

การพัฒนาสารไททานेटที่มีโครงสร้างแบบชั้นสำหรับประยุกต์ใช้งานทางไฟฟ้า

DEVELOPMENT OF LAYERED TITANATE FOR ELECTRONIC APPLICATION



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF LAYERED TITANATE FOR ELECTRONIC
APPLICATION



A SPECIAL PROJECT SUMMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาสารไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้นสำหรับประยุกต์ใช้งาน
ทางไฟฟ้า
Special Project Title Development of Layered Titanate for Electronic
Appication
นักศึกษา ปฏิภาณ ปาละโชติ
รหัสประจำตัว 58110033
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วรรณวิไลย์ วิทยากร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ทศพล เมลืองนนท์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.เบญจพล ต้นอู๋	
ผศ.ดร.กนกนันทน์ ภาชีรักษ์	
รศ.ดร.วรรณวิไลย์ วิทยากร	
ผศ.ดร.ทศพล เมลืองนนท์	

ภาควิชาภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง อนุมัติให้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)

หัวหน้าภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่..... เดือน.....พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การพัฒนาสารไททานेटที่มีโครงสร้างแบบ ชั้นสำหรับประยุกต์ใช้งานทางไฟฟ้า
นักศึกษา	นาย ปฏิภาณ ปาละโชติ
รหัสประจำตัว	58110033
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. วรณวิสัย วิทยากร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร. ทศพล เมลืองนนท์

บทคัดย่อ

ในโครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นความสนใจไปที่การพัฒนาเซรามิกไททานेटที่มีโครงสร้างแบบชั้นเพื่อประยุกต์ใช้ในงานทางไฟฟ้า โดยใช้สารซีเซียมคาร์บอเนต ซิงค์ออกไซด์ และไททานเนียมออกไซด์ ในการเตรียมเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททานेट ($Cs_{0.7}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ด้วยการเผาแบบซินเตอร์ในเงื่อนไขการทดลองต่างๆ เพื่อให้เม็ดเซรามิกมีความหนาแน่นมากที่สุด โดยมีเงื่อนไขอุณหภูมิในการ ซินเตอร์ อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการซินเตอร์ และการเผาซินเตอร์ในบรรยากาศต่างๆ จากนั้นนำไปตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้น โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยเครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวัด LCR ตามลำดับ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขในการเผาซินเตอร์เซรามิกในระบบต่างๆ และสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าตัวแปรในระหว่างกระบวนการเตรียมซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิและบรรยากาศในการเผาซินเตอร์ มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกในระบบนี้เป็นอย่างมาก ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกนั้นๆเป็นหลัก

คำสำคัญ : ไททานेटที่มีโครงสร้างแบบชั้น การซินเตอร์ ซีเซียมไททานेट สมบัติไดอิเล็กทริก

Title	Development of Layered Titanate for Electronic Application
Student	Mr. Patiphan Palachote
Student ID	58110033
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2018
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wanwilai Vittayakorn
Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Tosapol Maluangnont

Abstract

This work focuses on the development of layered titanate ceramics for using in electronic applications. Cs_2CO_3 , ZnO and TiO_2 powders were selected as precursors. The sintering process is modified to various conditions by varying firing temperature, heating/cooling rates and firing atmosphere in order to achieve the best densification of these ceramics cesium zinc titanate ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$). Phase formation and microstructure of all samples are investigated by using X-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscope (SEM), respectively. The dielectric properties of all ceramics are also measured by using LCR meter. From the results, it can be concluded that dielectric properties of ceramics in this system strongly depend on processing parameters such as sintering temperature, heating/cooling rates and firing atmosphere. Moreover, the dielectric properties also relate with densification and microstructure of these ceramics.

Keywords : layered titanate, sintering, cesium titanate, dielectric properties

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รศ.ดร. วรณวิไลย์ วิทยากร และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร. ทศพล เมลืองนนท์ ที่ได้ให้ความรู้ คำชี้แนะ การช่วยเหลือและการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำโครงการวิจัยนี้รวมถึง รศ.ดร.เบญจพล ต้นฮู้ และ ผศ.ดร.กนกนันทน์ ภาชีรักษ์ ประธานและกรรมการในการสอบหัวข้อโครงการวิจัยนี้ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะสำหรับโครงการนี้

ขอบคุณ นาย วชิรวิทย์ ยศราวาศ ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการทำโครงการวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบคุณสมาชิกของหน่วยวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังที่ให้คำปรึกษาและการช่วยเหลือในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการทำรูปเล่มรายงาน

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากโครงการวิจัยเล่มนี้ ผู้วิจัยขอบแต่บิดามารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านของผู้วิจัยด้วยความเคารพอย่างยิ่ง หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้

ปฐิภาณ ปาละโชติ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	i
Abstract.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญภาพ.....	vii
สารบัญตาราง.....	x
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัยแผนการดำเนินงาน.....	3
1.4 แผนการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ตัวเก็บประจุและวัสดุไดอิเล็กทริก.....	5
2.1.1 ความหมายของตัวเก็บประจุ.....	5
2.1.2 หลักการการเบื้องต้นของตัวเก็บประจุ.....	5
2.1.3 วัสดุไดอิเล็กทริก.....	7
2.2 สารไททานเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้น (Layered Titanate).....	9
2.2.1 แผ่นไททานเนต.....	9
2.2.2 สมบัติของวัสดุไททานเนต.....	10
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.4 เทคนิคที่ใช้ในการเตรียม.....	17
2.4.1 การเตรียมผงผสม.....	17
2.4.2 การเตรียมเซรามิก.....	19
2.5 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	20
2.5.1 เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	21
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	24
3.1 สารเคมีที่ใช้	24
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้.....	24
3.3 กระบวนการเตรียมผงผสม.....	27
3.4 กระบวนการเตรียมเม็ดเซรามิก.....	29
3.5 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก.....	31
3.5.1 การหาความหนาแน่น (density).....	31
3.5.2 การหดตัวหลังจากการเผา (shrinkage).....	31
3.5.3 น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผา (weight loss).....	32
3.6 การตรวจสอบเฟสของเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer ; XRD)	32
3.7 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก.....	33
3.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer หรือ EDS.....	34
3.9 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	36
4.1 ผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต	36
4.1.1 สมบัติกายภาพ.....	36
4.1.2 เฟสที่เกิดขึ้นของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต	37
4.1.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต	37
4.1.4 การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDX.....	38
4.2 เซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต.....	40
4.2.1 อุณหภูมิ	40
4.2.2 อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ	49

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.3 บรรยากาศในการเผา	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
บรรณานุกรม.....	72
ประวัติผู้เขียน.....	70



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ตัวเก็บประจุในอุดมคติ.....	2
1.2 โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น.....	2
2.1 แสดงโครงสร้างตัวเก็บประจุ.....	6
2.2 โมเลกุลของไดอิเล็กทริกแบบมีขั้ว (A) ขณะไม่ได้ขั้วสนามไฟฟ้า (B) ขณะได้รับสนามไฟฟ้า.....	7
2.3 โมเลกุลของไดอิเล็กทริกแบบไม่มีขั้ว (A) ขณะไม่ได้ขั้วสนามไฟฟ้า (B) ขณะได้รับสนามไฟฟ้า.....	8
2.4 วัสดุไดอิเล็กทริกช่วยลดความต่างศักย์ในระบบ.....	8
2.5 แสดงลักษณะโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์.....	9
2.6 (A) แสดงช่องว่างระหว่างชั้นที่มีไอออน (B) แสดงแผ่นนาโนไททานเนต.....	10
2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) ที่มีไอออนโลหะกระจายตัวอยู่บริเวณช่องว่างของแต่ละชั้น.....	12
2.8 แสดงโครงสร้างสารประกอบซีเซียมไททานเนตในเฟสของ $Cs_2Ti_6O_{13}$ อัตราส่วน 1:6.....	13
2.9 แสดงโครงสร้างสารประกอบซีเซียมไททานเนตในเฟสของ $Cs_2Ti_5O_{11}$ อัตราส่วน 1:5.....	14
2.10 แสดงค่าไดอิเล็กทริกของสาร $Ba_{0.96}La_{0.04}TiO_3$	15
2.11 แสดงความหนาแน่นของสารทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิการซินเตอร์ต่างๆ.....	16
2.12 หลักการทำงานของ การ ball-mill.....	17
2.13 เตาเผาแบบป้อนด้านหน้า.....	18
2.14 (A) เตาเผาท่อแบบแนวตั้ง (B) เตาเผาท่อแนวนอนแบบขอบต่ำ และ (C) เตาเผาท่อแนวนอนแบบขอบสูง.....	18
2.15 แสดงกระบวนการซินเตอร์.....	20
2.16 แผนภาพแสดงการตกกระทบของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law).....	21
2.17 แสดงส่วนประกอบต่างๆในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	23
2.18 แสดงการคายพลังงานของอิเล็กตรอนเพื่อลดระดับชั้นพลังงาน.....	23
3.1 แผนผังการเตรียมเซรามิกในระบบ $Cs_{0.7}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$	26
3.2 แสดงเครื่องบดย่อยสารด้วยลูกบอล.....	28
3.3 แสดงครกบดสาร.....	28
3.4 แสดงเครื่องอัดแบบแกนเดียว (uniaxial pressing).....	29
3.5 แสดงแม่พิมพ์อัดสาร.....	30

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.6 แสดงลักษณะของเม็ดอัด	30
3.7 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ...	34
4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต	36
4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	37
4.3 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	38
4.4 แสดงผลการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบธาตุของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	39
4.5 เซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส.....	41
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์.....	41
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวและอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์.....	42
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์และอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์	43
4.9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆตามเงื่อนไข	44
4.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต (A) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 1000 เท่า (B) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 1000 เท่า (C) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 25 เท่า	45
4.11 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต (A) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 1000 เท่า (B) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 1000 เท่า (C) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 25 เท่า	46
4.12 ผลของความถี่ต่อค่าทางไฟฟ้า (A) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (B) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก	47
4.13 ผลของอุณหภูมิต่อค่าทางไฟฟ้า (A) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (B) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก.....	48
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ.....	50

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวและอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ	51
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์.....	52
4.17 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างๆ.....	53
4.18 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตกำลังขยาย 1000 เท่า (A) ซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที (B) ซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที (C) ซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที	54
4.19 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตกำลังขยาย 1000 เท่า (A) ซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที (B) ซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที (C) ซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที	55
4.20 ผลของความถี่ต่อค่าทางไฟฟ้า (A) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (B) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก	56
4.21 ผลของอุณหภูมิต่อค่าทางไฟฟ้า (A) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (B) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก.....	57
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและบรรยากาศในการเผาซินเตอร์	59
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวและบรรยากาศในการเผา	60
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์และบรรยากาศในการเผา	61
4.25 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการเผาซินเตอร์ในบรรยากาศต่างๆ.....	62
4.26 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตกำลังขยาย 1000 เท่า (A) ซินเตอร์ในอากาศ (B) ซินเตอร์ในไนโตรเจน.....	63
4.27 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตกำลังขยาย 1000 เท่า (A) ซินเตอร์ในบรรยากาศปกติ (B) ซินเตอร์ในไนโตรเจน	63
4.28 ผลของความถี่ต่อค่าทางไฟฟ้า (A) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (B) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก	64
4.29 ผลของอุณหภูมิต่อค่าทางไฟฟ้า (A) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (B) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก.....	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแผนการดำเนินงานทั้งหมด	4
2.1 ตารางแสดงภาพรวมสมบัติต่างๆของไททาเนตที่มีโครงสร้างระดับนาโน	11
4.1 องค์ประกอบธาตุของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการแคลไซน์ ที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ 800 องศาเซลเซียส.....	38
4.2 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($Cs_{0.7}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	40
4.3 ค่าการหดตัวของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($Cs_{0.7}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที	42
4.4 น้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์ของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($Cs_{0.7}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที	43
4.5 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($Cs_{0.7}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 5 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	49
4.6 ค่าการหดตัวของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($Cs_{0.7}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 5 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	51
4.7 น้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์ของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($Cs_{0.7}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 5 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	52
4.8 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($Cs_{0.7}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในอากาศและไนโตรเจน.....	58
4.9 ค่าการหดตัวของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($Cs_{0.7}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในอากาศและไนโตรเจน.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.10		
น้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์ของเซรามิกในระบบซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในอากาศและไนโตรเจน.....	60	
4.11	ผลทางไฟฟ้าของเซรามิกซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนตที่ใช้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ต่างๆ.....	66
4.12	ผลทางไฟฟ้าของเซรามิกซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนตที่ใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาซิน เตอร์ต่างๆ.....	66
4.13	ผลทางไฟฟ้าของเซรามิกซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนตที่เผาซินเตอร์ในบรรยากาศต่างๆ.....	66



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านต่างๆเข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในการใช้ชีวิตประจำวันทำให้สามารถใช้ชีวิตได้อย่างสะดวกสบายมากขึ้น ซึ่งตัวเก็บประจุ (Capacitor) ก็เป็นชิ้นส่วนสำคัญที่พบเจอได้ทั่วไปในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยตัวเก็บประจุมีหน้าที่ในการเก็บประจุ (Charge) และ ปล่อยประจุออกไป (Discharge) ซึ่งในปัจจุบันตัวเก็บประจุถูกพัฒนาเพิ่มมากขึ้นจากในอดีตโดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ตัวเก็บประจุสามารถเก็บประจุได้มากยิ่งขึ้น มีขนาดเล็กลงเพื่อจัดเก็บหรือการใช้งานที่ง่ายประหยัดพื้นที่ โดยที่ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจยังคงเดิมหรือมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ซึ่งตามหลักการแล้วค่าความจุของตัวเก็บประจุจะเป็นดังสมการที่ (1.1) ที่ว่า

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (\text{ฟารัด}) \quad (1.1)$$

โดย C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกคั่นกลาง (ฟารัด)

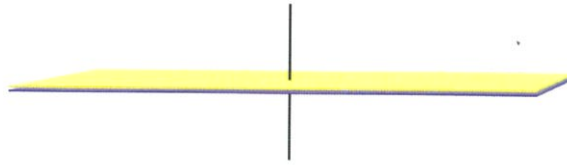
ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมของวัสดุ (ฟารัด/เมตร)

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (มีค่า $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$)

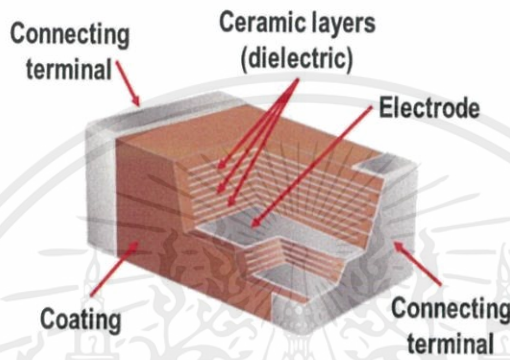
A คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วโลหะ (เมตร)

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ (เมตร)

จากสมการจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการเก็บประจุคือ พื้นที่หน้าตัด (A) และความหนา (d) โดยในวัสดุไดอิเล็กทริกเดียวกันหากชิ้นงานยังมีความหนาน้อยและค่าพื้นที่หน้าตัดยังมีค่าที่มากก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามากยิ่งขึ้นตามไปด้วยโดยภาพจำลองตัวเก็บประจุในอุดมคติแสดงไว้ดังภาพที่ 1.1 ซึ่งจะเห็นว่าหากตัวเก็บประจุมีลักษณะดังกล่าวจะทำให้ยากต่อการบรรจุหรือจัดเก็บในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งต่อมาจึงมีการพัฒนาเป็นตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น (Multilayer Capacitor หรือ MLC) ขึ้นมาโดยการนำชั้นบางๆมาซ้อนกันเพื่อลดขนาดให้เล็กลงสามารถนำไปบรรจุในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังที่แสดงในภาพ 1.2



ภาพที่ 1.1 ตัวเก็บประจุในอุดมคติ



ภาพที่ 1.2 โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น

ในจุดนี้เองจึงเกิดแนวคิดที่ว่าหากมีวัสดุที่มีโครงสร้างแบบชั้นตามธรรมชาติที่มีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างในอุดมคติก็น่าจะเป็นสิ่งที่น่าสนใจในศึกษาและพัฒนาเป็นอย่างมาก ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งความสนใจไปที่ไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้น (layer titanate) มาใช้ทำวัสดุไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุเนื่องจากมีลักษณะโครงสร้างสอดคล้องกับความต้องการ โดยไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้นเป็นสารในระบบไททาเนต (Titanate) ที่มีโครงสร้างแบบ 2 มิติ โดยเป็นลักษณะออกตะฮีดรัลเรียงต่อกันเป็นแผ่นดังแสดงในภาพที่ 1.2 โดยแผ่นแต่ละแผ่นจะเรียงซ้อนกันซึ่งชั้นของไททาเนตที่เรียงซ้อนกันเหล่านี้จะถูกเรียกว่าโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) โดยในโครงการวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงโครงสร้างของไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้นโดยการใช้ ซีเซียม (Cs) โพแทสเซียม (K) และรูบิเดียม (Rb) โดยเชื่อว่าขนาดอะตอมที่แตกต่างกันจะวางตัวอยู่ระหว่างชั้นของออกตะฮีดรัลแล้วส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นในแต่ละชั้นของโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งก็จะส่งผลต่อค่าความสามารถในการเก็บประจุให้เปลี่ยนแปลงไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมเซรามิกไททานेटที่มีโครงสร้างแบบชั้นด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1.2.2 เพื่อปรับปรุงโครงสร้างแบบชั้นของสารในระบบไททานेटโดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรในกระบวนการเตรียมที่ส่งผลต่อสมบัติที่วัสดุแสดงออกมา

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัยแผนการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมสารไททานेटที่มีโครงสร้างแบบชั้นโดยมีสูตรเคมีดังนี้ $\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ร่วมกับการบดย่อยด้วยลูกบอล จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นเซรามิกด้วยเทคนิคการกดอัดด้วยเครื่องอัดแกนเดียว จากนั้นนำไปเผาซินเตอร์ในเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขในการซินเตอร์ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ และบรรยากาศในการเผาสารที่มีผลต่อ เฟสที่เกิดขึ้น สมบัติกายภาพ ลักษณะโครงสร้างจุลภาค และสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกไททานेट

1.4 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงานทั้งหมด

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินงาน									
	ปี พ.ศ. 2561					ปี พ.ศ. 2562				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาข้อมูลการเตรียมสาร	➔									
2.คำนวณและเตรียมสาร	➔									
3.เตรียมผง		➔								
4.เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส		➔								
5.ตรวจสอบสารด้วยเครื่อง XRD		➔	➔							
6.อัดเม็ดขึ้นรูป			➔							
7.นำเม็ดมาเผาด้วยวิธี Sintering ตามตัวแปรต่างๆ				➔						
8.วัดสมบัติทางกลและไฟฟ้าพร้อมบันทึกผล						➔				
9.วิเคราะห์ผล							➔	➔	➔	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยโครงสร้างแบบชั้น กระบวนการเตรียมผงผสม กระบวนการขึ้นรูปเซรามิก กระบวนการซินเตอร์ และเทคนิคทางการตรวจวัดคุณสมบัติด้านต่างๆของวัสดุ

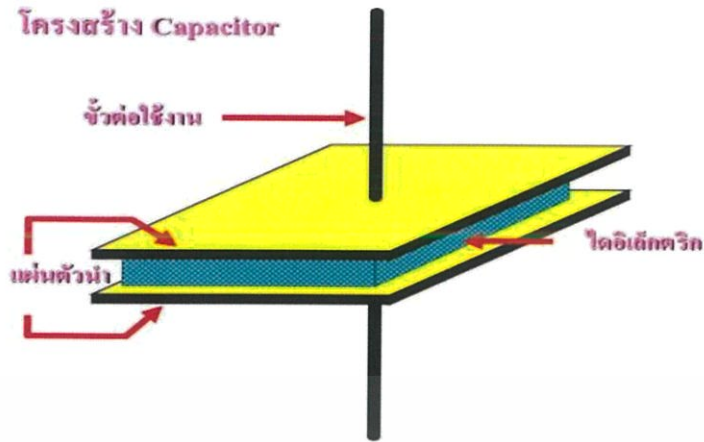
2.1 ตัวเก็บประจุและวัสดุไดอิเล็กทริก

2.1.1 ความหมายของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งมีความสามารถในการเก็บ (Charge) และคายประจุ (Discharge) ถูกนำมาใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปตัวเก็บประจุแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ แบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor) แบบเลือกค่าได้ (Select Capacitor) และแบบเลือกค่าได้ (Variable Capacitor) ตัวเก็บประจุเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคอนเดนเซอร์หรือเรียกย่อๆว่า ตัวซี (C) หน่วยของตัวเก็บประจุคือ ฟารัด (Farad)

2.1.2 หลักการการเบื้องต้นของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บ (Charge) และคายประจุ (Discharge) ได้โดยการนำแผ่นตัวนำ 2 ชั้นมาวางขนานให้ใกล้กันโดยขั้วทั้งสองไม่สัมผัสกัน ระหว่างขั้วทั้งสองจะมีฉนวนกันเรียกว่าไดอิเล็กทริก (Dielectric) ซึ่งไดอิเล็กทริกอาจเป็น อากาศ พลาสติก เซรามิก หรือสารที่มีสภาพคล้ายฉนวนอื่นๆเป็นต้น



ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างตัวเก็บประจุ [1]

จากภาพที่ 2.1 ความจุไฟฟ้าจะเกิดขึ้นจากการให้กระแสไฟฟ้าไปที่ขั้วต่อใช้งานทั้งสองด้าน จะเกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวนำจะทำให้เกิดค่าความจุทางไฟฟ้าโดย ประจุที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวนำมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulomb) ส่วนค่าความจุทางไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด (Farad) สามารถหาค่าการเก็บประจุได้จากสมการที่ (2.1)

