

การเตรียมสารไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้นสำหรับประยุกต์ใช้งานทางไฟฟ้า

FABRICATION OF LAYERED TITANATE FOR ELECTRONIC APPLICATIONS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION OF LAYERED TITANATE FOR ELECTRONIC APPLICATIONS



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

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมสารไททานेटที่มีโครงสร้างแบบชั้นสำหรับประยุกต์ใช้งานทางไฟฟ้า
Special Project Title Fabrication of Layered Titanate for Electronic Applications
นักศึกษา นาย วชิรวิทย์ ยศรวาศ
รหัสประจำตัว 57110039
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วรรณวิไลย์ วิทยากร

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กรกช อ่อนละออ	
ผศ.ดร.ทศพล เมลืองนนท์	
รศ.ดร.วรรณวิไลย์ วิทยากร	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่.....15.....เดือน.....ม.ย.....พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อ	การเตรียมสารไททานेटที่มีโครงสร้างแบบชั้นสำหรับประยุกต์ใช้งานทางไฟฟ้า
นักศึกษา	นาย วชิรวิทย์ ยศรวาศ
รหัสประจำตัว	57110039
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. วรรณวิไล วิทยาการ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำเตรียมสารไททานेटที่มีโครงสร้างแบบชั้น ในระบบซีเซียมซิงค์ไททานेट ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาของแข็ง แล้วตามด้วยการเผาแบบซินเตอร์ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ผงซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารตั้งต้น หลังจากบดย่อยแบบสั่นสะเทือนเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมงแล้ว นำผงผสมที่ได้ไปอบให้แห้ง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 20 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลง ของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นนำผงที่ผ่านการแคลไซน์แล้วไปอัดขึ้นรูปเป็นเม็ด แล้วเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นทำการตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้น และลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตามลำดับ พร้อมทำการวัดสมบัติไดอิเล็กทริกด้วยเครื่องวัด LCR ผลแสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$ ที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวอย่าง นอกจากนี้ระบบไททานेटที่มีโครงสร้างแบบชั้น ได้ทำการพัฒนาโดยการเปลี่ยนอะตอมระหว่างชั้น เพื่อปรับช่องว่างระหว่างชั้น ซึ่งอาจจะส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุ โพแทสเซียม (K) และรูบิเดียม (Rb) เป็นสารที่ถูกเลือกให้มีแทนที่ซีเซียม (Cs) ในโครงสร้าง และมีสูตรทางเคมีคือ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ 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 $\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$ ยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเซรามิก การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างชั้นพบว่าค่าไดอิเล็กทริกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่ได้อยู่ในแนวโน้มเดียวกันกับขนาดของอะตอมที่สามารถอธิบายได้ คาดว่าระยะห่างระหว่างชั้น ยังคงมีหลายพารามิเตอร์ สำหรับสมบัติไดอิเล็กทริกที่ยังกังวล

คำสำคัญ : โครงสร้างแบบหลายชั้น เทคนิคปฏิกิริยาของแข็ง การซินเตอร์

Title	Fabrication of Layered Titanate for Electronic Applications
Student	Mr. Wachirawit Yosrawas
Student ID	57110039
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2017
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wanwilai Vittayakorn

Abstract

In this work, the layered titanate of $Cs_{0.35}Zn_{0.175}Ti_{0.825}O_2$ system was fabricated by a solid state reaction and followed by sintering in normal air for various temperatures. Cs_2CO_3 , ZnO and TiO_2 powders were selected as precursors. After vibratory milling for 2 hours, the mixed power was dried and calcined at 800 °C with heating/cooling rates of 10 °C/min. After that, the calcined powder was pressed into pellets and sintered at various temperatures. Phase formation and microstructure of all samples were investigated by using X-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscope (SEM), respective. The dielectric properties are also measured by using LCR meter. The results showed that the dielectric properties of $Cs_{0.35}Zn_{0.175}Ti_{0.825}O_2$ ceramics strongly depended on densification of samples. Moreover, the layered titanate system was developed by changing atom between layers in order to adjust the space gap between each layer which can affect to dielectric properties of this materials. Potassium (K) and rubidium (Rb) were selected to substitute cesium (Cs) in the structure and the chemical formulas were $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ and $Rb_{0.75}Zn_{0.375}Ti_{1.625}O_4$, respectively. Ceramics of these two systems were fabricated in the same procedure as $Cs_{0.35}Zn_{0.175}Ti_{0.825}O_2$. The results showed that the dielectric properties of $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ and $Rb_{0.75}Zn_{0.375}Ti_{1.625}O_4$ ceramics also strongly depended on densification. Comparison in term of space gap between layers, it was seen that the dielectric values were significantly different, but not in the same trend with the atomic size which can explain that, except the space between layers, there are still have many parameters for dielectric properties need to concern.

Keywords : multilayer, solid state reaction, sintering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วรรณวิไล วิทยากร ที่ได้ให้ความรู้ คำชี้แนะ และการแก้ปัญหาต่างๆในการทำโครงการพิเศษ รวมถึงการให้ประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.กรกช อ่อนละออ และ ผศ.ดร.ทศพล เมลืองนนท์ กรรมการในการสอบหัวข้อโครงการพิเศษ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทำโครงการพิเศษ

ขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่เปิดหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน เพื่อให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาหาความรู้เพื่อนำไปต่อยอดในการทำงานในอนาคต

ขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้สถานที่ในการศึกษาหาความรู้ และเป็นสถานที่ที่ศักดิ์สิทธิ์ทำให้ข้าพเจ้ารู้สึกภาคภูมิใจ นำไปสู่การมุ่งมั่นตั้งใจในการศึกษาเล่าเรียนจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

วชิรวิทย์ ยศราราศ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญภาพ.....	viii
สารบัญตาราง.....	xii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตและแผนการดำเนินงาน.....	3
1.4 แผนการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ตัวเก็บประจุ.....	5
2.1.1 ความหมายของตัวเก็บประจุ.....	5
2.1.2 หลักการเบื้องต้นของตัวเก็บประจุ.....	5
2.1.3 ชนิดของตัวเก็บประจุ.....	8
2.1.4 หน่วยความจุของตัวเก็บประจุ.....	13
2.2 ไททานเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้น.....	15
2.2.1 แผ่นนาโนไททานเนต.....	15
2.2.2 ไททานเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้นระดับนาโน.....	16
2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.4 เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล.....	29
2.5 กระบวนการซินเตอร์.....	30
2.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 ก่อตั้งจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	32
2.8 สมบัติทางไฟฟ้า.....	33
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	35
3.1 สารเคมีที่ใช้.....	35
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้.....	35
3.3 กระบวนการเตรียมผงผสม.....	38
3.4 กระบวนการเตรียมเม็ดเซรามิก.....	40
3.5 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ.....	42
3.5.1 การหาความหนาแน่น.....	42
3.5.2 การหดตัวหลังจากการเผา.....	43
3.5.3 น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผา.....	43
3.6 การตรวจสอบเฟสของเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	44
3.7 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก.....	45
3.8 การตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่างๆ.....	46
3.9 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก.....	47
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	48
4.1 สารในระบบซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนต.....	48
4.1.1 ผงซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนต.....	48
4.1.1.1 สมบัติกายภาพ.....	48
4.1.1.2 เฟสที่เกิดขึ้น.....	49
4.1.1.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	50
4.1.2 เซรามิกซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนต.....	51
4.1.2.1 สมบัติกายภาพ.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2.2 เฟสที่เกิดขึ้น.....	55
4.1.2.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	56
4.1.2.4 องค์ประกอบของธาตุต่างๆ.....	58
4.1.2.5 สมบัติไดอิเล็กทริก.....	61
4.2 ผลการปรับปรุงโครงสร้างชั้นของสารไททานेट.....	66
4.2.1 สารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททานेट.....	66
4.2.1.1 ผงโพแทสเซียมซิงค์ไททานेट.....	66
1) สมบัติกายภาพ.....	66
2) เฟสที่เกิดขึ้น.....	67
3) ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	68
4.2.1.2 เซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททานेट.....	69
1) สมบัติกายภาพ.....	69
2) เฟสที่เกิดขึ้น.....	73
3) ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	74
4) การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุต่างๆ.....	76
5) สมบัติไดอิเล็กทริก.....	79
4.2.2 สารในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททานेट.....	82
4.2.2.1 ผงรูบิเดียมซิงค์ไททานेट.....	82
1) สมบัติกายภาพ.....	82
2) เฟสที่เกิดขึ้น.....	83
3) ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	83
4.2.2.2 เซรามิกรูบิเดียมซิงค์ไททานेट.....	85
1) สมบัติกายภาพ.....	85
2) เฟสที่เกิดขึ้น.....	89

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3) ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	91
4) การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุต่างๆ.....	94
5) สมบัติไดอิเล็กทริก.....	97
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	101
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	101
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	102
บรรณานุกรม.....	103



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 (ก) ลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุ และ (ข) แสดงลักษณะการเรียงตัวแยกชั้นของสารไททานเนียมไดออกไซด์ในอุดมคติ.....	2
2.1 (ก) แสดงอุปกรณ์ตัวเก็บประจุ (ข) แสดงโครงสร้าง และ(ค) แสดงลักษณะของตัวเก็บประจุ.....	5
2.2 (ก) การเกิดความจุจากการป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้า และ(ข) โครงสร้างของตัวเก็บประจุ.....	6
2.3 แสดงลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบชั้น.....	7
2.4 แสดงตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่.....	8
2.5 แสดงตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์.....	9
2.6 แสดงตัวเก็บประจุชนิดโปไลลาร์.....	9
2.7 แสดงตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก.....	10
2.8 แสดงตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์.....	10
2.9 แสดงตัวเก็บประจุชนิดพีดีทรี.....	11
2.10 แสดงตัวเก็บประจุชนิดโพลีสไตรีน.....	11
2.11 แสดงตัวเก็บประจุชนิดซิลเวอร์ไมก้า.....	12
2.12 แสดงตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้.....	12
2.13 แสดงตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้.....	13
2.14 แสดงตัวเก็บประจุแบบขนาน และสมการความสัมพันธ์.....	13
2.15 (ก) แสดงการต่อตัวประจุแบบขนาน และ(ข) แสดงการต่อประจุแบบอนุกรม.....	14
2.16 (ก) แสดงค่าความต่างศักย์ที่ลดลงเมื่อมีสารไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างแผ่นขนาน และ (ข) แสดงลักษณะจุลภาคของสารไดอิเล็กทริกที่อยู่ระหว่างแผ่นขนาน.....	14
2.17 แสดงลักษณะโครงสร้างของเลพิโดโครไซด์.....	15
2.18 แสดงแผ่นนาโนไททานเนต.....	16
2.19 แสดงช่องว่างระหว่างชั้นที่มีไอออน.....	16
2.20 แสดงโครงสร้าง (ก) อนุภาค (ข) รูโกล์ และ(ค) บรูคไคท์.....	17
2.21 แสดงโครงสร้างแบบชั้นของโพแทสเซียมเตตระไททานเนต.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.22 แสดงโครงสร้างแบบชั้นของโซเดียมไตรไททาเนต.....	18
2.23 แสดงลักษณะรูปร่างสัมพันธ์ของไททาเนตแบบชั้น.....	20
2.24 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเลพิโตโครไซด์ที่มีไอออนโลหะกระจายตัวอยู่บริเวณ ช่องว่างของแต่ละชั้น.....	25
2.25 แสดงโครงสร้างสารประกอบซีเซียมไททาเนตในเฟสของ $Cs_2Ti_6O_{13}$ โดยมีอัตราส่วน 1:6.....	26
2.26 แสดงโครงสร้างสารประกอบซีเซียมไททาเนตในเฟสของ $Cs_2Ti_5O_{11}$ โดยมีอัตราส่วน 1:5.....	27
2.27 แสดงค่าไดอิเล็กทริกของสาร $Ba_{0.96}La_{0.04}TiO_3$	28
2.28 แสดงการตกกระทบของลูกบอลในกระบวนการบดย่อย.....	29
2.29 แสดงกระบวนการซินเตอร์ในขั้นตอนต่างๆ.....	30
2.30 แผนภาพแสดงการตกกระทบของรังสีเอกซ์โดยอาศัยกฎของแบรกก์.....	31
2.31 แสดงอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานในระดับพลังงานต่างๆ.....	33
2.32 แสดงส่วนประกอบต่างๆภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	33
3.1 แผนผังการเตรียมเซรามิกในระบบระบบ $Cs_{0.35}Zn_{0.175}Ti_{0.825}O_2$, $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ และ $Rb_{0.375}Zn_{0.375}Ti_{1.625}O_4$	37
3.2 แสดงเครื่องบดย่อยด้วยลูกบอล.....	39
3.3 แสดงครกบดสาร.....	39
3.4 แสดงกระบวนการเผาแคลไซน์.....	40
3.5 แสดงเครื่องอัดแบบแกนเดี่ยว.....	41
3.6 แสดงแม่พิมพ์อัดสาร.....	41
3.7 แสดงลักษณะของเม็ดอัด.....	42
3.8 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	46
4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต.....	48
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต.....	49
4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิซินเตอร์ของ เซรามิกซีเอ็มซีไททานेट	52
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวหลังการเผากับอุณหภูมิซินเตอร์ของ เซรามิกซีเอ็มซีไททานेट	53
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผากับอุณหภูมิซินเตอร์ของ เซรามิกซีเอ็มซีไททานेट	54
4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของเซรามิกซีเอ็มซีไททานेट	55
4.8 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกซีเอ็มซีไททานेट	57
4.9 ผลการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบธาตุของเซรามิกซีเอ็มซีไททานेट	59
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิของเซรามิกซีเอ็มซีไททานेट	62
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิการซินเตอร์ ของเซรามิกซีเอ็มซีไททานेट	64
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิการซินเตอร์ของเซรามิกซีเอ็มซีไททานेट	65
4.13 แสดงลักษณะทางกายภาพของผงโพแทสเซียมซีเอ็มซีไททานेट	66
4.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงโพแทสเซียมซีเอ็มซีไททานेट.....	67
4.15 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงโพแทสเซียมซีเอ็มซีไททานेट	68
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของเซรามิก โพแทสเซียมซีเอ็มซีไททานेट	70
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวหลังการเผากับอุณหภูมิซินเตอร์ของ เซรามิกโพแทสเซียมซีเอ็มซีไททานेट.....	71
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผากับอุณหภูมิซินเตอร์ของ เซรามิกโพแทสเซียมซีเอ็มซีไททานेट.....	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.19 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต.....	73
4.20 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต.....	75
4.21 ผลการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบธาตุของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต.....	76
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิการซินเตอร์ของ เซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต.....	80
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิการซินเตอร์ของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต.....	81
4.24 แสดงลักษณะทางกายภาพของผงรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต.....	82
4.25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต.....	83
4.26 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต.....	84
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิก รูปีเดียมซิงค์ไททาเนต.....	86
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวหลังเผากับอุณหภูมิซินเตอร์ของ เซรามิกรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต.....	87
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังเผากับอุณหภูมิซินเตอร์ของ เซรามิกรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต.....	89
4.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต.....	90
4.31 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต.....	93
4.32 ผลการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบธาตุของเซรามิกรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต.....	94
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิซินเตอร์ของ เซรามิกรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต.....	98
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทาง ไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิการซินเตอร์ของเซรามิกรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต.....	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแผนการดำเนินงาน	4
2.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุชนิดต่างๆ.....	7
2.2 แสดงภาพรวมสมบัติต่างๆของไททานेटที่มีโครงสร้างระดับนาโน.....	23
4.1 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททานेट	51
4.2 ค่าการหดตัวของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททานेट	53
4.3 น้ำหนักที่สูญเสียหลักการเผาของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททานेट	54
4.4 ขนาดผลึกของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททานेट.....	56
4.5 ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์และขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททานेट.....	57
4.6 องค์ประกอบธาตุสารในระบบซีเซียมซิงค์ไททานेटที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 900 องศาเซลเซียส	60
4.7 องค์ประกอบธาตุสารในระบบซีเซียมซิงค์ไททานेटที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 950 องศาเซลเซียส	60
4.8 องค์ประกอบธาตุสารในระบบซีเซียมซิงค์ไททานेटที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1000 องศาเซลเซียส	60
4.9 องค์ประกอบธาตุสารในระบบซีเซียมซิงค์ไททานेटที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1050 องศาเซลเซียส	61
4.10 องค์ประกอบธาตุสารในระบบซีเซียมซิงค์ไททานेटที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1100 องศาเซลเซียส	61
4.11 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททานेट.....	65
4.12 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททานेट	69
4.13 ค่าการหดตัวของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททานेट.....	71
4.14 น้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททานेट.....	72
4.15 ขนาดผลึกของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททานेट.....	74
4.16 ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์และขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททานेट	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17 องค์ประกอบธาตุสารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 900 องศาเซลเซียส	78
4.18 องค์ประกอบธาตุสารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 950 องศาเซลเซียส	78
4.19 องค์ประกอบธาตุสารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1000 องศาเซลเซียส	78
4.20 องค์ประกอบธาตุสารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1050 องศาเซลเซียส	79
4.21 องค์ประกอบธาตุสารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1100 องศาเซลเซียส	79
4.22 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต.....	81
4.23 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต.....	85
4.24 ค่าการหดตัวของเซรามิกรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต.....	87
4.25 น้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผาของเซรามิกรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต.....	88
4.26 ขนาดผลึกของเซรามิกรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต	90
4.27 ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์และขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต.....	92
4.28 องค์ประกอบธาตุสารในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 900 องศาเซลเซียส	95
4.29 องค์ประกอบธาตุสารในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 950 องศาเซลเซียส	96
4.30 องค์ประกอบธาตุสารในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1000 องศาเซลเซียส	96
4.31 องค์ประกอบธาตุสารในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1050 องศาเซลเซียส	96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.32 องค์ประกอบธาตุสารในระบบรูปเดียวซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1100 องศาเซลเซียส	97
4.33 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิกรูปเดียวซิงค์ไททาเนต.....	99
4.34 การเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของซีเซียมซิงค์ไททาเนต โพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต และรูปเดียวซิงค์ไททาเนต.....	100



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์ตัวเก็บประจุอิเล็กทรอนิกส์ได้มีบทบาทกับการใช้ชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก ซึ่งอุปกรณ์ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ (Charge) และสามารถคายประจุ (Discharge) ได้ นิยมนำมาประกอบในวงจรทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ตัวอย่างเช่น วงจรกรองกระแส (Filter) วงจรผ่านสัญญาณ (By-pass) วงจรสตาร์ทเตอร์ (Starter) และวงจรถ่ายทอดสัญญาณ (Coupling) ฯลฯ ในอดีตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดใหญ่เนื่องจากต้องการเก็บประจุในปริมาณที่มาก ซึ่งต่อมาก็ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ตัวเก็บประจุอิเล็กทรอนิกส์ให้ทันสมัยขึ้น ซึ่งก็พบว่าอุปกรณ์ตัวเก็บประจุอิเล็กทรอนิกส์จะมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน และการจัดเก็บรักษารวมถึงลดค่าใช้จ่ายในการผลิตด้วย โดยในการพัฒนาอุปกรณ์ตัวเก็บประจุอิเล็กทรอนิกส์นี้ มีจุดประสงค์ให้เป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กแต่เก็บประจุได้มาก และประสิทธิภาพการทำงานยังเท่าเดิม หรือมีประสิทธิภาพการทำงานที่เพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม ทั้งยังสามารถนำไปใช้งานได้กับอุปกรณ์ตัวเก็บประจุอิเล็กทรอนิกส์ที่หลากหลายชนิด ทั้งนี้ อุปกรณ์ตัวเก็บประจุอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำมาจากวัสดุเซรามิกนั้น จะสามารถแสดงสมบัติการเก็บประจุที่เป็นไปตามสมการ

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

โดยค่า C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกเป็นตัวคั่นกลาง (ฟารัด)

A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า (เมตร)

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ (เมตร)

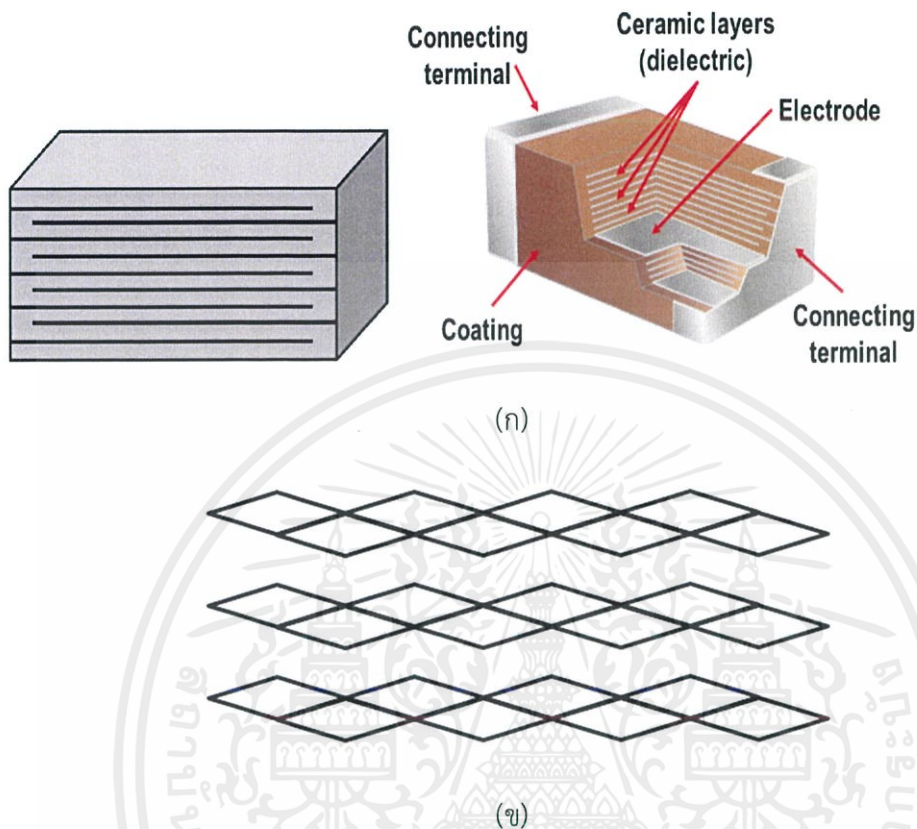
ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (มีค่า $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$)

ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมของวัสดุ (ฟารัด/เมตร)

หากต้องการให้วัสดุมีความจุไฟฟ้ามากแล้ว เมื่อวิเคราะห์ตามสมการที่ (1.1) พบว่าขึ้นตัวอย่างจะต้องมีค่าพื้นที่ (A) มากๆ และต้องการความหนา (d) น้อยๆ โดยลักษณะขึ้นตัวอย่างในอุดมคติได้แสดงไว้ในภาพที่ 1.1 (ก) ซึ่งในปัจจุบันก็มีการพัฒนาเป็นตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น (Multilayer Capacitor หรือ MLC) ใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามเมื่อได้ทำการศึกษาค้นคว้าเนื้อหาเอกสารทางวิชาการเพิ่มเติมก็พบว่า มีวัสดุที่มีโครงสร้างแบบชั้นโดยธรรมชาติของตัวมันเอง ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างในอุดมคติของตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น นั่นก็คือสารไททานเนต (TiO_2) ที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึกเรียงตัวแยกเป็นชั้นๆ (layer) ดังแสดงในภาพที่ 1.1 (ข) ซึ่งเชื่อว่าจะเป็นสารที่สามารถแสดงสมบัติทางไดอิเล็กทริกได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 1.1 (ก) ลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุ และ(ข) แสดงลักษณะการเรียงตัวแยกชั้นของสารไททาเนียมไดออกไซด์ในอุดมคติ [1]

สารในระบบไททาเนต (titanate) นั้นมีโครงสร้างใน 2 มิติ เป็นแบบออกตะฮีดรัลของหน่วย TiO_6 ที่ใช้ขบร่วมกัน ซึ่งเมื่อรวมกันในมุมมองที่กว้างขึ้นก็จะมีลักษณะเป็นแผ่น (sheet) ในระดับนาโนเมตรเมตร หรือที่เรียกว่า นาโนชีท (nanosheet) นั่นเอง โดยในบางครั้งจะเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่าโครงสร้างเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) ซึ่งเป็นลักษณะของนาโนชีทซ้อนกันไปเรื่อยๆ หลายชั้น ทั้งนี้ก็มีวัสดุในหลายระบบที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบนี้ โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งความสนใจไปที่สารในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต เนื่องจากสามารถเกิดโครงสร้างเป็นแบบชั้นได้ง่ายโดยธรรมชาติของสาร และสามารถเกิดเป็นโครงสร้างเลียนแบบตัวเก็บประจุแบบชั้นตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังได้ทำการปรับปรุงสารในระบบไททาเนต ที่มีโครงสร้างแบบชั้นระบบอื่นเพิ่มเติมซึ่งได้แก่ โพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต และรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างชั้นแตกต่างจากในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต โดยเชื่อว่าจะทำให้ค่าทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมเซรามิก $\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$ ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรในระหว่างการเตรียม โครงสร้าง และสมบัติของเซรามิก $\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$

1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของเซรามิก $\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$ ที่มีโครงสร้างเป็นแบบชั้นสำหรับนำไปใช้งานเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบหลายชั้น

1.2.4 เพื่อปรับปรุงโครงสร้างแบบชั้นของสารในระบบไททานेट ให้มีสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างจากเดิมด้วยการแทนที่ตำแหน่งในโครงสร้างแบบเลพิโตโครไซด์

1.3 ขอบเขตและแผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมเซรามิกไททานียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบชั้นมีสูตรเคมีเป็น $\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$ โดยใช้เทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยใช้สารตั้งต้นเป็นสารไททานียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3) โดยนำสารตั้งต้นทั้งหมดมาชั่งตามสัดส่วนที่คำนวณได้แล้วผสมกันด้วยเทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล (ball-milling) จากนั้นเผาแคลไซน์เพื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 20 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเมื่อได้รับผงตัวอย่างแล้วจะทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา และเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ตามลำดับ จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นเม็ดอัดด้วยเครื่องอัดแกนเดี่ยวพร้อมทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆแล้วจึงทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคความหนาแน่นของชิ้นงาน และสมบัติทางไฟฟ้า จากนั้นทำการปรับปรุงโครงสร้างแบบชั้นของสารในระบบไททานียมไดออกไซด์ด้วยการแทนที่ซีเซียมคาร์บอเนต ด้วย โพแทสเซียมคาร์บอเนต และรูบิเดียมคาร์บอเนต เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างชั้น และสมบัติที่แสดงออกมา

1.4 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน									
	ปี พ.ศ. 2560					ปี พ.ศ. 2561				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาข้อมูลการเตรียม และเทคนิควิธีการเตรียมสาร	➔									
2.เตรียมสารโดยการคำนวณอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารแต่ละชนิด	➔									
3.ทำการบดย่อยให้เป็นสารผสม โดยกระบวนการบดย่อยด้วยลูกบอล (ball milling)	➔									
4.นำสารผสมไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส		➔								
5.ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ขนาดอนุภาค และสัณฐานวิทยาของสาร			➔							
6.นำผงที่ได้มาอัดเม็ดขึ้นรูป				➔						
7.นำเม็ดอัดมาเผาแบบซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ1100 องศาเซลเซียส					➔					
8.นำชิ้นงานไปตรวจสอบวิเคราะห์ และวัดสมบัติทางไฟฟ้า และบันทึกผล						➔				
9.วิเคราะห์ผลที่ได้พร้อมพัฒนาปรับปรุงโครงสร้าง และสมบัติของสารในระบบที่เกี่ยวข้อง										➔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบไปด้วยวัสดุชนิดต่างๆ ที่มีโครงสร้างแบบชั้น สมบัติทางไฟฟ้า กระบวนการเตรียมผสม กระบวนการขึ้นรูป รวมถึงกระบวนการซินเตอร์ และเทคนิคการตรวจวัดสมบัติต่างๆของวัสดุ

2.1 ตัวเก็บประจุ

2.1.1 ความหมายของตัวเก็บประจุ

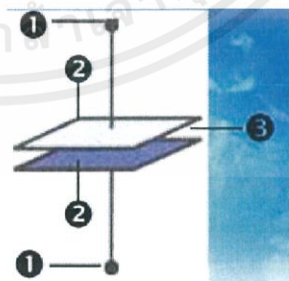
ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ (Charge) และสามารถคายประจุ (Discharge) ได้ นิยมนำมาประกอบในวงจรทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ตัวอย่างเช่น วงจรกรองกระแส (Filter) วงจรผ่านสัญญาณ (By-pass) วงจรสตาร์ทเตอร์ (Starter) วงจรถ่ายทอดสัญญาณ (Coupling) ฯลฯ เป็นต้น ตัวเก็บประจุแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ แบบค่าคงที่ แบบเปลี่ยนแปลงค่าได้ และแบบเลือกค่าได้ ตัวเก็บประจุเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคอนเดนเซอร์ หรือเรียกย่อๆ ว่าตัวซี (C) หน่วยของตัวเก็บประจุคือ ฟารัด (Farad)

2.1.2 หลักการเบื้องต้นของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ (Charge) และสามารถคายประจุ (Discharge) ได้ โดยนำสารตัวนำ 2 ชั้นมาวางในลักษณะขนานใกล้ๆ กัน แต่ไม่ได้ต่อกัน ระหว่างตัวนำทั้งสองจะถูกกั้นด้วยฉนวนที่เรียกว่าไดอิเล็กทริก (Dielectric) ซึ่งไดอิเล็กทริกนี้อาจจะเป็นอากาศ ไมก้า พลาสติก เซรามิก หรือสารที่มีสภาพคล้ายฉนวนอื่นๆ เป็นต้น



(ก)



(ข)



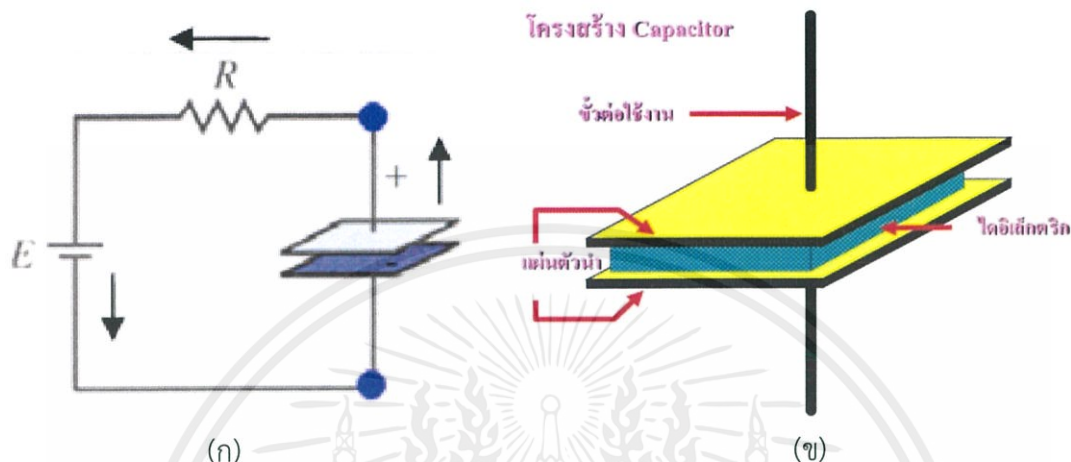
(ค)

ภาพที่ 2.1 แสดง (ก) อุปกรณ์ตัวเก็บประจุ (ข) โครงสร้าง และ(ค) ลักษณะของตัวเก็บประจุ [2]

จากภาพที่ 2.1 (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุ โดยที่ 1 หมายถึงจุดที่ต่อใช้งานกับวงจร 2 หมายถึงสารตัวนำที่เป็นแผ่นตัวนำ และ 3 หมายถึง ฉนวนในที่นี้คืออากาศ ความจุทางไฟฟ้าเกิดจากการป้อนแรงเคลื่อนให้กับขั้วทั้งสองของจุดที่ต่อใช้งานของสารตัวนำซึ่งจะทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนสารตัวนำที่เป็นแผ่นตัวนำ จะทำให้เกิดค่าความจุทางไฟฟ้าขึ้น ลักษณะนี้เรียกว่าการเก็บประจุ (Charge) เมื่อต้องการนำไปใช้งานเรียกว่าการคายประจุ (Discharge) ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณแผ่นตัวนำ มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulomb) ส่วนค่าความจุทางไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด (Farad)



ภาพที่ 2.2 (ก) การเกิดความจุจากการป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้า และ(ข) โครงสร้างของตัวเก็บประจุ [3]

สามารถหาค่าการเก็บประจุได้จากสมการที่ (2.1)

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

โดยค่า C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กตริกเป็นตัวคั่นกลาง (ฟารัด)

A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า (เมตร)

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ (เมตร)

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

ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมของวัสดุ (ฟารัด/เมตร)

ซึ่งความจุของตัวเก็บประจุจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ประการคือ

1) พื้นที่หน้าตัดของสารตัวนำที่เป็นแผ่นขั้ว เขียนแทนด้วยอักษร A ถ้าพื้นที่หน้าตัดมากแสดงว่าสามารถเก็บประจุได้มาก ถ้าพื้นที่หน้าตัดน้อยแสดงว่าเก็บประจุน้อย เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปนั้น จะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุขนาดเล็ก และขนาดใหญ่จำนวนมาก ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะเก็บประจุได้มากเพราะมีพื้นที่หน้าตัดมากนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

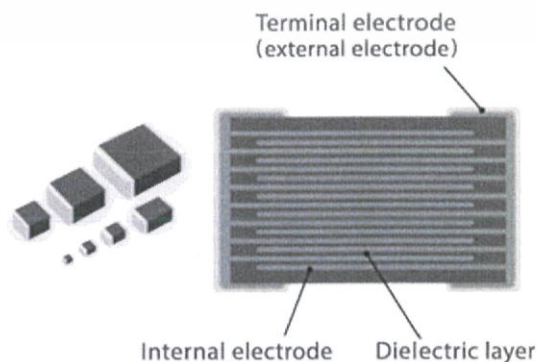
2) ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วทั้งสอง เขียนแทนด้วยอักษร d ถ้าอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กัน ความจุจะมีค่ามาก ถ้าอยู่ในตำแหน่งที่ไกลกันความจุจะมีค่าน้อย

3) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถ ในการที่จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น เมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนคั่นระหว่างแผ่นขั้ว ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกแต่ละตัวจะแตกต่างกันออกไป ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้ไดอิเล็กทริกต่างกัน ถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันค่าความจุ และอัตราทนแรงดันอาจแตกต่างกันออกไป สุญญากาศเป็นไดอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น การจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากเกินไปก็อาจทำให้ไดอิเล็กทริกสูญเสียสภาพจากฉนวนกลายเป็นตัวนำได้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุชนิดต่างๆ [4]

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
สุญญากาศ	1
อากาศ	1.0006
เซรามิก	30-7500
ไมก้า	5.5
ไมลา	3
น้ำมัน	4

