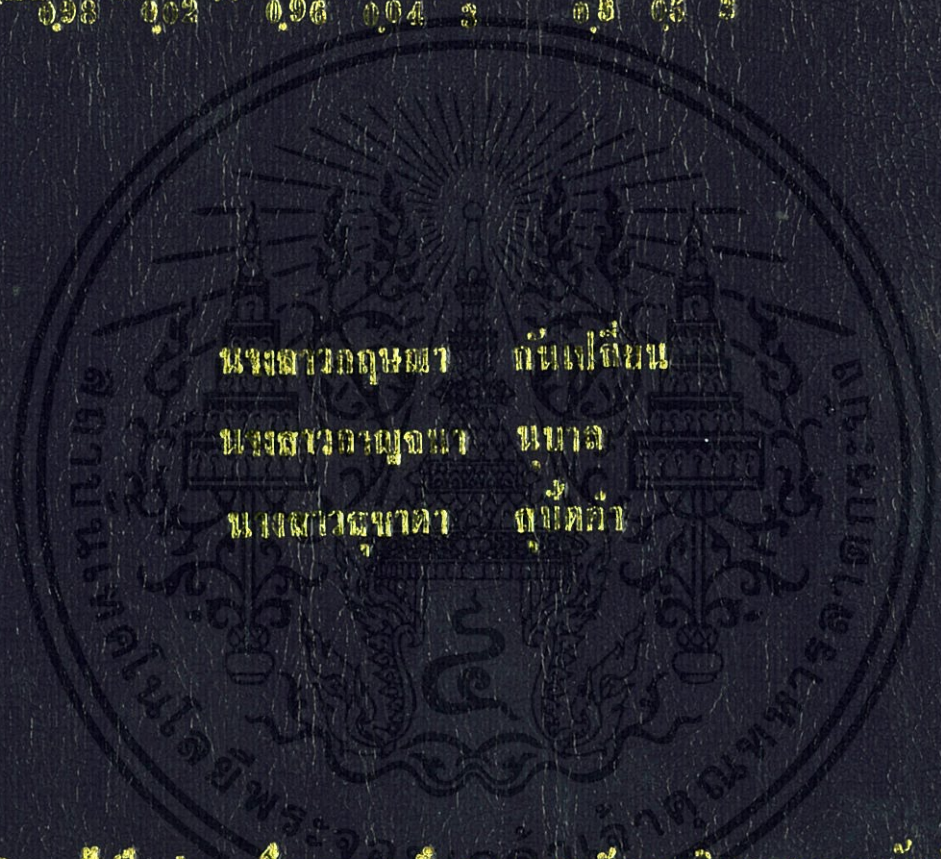


การเตรียมและสมบัติพิเศษของเซรามิกไร้ตะกั่ว

$(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04}\text{O}_{3-x}\text{HM}$ Zr O: $\text{M}=\text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$

Preparation and properties of lead-free piezoelectric ceramic

$(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04}\text{O}_{3-x}\text{HM}$ Zr O: $\text{M}=\text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$



นางสาวกฤษณา กิ่งฟ้า

นางสาวกฤษณา นาน

นางสาวกฤษณา กิ่งฟ้า

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต

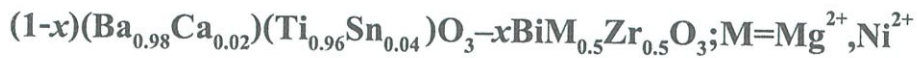
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

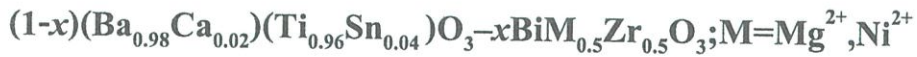
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การเตรียมและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกไร้สารตะกั่ว



Preparation and properties of lead-free piezoelectric ceramic



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

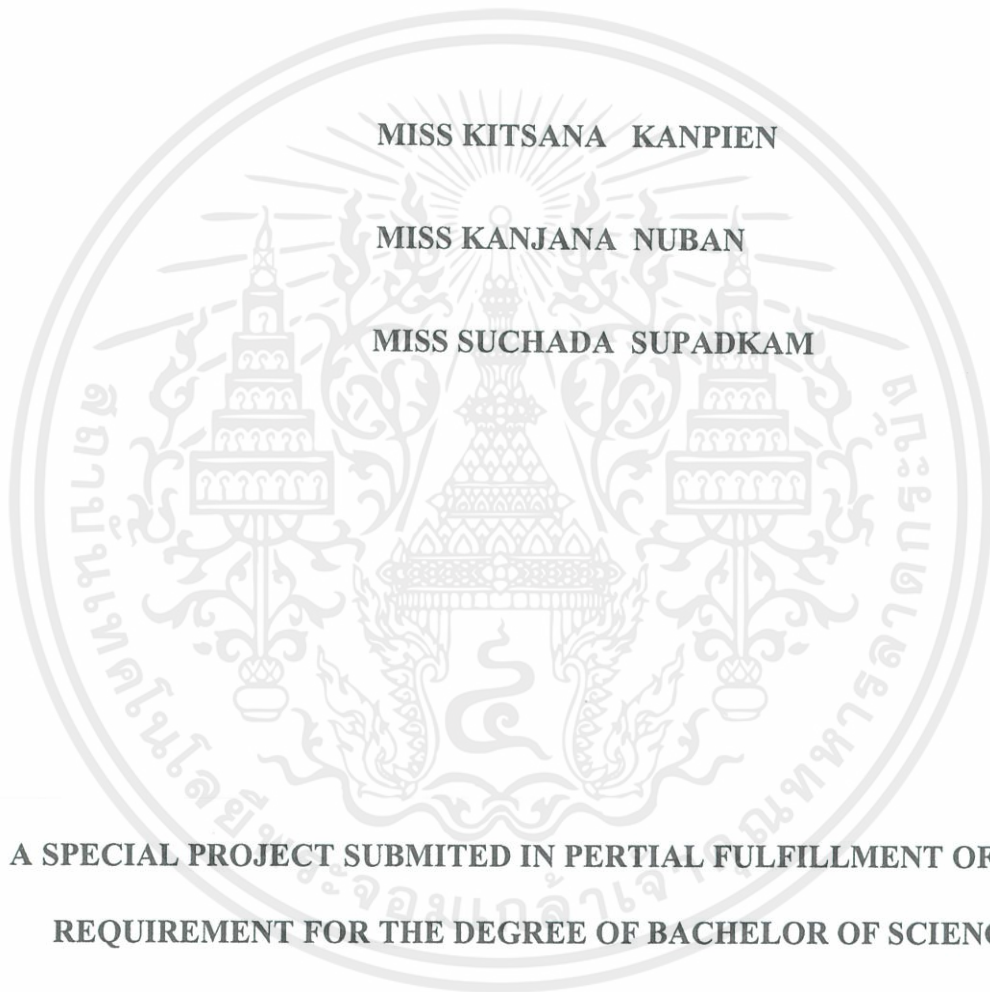
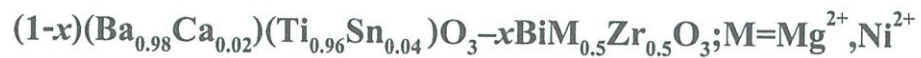
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง **ปีการศึกษา 2556** ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation and properties of lead-free piezoelectric ceramic



MISS KITSANA KANPIEN

MISS KANJANA NUBAN

MISS SUCHADA SUPADKAM

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE**

IN MAJOR OF INDUSTRIAL CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

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

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2013

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกไร้สารตะกั่ว
 $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3-x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3; \text{M}=\text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$
 Preparation and properties of lead-free piezoelectric ceramic
 $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3-x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3; \text{M}=\text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$

ชื่อนักศึกษา นางสาวกฤษณา กันเปลี่ยน
 นางสาวกาญจนา นูบาล
 นางสาวสุชาดา สุปัดคำ

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นราธิป วิทยาการ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
 อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ดร.ปานไพลิน สีหาราช	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์	
ผศ.ดร.นราธิป วิทยาการ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกไร้สารตะกั่ว	
	$(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$; $M=\text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกฤษณา กันเปลี่ยน	53050160
	นางสาวกาญจนา นุบาล	53050166
	นางสาวสุชาดา สุปัดคำ	53050376
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.นราธิป วิทยากร	

บทคัดย่อ

แบเรียมแคลเซียมไททานेटทินออกไซด์เป็นเซรามิกไร้สารตะกั่วที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่สูงใกล้เคียงกับเลดเซอโคเนตไททานेट (PZT) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของ $\text{Bi}(\text{M}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_3$; $M^{2+} = \text{Mg}^{2+}$ และ Ni^{2+} บนโครงสร้างผลึก การเปลี่ยนเฟส และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกไร้สารตะกั่ว $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$; $M=\text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$ เมื่อ $x = 0.00, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08$ และ 0.10 โดยเตรียมด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ซึ่งทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกและพฤติกรรมการเกิดเฟส ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เซรามิกระบบ BCTS-BMZ ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1350°C และระบบ BCTS-BNZ ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1325°C พบว่าเซรามิกที่ได้มีความหนาแน่นสูง และโครงสร้างทางจุลภาคมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งความหนาแน่นที่ได้มีค่ามากกว่า 97% เมื่อเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี ที่สัดส่วนองค์ประกอบของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่ามีเฟสเพอรอฟสไกต์เกิดขึ้น และโครงสร้างที่ได้เป็นเตตระโกนอล ซึ่งสังเกตได้ว่าโครงสร้างเตตระโกนอลของ BCTS จะลดลงเมื่อปริมาณสัดส่วนของ BMZ; $M^{2+} = \text{Mg}^{2+}$ และ Ni^{2+} เพิ่มขึ้น วงฮิสเทอรีซิสของเพอโรอิเล็กทริกแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของ BMZ; $M^{2+} = \text{Mg}^{2+}$ และ Ni^{2+} ในเซรามิก BCTS จะส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันและค่าสนามไฟฟ้าบังคับลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงวัน เวสสำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม กรุณาแจ้งไปยังกองบรรณาธิการ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้

คำสำคัญ : เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว เฟสเพอรอฟสไกต์ โพลาริเซชัน สนามไฟฟ้าบังคับ

Title	Preparation and properties of lead-free piezoelectric ceramic $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 -x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$; $M = \text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$	
Students	Miss Kitsana Kanpien	53050160
	Miss Kanjana Nuban	53050166
	Miss Suchada Supadkam	53050376
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Chemical Industry	
Academic Year	2013	
Advisor	Asst. Prof. Dr. Naratip Vittayakorn	

ABSTRACT

Barium calcium titanate tin oxide $[(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3:\text{BCTS}]$ is one such lead free system, which exhibits high piezoelectric properties similar to lead zirconate titanate (PZT). In this study we report the effect of $\text{Bi}(\text{M}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_3$; $M^{2+} = \text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$ on the crystal structure, phase transition and electrical properties of $[(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3]$ ceramics. Lead free $[(1-x)\text{BCTS} -x\text{BMZ}; M^{2+} = \text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}]$ (with x ranging from 0 to 0.1) were synthesized by conventional solid state sintering method. The crystal structure and phase formation was analyzed by X-ray diffraction (XRD). Highly dense and homogenous microstructure with >97% of the theoretical density was obtained by solid-state sintering of the green pellets at 1325°C for BCTS-BNZ and at 1350°C for BCTS-BMZ system. In the studied composition range, the XRD patterns revealed a single perovskite phase with tetragonal symmetry. However, the tetragonality (c/a) of BCTS ceramics significantly decreased as the BMZ; $M^{2+} = \text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$ content was increased. The ferroelectric hysteresis loop indicates that the ferroelectric order of the BCTS ceramics was significantly disrupted by the addition of BMZ; $M^{2+} = \text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$, leading to degradation in the remnant polarization and coercive field.

Keyword : Lead free piezoelectric perovskite phase polarization coercive field

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.นราธิป วิทยากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงานพิเศษฉบับนี้ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาที่ดี ให้ความรู้ สอนทักษะในการทำงานและความเอาใจใส่ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ดร.ปาน ไพลิน สีหาราชและ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบและช่วยกรุณาแก้ไขโครงการงานพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่เอื้อเฟื้อความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ และสารเคมี ตลอดจนเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและญาติพี่น้องเป็นอย่างยิ่งที่คอยสนับสนุนให้กำลังใจ คำแนะนำ คำตักเตือนในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณพี่ๆเพื่อนๆทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือต่างๆและกำลังใจ ทำให้งานวิจัยดำเนินไปด้วยดี

นางสาวกฤษณา กันเปลียน

นางสาวกาญจนา นุบาล

นางสาวสุชาดา สุปัดคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	4
2.1.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง	6
2.1.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม	6
2.2 ไดอิเล็กทริก	7
2.3 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	10
2.4 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์	11
2.5 อุณหภูมิและการเปลี่ยนเฟส	12
2.6 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ	13
2.7 มาตรการควบคุมผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของสหภาพยุโรป	15
2.7.1 ระเบียบว่าด้วยเศษซากของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	15
2.7.2 ระเบียบว่าด้วยการจำกัดการใช้สารอันตรายบางชนิดในผลิตภัณฑ์	18
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.8.1 แบเรียมไททาเนต	19
2.8.2 แบเรียมแคลเซียมทินไททาเนต	20
2.8.3 แบเรียมแคลเซียมทินไททาเนต-บิสมัทนิกเกิลไททาเนต	23
2.8.4 เลดไททาเนต-บิสมัทนิกเกิลเซอร์โคเนต	25
2.9 กระบวนการเตรียมผงเพียโซอิเล็กทริกด้วยวิธีทางปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	26
2.9.1 กระบวนการบดผสมด้วยลูกบอล	26
2.9.2 การเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	27
2.10 การอัดผง	29
2.11 กระบวนการเผาซินเตอร์	29
2.12 การทดสอบทางกายภาพ	31
2.12.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	31
2.12.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	34
2.13 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก	36
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	38
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	38
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	40
3.3 กระบวนการเตรียมผงเพียโซอิเล็กทริก BMgZ-BNiZ	41
3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก	42
3.5 การตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	43
3.6 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ	44
3.6.1 การหาค่าความหนาแน่น	44
3.7 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	46
3.7.1 ตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียไดอิเล็กทริก	46
3.7.2 ตรวจสอบวงฮิสเทอรีซิส	47

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.8 การตรวจสอบสัญญาณวิทยุของเซรามิก	47
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	48
4.1 การหาเอกลักษณ์เฉพาะของเซรามิกในระบบ BCTS-BMZ	48
4.1.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก	48
4.1.1.1 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของเซรามิก BCTS-BMZ	48
4.1.1.2 ผลการตรวจสอบร้อยละการหดตัวของเซรามิก BCTS-BMZ	50
4.1.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	51
4.1.3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก BCTS-BMZ	54
4.1.3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกและการเปลี่ยนเฟส	54
4.1.3.2 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟอโรอิเล็กทริก	56
4.1.4 ผลการตรวจสอบทางสัญญาณวิทยุของเซรามิก	60
4.2 การหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ BCTS-BNZ	62
4.2.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก	62
4.2.1.1 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของเซรามิก BCTS-BNZ	62
4.2.1.2 ผลการตรวจสอบร้อยละการหดตัวของเซรามิก BCTS-BNZ	63
4.2.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	64
4.2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก BCTS-BNZ	66
4.2.3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกและการเปลี่ยนเฟส	66
4.2.3.2 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟอโรอิเล็กทริก	68
4.2.4 ผลการตรวจสอบทางสัญญาณวิทยุของเซรามิก	72
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	74
5.1 สรุปผลการวิจัย	74
5.2 ข้อเสนอแนะ	77

สารบัญ(ต่อ)

เอกสารอ้างอิง
ภาคผนวก

หน้า
79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายต้องห้าม 6 ชนิด	19
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าร้อยละความหนาแน่นของเซรามิก BCTS-BMZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ	49
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิก BCTS-BMZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ	50
ตารางที่ 4.3 ค่าเลขทิกซารามิเตอร์ของเซรามิก BCTS-BMZ	53
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสของเซรามิก BCTS-BMZ ที่ 1 kHz	57
ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก BCTS-BNZ	62
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิก BCTS-BNZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ	63
ตารางที่ 4.7 ค่าเลขทิกซารามิเตอร์ของเซรามิก BCTS-BNZ	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	แผนผังความสัมพันธ์ของผลึกที่เกี่ยวข้องกับเพียโซอิเล็กทริกโดยพื้นฐานสมมาตรผลึก	5
รูปที่ 2.2	แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง	6
รูปที่ 2.3	แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม	6
รูปที่ 2.4	ทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุใดๆ ทำโดยนำวัสดุนั้นไปวางไว้ในสนามไฟฟ้า กระแสสลับ วัสดุใดมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มาก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของวัสดุต่อค่าความจุไฟฟ้าของสุญญากาศ	8
รูปที่ 2.5	ตัวอย่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นองค์ประกอบ	11
รูปที่ 2.6	โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์	12
รูปที่ 2.7	การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก(ϵ) กับอุณหภูมิของผลึกแบเรียมไททานเนต (BaTiO_3)	13
รูปที่ 2.8	แผนผังวิภาคของสารในระบบ $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$	14
รูปที่ 2.9	กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก $(\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$ ที่ $x = 0, 0.01, 0.02, 0.03$ และ 0.04	20
รูปที่ 2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิของเซรามิกระบบ $(\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$ ที่ $x = 0, 0.01, 0.02, 0.03$ และ 0.04 ที่ความถี่ 100 kHz	21
รูปที่ 2.11	กราฟวงวนฮิสเทอรีซิสของโพลาริเซชันกับ electric field ในระบบ $(\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิห้อง	22
รูปที่ 2.12	กราฟแสดงค่าคงที่ความเครียดเพียโซอิเล็กทริกและคัพลิงแฟกเตอร์ตามแนวระนาบของ $(\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$ ซึ่งมี x เป็นตัวแปร	22
รูปที่ 2.13	กราฟแสดงค่าคงที่ความเครียดเพียโซอิเล็กทริกและคัพลิงแฟกเตอร์ตามแนวระนาบซึ่งมีอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำหรับ $(\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$	23
รูปที่ 2.14 (a)	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการสลับขั้ว (T_c) กับค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ($\tan \theta$) (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกกับอุณหภูมิในการโพลิง	24

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.15 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกของ $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.94}\text{Sn}_{0.06})\text{O}_3 - \text{Bi}_{0.51}\text{Na}_{0.05}\text{TiO}_3$ โดยทำการวัดที่ความถี่ 1 kHz ที่อุณหภูมิห้อง	25
รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมบัติไดอิเล็กทริก ที่ขึ้นกับอุณหภูมิของ PT-100xBNZ ในช่วงรอยต่อเฟสที่ 100 kHz และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เมื่อเทียบกับ อุณหภูมิ ของ PT-40BNZ	25
รูปที่ 2.17 แสดงการบดผสมด้วยลูกบด	27
รูปที่ 2.18 แสดงแบบจำลองลักษณะการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งในสารผลึกเดี่ยว ผงผสม	28
รูปที่ 2.19 แสดงขั้นตอนการอัดขึ้นรูปแบบอัดตามแกนเดียว	29
รูปที่ 2.20 แสดงการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในช่วงการเผาซินเตอร์	31
รูปที่ 2.21 แสดงแบบจำลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	32
รูปที่ 2.22 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35
รูปที่ 3.1 แสดงการบรรจุสารในการเผาแคลไซน์	41
รูปที่ 3.2 กราฟแสดงขั้นตอนการเผาแคลไซน์	42
รูปที่ 3.3 แสดงการตัดเรียงสารในการเผาซินเตอร์	42
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงขั้นตอนในการเผาซินเตอร์	43
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเซรามิกและอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์	49
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิก $(1-x)\text{BaCTS}-x\text{BMZ}$	51
รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในช่วงระนาบ (111) (200) และ (220) ของเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BMZ}$	52
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิของสัดส่วนต่างๆของเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BMZ}$	55
รูปที่ 4.5 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BCTS-BMZ ที่อุณหภูมิห้อง	56
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้า ที่สัดส่วนต่างๆของเซรามิก BCTS-BMZ ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ	57

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันสูงสุดกับสัดส่วนของเซรามิก (1-x) BCTS-xBMZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ	58
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันคงค้างกับสัดส่วนของเซรามิก (1-x)BCTS-xBMZ	59
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามลบล้างโพลาริเซชันกับสัดส่วน ของเซรามิก (1-x)BCTS-xBMZ	59
รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก (1-x)BCTS-xBMZ (a) $x = 0.00$ (b) $x = 0.02$ (c) $x = 0.06$ (d) $x = 0.10$	61
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเซรามิกและอุณหภูมิในการเผา ซินเตอร์	63
รูปที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิก (1-x) BCTS-xBNZ	65
รูปที่ 4.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในช่วงระนาบ (111) (200) และ (220) ของเซรามิก (1-x)BCTS-xBNZ	65
รูปที่ 4.14 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BCTS-BNZ ที่อุณหภูมิห้อง	66
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิของสัดส่วนต่างๆของเซรามิก (1-x)BCTS-xBNZ	67
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้า ที่สัดส่วนต่างๆของเซรามิก (1-x)BCTS-xBNZ ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ	69
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันสูงสุดกับสัดส่วนของเซรามิก (1-x) BCTS-xBNZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ	70
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันคงค้าง กับสัดส่วนของเซรามิก (1-x)BCTS-xBNZ	71

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอสงวนสิทธิ์ใน
เนื้อหาและข้อมูลทั้งหมด ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
นอกจากนี้ขอสงวนสิทธิ์ในชื่อของเซรามิก (1-x)BCTS-xBNZ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.20 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก $(1-x)\text{BCTS-xBNZ}$

(a) $x = 0.02$ (b) $x = 0.06$ (c) $x = 0.10$

73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของงานวิจัย

โลกในยุคปัจจุบันได้มีความเจริญก้าวหน้าทางอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก รวมถึงอุตสาหกรรมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกก็เป็นวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่มีการศึกษาค้นคว้ากันอย่างแพร่หลาย แต่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกในปัจจุบันที่ใช้กันอยู่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก ปัจจุบันวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีการนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลายเพื่ออำนวยความสะดวกแก่มนุษย์ เช่น หัวพิมพ์ในเครื่องพิมพ์แบบฉีดหมึก (Ink jet print head) เครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner) ไมโครโฟน (Microphone) ลำโพง (Speaker) หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric transformer) เพียโซอิเล็กทริกโซนาร์ (Piezoelectric sonar) และหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ (Ferroelectric thin film memories) เป็นต้น[4] แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าตะกั่วก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก หากขาดความรู้และมีการกำจัดเศษซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ไม่ถูกวิธี หลายประเทศจึงได้ตระหนักถึงความสำคัญในส่วนนี้ ในปี ค.ศ. 2006 สหภาพยุโรป (EU) จึงได้ออกระเบียบว่าด้วยการกำจัดเศษซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Waste from electric and electronic equipment หรือ WEEE) และระเบียบที่ว่าด้วยการควบคุมและห้ามนำเข้าสินค้าที่มีสารอันตรายเกินมาตรฐานที่กำหนด (Restriction of certain hazardous substances หรือ RoHS) โดยกำหนดให้ผู้ผลิตสินค้าประเภทอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ห้ามนำสารอันตราย 6 ชนิด ในกระบวนการผลิต คือ ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) ปรอท (Hg) เฮกซะโครเมียม (Cr^{6+}) โพลีโบรไมด์ไบฟีนิล (PBB) และ โพลีโบรไมด์ไดฟีนิลเอเธอร์ (PBDE) เนื่องจากสารอันตรายเหล่านี้ล้วนมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ หากมีการแพร่กระจายลงสู่ดินหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนั้นจึงทำการศึกษาค้นคว้าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว เนื่องจากตะกั่วเป็นหนึ่งในสารอันตรายต้องห้ามดังกล่าว นอกจากนี้ก็ยังมีหลายประเทศ เช่น ประเทศญี่ปุ่น จีน และเกาหลีใต้ ก็เริ่มออกระเบียบในลักษณะนี้เช่นเดียวกัน เพื่อความปลอดภัยแก่มนุษย์ ซึ่งเรามักไร้สารตะกั่วส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาศึกษาคือ แบเรียมไททานาต แต่เนื่องจากแบเรียมไททานาตมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant หรือ d_{33}) 180 pC/N ซึ่งต่ำเมื่อเทียบกับเลดเซอร์โคเนตไททานาต (PZT) และอูณหูมิคูรี (TC) ค่า 120 องศาเซลเซียส จึงมีการเจือแคลเซียม (Ca) กับทิน (Sn) เข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติดังกล่าวให้สูงขึ้น

แบเรียมแคลเซียมทินไททาเนต $((\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$ หรือ BCTS) เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบอโรทอมบิก (Orthorhombic) แต่ถ้ามีการเจือแคลเซียม (Ca) มากขึ้น โครงสร้างจะกลายเป็นแบบเททระโกนอลทั้งหมด พบว่าแบเรียม-แคลเซียมทินไททาเนต $((\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$ หรือ BCTS) มีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant หรือ d_{33}) ที่สูงถึง 510 pC/N แต่อุณหภูมิคูรีต่ำอยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส จึงทำการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมสารประกอบของบิสมัทแมกนีเซียมเซอร์โคเนต $((\text{BiMg}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_3)$ และ บิสมัทนิกเกิลเซอร์โคเนต $((\text{BiNi}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_3)$ คาดว่าจะทำให้อุณหภูมิคูรีเพิ่มขึ้น ดังนั้นก็จะสามารถที่จะนำมาทดแทนวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าและการพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อนำมาทดแทนวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบที่ใช้กันในปัจจุบัน

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยการเกิดสารละลายของแข็งของสารในระบบ BCTS-BMZ อิทธิพลของกระบวนการสังเคราะห์ผงให้มีความบริสุทธิ์สูง เจือปนที่เหมาะสมในการเตรียมเซรามิกให้ได้ความหนาแน่นสูง รวมไปถึงการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของเซรามิกที่เตรียมได้ โดยงานวิจัยมุ่งศึกษา โครงสร้างผลึก (crystal structure) สมบัติทางกายภาพ (dielectric properties) สัณฐานวิทยา (morphology) การเปลี่ยนเฟส (phase transition) และสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ของสารระบบดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีความเหมาะสมในการสังเคราะห์ผงเพียโซอิเล็กทริก ในระบบ BCTS-BMZ และ BCTS-BNZ ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) เพื่อให้ได้ผงเซรามิกที่มีความบริสุทธิ์สูง
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีความเหมาะสมในการเตรียมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบ BCTS-BMZ และ BCTS-BNZ เพื่อให้ได้เซรามิกที่มีความหนาแน่น (มากกว่า 92% TD)
3. เพื่อศึกษาโครงสร้าง สมบัติทางกายภาพ การเปลี่ยนเฟส สมบัติไดอิเล็กทริกและ สัณฐานวิทยาของสารในระบบ BCTS – BMZ และ BCTS - BNZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งงานเพื่อการเผยแพร่เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำเนื้อหาไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นที่มิใช่การนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์ผงเพียโซอิเล็กทริกในระบบ $(1 - X)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ โดยที่ M คือ Ni และ Mg เมื่อ x มีค่า 0.00 0.02 0.04 0.06 0.08 และ 0.10 เพื่อให้ได้ผงที่มีความบริสุทธิ์สูง
2. เตรียมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบ BCTS – BMZ และ BCTS – BNZ เพื่อให้ได้เซรามิกที่มีความหนาแน่นสูง
3. ตรวจสอบโครงสร้างผลึก สมบัติทางกายภาพ การเปลี่ยนเฟส สมบัติไดอิเล็กทริก และสัณฐานวิทยาของสารในระบบ BCTS – BMZ และ BCTS - BNZ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจถึงหลักการและวิธีการในการสังเคราะห์ผงเพียโซอิเล็กทริกในระบบของ BCTS – BMZ และ BCTS – BNZ ให้มีความบริสุทธิ์สูง
2. สามารถเข้าใจถึงหลักการและวิธีการในการเตรียมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบ BCTS – BNZ และ BCTS – BMZ ให้มีความหนาแน่นสูง
3. สามารถทราบสัดส่วนที่แน่นอนของสารที่ทำเซรามิกมีสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่น
4. สามารถสังเคราะห์สารเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบของ BCTS – BMZ และ BCTS – BNZ ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับสารเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