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (\text{ฟารัด}) \quad (1.1)$$

โดย C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กตริกคั่นกลาง (ฟารัด)

ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมของวัสดุ (ฟารัด/เมตร)

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (มีค่า $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วโลหะ (เมตร)

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ (เมตร)

ซึ่งความจุของตัวเก็บประจุขึ้นกับตัวแปรดังนี้

- 1) พื้นที่หน้าตัดของสารตัวนำที่เป็นแผ่นตัวนำซึ่งแสดงด้วยอักษร A โดยเมื่อแผ่นตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดมากจะทำให้เก็บประจุได้มาก
- 2) ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลททั้งสองแสดงด้วยอักษร d ถ้าอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กัน ความจุจะมีค่ามาก ถ้าอยู่ในตำแหน่งที่ไกลกันความจุจะมีค่าน้อย
- 3) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถ ในการที่จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น เมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนคั่นระหว่างแผ่นเพลท ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกแต่ละตัว จะแตกต่างกันออกไป ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้ ไดอิเล็กตริกต่างกัน ถึงแม้จะมีขนาดเท่ากัน ค่าความจุและอัตราทนแรงดันอาจแตกต่างกันออกไป สุญญากาศเป็นไดอิเล็กตริกที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อื่น การจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากเกินไปก็อาจทำให้ไดอิเล็กทริกสูญเสียสภาพ จากฉนวนกลายเป็นตัวนำได้

2.1.3 วัสดุไดอิเล็กทริก

ไดอิเล็กทริก (dielectric) หรือฉนวน (insulator) จะมีพฤติกรรมตรงข้ามกับตัวนำโดยจะประกอบด้วยประจุที่มีพันธะยึดอยู่กับจุดศูนย์กลางของนิวเคลียสอย่างเหนียวแน่น ประจุเหล่านี้สร้างสนามไฟฟ้าตัวที่สองที่สามารถเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้ารวมทั้งด้านในและด้านนอกได้ โดยตามธรรมชาติวัสดุไดอิเล็กทริกจะเป็นวัสดุที่ภายในไม่มีประจุไฟฟ้าอิสระหรือมีน้อยมาก แต่หากถูกนำไปวางในสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มถึงระดับหนึ่งก็จะทำวัสดุไดอิเล็กทริกสามารถนำไฟฟ้าได้เช่นกันโดยคุณสมบัติลักษณะนี้ถูกเรียกว่าการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric loss) โดยปกติโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กทริกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่

- 1) แบบมีขั้ว (Polar) คือโมเลกุลที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนและโปรตอนดังภาพที่ 2.2 (ก) หรือเรียกโมเลกุลแบบนี้ว่าเพอร์มาเนนต์ไดโพล (permanent dipole) เมื่อวางในสนามไฟฟ้าจะได้ผลดังภาพ

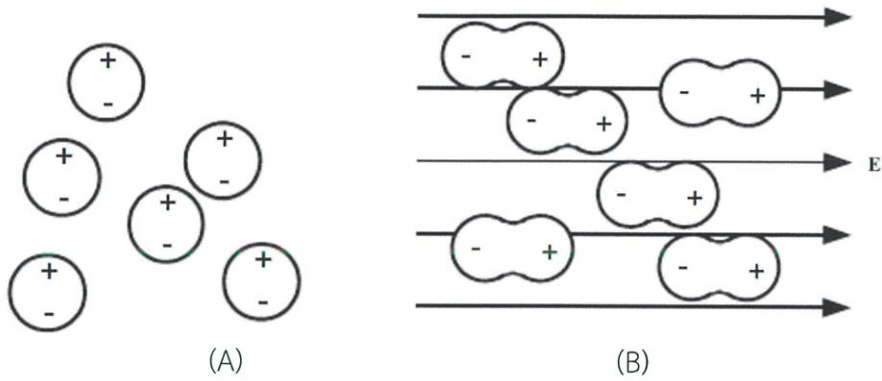


ภาพที่ 2.2 โมเลกุลของไดอิเล็กทริกแบบมีขั้ว (A) ขณะไม่ได้ขั้วสนามไฟฟ้า (B) ขณะได้รับสนามไฟฟ้า

[2]

- 2) แบบไม่มีขั้ว (Non - Polar) คือโมเลกุลที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนและโปรตรอนที่มีจุดศูนย์กลางรวมกันดังที่แสดงในภาพที่ 2.3 (A) และเมื่อถูกวางลงในสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดผลดัง ภาพที่ 2.3 (B) ผลจากภาพดังกล่าวทำให้ถูกแยกขั้วหรือโพลาไรซ์ (polarized) ซึ่งโมเลกุลที่ประพหุติตัวลักษณะดังกล่าวจะถูกเรียกว่าอินดิวิซัไดโพล (induced dipoles) และโดยทั่วไปในโมเลกุลลักษณะนี้เมื่อเราหยุดจ่ายสนามไฟฟ้าจะกลับสู่สถานะเดิมดังภาพที่ 2.3 (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



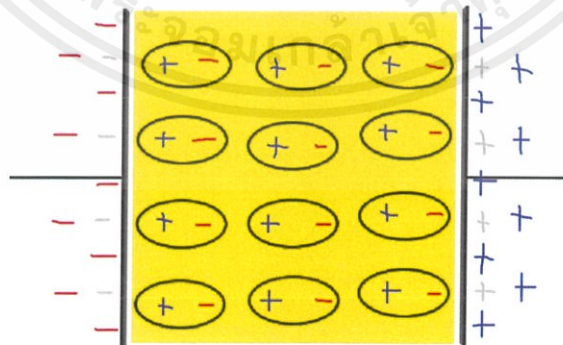
ภาพที่ 2.3 โมเลกุลของไดอิเล็กทริกแบบไม่มีขั้ว (A) ขณะไม่ได้ขั้วสนามไฟฟ้า (B) ขณะได้รับสนามไฟฟ้า

ซึ่งค่าการเก็บประจุในตัวเก็บประจุที่มีไดอิเล็กทริกคั่นกลางคำนวณค่าการเก็บประจุได้จากสมการที่ (2.2)

$$C = \frac{Q}{V} \quad (\text{ฟารัด}) \quad (2.2)$$

โดย C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกคั่นกลาง (ฟารัด)
 Q คือ ประจุรวมทั้งหมดที่อยู่บนตัวนำทั้งสอง (คูลอมบ์)
 V คือ ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำทั้งสองตัว (โวลต์)

วัสดุไดอิเล็กทริกเองก็สามารถช่วยเพิ่มความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุได้ด้วยเนื่องจากประจุบวก/ลบในวัสดุไดอิเล็กทริกจะจับกับประจุบนแผ่นตัวนำความต่างศักย์จึงลดลงดังภาพที่ 2.4 ซึ่งจากสมการ (2.2) จะเห็นได้ว่าการลดความต่างศักย์ลงค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น



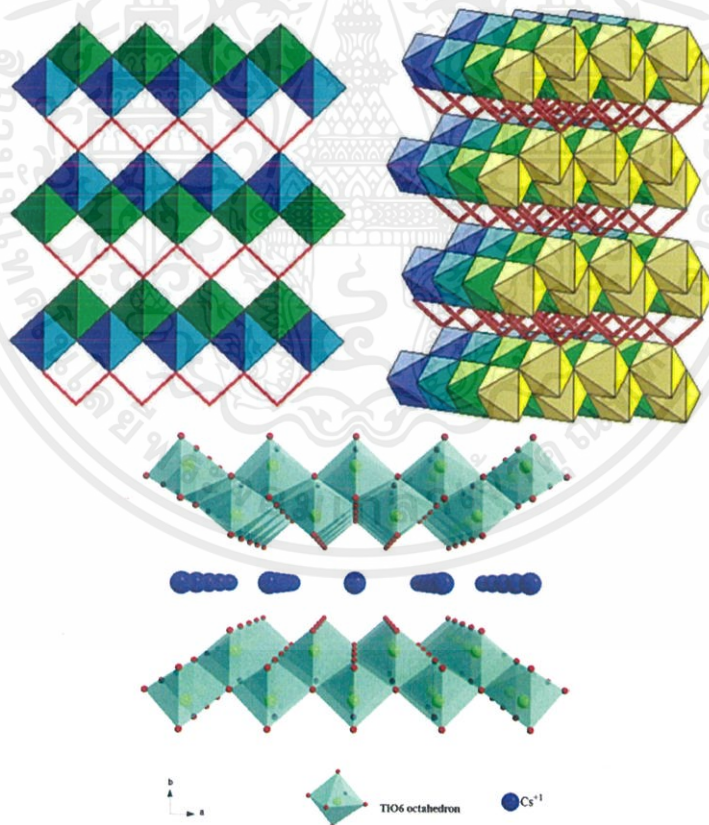
ภาพที่ 2.4 วัสดุไดอิเล็กทริกช่วยลดความต่างศักย์ในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สารไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้น (Layered Titanate)

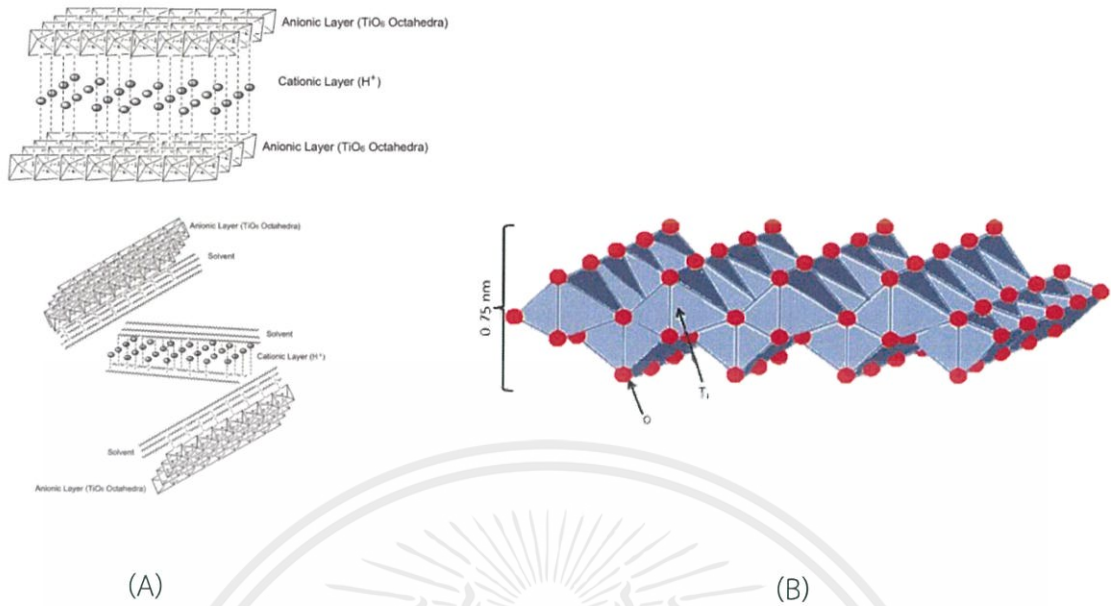
2.2.1 แผ่นไททาเนต

แผ่นไททาเนตเป็นโครงสร้างผลึกแบบ 2 มิติ ซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อขอบของโครงสร้างแบบออกตะฮีดรัลในสารในระบบไททาเนตมีสูตรทางเคมีคือ $A_xTi_{2-x/4}\square_{4x/4}O_4 \cdot H_2O$ ($x \sim 0.7$) (\square แทน vacancy) โดยแผ่นไททาเนตจะมีความหนาและระนาบตามมิติที่เป็นอนันต์ เมื่อแผ่นระนาบเหล่านี้เรียงซ้อนกันจะทำให้เกิดโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) สามารถเตรียมได้จากเฟสที่เป็นของเหลวของโปรโทนิคไททาเนต (protonic titanate) แต่ละชั้นดึงดูดกันด้วยแรงวัลเดอร์วาลโดยหากเพิ่มแรงคูลอมบ์ในกระบวนการเตรียมจะทำให้แต่ละชั้นมีขั้วตรงข้ามกัน จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ได้ข้อมูลว่าแผ่นไททาเนตเป็นโมเลกุลขนาดแมคโคร (macromolecules)



ภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.6 (A) แสดงช่องว่างระหว่างชั้นที่มีไอออน (B) แสดงแผ่นนาโนไททาเนต [4]

2.2.2 สมบัติของวัสดุไททาเนต

วัสดุไททาเนตแบบชั้น เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์อย่างถูกวิธีจะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวซึ่งหากมีการปนเปื้อนสารที่ได้จะมีสีแปลกออกไปเมื่อให้ความร้อนกับวัสดุในบรรยากาศที่ต่ำ หรือในแก๊สเฉื่อย โดยความหนาแน่นของท่อนาโนไททาเนต (titanate nanotube) มีค่า 3.12 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) สิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างกลุ่มก้อน (bulk) กับไททาเนตที่มีโครงสร้างระดับนาโนคือ ภายในของกลุ่มก้อน (bulk) ไม่สามารถเข้าถึงได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้ไม่สามารถแยกออกเป็นชั้นๆและจะไม่เกิดการเลื่อนของชั้น ความแตกต่างที่น่าสนใจอื่นๆคือ มีช่องว่างแถบพลังงาน (energy band gap) ที่ลดลง มีพื้นผิวเฉพาะเพิ่มมากขึ้น และจุดหลอมเหลวในวัสดุนาโนมีค่าลดลงตามที่แสดงในตาราง 2.1 โดยข้อแตกต่างระหว่างโครงสร้างของไททาเนตแบบ โมโนคลินิก (monoclinic) และออร์โธโรมบิก (orthorhombic) คือการเรียงตัวของขอบระนาบที่เชื่อมต่อกันในรูปแบบไททาเนตออกตะฮีดรัล (TiO₂ Octahedral) ตามแกน c มีการเรียงที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงภาพรวมสมบัติต่างๆของไททาเนตที่มีโครงสร้างระดับนาโน

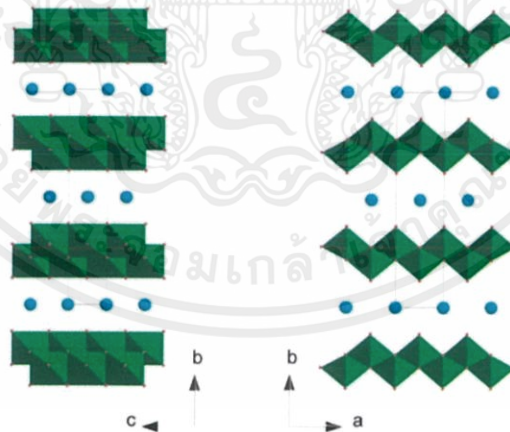
ลักษณะและสมบัติ ต่างๆ	ท่อนาโน (Nanotube)	ลวดนาโน (Nanowire)	แผ่นนาโน (Nanosheet)
เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา ความยาว	8-15 nm หรือมากกว่าไมโครเมตร	5-300 nm	<10 nm >100 nm
ช่องว่าง (band gap)	3.3-3.9 eV	3.4-3.6 eV	3.8 eV
พื้นที่ผิว	50-400 nm	18-300 m ² /g	240-380 m ² /g
ค่า Young's Modulus การนำไฟฟ้า	1.5×10^{-6} - 7.9×10^{-6} Gpa	14-16 Gpa $\sim 10^{-7}$ c/m $\sim 10^{-1}$ c/m	10^{-10} c/m

การหลุดออกเป็นแผ่นของชั้นโปรโทติกไททาเนต (protonic titanate) ที่มีโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) แผ่นนาโนไททาเนียมไดออกไซด์แบบ 2 มิติ มีช่องว่างระหว่างชั้น (band gap) มีค่า 3.84 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) บลูชิฟ (blue shifted) เปรียบเทียบกับ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) แบบอนาเทส ช่องว่างระหว่างชั้นมีค่า 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) เมื่อม้วนแผ่นเหล่านี้เข้ามาจะกลายเป็นท่อนาโน (nanotube) ซึ่งมีประจุมากขึ้นในโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ จากการศึกษาโดยวัดการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี (UV-Vis) พบว่าท่อนาโนไททาเนต (titanate nanotube) มีสมบัติเป็นสารแขวนลอยนี้อยู่ในอนุภาคนาโนที่ช่องว่างระหว่างชั้นมีค่า 3.87 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งข้างในท่อนาโนเป็นช่องว่างแถบพลังงาน (energy band gap) ที่มีค่าเป็นกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

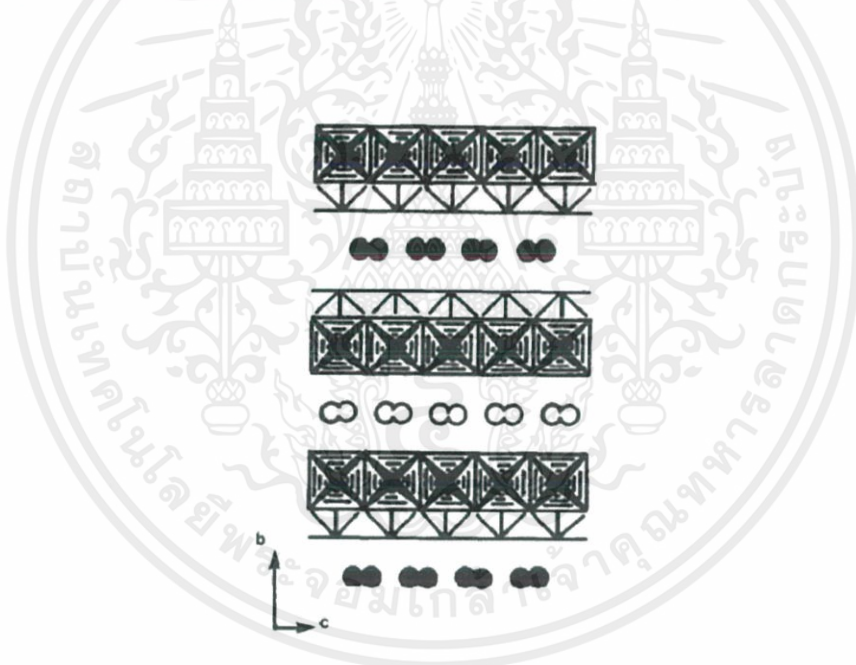
จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Tao และคณะ [5] ได้นำผงซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มาเจือกับไททานเตที่มีโครงสร้างแบบชั้นในระบบ $Cs_xTi_{2-x/2}Zn_{x/2}O_4$ ($x = 0.7$) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) ซึ่งเขาได้สังเคราะห์โครงสร้างแบบชั้นด้วยเทคนิคการเผาแบบ เฟสของแข็ง (solid state) เมื่อทำการสังเคราะห์เสร็จเรียบร้อยแล้วจะได้แลตทิซของอะตอมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) แต่เมื่อได้ทำการใส่สารละลายที่เป็นกรดลงไปในระบบจะพบว่าไอออนของซีเซียมจะอยู่ระหว่างชั้น และมีการสร้างโปรตอนชนิด $H_{2x}Ti_{2-x/2}\square_{x/2}O_4 \cdot H_2O$ เกิดขึ้น ซึ่งโปรตอนชนิดนี้จะคล้ายกับโครงสร้างแบบชั้นเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) โดยเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นนี้ จะมีความแตกต่างระหว่างสารประกอบ ที่มีเฟสเป็นแบบไอโซมอร์ฟัส (isomorphous) และในส่วนของปริมาณโปรตอนที่สูงและมีความหนาแน่นของประจุที่สูงเป็นผลมาจากซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กระจายตัวอยู่บริเวณขอบของโครงสร้างโดยที่โปรตอนโพโทนิกไททานเต (protonic titanate) $H_{2x}Ti_{2-x/2}\square_{x/2}O_4 \cdot H_2O$ สามารถแยกออกไปเป็นแผ่นโมเลกุลเดี่ยวในรูปแบบ $Ti_{1-\delta}\square_{\delta}O_2^{4\delta-}$ (โดยที่ δ คือ 0.175) ซึ่งมีความโดดเด่นของรูปร่างสี่เหลี่ยมเป็นแบบ 2 มิติ และมีความหนาที่น้อยประมาณ 1 นาโนเมตรและงานวิจัยนี้เป็นการใช้สารประกอบที่มีโครงสร้างระดับนาโนดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) ที่มีไอออนโลหะกระจายตัวอยู่บริเวณช่องว่างของแต่ละชั้น

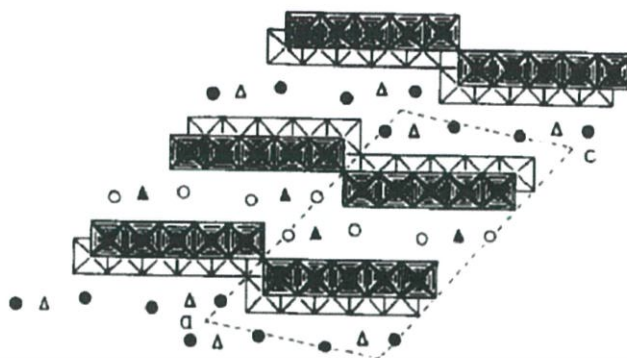
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน Grey Madsen และ Watts [6] ได้ศึกษาเฟสใหม่ในระบบ $\text{Cs}_2\text{O}-\text{TiO}_2$ โดยมีการผสมของ TiO_2 ในอัตราส่วนช่วง 75-100 เปอร์เซ็นต์โมล โดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 850 - 1200 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เกิดการรวมตัวใหม่เป็นซีเซียมไททาเนต 2 รูปแบบคือ $\text{Cs}_2\text{Ti}_5\text{O}_{11}$ และ $\text{Cs}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ ซึ่ง ($\text{Cs}_2\text{O} - \text{TiO}_2$) เมื่ออยู่ที่ความชื้นและอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส การผสมกันจะเกิดปฏิกิริยาและรวมตัวกันเป็น $\text{Cs}_2\text{Ti}_5\text{O}_{11} \cdot (1+X)\text{H}_2\text{O}$ โดยที่ $0.5 < X < 1$ ซึ่งโครงสร้าง 3 เฟสนี้จะเกิดขึ้นเป็นแบบ 2 มิติ ที่เชื่อมต่อกันที่ขอบไปเรื่อยๆ อย่างแน่นอนแล้วพบว่าจะมีไอออนซีเซียมอยู่ระหว่างชั้นของระบบ $\text{Cs}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ แต่ในรูปแบบของ $\text{Cs}_2\text{Ti}_5\text{O}_{11}$ และ $\text{Cs}_2\text{Ti}_5\text{O}_{11} \cdot (1+X)\text{H}_2\text{O}$ ในระยะของแต่ละชั้นจะเป็นโครงสร้าง 5-octahedra ที่มีระยะที่กว้างและจะเป็นการเชื่อมต่อกันแบบสายของริบบิ้น (ribbons) ซึ่งในการวิเคราะห์เฟสโดยการผสมกันของ $\text{Cs}_2\text{O} - \text{TiO}_2$ ในอัตราส่วนของ ($\text{Cs}_2\text{O} : \text{TiO}_2$) 1:3 ถึง 1:8 และให้อุณหภูมิในช่วง 850-1200 องศาเซลเซียส 2 เฟสใหม่ของซีเซียมไททาเนตที่เกิดขึ้น คือ $\text{Cs}_2\text{Ti}_5\text{O}_{11}$ ในอัตราส่วน 1:5 และ $\text{Cs}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ ในอัตราส่วน 1:6 ดังแสดงในภาพที่ 2.8 และ 2.9