หากทราบปัจจัยที่ทำให้ประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้าที่มากแล้ว ตัวอย่างของชิ้นงานจะมีลักษณะดังภาพที่ 2.3 ซึ่งในปัจจุบันก็ได้มีการพัฒนาเป็นตัวเก็บประจุที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น (Multilayer Capacitor หรือ MLC) ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย



ภาพที่ 2.3 แสดงลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบชั้น [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ชนิดของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุที่ผลิตออกมาในปัจจุบันมีมากมาย เราสามารถแบ่งชนิดของตัวเก็บประจุ ตามลักษณะทางโครงสร้าง หรือตามสารที่นำมาใช้เป็นไดอิเล็กทริก การแบ่งโดยใช้สารไดอิเล็กทริก เป็นวิธีการที่ค่อนข้างละเอียด เพราะว่าค่าไดอิเล็กทริกจะเป็นตัวกำหนดค่าตัวเก็บประจุตัวนั้น ๆ ว่าจะนำไปใช้งานในลักษณะใด ทนแรงดันเท่าใด แต่ถ้าหากแบ่งตามระบบเก่า ที่เคยแบ่งกันมาจะสามารถแบ่งตัวเก็บประจุได้เป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ

2.1.3.1) ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor) คือตัวเก็บประจุที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยปกติจะมีรูปลักษณะเป็นวงกลม หรือเป็นทรงกระบอก ซึ่งมักแสดงค่าที่ตัวเก็บประจุ เช่น 5 พิโกฟารัด (pF) 10 ไมโครฟารัด (μ F) แผ่นขั้วตัวนำมักใช้โลหะ และมีไดอิเล็กทริกประเภท ไมก้า เซรามิก อิเล็กโทรไลต์กึ่งกลาง เป็นต้น การเรียกชื่อตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่นี้จะเรียกชื่อตามไดอิเล็กทริกที่ใช้ เช่น ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์กึ่งกลาง ชนิดเซรามิก ชนิดไมก้า เป็นต้น ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่มีใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปมีดังนี้คือ

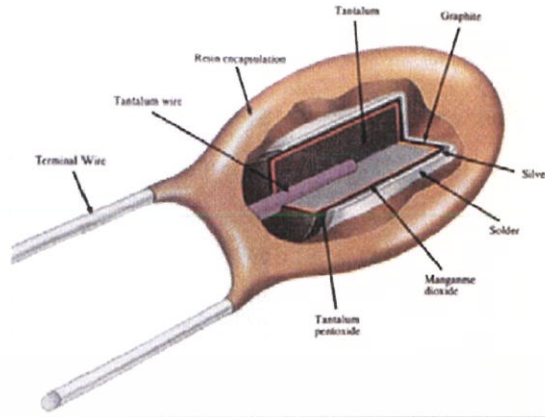
(1) ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte Capacitor) เป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะให้ค่าความจุสูง มีขั้วบวกลบ เวลาใช้งานต้องติดตั้งให้ถูกขั้ว โครงสร้างภายในคล้ายกับแบตเตอรี่ นิยมใช้กับงานความถี่ต่ำหรือใช้สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง มีข้อเสียคือกระแสรั่วไหล และความผิดพลาดสูงมาก



ภาพที่ 2.4 แสดงตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ [6]

(2) ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์ (Tantalum Electrolyte Capacitor) ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ต้องการความผิดพลาดน้อย และใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ มักจะใช้ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์ แทนชนิดอิเล็กโทรไลต์ธรรมดา เพราะให้ค่าความจุสูงเช่นกัน โครงสร้างภายในประกอบด้วยแผ่นตัวนำ ทำมาจากสารแทนทาลัม และแทนทาลัมเปอร์ออกไซด์อีกแผ่น นอกจากนี้ยังมีแมงกานีสไดออกไซด์ เงิน และเคลือบด้วยเรซิน ดังภาพที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.5 แสดงตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์ [7]

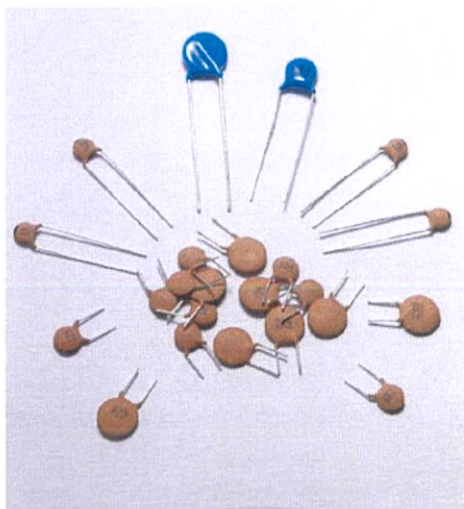
(3) ตัวเก็บประจุชนิดไบโพลาร์ (Bipolar Capacitor) นิยมใช้กันมากในวงจรภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องขยายเสียง เป็นตัวเก็บประจุจำพวกเดียวกับ ชนิดอิเล็กโทรไลต์ แต่ไม่มีขั้วบวกลบ บางครั้งเรียกสั้น ๆ ว่าไบแคป



ภาพที่ 2.6 แสดงตัวเก็บประจุชนิดไบโพลาร์ [8]

(4) ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก (Ceramic Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าไม่เกิน 1 ไมโครฟารัด (mF) นิยมใช้กันทั่วไปเพราะมีราคาถูก เหมาะสำหรับวงจรประเภทถ่ายทอดสัญญาณ (coupling) ความถี่วิทยุ ข้อเสียของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกคือมีการสูญเสียมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 แสดงตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก [9]

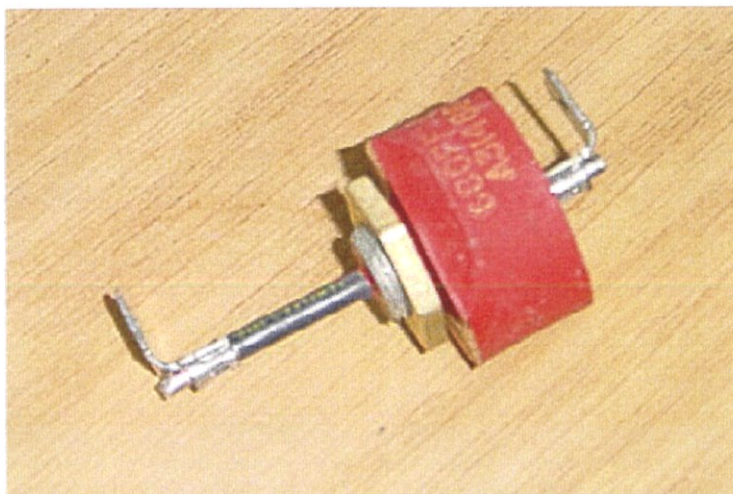
(5) ตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ (Mylar Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่ามากกว่า 1 ไมโครฟารัด (mF) เพราะฉะนั้นในงานบางอย่างจะใช้ไมลาร์แทนเซรามิก เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและการรั่วไหลของกระแสต่ำกว่าชนิดเซรามิก เหมาะสำหรับวงจรกรองความถี่สูง วงจรภาคโอเอฟของวิทยุ โทรทัศน์ ตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์จะมีตัวถังที่ใหญ่กว่าเซรามิกในอัตราทนแรงดันที่เท่ากัน



ภาพที่ 2.8 แสดงตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ [10]

(6) ตัวเก็บประจุชนิดฟีดทรู (Feed-through Capacitor) ลักษณะโครงสร้างเป็นตัวถังทรงกลมมีขาใช้งานหนึ่งหรือสองขา ใช้ในการกรองความถี่รบกวนที่เกิดจากเครื่องยนต์มักใช้ในวิทยุรถยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 แสดงตัวเก็บประจุชนิดพิดทรู [11]

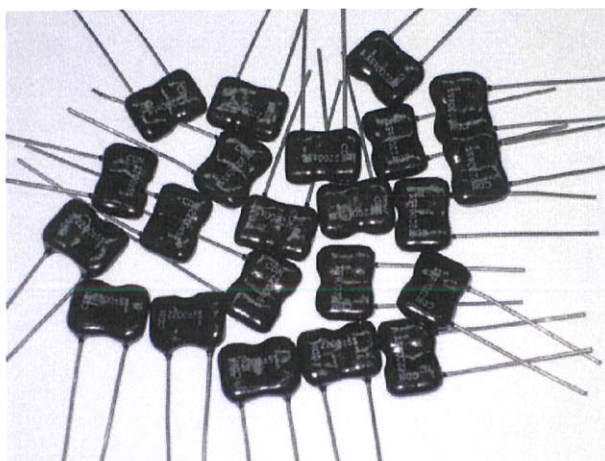
(7) ตัวเก็บประจุชนิดโพลีสไตรีน (Polystyrene Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าน้อยระดับนาโนฟารัด (nF) มีข้อดีคือให้ค่าการสูญเสียและกระแสรั่วไหลน้อยมาก นิยมใช้ในงานถ่ายทอดสัญญาณ (coupling) ความถี่วิทยุและวงจรจูนที่ต้องการความละเอียดสูง จัดเป็นตัวเก็บประจุระดับเกรดเอ



ภาพที่ 2.10 แสดงตัวเก็บประจุชนิดโพลีสไตรีน [12]

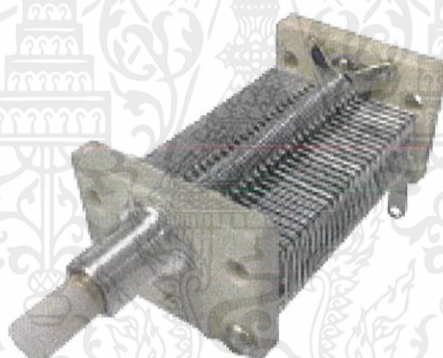
(8) ตัวเก็บประจุชนิดซิลเวอร์ไมก้า (Silver Mica Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่า 10 พิโกฟารัด (pF) ถึง 10 นาโนฟารัด (nF) เปรอร์เซนต์ความผิดพลาดน้อย นิยมใช้กับวงจรความถี่สูง จัดเป็นตัวเก็บประจุระดับเกรดเอ อีกชนิดหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 แสดงตัวเก็บประจุชนิดซิลเวอร์ไมก้า [13]

2.1.3.2) ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor) ค่าการเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน โครงสร้างภายในประกอบด้วย แผ่นโลหะ 2 แผ่นหรือมากกว่าวางใกล้กัน แผ่นหนึ่งจะอยู่กับที่ส่วนอีกแผ่นหนึ่งจะเคลื่อนที่ได้ ไดอิเล็กทริกที่ใช้มีหลายชนิดด้วยกันคือ อากาศ ไมก้า เซรามิก และพลาสติก เป็นต้น

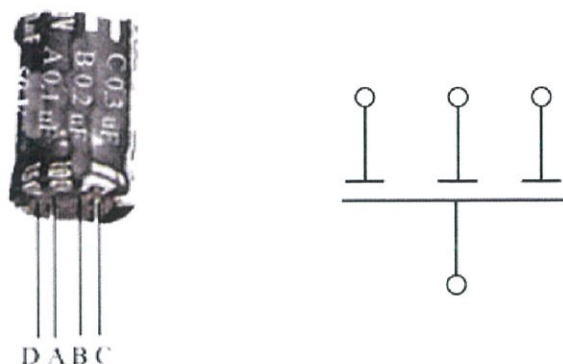


ภาพที่ 2.12 แสดงตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ [14]

ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้อีกชนิดหนึ่งที่เป็นที่รู้จักกันดีคือ ทริมเมอร์และแพดเดอร์ (Trimmer and Padder) โครงสร้างภายในประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 แผ่นวางขนานกัน ในกรณีที่ต้องการปรับค่าความจุให้ใช้ไขควงหมุนสลักตรงกลางค่าที่ปรับจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 พิโกฟารัด (pF) ถึง 20 พิโกฟารัด (pF) การเรียกชื่อตัวเก็บประจุแบบนี้ว่าทริมเมอร์หรือแพดเดอร์นั้นขึ้นอยู่กับว่าจะนำไปต่อในลักษณะใด ถ้านำไปต่อขนานกับตัวเก็บประจุตัวอื่นจะเรียกว่า ทริมเมอร์ แต่ถ้านำไปต่ออนุกรมจะเรียกว่า แพดเดอร์

2.1.3.3) ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้ (Select Capacitor) คือตัวเก็บประจุในตัวถังเดียว แต่มีค่าให้เลือกใช้งานมากกว่าหนึ่งค่าดังแสดงในภาพที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



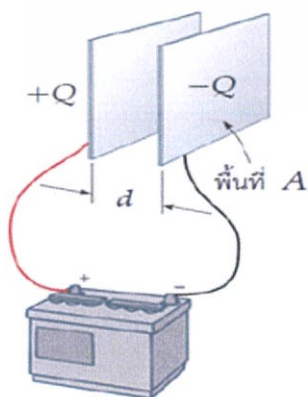
ภาพที่ 2.13 แสดงตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้ [15]

2.1.4 หน่วยความจุของตัวเก็บประจุ

ค่าความจุของตัวเก็บประจุ หมายถึง ความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็นฟารัด (Farad) เขียนแทนด้วยอักษรภาษาอังกฤษตัวเอฟ (F) ตัวเก็บประจุที่มีความสามารถในการเก็บประจุได้ 1 ฟารัด หมายถึงเมื่อป้อนแรงเคลื่อนจำนวน 1 โวลต์ จ่ายกระแส 1 แอมแปร์ ในเวลา 1 นาที ให้กับแผ่นเพลททั้งสอง สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ 1 คูโลมบ์ ในงานไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์จะไม่ค่อยนิยมใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่ามากเป็นฟารัด เพราะฉะนั้นค่าของตัวเก็บประจุที่พบในวงจรต่าง ๆ จึงมีค่าเพียงไมโคร นาโน และพิโกฟารัด ค่าต่าง ๆ สามารถแสดงค่าได้ดังนี้

1 ฟารัด	เท่ากับ 1,000,000	ไมโครฟารัด
1 ไมโครฟารัด	เท่ากับ 1,000	นาโนฟารัด
1 นาโนฟารัด	เท่ากับ 1,000	พิโกฟารัด

จากความสัมพันธ์ของค่าการเก็บประจุ ประจุไฟฟ้าและแรงดัน จะบอกถึงความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน ตัวเก็บประจุประกอบด้วยแผ่นตัวนำทั้งสองแผ่นวางขนานกันอยู่ห่างกันเล็กน้อยเป็นระยะ d ถ้าพื้นที่ของแผ่นขนานมากค่าความจุจะยิ่งมาก และจะได้สมการดังนี้



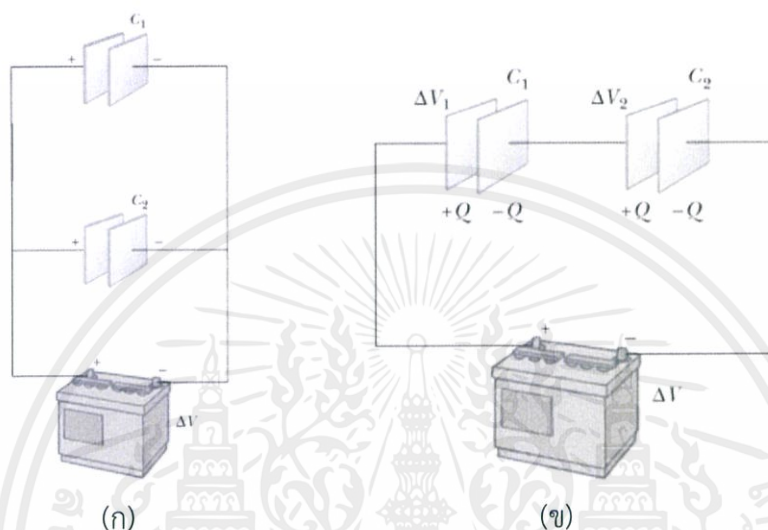
$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.2)$$

โดยที่ C คือ ค่าการเก็บประจุ (ฟารัด)
 Q คือ ประจุไฟฟ้า (คูโลมบ์)
 V คือ แรงดัน (โวลต์)

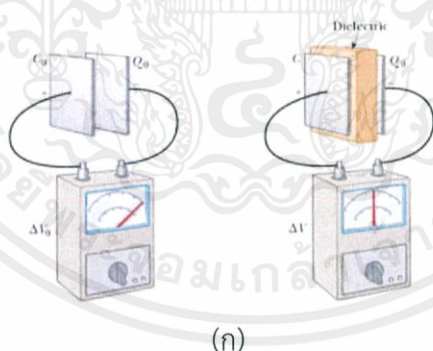
ภาพที่ 2.14 แสดงตัวเก็บประจุแบบขนาน และสมการความสัมพันธ์ [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

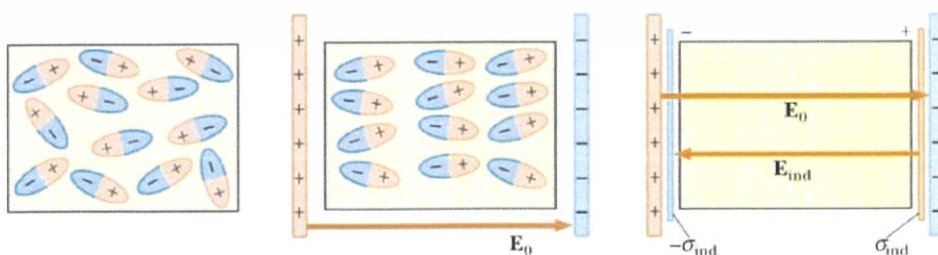
ซึ่งตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานมีการต่อวงจร 2 แบบด้วยกันคือ การต่อแบบขนาน และการต่อแบบอนุกรม ซึ่งก็จะให้ค่าความจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป (ดังภาพที่ 2.15) ซึ่งเมื่อนำสารไดอิเล็กทริกไปใส่ไว้ระหว่างแผ่นขนาน ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นจะมีค่าลดลง เนื่องจากการเรียงตัวของคู่ควบไฟฟ้าในเนื้อสารมีการจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีทิศตรงข้าม ด้วยเหตุนี้ทำให้สามารถอัดประจุเพิ่มได้อีก และจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก



ภาพที่ 2.15 (ก) แสดงการต่อตัวประจุแบบขนาน และ(ข) แสดงการต่อประจุแบบอนุกรม [17]



(ก)



(ข)

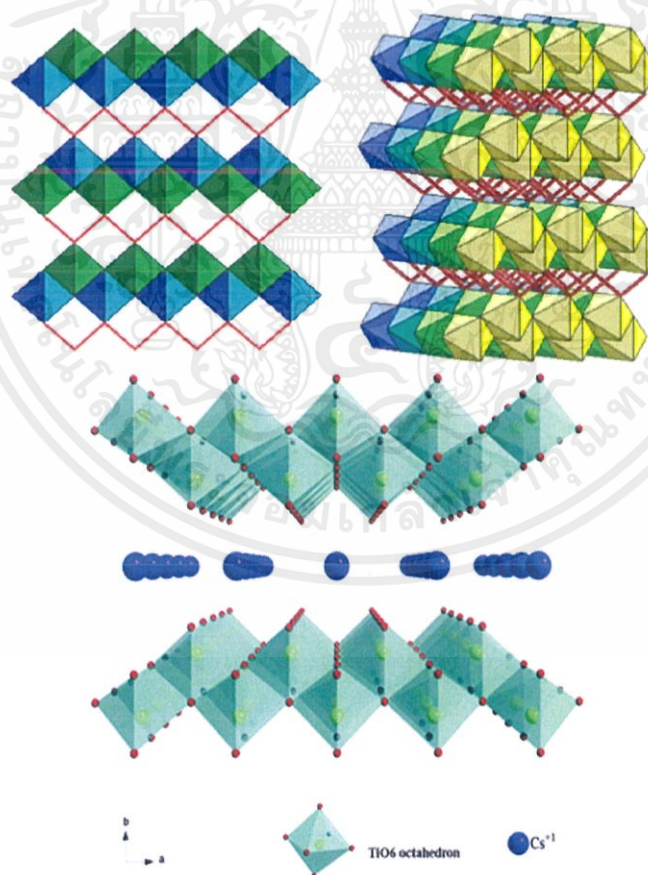
ภาพที่ 2.16 (ก) แสดงค่าความต่างศักย์ที่ลดลงเมื่อมีสารไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างแผ่นขนาน และ (ข) แสดงลักษณะจุลภาคของสารไดอิเล็กทริกที่อยู่ระหว่างแผ่นขนาน [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้น (Layered Titanate)

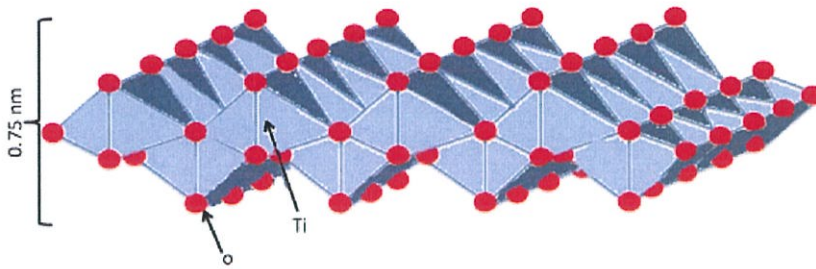
2.2.1 แผ่นนาโนไททาเนต (titanate nanosheet)

ไททาเนต หรือ แผ่นนาโนไททาเนต มีโครงสร้างเป็นแบบเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) (ภาพที่ 2.17) และมีลักษณะขอบเชื่อมต่อของหน่วยไททาเนต (TiO_6) ออกตะฮีดรัล (octahedral) ที่เป็นโครงสร้างผลึกแบบ 2 มิติ โดยมีสูตรทางเคมีคือ $A_7\text{Ti}_{2-x/4}\square_{x/4}\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($x \sim 0.7$) แผ่นนาโนไททาเนต จะมีความหนาของโมเลกุล และมีมิติระนาบที่เป็นอนันต์ มักจะเกิดจากเฟสของเหลวที่สกัดได้จาก โปรโทนิคไททาเนต (protonic titanate) ซึ่งเป็นวัสดุแบบชั้นที่สังเคราะห์มาจาก สารอนินทรีย์ แต่ละชั้นจะมีแรงดึงดูดแบบอ่อนๆ ที่ตรงกลางระหว่างชั้น ถ้าเพิ่มแรงकुลอมป์ในกระบวนการสกัด แต่ละชั้นจะมีขั้วที่ตรงข้ามกัน ซึ่งชั้นของวัสดุสามารถแยกออกจากกันได้ ด้วยวิธีการใส่สารประกอบคอลลอยด์เพียงชั้นเดียว ซึ่งใน 1 ชั้น สารละลายจะมีพลังงานการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่าพลังงานที่กระทำระหว่าง 2 ชั้น ในการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ได้ข้อมูลว่า แผ่นไททาเนต เป็นโมเลกุลขนาดแมคโคร (macromolecules) ด้วยสารละลายที่เพียงพอระหว่างชั้น ทำให้แผ่นไททาเนตสามารถประพฤติตัวเป็นโครงสร้างแบบชั้นได้

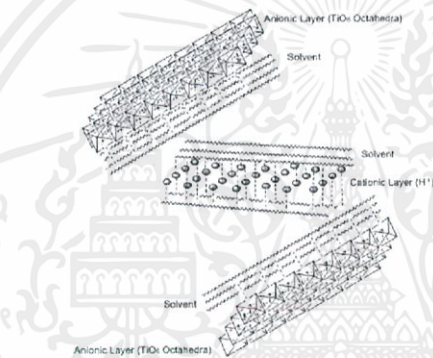
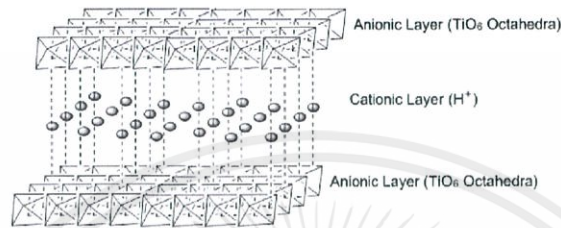


ภาพที่ 2.17 แสดงลักษณะโครงสร้างของเลพิโดโครไซต์ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.18 แสดงแผ่นนาโนไททาเนต [20]



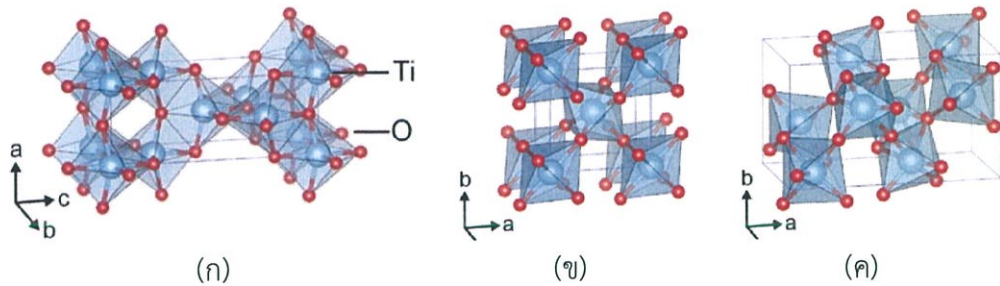
ภาพที่ 2.19 แสดงช่องว่างระหว่างชั้นที่มีไอออน [21]

2.2.2 ไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้นในระดับนาโน (layered titanate nanomaterial)

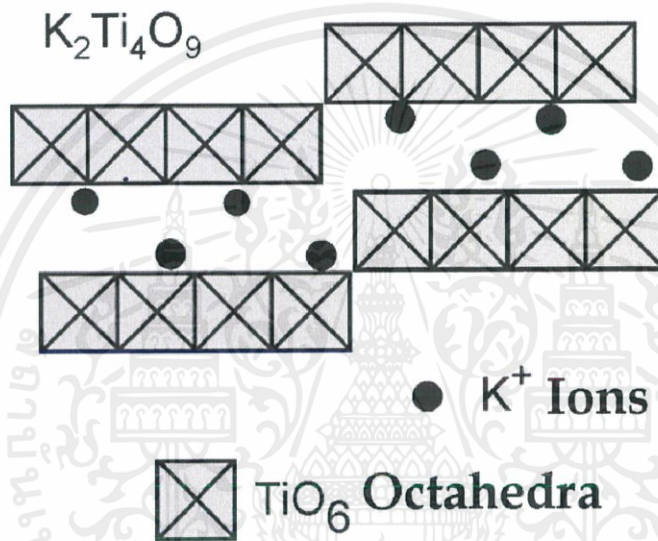
ในส่วนนี้จะแนะนำวัสดุนาโนแบบชั้นของไททาเนต โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างและสมบัติพื้นฐาน

2.2.2.1 เฟสไททาเนีย

ในธรรมชาติไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จะมีโครงสร้าง 3 แบบด้วยกันคือ แบบอนาเทส มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (tetragonal) แบบรูไทล์ มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) และแบบบรูคไคท์ มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธฮอมบิก (orthorhombic) นอกจากนี้ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ยังมีโครงสร้างมากกว่า 3 แบบ ซึ่งจะอยู่ในรูปของ $\text{TiO}_2(\text{B})$ (ภาพที่ 2.21) $\text{TiO}_2(\text{H})$ และ $\text{TiO}_2(\text{R})$ โครงสร้างทั้ง 5 เฟสนี้เกิดขึ้นได้ในความดันบรรยากาศที่สูงเท่านั้น ซึ่งไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นวัสดุนาโนที่พบมากที่สุดในแต่ละวัน และมักจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปอนุภาคนาโน แบบไอโซทรอปิก (isotropic) โดยจะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับ โฟโตแคตาไลซิส (photocatalysis) โฟโตโวลตาอิก (photovoltaics) การเคลือบ (coating) และตัวตรวจจับ (sensors) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.20 แสดงโครงสร้าง (ก) อนาเทส (ข) รูไทล์ และ(ค) บรูคโคท์ [22]



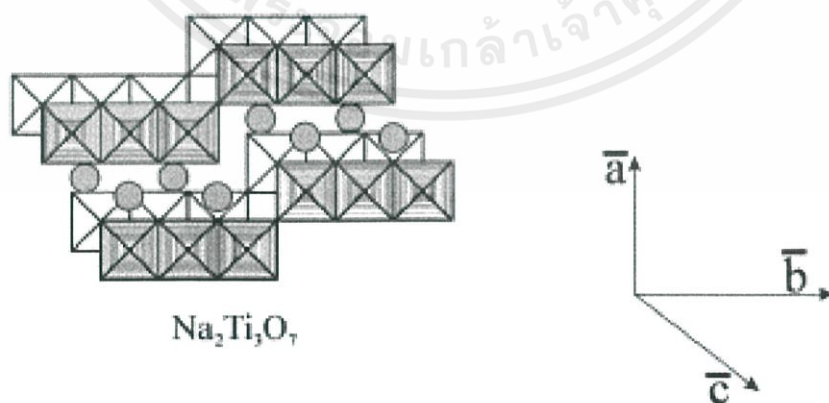
ภาพที่ 2.21 แสดงโครงสร้างแบบชั้นของโพแทสเซียมเตตระไททานเนต หรือ $\text{TiO}_2(\text{B})$ [23]

ถ้าไม่คำนึงถึงโครงสร้างผลึกที่แน่นอน ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารที่สำคัญที่ทำให้ความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ระหว่าง ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และไททานเนต ซึ่งจะเป็นไอออนิกผสม 70 เปอร์เซ็นต์ ต่อ พันธะโควาเลนต์ 30 เปอร์เซ็นต์ (ionic 70% : covalent 30%) และมีช่องว่าง (band gap) สารกึ่งตัวนำเป็นแบบอ้อม (indirect) โดยมีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นเพียงเล็กน้อย และมีสัดส่วน Ti : O คือ 1:2 (แม้ว่าออกซิเจนจะเป็นธาตุที่หาได้ง่ายก็ตาม) ในขณะที่ไททานเนตเป็นเกลือของ กรดโพลีไททานิก (polytitanic acids) คุณสมบัติของไททานเนตมีประจุเป็นลบ และโครงสร้างหลักจะประกอบไปด้วยหน่วย ไททานเนต (TiO_6) ออกตะฮีดรัล (octahedral) มีการเชื่อมต่อกันระวางขอบ หรือระนาบ มีช่องว่างที่กว้าง และโครงสร้างหลักให้ออกไซด์ (anions) นั้นสามารถแลกเปลี่ยนโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน และอัตราส่วนของไททานเนต ต่อ ออกซิเจน (Ti:O) ก็สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับสภาพเงื่อนไขของการรวมตัวกัน

ไททานเนตที่โดดเด่นที่สุดคือ เพอร์รอฟสไกต์ (perovskites) และวัสดุไททานเนต ซึ่งเพอร์รอฟสไกต์ คือผลึกที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับ แคลเซียมไททานเนต (CaTiO_3) แบบเรียงไททานเนต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(BaTiO₃) และเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) หรือ PZT (Pb[Zr_xTi_{1-x}]₂O₇) ซึ่งแคลเซียมไททาเนต (CaTiO₃) จะมีโครงสร้างแบบ ABX₃ โดยที่ A และ B คือไอออนบวก (ซึ่งไอออนของ A ใหญ่กว่า ไอออนของ B) และ X คือ ไอออนลบ ที่สำคัญในทางอุตสาหกรรมได้ใช้เพอร์รอฟสไกต์กันอย่างแพร่หลาย เพราะมีสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric) และที่โดดเด่นอีกอย่างหนึ่งก็คือไททาเนตแบบชั้น เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างชั้นบางๆ ซึ่งให้ค่าแอนไอโซโทรปิก (anisotropic) ที่สูงมากด้วยเหตุนี้ จึงสนใจ ไททาเนตแบบชั้น และศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องถึง ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) และไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้น

สูตรสมการทางเคมีโดยทั่วไปของไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้น คือ M_{2n}Ti_mO_{2m+n}·H₂O โดยที่ M เป็นประจุบวก ชนิดไอออนอัลคาไลด์ (alkali ion) (Na⁺ หรือ K⁺) หลังจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) H⁺ จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งหลังจากการทำมาสะอาดแล้ว จะทำให้ได้ผลเป็นประจุบวกทั้งหมด ด้วยเหตุนี้ไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้น ถือว่าเป็นไททาเนตที่ดีที่สุดในบรรดาที่มาจากเกลือ ของกรดโพลีไททานิก (polytitanic acids) ตัวอย่างเกลือ ของกรดโพลีไททานิก เช่น โซเดียมไตรไททาเนต (Na₂Ti₃O₇) (ภาพที่ 2.22) กรดเตตระไททานิก (H₂Ti₄O₉) และโพแทสเซียมเพนตะไททาเนต (K₂Ti₅O₁₁) โครงสร้างเหล่านี้เป็นโครงสร้างแบบโมโนคลินิก (monoclinic) ตัวอย่างที่กล่าวไปข้างต้นนั้นจะมีลักษณะที่เหมือนกันคือ (1) แผ่นจะมีการเชื่อมต่อกันที่ขอบระหว่างชั้นของหน่วยไททาเนต (TiO₆) โครงสร้างแบบออกตะฮีดรัล (octahedral) และ (2) ชั้นแต่ละชั้นจะมีลักษณะที่คล้ายกันมาก ซึ่งการวัดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ได้ระบุไว้อย่างชัดเจนว่ามีโครงสร้างอื่นเพิ่มมา คือ กรดไททานิก (H₂Ti₂O₄) และเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) H_xTi_{2-x/4}[]_{x/4}O₄(OH)₂ โดยที่ [] คือ ตำแหน่งช่องว่าง โครงสร้างทั่วไปที่กล่าวมานี้เป็นโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ที่มีการสร้างระนาบซึ่งประกอบด้วยหน่วยไททาเนต (TiO₆) ออกตะฮีดรัล (octahedral) ที่เชื่อมกันทางขอบและประกอบขึ้นเป็นแผ่น (sheets) ต่อเนื่องเรื่อยๆ



ภาพที่ 2.22 แสดงโครงสร้างแบบชั้นของโซเดียมไตรไททาเนต (Na₂Ti₃O₇) [24]

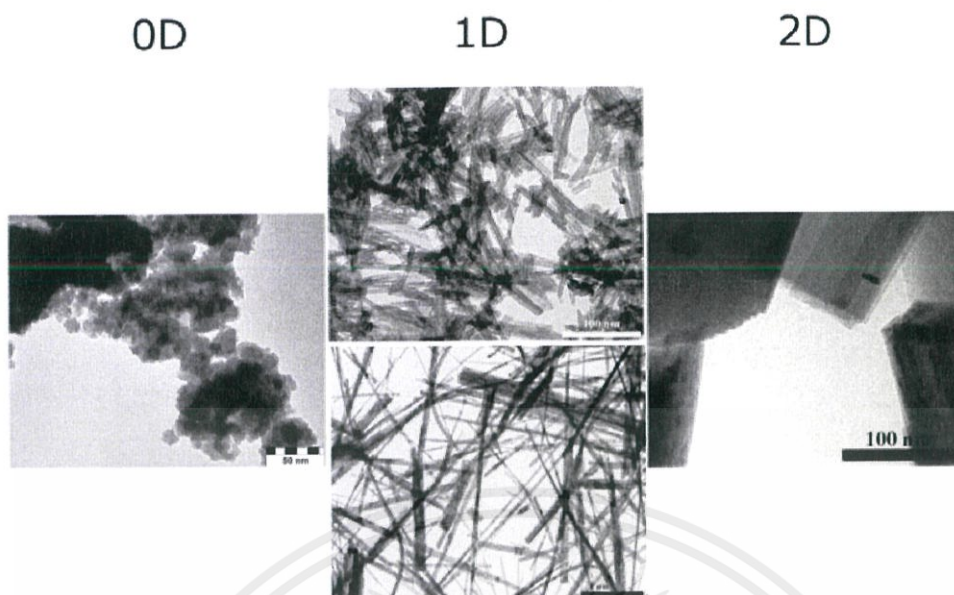
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2) ไททานเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้น และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

