



การประดิษฐ์เซรามิกบิสมัทโซเดียมซาแมเรียมไททาเนต-แบเรียมไททาเนต  
ด้วยเทคนิคการสังเคราะห์แบบเผาไหม้

Fabrication of Bismuth Sodium Samarium Titanate - Barium Titanate Ceramics  
by Combustion Synthesis Technique

นางสาว ญานิกา สิริภัทรธนากุล

นาย ภาณุวัฒน์ อินทนู

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณจากโครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2562



การประดิษฐ์เซรามิกบิสมัทโซเดียมซามารีอัมไททาเนต-แบเรียมไททาเนต  
ด้วยเทคนิคการสังเคราะห์แบบเผาไหม้

Fabrication of Bismuth Sodium Samarium Titanate - Barium  
Titanate Ceramics by Combustion Synthesis Technique

นางสาว ญานิกา สิริภัทรธนากุล

นาย ภาณุวัฒน์ อินทนู

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณจากโครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อปริญญาโท การประดิษฐ์เซรามิกบิสมัทโซเดียมชาแมเรียมไททานิต-แบเรียมไททานิต  
ด้วยเทคนิคการสังเคราะห์แบบเผาใหม่

ชื่อ นามสกุล นางสาว ญานิกา สิริภัทรธนากุล  
นาย ภาณุวัฒน์ อินทนู

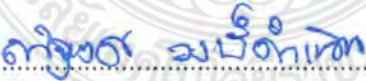
ชื่อปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต  
สาขาวิชา วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม  
คณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนพงศ์ สารอินทร์, ปร.ด.  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ณัฐพงศ์ วงศ์ดำเนิน, ปร.ด.

คณะกรรมการสอบได้ให้ความเห็นชอบปริญญาโทฉบับนี้แล้ว

..... วิไลวรรณ สิ้นกุล ..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิไลวรรณ สิ้นกุล, วท.ด.)

..... จิระศักดิ์ ..... กรรมการ  
(จิระศักดิ์ ธาระจักร์, ปร.ด.)

.....  ..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนพงศ์ สารอินทร์, ปร.ด.)

.....  ..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ณัฐพงศ์ วงศ์ดำเนิน, ปร.ด.)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
อนุมัติให้รับปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม  
วันที่ 5 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2563

ชื่อปริญญาบัตร	การประดิษฐ์เซรามิกบิส്മัทโซเดียมซามาเรียมไททาเนต-แบเรียมไททาเนต ด้วยเทคนิคการสังเคราะห์แบบเผาไหม้
ชื่อ สกุล	นางสาว ญานิกา สิริภัทรธนากุล นาย ภาณุวัฒน์ อินทนู
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม
คณะ	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ปีการศึกษา	2562

### บทคัดย่อ

บิส്മัทโซเดียมไททาเนตเจือด้วย Samarium Titanate ที่ความเข้มข้น 0.04 mol% โดยการเตรียมแบบ Ball mill เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการเผาไหม้แบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ตั้งแต่อุณหภูมิที่ 940, 960 และ 970 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 7 ชั่วโมง โดยศึกษารายละเอียดของสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์และสมบัติเชิงกลของเซรามิก ทำการทดสอบ XRD เพื่อศึกษาโครงสร้างของเซรามิก BSNT-BT ให้เป็นไปตามโครงสร้างแบบ Perovskite พบว่าเมื่อเผา ณ อุณหภูมิที่ต่างกันทำให้เม็ดเซรามิกมีความหนาแน่นมากขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา อีกทั้งพบว่า P-E hysteresis loop และค่าไดอิเล็กทริกมีความสัมพันธ์และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้ยังทดสอบค่าความแข็งของเซรามิก ณ อุณหภูมิที่ต่างกันโดยอุณหภูมิมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของเซรามิก BSNT-BT

คำสำคัญ : ค่าไดอิเล็กทริก ,  $\text{Sm}^{3+}$  , แบเรียมไททาเนต, P-E hysteresis loop , อุณหภูมิ

**Project title** Fabrication of Bismuth Sodium Samarium Titanate - Barium Titanate Ceramics by Combustion Synthesis Technique

**Author** Miss. Yanika Siriphattharathanakun  
Mr. Panuwat Ainthano

**Degree** Bachelor of Science (Industrial Materials Science)

**Major program** Industrial Materials Science  
Faculty of science and technology

**Academic Year** 2019

### ABSTRACT

Bismuth Sodium Titanium doped with Samarium Titanate at a concentration of 0.04 mol% by ball mill at 24 hours and increasing the temperature in the traditional combustion process at different temperatures. (From the temperature at 940,960 and 970 degrees Celsius) for 7 hours studies of the details of the dielectric and mechanical properties of the ceramics, XRD tests were conducted to study the structure of the BSNT-BT ceramic to be in accordance with the Perovskite structure It was found that when sintered at different temperatures, the density of the ceramic pellets increased with the firing temperature. In addition, the PE hysteresis loop and dielectric values were correlated and tended to Same direction in addition, the hardness of the ceramic is also tested at different temperatures, with temperatures affecting the various properties of the ceramic BSNT-BT.

**Keywords:** dielectric property, Samarium Titanate , Barium Titanate ,  
P-E hysteresis loop , temperature

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การประดิษฐ์เซรามิกบิสมัทโซเดียมซามาแมเรียมไททานต-แบเรียมไททานตด้วยเทคนิคการสังเคราะห์แบบเผาใหม่” เกิดขึ้นด้วยความตั้งใจในการดำเนินงานศึกษาพัฒนาวัสดุเซรามิกให้มีสมบัติในด้านต่างๆให้ดีขึ้นเพื่อสามารถนำมาใช้ต่อยอดในอุตสาหกรรมในอนาคตได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนพงศ์ สารอินทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำสอนและชี้แนะแนวทางต่างๆในการดำเนินงานที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิไลวรรณ ลีนะกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ จิระศักดิ์ ธาระจักร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ญัฐพงศ์ วงศ์ดำเนิน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จักรพงษ์ แก้วขาว ที่ให้ความกรุณาในการอนุญาตใช้เครื่องมือต่างๆ ที่มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพันธ์ บุญอินทร์ ผู้ให้คำปรึกษาและแนวทางในการดำเนินงาน และ นายพีระพงษ์ แยมชุมพร พี่เลี้ยงผู้ดูแลในการปฏิบัติงาน ที่สอนและให้เทคนิคต่างๆในการทำงาน ตั้งแต่กระบวนการเตรียมสารไปจนถึงกระบวนการทดสอบ ซึ่งทำให้การทำงานในครั้งนี้ผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ รุ่นพี่ ที่ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และ ศูนย์วิจัยเฟอร์โรอิเล็กทริก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆ ที่สามารถนำมาปรับใช้ในการทำงานและปรับปรุงแก้ไขงานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครทุกท่านที่เคยสั่งสอนและให้ความรู้จนก่อให้เกิดความรู้และสามารถนำมาใช้และแก้ปัญหาต่างๆในการวิจัยครั้งนี้ได้เป็นอย่างมาก และ สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณครอบครัวทั้ง บิดา มารดา ที่เป็นผู้ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการดำเนินงาน ขอขอบคุณ เพื่อนๆ และรุ่นพี่ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและคอยสนับสนุนอย่างดีเสมอมา

ผู้วิจัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน	2
2. แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 อิเล็กโทรเซรามิก (ElectroCeramics)	3
2.1.1 พิโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectricceramic)	3
2.1.2 เฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกส์ (Ferroelectricsceramic)	6
2.1.3 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว (Leadfreepiezoelectricmaterials)	6
2.1.4 โครงสร้าง BN	7
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.2.1 เฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์	8
2.2.2 ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกและสเปกตรัมของไดอิเล็กทริก	9
2.2.1 โพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเอง	11
2.3 การเตรียมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกด้วยกระบวนการแบบดั้งเดิม	13
2.3.1 การบดย่อยแบบลูกบอล	14
2.3.2 สารยึดเหนี่ยว	17
2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	18
2.4.1 เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	20
2.4.3 เครื่องวิเคราะห์ไดอิเล็กทริกและอิมพีแดนซ์	22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
3. วิธีดำเนินการ	
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	25
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร	25
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการ Ball mill	25
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการ Calcination และ Sintering	25
3.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเซรามิก	26
3.1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์	26
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	26
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	26
3.3.1 การออกแบบสูตรทางเคมีของเซรามิก	26
3.3.2 กระบวนการ Ball mill	27
3.3.3 กระบวนการอัดขึ้นรูป	27
3.3.4 กระบวนการเผาแคลไซน์	28
3.3.5 กระบวนการ Sintering	29
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	30
3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล (Density)	30
3.4.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	31
3.4.3 การทดสอบ Linear Shrinkage	32
3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า (P-E hysteresis loop)	32
3.4.5 การทดสอบค่าความแข็ง (Vickers Hardness)	33
3.4.6 การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)	33
4. ผลการทดลอง และอภิปรายผล	
4.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก BSNT-BT	34



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 ลักษณะของเซรามิก BSNT-BT ที่เตรียมที่เงื่อนไข $x=0.04$ ณ อุณหภูมิที่ 940,960 และ 970 องศาเซลเซียส	34
4.1.2 ความหนาแน่น (Density)	34
4.1.3 การหดตัวเชิงเส้น (Linear Shrinkage)	35
4.1.4 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness)	35
4.2 โครงสร้างของเซรามิก BSNT-BT	37
4.2.1 การศึกษาโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	37
4.3 สมบัติไฟฟ้าของเซรามิก BSNT-BT	38
4.3.1 ค่า Dielectric ของเซรามิก BSNT-BT $x=0.04$ ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	38
4.3.2 ค่า Impedance ของเซรามิก BSNT-BT $x=0.04$ ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	41
4.3.3 P-E hysteresis loop parameters ของเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่าง	44
5. สรุปผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่าง	46
5.2 สมบัติทางไฟฟ้า BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่าง	46
5.3 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	
ประวัตินักศึกษา	

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	ระยะเวลาการดำเนินงาน	2
2.1	แสดงชนิดของเม็ดบดสำหรับการบดย่อยแบบบอลที่มีขายในตลาด	15
4.1	แสดงผลค่าความแข็งของตัวอย่างเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	36



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2.1	โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ของ BNT	8
2.2	โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ $ABO_3$	8
2.3	การจัดเรียงตัวของแบบบรรจุชิตรูปลูกบาศก์ (Cubic closed packed: ccp)	9
2.4	แสดงภาพรวมของชุดเครื่องมือสำหรับบดย่อยด้วยลูกบอลแบบ	17
2.5	เครื่อง micro Vickers hardness HMV-G-FOR Automated Models SHIMADZU	18
2.6	รอยกดของ Micro Vicker Hardness	19
2.7	เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	20
2.8	เครื่องมือวิเคราะห์ความต้านทานไดอิเล็กทริกและอิมพีแดนซ์	22
3.1	กระบวนการ Ball mill	27
3.2	(ก) อัดขึ้นรูปด้วยแรงดัน 400 MPa	28
3.2	(ข) ชี้นงานขนาด 10 มิลลิเมตร	28
3.3	(ก) ใส่ชี้นงานในถ้วยครุซีเบล	29
3.3	(ข) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์	29
3.4	ชี้นงานหลังจากการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 7 ชั่วโมง	29
3.5	(ก) ต้มชี้นงานเป็นเวลา 3 ชั่วโมง	31
3.5	(ข) วัดค่า Density ของอากาศและน้ำ	31
3.6	(ก) การเตรียมผงเซรามิก	31
3.6	(ข) การวัดค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	31
3.7	(ก) การเตรียมชี้นงาน	32
3.7	(ข) วางชี้นงานเพื่อวัดสมบัติทางไฟฟ้า	32
3.8	(ก) การหล่อชี้นงาน	33
3.8	(ข) การวัดค่าความแข็ง	33
3.9	(ก) การวัดค่า Dielectric	33
3.9	(ข) เก็บบันทึกข้อมูล	33
4.1	เซรามิก BSNT-BT $x=0.04$ ณ อุณหภูมิ 940,960 และ 970 องศาเซลเซียส	34
4.2	กราฟแสดงค่า Density ที่เงื่อนไข $x=0.04$ ที่อุณหภูมิ 940,960 และ 970 องศาเซลเซียส	34
4.3	กราฟแสดงค่าการหดตัว ณ อุณหภูมิ 940,960 และ 970 องศาเซลเซียส	35

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 ผลการทดสอบค่าความแข็งของเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	36
4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของเซรามิก BSNT-BT	38
4.6 (ก) การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเปรียบเทียบกับความถี่ ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	38
4.6 (ข) การเปลี่ยนแปลงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับความถี่ของเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	39
4.7 (ก) การเปรียบเทียบค่าส่วนจริงของค่าไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	40
4.7 (ข) การเปรียบเทียบค่าส่วนจินตภาพของไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	40
4.8 (ก) การเปรียบเทียบค่าส่วนจริงของเซรามิก BSNT-BT กับความถี่	41
4.8 (ข) การเปรียบเทียบค่าส่วนจินตภาพของเซรามิก BSNT-BT กับความถี่ ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	42
4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของเซรามิก BSNT-BT กับความถี่ ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	43
4.10 (ก) P-E hysteresis loop เซรามิก BSNT-BT 940 องศาเซลเซียส (ข) P-E hysteresis loop เซรามิก BSNT-BT 960 องศาเซลเซียส (ค) P-E hysteresis loop ของเซรามิก BSNT-BT 970 องศาเซลเซียส	44-45

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

มนุษย์รู้จักการทำเซรามิกหลากหลายรูปแบบ เพื่อใช้ในชีวิตประจำวันมายาวนานกว่า 20,000 ปี จนกระทั่งเข้าสู่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมในศตวรรษที่ 19 จึงได้มีการนำเซรามิกมาใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม ทำให้ผู้คนเริ่มตระหนักถึงศักยภาพที่มากกว่าที่เคยเป็นมา จนมาถึงปัจจุบันเซรามิกถูกนำมาต่อยอดเพื่อตั้งประสิทธิภาพและประโยชน์ออกมาให้ได้มากที่สุด ด้วยกระบวนการทางด้านนวัตกรรมและเทคโนโลยีที่ก้าวหน้า ทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีเซรามิกในรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า “เซรามิกขั้นสูง” (High performance ceramic หรือ Advance ceramic) ซึ่งเกิดจากการนำวัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูงจากการสังเคราะห์หรือควบคุมคุณภาพ มาผ่านกระบวนการผลิตที่มีความซับซ้อน เพื่อให้ได้เซรามิกที่มีคุณสมบัติโดดเด่นในหลายๆ ด้าน เช่น เป็นฉนวนความร้อนสูง มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องยนต์ อุปกรณ์การแพทย์ และฉนวนกันความร้อนของกระสวยอวกาศ

ในช่วงปี 1990 เซรามิกใสเริ่มเป็นที่สนใจในการนำไปงานด้านเลเซอร์ เพื่อเป็นวัสดุทดแทนการใช้วัสดุชนิดผลึกเดี่ยวในระบบของเลเซอร์ของแข็ง (Solid State Lasers) เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นตัวกำเนิดแสงเลเซอร์ (Laser Medium) มักจะมีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้เตรียมวัสดุผลึกเดี่ยวได้ยาก เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ทนอุณหภูมิซึ่งมีราคาแพง ดังนั้นปัจจุบันเซรามิกใสจึงเป็นที่ยอมรับในการใช้งานแทนวัสดุผลึกเดี่ยวอย่างกว้างขวาง

ในปัจจุบันได้มีการนำ Piezoelectric ceramics มาใช้อย่างกว้างขวางในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเป็นวัสดุที่ใช้งานได้ซึ่งแปลงพลังงานเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้ามาปรับเปลี่ยนฟังก์ชันในการทำงานให้สามารถใช้งานในด้านของอุตสาหกรรมด้านการเก็บพลังงาน เลเซอร์ หรือเกี่ยวกับตัวส่งสัญญาณที่มีความถี่สูงที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับเทคโนโลยี จึงมีการนำมาใช้กันในรูปแบบที่หลากหลายไม่ว่าจะเป็นในด้านของอิเล็กทรอนิกส์ หรือด้านไฟฟ้า โดยมีการนำมาพัฒนาเป็นระบบใหม่ๆ หรือการนำมาประยุกต์ใช้โดยมีการเติมแต่งสารเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เซรามิกเราจะพบว่าผลิตภัณฑ์เซรามิกนั้นมีมากมายซึ่งอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้แก่ชิพในโทรศัพท์ทรานส์ดิวเซอร์บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นต้นดังนั้นเซรามิกที่ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์จึงถูกเรียกว่าอิเล็กทรอนิกส์เซรามิกปัจจุบันมีการเติบโตด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เซรามิกอย่างแพร่หลายเนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์อย่างก้าวกระโดดเพื่อมาทดแทนแบบเก่าที่มีการใส่สารที่อันตรายโดยอิเล็กทรอนิกส์เซรามิกแบบเก่าจะมีการผสมสารที่เป็นอันตรายเช่น ตะกั่วเพื่อต้องการให้เกิดการนำไฟฟ้าจึงทำให้มีการพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์เซรามิกแบบใหม่ขึ้นมาทดแทนแบบเก่าที่มีการใส่สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

#### 2.1 อิเล็กทรอนิกส์เซรามิก (ElectroCeramics)

เซรามิกใช้สมบัติทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์แม่เหล็กแสงเป็นหลักอิเล็กทรอนิกส์เซรามิกนั้นเป็นกลุ่มเซรามิกที่มีมากมายหลายชนิดและครอบคลุมสมบัติด้านต่างๆหลายอย่างได้แก่ ไฟฟ้าแม่เหล็กแสงและความร้อนเป็นต้นตัวอย่างเช่นไดอิเล็กทริกเซรามิกเช่นแบเรียมไททาเนตสำหรับใช้ทำตัวเก็บประจุไฟฟ้าไพโซอิเล็กทริกเซรามิกซึ่งเป็นเซรามิกที่สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานกล-พลังงานไฟฟ้ากลับไปมาได้วัสดุนี้เมื่อให้แรงกลเข้าไปจะสามารถเปลี่ยนแรงกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้หรือในทางกลับกันสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลได้ตัวอย่างเช่น เลเซอร์โคเนตไททาเนตสำหรับใช้ทำทรานส์ดิวเซอร์ (transducer) ชุดโพลิตเซลส์สำหรับเครื่องชั่งขนาดใหญ่ตัวจุดเตาแก๊ส (gasignitor) หรือที่ใกล้ตัวเราก็คือการดับวันเกิดที่เมื่อเปิดแล้วมีเสียงเพลงดังขึ้นก็อาศัยหลักการของไพโซอิเล็กทริกเซรามิกนั่นเองนอกจากนี้อิเล็กทรอนิกส์เซรามิกยังมีเซรามิกแม่เหล็ก (magneticceramics) เช่น เฟอร์ไรต์ (ferrite,  $Fe_3O_4$ ) ซึ่งใช้เป็นวัสดุบันทึกข้อมูล [1]