ภาพที่ 2.8 แสดงโครงสร้างสารประกอบซีเซียมไททาเนตในเฟสของ $\text{Cs}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ อัตราส่วน 1:6

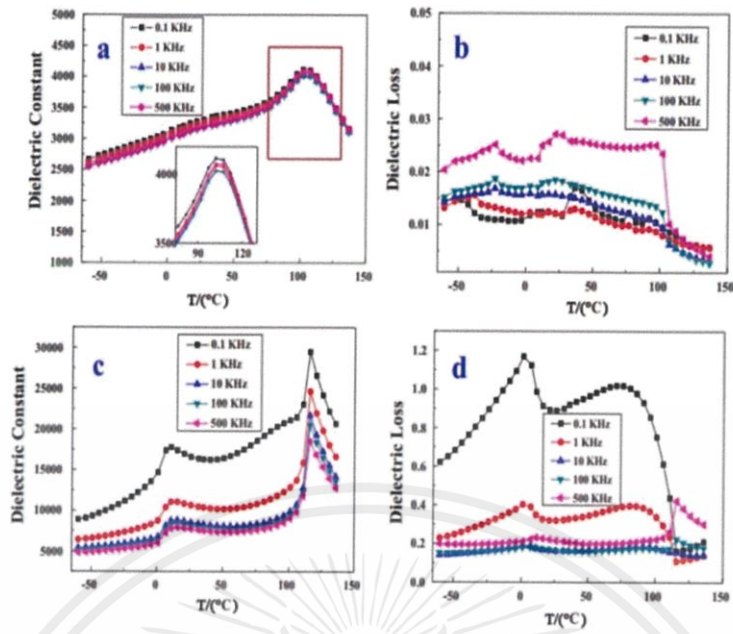
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างสารประกอบซีเซียมไททานेटในเฟสของ $\text{Cs}_2\text{Ti}_5\text{O}_{11}$ อัตราส่วน 1:5

ซึ่ง Yan Wang และคณะ [7] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเพื่อเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ดีในระบบ $\text{Ba}_{0.96}\text{La}_{0.04}\text{TiO}_3$ โดยได้ทำการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคทางเคมีแบบเปียกโดยการใช้หลักการ การตกตะกอนของสาร ซึ่งหลักการนี้จะสามารถควบคุมความสม่ำเสมอและขนาดของอนุภาคได้แล้วนำอนุภาคที่ตกตะกอนไปเผาแล้วจะได้เซรามิก $\text{Ba}_{0.96}\text{La}_{0.04}\text{TiO}_3$ เมื่อนำมาตรวจสอบคุณสมบัติพบว่า เซรามิกเป็นฉนวนที่ดีจึงได้นำเซรามิกนี้ไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา และ สมบัติความเป็นฉนวน ผลการตรวจสอบพบว่าเซรามิกที่เตรียมโดยการนำเอา La^{3+} และ Ba^{2+} นำมาผสมกันหรือเรียกว่า BLT-T อนุภาคมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ผสมกันไป มีค่ารูพรุนและการสูญเสียอิเล็กทริกที่สูงแต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเซรามิกที่นำเอา La^{3+} และ Ba^{2+} แยกออกจากกันพบว่ามีความหนาของอนุภาคที่สม่ำเสมอ และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่กว้างขึ้นสามารถให้ค่าประจุได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 35-85 องศาเซลเซียส อุณหภูมิช่วงนี้แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของวัสดุดังกล่าวสำหรับการนำมาใช้งานทางด้านตัวเก็บประจุแบบ หลายชั้น (multilayer capacitor) ดังแสดงในภาพที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



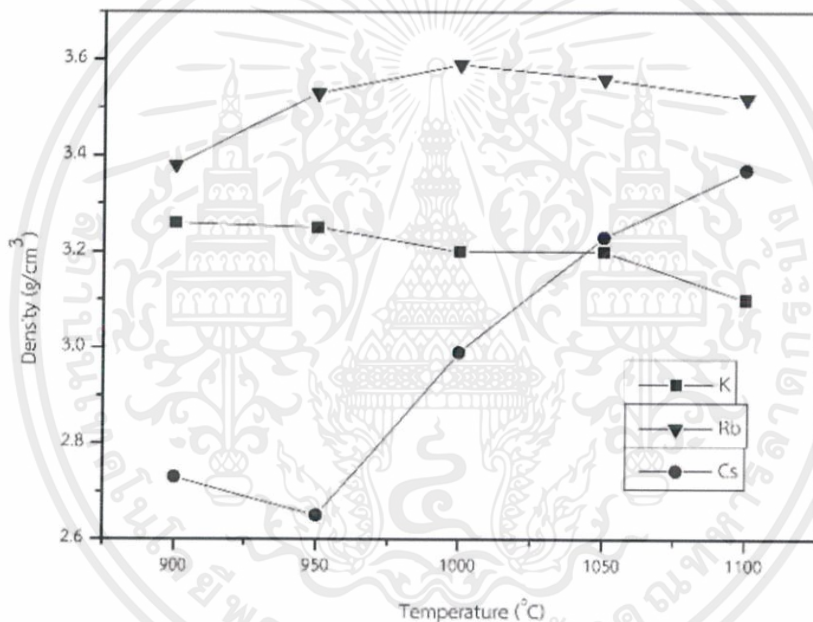
ภาพที่ 2.10 แสดงค่าไดอิเล็กทริกของสาร $Ba_{0.96}La_{0.04}TiO_3$

อนุภาคของ BLT ที่ได้จากวิธีทางเคมีเปียกโดยอาศัยกระบวนการตกตะกอน วิธีนี้ถูกใช้เนื่องจากมีข้อดีในการกระจายตัวและสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคได้ ซึ่งจะนำไปสู่การรวมตัวของเซรามิก BLT ที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งอาจจะเกิดจากการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันด้วยการรวม La^{3+} และ Ba^{2+} เข้าด้วยกัน (BLT-T) หรือแยก La^{3+} และ Ba^{2+} ออกจากกัน (BLT-S) ในโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติไดอิเล็กทริกจะเห็นได้ว่าเซรามิกส์ BLT-S ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระจายตัวของอนุภาคได้ดี พื้นผิวที่เรียบมีค่าความเป็นฉนวนที่สูง และการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำสุดที่อุณหภูมิห้อง เซรามิกเหล่านี้ได้รับการคาดหวังว่าจะมีการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคตเนื่องจากความจำเป็นที่จะมีการปรับขอบเกรนของอนุภาคที่ละเอียดมากยิ่งขึ้นของอุปกรณ์ตัวเก็บประจุที่มีโครงสร้างหลายชั้น (Multilayer Capacitor, MLC)

ต่อมาในปี.ศ.2560 นายวชิรวิทย์ ยศรราวาศ [8] ซึ่งเป็นสมาชิกของหน่วยวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สจล.ก็ได้ทำการเตรียมสารไททานेटที่มีโครงสร้างแบบชั้นในระบบซีเซียมซิงค์ไททานेट ($Cs_{0.35}Zn_{0.175}Ti_{0.825}O_2$) ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาของแข็งแล้วตามด้วยการเผาแบบซินเตอร์ในบรรยากาศปกติของอุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ผงซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารตั้งต้น หลังจากบดย่อยแบบสั้นสะเทือนเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง แล้วนำผงที่ผสมได้ไปอบแห้ง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 20 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นนำผงที่ผ่านการแคลไซน์แล้วไปอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดแล้วเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นทำการตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นและลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของรังสีเอกซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตามลำดับ พร้อมทำการวัดสมบัติไดอิเล็กทริกด้วยเครื่องวัด LCR ผลแสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$ ที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวอย่าง นอกจากนี้ระบบไททานเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้นได้ทำการพัฒนาโดยการเปลี่ยนอะตอมระหว่างชั้นเพื่อปรับช่องว่างระหว่างชั้น ซึ่งอาจจะส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุ โพแทสเซียม (K) และรูบิเดียม (Rb) เป็นสารที่ถูกเลือกให้มาแทนที่ซีเซียม (Cs) ในโครงสร้างและมีสูตรทางเคมีคือ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ และ $\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$ ตามลำดับ เซรามิกทั้งสองระบบถูกสร้างขึ้นมาโดยมีขั้นตอนเดียวกันกับ $\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$ ผลที่ได้แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ และ $\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$ ยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเซรามิกอีกด้วยดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แสดงความหนาแน่นของสารทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิการซินเตอร์ต่างๆ

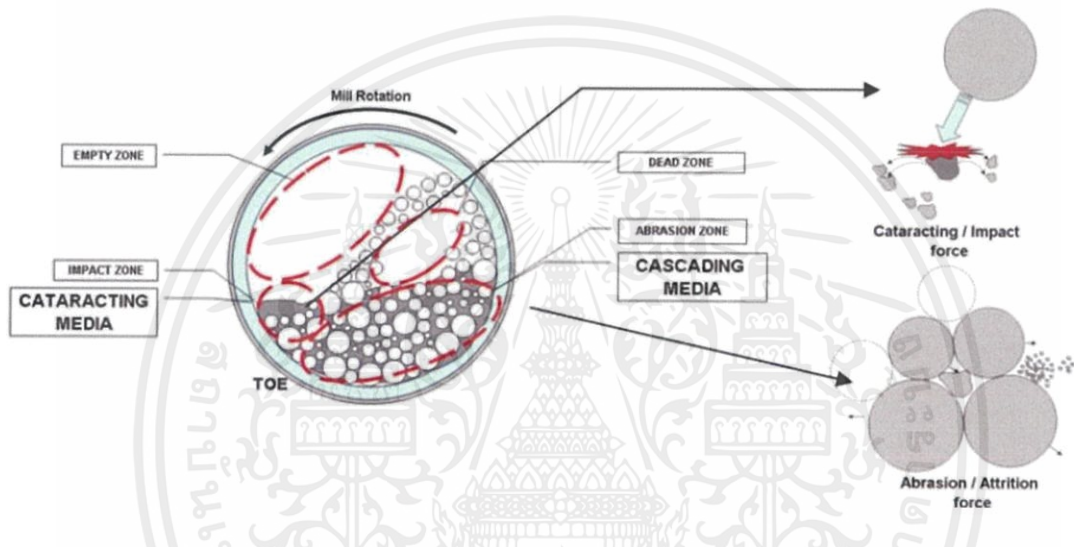
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เทคนิคที่ใช้ในการเตรียม

2.4.1 การเตรียมผงผสม

2.4.1.1) การ ball-mill

Ball-mill คือเทคนิคการบดย่อยสารให้มีขนาดเล็กกลง โดยเครื่องมือลดขนาดชนิดนี้ ประกอบด้วย ภาชนะปิดหรือหม้อบด (shell liner) หมุนอย่างช้าๆ ในแนวนอน ภายในมีลูกบดเป็น บอลโลหะโดยมีหลักการการทำงานดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.12 หลักการทำงานของ การ ball-mill [9]

เมื่อหม้อบดหมุนตัวลูกบดจะเคลื่อนที่ไปตามผนังของหม้อบดจนถึงจุดๆหนึ่งแล้วจะตกลงมา ทำให้เกิดกระบวนการบดภายในซึ่งประกอบไปด้วยแรงกระทำสองแรงดังนี้ 1) การบดที่เกิดจากแรงเหวี่ยง (centrifugal force) ทำให้ลูกบดกิ้งตัวติดกับผนังของหม้อบดรวมกับแรงดึงดูดของโลกทำให้ตกลงมา เกิดแรงกระแทก (shear impact) กับสารภายในบริเวณอิมแพคโซน 2) การกระแทกกันของลูกบดภายในหม้อบด เนื่องด้วยการกระทบกันเองของลูกบดจึงอาจเกิดการแตกหรือหลุดกร่อนทำให้เกิดการปนเปื้อนกับสารภายในได้ วัสดุที่ถูกนำมาทำลูกบดจึงต้องเป็นวัสดุที่มีความคงทนและแข็งแรงสูง ซึ่งโดยส่วนมากจะให้วัสดุที่ทำมาจาก อลูมินา (Al_2O_3) หรือเซอร์โคเนีย (ZrO_2) นอกจากนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการบดย่อยยังเกี่ยวข้องกับสัดส่วนและขนาดของลูกบดอีกด้วยเนื่องจากหากขนาดของลูกบดใหญ่จนเกินไปจะทำให้บดย่อยสารขนาดเล็กได้ยาก รวมไปถึงความเร็วที่เหมาะสมของรอบการหมุนเพื่อทำให้การบดย่อยมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

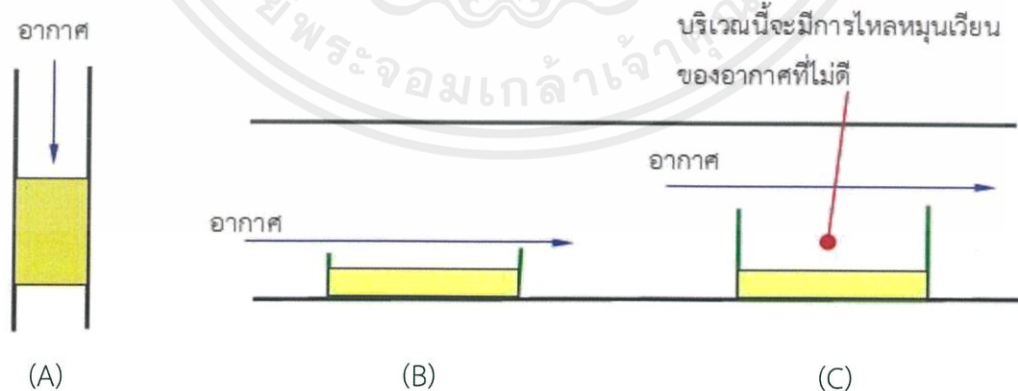
2.4.1.2) การแคลไซน์ (Calcination)

การแคลไซน์ คือ กระบวนการนำอนุภาคหรือสารบางอย่างไปเผาภายใต้อุณหภูมิสูง ในระดับที่ยังไม่ถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของอนุภาคหรือสารนั้น กระบวนการนี้ถูกใช้ในหลายวัตถุประสงค์เช่น กำจัดความชื้น สารอินทรีย์และก๊าซต่างๆ หรืออาจใช้เพื่อการเติมออกซิเจน (oxidize) ลงไปในสาร โดยลักษณะของเตาจะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ 1) เตาเผาแบบป้อนด้านหน้า มีลักษณะเป็นเหมือนกล่องสี่เหลี่ยมมีเส้นลวดให้ความร้อนติดตั้งกระจายอยู่ตามผนังเพื่อนช่วยให้ความร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอภายในเตา



ภาพที่ 2.13 เตาเผาแบบป้อนด้านหน้า [10]

- 2) เตาเผาแบบท่อ โดยเตาลักษณะนี้สามารถป้อนแก๊สเพื่อทำปฏิกิริยาขณะเผาได้เช่น การเผาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์



ภาพที่ 2.14 (A)เตาเผาท่อแบบแนวตั้ง (B)เตาเผาท่อแนวนอนแบบขอบต่ำ และ(C)เตาเผาท่อแนวนอนแบบขอบสูง [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การเตรียมเซรามิก

2.4.2.1) การขึ้นรูปเซรามิก

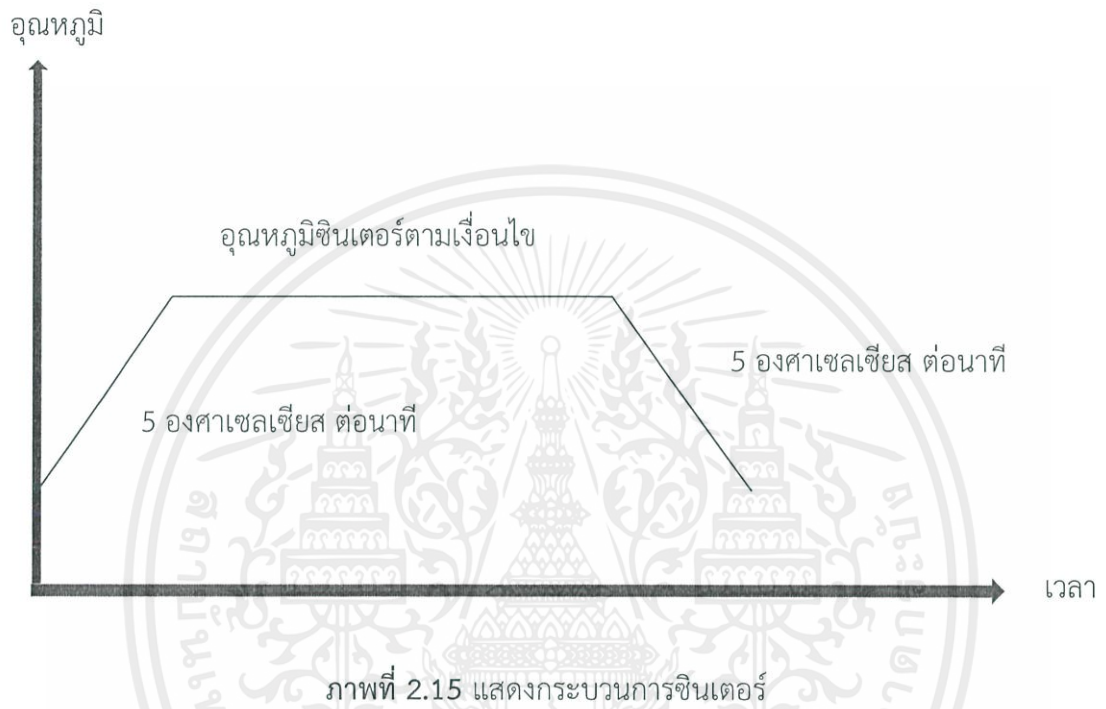
เซรามิกเป็นผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งที่เราพบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน เช่น ถ้วยชาม กระเบื้อง สุขภัณฑ์ หรือแม้กระทั่งชิ้นส่วนของอุปกรณ์เครื่องใช้ชนิดต่างๆ ผลิตภัณฑ์เซรามิกเหล่านี้มีรูปร่างลักษณะแตกต่างกัน ดังนั้นวิธีการขึ้นรูปที่ใช้กับผลิตภัณฑ์แบบต่างๆ จึงแตกต่างกันไปด้วย โดยทั่วไปแล้ว สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ 1) การขึ้นรูปโดยอาศัยความเหนียว (plastic forming) เป็นวิธีการขึ้นรูปที่เก่าแก่ที่สุด การเตรียมเนื้อดินปั้นจะกระทำโดยการผสมดินกับวัตถุดิบอื่นๆ และนวดให้เข้ากันดี หรืออาจผสมในรูปของน้ำดินแล้วนำไปกรองให้เป็นแผ่น จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูป ซึ่งอาจแบ่งได้เป็นอีกหลายวิธีย่อยๆ เช่น การปั้นด้วยมือ (hand forming) เป็นวิธีขึ้นรูปที่อิสระที่สุดผู้ปั้นจะใช้มือและอุปกรณ์ต่างๆ เข้าช่วยในการปั้นดินให้เป็นรูปร่างตามต้องการวิธีนี้สามารถปั้นผลิตภัณฑ์ได้ทุกรูปร่างแต่มีขนาดไม่แน่นอนและต้องอาศัยใช้เวลาและความชำนาญของผู้ปั้นมากจึงมักใช้กับงานศิลปะหรืองานหัตถกรรมพื้นบ้านที่ไม่ต้องการกำลังผลิตสูงนัก จิกเกอร์ริง (jiggering) เป็นวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรมโดยนำแผ่นเนื้อดินมาวางบนแบบปูนพลาสติกแล้วใช้ใบมีดกดรีดให้เนื้อดินได้รูปร่างตามต้องการใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปกลมและแบนเช่น จานชนิดต่างๆ เป็นต้น การรีด (extrude) วิธีนี้จะนำดินมาผ่านเข้าเครื่องรีดให้ออกมาเป็นแท่งยาวๆ ซึ่งมีรูปหน้าตัดตามที่ต้องการแบบไว้ มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปเป็นแท่งยาวๆ เช่น ท่อ (tube) เป็นต้น 2) การเทแบบ (casting) วิธีนี้จะเตรียมเนื้อดินปั้นให้อยู่ในรูปน้ำดินข้นๆ (slip) ที่ไหลตัวได้ดี จากนั้นจึงเทลงในแบบปูนพลาสติก ปูนจะดูดน้ำและทำให้เนื้อดินเกาะติดกับผนังแบบ ได้เป็นผลิตภัณฑ์ตามต้องการ วิธีนี้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปร่าง แต่ต้องใช้น้ำในการขึ้นรูปมาก ทำให้การหดตัวหลังอบแห้งสูง ซึ่งอาจเกิดการแตกหรือบิดเบี้ยวได้ง่าย ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ ได้แก่ สุขภัณฑ์ ถ้วยชามของที่ระลึกประเภทต่างๆ เป็นต้น 3) การอัด (pressing) วิธีนี้จะเตรียมเนื้อดินปั้นให้อยู่ในรูปของผงกลมๆ ที่ไหลตัวได้ดีจากนั้นจึงนำไปอัดด้วยเครื่องอัดแรงดันสูงเพื่อให้เกาะติดกันเป็นแผ่นวิธีนี้จะใช้น้ำในการขึ้นรูปน้อยที่สุดทำให้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งมีการหดตัวน้อยกว่าวิธีอื่นๆ แต่รูปทรงผลิตภัณฑ์ที่สามารถขึ้นรูปได้จำกัดกว่าตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ ได้แก่ กระเบื้องชนิดต่างๆ เป็นต้น