โครงสร้างผลึกที่แน่นอนของวิสคานาโนไททานเนต ได้ถูกนำมาทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ได้ข้อมูลว่า เมื่อทำการขยายภาพการตรวจวัด ก็พบว่าอนุภาคมีขนาดเล็กมาก และผลการตรวจวัดนี้ได้คล้ายคลึงกับ ภาพการตรวจวัด XRD ของไททานเนตที่ต่างชนิดกัน เช่น ไตรไททานเนต (tritanate) เพนตะไททานเนต (pentatitanate) โนนะไททานเนต (nonatitanate) และเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) ซึ่งวิสคานาโนไททานเนตได้มีดัชนีที่แม่นยำและใกล้เคียงกัน ทำให้การระบุเฟส และโครงสร้างผลึกทำได้ยาก ยิ่งไปกว่านั้นคือไททานเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้นสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างอื่นได้ทันที และเปรียบเสมือนเป็นวัสดุเริ่มแรกที่สามารถให้ค่าที่สภาวะเมทาสเตเบิล (metastable state) ที่หลากหลาย ผลิตภัณฑ์จะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อให้ความร้อน (thermal annealing) โดยอัตราการควบคุมอุณหภูมิขึ้นอยู่กับไอออนบวกของวัสดุเริ่มแรก และเวลาทั้งหมดที่ให้ความร้อน รวมถึงอุณหภูมิ

แม้สิ่งเหล่านี้จะน่าสงสัย แต่มันคือวัสดุเริ่มแรกที่จะทำการสังเคราะห์อัลคาไลด์ไฮโดรเทอร์มอล (alkaline hydrothermal) ปฏิกริยานี้จะทำให้ได้ไททานเนตที่มีโครงสร้างนาโนแบบชั้น ซึ่งวัสดุที่คาดว่าสามารถสังเคราะห์ได้โครงสร้างที่ดีคือ โซเดียมไตรไททานเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) โครงสร้างนี้ส่วนใหญ่จะเก็บรักษาด้วยการทำความสะอาดที่ค่าพีเอช (pH) ที่เป็นกลาง ภายหลังได้เก็บรักษาด้วยกระบวนการทางเคมี (chemical treatment) หรือจะเก็บได้เป็นเวลานานเมื่อผสมเฟสของไททานเนต

โครงสร้างแบบชั้นของกรดเมทาไททานิก (metatitanic acids) เป็นอนุภาคนาโนที่มีรูปร่าง 0 1 และ 2 มิติ ซึ่งลักษณะรูปร่างได้แสดงไว้ (ภาพที่ 2.23) มี 2 รูปร่างที่สำคัญคือ (1) ไททานเนตที่มีรูปร่าง 1 มิติ ก็คือ ท่อนาโน (nanotubes) และลวดนาโน (nanowires) ซึ่งท่อนาโนคล้ายกับพรมที่มีม้วนขึ้นไป มีความยาวประมาณ 50-200 นาโนเมตร ภายในมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4-8 นาโนเมตร และภายนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8-15 นาโนเมตร ซึ่งประกอบด้วยผนังที่ซ้อนทับกันประมาณ 4-7 ชั้น แต่ละชั้นห่างกันประมาณ 1 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับโซเดียมไตรไททานเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) ที่มีระยะห่างของชั้นประมาณ 0.96 นาโนเมตร ที่ระนาบ (100) และลักษณะสัณฐานวิทยาอันที่ (2) ความแตกต่างกันระหว่าง ท่อนาโนไททานเนต (titanate nanotubes) และเป็นที่ยอมรับกันว่า ท่อนาโนที่มีผนังที่มากก็คือ ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) นั่นคือ (i) ส่วนที่ตัดขวาง จะมีลักษณะเป็นเกลียวหมุน (ii) ช่องภายในของท่อนาโนไททานเนต สามารถเข้าถึงได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ ท่อนาโนคาร์บอนมีแท่งฟูลเลอร์รีน (fullerene) ปิดครึ่งหนึ่งไว้ และยังมีลวดนาโนไททานเนต (titanate nanowires) ที่เกิดขึ้นระหว่างการเตรียม โซเดียมไตรไททานเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) จัดเตรียมไว้เป็นแบบแผ่นที่มีความยาว 300-1500 นาโนเมตร ความหนา 30-60 นาโนเมตร โครงสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตัดขวาง และช่องภายในมีลักษณะกลวง



ภาพที่ 2.23 แสดงลักษณะรูปร่างสัณฐานวิทยาของไททาเนตแบบชั้น [25]

ในการเพิ่มรูปร่างที่มีอิทธิพลเหล่านี้แล้ว นอกจากนี้ไททาเนตที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร ยังมีข้อสังเกตอีกมากมาย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างแบบแผ่นระดับนาโน (nanosheet based structures) ที่คล้ายคลึงกับดอกไม้ หรือแผ่นบางมากๆ ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นอนุภาคที่มีรูปร่างสัณฐานวิทยาที่เหมือนกัน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-30 นาโนเมตร และมุ่งเน้นให้เป็นโครงสร้างแบบเกลียว และโครงสร้างทรงสี่เหลี่ยม

2.2.2.3) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไททาเนตที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร

ตามธรรมชาติแล้วเฟสสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพแวดล้อม เฟสจะเปลี่ยนแปลงได้เร็วขึ้นเมื่อมีความชื้น และมีค่าพีเอช (pH) ในบรรยากาศ เพราะไททาเนตไม่สามารถทนต่อกรดได้ Sui และคณะ [26] แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีค่าพีเอช (pH) ของเฟสไฮโดรเจนไททาเนต ($H_2Ti_2O_5$) จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเรื่อยๆ ซึ่งมีผลมาจากการกระจายตัวของไททาเนตที่ผสมในท่อนาโน (titania composite nanotubes) และสมบัติของอิเล็กโทรแคทาไลติก (electrocatalytic) ที่มีอนุภาคนาโนแพลทินัม (Pt nanoparticles) กระจายตัวบนไททาเนตที่มีโครงสร้างระดับนาโน ซึ่งการทนต่อกรดสามารถเปลี่ยนแปลงให้ดีขึ้นได้ โดยการทำให้มีการแลกเปลี่ยนไอออนของเหล็ก ตามหลักการของ Marinkovic และคณะ [27] การสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermally) ท่อนาโนไททาเนตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยธรรมชาติของตัวมันเอง โดยเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแบบโรมบิก (rhombic) และมีรูปร่างหมุนบิดแบบ อนุนาทิส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคนาโนเกิดจากการใช้ของไหลยิ่งยวด (supercritical water) ในการสกัดเป็นเวลา 10 นาที Mao และ Wong [28] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นถึงท่อนาโนไททาเนตเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) ไททาเนต(titanate) ท่อนาโน (nanotubes) และลวดนาโน (nanowires) สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นอนุภาคนาโนแบบอนาเทส ในระบบสารละลายที่บริสุทธิ์ได้ตามลำดับ

ไททาเนตที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร และยังมีกระบวนการที่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้อีกมากมาย ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยการให้ความร้อน (thermal treatment) จะทำให้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ $\text{TiO}_2(\text{B})$ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นแบบ อนาเทส เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นแบบรูโพล์ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส Kuo และคณะ [29] กล่าวว่า ไตรไททาเนต (tritanate) ของ $\text{TiO}_2(\text{B})$ จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งข้อมูลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตรวจสอบโดย Morgado และคณะ [30] ช่องภายในแบบเปิดของท่อนาโน ต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แล้วโครงสร้างจะค่อยๆยุบลงเป็นลวดนาโน (nanowires) ลวดนาโน สามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงถึง 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่มีการสูญเสียการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของเส้นใย จึงมีความน่าสนใจที่จะทราบถึงเฟสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งมีผลอย่างมากถ้ามีการเปลี่ยนแปลงไอออนที่นำมาเจือบริเวณชั้นโครงสร้าง ก็ทำให้รู้ว่าอนุภาคนาโนเป็นวัสดุเริ่มต้นของชั้นไททาเนต Beuvier และคณะ [31] ได้สร้างแผนภาพแสดงลักษณะสัมพันธ์สามส่วน (ternary) ได้สรุปสัดส่วนและความสัมพันธ์ของท่อนาโน (nanotubes) อนุภาคนาโนที่เป็นทรงกลม (nanospheres) และสายริบบิ้นนาโน (nanoribbons) โดยการให้ความร้อนในรูปแบบไฮโดรเจนไตรไททาเนต (H Trititanate)

การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และระยะเวลาให้ละเอียดขึ้น ในกระบวนการสังเคราะห์อัลคาไลด์ไฮโดรเทอร์มัล (alkaline hydrothermal) ซึ่งสามารถหยุดกระบวนการได้เมื่อความเข้มข้นของท่อนาโนไททาเนต (titanate nanotubes) มีค่าสูงสุด หรือปล่อยให้ระบบทำงานต่อ และปล่อยให้โครงสร้างเกิดการผสากันจนกลายเป็น ลวดนาโนไททาเนต (titanate nanowire) ได้เองโดยตามธรรมชาติ Bavykin และคณะ [32] ได้แสดงลักษณะทางสัมพันธ์ของลวดนาโน (nanowires) ที่มีความเสถียรที่สุด ภายใต้เงื่อนไขวิธีการทดลองเหล่านี้ : ระบบได้รับเกรน (gains) ประมาณ 20 กิโลจูล/โมล ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) โดยการพัฒนาลวดนาโน (nanowires) ท่อนาโน (nanotubes) สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นแบบ อนาเทส ได้โดยตรง หรือเป็นอนุภาคนาโนแบบ รูโพล์ เมื่อนำมาสัมผัสกับกรดบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ยาวนานหลายเดือน ที่จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เมื่อทำการทดสอบโดย หลักการอัลตราโซนิก (ultrasonic) หรือเมคคาโนเคมีคอล (mechanochemical) ท่อนาโนไททาเนต (titanate nanotube) จะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานแค่ช่วงแรก และเส้นจะสั้นลง และนี่คือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นแผ่นนาโนไททาเนต (titanate nanosheets) แล้วให้พลังงานไอโซโทรปิก (isotropic) เข้าไปก็จะกลายเป็นอนาเทส และสุดท้ายก็จะกลายเป็นอนุภาคนาโนแบบรูโพล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าท่อนาโนไททาเนต (titanate nanotubes) จะชอบระบบเทอร์โมไดนามิก (thermodynamically) มากกว่า ท่อนาโน (nanotubes) ยังเป็นไปได้ที่จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ ลวดนาโน (nanowires) ให้กลายเป็น ท่อนาโน (nanotubes) โดยสภาวะที่ไม่สมดุลของระบบ Kozma และคณะ [33] มีการสาธิตทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างรอบคอบ ของกระบวนการพิเศษทาง เมคคาโนเคมีคอล (mechnochemical) (พลังงานสะสม 11 มิลลิจูล/ฮิต ($\text{mJ}\cdot\text{hit}^{-1}$), 892 จูล/กรัม ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$) ในกรณีแผ่นนาโนไททาเนต (titanate nanosheets) มีพลังงานที่สูงก็คือ ลวดนาโนมีความบาง เมื่อทดสอบจากการกระทบของลูกบอล จะมีการเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นแบบนาเทส และแบบรูทล์ ได้ยาก ซึ่งระบบจะหมดไปในระดับพลังงานที่สูง ที่สถานะเมทาสเตเบิล (metastable state) แล้วจะมีความเสถียร พลังงานก็จะมีค่าที่น้อยแผ่นนาโน (nanosheets) ก็จะหมุนกลายเป็นท่อนาโน (nanowires)

ท่อนาโน (nanowires) เปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นแผ่นนาโน ด้วยกระบวนการอื่น เช่น อัลตราโซนิค (ultrasonication) หรือการรักษาด้วยกรด (acid treatment) แผ่นนาโนไททาเนต (titania nanosheets) สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นฟิล์มบางไททาเนตไดออกไซด์ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal)

ไททาเนตสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite) ได้ โดยการต่อยอดมาจากรูปร่างฐานวิทยาแบบ 1 มิติ โดยแบบการใช้สารตั้งต้น Ca- Sr- และ Ba- ไททาเนตที่มีโครงสร้างระดับไมโครเมตร สรุปลงงานโดย Li และคณะ [34] ไททาเนตทำจากโซเดียมไตรไททาเนต และ เส้นใยนาโน (nanofibers) และ Cao และคณะ [35] ทำไททาเนตจาก โพแทสเซียมไตรไททาเนต (potassium tetratitanate) เส้นใยบางๆนาโน (nanowhiskers)

2.2.2.4) สมบัติของวัสดุไททาเนต

วัสดุไททาเนตแบบชั้น เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์อย่างถูกวิธีจะมีลักษณะเป็นผงสีขาว ซึ่งถ้าผงมีลักษณะเปลี่ยนเป็นสีอื่นอาจเกิดจากการปนเปื้อนของโลหะ เช่น ไอออนของเหล็ก ที่ผนังของโลหะของการสังเคราะห์ท่อ หรือจะเป็นการเป่า และขาดออกซิเจน ซึ่งภายหลังสามารถเกิดขึ้นเองได้ เมื่อให้ความร้อนกับวัสดุในบรรยากาศที่ต่ำ หรือในที่เฉื่อย โดยความหนาแน่นของท่อนาโนไททาเนต (titanate nanotubes) นี้มีค่า $3.12 \text{ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (g}\cdot\text{cm}^{-3})$ สิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่าง กลุ่มก้อน (bulk) กับ ไททาเนตที่มีโครงสร้างระดับนาโน คือ ภายในของกลุ่มก้อน (bulk) ไม่สามารถเข้าถึงได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้ไม่สามารถเกิดการแยกออกเป็นชั้นๆ และก็จะไม่เกิดการเลื่อนของชั้น ความแตกต่างที่น่าสนใจอื่นๆ คือ มีพลังงานช่องว่าง (energy band gap) ระหว่างชั้นที่ลดลง มีพื้นที่ผิวเฉพาะที่เพิ่มมากขึ้น และจุดหลอมเหลวในวัสดุนาโนมีค่าลดลง ตามที่แสดงในตารางที่ 2.2 โดยที่ข้อแตกต่างระหว่างโครงสร้างแบบโมโนคลินิก (monoclinic) และ ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ไททาเนต คือ การเรียงตัวของขอบระนาบที่เชื่อมต่อกันในรูปแบบไททาเนตออกตะฮีดรัล (TiO_2 Octahedral) ตามแกน c มีการเรียงที่แตกต่างกัน เช่น ในโครงสร้างแบบโมโนคลินิก (monoclinic) เป็นการล้อมรอบประมาณ 3-4 ครั้ง จนกลายเป็นท่อนาโน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(nanotubes) ซึ่งอยู่รูปแบบของโครงสร้างแบบหน่วยออกตะฮีดรัล (octahedral units) มันคือการเชื่อมต่อแบบล้อมรอบซ้ำๆของหน่วยที่อยู่ติดกัน ในรูปแบบเส้นตรง ดังนั้นพื้นที่ผิวของโมนอคลินิกที่ล้อมรอบเป็นท่อนาโน (monoclinic nanotubes) คือ แผ่นที่ต่อกันโดยขอบจะมีการเชื่อมต่อกันไปเรื่อยๆเป็นชั้นๆ มีความแบนเรียบบริเวณพื้นที่ผิวที่เป็นโครงสร้างของ ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ซึ่งพื้นที่ผิวที่มีขอบเชื่อมต่อเป็นชั้นๆไปตามแนวแกนท่อจะมีเป็นโครงสร้างผลึกทั้ง 2 แบบ

ตารางที่ 2.2 แสดงภาพรวมสมบัติต่างๆของไททาเนตที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร

ลักษณะ และสมบัติ ต่างๆ	ท่อนาโน (Nanotube)	ลวดนาโน (Nanowire)	แผ่นนาโน (Nanosheet)
เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา ความยาว	8-15 nm หรือ มากกว่าไมโครเมตร	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 m ² /g	18-300 m ² /g	240-380 m ² /g
ยัง มอดูลัส การนำไฟฟ้า	1.5×10^{-6} - 7.9×10^{-6} J/cm	14-16 Gpa $\sim 10^{-7}$ c/m $\sim 10^{-1}$ c/m	10^{-10} Sc/m

การตรวจสอบพื้นที่ผิวเฉพาะด้วยเทคนิค (BET) ทำการตรวจสอบ ท่อนาโนไททาเนต (titanate nanotubes) มีพื้นที่ผิวประมาณ 200-300 ตารางเมตร/กรัม (m²·g⁻¹) เมื่อคำนวณจากการดูดซับที่พบไนโตรเจนมากที่สุด โดยการลากเส้นตรงผ่านจุดที่มีอุณหภูมิเท่ากันในการดูดซับของไอโซเทอม (adsorption isotherm) ซึ่งจากการวัดผลโดยสมการของ (Guggenheim-Anderson-de Borer หรือ GAB) ทำให้ได้ค่าพื้นที่ผิวประมาณ 350 ตารางเมตร/กรัม (m²·g⁻¹) แต่วิธีนี้มีแนวโน้มทำให้ค่าพื้นที่ผิวจะมากเกินไป เพราะการดูดซับมีความซับซ้อนมาก โดยที่บริเวณพื้นที่ผิวของไททาเนตมีสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic) มากกว่าการดูดซับไนโตรเจน ซึ่งจะพบว่าการคำนวณพื้นที่ผิวด้วยวิธีทางเรขาคณิต (geometrical method) จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกับเทคนิค BET การค่าที่ได้จากสมการของ GAB โดยเฉพาะพื้นที่ผิวของ ลวดนาโนไททาเนต (titanate nanowires) มีค่าที่ต่ำกว่า 50 ตารางเมตร/กรัม (m²·g⁻¹) ซึ่งค่าพื้นที่ผิวที่แม่นยำนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนรูปร่างของลวดนาโน

การหลุดออกเป็นแผ่นของชั้นโปรโทนิคไททาเนต (protonic titanate) ที่เป็นเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) แผ่นนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ แบบ 2 มิติ ซึ่งช่องว่าง (band gap) มีค่า 3.84 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) บลูชิฟ (blue shifted) เปรียบเทียบกับ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) แบบอนาเทส ช่องว่าง (band gap) มีค่า 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) เมื่อหมุนแผ่นเหล่านี้จะกลายเป็นท่อนาโน (nanotubes) ซึ่งจะมีประจุที่มากขึ้นในโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ จากการศึกษาได้ทำการทดลองโดยวัดการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี (uv-vis) พบว่า ท่อนาโนไททาเนต (titanate nanotubes) มีสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสารแวนดอลอยนี้เป็นอนุภาคของลวดนาโน ที่ช่องว่าง (band gap) มีค่า 3.87 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งข้างในของท่อนาโนเป็นช่องพลังงาน (energy band gap) ที่มีค่าเป็นกลาง

ไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้นเป็นวัสดุที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งวัสดุที่ชอบน้ำนี้สามารถถูกกรองเข้าไปเพื่อป้องกันผนังของไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้นได้ คล้ายกับแผ่นจำนวนมากของท่อคาร์บอน (carbon nanotubes bulkypaper) ที่ถูกกรองจนไม่สามารถเพิ่มได้อีก Miyachi และ Tokudome [36] ประสบความสำเร็จในการสร้างชั้นฟิล์มโปร่งใสที่มีความชอบน้ำมาก (transparent super-hydrophilic films) โดยน้ำที่สัมผัสกับแผ่นฟิล์มมีมุมสัมผัส 0 องศา ซึ่งเป็นองค์การดูดซับน้ำบนลวดนาโนไททาเนต (titanate nanowire) ภายใต้แสงอาทิตย์ ซึ่งจะมีการศึกษาอย่างละเอียดโดย Haspel และคณะ [37] ใช้เครื่องตรวจวัดแถบความถี่ไดอิเล็กทริกด้วยกระบวนการ ทรีรีแลกเซชัน (three relaxation) ค้นพบการนำไฟฟ้าที่บริเวณหน้าต่างความถี่ 10 มิลลิเฮิร์ตซ์ (mHz) – 10 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ซึ่งรูปแบบการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นได้จากการที่มีพาหะประจุที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ช่วงความถี่ระหว่างตรงกลาง มีแรงดึงดูดระหว่างผิว และมีการสูญเสียความถี่สูง เนื่องจากมีการปรับขั้วลดลงครั้งหนึ่ง

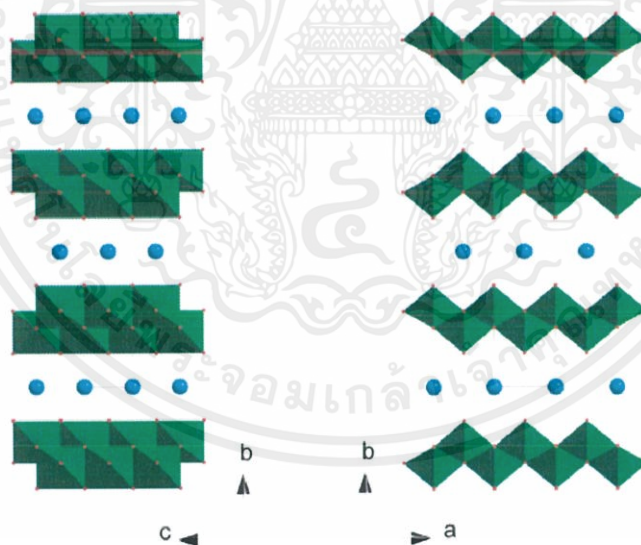
Bo และคณะ [38] ได้วัดสมบัติเชิงกลของโซเดียมลวดนาโนไตรไททาเนต (Sodium trititanate nanowires) จากการวัดผลของ ยัง มอดูลัส (Young's modulus) ของลวดนาโน $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ พบว่าเส้นลวดนาโนมีความยาวที่เป็นอิสระ และอยู่ในช่วง 21 – 45.5 กิกะปาสคาล (Gpa) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 33 ± 7 กิกะปาสคาล (Gpa) ค่าความแข็งแรงของ $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ จะอยู่ที่ 2.7 ± 0.7 กิกะปาสคาล (Gpa) ค่าที่ได้นี้เป็นผลลัพธ์ที่มีค่าดีกว่า งานของ Chang และคณะ [40] ซึ่งเขาได้วัดค่า ยัง มอดูลัส (Young's modulus) ของท่อนาโนไททาเนต อยู่ในช่วง 14-17 กิกะปาสคาล (Gpa)

ไฮโดรเจน (H) ที่รวมตัวกันเป็นรูปแบบ ท่อนาโนไททาเนต (titanate nanotubes) ด้วยกระบวนการกรดของแข็ง (solid acids) ทั้งทฤษฎีของบรอนสเตดโลว์รี (Bronsted) และตำแหน่งกรดลูอิส (Lewis acid site) Kitano และคณะ [39] ได้แสดงทฤษฎีบรอนสเตดโลว์รี (Bronsted) ความแข็งแรงกรดของ ท่อนาโนไททาเนต (titanate nanotubes) ที่มีความแข็งแรงกว่าแผ่นนาโน (nanosheets) และมีความแตกต่างกันระหว่างการบิดเบือนของแลตทิซ เนื่องจากการเลื่อนของชั้นไททาเนต ซึ่งไม่มีข้อมูลการทดสอบของพีเคเอ (pKa) ที่เป็นมาตรฐานของ ไททาเนตที่มีโครงสร้างนาโน ในงานวิจัยนี้ การไตรเตรท (tritation) เป็นวิธีที่มักใช้งานกันทั่วไปการดูดซับ เมททิลีนบลู (methylene blue) ไพริดีน (pyridine) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะตรวจวัดขนาดชนิดที่เล็กที่สุดและใหญ่ที่สุดได้ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างความเป็นกรดของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

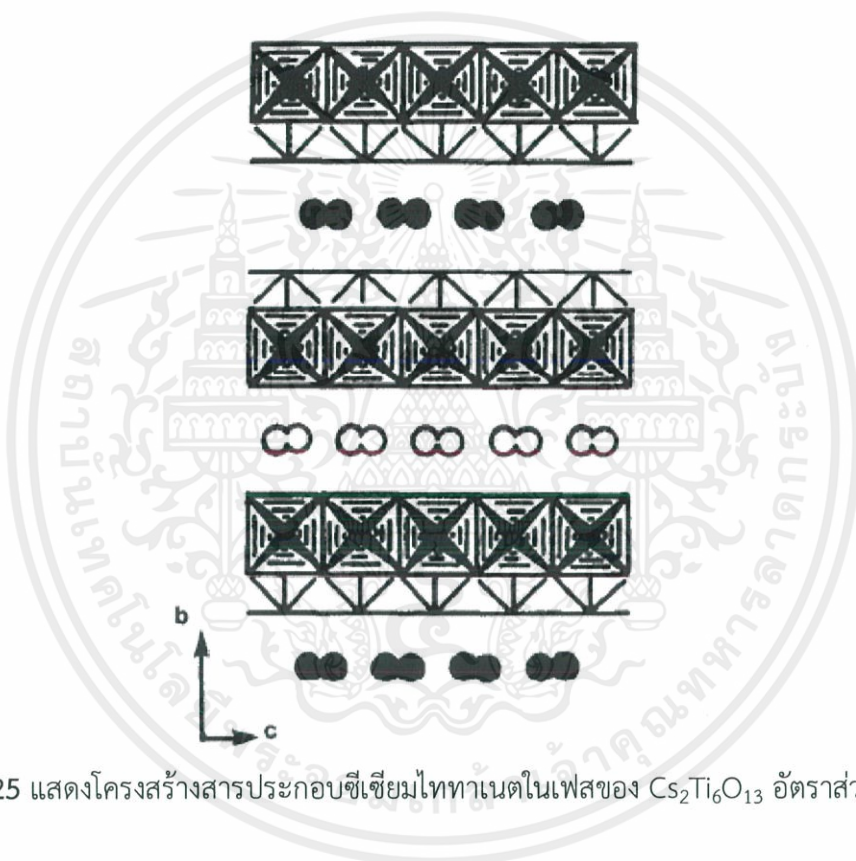
จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Tao และคณะ [40] ได้นำผงซิงค์ออกไซด์ (TiO_2) มาเจือกับไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบชั้นในระบบ $\text{Cs}_x\text{Ti}_{2-x/2}\text{Zn}_{x/2}\text{O}_4$ ($x = 0.7$) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) ซึ่งเขาได้สังเคราะห์โครงสร้างแบบชั้นด้วยเทคนิคการเผาแบบเฟสของแข็ง (solid state) เมื่อทำการสังเคราะห์เสร็จเรียบร้อยแล้วจะได้แลตทิซของอะตอมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) แต่เมื่อได้ทำการใส่สารละลายที่เป็นกรดลงไปในระบบ จะพบว่าไอออนของซีเซียมจะอยู่ระหว่างชั้น และมีการสร้างโปรตอนชนิด $\text{H}_{2x}\text{Ti}_{2-x/2}\text{O}_{4-x/2}\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เกิดขึ้น ซึ่งโปรตอนชนิดนี้จะคล้ายกับโครงสร้างแบบชั้นเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) โดยเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นนี้มีความแตกต่าง ระหว่างสารประกอบที่มีเฟสเป็นแบบไอโซมอร์ฟัส (isomorphous) และในส่วนของปริมาณโปรตอนที่สูง และมีความหนาแน่นของประจุที่สูง เป็นผลมาจากซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ไปกระจายตัวอยู่บริเวณขอบของโครงสร้าง โดยที่โปรตอนโพโทนิคไททาเนต (protonic titanate) $\text{H}_{2x}\text{Ti}_{2-x/2}\text{O}_{4-x/2}\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ สามารถแยกออกไปเป็นแผ่นโมเลกุลเดี่ยวในรูปแบบ $\text{Ti}_{1-\delta}\text{O}_2^{4\delta-}$ (โดยที่ δ คือ 0.175) ซึ่งมีความโดดเด่นของรูปร่างสี่เหลี่ยมเป็นแบบ 2 มิติ และมีความหนาที่น้อยประมาณ 1 นาโนเมตร และงานวิจัยนี้เป็นการใช้สารประกอบที่มีโครงสร้างระดับนาโน



ภาพที่ 2.24 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเลพิโดโครไซต์ (lepidocrocite) ที่มีไอออนโลหะกระจายตัวอยู่บริเวณช่องว่างของแต่ละชั้น

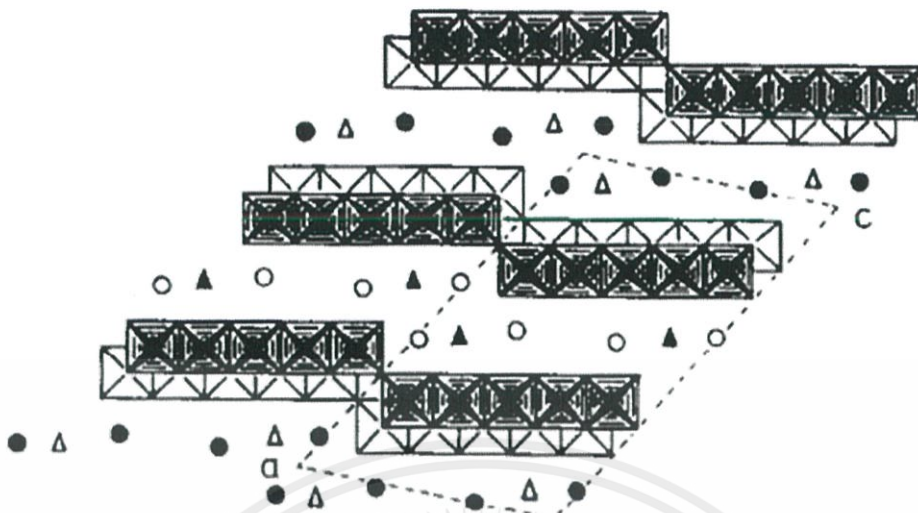
ในทำนองเดียวกัน Grey Madsen และ Watts [41] ได้ศึกษาเฟสใหม่ในระบบ $\text{Cs}_2\text{O} - \text{TiO}_2$ โดยมีการผสมของ TiO_2 ในอัตราส่วนช่วง 75-100 เปอร์เซ็นต์โมล โดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 850 - 1200 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เกิดการรวมตัวใหม่เป็นซีเซียมไททาเนต 2 รูปแบบคือ $\text{Cs}_2\text{Ti}_5\text{O}_{11}$ และ $\text{Cs}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ ซึ่ง ($\text{Cs}_2\text{O} - \text{TiO}_2$) เมื่ออยู่ที่ความชื้นและอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 200 องศา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานวิสาหรับการชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลเซียส การผสมกันจะเกิดปฏิกิริยา และรวมตัวกันเป็น $Cs_2Ti_5O_{11} \cdot (1+X)H_2O$ โดยที่ $0.5 < X < 1$ ซึ่งโครงสร้าง 3 เฟสนี้จะเกิดขึ้นเป็นแบบ 2 มิติ ที่เชื่อมต่อกันที่ขอบไปเรื่อยๆ อย่างแน่นอน แล้วพบว่าจะมีไอออนซีเซียม อยู่ระหว่างชั้นของระบบ $Cs_2Ti_6O_{13}$ แต่ในรูปแบบของ $Cs_2Ti_5O_{11}$ และ $Cs_2Ti_5O_{11} \cdot (1+X)H_2O$ ในระยะของแต่ละชั้นจะเป็นโครงสร้าง 5-octahedra ที่มีระยะที่กว้างและจะเป็นการเชื่อมต่อกันแบบสายของริบบิ้น (ribbons) ซึ่งในการวิเคราะห์เฟส โดยการผสมกันของ $Cs_2O - TiO_2$ ในอัตราส่วนของ $(Cs_2O : TiO_2)$ 1:3 ถึง 1:8 และให้อุณหภูมิในช่วง 850-1200 องศาเซลเซียส 2 เฟสใหม่ของซีเซียมไททานेटที่เกิดขึ้น คือ $Cs_2Ti_5O_{11}$ ในอัตราส่วน 1:5 และ $Cs_2Ti_6O_{13}$ ในอัตราส่วน 1:6



ภาพที่ 2.25 แสดงโครงสร้างสารประกอบซีเซียมไททานेटในเฟสของ $Cs_2Ti_6O_{13}$ อัตราส่วน 1:6

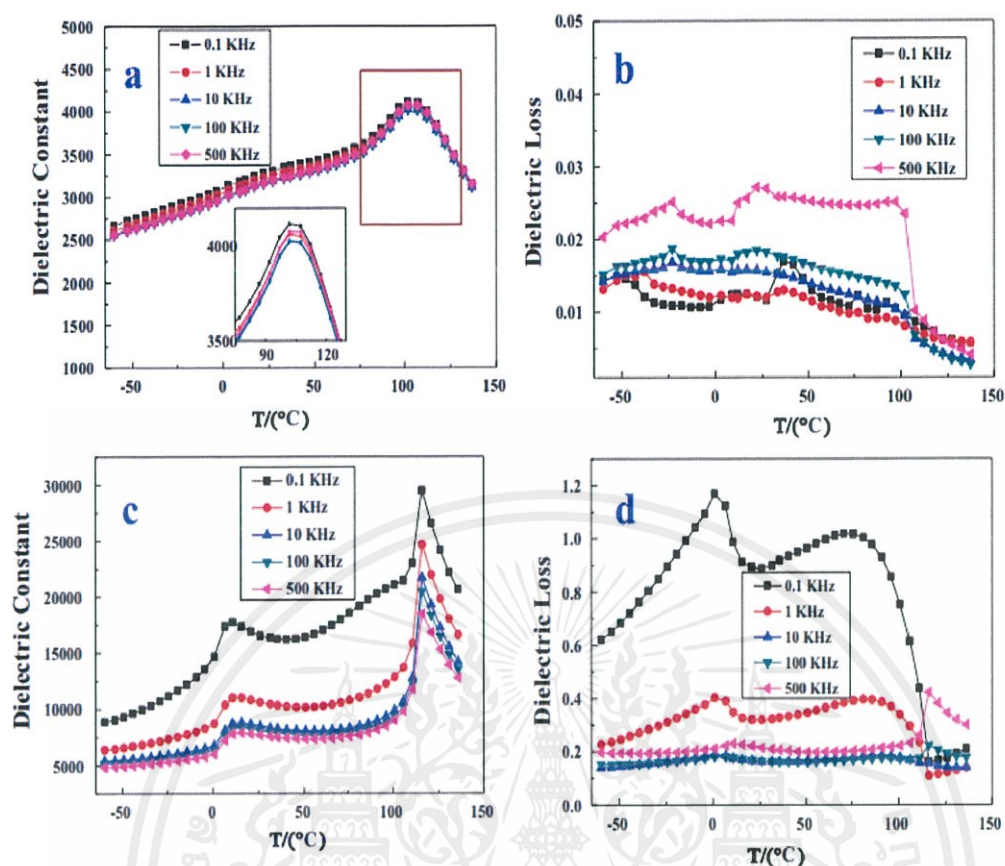
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.26 แสดงโครงสร้างสารประกอบซีเซียมไททาเนตในเฟสของ $\text{Cs}_2\text{Ti}_5\text{O}_{11}$ ที่อัตราส่วน 1:5