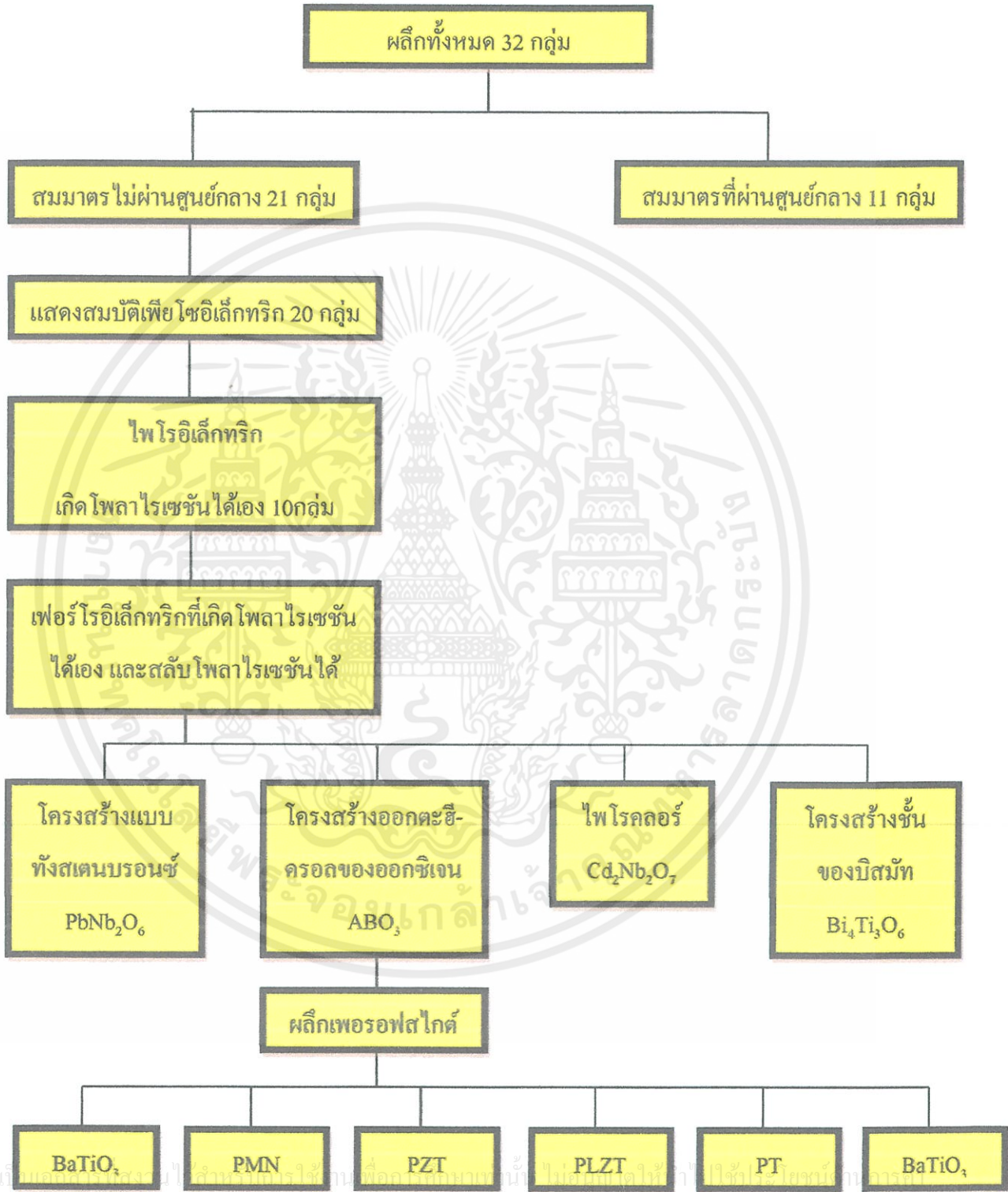
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric ceramics)

เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric ceramics) เป็นเซรามิกที่มีสมบัติโดดเด่นทางด้านเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุสามารถเปลี่ยนแปลง พลังงานจากไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1880 โดยชองส์และปีแอร์ กูรี [2] หลังจากนั้นก็ได้มีการนำความรู้มาศึกษาวิจัยต่อ จนสามารถพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้สำเร็จและใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์คำว่า “เพียโซ (Piezo)” มาจากภาษากรีก แปลว่า “กด” ดังนั้นสมบัติเพียโซอิเล็กทริก คือ การเกิดกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการได้รับแรงกด ซึ่งเป็นแรงเชิงกล การเกิดกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการได้รับแรงกดซึ่งเป็นแรงทางกลทำให้เกิดความเครียด (Strain) ในผลึก มีผลทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) ไปในทิศทางเดียวกัน เรียกว่า การโพลาไรเซชัน (Polarization) และให้กระแสไฟฟ้าออกมาโดยปริมาณและเครื่องหมายของการโพลาไรเซชันจะแปรผันตามความเครียดที่ได้รับ และในทางกลับกันเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สารจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือความเครียด (Strain) ขึ้นในสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ความเข้าใจในโครงสร้างภายในของวัสดุนั้นเป็นพื้นฐานสำคัญในการศึกษาสมบัติเพียโซอิเล็กทริก

นักฟิสิกส์ได้แบ่งผลึกออกเป็น 32 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จากผลึกทั้ง 32 กลุ่มดังกล่าว มี 21 กลุ่มที่ไม่สมมาตรของศูนย์กลาง (Noncentro symmetric) ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) ซึ่งพบถึง 20 กลุ่ม อีกหนึ่งกลุ่มที่เหลือนั้นไม่มีสภาพเป็นเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากได้รับแรงเชิงกลแล้วโครงสร้างจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่สมมาตรผ่านศูนย์กลางจาก 20 กลุ่มของผลึกที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกจะมีอยู่ 10 กลุ่มที่มีขั้ว (Polar) เกิดไดโพลโมเมนต์ได้ด้วยตัวเอง แม้ไม่ได้รับสนามไฟฟ้ากระทำเรียกกลุ่มสารพวกนี้ว่า สปอนทาเนียส โพลาไรเซชัน (Spontaneous Polarization) ผลึกมีขั้วเหล่านี้เป็นเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปมากพอจะทำให้ทิศทางของเวกเตอร์โพลาไรเซชันเปลี่ยนแปลงได้ เรียกสมบัติในกลุ่มนี้ว่า เพอร์โรอิเล็กทริก นั่นคือสารที่มีสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก

ทุกชนิดเป็นสารที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ดังนั้นการเกิดสมบัติเพียโซอิเล็กทริกจึงไม่จำเป็นต้องมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก [1]



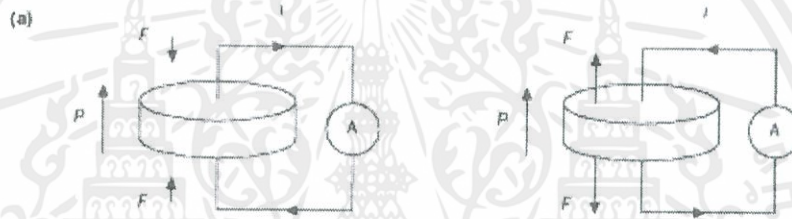
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 2.1 แผนผังความสัมพันธ์ของผลึกที่เกี่ยวข้องกับเพียโซอิเล็กทริก โดยพื้นฐานสมมาตรผลึก [3]

สภาพเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity) ของสารสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (direct effect) และสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (reverse effect)

2.1.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (direct effect)

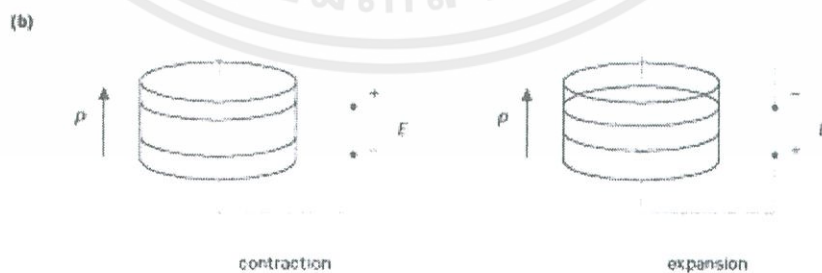
คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันเมื่อสารถูกแรงกดกระทำ (หรือเกิดความเค้น) ดังรูปที่ 2.2 เช่น เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Generator)



รูปที่ 2.2 แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (direct effect) [10]

2.1.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (reverse effect)

คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานกลที่จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงขนาด และปริมาตร (หรือเกิดความเครียด) ในสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ดังรูปที่ 2.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.3 แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (reverse effect) [10]
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (\text{Generator}) \quad (2.1)$$

$$E = s^E T + dE \quad (\text{Motor}) \quad (2.2)$$

- โดยที่ D คือ ค่าการแทนที่ทางไฟฟ้า (Dielectric displacement)
- T คือ ความเค้นหรือแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด (Stress) (N/m^2)
- E คือ สนามไฟฟ้า (Electric field) (N/C)
- d คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient) ของสาร (C/N)
- s^E คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของสาร (Elastic coefficient) และสัญลักษณ์ด้วยก

E แทนสถานะที่มีสนามไฟฟ้าคงที่

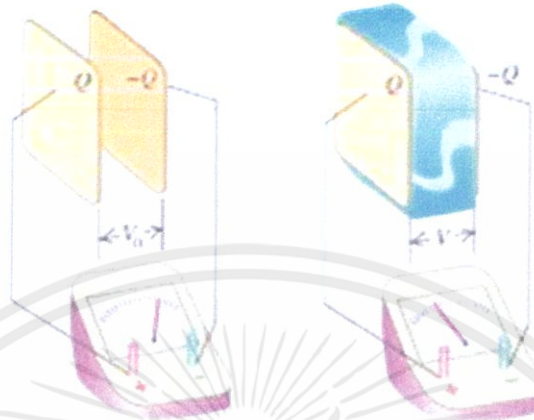
ϵ^T คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และสัญลักษณ์ด้วยก T แทนสถานะที่มีแรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัดคงที่

2.2 ไดอิเล็กทริก (Dielectric)

สารทุกชนิดประกอบด้วยส่วนย่อย คือ โมเลกุล ซึ่งโมเลกุลโดยปกติจะประกอบด้วยกลุ่มโปรตอนและอิเล็กตรอนมีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกัน และอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวของอะตอม เมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้ามากระทำกับโมเลกุลจะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศทางของสนาม และกลุ่มประจุลบจะเคลื่อนไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นโมเลกุลทุกโมเลกุลของสารต่างก็ก่อตัวเป็นโมเลกุลขั้วคู่ (dipole moment) โดยมีขั้วเล็กๆ เรียงต่อกันในทิศทางเดียวกันตามทิศสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามสารไดอิเล็กทริกประเภทนี้เป็นสารประเภทโมเลกุลไม่มีขั้ว (non-polar molecule) สารไดอิเล็กทริกบางชนิดที่โมเลกุลก่อตัวเป็นขั้วคู่ไฟฟ้า (dielectric dipole) ซึ่งในทิศทางไม่เป็นระเบียบ และเมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำต่อมันจะทำให้ขั้วคู่เล็กๆ เหล่านี้เรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกโมเลกุลประเภทนี้ว่าขั้วคู่ถาวร (permanent dipole) มีสารบางอย่างที่มีโมเลกุลเรียงตัวกันได้เองโดยไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอก เรียกสารชนิดนี้ว่าสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric materials) เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลดเซอร์โคเนตไททานเนต (PZT) เป็นต้น สามารถอธิบายผลของไดอิเล็กทริกในบรรยากาศและเมื่อผ่านวัสดุไดอิเล็กทริกดังรูป 2.4



รูป 2.4 ทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุใดๆ ทำโดยนำวัสดุนั้นไปวางไว้ในสนามไฟฟ้า กระแสสถิตย์ วัสดุใดมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มาก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของวัสดุต่อค่าความจุไฟฟ้าของสุญญากาศ [22]

ลักษณะของการที่โมเลกุลขั้วคู่ของสารไดอิเล็กทริกก่อตัวเป็นขั้วเล็กๆ แล้วจัดเรียงตัวกันในสนามไฟฟ้าเรียกว่าโพลาริเซชัน (polarization) โดยกำหนดให้โพลาริเซชันเป็นจำนวนโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ต่อหน่วยปริมาตร ถ้า N เป็นโมเลกุลต่อหน่วยปริมาตรและทุกๆ โมเลกุลมีขั้ว โมเลกุลคู่เป็น P ดังนั้นจะได้โพลาริเซชันเป็นดังสมการ 2.3

$$P = Np \quad (2.3)$$

และเมื่อสารไดอิเล็กทริกถูกโพลาริเซชัน สมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปโดยพิจารณาจากสมการ 2.4

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยที่ D คือ Electric displacement vector E คือ สนามไฟฟ้าในตัวกลาง และ ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่า $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

สมบัติอีกอย่างหนึ่งของสารไดอิเล็กทริก คือ มีสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าหรือความซึมซาบทางไฟฟ้า χ (electric susceptibility) ซึ่งกำหนดได้ด้วยสมการ 2.5

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (2.5)$$

ในสุญญากาศไม่เกิดโพลาไรเซชัน ($P = 0$) ดังนั้น χ เป็นศูนย์ด้วย เพราะฉะนั้น D จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าภายนอกเท่านั้น ถ้าสนามไฟฟ้าภายนอกเป็น E_0 ดังนั้นสนามไดอิเล็กทริกจะเป็น

$$D = \epsilon_0 E_0 \quad (2.6)$$

จากสมการ 2.5 และสมการ 2.6 จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} D &= \epsilon_0 E_0 + \epsilon_0 \chi E \\ D &= \epsilon_0 (1 + \chi) E \\ D &= \epsilon_0 \epsilon_r E \end{aligned} \quad (2.7)$$

โดยจะเรียกเทอม $(1 + \chi)$ หรือ ϵ_r ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant) อาจเขียนสมการ 2.8 ได้ดังนี้

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (2.8)$$

โดยที่ ϵ เรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสาร

สารไดอิเล็กทริกมักจะใช้เป็นฉนวนที่ทำหน้าที่คั่นระหว่างตัวนำของตัวเก็บประจุเพื่อกันหรือให้แรงดันสูงขึ้นกว่าแก่สรวมทั้งอากาศด้วย โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุที่สารไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าของตัวเก็บประจุอากาศดังสมการ

$$C = \epsilon C_0 \quad (2.9)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุสุญญากาศ C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น ϵ_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะตีพิมพ์หรือในรูปแบบอื่นใดก็ตาม หากมีให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งโดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์ (ϵ_r) เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ ϵ_0 คือ

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.10)$$

และจากความสัมพันธ์ $C = Q/V$ สำหรับกรณีที่ไม่มีสารไดอิเล็กทริกจะได้ว่า

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.11)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก และ d คือความหนาของสารไดอิเล็กทริกสำหรับตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าไดอิเล็กทริกเท่ากับ ϵ_r จะได้ว่า

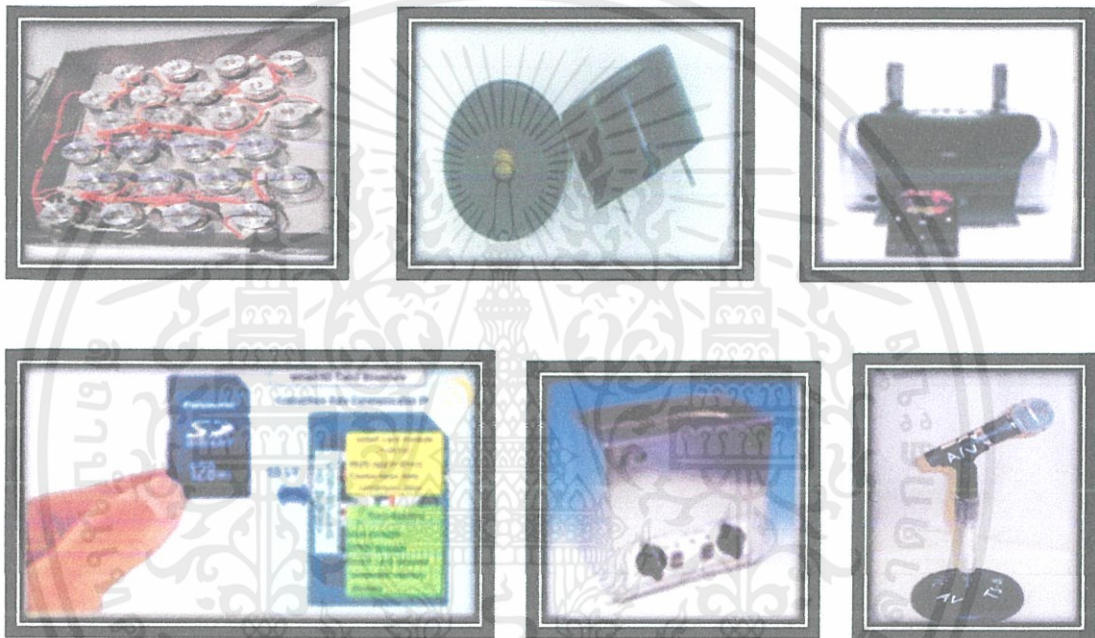
$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.12)$$

ถ้าป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้กับตัวเก็บประจุ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90 องศา แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเนื่องจากการที่ไดอิเล็กทริกมีความต้านทานไม่ถึงอนันต์ ทำให้เกิดเฟสของกระแสไฟฟ้าหน้าความต่างศักย์น้อยกว่า 90 องศา เรียกว่าแฟกเตอร์การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss tangent)

2.3 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก [4]

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถนำไปมาประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างหลากหลายขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลง ในกรณีให้แรงแก่วัสดุทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น สามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์จุดแก๊ส (Gas ignitor) ในเตาเครื่องทำความร้อน ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ใช้เป็นตัวตรวจจับความดัน (Pressure sensor) เป็นต้น และในกรณีที่มีการให้กระแสไฟฟ้ากับวัสดุ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือเกิดแรงเชิงกล สามารถนำมาใช้เป็นทรานสดิวเซอร์ในอุปกรณ์อัลตราโซนิก (Ultrasonic) ทางการแพทย์ ไมโครโฟน (Microphone) ลำโพง (Speaker) และนำมาใช้เป็นแอกชูเอเตอร์ (Actuator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประกอบที่สำคัญของเครื่องพิมพ์ (Printer) ชัตเตอร์ในกล้องถ่ายรูป วาล์วไฮดรอลิก

(Hydraulicvalve) เป็นต้น ดังแสดงในรูป 2.5 ถ้าพูดถึงในอดีตนั้น เราจะเห็นได้ว่าเครื่องพิมพ์ที่มีความละเอียดค่อนข้างต่ำ แต่ในปัจจุบันเครื่องพิมพ์มีความละเอียดมากขึ้น เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนี้เองทำให้มีความละเอียดมากขึ้น ดังนั้นถ้ายังมีการพัฒนาสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้ดีเท่าไร ก็จะได้เครื่องพิมพ์ที่มีความละเอียดเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น

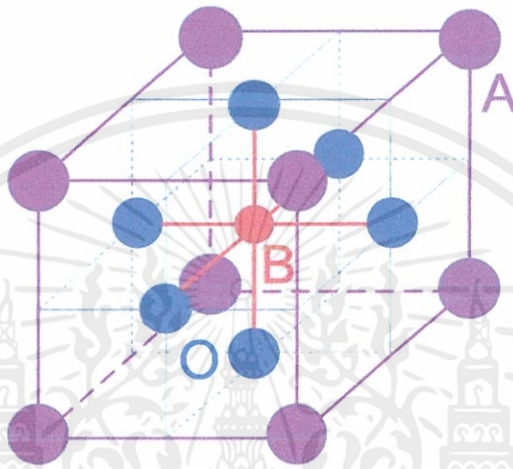


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นองค์ประกอบ [14]

2.4 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) [5]

โครงสร้างเพอโรฟสไกต์เป็นโครงสร้างของกลุ่มผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริก เป็นชื่อที่เรียกตามชื่อแร่แคลเซียมไททานेट (CaTiO_3) มีสูตรโมเลกุลเป็น ABO_3 โดยไอออน A และ B มีขนาดแตกต่างกันมาก โครงสร้างเพอโรฟสไกต์มีพื้นฐานมาจากหน่วยเซลล์แบบ FCC หรือเรียกว่า Face center cubic close packing โดยอะตอมของแคดไอออนที่มีขนาดใหญ่ (large A-site) เช่น Na^+ K^+ Ca^+ Ba^+ Pb^+ เป็นต้น จะยึดเกาะอยู่กับอะตอมของออกซิเจนจนก่อรูปขึ้นเป็นแบบ FCC ส่วนแคดไอออนที่มีขนาดเล็ก (B-site) จะเข้าอยู่ในช่องว่างทรงแปดหน้าที่เกิดขึ้นมาจากการจัดเรียงกัน

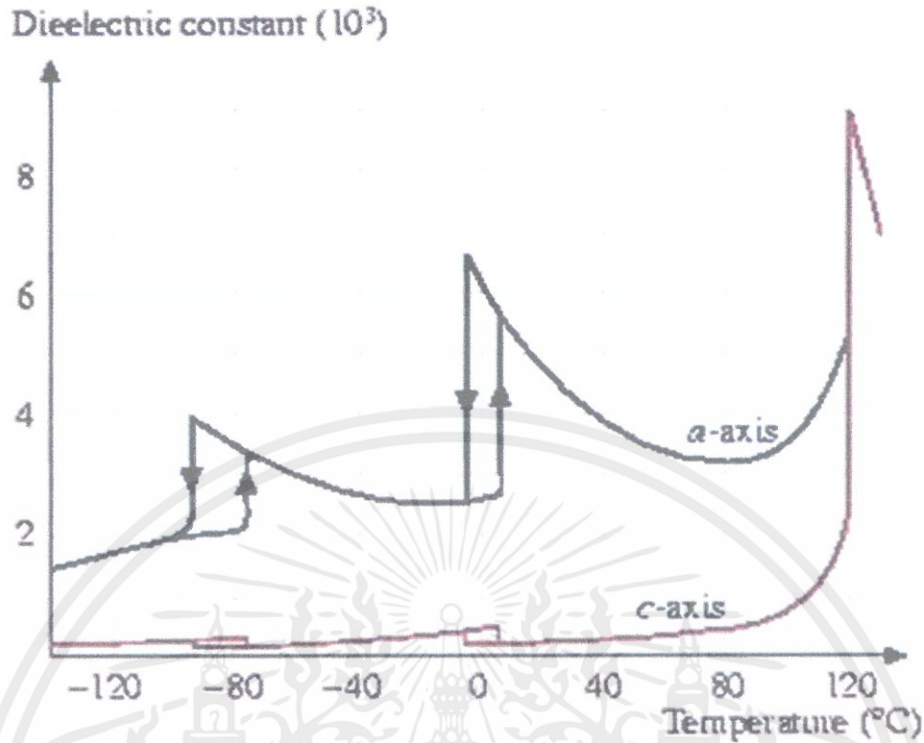
แบบ FCC ภายในโครงสร้างดังกล่าว เช่น Ta^{5+} Zr^{4+} Sn^{4+} โดยมีเพียงอะตอมของออกซิเจนเท่านั้นที่เป็นอะตอมข้างเคียงที่ล้อมรอบอยู่ใกล้ที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สารประกอบที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ในกลุ่มเฟอร์โรอิเล็กทริก ยกตัวอย่างเช่นแบเรียมไททานเนต ($BaTiO_3$) เลดไททานเนต ($PbTiO_3$) เลดเซอร์โคเนตไททานเนต (PZT) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานเนต (PLZT) เลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN) โพแทสเซียมไนโอเบต ($KNbO_3$) เป็นต้น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ [15]

2.5 อุณหภูมิและการเปลี่ยนเฟส

ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นสามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนเฟสได้หลายเฟสตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของผลึก จะเรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (phase transition temperature) ซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริก (ไม่มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง) ไปเป็นคิวบิกพาราอิเล็กทริก (มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง) จะเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสนี้ว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature หรือ T_c) ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant หรือ ϵ_r) ณ อุณหภูมิคูรีนั้นจะมีค่าสูงที่สุด โดยพิกของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นจะมีลักษณะเป็นพีกแหลม (sharp peak) ไม่ขึ้นกับความถี่ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นตัวอย่างการเปลี่ยนเฟสจากรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) ไปเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) และจากออร์โธโรมบิกไปเป็นเตตระโกนอล (tetragonal) ตามลำดับ และมีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ประมาณ 120°C โดยมี การเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกเตตระโกนอลไปเป็นพาราออร์โธโรมบิก อย่างไรก็ตามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้อิเล็กทริก



รูปที่ 2.7 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ) กับอุณหภูมิของ
ผลึกแบเรียมไททานेट (BaTiO_3) [18]

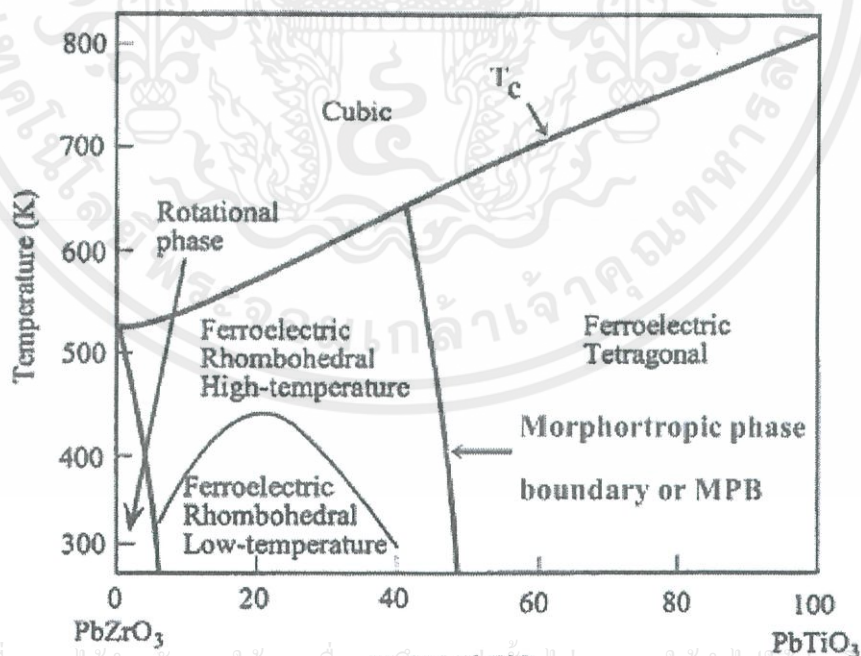
2.6 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ (Lead-based piezoelectric material)[2,6]

ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีการศึกษา ค้นคว้า พัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลักกันอย่างกว้างขวาง เช่น เลดเซอร์โคเนตไททานेट ($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$;PZT) โดยพบว่าเลดเซอร์โคเนตไททานेट ($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$;PZT) เป็นสารที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ในปี ค.ศ. 1952 B.Jaffe และคณะ [20] ได้ค้นพบเลดเซอร์โคเนตไททานेट ($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$;PZT) ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น

เลดเซอร์โคเนตไททานेट ($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$;PZT) เป็นสารละลายของแข็งระหว่าง
เลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3 ;PZ) กับเลดไททานेट (PbTiO_3 ;PT) ซึ่ง PZ มีโครงสร้างแบบอโรทอโรมบิก
ไม่ว่ากรดี (orthorhombic) มีสมบัติเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (anti-ferroelectric) และ PT มีโครงสร้าง
แบบเตตระโกนอล (tetragonal) มีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric) โดย PZT มี

โครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์ (perovskite) ซึ่ง Zr^{4+} กับ Ti^{4+} จะแบ่งกันอยู่ในตำแหน่ง B-site ของโครงสร้าง Pb^{2+} จะอยู่ในตำแหน่ง A-site ของโครงสร้าง และอยู่ในออกซิเจน

แผนภาพวัฏภาคของสารละลาย PZT ที่อุณหภูมิสูงจะมีโครงสร้างแบบคิวบิก (cubic) และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี (T_c) จะมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (tetragonal) กับรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) และที่อุณหภูมิล่างพบว่า บริเวณรอยต่อเฟส (Morphotropic phase boundary หรือ MPB) ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างเฟสรอมโบฮีดรอลกับเตตระโกนอล โดยมีอัตราส่วนระหว่างเซอร์โคเนตกับไททานเนียมเป็น 52 : 48 ดังแสดงในรูปที่ 2.8 นอกจากนี้ยังพบว่า เลดเซอร์โคเนตไททานเนต (PZT) ยังมีอุณหภูมิคูรีที่สูงถึง 380 องศาเซลเซียส (ที่บริเวณรอยต่อเฟส) และยังมีค่าสัมประสิทธิ์คูแวนไฟฟ้าเชิงกลที่สูง ทำให้เกิดการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าได้ง่าย มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง และง่ายต่อการเผาซินเตอร์ (sintering) เพราะใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก จึงทำให้สามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตลงได้เป็นอย่างมาก ยิ่งไปกว่านั้น การเตรียมเซรามิก PZT ให้มีความบริสุทธิ์สูง และมีความหนาแน่นสูงนั้นสามารถเตรียมได้ไม่ยุ่งยาก ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้สารประกอบกลุ่มนี้ได้มีการศึกษาค้นคว้า และพัฒนาอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ Mol % $PbTiO_3$ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ รูปที่ 2.8 แผนผังวัฏภาคของสารในระบบ $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ [19]

2.7 มาตรการควบคุมผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของสหภาพยุโรป

สหภาพยุโรปเป็นตลาดนำเข้าสินค้าอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก โดยผู้บริโภครที่บริโภคสินค้าประเภทอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีปริมาณสูงขึ้น เนื่องจากเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างไม่หยุดนิ่ง อาทิเช่น โทรศัพท์มือถือ โน้ตบุ๊ก เครื่องซักผ้า หัวหมักปรีนเตอร์ เป็นต้น ทำให้ผู้บริโภครตื่นตัวในการเลือกใช้สินค้า ส่งผลให้ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มีมากขึ้น

แต่ในขณะที่เดียวกันทำให้เกิดขยะจากผลิตภัณฑ์อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน แม้ว่าในหลายประเทศในสหภาพยุโรปได้ออกมาตรการในการควบคุมการทิ้งและการทำลายซากเหล่านี้ แต่กฎหมายในแต่ละประเทศก็มีความเข้มงวดไม่เท่ากัน และไม่สอดคล้องกัน ทำให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติ ดังนั้นสหภาพยุโรปจึงได้ออกระเบียบ เพื่อให้สมาชิกดำเนินไปในทิศทางเดียวกัน และเพิ่มประสิทธิภาพให้มากขึ้น ทั้งในด้านขยะจากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สารพิษที่เป็นวัสดุประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตะกั่วปรอท แคดเมียม เป็นต้น โดยขยะส่วนใหญ่จะถูกนำไปเผาหรือฝัง โดยไม่ผ่านการกำจัดพิษ ทำให้เสี่ยงต่อการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม โดยระเบียบที่ทางสหภาพยุโรปได้ออกระเบียบเพื่อควบคุมปริมาณขยะจากซากผลิตภัณฑ์อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และสารพิษที่เป็นองค์ประกอบในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ดังนี้