##### 2.1.1 ไพโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectricceramic)

วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กน้อยเมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าถ้าความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้ากำลังสองเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์อิเล็กทรอนิกส์สตริกทีฟ (electrostrictiveeffect) ในขณะที่วัสดุบางตัวจะแสดงปรากฏการณ์ในทางตรงกันข้ามกล่าวคือมีการเกิดโพลาริเซชันทางไฟฟ้า (electricalpolarization)

ขึ้นเมื่อเกิดความเครียดในวัสดุเนื่องจากความเค้นที่ใส่เข้าไปปรากฏการณ์ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric effects) โดยการประมาณอย่างคร่าวๆถ้าการเกิดโพลาริเซชัน (polarization) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้นจะเรียกว่าปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกโดยตรง (direct piezoelectric effect) และในทางกลับกันวัสดุไพโซอิเล็กทริกยังสามารถที่จะมีการเกิดขึ้นของความเครียดซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ใส่ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่าปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกโดยอ้อมปรากฏการณ์อิเล็กโทรสตริกที่ฟสามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์

$$X = ME^2 \quad (2.1)$$

โดยที่ M เป็นค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรสตริกที่ฟหรือถ้าแสดงในเทอมของการกระจัดทางไดอิเล็กทริก D ก็จะได้ว่า

$$X = QD^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ Q เป็นค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรสตริกที่ฟอีกตัวหนึ่ง

จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรสตริกที่ฟเป็นเทนเซอร์ลำดับที่สี่ (four-rank tensor) เนื่องจากค่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทนเซอร์ความเครียด (ลำดับที่สอง) กับผลคูณไขว้ (cross product) ของ D หรือ E ในทุกทิศทางในวัสดุผลึกเชิงเดี่ยวทั้ง 32 หมู่ (class) มีอยู่ 11 หมู่ ที่มีสมมาตรศูนย์กลาง (center of symmetry) ดังนั้นจึงไม่มีขั้วไฟฟ้า (non-polar) ในขณะที่อีก 21 หมู่ที่ไม่มีสมมาตรศูนย์กลาง (non-centrosymmetric) โดยมีอยู่ 20 หมู่ ที่แสดงปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกและอีก 1 หมู่ ซึ่งอยู่ในลูกบาศก์มีลักษณะของสมมาตรที่เมื่อรวมกันแล้วจะไม่แสดงปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกออกมาวัสดุผลึกเชิงซ้อนซึ่งถึงแม้แกนของผลึกในแต่ละเกรนนั้นจัดเรียงตัวแบบซุ่มก็จะแสดงปรากฏการณ์อิเล็กโทรสตริกที่ฟและถ้าแกนของผลึกสามารถที่จะเรียงตัวได้เหมาะสมก็จะทำให้เซรามิกผลึกเชิงซ้อนมีสมบัติไพโซอิเล็กทริกกระบวนการที่ใช้ในการจัดทิศทางการมีขั้วไฟฟ้าในเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกบางครั้งก็ต้องมีการทำขั้ว (poling) เพื่อจัดรูปแบบการเรียงตัวของโดเมนใหม่ดังนั้นอาจจะจัดเรียงลำดับของการมีระเบียบจากน้อยไปมากเป็นเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกผลึกเชิงซ้อนผลึกเชิงเดี่ยวเฟอร์โรอิเล็กทริกและผลึกเชิงเดี่ยวโดเมนเชิงเดี่ยว (single-domain single crystals) ตามลำดับ

สมบัติไพโซอิเล็กทริกสามารถอธิบายได้ในรูปของตัวแปรเสริม  $D$   $E$   $X$  และ  $x$  โดยที่  $X$  คือความเค้นการตอบสนองทางไฟฟ้าเนื่องจากปรากฏการณ์ตรงสามารถเขียนในรูปของความเครียดเป็น



$$D=ex \text{ หรือ } E=hx \quad (2.3)$$

และปรากฏการณ์อ้อมสามารถเขียนเป็น

$$X=g^*D \text{ หรือ } x=d^*E \quad (2.4)$$

โดยที่  $2hg^*$  และ  $d^*$  (และ  $e^*h^*gd$ ) เป็นสัมประสิทธิ์โฟโซอิเล็กทริกซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\left(\frac{\partial D}{\partial X}\right)_{E,T} = d; -\left(\frac{\partial E}{\partial X}\right)_{D,T} = h \quad (2.5)$$

$$\left(\frac{\partial D}{\partial x}\right)_{E,T} = e; -\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)_{D,T} = h \quad (2.6)$$

และในทางอ้อมจะได้

$$\left(\frac{\partial x}{\partial E}\right)_{x,T} = d^*; \left(\frac{\partial x}{\partial D}\right)_{x,T} = g^* \quad (2.7)$$

$$-\left(\frac{\partial X}{\partial E}\right)_{x,T} = e^*; -\left(\frac{\partial X}{\partial D}\right)_{x,T} = h^* \quad (2.8)$$

สำหรับในกรณีของสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรสตริกที่นั่นค่าที่ได้จะขึ้นกับทิศทางของ  $E$   $D$   $x$  และ  $X$  ทำให้บางครั้งความสัมพันธ์ค่อนข้างซับซ้อนถ้าสมมุติว่า  $x$  และ  $D$  นั้นอยู่ (colinear) จะทำให้ได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการ (2.1) และ (2.2) ว่า

$$\delta x = 2ME\delta E = 2QD\delta D \quad (2.9)$$

ซึ่งชี้ให้เห็นว่าถ้าให้สนามไฟฟ้าไบแอส  $E_b$  กับวัสดุอิเล็กโทรสตริกที่ฟแล้วจะโดยตรงระหว่างการเปลี่ยนแปลงของความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของสนามในกรณีของวัสดุที่มีขั้วการมีโพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous polarization) จะมีค่าเท่ากับ  $D$  ดังนั้น

$$\delta x = 2QP_s \delta D \quad (2.10)$$

ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก ( $g^*$ ) สัมประสิทธิ์อิเล็กโทรสตริกที่ฟ ( $Q$ ) และการมีขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเอง ( $P_s$ ) เป็น

$$g^* = 2QP_s \quad (2.11)$$

ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการตอบสนองทางพีโซอิเล็กทริกที่มีมากในวัสดุเพโรอิเล็กทริกชนิดนั้นเป็นผลสืบเนื่องมาจากผลรวมของสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรสตริกที่ฟกับการมีโพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเองที่มีค่ามากทั้งคู่

### 2.1.2 เฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกส์ (Ferroelectric ceramic)

เป็นวัสดุที่มีแกนเชิงขั้วเอกภูมิที่สามารถปรับเปลี่ยนทิศทางการวางตัวได้ โดยอาศัยสนามไฟฟ้าซึ่งขอบเขตความสามารถในการปรับแนวแกนเชิงขั้วของผลึกภายในเซรามิกนั้นจะถูกกำหนดโดยการวางตัวแบบสุ่มของตัวผลึกเองแต่ก็เพียงพอที่จะทำให้ผลึกเชิงซ้อนแบบไอโซทรอปิก (isotropic) เปลี่ยนสภาพไปเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) ที่มีขั้วได้สภาพมีขั้วเช่นนี้จะส่งผลทำให้เกิดพฤติกรรมแบบพีโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric) และไฟฟ้าเชิงแสง (electro-optic) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ อย่างเช่น โซนาร์ (Sonars) เครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิกส์ (ultrasonic cleaners) เครื่องตรวจจับด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared detectors) และตัวประมวลผลด้วยแสง (light processors) ซึ่งการประดิษฐ์วัสดุเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของเซรามิกนั้นสามารถทำได้ง่ายกว่าและผลิตได้ในปริมาณที่มากกว่าการทำให้อยู่ในรูปของผลึกเชิงเดี่ยว

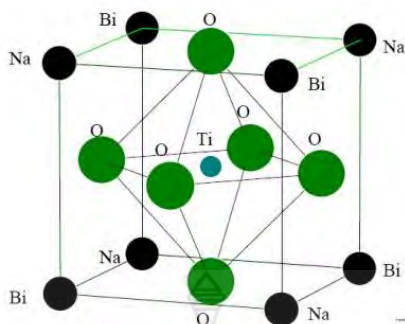
### 2.1.3 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว (Lead free piezoelectric materials)

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วได้รับความสนใจเป็นอย่างมากตั้งแต่มีการออกระเบียบอันตรายในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์การบำบัดซากยานยนต์ซึ่งสาระสำคัญของระเบียบสารอันตรายบางประเภทที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมโดยจำกัดผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์และระเบียบเศษซากของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ด้วยซึ่งตะกั่ว (Pb) พรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) และโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ทุกรูปแบบ ยกเว้นการใช้งานเฉพาะบางอย่างที่ระบุให้เป็นข้อยกเว้นซึ่ง

โดยส่วนมากจะอยู่ภายในยานยนต์เช่นเซนเซอร์หรืออุปกรณ์หัวฉีดต่างๆ เป็นที่ทราบกันดีว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ เลดเซอร์โคเนตไทเท หรือ PZT โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอัตราส่วน Zr/Ti เท่ากับ 52/48 ซึ่งเป็นบริเวณแนวรอยต่อเฟส (MPB) ของสารระบบนี้ [2] โดยที่อัตราส่วนดังกล่าว PZT จะแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นมากค่าสัมประสิทธิ์ทางเพียโซอิเล็กทริก ( $d_{33}$ ) มีค่าสูงถึง 779pC/N และมีอุณหภูมิคูรี (Te) อยู่ในช่วง 300-400°C โดยสมบัติที่โดดเด่นของ PZT ที่อัตราส่วน MER และอุณหภูมิคูรีที่สูงนี้ส่งผลให้ PZT มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงสามารถนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 175°C เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และอุณหภูมิใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปมีค่าประมาณ  $1/2T_c$  ซึ่ง PZT ที่สัดส่วนองค์ประกอบ MPB นี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลายจำนวนมากโดยรายละเอียดพื้นฐานของเซรามิก PZT และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของ PZT พบว่า PZT นั้นมีองค์ประกอบของตะกั่ว (Pb) อยู่มากกว่า 60% โดยน้ำหนักดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาและปรับปรุงวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วขึ้นมาให้มีสมบัติดีเยี่ยมเทียบเท่าหรือใกล้เคียงเพื่อนำไปใช้งานแทน PZT โดยในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการสังเคราะห์เซรามิกบิสมาทโซเดียมไททาเนต (BNT) ชั้นเซรามิก BNT มีข้อดีหลายอย่างไม่ว่าจะเป็นสมบัติด้านเพโรอิเล็กทริกและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ดี [3] และต่อมาได้มีการศึกษาพัฒนาเกี่ยวกับแบเรียมไททาเนตเซรามิก หรือ BT ซึ่งมีการปรับปรุงสมบัติเพโรอิเล็กทริกสมบัติไดอิเล็กทริกที่ดีเทียบเท่ากับ PZT สามารถกำหนดโดเมนให้รับสนามไฟฟ้าได้ทั้งสูงสุดและต่ำที่สุด [4]

#### 2.1.4 โครงสร้างของ BNT

บิสมาทโซเดียมไททาเนต (BNT) โครงสร้าง BNT มีลักษณะเป็นเพอโรฟสไกต์ ซึ่งพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงระบบผลึกตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ณ อุณหภูมิห้อง ระบบผลึกของ BNT เป็นรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) ซึ่งมีสมบัติทางไฟฟ้าเป็นเพโรอิเล็กทริกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นระบบผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นเตตระโกนอล (tetragonal) และผลึกลูกบาศก์ (cubic) ตามลำดับ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้าเช่นกัน โดยที่จะเปลี่ยนไปเป็นแอนไทเพอโรอิเล็กทริก (antiferroelectric) และพาราเพอโรอิเล็กทริก (paraelectric) ตามลำดับ ระบบผลึกของ BNT ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างไรก็ตามผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้าจะแตกต่างกันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระบบผลึกหลังจากการให้ความร้อนหรือลดอุณหภูมิ พบว่าจะมี hysteresis เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 255-305 °C ในระหว่างให้ความร้อนและที่อุณหภูมิ 250-200 °C ในระหว่างลดความร้อน โดยที่ฮิสเทอรีซิส (hysteresis) จะเกิดขึ้นบริเวณ BNT มีสมบัติเป็นแอนไทเพอโรอิเล็กทริก

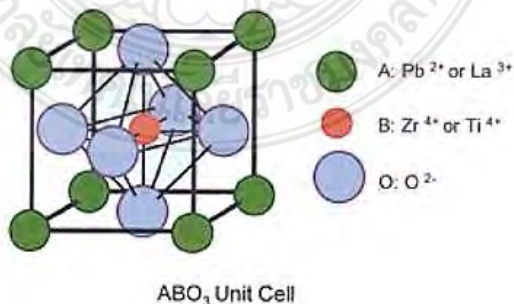


ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ของ BNT [5]

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 เฟร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite-type Ferroelectrics)

เพอโรฟสไกต์ (perovskite) เป็นชื่อของแร่แคลเซียมไทเทเนต ( $\text{CaTiO}_3$ ) ซึ่งเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกส่วนใหญ่ เช่น แบเรียมไทเทเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) เลดไทเทเนต ( $\text{PbTiO}_3$ ) เลดเซอร์โคไทเทเนต ( $\text{PbTiO}_3$ ) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไทเทเนต (PLZT) โปแทสเซียมไนโอเบตโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต ( $\text{K,NaNbO}_3$ ) และโพแทสเซียมแทนทาลไนโอเบต ล้วนแต่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ทั้งสิ้นโดยเซรามิกสารประกอบลดกไซด์เหล่านี้จะมีสูตรเคมีทั่วไปเป็น  $\text{ABO}_3$  เมื่อ O คือออกซิเจน A คือไอออนบวกที่มีรัศมีไอออนขนาดใหญ่ และ B คือไอออนบวกที่มีรัศมีไอออนขนาดเล็กโดยในภาพที่ 2.1 ได้แสดงลักษณะหน่วยเซลล์ของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์  $\text{ABO}_3$  ที่เป็นแบบคิวบิกซึ่ง A คือ Ba และ B คือ Ti นอกจากนี้สารเฟร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ยังสามารถมีสูตรเคมีเป็น  $\text{A}_2\text{B}_1\text{O}_3$  หรือ  $\text{A}_1\text{B}_5\text{O}_3$  ได้ส่วนสารประกอบเพอโรฟสไกต์ที่มีสูตรเคมีเป็น  $\text{A}_3\text{B}_3\text{O}_3$  นั้นจะไม่มีสมบัติความเป็นเฟร์โรอิเล็กทริกทั้งนี้ค่ารัศมีไอออนของ A และ B ในสารประกอบเพอโรฟสไกต์ก็สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ในช่วงกว้าง



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์  $\text{ABO}_3$  [6]

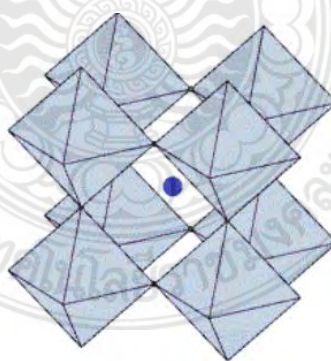
โครงสร้างเพอรอฟสไกต์เป็นการเชื่อมต่อกันในสามมิติของทรงแปดหน้า (octahedral)  $\text{BO}_6$ . ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวแบบบรรจุชิดรูปลูกบาศก์ (Cubic closed packed: ccp) ของไอออน A และ O โดยมีไอออน B เข้าไปแทรกอยู่ในตำแหน่งช่องว่างของทรงแปดหน้าทั้งนี้ ความสามารถในการบรรจุอะตอมของโครงสร้างเพอรอฟสไกต์นั้นอาจวิเคราะห์ด้วยค่า t หรือค่าทอเลอแรนซ์แฟคเตอร์ (tolerance factor) ซึ่งสามารถนิยามเป็นสมการได้ดังนี้

$$R_A + R_O = t (2)^{1/2} (R_B + R_O) \quad (2.12)$$

หรือ

$$t = (R_A + R_O) / (2)^{1/2} (R_B + R_O) \quad (2.13)$$

เมื่อ  $R_A$   $R_B$   $R_O$  คือรัศมีไอออนของไอออน 4B และออกซิเจนตามลำดับโดยการบรรจุไอออนในอุดมคติจะมีค่า t เท่ากับ 1 ซึ่งหากค่า t มีค่ามากกว่า 1 นั้นหมายถึงมีที่ว่างภายในช่องว่างทรงแปดหน้าเหลือมากเกินไป ทำให้ไอออน B สามารถเคลื่อนที่ได้มากโดยทั่วไปการเกิดโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่เสถียรควรจะมีค่า t อยู่ในช่วง  $0.9 < 1 - 1.1$  ทั้งนี้ นอกจากปัจจัยเรื่องขนาดของไอออนที่มีผลต่อการบรรจุอะตอมในโครงสร้างแล้วยังคงต้องพิจารณาปัจจัยอื่น



ภาพที่ 2.3 การจัดเรียงตัวแบบบรรจุชิดรูปลูกบาศก์ (Cubic closed packed: ccp) [7]

### 2.2.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและสเปกตรัมของไดอิเล็กทริก

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกส่วนมากไม่นำไฟฟ้าและแสดงสมบัติไดอิเล็กทริกที่ดีการนำวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกไปใช้งานส่วนใหญ่เน้นการทราบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) เป็นตัวแปรที่สำคัญมากนอกจากนี้ในการศึกษาสมบัติ

ไดอิเล็กทริกจะทำให้ทราบข้อมูลและมีความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างอะตอมและกลไกการเกิดโพลาริเซชันทางไฟฟ้าในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกมากขึ้นด้วย

สมมติให้ตัวเก็บประจุแผ่นโลหะคู่ขนานประกอบไปด้วยตัวกลางไดอิเล็กทริกเมื่อให้แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ ( $\varepsilon$ ) กับความถี่ ( $\omega$ ) บนตัวเก็บประจุนี้พบว่ามีค่ากระแสสลับ ( $i$ ) ไหลผ่านตัวเก็บประจุเป็น

$$i = j\omega\varepsilon_r C_0\varepsilon \quad (j = \sqrt{-1}) \quad (2.14)$$

เมื่อ  $C_0$  คือค่าความจุของตัวเก็บประจุแผ่นโลหะคู่ขนานที่ไม่มีตัวกลาง และ  $\varepsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (relativedielectricconstant) ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $\omega$  เนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กทริกรวมทั้งการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าในวัสดุไดอิเล็กทริก  $\varepsilon_r$  จึงต้องเขียนในรูปจำนวนเชิงซ้อนดังนี้

$$\varepsilon_r^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\varepsilon_r'$  คือส่วนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและ  $\varepsilon_r''(\omega)$  คือส่วนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นการแสดงการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกโดยใช้ค่า  $\tan\delta$  แทนค่า  $\sigma$  ในกาลค่าการสูญเสียนี้และนิยามไว้ว่า

$$\tan\delta = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (2.16)$$

โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $J$ ) ในตัวเก็บประจุแผ่นโลหะคู่ขนานหาได้จาก

$$J = j\omega\varepsilon_0 \varepsilon' E + \omega\varepsilon_0 \varepsilon'' E \quad (2.17)$$