ซึ่ง Yan Wang และคณะ [42] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเพื่อเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ดี ในระบบ $\text{Ba}_{0.96}\text{La}_{0.04}\text{TiO}_3$ โดยได้ทำการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคทางเคมีแบบเปียก โดยการใช้หลักการการตกตะกอนของสาร ซึ่งหลักการนี้จะสามารถควบคุมความสม่ำเสมอและขนาดของอนุภาคได้ แล้วนำอนุภาคที่ตกตะกอนไปเผาแล้วจะได้เซรามิก $\text{Ba}_{0.96}\text{La}_{0.04}\text{TiO}_3$ เมื่อนำมาตรวจสอบคุณสมบัติพบว่า เซรามิกเป็นฉนวนที่ดี จึงได้นำเซรามิกนี้ไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติความเป็นฉนวน ผลการตรวจสอบพบว่า เซรามิกที่เตรียมโดยการนำเอา La^{3+} และ Ba^{2+} นำมาผสมกัน หรือเรียกว่า BLT-T อนุภาคมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ผสมกันไป มีคาร์บอน และการสูญเสียอิเล็กทริกที่สูง แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเซรามิกที่นำเอา La^{3+} และ Ba^{2+} แยกออกจากกันพบว่า มีขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่กว้างขึ้นสามารถให้ค่าประจุได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 35-85 องศาเซลเซียส อุณหภูมิช่วงนี้แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของวัสดุดังกล่าว สำหรับการนำมาใช้งานทางด้านตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



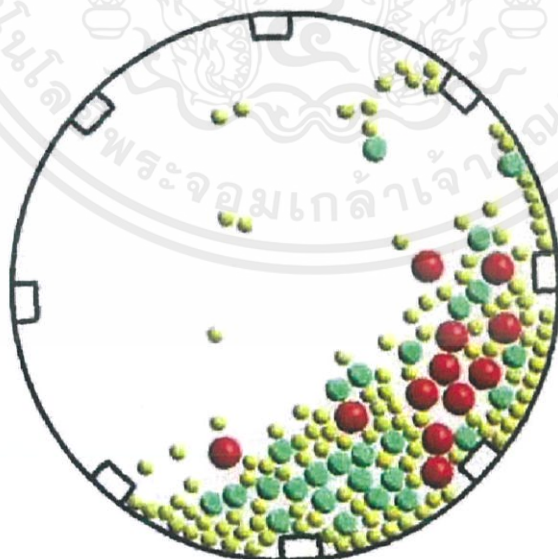
ภาพที่ 2.27 แสดงค่าไดอิเล็กทริกของสาร $\text{Ba}_{0.96}\text{La}_{0.04}\text{TiO}_3$

อนุภาคของ BLT ที่ได้จากวิธีทางเคมีเปียกโดยอาศัยกระบวนการตกตะกอน วิธีนี้ถูกใช้เนื่องจากมีข้อดีในการกระจายตัวและสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคได้ ซึ่งจะนำไปสู่การรวมตัวของเซรามิก BLT ที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งอาจจะเกิดจากการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันด้วย โดยการรวม La^{3+} and Ba^{2+} เข้าด้วยกัน (BLT-T) หรือแยก La^{3+} and Ba^{2+} ออกจากกัน (BLT-S) ในโครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติไดอิเล็กทริก จะเห็นได้ว่าเซรามิกส์ BLT-S ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระจายตัวของอนุภาคได้ดี พื้นผิวที่เรียบมีค่าความเป็นฉนวนที่สูง และการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำสุดที่อุณหภูมิห้อง เซรามิกเหล่านี้ได้รับการคาดหวังว่าจะมีการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคตเนื่องจากความต้องการที่จะมีการปรับขอบเกรนของอนุภาคที่ละเอียดมากยิ่งขึ้นของอุปกรณ์ตัวเก็บประจุที่มีโครงสร้างหลายชั้น (Multilayer Capacitor หรือ MLC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล

เทคนิคหรือวิธีการในการบดย่อยที่นิยมใช้กันเป็นอย่างมาก คือ เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล (ball-milling technique) เป็นเครื่องมือลดขนาด (size reduction) ที่ใช้ขบของแข็งชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยภาชนะปิด หรือหม้อบด (shell liner) หมุนอย่างช้าๆ ในแนวนอน ภายในมีลูกบด เป็นบอลโลหะ ซึ่งเม็ดบดดังกล่าวต้องทำมาจากวัสดุที่มีความแข็งสูง เช่น ลูกเหล็กทรงกลม หรือทำมาจากเซรามิก เช่น อลูมินา (Al_2O_3) หรือเซอร์โคเนีย (ZrO_2) เพื่อป้องกันการหลุดกร่อนของเม็ดบดขนาดบดย่อย เพราะอาจจะเกิดการปนเปื้อนไปกับสารที่ผสม นอกจากนี้ขนาดของเม็ดบดก็มีความสำคัญ ถ้ามีเม็ดบดที่ขนาดใหญ่อย่างเดียวยุสจะเกิดการผสมกันไม่ดี หรือสารจะไม่ถูกบด ซึ่งอาจจะมีแต่สารใหญ่ที่เกิดการการบดและแตกง่ายแต่เมื่อสารเล็กลงเรื่อยๆ ลูกบดจะไม่สามารถบดสารขนาดเล็กอีกต่อไปได้ และถ้าใช้เพียงแต่ลูกบดขนาดเล็ก สารอาจจะมีขนาดที่ต้องการแต่อาจจะใช้ระยะเวลาในการบดที่มาก ดังนั้นควรใช้ลูกบดขนาดเล็กและขนาดใหญ่ผสมกันไป รวมไปถึงความเร็วในการหมุนควรเหมาะสม เพื่อส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการบดย่อยที่ดี การบดเกิดจากการกระทบของลูกบอลกับวัสดุที่ต้องการบด เมื่อหม้อบดเริ่มหมุนตัวลูกบดจะเคลื่อนที่ขึ้นไปตามผนังของหม้อบด จนถึงจุดจุดหนึ่งแล้วจะตกลงมา ซึ่งจะมีการตกระทบเป็นรูปตัว D การบดจะเกิดจากแรง 2 แรงด้วยกัน คือ (1) แรงเหวี่ยง (centrifugal force) ซึ่งจะทำให้วัสดุและลูกบดกึ่งตัวเกาะติดกับผนังหม้อบด รวมกับแรงดึงดูดของโลกจะทำให้ตกลงมาตรงส่วนล่างของหม้อบด ซึ่งจะทำให้เกิดแรงกระทบ (shear impact) (2) การกระทบกันของลูกบดภายในหม้อบด เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล เป็นเทคนิคที่ทำงานง่ายและต้นทุนต่ำ อีกทั้งยังสามารถบดสารได้ช่วงขนาดที่เล็กกว่า 10 ไมโครเมตร



ภาพที่ 2.28 แสดงการตกระทบของลูกบอลในกระบวนการบดย่อย [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กระบวนการซินเตอร์ (sintering)

กระบวนการซินเตอร์ คือกระบวนการให้ความร้อนกับเม็ดผงอัดให้มีการรวมตัวกัน และมีความหนาแน่นที่มากจนกลายเป็นเซรามิกที่มีความแข็งแรง โดยกระบวนการซินเตอร์จะมีหลากหลายประเภทซึ่งจะขึ้นอยู่กับแต่ละระบบ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้การซินเตอร์แบบสถานะของแข็งในระบบนี้

การซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง (solid-state sintering) เป็นการซินเตอร์ของวัสดุที่ผลึกไม่มีความเป็นระเบียบ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 50%-80% ของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้น โดยกระบวนการนี้จะไม่ทำให้สารเกิดการรวมกันแต่สารจะเกิดการเชื่อมเข้าหากันบริเวณพื้นที่หน้าผิวของแต่ละอนุภาคส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นซึ่งรูพรุนภายในจะน้อยลง ขณะที่ผงอัดได้รับความร้อน จะส่งผลให้ความร้อนมีการแพร่ซึมเข้าสู่พื้นที่ผิวระหว่างรอยต่อของอนุภาค การแพร่ซึมของแลตทิซที่พื้นผิวของอนุภาคนั้น จะมีการส่งผ่านไอความร้อน เกิดเป็นคอคอด ตรงบริเวณที่เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาค ในระหว่างกระบวนการนี้จะไม่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นบริเวณภายในชิ้นงาน ซึ่งต่อมาคอคอดจะเริ่มขยายใหญ่ขึ้นทำให้บริเวณส่วนกลางที่ผิวสัมผัสของอนุภาคทั้ง 3 จะเกิดเป็นรูกลม จะมีการแพร่ซึมของขอบเกรนเข้าหากัน และการแพร่ซึมของแลตทิซจากบริเวณขอบเกรนไปยังรูพรุน กลไกในช่วงนี้จะทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.29 แสดงกระบวนการซินเตอร์ในขั้นตอนต่างๆ

ในกระบวนการซินเตอร์จะมีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่แสดงในภาพที่ 2.29 ลำดับแรกเป็นการเผาไล่ตัวประสานที่ผสมเข้าไประหว่างการอัดเม็ดขึ้นรูปให้ระเหยออกไปที่อุณหภูมิประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิไม่เกิน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อป้องกันการบวมหรือการแตกร้าวของเม็ดชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเร็วเกินไป จากนั้นจะทำการเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึงอุณหภูมิซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างๆและแต่ชนิดของสาร ต่อมาเผาแช่ที่อุณหภูมิดังกล่าวตามที่สารนั้นๆต้องการ ซึ่งขั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนนี้จะเป็นการเผาซินเตอร์ และขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการค่อยๆลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง และจะเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการซินเตอร์

2.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือเทคนิค (X-Ray Diffractometer หรือ XRD) เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์ (X) มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ (X) ที่ทราบความยาวคลื่น (λ) ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X) จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้อาศัยกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) ดังสมการที่ 2.3

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

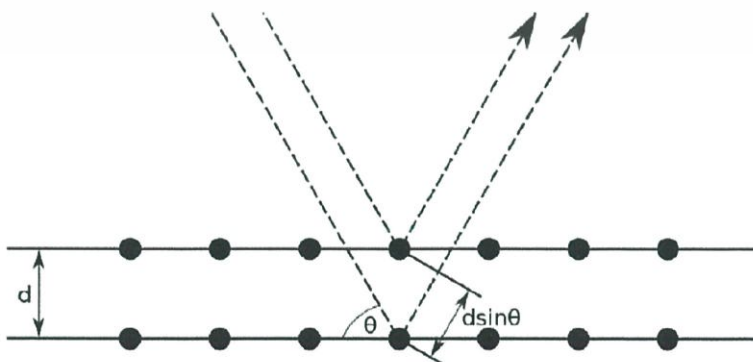
โดยค่า n คือ จำนวนเต็มใดๆ

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ มีค่าเท่ากับ 1.54 อังสตรอม

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

θ คือ มุมของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบที่บริเวณพื้นที่ผิวจะเกิดการหักเหของรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.30 แผนภาพแสดงการตกกระทบของรังสีเอกซ์โดยอาศัยกฎของแบรกก์ (Bragg's law) [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

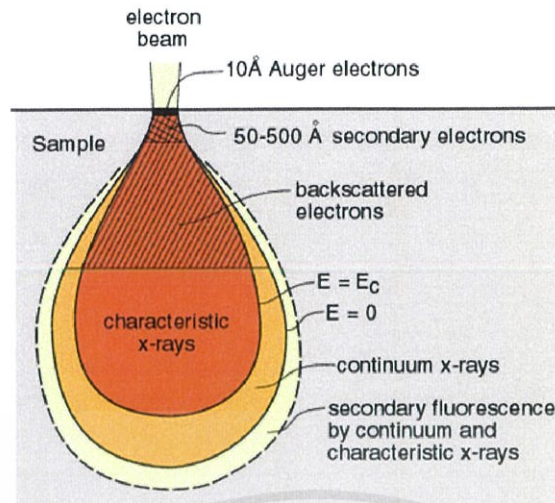
ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) ตามแสดงในภาพที่ 2.49 ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามช่องซึ่งมีสภาพเป็นสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 กิโลโวลต์ (kV) (บางเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 กิโลโวลต์ (kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมโดยเลนส์ของแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) ทั้ง 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่างๆกันตามลักษณะการใช้งาน

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) นับได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์สุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้ไปตกบนผิวของชิ้นงานตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของชิ้นงานตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (signal) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆเหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพบนจอต่อไป ซึ่งสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

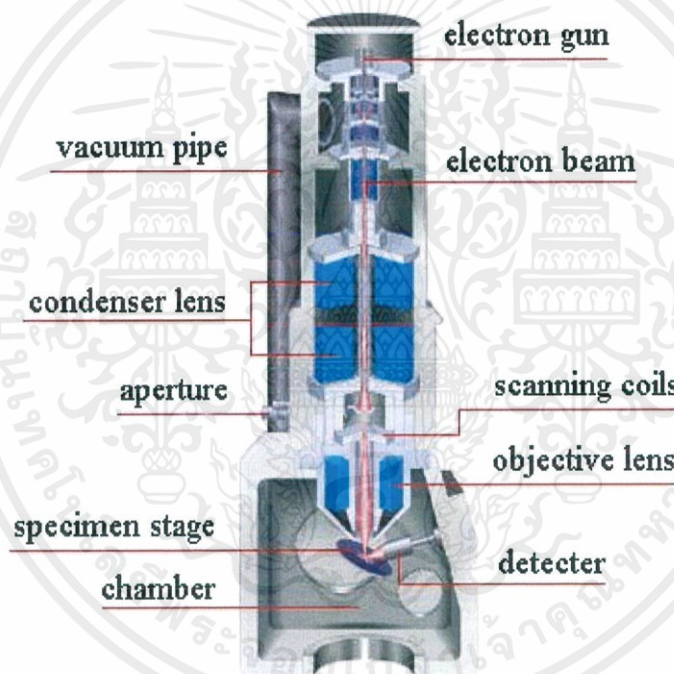
(1) อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron หรือ SE) สัญญาณนี้ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ จะเรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image หรือ SEI)

(2) อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron หรือ BSE) สัญญาณนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางด้านเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง และจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว

นอกจากสัญญาณทั้ง 2 เหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-Ray) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) โยเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของชิ้นงานตัวอย่างที่แตกต่างกันออกไป



ภาพที่ 2.31 แสดงอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานในระดับพลังงานต่างๆ [45]



ภาพที่ 2.32 แสดงส่วนประกอบต่างๆภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [46]

2.8 สมบัติทางไฟฟ้า

2.8.1 สมบัติไดอิเล็กทริก

สมบัติไดอิเล็กทริกเป็นสมบัติหนึ่งหรือวัสดุฉนวน กล่าวคือวัสดุชนิดนั้นจะไม่สามารถนำไฟฟ้า แต่จะมีความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าได้ โดยความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้านั้น ก็คือ ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance หรือ C) ซึ่งโครงสร้างของตัวเก็บประจุจะประกอบไปด้วยแผ่นโลหะทั้งสองแผ่นวางขนานกัน เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า และมีช่องว่างตรงกลางก็คือวัสดุที่มีสมบัติเป็นฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กทริก ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่วางอยู่ในสุญญากาศจะมีค่าตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\epsilon_r = \frac{dC}{\epsilon_0 A} \quad (2.4)$$

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

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าตัวเก็บประจุค่าความจุของตัวเก็บประจุจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ประการคือ

(1) พื้นที่หน้าตัดของสารตัวนำที่เป็นแผ่นขั้ว เขียนแทนด้วยอักษร A ถ้าพื้นที่หน้าตัดมาก แสดงว่าสามารถเก็บประจุได้มาก ถ้าพื้นที่หน้าตัดน้อยแสดงว่าเก็บประจุได้น้อย เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปนั้น จะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุขนาดเล็ก และขนาดใหญ่จำนวนมาก ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะเก็บประจุได้มาก เพราะมีพื้นที่หน้าตัดมากนั่นเอง

(2) ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วทั้งสอง เขียนแทนด้วยอักษร d ถ้าอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กัน ความจุจะมีค่ามาก ถ้าอยู่ในตำแหน่งที่ไกลกันความจุจะมีค่าน้อย

(3) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถที่จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น เมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนระหว่างแผ่นขั้ว จะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้ไดอิเล็กทริกต่างชนิดกัน ถึงแม้จะมีขนาดเท่ากัน แต่ค่าความจุและอัตราต้านทานแรงดันอาจมีความแตกต่างกันออกไป ซึ่งสุญญากาศเป็นไดอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด เมื่อนำมาเทียบกับวัสดุชนิดอื่น และการจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มากเกินไป อาจจะทำให้ไดอิเล็กทริกที่เป็นฉนวนมีสภาพที่ไม่ดี อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงจากฉนวนกลายเป็นตัวนำได้

2.8.2 การสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริก

เมื่อนำวัสดุไดอิเล็กทริกไปวางไว้บนสนามไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้ไดโพลภายในวัสดุไดอิเล็กทริกเกิดการเปลี่ยนไป-มาตามความถี่ของสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ใส่เข้าไป ที่ความถี่สูงๆนั้น ไดโพลภายในวัสดุไดอิเล็กทริกจะกลับตัวตามสนามไม่ทัน หรืออาจกล่าวได้ว่าไดโพลในวัสดุไดอิเล็กทริกนั้นจะใช้พลังงานในการกลับตัวไป-มา และสนามไฟฟ้านั้นก็เป็นพลังงานอย่างหนึ่ง เมื่อความถี่สูงขึ้น ทำให้ไดโพลกลับตัวไม่ทันส่งผลให้ไดโพลไม่กลับตัวตามสนามไฟฟ้า เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกยังคงได้รับสนามไฟฟ้าอยู่ในขณะที่ไดโพลยังคงไม่กลับตัวตามสนามไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดการสะสมกลายเป็นความร้อนขึ้นจนเป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริก

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการเตรียมผงผสมในระบบ ซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) และได้ปรับปรุงสารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) และรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ เฟสต่างๆที่เกิดขึ้น โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้า โดยขั้นตอนการทดลองทั้งหมดนี้จะแสดงกระบวนการเตรียมไว้ในแผนภาพที่ 3.1 ตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้

- 3.1.1 ผงซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ผลิตจากบริษัท across organics ประเทศเยอรมัน
- 3.1.2 ผงซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ผงนาโน ผลิตจากบริษัท Advanced Materials.
- 3.1.3 ผงไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ผงนาโน ผลิตจากบริษัท Advanced Materials.
- 3.1.4 ผงโพแทสเซียมคาร์บอเนต (KHCO_3) ความบริสุทธิ์ 99.7 เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์ ผลิตจากบริษัท sigma-aldrich ประเทศจีน
- 3.1.5 ผงรูบิเดียมคาร์บอเนต (Rb_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ ผลิตจากบริษัท sigma-aldrich ประเทศจีน
- 3.1.6 เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) ความบริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์
- 3.1.7 น้ำกลั่น
- 3.1.8 อะซิโตน
- 3.1.9 กาวเงิน

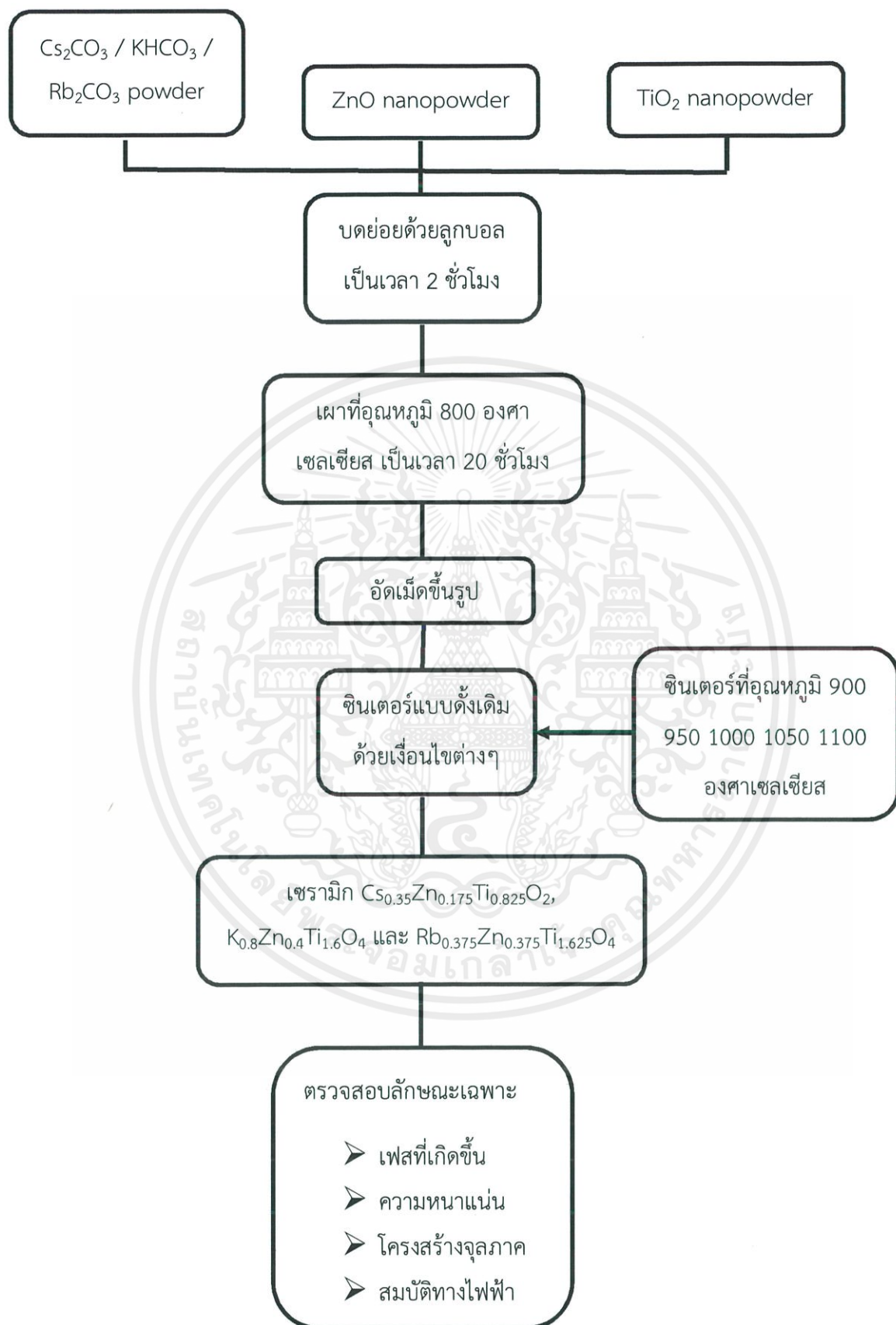
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

- 3.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) รุ่น JSM-6335F ผลิตโดยบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.2 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) ยี่ห้อ Philips รุ่น X'Pert MPD ผลิตโดยบริษัท Philips ประเทศฮอลแลนด์
- 3.2.3 เครื่อง LCR Meter ผลิตโดยบริษัท Hewlette Packard ประเทศมาเลเซีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.4 เครื่องชั่งสารดิจิทัลความละเอียด 0.0001 กรัม รุ่น GR-200 ผลิตโดยบริษัท A&D Company ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.5 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร ผลิตโดยบริษัทชวโชติ ประเทศไทย
- 3.2.6 ตู้อบสารอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส รุ่น RE 53 ผลิตโดยบริษัท Bender ประเทศเยอรมัน
- 3.2.7 เครื่องบดย่อยผสมสารด้วยลูกบอล
- 3.2.8 เครื่องอัดแบบแกนเดียว (uniaxial pressing)
- 3.2.9 ลูกบดทำจากเซอร์โคเนีย (ZrO_2) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 มิลลิเมตร
- 3.2.10 ขวดพลาสติกพร้อมฝาเปิด
- 3.2.11 เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์ (electronic digital calipers)
- 3.2.12 เทปพันท่อน้ำ
- 3.2.13 ซ้อนตักสาร
- 3.2.14 คีมคีบ (forceps)
- 3.2.15 ปีกเกอร์ขนาด 50 100 250 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- 3.2.16 ตะแกรงร่อน
- 3.2.17 ครกบดสาร
- 3.2.18 กระดาษฟรอยล์ทำจากอะลูมิเนียม (foil)
- 3.2.19 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร
- 3.2.20 ถ้วยอลูมินาสำหรับเผาสาร (Alumina crucible)
- 3.2.21 กระดาษทรายเบอร์ 400 600 1000 และ 1200
- 3.2.22 ถังซีลลอคสำหรับเก็บชิ้นงาน
- 3.2.23 กล่องพลาสติกสำหรับใส่ชิ้นงาน
- 3.2.24 ขวดพลาสติกสำหรับฉีดเอทานอล
- 3.2.25 นาฬิกาจับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



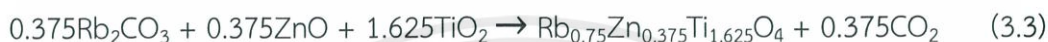
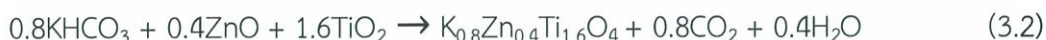
ภาพที่ 3.1 แผนผังการเตรียมเซรามิกในระบบ $Cs_{0.35}Zn_{0.175}Ti_{0.825}O_2$, $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ และ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการเตรียมผงผสม

ในการเตรียมผงซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีความบริสุทธิ์สูงและอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตร นำมาผสมกันตามระบบสมการ (3.1) และทำการปรับปรุงซึ่งมีขั้นตอนการทดลองเหมือนเดิม โดยเปลี่ยนเป็นสารโพแทสเซียมคาร์บอเนต (KHCO_3) สมการ (3.2) และรูบิเดียมคาร์บอเนต (Rb_2CO_3) สมการ (3.3)



โดยการนำสารซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3) 8.8093 กรัม, ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 2.2005 กรัม และไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 10.1799 กรัม การปรับปรุงสาร 2 ระบบด้วยกันคือ ระบบโพแทสเซียมซิงค์คาร์บอเนต โดยมีปริมาณสารโพแทสเซียมคาร์บอเนต (KHCO_3) 8.089 กรัม, ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 3.2887 กรัม, ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 12.9058 กรัม, และระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต โดยมีปริมาณสารรูบิเดียมคาร์บอเนต (Rb_2CO_3) 7.5173 กรัม, ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 2.6498 กรัม, ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 11.2652 กรัม โดยทั้ง 3 ระบบ จะมีขั้นตอนการทดลองที่เหมือนกันคือ นำสารทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วนต่างๆมาทำการชั่งด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียดสูง แล้วใส่สารเข้าไปในขวดพลาสติกที่มีลูกบอลเซอร์โคเนีย (ZrO_2) จำนวนครึ่งหนึ่งของขวดบอล จากนั้นเติมน้ำกลั่นและเอทานอลในอัตราส่วน 50:50 ลงไปเพื่อเป็นตัวช่วยในการหล่อลื่น และไม่ทำให้สารเกาะกันเป็นก้อนหรือติดกับลูกบอล แล้วนำเทปพันท่อน้ำมาพันบริเวณเกลียวฝาปิดขวดเพื่อให้แน่นและป้องกันการรั่วซึมของน้ำในขวดพลาสติก จากนั้นปิดฝาให้สนิทอีกครั้ง แล้วนำไปทำการบดย่อยโดยเครื่องบดย่อยด้วยลูกบอล ตามภาพที่ 3.2 เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และหลังจากบดย่อยเสร็จในเวลาที่กำหนดแล้ว นำสารที่ได้ซึ่งอยู่ในลักษณะของแข็งที่กระจายตัวอยู่ในของเหลว มาเทลงในบีกเกอร์ และนำไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สารละลายระเหยออกไปหมด ให้เหลือแต่เนื้อสารที่แห้ง ปราศจากความชื้น เมื่อสารแห้งดีแล้วนำสารมาบดด้วยครกบดสาร (ภาพที่ 3.3) เมื่อทำการบดสารจนเนียนละเอียดเรียบร้อยแล้ว นำสารใส่ภาชนะเพื่อนำไปเก็บไว้ในตู้อบเพื่อป้องกันให้สารปราศจากความชื้นจากภายนอก ซึ่งสารเหล่านี้จะตอบสนองต่อความชื้นได้ดี ดังนั้นเมื่อเตรียมสารเสร็จเรียบร้อย ควรเก็บรักษาสารไว้ในตู้อบทันที

จากนั้นนำผงผสมใส่ลงไปในถ้วยอะลูมินาสำหรับเผาสาร เพื่อไปทำการเผาสารแบบแคลไซน์ (calcine) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้นที่ 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที และอัตราการลงที่ 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที ตามภาพที่ 3.4 เมื่อทำการเผาแคลไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(calcine) เสร็จเรียบร้อยแล้วจากนั้นนำมาบดให้ละเอียดด้วยครกบดสาร และนำไปใส่ภาชนะเก็บไว้ในตู้อบเช่นเดิม

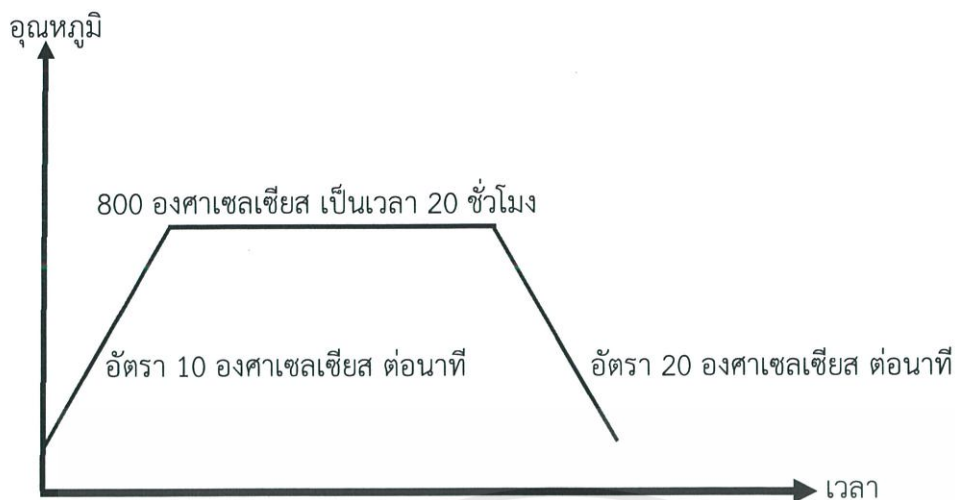


ภาพที่ 3.2 แสดงเครื่องบดย่อยด้วยลูกบอล



ภาพที่ 3.3 แสดงครกบดสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



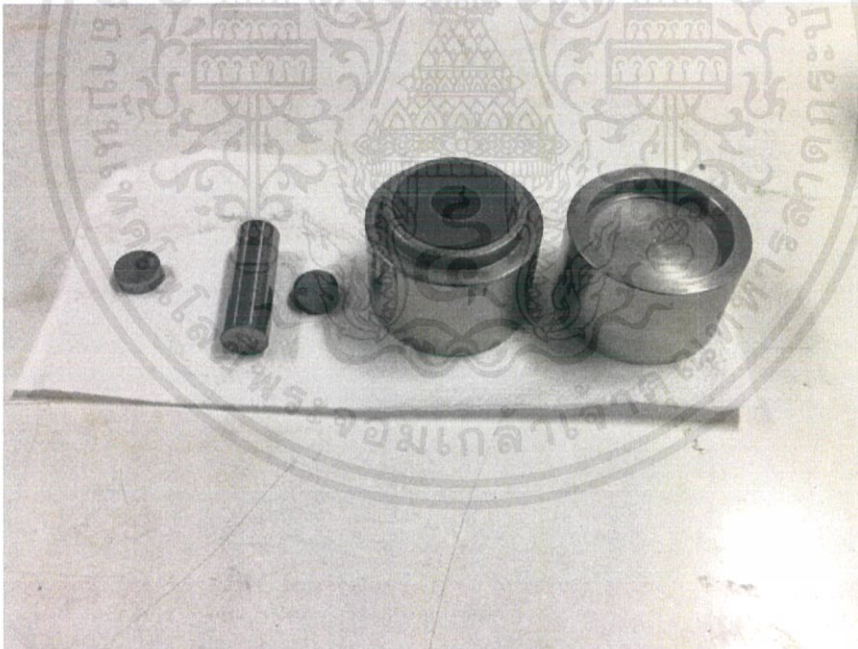
ภาพที่ 3.4 แสดงกระบวนการเผาแคลไซน์ (calcine)

3.4 กระบวนการเตรียมเม็ดเซรามิก

เมื่อทำการบดผงผสมได้เนียนละเอียดและเผาเรียบร้อยแล้ว นำผงผสมที่ได้มาอัดเม็ดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบแกนเดียว (uniaxial pressing) ดังภาพที่ 3.5 โดยจะเริ่มจากการชั่งสารผสมปริมาณครั้งละ 0.7 กรัม แล้วนำไปใส่แม่พิมพ์อัดสารที่ทำจากโลหะดังภาพที่ 3.6 โดยให้น้ำหนักที่กด 2 ตัน เป็นระยะเวลา 2 นาที จากนั้นนำแม่พิมพ์มาถอดออก ก็จะได้เม็ดอัดที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลม มีเส้นภาพศูนย์กลางประมาณ 13 มิลลิเมตร และหนาประมาณ 2.5 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.7 จากนั้นนำเม็ดอัดไปผ่านกระบวนการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง โดยที่นำเม็ดอัดใส่ลงไปในถ้วยอะลูมินาสำหรับเผาสาร แล้วนำสารที่ผ่านการเผาแคลไซน์มาปกคลุมทั้งด้านบนและด้านล่างของเม็ดอัด แล้วปกคลุมด้วยผงอะลูมินาเม็ดทั้งด้านบนและด้านล่างของเม็ดอัดอีกชั้น เพื่อให้มีการกระจายความร้อนที่ทั่วถึง

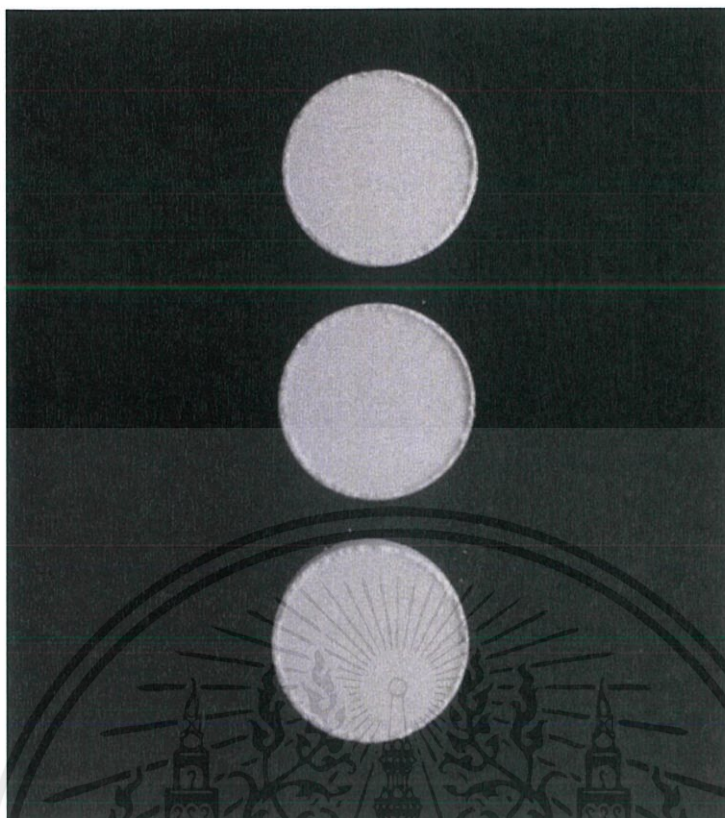


ภาพที่ 3.5 แสดงเครื่องอัดแบบแกนเดียว (uniaxial pressing)



