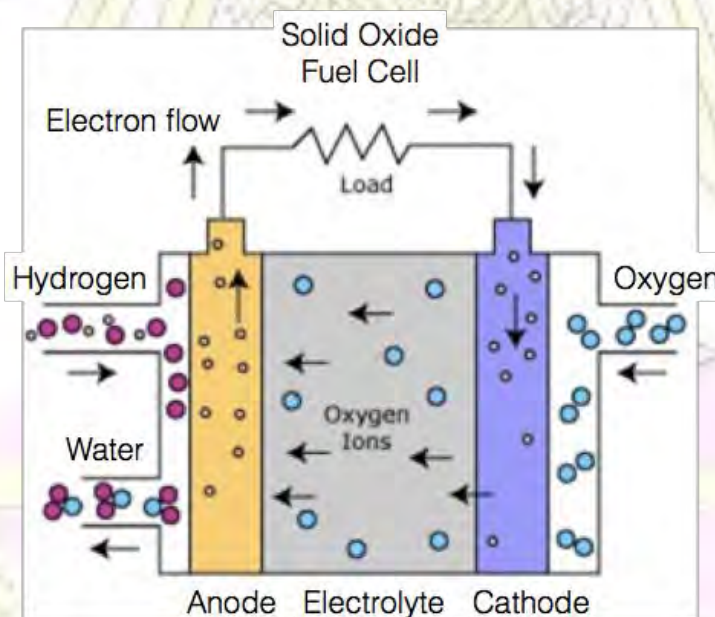
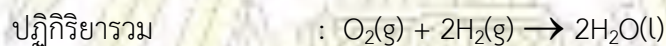
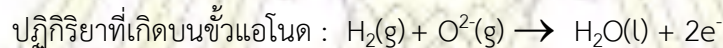
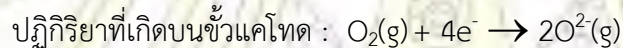


ทั้งนี้คุณสมบัติทั่วไปสำหรับขั้วแคโทดที่ใช้งานได้แก่

- (ก) มีคุณสมบัติของการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ดี
- (ข) สามารถนำอิเล็กตรอนและออกไซด์ไอออนได้ดี
- (ค) เสถียรต่อการถูกออกซิไดซ์ตลอดการใช้งาน
- (ง) เป็นตัวเร่งที่ดีในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจน

1.3.2.3 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง

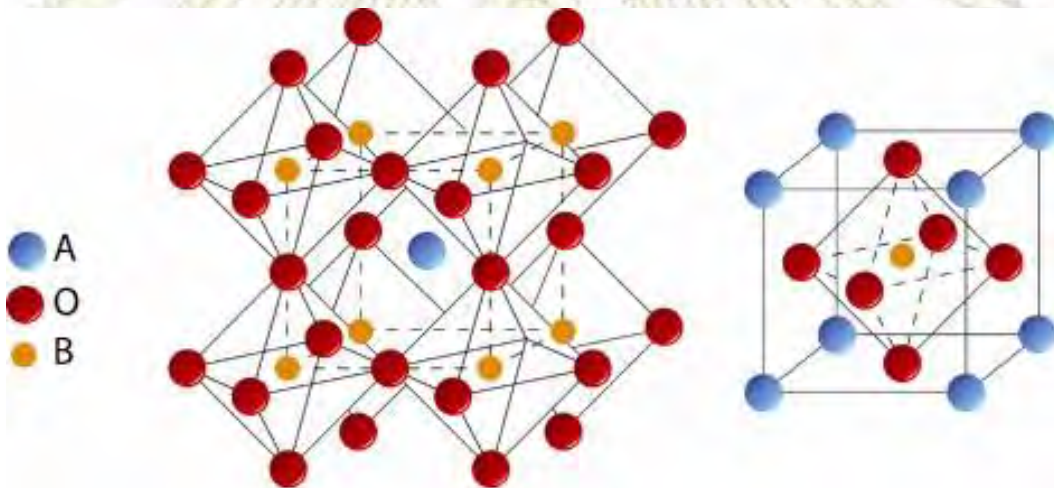
กระบวนการทางเคมีไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็งจะเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด



รูปที่ 1.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง

1.3.3 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์¹⁷⁻¹⁹ (Perovskite structure)

โครงสร้างเพอโรฟสไกต์เป็นชื่อที่เรียกตามโครงสร้างของแร่แคลเซียมไททานेट (CaTiO_3) โดยสารประกอบออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์นิยมใช้เป็นขั้วแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง โครงสร้างเพอโรฟสไกต์มีสูตรโครงสร้างทั่วไปคือ ABO_3 โดยที่ A คือโลหะแคโทไอออน (cation) ขนาดใหญ่ (ประจุ +2 หรือ +3) B คือโลหะทรานซิชันขนาดเล็ก (ประจุ +3 หรือ +4) และ O คืออะตอมของออกซิเจน การจัดเรียงโครงสร้างของเพอโรฟสไกต์เป็นแบบ face center cubic (FCC) โดยที่โลหะแคโทไอออน A เรียงตัวอยู่ที่มุมลูกบาศก์ทั้ง 4 ด้านจะเรียกแทนตำแหน่งนี้ว่า ตำแหน่ง A (A side) โลหะแคโทไอออน B วางตัวอยู่ที่กึ่งกลางลูกบาศก์จะเรียกแทนตำแหน่งนี้ว่าตำแหน่ง B (B side) และ O จะจัดเรียงตัวอยู่ที่กึ่งกลางของหน้าลูกบาศก์ในทุกๆด้าน การจัดเรียงตัวเช่นนี้ทำให้แคโทไอออน A มีเลขโคออดิเนชันเท่ากับ 12 และแคโทไอออน B มีเลขโคออดิเนชันเท่ากับ 6 แสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 การจัดเรียงตัวของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์¹⁸

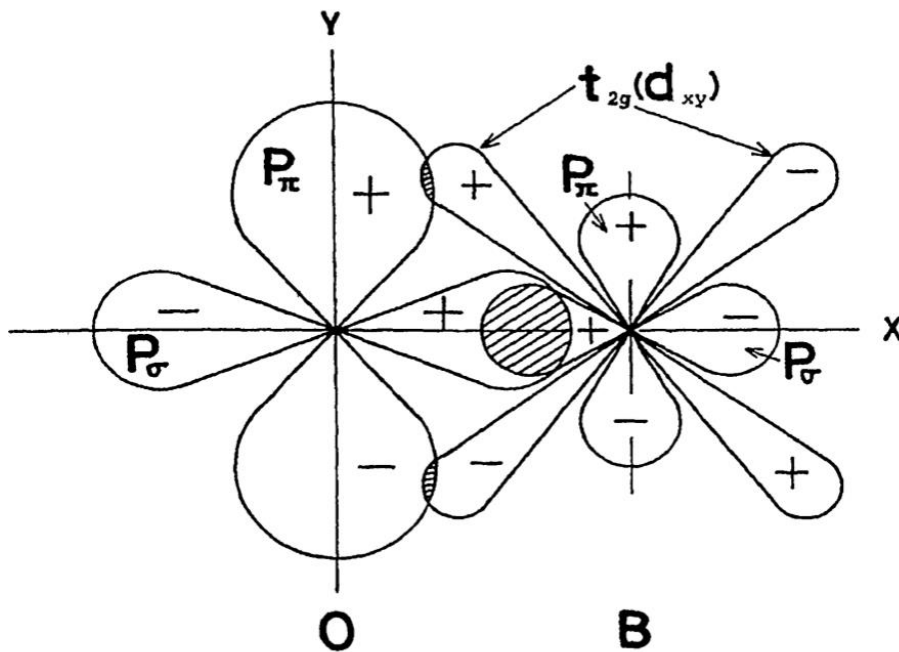
1.3.3.1 คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของเพอโรฟสไกต์

การจัดเรียงตัวของสารเพอโรฟสไกต์ทำให้โครงสร้างสามารถปรับตัวเพื่อชดเชยประจุ (charge compensation) ได้เมื่อมีการปรับเปลี่ยนสารในโครงสร้าง กล่าวคือเมื่อมีการแทนที่แคโทไอออนที่ตำแหน่ง A ด้วยประจุที่มีค่าบวกน้อยกว่าจะทำให้ประจุในโครงสร้างน้อยลง โครงสร้างเพอโรฟสไกต์จะปรับตัวเพื่อชดเชยประจุโดยการเพิ่มประจุบวก (electronic compensation) ที่ตำแหน่ง B จะทำให้เกิดช่องว่างของอิเล็กตรอน (electron hole) หรือการลดประจุลบ (ionic compensation) ที่ตำแหน่ง O โดยการปล่อยออกไซด์ไอออน จะ

ทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจน (oxygen vacancy) ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างเพอรอฟสไกต์สามารถนำไฟฟ้าได้ทั้งแบบอิเล็กทรอนิกส์และแบบไอออน

1) การนำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ (electronic conductivity)

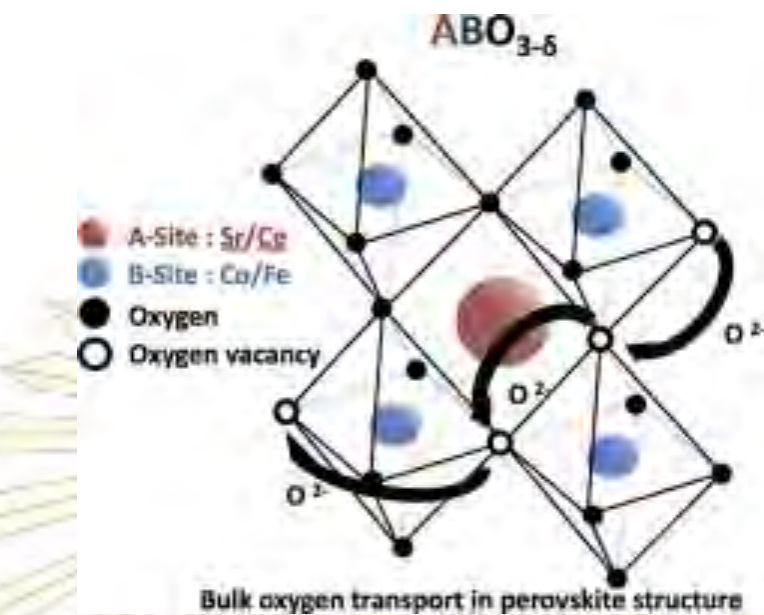
การนำอิเล็กทรอนิกส์ของสารเพอรอฟสไกต์เกิดจากการซ้อนทับกันระหว่างออร์บิทัล d_{xy} , d_{yz} และ d_{xz} ของโลหะทรานสิชันที่ตำแหน่ง B และ p ออร์บิทัลของอะตอมออกซิเจน แสดงในรูปที่ 1.4 ดังนั้นเมื่อมีการแทนที่แคทไอออนที่มีประจุน้อยกว่าที่ตำแหน่ง A ทำให้เกิดการปรับตัวเพื่อชดเชยประจุที่ตำแหน่ง B โดยการเพิ่มประจุบวก ส่งผลให้เกิดช่องว่างของอิเล็กทรอนิกส์ที่ตำแหน่ง B จากเหตุผลที่กล่าวข้างต้นทำให้โครงสร้างเพอรอฟสไกต์สามารถนำอิเล็กทรอนิกส์ได้ดี ซึ่งการนำอิเล็กทรอนิกส์แบบนี้จะเรียกว่า การนำชนิด p (p-type semiconductor)



รูปที่ 1.4 การเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่าง p ออร์บิทัลของออกซิเจนไอออนและ d ออปีทัลของแคทไอออน B²⁰

2) การนำไฟฟ้าแบบไอออน (ionic conductivity)

การนำไฟฟ้าแบบไอออน เกิดจากการปรับตัวของโครงสร้างเมื่อมีการแทนที่ที่ตำแหน่ง A ด้วยประจุน้อยลง ส่งผลให้โครงสร้างเกิดการปรับตัวเพื่อชดเชยประจุโดยการลดประจุลบด้วยการปล่อยออกไซด์ไอออนออกจากโครงสร้างทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจน แสดงในรูปที่ 1.5 ทำให้ออกไซด์ไอออนสามารถเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ได้ง่าย จึงส่งผลให้โครงสร้างเพอรอฟสไกต์สามารถนำไอออนได้ดีโดยการนำไฟฟ้าในลักษณะนี้เรียกว่า การนำชนิด n (n-type semiconductor)



รูปที่ 1.5 การเคลื่อนที่ของออกไซด์ไอออนผ่านช่องว่างออกซิเจน¹⁹

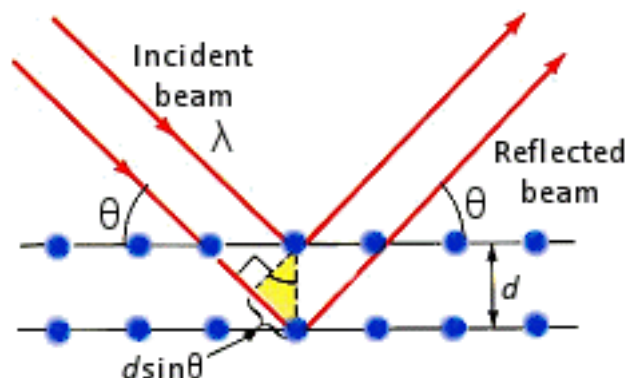
1.3.4 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ

1.3.4.1 เทคนิคเอกซเรย์พาวเดอร์ดิฟแฟรกชัน (X-ray powder diffraction, XRD)

เทคนิคเอกซเรย์พาวเดอร์ดิฟแฟรกชันเป็นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกและการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อตกกระทบกับวัตถุอนุภาคจะเกิดการหักเหของรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ เปรียบเทียบสเปกตรัมที่ได้กับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดย JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารแต่ละชนิดมีการจัดโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน สารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรแกรม (X-ray diffraction pattern) เฉพาะตัว

หลักการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึกตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg ที่กล่าวคือ รังสีเอกซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงแต่ละระนาบด้วยความยาวคลื่นที่ต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ โดยเมื่อรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียว (monochromatic) ตกกระทบผลึกหรือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ จะเกิดการสะท้อนบนระนาบของผลึกแสดงดังรูปที่ 1.6 และเมื่อผลต่างของระยะทางเดินของรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับจำนวนเท่า (n) ของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (λ) จะทำให้เกิดรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่เรียกว่า diffraction pattern ดังนั้นเมื่อทราบความยาวคลื่นและวัดมุมการเลี้ยวเบน (θ) ก็จะสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d) โดยใช้สมการของ Bragg