2.7.1 ระเบียบว่าด้วยเศษซากของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (waste of electrical and electronic equipment :WEEE)[7]

ระเบียบ WEEE มีวัตถุประสงค์เพื่อวางมาตรการในการป้องกันการเพิ่มปริมาณของซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (WEEE) ส่งเสริมการนำชิ้นส่วน/วัสดุกลับคืน (Recovery) และการใช้ซ้ำ/การนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle/reuse) โดยผ่านระบบการรับคืน (Return) และการจัดเก็บรวบรวม (Collection) ของผู้ผลิต และเพื่อลดความเสี่ยงและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการกำจัดซาก WEEE ระเบียบนี้พัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักความรับผิดชอบของผู้ผลิต (The principle of producer responsibility) โดยสหภาพยุโรปไปใช้วิธีกำหนดมาตรฐานขั้นต่ำในการจัดการเศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์และกำหนดเป้าหมายขั้นต่ำในการ Recovery/Re-use/Recycle และใช้กลไกตลาดไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คนไปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่กรณณาไปใช้ เป็นเครื่องมือในการบังคับให้ผู้ผลิตหากลยุทธในการจัดการกับซากผลิตภัณฑ์ที่หมดอายุ ที่มี

ประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด โดยการกำหนดให้ผู้ผลิตต้องเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการจัดการทั้งหมด

ระเบียบนี้ครอบคลุมถึงผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 10 กลุ่ม ที่ผลิตขึ้นทั้งก่อนและหลังจากที่ระเบียบนี้จะมีผลบังคับใช้ และใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไม่เกิน 1000 โวลต์ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิน 1500 โวลต์ ประเภทของผลิตภัณฑ์ทั้ง 10 กลุ่มที่จัดเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ประเด็นสำคัญของระเบียบ WEEE ที่จะส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตไทย สรุปได้ดังนี้

1. ผู้ผลิต ซึ่งครอบคลุมทั้งผู้ผลิตสินค้าและผู้นำเข้าสินค้าใน EU ต้องรับผิดชอบของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวที่หมดอายุการใช้งานแล้วโดยไม่คิดมูลค่า ไม่ว่าสินค้านี้จะถูกจำหน่ายโดยวิธีใด (รวมถึงการจำหน่ายทางอินเทอร์เน็ต หรือ e-commerce)
2. ตั้งแต่วันที่ 31 ธันวาคม 2549 ผู้ผลิตต้องแสดงให้เห็นว่าตนมีขีดความสามารถจัดการกับผลิตภัณฑ์ตามเกณฑ์กำหนดเป้าหมายขั้นต่ำของการ Recovery และการใช้ซ้ำ/การนำกลับมาใช้ใหม่ ตามที่แสดงในตารางที่ 2.1
3. ผู้ผลิตต้องเป็นผู้รับผิดชอบภาระค่าใช้จ่ายทั้งสิ้นในการจัดการซากผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การเก็บรวบรวม(Collection) การนำทรัพยากรกลับคืน (Recovery) การปรับปรุง การใช้ซ้ำ/การนำกลับมาใช้ใหม่ ไปจนถึงการกำจัดเศษเหลือทิ้ง โดยอย่างน้อยกระบวนการจัดการดังกล่าว จะต้องประกอบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้
 1. แยกชิ้นส่วนหรือวัตถุ ที่มีสารต่อไปนี้จากซากผลิตภัณฑ์ฯ เพื่อนำไปกำจัดอย่างถูกต้อง (การกำจัดต้องเป็นไปตาม EU Directive 75/442/EEC: Article 4)
 - ตัวเก็บประจุที่มีสาร โพลีคลอริเนทไบฟีนิล (Polychlorinated biphenyl (PCB))
 - ชิ้นส่วนที่มีสารปรอท
 - แบตเตอรี่
 - แผงวงจรไฟฟ้า (Printed circuit boards)
 - ตลับหมึกพิมพ์ ทั้งที่เป็นหมึกเหลว หมึกหลอด (Pasty) รวมทั้งหมึกสี
 - พลาสติกที่มี สารโบรมีน เป็นองค์ประกอบ เพื่อหน่วงการติดไฟ
 - ของเสียดจาก แอสเบสตอส
 - หลอดภาพ (Cathode ray tube)
 - สารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (สาร CFC), สารไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (สาร HCFC), สารไฮโดร ฟลูออโรคาร์บอน (สาร HFC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอด Gas discharge lamps
- จอ LCD ที่มีพื้นที่มากกว่า 100 ตารางเซนติเมตร และจอชนิดที่ใช้ back light ชนิด gas discharge lamps
- สายไฟฟ้าที่อยู่ภายนอก (External Electric Cables)
- ชิ้นส่วนที่มี ceramic fibers ตามที่ระบุใน EU Directive 67/69/EC
- ชิ้นส่วนที่มีสารกัมมันตภาพรังสี
- ตัวเก็บประจุชนิด Electrolyte ที่มีสารที่นำเป็นห่วง ที่มีขนาดสูงกว่า 25 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 25 มิลลิเมตร หรือที่มี ปริมาตรระดับเดียวกัน

2. แยกชิ้นส่วนต่อไปนี้จากซากผลิตภัณฑ์ฯ เพื่อทำการกำจัดตามที่ระบุ

- หลอดภาพ (Cathode ray tube): ต้องแยกสารเรืองแสงที่เคลือบอยู่ ออก
- อุปกรณ์ที่มีสารทำลายชั้น โอโซน หรือมี Global Warming Potential (GWP) สูงกว่า 15 เช่นสารที่มีอยู่ในโฟมและวงจรทำความเย็น
 - i. ต้องแยกแก๊สออกและทำลายอย่างเหมาะสม
 - ii. แก๊สที่ทำลายชั้น โอโซนต้องได้รับการบำบัดตามกฎหมาย EC No.2037/2000

วันที่ 29 มิ.ย. 2543 เรื่องสารที่ทำลายชั้น โอโซน

- Gas discharge lamps: แยกสารปรอทออก

3. ผู้ดำเนินการ จัดการซากผลิตภัณฑ์ และสถานที่จัดการ ต้องมีใบอนุญาตและต้อง ถูก ตรวจสอบทุกปี

4. ตั้งแต่วันที่ 13 สิงหาคม 2548 เป็นต้นไป ผู้ผลิตต้องออกค่าใช้จ่ายในการจัดการ เก็บ การบำบัด การนำทรัพยากรกลับคืน สำหรับซากสินค้าประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้าตาม บ้านเรือน และหลังจากวันที่กำหนดนี้ การจะนำสินค้าเข้าสู่ตลาดในประเทศ สมาชิกได้ ผู้ผลิตต้องแสดงหลักฐานเพื่อประกันการจัดการซากผลิตภัณฑ์ การ ประกันการจัดการซากผลิตภัณฑ์ฯ อาจเป็นในรูปแบบ การประกันการรีไซเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน (Recycling insurance) ก หรือ เงินค้ำประกันก็ได้ (Blocked bank account)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งกรณีสินค้าที่นำเข้าสู่ตลาดก่อนวันที่ 13 สิงหาคม 2548 (Historical waste) ให้

ผู้ผลิตที่อยู่ในตลาดในขณะที่มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้น ร่วมกันรับผิดชอบ ตามสัดส่วนที่เหมาะสม เช่นอาจคิดตามส่วนแบ่งตลาด

5. ผู้ผลิตมีหน้าที่ต้องให้ข้อมูลต่อไปนี้

5.1 ขั้นตอนการดำเนินการเมื่อผลิตภัณฑ์หมดอายุ ให้แก่ผู้ใช้ทราบ

5.2 วิธีการแยกชิ้นส่วนและข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับสารอันตรายที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์แก่ผู้ทำการรีไซเคิล

5.3 ข้อมูล ขอดขาย ขอดการเก็บคืน และขอดการนำกลับมาใช้ใหม่ แก่รัฐบาล

2.7.2 ระเบียบว่าด้วยการจำกัดการใช้สารอันตรายบางชนิดในผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (restriction of the use of certain hazardous substance in electrical and electronic equipment: RoHS) [7]

ระเบียบ RoHS เป็นระเบียบที่มุ่งเน้นการจำกัดการใช้สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมที่ต้นเหตุ โดยจำกัดการใช้สารอันตรายบางประเภทในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และทำให้การนำทรัพยากรกลับคืนและการทิ้งซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าฯ ส่งผลกระทบท่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด **ระเบียบนี้ครอบคลุมผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับ WEEE ยกเว้นเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในกลุ่ม 8 และ 9 (เครื่องมือแพทย์ และเครื่องมือวัดและควบคุม ตามลำดับ) โดยระเบียบนี้เสนอให้ใช้อื่นทดแทน สารตะกั่ว สารปรอท สารแคดเมียม สารโครเมียม-เฮกซะวาเลนซ์ (Cr-VI) สารโพลีโบรมิเนท-ไบฟีนิล (PolyBrominated Biphenyls - PBB) และ สารโพลีโบรมิเนท-ไดฟีนิล-อีเทอร์ (PolyBrominated DiphenylEthers -PBDE) ใน ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าฯ ภายในวันที่ 1 กรกฎาคม 2549 ทั้งนี้ไม่รวมชิ้นส่วนที่นำเข้าตลาดก่อนปี พ.ศ. 2546 แต่มีข้อยกเว้นสารตะกั่ว ปรอท แคดเมียม และ โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ (Cr VI) ในผลิตภัณฑ์บางชนิดดังนี้**

- สารปรอท ใน Compact fluorescent lamps ในปริมาณไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อหลอด
- สารปรอท ในหลอดฟลูออเรสเซนต์ แบบตรงสำหรับใช้งานทั่วไป โดย
- หลอดที่ใช้ Halophosphate ให้มีปรอทได้ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อหลอด
- Triphosphate ที่มีช่วงชีวิตปกติ ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อหลอดและ
- Triphosphate ที่มีช่วงชีวิตยาว ไม่เกิน 8 มิลลิกรัมต่อหลอด
- สารปรอท ในหลอดหลอดฟลูออเรสเซนต์ แบบตรง สำหรับใช้งานพิเศษ
- สารปรอท ในหลอดไฟที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับข้อมูลเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

- สารตะกั่ว ที่ผสมในแก้วของ หลอดภาพ ชั้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และ หลอดฟลูออเรสเซนต์
- สารตะกั่ว ที่ใช้ในโลหะอัลลอย (alloying element)
- ในเหล็ก ให้ที่มีปริมาณตะกั่วได้ไม่เกิน 0.35% โดยน้ำหนัก
- ในอลูมิเนียม ให้ที่มีปริมาณตะกั่วได้ไม่เกิน 0.4% โดยน้ำหนัก
- และในทองแดง ให้ที่มีปริมาณตะกั่วได้ไม่เกิน 4% โดยน้ำหนัก
- สารตะกั่วในสารบัดกรีชนิดจุดหลอมเหลวสูง ตะกั่วบัดกรีใน เครื่องคอมพิวเตอร์ หน่วยเก็บข้อมูล และชุดเก็บข้อมูล (ได้รับการยกเว้นถึงปี ค.ศ. 2010) ตะกั่วบัดกรีในระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับสวิทซ์ซึ่ง ให้สัญญาณ ส่งผ่านข้อมูล รวมถึงการบริหารเครือข่ายในการสื่อสาร และสารตะกั่ว ในชั้นส่วนเซรามิกอิเล็กทรอนิกส์
- สารแคดเมียม ในการเคลือบผิวหน้าเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในการใช้งานบางประเภท
- สารโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ในการป้องกันการกัดกร่อนเหล็กคาร์บอนในระบบหล่อเย็น ใน Absorption Refrigerators

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายต้องห้าม 6 ชนิด

สาร	ปริมาณความเข้มข้น (ppm)
ตะกั่ว (Pb)	100
ปรอท (Hg)	1000
แคดเมียม (Cd)	1000
เฮกซะ โครเมียม (Cr^{6+})	1000
โพลีโบรมิเนต-ไบฟีนิล (PBB)	1000
โพลีโบรมิเนต-ไดฟีนิล-อีเธอร์ (PBDE)	1000

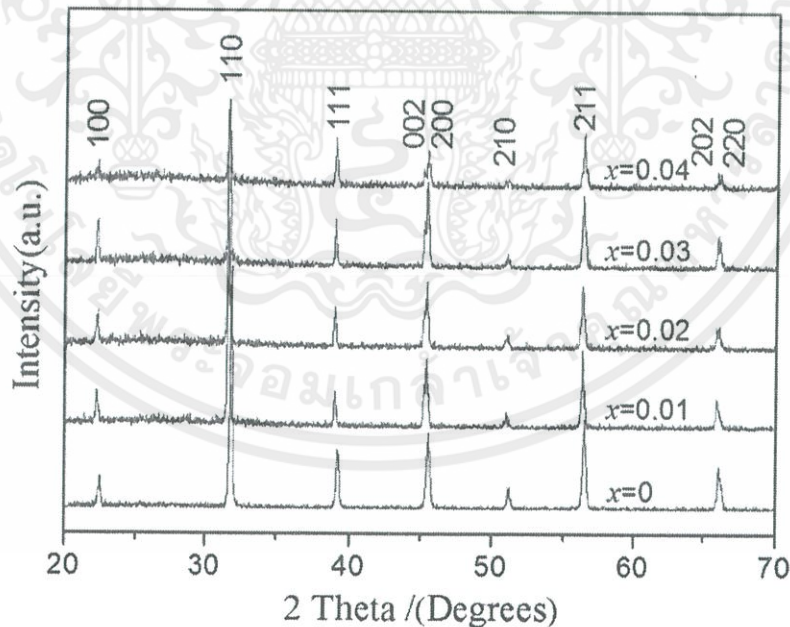
จากระเบียบทั้งสองส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อผู้ประกอบการอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีสารประกอบ PZT เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ซึ่งใน PZT มีสารตะกั่ว (Pb) เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นจึงเกิดการค้นคว้าศึกษาหาเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก เพื่อมาทดแทน PZT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด **2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 แบเรียมไททานต ($BaTiO_3$) [9]

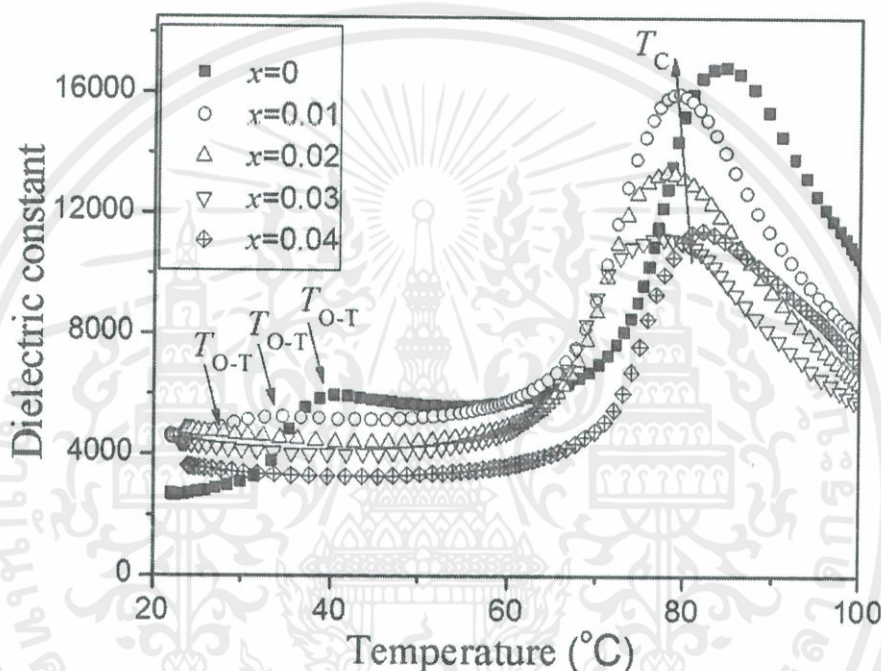
แบเรียมไททานेट เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ แบเรียมไททานेटมีค่าสัมประสิทธิ์ไฟฟ้าเชิงกลสูง (electromechanical coupling factor, k_{33}) จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ต่างๆได้ เช่น เครื่องโซนาร์ (sonar) แต่แบเรียมไททานेटมีอุณหภูมิคูรีที่ต่ำ (T_C) 120 องศาเซลเซียส และค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) ต่ำ ($d_{33}=180$ pC/N) ดังนั้นช่วงอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) ดังกล่าวมีความแคบสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน แต่สามารถเพิ่มช่วงอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) ให้มากขึ้นได้ โดยการเจือ Ca และ Sn จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) เพิ่มขึ้นเพราะมันเข้าไปสร้างเฟสใหม่ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อทำการศึกษาระบบ BCTS ในช่วง $0.01 \leq x \leq 0.03$ พบว่าสารระบบดังกล่าวมีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์ และเมื่อสัดส่วนของ BCTS เพิ่มขึ้นมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิคูรีกลับมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนของ x มีค่าเพิ่มขึ้น

2.8.2 แบเรียมแคลเซียมทินไททานेट ($\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x$)($\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04}$) O_3 [12]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **รูปที่ 2.9** กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก ($\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x$)($\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04}$) O_3 โชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ที่ $x = 0, 0.01, 0.02, 0.03$ และ 0.04 [12]

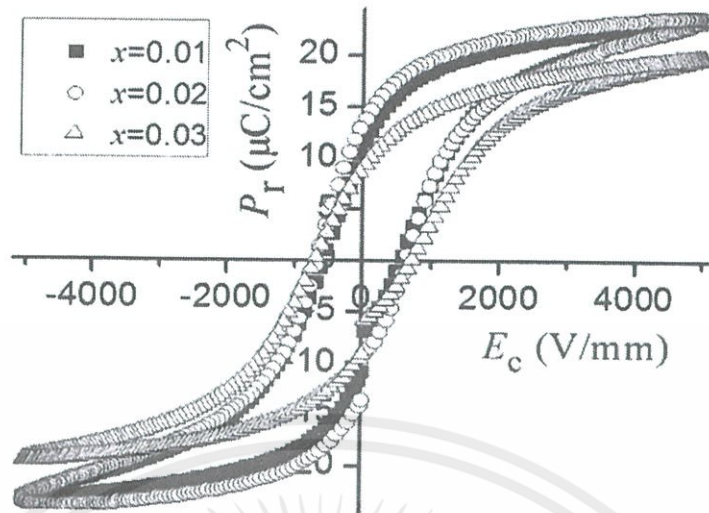
จากการศึกษาของ Wei Li และคณะ พบว่า BCTS มีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์ ซึ่งมี Ca และ Sn กระจายเข้าไปใน BaTiO_3 ผสมกันแบบสารละลายของแข็ง ถ้ามีการเจือ Ca เพิ่มขึ้นจนถึง $x = 0.04$ โครงสร้างจะเปลี่ยนจากแบบออร์โธรมบิก (Orthorhombic) ไปเป็นแบบเทตระโกนอล (tetragonal) ทั้งหมด ดังนั้นก็สรุปได้ว่าในช่วง $(0.01 \leq x \leq 0.03)$ จะเห็นเฟสของออร์โธรมบิก (Orthorhombic) และ เทตระโกนอล (tetragonal) อยู่ร่วมกันที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิของเซรามิกระบบ $(\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$ ที่ $x = 0, 0.01, 0.02, 0.03$ และ 0.04 ที่ความถี่ 100 kHz [12]

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ เซรามิก BCTS ขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.10 เห็นได้ชัดว่า ทั้งสองเฟสเปลี่ยนที่อุณหภูมิสูงกว่า 20 องศาเซลเซียส จะสังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสจากออร์โธรมบิก (Orthorhombic) ไปเป็นเทตระโกนอล (tetragonal) ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อมีการเจือ Ca มากขึ้น และอุณหภูมิคูรีของแต่ละตัวอย่างข้างต้นเป็น 80 องศาเซลเซียส ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าการเจือ Ca ไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิคูรีมากนัก แต่ทำให้อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสระหว่างออร์โธรมบิก (Orthorhombic) และเทตระโกนอล (tetragonal) ที่อุณหภูมิต่ำในระบอบของ

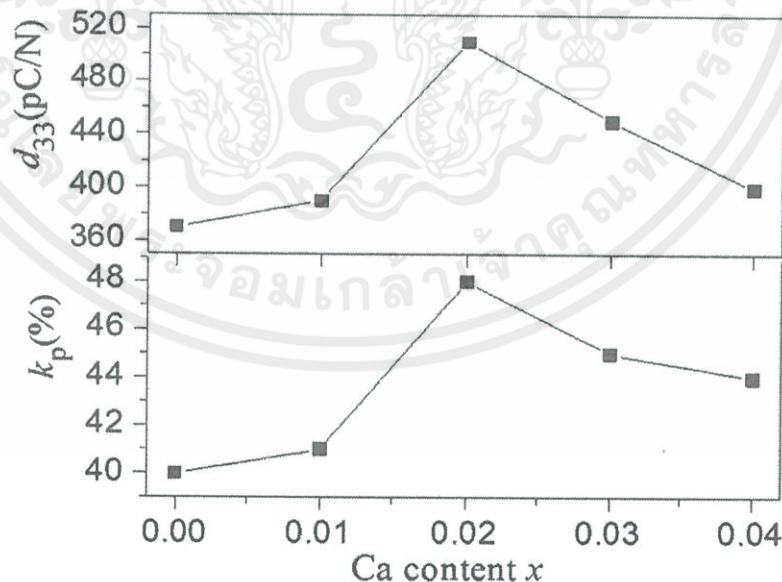
BCTS



รูปที่ 2.11 กราฟวงวนฮีสเทอรีซิสของโพลาริเซชันกับ electric field ในระบบ

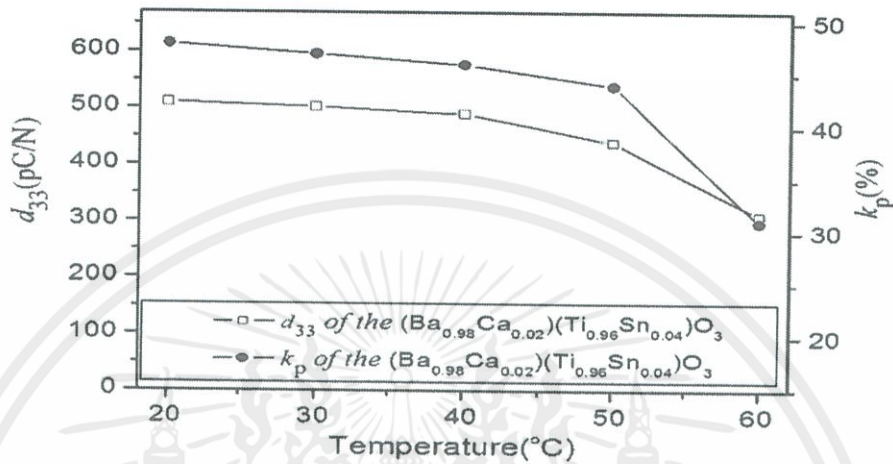
$(\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิห้อง [12]

วงวนฮีสเทอรีซิสของโพลาริเซชันกับ electric field ของเซรามิก BCTS แสดงในรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าบังคับ (coercive fields) จะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของ Ca ค่าโพลาริเซชันจะเพิ่มขึ้นที่ละน้อยจนถึงค่าสูงสุดคือ $13.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ที่ $x = 0.02$ แล้วก็ลดลง ดังรูปที่ 2.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงค่าคงตัวความเครียดเพียโซอิเล็กทริกและคัพปลิงแพกเตอร์ตามแนว
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ระนาบของ $(\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$ ซึ่งมี x เป็นตัวแปร [12]

รูปที่ 2.12 แสดงค่าคงตัวความเครียดเพียโซอิเล็กทริกและคัพปลิงแฟกเตอร์ตามแนวระนาบของเซรามิก BCTS ซึ่งมี Ca เป็นตัวแปร จะเห็นว่าเมื่อเจือ Ca ถึง $x = 0.02$ ค่า d_{33} และ k_p จะมีค่ามากที่สุด คือ 510 pC/N และ 48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงค่าคงตัวความเครียดเพียโซอิเล็กทริกและคัพปลิงแฟกเตอร์ตามแนวระนาบซึ่งมีอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำหรับ $(Ba_{x-1}Ca_x)(Ti_{0.96}Sn_{0.04})O_3$ [12]

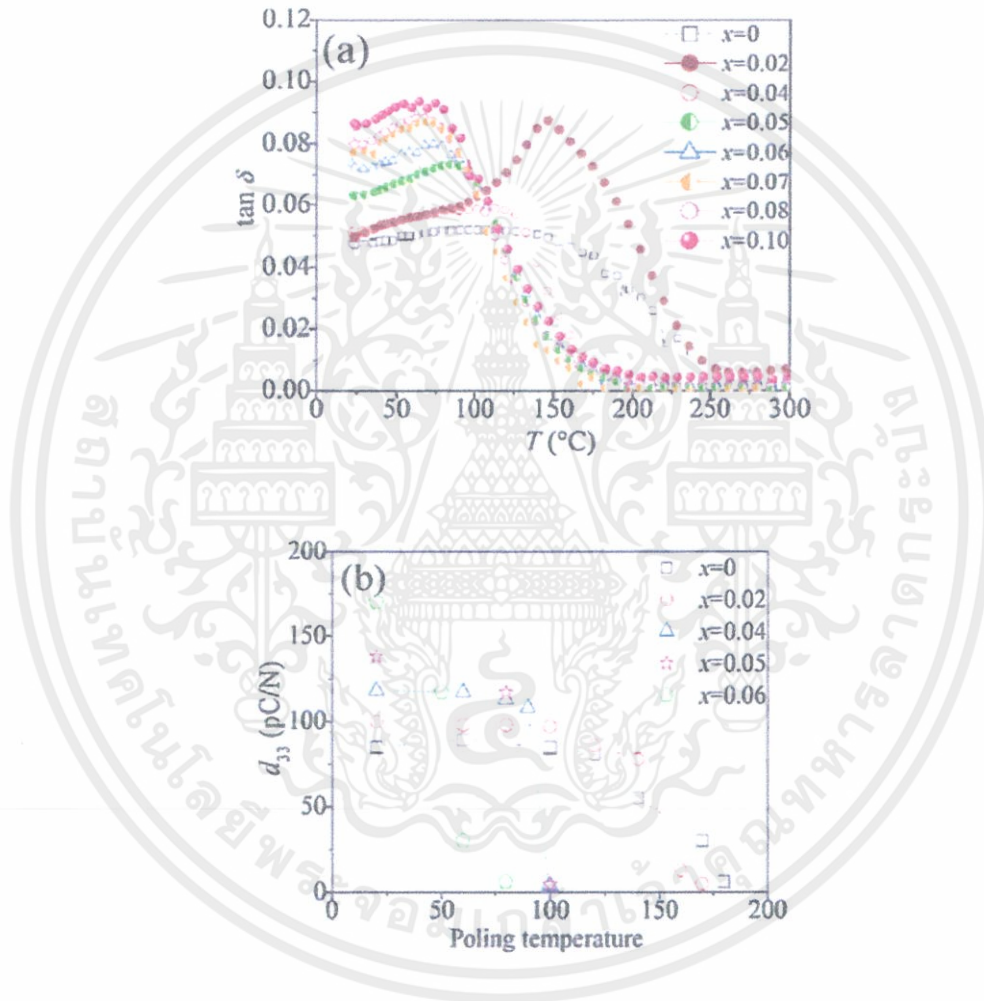
รูปที่ 2.13 แสดงค่าคงตัวความเครียดเพียโซอิเล็กทริกและคัพปลิงแฟกเตอร์ตามแนวระนาบซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 20 องศาเซลเซียส ถึง 60 องศาเซลเซียส พบว่าค่า d_{33} และ k_p เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงอุณหภูมิการใช้งาน (20 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส)

2.8.3 แบเรียมแคลเซียมทินไททานेट-บิสมาทิกเกิดไททานेट $(Ba_{0.98}Ca_{0.02})(Ti_{0.94}Sn_{0.06})O_3 - Bi_{0.51}Na_{0.05}TiO_3$ [13]

จากการศึกษาของ Dingquan Xiao และคณะพบว่า Ca และ Sn ที่เจือลงไป ใน แบเรียมไททานेट ทำให้ค่า d_{33} เพิ่มขึ้นประมาณ 500 pC/N โดยการก่อตัวของเฟสใหม่ที่อุณหภูมิห้อง แต่อุณหภูมิคูรีของ BCTS ทำให้ทำการเติมบิสมาทโซเดียมไททานेट ($Bi_{0.51}Na_{0.05}TiO_3$ หรือ BNT) เนื่องจากเอกสารนี้ BNT มีอุณหภูมิคูรีสูงถึง 320 องศาเซลเซียส เพื่อปรับปรุงสมบัติดังกล่าวนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ จากผลการวิจัยพบว่า อุณหภูมิขึ้นกับค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan\theta$) และอุณหภูมิการสลับขั้ว (T_d) ขึ้นอยู่กับค่าคงตัวความเครียดเพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) รูปที่ 2.14 แสดงอุณหภูมิที่ขึ้นอยู่กับค่า

สูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan\theta$) ของ $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.94}\text{Sn}_{0.06})\text{O}_3 - \text{Bi}_{0.51}\text{Na}_{0.05}\text{TiO}_3$ โดยวัดที่ความถี่ 100 kHz พิกที่ไ้ระดับอุณหภูมิการสลับขั้ว (T_d) ของ BCTS จะค่อยๆลดลงเมื่อ BCTS เพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิการสลับขั้ว (T_d) เข้าใกล้อุณหภูมิห้องจะทำให้ค่าเสียโไซอิเล็กทริกต่ำลง ดังรูปที่