ภาพที่ 3.6 แสดงแม่พิมพ์อัดสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.7 แสดงลักษณะของเม็ดอัด

3.5 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก

3.5.1 การหาความหนาแน่น (density)

นำเม็ดเซรามิกทั้งหมดที่ได้จากการเตรียม มาหาค่าความหนาแน่น โดยอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำ ตามกฎของอาร์คิมิดีส (Archimedes' method) โดยเริ่มจากการนำเม็ดเซรามิกที่ต้องการทราบค่าความหนาแน่นมาต้มกับน้ำกลั่นที่เดือดอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้วก็นำเม็ดเซรามิกมาวางไว้เพื่อให้เม็ดเซรามิกเย็นตัวลง จากนั้นนำเม็ดเซรามิกที่ผ่านการต้มและปล่อยให้แห้งนั้นมาชั่งในน้ำ (W_3) เมื่อชั่งเสร็จแล้วนำมาวางไว้บนกระดาษทิชชูที่ซับน้ำแบบหมาดๆ แล้วเช็ดน้ำที่เม็ดออกให้เม็ดมีลักษณะหมาดๆ จากนั้นนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่งอีกครั้ง น้ำหนักที่ได้ก็คือน้ำหนักของเม็ดที่ได้จากการชั่งเปียกหรือชั่งหมาดๆ (W_2) เมื่อผ่านการชั่งทั้ง 2 ขั้นตอนนี้แล้วนำเม็ดเซรามิกมาวางไว้บนทิชชูหรือกระดาษซับน้ำ จากนั้นซับให้แห้งแล้วนำไปเก็บไว้ในตู้อบ ให้เม็ดเซรามิกไม่เปียกและไม่มีความชื้น จากนั้นเมื่อเม็ดเซรามิกแห้งสนิทแล้วให้นำมาชั่ง ชั่งน้ำหนักที่ได้ก็คือน้ำหนักที่ชั่งแบบแห้ง (W_1) เมื่อทำการชั่งทั้ง 3 ครั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็คือ ชั่งในน้ำ (W_3) ชั่งเปียกหรือหมาดๆ (W_2) และชั่งแบบแห้ง (W_1) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นของเม็ดเซรามิก ตามสมการที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho_c = \frac{W_1}{W_3 - W_2} \times \rho_{H_2O} \quad (3.4)$$

โดยที่ ρ_c คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

ρ_{H_2O} คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (1กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งขณะแห้ง (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (กรัม)

W_3 คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งขณะเปียกแบบหมาดๆ (กรัม)

3.5.2 การหดตัวหลังจากการเผา (shrinkage)

ค่าการหดตัวของเม็ดเซรามิกที่เกิดขึ้นภายหลังจากกระบวนการซินเตอร์นั้น สามารถทำได้ด้วยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกก่อนการซินเตอร์ และหลังการซินเตอร์ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการหดตัวของเม็ดเซรามิกโดยการคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ตามสมการที่ 3.5 ดังนี้

$$\%shrinkage = \left[\frac{d_1 - d_2}{d_1} \right] \times 100 \quad (3.5)$$

โดยที่ d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกก่อนการซินเตอร์ (มิลลิเมตร)

d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกหลังการซินเตอร์ (มิลลิเมตร)

3.5.3 น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผา (weight loss)

น้ำหนักของเม็ดเซรามิกที่สูญเสียไประหว่างการเผาซินเตอร์ เป็นเพราะความร้อนไปทำให้เม็ดมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของเม็ดเซรามิกก่อนการซินเตอร์ และน้ำหนักของเม็ดเซรามิกหลังการซินเตอร์ ด้วยสมการที่ 3.6 ดังนี้

$$\%weight\ loss = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3.6)$$

โดยที่ W_1 คือ น้ำหนักของเม็ดเซรามิกก่อนการเผาซินเตอร์ (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักของเม็ดเซรามิกหลังการเผาซินเตอร์ (กรัม)

3.6 การตรวจสอบเฟสของเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer ; XRD)

การตรวจสอบเฟสของเม็ดเซรามิกทั้งหมดนี้ จะสามารถทำได้โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจหาชนิดของเฟสที่เกิดขึ้น โดยอาศัยหลักการตกกระทบของรังสีเอกซ์ บริเวณพื้นผิวของสารที่นำมาตรวจสอบ แล้วรังสีเอกซ์เกิดการกระเจิงแสง หรือ (scattering) และมีการเลี้ยวเบนโดยมีมุมการเลี้ยวเบนที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุ ผลึกและระนาบ (hkl) ที่รังสีตกกระทบภายในวัสดุ โดยที่รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุแต่ละชนิดนั้น ก็จะมีเฉพาะเจาะจงของวัสดุนั้น ซึ่งมีค่าการประมวลผลของแต่ละวัสดุเป็นฐานข้อมูลอยู่ในเครื่อง ดังนั้นเมื่อนำเครื่องมือสำหรับการตรวจวัด (detector) มารองรับการกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์ที่ออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่างๆ ก็จะสามารถตรวจสอบได้ว่าเป็นวัสดุชนิดใด โดยจะพิจารณาจากมุมที่ตกกระทบทั้งข้อมูลและความสัมพันธ์ของแบรกก์ (Bragg's-angle) และความเข้มของพีคกราฟรังสีเอกซ์ของรูปแบบการเลี้ยวเบนแล้วเกิดมุมที่ปรากฏ ซึ่งดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า สารแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะเจาะจงที่แตกต่างกัน ซึ่งถ้ามีรังสีเอกซ์มาตกกระทบ ก็จะทำให้มีมุมที่แตกต่างกันอยู่แล้ว ดังนั้นจึงนำมุมที่ตกกระทบของรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกันนี้ไปทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลของสารชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลระบบ (JCPDS files) ซึ่งเป็นข้อมูลที่มาตรฐานและสามารถเชื่อถือได้ โดยจะเป็นการตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นของสารแต่ละชนิด โดยเริ่มจากการนำสารที่จะทำการตรวจวัดไปวางไว้บริเวณช่องสำหรับวางชิ้นงานซึ่งอยู่ในเครื่อง XRD จากนั้นก็ปิดประตูเครื่องวัด XRD เพื่อทำการตรวจวัด ซึ่งการตรวจวัดครั้งนี้จะควบคุมโดยระบบคอมพิวเตอร์โดยมีโปรแกรมการทดสอบและตรวจวัด จากนั้นดำเนินเครื่องโดยการใช้ทองแดง ($\text{CuK}\alpha$) ที่ให้รังสีเอกซ์มีค่าความยาวคลื่นประมาณ 1.54 อังสตรอม (Å) ออกมาด้วยระดับประมาณ 0.02 องศา ต่อหน้าที่ จากค่ามุม 2θ ที่ 5 องศา ไปจนถึงที่ค่ามุม 2θ ที่ 65 องศา โดยกฎของแบรกก์จะเป็นไปตามสมการ 3.7 และสามารถคำนวณหาขนาดของผลึกได้ตามสมการของเซอร์เรอร์ ตามสมการที่ 3.8

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (3.7)$$

โดยที่ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม

θ คือ มุมที่รังสีตกกระทบ

n คือ เลขจำนวนเต็ม

λ คือ ความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t = \frac{K\lambda}{FWHM \cos\theta} \quad (3.8)$$

โดยที่ K คือ ค่าคงที่ของเซอร์เรอร์ ค่าดีพอลต์คือ 0.9

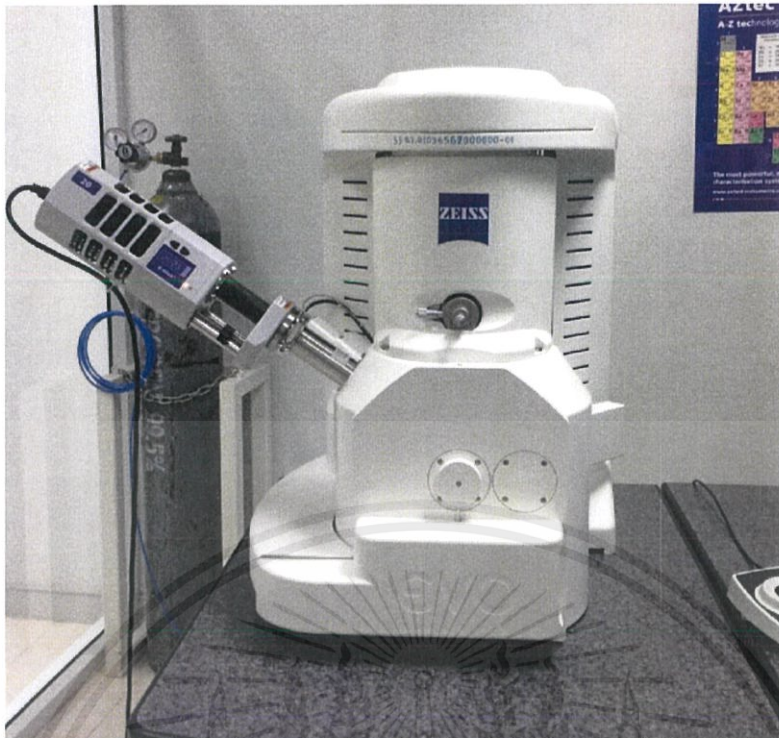
λ คือ ความยาวคลื่น

$FWHM$ คือ ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่ง ของความสูงสูงสุดของกราฟ

θ คือ มุมที่รังสีตกกระทบ

3.7 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เพื่อทราบลักษณะภายนอก และตรวจสอบรูปร่างลักษณะของสารที่ทำการสังเคราะห์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการอธิบายรูปร่างและโครงสร้างของชิ้นงาน สอดคล้องกับลักษณะสมบัติเฉพาะที่ได้ ซึ่งการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานนี้ จะตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตามภาพที่ 3.8 การตรวจสอบจะเริ่มโดยการนำผงผสมไปผสมกับน้ำกลั่น โดยหยดลงบนแผ่นเทปทองแดงเพื่อให้มีการนำไฟฟ้า แล้วนำไปติดไว้บนแท่นทองเหลือง (stub) ซึ่งติดไว้โดยเทปคาร์บอนสองหน้า จากนั้นนำแท่นทองเหลืองที่มีชิ้นงานติดไว้อยู่ไปทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำ โดยใช้เทคนิคการสปัตเตอริง (sputtering) ซึ่งหลักการนี้ เมื่อมีไอออนมาชนบริเวณพื้นผิวที่เคลือบด้วยทองคำ ก็จะทำให้ผิวของคำหลุดออกและไปเคลือบบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน เพื่อให้ผิวชิ้นงานตัวอย่างมีการนำไฟฟ้า โดยการเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำนี้จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 90 วินาที จากนั้นก็นำชิ้นงานไปตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และโครงสร้างลักษณะทางเคมีของชิ้นงาน



ภาพที่ 3.8 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM)

3.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer หรือ EDS

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาธาตุด้านเอกซเรย์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุคาร์บอนถึงธาตุยูเรเนียมเป็นต้นไป นำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางสามารถทดสอบได้ทั้งของแข็ง ของเหลวหรือผง สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ หลักการของเทคนิคนี้ คือ ให้อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดเข้าไปและชนสารตัวอย่าง โดยรังสีเอ็กซ์จะทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดของอะตอมของธาตุหลุดออก อิเล็กตรอนในวงถัดมาจึงจะเข้ามาแทนที่และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในลักษณะของเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ ซึ่งจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะตัวของธาตุนั้นเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและความเข้มข้นของเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ที่เกิดขึ้นจะเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก ซึ่งจะเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริก โดยการนำเม็ดเซรามิกที่ได้ทำการเตรียมทั้งหมดไปตรวจสอบ ซึ่งจะศึกษาความสัมพันธ์การเปลี่ยนไปของไดอิเล็กทริก โดยการเพิ่มอุณหภูมิห้องคือ 25 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สำหรับการเตรียมเม็ดเซรามิกเพื่อให้พร้อมกับการนำไปตรวจสอบจะเริ่มจากการนำเม็ดเซรามิกมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 600 1000 และ 1200 โดยขัดให้เม็ดเซรามิกมีความหนาลดลง 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกก็คือ ให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร แล้วนำเม็ดไปทำความสะอาดโดยเครื่องอัลตราโซนิกส์ เพื่อให้ผงที่ขัดไม่ติดไปตามพื้นผิวของชิ้นงาน จากนั้นนำมาวางไว้ให้แห้ง แล้วนำมาตากาวเงินชนิดเผา ซึ่งต้องทำการทาที่ละด้าน แล้วนำไปอบไว้เพื่อให้ด้านที่ทานั้นแห้ง พอแห้งแล้ว ให้พลิกกลับมาตากาวเงินอีกด้านหนึ่ง แล้วนำไปอบไว้เพื่อให้กาวเงินแห้งเช่นเดิม เมื่อกาวเงินครบทุกชิ้นงานแล้ว ก็นำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยมีอัตราการขึ้น และอัตราการลงของอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที เผาเพื่อทำให้กาวเงินแห้งและติดไปกับพื้นผิวของเม็ดเซรามิกได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปวัดค่า ไดอิเล็กทริก ด้วยเครื่อง LCR meter ที่ช่วงอุณหภูมิที่กล่าวไว้ข้างต้นคือ 25 – 200 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ 100 1000 10000 100000 และ 1000000 เฮิรตซ์ (Hz) จากนั้นนำค่าไดอิเล็กทริกที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกตามสมการที่ 3.9

$$\epsilon_r = \frac{dC}{\epsilon_0 A} \quad (3.9)$$

- 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)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

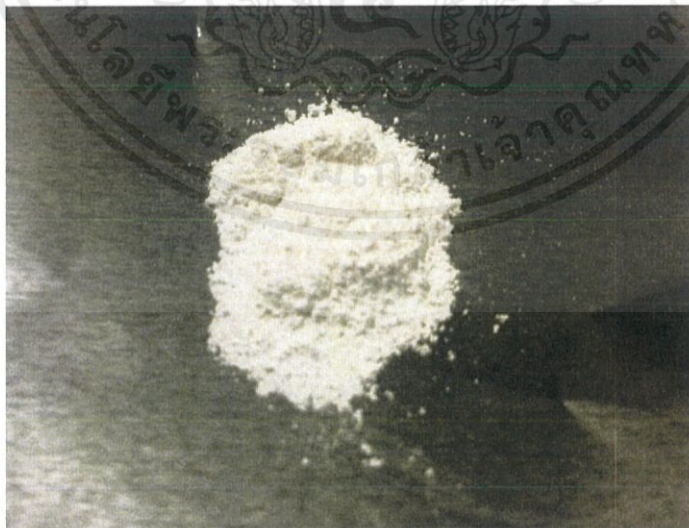
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็งร่วมกับการซินเตอร์แบบดั้งเดิม (normal sintering) โดยผลการทดลองที่จะกล่าวถึงประกอบไปด้วย สมบัติทางกายภาพ เฟสที่เกิดขึ้น โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกดังกล่าว จากนั้นจะเป็นผลการปรับปรุงโครงสร้างชั้นของสารไททาเนตในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) และรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) พร้อมผลการทดลองทั้งหมดโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 สารในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$)

4.1.1 ผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต

4.1.1.1 สมบัติกายภาพ

หลังจากทำการเผาแคลไซน์สารซีเซียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการขึ้น 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที และอัตราการลง 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบด เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้ว พบว่าผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด ดังภาพที่ 4.1

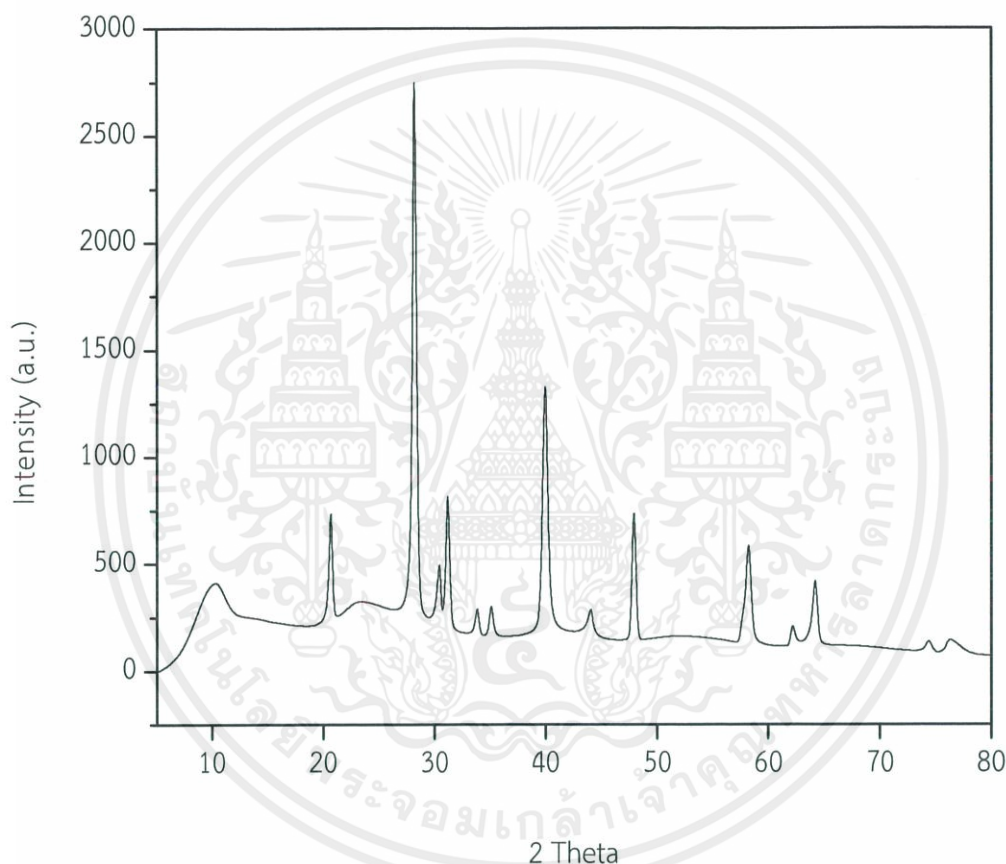


ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 เฟสที่เกิดขึ้นของผงซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนต

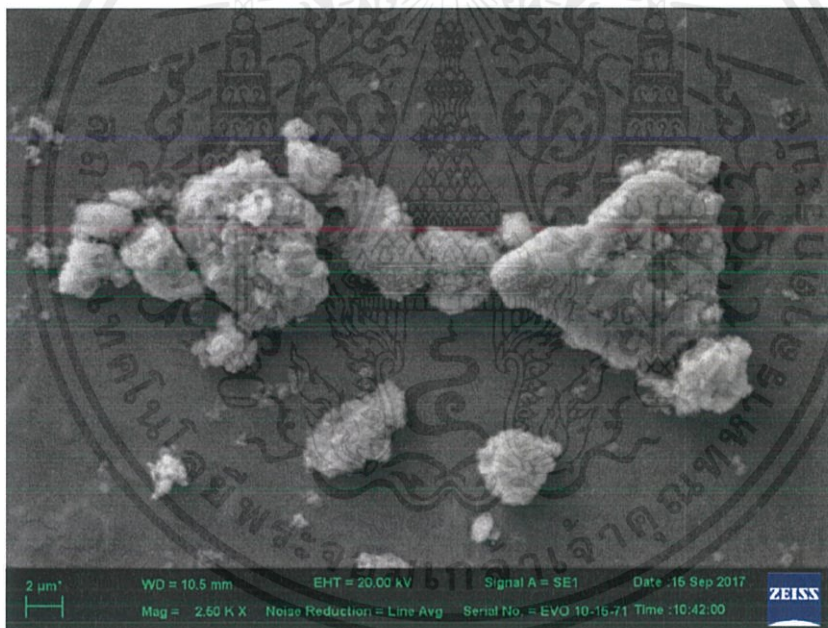
เมื่อผงซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนต ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราขาขึ้น 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที และอัตราขาลง 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมงเรียบร้อยแล้วนั้น จะนำมาตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer หรือ XRD) จะแสดงโดยภาพที่ 4.2 ซึ่งพบว่ากราฟเป็นเฟสบริสุทธิ์ไม่มีเฟสอื่นแปลกปลอม



ภาพที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนต ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

4.1.1.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนต

เมื่อทำการแคลไซน์ผงซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราขาขึ้น 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที และอัตราขาลง 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือSEM) โดยการนำผงซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนตไปผสมกับน้ำกลั่น โดยหยดลงบนแผ่นเทปคาร์บอนสองหน้า จากนั้นนำแท่นทองเหลืองที่นำที่มีชิ้นงานติดไว้ยูนำไปทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำ เพื่อให้ผิวของชิ้นงานตัวอย่างมีการนำไฟฟ้า แล้วจึงนำไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาค และสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือSEM) โดยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4.3 เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคโดยรวมจะเห็นว่าอนุภาคมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2.20 ไมโครเมตร โดยมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดประมาณ 12.14 ไมโครเมตร และขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดประมาณ 0.05 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงซีซีเอ็มซิงค์ไททาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 เซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$)

4.1.2.1 สมบัติทางกายภาพ

1) ค่าความหนาแน่นของเซรามิก

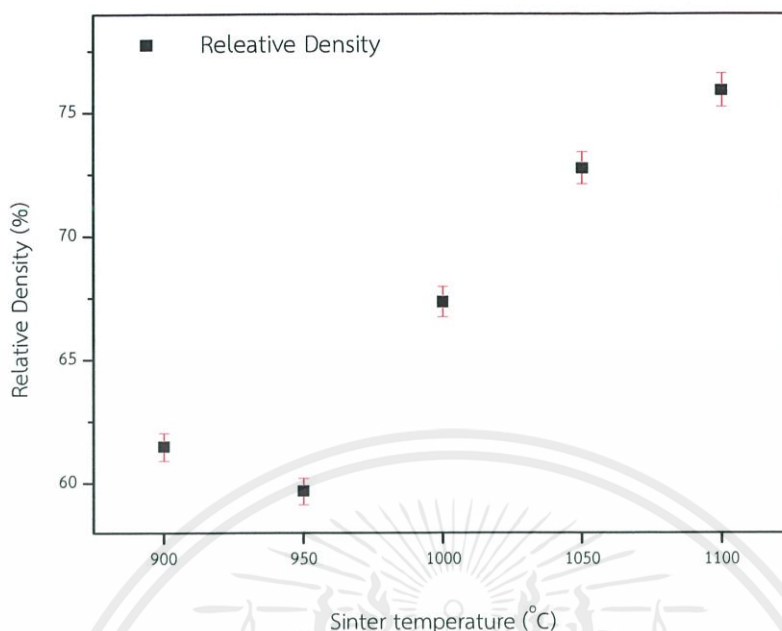
หลังจากทำการซินเตอร์เซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำชิ้นงานที่ได้มาหาค่าความหนาแน่นโดยอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำ ตามกฎของอาร์คิมิดีส (Archimedes's method) ดังสมการที่ 3.4 โดยค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของซีเซียมซิงค์ไททาเนตที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 4.4403 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

อุณหภูมิซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กรัม ต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
900	2.73	61.48
950	2.65	59.68
1000	2.99	67.33
1050	3.23	72.74
1100	3.37	75.89

จากตารางที่ 4.1 พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิกที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิการซินเตอร์เพิ่มขึ้น พบว่าความหนาแน่นของเม็ดเซรามิกเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันโดยจะมีค่าความหนาแน่นสูงสุดอยู่ที่ 75.89 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นนี้เป็นผลมาจากกระบวนการแน่นตัวในระหว่างการซินเตอร์ และเมื่อทำการพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับอุณหภูมิซินเตอร์พบว่าได้ผลดังภาพที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



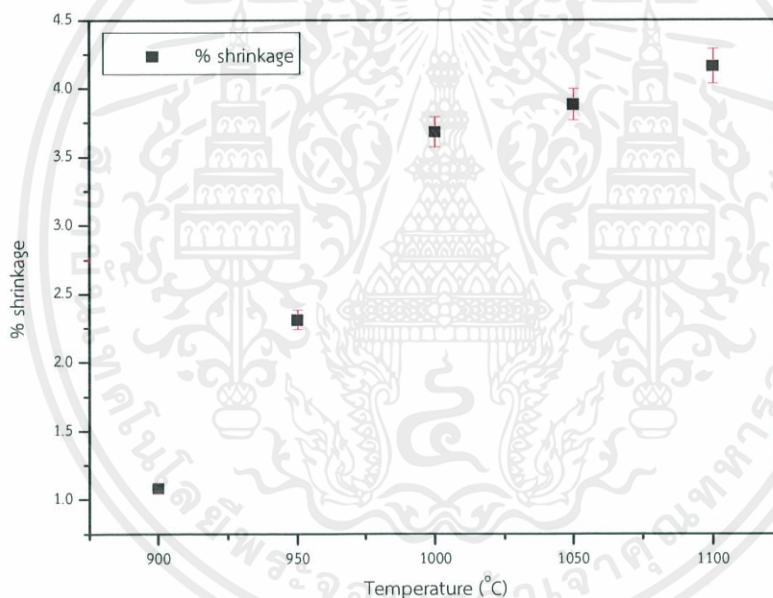
ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิกซีเซียม ซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$)

2) ค่าการหดตัวหลังจากการเผาของเซรามิก

หลังจากทำการซินเตอร์เซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบตั้งเดิมที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที เสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการวัดค่าการหดตัวของเซรามิกที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาซินเตอร์ สามารถทำได้โดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกก่อนการซินเตอร์ และหลังการซินเตอร์ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการหดตัวของเม็ดเซรามิกโดยการคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ตามสมการที่ 3.5 และสามารถพลอตเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 ค่าการหดตัวของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) หลังจากผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

อุณหภูมิซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ค่าการหดตัว (เปอร์เซ็นต์)
900	1.08
950	2.31
1000	3.68
1050	3.88
1100	4.16



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวหลังการเผากับอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$)

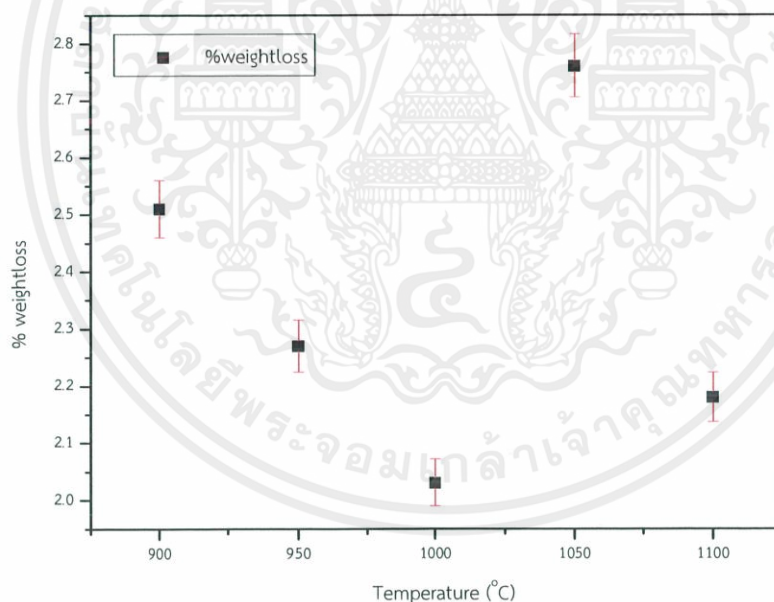
3) น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผาของเซรามิก

หลังจากทำการซินเตอร์เซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบตั้งเดิมที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที เสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการชั่งน้ำหนักที่สูญเสียไปของเซรามิกหลังจากการเผาซินเตอร์ สามารถทำได้โดยการชั่งน้ำหนักของเม็ดเซรามิกก่อนการซินเตอร์ และหลังการซินเตอร์ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการหดตัวของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เม็ดเซรามิกโดยการคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ตามสมการที่ 3.6 โดยค่าก็ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 และสามารถพลอตเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4.6

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักที่สูญหายไปหลังจากการเผาของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต หลังจากผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

อุณหภูมิซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักที่สูญหายไปหลังการเผา (เปอร์เซ็นต์)
900	2.51
950	2.27
1000	2.03
1050	2.76
1100	2.18

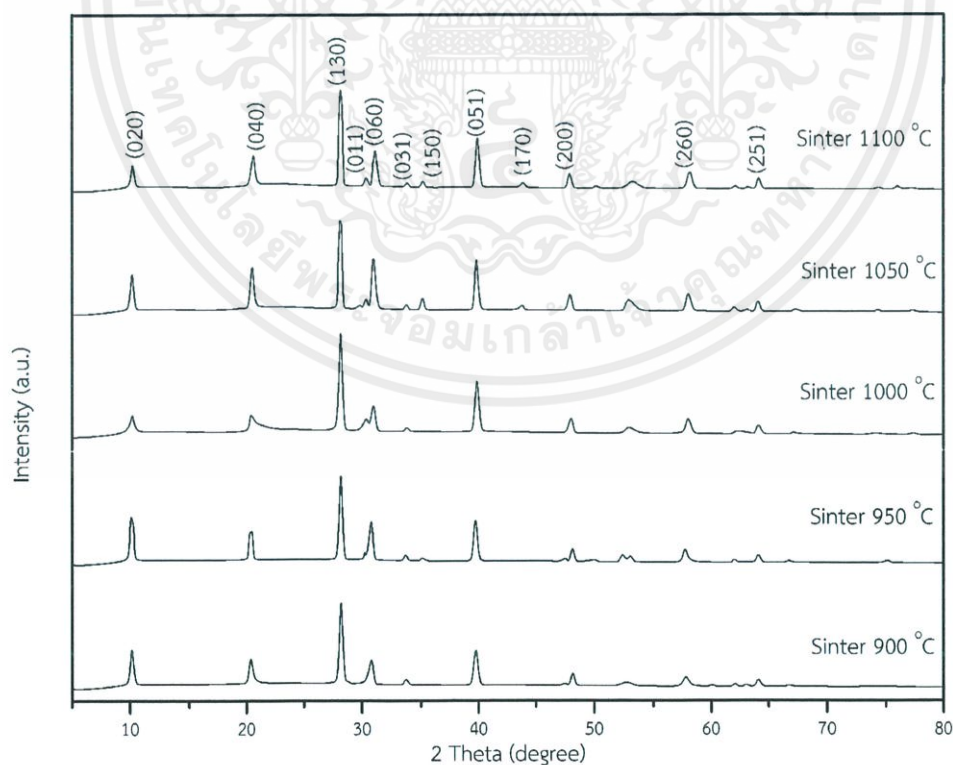


ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญหายไปหลังการเผากับอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 เฟสที่เกิดขึ้น

เมื่อเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททานेट ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เรียบร้อยแล้ว จะนำเซรามิกมาตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer หรือ XRD) โดยก่อนที่จะนำชิ้นงานไปทำการตรวจวัดจะต้องทำความสะอาดชิ้นงานให้สะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic) เพื่อขจัดสิ่งสกปรกบนผิวหน้าออกให้หมด จากนั้นนำมาขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1000 ตามลำดับ เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ยังคงเหลืออยู่ นำชิ้นงานไปอบไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาตรวจสอบเฟสด้วยเครื่อง XRD โดยภาพที่ 4.7 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททานेट ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) ที่ผ่านการซินเตอร์ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบดั้งเดิม จากภาพจะเห็นว่าทุกอุณหภูมิการซินเตอร์มีตำแหน่งของพีคเกิดขึ้นเหมือนกันทุกอัน และเมื่อตรวจสอบกับข้อมูลมาตรฐานแล้วพบว่า เป็นเฟสบริสุทธิ์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tao Gao และคณะ[41] มีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ a เท่ากับ 3.8143, b เท่ากับ 17.0205 และ c เท่ากับ 2.9837 Å และเมื่อทำการคำนวณขนาดของผลึกตามสมการเชอร์เรอร์ (สมการที่ 3.8) พบว่ามีค่าแสดงดังตารางที่ 4.4 จากตารางจะเห็นว่าค่าขนาดของผลึกจะไม่แตกต่างกัน นั้นหมายความว่าเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆนั้นไม่ได้ทำให้ขนาดของผลึกเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก ในระบบซีเซียมซิงค์ไททานेट

ด้วยการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 1100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ขนาดผลึกของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$)

อุณหภูมิการซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)
900	0.38
950	0.40
1000	0.38
1050	0.41
1100	0.41

