

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารตั้ง  
ต้น  $\text{CaMnO}_3$  ระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตที่สกัดจากเปลือกไข่  
และแคลเซียมคาร์บอเนตสำเร็จรูป

COMPARISON OF THERMOELECTRIC MATERIAL  
PERFORMANCE FROM  $\text{CaMnO}_3$  SUBSTRATES BETWEEN  
CALCIUM CARBONATE EXTRACTED FROM EGG SHELL  
AND FINISHED CALCIUM CARBONATE

กาญจนภรณ์ สุขเรือง

ธิดาทิพย์ จันทระเจริญ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

COMPARISON OF THERMOELECTRIC MATERIAL  
PERFORMANCE FROM  $\text{CaMnO}_3$  SUBSTRATES BETWEEN  
CALCIUM CARBONATE EXTRACTED FROM EGGSHELL  
AND FINISHED CALCIUM CARBONATE

KANJANAPORN SUKRUANG

THIDATIP JANJAROEN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารตั้งต้น  $\text{CaMnO}_3$  ระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตที่สกัดจากเปลือกไข่และแคลเซียมคาร์บอเนตสำเร็จรูป

Comparison Of Thermoelectric Material Performance From  $\text{CaMnO}_3$  Substrates Between Calcium Carbonate Extracted From Eggshell And Finished Calcium Carbonate

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวกาญจนาภรณ์ สุขเรือง รหัสนักศึกษา 58051029

นางสาวธิดาทิพย์ จันทระเจริญ รหัสนักศึกษา 58051077


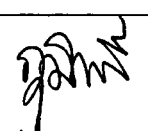
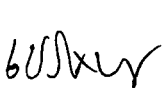
**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

**ภาควิชา** ฟิสิกส์

**ปีการศึกษา** 2561

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการคุมสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.รัชก สมนพรเสนต์ กรรมการ	
อาจารย์ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์. กรรมการ	
รศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<b>หัวข้อโครงการพิเศษ</b>	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารตั้งต้น $\text{CaMnO}_3$ ระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตที่สกัดจากเปลือกไข่และแคลเซียมคาร์บอเนตสำเร็จรูป
<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นางสาวกาญจนาภรณ์ สุขเรือง รหัสนักศึกษา 58051029 นางสาวธิตาทิพย์ จันทระเจริญ รหัสนักศึกษา 58051077
<b>ปริญญา</b>	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
<b>ภาควิชา</b>	ฟิสิกส์
<b>คณะ</b>	วิทยาศาสตร์
<b>มหาวิทยาลัย</b>	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
<b>ปีการศึกษา</b>	2561
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	รศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารตั้งต้น  $\text{CaMnO}_3$  ระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตที่สกัดจากเปลือกไข่และแคลเซียมคาร์บอเนตสำเร็จรูป โดยมีการสกัดแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ไก่เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้น 3 วิธี คือวิธีการละลาย  $\text{NaOH}$  กับเปลือกไข่ไก่เพื่อสลายเยื่อหุ้มไข่ วิธีลอกเยื่อหุ้มไข่ด้วยมือ และวิธีไม่ลอกเยื่อหุ้มไข่เลย และใช้แมงกานีสออกไซด์บริสุทธิ์ จากนั้นนำไปสังเคราะห์สารประกอบเทอร์โมอิเล็กทริก  $\text{CaMnO}_3$  ด้วยปฏิกิริยาของแข็ง (Solid state reaction) โดยใช้อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 3 เงื่อนไขไปเชื่อมขั้วไฟฟ้า และทดสอบไฟฟ้าเบื้องต้นพบว่า ขั้วไฟฟ้าที่เคลือบด้วยเงินดีกว่าขั้วไฟฟ้าที่ไม่เคลือบเงิน และวิธีลอกเยื่อหุ้มไข่ด้วยมือเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการสกัดแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ไก่

**คำสำคัญ :** แคลเซียมคาร์บอเนต ปฏิกิริยาของแข็ง เปลือกไข่ไก่ เทอร์โมอิเล็กทริก

<b>Title</b>	Comparison Of Thermoelectric Material Performance From $\text{CaMnO}_3$ Substrates Between Calcium Carbonate Extracted From Eggshell And Finished Calcium Carbonate
<b>Students</b>	Miss.Kanjanaporn Sukruang Student ID 58051029 Miss.Thidatip Janjaroen Student ID 58051077
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)
<b>Department</b>	Physics
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2018
<b>Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr.Chesta Ruttanapun

### Abstract

This special project is made to compare the performance of thermoelectric material from  $\text{CaMnO}_3$  precursor. Between the calcium carbonate extracted from the eggshell and the finished calcium carbonate. Calcium carbonate is extracted from eggshells to be used as a precursor to three methods: how to melt NaOH with a chicken eggshell to break the membrane. How to peel the membrane by hand, and the method does not peel the egg, and then use the pure manganese oxide, then lead the synthesis of the thermoplastic  $\text{CaMnO}_3$  compounds with a solid reaction (Solid state reaction), using temperatures 1,200 degrees Celsius for 12 hours, then take the thermoplastic material. The 3 dielectric conditions to weld electrodes and preliminary electrical test showed that the electrodes are coated with a better silver, non-coated silver electrode, and how to peel the membrane by hand is the best way to extract calcium carbonate from eggshells.

**Keywords** : calcium carbonate, Solid state reaction, eggshells, thermoelectric

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ รศ.ดร. เสรษฐา รัตนพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในงานวิจัยและท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย ขอขอบคุณ นายชัยวัฒน์ พรหมเพชร นักศึกษาปริญญาเอก ที่ได้ให้ความรู้ความเข้าใจในการใช้อุปกรณ์ต่างๆภายในห้องแล็บ และได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย ขอขอบคุณ นางสาววรรณิสา ทองสัมฤทธิ์ นักศึกษาปริญญาโท ที่คอยชี้แนะให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา ขอขอบคุณป้าลุงร้านขายข้าวไข่เจียวเก๊กซวย 1 ที่อนุเคราะห์เปลือกไข่ทั้งหมดที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณพี่ เพื่อน ที่ได้เอย่านามา ณ ที่นี้ ด้วยที่ให้ความช่วยเหลือซึ่งกันและกันเสมอมาตั้งแต่ต้นจนจบ

สำหรับคุณงานความดีอันใดที่เกิดจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการพิเศษเล่มนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาหาความรู้เป็นอย่างยิ่ง

กาญจนาภรณ์ สุขเรือง

ธิดาทิพย์ จันทระเจริญ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญ(ต่อ).....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
สารบัญภาพ(ต่อ).....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 เปลือกไข่.....	4
2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต.....	5
2.3 แมงกานีสออกไซด์.....	6
2.4 เทอร์โมอิเล็กทริก.....	6
2.4.1 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	6
2.4.2 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	10
2.4.3 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	11
2.4.4 โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก.....	12
2.4.5 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	12
2.5 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุโครงสร้างและลักษณะพื้นฐาน วิทยา.....	13
2.5.1 X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF).....	13
2.5.2 X-ray Diffractometer (XRD).....	15
2.5.3 กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM).....	16
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>18</b>
3.1 สารเคมีวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	18

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	21
3.2.1 วิธีการสังเคราะห์ $\text{CaCO}_3$ .....	22
3.2.2 การสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ $\text{CaMnO}_3$ จากสารตั้งต้น $\text{CaCO}_3$ และ $\text{MnO}_2$ โดยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง.....	25
3.3 การเชื่อมขั้วไฟฟ้าด้วยโลหะนำไฟฟ้า.....	29
3.4 วิธีการทดลอง.....	30
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>32</b>
4.1 สมบัติเชิงโครงสร้าง.....	32
4.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	32
4.1.2 การวิเคราะห์โดยเครื่อง Wavelength Dispersive X-ray fluorescence spectrometer.....	34
4.1.3 การตรวจสอบพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope, SEM).....	37
4.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้สารตั้งต้นจากเปลือกไข่.....	41
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>46</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>48</b>
<b>เอกสารอ้างอิง(ต่อ).....</b>	<b>49</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>50</b>
ภาคผนวก ก.....	51
ภาคผนวก ข.....	60
ภาคผนวก ค.....	67
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>73</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงขั้นตอนและแผนการดำเนินงานวิจัย.....	3
2.1 องค์ประกอบของเคมีทางเปลือกไข่.....	4
3.1 ตารางแสดงสารเคมีวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	18
3.2 สรุปรูปปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ $\text{CaCO}_3$ .....	26
3.3 แสดง step การตั้งเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา.....	29
4.1 ผลการทดสอบจากเครื่องWDXRFเงื่อนไขที่1.....	35
4.2 ผลการทดสอบจากเครื่องWDXRFเงื่อนไขที่2.....	35
4.3 ผลการทดสอบจากเครื่องWDXRFเงื่อนไขที่3.....	36
4.4 สันฐานวิทยาของผงแคลเซียมแมงกานีสออกไซด์จากการเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากเงื่อนไขของสารตั้งต้นที่มาจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการลอกเยื่อหุ้มเปลือกไข่.....	37
4.5 สันฐานวิทยาของผงแคลเซียมแมงกานีสออกไซด์จากการเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากเงื่อนไขของสารตั้งต้นที่มาจาก การลอกเยื่อหุ้มไข่ด้วยมือ.....	38
4.6 สันฐานวิทยาของผงแคลเซียมแมงกานีสออกไซด์จากการเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากเงื่อนไขของสารตั้งต้นที่มาจากไม่มีการลอกเยื่อหุ้ม.....	40

## สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 เปลือกไข่และเยื่อหุ้มไข่.....	4
2.2 Thomas Johann Seebeck.....	7
2.3 การทดลองของ Thomas Johann Seebeck.....	7
2.4 ปรากฏการณ์ซีเบค.....	8
2.5 ปรากฏการณ์เพลเทียร์.....	9
2.6 หลักการทำงานของเครื่องXRF.....	14
2.7 หลักการทำงานของเครื่องXRD.....	16
2.8 กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด.....	17
3.1 การเตรียมเปลือกไข่.....	22
3.2 แสดงการละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)พร้อมต้ม.....	22
3.3 แสดงการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	23
3.4 เตรียม Ball milling.....	23
3.5 แสดงการอบหลังการ Ball milling.....	23
3.6 ได้ผง CaCO <sub>3</sub> .....	24
3.7 ลอกเยื่อหุ้มไข่ด้วยมือ.....	24
3.8 แสดงหลังการอบแบบไม่ลอกเยื่อ.....	25
3.9 บดเป็นชิ้นเล็กเพื่อเตรียม Ball milling.....	25
3.10 รูปลูกภาพแสดง (ก) เตรียม Ball milling (ข) อบไล่ความชื้น.....	27
3.11 แสดงการเผาและหลังการเผา.....	27
3.12 บดให้ละเอียดแล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดสาร.....	28
3.13 แสดงการเผาซินเตอร์.....	28
3.14 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้จากเงื่อนไขการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการลอกเยื่อ(ก) วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้จากเงื่อนไขการลอกเยื่อด้วยมือ(ข) วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้จาก เงื่อนไขไม่มีการลอกเยื่อ(ค).....	29
3.15 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล.....	30
3.16 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	30
3.17 Set up การทดลอง.....	31
4.1 กราฟแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CaCO <sub>3</sub> ที่เป็นผงยังไม่ผ่านกระบวนการ การเผา.....	33
4.2 กราฟแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CaMnO <sub>3</sub> แคลไซต์ที่.....	34

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้าของทั้งสามเงื่อนไขโดยที่ข้าว ไม่มีการเคลือบด้วยเงิน.....	41
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิกับความต่างศักย์ของทั้งสามเงื่อนไขโดยที่ข้าว ไม่มีการเคลือบด้วยเงิน.....	42
4.5 กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้าของทั้งสามเงื่อนไขโดยที่ข้าวมีการ เคลือบด้วยเงิน.....	42
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิกับความต่างศักย์ของทั้งสามเงื่อนไขโดยที่ข้าว มีการเคลือบด้วยเงิน.....	43
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิกับกระแสของเงื่อนไขการลอกเยื่อด้วย มือเมื่อ ระหว่างที่ข้าวโลหะมีการเคลือบด้วยเงินและไม่มีการเคลือบด้วยเงิน.....	43
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิกับความต่างศักย์สูงสุดของเงื่อนไขการลอก เยื่อด้วยมือระหว่างที่ข้าวโลหะมีการเคลือบด้วยเงินและไม่มีการเคลือบด้วยเงิน.....	44
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับกระแส ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีสารตั้ง ต้นมาจาก $\text{CaCO}_3$ จากการลอกเยื่อด้วยมือ กับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่สารตั้งต้น $\text{CaCO}_3$ สำเร็จรูป.....	44
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับกระแส ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีสารตั้ง ต้นมาจาก $\text{CaCO}_3$ จากการลอกเยื่อด้วยมือ กับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่สารตั้งต้น $\text{CaCO}_3$ สำเร็จรูป.....	45

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$\text{CaCO}_3$	แคลเซียมคาร์บอเนต
$\text{MnO}_2$	แมงกานีสออกไซด์
$\text{CaMnO}_3$	แคลเซียมแมงกานีสออกไซด์

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันมีแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้น ในขณะที่แหล่งพลังงานหลักมีอยู่อย่างจำกัด จึงหันมาให้ความสนใจกับพลังงานทางเลือก แต่ยังมีขีดจำกัดเนื่องด้วยสภาพภูมิประเทศ และสภาพภูมิอากาศไม่เอื้ออำนวย เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ มีแสงแดดได้เพียงตอนกลางวันและความเข้มแสงที่ไม่สม่ำเสมอในแต่ละวัน พลังงานน้ำ ซึ่งผันแปรตามฤดูกาล พลังงานลม มีความเร็วลมที่ไม่สม่ำเสมอและสามารถใช้ได้เพียงบางพื้นที่ ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาค้นคว้าถึงพลังงานทางเลือกใหม่

เทอร์โมอิเล็กทริกคือ การเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน จึงเป็นเทคโนโลยีพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากแหล่งพลังงานความร้อนมีอยู่มาก ความร้อนที่ได้จากธรรมชาติเช่น น้ำพุร้อน ความร้อนจากดวงอาทิตย์ ความร้อนจากพื้นถนน รวมถึงความร้อนเหลือทิ้ง เช่น ความร้อนจากยานพาหนะ โรงงานอุตสาหกรรม คอมพิวเตอร์แอร์ ข้อดีคือการใช้ความร้อนเหลือทิ้งมาทำให้เกิดประโยชน์โดยสามารถผลิตไฟฟ้าได้ โดยการผันพลังงานจะอาศัยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาสร้างเป็นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล จากการศึกษา งานวิจัยพบว่า  $\text{CaMnO}_3$  มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

แคลเซียมคาร์บอเนตสำเร็จรูปตามท้องตลาดมีราคาที่สูง ผู้วิจัยได้ศึกษาโครงสร้างของเปลือกไข่ และทราบว่า โครงสร้างส่วนใหญ่ของเปลือกไข่เป็นผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตโดยมีประมาณ 98.2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเปลือกไข่ [1] ซึ่งสามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้ อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่อยู่ใกล้ตัว ง่าย และมีราคาถูก สามารถสกัดต้นทุนได้ ผู้วิจัยจึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตสำเร็จรูปและแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ หากมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงหรือดีกว่าก็สามารถนำมาแทนกันได้

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาและสังเคราะห์  $\text{CaCO}_3$  จากเปลือกไข่
- 2) เพื่อศึกษาและสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก  $\text{CaMnO}_3$  โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction method)

3) เพื่อศึกษาและสร้างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจากสารประกอบ  $\text{CaMnO}_3$  ที่สกัดได้  $\text{CaCO}_3$  จากเปลือกไข่ เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ  $\text{CaCO}_3$  สำเร็จรูป

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) สังเคราะห์ผงผลึก  $\text{CaCO}_3$  จากเปลือกไข่ พร้อมตรวจสอบโครงสร้างผลึก
- 2) สังเคราะห์สารประกอบ  $\text{CaMnO}_3$  ที่เป็นสารตั้งต้นจาก  $\text{CaCO}_3$  ที่สกัดจากเปลือกไข่ผสมกับ  $\text{MnO}_2$  โดยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง (Solid state reaction method) แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึก
- 3) สร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสารประกอบ  $\text{CaMnO}_3$  ที่มีสารตั้งต้นจาก  $\text{CaCO}_3$  ที่สกัดจากเปลือกไข่ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ  $\text{CaCO}_3$  สำเร็จรูป

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้องค์ความรู้ใหม่ๆ ในการทำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  จากเปลือกไข่
- 2) ได้สังเคราะห์และศึกษาสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีสารตั้งต้นจาก  $\text{CaCO}_3$  ที่สกัดจากเปลือกไข่ และ  $\text{CaCO}_3$  สำเร็จรูป
- 3) ได้ทราบว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีสารตั้งต้นเป็น  $\text{CaCO}_3$  ที่สกัดจากเปลือกไข่กับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีสารตั้งต้นเป็น  $\text{CaCO}_3$  สำเร็จรูปว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงมากเพียงใด
- 4) ได้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในอนาคต

### 1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาเครื่องมือต่างๆภายในห้อง LAB
- 2) ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก
- 3) เรียนรู้กระบวนการสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 4) สังเคราะห์ผงผลึก  $\text{CaCO}_3$  จากเปลือกไข่พร้อมตรวจสอบโครงสร้างผลึก
- 5) สังเคราะห์  $\text{CaCO}_3$  ที่สกัดจากเปลือกไข่ผสมกับ  $\text{MnO}_2$  โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction method)
- 6) สร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล  $\text{CaMnO}_3$
- 7) ทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้  $\text{CaCO}_3$  ที่สกัดจากเปลือกไข่และวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้  $\text{CaCO}_3$  สำเร็จรูป
- 8) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เปลือกไข่ไก่ [1]

เปลือกไข่ (Egg shell) คือ ส่วนที่อยู่ชั้นนอกสุดของไข่ไก่ มีลักษณะแข็งแรงแต่เปราะ โดยมีชั้นเยื่อหุ้มไข่ที่ติดอยู่กับเปลือกไข่ เพื่อห่อหุ้มส่วนที่เป็นของเหลวภายในซึ่งจะเจริญเติบโตเป็นตัวต่อไป โดยเปลือกไข่ของสัตว์ปีกส่วนใหญ่มีองค์ประกอบหลักคือแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) 98.2% แคลเซียมฟอสเฟต ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) 0.9% และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) 0.9% ในส่วนของเยื่อหุ้มไข่มีองค์ประกอบหลักคือสารอินทรีย์ 70% ซึ่งประกอบไปด้วยโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต สารอินทรีย์ 10% และความชื้น 20%



รูปที่ 2.1 เปลือกไข่และเยื่อหุ้มไข่

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่

แร่ธาตุ	% (โดยน้ำหนัก)		
	เปลือกไข่ไก่	เปลือกไข่เป็ด	เปลือกไข่นกกระทา
$\text{CaCO}_3$	99.0	96.5	97.3
S	0.1	1.2	0.4
Mg	0.5	0.1	1.0
P	0.2	0.5	1.1
K	-	0.0839	-

## 2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) [2]

แคลเซียมคาร์บอเนต หรือหินปูน เป็นสารธรรมชาติที่เกิดจากการตกตะกอน และสะสมตัวของหินในทะเล เปลือกหอย ปะการัง กระดูกสัตว์ พบมากตามธรรมชาติในรูปของหินปูน และ แร่แคลไซต์ (Calcite) หรือ แคลสปาร์ (Calspar) ถือเป็นสารตั้งต้นสำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงการนำมาใช้ในภาคครัวเรือน และการเกษตร

การเกิดสารประกอบคาร์บอเนต (Lime Carbonation) เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) กับน้ำ ดังสมการ  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

แคลเซียมคาร์บอเนตที่พบในหินหรือสินแร่ธรรมชาติ แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. หินคาร์บอเนต (carbonate rock) เป็นหินที่พบในธรรมชาติที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่
2. แร่แคลไซต์ (calcite) เป็นแร่ที่พบในธรรมชาติ มีองค์ประกอบหลักของแคลเซียมคาร์บอเนต มีสูตรทั่วไปเหมือนหินปูน คือ  $\text{CaCO}_3$  ประกอบด้วย CaO 56% และ  $\text{CO}_2$  44% อยู่ในรูปผลึกต่างๆที่มีชื่อเรียกต่างกัน เช่น ด็อกทูธสปาร์ (Dogtoothspar), ไอซ์แลนด์สปาร์ (Iceland Spar), เนลเฮดสปาร์ (Nailhead Spar) และซาตินสปาร์ (Satin Spar)

### การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต

1. การผลิตจากแหล่งแร่ธรรมชาติ แบ่งเป็น 2 วิธี คือ
  - 1.1 การนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาบดซึ่งเรียกว่า Ground Calcium Carbonate (GCC)
  - 1.2 การนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมา ตกผลึกใหม่ เรียกว่า Precipitated Calcium Carbonate (PCC)
2. การสังเคราะห์ แบ่งเป็น 3 วิธี คือ
  - 2.1 Solvey Process ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
  - 2.2 Sodium Hydroxide Process
  - 2.3 Carbonation Process

การสังเคราะห์ทั้ง 3 วิธี จะมีวิธี Carbonation Process เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สามารถให้ผลิตภัณฑ์  $\text{CaCO}_3$  ได้โดยตรง ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- Calcination :  $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$
- Hydration :  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2$
- Carbonation :  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

