

การสังเคราะห์ LSM ด้วยวิธีไฮล-เขต สำหรับเคลือบผิวแผ่นกั้นเขตต์เหล็กกล้าไร้สนิม  
ป้องกันการร่อนของโครเมียมในเขตต์ข้อต่อเชิงคอกไซด์แข็ง



ปริญญาวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ปีการศึกษา ๒๕๕๖

**การสังเคราะห์ LSM ด้วยวิธีโซล-เจล สำหรับเคลือบผิวแผ่นกั้นเซลล์เหล็กกล้าไร้สนิม  
ป้องกันการระเหยของโครเมียมในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง**



**ชนากานต์ คุณานพันธ์ชัย  
พรทิพย์ วงศ์จินดา**

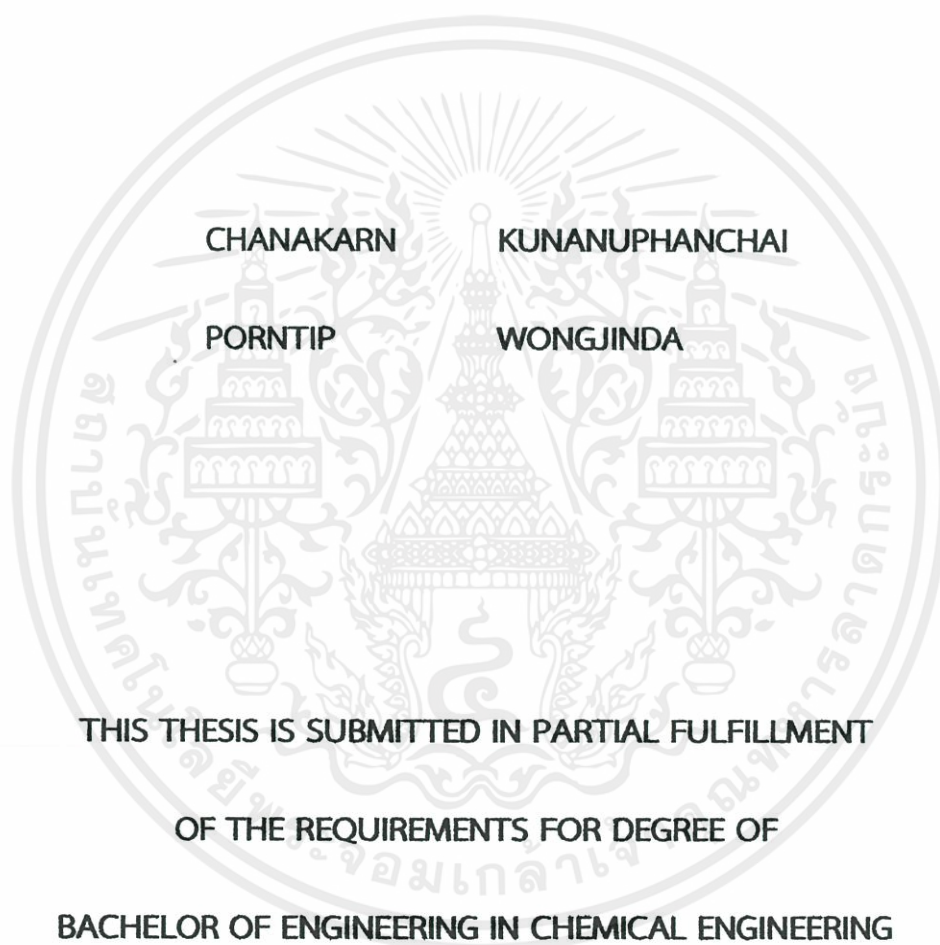
**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ปีการศึกษา 2556**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LSM Sol-gel Synthesis for Stainless Steel Interconnector Coating for  
Protecting Chromium Vaporization in SOFC**



**CHANAKARN**

**KUNANUPHANCHAI**

**PORNTIP**

**WONGJINDA**

**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT**

**OF THE REQUIREMENTS FOR DEGREE OF**

**BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**ACADEMIC YEAR 2013**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การสังเคราะห์ LSM ด้วยวิธีโซล-เจล สำหรับเคลือบผิวแผ่นกั้นเซลล์เหล็กกล้า  
ไร้สนิม ป้องกันการระเหยของโครเมียมในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

โดย นางสาวชนากานต์ คุณานุพันธ์ชัย  
นางสาวพรทิพย์ วงศ์จินดา

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วลัยรัตน์ จันทระอัมพร  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

วลัยรัตน์ จันทระอัมพร

ประธานกรรมการ

(ดร.วลัยรัตน์ จันทระอัมพร)

รศ.ดร.ดวงกมล วัฒนธนา

กรรมการ

(รศ.ดร.ดวงกมล วัฒนธนา)

ดร.ณัฐพร พิชชรนโชติ

กรรมการ

(ดร.ณัฐพร พิชชรนโชติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>ปริญญานิพนธ์เรื่อง</b>	การสังเคราะห์ LSM ด้วยวิธีโซล-เจล สำหรับเคลือบผิวแผ่นกั้นเซลล์เหล็กกล้าไร้สนิม ป้องกันการระเหยของโครเมียมในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	
<b>โดย</b>	นางสาวชนากานต์	คุณานุพันธ์ชัย
	นางสาวพรทิพย์	วงศ์จินดา
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ดร.वलัยรัตน์	จันทร์อัมพร
<b>ปริญญา</b>	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
<b>สาขาวิชา</b>	วิศวกรรมเคมี	
<b>ปีการศึกษา</b>	2556	

### บทคัดย่อ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell: SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพทางพลังงานสูงและกำลังได้รับการพัฒนาอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ปัญหาหลักอย่างหนึ่งของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ แผ่นกั้นเซลล์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการเสื่อมสภาพและทำให้อายุการใช้งานของแผ่นกั้นเซลล์ลดลง เนื่องจากเกิดการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง ในงานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) ที่เตรียมขึ้นโดยวิธีโซล-เจล (Sol-gel) ที่สภาวะอุณหภูมิ 80 °C โดยทำการปั่นกวนจนกระทั่งโซลเปลี่ยนเป็นเจลที่มีสีเหลืองใส ไม่มีตะกอน จากนั้นนำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800-900 °C เป็นเวลา 6 - 9 ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทคนิค X-ray diffraction (XRD) พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแคลไซน์จะแปรผันตรงกับค่า Intensity จากนั้นทำการศึกษาการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip-coating) โดยศึกษาผลของอุณหภูมิให้ความร้อนก่อนการแคลไซน์ที่ 400 - 500 °C และผลของการเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดไม่ขัดพื้นผิว ขัดพื้นผิว และกัดกรดพื้นผิว โดยทั้งชิ้นงานไว้ให้เย็นก่อนทำการจุ่มเคลือบทุก 5 นาที จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิให้ความร้อนก่อนการแคลไซน์ที่ 500 °C กับเหล็กชนิดไม่ขัดพื้นผิว สารประกอบของ LSM สามารถเคลือบติดผิวได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Report Title</b>	LSM sol-gel Synthesis for stainless steel Interconnector coating for protecting Chromium Vaporization in SOFC	
<b>By</b>	Miss Chanakam	Kunanuphanchai
	Miss Porntip	Wongjinda
<b>Advisor</b>	Dr.Walairat	Chandra-ambhorn
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Chemical Engineering	
<b>Year</b>	2013	

### Abstract

Solid oxide fuel cell (SOFC) is a kind of high efficiency fuel cells that have been widely developed in present. However, the main problem is interconnector made by stainless steel that had degenerated and life time decreased due to chromia evaporated from Chromia-scale when is on high temperature. This research had learn to "Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) Synthesis" which arranged by "Sol Gel" at 80 °c as spinning sol until being yellow gel and no sediment. Then is calcining at 800-900 °c on 6-9 hours. The X-ray Diffraction Analysis has found to the time and temperature of calcined which will be varied with intensity. Then have heading to stainless steel AISI 441 learned with Dip-coating as the result of 400-500 °c in advance to calcined also Non-Scrubbed, Scrubbed and Corrosive Surface Stainless Steel as cold dropped on 5 minute each to coating. The Scanning electron microscope analysis found 500°c operated to calcined with Non-Scrubbed Stainless Steel which is shown by LSM compound could be the best coated.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือดังนี้

ดร.วลัยรัตน์ จันทรัมย์พร อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำชี้แนะ คำปรึกษา ความรู้ ประสบการณ์ในการทำงาน พร้อมทั้งความช่วยเหลือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่คอยให้ความรู้ และความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เจ้าหน้าที่ห้องธุรการและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ช่วยจัดการเอกสาร เอื้ออำนวยสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือ ในการเตรียมชิ้นงานสำหรับการดำเนินงานวิจัยนี้

เจ้าหน้าที่วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้ออำนวยในส่วนของเครื่องมือวิเคราะห์ ผลการตรวจวัดและข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัยนี้

พี่และเพื่อนในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจให้การทำปริญญาานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดาและทุกคนในครอบครัวที่ให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจและการสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญตาราง	vi
สารบัญรูปภาพ	vii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells; FCs)	3
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cells; SOFCs)	4
2.3 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	6
2.4 แผ่นกั้นเซลล์ (Interconnectors)	8
2.5 การระเหยของโครเมียม (Cr vaporization)	9
2.6 เทคโนโลยีการเคลือบผิว	10
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	15
3.1 การทดลองสังเคราะห์ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) ด้วยวิธีโซล-เจล (Sol-gel)	15
3.2 การทดลองเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI441 Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) โซล-เจล ด้วยการจุ่มเคลือบ (Dip-coating)	16
3.3 วิธีการทดลอง	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

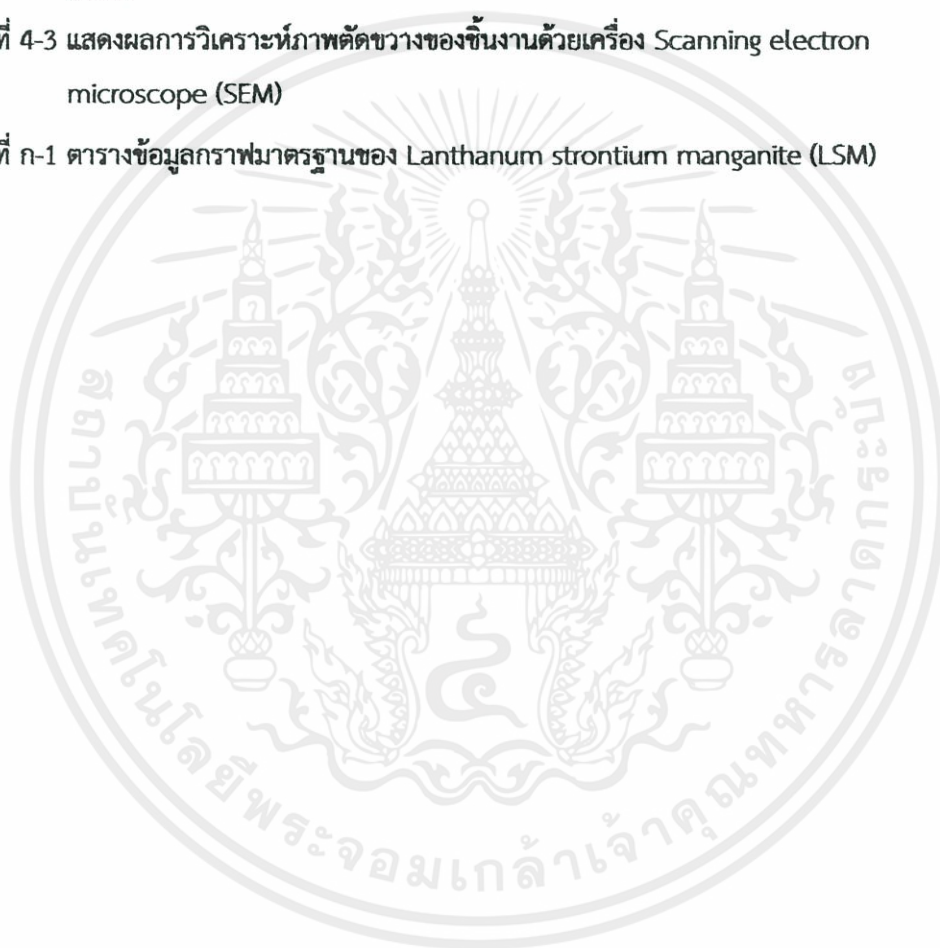
## สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	20
4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบของ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ :LSM) โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD)	20
4.2 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 441 ด้วย Lanthanum strontium manganite (LSM) โดยวิธี Sol-gel และการจุ่มเคลือบ	25
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	35
5.1 สรุปผลการวิจัย	35
5.2 วิจารณ์การทดลอง	37
5.3 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ	40
ภาคผนวก ข รูปภาพการทดลอง	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หัวข้อ	หน้า
ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของ AISI 441	9
ตารางที่ 3-1 แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา	18
ตารางที่ 4-1 แสดงการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 ด้วย Sol-gel โดยวิธี จุ่มเคลือบ	25
ตารางที่ 4-2 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)	30
ตารางที่ 4-3 แสดงผลการวิเคราะห์ภาพตัดขวางของชิ้นงานด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)	32
ตารางที่ ก-1 ตารางข้อมูลกราฟมาตรฐานของ Lanthanum strontium manganite (LSM)	40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