2.4.2.2) การซินเตอร์

การซินเตอร์เป็นวิธีการในการผลิตวัสดุเซรามิกดั้งเดิมและเทคนิคัลเซรามิกโดยอาศัยการให้ความร้อนเพื่อให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นชิ้นเดียวและมีความหนาแน่นมากเพื่อให้วัสดุมีความแข็งแรง ซึ่งการซินเตอร์ถูกแบ่งตามเฟสของวัสดุที่ถูกนำมาซินเตอร์ โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นความสนใจไปที่การซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง การซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง (Solid-state sintering) เป็นการซินเตอร์วัสดุที่ไม่มีความเป็นระเบียบ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์จะเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้นๆ เล็กน้อย ซึ่งวิธีดังกล่าวจะไม่ทำให้สารหลอมรวมกันแต่จะทำให้สารเกิดการเชื่อมติดกันที่บริเวณพื้นผิวของแต่ละอนุภาคทำให้รูพรุนภายในลดน้อยลงความหนาแน่นจึงเพิ่มขึ้น ขณะผงอัดได้รับความร้อนจะส่งผลให้ความร้อนมีการแพร่เข้าสู่พื้นที่ผิวระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่ออนุภาคการแพร่ของแลตทิซที่พื้นที่ผิวนั้น จะมีการส่งผ่านไอความร้อนทำให้เกิดคอคอดตรงบริเวณที่เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาค จากนั้นคอคอดจะเริ่มขยายใหญ่ขึ้นทำให้ส่วนกลางที่ผิวสัมผัสของอนุภาคเกิดเป็นรูกลมจะมีการแพร่ของขอบเกรนเข้าหากันและการแพร่ซึมแลตทิซจากบริเวณขอบเกรนไปยังรูพรุนกลไกในช่วงนี้จะทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

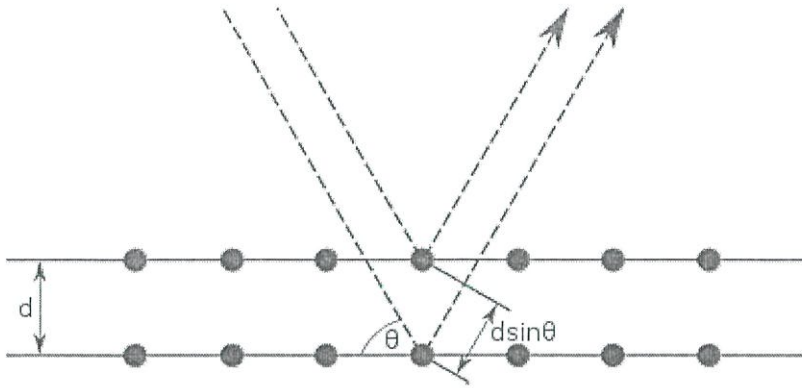


2.5 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.5.1 เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยหลักการของเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อาศัยแนวคิดที่ว่าเมื่อมองโครงสร้างผลึกว่าประกอบด้วยชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมที่สามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบได้โดยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้ลำคลื่นที่ถูกสะท้อนออกมาจากระนาบต่างๆจะมีความเข้มสูงเนื่องจากเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน ความแตกต่างของคลื่นที่ถูกสะท้อนจากระนาบใด ๆ ก็กับระนาบที่อยู่ข้างกันมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 แผนภาพแสดงการตกกระทบของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) [12]

โดยมีสมการอธิบายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยโครงสร้างผลึกดังสมการที่ 2.3

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

โดยค่า n คือ จำนวนเต็มใดๆ

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ มีค่าเท่ากับ 1.54 อังสตรอม

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

θ คือ มุมของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ

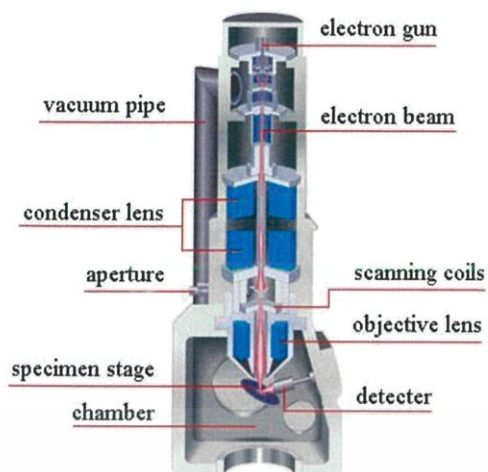
2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) อาศัยหลักการฉายหรือกราดไปบน พื้นผิวตัวอย่างด้วยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงที่ถูกปล่อยจาก แหล่งกำเนิด (Electron gun) เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าวกระทบกับผิวชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยอะตอม ต่างๆ จะปล่อยสัญญาณที่สามารถนำไปประมวลผลและให้ข้อมูลเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ องค์ประกอบของพื้นผิว และคุณสมบัติอื่นๆเช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น ส่วนประกอบของ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประกอบไปด้วยส่วนบนสุดคือแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่ เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิด จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตาม คอลลิมนซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 กิโลโวลต์ (kV) ซึ่งในบางเครื่องทำได้สูงถึง 50 กิโลโวลต์ (kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์ แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่า เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศน ศาสตร์อิเล็กตรอน (electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจาก แหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลงส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุด สุดท้ายจะทำหน้าที่โฟกัส ลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่างโดยมี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

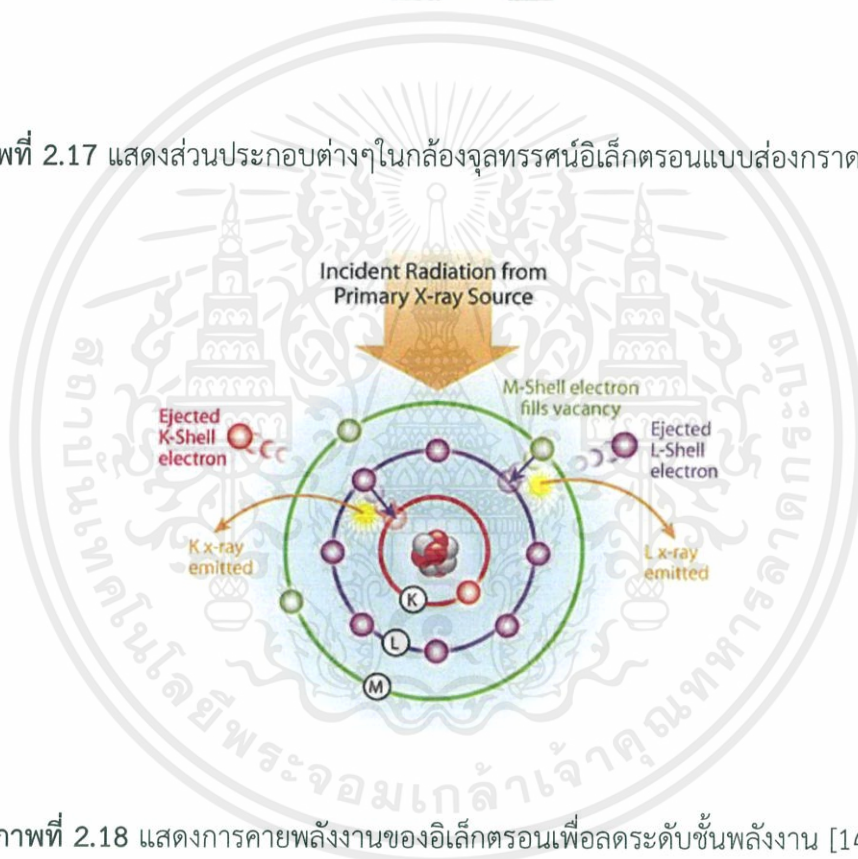
สแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆซึ่งปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วย แอปเพเจอร์ (aperture) หรือช่องเปิดที่มีลักษณะต่างๆกันตามลักษณะการใช้งานพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่างๆขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันและ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆเหล่านั้นแล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป โดยสัญญาณของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแบ่งออกได้เป็น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary- Electrons, SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับพื้นผิวตัวอย่างเป็นสัญญาณที่นำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้เรียกว่าภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons Image, SEI) และอีกชนิดหนึ่งคืออิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบเคมีบนพื้นผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของผิว ซึ่งนอกเหนือจากสัญญาณข้างต้นแล้วยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้นด้วยเช่น เอกซ์เรย์ (X-ray) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) โอลิอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลแตกต่างกันออกไป

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของ รังสีเอกซ์ (Energy dispersive X-ray Spectroscopy, EDS, EDX) ได้ด้วย โดยอาศัยหลักการกระตุ้นตัวอย่างด้วยอนุภาคพลังงานสูงได้แก่ อนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกลอยออกมาจากหลอดกำเนิดแสงเอกซ์ (X-ray tube) อนุภาคจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วมีพลังงานจลน์สูง เมื่ออนุภาคนี้อันผ่านเข้ามาอะตอมของตัวอย่างบางส่วนจะมีโอกาสที่จะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอม ในการชนนี้จะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นจนสามารถหลุดออกจากอะตอมได้ทำให้เกิดที่ว่างขึ้นซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นสูงกว่าจะตกลงมาอยู่แทน ในการตกจากชั้นพลังงานต้องใช้การคายพลังงานหรือปลดปล่อยพลังงานที่มากเกินไประดับพลังงานออกมา พลังงานที่คายออกมานี้จะอยู่ในรูปของรังสีเอกซ์เฉพาะ (characteristic X-ray) ซึ่งทำให้ระบุได้ว่าตัวอย่างมีองค์ประกอบของธาตุอะไรบ้าง เนื่องจากธาตุแต่ละธาตุจะมีพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะที่ไม่เหมือนกันเนื่องจากพลังงานในแต่ละระดับชั้นพลังงานแตกต่างกันทำให้พลังงานที่ถูกคายออกมาไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.17 แสดงส่วนประกอบต่างๆในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [13]



ภาพที่ 2.18 แสดงการคายพลังงานของอิเล็กตรอนเพื่อลดระดับชั้นพลังงาน [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการเตรียมผงผสมด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็งในระบบ ซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติต่างๆได้แก่ สมบัติทางกายภาพ เฟสต่างๆที่เกิดขึ้น โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้า โดยขั้นตอนการทดลองทั้งหมดนี้จะแสดงกระบวนการเตรียมไว้ในแผนภาพที่ 3.1 ตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้

- 3.1.1 ผงซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99 เปอเซ็นต์ ผลิตจากบริษัท sigma-aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.2 ผงซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ความบริสุทธิ์ 99.9 เปอเซ็นต์ ผงนาโน ผลิตจากบริษัท Advanced Material.
- 3.1.3 ผงไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ความบริสุทธิ์ 99-100.5 เปอเซ็นต์ ผงนาโน ผลิตจากบริษัท sigma-aldrich ประเทศเยอรมัน
- 3.1.4 ผงแลนทานัมเฮกซะโบไรด์ (LaB_6) ความบริสุทธิ์ 99 เปอเซ็นต์ ผลิตจากบริษัท sigma-aldrich ประเทศเยอรมัน
- 3.1.5 เอทานอล
- 3.1.6 น้ำกลั่น
- 3.1.7 กาวเงิน

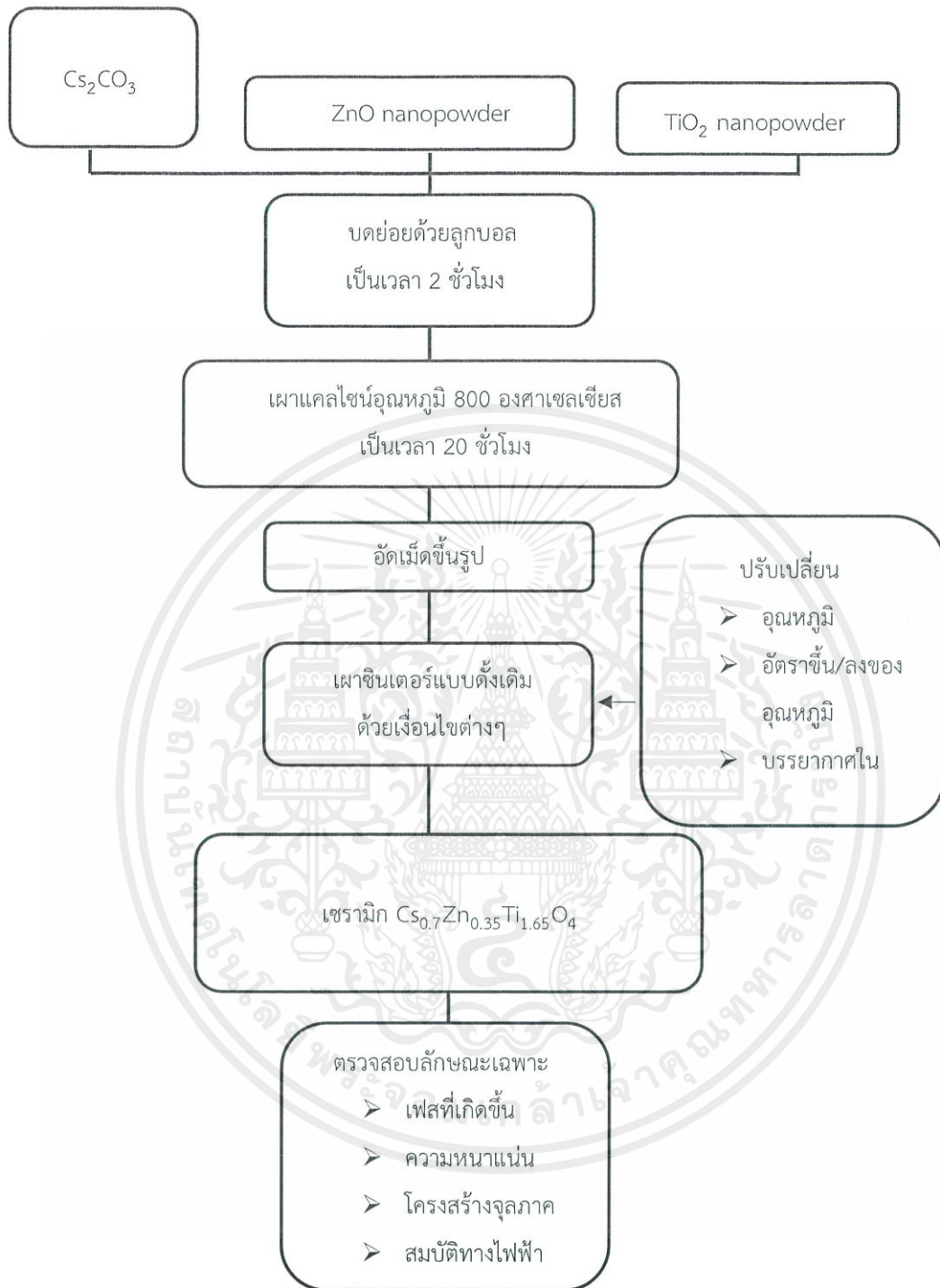
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

- 3.2.1 เครื่องชั่งสารดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม รุ่น ML204 ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.2.2 ตู้อบสารอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ผลิตโดยบริษัท yamato ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.3 เครื่องบดย่อยผสมสารด้วยลูกบอล
- 3.2.4 เต้าไฟฟ้าสำหรับเผาสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.5 ตู้ดูดความชื้น รุ่น DRY-100T ผลิตโดยบริษัท WEIFO ประเทศไต้หวัน
- 3.2.6 เครื่องอัดแบบแกนเดียว (uniaxial pressing)
- 3.2.7 เครื่องอัลตราโซนิกส์
- 3.2.8 ลูกบิดทำจากอลูมินา (Al_2O_3)
- 3.2.9 ขวดพลาสติกพร้อมฝาเปิด
- 3.2.10 ช้อนตักสาร (lab spatula)
- 3.2.11 คีมคีบ (forceps)
- 3.2.12 ปีกเกอร์ขนาด 100 600 และ 1000 มิลลิลิตร
- 3.2.13 ครอบบดสาร
- 3.2.14 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตร
- 3.2.15 ถ้วยอลูมินาสำหรับเผาสาร (Alumina crucible)
- 3.2.16 นาฬิกาจับเวลา
- 3.2.17 ตะแกรงร่อน
- 3.2.18 ครอบบดสาร
- 3.2.19 เทปพันท่อน้ำ
- 3.2.20 กระดาษฟรอยด์ทำจากอะลูมิเนียม (foil)
- 3.2.21 กระดาษทรายเบอร์ 1000 และ 2000
- 3.2.22 ขวดพลาสติกสำหรับฉีดเอทานอล
- 3.2.23 ถ้วยพลาสติกสำหรับเก็บชิ้นงาน
- 3.2.24 ถุงซีลล๊อคสำหรับเก็บชิ้นงาน
- 3.2.25 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์แบบดิจิตอล (electronic digital calipers)
- 3.2.26 ชุดเครื่องมือวัดความหนาแน่น (density determination kit)
- 3.2.27 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer) รุ่น SmartLab ผลิตโดยบริษัท Rigaku ประเทศแคนาดา
- 3.2.28 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) รุ่น JSM-6335F ผลิตโดยบริษัท JOEL ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.29 เครื่อง LCR Meter ผลิตโดยบริษัท Hewlette Packard ประเทศมาเลเซีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

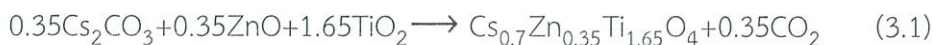


ภาพที่ 3.1 แผนผังการเตรียมเซรามิกในระบบ $\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการเตรียมผงผสม

ในกระบวนการเตรียมสารตามในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) จะทำการเตรียมโดยใช้สมการ (3.1)



โดยในระบบแรกใช้สารซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3) 8.8092 กรัม ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 2.2010 กรัม ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 10.1796 กรัม ซึ่งมีวิธีในการเตรียมสารโดยเริ่มจากการชั่งสารแต่ละชนิดด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล แล้วใส่สารในขวดพลาสติกพร้อมกับลูกบอลอลูมินา (Al_2O_3) ประมาณครึ่งขวดในระบบของตนเอง จากนั้นเติมเอทานอลและน้ำกลั่นในอัตราส่วน 50:50 ลงไปให้ท่วมลูกบอลอลูมินา (Al_2O_3) เล็กน้อยเพื่อเป็นตัวช่วยหล่อลื่นและไม่ทำให้สารเกาะกันเป็นก้อนหรือติดกับลูกบอล พันบริเวณฝาและเกลียวของขวดพลาสติกด้วยเทปพันท่อน้ำเพื่อป้องกันการรั่วซึมซึมน้ำและสารภายใน จากนั้นนำไปบดย่อยด้วยเครื่องบดย่อยด้วยลูกบอลด้วยระยะเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากทำการบดย่อยเสร็จแล้วให้นำสารที่ได้มาแยกออกจากลูกบอลโดยการเทผ่านตะแกรงร่อนและใช้เอทานอลชะล้าง จากนั้นนำสารที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจนสารแห้งสนิท เมื่อสารแห้งดีแล้วนำสารที่ได้มาบดด้วยครกบดสาร แล้วจึงนำสารใส่ลงในถ้วยอลูมินาสำหรับเผาสาร เพื่อทำการเผาแคลไซน์ (calcine) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้นขที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการลงที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อเผาแคลไซน์ (calcine) เสร็จแล้วนำสารที่ได้มาบดให้ละเอียดอีกครั้งด้วยครกบดสาร จากนั้นเก็บสารใส่ถุงซิปล็อคและใส่ไว้ในตู้ดูดความชื้นเนื่องจากสารเหล่านี้ไวต่อความชื้นมาก



ภาพที่ 3.2 แสดงเครื่องบำบัดย่อยสารด้วยลูกบอล



ภาพที่ 3.3 แสดงครกบดสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กระบวนการเตรียมเม็ดเซรามิก

นำสารที่ได้หลังจากการเผาแคลไซน์มาอัดเม็ดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบแกนเดียว (uniaxial pressing) โดยชั่งสาร 0.6 กรัมแล้วนำไปใส่ในแม่พิมพ์โลหะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 11 มิลลิเมตร จากนั้นนำเม็ดสารที่ได้ไปเผาซินเตอร์ตามเงื่อนไขต่างๆได้แก่การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการซินเตอร์ อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ และบรรยากาศในการเผา เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยผงผสมกลมเม็ดสารและคลุมด้วยผงอลูมินาอีกชั้นหนึ่ง



ภาพที่ 3.4 แสดงเครื่องอัดแบบแกนเดียว (uniaxial pressing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 แสดงแม่พิมพ์อัดสาร



ภาพที่ 3.6 แสดงลักษณะของแม่ตอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก

3.5.1 การหาความหนาแน่น (density)