## 2.3 แมงกานีสไดออกไซด์ (Manganese oxide) [3]

แมงกานีสมีหลากหลายชนิด ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของออกไซด์และไฮดรอกไซด์ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มักมีแมงกานีสออกไซด์ (MnO) เป็นองค์ประกอบแร่แมงกานีสชนิดไพโรลูไซต์เป็นชนิดที่พบได้มากที่สุดในธรรมชาติ มักมีสีดำหรือสีน้ำตาล แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO<sub>2</sub>) มักนิยมใช้สำหรับการผลิตแบตเตอรี่แห้ง เช่น แบตเตอรี่อัลคาไลน์และแบตเตอรี่ซิงค์คาร์บอน

ประโยชน์ของแมงกานีส

1. ในทางโลหกรรม โดยนำมาผสมกับเหล็ก เพื่อให้เหล็กนั้นมีความเหนียว ยืดหยุ่น และคงทนยิ่งขึ้น เช่น รางรถไฟ หัวชุด หัวเจาะเหล็กทุบ ฯลฯ นอกจากนี้ยังใช้ประโยชน์ในการทำให้เหล็กบริสุทธิ์ยิ่งขึ้น
2. ใช้ในทางโลหกรรม ได้แก่
  - อุตสาหกรรมประกอบถ่านหินไฟฉาย
  - อุตสาหกรรมเคมีบางประเภท เช่น ในการเตรียมด่างทับทิมซึ่งใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรค ยารักษาเนื้อไม้ให้คงทนถาวรเตรียมสารที่ใช้ในการฟอกหนัง ย้อมหนังและใช้ผสมเข้าไปในอาหารไก่
  - การผลิตวัสดุภัณฑ์เคมีจำต้องใช้แร่แมงกานีสเป็นตัวสำคัญ เช่น การทำสี ปุ๋ยสังเคราะห์ผสมในการทำอิฐแมงกานีสจะทำให้อิฐทนความร้อนสูง เป็นต้น

## 2.4 เทอร์โมอิเล็กทริก

เทอร์โมอิเล็กทริก เกิดจากการรวมคำระหว่างคำว่า “เทอร์โม (thermo)” ที่มีความหมายว่า ความร้อน และคำว่า “อิเล็กทริก (electric)” ที่มีความหมายว่าไฟฟ้า ดังนั้นจึงเป็น “ความร้อนและไฟฟ้า”

### 2.4.1 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่สามารถเปลี่ยนรูปแบบพลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยจะทำการเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ในการผันพลังงานจะอาศัยวัสดุตัวกลางที่มีสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก เรียกว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric materials) กล่าวคือ เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างปลายทั้งสองข้าง จะเกิดการถ่ายเทอุณหภูมิจากสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ คือการสั่นของอนุภาคโฟนอน (phonon) และการเคลื่อนที่ของพาหะทั้งอิเล็กตรอน (electron) และโฮล (hole) ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจะได้พลังงานไฟฟ้าออกมา ในขณะที่เดียวกันยังสามารถผันกลับจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้ โดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก จะมี

การถ่ายเทความต่างศักย์ไฟฟ้าจากความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำ ทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิขึ้นที่ปลายทั้งสองข้างของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และได้พลังงานความร้อนในที่สุด

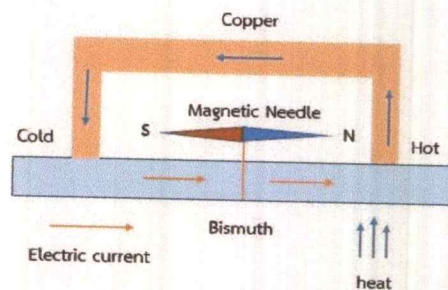
#### 2.4.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) [5]

ในปีค.ศ.1821 โทมัส โยฮัน ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) นักฟิสิกส์ชาวเอสโตเนีย กล่าวว่า “เมื่อให้ความร้อนที่รอยต่อของตัวนำสองชนิดจะเกิดกระแสไหลในวงจรปิด”



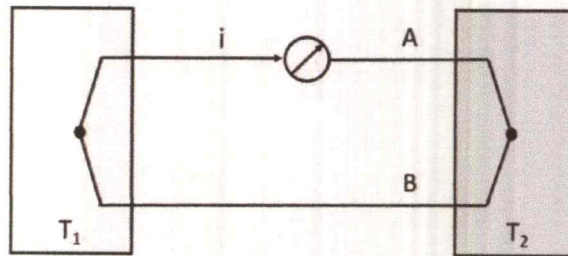
รูปที่ 2.2 Thomas Johann Seebeck [6]

เขาได้ค้นพบโดยบังเอิญจากการทดลอง เมื่อนำโลหะตัวนำต่างชนิดกันสองตัว คือบิสมัทกับทองแดงมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกัน แล้วให้ความร้อนที่จุดต่อด้านหนึ่ง ปรากฏว่าสามารถทำให้เข็มทิศเบนได้ ในตอนแรกซีเบคเข้าใจว่าเป็นอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจากความต่างของอุณหภูมิ ในภายหลังซีเบคได้เข้าใจแล้วว่าที่เข็มทิศเบนได้ เป็นผลเนื่องจากอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร โดยแรงที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปิดได้นั้น เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิมบนปลายรอยต่อของโลหะต่างชนิดกัน โดยแรงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า และได้เรียกปรากฏการณ์ที่ได้ถูกค้นพบว่า ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) มักถูกนำมาใช้สำหรับการเป็นอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า ซึ่งถูกเรียกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric power generator : TEG)

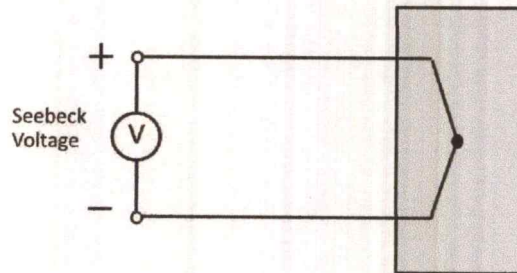


รูปที่ 2.3 การทดลองของโทมัส โยฮัน ซีเบค

สามารถสรุปการค้นพบได้ว่า เมื่อโลหะนำไฟฟ้าสองชนิดถูกต่อเข้าด้วยกัน และปลายทั้งสองด้านของรอยต่อมีอุณหภูมิแตกต่างกันแล้ว ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรของเส้นลวดดังรูป (ก) ค่าของกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง และเมื่อเป็นวงจรเปิดจะเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น เรียก แรงดันซีเบค (Seebeck voltage) ดังรูป (ข) [7]



รูป (ก)



รูป (ข)

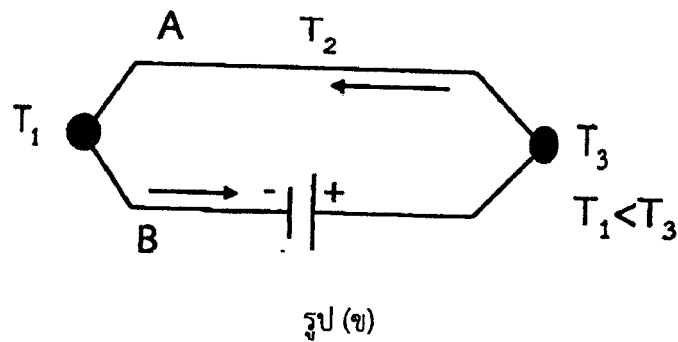
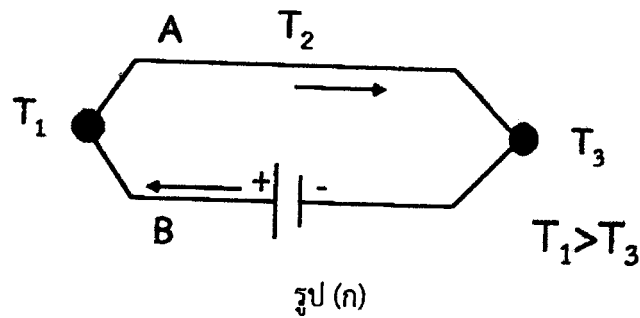
## รูปที่ 2.4 ปรากฏการณ์ซีเบค

### 2.4.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect)

ในปีค.ศ.1834 ฌอง ชาร์เลส อะธานเนส เพลเทียร์ (Jean Charles Athanase Peltier) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ได้กล่าวว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำ ความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้า”

ได้ทำการทดลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโลหะทองแดงและบิสมัทที่เชื่อมต่อกัน ผลที่เกิดขึ้น คือ รอยต่อระหว่างทองแดงและบิสมัทข้างหนึ่งจะร้อนขึ้น ส่วนอีกข้างหนึ่งจะเย็นลง อันเป็นผลจากคุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิดกลุ่มอิเล็กตรอน เคลื่อนผ่านโลหะด้านหนึ่งจะปลดปล่อยความร้อน (Heat evolved) แต่อีกด้านหนึ่งจะดูดกลืนความร้อน (Heat absorbed) ทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิ โดยเกิดขึ้นสอดคล้องกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกไหล

ผ่านเข้าไปในวงจร จะทำให้จุดต่อ  $T_1$  มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดต่อ  $T_3$  ดังรูป (ก) และเมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกไหลผ่านเข้าไปในวงจร จะทำให้จุดต่อ  $T_3$  มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดต่อ  $T_1$  ดังรูป (ข) [8] จากปรากฏการณ์นี้จึงถูกนำมาใช้เป็นตัวทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric cooler : TEC) และตัวทำความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric heater : TEH)



รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์เพลเทียร์

จากกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์จะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ซีเบคและปรากฏการณ์เพลเทียร์เป็นกระบวนการที่สามารถกำเนิดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำงานย้อนกลับกระบวนการ (Reverse operation) กันได้

#### 2.4.1.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)

ในปีค.ศ. 1854 วิลเลียม ทอมสัน (William Thomson) หรือ หลอด เคลวิน (Lord Kelvin) นักฟิสิกส์ชาวสก๊อต กล่าวว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้าสองจุดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันทิศทางการร้อนขึ้นอยู่กับการไหลของกระแสไฟฟ้าจากจุดเย็นไปจุดร้อนหรือจากจุดร้อนไปจุดเย็น”

ทอมสันได้ใช้ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ซีเบคและเพลเทียร์ ทำให้ทอมสันได้ค้นพบปรากฏการณ์ที่ 3 คือความร้อนสามารถถูกดูดหรือคายในวัสดุได้เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในวัสดุในขณะที่วัสดุมีการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมออยู่ (เกรเดียนต์อุณหภูมิ) โดยที่ความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงทั้งกระแสไฟฟ้าและเกรเดียนต์อุณหภูมิในวัสดุ ได้

เรียกค่าสัดส่วนคงที่นี้ว่า สัมประสิทธิ์ทอมสัน (Thomson coefficient) และได้เรียกการค้นพบนี้ว่า ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)

จากการศึกษาของทอมสัน ทำให้เข้าใจว่า ทั้งปรากฏการณ์ซีเบคและปรากฏการณ์เพลเทียร์ นั้นเป็นปรากฏการณ์ที่สัมพันธ์เกี่ยวโยงกัน โดยสัมพันธ์ผ่านเทอร์โมไดนามิกส์

#### 2.4.2 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก [9]

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่แสดงปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกได้ นั่นคือสามารถสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เกิดขึ้นได้ในตัวเอง เมื่อวัสดุมีความแตกต่างของอุณหภูมิในตัววัสดุตามปรากฏการณ์ซีเบค และยังสามารถเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิได้เมื่อมีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่วัสดุตามปรากฏการณ์เพลเทียร์ ปรากฏการณ์ทั้งสองย้อนกลับหากันได้ตามปรากฏการณ์ทอมสัน

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่รู้จักโดยทั่วไปมีดังต่อไปนี้ BiSb, CsBi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>Zn<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub>, CoSb<sub>3</sub>, PbTe Ag-Sb-Ge-Te (TAGS), Ag-Sb-Pb-Te (LAST), SiGe, Mg<sub>2</sub>Si, Mg<sub>2</sub>Sn, MnSi, FeSi, Bi<sub>2</sub>SrcCoO, NaCoO<sub>2</sub>, Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub>, SrTiO<sub>3</sub>, CaMnO<sub>3</sub>, ZnO วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ วัสดุชนิด-p (p-type) และ วัสดุชนิด-n (n-type) วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด-p (p-type) ได้แก่ Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, PbTe, PbTeSe, TAGS, SiGe, NaCoO<sub>2</sub>, Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> และวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด-n (n-type) ได้แก่ Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, PbTe, CoSb<sub>3</sub>, SiGe, ZnO, SrTiO<sub>3</sub>, CaMnO<sub>3</sub>

##### 2.4.2.1 ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

จากผลการวิจัยและพัฒนาด้านวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกประเภทสารกึ่งตัวนำ มีการพบว่า ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

- สามารถให้สภาพนำไฟฟ้าสูงแต่ เกิดความร้อนเพียงเล็กน้อย (ความร้อนเกิดจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า)
  - สามารถแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นความเย็นได้มาก
  - มีสภาพนำความร้อนต่ำ เพื่อป้องกันการนำความร้อนผ่านวัสดุ
- คุณสมบัติทั้ง 3 ประการ มีความสัมพันธ์กันด้วยหลักการทางฟิสิกส์ตามสมการที่ 2.1 สำหรับใช้บ่งชี้คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุ (Z)

$$Z = \frac{S^2 \sigma}{K} \quad (2.1)$$

โดยที่ S คือสัมประสิทธิ์ซีเบค (Volt/Kelvin)

$\sigma$  คือสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ (Ampere/Volt\*meter)

และ  $K$  คือสภาพนำความร้อนของวัสดุ (Watt/meter\*Kelvin)

โดยส่วนใหญ่แล้ว  $Z$  ขึ้นอยู่กับแต่ละช่วงอุณหภูมิของสารแต่ละประเภท ดังนั้นการพิจารณาค่า  $Z$  ต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านอุณหภูมิด้วย จึงมีการคูณสมการ 2.1 ด้วย  $T$  จะได้สมการใหม่กึ่งสมการ 2.2

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{K} T \quad (2.2)$$

### 2.4.3 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก [9]

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นโดยใช้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นส่วนประกอบและต้องสามารถแสดงปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกได้ คือต้องสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และสามารถผันกลับโดยเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้ด้วย

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกถูกประดิษฐ์ขึ้นมีลักษณะเป็นโมดูลเรียกว่า โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก โดยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก 1 ตัว ประกอบด้วยเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก 2 เซลล์ เป็นเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกชนิด-เอ็น จากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด-เอ็น และเป็นเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกชนิด-พี จากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิด-พี อย่างละ 1 เซลล์ นำมาต่อกับแผ่นตัวนำบาง เช่น ทองแดงบาง (Copper plate) เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านระหว่างเซลล์ทั้ง 2 ได้ แล้วประกบด้านบนกับด้านล่างของชุดเซลล์ดังกล่าว ด้วยแผ่นฉนวนไฟฟ้าแต่นำความร้อนได้ดี เช่น อลูมินาบาง (Alumina plate) เพื่อให้ความร้อนไหลผ่านได้และเพื่อเป็นฉนวนทางไฟฟ้า จากนั้นนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกหลายโมดูลมาประกอบกัน เป็นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

สำหรับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 2 ด้านการทำงาน คือ ด้านเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า และด้านเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

#### 2.4.3.1 ด้านเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า

เป็นด้านของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนความแตกต่างของอุณหภูมิในตัวอุปกรณ์ให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ ในด้านนี้จึงใช้สำหรับการเป็นอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า ถูกเรียกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric power generator : TEG) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถประยุกต์เป็นตัวผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนต่างๆได้

#### 2.4.3.2 ด้านเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

เป็นด้านของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนและก่อให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือด้านร้อน/เย็น) ที่แต่ละฝั่งของอุปกรณ์ อุปกรณ์ประเภทนี้สามารถแยกออกได้เป็น 2 รูปแบบคือเป็นตัวทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก

(Thermoelectric cooler : TEC) และเป็นตัวทำความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric heater : TEH)

#### 2.4.4 โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก [9]

โมดูลตัวกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจัดเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ทำความเย็น หรืออาจถูกนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งวัสดุที่จะนำมาใช้ทำเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้นั้น ตามหลักควรจะเป็นวัสดุที่มีค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิที่สูงหรือมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมาก ซึ่งคือวัสดุประเภทโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากมีประจุไฟฟ้าอิสระมาก มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ

##### 2.4.4.1 โครงสร้างของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

ลักษณะการเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำ หากต้องการนำโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ในการทำความเย็นหรือทำความร้อน โดยการนำสารกึ่งตัวนำแบบชนิดเอ็นหลายตัวมาต่อขนานกัน การไหลและทิศทางของด้านร้อนและด้านเย็นก็สามารถที่จะควบคุมได้ง่าย แต่ด้วยข้อจำกัดที่ว่า สารกึ่งตัวนำแบบชนิดเอ็นนั้นมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ

ดังนั้นหากต้องการให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ตามต้องการ จึงต้องมีการนำวัสดุกึ่งตัวนำแบบชนิดเอ็นหลายๆตัวมาต่ออนุกรมกัน แต่ข้อเสียของการนำวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลายๆตัวมาต่อกันนั้นยากในการควบคุมทิศทางของด้านร้อนและด้านเย็น ความร้อนส่วนหนึ่งจะไหลย้อนกลับมาทางด้านเย็นตามสายต่อระหว่างประจุบวกและประจุลบของวัสดุกึ่งตัวนำหรือเรียกว่า การลัดวงจรของความร้อนซึ่งเป็นการยากที่จะป้องกันการไหลย้อนกลับของความร้อน

#### 2.4.5 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก [9]

สามารถทำได้โดยการนำผงหรืออนุภาคมาอัดขึ้นรูปร่างแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงเพียงพอเพื่อที่จะทำให้อนุภาคเหล่านั้นเกาะกันและเกิดพันธะระหว่างกันขึ้น ขั้นตอนพื้นฐานที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังนี้

##### 1. การเตรียมวัสดุ

การเตรียมวัสดุในงานวิจัยนี้จะถูกเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง (Solid state reaction) เป็นวิธีการบดผสมแบบง่าย ๆ ของของแข็งของสารตัวอย่างตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยมี 2 แบบ คือแบบแห้งและแบบเปียก ซึ่งใช้การบดผสมแบบลูกบอล (Ball milling) วิธีนี้เตรียมโดยการนำสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งมาชั่งน้ำหนักให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการแล้วนำมาบดผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายน้อย แต่มีข้อเสียคือ ผลผลิตที่ได้มักมีความบริสุทธิ์ต่ำ ได้สารหายิบ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่ และอาจมีสารประกอบรูปอื่น ๆ เจือปนอยู่ เจือปนจากสารตั้งต้นหรือ

จากชุดอุปกรณ์ในการบด สิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อสมบัติต่างๆของสารที่ต้องการเตรียม โดยเฉพาะสมบัติทางไฟฟ้า

## 2. การขึ้นรูป

หลังจากที่เตรียมอนุภาคหรือผงของวัสดุแล้ว ขั้นตอนต่อไปนี้คือการขึ้นรูป สามารถทำได้ทั้งในสถานะที่แห้ง เหนียว นอกจากนี้ยังสามารถทำได้ทั้งที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิสูง กระบวนการขึ้นรูปมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การอัด (Pressing) การหล่อแบบ (Casting) และกระบวนการอื่นๆ นอกจากนี้ยังสามารถเติมสารตัวเติม (Additive) เพื่อช่วยในการขึ้นรูปดีขึ้นยกตัวอย่างเช่น ผสม binder ลงในวัสดุที่เป็นผง เพื่อช่วยการยึดเกาะในกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

### - การอัด (Pressing)

วัสดุในรูปของผง (Powder) สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัด (Pressing) ทั้งในสถานะแห้งหรือเหนียว กระบวนการอัดมีหลายประเภทด้วยกัน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงกระบวนการอัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือการอัดแกนเดียว (Uniaxial pressing) การอัดแกนเดียวเป็นกระบวนการอัดที่ง่ายที่สุด เริ่มต้นจากนำวัสดุใส่ลงแม่แบบ จากนั้นให้แรงอัดในแนวเดียวเพื่อให้ได้ชิ้นงานเนื้อแน่น ขั้นตอนสุดท้ายคือการถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ

## 3. การเผา Sintering

การเผาเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดย Sintering คือกระบวนการที่ทำให้อนุภาคของวัสดุเกิดพันธะระหว่างกัน โดยการแพร่ของของแข็งที่อุณหภูมิสูงมาก แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุ การแพร่ของอนุภาคจะเกิดขึ้นที่ระหว่งหน้าผิวสัมผัสของอนุภาค

## 2.5 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุ โครงสร้างและลักษณะสัมฐานวิทยา

### 2.5.1 X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF)

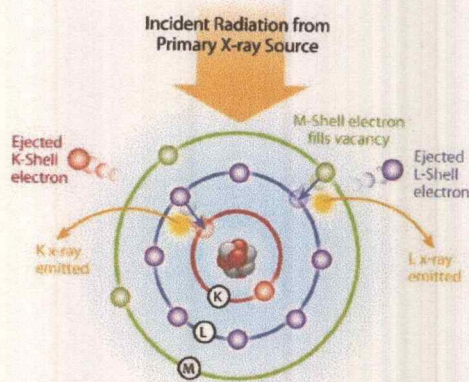
เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง

#### 2.5.1.1 หลักการทำงานและวิธีการวิเคราะห์

เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่าง จะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูป

ของโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งที่สภาวะนี้ อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray photon) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์” (Fluorescence)

พลังงานของรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมา จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนวงนอกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานกับระดับพลังงานของช่องว่างที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ รังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟลูออเรสเซนซ์จะเป็นรังสีเอ็กซ์ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ดังนั้นเทคนิค XRF จึงใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง อย่างไรก็ตามเทคนิค XRF จะไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุ 11 ธาตุแรกของตารางธาตุได้



รูปที่ 2.6 หลักการทำงาน XRF [10]

การคำนวณหาความยาวคลื่น (Wavelength,  $\lambda$ ) ของรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์จากสารตัวอย่าง จะทำได้โดยแทนค่าในสมการ

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.3)$$

ค่าความยาวคลื่นที่คำนวณได้สามารถชี้บอกได้ว่ารังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ของสารตัวอย่างประกอบด้วยธาตุใดบ้าง เทคนิคการวิเคราะห์นี้เรียกว่า Wavelength-dispersive XRF (WDXRF)

### 2.5.1.2 ข้อดีของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยเทคนิค XRF

1. มีสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ที่ได้เป็นค่าเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุซึ่งไม่แปรผันตามสถานะทางเคมีของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง
2. เทคนิคนี้จะไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-Destructive) ดังนั้นสามารถนำสารตัวอย่างกลับมาใช้ได้
3. วิธีการเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยากซับซ้อน
4. สามารถตรวจวิเคราะห์สารที่มีความเข้มข้นต่ำไปจนถึงสูงได้
5. มีความแม่นยำในการตรวจวิเคราะห์ดี

### 2.5.1.3 ความสามารถในการตรวจวิเคราะห์ของเครื่อง XRF รุ่น SRS3400

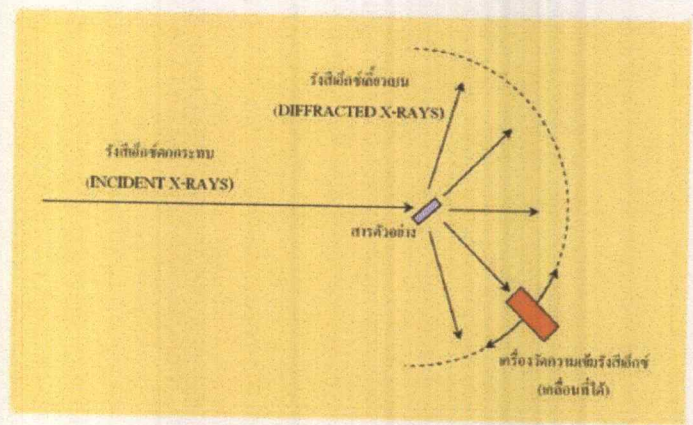
เครื่อง XRF สามารถตรวจวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างที่มีปริมาณตั้งแต่ 0.1 ppm ขึ้นไปในสารตัวอย่าง

## 2.5.2 X-ray Diffractometer (XRD) [11]

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง

### 2.5.2.1 หลักการทำงาน

เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ ที่ทราบความยาวคลื่น ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่ององศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของ XRD [12]

โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสี ที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ ก็แตกต่างกันไปด้วย ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิด จะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน

2.5.3 กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) [13]

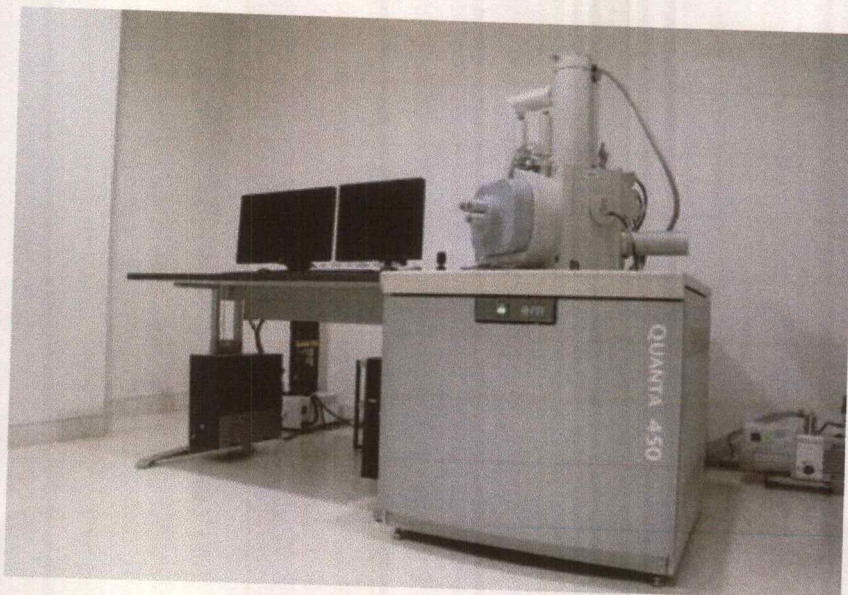
เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างจากการดิ่ง โดย Energy Dispersive Spectrometry (EDS) เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ ใน SEM ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้เพิ่มเติม

ลักษณะของผลที่ได้: ได้ภาพ 3 มิติจาก Secondary Electron (SE) หรือได้ภาพ 2 มิติจาก Back Scattered Electron (BSE) และธาตุต่างๆที่อยู่ในสารตัวอย่าง

การประยุกต์ใช้งาน: นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน กระเจิงกลับ (Back Scattered Electron) ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างที่ผ่านการดิ่งมา หรือเกิดความเสียหายมา

ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดสอบ: ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ หากเป็นแบบผง ใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น หากเป็นของแข็ง ควรเตรียมมาโดยมีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรแล้วแต่ภาชนะที่รองรับด้วย (มีขนาดเล็กจะดีกว่า เนื่องจากตัวอย่างจะสามารถถ่ายเท

อิเล็กทรอนิกส์กรวดได้ดีกว่าป้องกันการ Charging effects) ถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าอาจต้องมีการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองหรือคาร์บอน



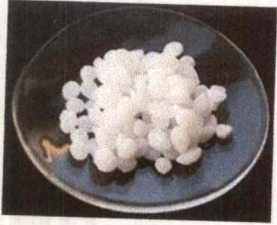



รูปที่ 2.8 กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด Scanning electron microscope (SEM) [14]

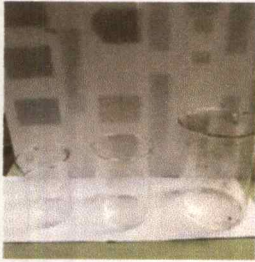

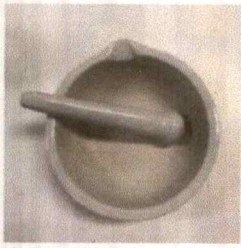


### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

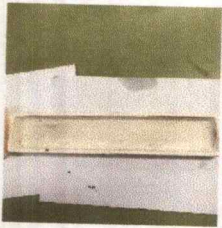

ในการจัดทำโครงการวิจัยเรื่อง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก  
ผู้จัดทำโครงการมีวิธีการดำเนินงานโครงการตามขั้นตอนต่อไปนี้

### 3.1 สารเคมีวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ลำดับ	ชื่ออุปกรณ์	รูปภาพประกอบ
1	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	
2	แอลกอฮอล์	
3	ผงแมงกานีสไดออกไซด์ MnO <sub>2</sub> (Reagent grade 99.0%)	
4	เปลือกไข่ไก่จากร้านขายไข่ เจียวเก็กี่ซอຍ1	

ลำดับ	ชื่ออุปกรณ์	รูปภาพประกอบ
5	เครื่องแก้วได้แก่ ปีกเกอร์ ปริมาตร 500 ml / 1000 ml	
6	เตาแผ่ให้ความร้อน (Hot plate) รุ่น C- MAG HS7 โดย บริษัท KA ประเทศจีน	
7	ถ้วยบดสารชนิด Agate	
8	เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม รุ่น ioneer	
9	เครื่องผสมสาร (Ball milling)	

ลำดับ	ชื่ออุปกรณ์	รูปภาพประกอบ
10	เตาเผาอุณหภูมิสูง (Hight Temperature furnace) ผลิตโดยบริษัท VESSTAR ประเทศเยอรมนี	
11	ตู้อบสารผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี	
12	เครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 30 ตัน ผลิตโดยบริษัท KC HYDRAURIC ประเทศไทย	
13	เครื่องอัดแรงดันสูง 5000 kPa	
14	ตู้ดูดควัน (fume hood) ผลิตโดยบริษัท design-after native ประเทศไทย	

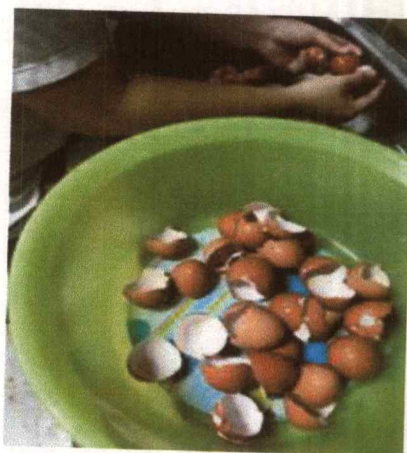
ลำดับ	ชื่ออุปกรณ์	รูปภาพประกอบ
15	ภาชนะสำหรับเผาสาร Crucible ใต้แก้ว ถ้วยอะลูมิน่า 50 ML	
16	กระดาษชั่งสาร (weighing paper) ขนาด 10*10 CM	
17	ภาชนะพลาสติก	
18	มัลติมิเตอร์ รุ่น Agilent 34461A ผลิตโดยบริษัท KEYSIGHT	

### 3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

ขั้นตอนนี้เป็นการทำตัววัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ยังไม่ได้เชื่อมขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกโดยเริ่มจากการเตรียมผงผลึกสารตั้งต้นจาก  $\text{CaCO}_3$  จากวิธีการต่างๆ การ Ball milling การทำอัตราส่วนของ  $\text{CaCO}_3$  กับ  $\text{MnO}_2$  เพื่อให้ได้ 50 กรัม การอัดขึ้นรูปและการเปลี่ยนสถานะของสารให้เป็นสถานะของแข็ง โดยวิธีกริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction method) ซึ่งมีรายละเอียดแสดงขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 3.2.1 วิธีการสังเคราะห์ $\text{CaCO}_3$

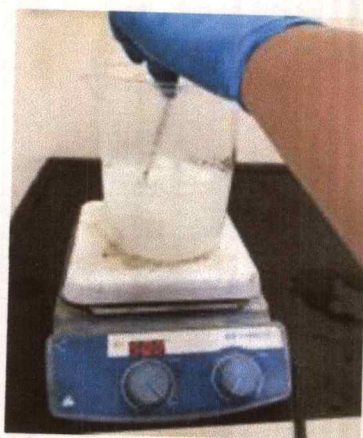
เป็นการสังเคราะห์  $\text{CaCO}_3$  จากเปลือกไข่เพื่อที่จะให้ได้ผลผลิตออกมา ซึ่งเปลือกไข่นั้นทางผู้วิจัยได้มาจากร้านขายข้าวไข่เจียวที่เก๊กชอย 1 จากนั้นนำเปลือกไข่ที่ได้มาล้างทำความสะอาด แล้วนำไปสู่กระบวนการการสังเคราะห์ซึ่งวิธีการสังเคราะห์ที่ผู้วิจัยได้ทดลองทำมี 3 วิธีที่จะแสดงต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 การเตรียมเปลือกไข่

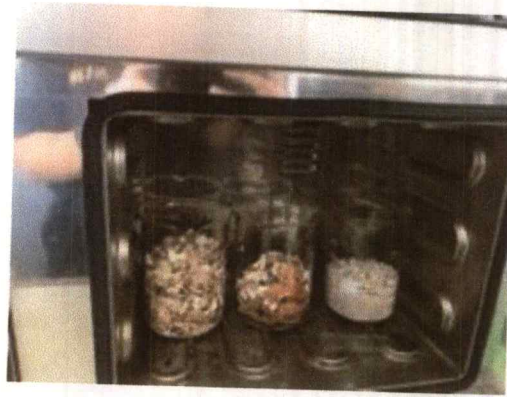
#### 3.2.1.1 การสังเคราะห์ผงผลึก $\text{CaCO}_3$ ด้วยสารละลาย $\text{NaOH}$ เพื่อลอกเยื่อออก

1. เริ่มต้นด้วยการละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ลงในน้ำแล้วนำไปวางบนเตาแผ้ให้ความร้อน (Hot plate) ตั้งอุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส รอจนเดือนจากนั้นนำเปลือกไข่ที่เตรียมไว้ค่อยค่อยเทใส่ลงภาชนะที่ต้มน้ำ ทิ้งไว้ 5 นาที



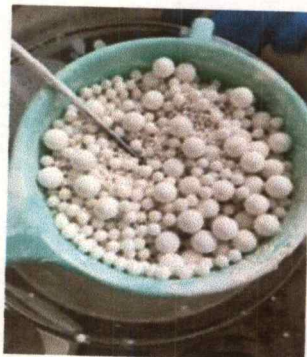
รูปที่ 3.2 แสดงการละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) พร้อมต้ม

2. นำเปลือกไข่ไปล้างน้ำเปล่าแล้วอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.3 แสดงการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

3. นำมาบดด้วยถ้วยบดสารบดพอยาบ แล้วนำไปใส่เครื่อง Ball milling เพื่อที่จะให้เนื้อของสารตัวอย่างละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



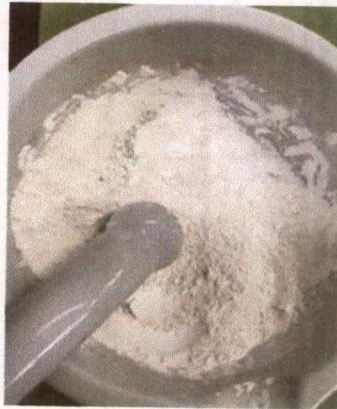
รูปที่ 3.4 เตรียม Ball milling

4. หลังจาก Ball milling เสร็จแล้วนำมาอบไล่ความชื้นอีกเป็นเวลาอีก 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 แสดงการอบหลังการ Ball milling

5. แล้วย้นำสารมาบดละเอียดอีกครั้งถือว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการสังเคราะห์ผงผลึก  $\text{CaCO}_3$  จากสารละลาย  $\text{NaOH}$



รูปภาพที่ 3.6 ได้ผง  $\text{CaCO}_3$

3.2.1.2 การสังเคราะห์ผงผลึก  $\text{CaCO}_3$  ด้วยวิธีการใช้มือเพื่อลอกเยื่อออกจากเปลือกไข่

1. นำเปลือกไข่มาต้มให้สุกแล้วลอกเยื่อหุ้มไข่ออกหลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  เพื่ออบไล่ความชื้น



รูปภาพที่ 3.7 ลอกเยื่อหุ้มไข่ด้วยมือ

2. จากนั้นนำเปลือกไข่มาบดพอหยาบ แล้วยนำไป Ball milling เพื่อให้สารตัวอย่างละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. นำตัวอย่างสารที่ Ball milling เสร็จแล้วนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลาอีก 12 ชั่วโมง

4. หลังจากอบเสร็จแล้วนำมาบดด้วยถ้วยบดสารให้ละเอียดเป็นผง

### 3.2.1.3 การสังเคราะห์ผงผลึก $\text{CaCO}_3$ ด้วยวิธีการไม่ลอกเยื่อ

1. นำเปลือกไข่มาอบที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น



รูปภาพที่ 3.8 แสดงหลังการอบแบบไม่ลอกเยื่อ

2. จากนั้นนำเปลือกไข่ที่อบแล้วมาบดพอหยาบ แล้วนำไปใส่เครื่อง Ball milling เพื่อที่จะให้สารตัวอย่างละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปภาพที่ 3.9 บดเป็นชิ้นเล็กเพื่อเตรียม Ball milling

3. นำตัวอย่างสารที่ Ball milling เสร็จแล้วนำไปอบไล่ความชื้นเป็นเวลาอีก 12 ชั่วโมง
4. หลังจากอบเสร็จแล้วนำมาบดให้ละเอียดเป็นผง

หลังจากที่เราทำการสังเคราะห์ผงผลึกได้ทั้งสามเงื่อนไขแล้วจึงนำสารตัวอย่างไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD)

### 3.2.2 การสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ $\text{CaMnO}_3$ จากสารตั้งต้น $\text{CaCO}_3$ และ $\text{MnO}_2$ โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1. เริ่มจากการนำเอาสารตัวอย่าง  $\text{CaCO}_3$  ที่ได้จากการสังเคราะห์มาหาอัตราส่วนกับ  $\text{MnO}_2$  โดย

จากสมการเริ่มต้น



หาน้ำหนักของสารตั้งต้น

สารที่ 1 : น้ำหนักของสาร  $\text{CaCO}_3 = 40.078 + 12.011 + (15.9994 \times 3) = 100.0872 \text{ g/mol}$

สารที่ 2 : น้ำหนักของสาร  $\text{MnO}_2 = 54.938 + (15.9994 \times 2) = 86.9368 \text{ g/mol}$

สารที่ 3 : น้ำหนักของสาร  $\text{CaMnO}_3 = 40.078 + 54.938 + (15.9994 \times 3) = 143.0142 \text{ g/mol}$

เมื่อได้ค่าที่ต้องการจึงทำการกำหนดให้สารที่ 3 มีค่าเป็น  $143.0142 = 50 \text{ g/mol}$  เพื่อเทียบให้สารที่ 1 และสารที่ 2 มีค่าเท่ากับสารที่สามซึ่งให้มีค่าเป็น 50 กรัม

จะได้เป็น

คิดสารที่ 1 จาก  $143.0142 = 50$

แล้วถ้าสารที่ 1 มีค่า  $100.0872$  จะเท่ากับเท่าไรใน  $50$  ของสารที่ 1 ทำการเทียบ  
บัญญัติไตรยางค์ จะได้  $\text{CaCO}_3 = 34.9920 \text{ g/mol}$

คิดสารที่ 2 จาก  $143.0142 = 50$

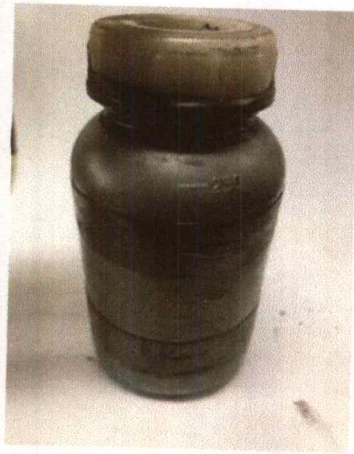
แล้วถ้าสารที่ 2 มีค่า  $86.9368$  จะเท่ากับเท่าไรใน  $50$  ของสารที่ 1 ทำการเทียบ  
บัญญัติไตรยางค์จะได้  $\text{MnO}_2 = 30.3940 \text{ g/mol}$

ตารางที่ 3.1 สรุปปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์  $\text{CaCO}_3$

สารตั้งต้น	ปริมาณสารที่ใช้ (กรัม)
$\text{CaCO}_3$	34.9920
$\text{MnO}_2$	30.3940

ค่าการผสมอัตราส่วนนั้นสามารถใช้กับ  $\text{CaCO}_3$  ที่เราสังเคราะห์มาทั้งสามเงื่อนไข

2. หลังจากที่ได้อัตราส่วนเรียบร้อยแล้วจึงทำการผสมสารตัวอย่างระหว่าง  $\text{CaCO}_3$  กับ  $\text{MnO}_2$  โดยใช้  $\text{CaCO}_3$  จากเงื่อนไขแรก ซึ่งสารตัวอย่างทั้งสามเงื่อนไขให้ทำวิธีเดียวกันนี้ จากนั้นนำเข้าเครื่องผสมสาร Ball milling เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เนื้อของสารนั้นผสมเข้ากันได้ดี หลังจากครบชั่วโมงแล้ว นำออกมาเข้าตูบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงนำมาบดให้ละเอียดด้วยบด



(ก)



(ข)

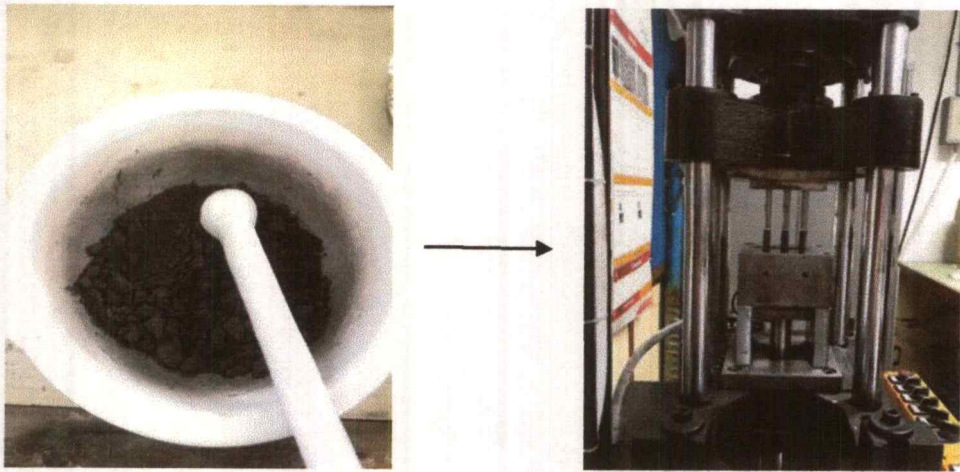
### 3.10 รูปภาพแสดง (ก) เตรียม Ball milling (ข) อบไล่ความชื้น

3. ทำการอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกจากนั้นนำไปเผาอบแรก (Calcine) เพื่อไล่ความชื้น สารอินทรีย์และก๊าซต่างๆ ด้วยอุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



