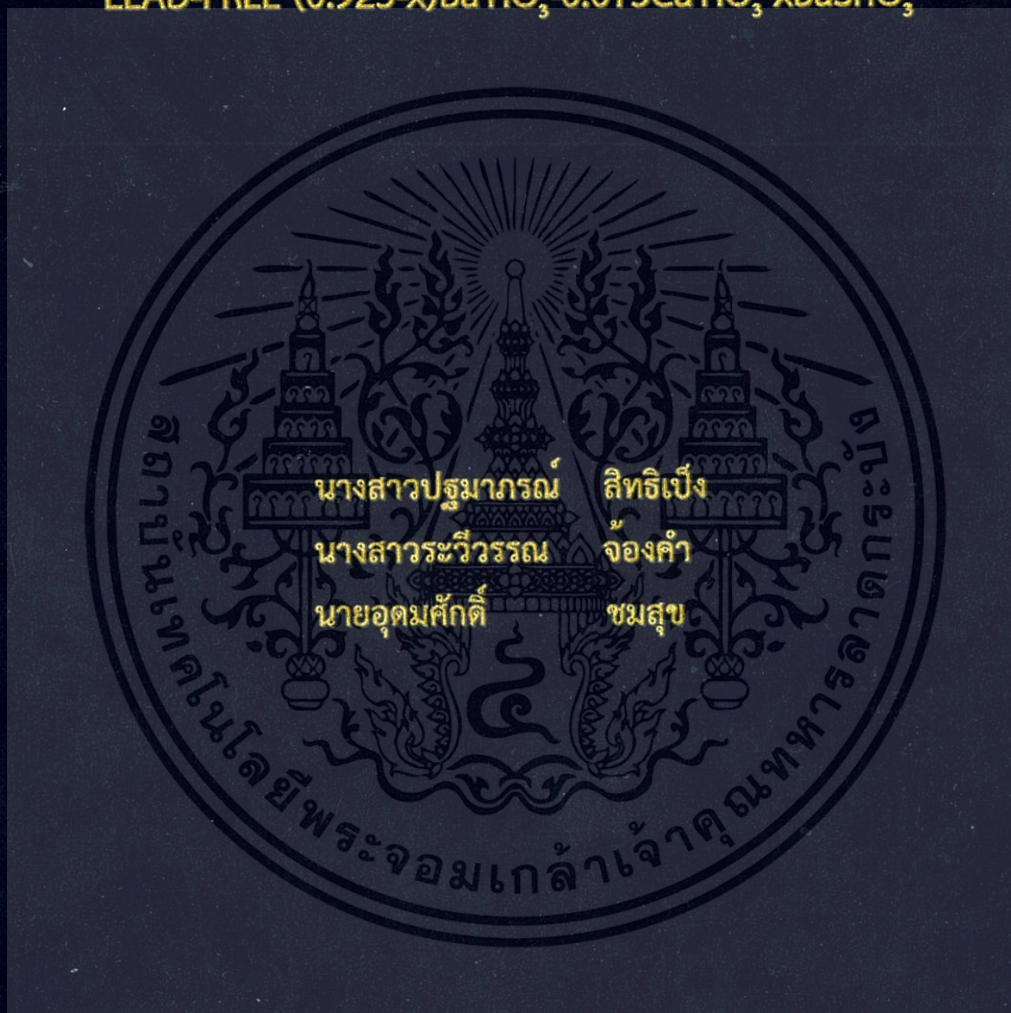


การเตรียมและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว  
ในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$

PREPARATION AND ELECTRICAL PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC  
LEAD-FREE  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การเตรียมและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว  
ในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$

PREPARATION AND ELECTRICAL PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC  
LEAD-FREE  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION AND ELECTRICAL PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC  
LEAD-FREE  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$






A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$ Preparation and Electrical Properties of Piezoelectric Lead-Free $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปฐมาภรณ์	สิทธิเป็ง รหัสนักศึกษา 54050203
	นางสาวระวีวรรณ	จ้องคำ รหัสนักศึกษา 54050252
	นายอุดมศักดิ์	ชมสุข รหัสนักศึกษา 54050338
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2557	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นราธิป วิทยากร	

คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ	
ดร.ทศพล เมื่อนันท กรรมการ	
ผศ.ดร.นราธิป วิทยากร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการวิจัย	การเตรียมและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปฐมภรณ์	สิทธิเป็ง	รหัสนักศึกษา 54050203
	นางสาวระวีวรรณ	จ้องคำ	รหัสนักศึกษา 54050252
	นายอุดมศักดิ์	ชมสุข	รหัสนักศึกษา 54050338
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นราธิป วิทยากร		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  (BCTS) ( $x = 0.025 - 0.1125$ ) โดยเตรียมผงเซรามิกด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1250 - 1400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานเซรามิกมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า ที่สัดส่วน  $x = 0.0625 - 0.0750$  มีการเกิดเฟสร่วมกัน 2 เฟส คือ เฟสเตตระโกนอลและเฟสออร์โธโรมบิก ซึ่งที่สัดส่วนดังกล่าว ชิ้นงานแสดงสมบัติเด่นทางไฟฟ้าสูงสุดที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่สนามไฟฟ้า 20 kV/cm มีค่าสูงสุดที่ 934.65 pm/V ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด 15000 จากการศึกษาพบว่า ชิ้นงานเซรามิกในระบบ BCTS เป็นตัวเลือกที่ดี สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว

คำสำคัญ : สมบัติไดอิเล็กทริก เพียโซอิเล็กทริก สมบัติทางกายภาพ ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป .....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	5
2.1 เพียโซอิเล็กทริก .....	5
2.2 การประยุกต์ใช้งานเพียโซอิเล็กทริก .....	8
2.3 ไดอิเล็กทริก .....	9
2.3.1 ค่าสภาพยอมสัมพันธ์ ( $\epsilon_r$ ) .....	12
2.3.2 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ( $\tan\delta$ ) .....	13
2.4 โครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ .....	13
2.5 แบบเรียบไททานเต .....	13
2.6 อุณหภูมิและการเปลี่ยนเฟส .....	14
2.7 มาตรการควบคุมผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของสหภาพยุโรป .....	15
2.7.1 ระเบียบเศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ .....	15
2.7.2 ระเบียบว่าด้วยการจำกัดการใช้สารอันตรายบางชนิดในผลิตภัณฑ์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ .....	16
2.8 กระบวนการเตรียมผงด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง .....	17
2.8.1 กระบวนการบดย่อยผสมด้วยเครื่องบดสารด้วยแรงสั่น .....	17
2.8.2 ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง .....	18
2.9 กระบวนการอัดผง .....	19
2.10 กระบวนการเผาซินเทอร์ .....	20
2.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	21
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	23
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b> .....	30
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แลงต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.3 กระบวนการเตรียมผงผลึก BT-CT-BS.....	31
3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิก .....	33
3.5 การตรวจสอบพฤติกรรมเกิดการเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	34
3.6 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ .....	35
3.6.1 การหาค่าความหนาแน่น (Density หรือ $\delta$ ) และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%TD) .....	35
3.6.2 การหาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังการเผา (Firing shrinkage).....	36
3.7 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า.....	37
3.7.1 การตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียไดอิเล็กทริก .....	37
3.7.2 การตรวจสอบวนวนฮีสเทอรีซิส.....	37
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>38</b>
4.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก .....	38
4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	40
4.3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก BT-CT-BS .....	42
4.3.1 ผลการตรวจสอบเพอร์โรอิเล็กทริก .....	42
4.3.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกและการเปลี่ยนเฟส.....	47
4.3.3 ผลการตรวจสอบสมบัติความเครียดของวัสดุต่อสนามไฟฟ้า .....	52
แบบแบตเตอรี่ฟลาย	
4.3.4 การตรวจสอบความเครียดของวัสดุต่อสนามไฟฟ้า.....	54
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>57</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	58
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายต้องห้าม 6 ชนิด.....	16
ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของเซรามิกระบบ (0.925-x)BT-0.075CT-xBS .....	38
ตารางที่ 4.2 ค่าการหดตัวของเซรามิกระบบ (0.925-x)BT-0.075CT-xBS .....	39
ตารางที่ ก-1 การคำนวณสัดส่วนสารในระบบ (0.925-x)BT-0.075CT-xBS .....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 เฟสไดอะแกรมของระบบ BCTS ทำโดย Li-Feng Zhu และคณะ.....	2
รูปที่ 1.2 แสดงสัดส่วนองค์ประกอบของวัสดุเซรามิกที่สามารถแสดงสมบัติ..... เพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น	3
รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (Direct piezoelectric effect) .....	6
รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม (Converse piezoelectric effect) .....	6
รูปที่ 2.3 แผนผังความสัมพันธ์ของผลึกที่เกี่ยวข้องกับเพียโซอิเล็กทริกโดยพื้นฐานสมมาตรผลึก....	8
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นองค์ประกอบ.....	9
รูปที่ 2.5 ตัวเก็บประจุลบ.....	12
รูปที่ 2.6 ภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิคูรี.....	14
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของผลึก..... แบเรียมไททาเนต ( $BaTiO_3$ )	15
รูปที่ 2.8 เครื่องบดสารด้วยแรงสั่น (Vibration Mill).....	18
รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) .....	19
เมื่อ (A) ผงผสมกันอยู่ก่อนการเกิดปฏิกิริยา (B) มีการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นบางส่วน และ (C) เมื่อปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์	
รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนการอัดขึ้นรูปแบบอัดแกนเดียว .....	19
รูปที่ 2.11 เครื่องอัดแกนเดียวแบบไฮดรอลิก.....	20
รูปที่ 2.12 แสดงกลไกการรวมกันของอนุภาคในระหว่างกระบวนการซินเทอร์..... (A) อนุภาคของผงก่อนเผาซินเทอร์ (B) ระยะแรก (C) ระยะกลาง (D) ระยะสุดท้าย	21
รูปที่ 2.13 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก.....	22
รูปที่ 2.14 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกที่ $x = 0 \ 0.01 \ 0.02 \ 0.03$ และ $0.04$ ..... $(Ba_{1-x}Ca_x)(Ti_{0.96}Sn_{0.04})O_3$	23
รูปที่ 2.15 กราฟวงวนฮีสเทอรีซิสของโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าของเซรามิกที่อุณหภูมิห้อง.	24
รูปที่ 2.16 กราฟแสดงค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกและค่าแฟกเตอร์การเชื่อมต่อพลังงาน .....	24
กล-ไฟฟ้าของเซรามิก $(Ba_{1-x}Ca_x)(Ti_{0.96}Sn_{0.04})O_3$ ที่เป็นฟังก์ชันของปริมาณ	
รูปที่ 2.17 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิก.....	25
รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนกับค่าโพลาริเซชันตกค้าง .....	26
และค่าสนามไฟฟ้าลบล้างของเซรามิก	
รูปที่ 2.19 กราฟวงวนฮีสเทอรีซิสของโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง .....	26
รูปที่ 2.20 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกของ $(Ba_{0.9}Ca_{0.1})(Ti_{1-x}Sn_x)O_3$ .....	27
รูปที่ 2.21 แสดงสัณฐานวิทยาของแบเรียมไททาเนตด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... (A) $x = 0.02$ : (B) $x = 0.04$ : (C) $x = 0.06$ : (D) $x = 0.08$ : (E) $x = 0.10$	28
รูปที่ 2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ.....	28
รูปที่ 2.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และขออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึก BT-CT-BS โดยวิธีปฏิกิริยา .....	32
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการเผาแคลไซน์ ( $T_c$ ) คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์.....	33
รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงการเผาซินเทอร์ ( $T_s$ ) คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเทอร์).....	34
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก .....	40
$(0.925-x)BaTiO_3-0.075CaTiO_3-xBaSnO_3$	
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในช่วงระนาบ (111) (200) และ (211).....	41
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้า .....	43
สัดส่วนต่างๆของเซรามิกระบบ $(0.925-x)BaTiO_3-0.075CaTiO_3-xBaSnO_3$	
รูปที่ 4.4 ลักษณะวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิกในระบบ $(0.925-x)BaTiO_3-$ .....	44
$0.075CaTiO_3-xBaSnO_3$ ที่สนามไฟฟ้า 20 kV/cm	
รูปที่ 4.5 ลักษณะวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิกในระบบ $(0.925-x)BaTiO_3-$ .....	44
$0.075CaTiO_3-xBaSnO_3$ ที่สนามไฟฟ้า 40 kV/cm	
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันอิมิตัวกับสัดส่วนของ.....	45
เซรามิกระบบ $(0.925-x)BaTiO_3-0.075CaTiO_3-xBaSnO_3$	
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันชั้นคงเหลือ ( $P_r$ ).....	46
กับสัดส่วนของเซรามิกระบบ $(0.925-x)BaTiO_3-0.075CaTiO_3-xBaSnO_3$	
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามลบล้างโพลาริเซชันชั้น ( $E_c$ ).....	46
กับสัดส่วนของเซรามิกระบบ $(0.925-x)BaTiO_3-0.075CaTiO_3-xBaSnO_3$	
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสีย.....	47
ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของสัดส่วนต่างๆ	
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ.....	48
ของสัดส่วนต่างๆที่ความถี่ 1 kHz	
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคูริกับสัดส่วนต่างๆ .....	49
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง .....	50
กับสัดส่วนต่างๆ	
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับสัดส่วนต่างๆ.....	51
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละความเครียดของวัสดุต่อสนามไฟฟ้า.....	52
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละความเครียดของวัสดุต่อสนามไฟฟ้า.....	53
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละความเครียด.....	54
กับสนามไฟฟ้าที่ 20 kV/cm	
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละความเครียดกับสนามไฟฟ้าที่ 40 kV/cm..	55
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและสัดส่วน.....	55
องค์ประกอบต่างๆเซรามิกในระบบ $(0.925-x)BaTiO_3-xBaSnO_3-0.075CaTiO_3$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้มีการใช้งานวัสดุหลากหลายด้านทั้งทางด้านอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ เกษตรกรรมทางการแพทย์ แม้กระทั่งทางด้านวิทยาศาสตร์นักวัสดุศาสตร์ได้คิดค้นวัสดุที่สามารถใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งวัสดุที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันคือ วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric material) ซึ่งวัสดุชนิดนี้เป็นวัสดุที่ฉลาดเป็นสมบัติพิเศษประเภทหนึ่งของวัสดุโดยมีตัวอย่างการใช้งาน เช่น ลำโพงแบบเพียโซอิเล็กทริก หัวฉีดปริ้นเตอร์ หัวตรวจวัดแก๊สเพียโซเซนเซอร์ โทรศัพท์มือถือ หัวฉีดน้ำมัน เป็นต้น เนื่องจากวัสดุชนิดนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เมื่อได้รับแรงทางกลจนให้แรงดันไฟฟ้าออกมาในทางกลับกันเมื่อให้ไฟฟ้าเข้าไปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขึ้นโดยเรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect)