หัวข้อ	หน้า
รูปที่ 2-1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	5
รูปที่ 2-2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบท่อ (Tubular SOFCs)	6
รูปที่ 2-3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบ (Planar SOFCs)	7
รูปที่ 2-4 การเปลี่ยนสถานะจาก โซล (Sol) เป็น เจล (Gel)	11
รูปที่ 2-5 การเคลือบผิวโดยวิธีการจุ่มเคลือบ (Dip-coating)	11
รูปที่ 3-1 การเตรียม LSM Sol - gel	17
รูปที่ 3-3 แสดงกระบวนการทดลองเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) Sol-gel ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip-coating)	19
รูปที่ 4-1 แสดงพิกษมาตรฐาน ของ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM)	21
รูปที่ 4-2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก X-ray diffraction (XRD) ของ $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ (LSM) แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ 1) 900 °C 6 ชั่วโมง 2) 800 °C 8 ชั่วโมง 3) 800 °C 6 ชั่วโมง	22
รูปที่ 4-3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก X-ray diffraction (XRD) ของ $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ (LSM) แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ 1) 850 °C 6 ชั่วโมง 2) 850 °C 8 ชั่วโมง 3) 900 °C 9 ชั่วโมง 4) 850 °C 9 ชั่วโมง	23
รูปที่ 4-4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก X-ray diffraction (XRD) ของ $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ (LSM) แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C 6 ชั่วโมง	24
รูปที่ 4-5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก X-ray diffraction (XRD) $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ (LSM) สภาวะหลังการจุ่มเคลือบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 °C ทั้งไว้ให้เย็นก่อนจุ่มเคลือบอีกครั้งทุก 5 นาที แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C เวลา 2 ชั่วโมง	27
รูปที่ 4-7 แสดงผลการวิเคราะห์ ก) พื้นผิว ข) ภาพตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 ก่อนการเคลือบผิวด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
รูปที่ ข-1 ชุดการทดลองการสังเคราะห์ Lanthanum strontium manganite (LSM) ด้วยวิธี Sol-gel	41
รูปที่ ข-2 Sol-gel ที่สังเคราะห์ได้	41
รูปที่ ข-3 เตาเผา	42
รูปที่ ข-4 ผง LSM ที่ผ่านการแคลไซน์	42
รูปที่ ข-5 การเคลือบผิวชิ้นงานโดยวิธีจุ่มเคลือบ	42
รูปที่ ข-6 เครื่อง Scanning electron microscopy (SEM)	43
รูปที่ ข-7 แผ่นโลหะ AISI 441 ก่อนและหลังการเคลือบผิว	43
รูปที่ ข-8 แสดงลำดับการเคลือบผิวชิ้นงาน	44
รูปที่ ข-9 แสดงผลการวิเคราะห์ SEM ของพื้นผิวโลหะ AISI 441 ก่อนการเคลือบผิว	44
รูปที่ ข-10 แสดงผลการวิเคราะห์ SEM ของภาพตัดขวางโลหะ AISI 441 ก่อนการเคลือบผิว	45
รูปที่ ข-11 แสดงผลจากการวิเคราะห์ SEM ของตัวอย่างชิ้นงานที่เคลือบไม่ติด	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัญหาด้านการขาดแคลนพลังงานและมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาสำคัญที่ทั่วโลกกำลังให้ความสนใจ เนื่องจากปัจจุบันพลังงานที่ได้จากปิโตรเลียมมีปริมาณลดน้อยลง แต่มนุษยโลกยังคงมีความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งพลังงานจากปิโตรเลียมยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมทางด้านมลพิษ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) นักวิจัยจึงมีการคิดค้นและพัฒนาพลังงานใหม่ๆ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนพลังงานจากปิโตรเลียมที่มีประสิทธิภาพและเหมาะแก่การนำไปใช้งาน หนึ่งในพลังงานทางเลือกที่เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาแหล่งพลังงานซึ่งสามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมคือ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells)

เซลล์เชื้อเพลิง เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานทางเคมีให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้า โดยใช้หลักการไฟฟ้าเคมี ซึ่งพลังงานที่ผลิตจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อม อีกทั้งเป็นพลังงานยั่งยืนที่สามารถทดแทนพลังงานจากปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติได้ เซลล์เชื้อเพลิงที่กำลังได้รับความสนใจมากที่สุดในขณะนี้คือ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cells: SOFCs) ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูง นำไฟฟ้าได้ดี เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะมีแผ่นกั้นเซลล์ (Interconnector) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์เข้าด้วยกันแบบอนุกรมได้เป็นชุดเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell stack)

ปัญหาหลักที่พบในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง เมื่อทำงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงคือ เกิดการระเหยของโครเมียมจากชั้นสเกลโครเมียมบนพื้นผิวของแผ่นกั้นเซลล์ที่เป็นโลหะผสมซึ่งในชั้นสเกลโครเมียมเป็นชั้นที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นกั้นเซลล์ ถ้าหากมีการสูญเสียชั้นสเกลโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์จะเกิดการสึกกร่อนได้ง่ายขึ้น และยังส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นกั้นเซลล์แยลง เซลล์เชื้อเพลิงจึงมีอายุการใช้งานสั้นลง จากปัญหาดังกล่าวเราจึงศึกษาวิธีการระเหยของโครเมียมจากชั้นสเกลโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์ซึ่งเป็นสิ่งที่ช่วยยืดอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยงานวิจัยนี้ศึกษาหาวิธีการสังเคราะห์และวิธีเคลือบผิวแผ่นกั้นเซลล์ด้วย Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล (Sol-gel)

มาช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์และวิธีเคลือบผิวแผ่นกั้นเซลล์ด้วย Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) ด้วยวิธีโซล-เจล (Sol-gel) ในสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 เพื่อป้องกันการระเหยของโครเมียมจากแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการสังเคราะห์ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ :LSM) โดยวิธีโซล-เจล (Sol-gel) ปั่นกวนต่อเนืองที่อุณหภูมิ 80 °C
2. ศึกษาสภาวะที่ใช้ในการเคลือบผิวโดยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip-coating) ที่เหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441

## 1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1. สามารถนำข้อมูลจากการทดลอง ไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงวัสดุที่ใช้ทำแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง เพื่อเพิ่มความทนทานและช่วยยืดอายุการใช้งาน
2. ช่วยส่งเสริมการใช้พลังงานทางเลือกที่เป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สำหรับใช้ในยานอวกาศอะพอลโล เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีข้อได้เปรียบตรงที่มีอัตราส่วนของพลังงานต่อน้ำหนักในเกณฑ์ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการใช้งานด้านอวกาศ อย่างไรก็ตามการประยุกต์สำหรับงานภาคพื้นดิน ยังมีปัญหาจากการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออน(Hydroxyl ion) ในสารอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงตามไปด้วย

3. Phosphoric - acid fuel cell (PAFC) เป็นระบบที่มีแนวโน้มที่จะถูกนำไปใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าแบบ PEMFC แต่เนื่องจากสารอิเล็กโทรไลต์มีฤทธิ์เป็นกรด อุปกรณ์ภายในเซลล์จึงต้องสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี
4. Solid oxide fuel cell (SOFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้สารอิเล็กโทรไลต์แข็ง ขั้วไฟฟ้าและส่วนประกอบอื่นๆภายในสามารถทนความร้อนสูงได้ดี เป็นระบบที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่ เนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มาก มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพแต่ก็มีข้อดีตรงที่ว่า ใช้น้ำอุณหภูมิสูงที่เป็นผลผลิตจากกระบวนการนี้ สามารถนำไปใช้ปั่นกังหันก๊าซต่อได้ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก
5. Molten carbonate fuel cell (MCFC) นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ สำหรับโรงไฟฟ้า เนื่องจากมีสภาวะทำงานที่อุณหภูมิสูง จึงสามารถนำความร้อนจากเซลล์ไปใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเสริม ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันความร้อน หรือใช้ทำความอบอุ่นในบ้านเรือนได้ด้วย และเนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า SOFC ทำให้ไม่ต้องใช้วัสดุพิเศษจึงทำให้ระบบนี้ใช้งบประมาณที่น้อยกว่า

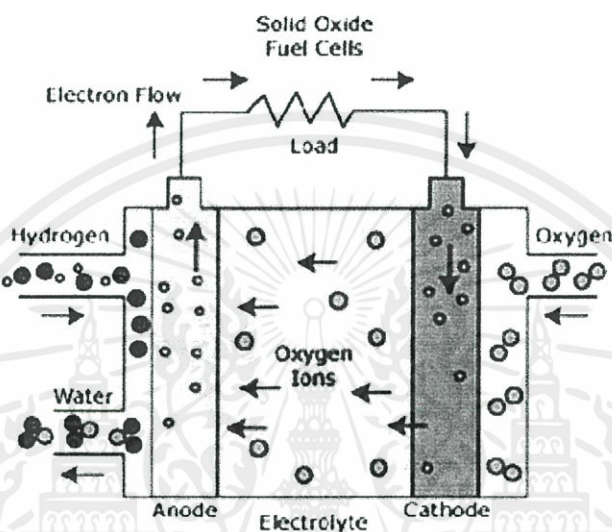
## 2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cells: SOFCs) <sup>[2, 3, 4, 6]</sup>

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงประเภทหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ในการเปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าและกำลังได้รับการพัฒนาอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมีอุณหภูมิทำงานอยู่ในช่วง 600 – 1,000 °C ทำให้การออกแบบ การดำเนินงาน และการควบคุมเซลล์เชื้อเพลิงมักมีความซับซ้อน อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นวัสดุประเภทเซรามิก ซึ่งประโยชน์ของการใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง คือสามารถขจัดปัญหาการรั่วซึมของ อิเล็กโทรไลต์เหลวออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิง และยังช่วยลดปัญหาการกัดกร่อนซึ่งถือเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิเล็กโทรไลต์เหลว คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ทำขั้วต้องมี

ความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง โดยวัสดุที่เหมาะสมต่อการนำมาทำขั้วแคโทด (Cathode) จะต้องมีกระบวนการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำอิเล็กตรอนและเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ได้ดี เช่น Lanthanum strontium manganite (LSM) ส่วนวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาทำขั้วแอโนด (Anode) ต้องเป็นวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้า ด้านทานสภาพการกัดกร่อน และสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ได้ดี เช่น Nickel cermet ( $\text{Ni-ZrO}_2$ )

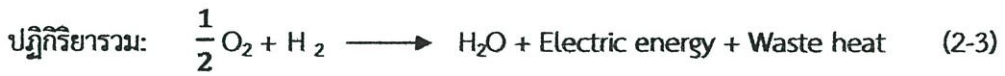
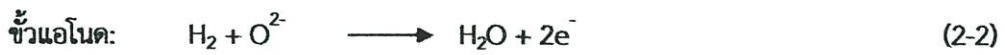
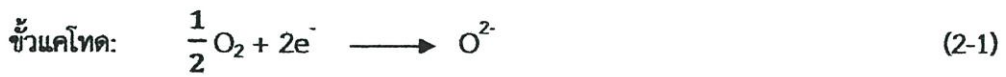
### หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง



รูปที่ 2-1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง [16]

ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ได้แก่ ขั้วแคโทด ขั้วแอโนด สารละลายอิเล็กโทรไลต์และแผ่นกั้นเซลล์ หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแสดงดังรูป 2-1 โดยการทำงานจะมีการป้อนแก๊สออกซิเจนเข้าที่ขั้วแคโทด แก๊สออกซิเจนจะรับอิเล็กตรอนจากเซลล์ไฟฟ้าภายนอกเกิดเป็นออกไซด์ไอออน ออกไซด์ไอออนนี้จะเคลื่อนที่ผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแอโนด ที่ขั้วแอโนดจะมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนเข้าไป เมื่อแก๊สไฮโดรเจนนี้ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ไอออนจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและอิเล็กตรอนเกิดขึ้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ได้ต่อไป อิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาจะมีการป้อนคืนกลับขั้วแคโทดอีกครั้ง เพื่อทำปฏิกิริยาเป็นรอบๆ ต่อไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า Electrochemical reaction โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

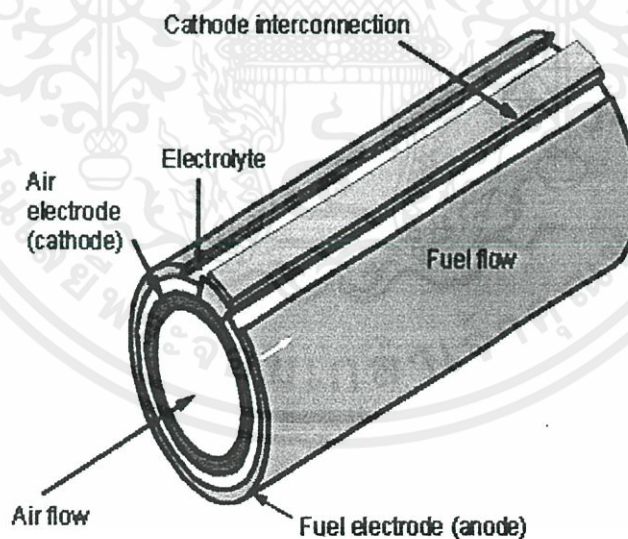


## 2.3 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง <sup>[5, 7, 8]</sup>

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เซลล์แบบท่อ (Tubular cells) และเซลล์แบบระนาบ (Planar cells)

### 2.3.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบท่อ (Tubular SOFCs)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบท่อสามารถออกแบบได้ง่าย ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย และการอุดรอยต่อของเซลล์ (Sealing arrangement) ทำได้ง่าย แต่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบท่อนี้ การไหลของกระแสมีความต้านทานสูง เนื่องจากต้องไหลผ่านท่อในระยะยาว ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง และมีกระบวนการผลิตค่อนข้างซับซ้อน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบท่อมักมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกยาว ดังรูป 2-2

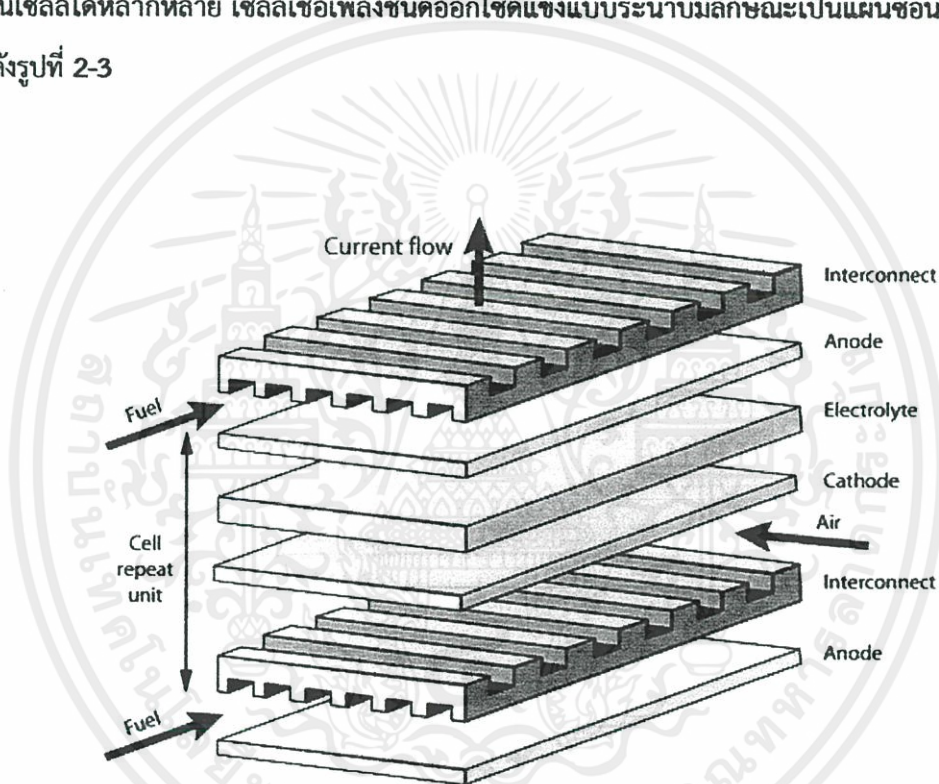


รูปที่ 2-2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบท่อ (Tubular SOFCs) <sup>[17]</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบ (Planar SOFCs)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบได้รับการพัฒนามาหลังจากเซลล์แบบท่อ สามารถแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในเซลล์แบบท่อได้ กล่าวคือ การไหลของกระแสในเซลล์แบบระนาบนี้มีความต้านทานการไหลที่ต่ำกว่า เนื่องจากเซลล์แบบระนาบมีระยะทางการไหลของกระแสที่สั้นกว่าในกรณีของเซลล์แบบท่อ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงกว่า อีกทั้งกระบวนการผลิตทำได้ง่าย และมีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าการผลิตเซลล์แบบท่อ อีกทั้งเทคโนโลยีการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบ สามารถยืดหยุ่นได้กว่าแบบท่อ และสามารถเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรไลต์และแผ่นกั้นเซลล์ได้หลากหลาย เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบมีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนกันเป็นชั้นๆ ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบ (Planar SOFCs) [18]