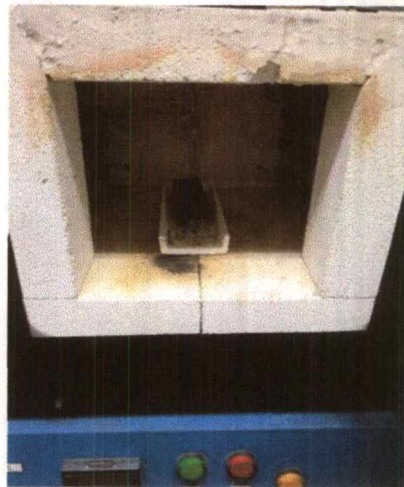
รูปภาพที่ 3.11 แสดงการเผาและหลังการเผา

4. นำสารที่ผ่านการเผาอบแรกแล้วมาบดให้ละเอียดเป็นเนื้อแป้งจากนั้นแล้วทำการอัดสาร ด้วยเครื่องอัดแรงดันสูง เป็นการอัดเพื่อขึ้นรูปวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้ได้รูปทรงกระบอก ซึ่งมีขนาด โดยใช้สารตัวอย่างต่อโมดูลหนึ่งตัวปริมาณ 4 กรัม ซึ่งในขั้นตอนนี้เราจะแบ่งสารตัวอย่างออกมาชนิดละ 5 กรัม เพื่อนำส่งไปตรวจสอบโครงสร้างผลึก (XRF) และวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน (SEM)



รูปภาพที่ 3.12 บดให้ละเอียดแล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดสาร

5. หลังจากที่อัดเรียบร้อยแล้วให้นำไปเผาอบสอง (sinter) เพื่อเป็นการขึ้นรูปวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกให้มีลักษณะเป็นของแข็งยึดเกาะกันมากขึ้น ซึ่งทำการเผาที่ 1150 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปภาพที่ 3.13 แสดงการเผาซินเตอร์

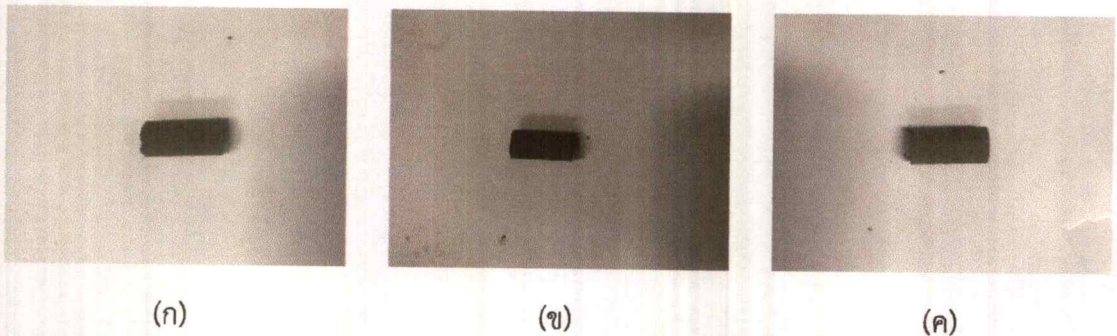
ซึ่ง  $\text{CaCO}_3$  ที่ได้มาจากทั้งสามเงื่อนไขให้ทำการขึ้นรูปวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกแบบเดียวกันนี้จนครบทั้งสามเงื่อนไขแล้วจึงนำไปสู่วิธีการถัดไป

ตารางที่ 3.2 เป็น step การตั้งเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา

step	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	Out put
1	200	20	90
2	400	20	90
3	600	20	90
4	800	20	95
5	1000	20	95
6	1150	15	100
7	1150	12 (ชม.)	100

หลังจากที่อุณหภูมิเป็นไปตามเวลาที่กำหนดแล้วเราจะปล่อยให้เครื่องเย็นลงเองตามธรรมชาติ (cool down)

6. ได้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งสามเงื่อนไข พร้อมทั้งจะนำไปสู่กระบวนการเชื่อมขั้ว



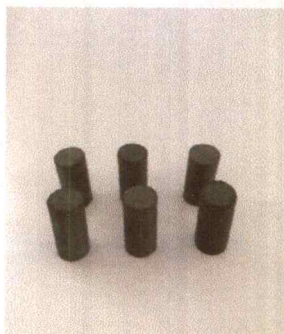
รูปภาพที่ 3.14 (ก) วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้จากเงื่อนไขการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการลอกเยื่อ (ข) วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้จากเงื่อนไขการลอกเยื่อด้วยมือ (ค) วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้จากเงื่อนไขไม่มีการลอกเยื่อหุ้ม

เนื่องจากผู้วิจัยได้มีสารตั้งต้นที่เป็นตัวสาร  $\text{CaCO}_3$  ที่มาจาก 3 เงื่อนไข แต่ขั้นตอนการสร้าง วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นมีขั้นตอนและวิธีการเดียวกันเลยเพียงแค่เปลี่ยนเงื่อนไขของ  $\text{CaCO}_3$

### 3.3 การเชื่อมขั้วไฟฟ้าด้วยโลหะนำไฟฟ้า

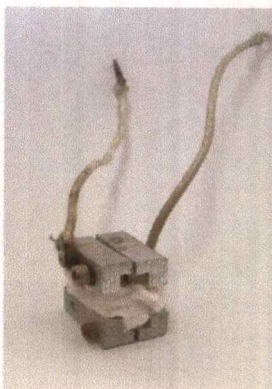
เป็นการต่อเชื่อมขั้วระหว่างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกกับขั้วโลหะเข้าด้วยกันซึ่งตัวขั้วโลหะที่เรา นำมาเชื่อมมีสองแบบคือขั้วโลหะที่ชุบเงินและขั้วโลหะที่ไม่ชุบเงินซึ่งมีขั้นตอนเหมือนกันดังต่อไปนี้

1. เตรียมเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 6 ตัว จากทั้ง 3 เซื่อนไซ เซื่อนไซละ 2 ตัว



รูปที่ 3.15 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

2. ขั้วโลหะ 6 คู่ โดยแบ่งออกเป็นขั้วโลหะที่ไม่ได้ชุบเงินกับชุบเงินอย่างละ 3 คู่
3. ประกอบขั้วโลหะกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเข้าด้วยกัน แล้วนำฉนวนมาปิดล้อมรอบวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 3.16 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

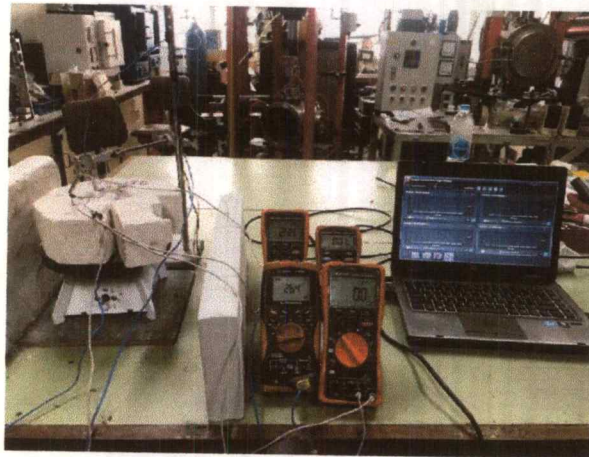
### 3.4 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจากสารตั้งต้นที่มีสารประกอบออกไซด์  $\text{CaCO}_3$  ที่สกัดจากเปลือกไข่ทั้ง 3 วิธี เพื่อทดสอบดูว่าสารตั้งต้นที่สกัดมาจากแต่ละวิธีนั้น ให้ประสิทธิภาพทางด้าน กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ และความต่างของอุณหภูมิว่าเป็นอย่างไร ซึ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ 1. ใช้ขั้วไฟฟ้าเคลือบด้วยเงิน 2. ใช้ขั้วไฟฟ้าไม่เคลือบเงิน จะเป็นไปตามขั้นตอนต่อไปนี้

**การทดลองที่ 1** เป็นการทดลองที่ใช้ขั้วไฟฟ้ามีการเคลือบด้วยเงิน ซึ่งจะทดลองนี้จะเป็นการหาค่าผลต่างของอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ โดยจะทดสอบวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 3 เจื่อนไซซึ่งได้แก่ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีสารตั้งต้นมาจากการกำจัดเยื่อด้วย NaOH, การลอกด้วยมือ และการไม่ลอกเยื่อ ซึ่งในการทดลองแต่ละแบบนี้จะมีขั้นตอนการทำเหมือนกัน

**ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้**

1. จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูป



**รูปที่ 3.17 Set up การทดลอง**

3. บันทึกค่าอุณหภูมิห้องฝักร้อนและเย็น กระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ที่อุณหภูมิห้อง
4. ให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึง 500 °C พร้อมบันทึกค่าอุณหภูมิห้องฝักร้อนและเย็น กระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์
5. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกของทั้ง 3 เจื่อนไซ

**การทดลองที่ 2** เป็นการทดลองที่ใช้ขั้วไฟฟ้าไม่มีการเคลือบด้วยเงิน ซึ่งจะทดลองนี้จะเป็นการหาค่าผลต่างของอุณหภูมิ กระแส และความต่างศักย์ โดยจะทดสอบวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 3 เจื่อนไซซึ่งได้แก่ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีสารตั้งต้นมาจากการกำจัดเยื่อด้วย NaOH, การลอกด้วยมือ และการไม่ลอกเยื่อ โดยมีขั้นตอนการทดลองเหมือนการทดลองที่ 1

## ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก  $\text{CaMnO}_3$  ที่มีเงื่อนไขของสารตั้งต้นที่แตกต่างกันแบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไขได้แก่ การสังเคราะห์ผงผลึก  $\text{CaCO}_3$  จากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, การสังเคราะห์ผงผลึก  $\text{CaCO}_3$  จากการลอกเยื่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการสังเคราะห์ผงผลึก  $\text{CaCO}_3$  โดยการไม่ลอกเยื่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากผู้ทดลองต้องการทราบว่าสารตั้งต้นชนิดไหนให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำจากสารตั้งต้นที่ซื้อมา ซึ่งจะมีหัวข้อการนำเสนอผลการทดลองดังนี้

### 4.1 สมบัติเชิงโครงสร้าง (Structure properties)

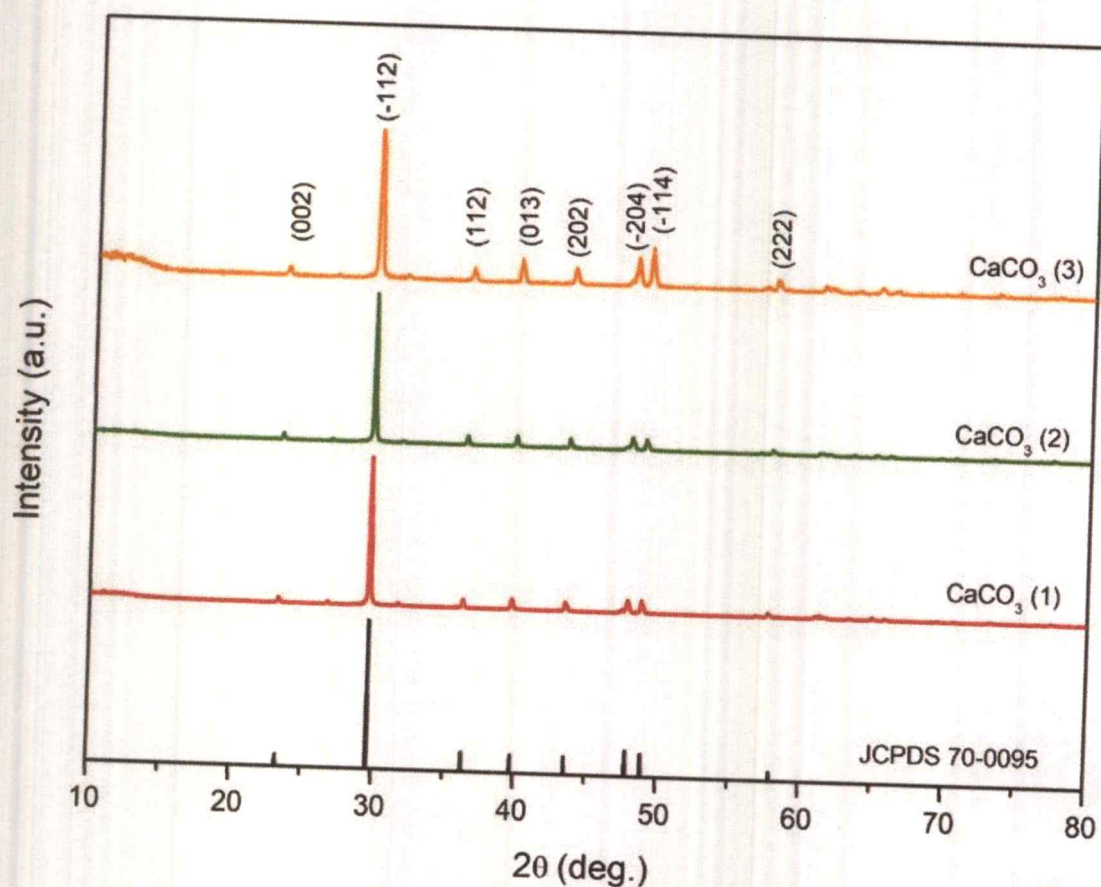
#### 4.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง แต่ในงานวิจัยของเราใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เพื่อดูแนวโน้มของสารประกอบที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นว่าใช่สารประกอบที่เราต้องการหาหรือไม่เมื่อเทียบกับสารประกอบอ้างอิงที่เราต้องการหา

##### 4.1.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ $\text{CaCO}_3$ ทั้ง 3 เงื่อนไข

เป็นการนำผงของ  $\text{CaCO}_3$  ที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์จากสามวิธีมาอบไล่ความชื้นและบดจนเป็นผง ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากเครื่อง XRD พบว่าผงผลึกมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับ  $\text{CaCO}_3$  ที่ปรากฏมุมเลี้ยวเบน เมื่อสังเกตจากกราฟที่ (4.1) พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเส้นสีแดงที่มาจากเงื่อนไขสารตั้งต้นการลอกมีเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เส้นสีเขียวมากจากเงื่อนไขสารตั้งต้นที่มีการลอกเยื่อด้วยมือ และเส้นสีส้มมาจากเงื่อนไขสารตั้งต้นที่ไม่มี

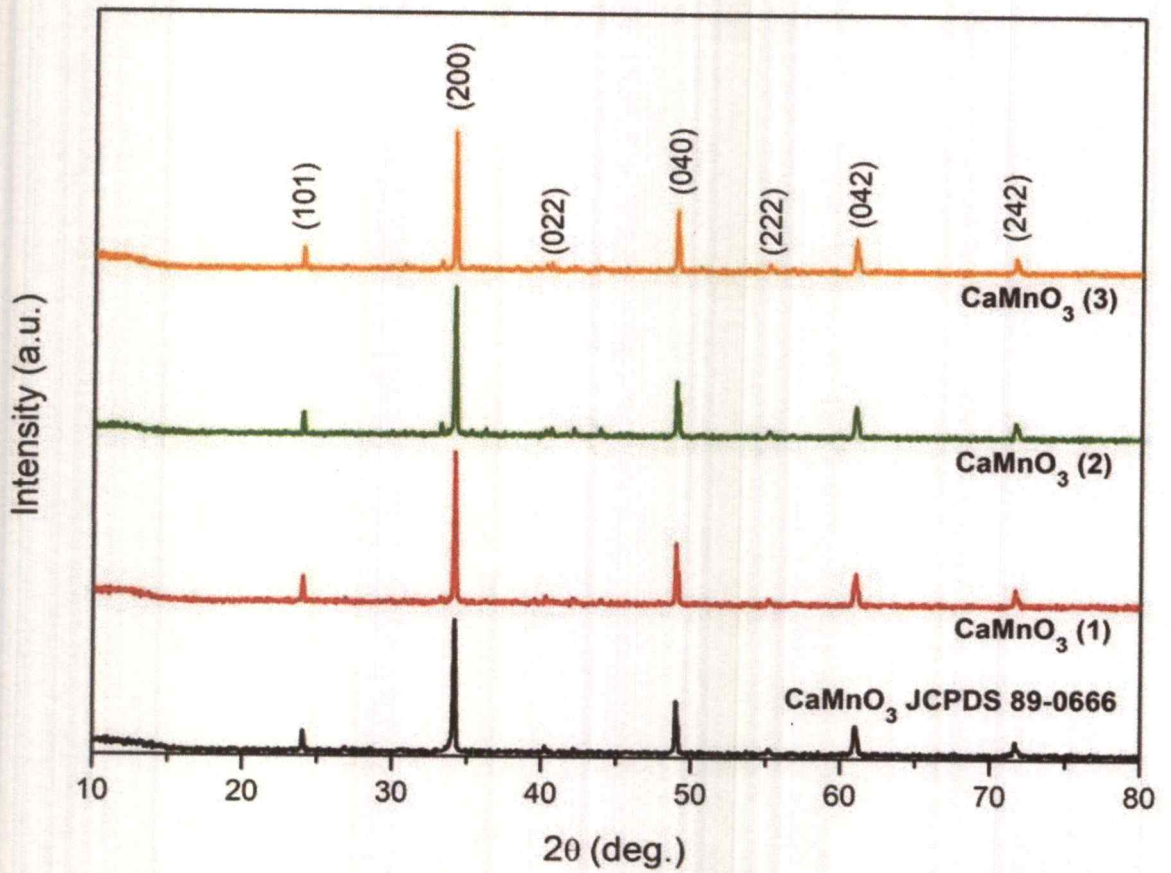
การลอกเยื่อหุ้ม มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับเส้นสีดำ ( $\text{CaCO}_3$  อ้างอิง) โดยที่ปรากฏมุมเลี้ยวเบน



รูปภาพที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ  $\text{CaCO}_3$  ที่เป็นผงยังไม่ผ่านกระบวนการเผา

4.1.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) ของ  $\text{CaMnO}_3$  ทั้ง 3 เงื่อนไข

เมื่อทำการเผาแคลไซน์สารตัวอย่างที่อุณหภูมิ  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากเครื่อง XRD พบว่าผงผลึกมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับ  $\text{CaMnO}_3$  ที่ปรากฏมุมเลี้ยวเบน เมื่อสังเกตจากกราฟที่ (4.1) พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นสีแดงที่มาจากเงื่อนไขสารตั้งต้นการลอกมีเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เส้นสีเขียวมาจากเงื่อนไขสารตั้งต้นที่มีการลอกเยื่อด้วยมือ และเส้นสีส้มมาจากเงื่อนไขสารตั้งต้นที่ไม่มีการลอกเยื่อหุ้ม มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับเส้นสีดำ ( $\text{CaMnO}_3$  อ้างอิง) โดยที่ปรากฏมุมเลี้ยวเบน



รูปภาพที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ  $\text{CaMnO}_3$  แคลไซน์ที่อุณหภูมิ  $1150^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

#### 4.1.2 การวิเคราะห์โดยเครื่อง Wavelength Dispersive X-ray fluorescence spectrometer

การวิเคราะห์โดยเครื่อง Wavelength Dispersive X-ray fluorescence spectrometer เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง

4.1.2.1 การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ของ  $\text{CaMnO}_3$  จากสารตั้งต้นที่มาจากการใช้สารละลาย

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบจากเครื่อง WDXRF เจ็อนไซท์ที่ 1

ลำดับ	รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบ อ้างอิง
1	Ca	97.6	Mass%	ทดสอบ ตัวอย่างด้วย เครื่อง Wavelength Dispersive X- ray fluorescence spectrometer
2	Mg	0.597	Mass%	
3	Na	0.498	Mass%	
4	Si	0.495	Mass%	
5	P	0.230	Mass%	
6	Al	0.119	Mass%	
7	S	0.110	Mass%	
8	Sr	0.10000	Mass%	
9	Fe	0.0927	Mass%	
10	K	0.0861	Mass%	
11	Cu	0.0640	Mass%	

4.1.2.2 การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ของ  $\text{CaMnO}_3$  จากสารตั้งต้นที่มาจาก  
การใช้การลอกมือ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบจากเครื่อง WDXRF เจ็อนไซท์ที่ 2

ลำดับ	รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบ อ้างอิง
1	Ca	98.3	Mass%	ทดสอบ ตัวอย่างด้วย เครื่อง Wavelength Dispersive X- ray fluorescence spectrometer
2	Mg	0.533	Mass%	
3	P	0.192	Mass%	
4	Si	0.183	Mass%	
5	Na	0.173	Mass%	
6	S	0.132	Mass%	
7	Bi	0.123	Mass%	
8	Fe	0.113	Mass%	
9	K	0.100	Mass%	

ลำดับ	รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบ อ้างอิง
10	Sr	0.0841	Mass%	ทดสอบตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Wavelength Dispersive X- ray fluorescence spectrometer
11	Al	0.0795	Mass%	
12	Ni	0.0330	Mass%	

4.1.2.3 การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ของ  $\text{CaMnO}_3$  จากสารตั้งต้นที่มาจาก  
การที่ไม่มีการลอกเยื่อ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบจากเครื่อง WDXRF เงื่อนไขที่ 3