4.1.2.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

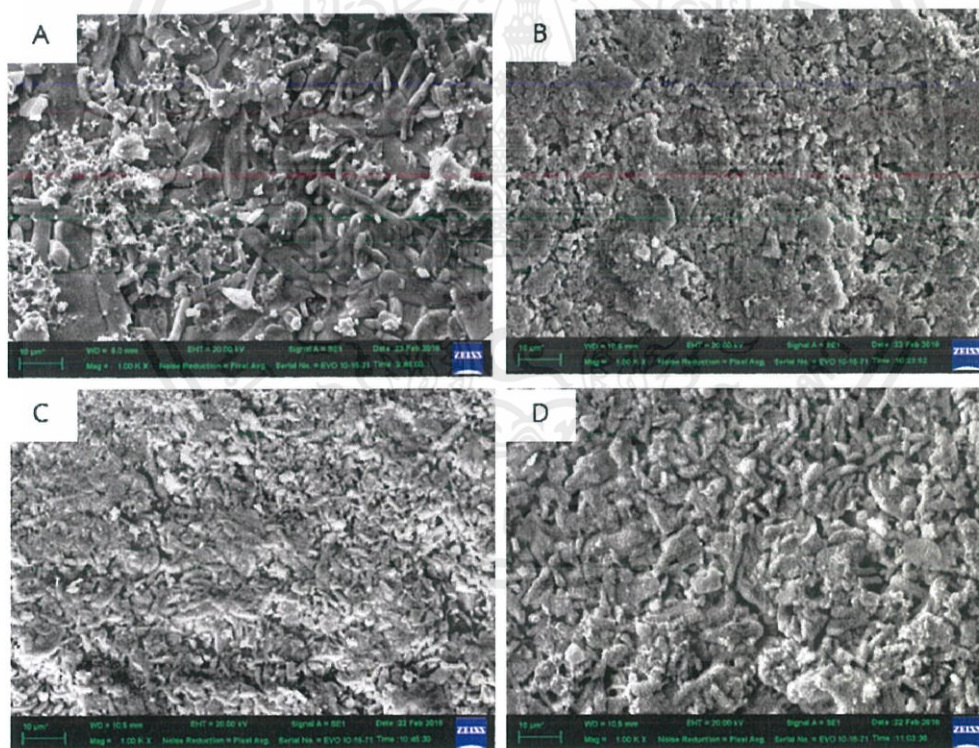
เมื่อทำการซินเตอร์เซรามิกระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) โดยก่อนที่จะนำตัวอย่างมาถ่ายภาพนั้นจำเป็นต้องทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงานออกให้หมด จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำชิ้นงานที่ได้ไปเคลือบด้วยทอง (Au) เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง แล้วจึงนำไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) โดยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4.8 ตามลำดับ ซึ่งภาพทั้งหมดถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคโดยรวมจะเห็นว่าเกรนที่เกิดขึ้นในการเผาซินเตอร์แต่ละอุณหภูมิมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน ทั้งนี้เป็นผลมาจากพฤติกรรมการเติบโตของเกรนของสารทั้งสามชนิดนั้นแตกต่างกัน และเมื่อทำการหาขนาดเกรนพบว่าเกรนของเม็ดเซรามิกจะมีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาาคาดว่าเป็นผลมาจากกลไกการส่งผ่านมวลในระหว่างการเผาซินเตอร์โดยที่มีปริมาณสัดส่วนของสารทั้งสามชนิดได้กระจายตัวทั่วบริเวณเม็ดเซรามิก โดยขนาดเกรนเฉลี่ยที่คำนวณได้และค่าความหนาแน่นสูงสุดของเม็ดเซรามิกที่คำนวณจากสมการที่ 3.4 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 โดยข้อมูลที่ได้พบว่าสัดส่วนที่ให้ค่าความหนาแน่นน้อยสุดอยู่ที่การเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส (ประมาณ 59.68%) ซึ่งเมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคจากภาพที่ 4.8 ร่วมกันจะเห็นได้ว่า มีรูพรุนกระจายตัวอยู่ตามผิวหน้าชิ้นงาน และมีรอยแตกร้าวจึงเป็นสาเหตุทำให้ความหนาแน่นลดลง ในขณะที่สัดส่วนที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดอยู่ที่การเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

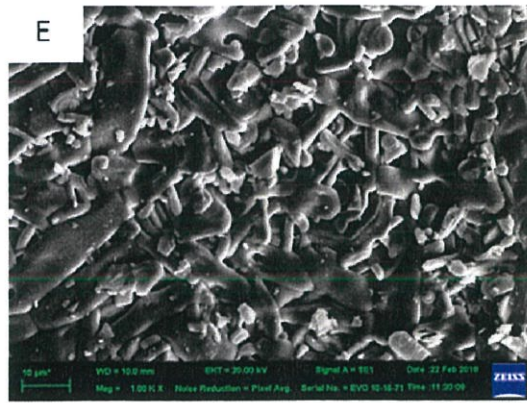
องศาเซลเซียส (ประมาณ 75.89%) ซึ่งจากลักษณะโครงสร้างจุลภาคในภาพที่ 4.8 จะเห็นได้มาเกรนมีลักษณะการแน่นตัวที่ดี ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น

ตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์และขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต

อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
900	61.48	5.63
950	59.68	5.68
1000	67.33	4.46
1050	72.74	6.50
1100	75.89	10.62



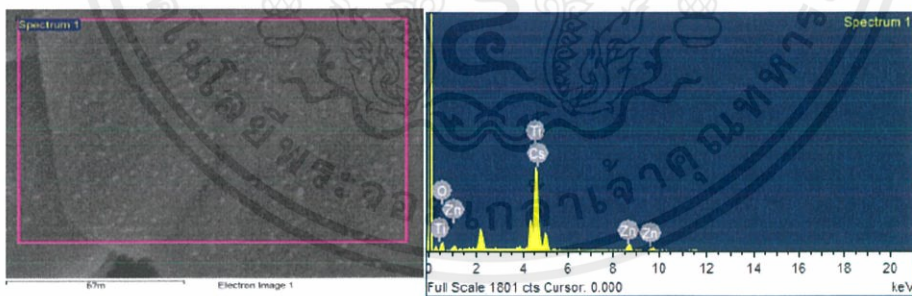
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



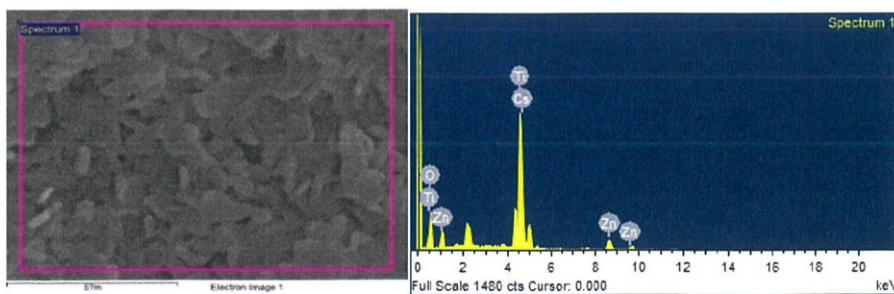
ภาพที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต โดยที่ (A) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (B) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส (C) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (D) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส (E) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

4.1.2.4 การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy)

การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุต่างๆ ของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy) ซึ่งจะบอกสัดส่วนองค์ประกอบของธาตุ เป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก และอะตอม ซึ่งแสดงข้อมูลไว้ดังภาพที่ 4.9 (A-E) และตารางที่ 4.6-4.10

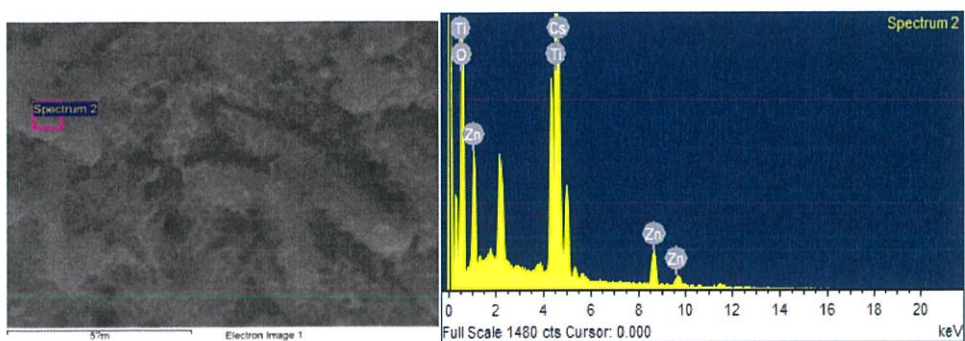


(A)

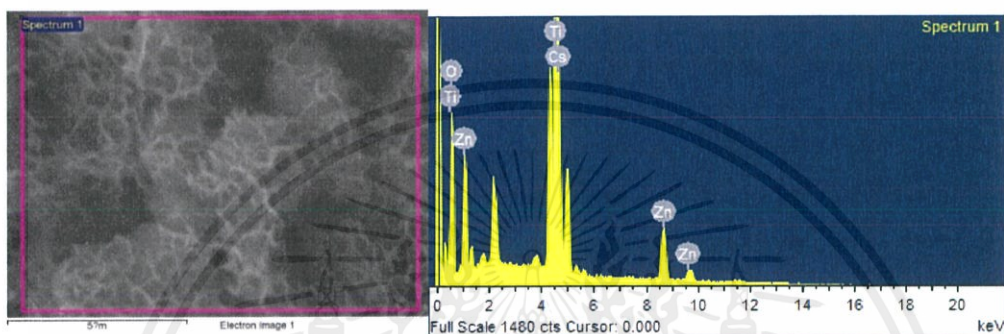


(B)

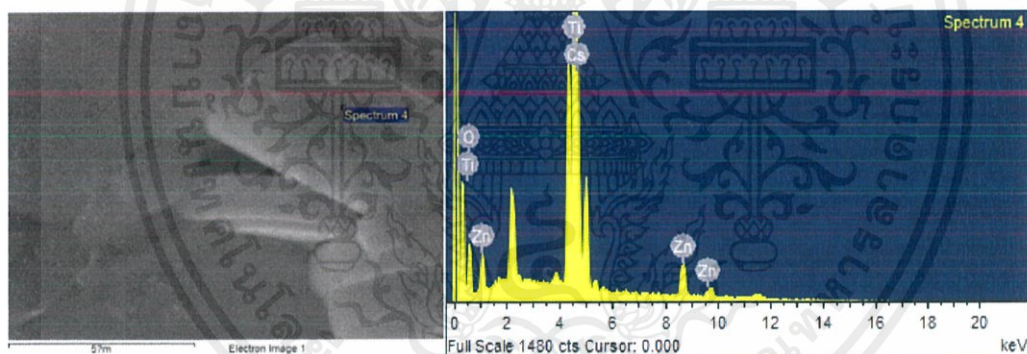
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(C)



(D)



(E)

ภาพที่ 4.9 ผลการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบธาตุของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ที่ผ่านการเผา
ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่ (A)900, (B)950, (C)1000, (D)1050, และ(E)1100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบซีซีเอ็มซีไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 900 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
Cs	36.49	13.59
Ti	39.17	40.49
Zn	12.59	9.53
O	11.76	13.59
รวม	100	

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบซีซีเอ็มซีไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 950 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
Cs	29.88	7.23
Ti	35.30	26.27
Zn	10.41	5.68
O	27.30	60.82
รวม	100	

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบซีซีเอ็มซีไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1000 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
Cs	27.67	6.78
Ti	29.16	19.84
Zn	9.46	4.71
O	33.71	68.66
รวม	100	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1050 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
Cs	28.33	7.91
Ti	32.84	25.45
Zn	13.39	7.61
O	25.44	59.03
รวม	100	

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1100 องศาเซลเซียส

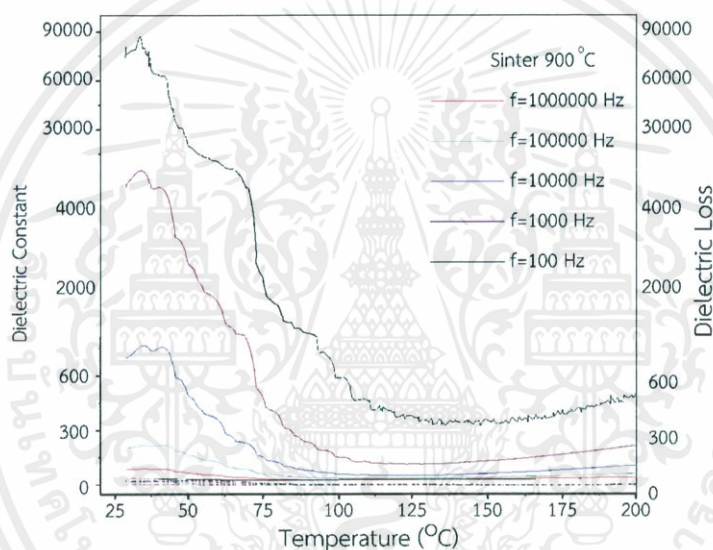
ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
Cs	38.00	14.45
Ti	40.43	42.64
Zn	10.57	8.17
O	11.00	34.75
รวม	100	

4.1.2.5 สมบัติไดอิเล็กทริก

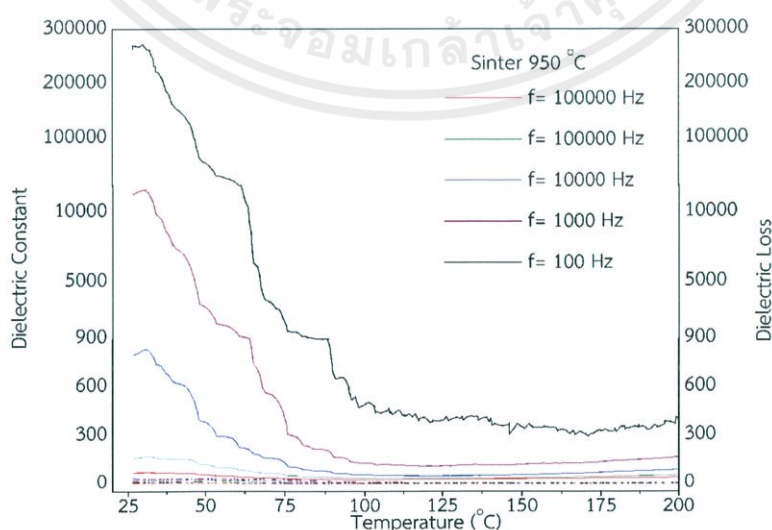
เมื่อนำเซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($Cs_{0.35}Zn_{0.175}Ti_{0.825}O_2$) ไปทำการซินเตอร์ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบดั้งเดิมแล้ว นำสารตัวอย่างที่ได้มาทำขั้วไฟฟ้า (electrode) เพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งการทำขั้วไฟฟ้านั้นเริ่มโดยนำเม็ดเซรามิกที่ไม่มีรอยแตกร้าวไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic) ขัดผิวหน้าให้เรียบได้ระนาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1200 ตามลำดับ เมื่อทำการขัดผิวหน้าเรียบเรียบร้อยแล้วจึงนำเม็ดเซรามิกมาอบเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำกาวเงิน (silver paste) ชนิดเผามาทาที่ผิวหน้าของเม็ดเซรามิกทั้งสองด้าน นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที เมื่อเผาเสร็จจึงนำเม็ดเซรามิกที่ได้มาขัดตกแต่งขอบให้เรียบร้อย เพื่อป้องกันการเชื่อมต่อกันของขั้วไฟฟ้าระหว่างผิวหน้าทั้งสอง จากนั้นนำสารตัวอย่างที่ผ่านการทำขั้วไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งก็คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ด้วยเครื่อง LCR ที่ช่วงอุณหภูมิห้อง ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยจะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความถี่ที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และผลลัพธ์ที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.10 (a-e) จากภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิของเม็ดเซรามิกในระบบซีเอ็มซีไททานเนต ภายใต้ความถี่ต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญ จากกราฟจะเห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิมิมีลักษณะตามกราฟภาพที่ 4.6 (A) ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าที่อุณหภูมิห้อง จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะค่อยๆลดลงจนกระทั่งถึงในช่วงอุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส ค่าไดอิเล็กทริกก็จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะเหมือนกันในทุกๆความถี่ สำหรับในชิ้นงานที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส กราฟก็จะมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิที่เหมือนกัน ดังนั้นก็เลยทำการเลือกค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ที่ความถี่ 100 เฮิร์ต ซึ่งเป็นค่าที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดมาพลอตเปรียบเทียบกัน พบว่าได้ผลตามภาพที่ 4.11

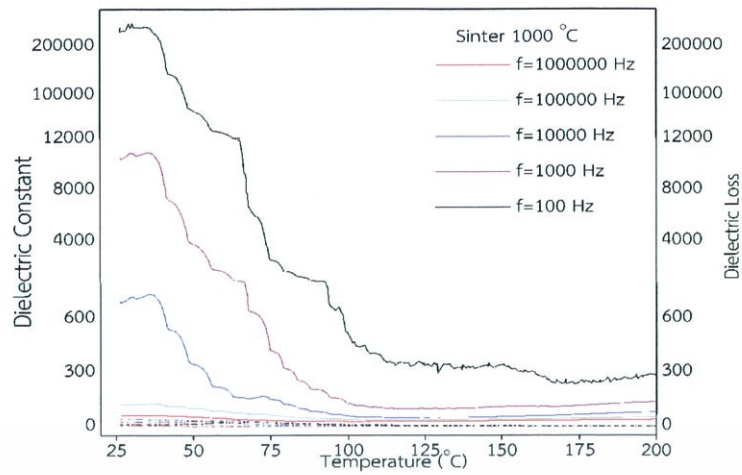


(A)

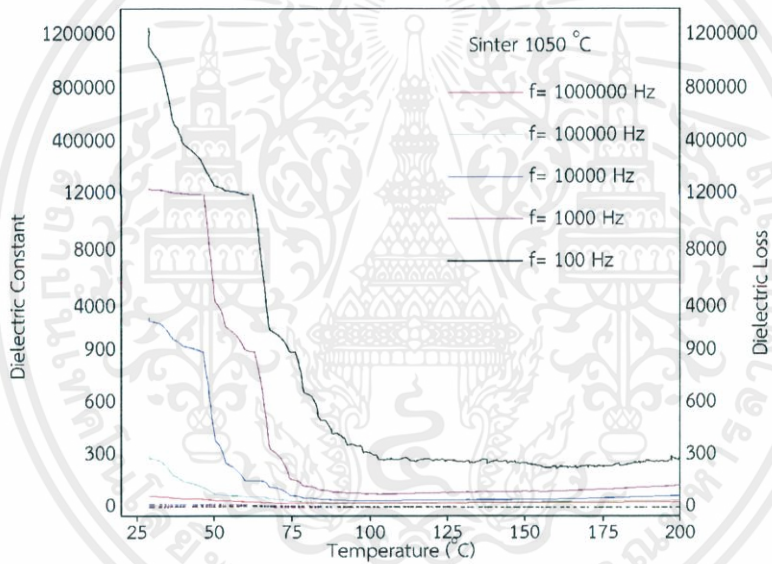


(B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

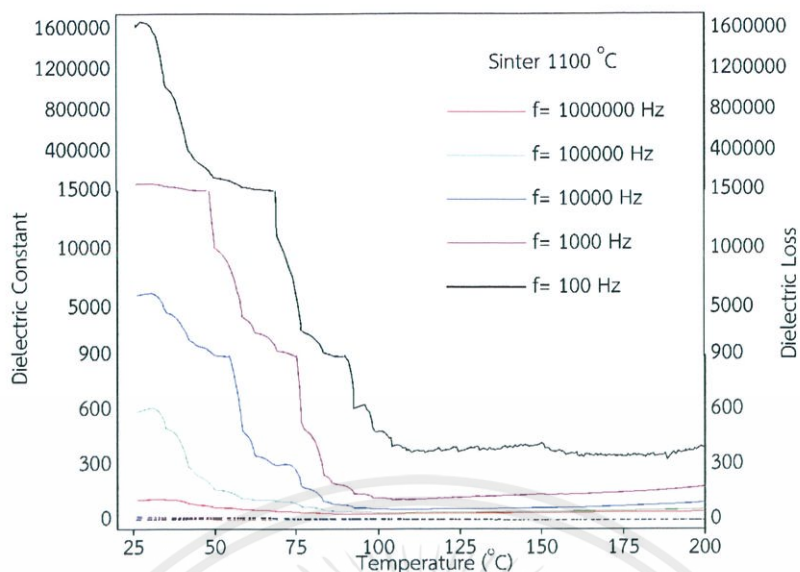


(C)



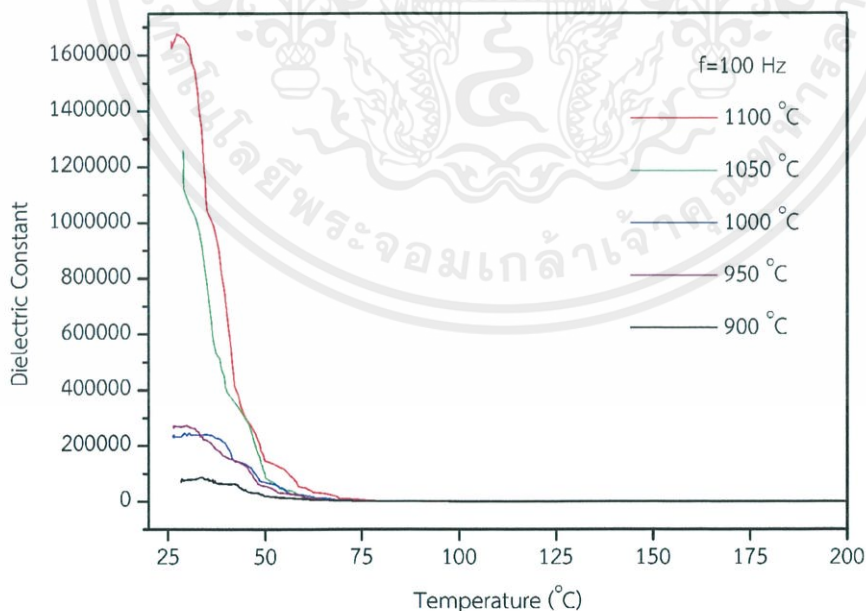
(D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(E)

ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับ อุณหภูมิของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) เมื่อ (A) sinter 900 °C (B) sinter 950 °C (C) sinter 1000 °C (D) sinter 1050 °C และ (E) sinter 1000 °C ตามลำดับ ที่ความถี่ 100 1000 10000 100000 1000000 เฮิรต (Hz)



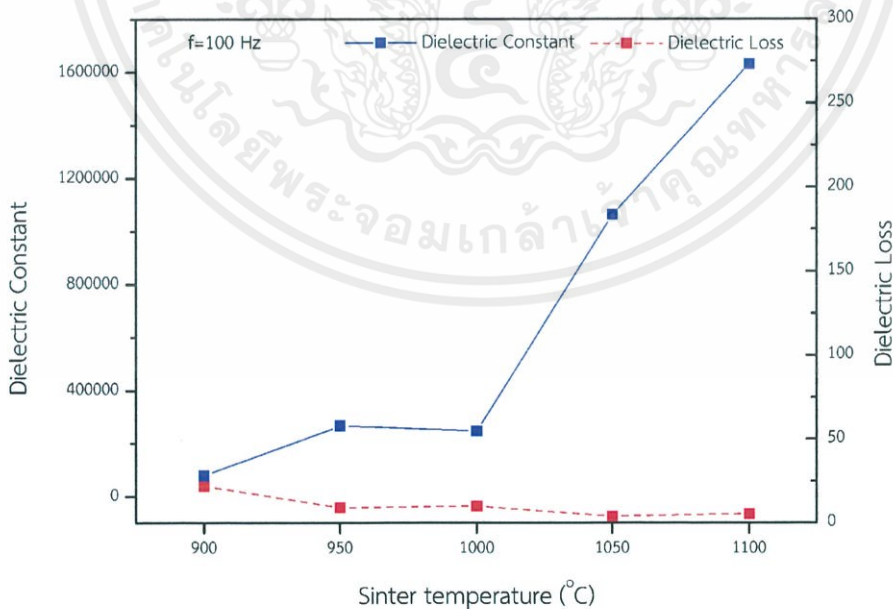
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิในการซินเตอร์ของ เซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) ที่ความถี่ 100 เฮิรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.11 พบว่าในการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่ำ ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 950 องศาเซลเซียส ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อทำการอ่านค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ดังตารางที่ 4.11 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการซินเตอร์เพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นเพราะที่อุณหภูมิการซินเตอร์ต่ำๆนั้นทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นต่ำ มีรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งรูพรุนนี้ก็จะทำให้ชิ้นงานไม่สามารถที่จะแสดงผลของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ได้อย่างเต็มที่

ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิกในระบบซีเซียม ซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) ความถี่ 100 เฮิร์ต อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
900	78204	21.98
950	266041	9.03
1000	246312	9.97
1050	1061400	3.87
1100	1630230	5.47



ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง(30องศาเซลเซียส) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิในการซินเตอร์ของเซรามิกซีเซียมซิงค์ไททาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการปรับปรุงโครงสร้างชั้นของสารไททานเนต

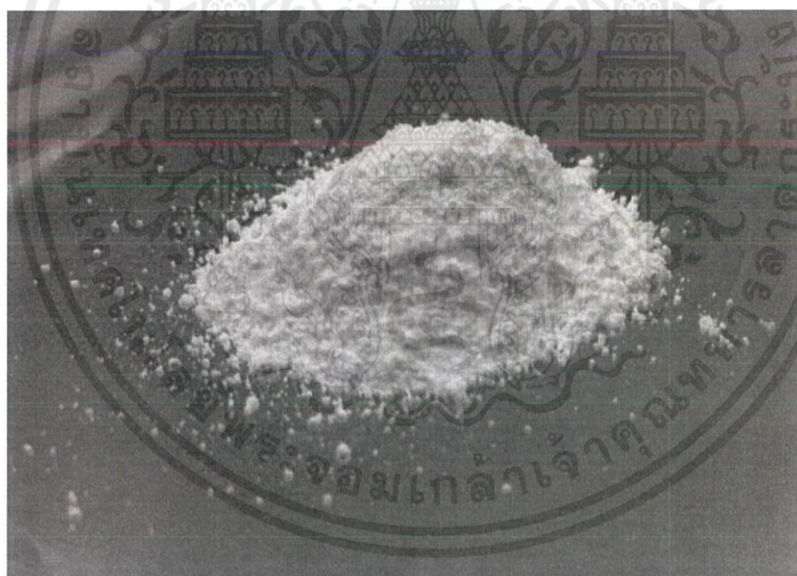
ในส่วนนี้ได้ทำการปรับปรุงสารในระบบไททานเนตโดยการแทนที่ตำแหน่ง A ในสูตรโครงสร้าง $A_7Ti_{2-x/4}□_{x/4}O_4 \cdot H_2O$ ด้วย โพแทสเซียม และรูบิเดียม เนื่องจากมีขนาดของอะตอมน้อยกว่าซีเซียม ($Cs = 298 \text{ pm}$, $K = 243 \text{ pm}$ และ $Rb = 265 \text{ pm}$) โดยเชื่อว่าผลทางไฟฟ้าที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลง ตามขนาดของอะตอมที่เปลี่ยนไป

4.2.1 สารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททานเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)

4.2.1.1 ผงโพแทสเซียมซิงค์ไททานเนต

1) สมบัติกายภาพ

หลังจากทำการเผาแคลไซน์สารโพแทสเซียมซิงค์ไททานเนต ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราขาขึ้น 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที และอัตราขาลง 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบด เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้ว พบว่าผงโพแทสเซียมซิงค์ไททานเนต มีลักษณะเป็นผงสีขาว ละเอียด ดังภาพที่ 4.13

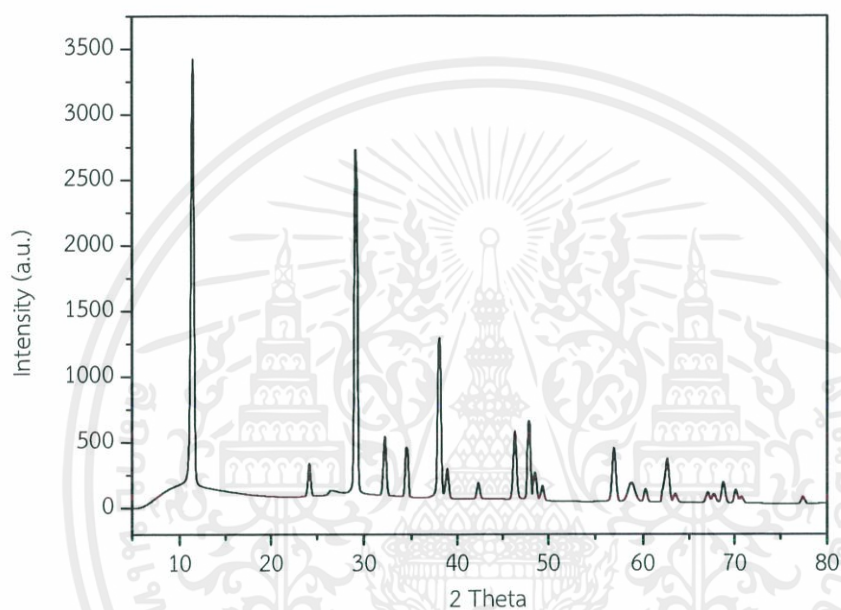


ภาพที่ 4.13 แสดงลักษณะทางกายภาพของผงโพแทสเซียมซิงค์ไททานเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เฟสที่เกิดขึ้นของผงโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต

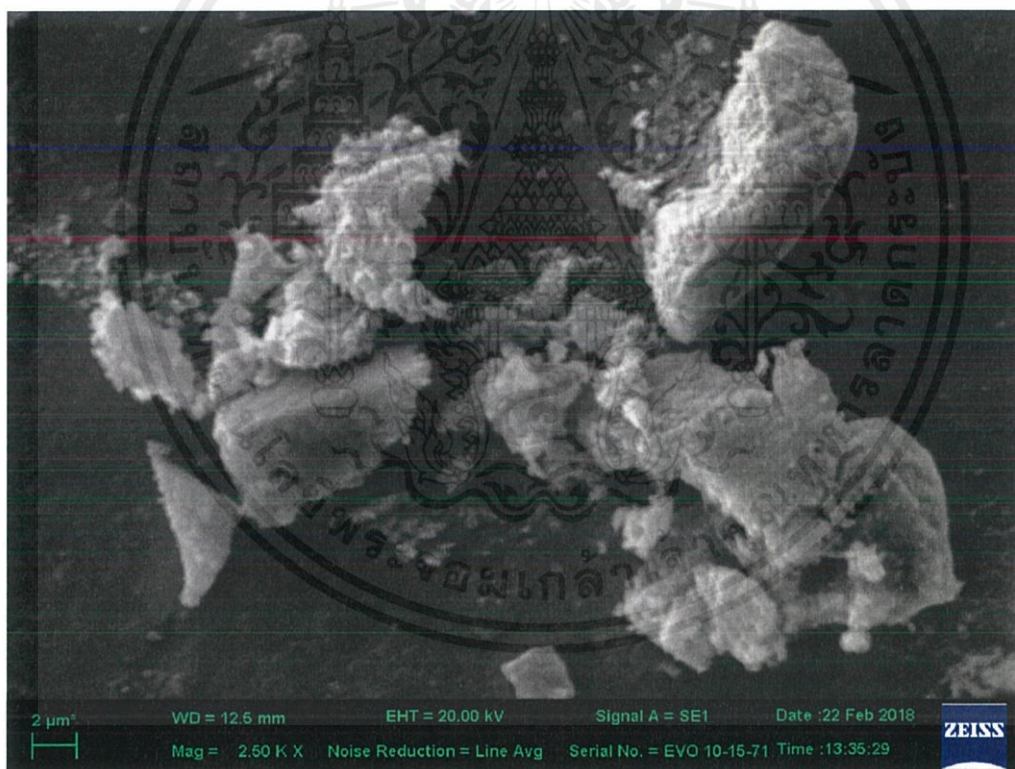
เมื่อผงโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยมี อัตราขาขึ้น 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที และอัตราขาลง 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง เรียบร้อยแล้วนั้น จะนำผงมาตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer หรือ XRD) จะแสดงโดยภาพที่ 4.14 ซึ่งพบว่ากราฟเป็นเฟสบริสุทธิ์ไม่มีเฟสอื่น แปรกลปอม



ภาพที่ 4.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการเผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

3) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต

เมื่อทำการแคลไซน์ผงโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยมีอัตรา
 ขาขึ้น 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที และอัตราขาลง 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง
 เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ
 ส่องกราด (scanning electron microscope หรือSEM) โดยการนำผงโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนตไป
 ผสมกับน้ำกลั่น โดยหยดลงบนแผ่นเทปคาร์บอนสองหน้า จากนั้นนำแท่นทองเหลืองที่นำที่มีชิ้นงาน
 ติดไว้ยู่นำไปทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำ เพื่อให้ผิวของชิ้นงานตัวอย่างมีการนำไฟฟ้า แล้วจึง
 นำไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง
 กราด (scanning electron microscope หรือSEM) โดยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงไว้ดัง
 ภาพที่ 4.15 เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคโดยรวมจะเห็นว่าอนุภาคมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีรูปร่าง
 ไม่แน่นอน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2.97 ไมโครเมตร โดยมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดประมาณ
 10.57 ไมโครเมตร และขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดประมาณ 0.32 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 เซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)

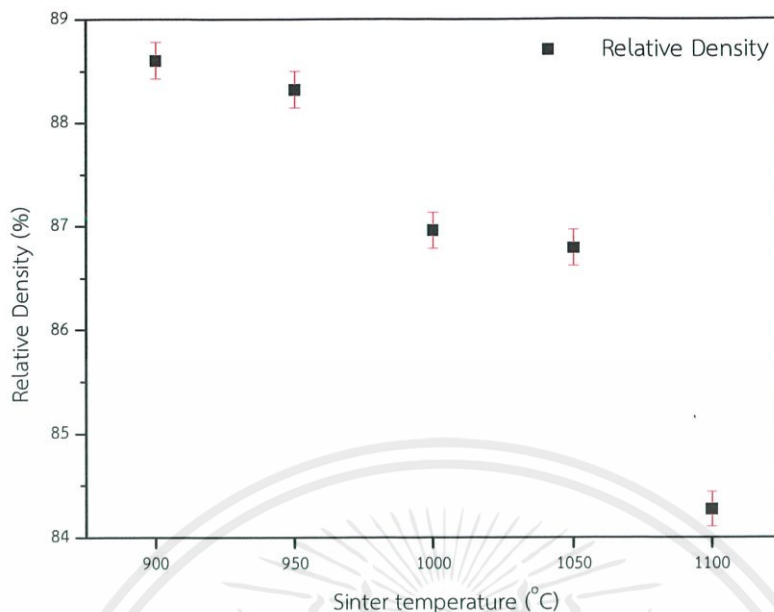
1) สมบัติทางกายภาพ

(1.1) ค่าความหนาแน่นของเซรามิก

หลังจากทำการซินเตอร์เซรามิกในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบตั้งเดิมที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำชิ้นงานที่ได้มาหาความหนาแน่น โดยอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำตามกฎของ อาร์คิมิดีส (Archimedes's method) ดังสมการที่ 3.4 โดยค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนตที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 3.6898 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

อุณหภูมิซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กรัม ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
900	3.26	88.60
950	3.25	88.32
1000	3.20	86.96
1050	3.20	86.79
1100	3.10	84.27



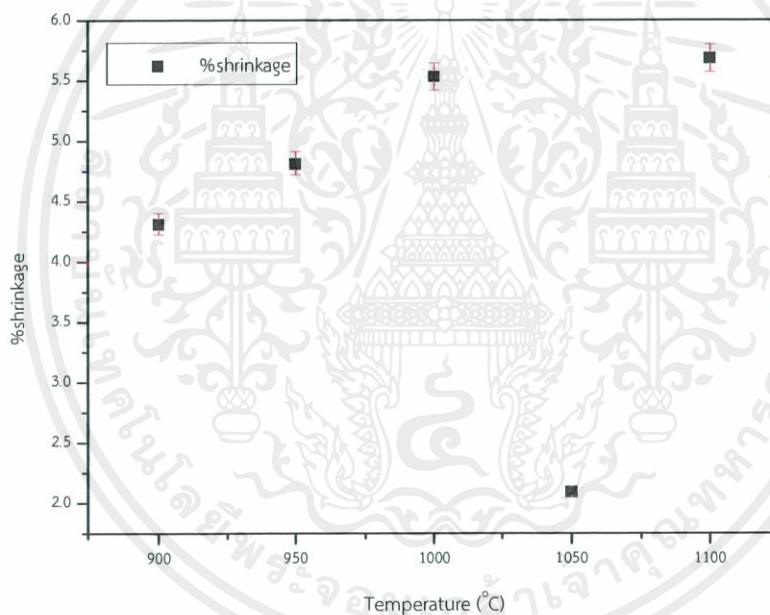
ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)