รูปที่ 1.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์²⁰

จากกฎของ bragg $2d\sin\theta = n\lambda$

เมื่อ n คือเลขจำนวนเต็ม

θ คือมุมตกกระทบของรังสีเอกซ์กับระนาบผลึก

d คือระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

1.3.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)²¹⁻²²

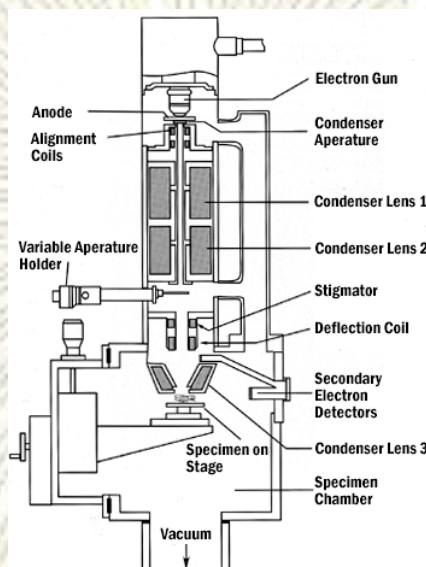
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้ศึกษาโครงสร้างหรือองค์ประกอบพื้นผิวของวัตถุที่ต้องการศึกษาโดยไม่ทำลายตัวอย่าง ภาพที่ได้มีลักษณะเป็น 3 มิติ สามารถให้รายละเอียดของภาพได้ตั้งแต่ 3-100 นาโนเมตร และกำลังขยายมากกว่า 3,000-100,000 เท่า ส่วนประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีดังนี้

- 1) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun)
- 2) เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (electromagnetic lens) และขดลวดควบคุมการเคลื่อนที่ของลำแสงอิเล็กตรอน (scan coil)
- 3) ช่องตัวอย่าง (specimen chamber)
- 4) อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (collector and scintillator)
- 5) อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ผ่านไปยังเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) เพื่อให้ตกลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบน

ชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ หลังจากนั้นจะถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์



รูปที่ 1.7 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.3.4.3 การวัดความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า²³⁻²⁴ (Electrochemical impedance spectroscopy)

เทคนิคการวัดความต้านทานทางเคมีไฟฟ้าที่นำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อวัดความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะเรียกความต้านทานนี้ว่า polarization resistance (R_p) โดยในการทำงานของเทคนิคนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่เวลาแตกต่างกัน จะให้ค่าสัญญาณไฟฟ้าออกมาแตกต่างกันที่ความถี่ต่างๆ หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น ค่าความต้านทาน (Z) จะถูกคำนวณและแสดงผลออกมาจากกฎของโอห์ม

$$Z = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = \frac{V \cos(\omega t)}{I \cos(\omega t - \varphi)} = Z_0 (\cos \varphi + j \sin \varphi) = Z_{re} + j Z_{im}$$

เมื่อ

J คือเลขจำนวนจินตภาพ

V คือค่าความต่างศักย์ที่ใช้ (โวลต์)

I คือค่าของกระแสไฟฟ้าที่ได้ (แอมแปร์)

φ คือเฟสที่เปลี่ยนแปลงจากสัญญาณที่เริ่มต้น

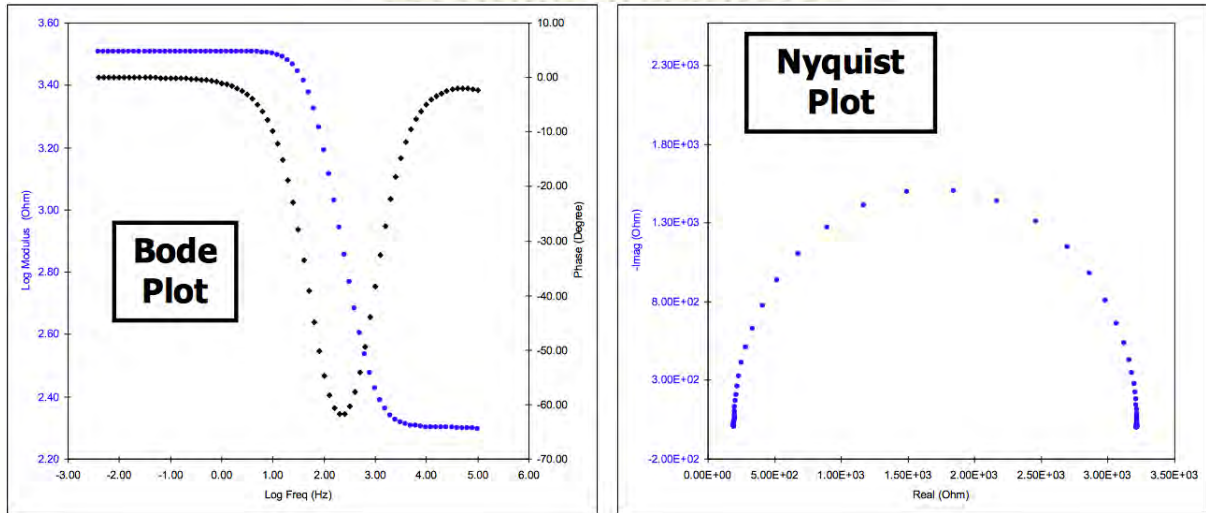
ω คือความถี่ที่ใช้ (เฮิรท์)

Z คือค่าความต้านทานที่วัดได้ (โอห์ม)

Z_{re} คือค่าความต้านทานที่เป็นจำนวนจริง (โอห์ม)

Z_{im} คือค่าความต้านทานที่เป็นจำนวนจินตภาพ (โอห์ม)

กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์คือ Bode plot และ Nyquist plot กราฟที่จะใช้ในการวิเคราะห์ความต้านทานระหว่างขั้วและอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงคือกราฟ Nyquist plot



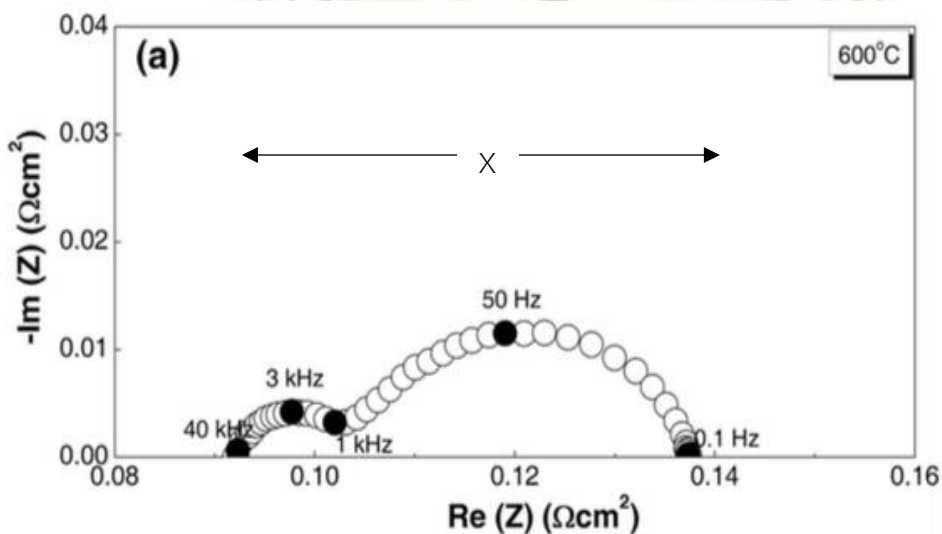
รูปที่ 1.8 ตัวอย่างกราฟ Bode plot และ Nyquist plot

กราฟ Nyquist plot จะใช้ค่าจากจุดตัดแกน X มาคำนวณหาความต้านทาน Rp โดยค่าที่อยู่บนแกน X คือค่า Z_{re} ที่ใช้หาค่า Rp

การคำนวณหาค่า polarization resistance $Rp = \frac{X}{A}$

เมื่อ X คือค่าความต่างของจุดตัดแกน X บนกราฟ Nyquist plot

A คือพื้นที่หน้าตัดของขั้วบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 1.9 ตัวอย่างกราฟ Nyquist plot จากการวัดค่า polarization resistance ในเซลล์เชื้อเพลิง⁶

บทที่ 2

วิธีการทดลอง

2.1 สารเคมี

ตารางที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	มวลโมเลกุล	ความบริสุทธิ์ (%)	บริษัทที่ผลิต
La ₂ O ₃	325.81	99.99%	Wako
SrCO ₃	147.63	≥99.9%	Sigma-Aldrich
Ga ₂ O ₃	187.44	≥99.99%	Sigma-Aldrich
MgO	40.3	≥98.00%	Fluka
Starch from rice	-	-	Sigma-Aldrich
Ethyl cellulose	-	-	Sigma-Aldrich
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol	216.32	99%	Sigma-Aldrich

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 เตาเผา (Furnace)

เตาเผายี่ห้อ Nabertherm รุ่น P330 ใช้ในการเผาสารที่อุณหภูมิสูงในขั้นตอนการสังเคราะห์สารอิเล็กโทรไลต์ ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด ให้ได้สารที่มีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์

2.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

เครื่อง SEM ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6480LV ใช้ตรวจสอบลักษณะสัณฐานและพื้นผิวของเมมเบรนอิเล็กโทรไลต์ชนิดอัดแน่น ความมีรูพรุนของเมมเบรนอิเล็กโทรไลต์และตรวจสอบการติดกันระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์

2.2.3 เครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer)

เครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์ PGSTAT302N พร้อมด้วย FRA32M ยี่ห้อ Metrohm รุ่น Autolab AUT84200 ใช้วัดความต้านทานทางไฟฟ้าระหว่างสารอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้า

2.2.4 เครื่องเอกซเรย์พาวเดอร์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray powder diffractometer, XRD)

เครื่อง XRD รุ่น DMAX 2200 Ultima ใช้ตรวจสอบโครงสร้างของสารเพอโรฟสไกต์ที่สังเคราะห์ได้ ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็น Cu K α และมีโมโนโครเมเตอร์ในการกรองแสง ทำการวิเคราะห์โครงสร้างสารในช่วง 20-70 องศา

2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 การสังเคราะห์สารเพอโรฟสไกต์และเตรียมแผ่นเมมเบรนเพอโรฟสไกต์ที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์

เตรียมสารเพอโรฟสไกต์ $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (LSGM) โดยการชั่งน้ำหนักสารตามอัตราส่วนโดยโมลดังตาราง 2.2 บดสารด้วยโกร่งอะลูมิเนียมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสารที่ได้ไปเผา (calcine) ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จากนั้นนำผงสีขาวที่ได้ไปบดอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ผงเพอโรฟสไกต์

เตรียมแผ่นเมมเบรนที่มีความหนาแน่นสูง โดยการนำผงเพอโรฟสไกต์ที่เตรียมได้ไปอัดแผ่นเมมเบรน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 มิลลิเมตร และความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ความดัน 3 ตัน เป็นเวลา 2 นาที นำแผ่นที่ได้ไปอัดให้แน่นขึ้นด้วยเทคนิค cold isostatic pressing (CIP) ในสภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำที่ความดัน 10 ตัน เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำแผ่นเมมเบรนไป sinter ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ตามด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.2 ปริมาณของสารที่ใช้ในการสังเคราะห์สารเพอโรฟสไกต์ $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ ปริมาณ 8 กรัม

สาร	La_2O_3	SrCO_3	Ga_2O_3	MgO
ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	4.8383	0.4871	2.4742	0.2660

2.3.2 การเตรียมพื้นผิวอิเล็กโทรไลต์ที่มีรูพรุน

นำแผ่นเมมเบรนที่อัดแน่นมาขัดด้วยเครื่องขัดแผ่นให้มีความหนาประมาณ 0.3 มิลลิเมตร และใช้กระดาษทรายขัดบริเวณผิวหน้าให้เรียบอีกครั้ง หลังจากนั้นนำผงเพอร์อฟสไกต์ที่เตรียมได้จากข้อ 2.3.1 มาผสมกับ rice starch ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อทำให้เกิดรูพรุน และนำไปเคลือบบนแผ่นเมมเบรนที่เตรียมไว้ทั้งสองด้าน โดยใช้ ethyl cellulose เป็นสารยึดเกาะ (binder) และ 2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol เป็นตัวทำละลาย นำแผ่นที่ผ่านการเคลือบทั้งสองด้านไปอบที่ 140 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยตัวทำละลายและนำไป sinter ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียสต่อนาที่จนถึงอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเปลี่ยนอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิที่กำหนด (ในช่วง 1200-1500 องศาเซลเซียส) จะได้แผ่นเมมเบรนเพอร์อฟสไกต์ที่มีรูพรุนบนพื้นผิว

ตารางที่ 2.3 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์สารเพอร์อฟสไกต์ $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ ที่มีรูพรุนปริมาณ 10 กรัม

%rice starch	ปริมาณสารที่ใช้ (กรัม)	
	LSGM	rice starch
20%	8.00	2.00
30%	7.00	3.00
40%	6.00	4.00
50%	5.00	5.00

2.3.3 การตรวจสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นเมมเบรนเพอร์อฟสไกต์

2.3.3.1 การตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

นำแผ่นเมมเบรนเพอร์อฟสไกต์ที่ไม่มีรูพรุนและที่มีรูพรุน มาตรวจสอบลักษณะพื้นผิวบนแผ่น (surface morphology) และภาพตัดขวาง (cross section) ของแผ่นเมมเบรนโดยการติดแผ่นเมมเบรนบนแท่นวางตัวอย่างด้วยเทปคาร์บอน (carbon tape) และปรับกำลังขยายและตำแหน่งให้เหมาะสมพร้อมเก็บภาพถ่ายไว้เป็นหลักฐานข้อมูล

2.3.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD

นำแผ่นเมมเบรนเพอรอฟสไกต์ที่มีและไม่มีรูพรุนมาพิสูจน์โครงสร้างด้วยวิธี XRD โดยทำการวิเคราะห์ 2θ ในช่วง $20-70^\circ$ ความกว้างของสลิต (slit) (DS/SS/RS) เท่ากับ 0.5° , 0.5° และ 0.30 mm ตามลำดับ อัตราเร็วในการสแกน 5° ต่อนาที