เมื่อ  $E$  คือความเข้มสนามไฟฟ้าโดยส่วนจริงของอัตราส่วน  $J/E$  คือสภาพนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) ในวัสดุไดอิเล็กทริกซึ่งหาได้จาก

$$\sigma(\omega) = \omega\varepsilon_0 \varepsilon''(\omega) \quad (2.18)$$

ผลรวมของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่เกิดจากกลไกทั้งหมดจะแสดงด้วยค่า  $\sigma(\omega)$  ดังนั้นการใช้ค่า  $\varepsilon''$  ร่วมกับตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งใน 3 ตัวแปรซึ่งได้แก่  $\varepsilon'' \tan\delta$  และ  $\sigma$  นั้นจะสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของวัสดุไดอิเล็กทริกในสนามไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์

### 2.2.3 โพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Polarization)

โดยทั่วไปแล้วผลึกจะมีสมบัติเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) เนื่องจากว่าสมบัติต่างๆที่ผลึกแสดงออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับทิศทางผลึกที่เราได้ทำการตรวจวัดแต่ก็มีข้อยกเว้นอยู่บ้างยกตัวอย่าง เช่น ผลึกในระบบลูกบาศก์หรือคิวบิก (cubic) อาจจะมีสมบัติเชิงแสงเป็นแบบไอโซทรอปิก (isotropic) ได้ถึงแม้ว่าจะมีสภาพยืดหยุ่นเป็นแบบแอนไอโซทรอปิกก็ตามที่จากเหตุผลต่างๆเหล่านี้การบรรยายถึงพฤติกรรมทางฟิสิกส์ของวัสดุจึงจำเป็นต้องอาศัยองค์ความรู้พื้นฐานในเรื่องของโครงสร้างผลึกเป็นสำคัญ เนื่องจากการบรรยายถึงเรื่องของระบบผลึกอย่างละเอียดนั้นมิอยู่ในตำราหลายๆเล่มแล้วในที่นี่จึงขอกกล่าวถึงแต่เพียงเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับสารเซรามิกในกลุ่มไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) กลุ่มไพโรอิเล็กทริก (pyroelectrics) และกลุ่มไฟฟ้าเชิงแสง (electro-optics) เท่านั้นสิ่งที่สำคัญและเป็นวัตถุประสงค์ของหัวข้อนี้ก็คือเรื่องของการจัดจำแนกบรรดาผลึกมีขั้ว (polarcrystals) ซึ่งเป็นผลึกที่มีการเกิดขั้วขึ้นเองหรือมีโพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเอง และมีแกนเชิงขั้วเป็นเอกภาพออกมาจากพวกผลึกที่ไม่มีขั้วโดยจากผลึกทั้งหมด 32 หมู่ ผลึก (Crystal classes) มีเพียง 11 หมู่ผลึกเท่านั้นที่มีศูนย์กลางสมมาตร (centrosymmetric) และไม่มีความเป็นไพโซอิเล็กทริกในขณะที่อีก 21 หมู่ผลึกที่เหลือนั้นไม่มีศูนย์กลางสมมาตรโดยมีอยู่ 20 หมู่ผลึกที่มีความเป็นไพโซอิเล็กทริกและจาก 20 หมู่ ผลึกดังกล่าวนี้ก็มีเพียง 10 หมู่ ผลึกเท่านั้นที่เป็นพวกมีขั้วแนวคิดในเรื่องของความแตกต่างระหว่างโครงสร้างที่มีขั้วกับไม่มีขั้วนั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการ 2.20 และ 2.21 โดยหลักการพื้นฐานแล้วขั้วคู่ไฟฟ้าจะประกอบด้วยสองจุดประจุที่มีขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงข้ามกันอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $\delta X$  ซึ่งค่าโมเมนต์ขั้วคู่  $P$  ของแต่ละขั้วคู่ไฟฟ้านั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$P = Q\delta X \quad (2.19)$$

ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่มีความเป็นบวกอยู่ในแนวเส้นตรงที่ลากจากประจุลบไปยังประจุบวก วัสดุที่มีการเกิดโพลาริเซชันนั้นก็เปรียบเสมือนกับปริซึมขั้วคู่มูลฐาน (elementary dipolar prisic) ที่มีความหนาแน่นประจุของพื้นผิวหน้าที่อยู่ตรงปลายปริซึมด้านหนึ่งเป็น  $+\sigma_p$  และอีกด้านหนึ่งเป็น  $-\sigma_p$  สำหรับค่าโมเมนต์ขั้วคู่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุนั้นจะเรียกว่า การเกิดขั้วหรือโพลาริเซชัน (polarization)  $P$  และสามารถมีการเปลี่ยนแปลงไปได้ในแต่ละจะได้ขนาดของเวกเตอร์ต่างๆเป็นต้น

$$\delta_p = \sigma_p \delta_A \delta_S \sigma_p \delta_V \quad (2.20)$$

หรือ

$$\frac{Sp}{SV} = P = \sigma_p \quad (2.21)$$

ผลึกไพโซอิเล็กทริกคือพวกผลึกที่สามารถจะมีการเกิดขั้ว (โพลาริเซชัน) หรือมีการเปลี่ยนแปลงการเกิดขั้ว (โพลาริเซชัน) เมื่อได้รับความเค้นและในทางกลับกันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปผลึกเหล่านี้ก็สามารถที่จะมีความเครียดเกิดขึ้นได้ซึ่งผลึกที่มีขั้วทั้ง 10 หมู่ผลึกนั้นจะมีความเป็นไพโรอิเล็กทริกพอกๆกับความเป็นไพโซอิเล็กทริกเนื่องจากว่าผลึกเหล่านี้มีโพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเองได้ในผลึกกลุ่มไพโรอิเล็กทริกนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะไปทำให้โพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเองมีการเปลี่ยนแปลงไปวัสดุในกลุ่มไพโรอิเล็กทริกจะมีสมบัติเพิ่มเติมพิเศษคือ ทิศทางของการเกิดขั้วขึ้นเองนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการให้สนามไฟฟ้าหรือความเค้นเชิงกลจากภายนอกเข้าไปซึ่งถ้าการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญดังกล่าวนี้เกิดจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าเป็นหลักก็จะจัดให้วัสดุดังกล่าวอยู่ในกลุ่มเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric) แต่ถ้าการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญนั้นเกิดจากอิทธิพลของความเค้นเป็นหลักก็จะจัดให้วัสดุดังกล่าวอยู่ในกลุ่มเฟอร์โรอีลาสติก (ferroelastic) แทนซึ่งลักษณะเด่นเพิ่มเติมพิเศษของวัสดุในกลุ่มไพโรอิเล็กทริกที่ได้กล่าวมานี้ไม่สามารถจะทำนายจากโครงสร้างผลึกได้โดยตรงจึงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากผลการทดลองเป็นสำคัญเนื่องจากว่าเซรามิกนั้นเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยผลึกเป็นจำนวนมากและต่างก็มีการจัดวางตัวกันเป็นแบบสุ่มเซรามิกจึงน่าจะมีสมบัติต่างๆเป็นแบบไอโซทรอปิกแต่เพราะว่าการปรับเปลี่ยนทิศทางของโพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเองภายในผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นสามารถเป็นไปได้ด้วยกระบวนการโพลลิ่ง (poling) จึงทำให้เซรามิกเหล่านี้สามารถแสดงพฤติกรรมไพโซอิเล็กทริกไพโรอิเล็กทริกและไฟฟ้าเชิงแสงออกมาได้ซึ่งกระบวนการโพลลิ่งนั้นเป็นวิธีการให้สนามไฟฟ้าสถิตแก่วัสดุภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาที่มีความเหมาะสมต่อการจัดวางทิศทางของแกนเชิงขั้วให้อยู่ในแนวเดียวกันกับทิศทางของสนามไฟฟ้าเท่าที่ปัจจัยแวดล้อมและโครงสร้างผลึกจะยอมให้เป็นไปได้

การเปลี่ยนแปลงทิศทางของโพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเองนั้นจำเป็นต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนในทิศทางผลึกที่มีความจำเพาะมากๆ ดังนั้นถ้าผลึกยังมีจำนวนของทิศทางที่จำเพาะดังกล่าวมากแกนเชิงขั้วของบรรดาผลึกที่อยู่ภายในเซรามิกก็ยังมีโอกาสที่จะถูกปรับแนวการจัดวางทิศทางให้มีความใกล้เคียงกันกับทิศทางของสนามโพลลิ่งมากขึ้นซึ่งโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (tetragonal) (4mm) นั้นมีทิศทางที่ยอมให้เป็นไปได้อยู่จำนวนหกทิศทางในขณะที่โครงสร้างแบบ



รอมบอฮีดรอล (rhombohedral) (Sm) นั้นมีถึงแปดทิศทางจึงสามารถจะมีการปรับแนวได้ดีกว่าแบบเทเกรโกนอลและถ้าเซรามิกนั้นมีทั้งผลึกแบบเทเกรโกนอลและรอมบอฮีดรอลปรากฏอยู่ร่วมกันที่จุดเปลี่ยนสถานะ (transition point) ซึ่งเป็นบริเวณที่วัสดุสามารถจะมีการเปลี่ยนแปลงจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ด้วยการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปจำนวนของทิศทางจำเพาะที่ระบบจะยอมให้เป็นไปได้ก็จะเพิ่มขึ้นมาเป็นสี่ทิศทางและเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการนำสารเซรามิกเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้งาน

### 2.3 การเตรียมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกด้วยกระบวนการแบบดั้งเดิม

กระบวนการเตรียมมีผลต่อสมบัติของเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกเป็นอย่างมากแม้ว่าจะมีการควบคุมสัดส่วนองค์ประกอบเป็นอย่างดีแล้วก็ตามซึ่งสมบัติของเซรามิกที่ได้นั้นอาจจะไม่ดีหากเงื่อนไขที่ใช้ในการเตรียมไม่เหมาะสมการประดิษฐ์เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกก็เหมือนกับการประดิษฐ์เซรามิกธรรมดาที่ใช้งานทางไฟฟ้าทั่วไปซึ่งจะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้ด้วยการซึ่งวัสดุตั้งต้นการบดย่อยผสมสารด้วยลูกบอลการเผาแคลไซน์การบดย่อยครั้งที่สองเพื่อลดขนาดการขึ้นรูปด้วยการกดอัดกับแม่พิมพ์หรือการอัดรีดการกำจัดโพลีเมอร์การเผาซินเตอร์การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าการทำผิวและการตรวจสอบลักษณะเฉพาะตามลำดับ ขั้นตอนแรกของการเตรียมเซรามิกคือการซึ่งวัสดุตั้งต้นซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะหรือสารประกอบคาร์บอนเตของโลหะเพื่อให้มีสูตรเคมีถูกต้องตามสัดส่วนองค์ประกอบที่ต้องการหากสารตั้งต้นมีความบริสุทธิ์มากก็จะสามารถควบคุมคุณภาพของเซรามิกได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามไม่ใช่สิ่งที่จำเป็นที่สุดเนื่องจากในบางครั้งวัสดุที่มีความบริสุทธิ์ต่ำจะมีราคาถูกกว่าทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายไปได้ทั้งนี้เซรามิกยังคงสามารถแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ดีได้หากเตรียมผ่านกระบวนการที่เหมาะสมและมีปริมาณของสารแปลกปลอมเจือปนอยู่น้อยสำหรับการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งอย่างสมบูรณ์โดยผ่านกระบวนการแพร่ของอะตอมนั้นจะต้องมีวัสดุตั้งต้นที่เป็นผงละเอียดมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า $2\mu\text{m}$ ซึ่งโดยทั่วไปวัตถุดิบจะถูกผสมและบดย่อยด้วยลูกบอล (milling) หรือด้วยหมอบดแบบสั่น (vibrating) ทั้งนี้ในทางอุตสาหกรรมมักนำการเตรียมผงที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ในการเตรียมผงของสารตั้งต้นเช่นเทคนิคการไหลของอากาศที่มีความดันสูง (high-pressure air flow) เพื่อให้ได้ผงที่มีคุณภาพสูงหลังจากขั้นตอนการผสมและการบดย่อยสารเรียบร้อยแล้วผงผสมที่ได้จะถูกอัดเป็นก้อน จากนั้นแคลไซน์เพื่อให้ได้สารประกอบที่ต้องการโดยผ่านปฏิกิริยาการรวมตัวเมื่อได้สารประกอบที่ต้องการแล้วก็จะนำสารประกอบที่ได้ไปบดย่อยอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปและเผาซินเตอร์ต่อไป สำหรับกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปสารประกอบนั้นโดยทั่วไปมีหลายวิธีเช่น การกดอัดกับแม่พิมพ์ การอัดรีด และการอัดด้วยความดันของไม่สเถียรในกระบวนการขึ้นรูปมักจะใช้สาร

พอลิเมอร์ที่มีความเหนียวเป็นตัวช่วยยึดเกาะให้ผงคงรูปอยู่ได้โดยทั่วไปพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นตัวช่วยยึดเกาะในเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกมักจะเป็นสารผสมระหว่างโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักกลีเซอรินร้อยละ 7 โดยน้ำหนักแอลกอฮอล์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักและน้ำร้อยละ 75 โดยน้ำหนักจากนั้นทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิ  $90^{\circ}\text{C}$  จนละลายเข้ากันดีในการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดจะใช้สารช่วยยึดเกาะประมาณร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนักของน้ำหนักรวมประกอบที่เป็นผงส่วนการขึ้นรูปด้วยการกดอัดกับแม่พิมพ์จะใช้สารช่วยยึดเกาะประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ปริมาณของสารช่วยยึดเกาะจะต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสมหากใส่สารช่วยยึดเกาะมากเกินไปเซรามิกที่ได้จะมีความพรุนสูงหลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วสารอัดจะถูกนำไปให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างช้าๆจนถึงอุณหภูมิ  $800-850^{\circ}\text{C}$  จากนั้นแช่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อกำจัดสารช่วยยึดเกาะโดยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจะต้องต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  มิฉะนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเกิดการผิดรูปไปนอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของเซรามิกกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในระหว่างกระบวนการเผาสามารถหลีกเลี่ยงได้ด้วยการให้บรรยากาศของออกซิเจนเข้าไปภายในเตาเผาซึ่งออกซิเจนที่ให้เข้าจะต้องมีความเหมาะสมหลังจากที่ทำการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ (สารช่วยยึดเกาะ) ออกไปและถูกเผาซินเตอร์ต่อเพื่อให้เกิดเป็นเซรามิกที่สมบูรณ์จากนั้นทำการขัดและทำความสะอาดชิ้นงานเซรามิกที่ได้แล้วนำไปเคลือบผิวทั้งสองด้านด้วยโลหะเพื่อให้เกิดเป็นขั้วสำหรับการนำไฟฟ้าโดยทั่วไปจะใช้โลหะกาวเงินเคลือบเป็นชั้นบางๆบนเซรามิกแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาทีเพื่อให้ซิลเวอร์ออกไซด์ในกาวเงินลดออกซิเจนลงเหลือเพียงที่บริเวณผิวหน้าของเซรามิกจากนั้นเซรามิกที่มีขั้วไฟฟ้าแล้วจะถูกนำไปผ่านกระบวนการโพลีนิ่งโดยการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงสูงเข้าไปเพื่อกระตุ้นให้เซรามิกดังกล่าวแสดงความเป็นเพียโซอิเล็กทริกออกมา

### 2.3.1 การบดย่อยแบบลูกบอล

เทคนิคการบดย่อยแบบลูกบอลนี้จะแตกต่างจากหลายเทคนิคตรงที่จะต้องใช้ตัวกลางในการบดหรือเม็ดบอลในการทำให้อนุภาคเล็กลงซึ่งกระบวนการหลักที่ทำให้อนุภาคแตกได้คือการกดอัด การกระแทกและแรงเฉือน (แรงเสียดทาน) ระหว่างเม็ดบดและอนุภาคผงนอกจากจะใช้เม็ดบอล (ball) แล้วยังอาจจะใช้เม็ดบดรูปร่างเป็นแท่ง (rod) ได้แต่อาจจะไม่เหมาะสมในการบดเพื่อให้ได้อนุภาคที่ละเอียดมากในขณะที่เม็ดบอลสามารถบดอนุภาคผงได้ละเอียดน้อยกว่า 10 ไมครอน เทคนิคการบดย่อยแบบนี้ยังเหมาะสมที่จะใช้บดทั้งในสภาวะเปียกและแห้ง กระบวนการบดย่อยด้วยลูกบอลนี้ค่อนข้างจะซับซ้อนที่จะหาทฤษฎีมาอธิบายอัตราการบดจะขึ้นกับหลากหลายปัจจัยรวมทั้งตัวแปรในการบดเช่น ขนาดความเร็วและจำนวนของเม็ดบด ขึ้นกับสมบัติของเม็ดบดเช่นขนาดความแข็งและรูปร่าง และสุดท้ายจะขึ้นกับสมบัติของอนุภาคที่ถูกบดด้วยโดยทั่วไปการบดด้วยเม็ดบอลที่ใช้ความเร็วต่ำเนื่องมาจากการใช้เม็ดบดขนาดใหญ่ทั้งนี้เป็นเพราะพลังงานกลที่ให้กับอนุภาคจะอยู่ในรูปของพลังงานศักย์ (potential energy) ในขณะที่การบดที่ความเร็วสูงมากเนื่องจากเม็ดบดขนาดเล็ก

พลังงานที่ให้กับอนุภาคของการบดแบบนี้จะอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ (kinetic energy) สำหรับขนาดของเม็ดบดเฉพาะขนาดหนึ่งที่มีมวลเป็นส่วนกับความหนาแน่นเม็ดบดที่ใช้ควรจะทำมาจากวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ในทางปฏิบัติการเลือกใช้เม็ดบดนั้นมักจะถูกจำกัดด้วยราคาที่ย่อมเยาสูงตาราง 2.1 แสดงค่าความหนาแน่นของเม็ดบดที่ทำมาจากวัสดุชนิดต่างๆจะเห็นได้ว่าเม็ดบดที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์จะมีความหนาแน่นสูงสุดซึ่งจะสามารถบดอนุภาคได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นแต่อย่างไรก็ตามราคาของเม็ดบดก็เป็นปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงถ้าทำการเตรียมผงในระดับอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของเม็ดบดสำหรับการบดย่อยแบบบอลที่มีขายในตลาด