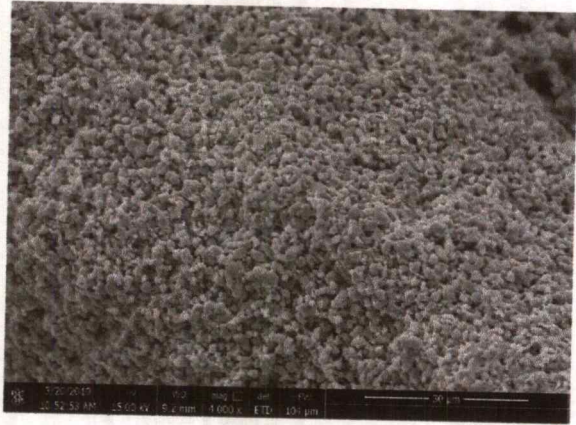
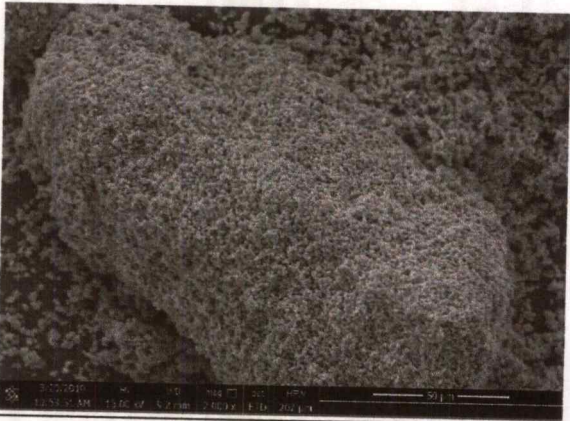
ลำดับ	รายการ ทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบ อ้างอิง
1	Ca	98.3	Mass%	ทดสอบ ตัวอย่างด้วย เครื่อง Wavelength Dispersive X- ray fluorescence spectrometer
2	Mg	0.560	Mass%	
3	S	0.329	Mass%	
4	P	0.203	Mass%	
5	Si	0.136	Mass%	
6	K	0.0923	Mass%	
7	Sr	0.0897	Mass%	
8	W	0.0886	Mass%	
9	Fe	0.0846	Mass%	
10	Al	0.0617	Mass%	
11	Cu	0.0352	Mass%	

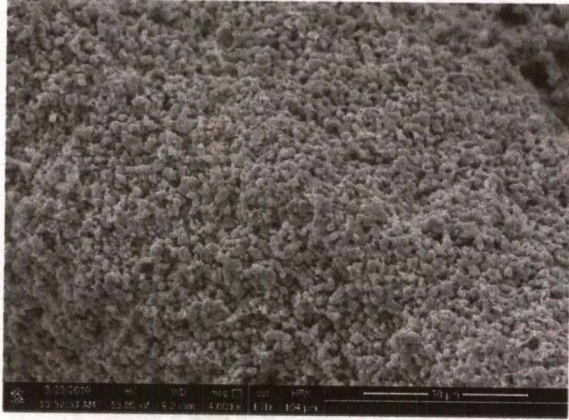

#### 4.1.3 การตรวจสอบพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope, SEM)

การตรวจสอบพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope, SEM) ตรวจสอบเพื่อศึกษารายละเอียดของโครงสร้างภายนอกหรือผิวของตัวอย่าง ภาพที่ได้จากกล้อง SEM เป็นภาพเสมือน 3 มิติที่มีระยะชัดลึกสูงทำให้สามารถระบุลักษณะของ พื้นผิวของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน

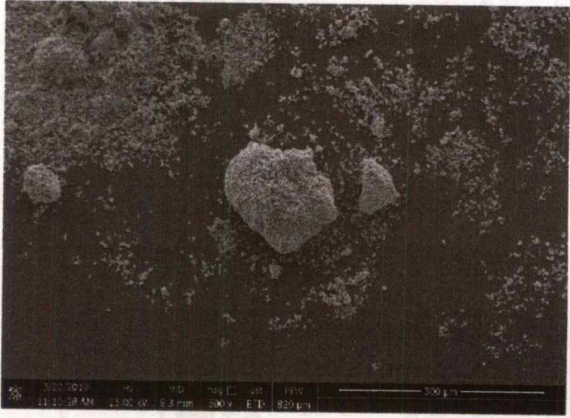
##### 4.1.3.1 การตรวจสอบพื้นผิวของ $\text{CaMnO}_3$ เเผาที่อุณหภูมิ $1150^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

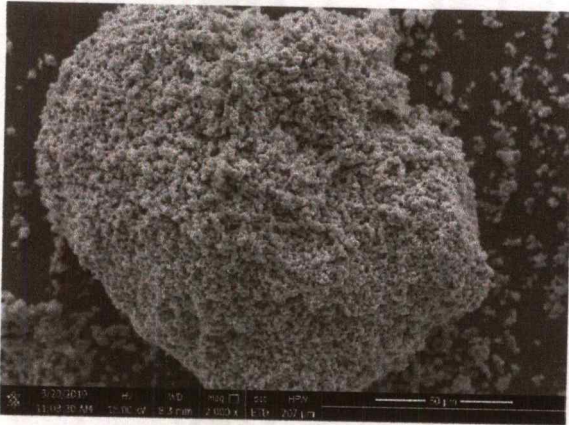
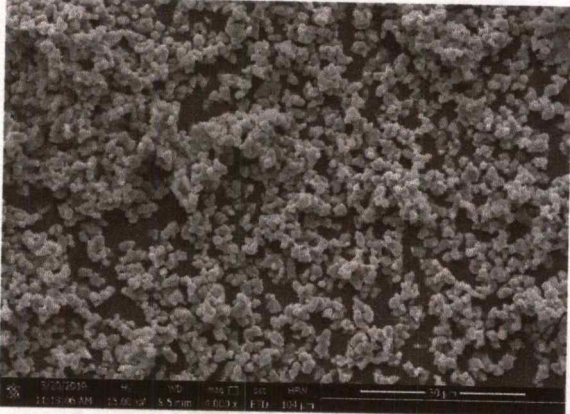
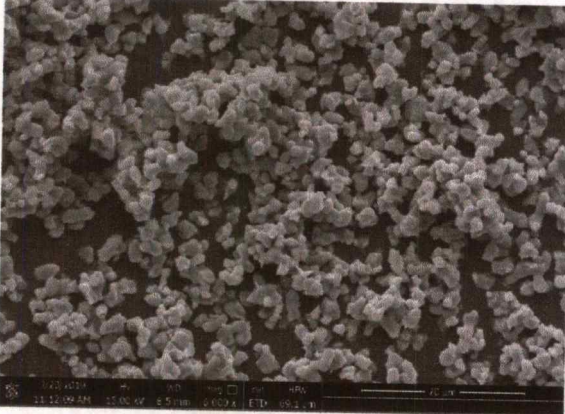
ตารางที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของผงแคลเซียมแมงกานีสออกไซด์จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ  $1150^\circ\text{C}$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากเงื่อนไขของสารตั้งต้นที่มาจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใน

ลำดับ	กำลังขยาย	ลักษณะพื้นผิว
1	500 เท่า	
2	2000 เท่า	

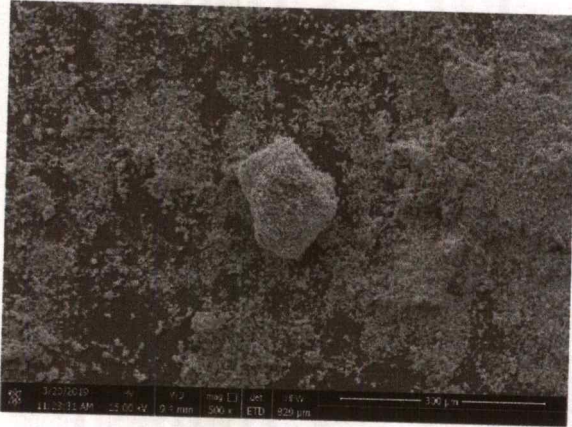
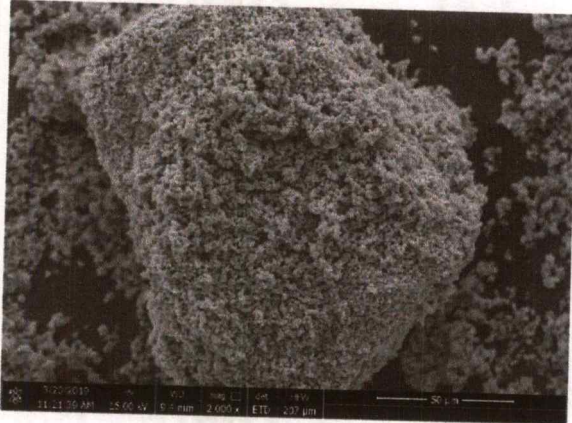

ลำดับ	กำลังขยาย	ลักษณะพื้นผิว
3	4000 เท่า	
4	6000 เท่า	

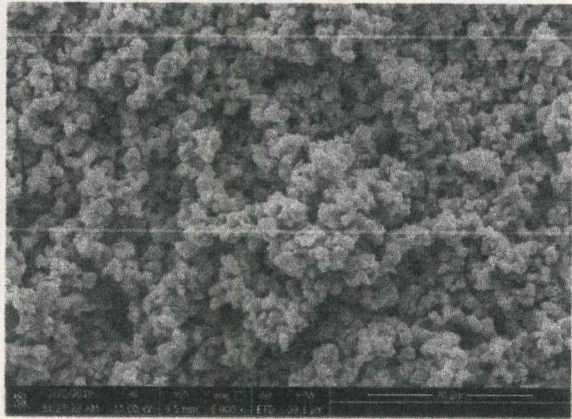
ตารางที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของผงแคลเซียมแมงกานีสออกไซด์จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากเงื่อนไขของสารตั้งต้นที่มาจาก การลอกเยื่อหุ้มไข ด้วยมือ

ลำดับ	กำลังขยาย	ลักษณะพื้นผิว
1	500เท่า	

ลำดับ	กำลังขยาย	ลักษณะพื้นผิว
2	2000เท่า	 <p>Scanning electron micrograph (SEM) showing a single, large, porous spherical particle. The surface is highly textured and interconnected. Technical data at the bottom: 3/23/2014, 11:02:30 AM, 20.0kV, 5.0um, 2.00kx, ETD, 0.01um.</p>
3	4000เท่า	 <p>Scanning electron micrograph (SEM) showing a dense field of small, porous particles. The particles appear to be interconnected, forming a porous network. Technical data at the bottom: 3/23/2014, 11:02:46 AM, 20.0kV, 5.0um, 4.00kx, ETD, 0.01um.</p>
4	6000เท่า	 <p>Scanning electron micrograph (SEM) showing a dense field of small, porous particles, similar to the 4000x magnification image but with higher detail. Technical data at the bottom: 3/23/2014, 11:02:59 AM, 20.0kV, 5.0um, 6.00kx, ETD, 0.01um.</p>

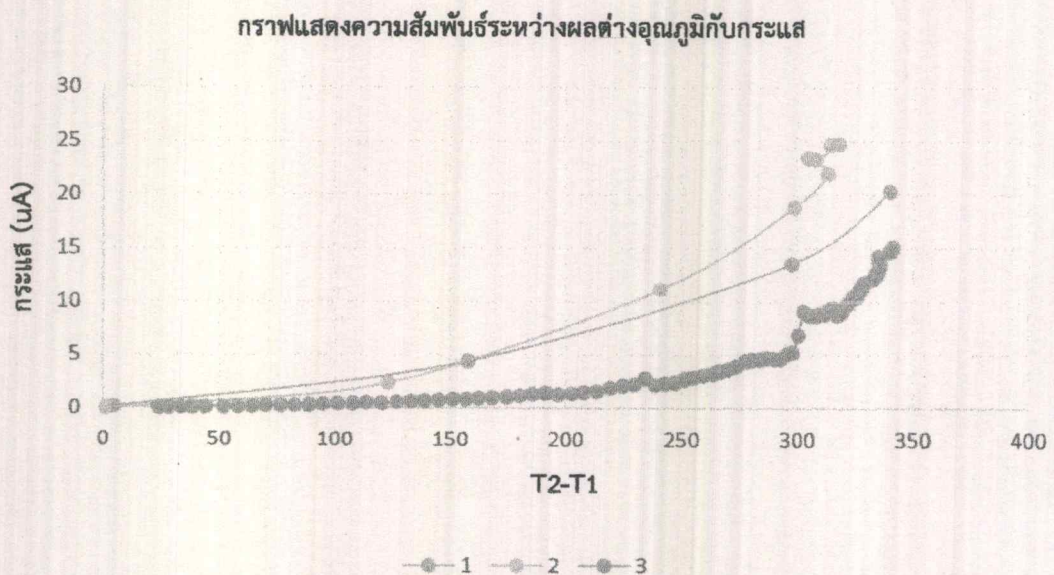
ตารางที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของผงแคลเซียมแมงกานีสออกไซด์จากการเผาแคลโซนที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากเงื่อนไขของสารตั้งต้นที่มาจากไม่มีการลอกเยื่อหุ้ม

ลำดับ	กำลังขยาย	ลักษณะพื้นผิว
1	500เท่า	
2	2000เท่า	
3	4000เท่า	

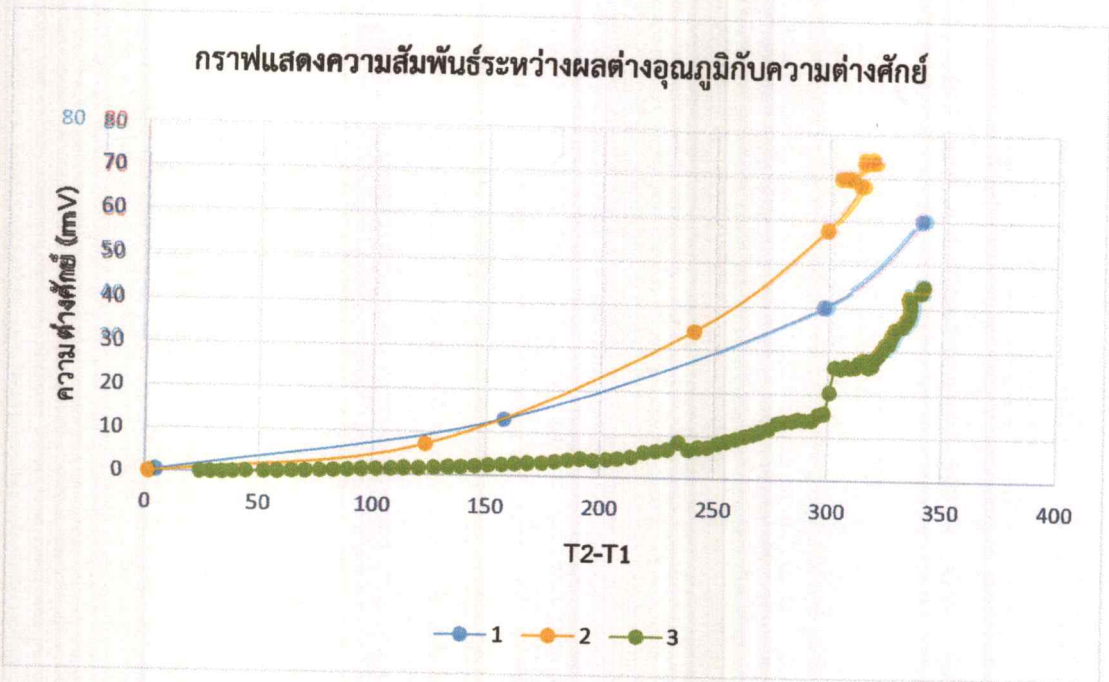
ลำดับ	กำลังขยาย	ลักษณะพื้นผิว
4	6000เท่า	

#### 4.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้สารตั้งต้นจากเปลือกไข่

4.2.1 ผลการทดลองจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยสารตั้งต้นจากเปลือกไข่จากทั้ง 3 เงื่อนไข โดยที่ขั้วไฟฟ้าไม่มีการเคลือบด้วยเงิน

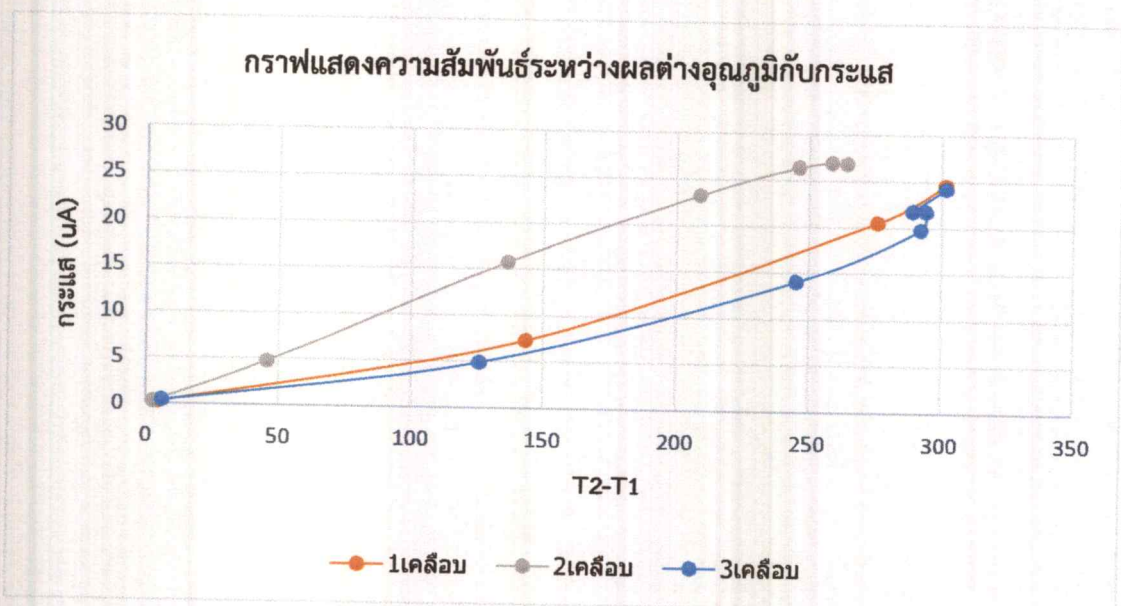


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้า ทั้ง 3 เงื่อนไขโดยที่ขั้วไฟฟ้าไม่มีการเคลือบเงิน

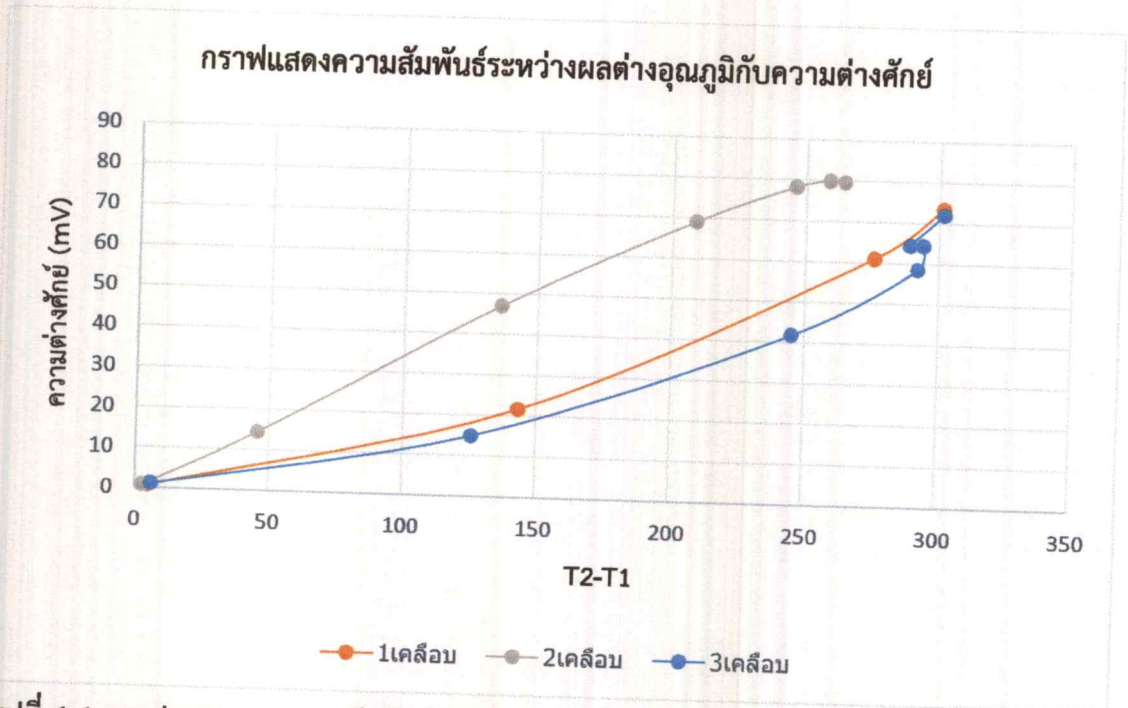


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับความต่างศักย์ของทั้ง 3 เจื่อนไซโดยที่ขั้วไม่มีการเคลือบด้วยเงิน

4.2.2 ผลการทดลองจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยสารตั้งต้นจากเปลือกไข่จาก 3 เจื่อนไซ โดยที่ขั้วไฟฟ้ามีการเคลือบด้วยเงิน