2.3.3.3 การวัดความต้านทานทางไฟฟ้า

นำแผ่นเมมเบรนเพอรอฟสไกต์ที่มีรูพรุนมาวัดความต้านทานทางไฟฟ้าโดยทำการเคลือบ $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3.8}$ (SSC) ที่ใช้เป็นแคโทดไว้ด้านหนึ่งของแผ่นเมมเบรนและเคลือบ $\text{SrFeMoO}_{3.8}$ (SFMO) ที่เป็นแอโนดไว้อีกด้านหนึ่ง นำแผ่นไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารติดแน่นบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ หลังจากนั้นนำไปวัดความต้านทานที่อุณหภูมิ $600-1000$ องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานที่ได้จะแสดงในรูป Nyquist plot

2.3.3.4 การวัดกำลังไฟฟ้า (Power density)

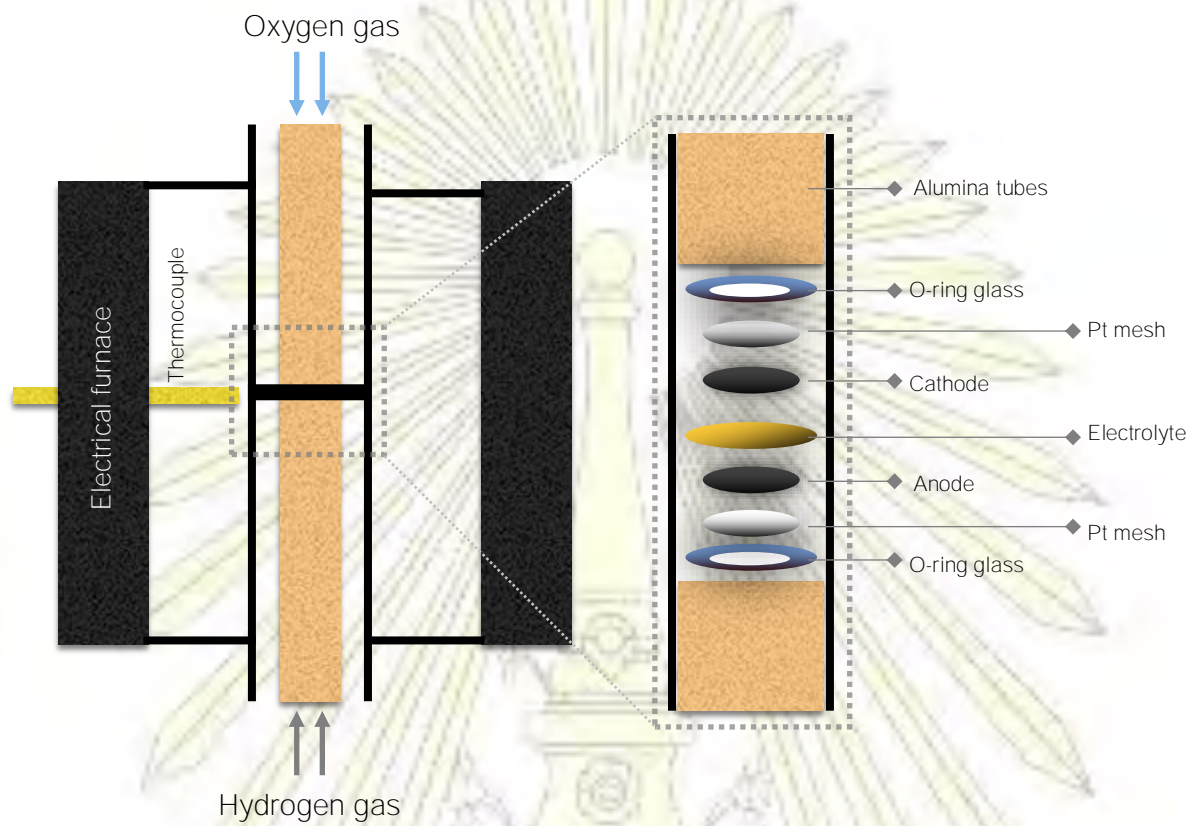
วัดกำลังไฟฟ้าโดยการนำแผ่นเมมเบรนเพอรอฟสไกต์ที่ผ่านการเคลือบด้วยขั้วแคโทดและขั้วแอโนด มาติดด้วยแก้วทั้งสองด้านเพื่อป้องกันการรั่วของแก๊ส นำไปให้ความร้อนบนแท่นวัดที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที เพื่อให้แก้วละลาย หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึง 800 องศาเซลเซียส เพื่อให้แก้วเชื่อมท่ออะลูมินาได้สนิทแสดงดังรูปที่ 2.1 เปิดวาล์วให้แก๊สออกซิเจนไหลผ่านที่ขั้วแคโทดและแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนดด้วยอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที หลังจากนั้นให้กระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดแพลทินัมแล้ววัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้ว แล้วนำไปคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจากสมการ

$$P = I \cdot V$$

เมื่อ P คือกำลังไฟฟ้าของเซลล์

I คือกระแสไฟฟ้าที่ให้เซลล์ (A)

V คือค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ (V)



รูปที่ 2.1 การตั้งเซลล์บน reactor เพื่อวัดค่าความต้านทานและวัดความต่างศักย์ของเซลล์

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 การสังเคราะห์แผ่นอิเล็กโทรไลต์

ทำการสังเคราะห์แผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM เพื่อใช้เป็นโครงสร้างหลักของเซลล์เชื้อเพลิงจาก La_2O_3 , SrCO_3 , Ga_2O_3 และ MgO นำแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่ได้หลังการ sintering และขัด ไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ตรวจสอบพื้นผิวและภาพตัดขวางด้วยเทคนิค SEM ดังนี้

3.1.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM

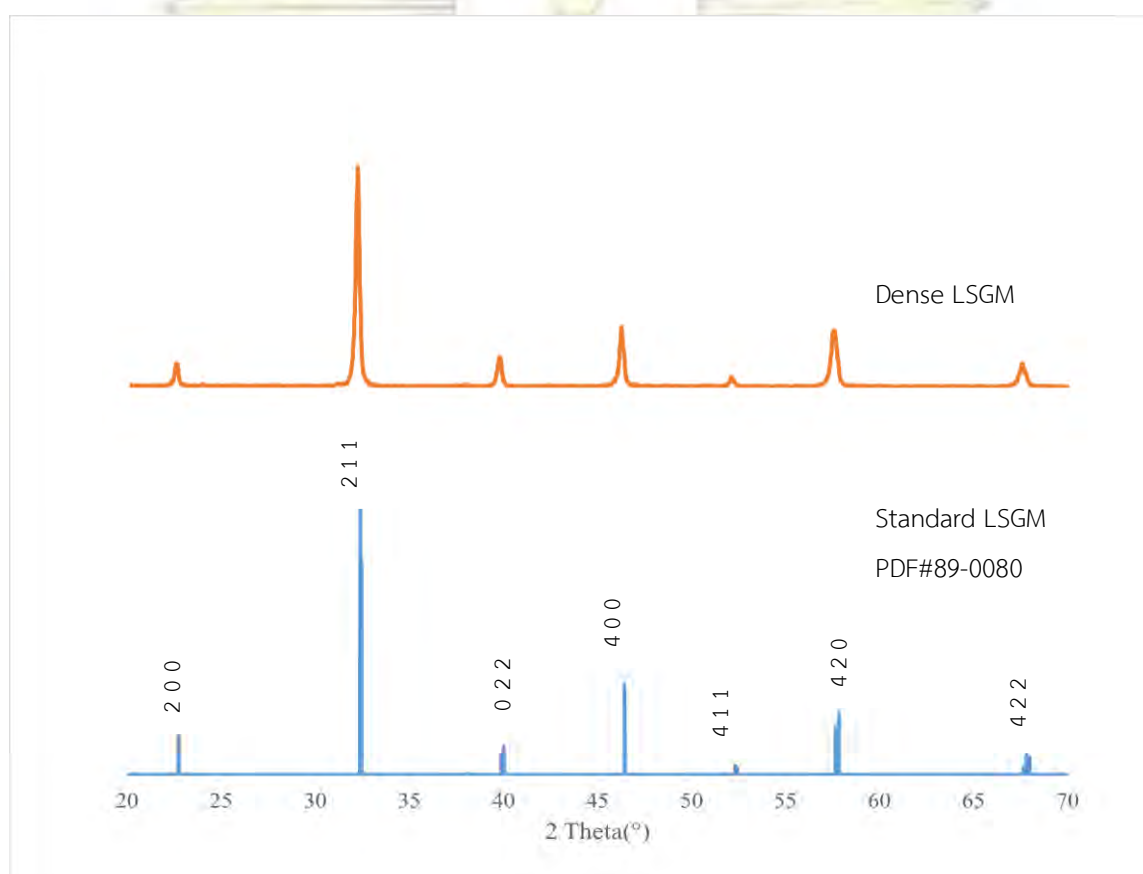
แผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM หลังผ่านการ sinter และขัด ได้แผ่นมีความหนา 0.3 มิลลิเมตร ลักษณะผิวเรียบและไม่มีรูพรุน แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นอิเล็กโทรไลต์หลังผ่านการ sintering และขัด

3.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิค XRD

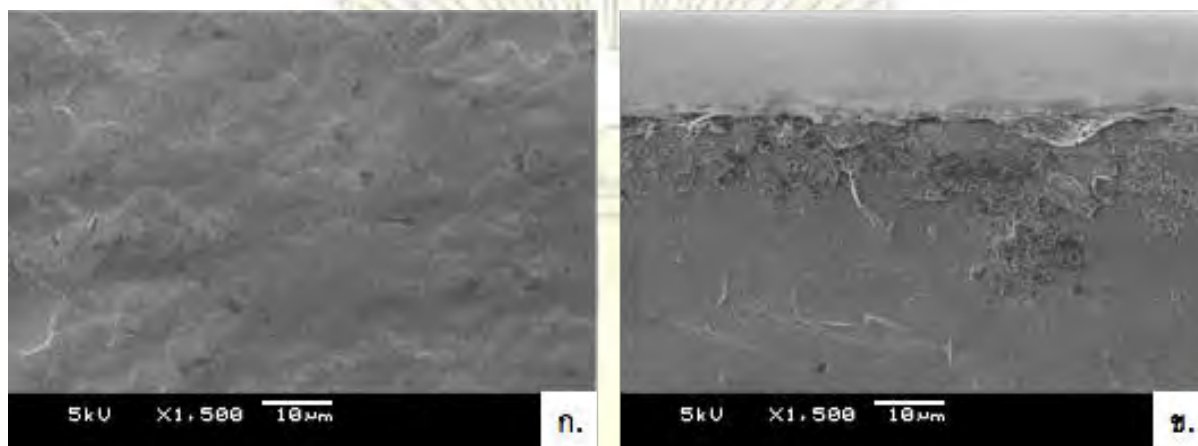
นำแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่สังเคราะห์ได้วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อยืนยันโครงสร้าง ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.2 พบว่าพีคที่ตำแหน่ง 2θ ของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์และสาร $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{G}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ มาตรฐาน (PDF#89-0080) เกิดพีคที่ตำแหน่งเดียวกันคือ 22, 32, 39, 46, 52, 57 และ 67 องศา และมี diffraction plane เท่ากับ 200, 211, 022, 400, 411, 420 และ 422 สรุปได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้นั้นคือ $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{G}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$



รูปที่ 3.2 เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรแกรมเปรียบเทียบระหว่าง สารมาตรฐาน $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{G}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ และสารอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่ได้จากการสังเคราะห์

3.1.3 การตรวจสอบพื้นผิวและภาพตัดขวางด้วยเทคนิค SEM

นำแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่ได้ไปตรวจสอบพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM พบว่าพื้นผิวของแผ่นอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีความหนาแน่นและไม่มีรูพรุน



รูปที่ 3.3 ภาพจากเทคนิค SEM ของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า ก.) แสดงพื้นที่ผิวของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ข.) แสดงภาพตัดขวางของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM

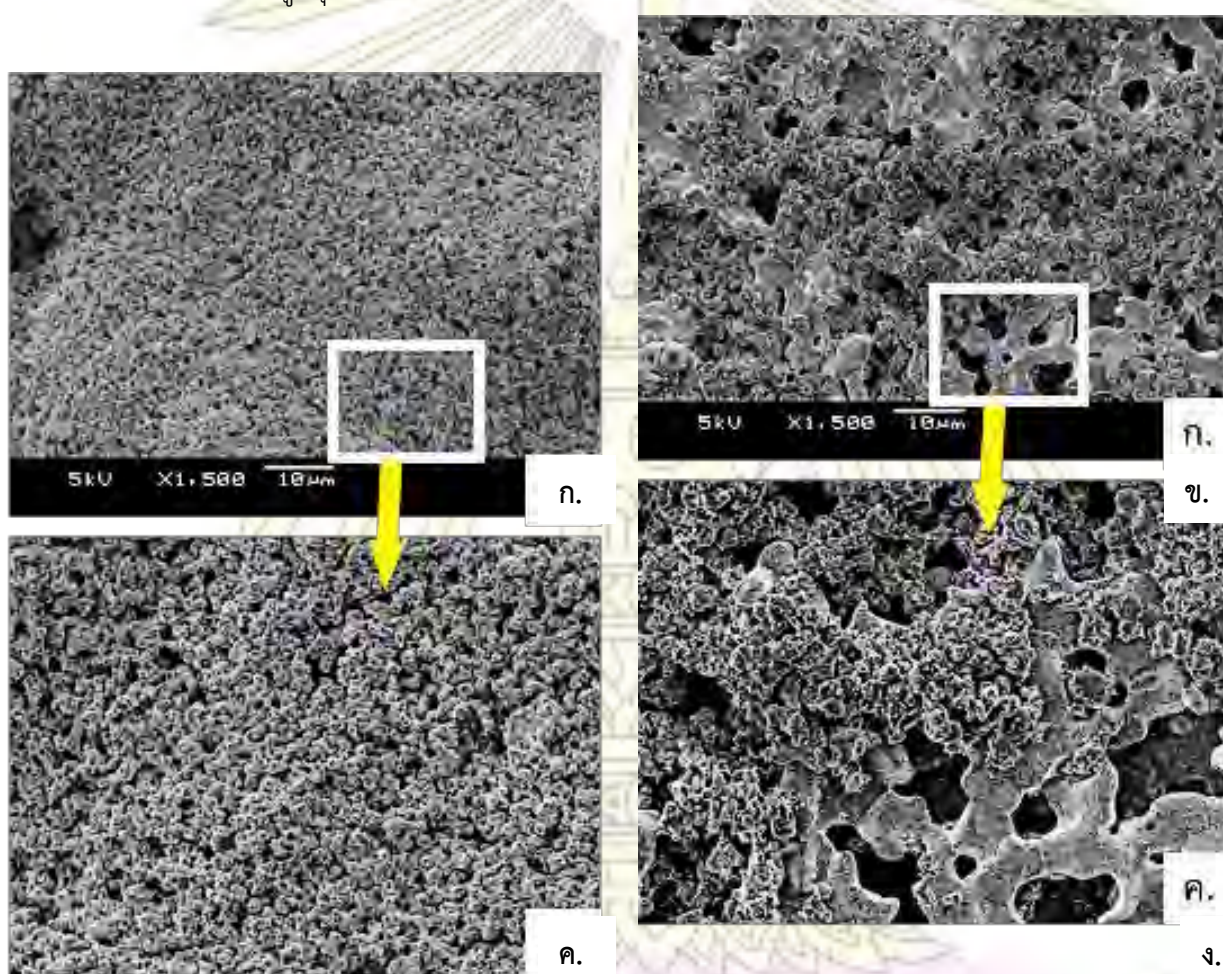
3.2 การศึกษาผลของวิธีการเคลือบสารผสมระหว่างสารเกิดรูพรุนและผง LSGM ลงบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์

ปรับปรุงแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นด้วยการทำให้เกิดรูพรุนบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ โดยวิธีการเคลือบสารผสมระหว่างผง LSGM และ rice starch ลงบนแผ่นทั้งสองด้าน หลังจากนั้นนำแผ่นไป sintering และเคลือบขั้วไฟฟ้าโดยใช้สาร SSC เป็นขั้วแคโทด และสาร SFMO เป็นขั้วแอโนด ทำการเปรียบเทียบวิธีการเคลือบขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกันคือวิธี impregnation และวิธี screen-printing แล้วทำการตรวจสอบการยึดติดของขั้วไฟฟ้ากับแผ่นอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิง โดยการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและภาพตัดขวางด้วยเทคนิค SEM และการวัดค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง

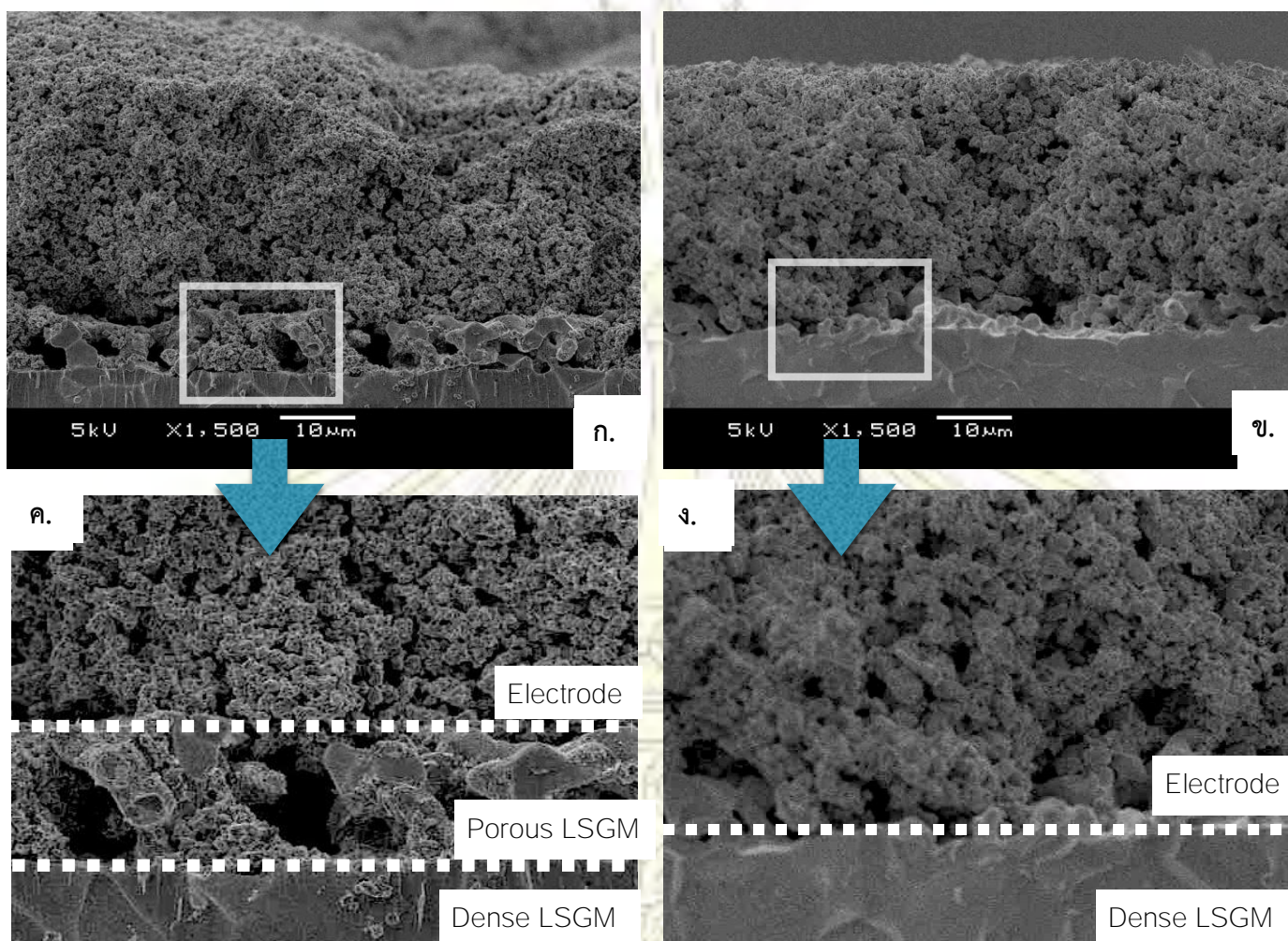
3.2.1 การตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

รูปที่ 3.4-3.5 แสดงภาพพื้นผิวและภาพตัดขวางของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่เคลือบด้วยขั้วไฟฟ้า จะเห็นว่า การเคลือบด้วยวิธี impregnation มีการซึมผ่านของสารที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเข้าไปในรูพรุนได้มากกว่าวิธี screen-printing ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในวิธี screen-printing โดยลักษณะของสารที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าจะมีความหนืดและเกาะกันเองมากกว่าสารที่ใช้ในวิธี impregnation จึงทำให้ขั้วไฟฟ้ายึดเกาะอยู่บริเวณผิวหน้าของรูพรุนบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์เป็นส่วนมาก และจะมีพื้นที่ในรูพรุนซึ่งไม่ถูกเคลือบด้วยขั้วไฟฟ้าซึ่งเห็นได้จากชั้นอิเล็กโทรไลต์ที่มีรูพรุนแยกจากชั้นขั้วที่เคลือบลงไปอย่างชัดเจน จากผลการวิเคราะห์พื้นผิวด้านบนแสดงดังรูป 3.4 จะเห็นว่า

ที่รูป 3.4 ก. เป็นการเคลือบด้วยวิธี screen-printing บนผิวหน้าของแผ่นถูกปกคลุมไปด้วยชั้นไฟฟ้าและไม่สามารถมองเห็นโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่โปร่งภายในได้ เมื่อวิเคราะห์จากภาพตัดขวาง แสดงดังรูปที่ 3.5 ก. พบว่าชั้นไฟฟ้าไม่สามารถเข้าไปแทรกภายในรูพรุนได้ จึงทำให้เห็นพื้นผิวที่ถูกแบ่งออกเป็น 3 ชั้น โดยชั้นล่างคือผิวอิเล็กทรอนิกส์ที่อัดแน่น ชั้นกลางคือผิวอิเล็กทรอนิกส์ที่มีรูพรุน และชั้นบนคือชั้นไฟฟ้าที่ถูกเคลือบลงไปสำหรับวิธี impregnation เมื่อวิเคราะห์จากพื้นผิวด้านบนแสดงดังรูป 3.4 ข. จะเห็นว่าสามารถมองเห็นรูพรุนของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชั้นไฟฟ้าเคลือบอยู่ แสดงถึงชั้นไฟฟ้าที่สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างรูพรุนได้ และในภาพตัดขวางแสดงดังรูป 3.5 ข. จะเห็นว่าสามารถแบ่งชั้นผิวของแผ่นได้เป็น 2 ชั้น โดยชั้นบนคืออิเล็กทรอนิกส์ที่มีรูพรุนที่ถูกเคลือบด้วยชั้นไฟฟ้าโดยจะเห็นเป็นรูพรุนถูกเคลือบชัดเจนบริเวณผิวรอยต่อระหว่างชั้น ส่วนชั้นล่างคืออิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่มีรูพรุน



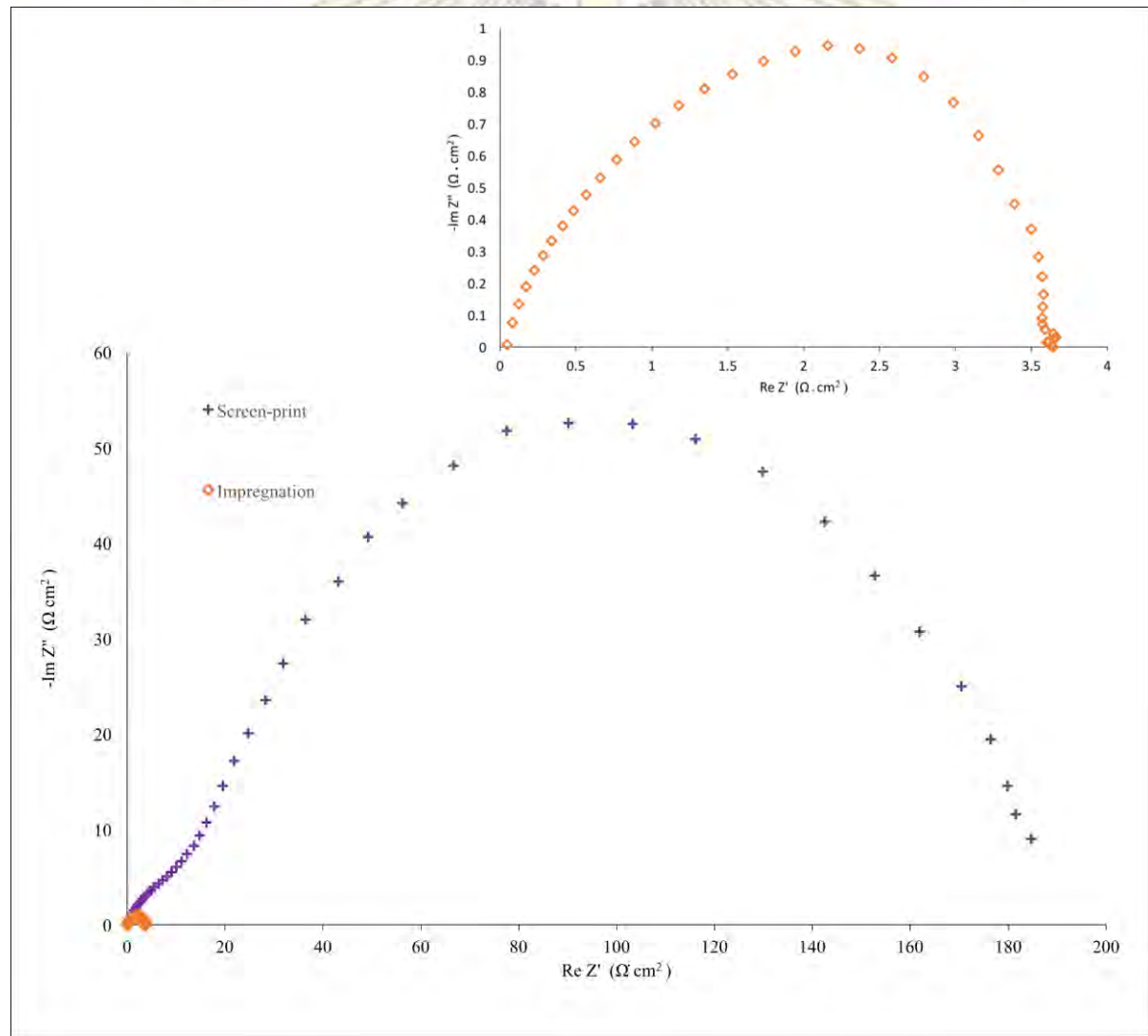
รูปที่ 3.4 ภาพพื้นผิวจากเทคนิค SEM ของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการเพิ่มรูพรุนบนพื้นผิวและเคลือบด้วยชั้นด้วยวิธีที่ต่างกัน ก.) เคลือบด้วยวิธี screen-printing ข.) เคลือบด้วยวิธี impregnation ค.) ภาพขยายของ ก. เพื่อแสดงรายละเอียด ง.) ภาพขยายของ ข. เพื่อแสดงรายละเอียด



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางจากเทคนิค SEM ของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ผ่านการเพิ่มรูพรุนบนพื้นผิวและเคลือบด้วยขี้ด้วยวิธีที่ต่างกัน ก.) เคลือบด้วยวิธี screen-printing ข.) เคลือบด้วยวิธี impregnation ค.) ภาพขยายของ ก. เพื่อแสดงรายละเอียด ง.) ภาพขยายของ ข. เพื่อแสดงรายละเอียด