2.14

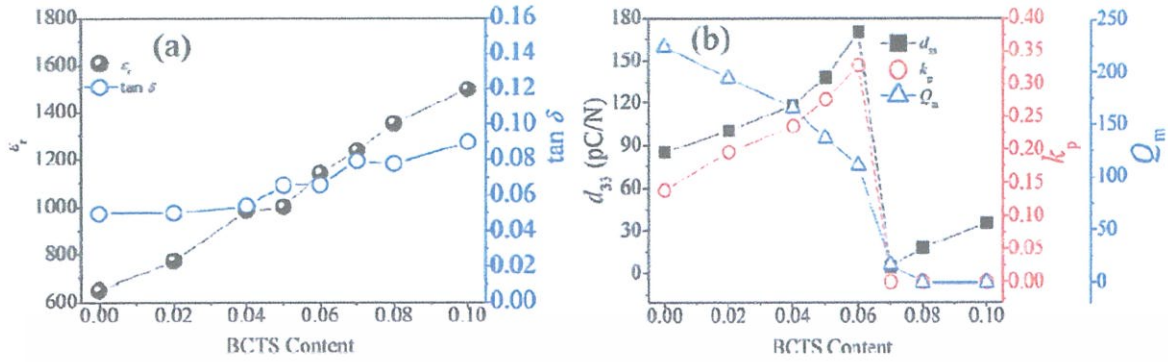


รูปที่ 2.14 (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการสลับขั้ว (T_d)

กับค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \theta$)

(b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

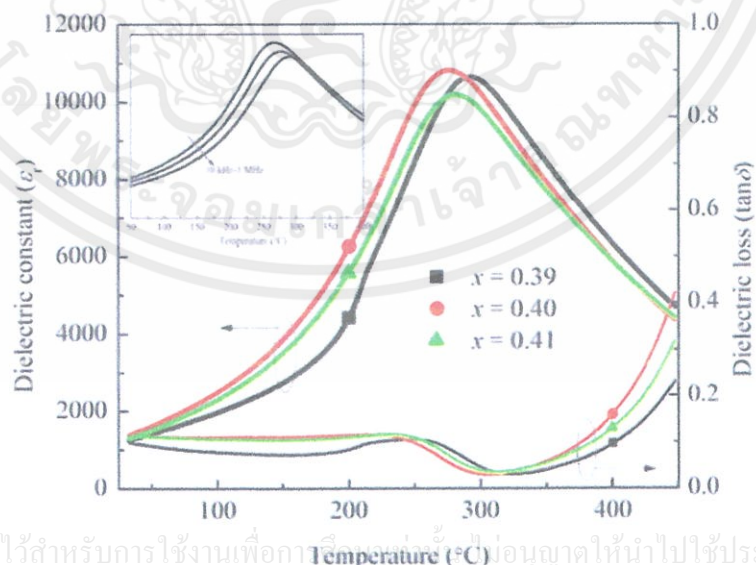
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ **คัดลอก** หรือ **เผยแพร่** อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกของ $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.94}\text{Sn}_{0.06})\text{O}_3 - \text{Bi}_{0.51}\text{Na}_{0.05}\text{TiO}_3$ โดยทำการวัดที่ความถี่ 1 kHz ที่อุณหภูมิห้อง กราฟแสดง (a) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \theta$) จะค่อยๆเพิ่มขึ้น เนื่องจาก BCTS ใช้อุณหภูมิในการเตรียมที่สูง ส่วนกราฟ(b) แสดงค่าคงตัวความเครียดเพียโซอิเล็กทริกและคัพปลิงแพกเตอร์ตามแนวระนาบ(d_{33}) ของ $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.94}\text{Sn}_{0.06})\text{O}_3 - \text{Bi}_{0.51}\text{Na}_{0.05}\text{TiO}_3$ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ BCTS เพิ่มขึ้นสูงสุด ที่ $x = 0.06$

2.8.4 เลดไททานเนต - บิสมัทนิกเกิลเซอร์โคเนต ($\text{PbTiO}_3 - \text{Bi}(\text{Ni}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_3$) [14]

จากรูปที่ 2.16 เป็นการศึกษาถึงค่าไดอิเล็กทริกขององค์ประกอบ PT-40BNZ ทั้งหมดบริเวณรอยต่อเฟส (MPB) ซึ่งบอกถึงการเปลี่ยนเฟส ที่ความถี่ที่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมบัติ ไดอิเล็กทริก ที่ขึ้นกับอุณหภูมิของ PT-100xBNZ

ในช่วงรอยต่อเฟสที่ 100 kHz และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เมื่อเทียบกับ อุณหภูมิ ของ PT-40BNZ [14]

จากกราฟเมื่อให้ความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 1 kHz พบว่าช่วงที่ต่ำกว่าค่าไดอิเล็กทริกสูงสุด จะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด และอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเป็นไปตามกฎของ Curie – Weiss จากการศึกษาการตอบสนองของเพียโซอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า พบว่าที่บริเวณ $x = 0.40$ มีอุณหภูมิคูรีเท่ากับ 270 องศาเซลเซียส และมีค่าการโพลาริเซชันคงเหลือ (Pr) เท่ากับ 38 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ รวมถึงค่าคงตัวความเครียดเพียโซอิเล็กทริกยังสูงถึง 400 pC/N (d_{33})

2.9 กระบวนการเตรียมผงเพียโซอิเล็กทริกด้วยวิธีทางปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

(solid state reaction)

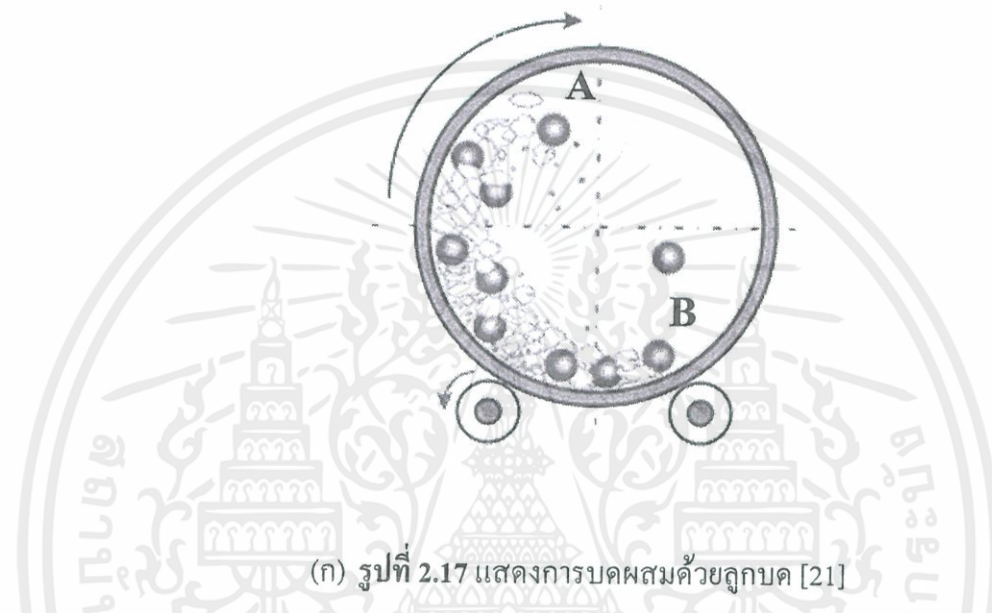
ในการเตรียมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกนั้น วิธีที่ได้รับความนิยมมาก คือ การเตรียมโดยใช้วัตถุดิบเป็นผง (powder) ซึ่งการเตรียมจากวิธีนี้คุณภาพของผงเซรามิกที่เตรียมนั้นมีความสำคัญต่อสมบัติเซรามิกเป็นอย่างมาก วิธีเตรียมผงเซรามิกมีวิธีการเตรียมอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การตกตะกอนร่วม (co-precipitation) ไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) โซลเจล (sol-gel) เป็นต้น ซึ่งในการทดลองนี้จะพิจารณาการเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction หรือ mixed oxide) เนื่องจากเป็นวิธีการเตรียมที่ไม่ซับซ้อน เตรียมได้ในปริมาณที่มากต่อครั้ง สารตั้งต้นเป็นสารประกอบออกไซด์ หรือ คาร์บอเนตของโลหะซึ่งมีราคาถูก แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อเสีย คือ ผงเซรามิกที่เตรียมได้มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับวิธีเตรียมทางเคมี

ในการเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ กระบวนการบดผสมด้วยลูกบด (ball-milling) และการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

2.9.1 กระบวนการบดผสมด้วยลูกบด (ball-milling)

กระบวนการบดผสมด้วยลูกบด (ball-milling) เป็นการบดผสมโดยใช้แรงกลในการบดผสม และในระหว่างการบดผสมนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี มีเพียงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเท่านั้น กระบวนการนี้ได้รับความนิยมสูงในการนำมาใช้เพื่อลดขนาดอนุภาคผงเฉลี่ยต่ำกว่า 1 ไมครอน ซึ่งใช้เพื่อลดขนาดอนุภาคผงที่ มีรูปร่าง หรือสิ่งแปลกปลอมที่ฝังอยู่ด้านในให้แตกออก สามารถนำมาใช้ในการผสมอนุภาคผงต่างชนิดกันให้เป็นเนื้อเดียวกันไปพร้อมๆกับการลดขนาดของอนุภาค

กระบวนการบดย่อยด้วยลูกบอลเป็นกระบวนการบดผสมอนุภาค โดยอาศัยการหมุนของหม้อบด ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกวาง มีฝาเพื่อใช้ในการเปิดปิดด้านหนึ่ง ในหม้อบดนี้จะใส่สารที่ต้องการบดผสม ลูกบด และสารช่วยในการหล่อลื่น ในปริมาณที่เหมาะสมกับขนาดของหม้อบด โดยในขณะที่หม้อบดหมุน ลูกบดที่บรรจุอยู่ด้านในจะต้องมีการเคลื่อนที่คล้ายกับตัวอักษร D ดังรูปที่ 2.17



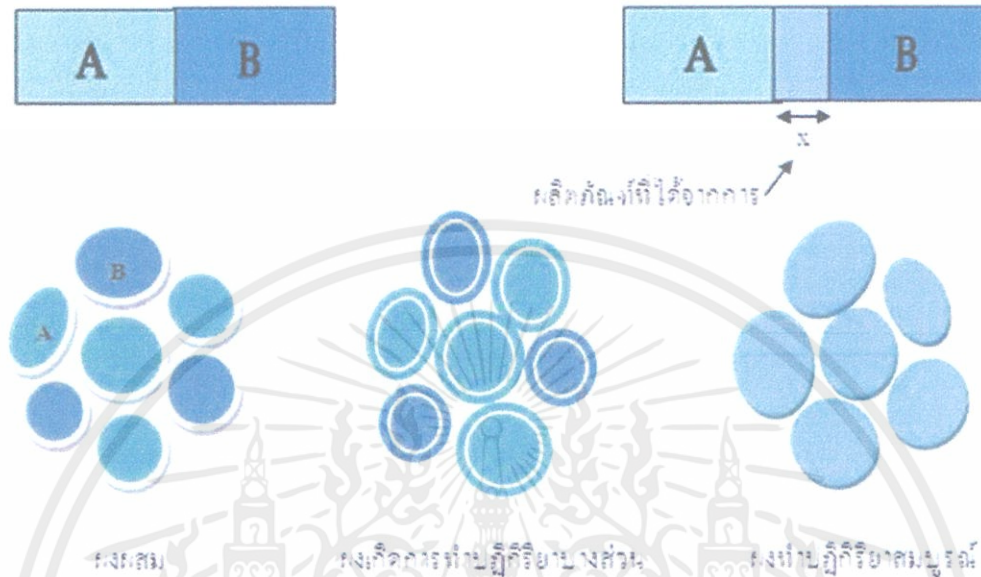
(ก) รูปที่ 2.17 แสดงการบดผสมด้วยลูกบด [21]

ลูกบดจะมีการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง B ขึ้นไปจนถึงตำแหน่ง A แล้วตกลงมากระทบกับอนุภาคด้านล่างและมีการหมุนเสียดสีกัน ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่เป็นวงจรเช่นนี้ไปเรื่อยๆทำให้อนุภาคของสารมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการกระทบของลูกบด การเสียดสีระหว่างหม้อบดกับลูกบด ในขณะที่การกระทบและการเสียดสีเหล่านี้ทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลง ก็ยังทำให้เกิดสิ่งเจือปนได้เช่นกัน เช่น ชั้นส่วนของลูกบด หรือผนังของหม้อบด ที่เกิดการสึกกร่อนหลุดออกมา ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถป้องกันได้ โดยการเลือกใช้ลูกบดที่มีคุณภาพสูง และใช้หม้อบดที่ทำจากวัสดุที่สามารถกำจัดออกได้ที่อุณหภูมิต่ำ เช่น หม้อบดพลาสติก เป็นต้น

2.9.2 การเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction)

การเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งเป็นการเกิดปฏิกิริยาที่มีการสลายตัวของตัวทำปฏิกิริยาเกิดเป็นของแข็งชนิดใหม่กับก๊าซ โดยการให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็งเพื่อทำปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็นไอของเหลวทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ให้เกิดการสลายตัว หรือเกิดปฏิกิริยา และเกิดเป็นของแข็งชนิดใหม่ขึ้นมา เรียกกระบวนการนี้ว่า

การแคลไซน์ (calcination) สารตั้งต้นเกิดอันตรกิริยาต่อกัน โดยอาศัยการแพร่ระหว่างกันของ ไอออน เป็นการช่วยลดขอบเขตของการแพร่ในขั้นตอนการเผาซินเตอร์



รูปที่ 2.18 แสดงแบบจำลองลักษณะการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งใน

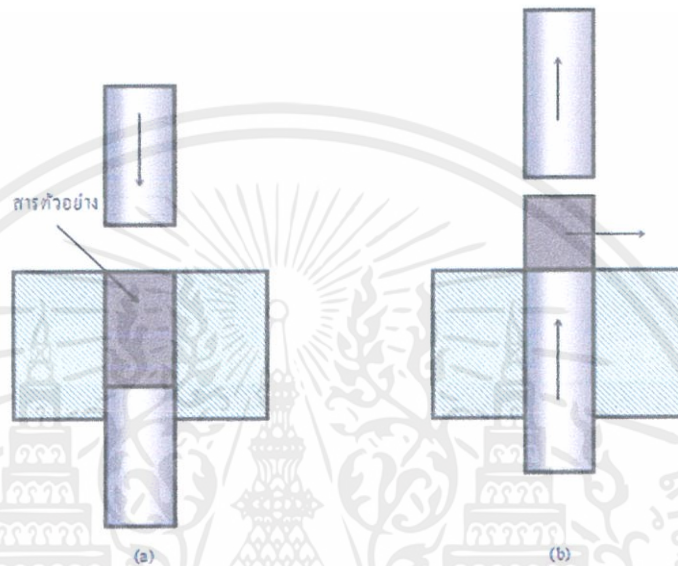
(ข) สารผลึกเดี่ยว (จ) ผงผสม [15]

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ธรรมชาติทางเคมีของตัวทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ ขนาดของอนุภาคและการกระจายของอนุภาค ขนาดของผงผสม ความสม่ำเสมอของผงผสม บรรยากาศ อุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อขนาดของตัวทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะทางของการแพร่มากขึ้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในกรณีที่มีแก๊สเกิดขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยา บรรยากาศจะมีผลต่อพลังงานจลน์ของการเกิดปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ความสม่ำเสมอของสารผสมจะส่งผลต่อระยะการแพร่และจำนวนของจุดสัมผัสระหว่างตัวทำปฏิกิริยา

การเตรียมผงด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็งมีค่าใช้จ่ายน้อย แต่จะเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคผง ทำให้ต้องใช้กระบวนการบดย่อยด้วยลูกบอลมาช่วยในการลดขนาด ซึ่งจะส่งผลให้เกิดสิ่งเจือปน เนื่องจากเศษของลูกบดหรือผนังของหม้อบดปะปนมาเสมอ นอกจากนี้การควบคุมขนาดอนุภาค เนื่องจากการบดทำได้ยาก

2.10 การอัดผง (powder pressing)

ใช้วิธีการอัดตามแกนเดียว (uniaxial) ผงจะถูกอัดในแม่พิมพ์โดยแรงที่มาจากทิศทางเดียว ชิ้นงานจะได้รูปร่างเหมือนกับรอยในแม่พิมพ์ การอัดขึ้นรูปแบบนี้ผลิตได้เฉพาะชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนเท่านั้น แต่อัตราการผลิตสูง ราคาถูก



รูปที่ 2.19 แสดงขั้นตอนการอัดขึ้นรูปแบบอัดตามแกนเดียว [15]

- (a) ผงเซรามิกถูกเติมลงในแม่พิมพ์และผงเซรามิกถูกกดอัดโดยแรงอัดจากหัวกดด้านบน
- (b) ชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปแล้วถูกดันออกมาจากแม่พิมพ์โดยหัวอัดด้านล่าง

สำหรับการอัดผงแบบอัดตามแกนเดียวนั้น ชิ้นงานที่ได้ต้องมีการนำไปเผา ในระหว่างการเผา ชิ้นงานจะมีการหดตัว ปริมาตรรูพรุนลดลง และความแข็งแรงเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เกิดจากการที่มีการเชื่อมประสานกันเป็นเนื้อเดียวที่มีความหนาแน่นสูงเป็นกระบวนการที่เรียกว่า การเผาซินเตอร์ (sintering)

เอกสารนี้ 2.11 กระบวนการเผาซินเตอร์ (sintering) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ กระบวนการเผาซินเตอร์ คือกระบวนการที่ทำให้อนุภาคของวัสดุเซรามิกเกิดพันธะซึ่งกันและกัน โดยการแพร่ของของแข็งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานมีการหดตัว ส่วนที่เป็นรูพรุน

ของเนื้อวัสดุลดลง และมีความหนาแน่นมากขึ้น โดยมากวิธีการนี้จะใช้กับเซรามิกจำพวก อลูมินา (alumina) เบอริลเลีย (beryllia) เฟอไรต์ (ferrites) และไททานเตต (titanate)

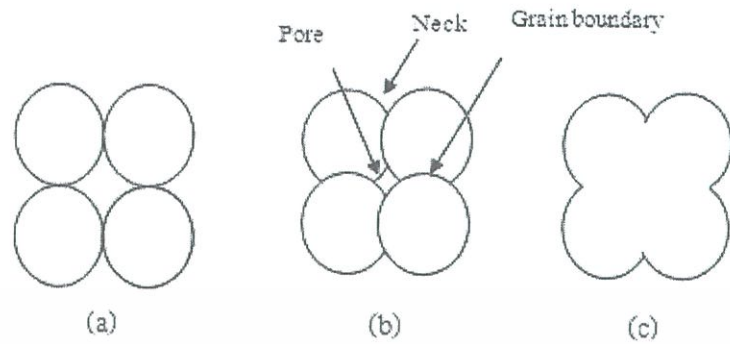
การซินเตอร์นั้นจะประกอบด้วย 3 ช่วงที่สำคัญ ได้แก่

(ก) การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น (initial stage of sintering) ประกอบด้วยการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค (rearrangement of particles) และเกิดการเติบโตของบริเวณระหว่างแต่ละอนุภาคหรือที่รู้จักกันว่า “คอ” แสดงดังรูปที่ 2.20 (b) โดยการเติบโตนี้เกิดจากการแพร่ การขนส่งแบบไอ การไหลแบบพลาสติกหรือการไหลหนืด สำหรับผงที่ประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมจะมีการหดตัวหรือการแน่นตัวเกิดขึ้นพร้อมกับการเติบโตของคอ ทำให้ความแตกต่างของความโค้งที่ผิวหายไป

(ข) การซินเตอร์ช่วงกลาง (intermediate stage of sintering) เริ่มเกิดขึ้นเมื่อรูพรุนมีรูปร่างสมดุล (equilibrium shape) ซึ่งจะพิจารณาได้จากแรงตึงผิวและแรงระหว่างผิว ส่วนเฟสของรูพรุนก็ยังคงมีความต่อเนื่องกันอยู่ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอนุภาคในการซินเตอร์ช่วงกลางนี้แสดงดังรูป 2.20 (c) จะเห็นได้ว่าขนาดของคอจะใหญ่ขึ้น ปริมาตรรูพรุนจะน้อยลง และจุดศูนย์กลางของอนุภาคจะเข้ามาใกล้กันมากขึ้น จึงส่งผลให้การหดตัวสัมพันธ์กับปริมาณของรูพรุนที่น้อยลง ส่วนขอบเกรนจะเริ่มเคลื่อนทำให้เกรนเริ่มโต และเกรนที่อยู่เคียงข้างนั้นหายไป เกรนดังกล่าว ดังนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเรขาคณิตของเกรน คอ และรูพรุนต่อไป การซินเตอร์ช่วงกลางนี้จะใช้เวลานานที่สุดจะเกิดจนกว่ารูพรุนจะมาเชื่อมต่อกันและสิ้นสุดเมื่อรูพรุนเริ่มแยกตัวออกจากกันเป็นรูพรุนเดี่ยว ๆ (isolated pores) การหดตัวในการซินเตอร์ช่วงนี้จึงมากกว่าช่วงอื่น ๆ

(ค) การซินเตอร์ช่วงท้าย (final stage of sintering) รูพรุนจะถูกกำจัดออกจากระบบโดยการแพร่ตามขอบเกรน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของขอบเกรนและการควบคุมการเติบโตของเกรนได้ อย่างไรก็ตามถ้าการเติบโตของเกรนนั้นเร็วเกินไปขอบเกรนก็จะเคลื่อนที่เร็วกว่ารูพรุน ส่งผลให้รูพรุนแยกตัวไปอยู่ในเกรน เมื่อเกรนเติบโตต่อไปจะทำให้รูพรุนถูกแยกออกจากขอบเกรน

ซึ่งจะให้ลดโอกาสการถูกกำจัดออกไปได้ ดังนั้นจึงควรมีการควบคุมการเติบโตของเกรนเป็นอย่างดี ไม่ว่ากรณีใด เพื่อให้การกำจัดรูพรุนเป็นไปได้มากที่สุด อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในช่วงการเผาซินเตอร์ [15]

- (a) อนุภาคผงหลังจากถูกอัดขึ้นรูป
 (b) อนุภาคผงเริ่มเชื่อมติดกันและมีรูพรุนเกิดขึ้นในบริเวณใจกลาง
 (c) ขนาดคอใหญ่ขึ้น ปริมาตรรูพรุนน้อยลง

2.12 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

2.12.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction analysis)

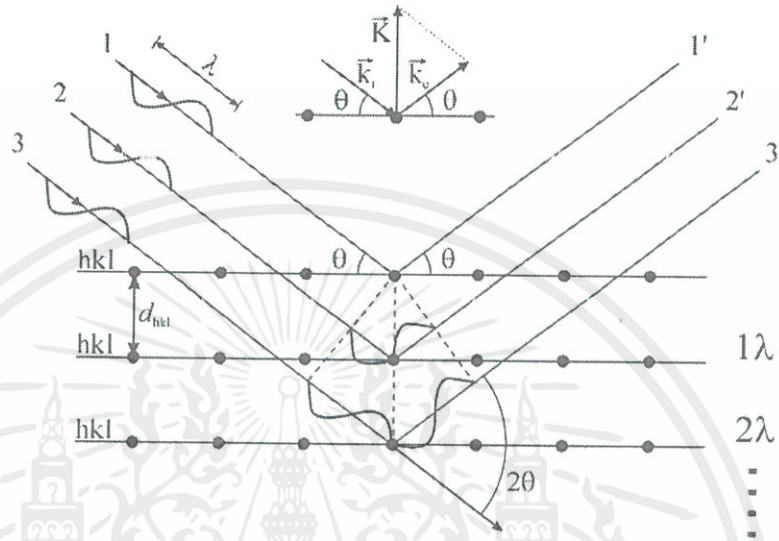
เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ภายในเนื้อวัสดุ โดยอาศัยองค์ความรู้พื้นฐานของวิชาโครงสร้างผลึก (crystallography) ซึ่งเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์นี้ เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์วัสดุแบบไม่ทำลายชิ้นงาน (non-destructive analysis) โดยสามารถใช้ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (crystal structure) องค์ประกอบของสารประกอบ การจัดเรียงของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบ ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และเชิงปริมาณ (quantitative) โดยเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญ

เอกสารนี้เป็นของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ขออนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ในปี ค.ศ. 1915 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเราสามารถมองเห็นผลึก

ว่าประกอบด้วยชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตก-

กระทบจะเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ ลำคลื่นที่สะท้อนออกมาจากระนาบต่าง ๆ จะมีความเข้มสูง ถ้าหากความแตกต่างระหว่างระยะเดินทาง (path difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงแบบจำลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ [16]

พิจารณาอะตอมในผลึกเรียงตัวเป็นระเบียบ และมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่า ๆ กัน รังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นลำขนานกัน การเลี้ยวเบนในลักษณะนี้เป็นการเลี้ยวเบนที่คล้ายกับการเลี้ยวเบนในเกรตติงแบบสะท้อน สิ่งสำคัญในการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ขึ้นกับภาวะ 2 ประการ คือ

1. รังสีที่ตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบน และเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน
2. ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

พิจารณา เมื่อยิงรังสีเอกซ์ตกกระทบผิวหน้าของผลึกเป็นมุม θ เพื่อให้เกิดการ

สะท้อนและการกระเจิงเมื่อเกิดอันตรกิริยากับอะตอม P และ Q จากกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) ความแตกต่างระหว่างระยะเดินทาง (path difference) ของคลื่นสะท้อนจากระนาบ มีค่าระยะทางเท่ากับ

$$SQ + QT = n\lambda \quad (2.13)$$

เมื่อ n คือ เลขจำนวนเต็ม

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์จากเป้าทองแดงมีค่า 1.54056 \AA

จากรูปที่ 2.16 พบว่าระยะทางของ $SQ = QT$ จากสามเหลี่ยม PSQ ระยะเดินทาง $SQ = d\sin\theta$ ดังนั้น

$$SQ = QT = d\sin\theta \quad (2.14)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก

ดังนั้น จากสมการที่ 2.13 และสมการที่ 2.14 อาจเขียนใหม่ได้ว่า เมื่อคลื่นเกิดการแทรกสอดแบบเสริมที่มุม θ จะได้สมการ

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.15)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก hkl

θ คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

n คือ เลขจำนวนเต็มใดๆ ($n = 1, 2, 3, \dots$)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ มีค่า 1.54056 \AA

จากกฎของแบร็ก (Bragg's Law) จะสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบได้ โดยปกติแล้วของแข็งที่เป็นผลึกจะมีโครงสร้างที่แน่นอน โดยผลึกจะประกอบด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล ที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบมีการซ้ำกันเกิดขึ้นในทิศทางระยะไกลในทุกทิศทาง มีมุมและระยะห่างระหว่างอะตอมที่แน่นอน โดยจะศึกษาในรูปแบบโครงข่าย (lattice) ที่มีรูปร่างที่แน่นอน

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique) สามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อกระทบผลึก จะเกิด

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) ที่แตกต่างกันขึ้น เป็นลักษณะเฉพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของธาตุและสารประกอบแต่ละชนิด ซึ่งรูปแบบนี้เทียบได้กับลายนิ้วมือของมนุษย์ โดยข้อมูลที่ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดราม่าและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ และความเข้มของรังสีเอกซ์

ปัจจุบันมีองค์กร JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Stand) ได้ทำการวัดและจัดเก็บรวบรวมข้อมูลของสารประกอบต่าง ๆ มากกว่า 8000 ชนิด ทั้งในรูปแบบการ์ดและซีดี (compact disk) ซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์เฟสของสารตัวอย่าง โดยนำรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้และค่าระยะห่างระหว่างระนาบที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับรูปแบบข้อมูลมาตรฐานของ JCPDS

2.12.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron Microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นระบบที่ภาพเกิดจากการสแกนด้วยลำแสงอิเล็กตรอนกระทบชิ้นงานตัวอย่าง ทำให้เกิดอันตรกิริยากับอะตอมของโครงสร้างในชิ้นงานตัวอย่าง และเกิดการปลดปล่อยอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่าง ได้เป็นสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal) ซึ่งสามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอม เนื่องจากได้ดูดกลืนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electrons) ดังนั้นทำให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าพลังงานต่ำ และเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมค่อนข้างต่ำ
2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (backscattering electrons) เป็นอิเล็กตรอนที่มีการสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอะตอมแล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมา เกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง
3. อิเล็กตรอนทะลุผ่าน (transmitted electrons) เป็นส่วนของอิเล็กตรอนที่เหลือจากการดูดกลืนพลังงานของชิ้นงานตัวอย่าง จำสามารถทะลุผ่านออกมาได้
4. รังสีเอ็กซ์ (X-rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาหลังการทำอันตรกิริยาระหว่างอะตอมบนชิ้นงานตัวอย่างกับอิเล็กตรอนพลังงานสูง
5. อิเล็กตรอนที่ถูกดูดกลืนในชิ้นงานตัวอย่าง (absorbed electrons) เป็นอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ส่วนใหญ่เลือกใช้สัญญาณอิเล็กตรอน 2 แบบ คือ สัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (backscattering electrons) และสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) ซึ่งสัญญาณอิเล็กตรอนทั้งสองแตกต่างกันที่สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าพลังงานอิเล็กตรอนต่ำกว่าสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ และพบว่าสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมาจากพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างระดับนาโนเมตร ส่วนสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับมาจากพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่ระดับลึกกว่า ทำให้สัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับมีความสามารถในการแจกแจงต่ำกว่าสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ความคมชัดของภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับขึ้นกับเลขอะตอมของชิ้นงานตัวอย่าง คือ ถ้าชิ้นงานมีเลขอะตอมมาก ทำให้ภาพที่ได้มีความคมชัดมาก ส่วนความชัดเจนของภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้นกับเลขอะตอม และลักษณะพื้นผิว (topograph) ของชิ้นงานตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นภาพ จะปรากฏภาพให้เห็นบน CRT เหมือนสัญญาณภาพจากโทรทัศน์