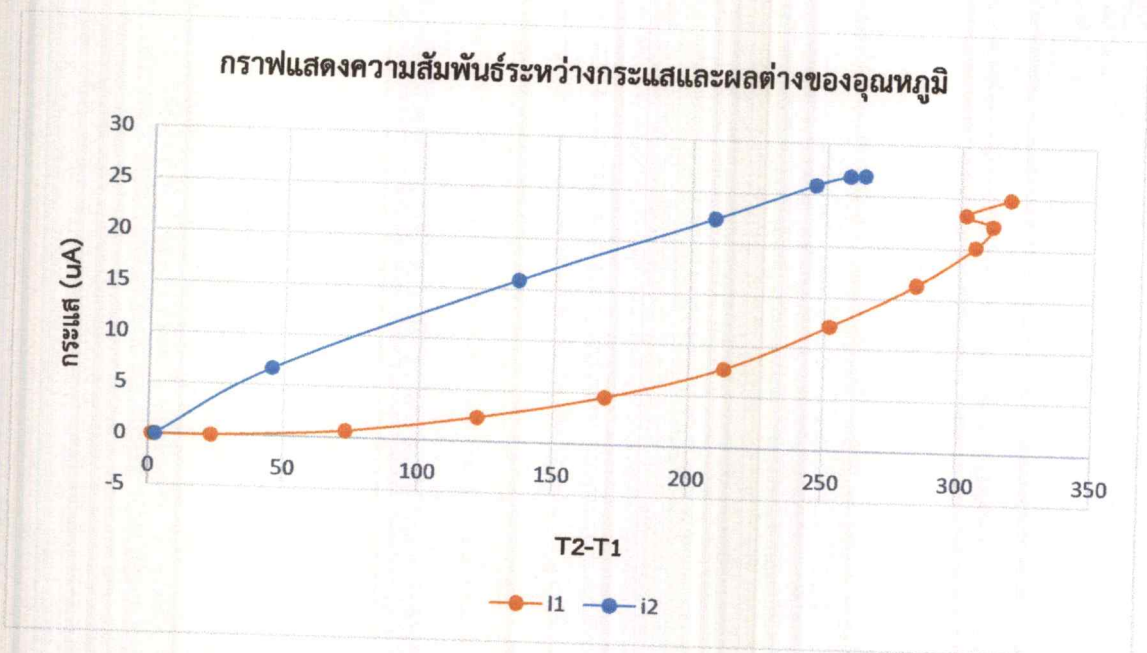


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับกระแสของทั้ง 3 เจื่อนไซโดยที่ขั้วมีการเคลือบด้วยเงิน

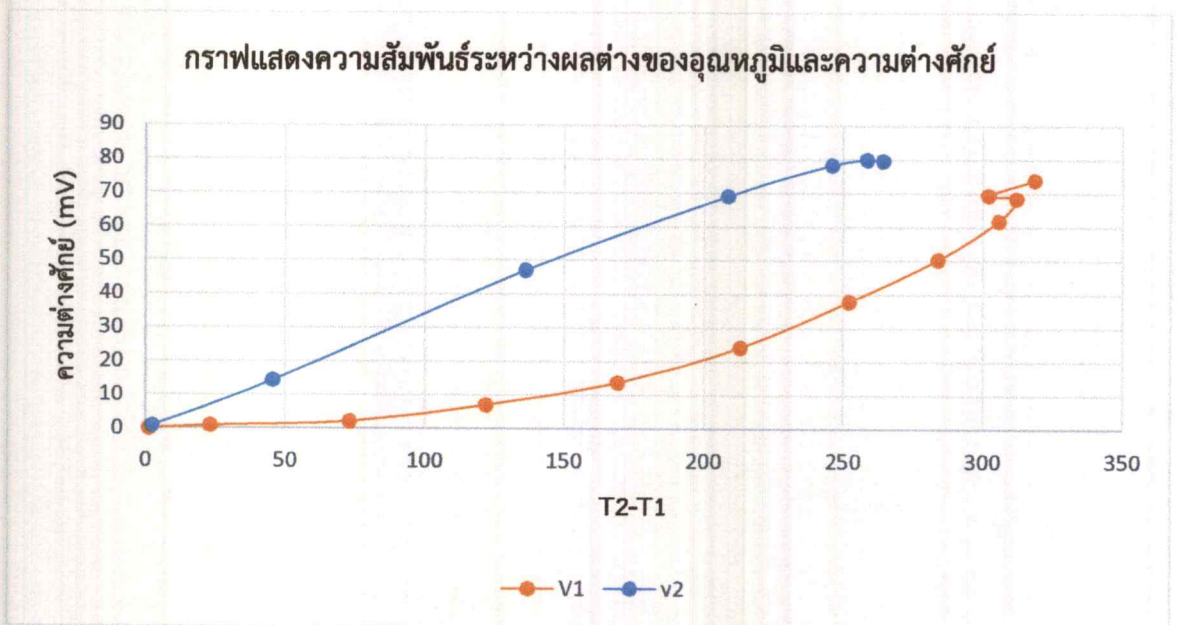


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับความต่างศักย์ของทั้ง 3 เงื่อนไข โดยที่ขั้วมีการเคลือบด้วยเงิน

#### 4.2.3 การเปรียบเทียบกราฟประสิทธิภาพไฟฟ้าเบื้องต้นระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ไม่มีการเคลือบด้วยเงินและขั้วไฟฟ้าที่มีการเคลือบด้วยเงิน

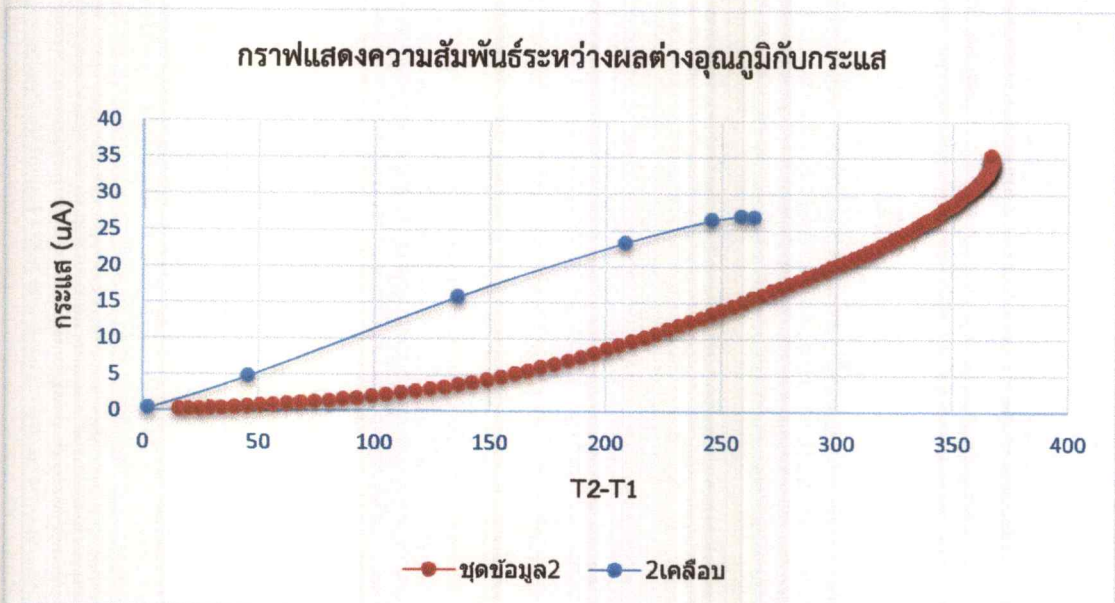


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับกระแส ของขั้วไฟฟ้าที่เคลือบด้วยเงินและไม่เคลือบด้วยเงิน

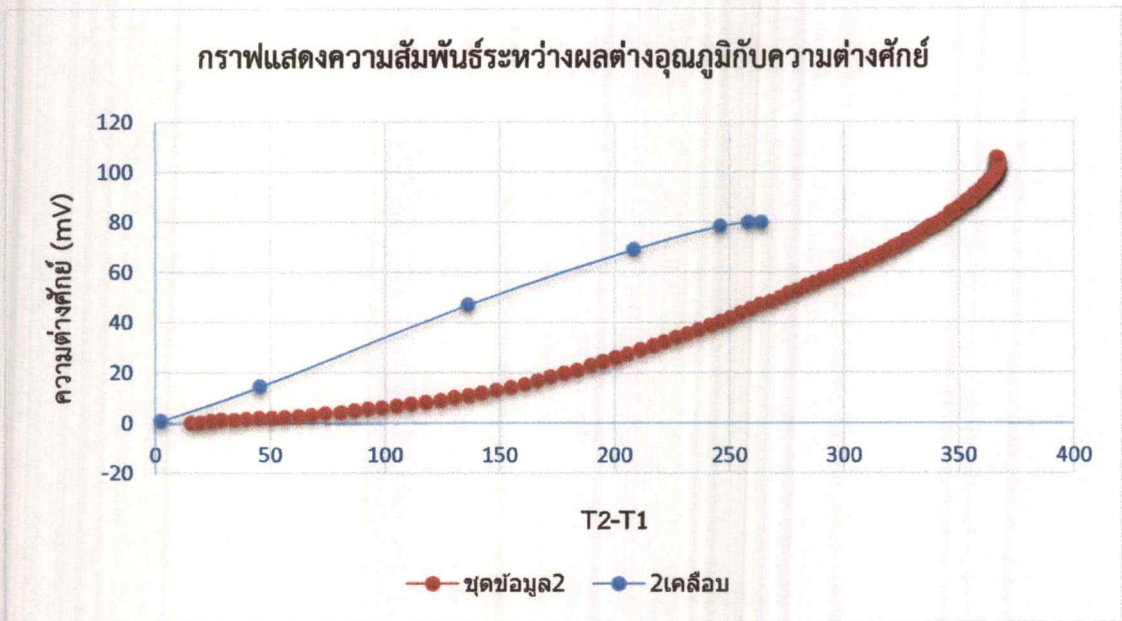


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับความต่างศักย์ ของขั้วไฟฟ้าที่เคลือบด้วยเงินและไม่เคลือบด้วยเงิน

4.2.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเบื้องต้นของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีสารตั้งต้นมาจาก  $\text{CaCO}_3$  จากการลอกเยื่อด้วยมือ กับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่สารตั้งต้น  $\text{CaCO}_3$  สำเร็จรูป



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับกระแส ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีสารตั้งต้นมาจาก  $\text{CaCO}_3$  จากการลอกเยื่อด้วยมือ กับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่สารตั้งต้น  $\text{CaCO}_3$  สำเร็จรูป



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับกระแส ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ที่มีสารตั้งต้นมาจาก  $\text{CaCO}_3$  จากการลอกเยื่อด้วยมือ กับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่สารตั้งต้น  $\text{CaCO}_3$  สำเร็จรูป

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

#### 5.1.1 การตรวจวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD)

##### 5.1.1.1 การตรวจวิเคราะห์เฟสของสารประกอบ $\text{CaCO}_3$

จากการสังเคราะห์  $\text{CaCO}_3$  ทั้ง 3 วิธี โดยวิธีการละลาย NaOH กับเปลือกไข่ไก่เพื่อสลายเยื่อหุ้มไข่ วิธีลอกเยื่อหุ้มไข่ด้วยมือ และวิธีไม่ลอกเยื่อหุ้มไข่เลย แล้วนำไปตรวจวิเคราะห์เฟส พบว่าผลึกมีรูปแบบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับ  $\text{CaCO}_3$  โดยระนาบของการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นนั้นประกอบไปด้วยระนาบ (002), (-112), (112), (013), (202), (-204) และ (222) ซึ่งสอดคล้องกับพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เด่นชัดมุม 2Theta ได้แก่ 23.240, 29.624, 36.297, 39.759, 43.541, 47.833 และ 57.921 องศา ตามลำดับ พีคที่ได้นั้นอ้างอิงจากข้อมูล JCPD หมายเลข 70-0095

##### 5.1.1.2 การตรวจวิเคราะห์เฟสของสารประกอบ $\text{CaMnO}_3$

จากการสังเคราะห์  $\text{CaMnO}_3$  ทั้ง 3 เงื่อนไข เมื่อทำการแคลไซน์สารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส แล้วนำไปตรวจวิเคราะห์เฟส พบว่าผลึกมีรูปแบบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับ  $\text{CaMnO}_3$  โดยระนาบของการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นนั้นประกอบไปด้วยระนาบ (020), (002), (040), (123) และ (242) ซึ่งสอดคล้องกับพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เด่นชัดมุม 2Theta ได้แก่ 23.853, 34.002, 48.825, 60.896 และ 71.575 องศา ตามลำดับ พีคที่ได้นั้นอ้างอิงจากข้อมูล JCPD หมายเลข 76-1132

#### 5.1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF)

จากการสังเคราะห์  $\text{CaCO}_3$  ทั้ง 3 วิธี แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบ พบว่าเงื่อนไขที่ 1 โดยวิธีการละลาย NaOH กับเปลือกไข่ไก่เพื่อสลายเยื่อหุ้มไข่ ได้ Ca 97.6% โดยมวล เงื่อนไขที่ 2 วิธีลอกเยื่อหุ้มไข่ด้วยมือ ได้ Ca 98.3% โดยมวล และเงื่อนไขที่ 3 วิธีไม่ลอกเยื่อหุ้มไข่เลย ได้ Ca 98.3% โดยมวล ที่เงื่อนไข 1 มีเปอร์เซ็นต์ที่น้อยกว่าเนื่องจากมีโซเดียมตกค้างปะปนอยู่ ทำให้ความสะอาดไม่ดี และเกิดจากการกักความร้อนของ NaOH และเงื่อนไขที่ 2 และ 3 มีเปอร์เซ็นต์ที่เท่ากัน เนื่องจากลอกเยื่อหุ้มไข่ไม่หมด

### 5.1.3 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

จากการสังเกตและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของ  $\text{CaMnO}_3$  ของทั้ง 3 เงื่อนไข พบว่าทั้ง 3 เงื่อนไข มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.7-3 ไมครอน จึงทำให้สารประกอบสามารถผสมเข้ากันได้ดี ในเงื่อนไขที่ 1 จะสังเกตว่ามีบางอย่างเคลือบอยู่ ต่างกับเงื่อนไขที่ 2 และ 3

### 5.1.4 สรุปผลจากการทดลอง

จากการทดลอง โดยการนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 3 เงื่อนไข ไปให้ความร้อนด้านเดียว และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิฝั่งร้อนและฝั่งเย็น พบว่า เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแบบไม่เคลือบด้วยเงิน เงื่อนไขที่ 2 ดีที่สุด โดยให้ค่าความต่างศักย์ 73.9 มิลลิโวลต์ กระแสไฟฟ้า 24.86 ไมโครแอมป์ และเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแบบเคลือบด้วยเงิน เงื่อนไขที่ 2 ดีที่สุด โดยให้ค่าความต่างศักย์ 79.9 มิลลิโวลต์ กระแสไฟฟ้า 26.91 ไมโครแอมป์ จะเห็นว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าแบบเคลือบด้วยเงินดีกว่า เนื่องจากเงินมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ระหว่างการสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ผู้วิจัยไม่ค่อยมีความระมัดระวัง
- 2) ภายในห้องปฏิบัติการมีการทดลองหลายอย่าง จึงอาจทำให้มีสารปนเปื้อน
- 3) ในการวัดไฟเบื้องต้นควรวัดอย่างละหลายรอบ เพื่อค่าที่แม่นยำ
- 4) ไม่ควรใช้ขั้วไฟฟ้าเดิมหลังจากที่ผ่านการให้ความร้อน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วิชัย ดำรงโกคภักดิ์. 2555. “เทคโนโลยีการนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์.” วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์. 11(2) : 77.
- [2] siamchemi. 2562. แคลเซียมคาร์บอเนต/หินปูน. [Online]. Available : <https://www.siamchemi.com/แคลเซียมคาร์บอเนต/>.
- [3] คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาลมหาวิทยาลัยมหิดล. 2551. อันตรายจากแมงกานีส. [Online]. Available. : [https://www.si.mahidol.ac.th/th/division/ophs/div\\_knowledgesdetail.asp?div\\_id=34&kl\\_id=21](https://www.si.mahidol.ac.th/th/division/ophs/div_knowledgesdetail.asp?div_id=34&kl_id=21).
- [4] ปุณยภัทร ภูมิภาค. 2560. เทอร์โมอิเล็กทริก. [Online]. Available. : <https://sites.google.com/site/powermut/phost-him/thexrmoxilekthrik>.
- [5] ยุทธนา กอสัมพันธ์,อมรเทพ แก้วไทย,จิโรจ ชاکรวงศ์ไพสิฐและอุกฤษ ชูดวง. 2554. “การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยสยาม.
- [6] Wikipedia. 2562. Thomas Johann Seebeck. [Online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Johann\\_Seebeck](https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Johann_Seebeck).
- [7] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์และนวกัทธา หนูนาถ. 2555. ปรากฏการณ์ซีเบค. [Online]. Available. : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6808/seebeck-effect-ปรากฏการณ์ซีเบค>.
- [8] ณรงค์ สัจวาระนที. 2552. “การศึกษาการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความร้อนจากเตาเศรษฐกิจ.” โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- [9] เชษฐา รัตนพันธ์. 2562. เทอร์โมอิเล็กทริกส์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย.
- [10] บริษัท เคลฟเวอร์ริช จำกัด. 2562. หลักการของ Energy-DispersiveX-RayFluorescence (ED-XRF). [Online]. Available : [http://cleverich.com/xrf\\_work.html](http://cleverich.com/xrf_work.html).
- [11] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. 2562. X-ray Diffraction XRD. [Online]. Available : <https://stic.mfu.ac.th/stic-analysis-tools/stic-tool-detail/17.html>.

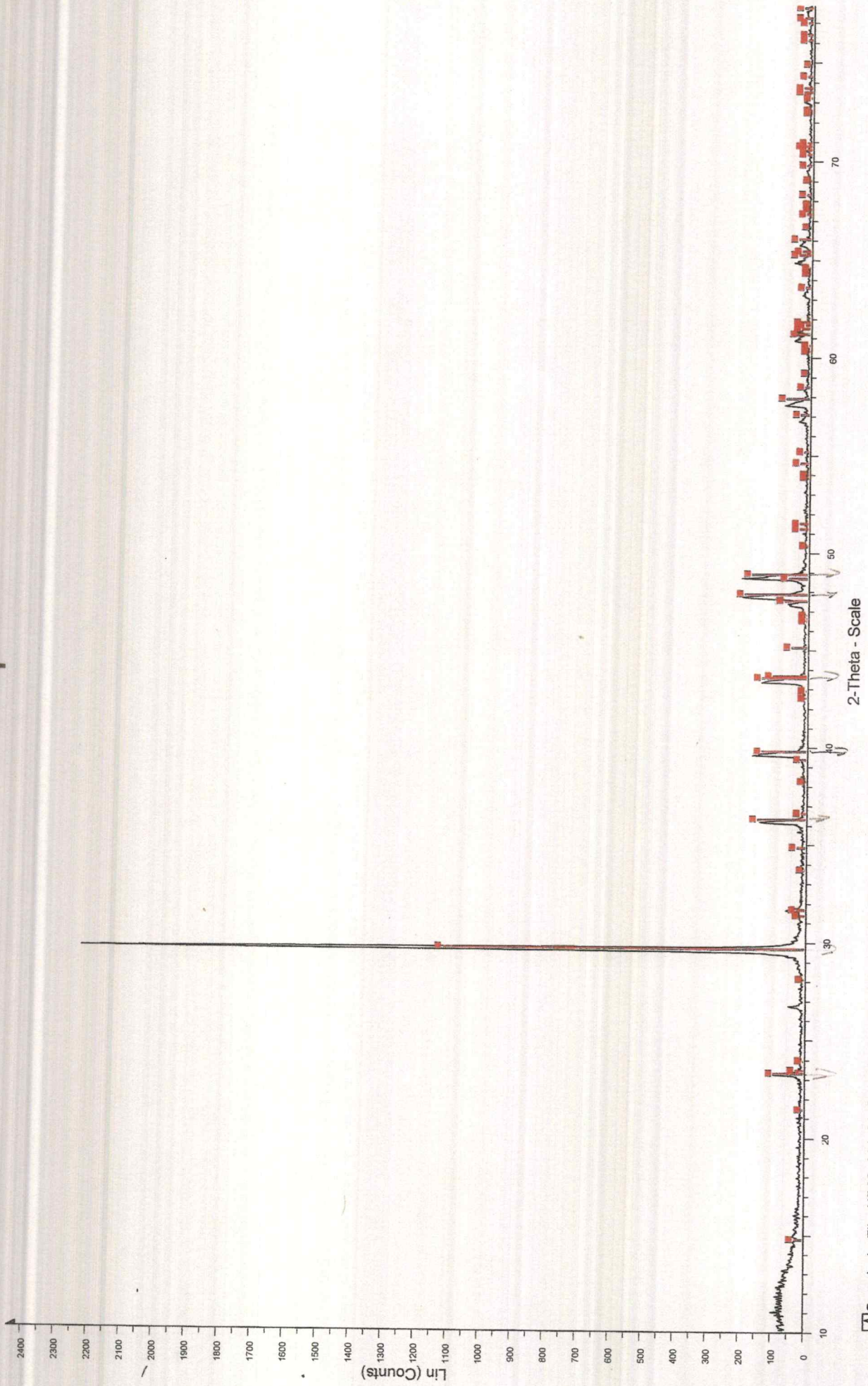
- [12] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). 2560. แสงซินโครตรอนกับงานวิจัยทางโบราณคดี. [Online]. Available : [https://www.sri.or.th/th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=401:2011-03-15-03-57-51&catid=50:2010-11-02-00-08-36](https://www.sri.or.th/th/index.php?option=com_content&view=article&id=401:2011-03-15-03-57-51&catid=50:2010-11-02-00-08-36).
- [13] ศูนย์นวัตกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2562. Scanning Electron Microscopy (SEM). [Online]. Available : [http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id\\_sub=42&id=39](http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=42&id=39).
- [14] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน). 2562. Scanning Electron Microscope (SEM). [Online]. Available : <https://www.sri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/73-scanning-electron-microscope-sem.html>.