3.2.2 การวัดค่าความต้านทานของเซลล์

นำเซลล์เชื้อเพลิงมาวัดค่าความต้านทานในช่วงอุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบ ขั้วไฟฟ้าที่เคลือบด้วยวิธี impregnation และ screen-printing พบว่า ขั้วไฟฟ้าที่เคลือบด้วยวิธี impregnation มีค่าความต้านทานต่ำกว่าขั้วไฟฟ้าที่เคลือบด้วยวิธี screen-printing ซึ่งจะเห็นได้จาก Nyquist plot ดังรูปที่ 3.6 และค่าความต้านทานสรุปดังตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าทั้ง 2 วิธีมีค่าความต้านทานแตกต่างกันมาก ซึ่งอาจเป็นผลจากการเคลือบขั้วไฟฟ้าลงบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยการเคลือบขั้วไฟฟ้าลงบนแผ่นที่มีรูพรุนด้วยวิธี screen-printing ทำให้ขั้วไฟฟ้าไม่สามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนได้ เซลล์เชื้อเพลิงจึงมีความต้านทานระหว่างผิวขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์สูง และสำหรับวิธี impregnation ขั้วไฟฟ้าสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในรูพรุนได้ดี จึงเพิ่มพื้นที่ผิวในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้ค่าความต้านทานมีค่าน้อย



รูปที่ 3.6 Nyquist plot จากการวัดความต้านทานของเซลล์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบ ระหว่างการเคลือบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธี impregnation และ screen-printing

ตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จากการเคลือบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธี impregnation และ screen-print ที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิขณะทำการวัด (องศาเซลเซียส)	ค่าความต้านทาน Rp (โอห์ม/ตารางเซนติเมตร)	
	วิธี impregnation	วิธี screen-printing
600	74.67	5100
650	26.58	2500
700	13.57	1265
750	6.71	585
800	3.64	191

ที่อุณหภูมิสูงความต้านทานที่วัดได้มีค่าต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง อิเล็กตรอนจะมีพลังงานในการเคลื่อนที่มากส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ดี จึงทำให้ความต้านทานไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ต่ำ และในทางเดียวกันเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนลดน้อยลงด้วย ส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ไม่ดี จึงทำให้เพิ่มความต้านทานไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์

จากการทดลองนี้สรุปได้ว่า การเคลือบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธี impregnation ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีความต้านทานของเซลล์ต่ำกว่าการเคลือบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธี screen-printing

3.3 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างสารเกิดรูพรุนและผง LSGM

เพื่อให้ได้ขนาดและปริมาณของรูพรุนที่แตกต่างกันบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ จึงศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างสารเพิ่มรูพรุนและผง LSGM ที่ต่างกันดังนี้

LSGM ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

LSGM + 20% Rice starch

LSGM + 30% Rice starch

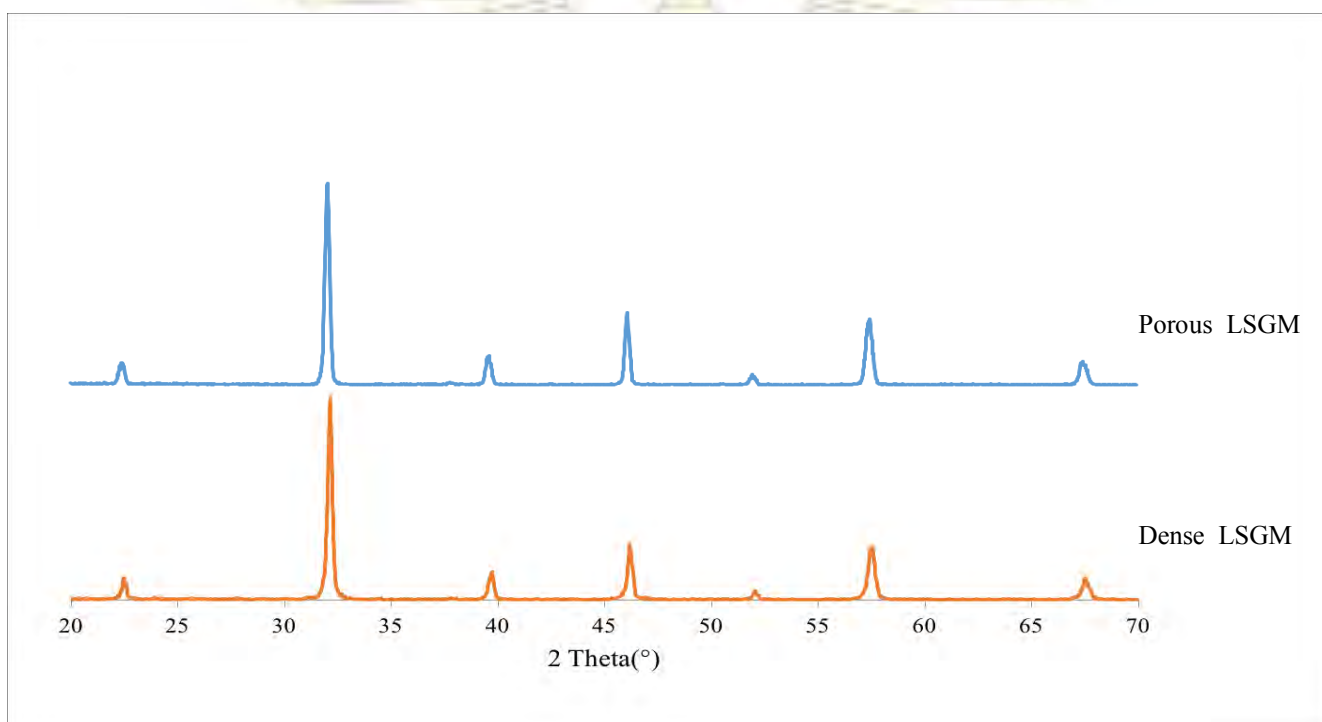
LSGM + 40% Rice starch

LSGM + 50% Rice starch

แล้วจากนั้นนำแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ได้มาเคลือบด้วยสารสำหรับทำขั้วแคโทด SSC และขั้วแอโนด SFMO ด้วยวิธี impregnation แล้วนำไปวัดค่าความต้านทานของเซลล์และตรวจสอบพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค SEM

3.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่มีรูพรุนด้วยเทคนิค XRD

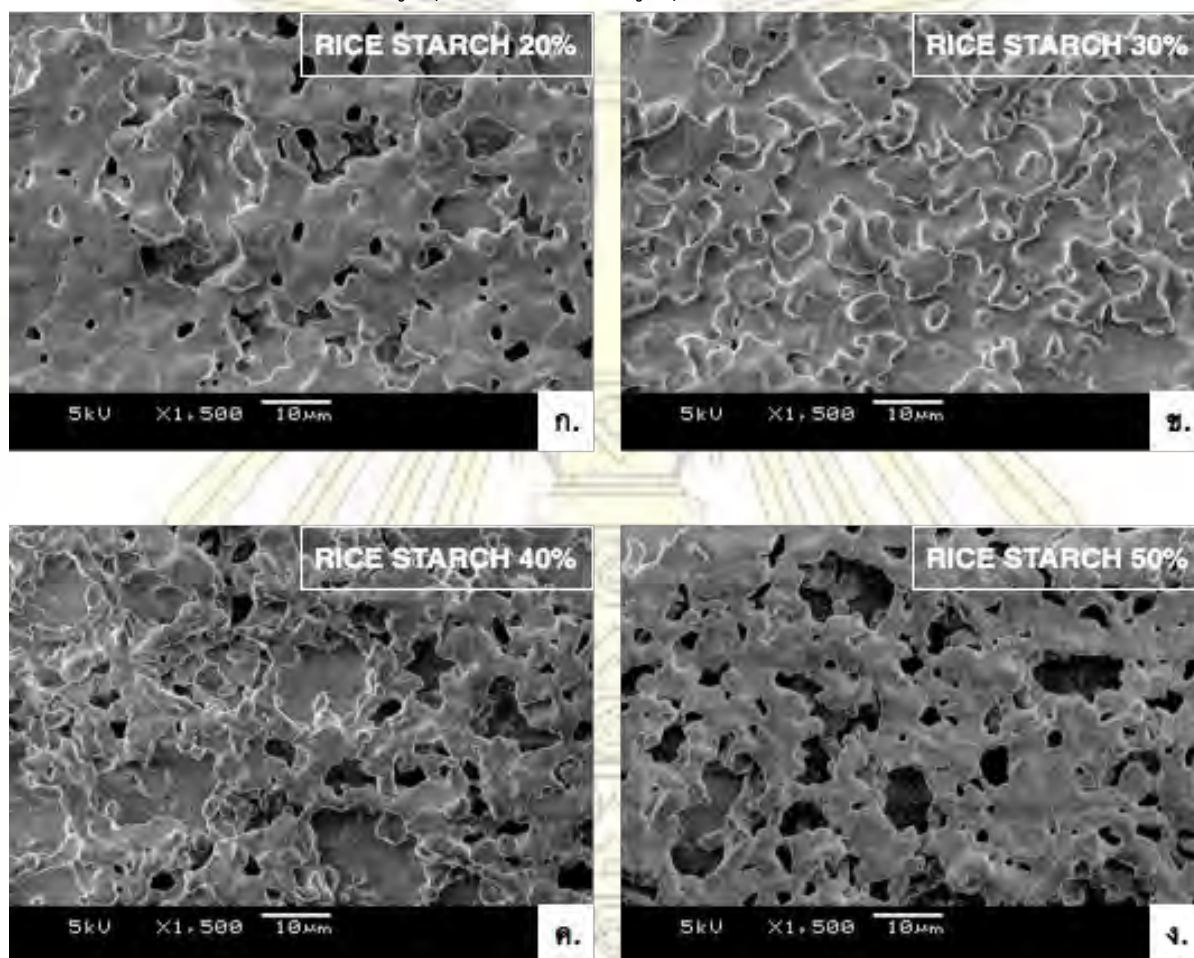
นำแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่ไม่ได้ทำการเพิ่มพื้นที่ผิวและแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ทำการเพิ่มพื้นที่ผิวไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อยืนยันโครงสร้างและเปรียบเทียบข้อมูล แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 3.6 พบว่าพีคที่ตำแหน่ง 2θ ของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่ยังไม่ปรับปรุงพื้นที่ผิวและพีคที่ตำแหน่ง 2θ ของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นที่ผิวขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกัน โดยเกิดพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 22, 32, 39, 46, 52, 57 และ 67 องศา แสดงว่าอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่มีรูพรุนหลังจากสังเคราะห์ได้นั้นมีโครงสร้างเดียวกับแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นแผ่นตั้งต้น



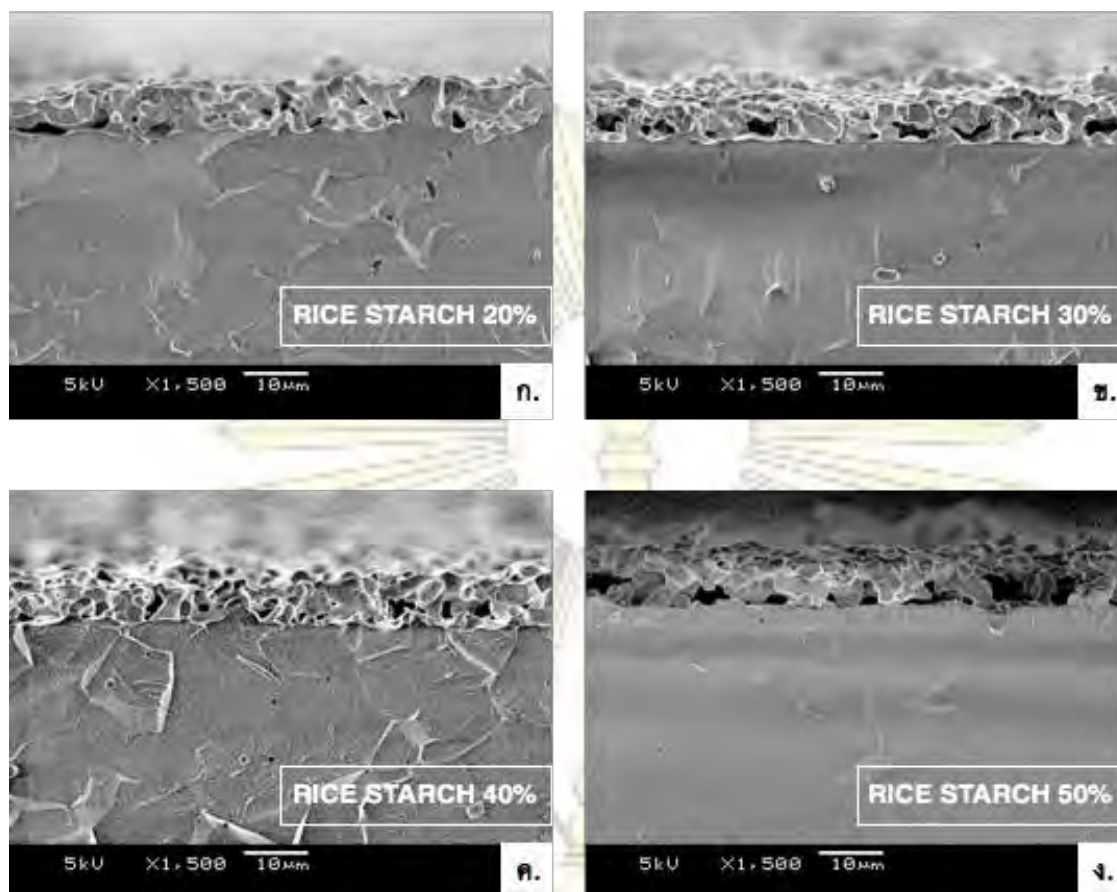
รูปที่ 3.7 เอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรแกรมเปรียบเทียบระหว่าง เพอร์ออฟสไกต์ $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ สารอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่ไม่ผ่านการเพิ่มพื้นที่ผิว และอิเล็กโทรไลต์ LSGM ที่ผ่านการเพิ่มพื้นที่ผิว

3.3.2 การตรวจสอบพื้นผิวและพื้นที่ตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

รูปที่ 3.8 แสดงภาพพื้นผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โพลีเมอร์ที่เพิ่มพื้นผิวด้วย rice starch และผง LSGM ที่อัตราส่วน 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วน rice starch ทำให้มีรูพรุนเพิ่มและรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ภาพตัดขวาง แสดงดังรูป 3.9 จะเห็นว่ารูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ rice starch เช่นกัน แต่ที่อัตราส่วนของ rice starch 50 เปอร์เซ็นต์ เกิดช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างผิวของ LSGM ที่ไม่มีรูพรุนและ LSGM ที่มีรูพรุน ส่งผลทำให้พื้นผิวทั้ง 2 ชั้นติดกันไม่ได้