ชนิดของเม็ดบด	ค่าความหนาแน่น $10^3$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
พอร์ซเลน(porcelain)	2.3
ซิลิกอนไนไตรด์( $Si_3N_4$ )	3.1
อะลูมินา( $Al_2O_3$ )	3.6
เซอร์โคเนีย( $ZrO_2$ )	5.5
เหล็ก(steel)	7.7
ทังสเตนคาร์ไบด์(WC)	14.8

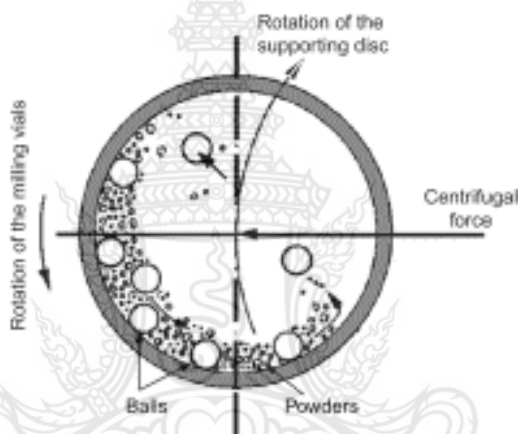
นอกจากนี้ขนาดของเม็ดบดก็มีความสำคัญที่จะต้องพิจารณาด้วยโดยปกติแล้วเม็ดบดที่มีขนาดเล็กจะดีกว่าเม็ดบดขนาดใหญ่เนื่องจากที่ปริมาตรเดียวกันจะได้จำนวนเม็ดบดมากกว่า ถ้าเม็ดบดยังมีขนาดเล็กลงถ้าสมมุติให้อัตราการบดขึ้นกับจำนวนจุดสัมผัสระหว่างเม็ดบดกับอนุภาคผงและในขณะที่จำนวนจุดสัมผัสเพิ่มขึ้นกับพื้นที่ผิวของเม็ดบดดังนั้นอัตราการบดจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นนั่นก็คือขนาดของเม็ดบดเล็กลงนั่นเองแต่อย่างไรก็ตามเม็ดบดก็ไม่ควรจะมีขนาดเล็กจนเกินไปทั้งนี้อาจจะทำให้เม็ดบดไม่มีแรงมากเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคผงแตกได้ยิ่งไปกว่านี้ [8] อัตราการบดยังขึ้นกับขนาดของอนุภาคผงด้วยอัตราการบดนี้จะลดลงถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กลงยิ่งถ้าทำการบดไปเรื่อยๆ และ อนุภาคยิ่งละเอียดมากจนมีขนาดประมาณ 1 ไมครอนจะทำให้การบดเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้นโดยปัจจัยสำคัญคือ แนวโน้มของการเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคที่สัมพันธ์กับขนาดอนุภาคการบดที่ลดลงเมื่อขนาดของอนุภาคลดลงและตำหนิในอนุภาคมีขนาดเล็กลงและปริมาณลดลงเมื่ออนุภาคเล็กลงซึ่งจะทำให้อนุภาคมีความแข็งแรงมากขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดของขนาดอนุภาคต่อการบดควรใช้การบดแบบเปียกแทนการบดแบบแห้งโดยการใช้สารช่วยกระจาย (dispersing agent) ในระหว่างการบดและเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงระดับหนึ่งอาจจะทำการเปลี่ยนเทคนิคการบดย่อยเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาค

เล็กถึงขนาดที่ต้องการก็ได้ ภาพที่ 2.3 แสดงภาพรวมของชุดเครื่องมือสำหรับบดย่อยด้วยลูกบอลแบบเปียกซึ่งหน้าบรรจุมะตับวัสดุที่ต้องการจะลดขนาดและของเหลวที่ช่วยในการกระจายอนุภาคจะถูกปิดแน่นหนาและหมุนในแนวนอนบนสายพานที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ภายในหม้อบดจะถูกควบคุมด้วยยางเพื่อช่วยป้องกันการการสึกหรอเนื่องจากการกระทบของเม็ดบดกับผนังลักษณะการหมุนของหม้อบดเม็ดบดจะมีการเคลื่อนที่คล้ายอักษรรูปตัว D โดยจะเคลื่อนที่เลื่อนไถไปจากตำแหน่งแล้วตกลงมากระทบกับวัสดุด้านล่างและหมุนเวียนด้วยลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนขนาดอนุภาคเล็กลงจนไม่สามารถบดให้ละเอียดลงไปได้อีกจะเห็นได้ว่าอัตราเร็วการหมุนของหม้อบดนั้นมีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าปัจจัยอื่นๆที่ได้กล่าวไปแล้วทั้งนี้เนื่องจากอัตราเร็วในการหมุนหม้อบดนี้จะส่งผลต่อแนวการเคลื่อนที่ของเม็ดบดและพลังงานกลที่ให้กับอนุภาคผงดังนั้นสามารถนิยามทอมความเร็วการหมุนวิกฤต (critical speed of rotation) ได้เป็นความเร็วที่ต้องการเพื่อให้เม็ดบดเคลื่อนไปยังตำแหน่งบนสุดของเส้นทางการเคลื่อนที่ซึ่งตำแหน่งนี้จะมีแรงศูนย์กลางที่สมดุลกับแรงโน้มถ่วงของโลกพอดีความเร็วในการบดในหน่วยรอบต่อเวลามีค่าเท่ากับ  $(g/R)^{1/2} (2\pi)$  เมื่อ R คือรัศมีของหม้อบดและ g คือแรงโน้มถ่วงของโลกในทางปฏิบัติการบดย่อยด้วยเม็ดบดจะทำที่ร้อยละ 75 ของความเร็วการหมุนวิกฤตนั้นคือเม็ดบดจะไม่สามารถเคลื่อนไปที่ตำแหน่งสูงสุดของเส้นทางการเคลื่อนที่ได้จากที่ได้กล่าวไปแล้วเบื้องต้นเป็นการยากมากที่จะหาทฤษฎีเฉพาะมาอธิบายพฤติกรรมการบดย่อยสมการ 2.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบดกับปัจจัยต่างๆ

$$\text{Rate of milling} = AR^{1/2} pd / r \quad (2.22)$$

เมื่อ A คือค่าคงที่เฉพาะที่ขึ้นกับเทคนิคการบดและพลังงานที่ใช้ในการบด R คือรัศมีของหม้อบด p คือความหนาแน่นของเม็ดบด d คือขนาดของอนุภาคผงและ r คือรัศมีของเม็ดบด จากสมการ 2.28 อัตราการบดจะลดลงเมื่อขนาดของอนุภาคลดลงอย่างไรก็ตามความสัมพันธ์นี้จะจำกัดที่ค่าหนึ่งเท่านั้นดังที่กล่าวไปแล้วการเปลี่ยนแปลงของอัตราการบดจะขึ้นกับรัศมีของเม็ดบดแต่ก็มีข้อจำกัดเช่นกัน กล่าวคือเม็ดบดจะต้องสามารถมีแรงเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคแตกได้ ในกระบวนการบดจริงนั้นมียุจุดประสงค์เพื่อให้เม็ดบดตกลงมากระทบอนุภาคที่ก้นของหม้อบดแทนที่จะกระทบผนังที่หุ้มด้วยยางสำหรับการบดแบบแห้งจะให้การบดที่ประมาณร้อยละ 75 ของความเร็วการหมุนวิกฤตเมื่อใช้เม็ดบดประมาณร้อยละ 50 ของปริมาตรหม้อบดและมีการเติมอนุภาคไปประมาณร้อยละ 25 ของปริมาตรหม้อบดส่วนการบดแบบเปียกควรจะใช้เม็ดบดประมาณร้อยละ 50 ของเหลวประมาณร้อยละ 40 และปริมาณอนุภาคของแข็งในของเหลวประมาณร้อยละ 25-40 ของปริมาตรหม้อบด ทั้งนี้การบดแบบเปียกจะมีข้อดีเหนือกว่าการบดแบบแห้งตรงที่พลังงานที่ใช้ในการบดจะมากกว่าประมาณร้อยละ 10-20 แต่ก็มีข้อเสียตรงที่การบดแบบเปียกนี้จะทำให้เกิดการสึกหรอของเม็ดบดได้มากกว่าและจำเป็นที่

จะต้องทำให้ของผสมที่ผ่านการบดแห้งก่อนที่จะนำผงละเอียดไปใช้ประโยชน์ได้การบดทั้งสองแบบนี้จะมีข้อเสียหลักคือการเจือปนของเศษเม็ดบดที่เกิดการสึกหรอหรือแตกในระหว่างการบด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตระหนักถึงข้อเสียนี้และหาทางแก้ไขเช่น อาจเลือกใช้ใช้เม็ดบดเซอริโคเนียที่เสียดต่อกิจกรรมเคมีที่อุณหภูมิเผาซินเตอร์หรือใช้เม็ดบดเหล็กที่สามารถทำการล้างหรือใช้สนามแม่เหล็กดูดออกจากผงได้หรือหลีกเลี่ยงการใช้เม็ดบดที่มีความหนาแน่นต่ำเช่น พอร์ซเลน และ อะลูมินา ที่มีความหนาแน่นต่ำมากวัสดุทั้งสองนี้มักจะทำให้เกิดการตกค้างของสารซิลิกาได้ซึ่งจะส่งผลให้เกิดของเหลวซิลิเกตในขณะที่ทำการเผาซินเตอร์และทำให้การควบคุมโครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิกนั้นเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2.4 แสดงภาพรวมของชุดเครื่องมือสำหรับบดย่อยด้วยลูกบอลแบบเปียก [9]

### 2.3.2 สารยึดเหนี่ยว

ในกระบวนการขึ้นรูปแทบทุกประเภทจะต้องใช้สารยึดเหนี่ยวซึ่งในทางปฏิบัตินั้นจะมีสารอินทรีย์หลายชนิดให้เลือกใช้บางชนิดละลายได้ในน้ำและอีกหลายชนิดสามารถละลายได้ในของเหลวอินทรีย์ เมื่อทำการละลายสารยึดเหนี่ยวในของเหลวใดๆ ก็ตามควรจะต้องพิจารณาความสามารถในการละลายเป็นอันดับแรกในบางครั้งอาจจะเรียกสารยึดเหนี่ยวด้วยชื่อที่แตกต่างกันไปขึ้นกับจุดประสงค์ของการใช้งาน เช่น

1. ตัวทำให้เปียก (wetting agent) จะทำให้อนุภาคผงเปียกง่ายขึ้น
2. ตัวทำให้หนา (thickener) ช่วยเพิ่มความหนืดปรากฏให้กับระบบสารผสม
3. ตัวเพิ่มการแขวนลอย (Suspensionaid) ช่วยเพิ่มการก่อดัวของอนุภาคในสเลอรี
4. ตัวเพิ่มวิทยากระแส (rheologicalaid) ช่วยควบคุมสมบัติการไหลของสเลอรี
5. การเพิ่มความเหนียว (plasticizer) เพิ่มพฤติกรรมความเสียวรูปให้กับอนุภาคผงที่มีความเปราะสูง

6. ตัวทำให้ของเหลวติด (liquid retention agent) ช่วยลดการแยกตัวของของเหลวออกจากอนุภาคผง
7. ตัวเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกัน (consistency aid) จะช่วยเปลี่ยนแปลงของเหลวที่ต้องการเพื่อให้เกิดลักษณะการไหลเฉพาะ
8. สารยึดเหนี่ยว (binder) เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการเผาซินเตอร์

สารยึดเหนี่ยวจะมีหลายชนิดในที่นี้จะแบ่งเป็น 2 ชนิดได้แก่ สารยึดเหนี่ยวดินเหนียว (Clay binder) และสารยึดเหนี่ยวระดับโมเลกุล (molecular binder) สำหรับสารยึดเหนี่ยวชนิดแรกจะนิยมใช้ในกระบวนการเตรียมเซรามิกแบบดั้งเดิมและเซรามิกชั้นสูงที่มีองค์ประกอบของอะลูมินาและซิลิกาเป็นหลัก สารยึดเหนี่ยวดินเหนียวจะเป็นสารยึดเหนี่ยวชนิดอนุภาคคอลลอยด์ (coloidal particle-type binder) ที่เตรียมจากเยื่อเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูงเมื่อนำสารยึดเหนี่ยวชนิดนี้ไปใช้ในการเตรียมเซรามิกมักจะทำให้เกิดรูพรุนขนาดไมครอนขึ้นได้ในชิ้นงานหลังการเผาซินเตอร์ สารยึดเหนี่ยวระดับโมเลกุลมีองค์ประกอบหลากหลายในช่วงที่กว้างอาจจะพบได้ในธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นสารยึดเหนี่ยวชนิดนี้ จะทำให้เกิดความยืดหยุ่นและมีพฤติกรรมทางกระแสวิทยาขึ้นเมื่อสารยึดเหนี่ยวสลายตัวภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนอาจส่งผลให้มีสิ่งเจือปนของสารอนินทรีย์หลงเหลือได้สารยึดเหนี่ยวชนิดนี้จะใช้เมื่อองค์ประกอบทางเคมีของมันนั้นเข้ากันได้กับองค์ประกอบของอนุภาคผงเนื่องจากสารตกค้างที่หลงเหลือมักจะมีปริมาณมาก

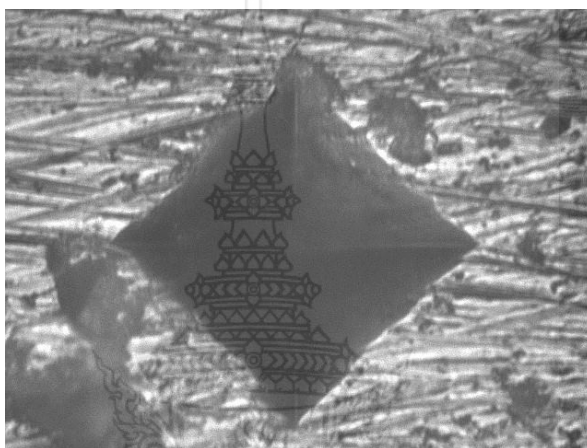
## 2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

### 2.4.1 เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers hardness)



ภาพที่ 2.5 เครื่อง micro Vickers hardness HMV-G-FOR Automated Models SHIMADZU

การทดสอบความแข็งแบบ Vickers นี้ใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิด (Diamond pyramid) ซึ่งมีมุมระหว่างหน้าตรงข้ามของ Pyramid เท่ากับ 136 องศา บางครั้งอาจเรียกการวัดค่าความแข็งนี้ว่า Diamond pyramid hardness test (DPH) เนื่องจากการเรียกตามลักษณะหัวกดนั่นเอง หลักการในการวัดค่าความแข็งคือชิ้นงานจะถูกกดด้วยหัวกด Diamond pyramid จนเกิดรอยกดเป็นรูป pyramid ฐานสี่เหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.6 รอยกดของ Micro Vicker Hardness

ค่าความแข็งโดยใช้หัวกดประเภทนี้เรียกว่า Vickers hardness number (VHN) และสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักกด (Load) หารด้วยพื้นที่ผิวของรอยกด Indentation ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะนิยมคำนวณจากเส้นทแยงมุม (Diagonal) ของรอยกดรูป Pyramid ดังแสดงได้จากสมการ

$$VHN = \frac{2P \sin(\theta/2)}{d^2} = \frac{1.854 P}{d^2} \quad (2.23)$$

เมื่อ P คือน้ำหนักกด กิโลกรัม

D คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเส้นทแยงมุม =  $(d_1 + d_2)/2$  มิลลิเมตร.

$\theta$  คือมุมระหว่างหน้าตรงกันข้าม = 136 องศา

โดยทั่วไปแล้วการวัดความแข็งแบบ Vickers นี้ควรเลือกการใช้น้ำหนักกดให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดรอยกด Pyramid ที่สมบูรณ์ (Perfect indentation) มีฐานเป็นสี่เหลี่ยมหารรอยกด Pyramid ที่ได้มีลักษณะบิดเบี้ยวคล้ายหมอนปุกเข็มหมุด (Pincushion) นั้นเป็นผลมาจากการจมตัวของเนื้อวัสดุ

รอบๆหน้าของ Pyramid ซึ่งมักพบในวัสดุที่ผ่านการอบอ่อน (Annealed metals) และมีผลทำค่าเส้นทแยงมุมที่วัดได้มากกว่าความเป็นจริง (วัสดุมีค่าความแข็งน้อยกว่าความเป็นจริง) รอยกดลักษณะป่องตรงกลาง (Barrel-shaped) ที่สามารถพบในการทดสอบวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold-worked metals) รอยกดที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการทับซ้อนกันของเนื้อวัสดุบริเวณหน้าของ Pyramid ในกรณีนี้การวัดเส้นทแยงมุมจะได้ค่าที่น้อยกว่าความเป็นจริงจึงทำให้ค่าความแข็งแบบ Vickers ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าปกติ การวัดค่าความแข็งแบบ Vicker นี้ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางสำหรับการศึกษาวิจัยเนื่องจากสามารถวัดค่าความแข็งได้ในช่วงที่กว้างและมีหน่วยของค่าความแข็งเดียวคือ VHN (สำหรับค่าน้ำหนักหนึ่งๆ) ทำให้เหมาะสำหรับการทดสอบวัสดุได้หลากหลายชนิด ตัวอย่างเช่น สามารถวัดค่าความแข็งของวัสดุที่มีความอ่อนมาก (VHN=5) จนถึงวัสดุที่มีความแข็งมาก (VHN=1,500) ซึ่งสะดวกและให้ช่วงของความแข็งที่กว้างกว่าการวัดความแข็งแบบ Brinell และ Rockwell สำหรับน้ำหนักกดที่ใช้ในการวัดค่าความแข็งแบบ Vickers นี้อยู่ในช่วง 1-120kg ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุที่นำมาทดสอบแต่อย่างไรก็ดีการวัดความแข็งแบบ Vickers ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในการทดสอบประจำวัน (Routinetest) ในภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากใช้เวลาในการทดสอบนานกว่าการทดสอบแบบ Rockwell และอาจมีความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการวัดความยาวของเส้นทแยงมุม

#### 2.4.2 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-Ray Diffractometer (XRD)



ภาพที่ 2.7 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ และในปี ค.ศ.