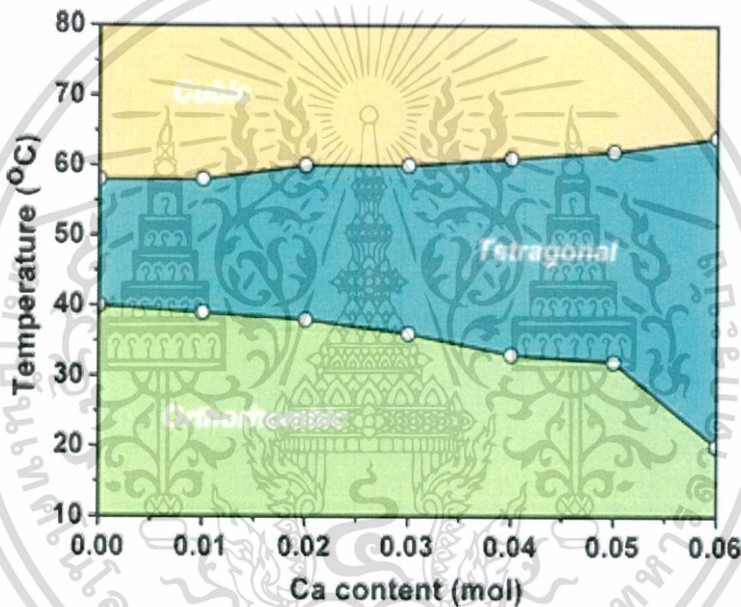
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) คือ ปรากฏการณ์ที่วัสดุสามารถเกิดขั้วไฟฟ้าได้ (Electrical polarization) เนื่องจากเกิดความเครียด (Strain) ขึ้นภายในตัววัสดุ เมื่อวัสดุได้รับความเค้น (Stress) เข้าไป โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (Direct piezoelectric effect)” และในทางกลับกันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยภายในวัสดุจะเกิดความเครียดขึ้นซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม (Converse piezoelectric effect)” วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นคือ เลดเซอร์โคเนตไททาเนต ( $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  หรือ PZT) เนื่องจากมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริก และไดอิเล็กทริกที่ดี เมื่อเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดอื่น แต่เนื่องจาก PZT มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณของเลดออกไซด์สูงถึง 60% โดยน้ำหนัก ถือได้ว่าเป็นปริมาณของโลหะหนักที่สูงและส่งผลให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมหากมีการนำไปใช้งานและทำลายอย่างไม่ถูกวิธี

โดยในสหภาพยุโรปได้ออกมาตรการ WEEE (Waste from Electrical and Electronics Equipment) [3] ซึ่งเป็นระเบียบที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักความรับผิดชอบของผู้ผลิต มุ่งเน้นให้มีการลดปริมาณการทิ้งเศษซากผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อจัดการกับผลิตภัณฑ์ที่หมดอายุให้เกิดประโยชน์และคุ้มค่าสูงสุดและระเบียบ RoHS (Restriction of certain hazardous substances) [3] เป็นระเบียบที่มุ่งเน้นการจำกัดการใช้สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยจำกัดการใช้สารอันตรายบางประเภทในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และทำให้การนำทรัพยากรกลับคืนและการทิ้งซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดระเบียบนี้ครอบคลุมผลิตภัณฑ์เดียวกับ WEEE โดยสารต้องห้าม 6 ตัว ที่ห้ามนำเข้าสหภาพยุโรปหนึ่งในส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ ตะกั่ว ซึ่งบริษัทที่จะสามารถส่งสินค้าได้นั้นจะต้องมีการจำกัดปริมาณของสารตะกั่วไม่เกิน 0.01 wt% จึงจะสามารถนำเข้าในสหภาพยุโรป