รูปที่ 2.22 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [17]

โดยทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของเซรามิกบริเวณรอยหัก เพื่อตรวจสอบลักษณะและขนาดของเกรนที่ได้ โดยการนำเซรามิกที่เตรียมได้มาทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคส์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นนำไปเคลือบ

ด้วยทอง แล้วจึงทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยาย ในช่วง 5000 ถึง 20000 เท่า

2.13 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก [18]

ไดอิเล็กทริก คือ สารที่ไม่นำไฟฟ้า และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ซึ่งเป็นตัวเลขที่แสดงสมบัติอย่างหนึ่งของตัวเก็บประจุ โดยทำการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan\theta$) ของเซรามิกที่เตรียมได้เทียบกับการเปลี่ยนแปลงความถี่และสัดส่วนองค์ประกอบ โดยนำเซรามิกมาทำการขัดให้เรียบและขนานกับทั้งสองหน้าโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 1000 เซรามิกที่ได้มีความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร ทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคส์ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาอบไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการวัดความหนา และเส้นผ่านศูนย์กลาง เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของเซรามิกนำมาทำขั้วไฟฟ้า โดยใช้กาวเงินทาที่ผิวหน้าของเซรามิกทั้งสองด้าน แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 °C/นาที เพื่อให้กาวเงินแห้งและติดผิวเซรามิกได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LCR meter ที่ความถี่ 0.1 1 10 100 และ 1000 kHz แล้วนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้จากสมการที่ 2.16

$$\epsilon_r = \frac{C_p d}{\epsilon_0 A} \quad (2.16)$$

เมื่อ ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของสารตัวอย่าง

C_p คือ ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของสารตัวอย่าง

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง (cm)

A คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่าง (cm²)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ มีค่า 8.85×10^{-12} ฟารัด/เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ค่าความสามารถเก็บประจุของสารสามารถวัดได้ที่ความถี่ต่างๆ แต่โดยทั่วไปจะวัดที่ความถี่ 1 kHz ไม่ว่าจะถี่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าไม่คงที่ ขึ้นกับอุณหภูมิ (T) ของเนื้อสาร ตามสมการของ Curie-Weiss

Law คือ

$$\epsilon_r - 1 = \frac{C}{T - T_c} \quad (2.17)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิของสาร ($^{\circ}\text{C}$)

T_c คือ อุณหภูมิคูรี (curie temperature) หรือ อุณหภูมิที่สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกไม่มี

ขั้วไฟฟ้าหรือค่าโพราไรเซชันมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของสาร

C คือ ค่าคงที่คูรี (curie constant) มีค่าอยู่ระหว่าง $10^3 - 10^5$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ กระบวนการเตรียม และการหา ลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3-x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ เมื่อ M คือ Mg และ Ni ซึ่ง x มีค่าตั้งแต่ 0.00 ถึง 0.10 โดยจะเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผงเพียโซอิเล็กทริกไว้สาร ตะกั่ว การเตรียมเซรามิก และการตรวจวัดสมบัติต่างๆ ได้แก่ ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกที่เตรียมขึ้นดังต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ขวดพลาสติกพร้อมฝาปิด
- 3.1.2 กระบอกล้างน้ำกลั่น
- 3.1.3 กระบอกล้างเอทานอล
- 3.1.4 ลูกบิด zirconia
- 3.1.5 ช้อนตักสาร
- 3.1.6 ปีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร 2 ใบ
ขนาด 1000 มิลลิลิตร 3 ใบ
- 3.1.7 อลูมิเนียมฟรอยล์ (aluminum foil)
- 3.1.8 ตะแกรงกรอง
- 3.1.9 ถ้วยอลูมินาสำหรับเผาสาร (alumina crucible)
- 3.1.10 ครอบคูลสาร
- 3.1.11 กระดาษทราย เบอร์ 600 1000 1200 และ 2000
- 3.1.12 เทปกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายเอกสารของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1.13 ยางไนรอกักรยานยนต์
- 3.1.14 คีมหนีบ (forceps)
- 3.1.15 แท่งแม่เหล็กสำหรับปั่นกวนสาร (magnetic bar)
- 3.1.16 ถูขีปพลาสติกสำหรับใส่สารเบอร์ 2 5 และ 7
- 3.1.17 เวอร์เนีย
- 3.1.18 แผ่นให้ความร้อน (hot plate) พร้อมตัวผสมสารแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
- 3.1.19 แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เซนติเมตร
- 3.1.20 เครื่องอัดไฮดรอลิก ผลิตโดยบริษัทแสงไทยอินเตอร์เทรด จำกัด ประเทศไทย
- 3.1.21 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific
ประเทศอังกฤษ
- 3.1.22 ตู้อบสารอุณหภูมิประมาณ 250° ซ ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific
- 3.1.23 เตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง 1200° ซ และ 1600 ° ซ ผลิตโดยบริษัท Chavachote
- 3.1.24 เครื่องบดย่อยสารแบบลูกบอล
- 3.1.25 เครื่องตรวจการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer : XRD)
- 3.1.26 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
- 3.1.27 เครื่องวัดฮีสเทอรีซิส ผลิตโดยบริษัท Radiant Technologies, Inc.
รุ่น RT6000HVA ประเทศแคนาดา
- 3.1.28 เครื่องอัดตราซิโนกส์ ผลิตโดยบริษัท Fight ประเทศสวีเดน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

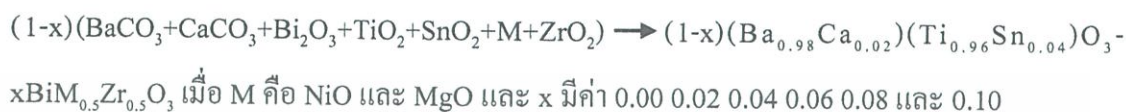
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ความบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดยบริษัท Inframal Advanced Materials ประเทศอังกฤษ
- 3.2.2 บิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดยบริษัท Aldrich ประเทศเยอรมนี
- 3.2.3 ทินออกไซด์ (SnO_2) ความบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.4 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศเยอรมนี
- 3.2.5 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ความบริสุทธิ์ 99.5% ผลิตโดยบริษัท Analar ประเทศอังกฤษ
- 3.2.6 แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) ความบริสุทธิ์ 98.5% ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศอิตาลี
- 3.2.7 เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) ความบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดยบริษัท Inframal Advanced Materials ประเทศอังกฤษ
- 3.2.8 นิกเกิลออกไซด์ (NiO) ความบริสุทธิ์ 99% ผลิตโดยบริษัท Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.9 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ความบริสุทธิ์ 99+% ผลิตโดยบริษัท Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.10 ฟองลูมินา (Al_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.99% ผลิตโดยบริษัท Inframal Advanced Materials ประเทศอังกฤษ

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 3.2.11 เอทานอล ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) ความบริสุทธิ์ 95% ผลิตโดยองค์การสุรา ประเทศไทย การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

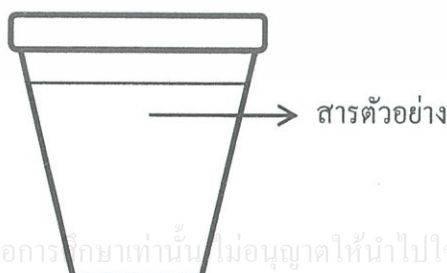
3.3 กระบวนการเตรียมผงเพียโซอิเล็กทริก BMgZ-BNiZ

การเตรียมผงเพียโซอิเล็กทริก BMgZ-BNiZ ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) จากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์สูง จากปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้

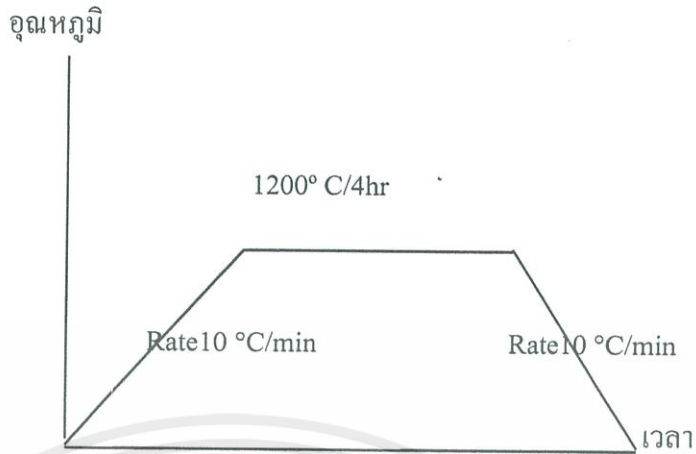


การเตรียมผงเพียโซอิเล็กทริกมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมสารที่ $x = 0.00$ M คือ Ni โดยใช้น้ำหนักสารตามตารางที่ 3.1 ใส่ขวดพลาสติกที่บรรจุลูกบดเซอร์คอนเนีย โดยใช้เอทานอลเป็นตัวกลาง
2. บดผสมเป็นเวลา 18 ชั่วโมง
3. นำมารองโดยใช้ตะแกรงกรอง ใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร และใช้เอทานอลล้างลูกบดจนสะอาด นำสารที่ได้ไประเหยเอาเอทานอลออกโดยใช้เตาสำหรับให้ความร้อน
4. เมื่อระเหยเอทานอลจนแห้งแล้วจะเหลือตะกอนของสารที่ต้องการจึงนำไปอบในตู้อบสารอุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. หลังจากนั้นเตรียมสัดส่วน(x) อื่นๆ ด้วยวิธีการเดียวกัน
6. นำผงเพียโซอิเล็กทริกที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดไปเผาแคลไซน์โดยนำสารใส่ครุชีเบิ้ล ดังรูปที่ 3.1 และใช้ขั้นตอนการเผาแคลไซน์ตามรูปที่ 3.2
7. นำสารที่ผ่านการเผาแคลไซน์แล้วมาบดในครกบดสาร
8. นำสารที่บดแล้วไปทำการบดผสมซ้ำอีก 1 ครั้ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 3.1 แสดงการบรรจุสารในการเผาแคลไซน์



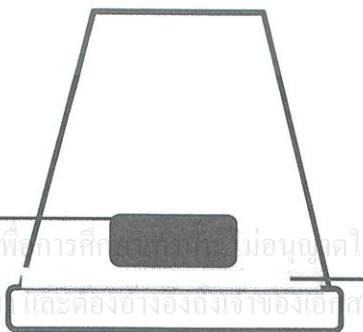
รูปที่ 3.2 กราฟแสดงขั้นตอนการเผาเคลือบ

3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก

โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

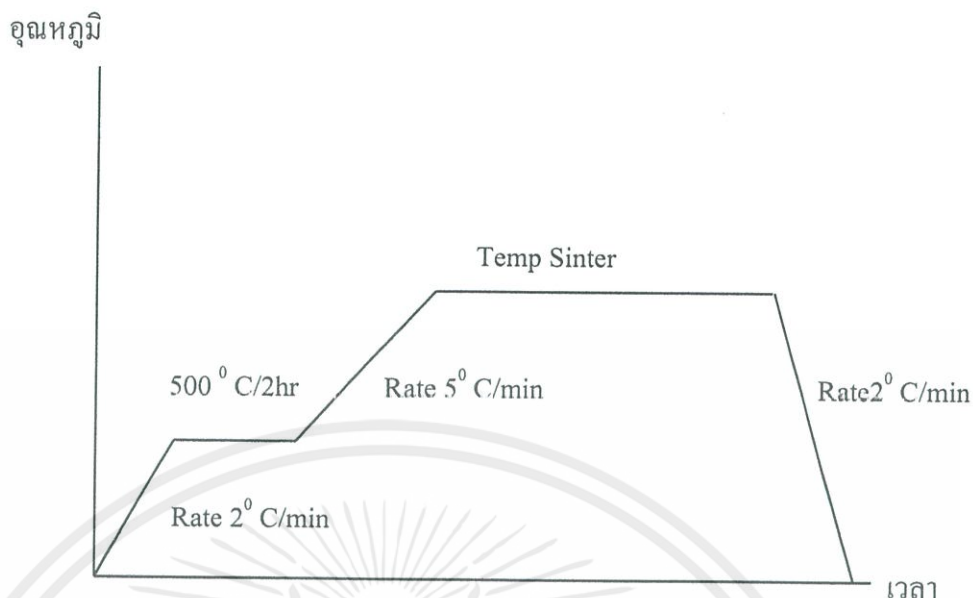
1. นำผงเพียโซอิเล็กทริกที่เตรียมได้ มาบดผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (binder) เพื่อให้ผงเกาะกันได้ดีขึ้น
2. จากนั้นนำมาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ด โดยใช้แม่พิมพ์โลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ด้วยเครื่องอัดในระบบไฮดรอลิกด้วยความดัน 2 ตัน
3. นำไปเผาไล่อุณหภูมิ เพื่อหาอุณหภูมิซินเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้เซรามิกที่มีความหนาแน่นสูง โดยนำมาจัดเรียงในครุชีเบิ้ล ดังรูปที่ 3.3 และใช้ขั้นตอนการเผาซินเตอร์ตามรูปที่ 3.4
4. นำเซรามิกที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ

เม็ดสารตัวอย่าง ←



→ ผงอลูมินา

รูปที่ 3.3 แสดงการตัดเรียงสารในการเผาซินเตอร์



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงขั้นตอนในการเผาซินเตอร์

3.5 การตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

นำสารตัวอย่างที่ได้จากการเผาเคลือบและเผาซินเตอร์ ไปทำการศึกษาพฤติกรรม การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์ เอกสิทธิ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสี เอกซ์ ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเทียบ กับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบบวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยปกติผลึกจะมีลักษณะ การจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นชั้นๆ ซึ่งลักษณะการเรียงตัวนี้จะแตกต่างกันไปในผลึกแต่ละชนิด ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัว เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบผลึกจะทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีเอกซ์จากชุด ระนาบเหล่านี้ โดยเป็นไปตามกฎของแบรค (Bragg' law) ซึ่งจะสามารถหาระยะห่างระหว่าง ระนาบได้ โดยอาศัยสมการที่ 3.1

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารเมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก hkl อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ θ คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

n คือ เลขจำนวนเต็มใดๆ ($n = 1, 2, 3, \dots$)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากเป้าทองแดงมีค่า 1.54056 \AA

ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้สภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้

อุณหภูมิในการวิเคราะห์	25°C
มุม 2θ เริ่มต้น – สิ้นสุด	20° - 80°
Step size	0.02°
Time step	1 sec

ข้อมูลที่ได้จากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สามารถนำมาใช้หาองค์ประกอบทางเคมี หรือ หาโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้ นอกจากนี้ยังสามารถทำการคำนวณหาปริมาณของเฟสหลัก ซึ่งมีโครงสร้างเพอโรพสไกต์ที่เกิดขึ้นในเชิงเปรียบเทียบกับเฟสแปลกพลอม (Pyrochlore) โดยอาศัยสมการที่ 3.2

$$\text{ปริมาณของเฟสหลัก (\%wt)} = \frac{I_{\text{perov.}} \times 100}{I_{\text{perov.}} + I_{\text{pyro.}}} \quad (3.2)$$

เมื่อ $I_{\text{perov.}}$ คือ ความเข้มข้นสูงสุดของพีค XRD ของเฟสเพอโรพสไกต์

$I_{\text{pyro.}}$ คือ ความเข้มข้นสูงสุดของพีค XRD ของเฟสแปลกพลอม

3.6 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

3.6.1 การหาค่าความหนาแน่น (Density หรือ ρ)

ทำการหาความหนาแน่นของเซรามิกที่เตรียมได้ โดยอาศัยหลักการของอาร์คิมิดีส ที่กล่าวไว้ว่า “เมื่อจุ่มของแข็งลงในของเหลวจะมีแรงพยุงที่เกิดขึ้นบนของแข็งนั้น โดยแรงพยุงที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับน้ำหนักของๆเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยปริมาตรของแข็ง” วิธีการทำโดยนำเซรามิกที่เตรียมได้นำมาตมในน้ำกลั่น โดยให้น้ำกลั่นท่วมเม็ดเซรามิกเป็นเวลา 5 ชั่วโมงเพื่อให้ น้ำเข้าไปแทนที่อากาศที่อยู่ในรูพรุนของเซรามิก จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น

จนถึงอุณหภูมิห้องแล้วทำการชั่งน้ำหนักเม็ดเซรามิกที่อิมน้ำ โดยการแทนที่ของน้ำเป็น w_1 จากนั้นนำเม็ดเซรามิกมาซับด้วยกระดาษทิชชูเปียก แล้วจึงนำมาชั่งหาน้ำหนักแห้งเป็น w_2 แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นดังสมการที่ 3.3

$$\rho = \frac{w_2 \times \rho_1}{w_2 - w_1} \quad (3.3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของเซรามิก (g/cm^3)

w_1 คือ น้ำหนักของเซรามิกที่ชั่งได้ในน้ำ (g)

w_2 คือ น้ำหนักของเซรามิกเปียก (g)

ρ_1 คือ ความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิที่วัด (g/cm^3)

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ได้จากสมการที่ 3.4

$$\%TD = \frac{\rho}{\rho_{TD}} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ %TD คือ เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี

ρ คือ ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง (g/cm^3)

ρ_{TD} คือ ความหนาแน่นของสารตัวอย่างตามทฤษฎี (g/cm^3)

3.6.2 การหาการหดตัวของเซรามิกหลังการเผาซินเตอร์ (Firing shrinkage)

หลังจากทำการเผาซินเตอร์เซรามิก แล้วนำชิ้นงานมาตรวจวัดการหดตัวของเซรามิกหลังเผาในรูปของการหดตัวเชิงปริมาตร (Volume Shrinkage) โดยคำนวณหาจากปริมาตรของชิ้นงานก่อนและหลังการเผาซินเตอร์โดยอาศัยสมการที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = \pi r^2 \times d \quad (3.5)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของเม็ดเซรามิก (cm^3)

r คือ รัศมีของเม็ดเซรามิก (cm)

d คือ ความหนาของเม็ดเซรามิก (cm)

แล้วจึงนำปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ (V_2) มาเปรียบเทียบกับปริมาตรก่อนการเผาซินเตอร์ (V_1) เพื่อคำนวณหาร้อยละการหดตัวของเซรามิก โดยอาศัยสมการที่ 3.6

$$s = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ s คือ ร้อยละการหดตัวของเซรามิก

V_1, V_2 คือ ปริมาตรก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ ตามลำดับ

3.7 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

3.7.1 ตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และการสูญเสียไดอิเล็กทริก

ทำการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิกที่เตรียมได้เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความถี่ โดยนำเซรามิกที่ต้องการทดสอบมาทำการขัดให้เรียบและขนานกันทั้งสองหน้าโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 600 1000 และ 1200 ตามลำดับ เซรามิกที่ได้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคส์เป็นเวลา 10 นาที วัดความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลาง แล้วจึงนำมาทำขั้วไฟฟ้า (Electrode) โดยใช้กาวเงินชนิดเผาที่ผิวหน้าของเซรามิกทั้งสองด้านและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 20 นาที ด้วยอัตราการเพิ่ม/ลดอุณหภูมิ 5°C/min เพื่อให้กาวเงินแห้งและติดกับผิวเซรามิกได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LCR meter ที่ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 200°C ที่ความถี่ 1 10 และ 100 kHz แล้วนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกโดยอาศัยสมการที่ 3.7

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้จัดทำหนังสือให้คำปรึกษาขอสงวนสิทธิ์และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของสารตัวอย่าง

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง

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

A คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่าง

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของสารตัวอย่าง

3.7.2 ตรวจสอบวงฮิสเทอรีซิส

ตรวจสอบวงฮิสเทอรีซิส โดยการนำชิ้นสารตัวอย่างที่ทำขั้วไฟฟ้าแล้วมาวางระหว่างขั้วยึดจับ แล้วนำไปแช่ในน้ำมันซิลิโคนของชุดควบคุมความร้อน เปิดสวิตช์ High Voltage Amplifier และ โปรแกรมศึกษาวงฮิสเทอรีซิส RT-66 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ ใ้ข้อมูลความหนาและพื้นที่ผิวของชิ้นสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษา จำนวนเกรนทั้งหมดที่วัดได้ ขนาดเกรนเฉลี่ย ความยาวของเส้นที่พาดผ่านเกรน กำหนดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ 4000 กิโลโวลต์/มิลลิเมตร บันทึกข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและโพลาริเซชันที่ได้ลงแผ่นบันทึกข้อมูลแล้วนำไปวิเคราะห์และเขียนเป็นกราฟ

3.8 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเซรามิก

ทำการศึกษการพัฒนาการของเกรนและสัณฐานวิทยาของเซรามิกบริเวณรอยแตกหักภายในของเซรามิก เพื่อหาความสัมพันธ์กับพฤติกรรมทางไฟฟ้าของเซรามิกที่เตรียมได้ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope หรือ SEM) โดยการนำเซรามิกมาทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคส์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาอบเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเซรามิกไปเคลือบด้วยทองด้วยวิธีการเคลือบ (Sputtering) แล้วนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยายในช่วง 3,000 – 30,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะเสนอผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมเซรามิกในระบบ $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3-x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ เมื่อ M คือ Mg และ Ni ซึ่ง x มีค่าเท่ากับ 0.00 0.02 0.04 0.06 0.08 และ 0.10 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) นำผงที่ได้ไปทำการเตรียมเซรามิกด้วยเทคนิคการเผาซินเตอร์แบบทั่วไป และทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่ดีที่สุด ในการเตรียมเซรามิกให้ได้รับความหนาแน่นสูง หลังจากนั้นนำเซรามิกที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึก (Crystal structure) สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) วัดความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การหดตัว ล้วนฐานวิทยา ตรวจสอบพิกัดเอกลักษณะ การเปลี่ยนเฟส และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกที่เตรียมได้ พร้อมทั้งอภิปรายผลการทดลองที่ได้ตามลำดับต่อไปนี้

4.1 การหาเอกลักษณ์เฉพาะของเซรามิกในระบบ BCTS-BMZ

4.1.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก

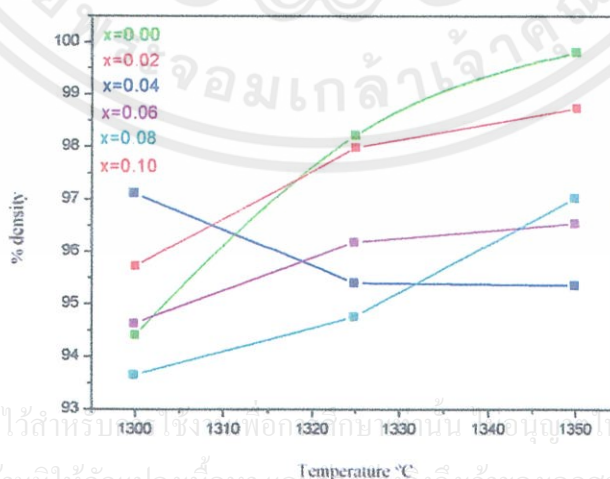
4.1.1.1 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของเซรามิก BCTS-BMZ

เมื่อนำเซรามิก BCTS-BMZ ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด คือเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300 1325 และ 1350 °C หลังจากการเตรียมเม็ดเซรามิกเรียบร้อยแล้ว นำเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการตรวจวัดความหนาแน่น (ρ) ด้วยหลักการแทนที่น้ำโดยการนำเม็ดเซรามิกไปต้มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นและนำมาชั่งน้ำหนัก จากนั้นคำนวณร้อยละความหนาแน่นตามสมการที่ 3.3 เพื่อหาเซรามิกที่มีความหนาแน่นสูงสุดมาตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ ต่อไป ร้อยละความหนาแน่นของเซรามิก BCTS-BMZ แสดงดังตารางที่ 4.1 จากผลการคำนวณที่ได้ พบว่าที่อุณหภูมิแตกต่างกันมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิ 1350 °C มีค่าร้อยละความหนาแน่นสูงสุด จะเห็นได้จากรูปที่ 4.1 จึงเลือกที่จะศึกษา เซรามิก BCTS-BMZ ที่อุณหภูมิ 1350 °C นอกจากนี้พบว่าแนวโน้มค่าความหนาแน่นของเซรามิกนั้นไม่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ BCTS-BMZ อาจเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ธรรมชาติของสารแต่ละชนิดและการสูญเสียองค์ประกอบของบิสมีทในเซรามิกระหว่างการเผา ซินเตอร์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าร้อยละความหนาแน่นของเซรามิก BCTS-BMZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ

สัดส่วนองค์ประกอบ	อุณหภูมิซินเตอร์(°C)	ร้อยละความหนาแน่นของเซรามิก
$x = 0.00$	1300	94.40
$x = 0.02$	1300	95.70
$x = 0.04$	1300	97.12
$x = 0.06$	1300	94.64
$x = 0.08$	1300	93.65
$x = 0.10$	1300	82.03
$x = 0.00$	1325	98.21
$x = 0.02$	1325	97.95
$x = 0.04$	1325	95.40
$x = 0.06$	1325	96.19
$x = 0.08$	1325	94.75
$x = 0.10$	1325	82.58
$x = 0.00$	1350	99.81
$x = 0.02$	1350	98.71
$x = 0.04$	1350	95.36
$x = 0.06$	1350	96.54
$x = 0.08$	1350	97.02
$x = 0.10$	1350	84.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรนำออกนอกระบบโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเซรามิกและอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์

4.1.1.2 ผลการตรวจสอบร้อยละการหดตัวของเซรามิก BCTS-BMZ

นำเซรามิก BCTS-BMZ ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด คือ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300 1325 และ 1350 °C มาตรวจสอบค่าร้อยละการหดตัวหลังการเผาซินเตอร์โดยการวัดปริมาตรของเซรามิกก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ โดยร้อยละการหดตัวนั้นแสดงในตารางที่ 4.2 จากการทดลองพบว่าแนวโน้มของค่าการหดตัวที่ได้ไม่น่าจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนองค์ประกอบของ BMZ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ธรรมชาติของสารแต่ละชนิดและการสูญเสียขององค์ประกอบของบิสมีท์ในเซรามิกระหว่างการเผาซินเตอร์ เป็นต้น

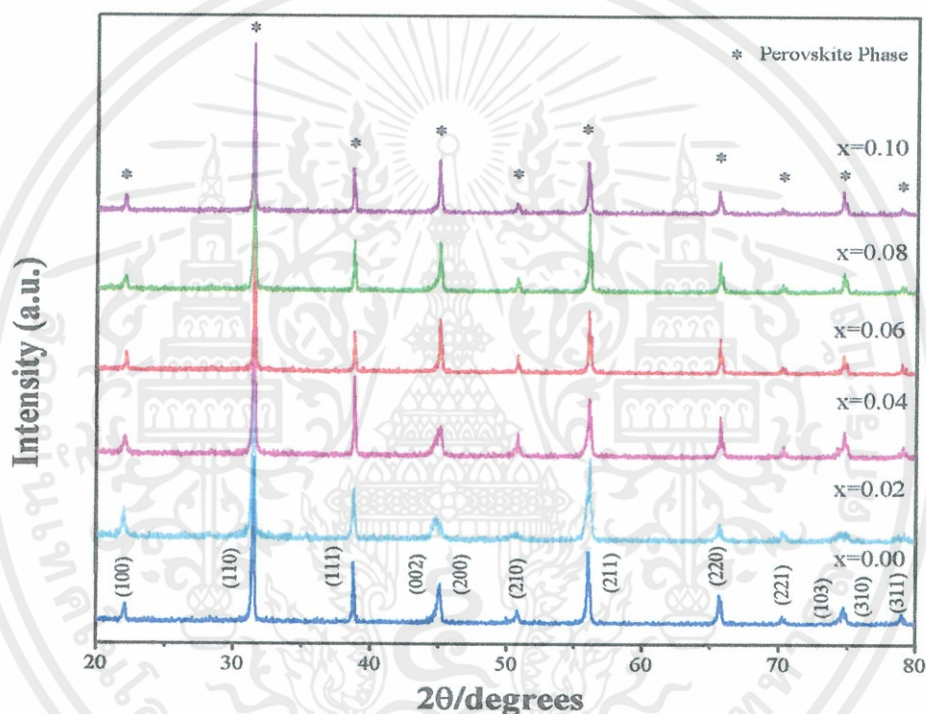
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิก BCTS-BMZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ

สัดส่วนองค์ประกอบ	อุณหภูมิซินเตอร์(°C)	ร้อยละการหดตัวของเซรามิก
$x = 0.00$	1300	35.05
$x = 0.02$	1300	24.64
$x = 0.04$	1300	36.99
$x = 0.06$	1300	34.86
$x = 0.08$	1300	40.31
$x = 0.10$	1300	36.84
$x = 0.00$	1325	40.05
$x = 0.02$	1325	40.07
$x = 0.04$	1325	44.75
$x = 0.06$	1325	44.75
$x = 0.08$	1325	47.46
$x = 0.10$	1325	40.44
$x = 0.00$	1350	44.90
$x = 0.02$	1350	35.13
$x = 0.04$	1350	33.89
$x = 0.06$	1350	35.76
$x = 0.08$	1350	34.64
$x = 0.10$	1350	31.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เมื่อทำการเผาแคลไซน์ผงในระบบ $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BMZ}$ เมื่อ $x = 0.00 - 0.10$ ตามเงื่อนไขที่กำหนด (เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นและลงอุณหภูมิ $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ และทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นและลงอุณหภูมิ $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) แล้วนำมาอัดเป็นเม็ดเซรามิก จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบเปลี่ยนไป แสดงดังรูปที่ 4.2