ภาคผนวก

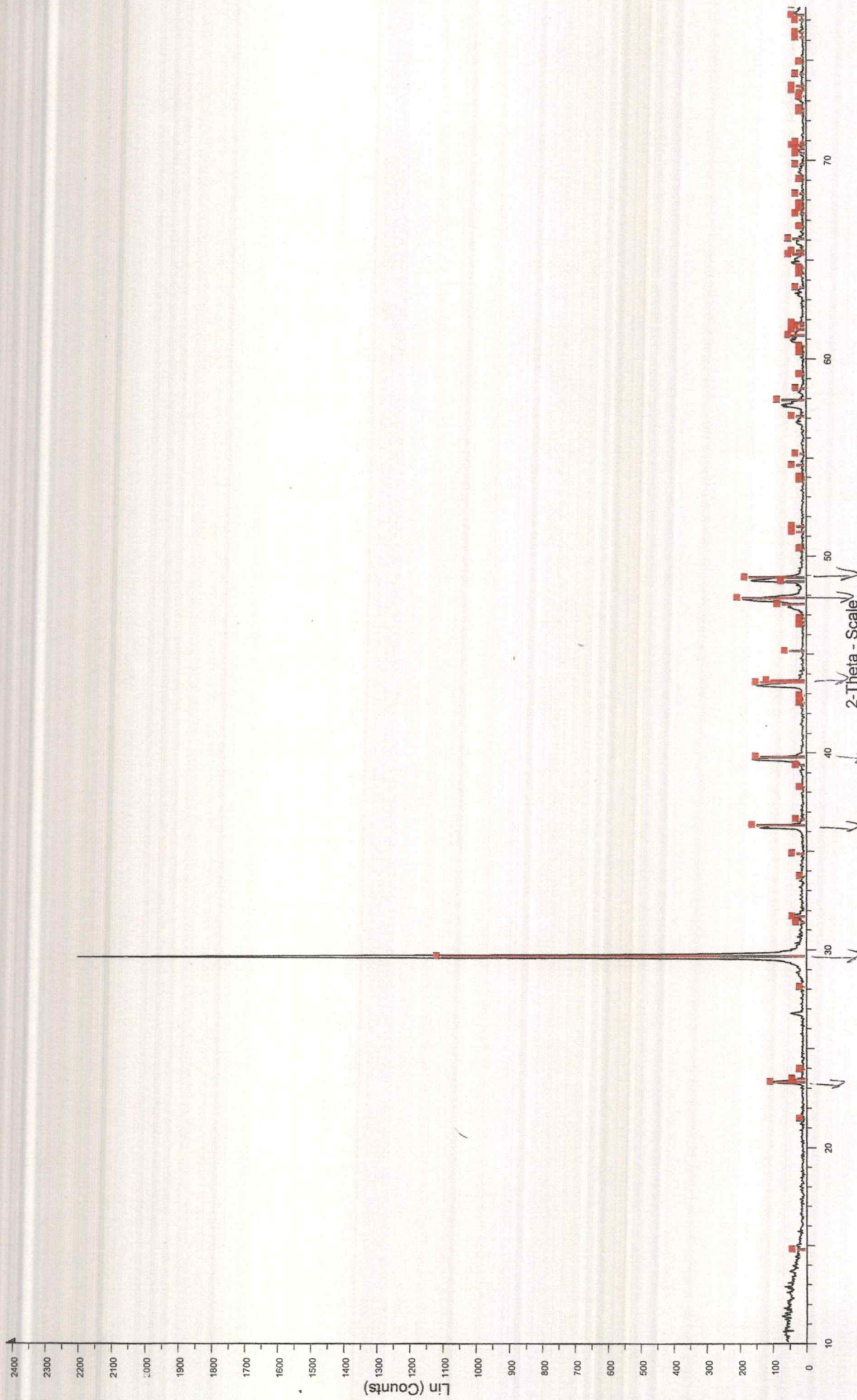
## ภาคผนวก ก

กราฟแสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) ของสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{CaMnO}_3$  จากศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

# Sample 1

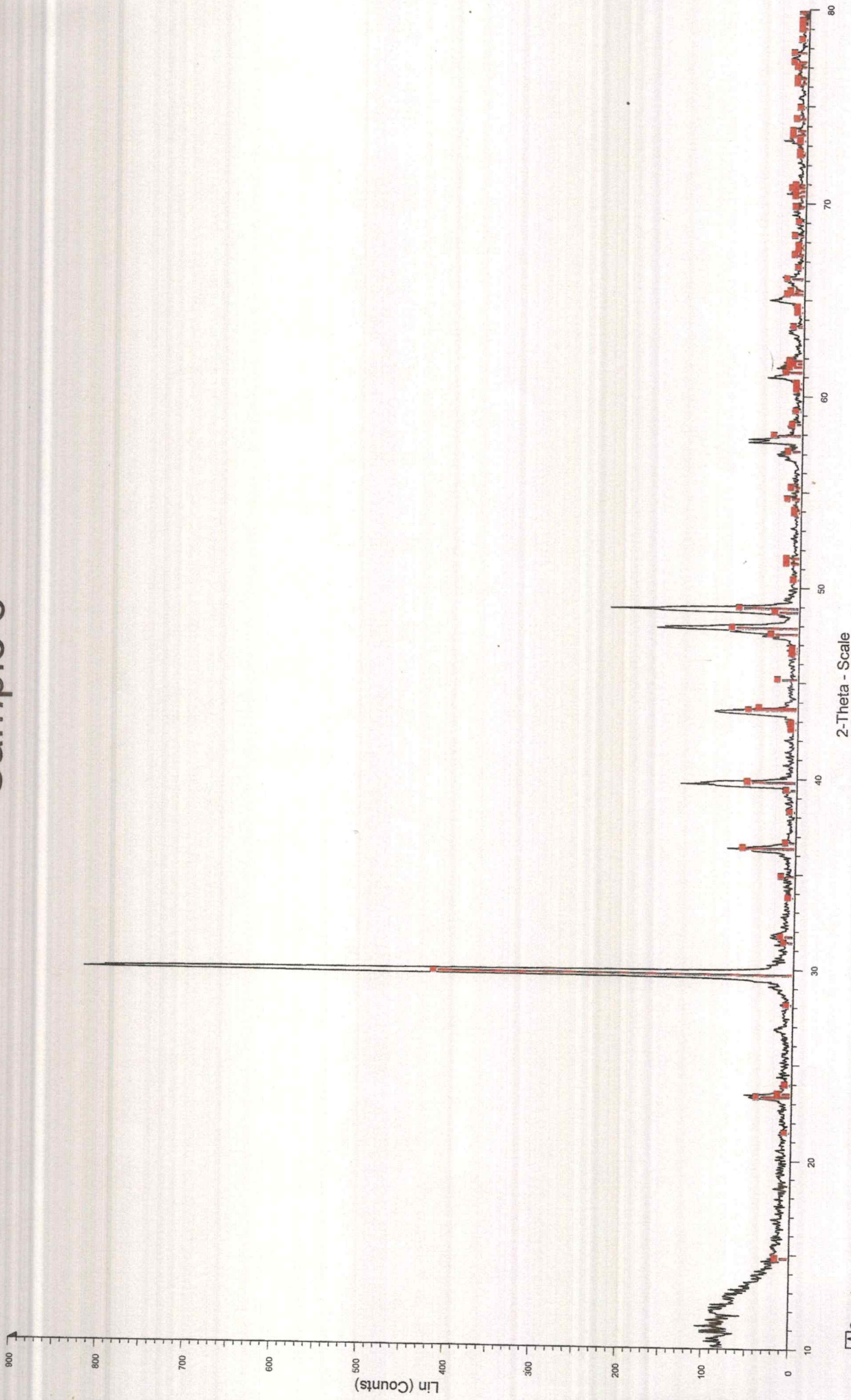


# Sample 2



Sample 2 - File: XD62\_014\_02\_Sample 2.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 10.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.040 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 10.000 ° - The  
Operations: Import  
70-0095 (C) - Calcium Carbonate - CaCO3 - C - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 6.33400 - b 4.94800 - c 8.03300 - alpha 90.000 - beta 107.900 - gamma 90.000 - Primitive - P21/c (14) - 4

# Sample 3



Sample 3 - File: XD62\_014\_03\_Sample 3.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 10.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.040 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 10.000 ° - Theta: Operations: Import

70-0095 (C) - Calcium Carbonate - CaCO<sub>3</sub> - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 6.33400 - b 4.94800 - c 8.03300 - alpha 90.000 - beta 107.900 - gamma 90.000 - Primitive - P21/c (14) - 4 -

CaCO<sub>3</sub>

Calcium Carbonate

Lattice : Monoclinic

S.G. : P21/c (14)

a = 6.33400

b = 4.94800

c = 8.03300

a/b = 1.28011

c/b = 1.62348

Beta = 107.90

Z = 4

Mol. weight = 100.09

Volume [CD] = 239.57

Dx = 2.775

l/lcor = 2.09

ICSD COLLECTION CODE : 000150

REMARKS FROM ICSD : REM PRE 18 kbar.

TEMPERATURE FACTOR : ITF

\*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference :

\*Acta Crystallogr., Sec. B, volume 31, page 343, (1975) :  
Merrill, L., Bassett, W.A.

Radiation : CuKa1

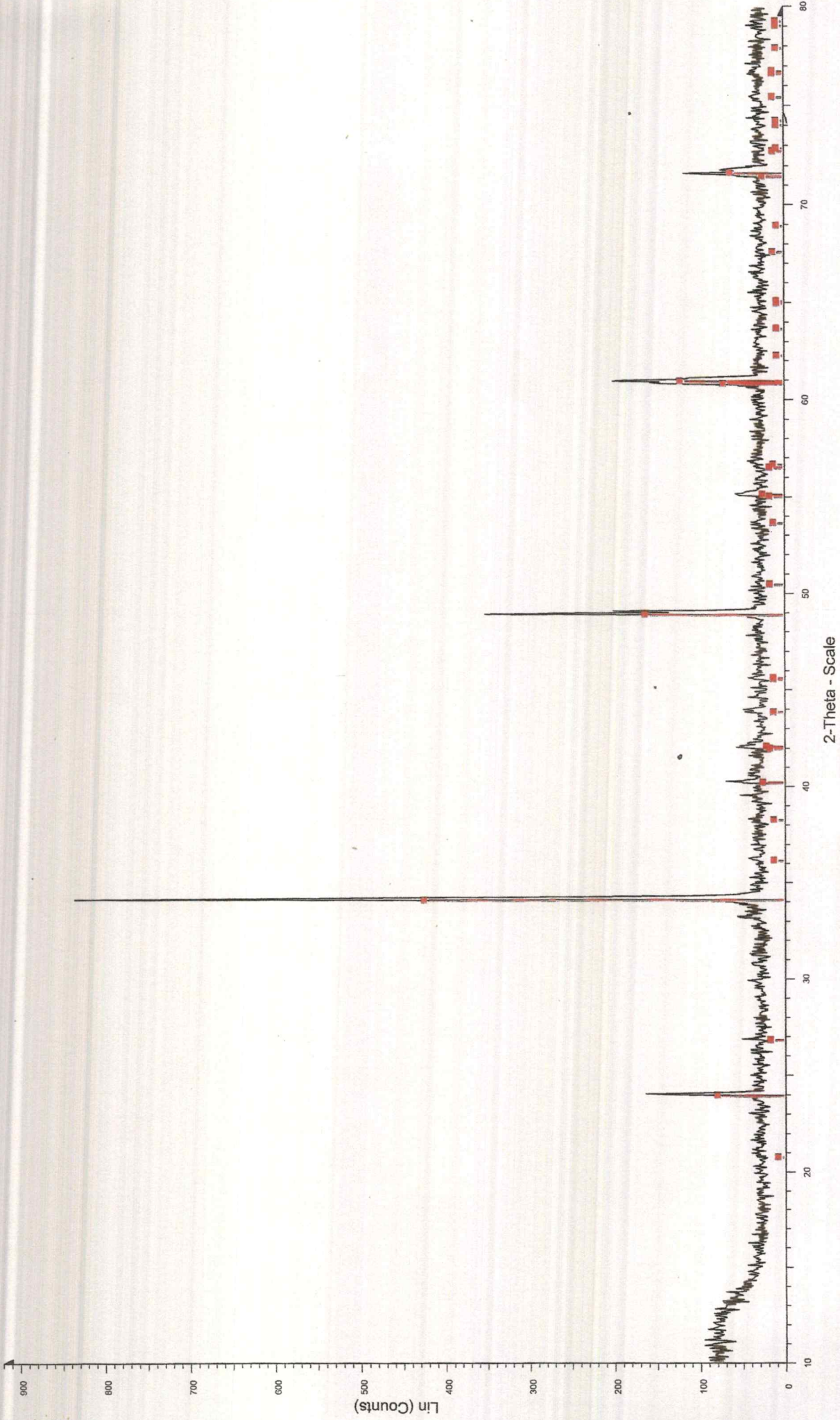
Lambda : 1.54060

Filter : Not specified

d-sp : Calculated spacings

2th	l	h	k	l	2th	l	h	k
14.685	2	1	0	0	*69.825	1	-1	2
21.374	<1	0	1	1	70.374	1	3	2
23.240	8	1	1	0	70.611	1	3	1
*23.240	8	0	0	2	*70.611	1	1	1
23.399	2	-1	0	2	70.798	2	-4	2
23.881	<1	-1	1	1	*70.798	2	-2	0
28.028	<1	1	1	1	70.944	1	-4	2
29.624	100	2	0	0	*70.944	1	-2	2
*29.624	100	-1	1	2	72.494	<1	1	3
31.303	1	1	0	2	72.639	<1	0	2
31.632	2	-2	0	2	*72.639	<1	-3	3
33.672	<1	-2	1	1	73.230	<1	2	3
34.828	2	2	1	0	73.533	2	4	2
36.297	13	0	2	0	*73.533	2	-1	1
*36.297	13	1	1	2	73.755	2	-2	1
36.586	1	-2	1	2	74.350	1	3	3
38.205	<1	0	2	1	*74.350	1	4	0
39.336	1	1	2	0	74.937	<1	-5	0
39.759	12	2	1	1	*74.937	<1	-3	0
*39.759	12	0	1	3	76.184	1	0	3
42.498	<1	1	2	1	*76.184	1	-4	1
42.855	<1	-2	1	3	76.419	1	-2	3
43.541	12	0	2	2	77.030	1	0	4
*43.541	12	2	0	2	*77.030	1	2	2
43.625	9	-1	2	2	77.268	2	4	1
45.112	4	3	0	0	*77.268	2	0	1
*45.112	4	-1	0	4	77.761	2	-5	1
46.482	<1	1	1	3	*77.761	2	-4	2
46.622	<1	-2	2	1	78.473	<1	4	2
46.786	<1	-3	1	1	78.985	<1	1	4
47.511	6	2	2	0	*78.985	<1	3	0
*47.511	6	0	0	4	79.231	<1	3	2
47.833	17	-3	1	2	*79.231	<1	1	2
*47.833	17	-2	0	4	79.434	<1	5	0
48.659	5	1	2	2	79.917	<1	-5	0
48.887	15	-2	2	2	81.095	<1	2	3
*48.887	15	-1	1	4	*81.095	<1	2	1
50.345	<1	-1	2	3	81.766	<1	0	4
51.201	2	0	1	4	*81.766	<1	1	3
51.495	2	0	2	3	81.882	<1	-1	4
*51.495	2	-2	1	4	*81.882	<1	1	0
53.862	<1	3	1	1	82.107	1	-1	2
54.008	<1	-2	2	3	82.248	1	5	1
54.616	2	1	0	4	*82.248	1	-3	3
55.176	1	-3	0	4	82.727	<1	-5	1
57.082	2	0	3	1	*82.727	<1	-4	0
*57.082	2	2	1	3	83.965	<1	-2	4
57.921	6	1	3	0	84.619	2	2	4
*57.921	6	2	2	2	*84.619	2	3	3
58.494	1	-4	0	2	85.541	<1	-4	1
*58.494	1	-3	1	4	85.648	1	-2	4
59.214	<1	3	2	0	*85.648	1	4	2
*59.214	<1	-1	2	4	86.217	1	-5	2
60.334	<1	1	3	1	*86.217	1	-3	2
60.640	<1	-1	1	5	86.788	<1	4	1
61.216	3	-1	3	2	*86.788	<1	0	3
*61.216	3	0	2	4	87.230	<1	-5	2
61.499	2	4	0	0	*87.230	<1	-2	1
*61.499	2	-2	2	4	87.644	<1	0	4
61.686	1	-4	1	2	*87.644	<1	4	3
61.842	2	-4	1	1	87.970	<1	5	1
*61.842	2	-2	1	5	88.683	<1	-5	1
63.621	1	3	2	1	89.656	<1	-2	4
*63.621	1	0	1	5				
64.336	<1	2	3	0				
64.603	<1	4	1	0				
65.280	3	1	3	2				
*65.280	3	2	0	4				
65.469	2	-2	3	2				
66.063	3	-4	0	4				
66.684	<1	-1	3	3				
67.346	1	1	2	4				
67.606	<1	2	3	1				
*67.606	<1	0	3	3				
67.841	<1	-3	2	4				
68.330	1	2	1	4				
69.068	<1	-4	1	4				
69.825	1	4	1	1				

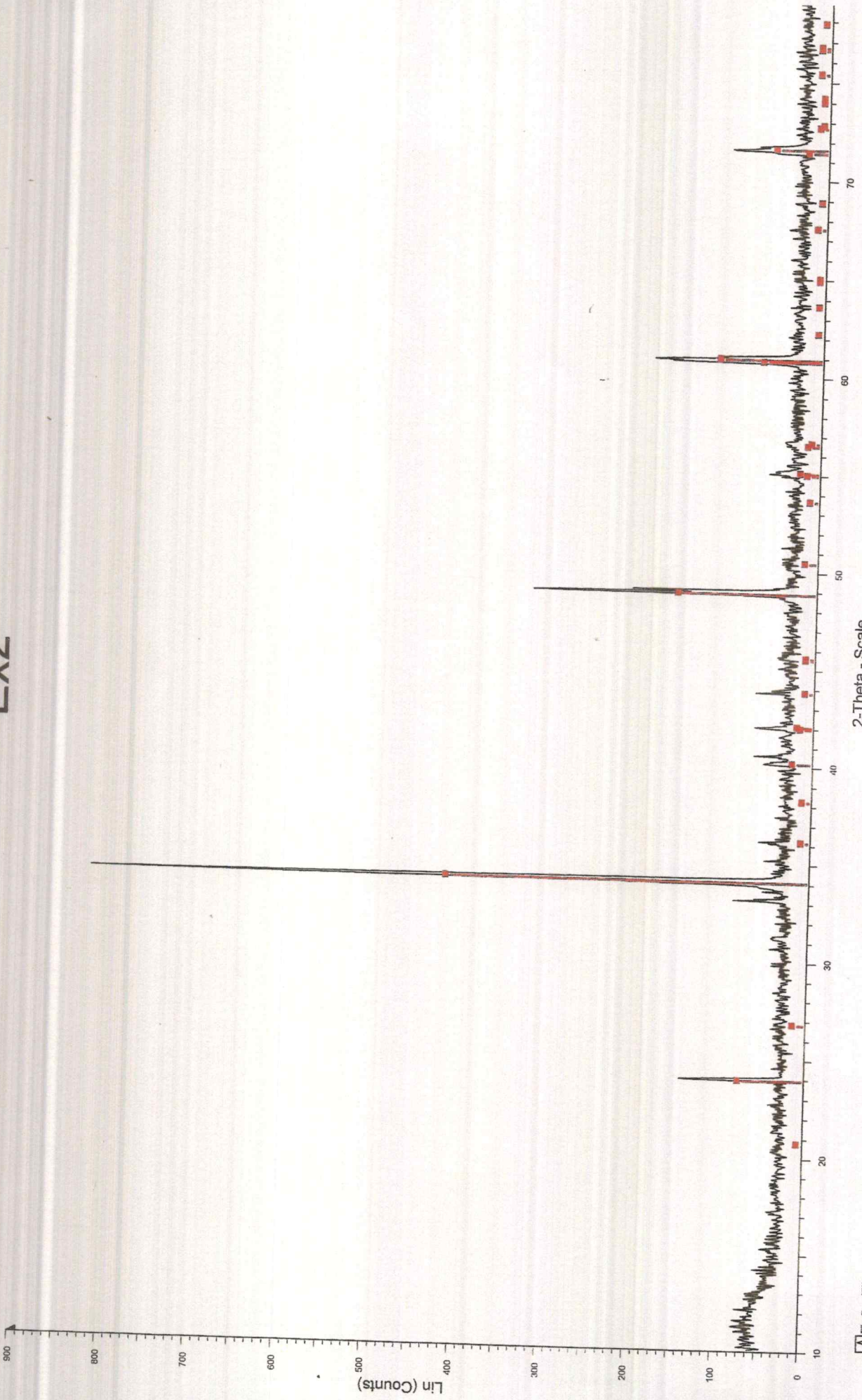
# Ex1



Ex1 - File: XD62\_034\_01\_Ex1.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 10.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.040 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 10.000 ° - Theta: 5.000 ° - Ph Operations: Import

76-1132 (C) - Calcium Manganese Oxide - CaMnO3 - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic - a 5.27900 - b 7.44800 - c 5.26400 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Primitive - Pnm