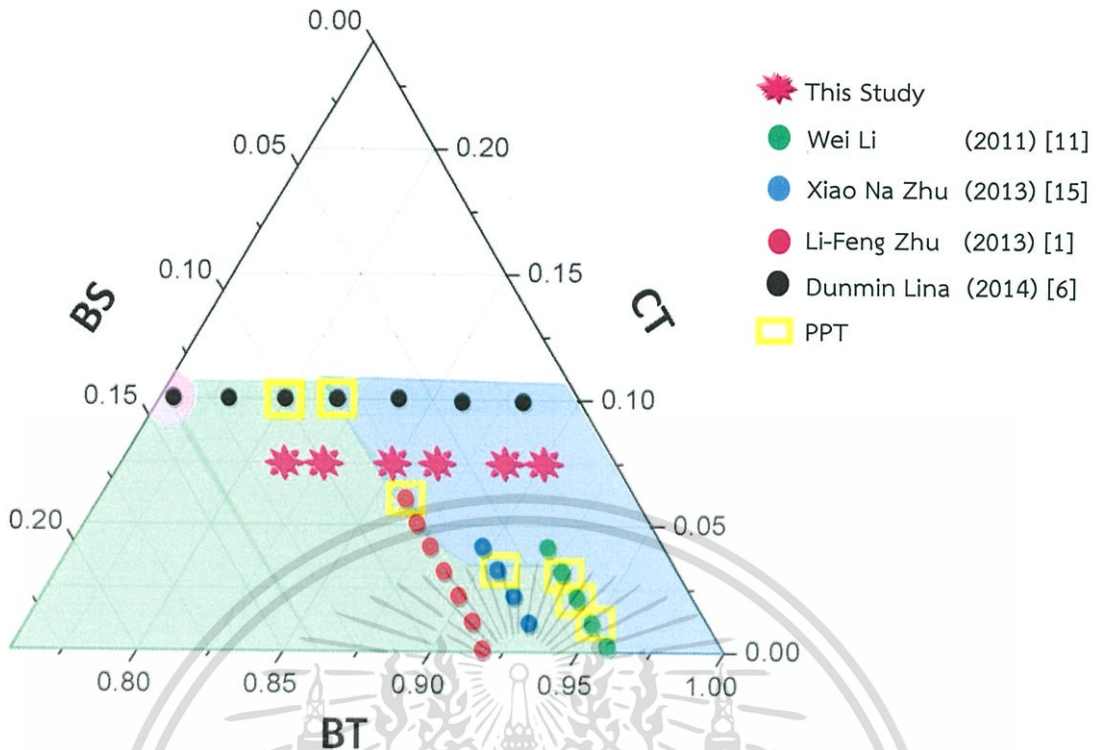
ดังนั้นจึงได้มีนักวัสดุศาสตร์ที่มุ่งทำการวิจัยเพื่อหาสารที่จะมาประดิษฐ์เป็นวัสดุเซรามิกที่สามารถทดแทนวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก โดยงานวิจัยของ Li-Feng Zhu และคณะ [1] ได้สังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.92}\text{Sn}_{0.08})\text{O}_3:\text{BCTS}$  โดยใช้สัดส่วนเป็น  $x = 0.00 \ 0.01 \ 0.02 \ 0.03 \ 0.04 \ 0.05 \ 0.06 \ \text{mol}$  โดยที่  $x$  คือ ปริมาณของแคลเซียม จากการศึกษาวิจัยพบว่าระบบนี้มีโครงสร้างเป็นเพอร์รอฟสไกต์และที่สัดส่วน  $x = 0.05$  จะเกิดเฟสร่วมกันระหว่างโครงสร้างเตตระโกนอลกับโครงสร้างออร์โธโรมบิกซึ่งดูได้จากรูปที่ 1.1 ซึ่งส่งผลให้สัดส่วนนี้มีค่าเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นที่สุด



รูปที่ 1.1 เฟสไดอะแกรมของระบบ BCTS ทำโดย Li-Feng Zhu และคณะ [1]

มีหลายงานวิจัยที่มุ่งพัฒนาสังเคราะห์เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก งานวิจัยทั้งหลายมุ่งเน้นที่จะทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนองค์ประกอบของ BCTS เป็นหลัก เพื่อให้มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นที่สุด มีความหลากหลายเฟส ซึ่งเกิดจตุรรอยต่อเฟสร่วมกัน 2 เฟส โดยที่ผ่านมาก็มักมีผู้ทำการวิจัยได้พบว่าการสังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกในระบบ BCTS แต่ละสัดส่วนนั้นมีทั้งเกิดเฟสร่วมกันและเกิดเฟสเดี่ยวเกิดขึ้นซึ่งจากงานวิจัยของ Li-Feng Zhu และคณะได้พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกที่  $x = 0.05$  ของระบบ BCTS ได้ให้ค่า  $d_{33}$  สูงถึง 568 pC/N  $k_p = 47.7\%$  และ  $\epsilon_r = 23,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 แสดงสัดส่วนองค์ประกอบของวัสดุเซรามิกที่สามารถแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น

จากรูปที่ 1.2 เมื่อพิจารณาเฟสไดอะแกรมแล้วเห็นว่างานวิจัยต่าง ๆ นั้นมุ่งที่จะศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในสัดส่วนที่มีเฟสร่วมกันและเฟสเดี่ยว เพื่อพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วให้มีสมบัติที่โดดเด่นที่ขึ้นอยู่กับพื้นฐานของงานวิจัยที่ได้ทำมาก่อนแล้ว แต่ยังมีสัดส่วนองค์ประกอบอื่นๆที่น่าสนใจอีกมากมายที่ยังไม่มีผู้ใดศึกษาซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าบริเวณสัดส่วนเหล่านี้อาจแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นและอาจจะมีค่าไดอิเล็กทริกที่ดี เนื่องจากบริเวณที่จะทำการศึกษาต่อไปนี้จะใกล้เคียงกับบริเวณที่มีผู้ศึกษาและอาจจะเป็นบริเวณที่เกิดเฟสร่วมกันสองเฟสซึ่งบริเวณเกิดเฟสร่วมกันนั้นจะมีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นที่สุด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเตรียมวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ปราศจากตะกั่วเป็นองค์ประกอบซึ่งจะทำการศึกษาจุดสัณฐานโดยทำการหาค่าเพียโซอิเล็กทริกที่มีค่าสูงที่สุดในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  (BT-CT-BS) โดยที่  $x = 0.0250$   $0.0375$   $0.0625$   $0.0750$   $0.1000$   $0.1125$  ตามลำดับ ซึ่งไม่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบโดยเลือกใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ในการสังเคราะห์เซรามิก โดยงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) และการเปลี่ยนเฟส (Phase Transition) ของสารในระบบดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  เมื่อ  $x = 0.0250$   $0.0375$   $0.0625$   $0.0750$   $0.1000$   $0.1125$  ตามลำดับที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction)

2. เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนองค์ประกอบที่สามารถแสดงสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี หาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจากการสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ไร้สารตะกั่วในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$

3. เพื่อสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดีพิจารณาจากความบริสุทธิ์ ความหนาแน่น และเปอร์เซ็นต์การหดตัว

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction)

2. เตรียมวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกโดยใช้สาร  $\text{BaCO}_3$   $\text{CaCO}_3$   $\text{SnO}_2$   $\text{TiO}_2$  เป็นสารตั้งต้นเตรียมสารในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  เมื่อมีสัดส่วนองค์ประกอบของสารเจือเป็น  $x = 0.0250$   $0.0375$   $0.0625$   $0.0750$   $0.1000$   $0.1125$  ตามลำดับ

3. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเทอร์ที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่เตรียมได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมผงเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่ปราศจากตะกั่วได้ในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  ที่มีความบริสุทธิ์และมีความหนาแน่นสูงด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ได้

2. ทราบถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาซินเทอร์ของสารเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  เพื่อให้ได้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)

3. ทราบถึงสัดส่วนที่เหมาะสมของสารเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  ที่ทำให้เซรามิกในระบบดังกล่าวแสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

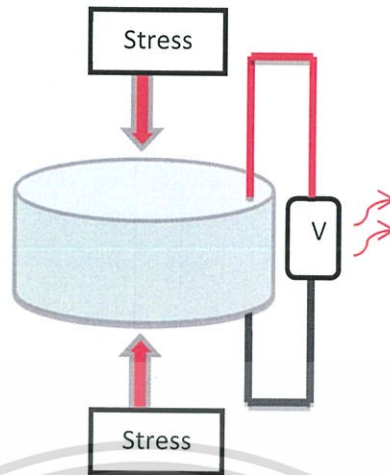
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะนำเสนอข้อมูลที่ได้จากเอกสารทางวิชาการที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วที่มีโครงสร้างผลึกแบบเพอร์รอฟสไกต์ ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสารในระบบแบเรียมไททาเนต-แคลเซียมไททาเนต-แบเรียมทินออกไซด์ (BT-CT-BS) อุณหภูมิและการเปลี่ยนเฟสของแบเรียมไททาเนต รวมถึงงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับสารในระบบดังกล่าวโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

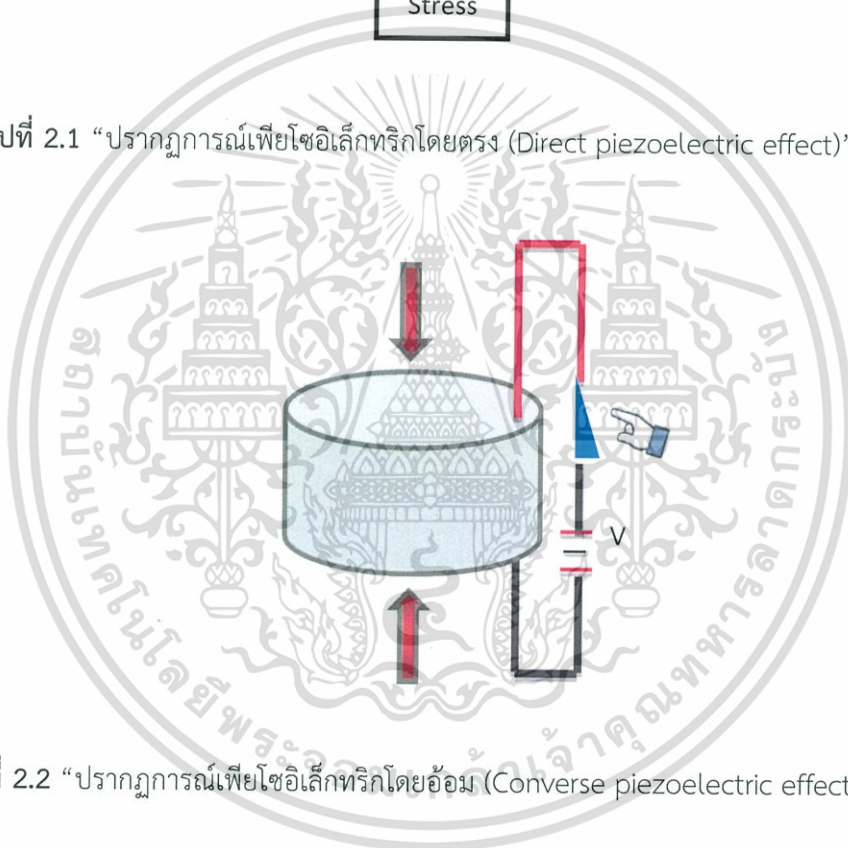
#### 2.1 เพียโซอิเล็กทริก

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric ceramic) นั้น ถูกค้นพบในปี คริสต์ศักราช 1880 โดย Pierre Curies และ Jacques [1] ได้ศึกษาผลของแรงกดต่อการเกิดประจุไฟฟ้าของผลึกควอตซ์ (Quartz) ดีเกลือ (Rochelle Salt) อัญมณี (Tormaline) ว่าสามารถให้กำเนิดไฟฟ้าได้เมื่อมีแรงกดกระทำต่อผลึกโดยเขาเรียกชื่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก” (Piezoelectric Effect) ซึ่งคำว่า “เพียโซ” (Piezo) นั้นมาจากภาษากรีกที่แปลว่า กด ต่อมาในปีคริสตศักราช 1881 Gabriel Lippmann ได้ศึกษาค้นพบปรากฏการณ์ย้อนกลับได้โดยพิจารณาจากหลักเทอร์โมไดนามิกส์คือ ถ้าให้ไฟฟ้าเข้าไปในผลึกผลึกก็จะสั้นได้ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ได้ รับแรงเค้น (Mechanical Stress) จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้า (Electric Charge) หรือการจัดเรียงตัวทางแสงขึ้น (Polarization) เรียกว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรง” (Direct Piezoelectric Effect) เมื่อนำวงจรต่อเข้ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกภายใต้แรงอัดจะมีกระแสไหลเข้าวงจรและหากเปลี่ยนเป็นแรงดึงจะเกิดกระแสไหลในทิศตรงข้าม การประยุกต์จากผลทางตรง เช่น ไมโครโฟนและสัญญาณโซน่า เป็นต้น

ในทางกลับกันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกแล้วนั้นภายในวัสดุจะสามารถเกิดความเครียดซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางอ้อม (Converse Piezoelectric Effect)” ตัวอย่างงานประยุกต์ผลทางอ้อม เช่น อัลตราโซนิค ทรานสดิวเซอร์ แอคชูเอเตอร์ หัวจุดเตาแก๊ส เป็นต้น โดยรูปที่ 2.1 และ 2.2 เป็นการอธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 2.1 “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (Direct piezoelectric effect)” [6]



รูปที่ 2.2 “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม (Converse piezoelectric effect)” [6]

สมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทั้ง 2 ปรากฏการณ์โดยพิจารณาจากสมบัติทางไฟฟ้าและการยืดหยุ่นของวัสดุคือ

$$D = dE + \mathcal{E}^T E \text{ (Generator).....(2.1)}$$

$$S = S^E T + dE \text{ (Motor).....(2.2)}$$

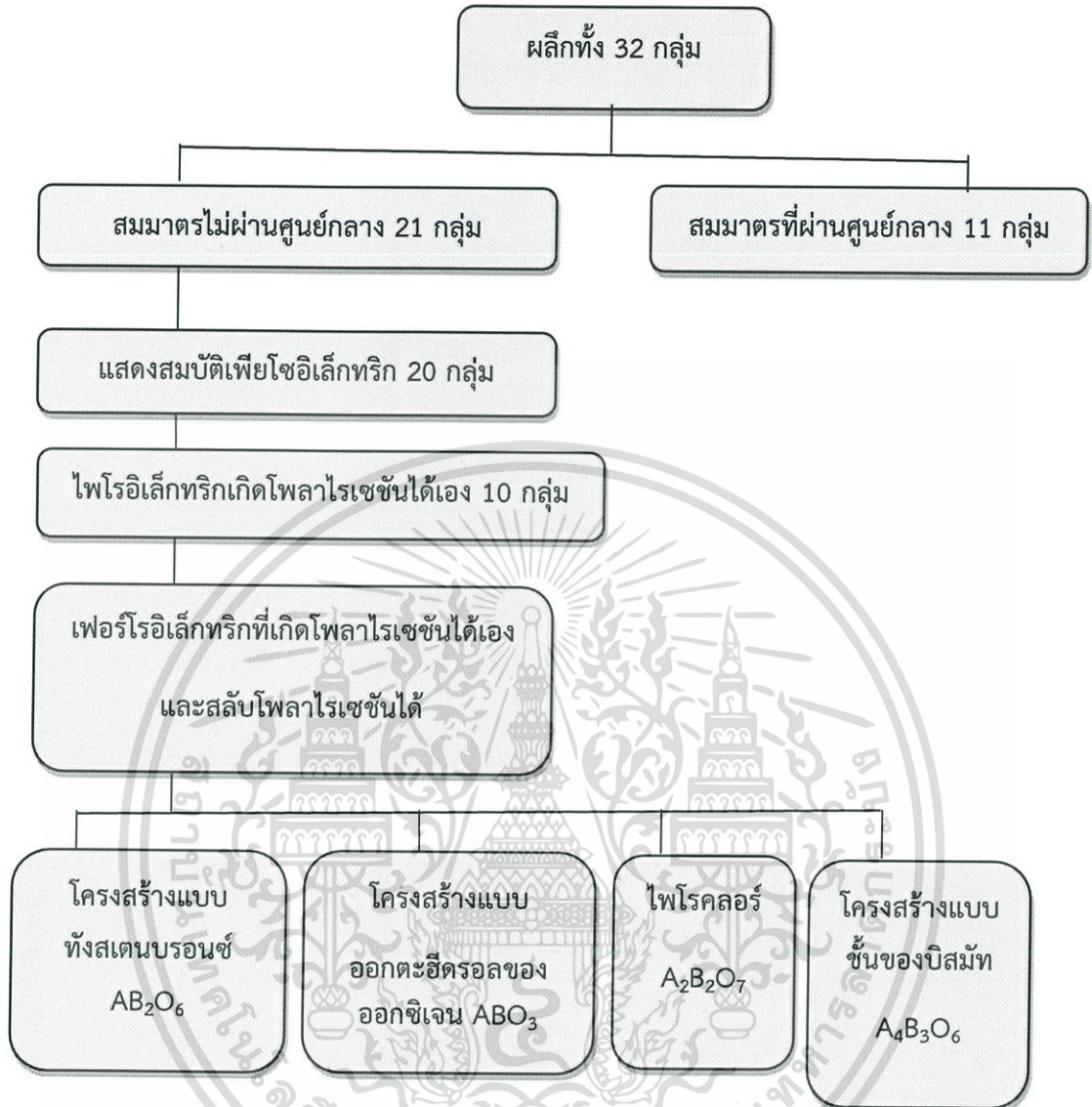
เมื่อ  $D$  คือ ค่าการแทนที่ทางไฟฟ้า (Dielectric displacement)

$T$  คือ ความเค้น (Stress)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- E คือ สนามไฟฟ้า (Electric field)  
 S คือ ความเครียด (Strain)  
 D คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient)  
 $S^E$  คือ สัมประสิทธิ์ความหยุ่นของวัสดุ (Elastic coefficient)  
 (ส่วนกลับของมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น)  
 $\epsilon^T$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity)