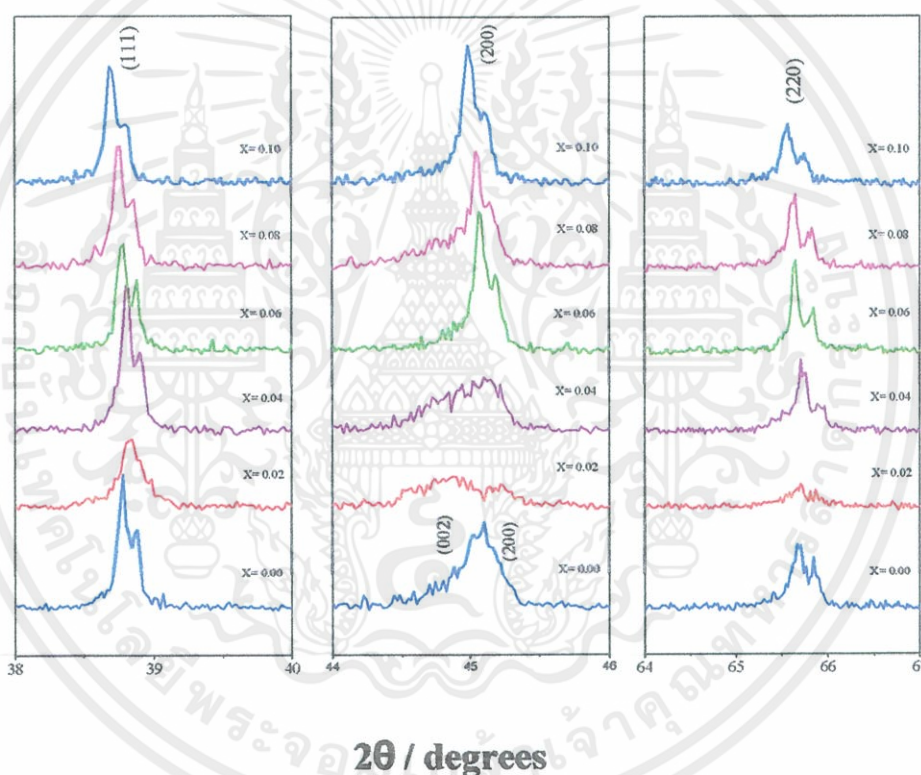


รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิก $(1-x)\text{BaCTS}-x\text{BMZ}$

จากรูปที่ 4.2 พบว่าสามารถเตรียมเฟสเพอร์อฟสไกต์ได้ทุกสัดส่วนเพราะว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของเซรามิก BCTS-BMZ ที่ได้นั้นมีลักษณะตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ แสดงโดยใช้สัญลักษณ์ “*” และไม่พบเฟสแปลกปลอมใดๆ

ในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เลย นอกจากนี้ยังพบอีกว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ $0.00 \leq x \leq 0.04$ นั้นมีระบบผลึกเป็นเตตระโกนอล เนื่องจากมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ สอดคล้องกับไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ซึ่งทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BaTiO_3 จากแฟ้มข้อมูล JCPDS เลขที่ 79-2264 ซึ่งมีโครงสร้าง

เป็นเตตระโกนอลที่อุณหภูมิห้อง มีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ดังนี้ $a = 3.999 \text{ \AA}$ และ $c = 4.018 \text{ \AA}$ แต่เมื่อปริมาณของ BMZ เพิ่มสูงขึ้นเป็น $x = 0.06 - 0.10$ รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้เห็นความแตกต่างเด่นชัดขึ้น ได้ทำการขยายพิกในช่วง 2θ เท่ากับ 38-40 44-46 และ 64-67 แสดงดังรูปที่ 4.3 เมื่อเราพิจารณาพิกที่ระนาบ (111) (200) และ (220) ทำให้ทราบว่าเซรามิก BCTS-BMZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00 - 0.04$ มีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอล เพราะว่าพิกที่ระนาบ (200) นั้นยอดพิกมีการแยกออก แต่เมื่อปริมาณ BMZ เพิ่มสูงขึ้นเป็น $x = 0.06 - 0.10$ พิกที่ระนาบ (200) นั้นเป็นพิกเดี่ยว ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในช่วงระนาบ (111) (200) และ (220)

ของเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BMZ}$

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในช่วงระนาบดังแสดง พบว่าของกลุ่ม (200) สำหรับเซรามิก BCTS-BMZ จะเห็นว่าเมื่อปริมาณของ BMZ เพิ่มขึ้นที่ $x = 0.06$ พิกจะเริ่มรวมกันเป็นพิกเดี่ยว คือ 2θ เท่ากับ 45.309 (ระนาบ 200) และ 2θ เท่ากับ 45.092

(ระนาบ 002) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหน่วยเซลล์จะเริ่มเปลี่ยนจากเตตระโกนอลไปเป็นคิวบิกมากขึ้นเมื่อปริมาณของ BMZ เพิ่มขึ้น

ในระบบ BCTS-BMZ นั้นจะมีไอออน Ba^{2+} ($r = 1.610 \text{ \AA}$) Ca^{2+} ($r = 1.340 \text{ \AA}$) และ Bi^{3+} ($r = 1.40$) อยู่ในตำแหน่ง A (A-site) และไอออน Ti^{4+} Sn^{4+} Mg^{2+} Zr^{4+} นั้นจะอยู่ที่ตำแหน่ง B (B-site) ของโครงสร้างผลึกเพอโรฟสไกต์ เมื่อรัศมีไอออนของ Ti^{4+} Sn^{4+} Mg^{2+} Zr^{4+} คือ $x = 0.605 \text{ \AA}$ 0.690 \AA 0.720 \AA และ 0.720 \AA ตามลำดับ โดยทั่วไปแลตทิซพารามิเตอร์ของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์นั้นจะลดลงเมื่อ x เพิ่มขึ้น เนื่องจากไอออนของ $(Ti_{0.96}Sn_{0.04})^{4+}$ ที่มีขนาดเล็กกว่า ($r = 0.6475 \text{ \AA}$) ไอออนของ $(Mg_{0.5}Zr_{0.5})^{3+}$ ($r = 0.720 \text{ \AA}$) ทำให้หน่วยเซลล์มีขนาดเล็กลงซึ่งเป็นไปตามกฎ Vegard [23]

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแลตทิซพารามิเตอร์กับค่ามุม 2θ ในสมการที่ 4.2 สามารถหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของสารประกอบเพอโรฟสไกต์ในระบบ $(1-x)BCTS-xBMZ$ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{a^2}{h^2} + \frac{b^2}{k^2} + \frac{c^2}{l^2} \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.3 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของเซรามิก BCTS-BMZ

x	a	b	c	c/a	ระบบ
0.00	4.014445 ± 0.012199	-	4.016397 ± 0.00185	1.000486	เตตระโกนอล
0.02	4.013057 ± 0.01088	-	4.020217 ± 0.040062	1.001784	เตตระโกนอล
0.04	4.004953 ± 0.034008	-	-	-	คิวบิก
0.06	4.019129 ± 0.001902	-	-	-	คิวบิก
0.08	4.021777 ± 0.002349	-	-	-	คิวบิก
0.10	4.02678 ± 0.00241	-	-	-	คิวบิก

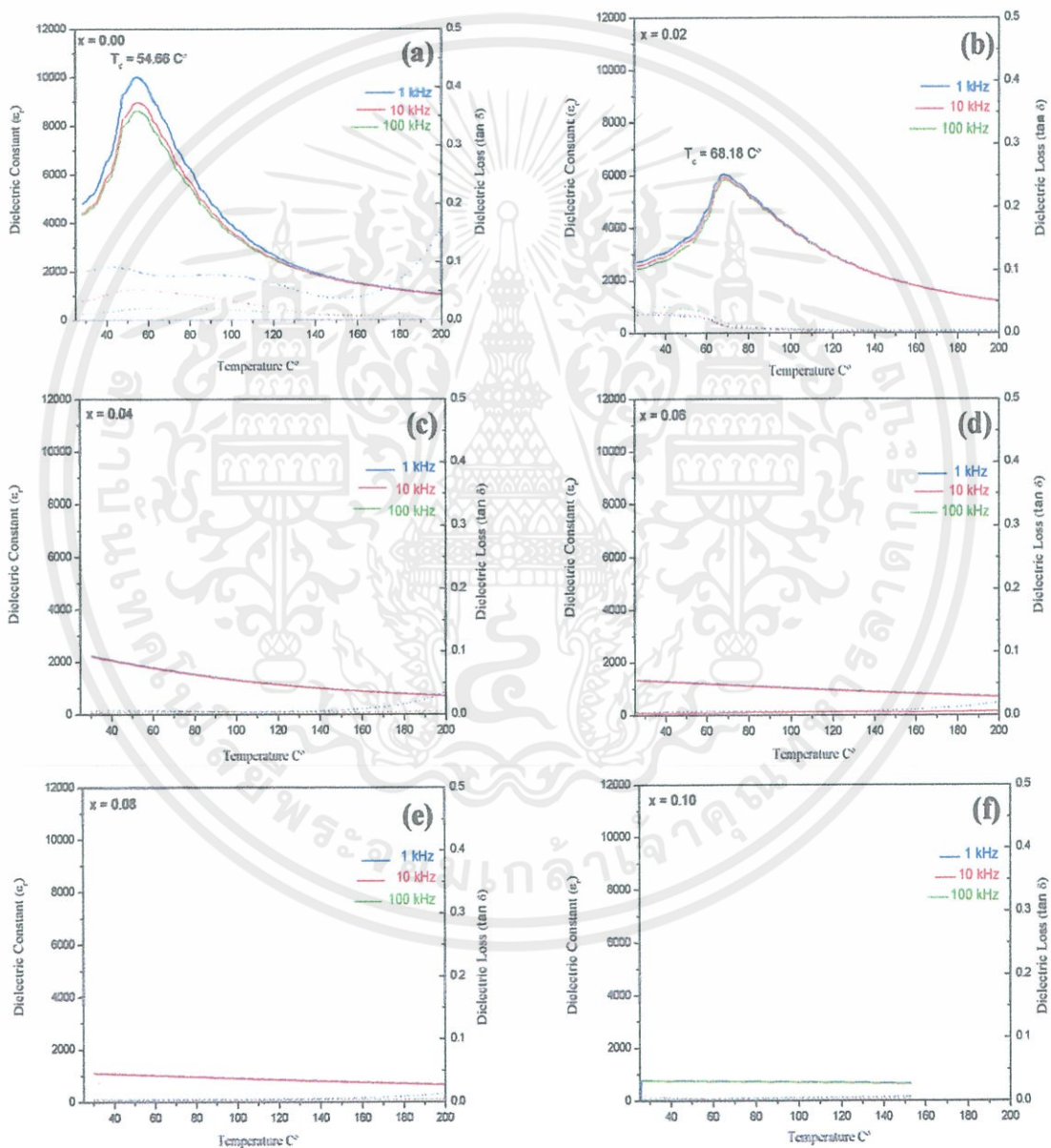
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก BCTS-BMZ

4.1.3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกและการเปลี่ยนเฟส (Dielectric properties and phase transition)

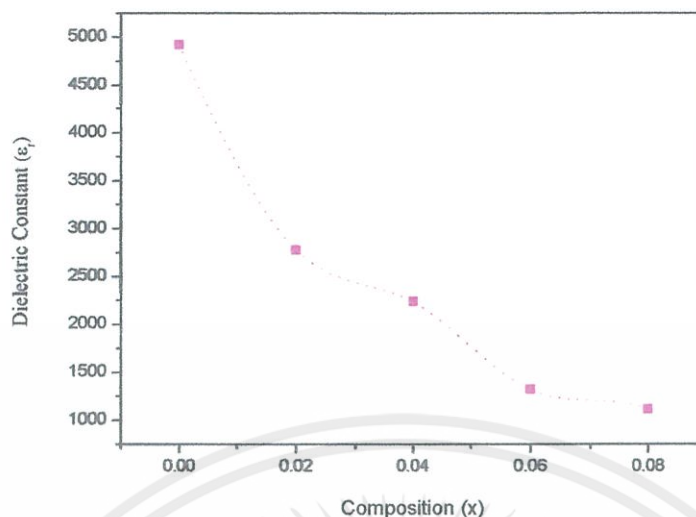
เมื่อเตรียมเซรามิก BCTS-BMZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ได้แล้ว นำมาตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant (ϵ_r)) ที่อุณหภูมิห้องของเซรามิก BCTS-BMZ นั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของ BMZ สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.5 จากนั้นทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องจนถึง 200 °C ที่ความถี่ 1, 10 และ 100 kHz ได้ผลดังรูปที่ 4.4 จากรูปเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss หรือ $\tan\delta$) ที่ความถี่ต่างๆ กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป จากผลการตรวจสอบนี้บอกถึงค่าอุณหภูมิและความถี่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BCTS-BMZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00$ ที่อุณหภูมิห้องมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเข้าใกล้ 5,000 และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะเกิดเป็นพีคของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ซึ่งที่ยอดพีคนี้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเข้าใกล้ 10,000 ที่อุณหภูมิประมาณ 55 °C โดยเกิดการเปลี่ยนเฟสจากเตตระโกนอลไปเป็นคิวบิก แสดงดังรูปที่ 4.4 (a) ซึ่งสมบัติไดอิเล็กทริกที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00$ นั่นคือ BCTS นั้นจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความถี่ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะลดลง นอกจากนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกยังขึ้นกับความถี่ จากกราฟจะเห็นว่ายิ่งความถี่เพิ่มสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลง จากรูปที่ 4.4 (a) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้น ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 160 °C และที่ความถี่ต่างกันค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าต่างกัน เมื่อความถี่สูงขึ้นค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าน้อยลง และเมื่อมีการเจือ BMZ ลงไปในสัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.02$ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แต่จะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามความถี่ จากรูปที่ 4.4 (b) จะเห็นว่าที่อุณหภูมิห้องมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเข้าใกล้ 2,700 จากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าเข้าใกล้ 6,000 ที่อุณหภูมิประมาณ 68 °C และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจาก 68 °C ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลง ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 70 °C ที่ความถี่ต่างกันค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าไม่ต่างกันมากนัก หลังจากนั้นเมื่อมีไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การเจือ BMZ ลงไปในสัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.04 - 0.10$ พบว่าไม่เกิดพีคของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก แสดงให้เห็นว่าเซรามิก BCTS-BMZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.04 - 0.10$ นั้นมีลักษณะ

ของ โครงสร้างแบบคิวบิก ซึ่งมีความเสถียรมาก เนื่องจากไม่มีอุณหภูมิคูรีเกิดขึ้น นั่นคือ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้าง และที่สัดส่วนองค์ประกอบของ BMZ ที่ $x = 0.04 - 0.10$ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะขึ้นกับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย แต่ไม่ขึ้นกับความถี่ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.4 (c) – (f) จะเห็นว่าที่ความถี่ต่างๆ กัน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแทบไม่ต่างกัน ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าน้อยมาก และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นการคำ
 รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสีย ไดอิเล็กทริก
 ไม่ว่าจะถี่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับอุณหภูมิของสัดส่วนต่างๆของเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BMZ}$

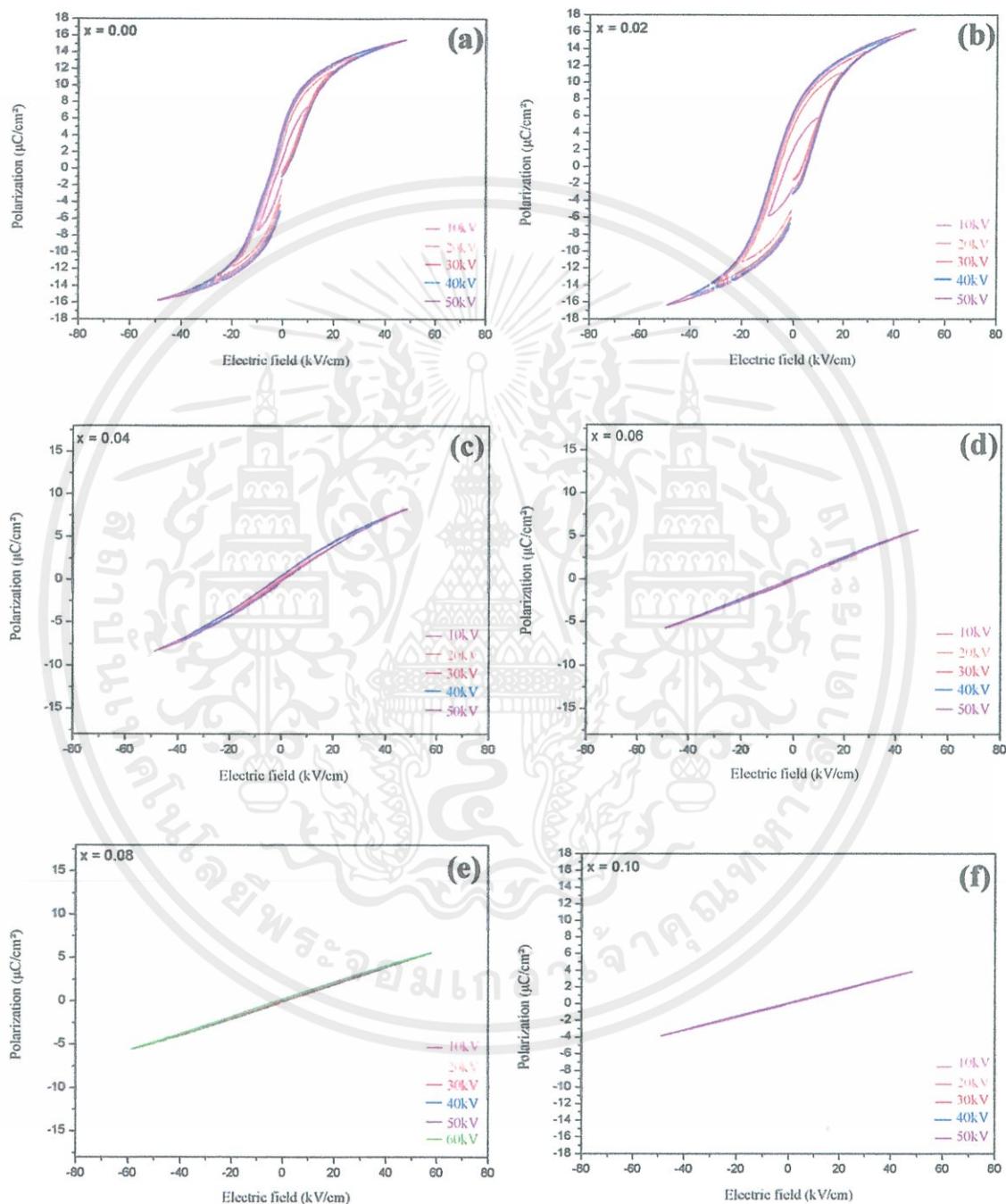


รูปที่ 4.5 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเซรามิก BCTS-BMZ ที่อุณหภูมิห้อง

4.1.3.2 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริก

เมื่อนำเซรามิก BCTS-BMZ ในสัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00-0.10$ มาตรวจสอบทางเฟอร์โรอิเล็กตริก โดยการวัดวงวนฮิสเทอรีซิส ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริกของเซรามิก โดยตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ ได้รับและค่าโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งผลของศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อค่าโพลาไรเซชันนั้นแสดงในลักษณะของวงวนเรียกว่าวงวนฮิสเทอรีซิส จากรูปที่ 4.6 พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00-0.04$ เกิดเป็นวงวนฮิสเทอรีซิสขึ้น ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรงแสดงดังรูปที่ 4.6 (a) – (c) เมื่อให้สนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นค่าโพลาไรเซชันก็จะสูงขึ้น แต่อัตราการเพิ่มของค่าโพลาไรเซชันจะมีค่าลดลง เมื่อสารเริ่มอิ่มตัว ที่สัดส่วน $x = 0.00$ มีค่าโพลาไรเซชันสูงสุด (P_s) เท่ากับ $15.6 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และเมื่อเราลดสนามไฟฟ้า อัตราการลดลงของโพลาไรเซชันจะต่างไปจากเดิมจนเมื่อค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับศูนย์และพบว่าเซรามิก BCTS-BMZ มีค่าโพลาไรเซชันที่หลงเหลือ (P_r) เท่ากับ $5.32 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และเมื่อให้สนามไฟฟ้ามีทิศตรงข้ามจะพบว่าค่าโพลาไรเซชันจะค่อยๆลดลงจนกระทั่งเท่ากับศูนย์ จะมีค่าสนามลบค้างโพลาไรเซชัน (E_c) เท่ากับ $2.9 \text{ kV}/\text{cm}$ และเมื่อเพิ่มปริมาณของ BMZ เป็น $x = 0.02$ ค่าโพลาไรเซชันสูงสุด (P_s) จะมีค่ามากขึ้นเป็น $16.34 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ มีค่าโพลาไรเซชันที่หลงเหลือ (P_r) เท่ากับ $6.85 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และค่าสนามลบค้างโพลาไรเซชัน (E_c) เท่ากับ $6.5 \text{ kV}/\text{cm}$ และที่สัดส่วนองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเป็น $x = 0.04$ ค่าโพลาไรเซชันสูงสุด (P_s) จะมีค่าลดลงเท่ากับ $8.33 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ มี

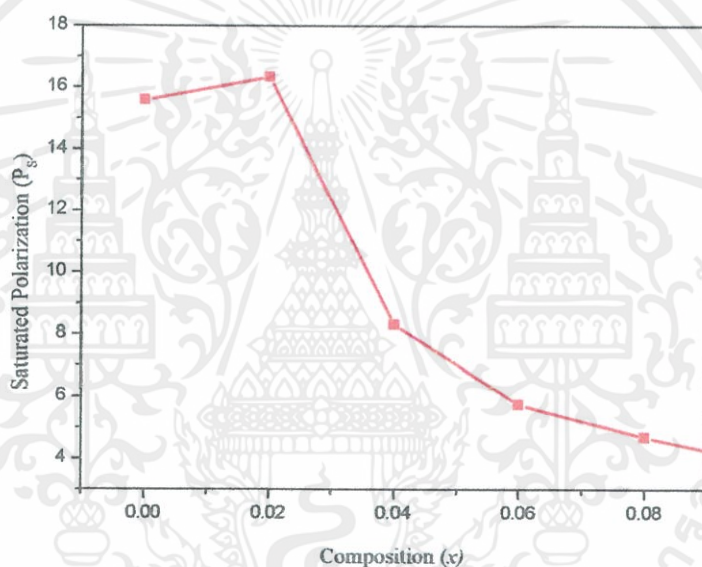
ค่าโพลาริเซชันที่หลงเหลือ (P_r) เท่ากับ $0.59 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และค่าสนามลบค้างโพลาริเซชัน (E_c) เท่ากับ $1.2 \text{ kV}/\text{cm}$ จากนั้นเมื่อปริมาณสัดส่วนองค์ประกอบของ BMZ เพิ่มขึ้นเป็น $x = 0.06 - 0.10$ จะพบว่าลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสเป็นแบบเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.6 (d) - (f)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานไฟฟ้า โยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สัดส่วนต่างๆ ของเซรามิก BCTS-BMZ ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

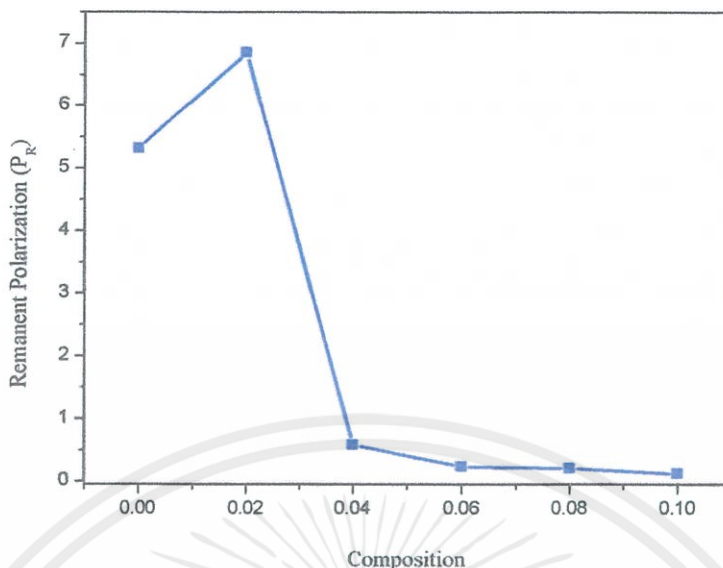
จากผลการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้นี้สามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงที่พบในพีคของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกได้ ซึ่งทำให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงพีคของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนั้นเป็นการเปลี่ยนเฟสจากเตตระโกนอลไปเป็นควิบิกเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี เนื่องจากลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสที่วัดที่อุณหภูมิห้องที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00-0.02$ นั้นมีลักษณะแบบวงวนเดี่ยว ซึ่งแสดงว่ามีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริกแบบปกติ สำหรับสัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.04 - 0.10$ นั้นที่อุณหภูมิห้องมีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งสอดคล้องกับผลทางไดอิเล็กตริกที่พีคของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนั้น จะหายไปสู่อุณหภูมิห้อง เมื่อปริมาณของ BMZ เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันสูงสุดกับสัดส่วนของเซรามิก

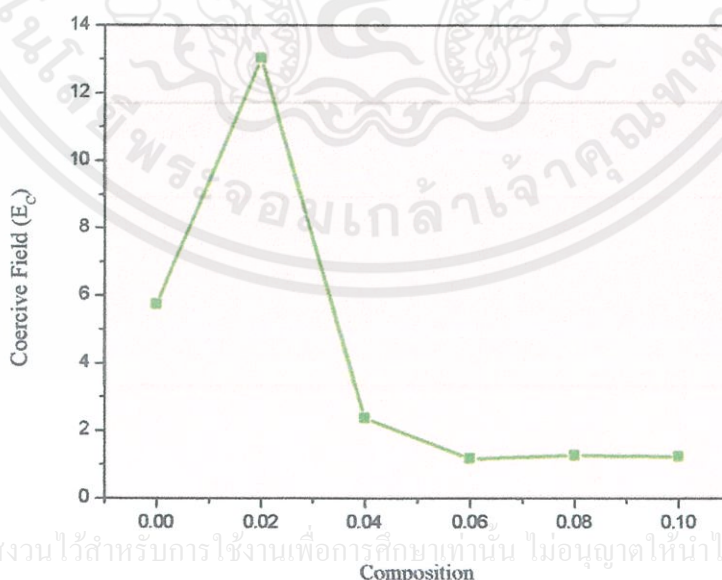
(1-x) BCTS-xBMZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันสูงสุดกับสัดส่วนของบิสมัทแมกนีเซียมเซอร์โคเนต จากกราฟพบว่าเมื่อสัดส่วนของบิสมัทแมกนีเซียมเซอร์โคเนตเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าโพลาริเซชันสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งในช่วง $0 \leq x \leq 0.02$ ค่าโพลาริเซชันสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงที่สัดส่วน $x = 0.04$ ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงเฟสจากเตตระโกนอลเป็นควิบิก



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันคงค้างกับสัดส่วนของเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BMZ}$

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันคงค้างกับสัดส่วนของบิสมีทแมกนีเซียมเซอร์โคเนต จากกราฟพบว่าเมื่อสัดส่วนของบิสมีทแมกนีเซียมเซอร์โคเนตเพิ่มขึ้นทำให้ค่าโพลาไรเซชันคงค้างมีแนวโน้มลดลง ซึ่งช่วงสัดส่วนองค์ประกอบของสารเป็น $0 \leq x \leq 0.02$ จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าโพลาไรเซชันคงค้างเป็นไปในแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งอย่างสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามลบล้างโพลาไรเซชันกับสัดส่วนของเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BMZ}$

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามลบล้างโพลาไรเซชันกับสัดส่วนของ บิสมัทแมกนีเซียมเซอร์โคเนต จากกราฟพบว่าในช่วง $0 \leq x \leq 0.02$ ค่าสนามลบล้างโพลาไรเซชัน จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อสัดส่วนของบิสมัทแมกนีเซียมเซอร์โคเนตเพิ่มขึ้นเป็น $x = 0.04 - 0.10$ ทำให้ ค่าสนามลบล้างโพลาไรเซชันมีแนวโน้มลดลง