ด้วยข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบที่ได้กล่าวในข้างต้น ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลากหลายสาขา ในการแก้ไขและพัฒนา เพื่อให้เซลล์มีความเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด ปัญหาหลักที่พบในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบในปัจจุบันมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การแก้ปัญหาการกัดกร่อนของแผ่นกั้นเซลล์ที่เป็นโลหะ (Metallic interconnect)
- การพัฒนาเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้เป็นตัวประสาน (Sealing)
- การปรับปรุงความเค้นเชิงกลภายในเซลล์

## 2.4 แผ่นกั้นเซลล์ (Interconnector) <sup>[3, 5, 7]</sup>

แผ่นกั้นเซลล์เป็นวัสดุที่ใช้เชื่อมต่อเซลล์เดี่ยวแต่ละเซลล์แบบอนุกรม ให้ได้เป็นชุดเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น หน้าที่สำคัญของแผ่นกั้นเซลล์คือ นำกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เดี่ยวแต่ละเซลล์ไปสู่วงจรภายนอกเซลล์ และช่วยแยกกระแสการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงกับอากาศระหว่างเซลล์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดตามลำดับ คุณสมบัติของแผ่นกั้นเซลล์ที่ดี สามารถสรุปได้ดังนี้

- มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและนำความร้อนดี
- มีค่าการนำอิเล็กตรอนสูง แต่ค่าการนำไอออนต่ำ
- มีความต้านทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี
- แก๊สไม่สามารถแพร่ผ่านได้
- มีความแข็งแรงเชิงกลสูง

แผ่นกั้นเซลล์ในระยะแรกทำจากวัสดุประเภทเซรามิก เช่น  $\text{CoCr}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LaCrO}_3$  และ  $\text{YCrO}_3$  เนื่องจากการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง มีอุณหภูมิในการทำงานที่สูงประมาณ 900 – 1,000 °C แต่ระยะหลังมีการพัฒนาให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถทำงานที่อุณหภูมิต่ำลงได้ประมาณ 600- 850 °C ปัจจุบันจึงนิยมใช้วัสดุประเภทโลหะผสมเป็นวัสดุที่นำมาใช้ทำแผ่นกั้นเซลล์ ข้อดีของแผ่นกั้นเซลล์ที่ทำจากโลหะผสม คือ

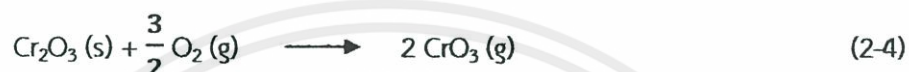
- สามารถนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดีกว่า
- กระบวนการขึ้นรูปทำได้ง่าย มีความแข็งแรงทนทาน
- ต้นทุนของวัสดุและต้นทุนในการขึ้นรูปต่ำกว่า

แผ่นกั้นเซลล์ที่ทำจากโลหะผสม เมื่อเวลาผ่านไป จะมีการเสื่อมสภาพของแผ่นกั้นเซลล์เนื่องจากการสูญเสียโครเมียมออกจากพื้นผิวของโลหะผสม ซึ่งสามารถช่วยลดการระเหยของโครเมียมนี้ได้ด้วย

เอกสารวิธีการเคลือบผิวของแผ่นกั้นเซลล์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การระเหยของโครเมียม (Chromium vaporization) <sup>[3, 6, 9, 10]</sup>

การเกิดสเกลโครเมียม (Chromia scale: Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) จะช่วยป้องกันปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับผิวหน้าของโลหะ จึงเป็นการเพิ่มความต้านทานการสึกกร่อนของโลหะได้ แต่การทำงานของแผ่นกั้นเซลล์ต้องมีด้านที่สัมผัสกับขั้วแคโทดซึ่งทำงานที่อุณหภูมิสูง และมีการสัมผัสกับอากาศอยู่ตลอดเวลา โดยแก๊สออกซิเจนสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับชั้นสเกลโครเมียม ส่งผลให้เกิดการระเหยของโครเมียมไตรออกไซด์ (CrO<sub>3</sub>) ระบายออกสู่ภายนอก ทำให้แผ่นกั้นเซลล์นั้นเกิดการเสื่อมสภาพ ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ (2-4) และ (2-5)



วัสดุที่สามารถพบการเกิดสเกลโครเมียมได้คือ โลหะผสมที่มีองค์ประกอบของโครเมียมมากกว่า 12% ตัวอย่างของโลหะผสมที่สามารถเกิดสเกลโครเมียมได้ แสดงองค์ประกอบดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของ AISI 441

Element	Cr	C	Mn	Si	Al	Ti	Nb	Mo	Fe
AISI 441	17.83	0.01	0.24	0.60	0.006	0.13	0.55	0.01	Balance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 เทคโนโลยีการเคลือบผิว

การเคลือบผิว (Coating) คือ กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มบางคลุมพื้นผิวของวัตถุ นอกจากจะทำให้ชิ้นงานมีความสวยงามแล้วยังเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นผิวได้ เช่น ป้องกันการกัดกร่อน เพิ่มความต้านทานการสึกหรอหรือความต้านทานรอยขีดข่วนให้กับชิ้นงาน ชิ้นงานในงานอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภทรวมถึงชิ้นงานที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวันส่วนใหญ่มักผ่านการเคลือบผิวมาแล้วทั้งสิ้น กระบวนการเคลือบผิวมีหลาย โดยจะขอยกตัวอย่างวิธีที่กำลังได้รับความสนใจและเกี่ยวข้องกับงานวิจัย ดังนี้

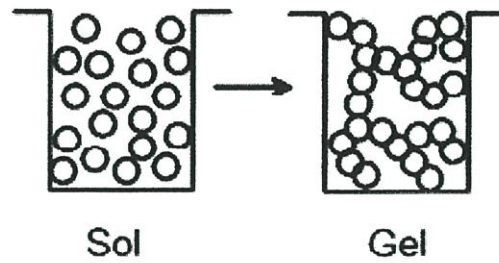
### 2.6.1 Sol-gel <sup>[13, 19, 20]</sup>

Sol-gel เป็นเทคโนโลยีในการเตรียมสารเคลือบผิว ที่อาศัยการเกาะตัวกันของสารในระดับโมโนเมอร์ โดยการเตรียมสารละลายไอออนโลหะในตัวทำละลายที่เหมาะสม เช่น กรดซิตริก (Citric acid) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัว Chelating agent ร่วมกับ Ethylene glycol เป็นตัวทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ เป็นต้น

โซล (Sol) เป็นสารประกอบประเภทคอลลอยด์ ซึ่งมีอนุภาคแขวนลอยอยู่ในสารละลายทำให้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โซลจะถูกนำไปให้ความร้อนออกไปพร้อมๆ กับการปั่นกวนเพื่อกำจัดของเหลวออกไป ทำให้เกิดเป็น เจล (Gel) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาวขึ้นเมื่อเทียบกับอนุภาคคอลลอยด์ Sol-gel จึงเป็นเทคนิคที่เปลี่ยนจาก Sol เป็น Gel ที่สามารถนำไปเคลือบผิวชิ้นงานที่ต้องการได้ นิยมใช้ร่วมกับเทคโนโลยีการเคลือบผิววิธีต่างๆ เช่น Dip-coating, Spraying, Spin coating เป็นต้น

ข้อดีของการเคลือบผิวด้วยวิธีนี้จะได้ชั้นเคลือบที่มีความหนาแน่นสูง สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดี สามารถเคลือบผิวชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ แต่การนำไปใช้งานโดยตรงทำได้น้อย ต้องใช้วิธีอื่นร่วมด้วยดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น วิธี Sol-gel เป็นเทคโนโลยีการเคลือบผิวที่กำลังได้รับความสนใจและพัฒนาอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน สามารถทำได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรม

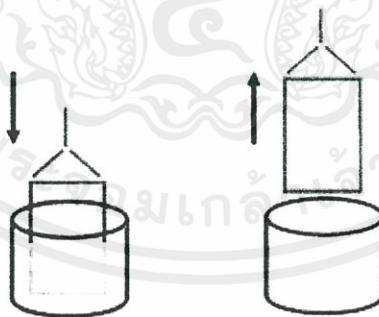
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-4 การเปลี่ยนสถานะจาก โซล (Sol) เป็น เจล (Gel) <sup>[21]</sup>

### 2.6.2 Dip-coating <sup>[13, 14, 20]</sup>

การจุ่มเคลือบ (Dip-coating) เป็นเทคโนโลยีการเคลือบผิวที่นำชิ้นงานมาผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง นิยมใช้ร่วมกับวิธี Sol-gel ทำได้โดยจุ่มชิ้นงานลงในโซลแล้วค่อยๆ ดึงชิ้นงานขึ้น ซึ่งความเร็วในการดึงจะมีผลต่อความหนาของฟิล์ม โดยสามารถควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มได้ โดยการทำให้ช้าหากยังไม่ได้ความหนาของชั้นฟิล์มที่ต้องการ แต่หากดึงชิ้นงานช้าเกินไปจะทำให้ได้ความหนาของชั้นฟิล์มไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากส่วนบนของชิ้นงานที่ดึงขึ้นก่อนจะมีความหนาน้อยกว่าส่วนล่างของชิ้นงาน เมื่อได้ความหนาของชั้นฟิล์มที่ต้องการแล้ว จึงนำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดหลอมละลายของโลหะที่นำมาเคลือบอีกครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าสารเคลือบที่ติดอยู่บนชิ้นงานนั้นหลอมละลายเคลือบผิวชิ้นงานอย่างสมบูรณ์ ข้อดีของการเคลือบผิวด้วยวิธีนี้จะสามารถป้องกันการกัดกร่อนที่ผิวของชิ้นงานได้ดี เนื่องจากมีการยึดติดของสารเคลือบผิวบนชิ้นงานได้ดี



รูปที่ 2-5 การเคลือบผิวโดยวิธีการจุ่มเคลือบ (Dip-coating) <sup>[22]</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 การระเหยของโครเมียมจากอัลลอยเหล็ก-โครเมียมที่เคลือบและไม่เคลือบผิว ณ อุณหภูมิ 1,073 เคลวิน <sup>[9]</sup>

Hedeto Kurokawa และคณะ ได้ทำการศึกษาการระเหยของโครเมียมจากปฏิกิริยาออกซิเดชันบน Ferritic stainless steel ส่งผลให้เซลล์มีการเสื่อมลง โดยทำการศึกษาการระเหยของโครเมียมทั้งที่มีการเคลือบและไม่เคลือบผิว ที่อุณหภูมิ 1,073 °K โดยจะทำการเคลือบด้วยวิธีการสเปรย์ และการจุ่มเคลือบ พบว่าการเคลือบด้วย Lanthanum strontium manganese oxide (LSM:  $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ ), Lanthanum strontium cobalt iron oxide (LSCF:  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_3$ ) และ Manganese cobalt oxide (MCO:  $\text{MnCo}_2\text{O}_4$ ) ที่เตรียมจากผงขนาดเล็กกว่าไมครอน สามารถช่วยลดการระเหยของโครเมียมได้ โดยมีפקเตอร์เท่ากับ 21 ถึง 40 การเคลือบด้วย Manganese cobalt oxide และ Lanthanum strontium chromium oxide ( $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CrO}_3$ ) ที่เตรียมโดยการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของ Glycine nitrate สามารถลดการระเหยของโครเมียมได้ โดยมีפקเตอร์เท่ากับ 2 ถึง 3 เท่านั้น เนื่องจากชั้นเคลือบมีรูพรุน ชั้นเคลือบแต่ละชนิดอาจมีפקเตอร์ที่แตกต่างกันไปแต่ก็สามารถลดการระเหยของโครเมียมได้

### 2.7.2 โครงสร้างและคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของชั้นฟิล์ม $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ ที่สังเคราะห์โดยวิธี Sol-gel <sup>[11]</sup>

Xinde Zhu และคณะ ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของชั้นฟิล์ม  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  ที่สังเคราะห์โดยวิธี Sol-Gel โดยทำการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip-coating) พบว่าชั้นฟิล์มบางของ  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  (LSMO) ไม่สามารถเกิดได้ หากอุณหภูมิไม่ถึง 600 °C LSMO จะถูกเติมด้วยสารละลายฟลิโคเอเซอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เจลสามารถเกาะตัวได้ดีและป้องกันการรอยร้าวในชั้นฟิล์มระหว่างการเผา การวิเคราะห์โครงสร้างของพื้นผิวฟิล์มที่เตรียมขึ้น จะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของ LSMO 56.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสารละลายโซลเจล ส่งผลอย่างมากต่อโครงสร้างของชั้นฟิล์ม ผลการศึกษาพบว่าความต้านทานของฟิล์มจะมีค่าลดลงแปรผันตามระยะเวลาการใช้และปริมาณของ LSMO ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.3 การระเหยของโครเมียมจากเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งใช้เป็นแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์เชื้อเพลิง ชนิด ออกไซด์แข็ง<sup>[12]</sup>

Wichitra Wongpromrat และคณะ ได้ทำการศึกษาศึกษาการระเหยของโครเมียมออกจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 โดยจำลองสภาวะการปฏิบัติการให้เหมือนขั้วแคโทด แล้วทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ 2 ตัว คืออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนขึ้นผ่านชั้นงานและอุณหภูมิ ซึ่งจากการทดลองพบว่า ในช่วงอัตราการไหลเชิงเส้น 0.8 - 3.0 cm/s การระเหยของโครเมียมถูกจำกัดด้วยจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา สำหรับของอุณหภูมินั้นพบว่า การระเหยของโครเมียมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิปฏิบัติการสูง โดยจากการคำนวณพบว่า การระเหยของโครเมียมมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 34.07 kJ/mol จากงานวิจัยนี้เป็นการยืนยันว่า มีการระเหยของโครเมียมเกิดขึ้นกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 เช่นเดียวกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS 430 ดังนั้น ก่อนการนำเหล็กกล้าไร้สนิมไปใช้เป็นแผ่นกั้นเซลล์ ควรจะมีการนำเหล็กกล้าไร้สนิมไปเคลือบป้องกันการระเหยของโครเมียมก่อน ซึ่งจะต้องมีการศึกษาถึงชนิดของสารเคลือบและวิธีการเคลือบที่เหมาะสมต่อไป

### 2.7.4 การสังเคราะห์ชั้นฟิล์มบางของ $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ บนพื้นผิวของ เหล็ก-โครเมียม โดยวิธี Sol-gel และ Dip-coating<sup>[13]</sup>