1912 W.L.Bragg ได้มีการเสนอแนวคิดที่ว่าเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบบนรังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบบน โดยสมการของ W.L.Bragg ได้กล่าวไว้ดังสมการที่ 2.24

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.24)$$

เมื่อ  $n$  คือเลขจำนวนเต็ม

$\lambda$  คือความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ที่ใช้

$d$  คือระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

$\theta$  คือมุมที่รังสีตกกระทบบนของรังสีเอ็กซ์กระทบบนระนาบของผลึก

จากหลักการของ W.L.Bragg ทำให้มีการศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกจนมีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ขึ้นในปี ค.ศ.1948 และพัฒนาจนกระทั่งมีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานและวิเคราะห์ประมวลผลเพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้นนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักเคมีวิทยาวัสดุศาสตร์ธรณีวิทยาและโลหะวิทยา เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (Crystalline Structure) ของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้โดยสารตัวอย่างอาจอยู่ในรูปแบบผง (Powder) ของแข็ง (Solid) และแบบฟิล์มบาง (Thin Film) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะให้รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกและระนาบผลึกของสารตัวอย่างโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมแตกต่างกันและสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) ที่เฉพาะตัว

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะประกอบไปด้วย

1. หลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (X-ray source) ซึ่งรังสีเอ็กซ์จะถูกสร้างขึ้นโดยให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่อยู่ภายในหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวดอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูงทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจากเส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดโดยการปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ไปยังตัวอย่าง

2. ตัวบังคับรังสี (Motorized sources/lits) ช่วยในการบีบบังคับรังสีลงบนชิ้นงาน
3. อุปกรณ์ตรวจจذبรังสีเอ็กซ์ (detector) เป็นอุปกรณ์ตรวจจذبรังสีเอ็กซ์ที่เกิดการเลี้ยวเบนออกจากตัวอย่าง

### 2.4.3 เครื่องวิเคราะห์ไดอิเล็กทริกและอิมพีแดนซ์ (Dielectric impedance analyzer)



ภาพที่ 2.8 เครื่องวิเคราะห์ความต้านทานไดอิเล็กทริกและอิมพีแดนซ์

มีช่วงความถี่ 1MHz ถึง 1GHz ให้ความแม่นยำพื้นฐานในช่วงอิมพีแดนซ์ที่กว้างพร้อมแหล่งกำเนิดกระแสไบแอส 40V ในตัวฟังก์ชันการวิเคราะห์วงจรที่เทียบเท่ารองรับรุ่นพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันเจ็ดแบบสามารถวัด Dielectric / วัสดุแม่เหล็กและการวัดความต้านทานอิมพีแดนซ์แบบ on-wafe หรือ องค์ประกอบไมโครความแม่นยำสูง อิมพีแดนซ์ (สัญลักษณ์  $Z$ ) คือการวัดความต้านทานโดยรวมของวงจรกับการไหลของประจุกระแสไฟการมันเป็นเหมือนความต้านทานแต่ก็คำนึงถึงผลกระทบของความจุและการเหนี่ยวนำความต้านทานที่มีหน่วยวัดเป็นโอห์ม ( $\Omega$ )

$$\text{Impedance } Z = \frac{V}{I} \quad (2.25)$$

$$\text{Resistance } R = \frac{V}{I} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $V$  = แรงดันไฟฟ้า (V)

$I$  = กระแสไฟฟ้า (A)

$Z$  = ค่าความต้านทานรวมในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ( $\Omega$ )

$R$  = ความต้านทาน ( $\Omega$ )

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

saiporn prasertpalichat, phutthichonand rattiphorn (2017) [10] ได้ศึกษาเซรามิกไร้สารตะกั่วเพียโซอิเล็กทริกในระบบ  $0.70(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3)-0.20(\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3)-0.10(\text{BaZr}_{0.20}\text{Ti}_{0.80}\text{O}_3)$  หรือ BNT-BKT-BT โดย BKT ถูกเผาแคลไซน์ที่ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ BZT ถูกแคลไซน์ที่ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำเอาผงผลึก BNT-BKT-BT ในสัดส่วน 0.70:0.20:0.10 มาเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050-1175 องศา ศึกษาโครงสร้างผลึก BNT-BKT-BT ทำการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าเซรามิกมีโครงสร้างเฟสร่วมกันระหว่างรอมโบฮีดรอลและเทระโกนอล โดยจะมีลักษณะเป็นเทระโกนอลมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิซินเตอร์ จากการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกพบว่าเซรามิกในทุกๆ ตัวอย่างมีพฤติกรรมแบบรีแลกเซอร์ฟีร์โรอิเล็กทริก และพบว่าเซรามิกที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส มีค่าไดอิเล็กทริกสูงสุดและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุดเป็น 5053 และ 0.02

Chompoonuch Warangkanagool (2015) [11] ได้ศึกษาโครงสร้างเฟสและโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกเซรามิก  $(0.7)\text{BaTiO}_3-(0.3)\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$  หรือ 0.7BT-0.3BNT ที่เตรียมโดยวิธีมิกซ์ออกไซด์ และวิธีเกลือหลอมเหลวโดยใช้  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  เป็นสารตั้งต้นนำสารตั้งต้นนี้มาบดผสมเปียกกันเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้เอทานอลเป็นตัวกลางในการผสมนำของผสมนี้ทำให้แห้งคัดขนาด และทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600-900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศา ต่อนาทีเช่นเดียวกันทั้งสองวิธีตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าเงื่อนไขอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาแคลไซน์ของผงผลึก 0.7BT-0.3BNT ที่เตรียมโดยวิธีมิกซ์ออกไซด์และที่เตรียมโดยวิธีเกลือหลอมเหลวคือ ณ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และ 600 องศา ตามลำดับ จะเห็นว่าวิธีเกลือหลอมเหลวนี้นำไปช่วยลดอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ได้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) นำไปหาขนาดของอนุภาค พบว่าอนุภาคของผงผลึก 0.7BT-0.3BNT ที่เตรียมทั้งสองวิธีนั้นมีการจับกันเป็นกลุ่มก้อน เมื่อหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึกจากภาพถ่าย SEM พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึก 0.7BT-0.3BNT ที่อุณหภูมิแคลไซน์ 600-900°C อยู่ในช่วง 0.2-0.3  $\mu\text{m}$

Wangfeng Bai and Peng Li (2015) [12] ได้ศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างที่ขึ้นกับอุณหภูมิความเสถียรของเฟสพฤติกรรมของความเครียดไดอิเล็กทริกเฟอร์โรอิเล็กทริก (FE), สมบัติเพียโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริกของ  $\text{Bi}(\text{Ni}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$  (BNiT) emodified 0.94  $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3$ e0.06 $\text{BaTiO}_3$  (BNT-BT-xBNiT,  $0 \leq x \leq 0.06$ ) แคลไซน์ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศที่มีหลังคาครอบแล้วกดเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ผสมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นสารยึดเกาะ 8 wt.% ซินเตอร์ในบรรยากาศที่มีหลังคาครอบแล้วที่ 1150 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยสรุปผลกระทบของการเพิ่ม BNT ไปยังระบบ BNT-BTเกี่ยวกับพัฒนาการของโครงสร้างและพฤติกรรมของความเครียดแ่งขององค์ประกอบและอุณหภูมิและแผนภาพเฟสสร้างขึ้นสำหรับระบบ BNT-BT-xBNIT การอยู่ร่วมกันของเฟสของ FE และเฟส relaxor สำหรับองค์ประกอบที่สำคัญ  $x = 0.035$  นั้นระบุส่งผลให้เกิดการบีบอัด P-E loop และความเครียดขนาดใหญ่  $0.35\%$  ( $S_{max} / E_{max} \approx 590 \text{ pm} / \text{V}$ ) พร้อมสนามไฟฟ้า  $60 \text{ kV} / \text{cm}$  การพึ่งพาอุณหภูมิของไดอิเล็กทริก piezoelectric เพอร์โรอิเล็กทริกและคุณสมบัติของความเครียดรวมกับการเปรียบเทียบค่า  $T_d$  ที่กำหนดโดย TSDC และ TF-R ที่ได้จากความผิดปกติของอิเล็กทริกซ์ให้เห็นว่าการสลับขั้วและ ferroelectric-to-relaxor การเปลี่ยนภาพถือเป็นกระบวนการแยกและไม่ต่อเนื่องรามานสเป็คตรัมและความเครียดและพฤติกรรมโพลาริเซชันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ pseudocubic relaxor เพื่อเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริก

J.D.S. Guerra and A. Peláiz-Barranco (2017) [13] ได้ศึกษานี้การพึ่งพาสนามไฟฟ้าของโพลาริเซชันไฟฟ้า (hysteresis loop) พบชั้นของความถี่ใน เซรามิกระบบ  $(\text{Bi}_{0.5} \text{Na}_{0.5})_{0.92} \text{Ba}_{0.065} \text{La}_{0.010} \text{TiO}_3$  โดยการแคลไซน์  $850^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 h อัดขึ้นรูปเป็นดิสและซินเตอร์ที่  $1180$  องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่จำเป็นเพื่อให้ได้การเปลี่ยนโดเมนที่แท้จริงนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้ คุณสมบัติโครงสร้างศึกษาจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และการปรับแต่งของ Rietveld แสดงให้เห็นถึงการอยู่ร่วมกันของทั้ง antiferroelectric (AFE) และเฟส ferroelectric (FE) สนามไฟฟ้าของโพลาริเซชันยังได้รับการประเมินแม้ในความถี่ที่สูงขึ้นเมื่อพิจารณาถึงสิ่งที่ไม่ใช่พลังงานการพึ่งพาสำหรับฟิล์ม

Jianhua Zhu and Eric Rop Kipkoech (2005) [14] ได้ศึกษาผลกระทบของสาร  $\text{LnAlO}_3$  ( $\text{Ln} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) ที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติเป็นฉนวนของวัสดุ  $\text{Ba}_{4.2} \text{Nd}_{9.2} \text{Ti}_{18} \text{O}_{52}$  (BNT) ถูกเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ  $1200 - 1250$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ  $1320 - 1380$  องศาเซลเซียส ได้รับการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของ BNT เจือด้วย  $\text{NdAlO}_3$  ถูกวิเคราะห์โดยใช้ X-ray diffraction และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เกิดการเพิ่ม 10 wt.% ของ  $\text{NdAlO}_3$  และมีความพรุนของชิ้นงาน

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการ

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร

- 3.1.1.1 ช้อนตักสารสแตนเลส (Spatula Stainless)
- 3.1.1.2 หน้ากากอนามัย
- 3.1.1.3 ถุงมือยางสำหรับตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์ (Gloves examination gloves Latex powder free)
- 3.1.1.4 ถ้วยครุชชีเบล (Ceramic crucible)
- 3.1.1.5 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance)
- 3.1.1.6 ปีกเกอร์ขนาด 500 ml.
- 3.1.1.7 ปีกเกอร์ขนาด 250 ml.
- 3.1.1.8 แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์
- 3.1.1.9 กระดาษชั่งสาร (Weighing Paper) ขนาด 10x10 cm.
- 3.1.1.10 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.1.1.11 Forcep

##### 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการ Ball mill

- 3.1.2.1 Vial ball mill stainless steel แบบแนวตั้ง
- 3.1.2.2 Stainless ball
- 3.1.2.3 Planetary ball mill
- 3.1.2.4 ช้อนตักสารสแตนเลส (Spatula Stainless)
- 3.1.2.5 ถุงชিপ्लीอคใส่

##### 3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการ Calcination และ Sintering

- 3.1.3.1 เตาเผาเซรามิก
- 3.1.3.2 คีมเตาหลอม
- 3.1.3.3 ถุงมือกันความร้อน
- 3.1.3.4 หน้ากากกันความร้อน

### 3.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเซรามิก

- 3.1.4.1 Hydraulic press “Extra Mactech” 30 Ton
- 3.1.4.2 Mold stainless steel
- 3.1.4.3 Punch แม่พิมพ์ฝั่งตัวผู้
- 3.1.4.4 Die แม่พิมพ์ฝั่งตัวเมีย
- 3.1.4.5 Punch plate steel
- 3.1.4.6 Ethyl alcohol 95%
- 3.1.4.7 Cotton Buds
- 3.1.4.8 กระจกทึบ
- 3.1.4.9 สำลีพันก้าน

### 3.1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์

- 3.1.5.1 เครื่องขัดชิ้นงานทางโลหะวิทยา (Grinder polisher)
- 3.1.5.2 Sandpaper no. 1000
- 3.1.5.3 เวอร์เนีย (Vernier Caliper)
- 3.1.5.4 ฟองน้ำรองชิ้นงาน
- 3.1.5.5 กล่องเก็บชิ้นงาน
- 3.1.5.6 กระจกใสสำหรับรองขัดชิ้นงาน

## 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

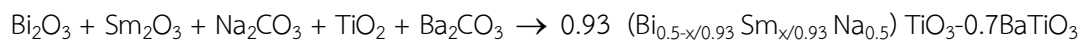
- 3.2.1 บิสมัทออกไซด์ (Bismuth oxide :  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) ความบริสุทธิ์ 98%
- 3.2.2 แบเรียมคาร์บอเนต (Barium carbonate :  $\text{BaCO}_3$ ) ความบริสุทธิ์ 99%
- 3.2.3 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide:  $\text{TiO}_2$ ) ความบริสุทธิ์ 99%
- 3.2.4 ซามอร์เรียมออกไซด์ (Samarium oxide :  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ) ความบริสุทธิ์ 99.999%
- 3.2.5 โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ความบริสุทธิ์ 99.995%
- 3.2.6 ซิลิโคนออย (Silicone oil)

## 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

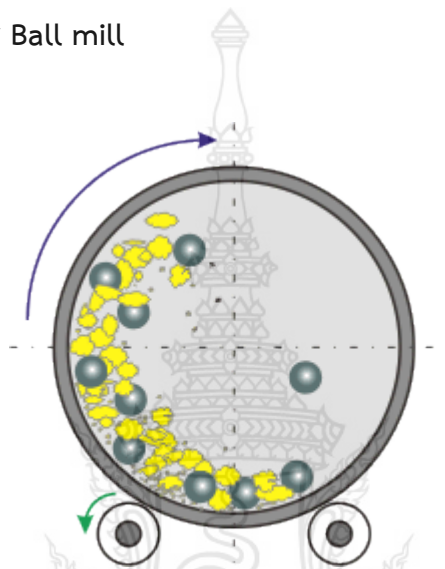
### 3.3.1 การออกแบบสูตรทางเคมีของเซรามิก

ในการออกสูตรเคมีของเซรามิก BSNT-BT ที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้แบบดั้งเดิมโดยใช้สารเคมีในอัตราส่วน 0.93 ( $\text{Bi}_{0.5-x/0.93} \text{Sm}_{x/0.93} \text{Na}_{0.5}$ )  $\text{TiO}_3$ -0.7 $\text{BaTiO}_3$  ร้อยละโดยโมลและใช้  $\text{Sm}_2\text{O}_3$

ที่เงื่อนไข  $x$  มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.04 โดยโมล โดยจะอาศัยปฏิกิริยาการสลายตัว (Decomposition reaction) เพื่อให้สารตั้งต้นได้รับความร้อนจนทำให้เกิดการแตกตัว ดังนี้



### 3.3.2 กระบวนการ Ball mill



ภาพที่ 3.1 กระบวนการ Ball mill [15]

กระบวนการ Ball mill โดยเริ่มจากการเติมวัสดุ และ Medium เช่น น้ำ, แอลกอฮอล์, โพลีเอธิลีน และ Additive ต่าง ๆ ลงไปใน Ball Mill แล้วทำการปิดฝา Ball Mill และจึงเริ่มดำเนินการบด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเราจะคำนึงถึงปริมาณของสาร และเม็ดบดเพื่อขณะที่บดนั้น จะได้มีปริมาณพื้นที่ที่พอดีต่อการบดสาร ซึ่งจะทำให้ขนาดของสารมีขนาดที่เล็กจนกระทั่งได้ความละเอียดของสารที่ต้องการและนำไปอบแห้งเพื่อนำสารมาบดอัดขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไป

### 3.3.3 กระบวนการอัดขึ้นรูป

1. นำสารที่อบแห้งแล้วมาบดในโถรงบดสารให้ละเอียด
2. ทำความสะอาด mold stainless steel ด้วยเอทานอลให้สะอาด
3. อัดขึ้นรูปด้วย mold stainless steel ที่มี Dimension ขนาด 15 มิลลิเมตร ด้วยแรงดัน 400 MPa เป็นเวลา 10 วินาที ดังภาพที่ 3.2 (ก)
4. จะได้ชิ้นงานขนาด Dimension 10 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.2 (ข) จากนั้นนำเม็ดเซรามิกที่ได้ใส่ถุงซิปลงเพื่อป้องกันสิ่งแปลกปลอมเข้าไปเจอกับสารเคมี
5. เช็ดทำความสะอาดแม่พิมพ์ด้วยเอทานอลและเตรียมชิ้นงานสำหรับเผาแคลไซน์



ภาพที่ 3.2 (ก) อัดขึ้นรูปด้วยแรงดัน 400 MPa



ภาพที่ 3.2 (ข) ชิ้นงานขนาด 10 มิลลิเมตร

### 3.3.4 กระบวนการเผาแคลไซน์

1. ทำความสะอาดถ้วยครุชชีเบลด้วยเอทานอลให้สะอาด
2. นำชิ้นงานใส่ลงในถ้วยครุชชีเบลและนำถ้วยครุชชีเบลเข้าตู้เผาเพื่อทำการเผาแคลไซน์ ดังภาพที่ 3.3 (ก)
3. ทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิอยู่ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อวินาที ดังภาพที่ 3.3 (ข)
4. เมื่อครบ 2 ชั่วโมงนำถ้วยครุชชีเบลออกจากเตาและนำมาพักไว้
5. จากนั้นทำชิ้นงานที่ได้ออกมาบดในโถรงบดสารให้ละเอียดเพื่อนำไปทดสอบ XRD เพื่อโครงสร้างของเซรามิกที่จะได้เป็นโครงสร้างแบบ Perovskite





ภาพที่ 3.3 (ก) ใส่ชิ้นงานในถ้วยครุชชีเบล



ภาพที่ 3.3 (ข) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์

### 3.3.5 กระบวนการ Sintering

1. หลังจากที่ได้ตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานแล้วทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วย mold stainless steel ที่มี Dimension ขนาด 10 มิลลิเมตร ด้วยแรงดัน 400 MPa เป็นเวลา 10 วินาที
2. จากนั้นทำความสะอาดถ้วยครุชชีเบลด้วยเอทานอลให้สะอาด
3. ใส่ผง BT Mix เพื่อรองให้ผิวหน้าของชิ้นงานมีความเรียบและเพื่อสร้างบรรยากาศของ BT ในการเผาได้มากขึ้น
4. วัด Dimension ก่อนเผาของชิ้นงาน จากนั้นเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันตั้งแต่ อุณหภูมิที่ 940, 960 และ 970 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง โดยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ อยู่ที่ 2 องศาเซลเซียสต่อวินาที
5. เมื่อครบกำหนดนำชิ้นงานออกมาจากเตาพักทิ้งไว้และทำการวัดค่า Dimension หลังเผา



ภาพที่ 3.4 ชิ้นงานหลังจากการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