รูปที่ 3.8 ภาพพื้นผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โพลีเมอร์เคลือบด้วยสารเกิดรูพรุนที่อัตราส่วนแตกต่างกัน ก.) เคลือบด้วยอัตราส่วน rice starch 20% ข.) เคลือบด้วยอัตราส่วน rice starch 30% ค.) เคลือบด้วยอัตราส่วน rice starch 40% ง.) เคลือบด้วยอัตราส่วน rice starch 50%

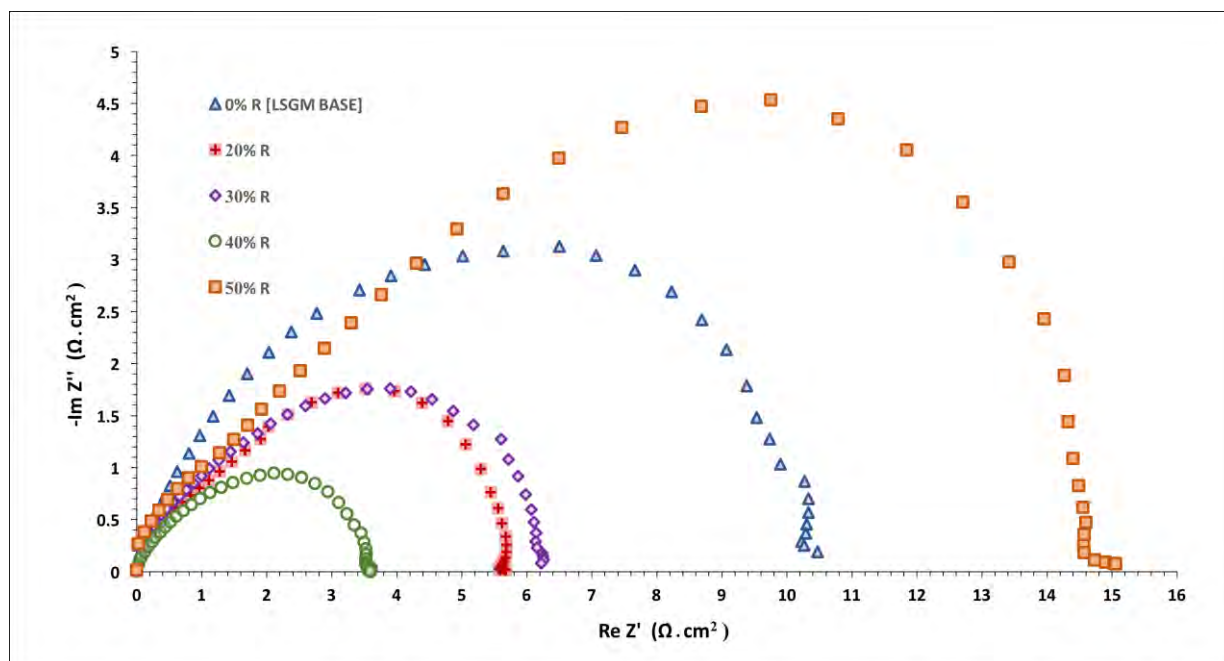


รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่เคลือบด้วยสารเกิดรูพรุนที่อัตราส่วนแตกต่างกัน

- ก.) เคลือบด้วยอัตราส่วน rice starch 20% ข.) เคลือบด้วยอัตราส่วน rice starch 30%
 ค.) เคลือบด้วยอัตราส่วน rice starch 40% ง.) เคลือบด้วยอัตราส่วน rice starch 50%

3.3.3 การวัดค่าความต้านทานของเซลล์

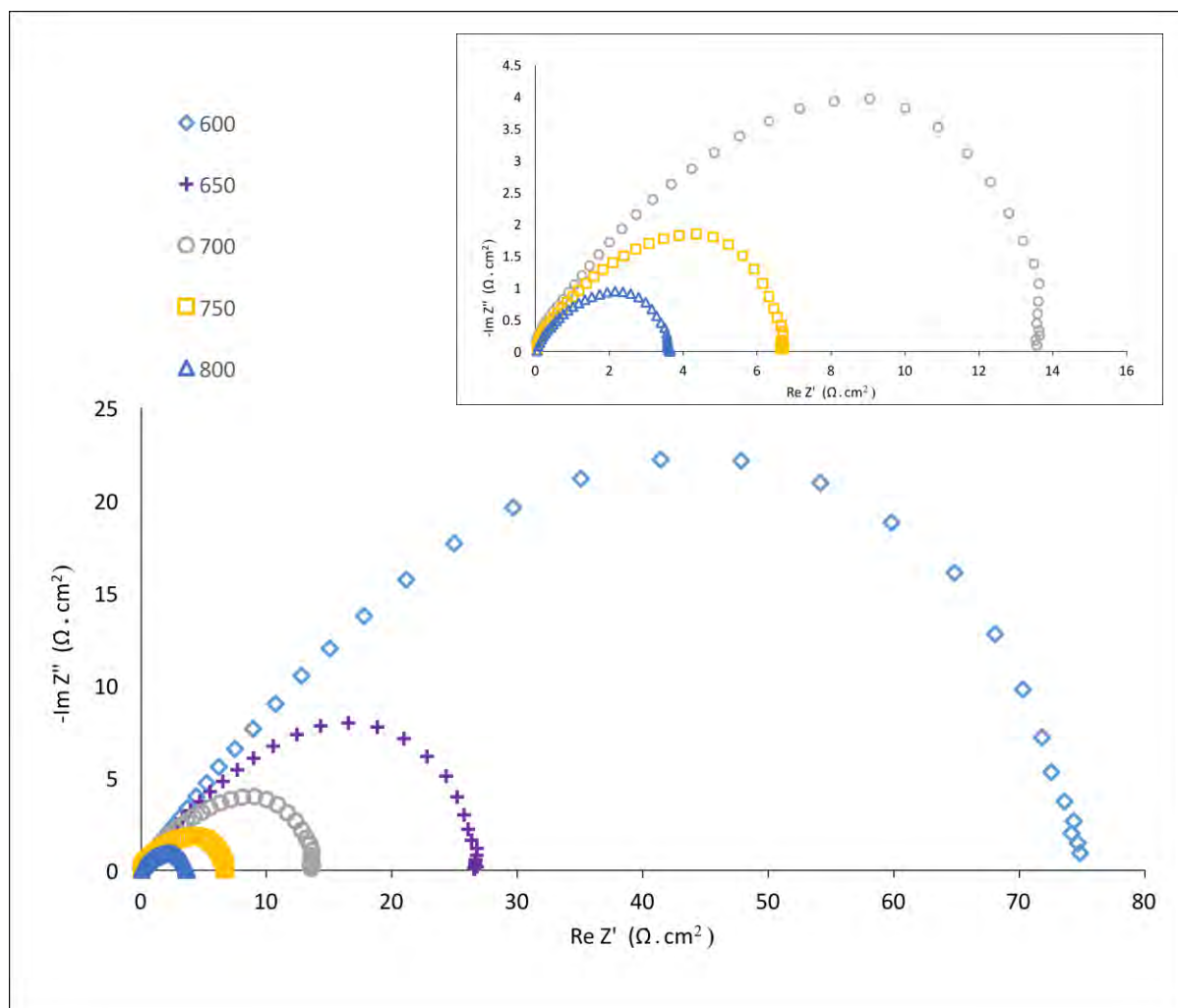
รูปที่ 3.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานของเซลล์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยมีการปรับปรุงพื้นผิวของอิเล็กโทรไลต์ด้วย rice starch ในอัตราส่วน 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าเมื่อมีการปรับปรุงเพิ่มพื้นผิวให้มีรูพรุน ค่าความต้านทานของเซลล์จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน rice starch ในช่วง 20-40 เปอร์เซ็นต์ ค่าความต้านทานมีแนวโน้มลดลงตามลำดับเช่นกัน เนื่องจากมีรูพรุนเพิ่มขึ้นจึงทำให้ข้อไฟฟ้าสามารถไปยึดเกาะได้มากขึ้น ดังนั้น active site ในการเร่งปฏิกิริยาของข้อไฟฟ้าบนผิวอิเล็กโทรไลต์จึงมากขึ้น โดยที่อัตราส่วน rice starch 40 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าความต้านทานที่ต่ำที่สุด และที่อัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้นต่างจากอัตราส่วนอื่นมาก อาจเนื่องมาจากมีช่องว่างรูพรุนขนาดใหญ่ระหว่างชั้นอิเล็กโทรไลต์ที่มีรูพรุนและชั้นอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีรูพรุนทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ระหว่างข้อไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ได้ไม่ดึ้นก จึงทำให้ความต้านทานของเซลล์เพิ่มขึ้น สรุปค่าความต้านทานดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.10 แสดง Nyquist plot ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่มีอัตราส่วน rice starch 20, 30, 40, 50 เปอร์เซ็นต์ และแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (rice starch 0%)

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความต้านทานของเซลล์เมื่อใช้ rice starch ที่อัตราส่วนต่างๆ

% rice starch ใน LSGM	ค่าความต้านทาน R_p (โอห์มตารางเซนติเมตร)
0	10.5
20	5.67
30	6.25
40	3.56
50	14.9



รูปที่ 3.11 แสดง Nyquist plot ของเซลล์ที่แผ่นอิเล็กโทรไลต์มีอัตราส่วน Rice starch 40% วัดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 600-800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความต้านทานของเซลล์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิที่ใช้วัด (องศาเซลเซียส)	ค่าความต้านทาน R_p (โอห์มตารางเซนติเมตร)
600	74.86
650	26.60
700	13.57
750	6.64
800	3.56

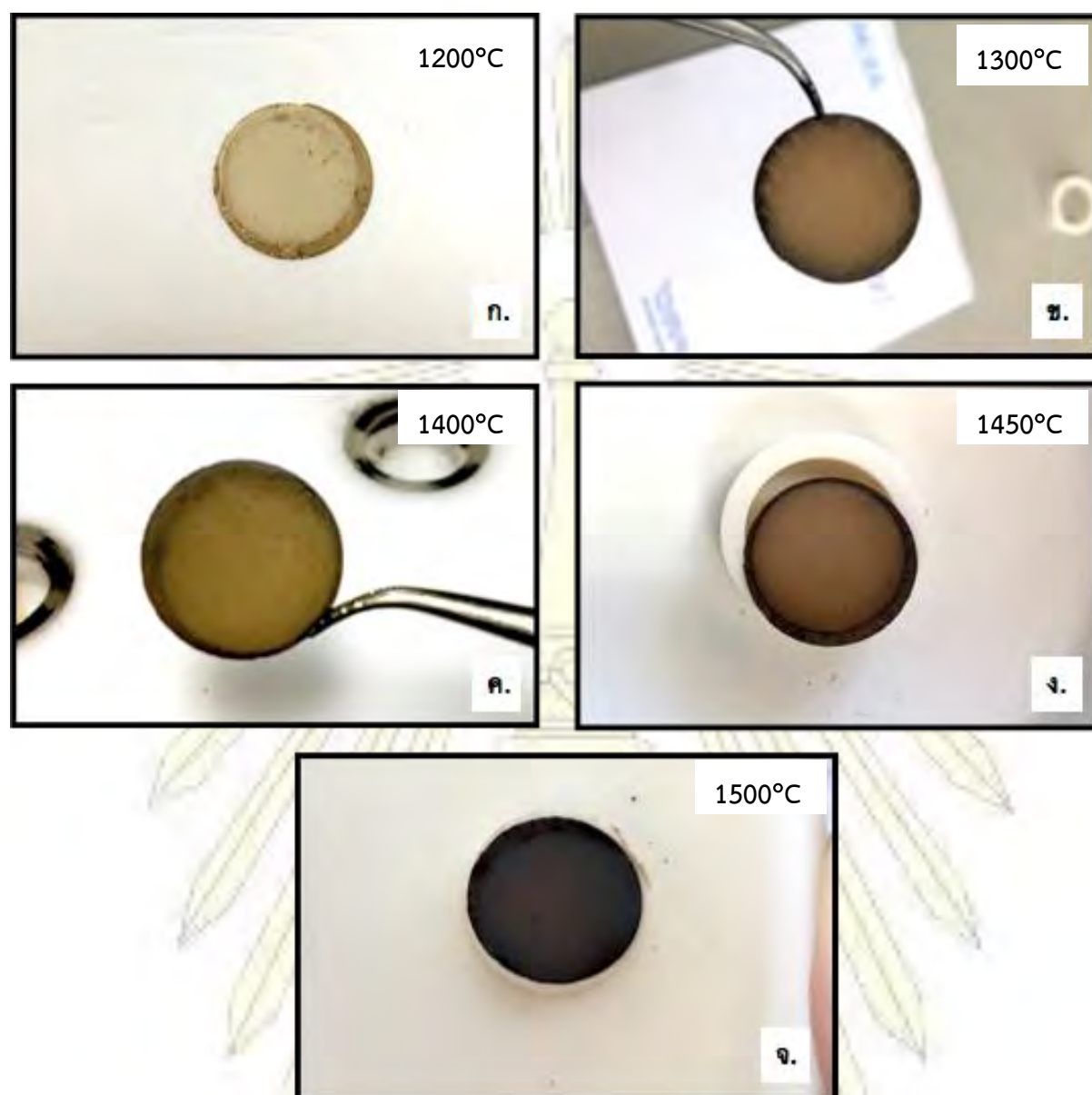
เมื่อวัดค่าความต้านทานของเซลล์ที่อุณหภูมิต่างๆกัน ดังรูป 3.11 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้ค่าความต้านทานของเซลล์เพิ่มขึ้นดังเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น สรุปว่าที่อัตราส่วน rice starch 40 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในการศึกษานี้

3.4 การศึกษาอุณหภูมิในการ sintering ที่มีผลต่อรูพรุน

เพื่อให้เกิดขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกัน จึงศึกษาผลของอุณหภูมิในการ sintering ที่อุณหภูมิ 1200, 1300, 1400, 1450 และ 1500 องศาเซลเซียส โดยนำแผ่นอิเล็กโทรไลต์มาเคลือบ rice starch ที่อัตราส่วน 40 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำไป sintering ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นนำแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ได้มาเคลือบด้วยข้าวไฟฟ้าแคโทด SSC และข้าวไฟฟ้าแอโนด SFMO ด้วยวิธี impregnation แล้วนำไปตรวจสอบพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM และวัดค่าความต้านทานของเซลล์ดังนี้