โดยตัวยกในสมการทั้งสองนี้แสดงถึงปริมาณที่เป็นค่าคงที่ซึ่ง  $\epsilon^T$  ในสมการที่ 2.1 บ่งบอกว่าความเค้นเป็นค่าคงที่ส่วน  $S^E$  ในสมการที่ 2.2 นั้นมีสนามไฟฟ้าเป็นค่าคงที่จากรูปแบบของสมการทั้งสองนี้จะแสดงถึงความแตกต่างของการจัดเรียงตัวในวัสดุซึ่งจะสัมพันธ์กับสมบัติของวัสดุนั้นๆ นอกจากนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังมีสมบัติที่ขึ้นกับทิศทางจึงต้องมีการระบุเป็นตัวย่อไว้ เพื่อแสดงถึงเงื่อนไขของสภาวะที่กำหนดสำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นต้องการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง เพื่อที่จะนำไปใช้ในอุปกรณ์ที่มีการสั่นและการเคลื่อนไหว เช่น เครื่องสัญญาณสะท้อน (Sonar) และเครื่องสำหรับรับฟัง (Sounder) โดยทั่วไปนักฟิสิกส์ศาสตร์ได้แบ่งผลึก (Crystal) ตามสมมาตรได้ 32 กลุ่มโดยแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่ 11 กลุ่มนั้นมีลักษณะสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง (Centrosymmetry) และอีก 21 กลุ่มนั้นมีลักษณะไม่สมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง (Non-centrosymmetry) ซึ่งผลึกในกลุ่มนี้จะแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก 20 กลุ่ม ส่วนอีก 1 กลุ่ม ไม่แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างที่มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลางเมื่อได้รับแรงกระทำ โดยผลึกเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 20 กลุ่มนี้มีเพียง 10 กลุ่มเท่านั้นที่สามารถเกิดโพลาริเซชันได้เองซึ่งเรียกกลุ่มนี้ว่า สปอนทาเนียสโพลาริเซชัน (Spontaneous polarization) และหากการเกิดโพลาริเซชันนี้สามารถสลับขั้ว (Switching) ไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปได้จะเรียกผลึกกลุ่มนี้ว่า ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) ซึ่งผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนี้สามารถแบ่งย่อยตามโครงสร้างได้ดังนี้ กลุ่มโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite structure) กลุ่มโครงสร้างแบบทังสเตนบรอนซ์ (Tungstenbronze structure) และกลุ่มโครงสร้างแบบชั้นของบิสมัท (Bismuthlayer structure)



รูปที่ 2.3 แผนผังความสัมพันธ์ของผลึกที่เกี่ยวข้องกับเพียโซอิเล็กทริกโดยพื้นฐานสมมาตรผลึก [2][3]

## 2.2 การประยุกต์ใช้งานเพียโซอิเล็กทริก [5]

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถนำไปประยุกต์ในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ได้หลากหลาย โดยขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลง เช่น ใช้ในเครื่องสะท้อนเสียง (Resonator) เมื่อนักดนตรีวางเครื่องบนผิววัสดุไม่ว่าจะเป็นพื้นหิน พื้นไม้ พรหม ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ต่างๆทำให้เครื่องเสียงขึ้นเตี้ยวกันนั้นมีเสียงที่แตกต่างกันไปตามเรโซแนนซ์ของเสียงที่มารบกวน เครื่องสะท้อนเสียงจะช่วยดูดซับเสียงรบกวน วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทนต่อการเปลี่ยนแปลงได้สูง (High frequency transducers) จึงนิยมนำมาใช้ในอุปกรณ์หม้อแปลงซึ่งมีความไวในการตรวจจับสาร (Higher sensitivity) ทำเป็นแก๊สเซ็นเซอร์ (Gas sensor) เครื่องสูบฉีดระดับไมโคร (Micropumps) เป็นส่วนประกอบในปริ้นเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกนำมาใช้อย่างเฉพาะเจาะจงสำหรับการสร้างระบบชิปเดี่ยว (Single chip system) ที่ประกอบด้วยขั้นตอนการตรวจหาประมวลผลและการเชื่อมโยงข้อมูล ตัวอย่างเช่นเซ็นเซอร์ต่างๆ ที่ถูกฝังเป็นครีโอสายบนเครื่องบนที่ทำงานในการตรวจหาแล้วประมวลผลให้เห็นได้โดยผ่านทางจอมอนิเตอร์ อีกทั้งจัดเตรียมการส่งผ่านข้อมูลสู่ศูนย์กลางการควบคุมทั้งทางอากาศและทางภาคพื้นดินเป็นต้นรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นองค์ประกอบ [2] [3] [5]

### 2.3 ไดอิเล็กทริก [6]

วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric) เป็นวัสดุที่มีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรม โดยทั่วไปแล้ววัสดุไดอิเล็กทริกจะมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่จะแตกต่างจากฉนวนไฟฟ้าโดยทั่วไปคือ การมีสมบัติของการเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งค่าความสามารถในการกักเก็บประจุไฟฟ้าของสารไดอิเล็กทริกนี้จะเรียกว่าค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) โดยเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สารไดอิเล็กทริกสารจะเกิดโพลาไรเซชันขึ้นซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลรวมของโพลาไรเซชันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Net polarization/Unit volume)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ามีค่าโพลาไรเซชันสูงจะส่งผลให้สารไดอิเล็กทริกมีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้นไปด้วยสารบางประเภทที่มีการจัดเรียงตัวเองได้โดยไม่ต้องมีสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำ แต่สามารถใช้สนามไฟฟ้าภายนอกบังคับทิศทางของขั้วได้โดยเรียกสารประเภทนี้ว่า วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric materials) เช่น แบเรียมไททาเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) [6] เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) โดยคุณลักษณะของสารไดอิเล็กทริกคือ มีความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้า ซึ่งการเก็บพลังงานไฟฟ้าจะถูกแทนที่โดยนำประจุไปเก็บไว้ภายในประจุบวกและลบต่อต้านกับแรงต้านทานโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว จะไม่มีการจัดเรียงตัวจนกระทั่งมีการกระทำจากสนามประจุบวกและลบจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้าม เพื่อต่อต้านแรงดึงดูดและทำให้เกิดขั้วซึ่งอยู่ในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าทั้งชนิดขั้วที่อธิบายโดยไดโพลโมเมนต์ (P) เราจะได้ว่า

$$P = NP \dots \dots \dots (2.3)$$

และเมื่อสารไดอิเล็กทริกถูกโพลาไรซ์ สมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปโดยพิจารณาจาก  
สมการ 2.4

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

เมื่อ D คือ Electric displacement  
E คือ สนามไฟฟ้าในตัวกลาง  
 $\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่า  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

สมบัติอีกอย่างหนึ่งของสารไดอิเล็กทริก คือ มีสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าหรือความซึมซาบทางไฟฟ้า  $\chi$  (Electric susceptibility) ซึ่งกำหนดได้ด้วยสมการ 2.5