4.1.4 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของเซรามิก

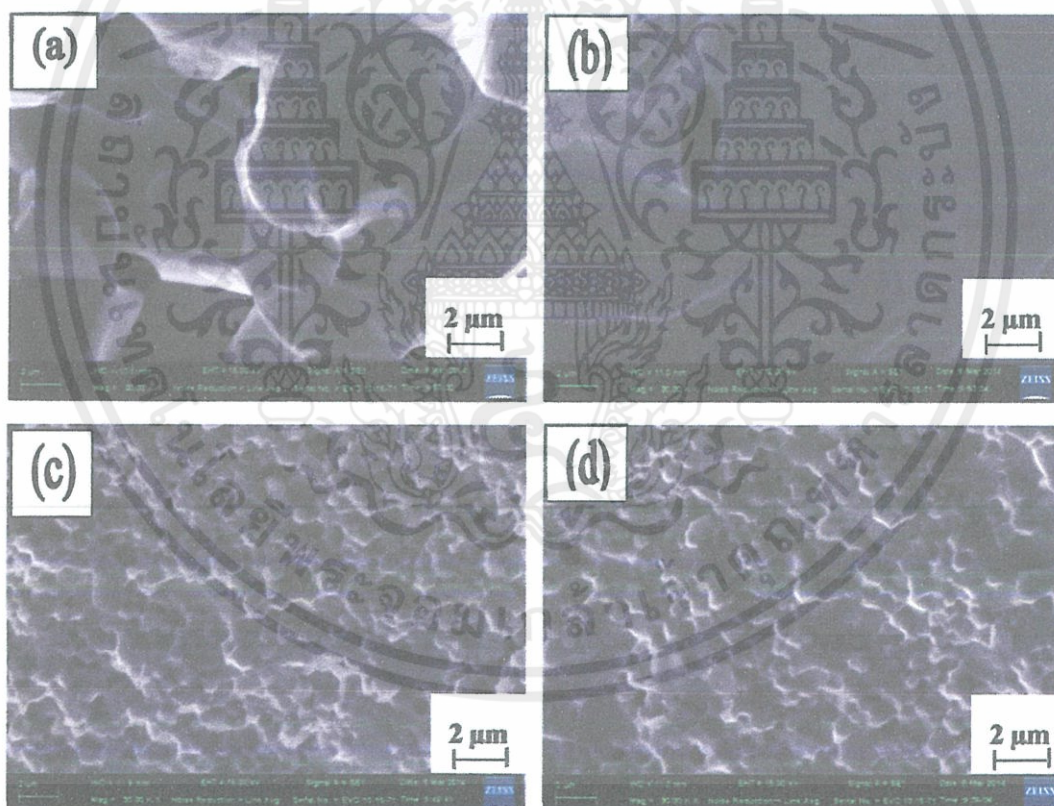
นำเซรามิก BCTS-BMZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ มาตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นภาพบริเวณรอยหัก ของเซรามิก BCTS-BMZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ จากรูปพบว่าไม่มีเกรนที่เป็นเฟสไฟโร- คลอร์ในทุกสัดส่วนองค์ประกอบ เนื่องจากเกรนของเฟสไฟโรคลอร์นั้นจะมีลักษณะที่ต่างออกไป โดยจะมีลักษณะเป็นรูปพีระมิด หรือเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม และจากภาพถ่ายที่ได้นี้ไม่พบเกรนที่มี รูปร่างดังกล่าว ดังนั้นแสดงว่าไม่มีเฟสไฟโรคลอร์เกิดขึ้นในสารประกอบ BCTS-BMZ ที่เตรียมได้ ในทุกสัดส่วนองค์ประกอบ และการหักส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรนแสดงให้เห็นว่าที่ บริเวณขอบเกรนนั้นมีความแข็งแรงน้อยกว่าเกรน ทำให้เมื่อมีการแตกหรือหักของเซรามิก BCTS- BMZ จึงเกิดการแตกหักที่บริเวณขอบเกรนเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อพิจารณาขนาดเกรนของเซรามิก BCTS-BMZ ในทุกสัดส่วนองค์ประกอบพบว่าขนาดเกรนจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ BMZ เพิ่มขึ้น แต่ที่สัดส่วนองค์ประกอบที่ $x = 0.02$ ไม่สามารถหาขนาดเกรนได้เนื่องจากเกิดการ แตกหักแบบผ่าเกรน

จากรูป 4.10 (a) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายบริเวณรอยแตกหักตามขอบเกรน (Intergranular) ที่กำลังขยาย 30 k ของเม็ดเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BMZ}$ ของสัดส่วน $x = 0.00$ ที่ผ่าน การซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350°C พบว่า เกรนมีขนาดใหญ่ มีการเรียงตัวชิดติดกัน ขนาดของเกรน เฉลี่ย 4.63 ± 0.80 ไมโครเมตร มีปริมาณและขนาดของรูพรุนเล็กน้อย

จากรูป 4.10 (b) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายบริเวณรอยแตกหักผ่าเกรน (Intragranular) ที่กำลังขยาย 30 k ของเม็ดเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BMZ}$ ของสัดส่วน $x = 0.02$ ที่ผ่าน การซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350°C พบว่าไม่สามารถหาขนาดเกรนได้เนื่องจากเกิดการแตกผ่าเกรนเลย ไม่เกิดเป็นเกรนได้ ซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็กในปริมาณน้อย

จากรูป 4.10 (c) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายบริเวณรอยแตกหักตามขอบเกรน (Intergranular) ที่กำลังขยาย 30 k ของเม็ดเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BMZ}$ ของสัดส่วน $x = 0.06$ ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350°C พบว่า ลักษณะของเกรนมีการเรียงตัวชิดติดกัน เกรนมีขนาดเล็กมีขนาดสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน ขนาดของเกรนเฉลี่ย 0.19 ± 0.03 ไมโครเมตร ลักษณะของเกรนมีลักษณะเหมือนกัน และพบรูพรุนเกิดขึ้นในโครงสร้างขนาดเล็กในปริมาณน้อย

จากรูป 4.10 (d) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายบริเวณรอยแตกหักตามขอบเกรน (Intergranular) ที่กำลังขยาย 30 k ของเม็ดเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BMZ}$ ของสัดส่วน $x = 0.10$ ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350°C พบว่า ลักษณะของเกรนมีการเรียงตัวชิดติดกัน ขนาดของเกรนเฉลี่ย 0.27 ± 0.05 ไมโครเมตร และพบรูพรุนเกิดขึ้นในโครงสร้างขนาดเล็กในปริมาณน้อย



รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BMZ}$ (a) $x = 0.00$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก (b) $x = 0.02$ (c) $x = 0.06$ (d) $x = 0.10$ เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ BCTS-BNZ

4.2.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก

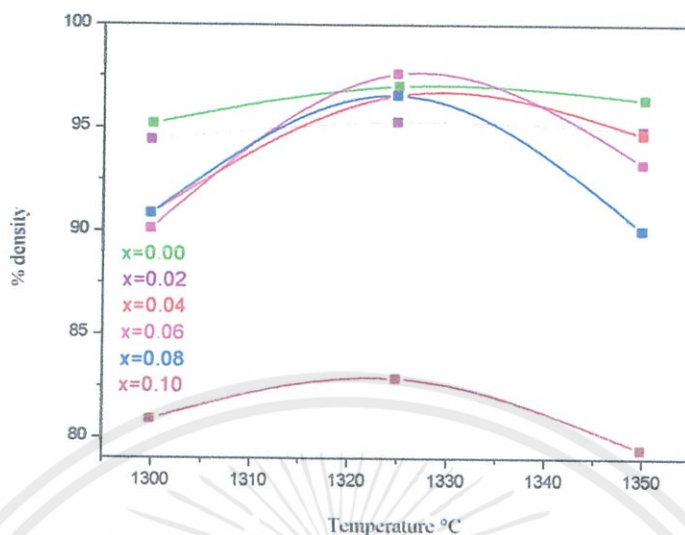
4.2.1.1 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของเซรามิก BCTS-BNZ

หลังจากการเตรียมเม็ดเซรามิกเรียบร้อยแล้ว นำเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการตรวจวัดความหนาแน่น (ρ) ด้วยหลักการแทนที่น้ำ จากนั้นคำนวณร้อยละความหนาแน่นตามสมการที่ 3.3 เพื่อหาเซรามิกที่มีความหนาแน่นสูงสุดมาตรวจสอบสมบัติอื่นๆ ต่อไป ร้อยละความหนาแน่นของเซรามิก BCTS-BNZ แสดงดังตารางที่ 4.5 จากผลการคำนวณที่ได้ พบว่าที่อุณหภูมิ 1325 °C มีค่าร้อยละความหนาแน่นสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จึงเลือกที่จะศึกษาเซรามิก BCTS-BNZ ที่อุณหภูมิ 1325 °C

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก BCTS-BNZ

สัดส่วนองค์ประกอบ(x)	อุณหภูมิซินเตอร์(C°)	ร้อยละความหนาแน่น(g/cm ³)
0.00	1300	95.19
0.02	1300	94.41
0.04	1300	90.86
0.06	1300	90.11
0.08	1300	90.83
0.10	1300	80.92
0.00	1325	97.00
0.02	1325	95.28
0.04	1325	96.57
0.06	1325	97.60
0.08	1325	96.55
0.10	1325	82.88
0.00	1350	96.36
0.02	1350	94.85
0.04	1350	94.66
0.06	1350	93.25
0.08	1350	90.03
0.10	1350	79.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเซรามิกและอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์

4.2.1.2 ผลการตรวจสอบร้อยละการหดตัวของเซรามิก BCTS-BNZ

นำเซรามิก BCTS-BNZ ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด คือ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300 1325 และ 1350 °C มาตรวจสอบค่าร้อยละการหดตัวหลังการเผาซินเตอร์โดยการวัดปริมาตรของเซรามิกก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ โดยร้อยละการหดตัวนั้นแสดงในตารางที่ 4.6 จากการทดลองพบว่าแนวโน้มของค่าการหดตัวที่ได้นั้นไม่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนองค์ประกอบของ BNZ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ธรรมชาติของสารแต่ละชนิด และการสูญเสียขององค์ประกอบของบิสมีทในเซรามิกระหว่างการเผาซินเตอร์ เป็นต้น

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิก BCTS-BNZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ

สัดส่วนองค์ประกอบ	อุณหภูมิซินเตอร์(°C)	ร้อยละการหดตัวของเซรามิก
$x = 0.00$	1300	34.92
$x = 0.02$	1300	39.62
$x = 0.04$	1300	37.62
$x = 0.06$	1300	39.96
$x = 0.08$	1300	41.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

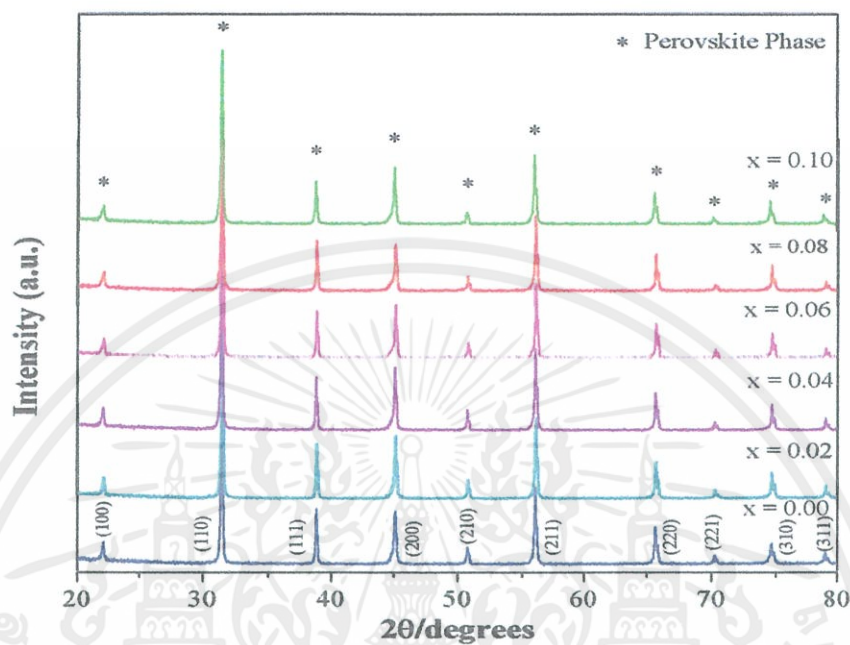
$x = 0.10$	1300	36.01
$x = 0.00$	1325	41.61
$x = 0.02$	1325	42.42
$x = 0.04$	1325	39.97
$x = 0.06$	1325	40.52
$x = 0.08$	1325	34.05
$x = 0.10$	1325	34.01
$x = 0.00$	1350	37.14
$x = 0.02$	1350	39.16
$x = 0.04$	1350	45.08
$x = 0.06$	1350	32.59
$x = 0.08$	1350	33.28
$x = 0.10$	1350	25.88

4.2.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

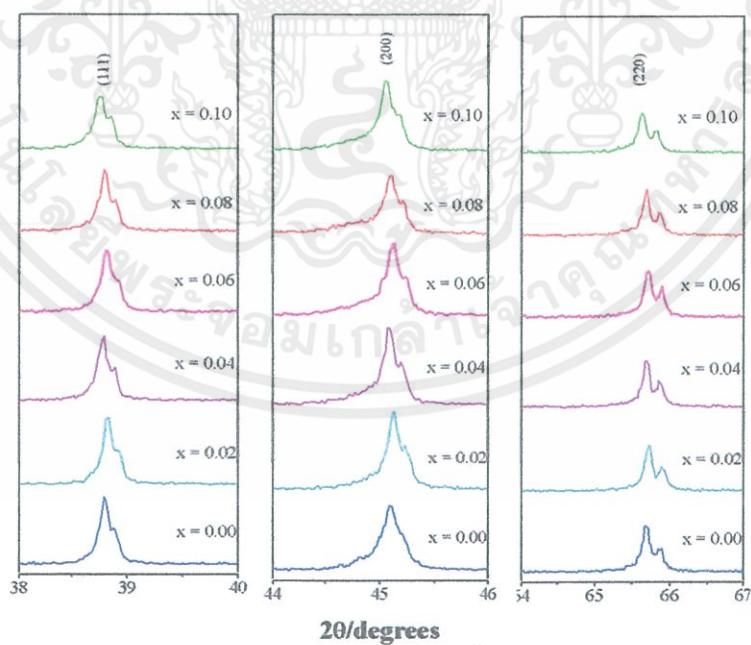
เมื่อทำการเผาเคลือบในระบอบ $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BNZ}$ เมื่อ $x = 0.00 - 0.10$ ตามเงื่อนไขที่กำหนด (เผาเคลือบที่อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นและลงอุณหภูมิ $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ และทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นและลงอุณหภูมิ $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) แล้วนำมาอัดเป็นเม็ดเซรามิก จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึก และชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบเปลี่ยนไป แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าสามารถเตรียมเฟสเพอร์อฟสไกต์ได้ทุกสัดส่วนเพราะว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของเซรามิก BCTS-BNZ ที่ได้นั้นมีลักษณะตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ แสดงโดยใช้สัญลักษณ์ “ * ” และไม่พบเฟสแปลกปลอมใดๆ ในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เลย เพื่อให้เห็นความแตกต่างเด่นชัดขึ้น ได้ทำการขยายพิกในช่วง 2θ เท่ากับ 38-40 44-46 และ 64-67 แสดงดังรูปที่ 4.13 ซึ่ง รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสี

เอกซ์ของ BaTiO_3 จากเพิ่มข้อมูล JCPDS เลขที่ 89-2475 ซึ่งมีโครงสร้างเป็นลูกบาศก์มีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ดังนี้ $a = 4.017\text{ \AA}$ เมื่อเราพิจารณาพิกที่ระนาบ (111) (200) และ (220) ทำให้ทราบว่า

เซรามิก BCTS-BNZ มีโครงสร้างแบบคิวบิกที่ทุกสัดส่วนองค์ประกอบเนื่องจากไม่เกิดการแยกของเฟสที่ระนาบ (111) (200) และ (220) ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิก (1-x) BCTS-xBNZ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในช่วงระนาบ (111) (200) และ (220)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเซรามิก (1-x)BCTS-xBNZ

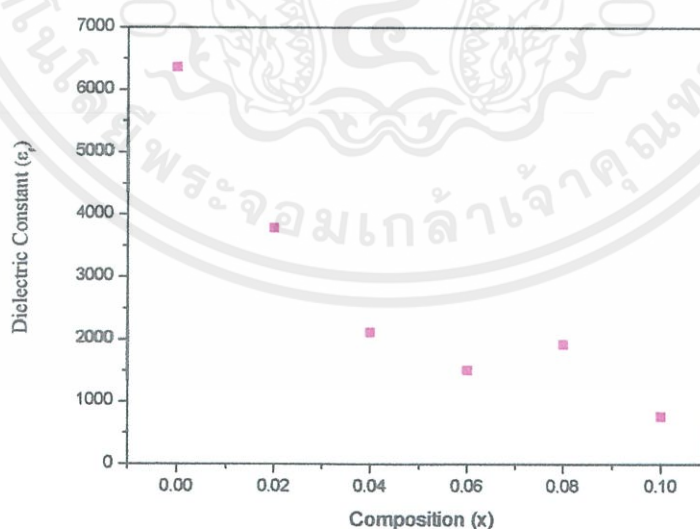
ตารางที่ 4.7 ค่าเลขทฤษฎีพารามิเตอร์ของเซรามิก BCTS-BNZ

X	a	b	c	c/a	ระบบ
0.00	4.014445 ± 0.012199	-	4.016397 ± 0.00185	1.000486	เตตระโกนอล
0.02	4.015011 ± 0.001019	-	-	-	คิวบิก
0.04	4.018086 ± 0.001413	-	-	-	คิวบิก
0.06	4.016008 ± 0.001999	-	-	-	คิวบิก
0.08	4.017256 ± 0.000531	-	-	-	คิวบิก
0.10	4.021051 ± 0.000652	-	-	-	คิวบิก

4.2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก BCTS-BNZ

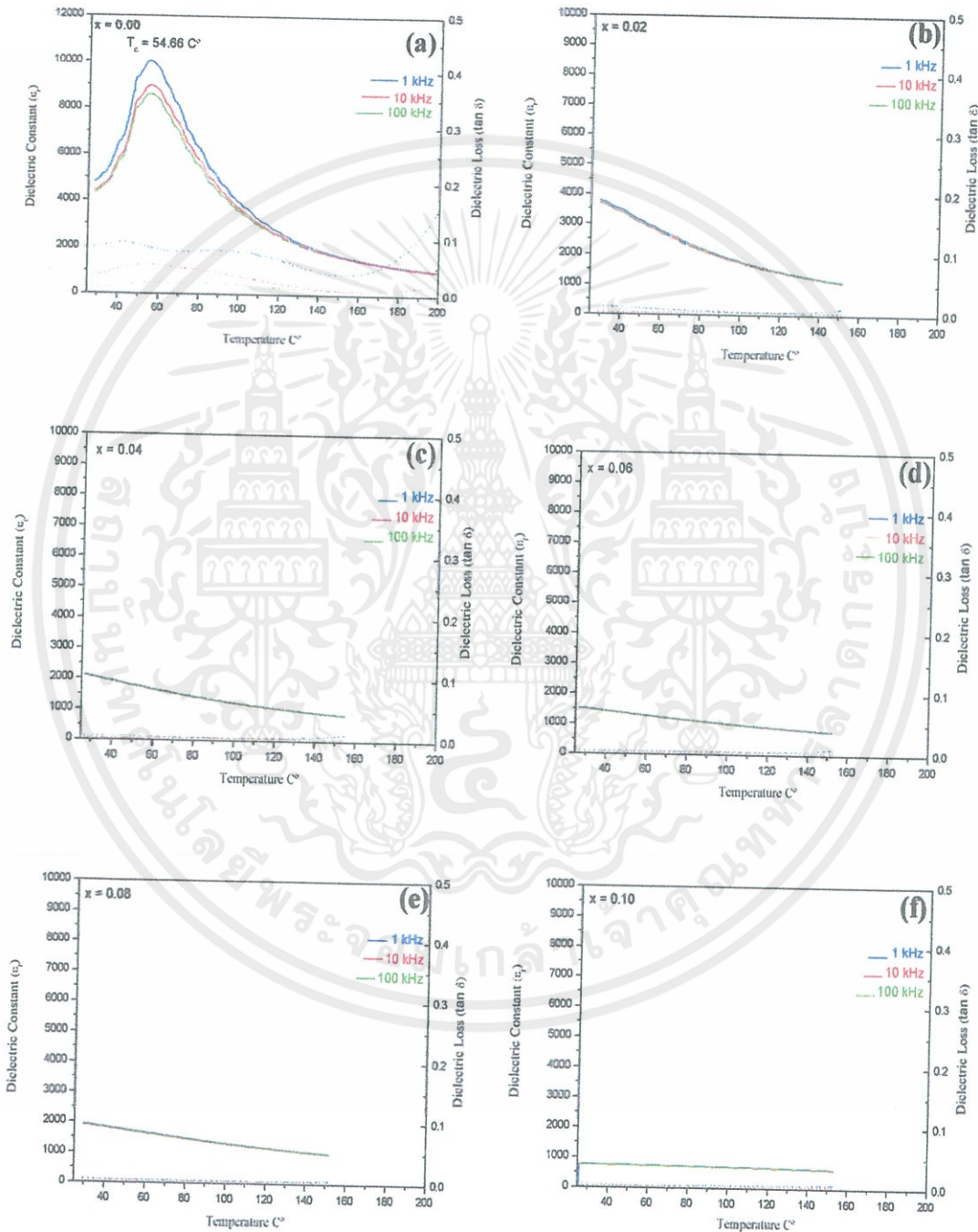
4.2.3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกและการเปลี่ยนเฟส (Dielectric propertie and phase transition)

เมื่อเตรียมเซรามิก BCTS-BNZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ได้แล้วนำมาตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant (ϵ_r)) ที่อุณหภูมิห้องของเซรามิก BCTS-BNZ นั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของ BNZ สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 4.14 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BCTS-BNZ ที่อุณหภูมิห้อง

จากนั้นทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องจนถึง 200 °C ที่ความถี่ 1 10 และ 100 kHz ได้ผลดังรูปที่ 4.15 จากรูปเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss หรือ $\tan \delta$) ที่ความถี่ต่างๆ กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก

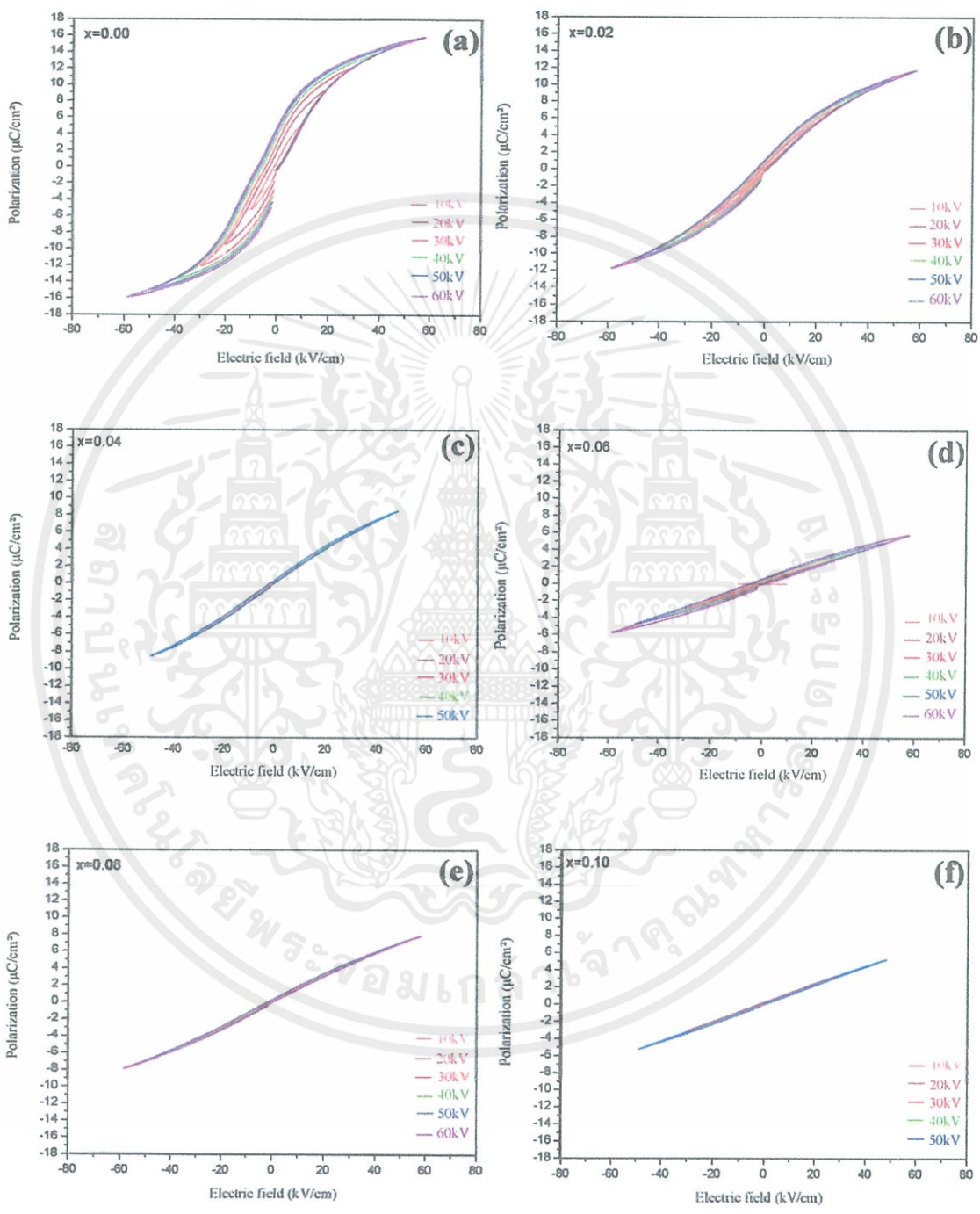
กับอุณหภูมิของสัดส่วนต่างๆของเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BNZ}$

จากผลการตรวจสอบนี้บอกถึงค่าอุณหภูมิและความถี่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BCTS-BNZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00$ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเข้าใกล้ 1,0000 ที่อุณหภูมิประมาณ 55 °C โดยเกิดการเปลี่ยนเฟสเตตระโกนอลไปเป็นคิวบิก แสดงดังรูปที่ 4.15 (a) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะลดลง นอกจากนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกยังขึ้นกับความถี่ จากกราฟจะเห็นว่ายิ่งความถี่เพิ่มสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลง ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 160 °C และที่ความถี่ต่างกันค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าต่างกัน เมื่อความถี่สูงขึ้นค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าน้อยลง และเมื่อมีการเจือ BNZ ลงไปในสัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.02$ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลงเป็น 3,800 และไม่พบอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส ดังนั้นที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.02$ นั้นโครงสร้างจะเป็นแบบคิวบิกโดยสมบูรณ์ ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าน้อยมากซึ่งไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและความถี่ และเมื่อมีการเจือ BNZ ลงไปในสัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.04 - 0.10$ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซรามิก BCTS-BNZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.04 - 0.10$ นั้นมีลักษณะของโครงสร้างแบบคิวบิกที่มีความเสถียรมาก นั่นคือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.15 (c) – (f) และจะเห็นว่าที่ความถี่ต่างๆกัน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแทบไม่ต่างกัน ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าน้อยมาก และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

4.2.3.2 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

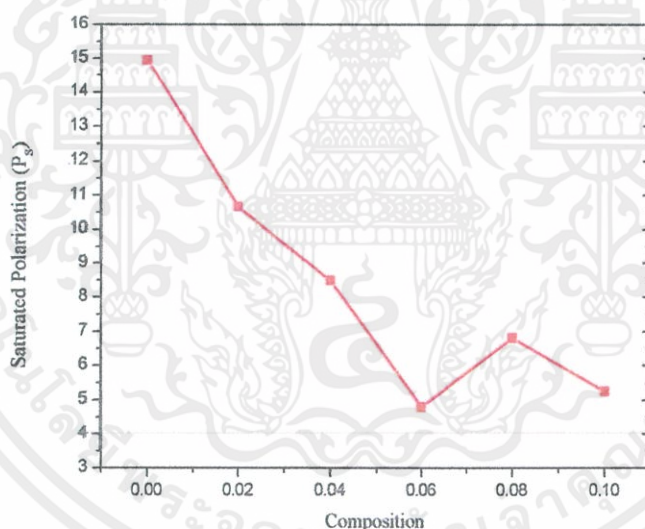
เมื่อนำเซรามิก BCTS-BNZ ในสัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00 - 0.10$ มาตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยการวัดวงวนฮิสเทอรีซิส ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก โดยตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ได้รับและค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้น ซึ่งผลของศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อค่าโพลาริเซชันนั้นแสดงในลักษณะของวงวนเรียกว่าวงวนฮิสเทอรีซิส ดังรูปที่ 4.16 พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00-0.06$ เกิดเป็นวงวนฮิสเทอรีซิสขึ้น ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรงแสดงดังรูปที่ 4.16 (a) – (e) พบว่าเมื่อให้สนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นค่าโพลาริเซชันก็จะสูงขึ้น อัตราการเพิ่มของค่าโพลาริเซชันลดลง เมื่อสารเริ่มอิ่มตัวที่สัดส่วน $x = 0.00$ มีค่าโพลาริเซชันสูงสุด(P_s) เท่ากับ 14.95 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ และเมื่อเราลดสนามไฟฟ้า อัตราการลดลงของโพลาริเซชันจะต่างไปจากเดิมจนเมื่อค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับศูนย์และพบว่าเซรามิก BCTS-BNZ มีค่าโพลาริเซชันที่หลงเหลือ(P_r) 4.19 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ และเมื่อให้สนามไฟฟ้ามีทิศทาง

ข้ามจะพบว่าค่าโพลาริเซชันจะค่อยๆลดลงจนกระทั่งเท่ากับศูนย์ จะมีค่าสนามลบด่าง โพลาริเซชัน (E_C) เท่ากับ 3.78 kV/cm ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (a)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ที่สัดส่วนต่างๆของเซรามิก (1-x)BCTS-xBNZ ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