3.4.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นอิเล็กโทรไลต์หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

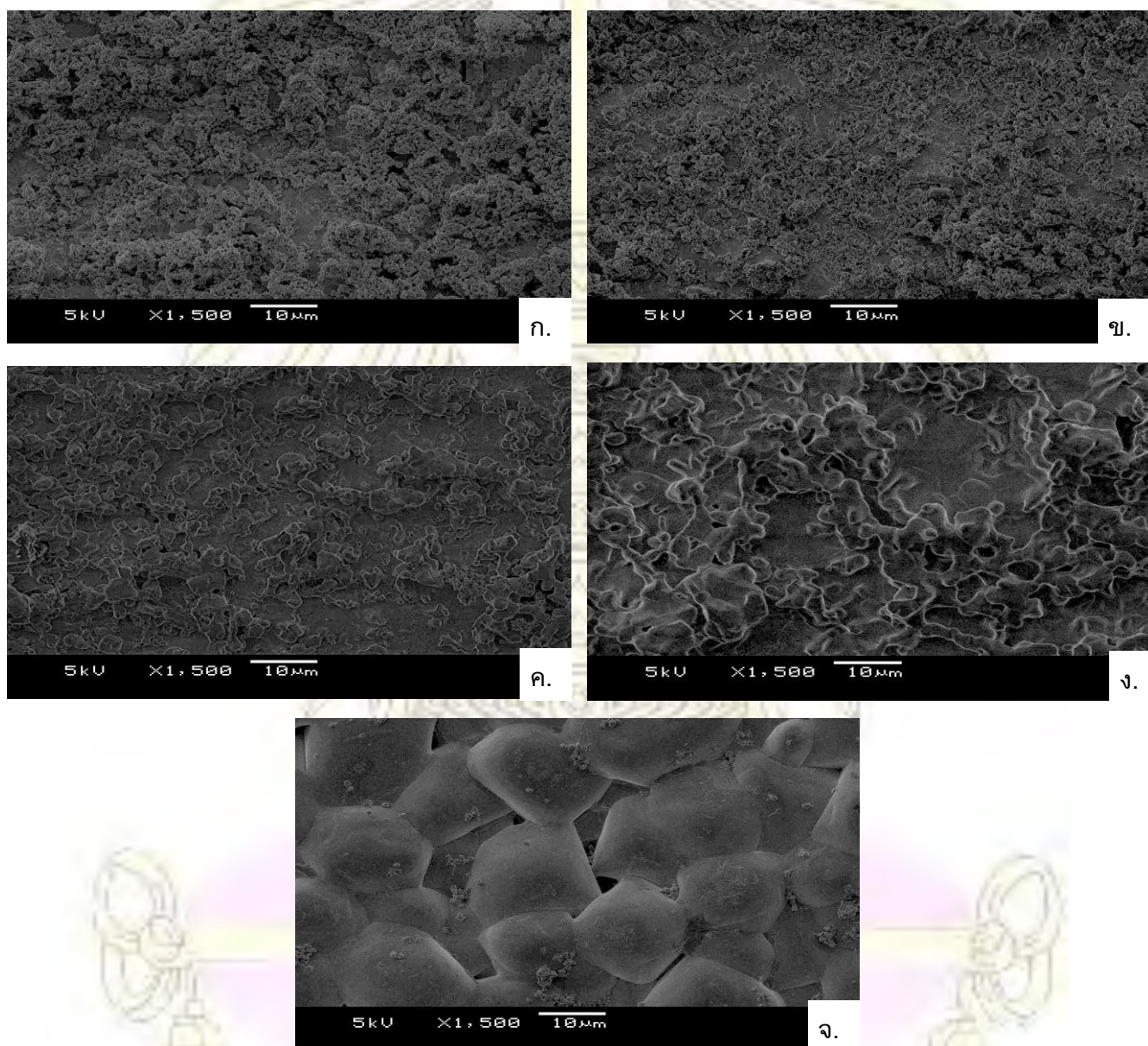
ในการ sintering แผ่นอิเล็กโทรไลต์อีกครั้งที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 3.12 ภาพ ก. จะเห็นว่าแผ่น LSGM รูพรุนบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ยังไม่ติดแผ่นเท่าที่ควร มีการหลุดร่อนบางส่วน และมีสีอ่อนลง ซึ่งแตกต่างจากแผ่นอิเล็กโทรไลต์เดิม อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการ sintering ต่ำเกินไป เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการ sintering เป็น 1300 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพ 3.12 ข. จะเห็นว่า LSGM ที่มีรูพรุน ดูกลมกลิ้งกับแผ่นเดิมมากขึ้นแต่ยังไม่เรียบไปกับแผ่น และ LSGM รูพรุนจะเริ่มเรียบติดกับแผ่นตั้งแต่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียสขึ้นไป และที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส แสดงดังรูป 3.12 จ. จะเห็นว่าแผ่นมีสีน้ำตาลเข้มเหมือนไหม้ ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นมีความบางมากแล้วเมื่อนำไป sintering ที่อุณหภูมิสูง เพื่อทำให้เกิดรูพรุนอีกครั้ง แผ่นอิเล็กโทรไลต์อาจได้รับความร้อนมากเกินไปจนทำให้แผ่นไหม้และสารอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่เคลือบด้วยสารผสมระหว่าง LSGM และ rice starch 40 เปอร์เซ็นต์ หลังการ sintering ที่อุณหภูมิต่างๆ ก.) 1200 องศาเซลเซียส ข.) 1300 องศาเซลเซียส ค.) 1400 องศาเซลเซียส ง.) 1450 องศาเซลเซียส จ.) 1500 องศาเซลเซียส

3.4.2 การตรวจสอบพื้นผิวและพื้นที่ตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

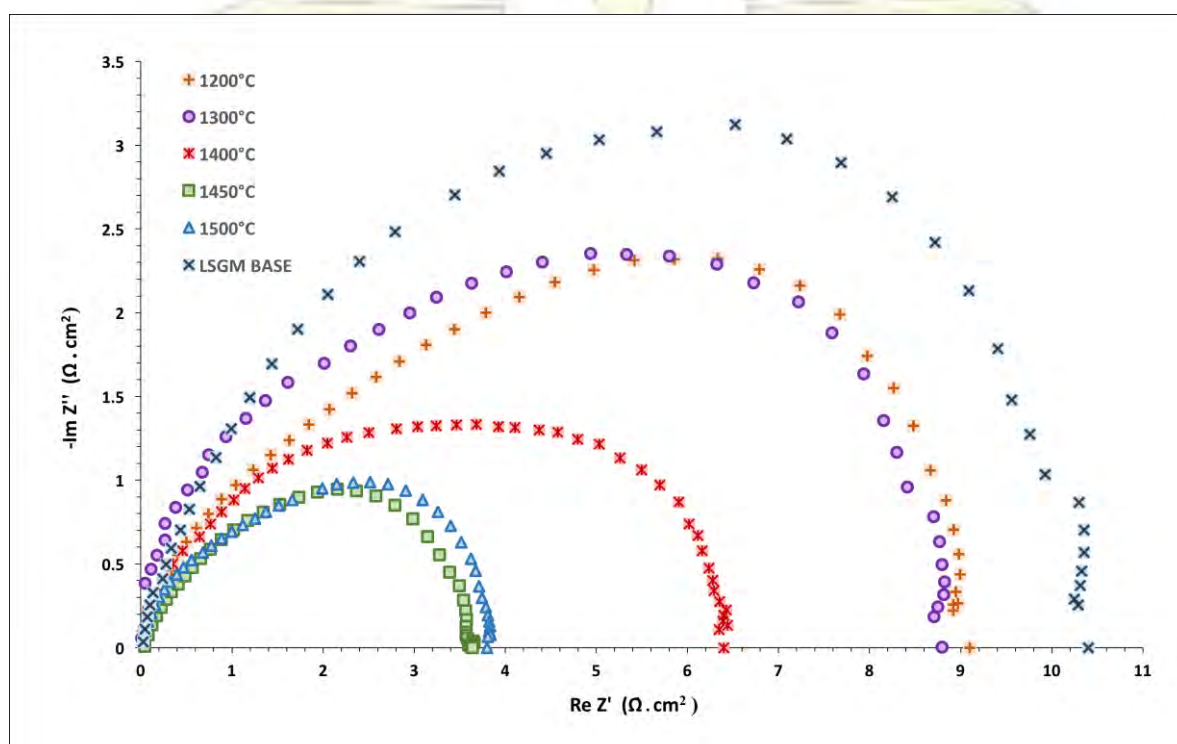
จากการตรวจสอบพื้นผิวของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิค SEM แสดงดังรูปที่ 3.13 พบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำให้มีการเกิดรูพรุนบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้นอนุภาคบนผิวอิเล็กโทรไลต์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยปกติในการ sintering LSGM เพื่อ activate LSGM จะใช้อุณหภูมิในช่วง 1400-1500 องศาเซลเซียส ดังนั้นที่อุณหภูมิ 1200-1300 อาจเกิดโครงสร้างของ LSGM ที่ต่างจากอิเล็กโทรไลต์ LSGM ปกติ สำหรับแผ่นที่ sintering เพื่อให้เกิดรูพรุนที่ อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคของอิเล็กโทรไลต์ที่ใหญ่ขึ้นชัดเจนอาจเนื่องมาจากแผ่นอิเล็กโทรไลต์ได้รับความร้อนมากเกินไป เนื่องจากก่อนที่จะ sintering ได้มีการขัดให้บาง 0.3 มิลลิเมตรจึงทำให้อิเล็กโทรไลต์ได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.13 ภาพตัดขวางจากเทคนิค SEM ของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ผ่านการเพิ่มรูพรุนโดยใช้อุณหภูมิในการ sintering ต่างกัน ก.) 1200 องศาเซลเซียส ข.) 1300 องศาเซลเซียส ค.) 1400 องศาเซลเซียส ง.) 1450 องศาเซลเซียส จ.) 1500 องศาเซลเซียส

3.4.3 การวัดค่าความต้านทานของเซลล์

จากรูปที่ 3.14 และตารางที่ 3.3 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ sintering ตั้งแต่ 1200-1450 องศาเซลเซียส ความต้านทานของเซลล์ลดลงซึ่งคาดว่าเนื่องมาจากโครงสร้างของอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ โดยอุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส ให้ค่าความต้านทานของเซลล์ที่ต่ำที่สุด และที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสมีค่าความต้านทานสูงกว่าที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียสเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังผล SEM



รูปที่ 3.14 กราฟ Nyquist ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ sintering โดยใช้อุณหภูมิ 1200, 1300, 1400, 1450 และ 1500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าความต้านทานของเซลล์ผ่านการ sintering ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เมื่อใช้อุณหภูมิขณะวัดที่ 800 องศาเซลเซียส

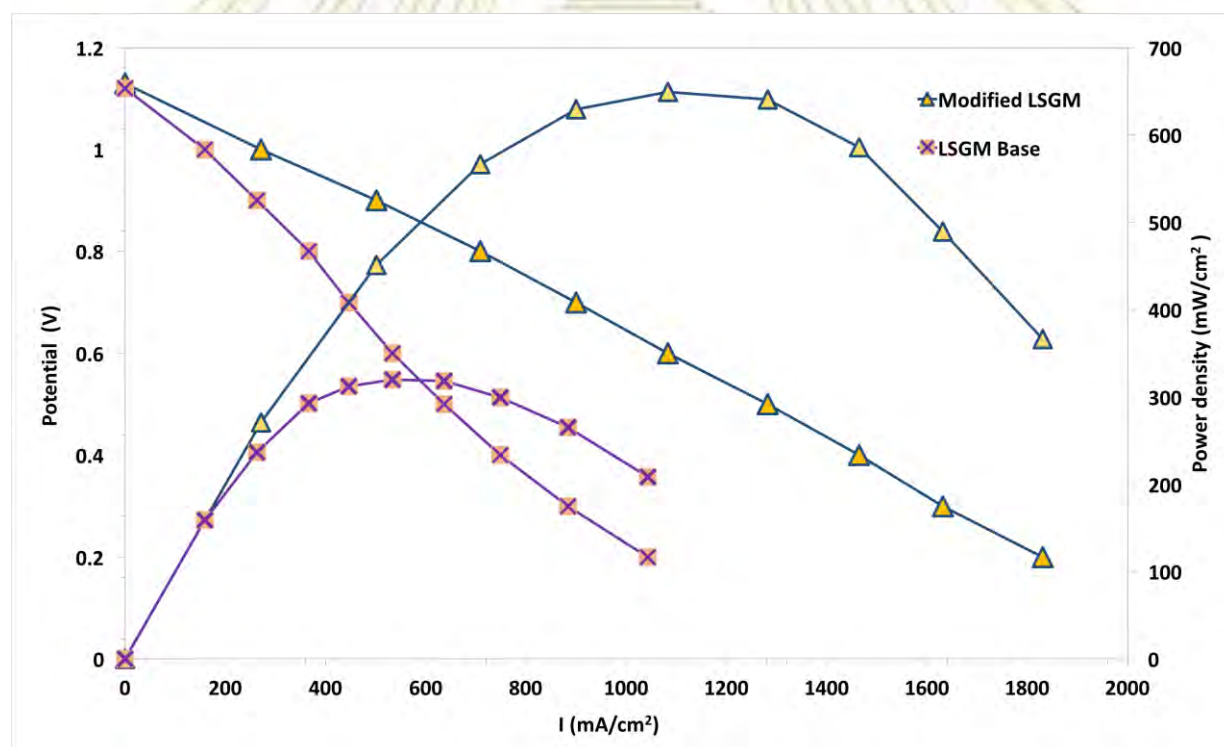
อุณหภูมิที่ใช้ sinter (องศาเซลเซียส)	ค่าความต้านทาน Rp (โอห์ม/ตารางเซนติเมตร)
1200	9.00
1300	8.71
1400	6.34
1450	3.56
1500	3.81