นำเม็ดเซรามิกที่ได้จากการเตรียมไปชั่งน้ำหนัก (W_1) จากนั้นนำเม็ดเซรามิกไปต้มกับน้ำกลั่นที่เดือดอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้วให้ทิ้งเม็ดเซรามิกไว้หนึ่งคืนเพื่อให้เม็ดเซรามิกเย็นตัวลง จากนั้นนำเม็ดเซรามิกขึ้นมาจากน้ำและนำไปซับให้หมาดแล้วนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล (W_2) นำเม็ดเซรามิกที่ยังหมาดอยู่มาชั่งต่อโดยอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำตามกฎของอาร์คิมิดีส (Archimedes' method) ด้วยชุดเครื่องมือวัดความหนาแน่น (density determination kit) (W_3) เมื่อทำการชั่งครบแล้วจะได้ค่าออกมา 3 ค่าคือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งขณะแห้ง (W_1) น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งขณะเปียกหมาดๆ (W_2) และน้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่น ตามสมการที่ 3.2

$$\rho_c = \frac{W_1}{W_3 - W_2} \times \rho_{H_2O} \quad (3.2)$$

โดยที่ ρ_c	คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
ρ_{H_2O}	คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (1กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
W_1	คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งขณะแห้ง (กรัม)
W_2	คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งขณะเปียกหมาดๆ (กรัม)
W_3	คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (กรัม)

3.5.2 การหดตัวหลังจากการเผา (shrinkage)

ค่าการหดตัวของเซรามิกที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาซินเตอร์นั้น สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ โดยนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ ตามสมการที่ 3.3

$$\%shrinkage = \left[\frac{d_1 - d_2}{d_1} \right] \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่ d_1	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกก่อนการซินเตอร์ (มิลลิเมตร)
d_2	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกหลังการซินเตอร์ (มิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผา (weight loss)

น้ำหนักของเม็ดยาที่สูญเสียไประหว่างการเผาซินเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของเม็ดยาเมื่อก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ โดยนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ ตามสมการที่ 3.4

$$\%weight\ loss = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่ W_1 คือ น้ำหนักของเม็ดยาเมื่อก่อนการเผาซินเตอร์ (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักของเม็ดยาหลังการเผาซินเตอร์ (กรัม)

3.6 การตรวจสอบเฟสของเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer ; XRD)

การตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นเทคนิคที่ถูกใช้เพื่อตรวจวัดเฟสที่เกิดขึ้นโดยอาศัยหลักการตกกระทบของรังสีเอกซ์ ในโครงสร้างวัสดุที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดการกระเจิงของแสง (scattering) ต่างกันเนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีรูปแบบเฉพาะของโครงสร้างของวัสดุ ผลึกและระนาบ (hkl) ดังนั้นเมื่อนำเครื่องมือสำหรับตรวจวัด (detector) มารองรับการกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์ที่ออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่างๆ ก็จะสามารถสันนิษฐานได้ว่าเป็นวัสดุชนิดใดโดยพิจารณาจากมุมตกกระทบ ความสัมพันธ์ของแบรกก์ (Bragg's angle) การเปรียบเทียบความเข้มของพีคกราฟรังสีเอกซ์ และรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏกับข้อมูลของสารชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลระบบ (JCPDS files) ซึ่งเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้และเป็นมาตรฐานที่ใช้กันทั่วไป โดยในขั้นตอนการตรวจวัดสารส่วนหนึ่งจะถูกนำไปผสมกับแลนทานัมเอกซบอไรด์เพื่อใช้เปรียบเทียบกับสารปกติ ซึ่งการตรวจวัดจะถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์และใช้ทองแดง ($CuK\alpha$) ที่ให้รังสีเอกซ์ที่มีค่า ความยาวคลื่นประมาณ 1.54 อังสตรอม (Å) ออกมาด้วยระดับประมาณ 0.02 องศาต่อนาที โดยอาศัยกฎของแบรกก์ (bragg's law) เพื่อหาระยะห่างระหว่างระนาบอะตอมตามสมการที่ 3.5 และสามารถคำนวณหาขนาดของผลึกได้จากสมการที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (3.5)$$

โดยที่	d	คือ ระยะห่างระหว่างระนาบอะตอม
	θ	คือ มุมที่รังสีตกกระทบ
	n	คือ เลขจำนวนเต็ม
	λ	คือ ความยาวคลื่น

$$t = \frac{K\lambda}{FWHM \cos\theta} \quad (3.6)$$

โดยที่	K	คือ ค่าคงที่ของเซอร์เรอร์ ค่าดีฟอลต์คือ 0.9
	λ	คือ ความยาวคลื่น
	$FWHM$	คือ ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสุดของกราฟ
	θ	คือ มุมที่รังสีตกกระทบ
	t	คือ ขนาดอนุภาค

3.7 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุจากนั้นนำไปวิเคราะห์ร่วมกับคุณสมบัติเฉพาะ โดยอธิบายจากรูปร่างซึ่งการตรวจสอบนี้ทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การตรวจสอบจะเริ่มโดยการนำผงผสมไปผสมกับน้ำกลั่น โดยหยดลงบนเทปทองแดงเพื่อไหม้การนำไฟฟ้า แล้วนำไปติดไว้บนแท่งทองเหลือง (stub) ซึ่งติดไว้โดยเทปคาร์บอนสองหน้า จากนั้นนำแท่งทองเหลืองที่มีชิ้นงานติดอยู่ไปทำการเคลือบพื้นผิวด้วยทองคำโดยใช้เทคนิคสเปตเตอริง (sputtering) จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุ



ภาพที่ 3.7 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

3.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer หรือ EDS

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุด้านเอกซเรย์ สามารถทดสอบได้ทั้งของแข็ง ของเหลวหรือผงซึ่งให้ข้อมูลทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยใช้หลักการให้พลังงานจันอิเล็กตรอนวงนอกของสารหลุดออก ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานซึ่งในสารแต่ละชนิดจะมีค่าการปลดปล่อยพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกไม่เท่ากันทำให้สามารถระบุถึงชนิดของสารได้ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุคาร์บอนถึงธาตุยูเรเนียมเป็นต้นไป

3.9 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก

ในโครงการวิจัยนี้มุ่งความสนใจไปที่การประยุกต์ใช้ทางไฟฟ้าของเซรามิก โดยศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุโดยการนำเม็ดเซรามิกที่เตรียมไปตรวจสอบ ซึ่งจะศึกษาความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของไดอิเล็กทริก โดยการเพิ่มอุณหภูมิห้องคือ 25 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สำหรับการเตรียมเม็ดเซรามิกเพื่อนำไปตรวจสอบเริ่มจากการขัดผิวหน้าของเม็ดเซรามิกด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000 และ 2000 โดยขัดให้เม็ดเซรามิกมีความหนาน้อยกว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางคือประมาณ 1 มิลลิเมตร แล้วนำเม็ดไปทำความสะอาดโดยเครื่องอัลตราโซนิคส์ เพื่อให้เม็ดที่ถูกขัดออกไม่ติดอยู่บนพื้นผิวของเม็ดเซรามิกจากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งแล้วนำมาทากาวเงินเพื่อทำขั้ว จากนั้นนำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยมีอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิอยู่ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อให้กาวเงินแห้งและติดกับเม็ดเซรามิกได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปวัดค่าไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LCR meter ตามอุณหภูมิที่กล่าวไว้ข้างต้นที่ความถี่ 10 100 1000 10000 100000 และ 1000000 เฮิร์ตซ์ (Hz) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกตามสมการที่ 3.7

$$\epsilon_r = \frac{dC}{\epsilon_0 A} \quad (3.7)$$

โดยที่	ϵ_r	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารตัวอย่าง (ฟารัด/เมตร)
	d	คือ ความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง (เมตร)
	C	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง (ฟารัด)
	ϵ_0	คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ในสุญญากาศ (มีค่า $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$)
	A	คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็งและการเผาแบบซินเตอร์ โดยผลการทดลองประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ เฟสที่เกิดขึ้น โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตและเม็ดเซรามิก

4.1 ผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต

4.1.1 สมบัติกายภาพ

หลังจากการเตรียมสารซีเซียมซิงค์ไททาเนตด้วยวิธีการเผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยมีอัตราขาขึ้น 10 องศาเซลเซียส ต่อนาทีและมีอัตราขาลง 20 องศาเซลเซียส ต่อนาทีจากนั้นนำมาบดด้วยครกบดสาร พบว่าผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ได้มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด ดังภาพที่ 4.1

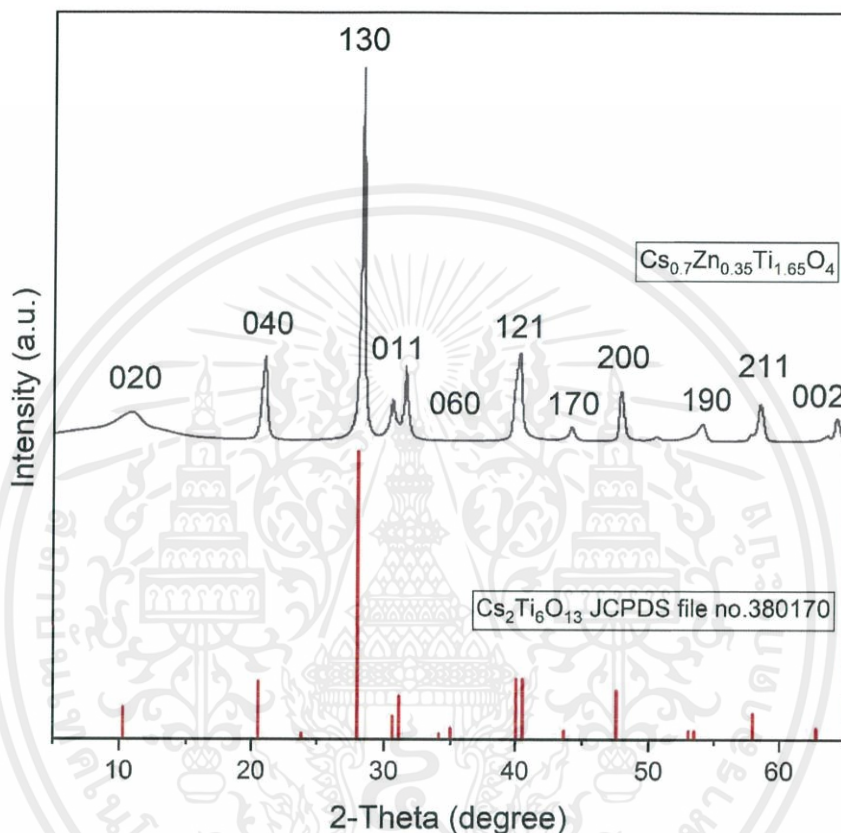


ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 เฟสที่เกิดขึ้นของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต

จากการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสารซีเซียมซิงค์ไททาเนตด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่ากราฟเป็นเฟสบริสุทธิ์ไม่มีเฟสอื่นแปลกปลอมโดยสามารถตรวจสอบได้โดยกาเปรียบเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS file no.38-0170 จะเห็นได้ว่าการเลื่อนของกราฟไปทางขวาเล็กน้อยซึ่งอาจเป็นผลมาจากเติมซิงค์ในโครงสร้าง

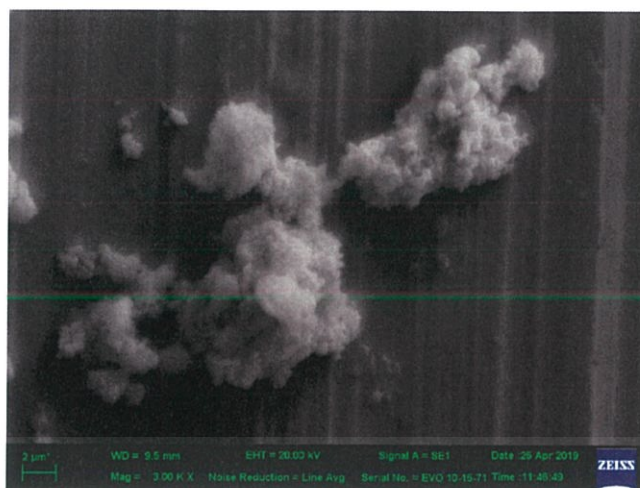


ภาพที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

4.1.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถูกเตรียมด้วยการนำผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตผสมกับเอทานอล แล้วจึงนำไปหยดลงบนเทปทองแดงที่ถูกแปะอยู่บนแท่นทองเหลือง จากนั้นนำไปเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำ โดยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของซีเซียมซิงค์ไททาเนตพบว่าลักษณะอนุภาคของซีเซียมซิงค์ไททาเนตมีลักษณะกลมและเกาะกันอยู่เป็นกลุ่ม โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 0.5 – 1 ไมโครเมตร

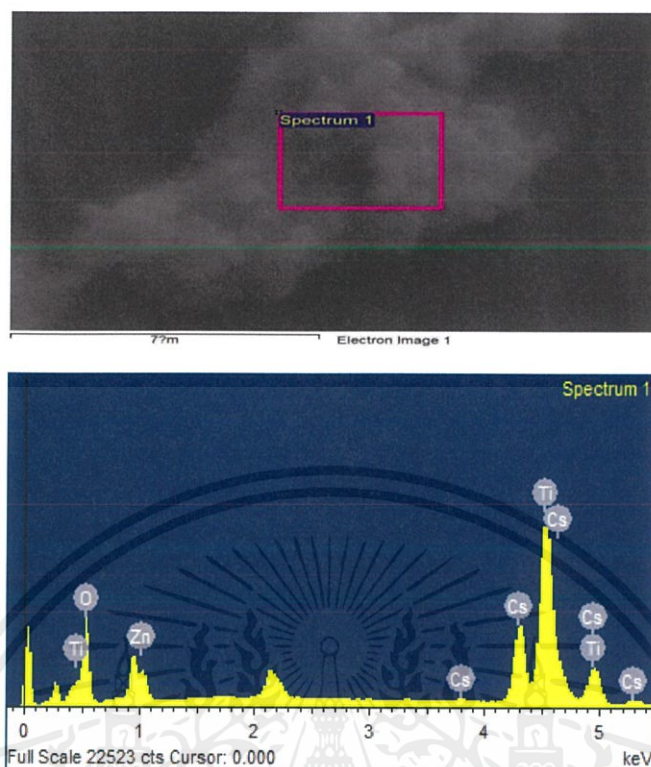
4.1.4 การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDX

การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุต่างๆของ ผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต ด้วยเทคนิค EDS ถูกระบุสัดส่วนขององค์ประกอบธาตุต่างๆ เป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก และอะตอม ดังแสดงในภาพที่ 4.4 และตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบธาตุของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการแคลไซน์ ที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ 800 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
Cs	30.82	7.85
Zn	7.81	4.04
Ti	29.62	20.93
O	31.75	67.17
รวม	100	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 แสดงผลการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบธาตุของผงซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

หากเปรียบเทียบสูตรทางเคมีของซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนตกับผลของเทคนิค EDX จะเห็นได้ว่าเมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์อะตอมมีความใกล้เคียงกันของเปอร์เซ็นต์อะตอมในสูตรทางเคมีและผลการตรวจวัดที่ได้ ซึ่งเมื่อประกอบกับผล XRD จะทำให้สรุปได้ว่าซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนตที่ถูกเตรียมขึ้นมามีความบริสุทธิ์

4.2 เซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต

4.2.1 อุณหภูมิ

4.2.1.1 สมบัติทางกายภาพ

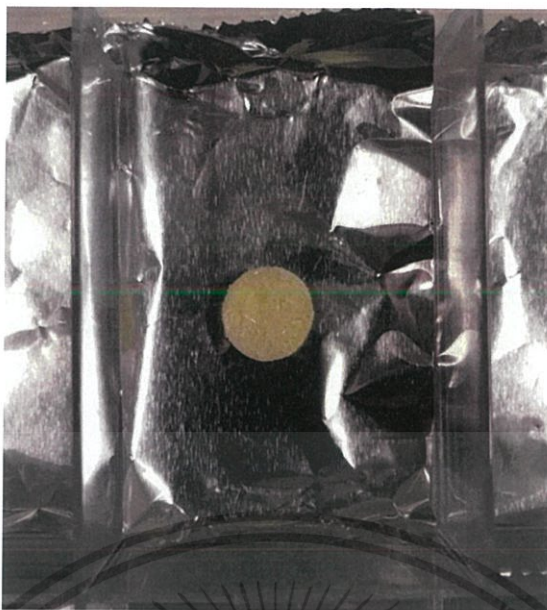
1) ค่าความหนาแน่น

การหาความหนาแน่นของชิ้นงานทำได้โดยการอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำ ตามกฎของอาร์คิมิดีส (Archimedes's method) ดังสมการที่ 3.4 โดยเปรียบเทียบระหว่าง เม็ดเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส โดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์จากค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของซีเซียมซิงค์ไททาเนต ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.4403 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยความหนาแน่นที่คำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที

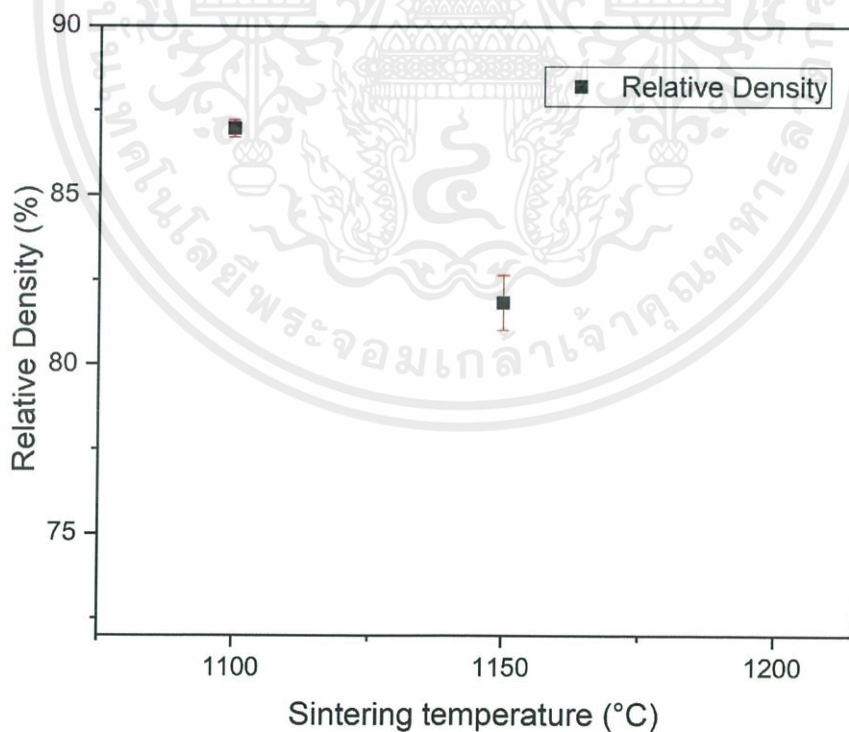
อุณหภูมิเซลเซียส (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กรัม ต่อ ลูกบาศก์เมตร)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
1100	3.86	86.97
1150	3.63	81.84
1200	n/a	n/a

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนาแน่นของชิ้นงานมีความหนาแน่นน้อยลง โดยที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เม็ดเซรามิกเกิดการสูญเสียของชิ้นงานทำให้มีลักษณะของชิ้นงานเป็นรูพรุนดังรูปที่ 4.5 ทำให้ไม่สามารถวัดความหนาแน่นได้ โดยความหนาแน่นที่สูงที่สุดมีค่า 86.97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.5 เซรามิกซีเซียมซิงค์ไททานตที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

โดยเมื่อทำการพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอุณหภูมิการเผาซินเตอร์จะ
ได้ผลดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์

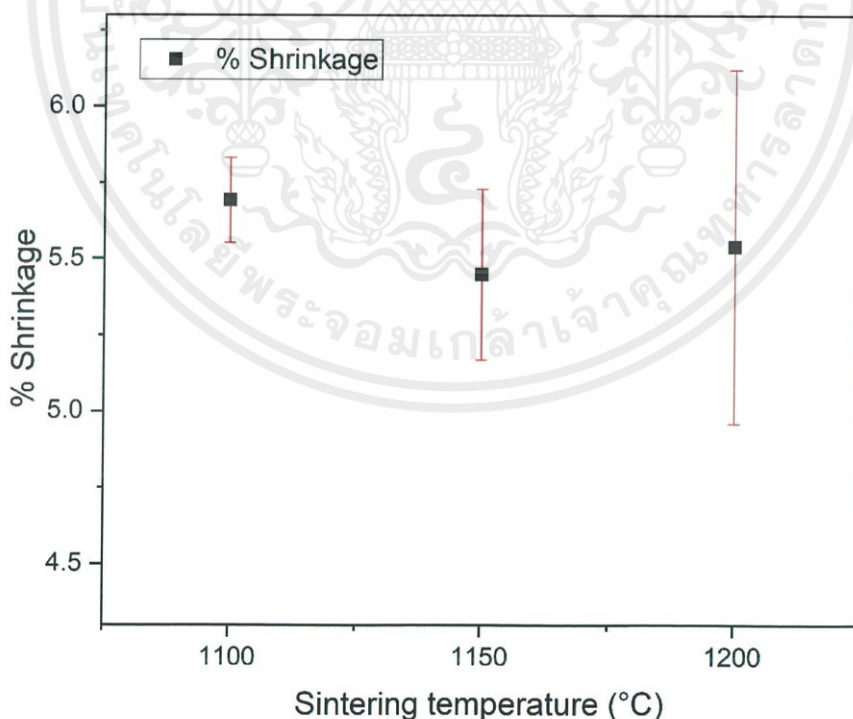
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ค่าการหดตัวหลังจากการเผา

การหดตัวหลังจากการเผาซินเตอร์สามารถทำได้ด้วยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 3.5 โดยเปรียบเทียบระหว่าง เม็ดเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าการหดตัวและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวและอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ แสดงในตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าการหดตัวของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

อุณหภูมิซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ค่าการหดตัว (เปอร์เซ็นต์)
1100	5.69
1150	5.45
1200	5.54



ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวและอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์