(1.2) ค่าการหดตัวหลังจากการเผาของเซรามิก

หลังจากทำการซินเตอร์เซรามิกในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบตั้งเดิมที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที เสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการวัดค่าการหดตัวของเซรามิกที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาซินเตอร์ สามารถทำได้โดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกก่อนการซินเตอร์ และหลังการซินเตอร์ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการหดตัวของเม็ดเซรามิกโดยการคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ตามสมการที่ 3.5 แสดงค่าไว้ที่ตาราง 4.13 และสามารถพลอตเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4.17

ตารางที่ 4.13 ค่าการหดตัวของเซรามิกในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต หลังจากผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

อุณหภูมิซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ค่าการหดตัว (เปอร์เซ็นต์)
900	4.31
950	4.81
1000	5.53
1050	3.09
1100	5.68



ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวหลังจากการเผากับอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)

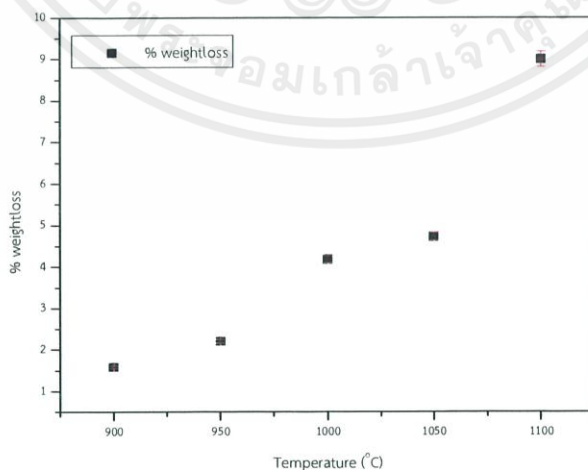
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.3) น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผาของเซรามิก

หลังจากทำการซินเตอร์เซรามิกในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที เสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการชั่งน้ำหนักที่สูญเสียไปของเซรามิกหลังจากการเผาซินเตอร์ สามารถทำได้โดยการชั่งน้ำหนักของเม็ดเซรามิกก่อนการซินเตอร์ และหลังการซินเตอร์ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการหดตัวของเม็ดเซรามิกโดยการคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ตามสมการที่ 3.6 โดยค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.14 และสามารถพลอตเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4.18

ตารางที่ 4.14 น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผาของเซรามิกในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) หลังจากผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

อุณหภูมิซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผา (เปอร์เซ็นต์)
900	1.59
950	2.21
1000	4.18
1050	4.73
1100	8.99

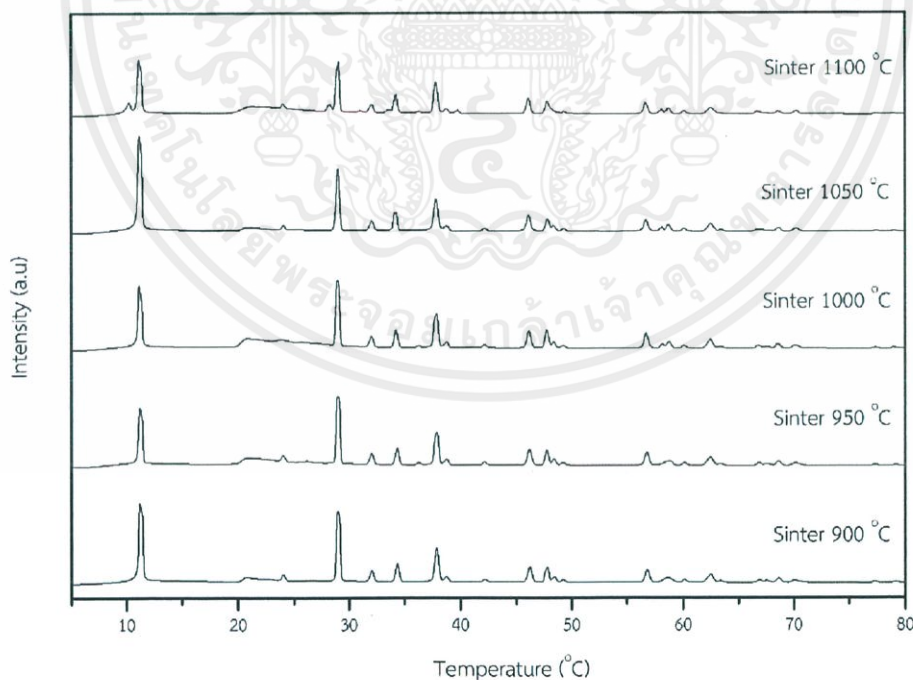


ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผากับอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เฟสที่เกิดขึ้น

เมื่อเซรามิกในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เรียบร้อยแล้ว จะนำเซรามิกมาตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer หรือ XRD) โดยก่อนที่จะนำชิ้นงานไปทำการตรวจวัดจะต้องทำความสะอาดชิ้นงานให้สะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic) เพื่อขจัดสิ่งสกปรกบนผิวหน้าออกให้หมด จากนั้นนำมาขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1000 ตามลำดับ เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ยังคงเหลืออยู่ นำชิ้นงานไปอบไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาตรวจสอบเฟสด้วยเครื่อง XRD โดยภาพที่ 4.19 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบดั้งเดิม จากภาพจะเห็นว่าทุกอุณหภูมิการซินเตอร์มีตำแหน่งของพีคเกิดขึ้นเหมือนกันทุกอัน และเมื่อตรวจสอบกับฐานข้อมูล [48] พบว่า เป็นเฟสบริสุทธิ์และมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ a เท่ากับ 3.8237, b เท่ากับ 15.532, และ c เท่ากับ 2.9727 Å และเมื่อทำการคำนวณขนาดของผลึกตามสมการเชอร์เรอร์ (สมการที่ 3.8) พบว่ามีได้ค่าแสดงไว้ดังตารางที่ 4.15 จากตารางจะเห็นว่าค่าไม่ได้แตกต่างกัน นั่นหมายความว่าเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆไม่ได้ทำให้ขนาดของผลึกเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4.19 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ด้วยการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 1100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ขนาดผลึกของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)

อุณหภูมิการซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)
900	0.34
950	0.38
1000	0.38
1050	0.34
1100	0.33

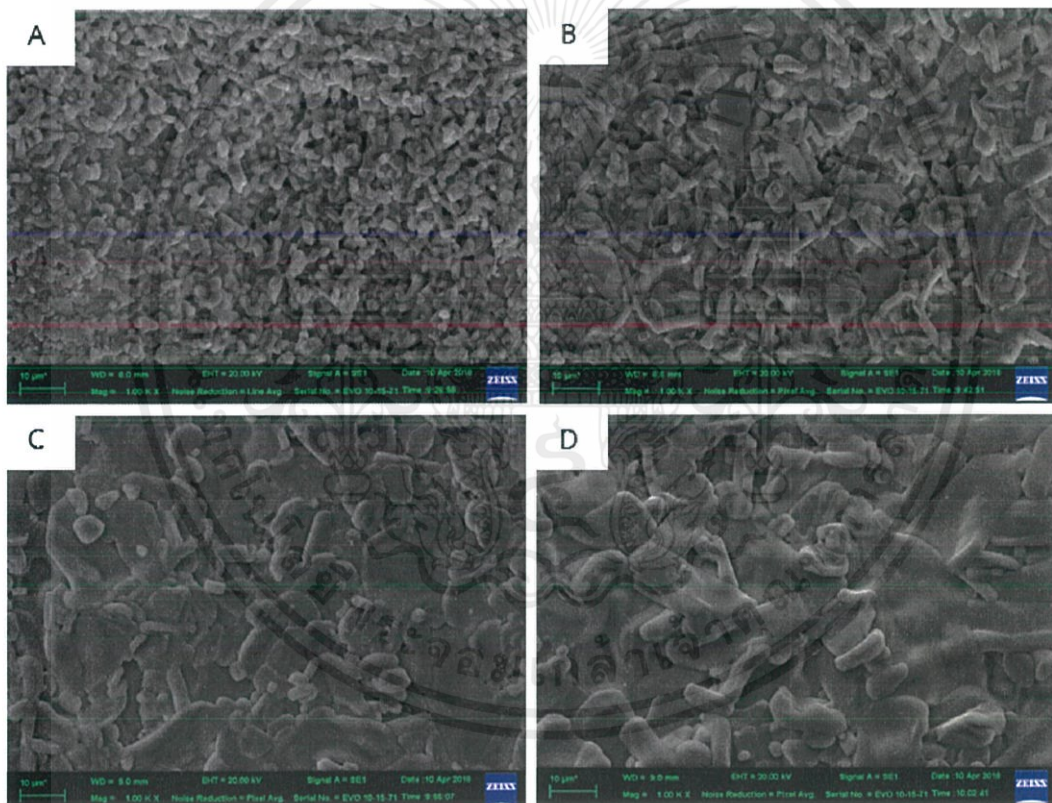
3) ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

เมื่อทำการซินเตอร์เซรามิกระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) โดยก่อนที่จะนำตัวอย่างมาถ่ายภาพนั้นจำเป็นต้องทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงานออกให้หมด จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำชิ้นงานที่ได้ไปเคลือบด้วยทอง (Au) เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง แล้วจึงนำไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) โดยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4.20 ตามลำดับ ซึ่งภาพทั้งหมดถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคโดยรวมจะเห็นว่า เกรนที่เกิดขึ้นในการเผาซินเตอร์แต่ละอุณหภูมิมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน ทั้งนี้เป็นผลมาจากพฤติกรรมการเติบโตของเกรนของสารทั้งสามชนิดนั้นแตกต่างกันและเมื่อทำการหาขนาดเกรน พบว่าเกรนของเม็ดเซรามิกจะมีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการซินเตอร์ คาดว่าเป็นผลมาจากกลไกการส่งผ่านมวลในระหว่างการเผาซินเตอร์ โดยมีปริมาณสัดส่วนของสารทั้งสามชนิดได้กระจายตัวทั่วบริเวณเซรามิก โดยขนาดเกรนเฉลี่ยที่คำนวณได้และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเม็ดเซรามิกที่คำนวณจากสมการ 3.4 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.16 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการซินเตอร์เพิ่มขึ้นเกรนของเม็ดเซรามิกจะใหญ่ขึ้น และลักษณะโครงสร้างจุลภาคมีการจัดเรียงตัวของเกรนที่ค่อนข้างหนาแน่นจับตัวกันดี และพบรูพรุนน้อยบนบริเวณพื้นผิวชิ้นงานซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์และขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)

อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
900	88.60	1.56
950	88.32	3.70
1000	86.96	7.51
1050	86.79	11.88
1100	84.27	12.63



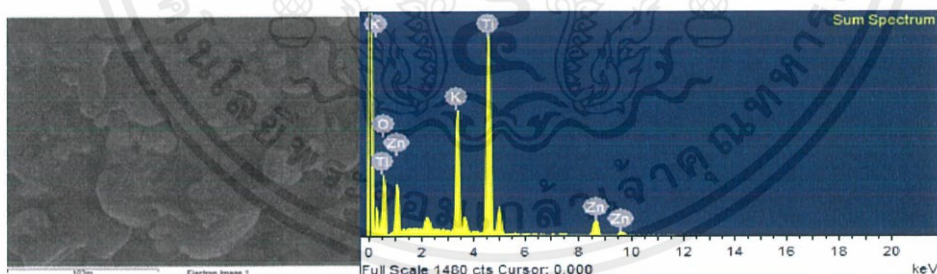
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



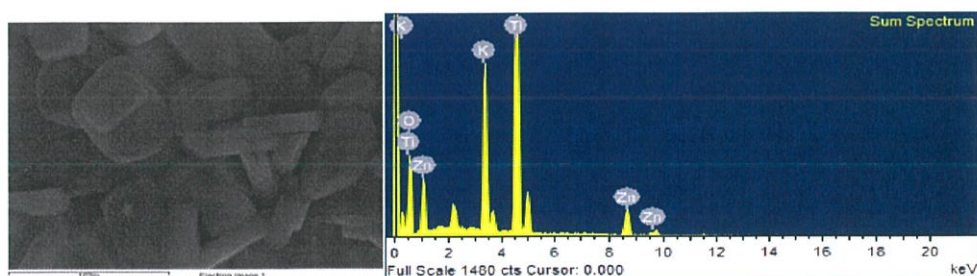
ภาพที่ 4.20 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต โดยที่ (A) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (B) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส (C) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (D) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส (E) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

4) การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy)

การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุต่างๆ ของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy) ซึ่งจะบอกสัดส่วนองค์ประกอบของธาตุ เป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก และอะตอม ซึ่งแสดงข้อมูลไว้ดังภาพที่ 4.21 (A-E) และตารางที่ 4.17-4.21

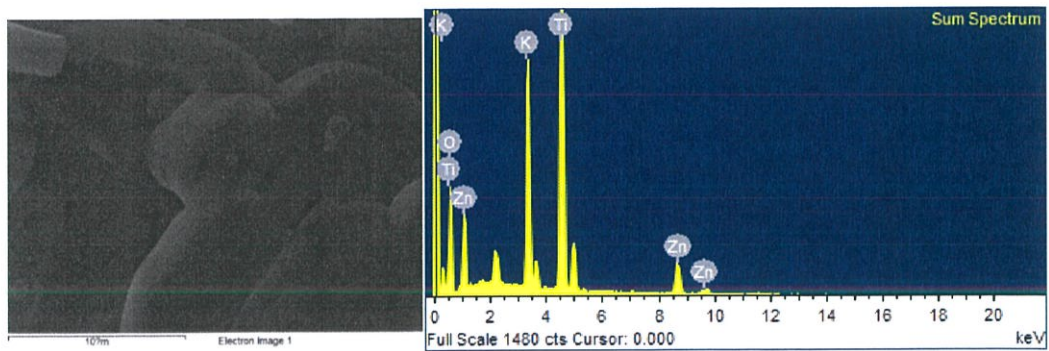


(A)

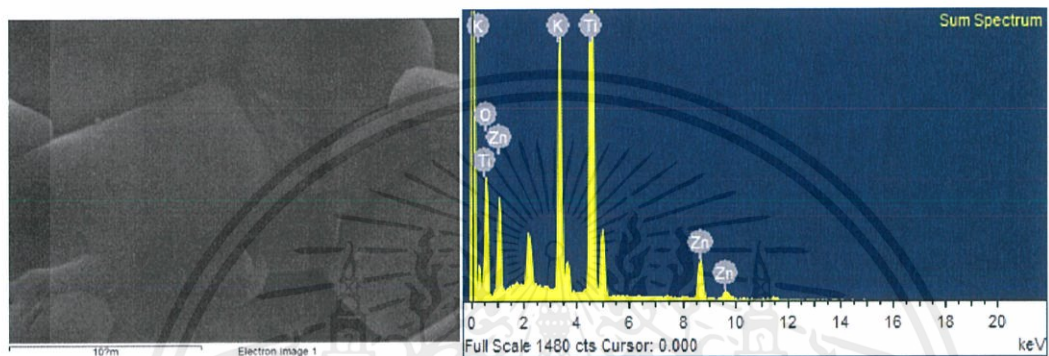


(B)

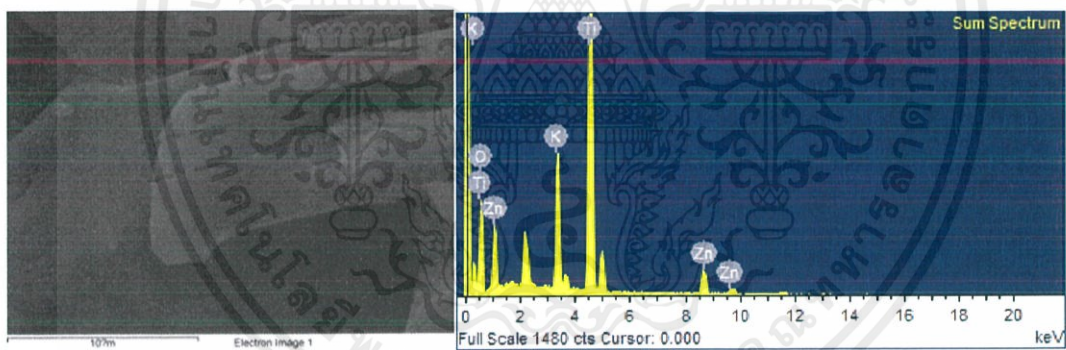
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(C)



(D)



(E)

ภาพที่ 4.21 ผลการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบธาตุของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ที่ผ่านการเผา ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่ (A)900, (B)950, (C)1000, (D)1050, และ(E) 1100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 900 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
K	12.42	8.65
Ti	37.33	21.22
Zn	11.99	5.00
O	38.26	65.13
รวม	100	

ตารางที่ 4.18 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 950 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
K	12.03	8.58
Ti	37.56	37.56
Zn	13.94	5.95
O	36.47	63.60
รวม	100	

ตารางที่ 4.19 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1000 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
K	12.56	8.90
Ti	37.93	21.95
Zn	12.72	5.40
O	36.79	63.75
รวม	100	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1050 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
K	12.15	8.85
Ti	39.07	23.22
Zn	14.01	6.10
O	34.76	61.84
รวม	100	

ตารางที่ 4.21 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1100 องศาเซลเซียส

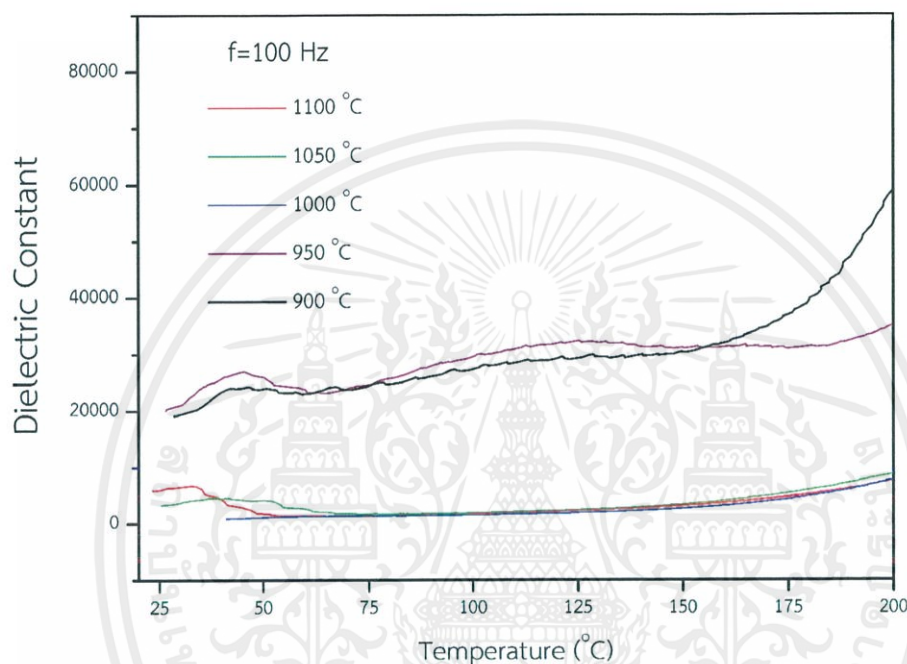
ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
K	9.22	6.45
Ti	39.08	22.32
Zn	13.31	5.57
O	38.39	65.65
รวม	100	

5) สมบัติไดอิเล็กทริก

เมื่อนำเซรามิกในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ไปทำการซินเตอร์ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบดั้งเดิมแล้ว นำสารตัวอย่างที่ได้มาทำขั้วไฟฟ้า (electrode) เพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งการทำขั้วไฟฟ้านั้นเริ่มโดยนำเม็ดเซรามิกที่ไม่มีรอยแตกร้าวไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (ultrasonic) ขัดผิวหน้าให้เรียบได้ระนาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1200 ตามลำดับ เมื่อทำการขัดผิวหน้าเรียบร้อยแล้วจึงนำเม็ดเซรามิกมาอบเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำกาวเงิน (silver paste) ชนิดเผามาทาที่ผิวหน้าของเม็ดเซรามิกทั้งสองด้าน นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที เมื่อเผาเสร็จจึงนำเม็ดเซรามิกที่ได้มาขัดตกแต่งขอบให้เรียบร้อย เพื่อป้องกันการเชื่อมต่อกันของขั้วไฟฟ้าระหว่างผิวหน้าทั้งสอง จากนั้นนำสารตัวอย่างที่ผ่านการทำขั้วไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งก็คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ด้วยเครื่อง LCR ที่ช่วงอุณหภูมิห้อง ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยจะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิ ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ จากภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่ากราฟจะมีแนวโน้มเป็นเหมือนกันคือ เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้นเรื่อยๆจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง โดยที่ความถี่ 100 เฮิร์ต จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มากที่สุด ดังนั้นจึงแสดงผลการทดลองที่เปรียบเทียบจากความถี่ 100 เฮิร์ต พบว่าได้ผลตามภาพที่ 4.22

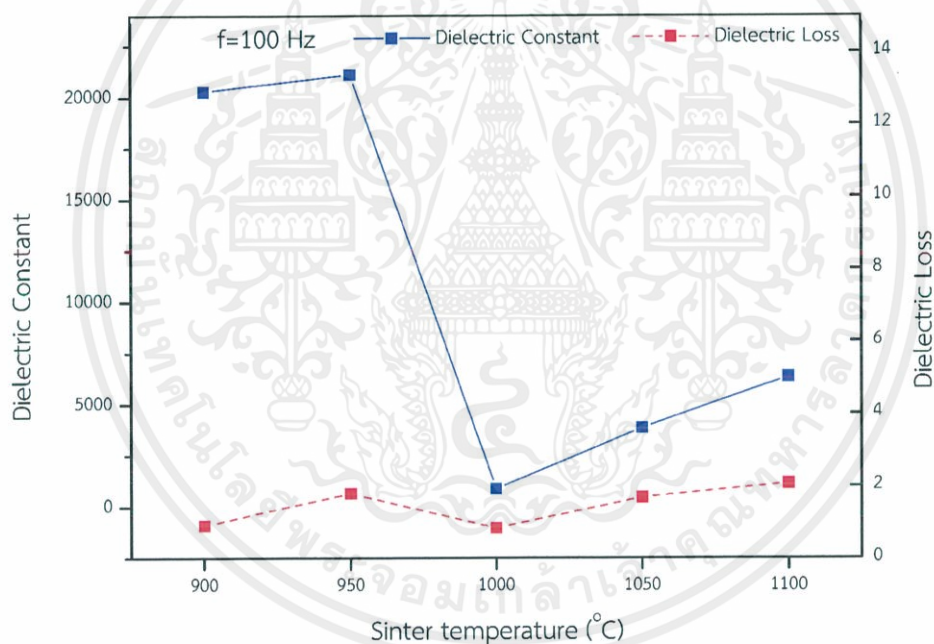


ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิในการซินเตอร์ของ เซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ความถี่ 100 เฮิร์ต ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จากภาพที่ 4.22 เมื่อได้ทำการอ่านค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง ดังตารางที่ 4.22 พบว่าการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุด นั้นแสดงให้ เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิการซินเตอร์ไม่ได้ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ซึ่งอาจเป็นเพราะการซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลทำให้มีจำนวนเกรนมีไม่มากทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง

ตารางที่ 4.22 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิกในระบบ โพลแทสเซียมซิงค์ไททานเนต($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)

อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
900	20274	0.89
950	21106	1.78
1000	870	0.82
1050	3863	1.67
1100	6351	2.06



ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง(30องศาเซลเซียส) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิในการซินเตอร์ของเซรามิกโพแทสเซียมซิงค์ไททานเนต ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ที่ความถี่ 100 เฮิร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 สารในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$)

4.2.2.1 ผงรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต

1) สมบัติกายภาพ

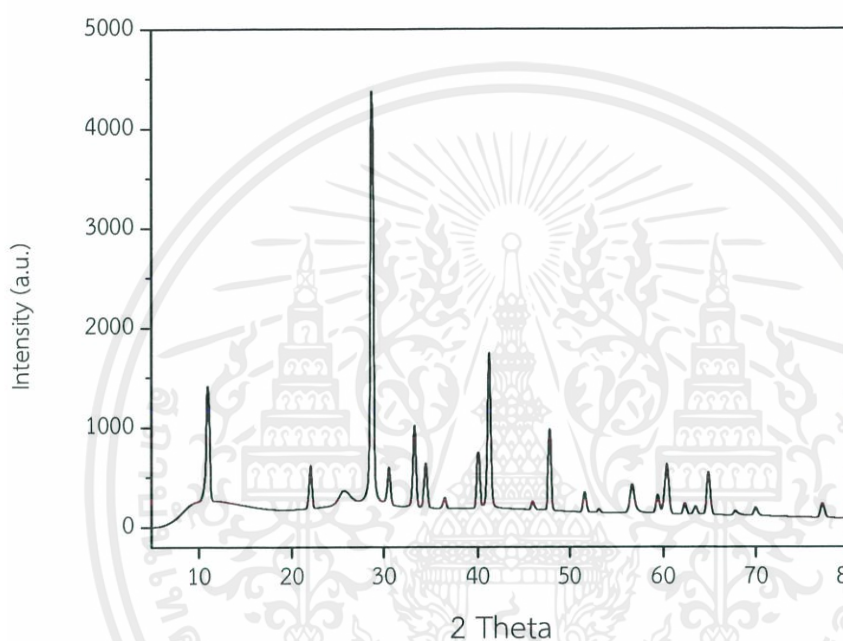
หลังจากทำการเผาแคลไซน์สารรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยมี อัตราขาขึ้น 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที และอัตราขาลง 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบด เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้ว พบว่าผงรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต มีลักษณะเป็นผงสีขาว ละเอียด ดังภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 แสดงลักษณะทางกายภาพของผงรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต

2) เฟสที่เกิดขึ้นของผงรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต

เมื่อผงรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราขาขึ้น 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที และอัตราขาลง 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง เรียบร้อยแล้วนั้น จะนำมาตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer หรือ XRD) จะแสดงโดยภาพที่ 4.25 ซึ่งพบว่ากราฟเป็นเฟสบริสุทธิ์ไม่มีเฟสอื่นแปลกปลอม

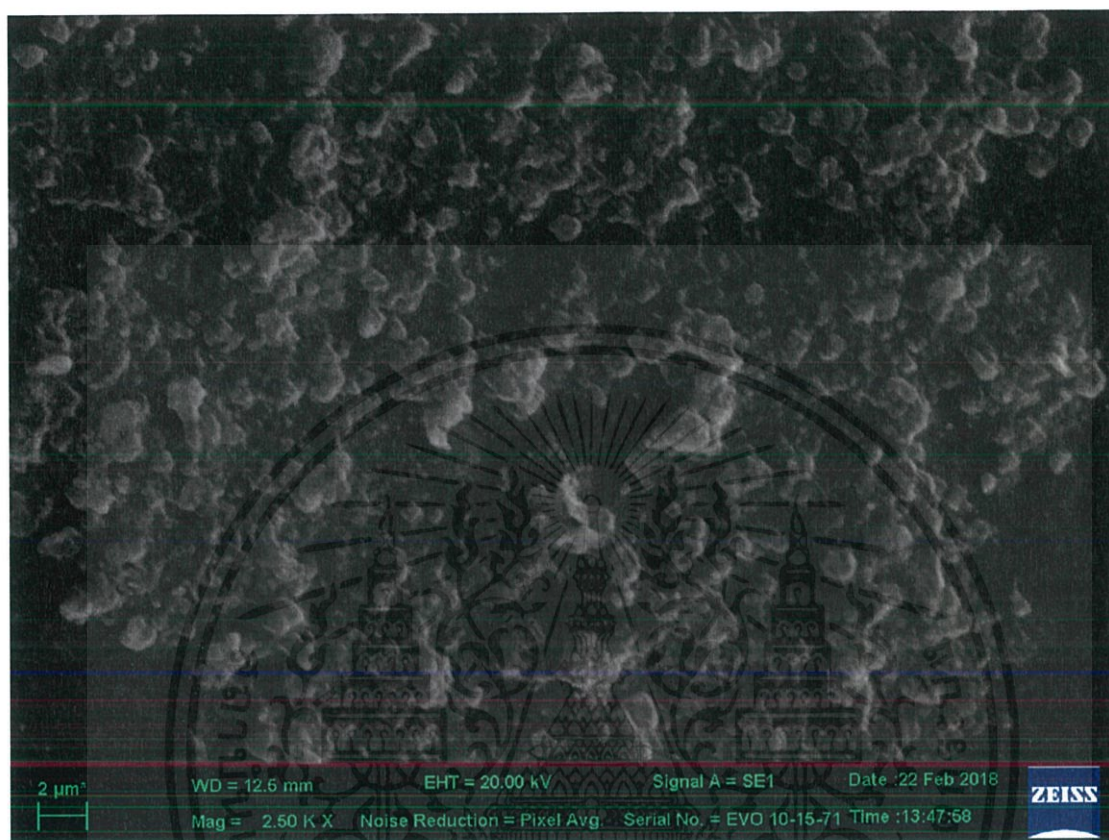


ภาพที่ 4.25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงรูปีเดียมซิงค์ไททาเนตที่ผ่านการเผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

3) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงซีเซียมซิงค์ไททาเนต

เมื่อทำการแคลไซน์ผงรูปีเดียมซิงค์ไททาเนตที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราขาขึ้น 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที และอัตราขาลง 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) โดยการนำผงรูปีเดียมซิงค์ไททาเนตไปผสมกับน้ำกลั่น โดยหยดลงบนแผ่นเทปคาร์บอนสองหน้า จากนั้นนำแท่นทองเหลืองที่นำที่มีชิ้นงานติดไว้อยู่ นำไปทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำ เพื่อให้ผิวของชิ้นงานตัวอย่างมีการนำไฟฟ้า แล้วจึงนำไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) โดยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงไว้ดังภาพที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.26 เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคโดยรวมจะเห็นว่าอนุภาคมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1.98 ไมโครเมตร โดยมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดประมาณ 2.68 ไมโครเมตร และขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดประมาณ 0.05 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.26 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 เซรามิกรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$)

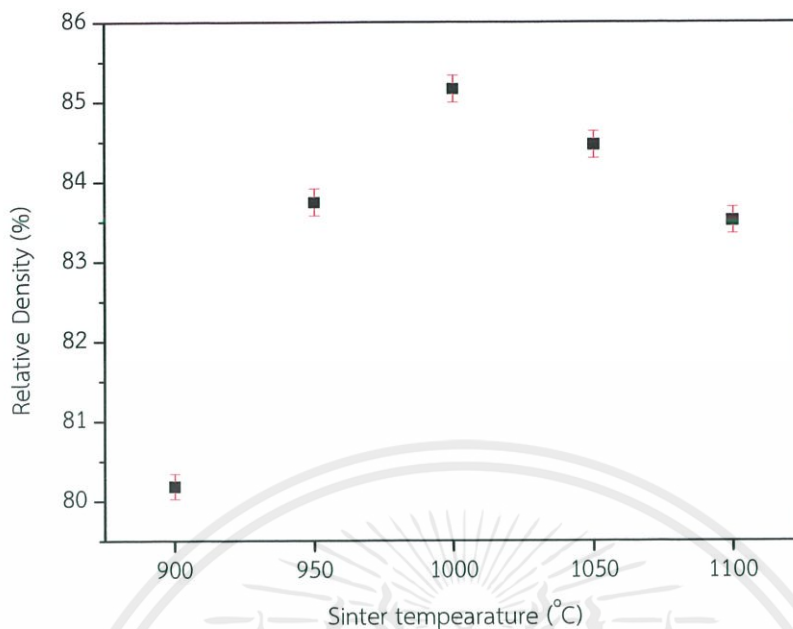
1) สมบัติทางกายภาพ

(1.1) ค่าความหนาแน่นของเซรามิก

หลังจากทำการซินเตอร์เซรามิกในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบตั้งเดิมที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำชิ้นงานที่ได้มาหาความหนาแน่นโดยอาศัย หลักการแทนที่ของน้ำตามกฎของ อาร์คิมิดีส (Archimedes's method) ดังสมการที่ 3.4 โดยค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของรูบิเดียมซิงค์ไททาเนตที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 4.2150 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.23 และสามารถพลอตเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4.27

ตารางที่ 4.23 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

อุณหภูมิซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กรัม ต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
900	3.38	80.18
950	3.53	83.74
1000	3.59	85.16
1050	3.56	84.46
1100	3.52	83.51



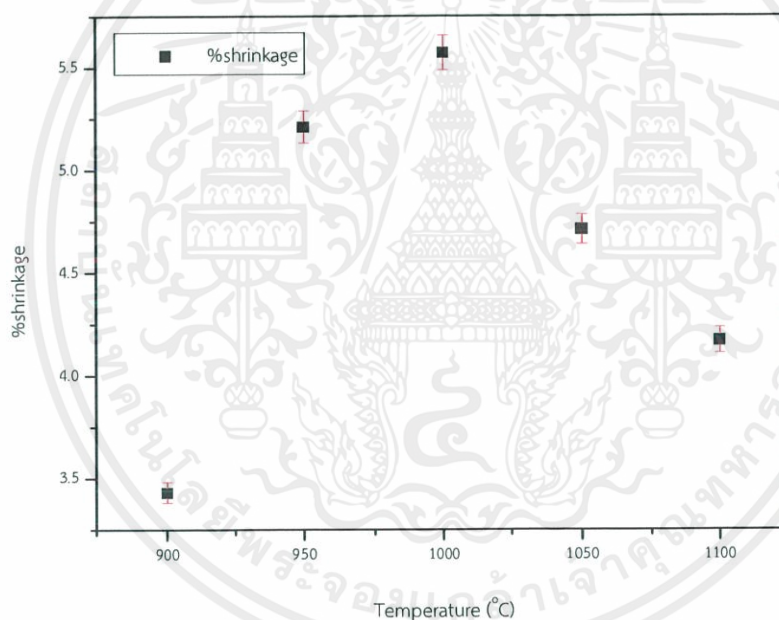
ภาพที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิกรูบิเดียม ซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$)

(1.2) ค่าการหดตัวหลังจากการเผาของเซรามิก

หลังจากทำการซินเตอร์เซรามิกในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบตั้งเดิมที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที เสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการวัดค่าการหดตัวของเซรามิกที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาซินเตอร์ สามารถทำได้โดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกก่อนการซินเตอร์ และหลังการซินเตอร์ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการหดตัวของเม็ดเซรามิกโดยการคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ตามสมการที่ 3.5 ที่แสดงค่าไว้ในตารางที่ 4.14 และสามารถพลอตเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4.28

ตารางที่ 4.24 ค่าการหดตัวของเซรามิกในระบบรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) หลังจากผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

อุณหภูมิซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ค่าการหดตัว (เปอร์เซ็นต์)
900	3.43
950	5.21
1000	5.57
1050	4.71
1100	4.17



ภาพที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวหลังจากการเผาที่อุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิกรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