### 3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นและปริมาตรเชิงโมล (Density)

- นำชิ้นงานเซรามิกที่ได้หลังจากการเผา Sintering มาต้มเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.5 (ก) จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมงก่อนนำมาวัดค่า Density
- ทำการชั่งชิ้นงานเซรามิกโดยชั่งน้ำหนักในอากาศด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง 10 รอบ เพื่อให้ได้ความแม่นยำของความหนาแน่นภายในอากาศ ดังภาพที่ 3.5 (ข)
- จากนั้นทำการชั่งชิ้นงานเซรามิกในน้ำเพื่อให้ได้ค่าน้ำหนักของเซรามิกภายในน้ำ โดยชั่งทั้งหมด 10 รอบ เพื่อให้ได้น้ำหนักของเซรามิกในน้ำที่มีความแม่นยำของความหนาแน่น
- นำค่าทั้งสองที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของเซรามิก คำนวณโดยการใช้สูตรได้ดังสมการที่ (1)

$$\rho = \frac{W_{Air}}{W_{Air} - W_{Water}} \times \rho_{Water} \quad (1)$$

เมื่อ  $W_{Air}$  คือ น้ำหนักของเซรามิกตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ (g)

$W_{Water}$  คือ น้ำหนักของเซรามิกตัวอย่างที่ชั่งในน้ำ (g)

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของเซรามิกตัวอย่าง ( $g/cm^3$ )

และ  $\rho_{Water}$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $1.0000 g/cm^3$

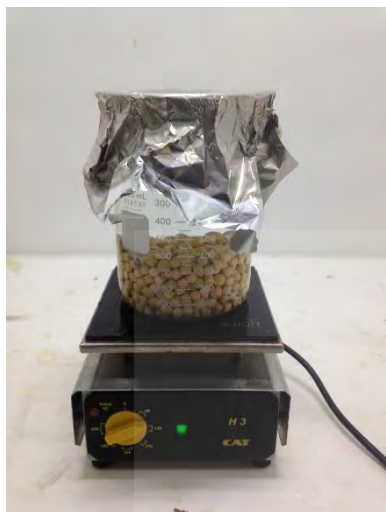
สำหรับค่าปริมาตรเชิงโมล ( $V_M$ ) นั้น สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของเซรามิกกับปริมาตรของโมล ดังสมการที่ (2)

$$V_M = \frac{M_T}{\rho} \quad (2)$$

เมื่อ  $V_M$  = ปริมาตรเชิงโมลของเซรามิกตัวอย่าง ( $cm^3/mol$ )

$M_T$  = น้ำหนักโมเลกุลรวมของเซรามิกตัวอย่าง ( $g/mol$ )

และ  $\rho$  = ความหนาแน่นของเซรามิกตัวอย่าง ( $g/cm^3$ )



ภาพที่ 3.5 (ก) ต้มขึ้นงานเป็นเวลา 3 ชั่วโมง      ภาพที่ 3.5 (ข) วัดค่า Density ของอากาศและน้ำ

### 3.4.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

1. เตรียมสารใส่ลงในแผ่นโลหะและนำเซรามิกตัวอย่างวางลงที่ตำแหน่งวางวัสดุของเครื่อง ดังภาพที่ 3.6 (ก)
2. ทำการวัดค่าเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกที่องศา  $2\theta$  ความยาวคลื่นที่  $20\lambda - 80\lambda$  ดังภาพที่ 3.6 (ข)
3. นำข้อมูลที่ได้จากการวัดค่า XRD มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและโครงสร้างของเซรามิก BSNT-BT

โดยการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะทดสอบด้วย เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) เพื่อศึกษาโครงสร้างของเซรามิก BSNT-BT อีกทั้งยังทดสอบเพื่อดูความเป็นโครงสร้างแบบ Perovskite



ภาพที่ 3.6 (ก) การเตรียมผงเซรามิก



ภาพที่ 3.6 (ข) การวัดค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

### 3.4.3 การทดสอบ Linear Shrinkage

การทดสอบการหดตัวเมื่อเผา ทดสอบการหดตัวเมื่อเผาเพื่อเปรียบเทียบขนาดก่อนเผา และหลังเผาตามวิธี ตามมาตรฐานของ ASTM C326-09 Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays เพื่อดูเปอร์เซ็นต์ในการหดตัวของเซรามิก ดัง สูตรที่ 3 ดังนี้

$$\text{การหดตัว, ร้อยละ} = \frac{\text{ความยาวเมื่อแห้ง} - \text{ความยาวเมื่อเผา}}{\text{ความยาวเมื่อแห้ง}} \times 100 \quad (3)$$

### 3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า (P-E hysteresis loop)

1. ขัดปรับผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 1,200 จนได้ระนาบที่เรียบเสมอกัน ทั้งสองด้านของชิ้นงาน
2. เช็ดชิ้นงานให้แห้งจากนั้นทาภาวเงินที่ชิ้นงานให้เรียบที่ละด้านโดยทิ้งไว้ให้แห้งที่ อุณหภูมิห้องเป็นเวลาครึ่งชั่วโมงจึงสามารถทาภาวเงินอีกด้านได้และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องครึ่งชั่วโมง เช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 3.7 (ก)
3. นำชิ้นงานเซรามิกที่ทาภาวเงินไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเพื่อไล่ความชื้น
4. ใส่ซิลิโคนออยลงไปในอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ จากนั้นนำชิ้นงานวางลง ณ ตำแหน่งที่วาง วัสดุตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.7 (ข)
5. ทำการวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ และ โวลต์ ให้เหมาะสม ตามที่ต้องการข้อมูลในการเปรียบเทียบจดบันทึกข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์และความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 3.7 (ก) การเตรียมชิ้นงาน



ภาพที่ 3.7 (ข) วางชิ้นงานเพื่อวัดสมบัติทางไฟฟ้า

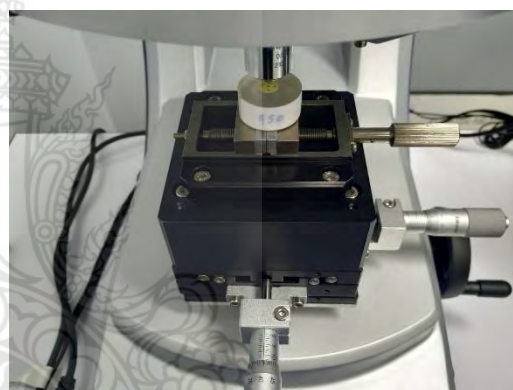
### 3.4.5 การทดสอบค่าความแข็ง (Vickers Hardness)

เป็นการทดสอบหาความแข็งของชิ้นงานโดยใช้เครื่อง micro vicker hardness ในกาทดสอบค่าความแข็งของเซรามิก โดยใช้หัวกดเพชรที่ 136 องศา ในการทดสอบชิ้นงาน มีวิธีการทดสอบชิ้นงานดังนี้

1. นำชิ้นงานมาขัดปรับระนาบด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 1,200 เพื่อให้ทั้งสองด้านมีระนาบที่เท่ากัน
2. ทำการหล่อเรซินเพื่อให้เมืงมีความเป็นระนาบมากยิ่งขึ้น ดังภาพที่ 3.8 (ก) จากนั้นทำการขัดปรับระนาบของเมืงอีกครั้งก่อนนำมาทำการทดสอบ
3. ใช้หัวกดเพชรขนาด 136 องศา ที่สามารถปรับแรงกดได้ตกลงบนพื้นผิวชิ้นงานเซรามิกเพื่อหาพื้นที่ที่มีความเรียบและสมบูรณ์ที่สุดในการทดสอบ จากนั้นทำการกดทดสอบทั้งหมด 5 จุด ด้วยกำลังขยาย 25 ไมครอน และบันทึกผล



ภาพที่ 3.8 (ก) การหล่อชิ้นงาน



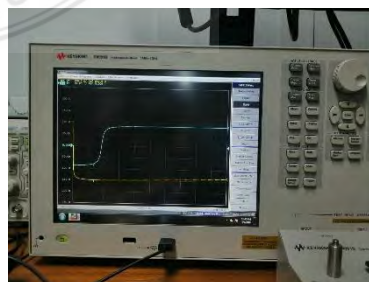
ภาพที่ 3.8 (ข) การวัดค่าความแข็ง

### 3.4.6 การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)

การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ มีความเป็นขั้ว (polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ได้ ดังภาพที่ 3.9 (ก) จากนั้นจะเป็นการอ่านค่ากราฟและบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาอภิปรายผล ดังภาพที่ 3.9 (ข)



ภาพที่ 3.9 (ก) การวัดค่า Dielectric



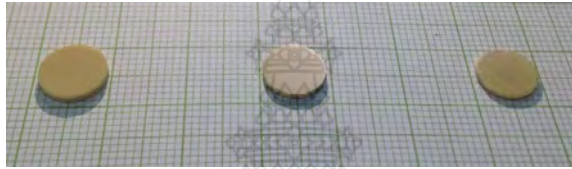
ภาพที่ 3.9 (ข) เก็บบันทึกข้อมูล

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก BSNT-BT

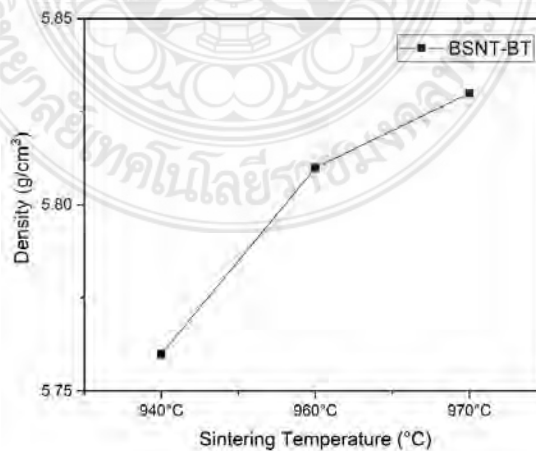
4.1.1 ลักษณะของเซรามิก BSNT-BT ที่เตรียมที่เงื่อนไข  $x=0.04$  ณ อุณหภูมิที่ 940,960 และ 970 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.1 เซรามิก BSNT-BT  $x=0.04$  ณ อุณหภูมิ 940,960 และ 970 องศาเซลเซียส

#### 4.1.2 ความหนาแน่น (Density)

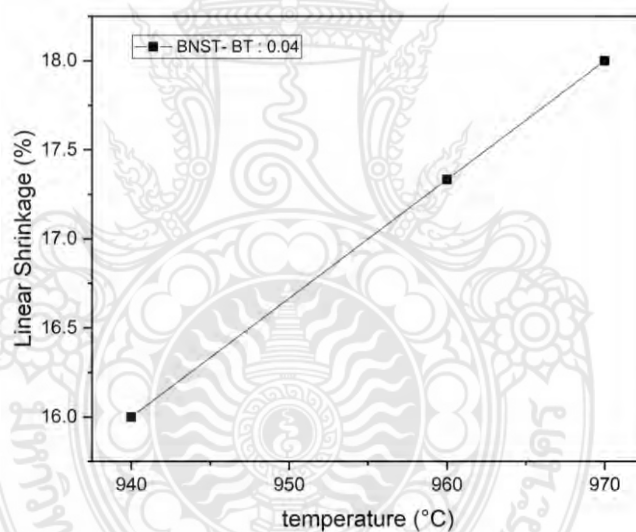
ผลการศึกษาค่าความหนาแน่นของเซรามิกตัวอย่างที่เผาคนละอุณหภูมิเมื่อนำมาเปรียบเทียบแล้วพบว่าที่อุณหภูมิ 970 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นของชิ้นงานมากที่สุด ในส่วนอุณหภูมิ 940 และ 960 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นน้อยลงมาตามลำดับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ทั้งนี้อุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อเม็ดเซรามิกการเผาที่อุณหภูมิทั้ง 3 อุณหภูมิโดยใช้ระยะเวลาในการแช่ทิ้งไว้ 7 ชั่วโมง จึงสรุปได้ว่าเม็ดเซรามิกจะมีความหนาแน่นขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงค่า Density ที่เงื่อนไข  $x=0.04$  ที่อุณหภูมิ 940,960 และ 970 องศาเซลเซียส

#### 4.1.3 การหดตัวเชิงเส้น (Linear Shrinkage)

การหาค่าการหดตัวของเม็ดเซรามิกตัวอย่างจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิส่งผลต่อการหดตัวของเม็ดเซรามิกเมื่อเราเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้เม็ดเซรามิกมีการหดตัวอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 970 องศาเซลเซียสที่มีค่าการหดตัวมากที่สุด ซึ่งในส่วนของอุณหภูมิที่ 930,940 จะมีค่าการหดตัวต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิและจำนวนเวลาในการเผาที่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ NaoyaTakahashi และคณะ [16] ที่ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวเชิงเส้นที่อุณหภูมิสูงพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงที่ 1,300 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวถึง 3 เปอร์เซ็นต์ทำให้งานมีความหนาแน่นมากขึ้นแต่อาจมีความเปราะบางเล็กน้อยเพื่อลดการหดตัวที่อุณหภูมิ 1,300 จึงได้มีการเคลือบ silica โดยเปอร์เซ็นต์การหดตัวจาก 4.3 เปอร์เซ็นต์ลดลงมาเหลือ 1.5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาที่มีผลต่อการหดตัวเชิงเส้นของวัสดุดังภาพที่ 4.3



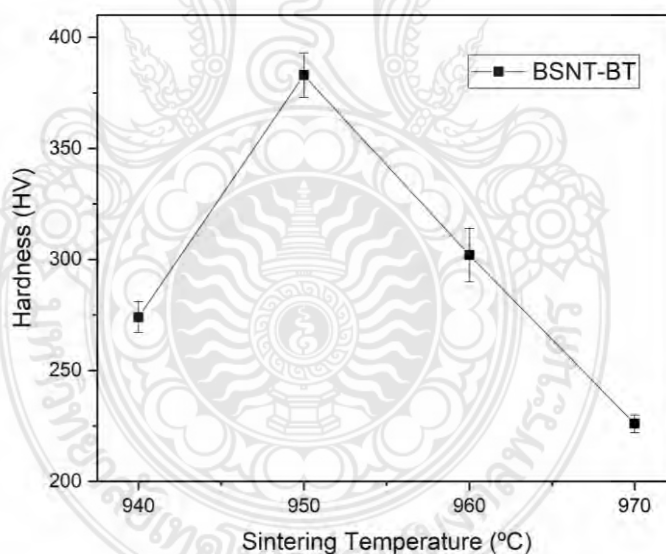
ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงค่าการหดตัว ณ อุณหภูมิ 940,960 และ 970 องศาเซลเซียส

#### 4.1.4 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness)

จากความหนาแน่นผลจากการศึกษาความหนาแน่นของเซรามิกตัวอย่างพบว่าความหนาแน่นของเซรามิกตัวอย่างมีผลต่อค่าความแข็งและสมบัติเชิงกลซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความหนาแน่นแต่ไม่เสมอไป ขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ด รูพรุน และ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเซรามิกดังภาพที่ 4.4

ตารางที่ 4.1 แสดงผลค่าความแข็งของตัวอย่างเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

	BSNT-BT 940°C	BSNT-BT 950°C	BSNT-BT 960°C	BSNT-BT 970°C
ผลการทดสอบ	Hardness (HV)	Hardness (HV)	Hardness (HV)	Hardness (HV)
1	284	397	317	232
2	278	387	311	227
3	273	380	299	225
4	270	378	297	224
5	267	371	285	223
ค่าเฉลี่ย	274	383	302	226
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7	10	12	4



ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าความแข็งของเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาเซรามิก BSNT-BT ที่มีการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (940,950,960 และ 970 องศาเซลเซียส) ที่เงื่อนไข  $x = 0.04$  ซึ่งการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันมีผลต่อความแข็งของชิ้นงานโดยพบว่าชิ้นงานของเซรามิก BSNT-BT ที่ความเข้มข้น  $x = 0.04$  ที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับความหนาแน่น จากภาพที่ 4.4 แสดงถึงความแข็งของชิ้นงานเซรามิกแต่ละอุณหภูมิซึ่งอุณหภูมิที่ 950 องศาเซลเซียส มีความแข็งดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่า density แล้วมีแนวโน้มไป

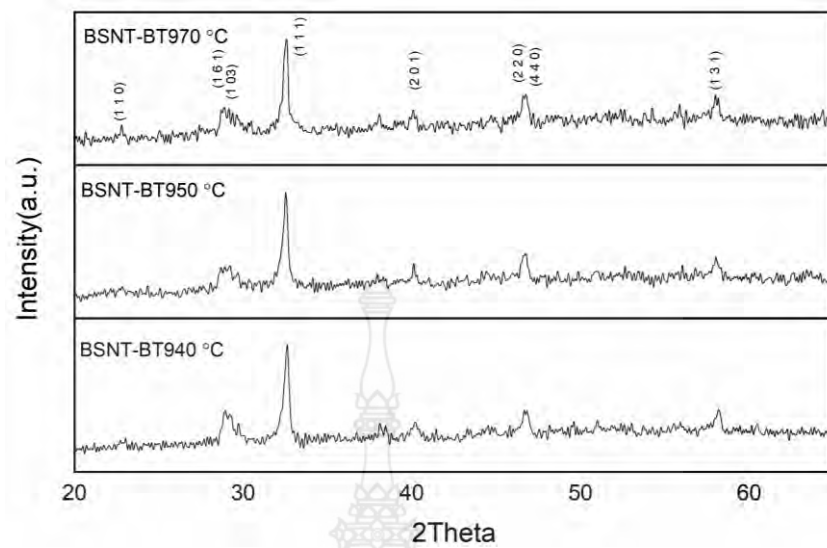


ในทางเดียวกันยิ่งความหนาแน่นมากค่าความแข็งก็จะเพิ่มตามค่า Density ที่ได้ ในส่วนของอุณหภูมิที่ 960 และ 940 องศาเซลเซียสจะมีค่าความแข็งรองลงมาแต่มีแนวโน้มแตกต่างจากค่า density ไม่มาก เนื่องจากมีผลมาจากรูพรุนและพื้นที่จำนวนในการทดสอบของเม็ดเซรามิกทั้งสองอุณหภูมิ และ อุณหภูมิที่ 970 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งน้อยที่สุดเนื่องจากลักษณะของชิ้นงานมีรูพรุนเยอะและความหนาแน่นต่ำจึงทำให้ค่าความแข็งที่ได้เป็นไปตามค่าความหนาแน่นของอุณหภูมิที่ 970 องศาเซลเซียส โดยจากการวิจัยเกี่ยวกับความแข็งของเซรามิก Chuthathip Mangkonsuac และคณะ [17] ได้ ศึกษาเกี่ยวกับ alcium phosphate เซรามิกที่มีความหนาแน่นสูงโดยใช้การเผาซินเตอร์ด้วยไมโครเวฟโดยศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับ การเผาเซรามิกแบบดั้งเดิม ชิ้นงานที่ถูกซินเตอร์นั้นโดดเด่นด้วยโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวผลปรากฏว่ามีความหนาแน่นและค่าความแข็งของชิ้นงานเซรามิก calcium phosphate ที่เผาโดยการเผาด้วยไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าการเผาแบบทั่วไปโดยความหนาแน่นมีผลต่อค่าความแข็งไม่ว่าจะเป็นการเผาซินเตอร์แบบดั้งเดิมหรือการเผาด้วยไมโครเวฟ จึงสรุปได้ว่าค่าความแข็งของเซรามิกที่อุณหภูมิแตกต่างกันนั้นจะมีความสัมพันธ์และแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกันกับค่า Density กล่าวคือ ยิ่งเม็ดเซรามิกมีความหนาแน่นมากค่าความแข็งในการทดสอบก็จะเพิ่มขึ้นตามค่าของ Density ที่ได้.