Leandro da Conceicao และคณะ ได้ทำการศึกษาชั้นฟิล์มบางของ LSM (Lanthanum strontium manganite) ที่ถูกเตรียมขึ้นด้วยกระบวนการ Sol-gel และ Dip-coating บนพื้นผิวโลหะ (SS439-Cr 16.6%) เพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง Gel ถูกเตรียมขึ้นด้วยอัตราส่วนของสารอินทรีย์และเกลือของโลหะที่มีความเข้มข้นและความหนืดแตกต่างกัน โดยชั้นฟิล์มบางของ LSM จะเคลือบอยู่บนผิวหน้าของโลหะผสม แล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 600-1000 °C สามารถวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นฟิล์มบางและความเป็นผลึก ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) และ Scanning electron microscope (SEM) พบว่า ชั้นฟิล์มบางของ LSM ที่ถูกเตรียมขึ้นด้วยความหนืดของ Sol-gel ต่ำ จะสามารถเคลือบติดแน่นกับผิวโลหะผสมได้ดี โดยชั้นงานตัวอย่างถูกเตรียมขึ้นจาก Gel ที่มีความหนืด 50 mPa·s พบว่าสามารถเห็นชั้นเคลือบของ LSM ชัดเจน ปราศจากรอยแตกร้าว และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.5 $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ เคลือบโลหะผสม SS444 โดยกระบวนการจุ่มเคลือบ สำหรับโลหะเชื่อมต่อกันของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง<sup>[23]</sup>

Laurent Dessemond และคณะได้ทำการศึกษาเทคโนโลยี Sol-gel และการจุ่มเคลือบ (Dip-coating) ถูกนำมาใช้กับ การสังเคราะห์ชั้นฟิล์มบางที่มีรูพรุนของ  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  (LSM) เคลือบบนแผ่นโลหะผสม SS444 ชั้น LSM ถูกเผาในอากาศด้วยอุณหภูมิ 800 °C เวลา 2 ชั่วโมง โดยประสบความสำเร็จอย่างดีในการยึดติดกับพื้นผิว การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบ และการเพิ่มขึ้นของ  $\gamma$  Oxide ถูกวิเคราะห์โดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ประเมินค่า ASR (Area specific resistance) สำหรับการเคลือบผิว และไม่เคลือบผิว ระหว่างการเผาที่ระยะเวลาในอากาศที่ 800 °C เป็นเวลา 200 ชั่วโมง และระหว่าง 600 และ 900 °C การเพิ่มขึ้นของ oxide เปรียบเทียบกับ  $(\text{Cr,Mn})_3\text{O}_4$  spinel และ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ชัดเจนขึ้นสำหรับการเคลือบผิว และไม่เคลือบผิว พบว่าการเคลือบผิวโดย LSM นั้นทำให้โลหะผสมมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน มีค่า ASR (Area specific resistance) ต่ำ หลังจากการเผา ที่ 800 °C เวลา 200 ชั่วโมง ประสิทธิภาพของการเคลือบผิวของ LSM จะขึ้นกับความเสถียรของฟิล์มและการยึดติดบนโลหะผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การทดลองสังเคราะห์ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM)

##### ด้วยวิธีโซล-เจล (Sol-gel)

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็กไฟฟ้า พร้อมแท่งแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer and Magnetic Bar)
2. เครื่องชั่งน้ำหนัก
3. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร
4. กระจกตวง (Graduated cylinder) ขนาด 25 มิลลิลิตร
5. แท่งกวนคนสาร (Stirring Rod)
6. ช้อนตักสาร (Spatula)
7. โกร่งบดสาร (A mortar and pestle)
8. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD)
9. เตาเผา (Furnace)
10. ภาชนะหลอม (Crucible)

##### 3.1.2 สารเคมี

1. Lanthanum nitrate hexahydrate ( $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )
2. Strontium nitrate ( $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ )
3. Manganese nitrate tetrahydrate ( $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )
4. Citric acid (CA)
5. Ethylene glycol (EG)
6. น้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การทดลองเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) ด้วย Sol-gel โดยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip-coating)

#### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1. เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 441
2. เครื่อง Ultrasonic cleaner
3. ที่คีบ
4. ถังมือ
5. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร
6. เตาอบ (Oven)
7. เตาเผา (Furnace)
8. เตาหลอม (Crucible)
9. กระดาษทราย (Sandpaper) เบอร์ 240 และ เบอร์ 1000

#### 3.2.2 สารเคมี

1. Acetone
2. Hydrochloric acid เข้มข้น 37%wt

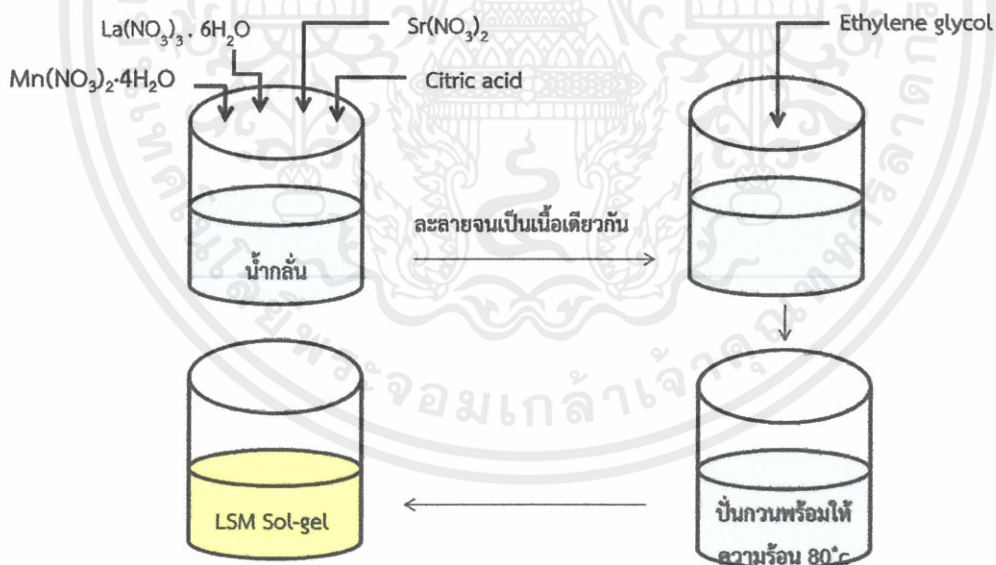
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM)

ด้วยวิธี Sol-gel

1. ชั่งแลนทานัมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต ( $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) 7.457 g, สตรอนเทียมไนเตรท( $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ) 0.905 g, แมงกานีส (II) ไนเตรทไฮเดรต ( $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) 5.409 g, กรดซิตริก 4.990 g ใส่ลงในบีกเกอร์
2. ละลายสารด้วยน้ำกลั่น โดยเติมลงไปทีละน้อย
3. เติมเอทิลีนไกลคอล 12 ml ลงในบีกเกอร์ ใช้แท่งแก้วคนสารจนกระทั่งได้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน
4. จากนั้นนำสารละลายที่ได้ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  พร้อมกับปั่นกวนโดยเครื่องปั่นกวนแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมแท่งแม่เหล็ก ปั่นกวนอย่างต่อเนื่องจนโซลกลายเป็นเจลที่มีลักษณะสีเหลืองใส ไม่มีตะกอน ดังรูปที่ 4-3



รูปที่ 3-1 การเตรียม LSM Sol - gel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตอนที่ 2 การเตรียมผง Lanthanum Strontium Manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM)

1. นำ Sol-gel ที่ได้จากตอนที่ 1. ใส่ใน Crucible เข้าเตาเผา
2. ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C เวลา 2 ชั่วโมง ระเหยตัวทำละลายในเจล (Gel) จากนั้นแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800-900 °C และเวลาแคลไซน์ 6-9 ชั่วโมง ดังตารางที่ 3-1 ทิ้งไว้ให้เย็นและนำออกจากเตาเผา จะได้ผง LSM

ตารางที่ 3-1 แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)
800	6
800	8
850	6
850	8
850	9
900	6
900	9

3. นำไปวิเคราะห์การเกิดโครงสร้างสารประกอบของ Lanthanum Strontium Manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ :LSM) โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) โดยทำการวัดที่มุม  $2\theta$  ในช่วง 20 - 80 °

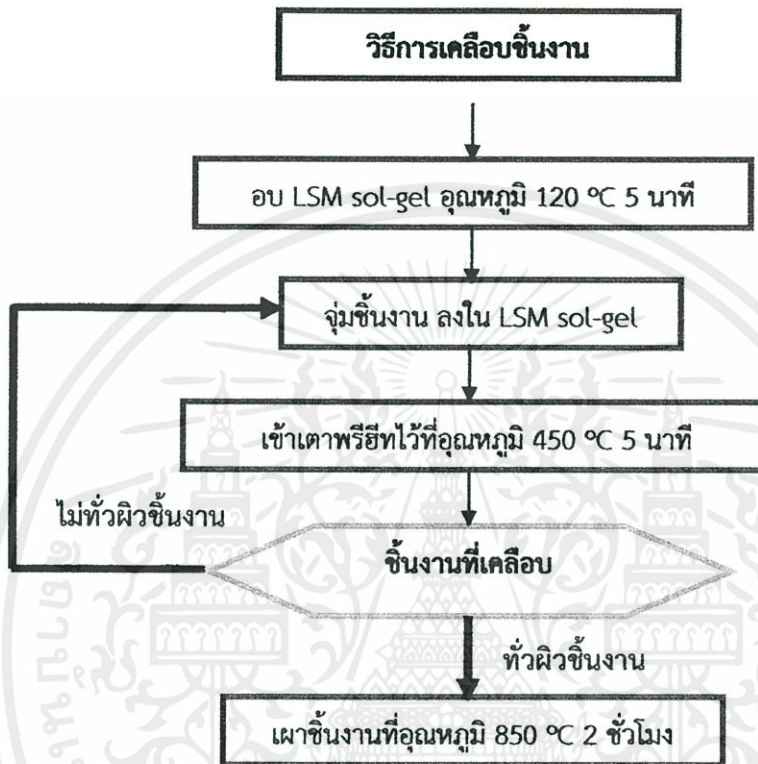
## ตอนที่ 3 การเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 ก่อนเคลือบ Lanthanum Strontium Manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) ด้วย Sol-gel โดยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip coating)

1. ตัดเหล็กขนาดกว้าง 1.8 cm ยาว 2.8 cm
2. เตรียมพื้นผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกัน 3 ลักษณะ ดังนี้
  - ไม่ขัดผิวชิ้นงาน
  - ขัดผิวชิ้นงาน ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240 และเบอร์ 1000 เพื่อทำเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน ให้มีความเรียบและสม่ำเสมอ
  - กัดกรดผิวชิ้นงาน กัดพื้นผิวชิ้นงานด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 37%wt เพื่อทำลายบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 ให้ขรุขระมากขึ้นก่อนการเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากนั้นนำชิ้นงานที่มีพื้นผิวทั้ง 3 ลักษณะมาล้างอะซิโตนด้วยเครื่อง Ultrasonic Cleaner เพื่อทำความสะอาดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 ก่อนที่จะนำไปเคลือบต่อไป

**ตอนที่ 4** การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 Lanthanum Strontium Manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ :LSM) ด้วย Sol-gel โดยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip coating)



**รูปที่ 3-3** แสดงกระบวนการทดลองเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 Lanthanum Strontium Manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) Sol-gel ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ (dip coating)

- นำ LSM sol-gel ที่ได้ ไปอบที่อุณหภูมิ 120 °C เพื่อระเหยตัวทำละลายก่อนที่จะนำไปเคลือบผิวบนชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441
- จากนั้นนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 ที่เตรียมไว้ในตอนที่ 3 เคลือบด้วยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip coating) LSM sol-gel ที่ผ่านการระเหยตัวทำละลายแล้ว ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C ทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกว่า LSM จะสามารถเคลือบทั่วชิ้นงาน แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้ชั้นเคลือบเกิดการฟอร์มตัวเป็น  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  อย่างสมบูรณ์
- จากนั้นนำชิ้นงานแบบต่างๆ ที่ได้มาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานด้วยเครื่อง Scanning

Electron Microscope (SEM) ชิ้นงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

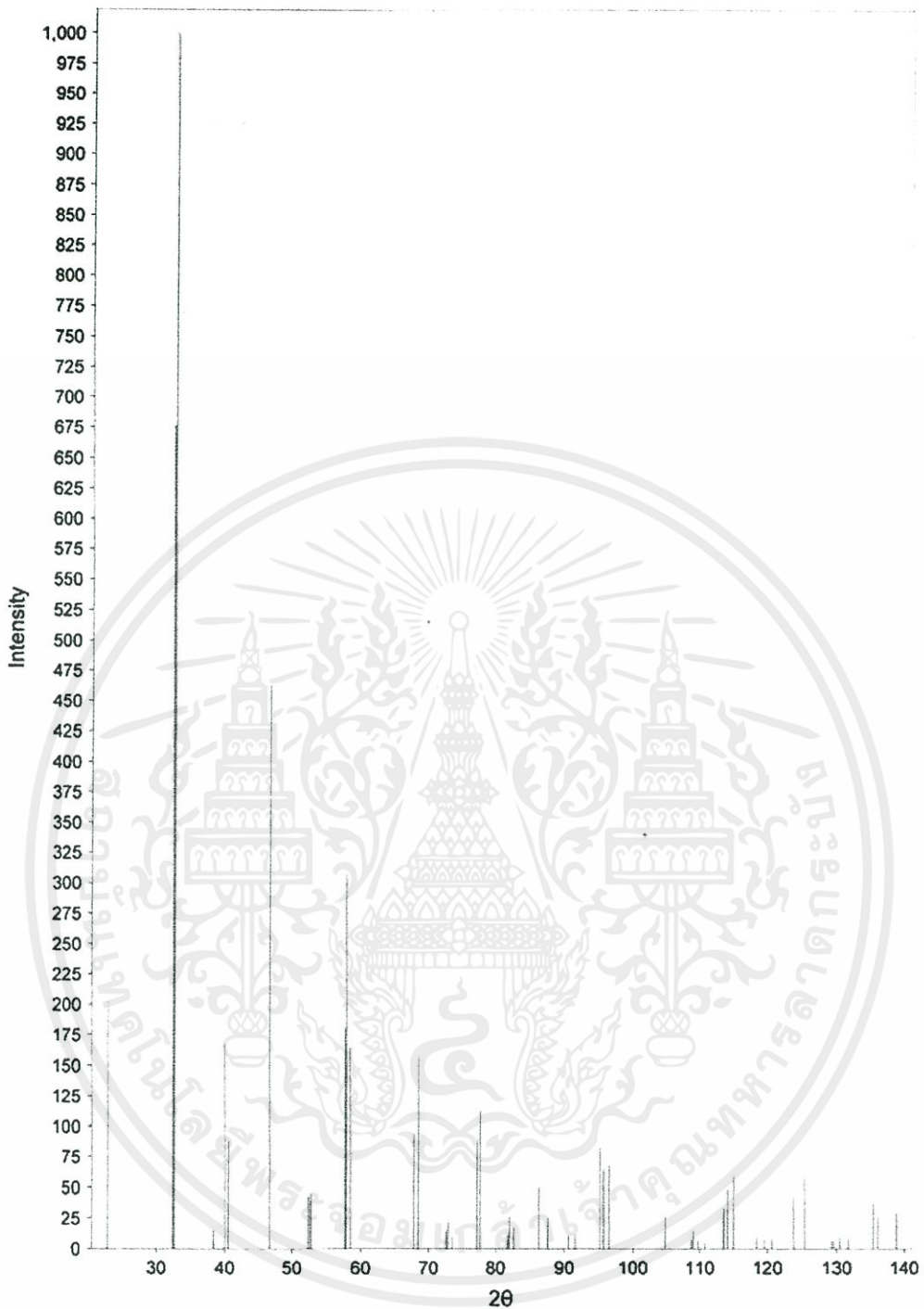
#### 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบของ Lanthanum strontium manganite

( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

การศึกษาการเกิดการสร้างผลึกเป็นโครงสร้างสารประกอบของ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) แสดงดังรูปที่ 4-1 เส้นกราฟสีแดง แสดงพีคมาตรฐานของ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) ที่มีมุม  $2\theta$  ในช่วง  $20-80^\circ$  มีพีคของ LSM ตำแหน่งปรากฏชัดเจนที่มีมุม  $23^\circ$ ,  $32^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $47^\circ$ ,  $58^\circ$ ,  $68^\circ$ ,  $78^\circ$

การสังเคราะห์ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) ที่เตรียมขึ้นโดยวิธี โซล-เจล (Sol-gel) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  ทำการปั่นกวจนกระทั่งโซลเปลี่ยนเป็นเจลที่มีลักษณะ สีเหลืองใส ไม่มีตะกอน โดยศึกษาผลของอุณหภูมิแคลไซน์  $800-900^\circ\text{C}$  เวลาที่ใช้ในการแคลไซน์ 6-9 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



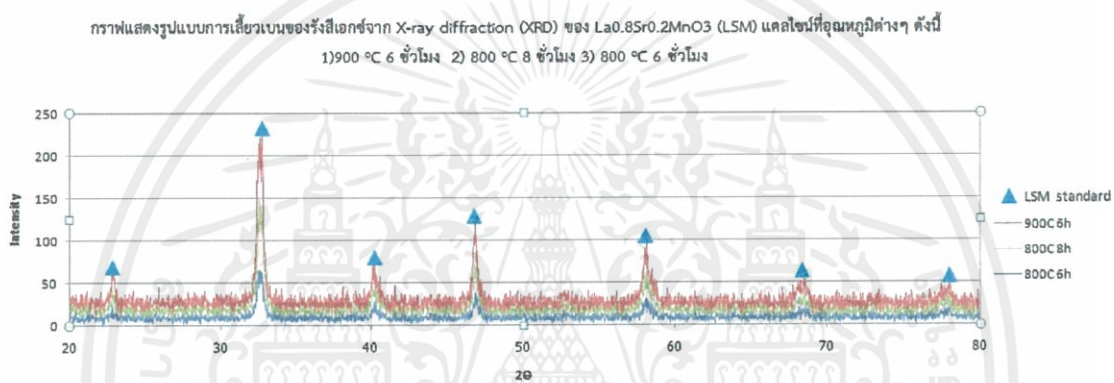
© 2014 International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

— 00-053-0058 (Fixed Slit Intensity)

รูปที่ 4-1 แสดงพีคมาตรฐาน ของ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) พบว่าการสังเคราะห์ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) เตรียมผ่านกระบวนการโซล-เจล แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 6 ชั่วโมง เกิดพีคการเลี้ยวเบนที่คาดว่าเกิดการสร้างผลึกเป็นโครงสร้างสารประกอบของ LSM มีพีคของการเกิดการสร้างผลึกเป็นโครงสร้างสารประกอบของ LSM พิกตรงตำแหน่งมุม 23 °, 32 °, 40 °, 47 °, 58 °, 68 °, 78 ° ดังรูปที่ 4-1 แต่ LSM ที่สังเคราะห์ได้ยังมีค่า Intensity ต่ำกว่ากราฟมาตรฐาน ผู้ทำการทดลองจึงทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่มีผลต่อการเกิดการสร้างผลึกเป็นโครงสร้างสารประกอบของ LSM โดยทำการทดลองปรับเปลี่ยนสภาวะคือ เพิ่มอุณหภูมิ แคลไซน์เมื่อเวลาคงที่และเพิ่มเวลาแคลไซน์เมื่ออุณหภูมิแคลไซน์คงที่ ดังนี้ 1) 900 °C เวลา 6 ชั่วโมง 2) 800 °C เวลา 8 ชั่วโมง



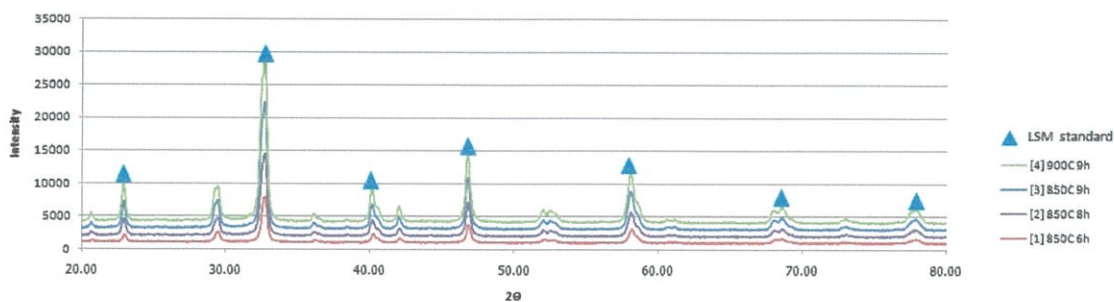
รูปที่ 4-2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก X-ray diffraction (XRD) ของ  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  (LSM) แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ 1) 900 °C 6 ชั่วโมง 2) 800 °C 8 ชั่วโมง 3) 800 °C 6 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4-2 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์เมื่อเวลาคงที่ 1) 900 °C เวลา 6 ชั่วโมง มีผลต่อการเกิดการสร้างผลึกเป็นโครงสร้างสารประกอบของ LSM มากกว่าการเพิ่มเวลาแคลไซน์เมื่ออุณหภูมิแคลไซน์คงที่ 2) 800 °C เวลา 8 ชั่วโมง เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ทั้ง 3 สภาวะดังกล่าวยังมีค่า Intensity ต่ำกว่าพีคมาตรฐานของ LSM ดังนั้นจึงทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดการสร้างผลึกเป็นโครงสร้างสารประกอบของ LSM ต่อไป

ผู้ทำการทดลองจึงทำการทดลองศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเพิ่มเติมต่อการเกิดการสร้างผลึกเป็นโครงสร้างสารประกอบของ LSM ที่อุณหภูมิแคลไซน์และเวลาแคลไซน์ต่างๆ ดังต่อไปนี้ 1) 850 °C 6 ชั่วโมง 2) 850 °C 8 ชั่วโมง 3) 900 °C 9 ชั่วโมง 4) 850 °C 9 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก X-ray diffraction (XRD) ของ  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  (LSM) แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้  
 1) 850 °C 6 ชั่วโมง 2) 850 °C 8 ชั่วโมง 3) 850 °C 9 ชั่วโมง 4) 900 °C 9 ชั่วโมง

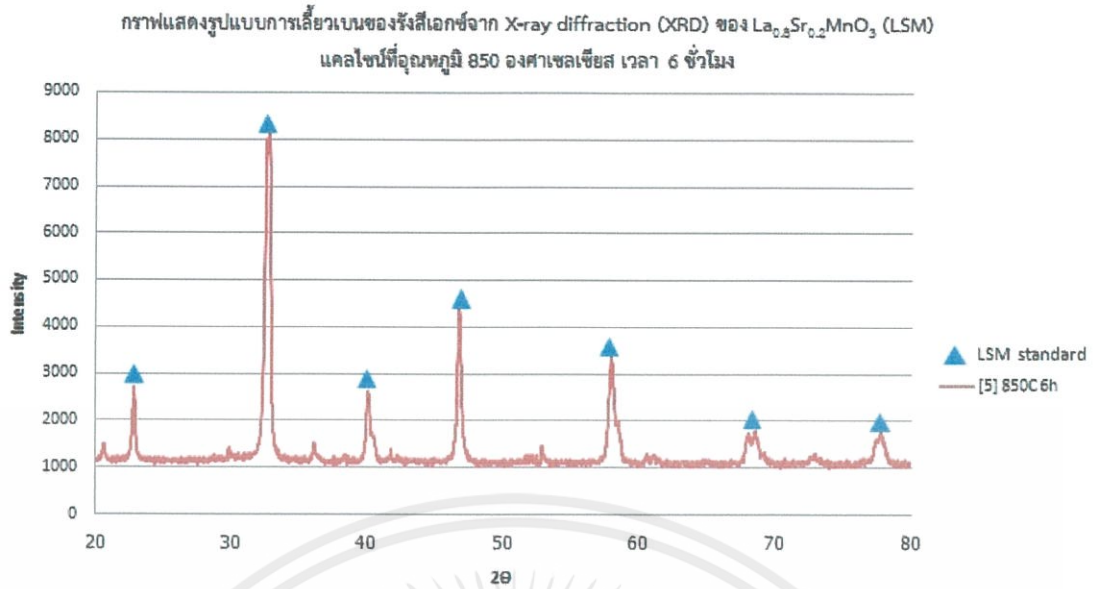


**รูปที่ 4-3** แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก X-ray diffraction (XRD) ของ  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  (LSM) แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ 1) 850 °C 6 ชั่วโมง 2) 850 °C 8 ชั่วโมง 3) 900 °C 9 ชั่วโมง 4) 850 °C 9 ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) พบว่า ทั้งอุณหภูมิแคลไซน์และเวลาแคลไซน์มีผลต่อการเกิดการสร้างผลึกเป็นโครงสร้างสารประกอบของ LSM ซึ่ง LSM Sol-gel แคลไซน์แต่ละสภาวะแสดงดังรูปที่ 4-3 เกิดพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) มีค่า Intensity สูงกว่าพีคมาตรฐานและตำแหน่งพีคตรงกับพีคมาตรฐานที่ ตำแหน่งมุม  $23^\circ$ ,  $32^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $47^\circ$ ,  $58^\circ$ ,  $68^\circ$ ,  $78^\circ$  ดังรูปที่ 4-1 อย่างไรก็ตาม พบว่า มีพีคผิดแปลกไปที่ตำแหน่ง  $29^\circ$  จากการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลพีคปรากฏที่ตำแหน่งมุม  $29^\circ$  นี้และจากการสันนิษฐาน อาจเป็นพีคของแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งแคลเซียมออกไซด์มีพีคปรากฏที่ตำแหน่งมุม  $29^\circ$  จากปัญหาการปนเปื้อนของสาร เนื่องจากมีการใช้อุปกรณ์ร่วมกันในห้องปฏิบัติการ ส่งผลให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อน

ดังนั้นผู้ทำการทดลองจึงทำการทดลองอีกครั้งโดยเลือกทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 850 °C เวลา 6 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก X-ray diffraction (XRD) ของ  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  (LSM) แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C 6 ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) พบว่าฟิสิกส์ที่เกิดจากสารปนเปื้อนนั้นหายไป ซึ่งทำให้ข้อสันนิษฐานนั้นเป็นจริง ผู้ทำการทดลองจึงเลือกใช้ LSM Sol-gel ที่สังเคราะห์ได้ทดลองเคลือบผิวชิ้นงานจริงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 441 ด้วย Lanthanum strontium manganite (LSM) โดยวิธี Sol-gel และการจุ่มเคลือบ

### 4.2.1 ผลการเคลือบชิ้นงาน

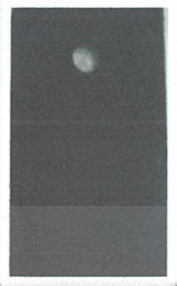
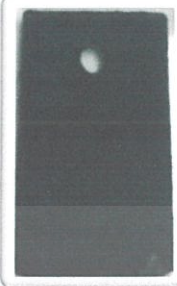
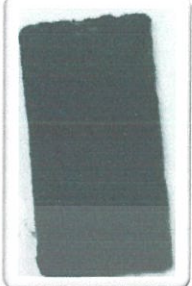



การศึกษาวิธีการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI441 ด้วย Lanthanum strontium manganite (LSM) โดยวิธี Sol-gel และการจุ่มเคลือบ จากการทดลองกับเหล็ก 3 ชนิด คือ 1. เหล็กไม่ขัดพื้นผิว 2. เหล็กขัดพื้นผิว 3.เหล็กกัดด้วยกรด HCl (37%wt) ที่สภาวะการให้ความร้อนขณะจุ่มเคลือบที่อุณหภูมิ 400 – 500 °C และทำการจุ่มเคลือบชิ้นงานทุก 5 นาที โดยเปรียบเทียบวิธีการจุ่มเคลือบแบบจุ่มเคลือบชิ้นงานทันทีกับทั้งชิ้นงานไว้ให้เย็นก่อนจุ่มเคลือบ แล้วแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 ด้วย Sol-gel โดยวิธีจุ่มเคลือบ

ชิ้นงาน	เหล็กไม่ขัดผิว	เหล็กขัดผิว	เหล็กกัดด้วยกรด HCl (37%wt)
<ul style="list-style-type: none"> <li>ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C</li> <li>จุ่มเคลือบทันที</li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C</li> <li>จุ่มเคลือบทันที</li> </ul>			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

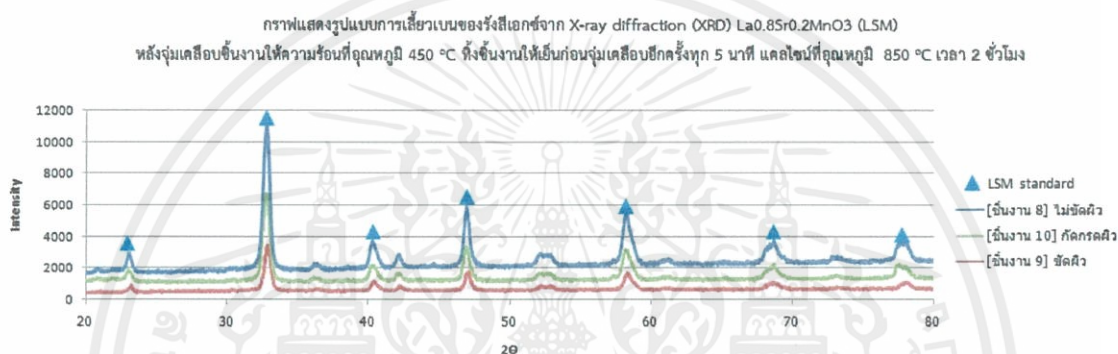
ชิ้นงาน	เหล็กไม่ขัดผิว	เหล็กขัดผิว	เหล็กกัดด้วยกรด HCl (37%wt)
<ul style="list-style-type: none"> <li>ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C</li> <li>ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนจุ่มเคลือบ</li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C</li> <li>ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนจุ่มเคลือบ</li> </ul>			