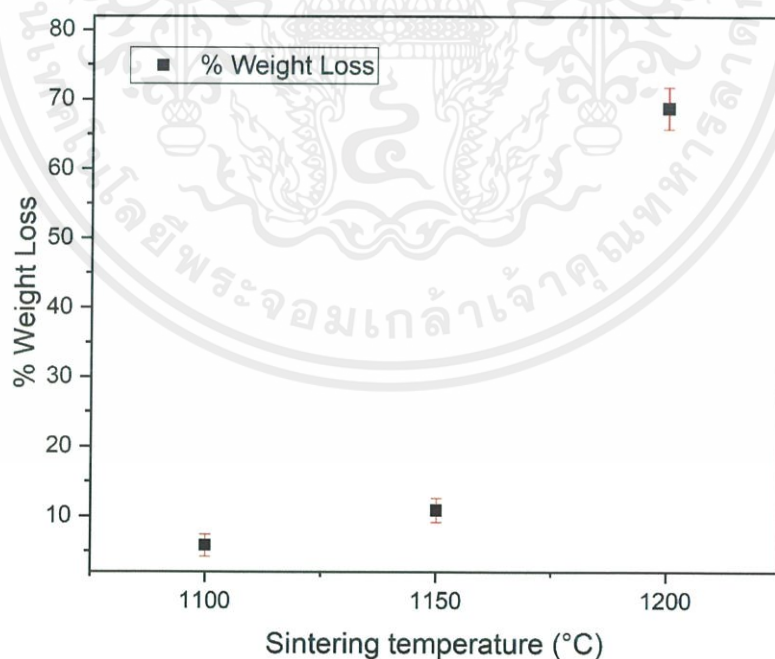
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผา

น้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์สามารถทำได้ด้วยการชั่งน้ำหนักของเม็ดเซรามิกก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 3.6 โดยเปรียบเทียบระหว่าง เม็ดเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททานेट ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์และอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ แสดงในตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์ของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททานेट ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

อุณหภูมิซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักที่สูญเสียจากการเผา (เปอร์เซ็นต์)
1100	5.79
1150	10.84
1200	68.77

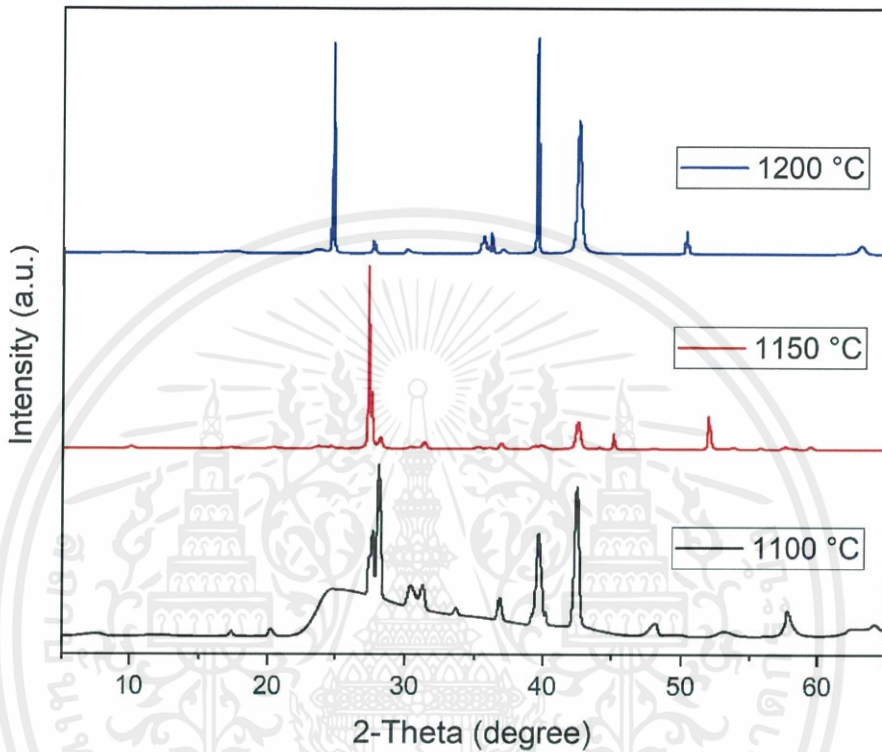


ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์และอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 เฟสที่เกิดขึ้น

การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ นั้น ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.9 โดยการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



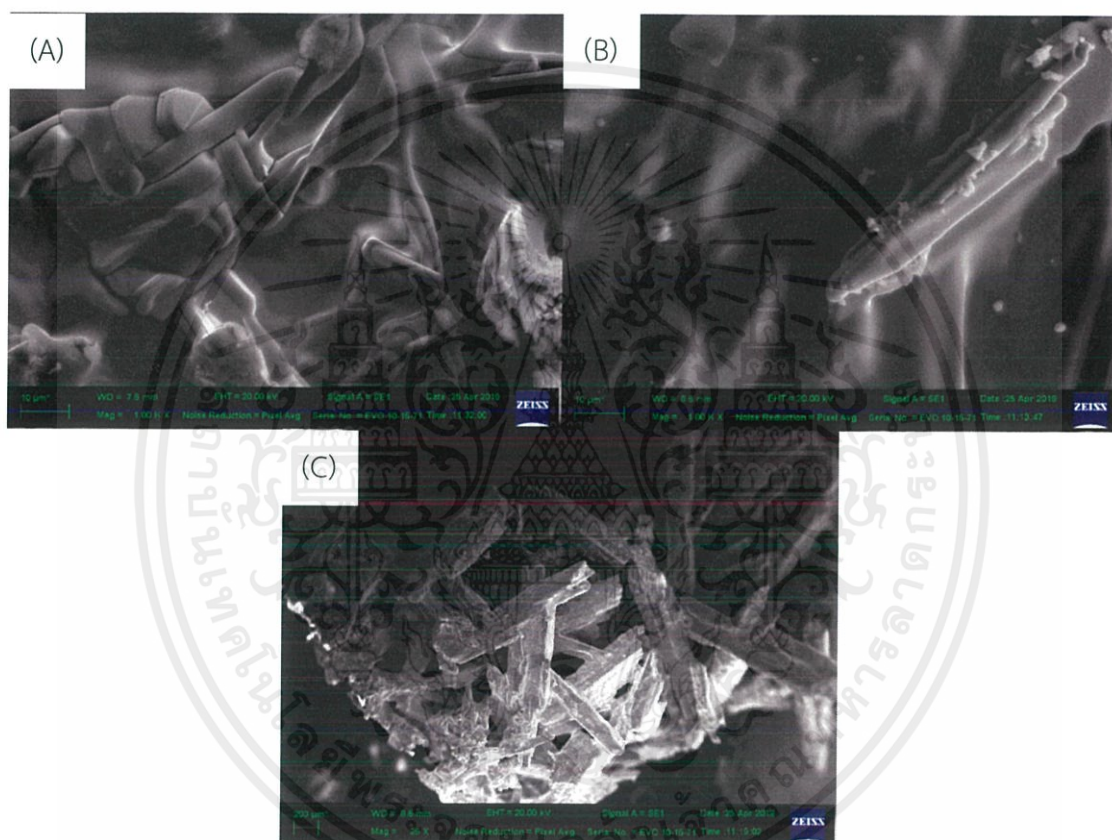
ภาพที่ 4.9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆตามเงื่อนไข

จากภาพจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสในเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส คาดว่าเป็นผลมากจากเกิดการสูญเสียของชิ้นงานเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูง

4.2.1.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

หลังจากที่ทำการเผาซินเตอร์เซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) เรียบร้อยแล้ว จึงนำมาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) โดยเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนตหลังจากการเผาซินเตอร์จะเห็นได้ว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ที่สูงขึ้นนั้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเกรนของเม็ดเซรามิก โดยเกรนของเม็ดเซรามิกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและจำนวนเกรนที่มองเห็นได้ชัดเจนน้อยลงเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ที่สูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากเฟสของแข็งกลายเป็นเฟสของเหลวแล้วรวมเข้าด้วยกันเป็นเนื้อเดียวจึงทำให้จำนวนเกรนที่มองเห็นได้ชัดเจนลดน้อยลง สามารถสังเกตได้จากลักษณะของเกรนที่เมื่อทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าและภาคตัดขวางของชิ้นงานถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททานเนต

- (A) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 1000 เท่า
- (B) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 1000 เท่า
- (C) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 25 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางเซรามิกในระบบซีเอ็มซีไททานเนต

(A) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 1000 เท่า

(B) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 1000 เท่า

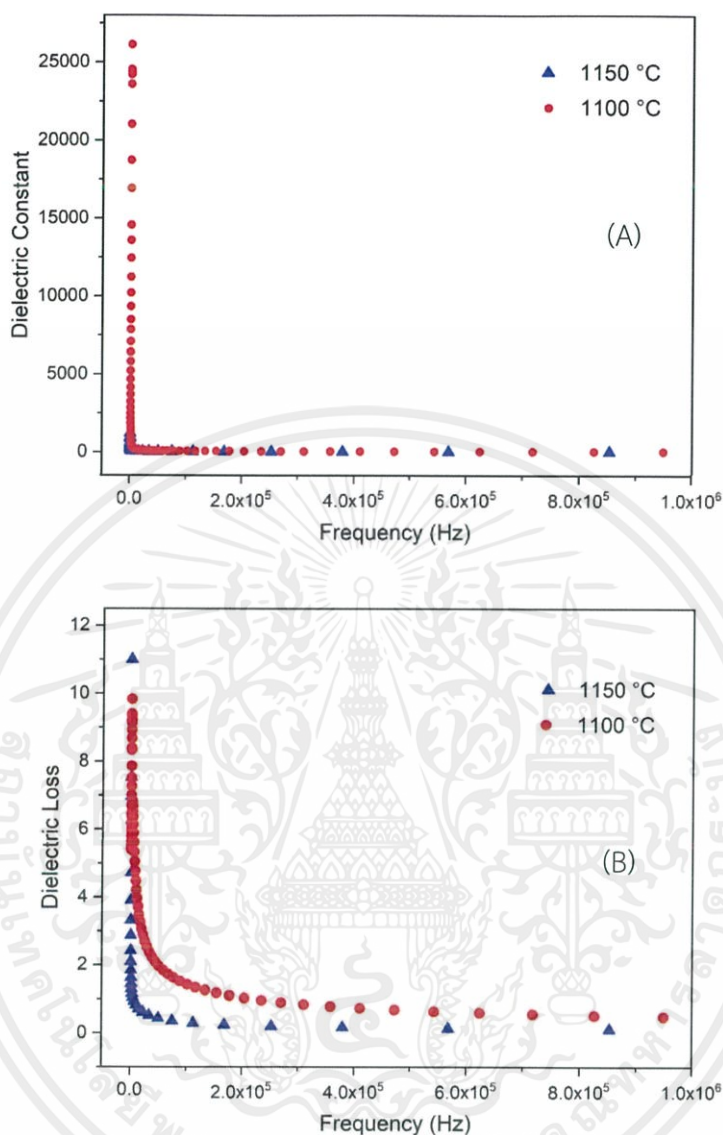
(C) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส กำลังขยาย 25 เท่า

4.2.1.4 สมบัติทางไฟฟ้า

1) ผลของความถี่ที่ส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า

จากการนำเม็ดเซรามิกตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ต่างๆตามเงื่อนไขไปทำซ้ำและตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะศึกษาผลของความถี่และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปต่อสมบัติทางไฟฟ้า โดยใช้ความถี่ 10 100 1000 10000 100000 1000000 และอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เพื่อศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่าได้ผลดังภาพที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



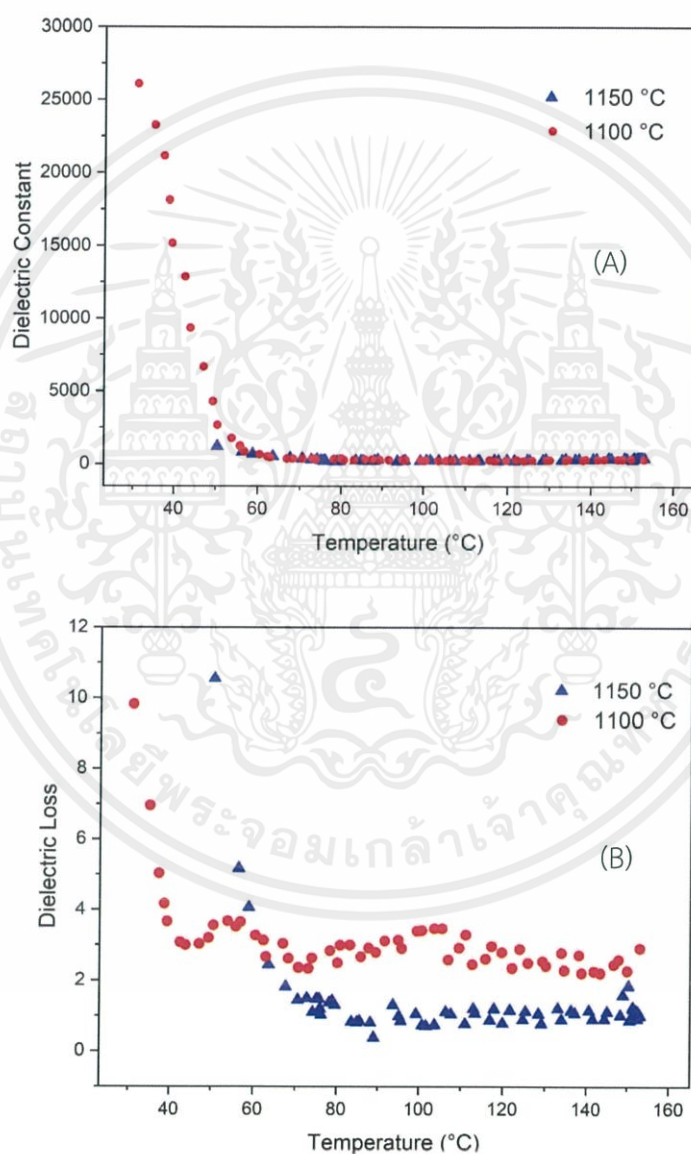
ภาพที่ 4.12 ผลของความถี่ต่อค่าทางไฟฟ้า (A) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (B) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

จากภาพที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททานเนตลดลง ซึ่งค่าทั้งสองจะมีค่ามากในช่วงของความถี่ 10 เฮิร์ตซ์ และลดลงเรื่อยๆตามลำดับ โดยเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททานเนตที่ทำการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดอยู่ที่ 26117 และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก 9.83 ส่วนเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททานเนตที่ทำการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดอยู่ที่ 1223 และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก 10.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า

จากการนำเม็ดเซรามิกตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ต่างๆตามเงื่อนไขไปทำซ้ำและตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR โดยกำหนดความถี่ที่ 10 เฮิรตซ์ ซึ่งจะศึกษาผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปต่อสมบัติทางไฟฟ้า โดยตรวจวัดตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ไปจนถึง 150 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่า ได้ผลดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิต่อค่าทางไฟฟ้า (A) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (B) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่ลดน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ทำการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดอยู่ที่ 26117 และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก 9.83 ส่วนเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ทำการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดอยู่ที่ 1223 และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก 10.56

จากผลของอุณหภูมิและความถี่เห็นได้ชัดการเผาซินเตอร์เซรามิกที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ให้ผลที่ดีกว่าซึ่งอาจเป็นผลมาจากความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีความแตกต่างกัน

4.2.2 อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ

4.2.2.1 สมบัติทางกายภาพ

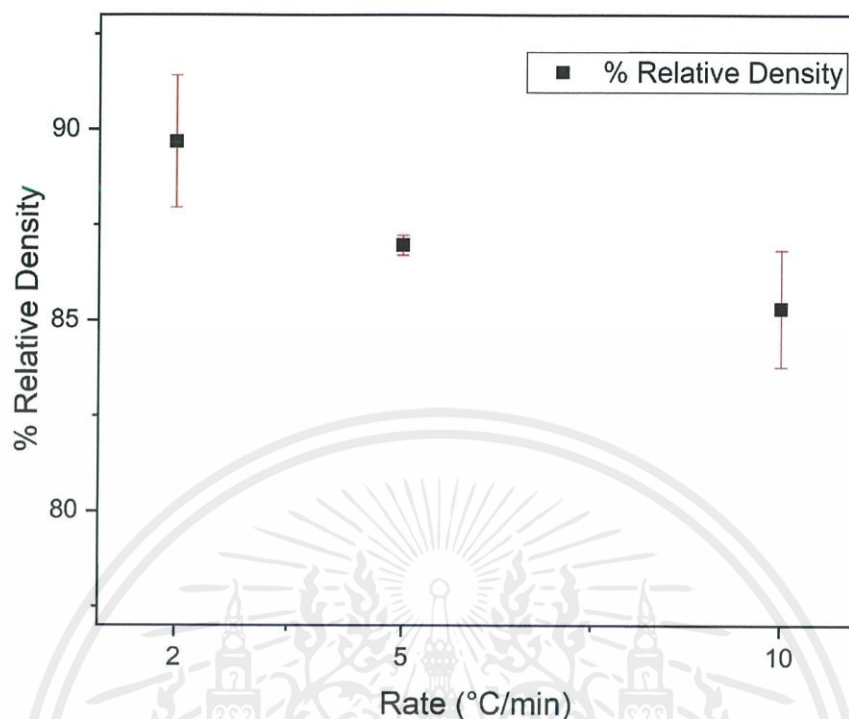
1) ค่าความหนาแน่น

การหาความหนาแน่นของชิ้นงานทำได้โดยการอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำ ตามกฎของอาร์คิมิดีส (Archimedes's method) ดังสมการที่ 3.4 โดยเปรียบเทียบระหว่าง เม็ดเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 5 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์จากค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของซีเซียมซิงค์ไททาเนต ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.4403 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยความหนาแน่นที่คำนวณได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 5 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

อัตราการขึ้น/ลง (องศาเซลเซียสต่อนาที)	ความหนาแน่น (กรัม ต่อ ลูกบาศก์เมตร)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
2	3.98	89.69
5	3.86	86.97
10	3.79	85.31

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานมีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที มีความหนาแน่นที่สูงสุด ซึ่งมีค่า 89.69 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิตั้ง

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิตั้งที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ไม่ได้ส่งผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานมาก ซึ่งผลของความหนาแน่นที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิตั้งต่างๆมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิตั้ง 2 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลของความหนาแน่นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูงกว่าอัตราการขึ้น/ลง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

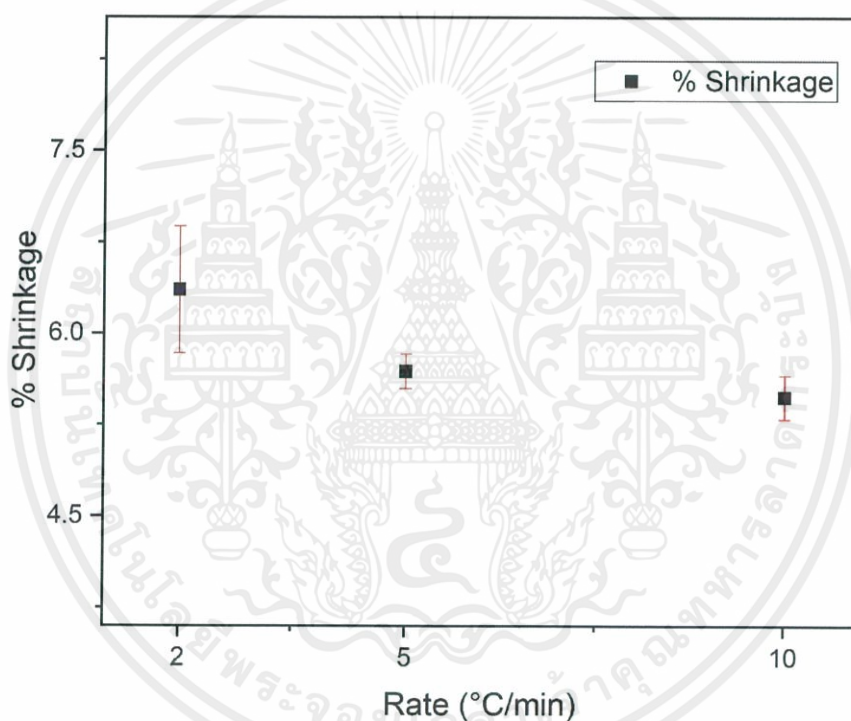
2) ค่าการหดตัวหลังจากการเผา

การหดตัวหลังจากการเผาซินเตอร์สามารถทำได้ด้วยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 3.5 โดยเปรียบเทียบระหว่าง เม็ดเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิตั้ง 1100 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าการหดตัวและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวและอุณหภูมิตั้งในการเผาซินเตอร์ แสดงในตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.15 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าการหดตัวของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 5 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

อัตราการขึ้น/ลง (องศาเซลเซียสต่อนาที)	ค่าการหดตัว (เปอร์เซ็นต์)
2	6.36
5	5.69
10	5.48



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวและอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ

3) น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผา

น้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์สามารถทำได้ด้วยการชั่งน้ำหนักของเม็ดเซรามิกก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 3.6 โดยเปรียบเทียบระหว่าง เม็ดเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 2 5 และ 10 องศาเซลเซียสต่อ ซึ่งน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผา

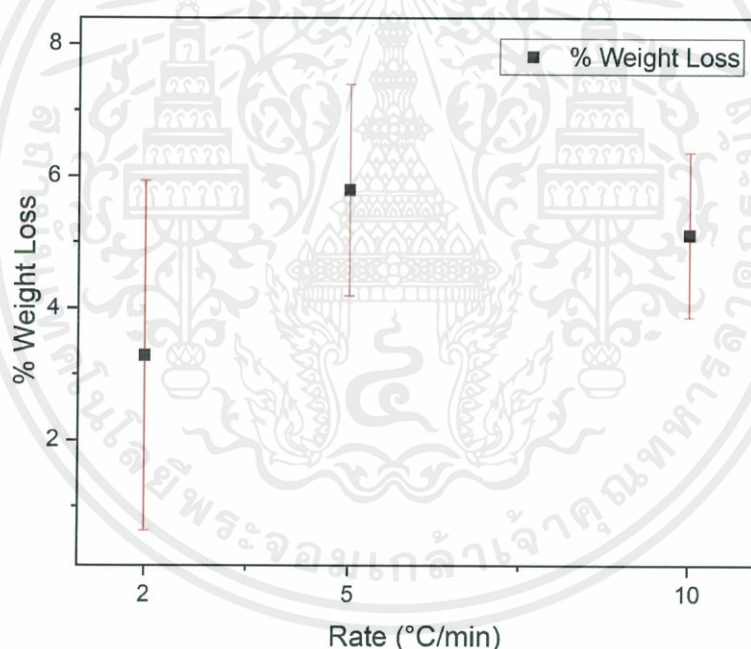
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซินเตอร์และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ แสดงในตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.16 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 น้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์ของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต

($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2.5 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

อัตราการขึ้น/ลง (องศาเซลเซียสต่อนาที)	น้ำหนักที่สูญเสียจากการเผา (เปอร์เซ็นต์)
2	3.28
5	5.79
10	5.11

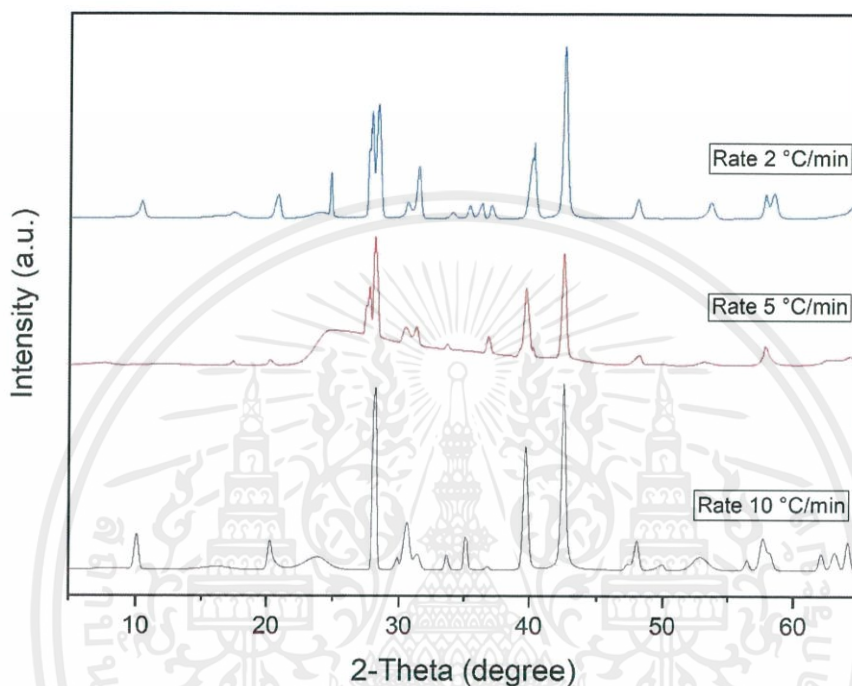


ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาซินเตอร์และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 เฟสที่เกิดขึ้น

การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่าง ๆ นั้นมีความคล้ายคลึงกัน ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.17 โดยการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

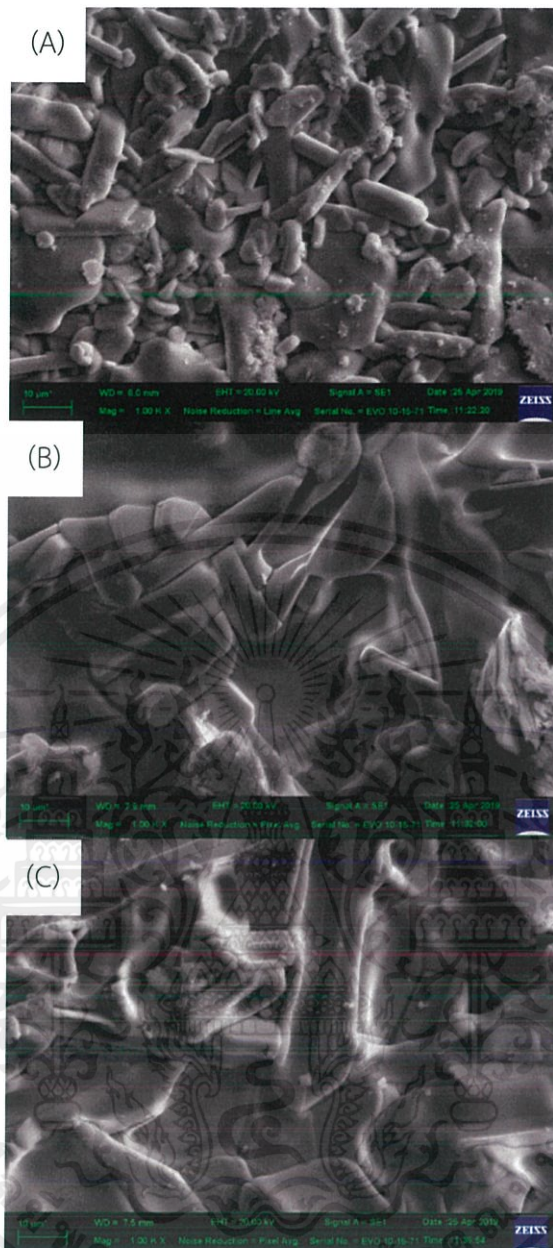


ภาพที่ 4.17 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างๆ

4.2.2.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

หลังจากที่ทำการเผาซินเตอร์เซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) เรียบร้อยแล้ว จึงนำมาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) โดยเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนตหลังจากการเผาซินเตอร์จะเห็นได้ว่าอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ที่สูงขึ้นนั้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเกรนของเม็ดเซรามิก โดยเกรนของเม็ดเซรามิกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ที่สูงขึ้น โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าและภาคตัดขวางของชิ้นงานถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ

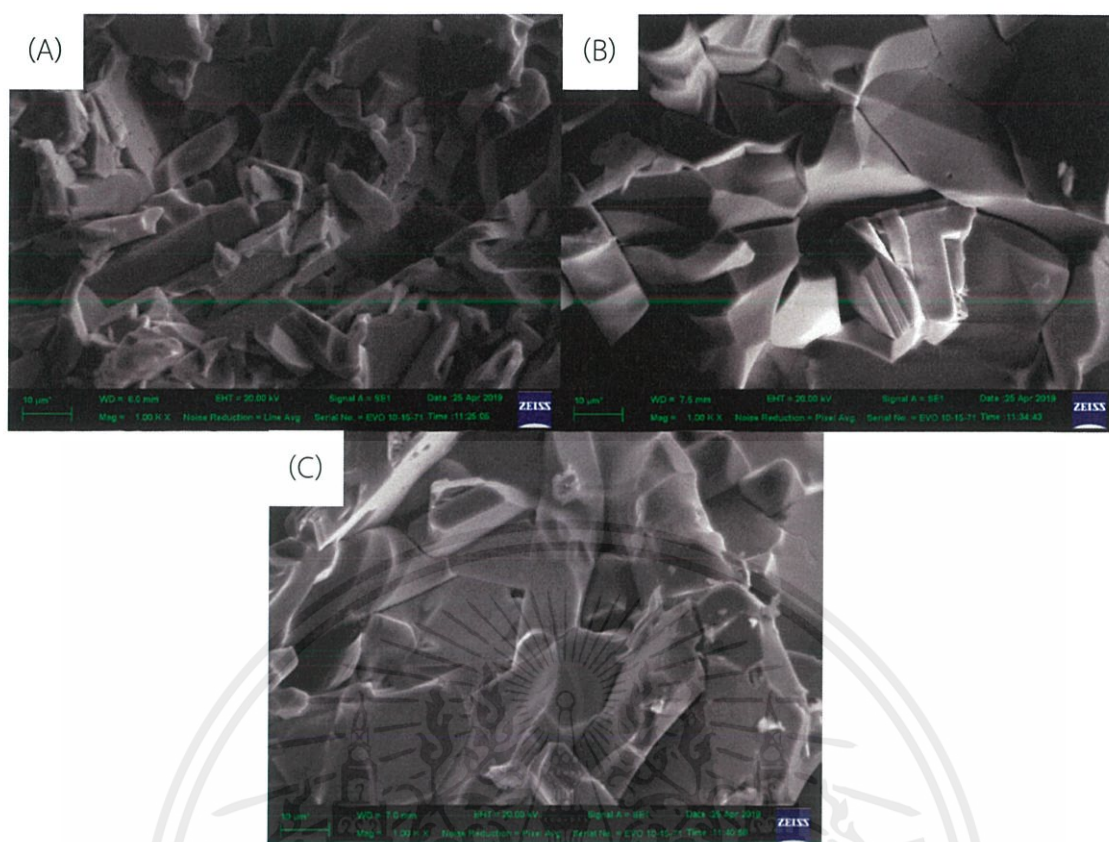
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าเซรามิกซีเอ็มซีไฮทานेटกำลังขยาย 1000 เท่า

- (A) ซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที
- (B) ซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
- (C) ซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.19 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางเซรามิกซีเอ็มซีเททานด์กำลังขยาย 1000 เท่า (A) ซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที (B) ซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที (C) ซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

จากภาพที่ 4.18 และ 4.19 จะเห็นได้ชัดเจนว่าขนาดของเกรนมีความแตกต่างกันอย่างมากเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ ซึ่งสามารถคาดได้ว่าอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิส่งผลต่อการเติบโตของเกรน โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเกรน อยู่ที่ 10.95 4.5 และ 0.98 ไมโครเมตร ตามลำดับ

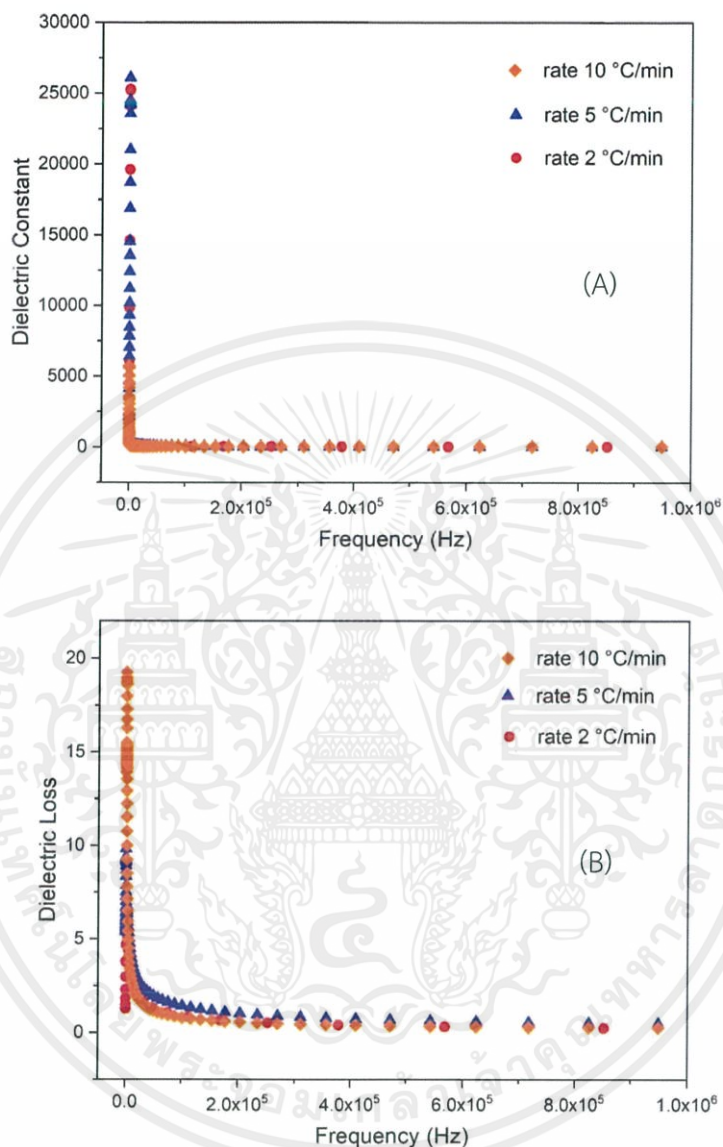
4.2.2.4 สมบัติทางไฟฟ้า

1) ผลของความถี่ที่ส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า

จากการนำเม็ดเซรามิกตัวอย่างที่ใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ต่างๆตามเงื่อนไขไปทำขั้วและตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ซึ่งจะศึกษาผลของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อสมบัติทางไฟฟ้า โดยใช้ความถี่ 10 100 1000 10000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100000 และ 1000000 ตามลำดับ เพื่อศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่าได้ผลดังภาพที่ 4.20

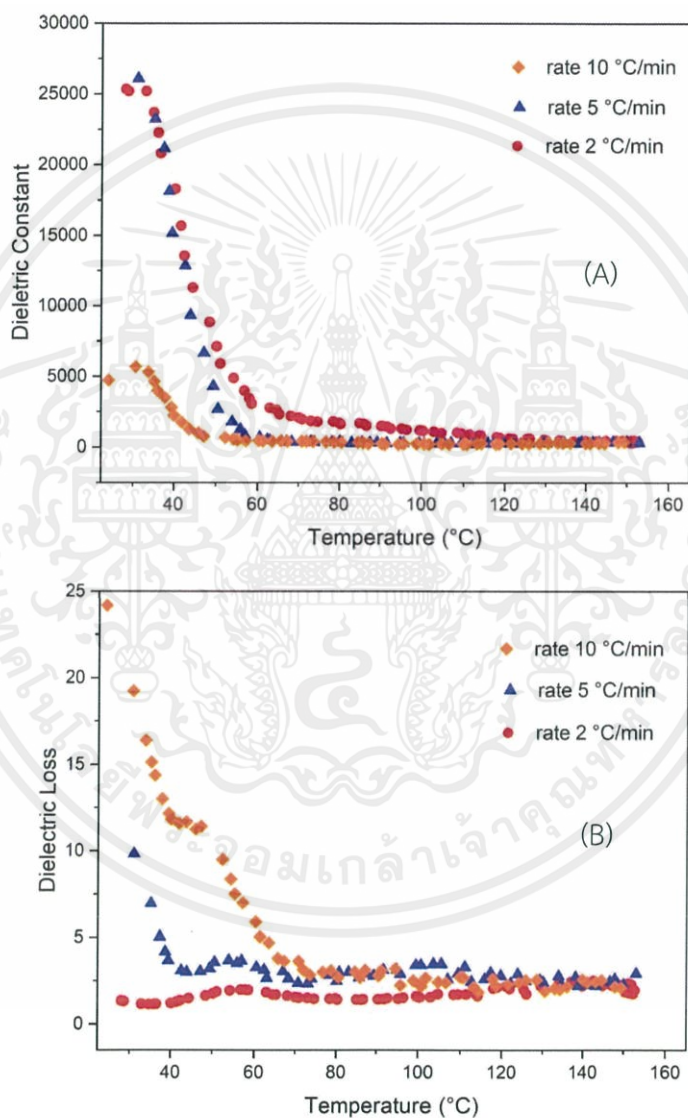


ภาพที่ 4.20 ผลของความถี่ต่อค่าทางไฟฟ้า (A) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (B) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า

จากการนำเม็ดเซรามิกตัวอย่างที่ใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ต่างๆตามเงื่อนไขไปทำซ้ำและตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR โดยกำหนดความถี่ที่ 10 เฮิรตซ์ ซึ่งจะศึกษาผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปต่อสมบัติทางไฟฟ้า โดยตรวจวัดตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ไปจนถึง 150 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่าได้ผลดังภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 ผลของอุณหภูมิต่อค่าทางไฟฟ้า (A) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (B) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ทำการเผาซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้นลงต่างๆนั้นมีความหนาแน่นที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ขนาดของเกรนที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งเมื่อนำมาทดสอบผลของความถี่และอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าทางไฟฟ้าแล้วนั้นได้ผลดังนี้ เซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ทำการเผาซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดอยู่ที่ 25361 และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก 1.35 เซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ทำการเผาซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดอยู่ที่ 26117 และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก 9.83 และเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ทำการเผาซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดอยู่ที่ 5691 และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก 19.26 ทำให้สันนิษฐานได้ว่า ขนาดของเกรนมีผลต่อค่าทางไฟฟ้า

4.2.3 บรรยากาศในการเผา

4.2.3.1 สมบัติทางกายภาพ

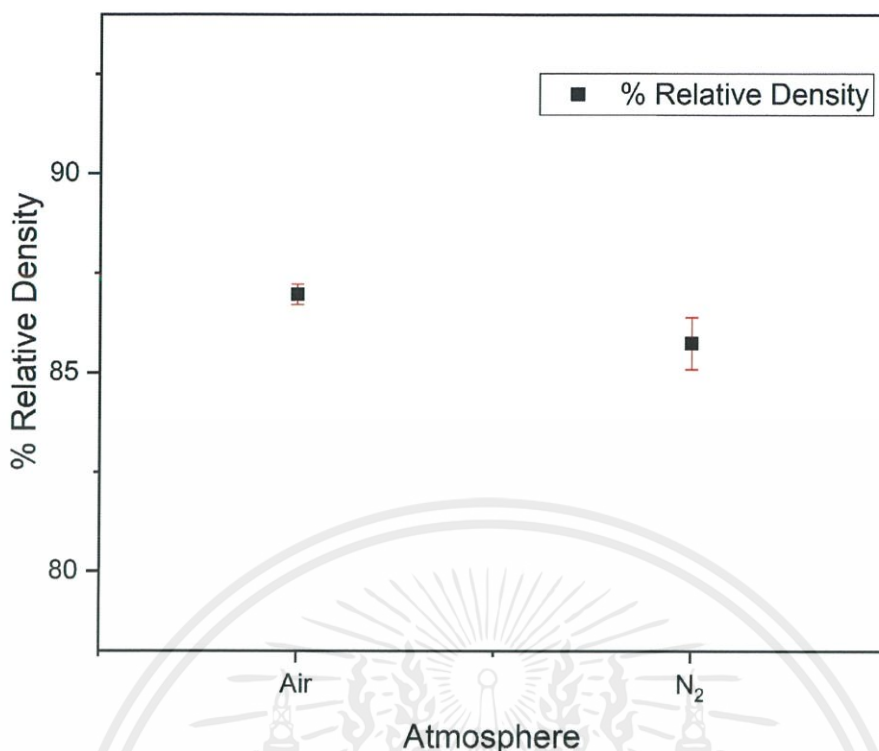
1) ค่าความหนาแน่น

การหาความหนาแน่นของชิ้นงานทำได้โดยการอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำ ตามกฎของอาร์คิมิดีส (Archimedes's method) ดังสมการที่ 3.4 โดยเปรียบเทียบระหว่าง เม็ดเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ในบรรยากาศปกติ และ ไนโตรเจน (N_2) โดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์จากค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของซีเซียมซิงค์ไททาเนต ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.4403 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยความหนาแน่นที่คำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในอากาศและไนโตรเจน

บรรยากาศในการเผา	ความหนาแน่น (กรัม ต่อ ลูกบาศก์เมตร)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
อากาศ	3.86	86.97
ไนโตรเจน	3.81	85.74

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงบรรยากาศในการเผาซินเตอร์ส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานมีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยที่บรรยากาศปกติมีความหนาแน่นที่สูงสุด ซึ่งมีค่า 86.97 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและบรรยากาศในการเผาซินเตอร์

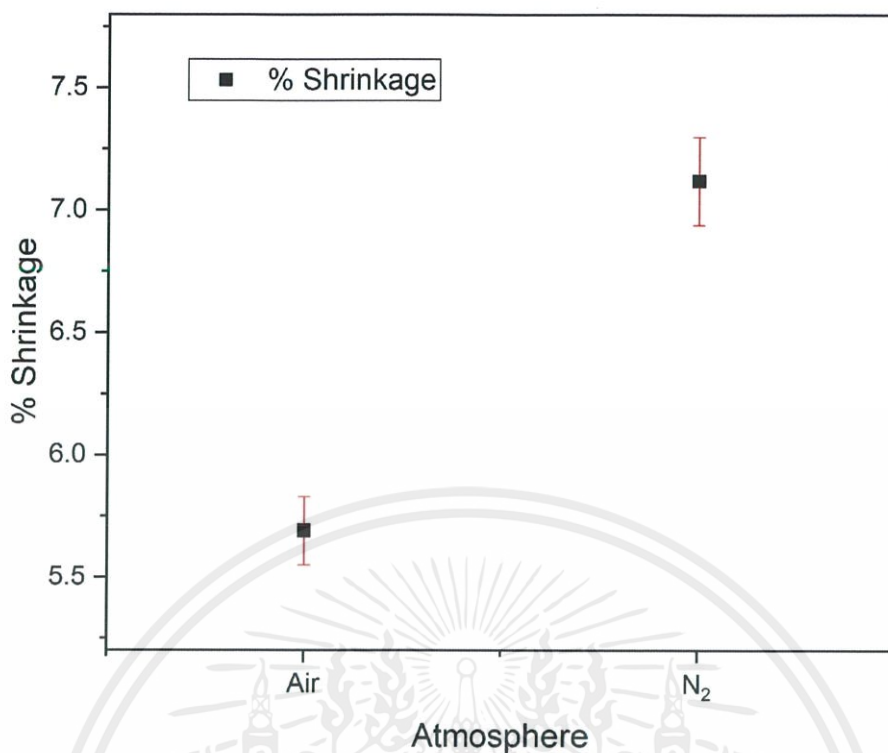
2) ค่าการหดตัวหลังจากการเผา

การหดตัวหลังจากการเผาซินเตอร์สามารถทำได้ด้วยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 3.5 โดยเปรียบเทียบระหว่าง เม็ดเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ในบรรยากาศปกติและ ไนโตรเจน (N_2) ซึ่งค่าการหดตัวและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวและบรรยากาศในการเผา แสดงในตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.23 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ค่าการหดตัวของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในอากาศและไนโตรเจน

บรรยากาศในการเผา	ค่าการหดตัว (เปอร์เซ็นต์)
อากาศ	5.69
ไนโตรเจน	7.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวและบรรยากาศในการเผา

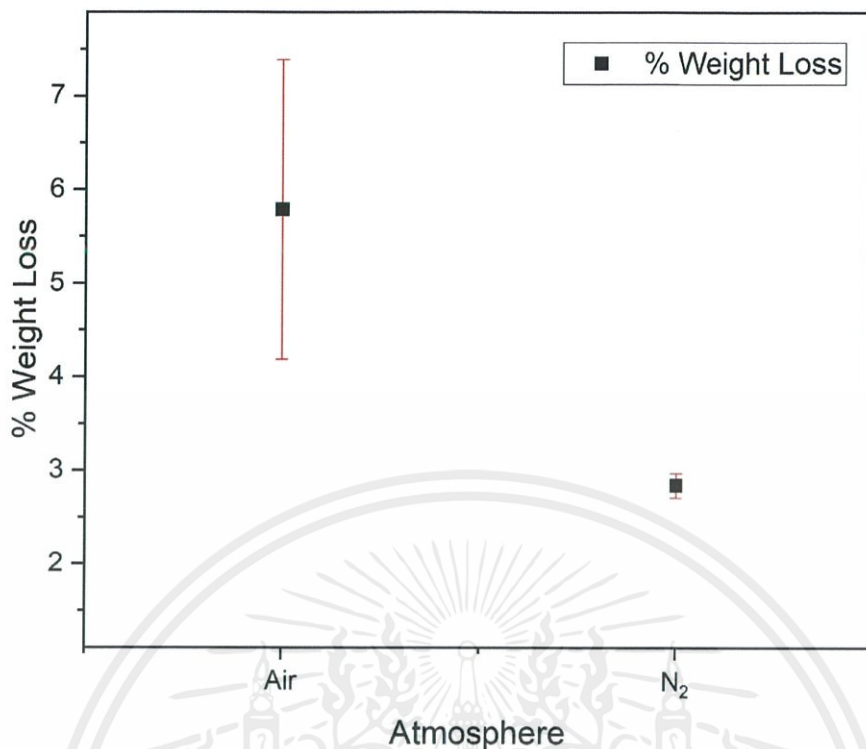
3) น้ำหนักที่สูญหายไปหลังจากการเผา

น้ำหนักที่สูญหายหลังจากการเผาซินเตอร์สามารถทำได้ด้วยการชั่งน้ำหนักของเม็ดเซรามิกก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 3.6 โดยเปรียบเทียบระหว่าง เม็ดเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 2 5 และ 10 องศาเซลเซียสต่อ ซึ่งน้ำหนักที่สูญหายหลังจากการเผาซินเตอร์และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญหายหลังจากการเผาซินเตอร์และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ แสดงในตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.24 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 น้ำหนักที่สูญหายหลังจากการเผาซินเตอร์ของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในอากาศและไนโตรเจน

บรรยากาศในการเผา	น้ำหนักที่สูญหายจากการเผา (เปอร์เซ็นต์)
อากาศ	5.79
ไนโตรเจน	2.84

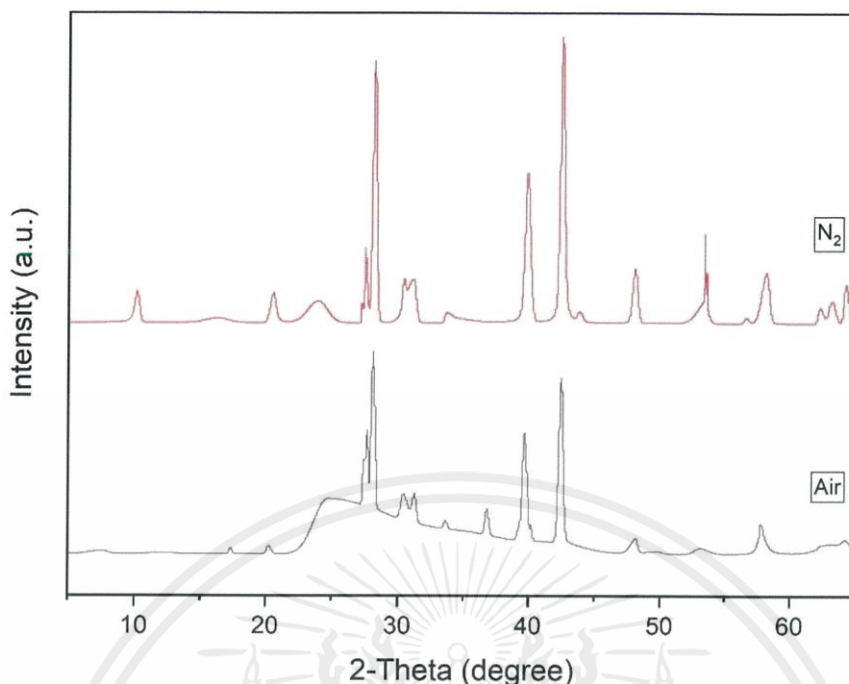
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักหลังจากการเผาซินเตอร์และบรรยากาศในการเผา

4.2.3.2 เฟสที่เกิดขึ้น

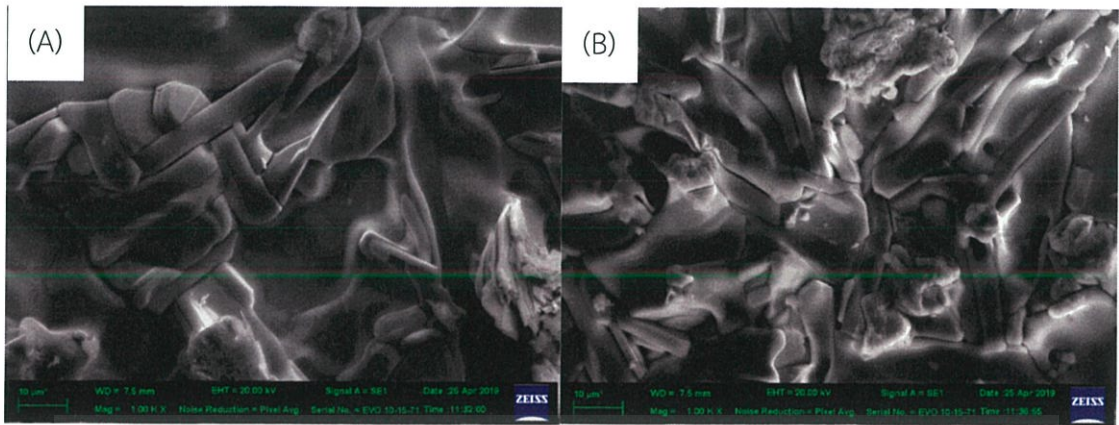
การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่าง ๆ นั้น ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.25 โดยการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเผาในบรรยากาศที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อเฟสที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะของพีคที่เป็นเอกลักษณ์ยังคงอยู่



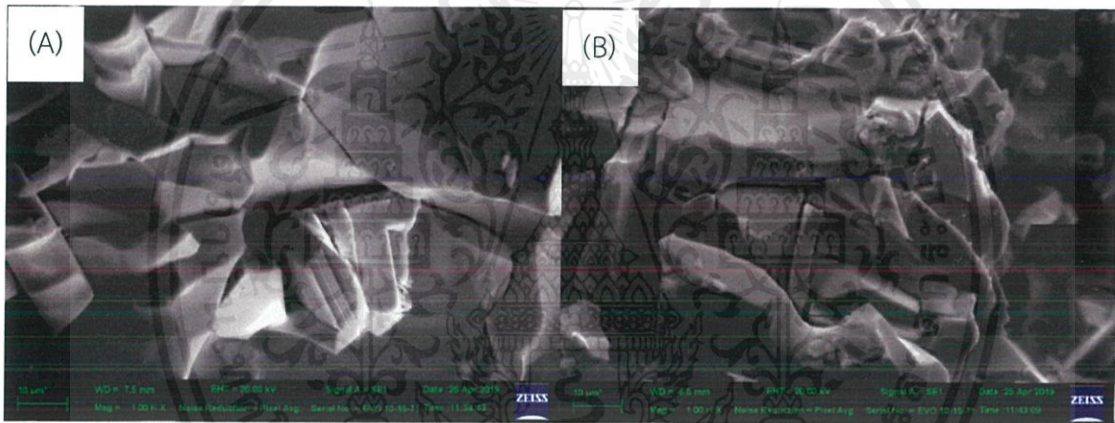
ภาพที่ 4.25 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการเผาซินเตอร์ในบรรยากาศต่างๆ

4.2.3.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

หลังจากที่ทำการเผาซินเตอร์เซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) เรียบร้อยแล้ว จึงนำมาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) โดยเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนตหลังจากการเผาซินเตอร์จะเห็นได้ว่าบรรยากาศในการเผาส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเกรนของเม็ดเซรามิก โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าและภาคตัดขวางของชิ้นงานถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.26 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตกำลังขยาย 1000 เท่า
(A) ซินเตอร์ในบรรยากาศปกติ (B) ซินเตอร์ในไนโตรเจน



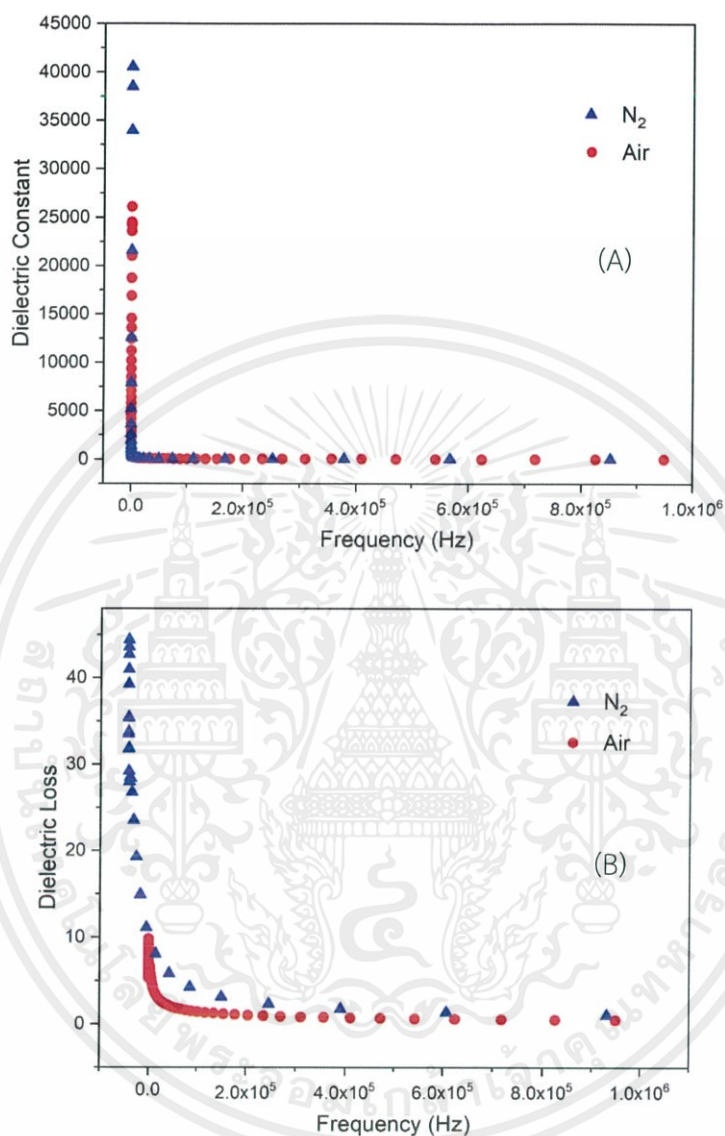
ภาพที่ 4.27 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตกำลังขยาย 1000 เท่า (A) ซินเตอร์ในบรรยากาศปกติ (B) ซินเตอร์ในไนโตรเจน

4.2.3.4 สมบัติทางไฟฟ้า

เมื่อนำเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ไปทำการซินเตอร์ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แล้วนำสารตัวอย่างที่ได้มาทำขั้วไฟฟ้า (electrode) เพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ด้วยเครื่อง LCR 1) ผลของความถี่ที่ส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า

จากการนำเม็ดเซรามิกตัวอย่างที่เผาซินเตอร์ในบรรยากาศต่างๆตามเงื่อนไขไปทำขั้วและตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ซึ่งจะศึกษาผลของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อสมบัติทางไฟฟ้า โดยใช้ความถี่ 10 100 1000 10000 100000 และ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1000000 ตามลำดับ เพื่อศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่าได้ผลดังภาพที่ 4.28

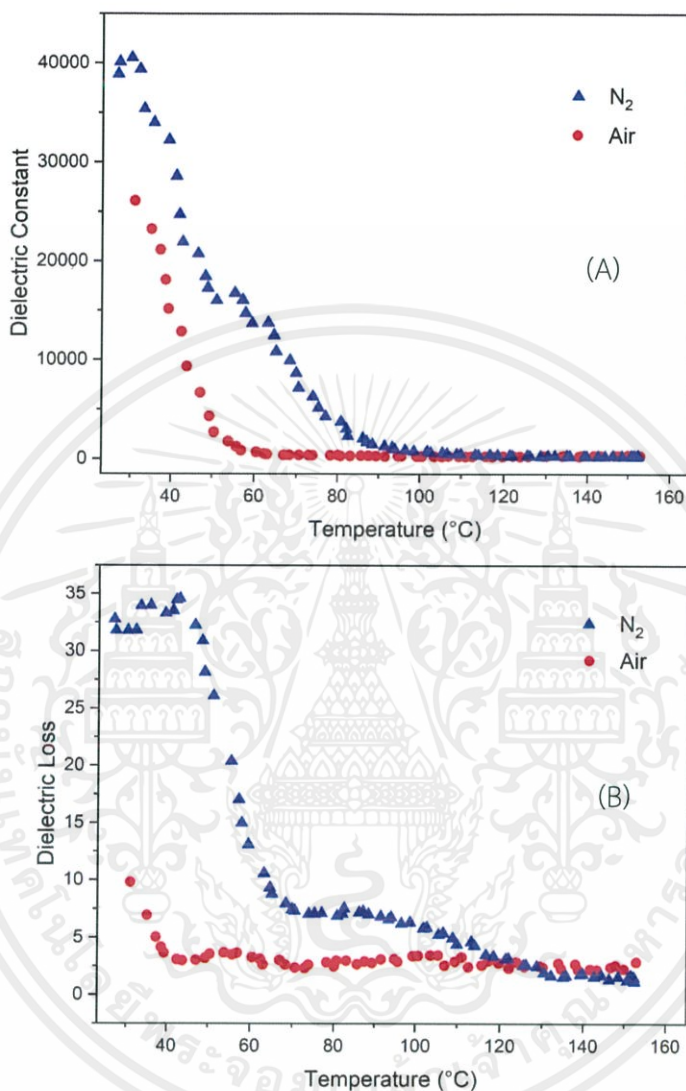


ภาพที่ 4.28 ผลของความถี่ต่อค่าทางไฟฟ้า (A) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (B) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

2) ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า

จากการนำเม็ดเซรามิกตัวอย่างที่เผาซินเตอร์ในบรรยากาศต่างๆตามเงื่อนไขไปทำขั้วและตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR โดยกำหนดความถี่ที่ 10 เฮิรตซ์ ซึ่งจะศึกษาผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปต่อสมบัติทางไฟฟ้า โดยตรวจวัดตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปจนถึง 150 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่า
ได้ผลดังภาพที่ 4.29



ภาพที่ 4.29 ผลของอุณหภูมิต่อค่าทางไฟฟ้า (A) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (B) ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิและความถี่เพิ่มขึ้นแนวโน้มของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและ ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะลดลง โดยหากนำค่าทางไฟฟ้าไปเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นจะไม่เห็นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าเนื่องจากการเผาในบรรยากาศที่ต่างกัน ผลของความหนาแน่นของชิ้นงานนั้นใกล้เคียงกันมาก แต่หากเปรียบเทียบกับขนาดของเกรนที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดทำให้สันนิษฐานได้ว่าเกรนมีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งลักษณะของเกรนที่แตกต่างกันอาจเกิดขึ้นจากเติบโตของเกรนในบรรยากาศการเผาต่างๆที่แตกต่างกัน ผลไฟฟ้าของเซรามิกที่เผาใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศต่างๆมีผลแสดงดังนี้ เซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ทำการเผาซินเตอร์ในอากาศ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดอยู่ที่ 26117 และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก 9.83 เซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ทำการเผาซินเตอร์ในไนโตรเจน มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดอยู่ที่ 40567 และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก 31.79

ตารางที่ 4.11 ผลทางไฟฟ้าของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ใช้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
1100	26117	9.83
1150	1223	10.56

ตารางที่ 4.12 ผลทางไฟฟ้าของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่ใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ต่างๆ

อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียสต่อนาที)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
2	25361	1.35
5	26117	9.83
10	5691	19.26

ตารางที่ 4.13 ผลทางไฟฟ้าของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่เผาซินเตอร์ในบรรยากาศต่างๆ

บรรยากาศในการเผา	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
อากาศ	26117	9.83
ไนโตรเจน	40567	31.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองจากเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.7}\text{Zn}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ซึ่งทำการเผาซินเตอร์ โดยศึกษาผลของเงื่อนไขในการทดลองที่มีผลต่อ เฟสที่เกิดขึ้น โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า ทั้งนี้ข้อสรุปและข้อเสนอแนะที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมีดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) สามารถประดิษฐ์เซรามิกวัสดุผสมในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต โดยมีอัตราส่วนของสารซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3) 8.0892 กรัม, ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 2.2010 กรัม, และไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 10.1796 กรัม โดยเทคนิคมิชชิ่งแบบดั้งเดิมร่วมกับการซินเตอร์แบบดั้งเดิมในเงื่อนไขต่างๆ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง

2) เซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ที่ผ่านกระบวนการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1200 องศาเซลเซียสพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้ความหนาแน่นของเซรามิกลดลงและที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดสูญเสียของเม็ดเซรามิก ทำให้มีลักษณะที่เป็นรูพรุนเกิดขึ้น โดยการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเซรามิกที่เผาซินเตอร์ในอุณหภูมิต่างๆ โดยการเปรียบเทียบค่าคงที่สูงสุดที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) จนถึง 150 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ 1100 องศาเซลเซียส ทำให้เซรามิกมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดคือ 26117

3) เซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ที่ผ่านกระบวนการเผาซินเตอร์ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 2 5 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิทำให้ความหนาแน่นของเซรามิกเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเซรามิกที่เผาซินเตอร์ในอุณหภูมิต่างๆ โดยการเปรียบเทียบค่าคงที่สูงสุดที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) จนถึง 150 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำให้เซรามิกมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดคือ 26117

4) การเผาเซรามิกในบรรยากาศที่ต่างกันส่งผลต่อเกรนของเซรามิกซึ่งทำให้ส่งผลต่อค่าทางไฟฟ้า โดยแม้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกที่เผาในไนโตรเจนจะสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดแต่ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกก็สูงกว่ามากเช่นกัน ดังนั้น เงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิในการเผา 1100 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และเผาในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การเปลี่ยนเงื่อนไขในการเผาส่งผลต่อสมบัติของเซรามิกซีเอ็มซีไททาเนต โดยอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ส่งผลอย่างมากต่อความหนาแน่นของเซรามิก อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิและบรรยากาศในการเผาส่งผลต่อเกรนทำให้คุณสมบัติเกิดการเปลี่ยนแปลงตาม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) สารตั้งต้นมีความไวต่อความชื้น เพราะฉะนั้นเมื่อทำการทดลองแต่ละขั้นตอนเสร็จเรียบร้อยควรเก็บสารไว้ในตู้ดูดความชื้น

2) ในขั้นตอนการอบเพื่อร่อนผงผสมออกจากเม็บบดทำให้เกิดการสูญเสียสารได้ง่ายซึ่งอาจทำให้สารที่เตรียมไม่ตรงตามสูตรที่คำนวณ เพราะฉะนั้นควรเตรียมอย่างระมัดระวังและชะสารออกจากเม็บบดออกให้หมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] [online]. Available : <https://sites.google.com/site/123smudnot/bth-thi-7>
- [2] [online]. Available : <https://www.scribd.com/document/250704573>
- [3] [online]. Available : <https://www.slideshare.net/mkafzzal/340-important-non-silicates>
- [4] [online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Titanate_nanosheet
- [5] Tao Gao et.al. June 2009 “Defect Chemistry of a Zinc-Dope Lepidocrocite Titanate $Cs_xTi_{2-x/2}Zn_{x/2}O_4$ ($x=0.7$) and its Protonic Form” J. Chemistry Of Materials 21 :3503-3513.
- [6] E. GREY et.al. December 1984 “New cesium Titanate Layered Structures” J. Of Solid state chemistry 58 : 350-356.
- [7] Yan Wang et.al 2017 “Synthesis of fine-grain $Ba_{0.96}La_{0.04}TiO_3$ dielectric ceramics by different routes for multilayer ceramic capacitors” J.Ceramics International 43:15115-15121.
- [8] Wachirawit Yosrawas 2017 “Fabrication of Layered Titanate for electronic application” Bangkok; College of Nanotechnology. KMITL
- [9] [online]. Available : <http://eng.sut.ac.th/ceramic/old/article/19.pdf>
- [10] [online]. Available : <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2017/10/box-furnace-for-auto-safety-components/>
- [11] [online]. Available : <https://tamagozilla.blogspot.com/2011/10/calination-mo-memoir-thursday-13.html>
- [12] [online]. Available : https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/268_12-18.pdf
- [13] [online]. Available : <https://stic.mfu.ac.th/stic-analysis-tools/stic-tool-detail/20.html>
- [14] [online]. Available : <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5251>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายปฏิภาณ ปาละโชติ
วัน เดือน ปีเกิด	12 ธันวาคม พ.ศ.2539
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลตากสิน แขวงคลองสาน เขตคลองสาน กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 47/53 หมู่ที่ 5 ถนนสุขุมวิท ตำบลสี่ตึก อำเภอสี่ตึก จังหวัดชลบุรี 20180
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2551 จบการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนธัมมสิริศึกษาสี่ตึก พ.ศ.2557 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนระยองวิทยาคม พ.ศ.2558 เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้