## 4.2 โครงสร้างของเซรามิก BSNT-BT

### 4.2.1 การศึกษาโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

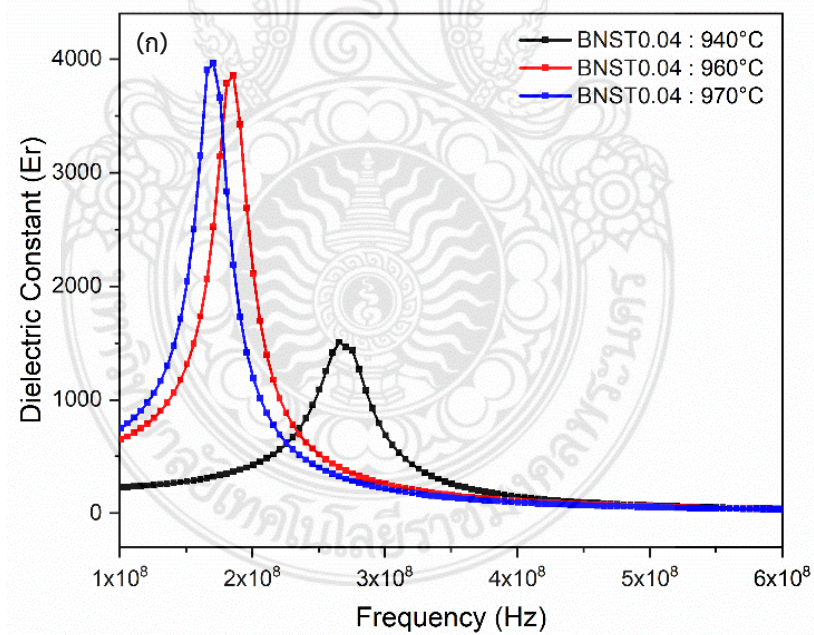
จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก บิสมัทโซเดียมไททาเนต-แบเรียม (BNT-BT) ที่เจือด้วย ซาแมเรียม (Sm) ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 940, 960 และ 970 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ผลการตรวจสอบพบว่า บิสมัทโซเดียมไททาเนต (BNT) มีลักษณะการเกิดเฟสที่สอดคล้องกับค่ามาตรฐาน Crystallography Open Database (COD) file หมายเลข 96-210-3297 ที่ตำแหน่ง  $2\theta = 20-60$  องศา มีลักษณะโครงสร้างแบบ tetragonal แบเรียมไททาเนต (BT) เกิดเฟสที่สอดคล้องกับค่ามาตรฐาน Crystallography Open Database (COD) file หมายเลข 96-202-0379 ที่ตำแหน่ง  $2\theta = 27.50$  องศา มีลักษณะโครงสร้างแบบ orthorhombic และนอกจากนี้ยังพบการเกิดเฟสซาแมเรียม ( $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ) ที่สอดคล้องกับค่ามาตรฐาน Crystallography Open Database (COD) file หมายเลข 96-153-1482 ที่ตำแหน่ง  $2\theta = 46-49$  องศา ดังภาพที่ 4.5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Peng Fu [18]



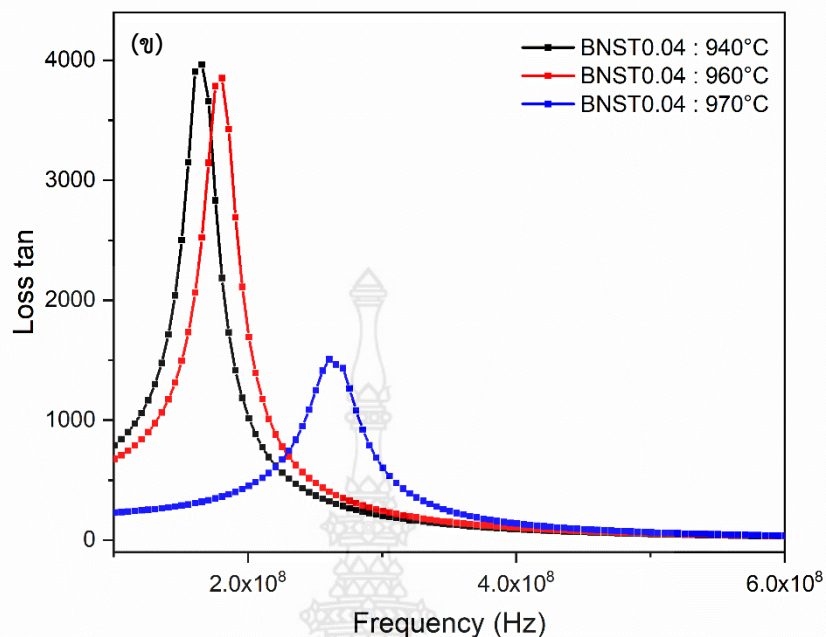
ภาพที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของเซรามิก BSNT-BT

### 4.3 สมบัติไฟฟ้าของเซรามิก BSNT-BT

#### 4.3.1 ค่า Dielectric ของเซรามิก BSNT-BT $x=0.04$ ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

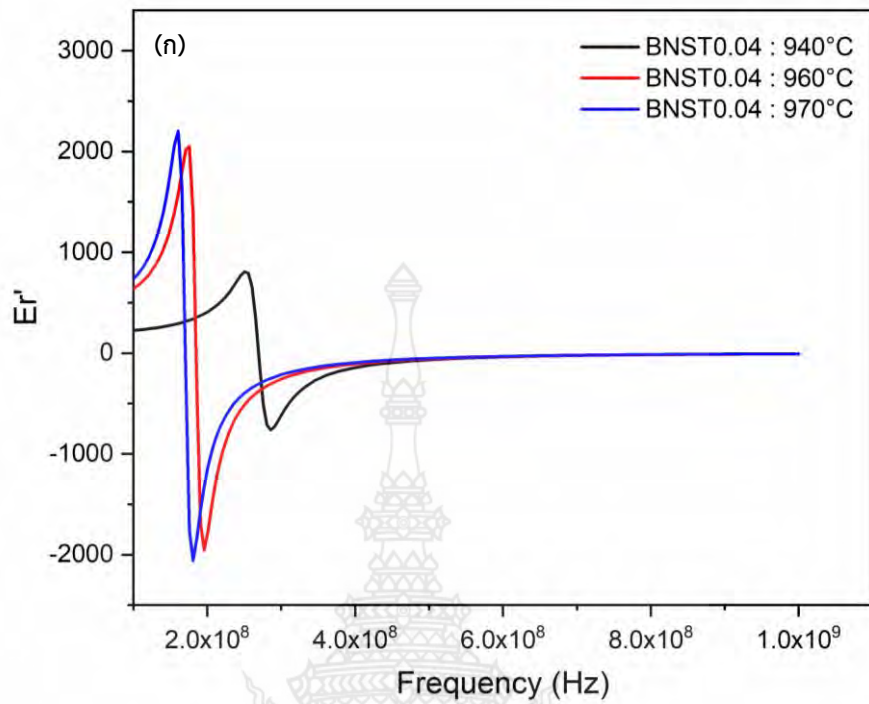


ภาพที่ 4.6 (ก) การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเปรียบเทียบกับความถี่ ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

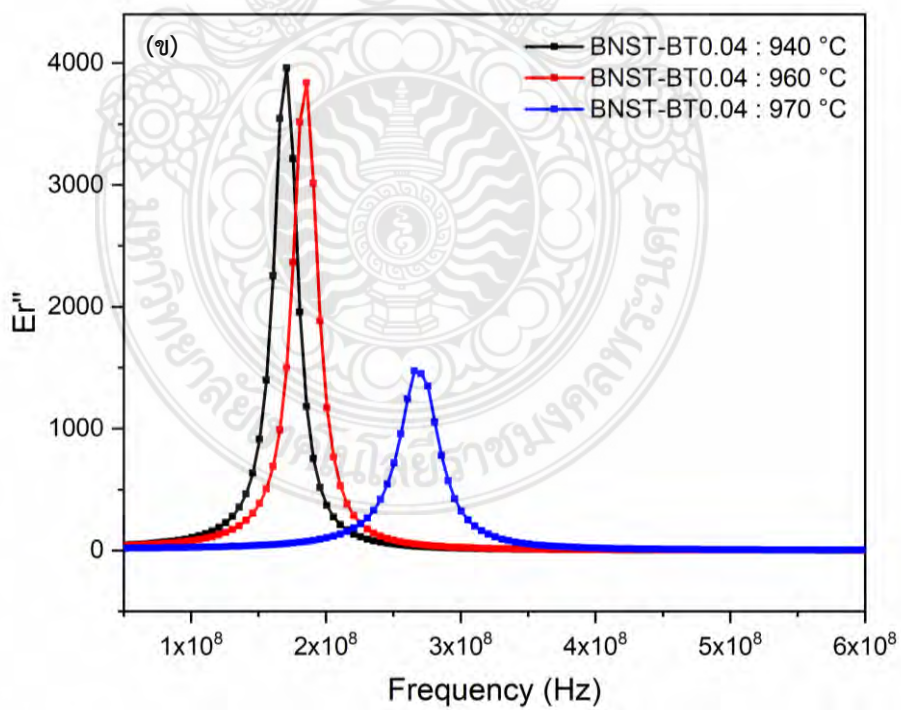


ภาพที่ 4.6 (ข) การเปลี่ยนแปลงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับความถี่ของเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ในการเผาเซรามิก BSNT-BT ที่ความเข้มข้น 0.04 ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (ตั้งแต่อุณหภูมิ 940, 960 และ 970 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ซึ่งอุณหภูมิที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าไดอิเล็กทริก โดยอุณหภูมิที่ 970 องศาเซลเซียส ตั้งแต่ความถี่  $10^6$  -  $10^8$  เฮิร์ตซ์ จะมีค่าไดอิเล็กทริกสูงที่สุดอยู่ที่ช่วงความถี่ 170.8 เมกะเฮิร์ตซ์ ตามด้วยอุณหภูมิที่ 960 และ 940 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งพีคที่สูงของเซรามิกเกิดจากอุณหภูมิและชั่วโมงในการเผาที่นานขึ้นดังภาพที่ 4.6 (ก) ซึ่งเมื่อเทียบกับภาพที่ 4.6 (ข) จะพบว่ามีความสัมพันธ์กัน เมื่อเซรามิก BSNT-BT ที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงแต่จะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำและเซรามิก BSNT-BT ที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำแต่จะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูง จากงานวิจัยของ Jiwen Xu และคณะ ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับความถี่ที่แตกต่างและอุณหภูมิที่แตกต่างพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงจะทำให้มีค่าไดอิเล็กทริกที่เพิ่มขึ้นและมีความสัมพันธ์กันของการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะทำให้มีค่าการสูญเสียที่ต่ำไปในทิศทางเดียวกัน [19] จึงสรุปได้ว่าในช่วงความถี่สูงเซรามิกที่อุณหภูมิ 970 องศาเซลเซียสสามารถนำมาใช้งานในช่วงความถี่นั้นๆได้



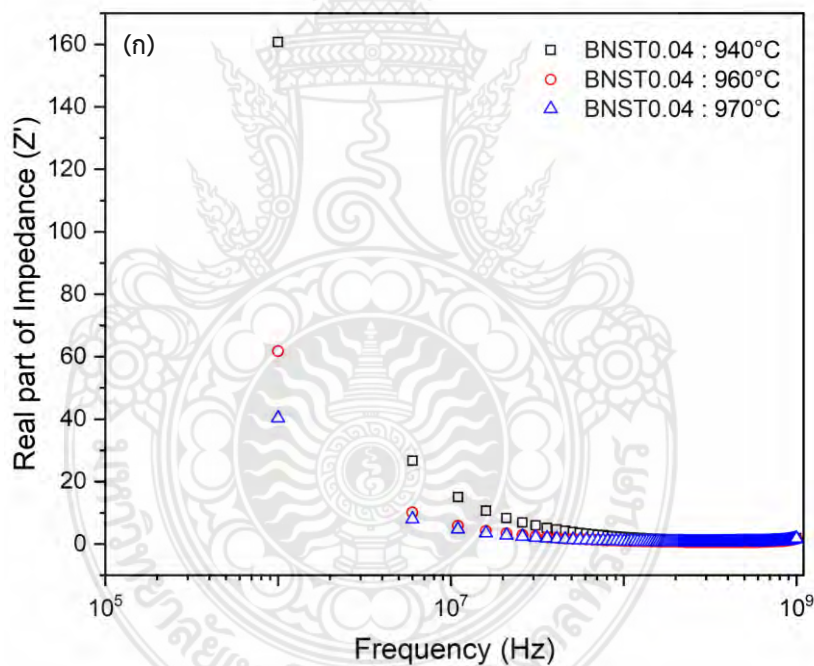
ภาพที่ 4.7 (ก) การเปรียบเทียบค่าส่วนจริงของค่าไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของเซรามิก  
BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน



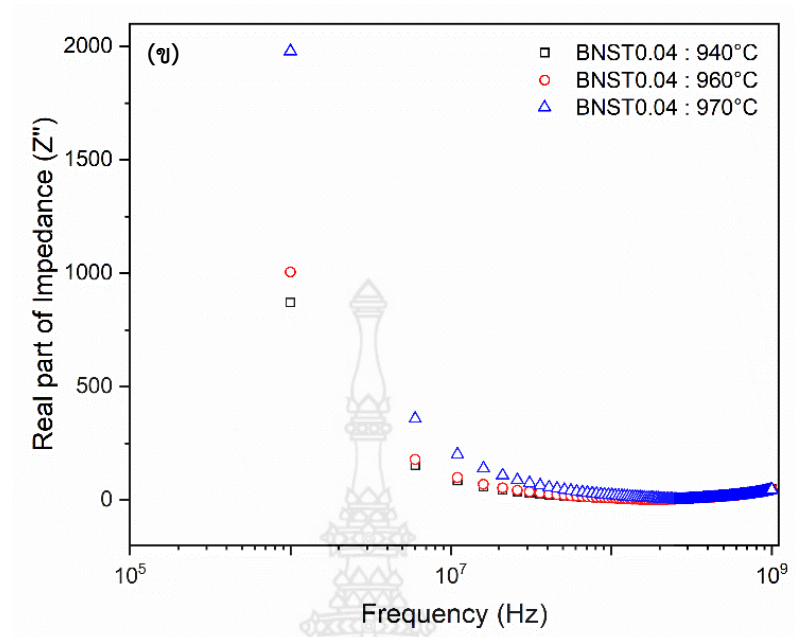
ภาพที่ 4.7 (ข) การเปรียบเทียบค่าส่วนจินตภาพของไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของเซรามิก  
BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

การเปรียบเทียบค่าส่วนจริงของค่าไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของเซรามิก BSNT-BT ที่  $x=0.04$  ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (ตั้งแต่อุณหภูมิที่ 940, 960 และ 970 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 7 ชั่วโมง พบว่าลักษณะของกราฟในช่วงความถี่ 175.8 เมกะเฮิร์ตซ์ อุณหภูมิที่ 970 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.7 (ก) จะมีค่าส่วนจริงของไดอิเล็กทริกที่สูงซึ่งสามารถนำมาเป็นตัวเก็บประจุได้ ทั้งนี้ผลของการสูญเสียค่าไดอิเล็กทริกในส่วนของค่าจินตภาพนั้นส่งผลให้อุณหภูมิที่ 970 องศาเซลเซียสลดลงต่ำที่สุดและพบพีคที่สูงที่สุดคืออุณหภูมิ 940 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.7 (ข) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าส่วนจริงของค่าไดอิเล็กทริกอีกด้วย จึงสรุปได้ว่าในช่วงความถี่ที่ 175.8 เมกะเฮิร์ตซ์ อุณหภูมิที่ 970 องศาเซลเซียส สามารถเป็นตัวเก็บประจุได้ในช่วงความถี่นั้นได้

#### 4.3.2 ค่า Impedance ของเซรามิก BSNT-BT $x=0.04$ ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

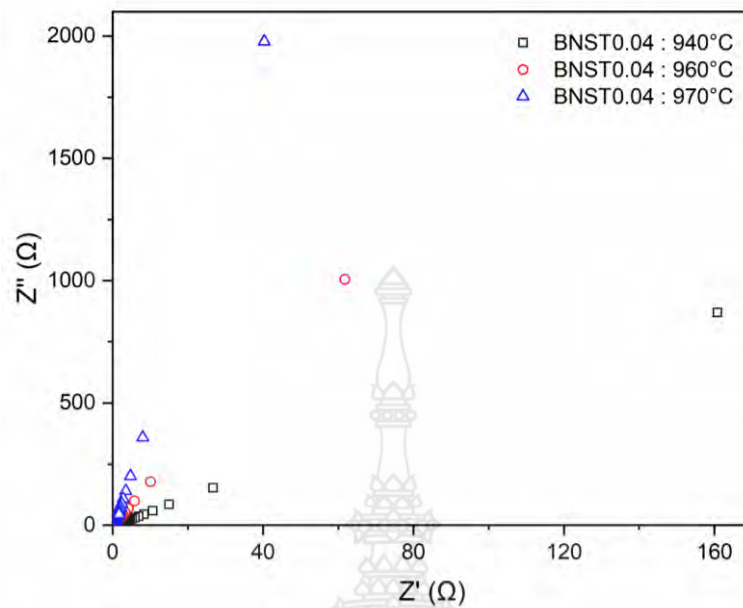


ภาพที่ 4.8 (ก) การเปรียบเทียบค่าส่วนจริงของเซรามิก BSNT-BT กับความถี่



ภาพที่ 4.8 (ข) การเปรียบเทียบค่าส่วนจินตภาพของเซรามิก BSNT-BT กับความถี่ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