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อให้อุณหภูมิในการให้ความร้อนขณะจุ่มเคลือบสูงขึ้น ขณะที่อุณหภูมิและเวลาเคลือบชิ้นงานที่จะส่งผลให้การเคลือบผิวมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ผง LSM สามารถเคลือบติดกับผิวของชิ้นงานได้ดีและสม่ำเสมอขึ้น อีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเคลือบผิวชิ้นงานคือวิธีการจุ่มเคลือบ โดยการจุ่มเคลือบชิ้นงานทันทีหลังการให้ความร้อน จะทำให้ Sol-gel เกิดการเดือดและเกิดฟองอากาศขึ้นบนชั้นเคลือบ ทำให้ชั้นเคลือบไม่สม่ำเสมอ และเกิดการร่อนหลุดได้ง่าย จึงแก้ไขปัญหาด้วยการทิ้งชิ้นงานให้เย็นก่อนการจุ่มเคลือบครั้งต่อไป สำหรับชนิดของชิ้นงานที่นำมาเคลือบพบว่า ชิ้นงานเหล็กขัดผิวนั้น ให้ประสิทธิภาพการเคลือบผิวต่ำที่สุด เนื่องจากการขัดผิวเป็นการปรับพื้นผิวของเหล็กให้มีความเรียบและสม่ำเสมอ ทำให้การยึดเกาะของสารเคลือบกับตัวชิ้นงานน้อย เกิดการร่อนหลุดง่าย สำหรับชิ้นงานเหล็กไม่ขัดผิวและเหล็กที่กัดด้วยกรด HCl (37%wt) มีประสิทธิภาพในการยึดติดของสารเคลือบใกล้เคียงกันเมื่อมองด้วยตาเปล่า การกัดด้วยกรดก่อนการเคลือบผิวเป็นการปรับสภาพผิวของชิ้นงาน ช่วยเพิ่มลวดลายบนพื้นผิวชิ้นงาน ทำให้ผิวชิ้นงานมีความขรุขระมากขึ้น Sol-gel สามารถยึดเกาะบนผิวชิ้นงานได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 วิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบของ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 หลังการจุ่มเคลือบ

จากปัญหาการจุ่มเคลือบชิ้นงานทันทีหลังการให้ความร้อน จะทำให้ Sol-gel เกิดการเดือดและเกิดฟองอากาศขึ้นบนชั้นเคลือบ ทำให้ชั้นเคลือบไม่สม่ำเสมอ และเกิดการร่อนหลุดได้ง่าย ผู้ทำการทดลองจึงปรับวิธีการเคลือบผิวการจุ่มเคลือบชิ้นงานหลังการให้ความร้อน โดยทิ้งชิ้นงานไว้ให้เย็นก่อนการจุ่มเคลือบชิ้นงานอีกครั้ง ชิ้นงานที่เคลือบด้วย LSM จึงมีความเรียบสม่ำเสมอมากขึ้น ที่สภาวะดังรูปที่ 4-5

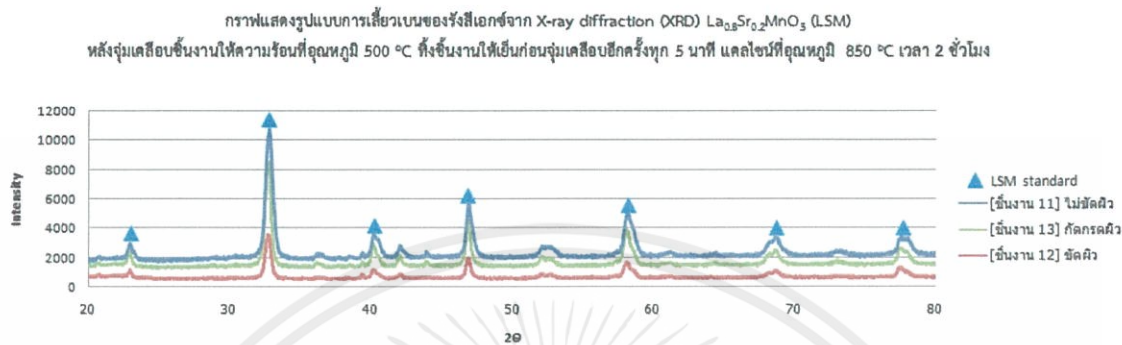


รูปที่ 4-5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จาก X-ray diffraction (XRD)  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  (LSM) สภาวะหลังการจุ่มเคลือบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 °C ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนจุ่มเคลือบอีกครั้งทุก 5 นาที แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C เวลา 2 ชั่วโมง

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) พบว่าการเกิดการสร้างผลึกเป็นโครงสร้างสารประกอบของ LSM เคลือบติดบนพื้นผิวของชิ้นงานทั้ง 3 ลักษณะ โดยพื้นผิวของชิ้นงานที่นำมาเคลือบนั้นมีความแตกต่างกันคือ ชิ้นงานไม่ขัดผิว ชิ้นงานขัดผิว และกัดกรดผิวชิ้นงาน การจุ่มเคลือบชิ้นงานหลังให้ความร้อนแล้วทิ้งชิ้นงานไว้ให้เย็นก่อนจุ่มเคลือบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 450°C ทุก 5 นาที เวลาและอุณหภูมิในการแคลไซน์คงที่ ดังรูปที่ 4-5 นั้น พบว่าชิ้นงานทั้ง 3 ลักษณะนั้น LSM มีการยึดเกาะบนพื้นผิวชิ้นงานได้ดีขึ้นและมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น ความหนาของชั้นเคลือบค่อนข้างเรียบ มีค่า Intensity สูง โดยเรียงลำดับชิ้นงานที่มีค่า Intensity จากสูงไปต่ำคือ ชิ้นงานที่ 8>10>9 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังทำการจุ่มเคลือบและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C ทิ้งชิ้นงานไว้ให้เย็นก่อนจุ่มเคลือบอีกครั้งทุก 5 นาที แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°C เวลา 2 ชั่วโมงนั้น ผู้ทำการทดลองจึงเพิ่มอุณหภูมิให้ความร้อนเพื่อเปรียบเทียบว่าการจุ่มเคลือบและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C ทิ้งชิ้นงานไว้ให้เย็นก่อนจุ่มเคลือบอีกครั้งทุก 5 นาที นั้นมีผลอย่างไรต่อการเคลือบ



รูปที่ 4-6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จาก X-ray diffraction (XRD)  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$

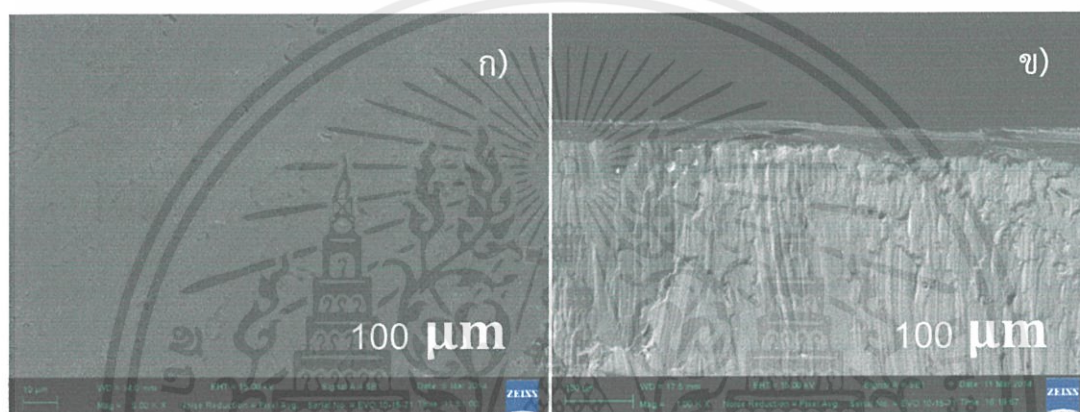
(LSM) สภาวะหลังการจุ่มเคลือบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 °C ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนจุ่มเคลือบอีกครั้งทุก 5 นาที แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C เวลา 2 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4-6 พบว่าชั้นเคลือบของชิ้นงานมีความเรียบสม่ำเสมอ LSM ยึดเกาะบนพื้นผิวชิ้นงานได้ดี ไม่หลุดร่อนง่าย และจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ให้ความร้อนกับชิ้นงานที่จุ่มเคลือบสูงขึ้น ส่งผลต่อค่า intensity ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ โดยเรียงลำดับชิ้นงานที่มีค่า intensity จากสูงไปต่ำคือ ชิ้นงานที่ 11>13>12 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

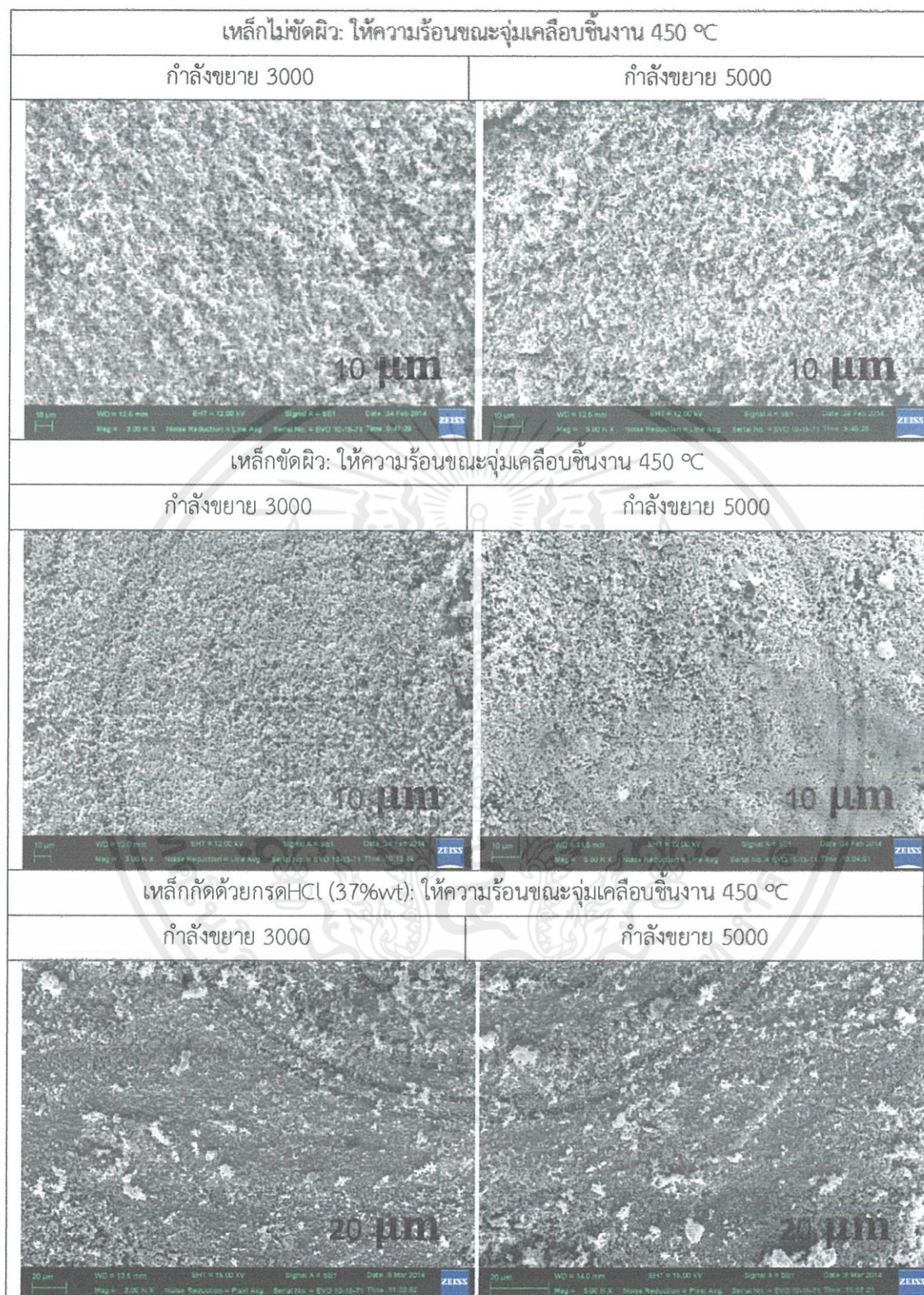
จากการพิจารณาผลของการเคลือบผิวชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 หลังการเคลือบผิวด้วย Sol-gel โดยวิธีจุ่มเคลือบ ดังแสดงในตาราง 4-1 นั้นพบว่าการเคลือบผิวชิ้นงานที่สภาวะการให้ความร้อนขณะจุ่มเคลือบที่อุณหภูมิ 450 – 500 °C โดยวิธีทั้งชิ้นงานไว้ให้เย็นก่อนจุ่มเคลือบ ทุก 5 นาที และเคลือบซ้ำที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันเมื่อมองด้วยตาเปล่า จึงนำชิ้นงานที่สภาวะดังกล่าวมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานโดยละเอียดด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ได้ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานดังแสดงในตาราง 4-2 และผลการวิเคราะห์พื้นผิวและภาพตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 ก่อนการเคลือบผิว ดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 แสดงผลการวิเคราะห์ ก) พื้นผิว ข) ภาพตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 ก่อนการเคลือบผิวด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

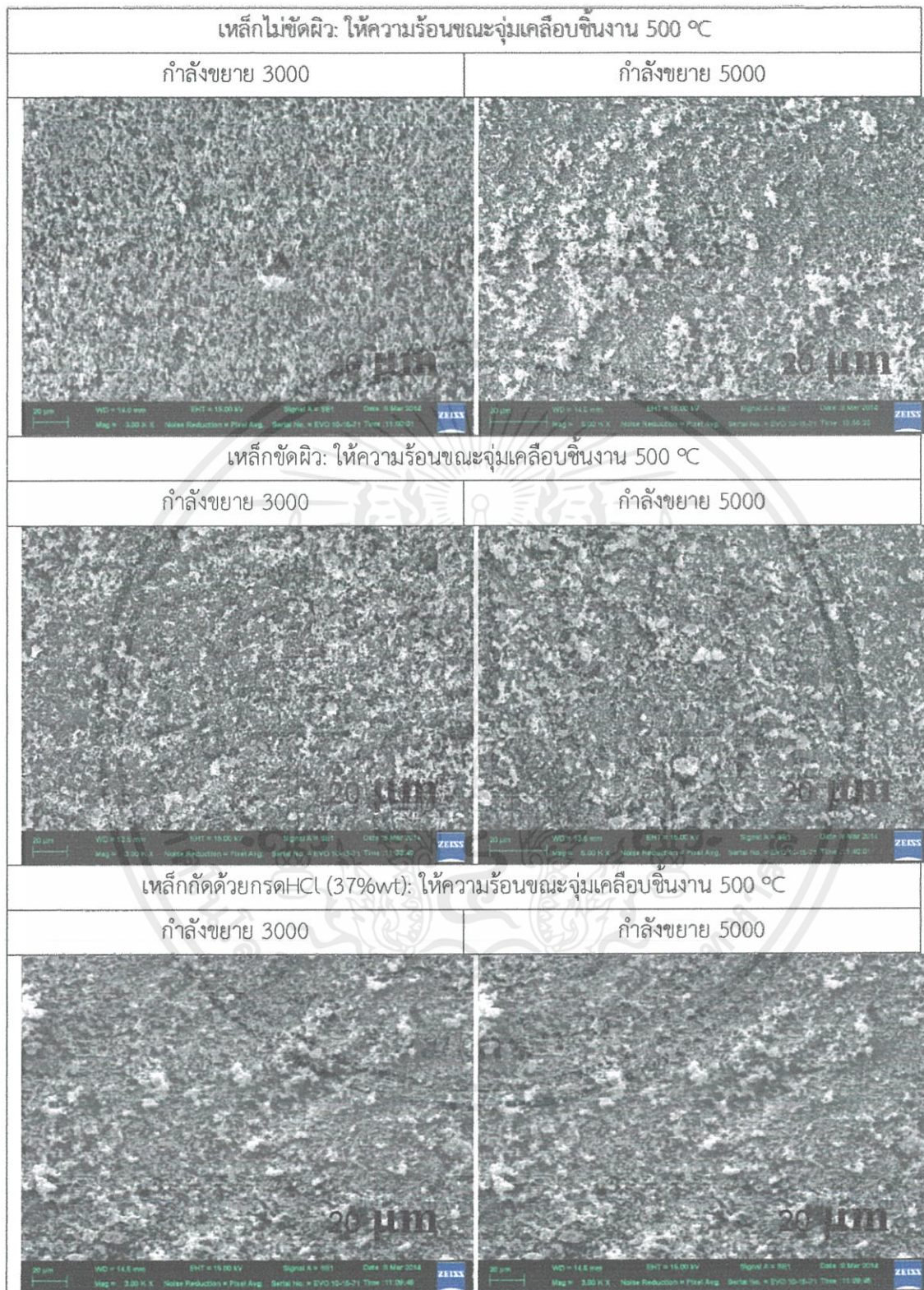
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