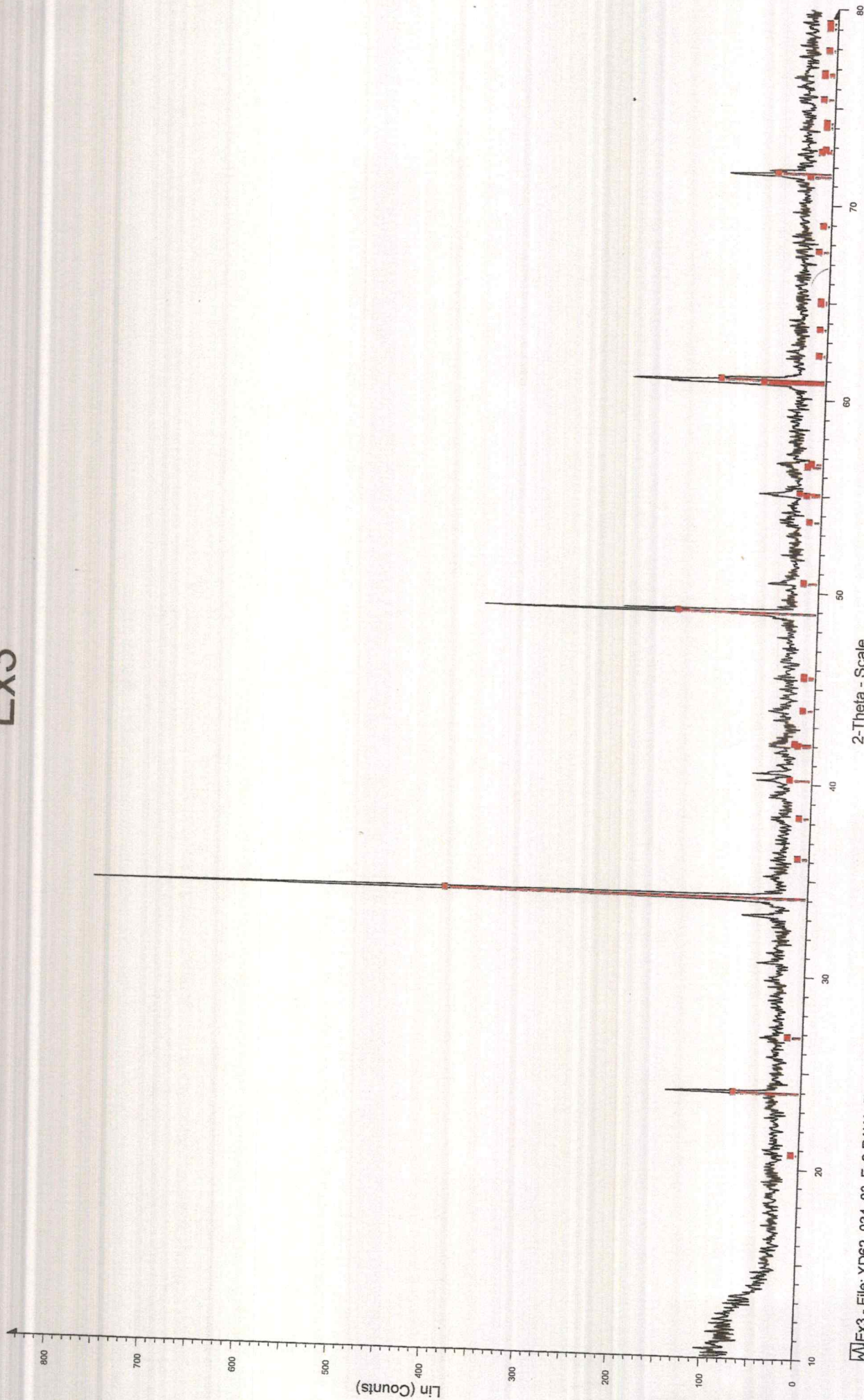
# Ex2



2-Theta - Scale

Ex2 - File: XD62\_034\_02\_Ex2.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 10.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.040 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 10.000 ° - Theta: 5.000 ° - Phi Operations: Import  
76-1132 (C) - Calcium Manganese Oxide - CaMnO3 - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic - a 5.27900 - b 7.44800 - c 5.26400 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Primitive - Pnm

# Ex3



Ex3 - File: XD62\_034\_03\_Ex3.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 10.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.040 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 10.000 ° - Theta: 5.000 ° - Ph

Operations: Import

76-1132 (C) - Calcium Manganese Oxide - CaMnO3 - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic - a 5.27900 - b 7.44800 - c 5.26400 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Primitive - Pnm

Ca Mn O<sub>3</sub><sup>†</sup>  
 Calcium Manganese Oxide

<b>Lattice :</b> Orthorhombic		<b>Mol. weight =</b> 143.02
<b>S.G. :</b> Pnma (62)		<b>Volume [CD] =</b> 206.97
<b>a =</b> 5.27900	<b>Z =</b> 4	<b>Dx =</b> 4.590
<b>b =</b> 7.44800		
<b>c =</b> 5.26400		
<b>a/b =</b> 0.70878		<b>//cor =</b> 3.21
<b>c/b =</b> 0.70677		

ICSD COLLECTION CODE : 035218  
 TEMPERATURE FACTOR : ATF

\*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference :  
 \*J. Solid State Chem., volume 45, page 71, (1982) :  
 Poeppelmeier, K.R., Leonowicz, M.E., Scanlon, J.C., Longo, J.M., Yelon, W.B.

<b>Radiation :</b> CuKα1	<b>Filter :</b> Not specified
<b>Lambda :</b> 1.54060	<b>d-sp :</b> Calculated spacings

2th	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
20.645	<1	0	1	1
23.853	17	1	0	1
*23.853	17	0	2	0
26.722	2	1	1	1
34.002	100	1	2	1
*34.002	100	0	0	2
36.073	1	2	1	0
38.177	1	1	0	2
40.125	4	1	1	2
*40.125	4	0	3	1
41.919	2	2	2	0
42.002	3	0	2	2
43.776	1	1	3	1
45.471	1	2	2	1
45.530	1	1	2	2
48.825	37	2	0	2
*48.825	37	0	4	0
50.434	2	2	3	0
*50.434	2	2	1	2
53.589	1	1	3	2
*53.589	1	0	1	3
54.976	2	3	0	1
55.055	4	2	2	2
*55.055	4	1	4	1
56.460	2	3	1	1
56.593	1	1	1	3
60.768	15	3	2	1
60.896	27	0	4	2
*60.896	27	1	2	3
62.237	<1	2	3	2
63.626	<1	2	0	3
*63.626	<1	1	4	2
64.910	<1	3	1	2
65.017	<1	0	5	1
*65.017	<1	0	3	3
67.581	1	3	3	1
68.908	<1	3	2	2
71.418	4	4	0	0
71.575	13	2	4	2
72.706	1	4	1	0
72.852	<1	2	5	0
73.989	<1	4	0	1
74.206	<1	1	0	4
75.403	1	2	5	1
*75.403	1	1	1	4
76.607	1	3	4	1
*76.607	1	3	0	3
76.721	1	1	4	3
*76.721	1	0	2	4
77.883	<1	3	1	3
79.032	<1	4	2	1
79.245	<1	1	2	4
81.695	7	1	6	1
*81.695	7	2	0	4
82.764	1	4	3	0
*82.764	1	4	1	2
82.904	1	2	5	2
*82.904	1	2	1	4
84.150	<1	3	4	2
*84.150	<1	2	4	3
85.222	<1	4	3	1
85.431	<1	0	5	3
*85.431	<1	1	3	4
86.458	<1	4	2	2
86.625	<1	2	2	4
*86.625	<1	0	6	2
87.778	1	3	5	1
*87.778	1	3	3	3
89.043	<1	2	6	1
*89.043	<1	1	6	2

## ภาคผนวก ข

ตารางแสดงการวิเคราะห์โดยเครื่อง Wavelength Dispersive X-ray fluorescence spectrometer เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างจากศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี



วันที่ออก : 10 เมษายน พ.ศ. 2562  
เลขที่รายงาน : TR62-00021  
หน้า : 1/1

## ใบรายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า	นางสาวกาญจนารมภ์ สุขเรือง สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อตัวอย่าง	CaCO <sub>3</sub> EX <sub>1</sub>
รหัสตัวอย่าง	TS62-02-00003-001
ชนิดตัวอย่าง	ของแข็ง
ลักษณะและสภาพตัวอย่าง	ของแข็งสีขาวผสมกรวดบร็อกเกตเป็นแผ่น
วันที่รับตัวอย่าง	18 มีนาคม พ.ศ. 2562
วันที่ทดสอบ	29 มีนาคม พ.ศ. 2562

### ผลการทดสอบ

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบอ้างอิง
Ca	97.6	mass%	ทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่อง Wavelength Dispersive X-ray fluorescence spectrometer
Mg	0.597	mass%	
Na	0.498	mass%	
Si	0.495	mass%	
P	0.230	mass%	
Al	0.119	mass%	
S	0.110	mass%	
Sr	0.1000	mass%	
Fe	0.0927	mass%	
K	0.0861	mass%	
Cu	0.0640	mass%	

-End of Report-

อนุมัติผลโดย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญชลี สำเภา)

ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายปฏิบัติการวิจัย

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น

รายงานผลการทดสอบต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับความยินยอมอย่างเป็นทางการ ยกเว้นทำทั้งฉบับ

## SQX Calculation Result

Sample : TS62-00003-001

Date analyzed : 2019- 3-29 12:13

Application : F-U\_Solid\_N\_673

Sample type : Oxide Powder

Balance :

Binder : H3BO3

Ratio : 8.9374

Matching library :

Sample film corr. :

Impurity corr. :

File : EX1

No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Ca	97.6	mass%	0.02132	Ca-KA	226.0317	35.2645
2	Mg	0.597	mass%	0.02371	Mg-KA	0.2849	0.2157
3	Na	0.498	mass%	0.03499	Na-KA	0.0753	0.1799
4	Si	0.495	mass%	0.00457	Si-KA	0.9239	0.1787
5	P	0.230	mass%	0.00256	P -KA	1.1744	0.0831
6	Al	0.119	mass%	0.00572	Al-KA	0.1934	0.0428
7	S	0.110	mass%	0.00594	S -KA	0.5518	0.0397
8	Sr	0.1000	mass%	0.00575	Sr-KA	8.1357	0.0361
9	Fe	0.0927	mass%	0.01160	Fe-KA	0.5371	0.0335
10	K	0.0861	mass%	0.00554	K -KA	0.2033	0.0311
11	Cu	0.0640	mass%	0.00794	Cu-KA	1.0495	0.0231



วันที่ออก : 10 เมษายน พ.ศ. 2562  
เลขที่รายงาน : TR62-00022  
หน้า : 1/1

## ใบรายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า	นางสาวกาญจนภรณ์ สุขเรือง สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อตัวอย่าง	CaCO <sub>3</sub> EX <sub>2</sub>
รหัสตัวอย่าง	TS62-02-00003-002
ชนิดตัวอย่าง	ของแข็ง
ลักษณะและสภาพตัวอย่าง	ของแข็งสีขาวผสมกรวดบอริกอัดเป็นแผ่น
วันที่รับตัวอย่าง	18 มีนาคม พ.ศ. 2562
วันที่ทดสอบ	29 มีนาคม พ.ศ. 2562

### ผลการทดสอบ

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบอ้างอิง
Ca	98.3	mass%	ทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่อง Wavelength Dispersive X-ray fluorescence spectrometer
Mg	0.533	mass%	
P	0.192	mass%	
Si	0.183	mass%	
Na	0.173	mass%	
S	0.132	mass%	
Bi	0.123	mass%	
Fe	0.113	mass%	
K	0.100	mass%	
Sr	0.0841	mass%	
Al	0.0795	mass%	
Ni	0.0330	mass%	

-End of Report-

อนุมัติผลโดย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญชลี สำเภา)

ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายปฏิบัติการวิจัย

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น

รายงานผลการทดสอบต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับความยินยอมอย่างเป็นทางการ ยกเว้นทำทั้งฉบับ

## SQX Calculation Result

Sample : TS62-00003-002

Date analyzed : 2019- 3-29 11:51

Application : F-U\_Solid\_N\_671

Sample type : Oxide Powder

Balance :

Binder : H3BO3

Ratio : 8.9821

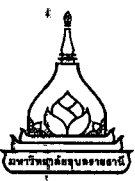
Matching library :

Sample film corr. :

Impurity corr. :

File : EX2

No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Ca	98.3	mass%	0.02115	Ca-KA	227.3357	35.6165
2	Mg	0.533	mass%	0.02140	Mg-KA	0.2541	0.1932
3	P	0.192	mass%	0.00287	P -KA	0.9799	0.0695
4	Si	0.183	mass%	0.00375	Si-KA	0.3413	0.0663
5	Na	0.173	mass%	0.03144	Na-KA	0.0261	0.0626
6	S	0.132	mass%	0.00575	S -KA	0.6632	0.0478
7	Bi	0.123	mass%	0.01573	Bi-LA	2.1760	0.0446
8	Fe	0.113	mass%	0.01105	Fe-KA	0.6552	0.0411
9	K	0.100	mass%	0.00589	K -KA	0.2372	0.0364
10	Sr	0.0841	mass%	0.00579	Sr-KA	6.8066	0.0305
11	Al	0.0795	mass%	0.00423	Al-KA	0.1296	0.0288
12	Ni	0.0330	mass%	0.00854	Ni-KA	0.4104	0.0120



วันที่ออก : 10 เมษายน พ.ศ. 2562  
เลขที่รายงาน : TR62-00023  
หน้า : 1/1

### ใบรายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า	นางสาวกาญจนารณ์ สุขเรือง สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อตัวอย่าง	CaCO <sub>3</sub> EX <sub>2</sub>
รหัสตัวอย่าง	TS62-02-00003-003
ชนิดตัวอย่าง	ของแข็ง
ลักษณะและสภาพตัวอย่าง	ของแข็งสีขาวผสมกรดบอริกอัดเป็นแผ่น
วันที่รับตัวอย่าง	18 มีนาคม พ.ศ. 2562
วันที่ทดสอบ	29 มีนาคม พ.ศ. 2562

### ผลการทดสอบ

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบอ้างอิง
Ca	98.3	mass%	ทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่อง Wavelength Dispersive X-ray fluorescence spectrometer
Mg	0.560	mass%	
S	0.329	mass%	
P	0.203	mass%	
Si	0.136	mass%	
K	0.0923	mass%	
Sr	0.0897	mass%	
W	0.0886	mass%	
Fe	0.0846	mass%	
Al	0.0617	mass%	
Cu	0.0352	mass%	

-End of Report-

อนุมัติผลโดย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญชลี สำเภา)

ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายปฏิบัติการวิจัย

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น

รายงานผลการทดสอบต้องไม่ถูกทำสำเนาเฉพาะเพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับความยินยอมอย่างเป็นทางการ ยกเว้นทำทั้งฉบับ

## SQX Calculation Result

Sample : TS62-00003-003

Date analyzed : 2019- 3-29 12:02

Application : F-U\_Solid\_N\_672

Sample type : Oxide Powder

Balance :

Binder : H3BO3

Ratio : 8.9920

Matching library :

Sample film corr. :

Impurity corr. :

File : EX3

No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Ca	98.3	mass%	0.02061	Ca-KA	207.6433	32.5635
2	Mg	0.560	mass%	0.02213	Mg-KA	0.2438	0.1855
3	S	0.329	mass%	0.00631	S -KA	1.5095	0.1089
4	P	0.203	mass%	0.00311	P -KA	0.9452	0.0671
5	Si	0.136	mass%	0.00453	Si-KA	0.2324	0.0452
6	K	0.0923	mass%	0.00630	K -KA	0.1988	0.0306
7	Sr	0.0897	mass%	0.00580	Sr-KA	6.6340	0.0297
8	W	0.0886	mass%	0.02300	W -LA	0.5233	0.0293
9	Fe	0.0846	mass%	0.01201	Fe-KA	0.4465	0.0280
10	Al	0.0617	mass%	0.00453	Al-KA	0.0919	0.0204
11	Cu	0.0352	mass%	0.00809	Cu-KA	0.5255	0.0117

## ภาคผนวก ค

ตารางแสดงผลการทดลองที่ขั้วไฟฟ้ามีการเคลือบด้วยเงินและไม่มีการเคลือบด้วยเงิน

ตารางที่ 1 แสดงค่าต่างๆ ที่ได้จากการวัดไฟของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก จากเงื่อนไขการลอกเยื่อด้วย สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยที่ขั้วไม่มีการเคลือบด้วยเงิน

ลำดับ	อุณหภูมิฝั่งร้อน(Th)	อุณหภูมิฝั่งเย็น(Tc)	ผลต่างของอุณหภูมิ ( $\Delta T$ )	โวลต์(V)	กระแส (I)
1	34.4	29.7	4.768.8	0.3	0.11
2	50	30.3	19.70	0.27	0.7
3	100	31.2	68.80	1.29	3.8
4	150	33.1	116.90	2.86	8.3
5	200	36.7	163.30	4.68	13.8
6	250	43.0	207.00	6.87	20.4
7	300	53.3	246.70	9.30	27.5
8	350	68.2	281.10	11.83	34.8
9	400	90.9	309.10	14.73	43.6
10	450	118.7	331.30	17.62	52.1
11	500	159.9	340.10	19.96	59.2

ตารางที่ 2 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการวัดไฟของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก จากเงื่อนไขการลอกเยื่อด้วยมือโดยที่ชั่วโมงไม่มีการเคลือบด้วยเงิน

ลำดับ	อุณหภูมิฝั่งร้อน(Th)	อุณหภูมิฝั่งเย็น(Tc)	ผลต่างของอุณหภูมิ ( $\Delta T$ )	โวลต์(V)	กระแส (I)
1	28.3	27.2	1.1	0.0	0.00
2	50	27	23	0.92	0.00
3	100	27.1	29	2.2	0.72
4	150	28.1	121.9	7.1	2.39
5	200	30.9	169.1	13.8	4.65
6	250	37.00	213	24.3	7.74
7	300	48	252	37.9	12.17
8	350	66.1	283.9	50.4	16.36
9	400	94.4	305.6	61.9	20.17
10	450	138	313	68.5	22.24
11	500	198	302	69.5	23.29
12	600	281.5	318.5	73.9	24.86

ตารางที่ 3 แสดงผลต่างของอุณหภูมิ กระแส และโวลต์ จากการวัดไฟของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้จากเงื่อนไขที่ 2 แบบไม่เคลือบเงิน

ลำดับ	อุณหภูมิฝั่งร้อน(Th)	อุณหภูมิฝั่งเย็น(Tc)	ผลต่างของอุณหภูมิ( $\Delta T$ )	โวลต์(V)	กระแส (I)
1	27	25.9	1.1	0	0.01
2	50	27	23	0.4	0.41
3	100	27.1	72.9	1.3	0.47
4	150	28.1	121.9	2.5	0.85
5	200	31	169.1	3.9	1.32
6	250	37	213	6.7	2.23
7	300	48	252	11.7	3.93
8	350	66.1	283.9	26.3	9.11
9	400	94.4	305.6	30.3	10.2
10	450	138	312	39.2	13.16
11	500	198	302	48.2	16.22
12	550	231.5	318.5	54.9	18.36

ตารางที่ 4 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการวัดไฟของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก จากเงื่อนไขลอคเยื่อด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH) โดยที่ขั้วไฟฟ้ามีการเคลือบด้วยเงิน

ลำดับ	อุณหภูมิฝั่งร้อน(Th)	อุณหภูมิฝั่งเย็น(Tc)	ผลต่างของอุณหภูมิ( $\Delta T$ )	โวลต์(V)	กระแส (I)
1	25.1	26.6	1.5	0.1	0.00
2	50	35.5	14.5	3.6	1.26
3	100	39.8	60.2	19.6	6.68
4	150	48.9	101.1	34.7	11.76
5	200	62.1	137.9	47.3	15.89
6	250	80	170	57.9	19.53
7	300	102.2	197.8	66.7	22.30
8	350	129.0	221	72.6	24.47
9	400	160.5	239.5	77.0	25.94
10	450	198.1	251.9	79.7	26.84
11	500	240.9	259.1	79.9	26.91

ตารางที่ 5 แสดงผลต่างของอุณหภูมิ กระแส และโวลต์ จากการวัดไฟของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่  
ได้จากเงื่อนไขการลอกเยื่อด้วยมือ โดยที่ขั้วไฟฟ้ามีการเคลือบด้วยเงิน

ลำดับ	อุณหภูมิฝั่ง ร้อน(Th)	อุณหภูมิฝั่งเย็น (Tc)	ผลต่างของ อุณหภูมิ ( $\Delta T$ )	โวลต์(V)	กระแส (I)
1	28.3	27.8	0.5	0.0	0.0
2	50	35.9	14.1	1.5	0.52
3	100	38.5	61.5	5.4	1.85
4	200	52.3	147.7	18.4	6.23
5	250	63.6	186.4	26.7	9.01
6	300	77.9	222.1	35.3	11.92
7	350	98.3	251.7	43.4	14.67
8	400	123.7	276.3	51.2	17.30
9	450	157.9	292.1	58.8	19.86
10	500	203	297	64.1	21.65

ตารางที่ 6 แสดงผลต่างของอุณหภูมิ กระแส และโวลต์ จากการวัดไฟของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่  
ได้จากเงื่อนไขไม่มีการลอกเยื่อ โดยที่ขั้วไฟฟ้ามีการเคลือบด้วยเงิน

ลำดับ	อุณหภูมิฝั่ง ร้อน(Th)	อุณหภูมิฝั่งเย็น (Tc)	ผลต่างของ อุณหภูมิ ( $\Delta T$ )	โวลต์(V)	กระแส (I)
1	34.8	30.3	4.5	0.8	0.00
2	50	31.0	19	1.8	0.64
3	100	32.7	67.3	7.5	2.54
4	150	35.4	114.2	16.4	5.53
5	200	39.6	160.4	26.2	8.8
6	250	48.2	151.8	38.2	12.58
7	300	60.5	239.5	49.4	16.59
8	350	79.9	270.2	59.9	20.08
9	400	107.8	292.2	67.5	22.65
10	450	148.1	301.9	72.6	24.28
11	500	201.3	298.7	73.1	24.16