3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว

นำเซลล์เชื้อเพลิงที่มีค่าความต้านทานต่ำที่สุดจากการวัดค่าความต้านทานในหัวข้อ 3.2, 3.3 และ 3.4 คือเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้วิธี impregnation ในการเคลือบขั้ว ใช้อัตราส่วน rice starch 40 เปอร์เซ็นต์ และ sintering ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียสเพื่อให้เกิดรูพรุน ไปทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวโดยให้กระแสไฟฟ้าและวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าเพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า ในภาวะที่ใช้แก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง

3.5.1 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเดี่ยว

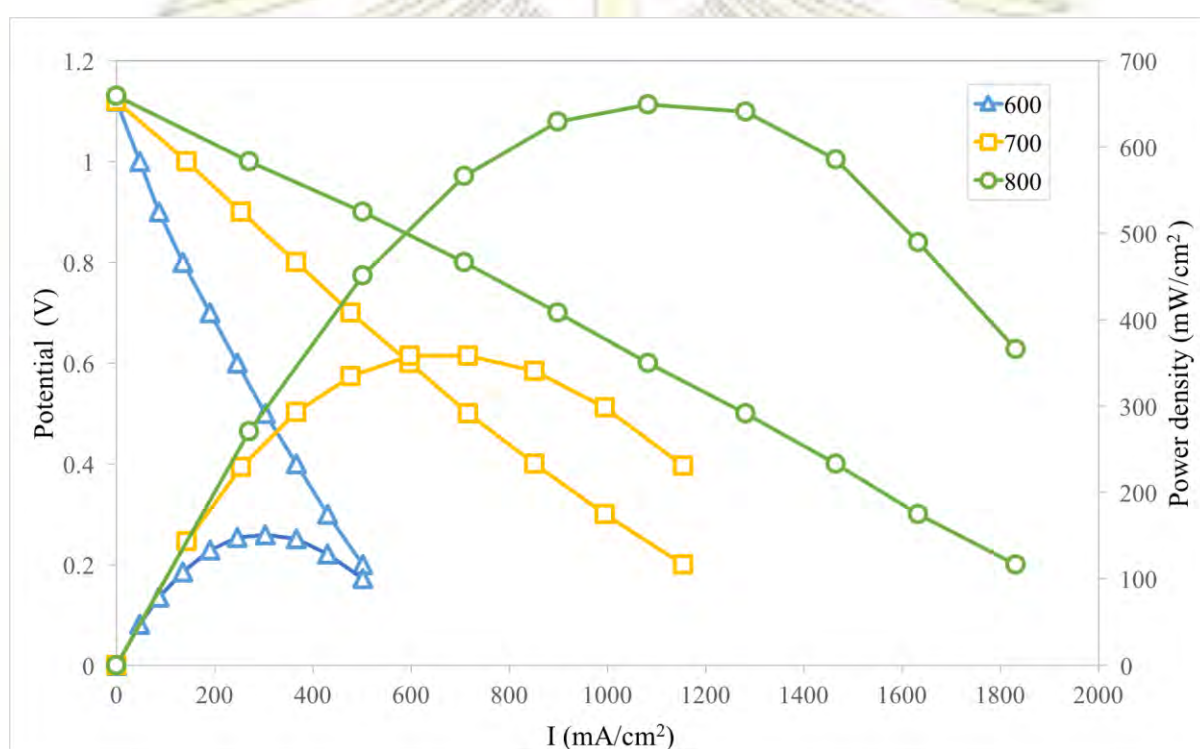
จากรูปที่ 3.15 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ทำการเพิ่มพื้นที่ผิว (modified LSGM) และแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผ่านการเพิ่มพื้นที่ผิว (base) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ทำการเพิ่มพื้นที่ผิวมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงกว่าแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผ่านการเพิ่มพื้นที่ผิวประมาณ 2 เท่า ค่ากำลังไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆแสดงสรุปดังตารางที่ 3.4 เมื่อลดอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะเห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์ต่ำลง แสดงดังรูป 3.16



รูปที่ 3.15 ค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่เปรียบเทียบระหว่างแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ทำการเพิ่มพื้นที่ผิวและแผ่นอิเล็กโทรไลต์ปกติ โดยวัดค่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.5 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่เพิ่มพื้นที่ผิวและแผ่นอิเล็กโทรไลต์ปกติโดยวัดค่าที่
อุณหภูมิในช่วง 600-800 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิขณะทำการวัด (องศาเซลเซียส)	กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร)	
	แผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่เพิ่มพื้นที่ผิว	แผ่นอิเล็กโทรไลต์ปกติ
600	151.20	70.03
700	358.11	178.26
800	649.37	319.91



รูปที่ 3.16 ค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงของแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่เพิ่มพื้นที่ผิวโดยเปรียบเทียบแต่ละอุณหภูมิ
ขณะวัดในช่วง 600-800 องศาเซลเซียส

บทที่ 4

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้สามารถปรับปรุงพื้นผิวบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ให้มีรูพรุนได้โดย นำแผ่นอิเล็กโทรไลต์ $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (LSGM) ที่ผ่านการ sintering มาเคลือบด้วยสารผสมระหว่างผง LSGM และ rice starch แล้วนำไป sintering อีกครั้ง จะได้แผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่มีชั้นรูพรุนอยู่บนพื้นผิว จากนั้นตรวจสอบปัจจัยทางกายภาพด้วยวิธี SEM และวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงโดยการใช้ขั้วแคโทดเป็นสาร SSC และขั้วแอโนดเป็นสาร SFMO เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อรูพรุนและความต้านทาน

จากการศึกษาวิธีในการเคลือบขั้วไฟฟ้าบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่มีรูพรุนพบว่า การเคลือบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธี impregnation จะให้ค่าความต้านทานต่ำที่สุด สารที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนบนแผ่นอิเล็กโทรไลต์ได้ดีกว่าการเคลือบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธี screen-printing ซึ่งจะเห็นขั้วไฟฟ้าส่วนใหญ่เคลือบอยู่ด้านบนผิวอิเล็กโทรไลต์โดยไม่แทรกเข้าไปในรูพรุน ดังนั้นค่าความต้านทานจึงสูง

อัตราส่วนของ rice starch ที่ผสมกับผง LSGM เพื่อทำให้เกิดรูพรุนนั้น เมื่อทำการศึกษาพบว่ารูพรุนจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ rice starch ที่เพิ่มขึ้นจาก 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ และแนวโน้มค่าความต้านทานของเซลล์ไฟฟ้าจะต่ำลง โดยอัตราส่วนของ rice starch ที่ 40 เปอร์เซ็นต์จะให้ค่าความต้านทานต่ำที่สุดและที่อัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าอิเล็กโทรไลต์มีรูพรุนเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างพื้นผิว LSGM เดิมและ LSGM ที่มีรูพรุนซึ่งอาจทำให้ LSGM ทั้ง 2 ชั้นติดกันไม่ดีเท่าที่ควร

นอกจากนี้เมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการ sintering เพื่อทำให้เกิดรูพรุน พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ sintering เท่ากับ 1450 องศาเซลเซียสจะให้ค่าความต้านทานต่ำที่สุด ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างทางกายภาพของอิเล็กโทรไลต์จะแตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ sintering ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อให้นำไฟฟ้าในวัสดุและประสิทธิภาพของวัสดุได้

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวจากค่ากำลังไฟระหว่างแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว พบว่าแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธี impregnation ทำให้เกิดรูพรุน โดยใช้อัตราส่วน rice starch ที่ 40 เปอร์เซ็นต์ และทำการ sintering ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าได้สูงถึง 649.37 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวที่มีค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 319.91 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวให้มีรูพรุนด้วย rice starch ที่ 40 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับผง LSGM แล้วนำไป sintering ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความต้านทานต่ำที่สุด และมีประสิทธิภาพมากกว่าแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ประมาณ 2 เท่า ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการนำแผ่นที่ปรับปรุงนี้ไปพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในอนาคต

4.2 ข้อเสนอแนะ

แนวทางในการปรับปรุงงานวิจัยนี้ได้แก่

1. วิเคราะห์ปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้เกิดรูพรุนบนแผ่นอิเล็กทรอนิกส์
2. ศึกษาอัตราส่วนของสารเกิดรูพรุนให้ละเอียดยิ่งขึ้น
3. วิเคราะห์ผลจากค่าอื่นๆ นอกเหนือจากค่าความต้านทานของเซลล์



เอกสารอ้างอิง

1. Stambouli, A.B. Fuel Cells: The Expectations for an Environmental-friendly and Sustainable Source of Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2011**, *15* (9), 4507-4520.
2. Ivers-Tiffée, E.; Weber, A.; Herbstritt, D. Materials and Technologies for SOFC-components. *Journal of the European Ceramic Society* **2001**, *21* (10-11), 1805-1811.
3. Datta, P.; Majewski, P.; Aldinger, F. Structural Studies of Sr- and Mg-doped LaGaO₃. *Journal of Alloys and Compounds* **2007**, *438*, 232-237.
4. Zhang, H.; Zhao, F.; Chen, F. Xia, C. Nano-structure Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_{3-δ} Electrodes for Intermediate-temperature SOFCs with Zirconia Electrolytes. *Solid State Ionics* **2011**, *192*, 591-594.
5. Dong, F.; Chen, D.; Ran, R.; Park, H.; Kwak, C.; Shao, Z. A Comparative Study of Sm_{0.5}Sr_{0.5}MO_{3-δ} (M = Co and Mn) as Oxygen Reduction Electrodes for Solid Oxide Fuel Cells. *International of Hydrogen Energy* **2012**, *37*, 4377-4387.
6. Han, D.; Liu X.; Zeng, F.; Qian, J.; Wu, T.; Zhan, Z. A Micro-nano Porous Oxide Hybrid for Efficient Oxygen Reduction in Reduced-temperature Solid Oxide Fuel Cells. *Nature Research Journal* **2012**. [cited 20 April 2017] Doi:10.1038/srep00462
7. Salehi, Z.; Basoli, F.; Sanson, A.; Mercadelli, E.; Liccoccia, S.; Di Bartolomeo, E. Porous/dense La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.8}Mg_{0.2}O_{3-δ} (LSGM) Bilayer Infiltrated with Metallic Oxidation Catalyst. *Ceramics International* **2014**, *40*, 16455-16463.
8. Han, Z.; Wang, Y.; Yang, Y.; Li, L.; Yang, Z.; Han, M. High-performance SOFCs with Impregnated Sr₂Fe_{1.5}Mo_{0.5}O_{6-δ} Anodes Toward Sulfur Resistance. *Journal of Alloy and Compound* **2017**, *703*, 258-263.
9. Yamamoto, O. Solid Oxide Fuel Cells: Fundamental Aspects and Prospects. *Electrochimica Acta* **2000**, *45* (15-16), 2423-2435.
10. Badwal, S.P.S.; Foger, K. Solid Oxide Electrolyte Fuel Cell Review. *Ceramic International* **1996**, *22*, 257-265.
11. Ormerod, M.R. Solid Oxide Fuel Cells. *Chemical Society Reviews* **2003**, *32*, 17-28.

12. Costamagna, P.; Costa, P.; Antonucci, V. Micro-modelling of Solid Oxide Fuel Cell Electrode. *Electrochimica Acta* **1998**, *43* (3-4), 375-394.
13. Stambouli, A.B.; Traversa, E. Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs): A Review of an Environmentally Clean and Efficient Source of Energy. *Renewable and Sustainable Energy Review* **2002**, *6* (5), 433-455.
14. Franso, L.M.; Arico, A.S. 9-Ceramic Membranes for Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs): State of The Art and Perspectives. *Membranes for Clean and Renewable Power Applications* **2014**, 237-265.
15. Singhal, S.C. Advances in Solid Oxide Fuel Cell Technology. *Solid State Ionics* **2000**, *135* (1-4), 305-313.
16. Singhal, S.C. Solid Oxide Fuel Cells for Stationary, Mobile, and Military Applications. *Solid State Ionic* **2002**, *153*, 405-410.
17. Johnson, M.; Lemmens, P. Crystallography and Chemistry of Perovskite. *Handbook of Magnetism and advanced magnetic material* **2017**.
18. Chroneos, A.; Vovk, R.V.; Goulatis, I.L. Oxygen Transport in Perovskite and Related Oxide: A Brief Review. *Journal of Alloy and Compound* **2010**, *494*, 190-195.
19. Li, H.; Zhao, Y.; Wang, Y.; Li, Y. $\text{Sr}_2\text{Fe}_{2-x}\text{Mo}_x\text{O}_{6-\delta}$ Perovskite as An Anode in Solid Oxide Fuel Cell: Effect of Substitution Ratio. *Catalysis Today* **2016**, *259*, 417-422.
20. Richter, J.; Holtappels, P.; Graule, T.; Nakamura, T.; Gauckler, L.J. Materials Design for Perovskite SOFC Cathodes. *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly* **2009**, *140* (9), 985-999.
21. Bard, A.J.; Denuaut, G.; Lee, C.; Mandler, D.; Wipf, O.D. Scanning Electrochemical Microscopy: A New Technique for the Characterization and Modification of Surfaces. *Account of Chemical Research* **1990**, *23*, 357-363.
22. Molday, S.R.; Maher, P.A. Review of Cell Surface Marker and Labelling Techniques for Scanning Electron Microscopy. *The Histochemical Journal* **1980**, *12* (3), 273-315.
23. Nechache, A. Diagnosis of Cathode-supported Solid Oxide Electrolysis Cell by Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Electrochimica Acta* **2016**, *210*, 596-605.
24. Huang, Q.A.; Hui, R.; Wang, B.; Zhang, J. A Review of AC Impedance Modeling and Validation in SOFC Diagnosis. *Eletrochimica Acta* **2007**, *52* (28), 8144-8164.

ประวัติผู้วิจัย

นางสาวนวรรตน์ คำศรี เกิดเมื่อวันที่ 14 เดือนมีนาคม พ.ศ.2537 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายสามัญ แผนการเรียนการสอนคณิตศาสตร์-วิทยาศาสตร์ จากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อปีการศึกษา 2555 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้หลังสำเร็จการศึกษาคือ บ้านเลขที่ 8 ซอยรามคำแหง 118 แยก 55 เขตสะพานสูง แขวงสะพานสูง จังหวัดกรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10240 อีเมล Nawarat.Khs@gmail.com