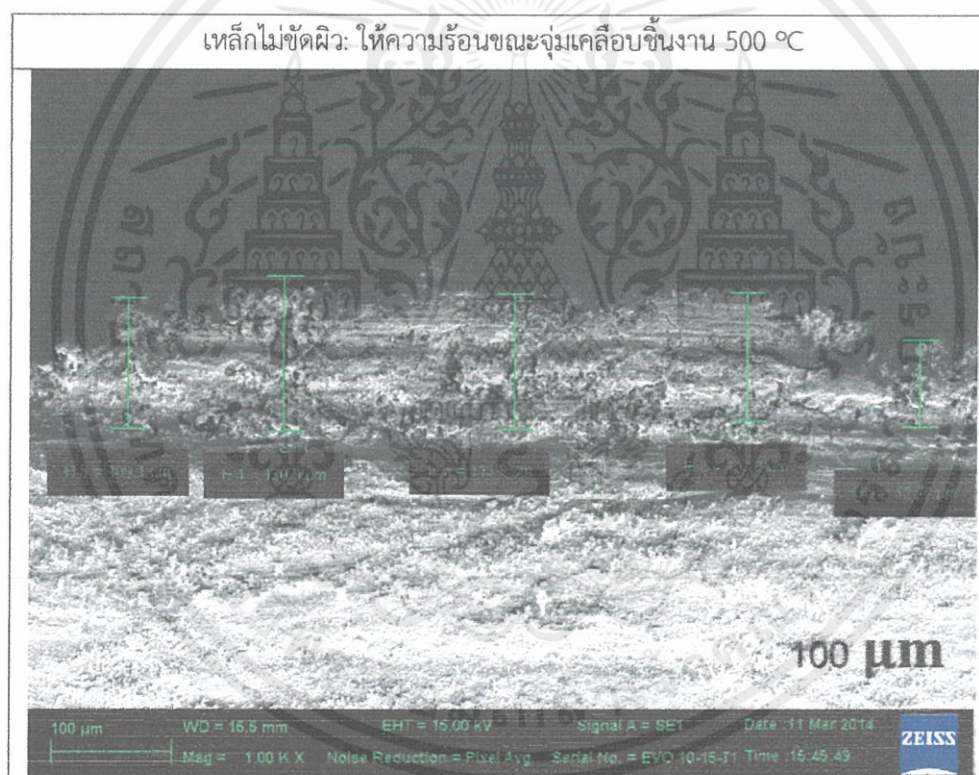
## ตารางที่ 4-2 (ต่อ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

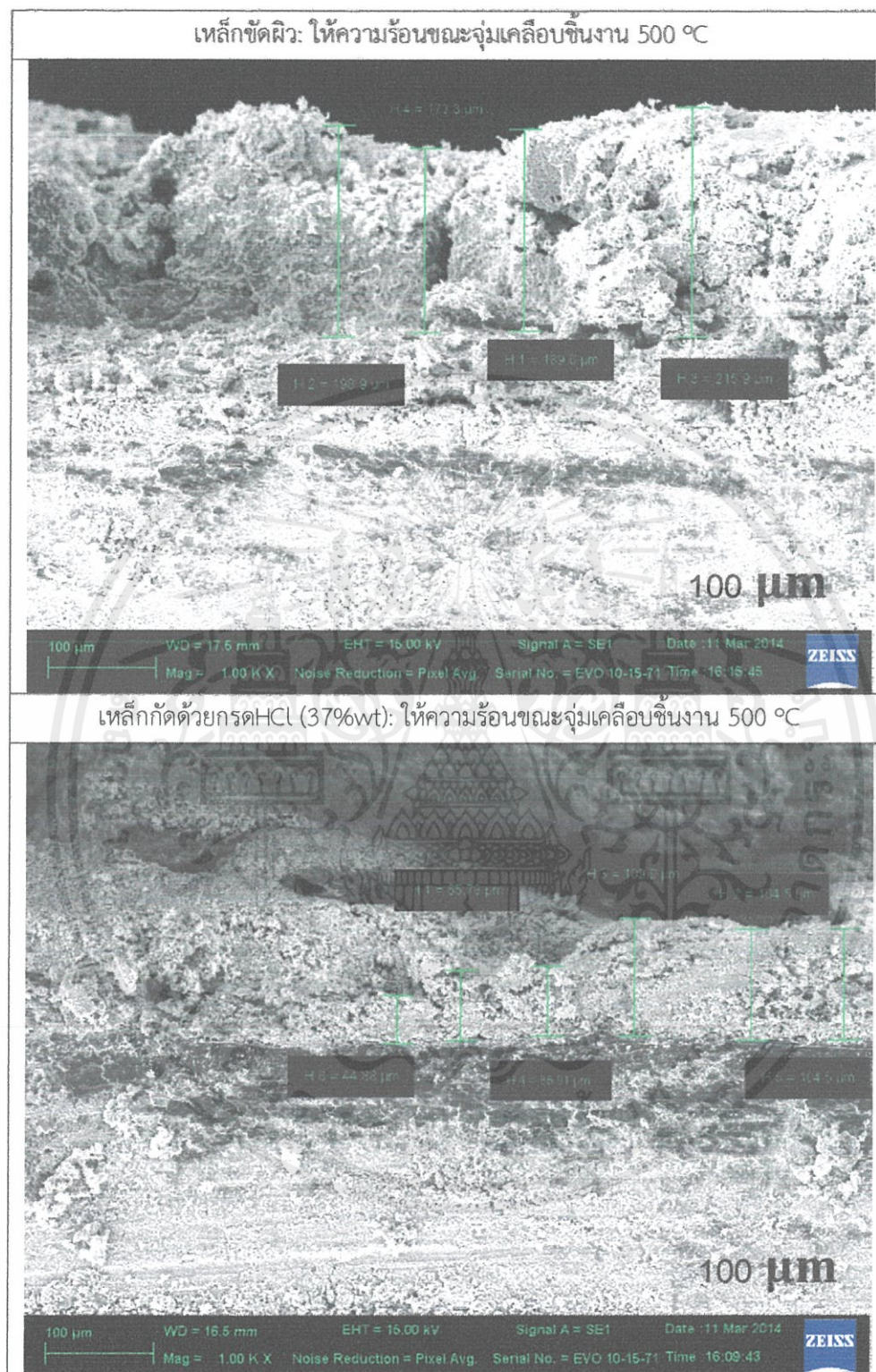
ผลการวิเคราะห์จาก Scanning electron microscope (SEM) พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากรูปการเคลือบชิ้นงาน กล่าวคือ ชิ้นงานเหล็กขัดผิวมีประสิทธิภาพในการเคลือบน้อยที่สุด แม้ว่าจะมีชั้นเคลือบที่ค่อนข้างสม่ำเสมอแต่ยังมีรอยแตกของชั้นเคลือบอยู่มากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานเหล็กไม่ขัดผิวและเหล็กที่กัดด้วยกรด HCl เหล็กทั้ง 2 ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการยึดเกาะของชั้นเคลือบกับพื้นผิวชิ้นงานที่ใกล้เคียงกัน โดยประสิทธิภาพการเคลือบผิวของเหล็กทุกชนิดจะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิให้ความร้อนขณะเคลือบสูงขึ้น ดังนั้นจึงทำการพิจารณาผลการเคลือบชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือที่สภาวะการให้ความร้อนขณะจุ่มเคลือบ 500 °C เพื่อพิจารณาคูภาพตัดขวางของชิ้นงานทั้ง 3 ด้วยวิธี Scanning electron microscope (SEM) อีกครั้ง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังตาราง 4-3

ตารางที่ 4-3 แสดงผลการวิเคราะห์ภาพตัดขวางของชิ้นงานด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-3 (ต่อ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ภาพตัดขวางชั้นของชิ้นงานด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) พบว่ามีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน กล่าวคือ เหล็กชนิดขัดผิว มีความหนาของชั้นเคลือบที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่มีการแตกร้าวของชั้นเคลือบมาก เนื่องจากพื้นผิวของเหล็กชนิดนี้ ได้รับการปรับผิวให้ความเรียบ ลื่นและสม่ำเสมอ จึงส่งผลให้การเกาะตัวของสารเคลือบทำได้น้อย เกิดการแตกร้าวร่อนหลุดง่าย เมื่อพิจารณาเหล็ก 2 ชนิดที่เหลือ พบว่าเหล็กชนิดกัดครดยังมีการร่อนของชั้นเคลือบและมีความหนาของชั้นเคลือบไม่ค่อยสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กชนิดไม่ขัดผิว ที่มีความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบมากกว่า และพบการแตกร้าวของชั้นเคลือบน้อยกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองสังเคราะห์ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) ด้วยวิธี Sol-gel ที่สภาวะอุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  โดยทำการปั่นจนกระทั่งโซลเปลี่ยนเป็นเจลที่มีลักษณะสีเหลืองใส ไม่มีตะกอน ผลของอุณหภูมิแคลไซน์ที่  $800\text{--}900^\circ\text{C}$  และเวลาที่ใช้ในการแคลไซน์ 6-9 ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าเมื่ออุณหภูมิแคลไซน์และเวลาแคลไซน์สูงขึ้น ทำให้ค่า intensity เพิ่มขึ้นมีการเกิดการสร้างผลึกโครงสร้างเป็นสารประกอบของ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ : LSM) มากขึ้น และจากการทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 ด้วย Sol-gel โดยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip-coating) พื้นผิวของชิ้นงานที่นำมาเคลือบนั้นมีความแตกต่างกัน คือ ชิ้นงานไม่ขัดผิว ชิ้นงานขัดผิว และกัดกรดผิวชิ้นงาน ทำการจุ่มเคลือบแบบทันทีและทิ้งไว้ให้เย็นก่อนจุ่มเคลือบ โดยใช้อุณหภูมิให้ความร้อน เวลาและอุณหภูมิในการแคลไซน์คงที่นั้น พบว่าชิ้นงานที่จุ่มเคลือบแบบทันทีหลังการให้ความร้อนจะทำให้ Sol-gel เกิดการเดือดและเกิดฟองอากาศขึ้นบนชั้นเคลือบ ส่งผลให้ชั้นเคลือบมีความไม่สม่ำเสมอ เกิดการหลุดร่อนของผง LSM ที่เคลือบ ความหนาของชั้นเคลือบไม่สม่ำเสมอ มีความขรุขระ จึงมีการปรับปรุงวิธีการเคลือบผิวโดยการจุ่มเคลือบชิ้นงานหลังให้ความร้อนจะทิ้งชิ้นงานไว้ให้เย็นตัวก่อนที่จะจุ่มเคลือบอีกครั้ง ซึ่งทำให้ LSM เคลือบติดผิวของชิ้นงานได้ดีขึ้นและมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น ความหนาของชั้นเคลือบค่อนข้างเรียบมากกว่าชิ้นงานที่จุ่มเคลือบทันทีหลังการให้ความร้อน นำไปวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD) พบว่ามีการเกิดโครงสร้างสารประกอบของ LSM เคลือบกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของทุกๆ ชิ้นงาน ค่า intensity มีค่าสูง โดยเรียงลำดับชิ้นงานที่มีค่า intensity จากสูงไปต่ำ คือชิ้นงานที่ไม่ขัดผิว>กัดกรดพื้นผิว>ขัดพื้นผิว ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 ด้วย Sol-gel โดยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip-coating) พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบ เมื่ออุณหภูมิและเวลาแคลไซน์คงที่ ที่ 850 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง คือ 1.อุณหภูมิให้ความร้อน 2. วิธีการจุ่มเคลือบ 3.ชนิดของชิ้นงาน พบว่า

1. การศึกษาผลของอุณหภูมิให้ความร้อนก่อนการแคลไซน์ที่ 400-500 °C พบว่าเมื่อให้อุณหภูมิในการให้ความร้อนสูงขึ้น จะส่งผลให้การเคลือบผิวมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผง LSM สามารถเคลือบติดกับผิวของชิ้นงานได้ดีและสม่ำเสมอขึ้น โดยสภาวะให้ผลการเคลือบที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิให้ความร้อน 500 °C

2. การศึกษาผลของวิธีการจุ่มเคลือบโดยเปรียบเทียบระหว่างการจุ่มเคลือบชิ้นงานทันทีหลังการให้ความร้อนกับการทิ้งชิ้นงานไว้ให้เย็นก่อนการจุ่มเคลือบครั้งต่อไป พบว่าการจุ่มเคลือบชิ้นงานทันทีหลังการให้ความร้อนจะทำให้ Sol-gel เกิดการเดือดและเกิดฟองอากาศขึ้นบนชั้นเคลือบ ทำให้ชั้นเคลือบไม่สม่ำเสมอ และเกิดการร่อนหลุดได้ง่าย หลังการให้ความร้อนจึงควรทิ้งชิ้นงานไว้ให้เย็นก่อนการจุ่มเคลือบครั้งต่อไป

3. การศึกษาผลของชนิดของชิ้นงานที่นำมาเคลือบ 3 ลักษณะคือ 1. เหล็กไม่ขัดผิว 2. เหล็กขัดผิว และ 3. เหล็กกัดด้วยกรด HCl (37%wt) พบว่าเหล็กไม่ขัดผิวมีประสิทธิภาพของการเคลือบได้ดีที่สุด มีชั้นเคลือบสม่ำเสมอ พบรอยแตกร้าวของชั้นเคลือบน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กขัดผิวและเหล็กกัดด้วยกรด HCl (37%wt) ที่สภาวะเดียวกัน