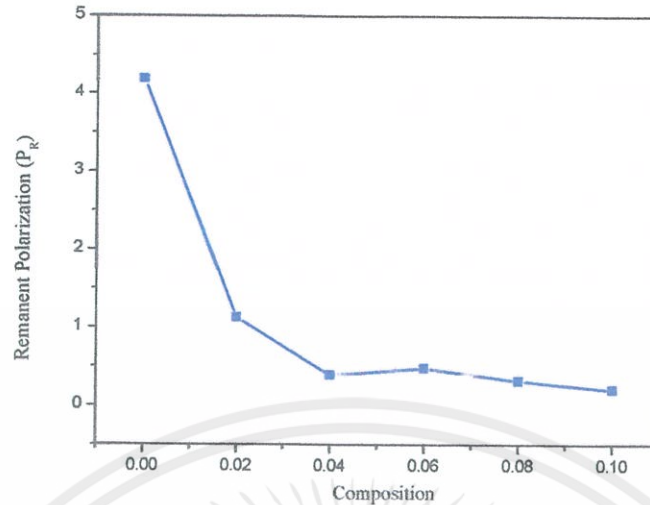
และเมื่อเพิ่มปริมาณของ BNZ เป็น $x = 0.02$ ค่าโพลาริเซชันสูงสุด (P_s) จะลดลงเป็น $10.66 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ มีค่าโพลาริเซชันที่หลงเหลือ (P_r) เท่ากับ $1.12 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และค่าสนามลบด้างโพลาริเซชัน (E_c) เท่ากับ $1.5 \text{ kV}/\text{cm}$ และที่สัดส่วนองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเป็น $x = 0.04$ ค่าโพลาริเซชันสูงสุด (P_s) จะมีค่าลดลงซึ่งมีค่าเท่ากับ $8.49 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ มีค่าโพลาริเซชันที่หลงเหลือ (P_r) เท่ากับ $0.39 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และค่าสนามลบด้างโพลาริเซชัน (E_c) เท่ากับ $0.6 \text{ kV}/\text{cm}$ เมื่อเพิ่มปริมาณของ BNZ เป็น $x = 0.06$ ค่าโพลาริเซชันสูงสุด (P_s) จะมีค่าลดลงซึ่งมีค่าเท่ากับ $4.80 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ มีค่าโพลาริเซชันที่หลงเหลือ (P_r) เท่ากับ $0.48 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และค่าสนามลบด้างโพลาริเซชัน (E_c) เท่ากับ $3.4 \text{ kV}/\text{cm}$ และเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ BNZ เพิ่มขึ้นเป็น $x = 0.08$ ค่าโพลาริเซชันสูงสุด (P_s) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $6.81 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ มีค่าโพลาริเซชันที่หลงเหลือ (P_r) เท่ากับ $0.32 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และค่าสนามลบด้างโพลาริเซชัน (E_c) เท่ากับ $0.6 \text{ kV}/\text{cm}$ และที่ $x = 0.10$ จะพบว่าลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสเป็นแบบเส้นตรง



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันสูงสุดกับสัดส่วนของเซรามิก

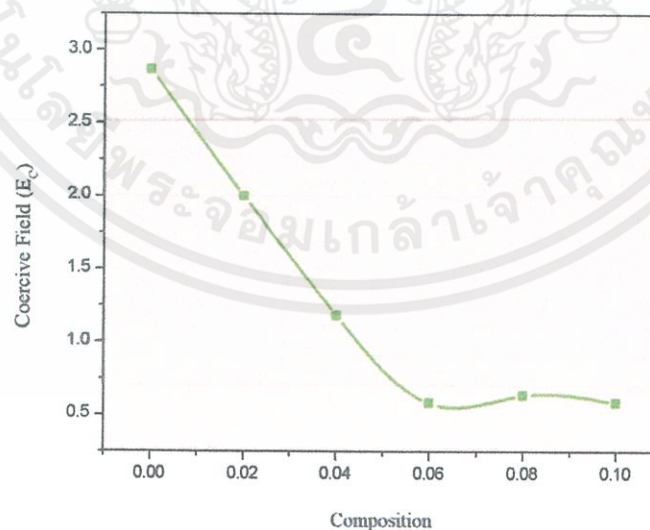
(1-x) BCTS-xBNZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ

จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันสูงสุดกับสัดส่วนของบิสมันิกเทลลูไรด์โคเนค จากกราฟพบว่าเมื่อสัดส่วนของบิสมันิกเทลลูไรด์โคเนคเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าโพลาริเซชันสูงสุดมีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้นที่สัดส่วน $x = 0.08$ และจะมีค่าลดลงเมื่อ $x = 0.10$ ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากขั้นตอนในการวัดค่า เนื่องจากอาจมีการสลับเม็ดเซรามิกที่ $x = 0.06$ กับ 0.08



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันคงค้างกับสัดส่วนของเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BNZ}$

จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันคงค้างกับสัดส่วนของบิสมีท นิกเกิลเซอร์โคเนต จากกราฟพบว่าเมื่อสัดส่วนของบิสมีท นิกเกิลเซอร์โคเนตเพิ่มขึ้นทำให้ค่าโพลาไรเซชันคงค้างมีแนวโน้มลดลง ซึ่งช่วงสัดส่วนองค์ประกอบของสารเป็น $0 \leq x \leq 0.04$ จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าโพลาไรเซชันคงค้างเป็นไปในแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งอย่างสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ

รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามลบด่างโพลาไรเซชันกับสัดส่วนของเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BNZ}$

จากรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามลบล้างโพลาไรเซชันกับสัดส่วนของบิสมัทนิกเกิลเซอร์โคเนต จากกราฟพบว่าเมื่อสัดส่วนของบิสมัทนิกเกิลเซอร์โคเนตเพิ่มขึ้น ค่าสนามลบล้างโพลาไรเซชันมีแนวโน้มลดลง

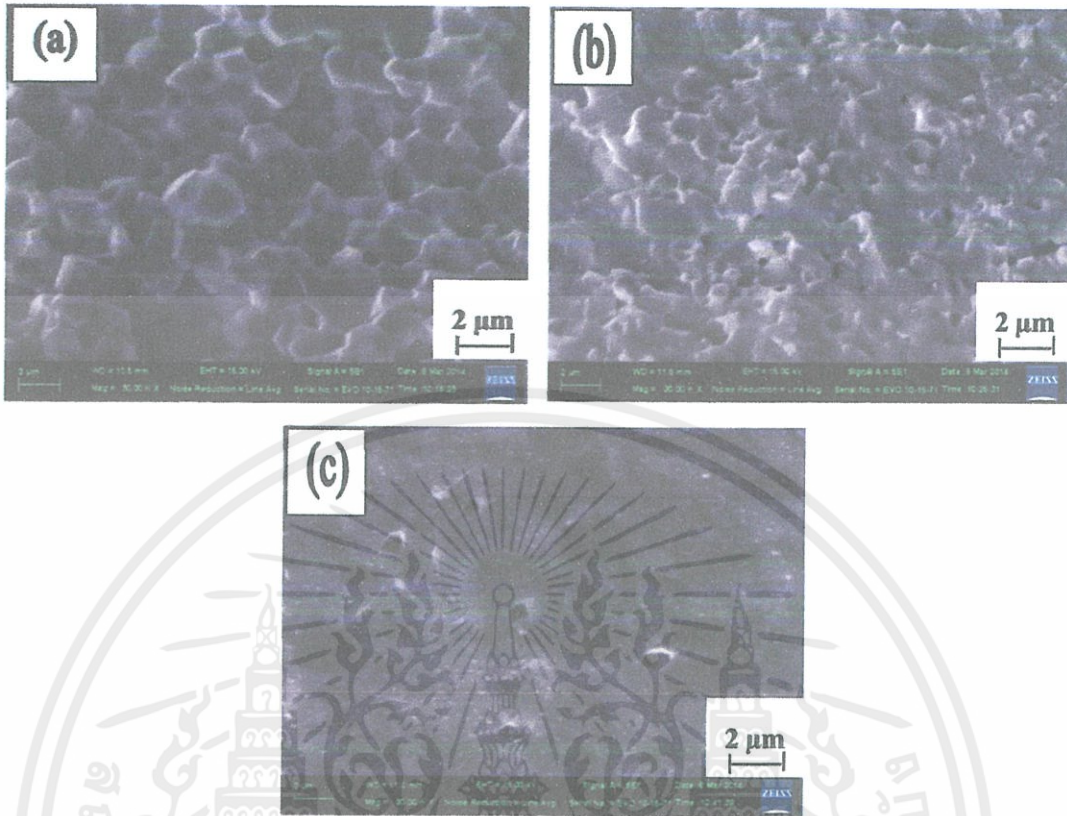
4.2.4 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของเซรามิก

นำเซรามิก BCTS-BNZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ มาตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นภาพบริเวณรอยหักของเซรามิก BCTS-BNZ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ จากรูปพบว่าไม่มีเกรนที่เป็นเฟสไพโรคลอรัลในทุกสัดส่วนองค์ประกอบของ BCTS-BNZ ที่เตรียมได้ และการหักส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรนแสดงให้เห็นว่าที่บริเวณขอบเกรนนั้นมีความแข็งแรงน้อยกว่าเกรน ทำให้เมื่อมีการแตกหรือหักของเซรามิก BCTS-BNZ จึงเกิดการแตกหักที่บริเวณขอบเกรนเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อพิจารณาขนาดเกรนของเซรามิก BCTS-BNZ ในทุกสัดส่วนองค์ประกอบพบว่าขนาดเกรนจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ BNZ เพิ่มสูงขึ้น แต่ที่สัดส่วนองค์ประกอบที่ $x = 0.10$ ไม่สามารถหาขนาดเกรนได้เนื่องจากเกิดการแตกหักแบบผ่าเกรน

จากรูป 4.20 (a) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายบริเวณรอยแตกหักตามขอบเกรน (Intergranular) ที่กำลังขยาย 30 k ของเม็ดเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BNZ}$ ของสัดส่วน $x = 0.02$ ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1325°C พบว่าเกรนมีขนาดเล็ก มีการเรียงตัวชิดติดกัน ขนาดของเกรนเฉลี่ย 0.37 ± 0.07 ไมโครเมตร มีปริมาณและขนาดของรูพรุนเล็กน้อย

จากรูป 4.20 (b) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายบริเวณรอยแตกหักตามขอบเกรน (Intergranular) ที่กำลังขยาย 30 k ของเม็ดเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BNZ}$ ของสัดส่วน $x = 0.06$ ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1325°C พบว่าลักษณะของเกรนมีการเรียงตัวชิดติดกันและมีการเชื่อมต่อกันของเกรนทำให้ไม่สามารถหาขนาดเกรนได้ ลักษณะของเกรนมีลักษณะเหมือนกัน และพบรูพรุนเกิดขึ้นในโครงสร้างขนาดเล็กในปริมาณน้อย

จากรูป 4.20 (c) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายบริเวณรอยแตกหักผ่าเกรน (Intragranular) ที่กำลังขยาย 30 k ของเม็ดเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BNZ}$ ของสัดส่วน $x = 0.10$ ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1325°C พบว่าไม่สามารถหาขนาดเกรนได้และพบรูพรุนขนาดเล็กในปริมาณน้อย



รูปที่ 4.20 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก $(1-x)\text{BCTS}-x\text{BNZ}$

(a) $x = 0.02$ (b) $x = 0.06$ (c) $x = 0.10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาเซรามิกในระบบ $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$

เมื่อ M คือ NiO และ MgO ที่สัดส่วน x ในช่วง 0.00 ถึง 0.10 สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$

1) สามารถเตรียมเฟสเพอรอฟสไกต์บริสุทธิ์ของเซรามิก $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ ได้ทุกสัดส่วน โมลของ BiMgZrO_3 ที่เจือเข้าไป

2) จากการศึกษสมบัติทางกายภาพ (ร้อยละความหนาแน่นและเปอร์เซ็นต์การหดตัว) ของเซรามิก $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ พบว่าที่อุณหภูมิ 1350°C สามารถเตรียมเซรามิกให้มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ได้มากกว่าร้อยละ 95

3) การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซรามิก $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00$ เกรนมีขนาดใหญ่ มีรูพรุนขนาดเล็ก ในปริมาณน้อย ที่ $x = 0.02$ ไม่สามารถหาขนาดเกรนได้ และที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.06 - 0.10$ เกรนมีขนาดเล็กสม่ำเสมอ

4) จากการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ พบว่าที่สัดส่วน $0 \leq x \leq 0.02$ เซรามิกจะมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอลและเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นคิวบิกในช่วงสัดส่วน $0.04 \leq x \leq 0.10$

5) จากการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง 5.1) การตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก พบว่าในช่วงสัดส่วน $0 \leq x \leq 0.02$ จะมี

การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกค่อนข้างสูง เนื่องจากเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง

โครงสร้างจากเตตระโกนอลไปเป็นคิวบิก เมื่อปริมาณ BiMgZrO_3 เพิ่มเป็น $x = 0.04$ พบว่าค่าไดอิเล็กทริกลดต่ำลงถึง 2,200 โครงสร้างจะเปลี่ยนจากเตตระโกนอลไปเป็นคิวบิกอย่างสมบูรณ์

5.2) การตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 10025.2 ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00$

5.3) ค่าความสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ BiMgZrO_3 เพิ่มขึ้นในช่วง x มีค่าเท่ากับ 0.00 – 0.10

5.4) จากการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกแสดงลักษณะเฟอร์โรอิเล็กทริกไม่ค่อยดีนัก เนื่องจากสัดส่วนขององค์ประกอบ BiMgZrO_3 มีผลทำให้ค่าโพลาริเซชันสูงสุด ค่าโพลาริเซชันหลงเหลือ และค่าสนามลบถ่างโพลาริเซชัน มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ BiMgZrO_3 ที่เพิ่มขึ้น

5.1.2 การหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiN}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$

1) สามารถเตรียมเฟสเพอรอฟสไกต์บริสุทธิ์ของเซรามิก $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiN}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ ได้ทุกสัดส่วนโมลของ $\text{BiN}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ ที่เจือเข้าไป

2) จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ (ร้อยละความหนาแน่นและเปอร์เซ็นต์การหดตัว) ของเซรามิก $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiN}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ พบว่าที่อุณหภูมิ 1325°C สามารถเตรียมเซรามิกให้มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ได้มากกว่าร้อยละ 92

3) การศึกษาทางสัณฐานของเซรามิก $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiN}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.0$ เกรนมีขนาดเล็ก มีรูพรุนขนาดเล็กในปริมาณน้อย ที่ $x = 0.06$ ไม่สามารถหาขนาดเกรนได้เนื่องจากมีการเชื่อมต่อกันของเกรน และที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.10$ ไม่สามารถหาขนาดเกรนเนื่องจากเกิดการแตกหักแบบผ่าเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 4) จากการศึกษาสมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})$

$O_3-xBiN_{0.5}Zr_{0.5}O_3$ พบว่าที่สัดส่วน $x = 0.00$ เซรามิกจะมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล และเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นคิวบิกในช่วงสัดส่วน $0.02 \leq x \leq 0.10$

5) จากการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

5.1) การตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก พบว่าในช่วงสัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00$ จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงถึง 6,200 เนื่องจากเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเตตระโกนอลไปเป็นคิวบิก

5.2) การตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 10,000 ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00$

5.3) ค่าความสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ $BiNZrO_3$ เพิ่มขึ้นในช่วง x มีค่าเท่ากับ $0.00 - 0.10$

5.4) จากการตรวจสอบสมบัติเฟอโรอิเล็กทริกเซรามิกแสดงลักษณะเฟอโรอิเล็กทริกไม่ค่อยดีนัก เนื่องจากสัดส่วนขององค์ประกอบ $BiNiZrO_3$ มีผลทำให้ค่าโพลาริเซชันสูงสุด ค่าโพลาริเซชันหลงเหลือ และค่าสนามลบด่างโพลาริเซชัน มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ $BiNiZrO_3$ ที่เพิ่มขึ้น

5.1.3 การเปรียบเทียบผลของลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ $(1-x)(Ba_{0.98}Ca_{0.02})$



1.) จากผลการตรวจสอบทางกายภาพของเซรามิก (ร้อยละความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การหดตัว) พบว่าไม่มีนัยสำคัญต่อลักษณะเฉพาะของเซรามิกทั้ง 2 ระบบ

2.) จากการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกพบว่าเซรามิกในระบบ $(1-x)(Ba_{0.98}Ca_{0.02})(Ti_{0.96}Sn_{0.04})O_3 - xBiM_{0.5}Zr_{0.5}O_3$ เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสโครงสร้างจากเตตระโกนอลไปเป็นคิวบิกระหว่างสัดส่วน 0.00 ถึง 0.02 ส่วนเซรามิกในระบบ $(1-x)(Ba_{0.98}Ca_{0.02})(Ti_{0.96}Sn_{0.04})O_3 - xBiN_{0.5}Zr_{0.5}O_3$ เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสโครงสร้างจากเตตระโกนอลไปเป็นคิวบิกที่สัดส่วน $x = 0.00$

2.) ควรทำการตรวจสอบชนิดของเฟสที่ปรากฏในเซรามิก $(1-x)(\text{Ba}_{0.93}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ และ $(1-x)(\text{Ba}_{0.93}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3 - x\text{BiN}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ ด้วยเทคนิค EDX เพื่อประกอบการอภิปรายผลของเทคนิค SEM

3.) นำการตรวจสอบสมบัติอื่นๆเพิ่มเติมเช่น สมบัติเพียโซอิเล็กทริกและสมบัติเชิงกล เป็นต้นเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นในการกำหนดการประยุกต์ใช้งานของเซรามิกและประโยชน์ต่อการหาแนวทางในการศึกษาและสร้างความเข้าใจในเซรามิกระบบนี้ให้มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] อัครภา พรหมมิ. 2553. “โครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกในระบบเลดเซอร์โคเนตแบเรียมแมกนีเซียมไนโอเบต”, สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม - เครื่องมือวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] G.H.Heartling. 1999. “Ferroelectric Ceramics: History and Technology”. J.Am.ceram.Soc. 82, 797-818.
- [3] วรณวิมล พันธุ์. 2552. “การเตรียมและการเปลี่ยนเฟสในเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก เลดเซอร์โคเนต-เลดไททานต-รีแลกเซอร์”. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] นิตยา อาดัมภ์. 2552. “การสังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วโพแทสเซียมไนโอเบตและโซเดียมไนโอเบตโดยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล”. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] น. วิทยากร. 2544. วิทยานิพนธ์ (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ “การเตรียมและตรวจสอบผลของคาร์บอนที่มีต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเลดเซอร์โคเนตติทานตพอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง แบบ 0-3”.
- [6] A. Safari, R. K. Randa, and V. F. Janas. 1996. “ferroelectric; Materials Characteristics & Application”. key Engineering Materials. vol.122 – 124, pp.35 – 70.
- [7] ชนิศา นวนิล และคณะ. 2551. “การสังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ $[(Bi_{1/2}K_{1/2})_{1-x/2}Li_x]_{0.99}Ba_{0.01}TiO_3$ ” สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [8] เอกสารประกอบการเรียนรายวิชาบำรุงรักษาเครื่องมือวิเคราะห์
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- [9] T. Takenaka and H. Nagata. 2005. “Current status and prospects of lead-free piezoelectric ceramic”. European ceramic society. vol 25, pp. 2693 – 2700.

- [10] Moulson and Herbert. *Electroceramics*. 1990. "Materials Properties Application". Chapman and Hall.
- [11] พรรณนิภา คำแสนหมื่น. 2553. "โครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกในระบบ เลดเซอร์โคเนต-แบเรียมแมกนีเซียมไนโอเบต". ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [12] Wei Li, Zhijun Xu, and Guozhong Zang. 2011. "Large Piezoelectric Coefficient in $(\text{Ba}_{x-1}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$ Lead- Free Ceramics". Liaocheng University. vol 94, pp.4131-4133.
- [13] Bo Wu, Dingquan Xiao, and Wenjuan Wu. 2012. "Microstructure and electrical properties of $(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.94}\text{Sn}_{0.06})\text{O}_3$ -modified $\text{Bi}_{0.51}\text{Na}_{0.50}\text{TiO}_3$ lead-free ceramics". Sichuan University. Vol 38, pp.5677-5681
- [14] Yangchun Rong, Jun Chen, Huajun Kang, Laijun Liu, Liang Fang, Longlong Fang, Zhao Pan and Xianran Xing. 2013 "Large Piezoelectric Response and Polarization in Relaxor Ferroelectric PbTiO_3 - $\text{Bi}(\text{Ni}_{1/2}\text{Zr}_{1/2})\text{O}_3$ " University of science and Technology Beijing China. Vol.96
- [15] พรพรรณ คำคุ้ม และคณะ. 2012. "การประดิษฐ์และหาลักษณะเฉพาะของเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว BaTiO_3 - $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}\text{TiO}_3$ - BiMO_3 : M:Al และ Ga" สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [16] ชนิศา นวนิล และคณะ. 2551. "การสังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ $(\text{Bi}_{1/2}\text{K}_{1/2})_{1-x/2}\text{Li}_x\text{Ba}_{0.01}\text{TiO}_3$ " สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [17] นิตยา อาคัมภ์. 2552 "การสังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วโพแทสเซียมไนโอเบต (KNbO_3) และโซเดียมไนโอเบต (NaNbO_3) โดยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล" สาขาเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรม-เครื่องมือวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

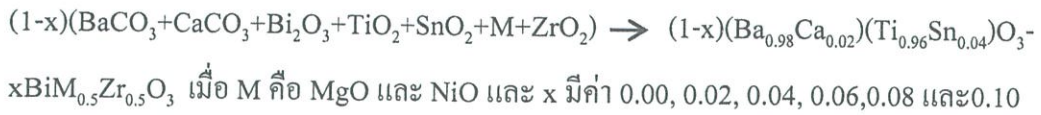
- [18] ชนิตา นวนิล และคณะ.2551. “การสังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ $[(\text{Bi}_{1/2}\text{K}_{1/2})_{1-x/2}\text{Li}_x]_{0.99}\text{Ba}_{0.01}\text{TiO}_3$ ” สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [19] Bochanan , R.C., “Ceramic Material For Electronic”. 1996. mercel Dekker.
- [20] B.Jaffe, W.R. Cook, and H.Jaffe. 1971. “Piezoelectric Ceramic”. USA:
- [21] ศ. อนันตมา. 2543. “กระบวนการประดิษฐ์เซรามิกชั้นสูง”. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [22] [Online]วรรณกรรมปริทัศน์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่:
www.archive.lip.cmu.ac.th/full/T/2552/mat0452
- [23] Suryanaryana, C., and Norton, M.G. 1998 .“X-ray Diffraction A Pratical Approach”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง



สารในระบบ BCTS-BMZ

x = 0	BaCO ₃	CaCO ₃	Bi ₂ O ₃	TiO ₂	SnO ₂	MgO	ZrO ₂
Mw	197.3359	100.0869	465.959	79.8658	150.7088	40.3044	123.2228
mole	0.083732	0.001709	0	0.082023	0.003418	0	0
x = 0.02							
Mw	197.3359	100.0869	465.959	79.8658	150.7088	40.3044	123.2228
mole	0.081495	0.001663	0.000832	0.079832	0.003326	0.000849	0.000849
x = 0.04							
Mw	197.3359	100.0869	465.959	79.8658	150.7088	40.3044	123.2228
mole	0.07929	0.001553	0.001686	0.077671	0.003236	0.001686	0.001686
x = 0.06							
Mw	197.3359	100.0869	465.959	79.8658	150.7088	40.3044	123.2228
mole	0.077113	0.001574	0.002511	0.07554	0.003147	0.002511	0.002511
x = 0.08							
Mw	197.3359	100.0869	465.959	79.8658	150.7088	40.3044	123.2228
Mole	0.074967	0.00153	0.003326	0.073437	0.00306	0.003326	0.003326
x = 0.10							
Mw	197.3359	100.0869	465.959	79.8658	150.7088	40.3044	123.2228
mole	0.072848	0.001487	0.00413	0.071362	0.002973	0.00413	0.00413

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารในระบบ BCTS-BNZ

x = 0	BaCO ₃	CaCO ₃	Bi ₂ O ₃	TiO ₂	SnO ₂	NiO	ZrO ₂
Mw	197.3359	100.0869	465.959	79.8658	150.7088	74.6928	123.2228
mole	0.083732	0.001709	0	0.082023	0.003418	0	0
x = 0.02							
Mw	197.3359	100.0869	465.959	79.8658	150.7088	74.6928	123.2228
mole	0.081377	0.001661	0.000847	0.079716	0.003321	0.000847	0.000847
x = 0.04							
Mw	197.3359	100.0869	465.959	79.8658	150.7088	74.6928	123.2228
mole	0.07906	0.001613	0.001681	0.077447	0.003227	0.001681	0.001681
x = 0.06							
Mw	197.3359	100.0869	465.959	79.8658	150.7088	74.6928	123.2228
mole	0.076782	0.001567	0.0025	0.075215	0.003134	0.0025	0.0025
x = 0.08							
Mw	197.3359	100.0869	465.959	79.8658	150.7088	74.6928	123.2228
Mole	0.07454	0.001521	0.003307	0.073019	0.003042	0.003307	0.003307
x = 0.10							
Mw	197.3359	100.0869	465.959	79.8658	150.7088	74.6928	123.2228
mole	0.072335	0.001476	0.004101	0.070858	0.002952	0.004101	0.004101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงน้ำหนักของสารที่ X ต่างๆ M=Ni

X	สาร (กรัม)						
	TiO ₂	Bi ₂ O ₃	SnO ₂	NiO	CaCO ₃	BaCO ₃	ZrO ₂
0.00	6.5508	0	0.5151	0	0.1710	16.5233	0
0.02	6.3666	0.3948	0.5006	0.0633	0.1662	16.0586	0.1044
0.04	6.1854	0.7831	0.4863	0.1255	0.1615	15.6015	0.2071
0.06	6.0071	1.1651	0.4723	0.1868	0.1568	15.1518	0.3081
0.08	5.8317	1.5409	0.4585	0.2470	0.1523	14.7095	0.4075
0.10	5.6592	1.9107	0.4450	0.3063	0.1478	14.2742	0.5053

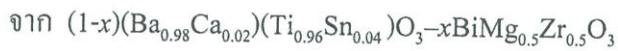
ตารางที่ 3.2 แสดงน้ำหนักของสารที่ X ต่างๆ M=Mg

X	สาร (กรัม)						
	TiO ₂	Bi ₂ O ₃	SnO ₂	MgO	CaCO ₃	BaCO ₃	ZrO ₂
0.00	6.5508	0	0.5151	0	0.1710	16.5232	0
0.02	6.3759	0.3954	0.5013	0.0342	0.1665	16.0820	0.1046
0.04	6.2033	0.7854	0.4877	0.0679	0.1620	15.6467	0.2077
0.06	6.0330	1.1702	0.4744	0.1012	0.1575	15.2173	0.3094
0.08	5.8651	1.5497	0.4611	0.1341	0.1531	14.7936	0.4098
0.10	5.6993	1.9243	0.4481	0.1664	0.1488	14.3756	0.5089

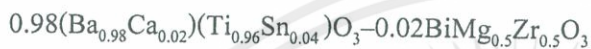
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณหาความหนาแน่นทางทฤษฎี

ตัวอย่างการคำนวณหาความหนาแน่นทางทฤษฎี



เมื่อเทียบกับโครงสร้าง ABO_3 พบว่า A site คือ Ba Ca Bi และ B site คือ Ti Sn Mg Zr



หามวลที่ตำแหน่ง A site (m_A)

จาก

$$m = nA$$

เมื่อ

m คือ มวลของอะตอม (g)

n คือ จำนวนโมล

A คือ น้ำหนักอะตอม (g/mol)

มวลอะตอมของ Ba

$$m = (0.9604)(137.327) = 131.8889 \text{ g}$$

มวลอะตอมของ Ca

$$m = (0.0196)(40.078) = 0.7855 \text{ g}$$

มวลอะตอมของ Bi

$$m = (0.02)(208.98) = 4.1796 \text{ g}$$

$$\text{ดังนั้น } m_A = 131.8889 + 0.7855 + 4.1796 = 136.854 \text{ g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

หามวลของหน่วยเซลล์ (M)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาก } m = \frac{nA}{N_A}$$

- เมื่อ n คือ จำนวนโมล
- A คือ น้ำหนักอะตอม (g/mol)
- N_A คือ เลขอะโวกาโด (Avogadro number) 6.02×10^{23} atom/mol
- m คือ มวลของหน่วยเซลล์ (g)

มวลของตำแหน่ง A site ต่อ 1 หน่วยเซลล์

$$m = \frac{1(136.854)}{6.02 \times 10^{23}} = 22.733 \times 10^{-23} \text{ g}$$

มวลของตำแหน่ง B site ต่อ 1 หน่วยเซลล์

$$m = \frac{1(50.8418)}{6.02 \times 10^{23}} = 8.4454 \times 10^{-23} \text{ g}$$

มวลของตำแหน่ง O ต่อ 1 หน่วยเซลล์

$$m = \frac{3(15.9994)}{6.02 \times 10^{23}} = 7.9731 \times 10^{-23} \text{ g}$$

จะได้ $M = (22.733 + 8.4454 + 7.9731) \times 10^{-23} \text{ g}$

หาความหนาแน่นทางทฤษฎี จาก

$$\rho_{TD} = \frac{M}{V}$$

- เมื่อ ρ_{TD} คือ ความหนาแน่นทางทฤษฎีของสารตัวอย่าง (g/mol)
- V คือ ปริมาตรของหน่วยเซลล์ โดยระบบ BCTS-BMZ มีปริมาตรเท่ากับ
- $$64.7273 \times 10^{-24}$$
- M คือ มวลของเซลล์ (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 จะได้ว่า $\rho_{TD} = \frac{39.1515 \times 10^{-23}}{64.7273 \times 10^{-24}} = 6.0487 \text{ g/cm}^3$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยน้ำหนักอะตอม

$$\text{Ba} = 137.327 \text{ g/mol}$$

$$\text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol}$$

$$\text{Ti} = 47.867 \text{ g/mol}$$

$$\text{Sn} = 118.71 \text{ g/mol}$$

$$\text{O} = 15.994 \text{ g/mol}$$

$$\text{Bi} = 208.98 \text{ g/mol}$$

$$\text{Mg} = 24.305 \text{ g/mol}$$

$$\text{Zr} = 91.224 \text{ g/mol}$$

จากสูตร

$$\begin{aligned} \%TD &= \frac{\rho_{\text{ตัวอย่าง}}}{\rho_{\text{TD}}} \times 100 \\ &= \frac{5.965248}{6.0487} \times 100 \\ \%TD &= 98.6204 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้