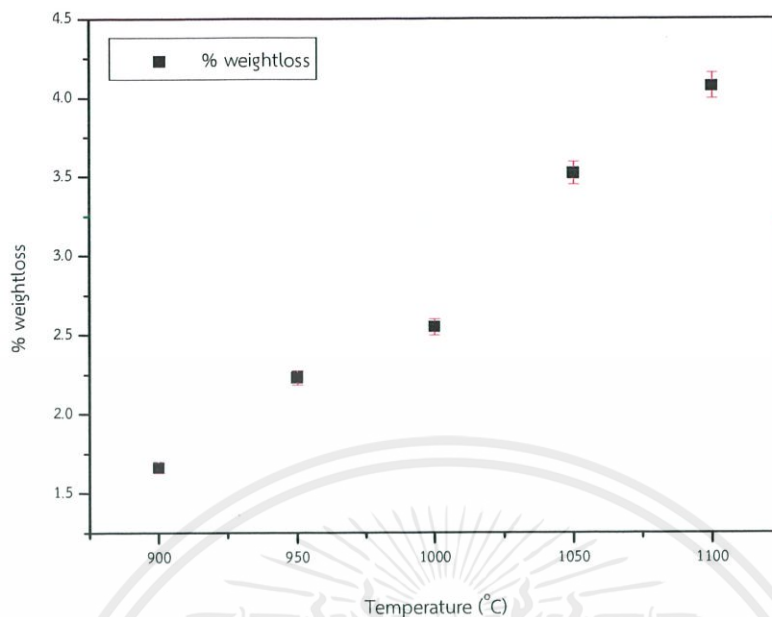
(1.3) น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผาของเซรามิก

หลังจากทำการซินเตอร์เซรามิกในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที เสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการชั่งน้ำหนักที่สูญเสียไปของเซรามิกหลังจากการเผาซินเตอร์ สามารถทำได้โดยการชั่งน้ำหนักของเม็ดเซรามิกก่อนการซินเตอร์ และหลังการซินเตอร์ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการหดตัวของเม็ดเซรามิกโดยการคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ตามสมการที่ 3.6 โดยค่าก็ได้แสดงดังตารางที่ 4.25 และสามารถพลอตเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4.29

ตารางที่ 4.25 น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผาของเซรามิกในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต หลังจากผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

อุณหภูมิซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผา (เปอร์เซ็นต์)
900	1.66
950	2.23
1000	2.55
1050	3.52
1100	4.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



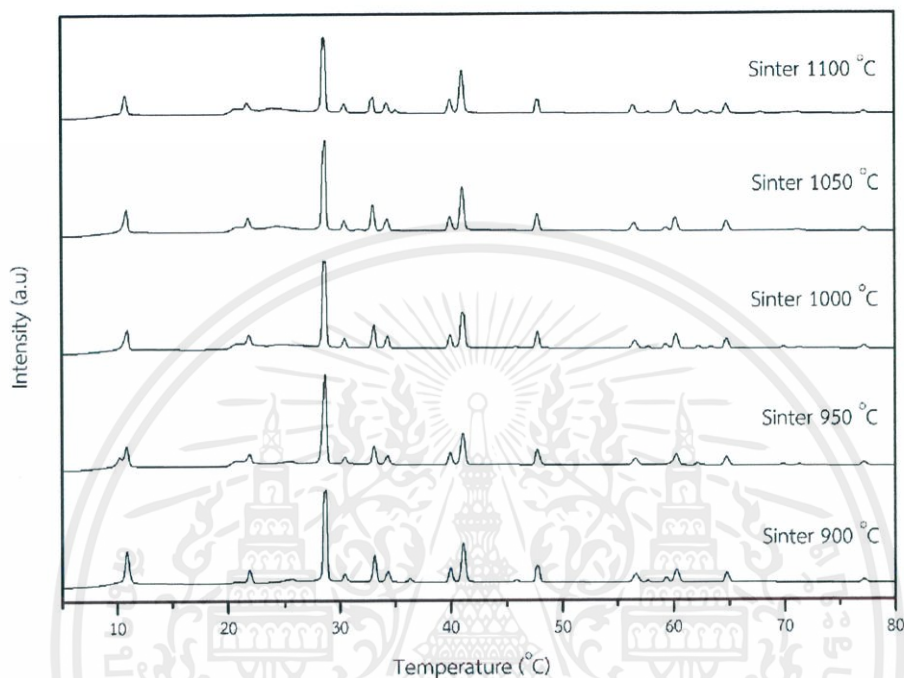
ภาพที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการเผากับอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิกรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$)

2) เฟสที่เกิดขึ้น

เมื่อเซรามิกในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เรียบร้อยแล้ว จะนำเซรามิกมาตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer หรือ XRD) โดยก่อนที่จะนำชิ้นงานไปทำการตรวจวัดจะต้องทำความสะอาดชิ้นงานให้สะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (ultrasonic) เพื่อขจัดสิ่งสกปรกบนผิวหน้าออกให้หมด จากนั้นนำมาขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1000 ตามลำดับ เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ยังคงเหลืออยู่ นำชิ้นงานไปอบไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาตรวจสอบเฟสด้วยเครื่อง XRD โดยภาพที่ 4.21 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ที่ผ่านการซินเตอร์ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบดั้งเดิม จากภาพจะเห็นว่าทุกอุณหภูมิการซินเตอร์มีตำแหน่งของพีคเกิดขึ้นเหมือนกันทุกอัน และเมื่อตรวจสอบกับฐานข้อมูล [48] พบว่า เป็นเฟสบริสุทธิ์และมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ a เท่ากับ 3.8311, b เท่ากับ 16.067, และ c เท่ากับ 2.9720 Å และเมื่อทำการคำนวณขนาดของผลึกตามสมการเชอร์เรอร์ (สมการที่ 3.8) พบว่ามีได้ค่าแสดงไว้ดังตารางที่ 4.26 จากตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าค่าไม่ได้แตกต่างกัน นั่นหมายความว่าเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆไม่ได้ทำให้ขนาดของผลึกเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ด้วยการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 1100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.26 ขนาดผลึกของเซรามิกรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$)

อุณหภูมิการซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)
900	0.37
950	0.34
1000	0.36
1050	0.38
1100	0.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

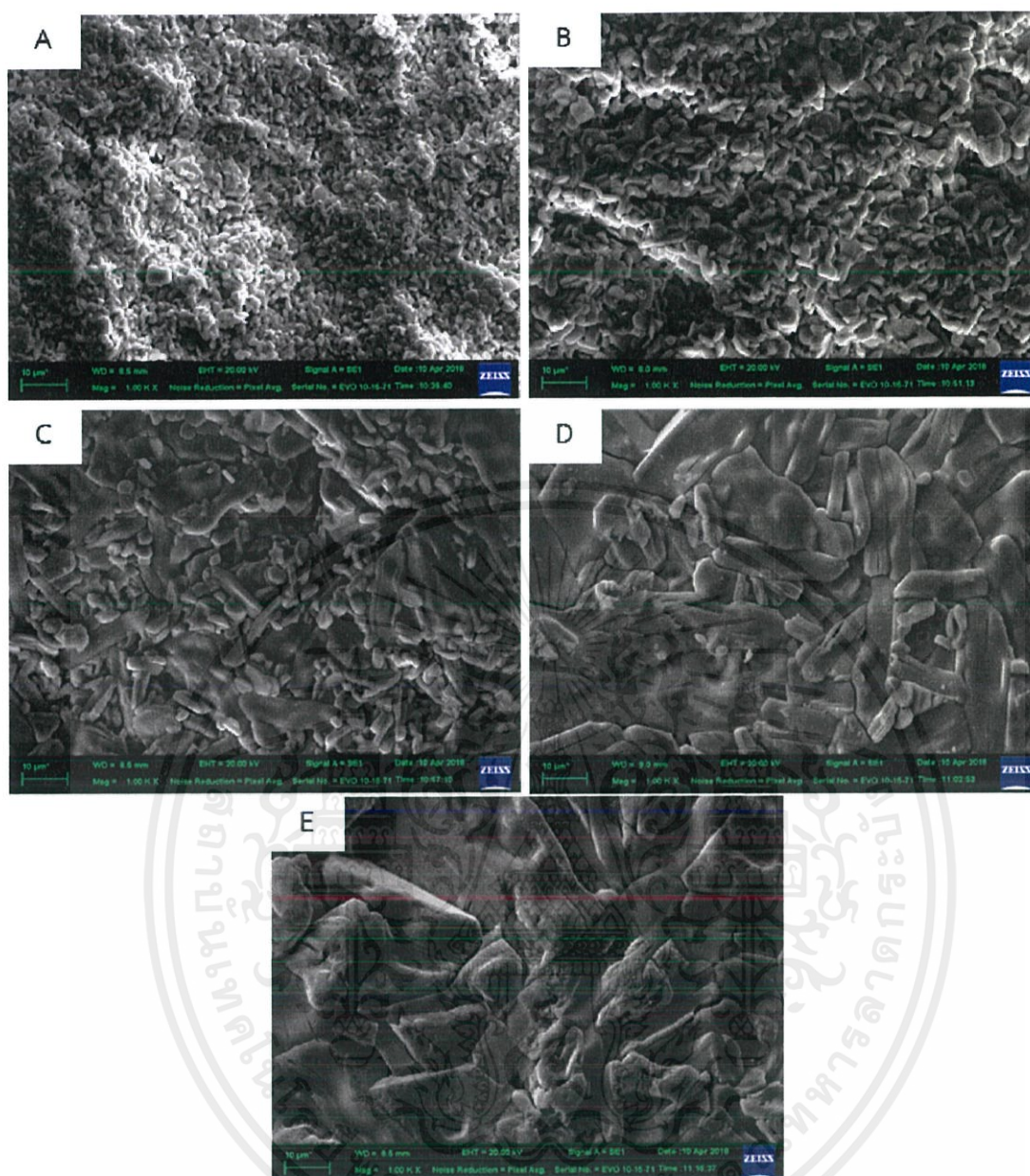
เมื่อทำการซินเตอร์เซรามิกระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) โดยก่อนที่จะนำตัวอย่างมาถ่ายภาพนั้นจำเป็นต้องทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงานออกให้หมด จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำชิ้นงานที่ได้ไปเคลือบด้วยทอง (Au) เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง แล้วจึงนำไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) โดยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4.31 ตามลำดับ ซึ่งภาพทั้งหมดถ่ายที่ก่าลังขยาย 1000 เท่า โดยเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคโดยรวมจะเห็นว่า เกรนที่เกิดขึ้นในการเผาซินเตอร์แต่ละอุณหภูมิมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน ทั้งนี้เป็นผลมาจากพฤติกรรมการเติบโตของเกรนของสารทั้งสามชนิดนั้นแตกต่างกัน และเมื่อทำการหาขนาดเกรนพบว่าเกรนของเม็ดเซรามิกจะมีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการซินเตอร์ คาดว่าเป็นผลมาจากกลไกการส่งผ่านมวลในระหว่างการเผาซินเตอร์ โดยที่มีปริมาณสัดส่วนของสารทั้งสามชนิดได้กระจายตัวทั่วบริเวณเซรามิก โดยขนาดเกรนเฉลี่ยที่คำนวณได้และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเม็ดเซรามิกที่คำนวณจากสมการ 3.4 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.27 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการซินเตอร์เพิ่มขึ้นเกรนของเม็ดเซรามิกจะใหญ่ขึ้น และลักษณะโครงสร้างจุลภาคมีการจัดเรียงตัวของเกรนที่ค่อนข้างหนาแน่นจับตัวกันดี และพบรูพรุนน้อยบนบริเวณพื้นผิวชิ้นงานซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้

ตารางที่ 4.27 ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์และขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$)

อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
900	80.18	1.28
950	83.74	2.28
1000	85.16	8.06
1050	84.46	11.23
1100	83.51	21.79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

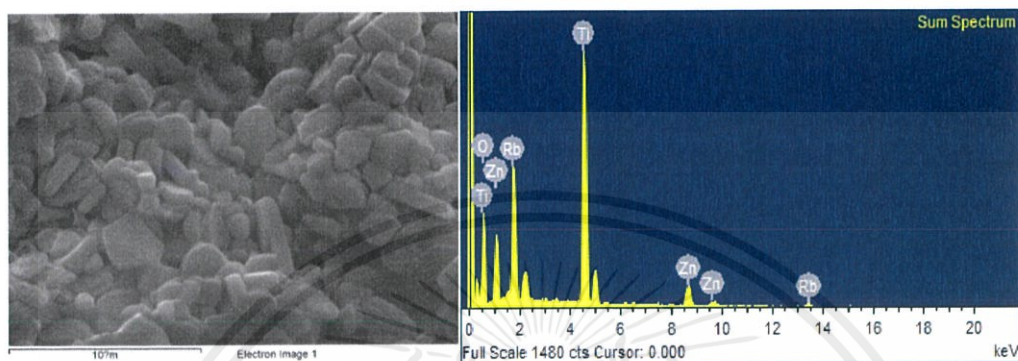


ภาพที่ 4.31 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกในระบบรูปีเดียมซิงค์ไททาเนต โดยที่ (A) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (B) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส (C) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (D) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส (E) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

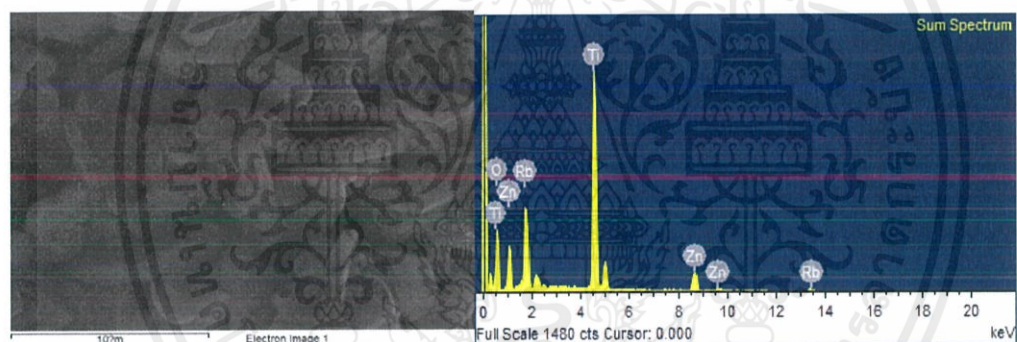
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy)

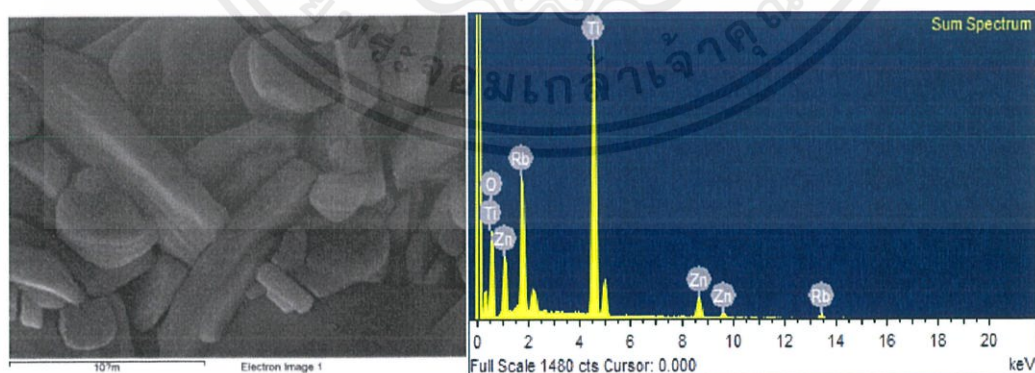
การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุต่างๆ ของเซรามิกรูปเม็ดแข็งไททานิต ด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy) ซึ่งจะบอกสัดส่วนองค์ประกอบของธาตุ เป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก และอะตอม ซึ่งแสดงข้อมูลไว้ดังภาพที่ 4.32 (A-E) และตารางที่ 28-32



(A)

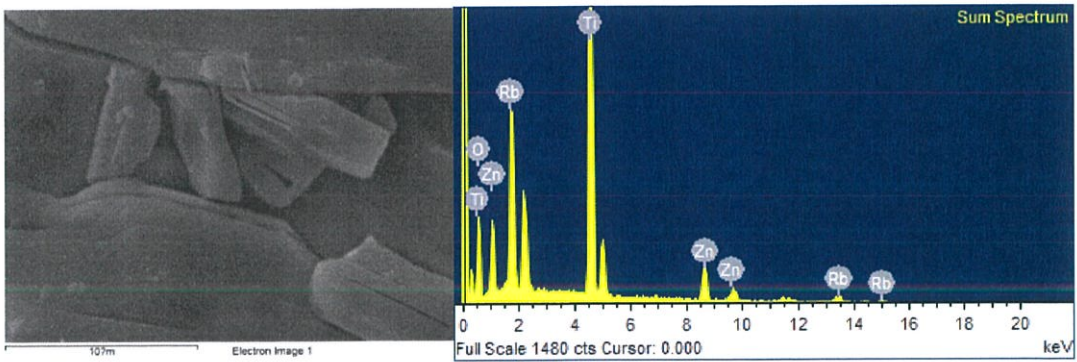


(B)

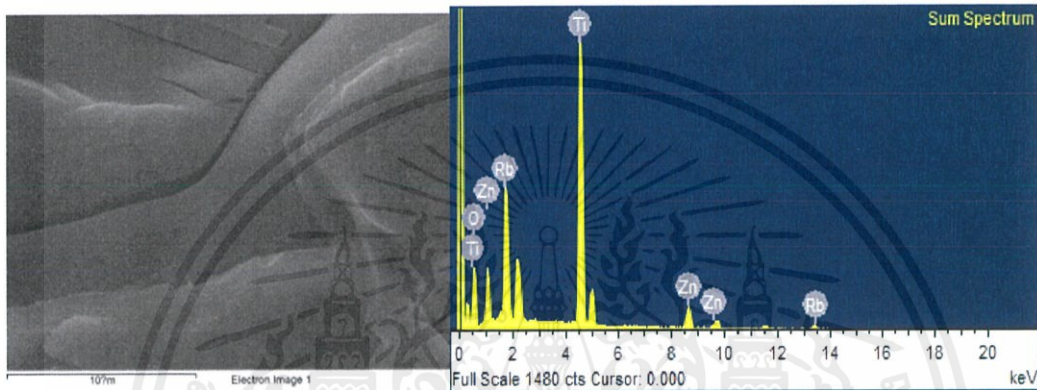


(C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(D)



(E)

ภาพที่ 4.32 ผลการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบธาตุของเซรามิกรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ที่ผ่านการเผา ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่ (A)900, (B)950, (C)1000, (D)1050, และ(E)1100องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.28 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 900 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
Rb	17.37	5.98
Ti	33.94	20.86
Zn	11.84	5.33
O	36.86	67.83
รวม	100	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.29 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 950 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
Rb	12.24	5.07
Ti	37.42	23.78
Zn	14.48	6.74
O	33.86	64.41
รวม	100	

ตารางที่ 4.30 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1000 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
Rb	17.05	5.93
Ti	35.08	21.76
Zn	11.84	5.38
O	36.04	66.93
รวม	100	

ตารางที่ 4.31 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1050 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
Rb	17.13	6.60
Ti	40.87	28.11
Zn	13.65	6.88
O	28.36	58.40
รวม	100	

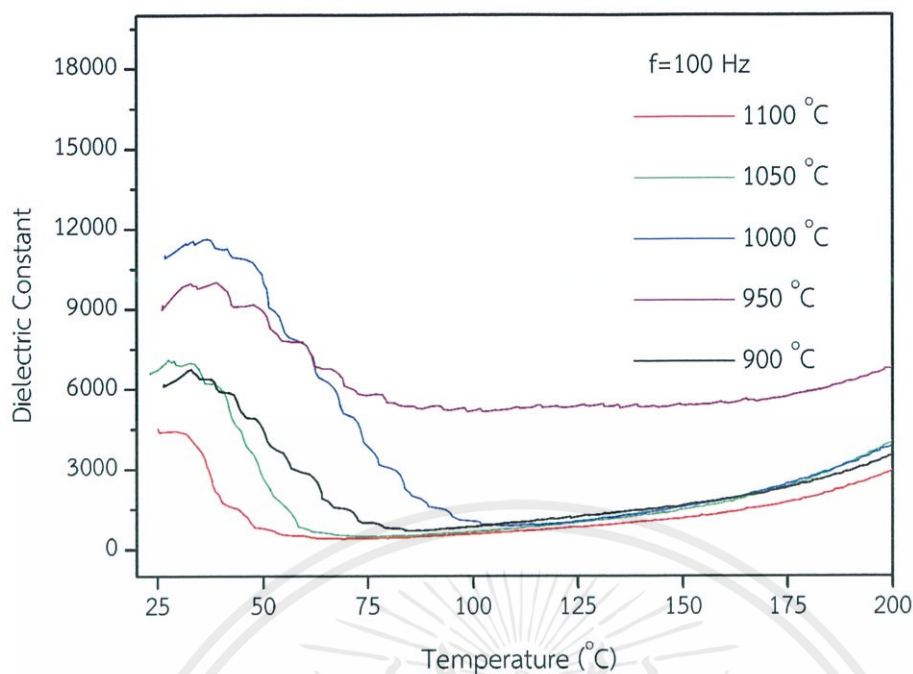
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.32 องค์ประกอบธาตุของสารในระบบรูปีเตียมซิงค์ไททาเนต ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1100 องศาเซลเซียส

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	อะตอม (เปอร์เซ็นต์)
Rb	17.85	6.73
Ti	40.01	26.92
Zn	12.19	6.01
O	29.95	60.34
รวม	100	

5) สมบัติไดอิเล็กทริก

เมื่อนำเซรามิกในระบบรูปีเตียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ไปทำการซินเตอร์ด้วยเทคนิคการซินเตอร์แบบดั้งเดิมแล้ว นำสารตัวอย่างที่ได้มาทำขั้วไฟฟ้า (electrode) เพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งการทำขั้วไฟฟ้านั้นเริ่มโดยนำเม็ดเซรามิกที่ไม่มีรอยแตกร้าวไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic) ขัดผิวหน้าให้เรียบได้ระนาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1200 ตามลำดับ เมื่อทำการขัดผิวหน้าเรียบร้อยแล้วจึงนำเม็ดเซรามิกมาอบเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำกาวเงิน (silver paste) ชนิดเผามาทาที่ผิวหน้าของเม็ดเซรามิกทั้งสองด้าน นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที เมื่อเผาเสร็จจึงนำเม็ดเซรามิกที่ได้มาขัดตกแต่งขอบให้เรียบร้อย เพื่อป้องกันการเชื่อมต่อกันของขั้วไฟฟ้าระหว่างผิวหน้าทั้งสอง จากนั้นนำสารตัวอย่างที่ผ่านการทำขั้วไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งก็คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ด้วยเครื่อง LCR ที่ช่วงอุณหภูมิห้อง ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิ ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ จากภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่ากราฟจะมีแนวโน้มเป็นเหมือนกันคือ เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้นเรื่อยๆจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง โดยที่ความถี่ 100 เฮิร์ต จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มากที่สุด ดังนั้นจึงแสดงผลการทดลองที่เปรียบเทียบกับความถี่ 100 เฮิร์ต พบว่าได้ผลตามภาพที่ 4.33

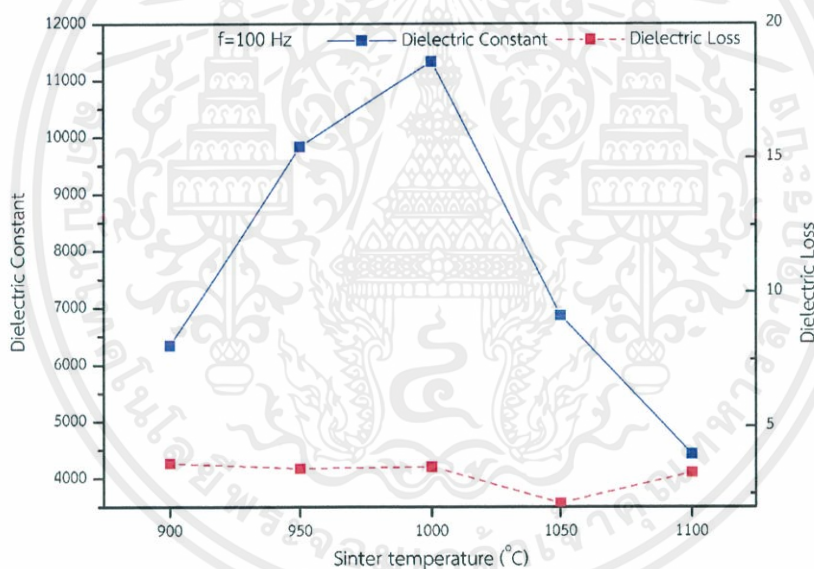


ภาพที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิในการซินเตอร์ของ เซรามิกรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ความถี่ 100 เฮิร์ต ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จากภาพที่ 4.33 เมื่อได้ทำการอ่านค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ดังตารางที่ 4.33 พบว่าการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุด นั้นแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิการซินเตอร์ไม่ได้ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นในระบบ รูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ซึ่งอาจเป็นเพราะการซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลทำให้มีจำนวนเกรนมีไม่มากทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง ซึ่งสามารถดูกราฟเปรียบเทียบได้จากภาพที่ 4.34

ตารางที่ 4.33 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิกในระบบรูบิเดียม ซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ความถี่ 100 เฮิร์ต ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
900	6339	3.62
950	9832	3.43
1000	11327	3.49
1050	6868	2.13
1100	4429	3.28



ภาพที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง(30องศาเซลเซียส) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิในการซินเตอร์ของเซรามิกรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ที่ความถี่ 100 เฮิร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการปรับปรุงโครงสร้างชั้นของสารไททานเนตแล้ว จึงนำสารทั้ง 2 ระบบ คือ โพลีสเซียมซิงค์ไททานเนต และรูบิเดียมซิงค์ไททานเนต จึงมาทำการเปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้า ความถี่ 100 เฮิร์ต ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กับซีเซียมซิงค์ไททานเนต ได้ผลดังตารางที่ 19 พบว่า ระบบซีเซียมซิงค์ไททานเนตมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด ตามด้วยโพลีสเซียมซิงค์ไททานเนต และรูบิเดียมซิงค์ไททานเนต

ตารางที่ 4.34 การเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ ซีเซียมซิงค์ไททานเนต โพลีสเซียมซิงค์ไททานเนต และรูบิเดียมซิงค์ไททานเนต ความถี่ 100 เฮิร์ต ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ระบบ	ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส		
	อุณหภูมิซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ ไดอิเล็กทริก	ค่าการสูญเสีย ไดอิเล็กทริก
ซีเซียมซิงค์ไททานเนต	1100	1630230	5.41
โพลีสเซียมซิงค์ไททานเนต	950	21106	1.78
รูบิเดียมซิงค์ไททานเนต	1000	11327	3.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากเซรามิกทั้ง 3 ระบบคือ ระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Cs}_{0.35}\text{Zn}_{0.175}\text{Ti}_{0.825}\text{O}_2$) โพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) และรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) ที่ทำการซินเตอร์แบบดั้งเดิม (normal sintering) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของเงื่อนไขในการเตรียมที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ เฟสที่เกิดขึ้น โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า ทั้งนี้ข้อสรุปและข้อเสนอแนะที่ได้จากผลการทดลองทั้งหมดมีดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) สามารถประดิษฐ์เซรามิกวัสดุผสมในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต มีอัตราส่วนของสารซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3) 8.8093 กรัม, ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 2.2005 กรัม และไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 10.1799 กรัม โดยเทคนิคมิกซ์ออกไซด์แบบดั้งเดิมร่วมกับการซินเตอร์แบบดั้งเดิมในบรรยากาศปกติได้สำเร็จภายใต้การซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที

2) เซรามิกในระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต ที่ผ่านกระบวนการผสมและเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 950 1000 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส พบว่ามีความเป็นผงสาร ซึ่งยืนยันจากการปรากฏเฟสซีเซียมซิงค์ไททาเนตในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการซินเตอร์ทำให้เซรามิกมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 6.57 ทั้งนี้ยังตรวจพบการละลายเข้าหากันของเฟสทั้งสองจากการรวมกันของพีค (011)/(060) และเป็นโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก สำหรับผลการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกในระบบก็พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับความถี่ ที่ความถี่ 100 เฮิร์ตให้ค่าไดอิเล็กทริกที่สูงสุด จึงนำมาทำการเปรียบเทียบ ซึ่งผลที่ได้คือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็มีค่าสูงขึ้น (ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1100 องศาเซลเซียส) มีค่าไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ประมาณ 1630230 จากผล XRD และการเพิ่มของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการซินเตอร์นั้นคาดว่าเป็นผลมาจากการที่ไอออนของซิงค์ เข้าไปแทนที่ไอออนของไททาเนียม (Ti^{4+}) ในโครงสร้างของซีเซียมซิงค์ไททาเนตโดยมีความร้อนในระหว่างกระบวนการซินเตอร์เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา

3) การประดิษฐ์ปรับปรุงสารในระบบโพแทสเซียมซิงค์ไททาเนต ($\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) และรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต ($\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$) โดยมีกระบวนการทดลองที่เหมือนกันกับระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนต โดยมีอัตราส่วนของสารโพแทสเซียมคาร์บอเนต (KHCO_3) 8.089 กรัม, ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2887 กรัม ไททาเนียมไดออกไซด์(TiO_2) 12.9058 กรัม, และระบบรูบิเดียมซิงค์ไททาเนต โดยมีปริมาณสารรูบิเดียมคาร์บอเนต(Rb_2CO_3) 7.5173 กรัม, ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 2.6498 กรัม ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 11.2652 กรัมพบว่ามีความเป็นวัสดุผสมเมื่อดูจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นสูงสุดคือ 3.26 (อุณหภูมิซินเตอร์ 900 องศาเซลเซียส) และ 3.59 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร(อุณหภูมิการซินเตอร์ 1000 องศาเซลเซียส) ในระบบ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ และ $\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$ ตามลำดับ ทั้งนี้ความหนาแน่นของ 2 ระบบไม่ขึ้นกับอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ คาดว่าเกิดจากระหว่างการอัดเม็ดอาจมีความคาดเคลื่อนของน้ำหนักระหว่างการกดซึ่งส่งผลต่อความหนาแน่นระหว่างนำไปทำการเผาซินเตอร์ในขั้นตอนถัดไป โดยระบบ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ มีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 7.45 ไมโครเมตร และระบบ $\text{Rb}_{0.75}\text{Zn}_{0.375}\text{Ti}_{1.625}\text{O}_4$ ประมาณ 8.92 ไมโครเมตร สำหรับการศึกษาศสมบัติไดอิเล็กทริกทั้ง 3 ระบบ พบว่าระบบซีเซียมซิงค์ไททาเนตมีค่าไดอิเล็กทริก 1630230 (ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1100 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีความมากกว่าระบบโพแทสเซียมมีค่าไดอิเล็กทริก 20274 (ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 900 องศาเซลเซียส) และรูบิเดียมซิงค์ไททาเนตที่มีค่าไดอิเล็กทริก 11327 (ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ 1000 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างชั้น พบว่าค่าไดอิเล็กทริกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่ได้อยู่ในแนวโน้มเดียวกันกับขนาดของอะตอมที่สามารถอธิบายได้ คาดว่าระยะห่างระหว่างชั้น ยังคงมีหลายพารามิเตอร์สำหรับสมบัติไดอิเล็กทริก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) สำหรับเทคนิคการซินเตอร์นั้นมีลำดับขั้นในการให้ความร้อนในระหว่างการซินเตอร์ที่หลากหลาย ทำให้เซรามิกได้มีความหนาแน่นที่ค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้สามารถปรับปรุงชิ้นงานได้โดยการออกแบบลำดับขั้นตอนการให้ความร้อนของระบบการซินเตอร์ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงรูพรุนในชิ้นงานที่มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ

2) สารตั้งต้นทั้ง 3 สารมีความไวต่อความชื้น เพราะฉะนั้นเมื่อทำการทดลองแต่ละขั้นตอนเสร็จเรียบร้อยแล้วควรเก็บสารไว้ในตู้ดูดความชื้น

บรรณานุกรม

- [1] [Online]. Available : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MLCC
Construction.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MLCC_Construction.png)
- [2] [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor>
- [3] [Online]. Available : <http://pongsatornsa.blogspot.com/2015/12/capacitor.html>
- [4] [Online]. Available : <http://www.scimath.org/lesson-physics/item/7205-capacitor>
- [5] [Online]. Available :
http://www.global.tdk.com/techmag/electronics_primer/vol2.htm
- [6] [Online]. Available : <https://phukphan.blogspot.com/2016/05/what-is-capacitor.html>
- [7] [Online]. Available : <http://pongsatornsa.blogspot.com/2015/12/capacitor.html>
- [8] [Online]. Available : <http://www.nawattakam.com/article>
- [9] [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/velectronic1/capacitor>
- [10] [Online]. Available : <https://happypa.wikispaces.com/responseToken>
- [11] [Online]. Available : <http://pongsatornsa.blogspot.com/2015/12/capacitor.html>
- [12] [Online]. Available : <http://pongsatornsa.blogspot.com/2015/12/capacitor.html>
- [13] [Online]. Available :
http://www.ppnresource.com/product.detail_431643_th_4938838
- [14] [Online]. Available : <https://www.amplifiedparts.com/products/capacitor-365pf-variable>
- [15] [Online]. Available : <http://pongsatornsa.blogspot.com/2015/12/capacitor.html>
- [16] [Online]. Available : <http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-03.html>
- [17] [Online]. Available : <http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-03.html>
- [18] [Online]. Available : <http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-03.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] [Online]. Available : <https://www.slideshare.net/mkafzza/340-important-non-silicates>
- [20-21] [Online]. Available : http://www.wikiwand.com/en/Titanate_nanosheet
- [22] [Online]. Available : <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/aa6500>
- [23] [Online]. Available : https://www.researchgate.net/figure/Crystal-structures-of-potassium-titanates-K-2-Ti-4-O-9-K-2-Ti-6-O-13_fig5_280222697?_sg=8mDt-fsuZfDx0vG_LrRRqkLag6Ty6tfZXJb2va_IK2a-PY1eGEhp54kluA5JY-WrylZVtWGGtN5pdZeKr990jQ
- [24] Szilvia Papp et.al. May 2005. "The influence of temperature on the structural behaviour of sodium tri- and hexa-titanates and their protonated forms" J. Of Solid state chemistry 178 : 1614-1619.
- [25-40] Krisztian Kordas et.al. April 2015 "Layered titanate nanostructures: perspectives for industrial exploitation" J. Translational Materials Research 2 : 1613-2053.
- [41] Tao Gao et.al. June 2009 "Defect Chemistry of a Zinc-Doped 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.
- [42] E. GREY et.al. December 1984 "New cesium Titanate Layered Structures" J. Of Solid state chemistry 58 : 350-356.
- [43] 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.
- [44] [Online]. Available : http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=1818&pageid=40&read=true&count=true
- [45] [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_crystallography

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[46-47] [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>

[48] Tosapol M et.al. 2017 “Beyond soft chemistry-bulk and surface modifications of polycrystalline lepidocrocite titanate induced by post-synthesis thermal treatment” J.The Royal Society of Chemistry 2017 : S1-S6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชिरวิทย์ ยศราวาศ
วัน เดือน ปีเกิด	26 มีนาคม พ.ศ.2539
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลร้อยเอ็ด อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 186 หมู่ที่ 19 ถนนปัทมานนท์ ตำบลรอบเมือง อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด 45000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2550 จบการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเมืองร้อยเอ็ด พ.ศ.2556 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย พ.ศ.2557 เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้