จากการทดลองและศึกษาผลของอิทธิพลทั้ง 3 ปัจจัย ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบผิว พบว่าสภาวะที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด ในการเคลือบผิวกล้าไร้สนิมเกรด AISI 441 คือใช้อุณหภูมิให้ความร้อนก่อนการแคลไซน์ที่ 500 °C จุ่มเคลือบทุก 5 นาที กับเหล็กชนิดไม่ขัดพื้นผิว LSM สามารถเคลือบติดผิวได้ดีที่สุดและแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สอดคล้องกับเหตุผลที่ได้อธิบายข้างต้นและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของ Lanthanum strontium manganite ( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ :LSM) โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) ที่มีค่า Intensity สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 วิจารณ์การทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการดำเนินการทดลองในขั้นแรก ตั้งแต่การออกแบบการทดลอง การสังเคราะห์สาร และการเคลือบผิวชิ้นงาน จึงทำให้ระบบต่างๆยังไม่เสถียร เนื่องจากอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ เช่น เครื่องปั่นกวนแม่เหล็กไฟฟ้า มีปัญหาบ่อยครั้ง ซึ่งต้องใช้เวลาในการซ่อมแซม ทำให้เกิดความล่าช้าไม่สามารถดำเนินการตามแผนการดำเนินงานที่วางไว้ และมีปัญหาการปนเปื้อนของสารเนื่องจากการใช้อุปกรณ์ร่วมกันในห้องปฏิบัติการ ส่งผลให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาเพิ่มเติมควรทำการศึกษาค่าผลของการเคลือบผิวชิ้นงานเมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ และควรศึกษาค่าผลของการเคลือบผิวกับการระเหยของโครเมียมสเกล ว่าสามารถลดอัตราการระเหยของชั้นโครเมียมสเกลได้หรือไม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Woon Ki Na, Bill Diong, Fuel Cells Modeling Control and Applications, CRC Press, Boca Raton, FL, 2010.
- [2] Vladimir S Bagotsky, Fuel Cells Problems and Solution, John Wiley, USA, 2009.
- [3] Subhash C Singhal, Kevin Kendall High Temperature Solid Oxide Fuel Cells, MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall, 2003.
- [4] S.C. Singhal, K. Kendall High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications Elsevier Ltda., New York (2004)
- [5] Z. Yang, J.W. Fergus J.W. Fergus, R. Hui, X. Li, D.P. Wilkinson, J. Zhang (Eds.), Solid Oxide Fuel Cells: Materials, Properties and Performance, CRC Press, Boca Raton (2009), p. 179
- [6] Kevin Huang, Solid oxide fuel cell technology principle, performance and operation, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, India and USA, 2009.
- [7] Xianguli, Principle of fuel cells, Taylor & Francis Group, New York, USA, 2004.
- [8] Villarreal, I., Jacobson, C., Leming, A. Metal-supported solid oxide fuel cells (2003) Electrochemical and Solid-State Letters, 6 (9), pp. A178-A179.
- [9] Hideto Kurokawa, Craig p. Jacobson, Lutgard C. Dejonghe, Chromium vaporization of bare and of coated iron-chromium alloy at 1,073 K, Solid state Ionics, 178, 287-296, 2007.
- [10] H. Hwang, G.M. Choi, The effects of LSM coating on 444 stainless steel as SOFC interconnect, J Electroceram, 22 (2009), pp. 67-72
- [11] X.Zhu et al., Microstructures and electrical properties of  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  films synthesized by sol-gel method, Applied Surface Science, 532-537, 254, 2007.
- [12] Wongpromrat W, "Chromium Vaporisation from AISI 441 Stainless Steel," Ph.D. Thesis, King Mongkut's Institute University of Technology Ladkrabang Bangkok, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Leando da Conceicao, Mariana M.V.M. Souza, Synthesis of  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  thin films supported on Fe–Cr alloy by sol–gel/dip-coating process: Evaluation of deposition parameters, Thin Solid Films, Rio de Janeiro/RJ, Brazil (2013)
- [14] B.J. Brasjen, A.W. van Cuijka, Dip-coating of chemically patterned surfaces, Chem. Eng. Sci., 33–37,2011
- [15] B. Hua, J. Pu, F. Lu, J. Zhang, B. Chi, L. Jian, Development of a Fe–Cr alloy for interconnect application in intermediate temperature solid oxide fuel cells, J Power Sources, 195 (2010), pp. 2782–2788
- [16] Online <http://www.mne.eng.psu.ac.th/student/fuelcell/sofc.html>. 09/2013
- [17] Online [http://www.physics.montana.edu/sofc/roehre\\_lang.html](http://www.physics.montana.edu/sofc/roehre_lang.html). 09/2013
- [18] Online [http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/high\\_temp\\_sofc.php](http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/high_temp_sofc.php). 09/2013
- [19] Online <http://www.solgel.com/articles/June00/phalip/introsolgel.html>. 02/2014
- [20] Online [http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2548/mat0848cw\\_ch2.pdf](http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2548/mat0848cw_ch2.pdf) 02/2014
- [21] Online <http://www.prsc.usm.edu/mauritz/solgel.html> 02/2014
- [22] Online <http://www.mtec.or.th/index.php?option=content&task=view&id=1473&Itemid=176> 02/2014
- [23] Laurent Dessemond, Leando da Conceicao, Mariana M.V.M. Souza,  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ -coated SS444 alloy by dip-coating process for metallic interconnect supported Solid Oxide Fuel Cells, Journal Power Sources, 159-167, 241, 2013.
- [24] Y.D. Zhen, San Ping Jiang, Interaction between metallic interconnect and constituent oxides of  $(\text{La}, \text{Sr})\text{MnO}_3$  coating of solid oxide fuel cells, science direct, 3253-3624,26, 2006.
- [25] M. Gaudon<sup>1</sup>, C. Laberty-Robert<sup>1</sup>, F. Ansart<sup>1\*</sup>, P. Stevens<sup>2</sup> and A. Rousset<sup>1</sup>, Synthesis and Characterization of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3+\delta}$  Thin Films from Polymeric Precursors, J. New. Mat. Electrochem. Systems, 57-61, 5, 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลดิบ

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของ Lanthanum Strontium Manganite (LSM)

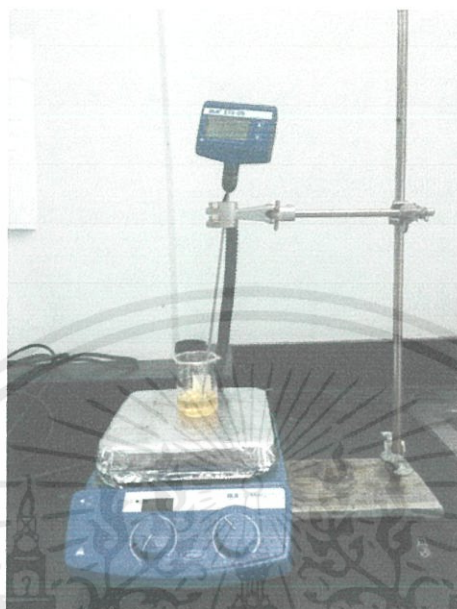
2 $\theta$	Intensity	2 $\theta$	Intensity
22.8044	203	91.5106	12
32.3522	676	95.1094	83
32.6462	999	95.6265	64
38.286	15	96.4214	68
39.965	168	104.6903	27
40.4469	88	108.7091	7
46.6298	463	109.032	15
52.3266	42	109.702	6
52.7297	45	110.7239	5
57.7354	180	113.4367	28
57.8943	307	113.5667	33
58.4616	164	114.1146	49
67.736	95	114.9895	60
68.4211	157	118.4163	9
72.5199	14	119.5332	7
72.8467	22	120.588	9
73.499	9	123.7508	42
77.2498	90	125.2744	60
77.7384	113	129.1691	6
81.6607	11	129.5251	6
81.9696	26	130.3489	9
82.6041	17	131.6048	9
86.254	51	135.307	37
87.5202	25	135.9641	27
90.5659	11	138.7676	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการปฏิบัติงานเพื่อการศึกษา อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## รูปภาพชุดการทดลอง

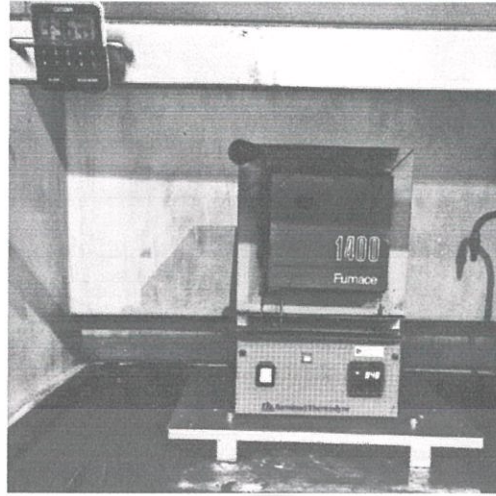


รูปที่ ข-1 ชุดการทดลองการสังเคราะห์ Lanthanum strontium manganite (LSM) ด้วยวิธี Sol-gel



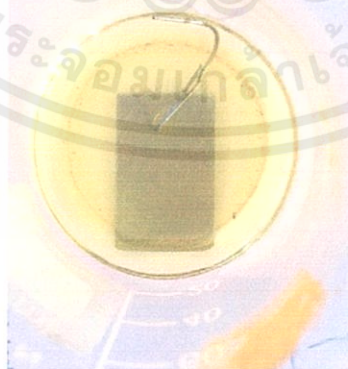
รูปที่ ข-2 Sol-gel ที่สังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

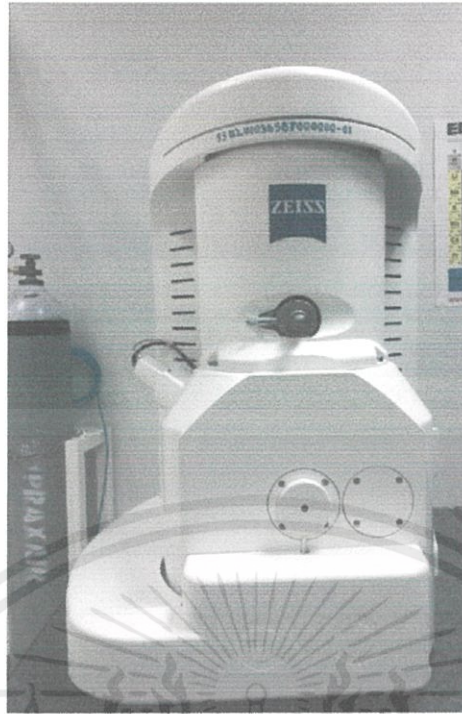


รูปที่ ข-3 เตาเผา

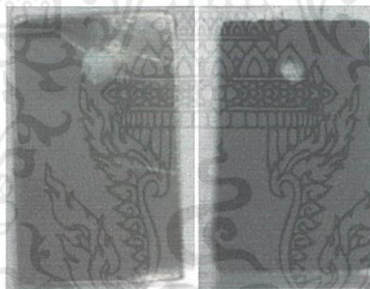
รูปที่ ข-4 ผง LSM ที่ผ่านการแคลไซน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น กรุณาอย่าได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-6 เครื่อง Scanning electron microscopy (SEM)

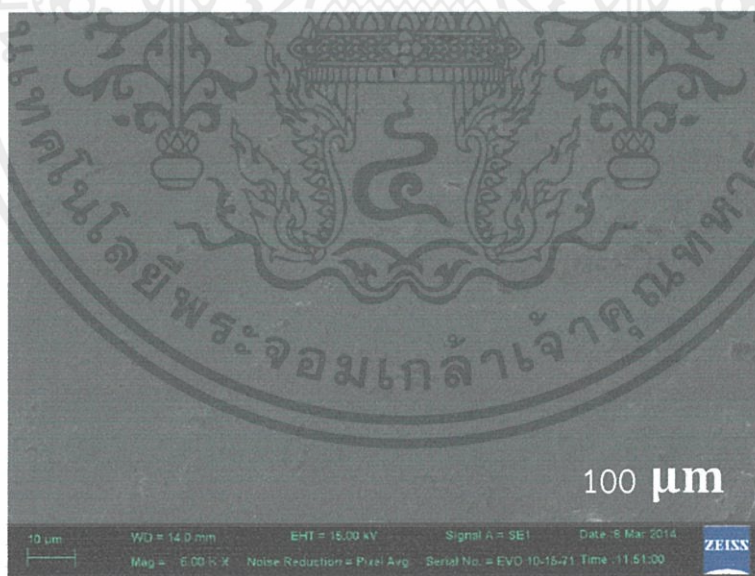


รูปที่ ข-7 แผ่นโลหะ AISI 441 ก่อนและหลังการเคลือบผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

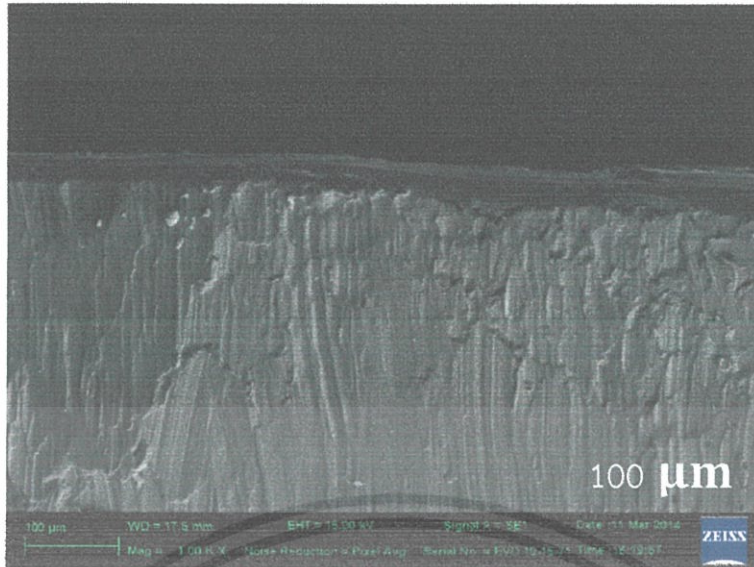
ครั้งที่	1	3	8	13	สุดท้าย
ไม่ขัด ผิวชิ้นงาน					
ขัด ผิวชิ้นงาน					
กัดกรด ผิวชิ้นงาน					

รูปที่ ข-8 แสดงลำดับการเคลือบผิวชิ้นงาน



รูปที่ ข-9 แสดงผลการวิเคราะห์ SEM ของพื้นผิวโลหะ AISI 441 ก่อนการเคลือบผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-10 แสดงผลการวิเคราะห์ SEM ของภาพตัดขวางแผ่นโลหะ AISI 441 ก่อนการเคลือบผิว



รูปที่ ข-11 แสดงผลจากการวิเคราะห์ SEM ของตัวอย่างชิ้นงานที่เคลือบไม่ติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้