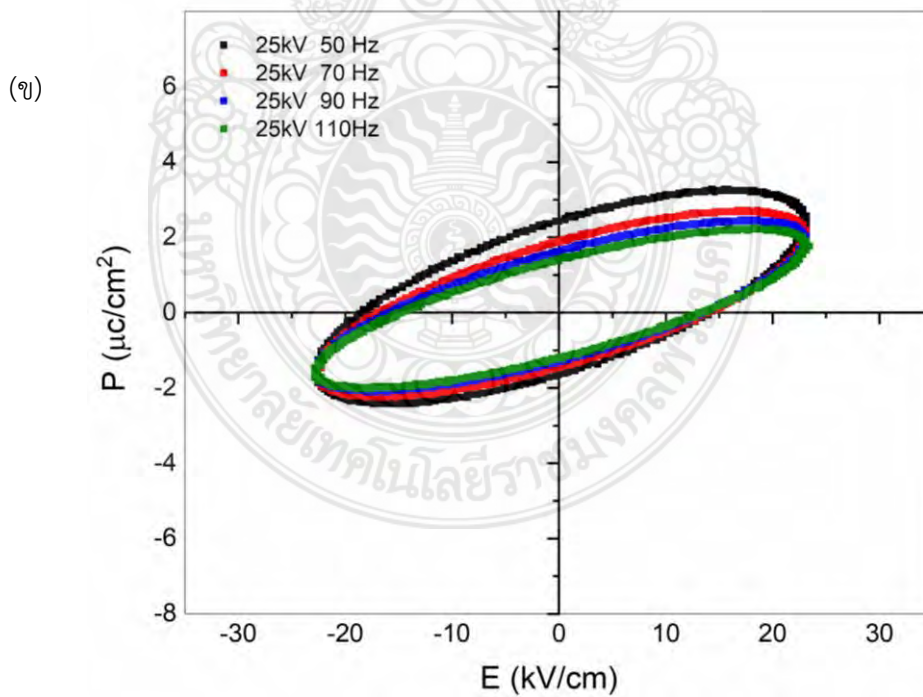
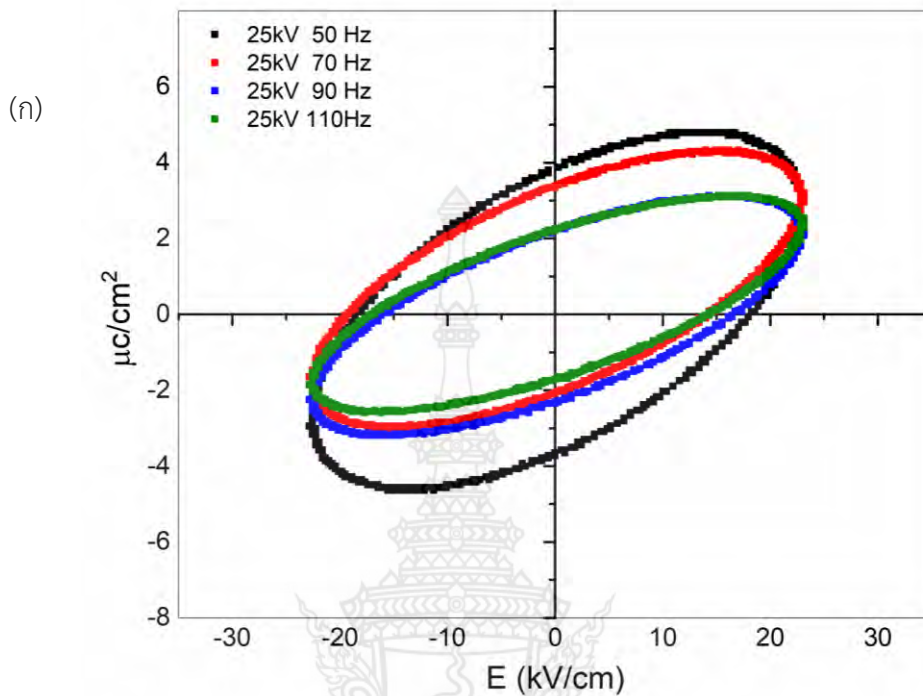
จากภาพที่ 4.8 (ก) จะเห็นได้ว่า ณ ช่วงความถี่ที่  $10^5 - 10^9$  เฮิร์ตซ์ อุณหภูมิที่มีค่าส่วนจริงสูงสุด อยู่ที่อุณหภูมิ 940 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับค่า loss tan ดังภาพที่ 4.6 (ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองค่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จากการวิจัยของ S. Halder และคณะ [20] พบว่า มีการปรากฏจุดสูงสุดของพีคความถี่ที่แน่นอนเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่ง ในส่วนของตรงส่วนจินตภาพของ เส้นโค้งความต้านทานและที่ความถี่สูง โดยสรุปได้ว่า ค่าจินตภาพของเซรามิก BSNT จะมีความสัมพันธ์และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าไดอิเล็กทริก ดังภาพที่ 4.6 (ก) จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะมีค่าไดอิเล็กทริกและค่าจินตภาพที่ยานความถี่สูงและมีความเป็น ตัวต้านทานเช่นกัน



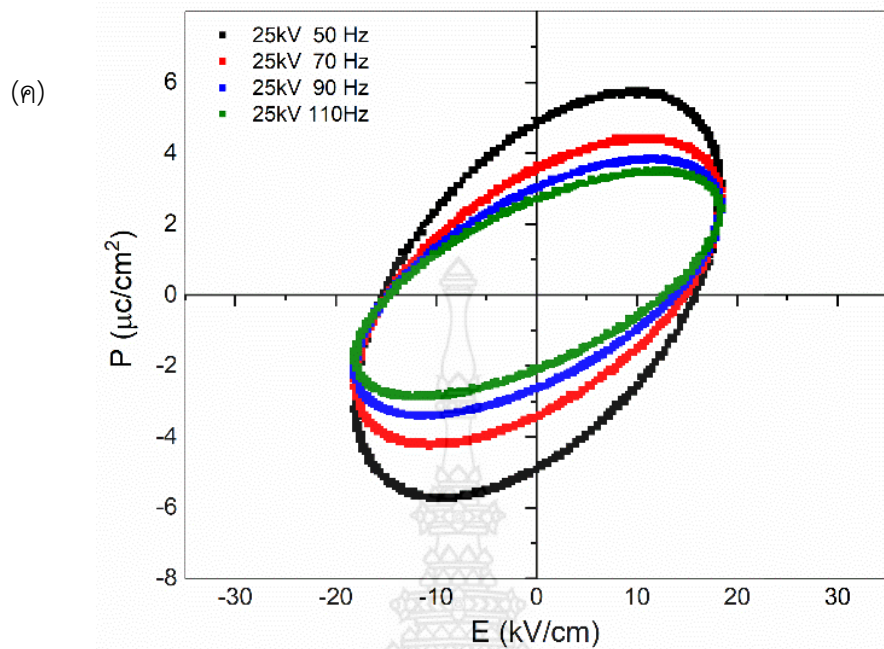
ภาพที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของเซรามิก BSNT-BT กับความถี่  
ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

พล็อตอิมพีแดนซ์ของเซรามิก BSNT-BT ที่มีการเปรียบเทียบกับความต้านทานและความถี่ จากภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าการเหนี่ยวนำในส่วนที่โค้งครึ่งวงกลมที่มีความถี่สูงอยู่ในช่วงความถี่ที่ 198.4 เมกะเฮิรตซ์ มีการกระจายตัวออกเป็นวงกลมแนวโค้งมากที่สุดโดยเรียงจากอุณหภูมิ 940 , 960 และ 970 องศาเซลเซียส ตามลำดับความถี่ จากงานวิจัยของ Elaher Taghaddos และคณะ [21] พบว่าเมื่อให้ความถี่สูงเข้าไปจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและทำให้ส่วนโค้งของชิ้นงานมีความโค้ง และกระจายตัวได้มากขึ้นโดยความต้านทานจะมีองค์ประกอบสูงมาก เช่น องค์ประกอบของเฟส ผนิก ในการเผา หรือ อุณหภูมิในการเผาก็มีผลต่อส่วนโค้งที่มีขนาดใหญ่และการกระจายตัวซึ่งผลที่เข้าใกล้ วงกลมและโค้งจะขึ้นอยู่กับระดับความถี่ที่สอดคล้องกับผลที่ได้ จึงสรุปได้ว่า ผลของอุณหภูมิและความถี่มีผลต่อการโค้งและการกระจายตัวของเซรามิก BSNT-BT

## 4.3.3 P-E hysteresis loop parameters ของเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่าง







ภาพที่ 4.10 (ก) P-E hysteresis loop เซรามิก BSNT-BT 940 องศาเซลเซียส (ข) P-E hysteresis loop เซรามิก BSNT-BT 960 องศาเซลเซียส (ค) P-E hysteresis loop ของเซรามิก BSNT-BT 970 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกพบว่าสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่ต่างกัน (ตั้งแต่อุณหภูมิที่ 940, 960 และ 970 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้มีลูปไฟฟ้ามีความโค้งมากขึ้นตามความถี่ที่สูงขึ้นซึ่งมีความสัมพันธ์และแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าไดอิเล็กทริก ดังภาพที่ 4.6 (ก) เนื่องจากที่อุณหภูมิ 970 องศาเซลเซียสจะมีค่าไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุด จากงานวิจัยของ Qi Xu และคณะ [22] ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิที่ต่างกัน โดยผลวิจัยพบว่า อุณหภูมิที่ต่างกันจะส่งผลให้เซรามิกมีการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นโดยขึ้นอยู่กับความถี่และอุณหภูมิที่ใช้โดยยิ่งอุณหภูมิสูงและความถี่สูงจะทำให้เซรามิกมีลูปไฟฟ้าที่ดีขึ้นตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าการเผาเซรามิกที่อุณหภูมิที่ต่างกันทำให้เซรามิก สามารถเป็นตัวเก็บประจุได้ดีและระยะเวลาในการเผาส่งผลทำให้ลูปไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่าง

จากการศึกษาเซรามิก BSNT-BT โดยการเตรียมด้วยวิธีการเผาใหม่แบบดั้งเดิมโดยเพิ่มอุณหภูมิในการเผา พบว่าความหนาแน่นของเซรามิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความอุณหภูมิและความนานของชั่วโมงที่ใช้ในการเผาทำให้เซรามิกที่ได้มีความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น ในส่วนของค่าการหดตัวจะมีผลกับอุณหภูมียิ่งอุณหภูมิสูงและมีความหนาแน่นมากจะทำให้ชิ้นงานมีการหดตัวสูงตามลำดับอีกทั้งในเรื่องของความแข็งแรงของอุณหภูมิ ความหนาแน่น รวมถึงโครงสร้างของเซรามิกที่ได้ส่งผลต่อความแข็งแรงของเซรามิก.

#### 5.2 สมบัติทางไฟฟ้า BSNT-BT ณ อุณหภูมิที่แตกต่าง

ในส่วนของสมบัติในด้านของค่าไดอิเล็กทริกพบว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปมีผลต่อเล็กน้อยต่อสมบัติไฟฟ้าซึ่งต้องขึ้นอยู่กับสารตัวเจือที่ใช้อีกทั้งยังอยู่ที่โครงสร้างของเซรามิกอีกด้วย ทั้งนี้ค่าไดอิเล็กทริกของเซรามิกมีแนวโน้มที่จะเป็นฉนวนได้ต่ำเนื่องจากค่าไดอิเล็กทริกมีค่าที่สูงจึงทำให้เซรามิกมีความเป็นฉนวนได้ต่ำ

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดในงานวิจัยอื่นได้ ในกระบวนการดำเนินงานมีเทคนิคที่แตกต่างในการทำงานซึ่งผลที่ได้เกี่ยวกับสมบัติต่างๆ อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ โดยผลของการทดสอบขึ้นอยู่กับปริมาณของสารที่เจือ กระบวนการเตรียมชิ้นงาน และระยะเวลาในการเผาที่อาจส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลและสมบัติไดอิเล็กทริกที่ดีขึ้นหรือแย่ลงก็ได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการเตรียมชิ้นงาน ระยะเวลาในการเผา และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

## บรรณานุกรม

- [1] ดร. คชินท์ สายอินทวงศ์ เซรามิก ceramic [ออนไลน์] สืบค้นเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2563 จาก  
เว็บไซต์ : [http://www.thaiceramicsociety.com/ab\\_cer.php](http://www.thaiceramicsociety.com/ab_cer.php)
- [2] B. jaffe ,”piezoelectric ceramics”, elsevier science, 2012 Page 328  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-379550-2.X5001-7>
- [3] Yueming Zhanga, Guochuang Liang and et al. “Phase-transition induced optimization of electrostrain, electrocaloric refrigeration and energy storage of LiNbO<sub>3</sub> doped BNT-BT ceramics”.*Ceramics International. Volume 46, Issue 2, (2020), 1343-1351.*
- [4] Bin Li, Mao-Sheng Cao,† Jia Liu, and Da-Wei Wang.. “Domain Structure and Enhanced Electrical Properties in Sodium Bismuth Titanate Ceramics Sintered from Crystals with Different Morphologies”. *Journal of the American Ceramic Society volume 99, (2016), 2316–2326.*
- [5] ดร.อารี ธนบุญสมบัติ. (2017) เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว:บิสมัทโซเดียมไททาเนต [ออนไลน์] สืบค้นเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2563 จากเว็บไซต์:  
[https://www2.mtec.or.th/th/emagazine/admin/upload/261\\_MT09\\_37.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/emagazine/admin/upload/261_MT09_37.pdf)
- [6] Haertling, G. H, “Ferroelectric Ceramics: History and Technology,” *Journal of the American Ceramic Society, (1999). 797-818.*
- [7] C.Morilla-Santosa. F.F.Ferreira, “Modeling the crystallographic structure of Ho(Ni,Co,Mn)O<sub>3±δ</sub> perovskite-type manganite,”*Journal of Advanced Ceramics, 2012, 274-282.*
- [8] M.N. Rahaman, “ceramic processing and sintering”, Marcel Dekker Inc., New York, 1995.
- [9] M. SherifEl-Eskandarany, “2 - The history and necessity of mechanical alloying,” *Mechanical Alloying (Second Edition)Nanotechnology, Materials Science and Powder Metallurgy, (2015).13-47.*

- [10] Sasiporn Prasertpalichat, Sasipha Phutthichonand Rattiphorn Sumang, "Effect Of Sintering Temperature On Crystal Structure and Electrical Properties Of Bnt-Bkt-Bzt Lead-Free Ceramic," *PSRU Journal of Science and Technology* 2, (2017), 20-32.
- [11] Chompoonuch Warangkanagool, "Reducing Temperature for Preparation 0.7BT-0.3BNT Ceramic Powders," *Naresuan University Journal: Science and Technology*, (2015), 79-85.
- [12] Wangfeng Bai, Peng Li, "Structure evolution and large strain response in BNTeBT lead-free piezoceramics modified with  $\text{Bi}(\text{Ni}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ ," *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 649, (2015), 772-781.
- [13] J.D.S. Guerra, A. Peláiz-Barranco, "Room temperature antiferroelectric-phase stability in BNT-BT lead-free ceramics," *Physica B: Physics of Condensed Matter*, Volume.525, (2017), 114-118.
- [14] Jianhua Zhu, Eric Rop Kipkoech, Wenzhong Lu, "Effects of  $\text{LnAlO}_3$  (Ln = La, Nd, Sm) additives on the properties of  $\text{Ba}_{4.2}\text{Nd}_{9.2}\text{Ti}_{18}\text{O}_{54}$  ceramics," *Journal of the European Ceramic Society* vol.26, (2005), 2027-2030.
- [15] SE Perfect One Co.,Ltd. หลักการ Ball mill (2018) สืบค้นเมื่อ 15 มีนาคม 2563 [ออนไลน์] จากเว็บไซต์ : <http://secuttingtool.blogspot.com/2013/02/ball-mill.html>
- [16] Chuthathip Mangkonsua , Ishikawa Kuniob , Lila Bunhanc Radzali Otmand and Ahmad-Fauzi, Mohd Noor. (2016). "the effect of microwave sintering on the microstructure and properties of calcium phosphate ceramic," *Procedia Chemistry*, volume.19, pp498 – 504 <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.044>
- [17] Chuthathip Mangkonsua , Ishikawa Kuniob , Lila Bunhanc Radzali Otmand and Ahmad-Fauzi, Mohd Noor. (2016). "the effect of microwave sintering on the microstructure and properties of calcium phosphate ceramic," *Procedia Chemistry*, volume.19, pp498 – 504 <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.044>
- [18] Peng Fu, et al. "Piezoelectric, ferroelectric and dielectric properties of  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ -doped  $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})_{0.94}\text{Ba}_{0.06}\text{TiO}_3$  lead-free ceramics," *Materials Chemistry and Physics*. Vol. 124, pp. 1065-1070, 2010.

- [19] Jiwen Xu , Xiaopeng Lu , Ling Yang , Changrong Zhou , Yangyang Zhao , Haibo Zhang , Xiaowen Zhang , Wei Qiu and Hua Wang. (2017,May 30).“Enhanced electrical energy storage properties in Ladoped  $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})_{0.93}\text{Ba}_{0.07}\text{TiO}_3$  lead-free ceramics by addition of  $\text{La}_2\text{O}_3$  and  $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ ”. *J Mater Sci* (2017) 52:10062–10072  
DOI: 10.1007/s10853-017-1209-0
- [20] S. Halder , S. Bhuyan , R.N.P. Choudhary. (2019,February).“Structural, dielectric and electrical characteristics of lead-free electro-ceramic:  $\text{Bi}(\text{Ni}_{2/3}\text{Ta}_{1/3})\text{O}_3$ ”. *Volume 22, Issue 1, February 2019, Pages 376-384*  
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.11.007>
- [21] Elaheh Taghaddos , Harry Charalambous, Thomas Tsakalagos, Ahmed Safari. (2019,August). “Electromechanical properties of flash sintered BNT-based piezoelectric ceramic”. *Volume 39, Issue 9, August 2019, Pages 2882-2888*  
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.03.050>
- [22] Qi Xu , Michael T. Lanagan , Xuechen Huang , Juan Xie , Lin Zhang , Hua Hao and Hanxing Liu. (2016,June). “Dielectric behavior and impedance spectroscopy in lead-free BNT–BT–NBN perovskite ceramics for energy storage”. *Volume 42, Issue 8, June 2016, Pages 9728-9736* <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.062>

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ



## ประวัตินักศึกษา

ชื่อ นามสกุล ญาณิกา สิริภัทรธนากุล  
วัน เดือน ปีเกิด 3 พฤษภาคม 2540  
ภูมิลำเนา 70/27 ม.4 ถ. สุราษฎร์-นาสาร ซ. บุญทรัพย์  
ต. พังเตาใหม่ อ. บ้านนาสาร จ. สุราษฎร์ธานี  
84120



## ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	เทคนิคสุราษฎร์ธานี	2559
มัธยมศึกษาตอนต้น	สุราษฎร์ธานี 2	2555

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ 70/27 ม.4 ถ. สุราษฎร์ -นาสาร ซ. บุญทรัพย์ ต. พังเตาใหม่ อ. บ้านนาสาร  
จ. สุราษฎร์ธานี 84120  
yanika.m@hotmail.com , yanika-s@rmutp.ac.th  
063-990-0108



## ประวัตินักศึกษา

ชื่อ นามสกุล

ภาณุวัฒน์ อินทนู

วัน เดือน ปีเกิด

11 กุมภาพันธ์ 2541

ภูมิลำเนา

152/2 หมู่ที่ 3 ต.บางพูด อ.ปากเกร็ด

จ. นนทบุรี 11120



## ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา

ชื่อสถาบัน

ปีที่สำเร็จการศึกษา

มัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนปากเกร็ด

2559

มัธยมศึกษาตอนต้น

โรงเรียนปากเกร็ด

2555

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้

19/51 หมู่ที่12 ต.คลองข่อย อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120

Panuwat-a@rmutp.ac.th

094-986-5411