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

ในสุญญากาศไม่เกิดโพลาไรเซชัน ( $P = 0$ ) ดังนั้น  $\chi$  เป็นศูนย์ด้วย เพราะฉะนั้น D จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าภายนอกเท่านั้น ถ้าสนามไฟฟ้าภายนอกเป็น  $E_0$

$$D = \epsilon_0 E \dots \dots \dots (2.6)$$

จากสมการ 2.5 และสมการ 2.6 จะได้สมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \epsilon_0 E + \epsilon_0 \chi E$$

$$D = \epsilon_0 (1 + \chi) E$$

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \dots\dots\dots(2.7)$$

โดยจะเรียกเทอม  $(1+\chi)$  หรือ  $\epsilon_r$  ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Relative constant) อาจเขียนสมการได้ดังนี้

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

เมื่อ  $\epsilon$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

สารไดอิเล็กทริกมักจะใช้เป็นฉนวนที่ทำหน้าเป็นที่คั่นระหว่างตัวนำของตัวเก็บประจุเพื่อกันหรือให้แรงดันสูงขึ้นกว่าแก๊สรวมทั้งอากาศด้วย โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุที่สารไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าของตัวเก็บประจุอากาศดังสมการ

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

เมื่อ  $C_0$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุสูญญากาศ

$C$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริก  
ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น  $\epsilon_r$

ซึ่งโดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสูญญากาศ  $\epsilon_0$  คือ

$$\epsilon_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \dots\dots\dots(2.10)$$

และจากความสัมพันธ์  $C = Q/V$  สำหรับกรณีที่ไม่มีสารไดอิเล็กทริกจะได้สมการดังนี้

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

เมื่อ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก

$d$  คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริกสำหรับตัวเก็บประจุเก็บ

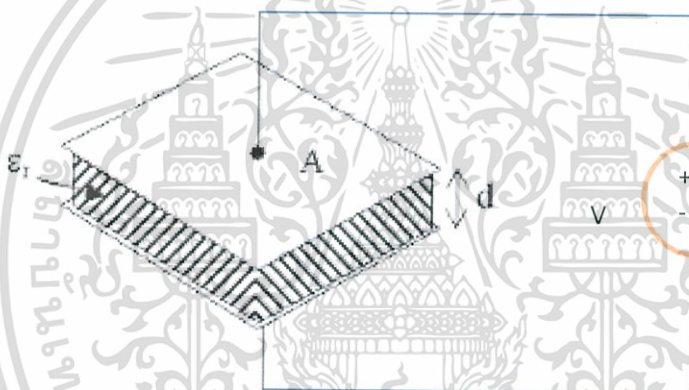
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มวลสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าไดอิเล็กทริกเท่ากับ  $\epsilon_r$  จะได้ว่า

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

ถ้าป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้กับตัวเก็บประจุ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสหน้าหน้าความต่างศักย์เป็นมุม  $90^\circ$  แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเนื่องจากการที่ไดอิเล็กทริกต้านทานไฟฟ้าไม่ถึงอนันต์ ทำให้เกิดเฟสกระแสไฟฟ้านำหน้าความต่างศักย์น้อยกว่า  $90^\circ$  เรียกว่า แผลงเตอร์การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss)

### 2.3.1 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ )



รูปที่ 2.5 ตัวเก็บประจุลบ [6]

จากรูปที่ 2.5 เป็นวงจรการทำงานของตัวเก็บประจุอย่างง่ายโดยแผ่นขนานที่ทำด้วยโลหะโดยมีระยะห่างเท่ากับ  $d$  พื้นที่ของแผ่นเท่ากับ  $A$  ระหว่างแผ่นขนานเป็นสุญญากาศ เมื่อมีศักย์ไฟฟ้า  $V$  คร่อมแผ่น ขนานโดยที่แผ่นโลหะแผ่นหนึ่งจะเป็นแผ่นประจุ  $+Q$  และอีกแผ่นหนึ่งจะเป็นประจุ  $-Q$  ค่าประจุนี้จะเป็นสัดส่วนกับ  $V$  ดังสมการ 2.13

$$Q = CV \dots \dots \dots (2.13)$$

เมื่อ  $C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) มีหน่วยเป็น  
คูลอมบ์ต่อโวลต์ (C/V) หรือ ฟารัด (F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจุไฟฟ้าบอกถึงความสามารถในการเก็บประจุ ยิ่งมีความจุไฟฟ้ามากยิ่งเก็บประจุได้มาก ถ้าตัวเก็บประจุมีขนาดพื้นที่หน้าตัดมากกว่าระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนาน และการมีไดอิเล็กทริกอยู่ในตัวเก็บประจุจะช่วยเพิ่มพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุให้สามารถสร้างตัวเก็บประจุขนาดเล็กแต่มีค่าความจุไฟฟ้าสูงได้

### 2.3.2 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ( $\tan\delta$ )

ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss,  $\tan\delta$ ) สำหรับวัสดุเซรามิกเป็นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการให้พลังงานไฟฟ้าแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นรูปแบบอื่นๆ เช่น เปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน เป็นต้น ซึ่งได้จากสัดส่วนของความได้เปรียบทางพลังของวงจรแผ่นตัวนำคู่ขนานและสามารถวัดได้จากวงจรอิมพีแดนซ์ ซึ่งปริมาณของค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นสามารถประมาณได้ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

## 2.4 โครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ [8] [9]

โครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) เป็นชื่อที่เรียกกันตามแร่แคลเซียมไททานेट ( $\text{CaTiO}_3$ ) มีสูตรโครงสร้างทั่วไปเป็น  $\text{ABO}_3$  เมื่อ A และ B เป็นไอออนบวกซึ่งมีขนาดไอออนใหญ่และเล็กตามลำดับ โครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์มีพื้นฐานมาจากหน่วยเซลล์แบบ FCC (Face center cubic) ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของ  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Ti}^{4+}$  และ  $\text{O}^{2-}$   $\text{Ca}^{2+}$  ไอออนอยู่ที่ตำแหน่ง A และ  $\text{O}^{2-}$  ไอออนอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแต่ละหน้าของคิวบิก ส่วน  $\text{Ti}^{4+}$  ไอออนอยู่ตรงกลางของยูนิตเซลล์สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์จะรวมไปถึงพวกสารประกอบในกลุ่มไททานेट (Titanates) หลากๆ ชนิดที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์เซรามิก เช่น  $\text{BaTiO}_3$   $\text{SrTiO}_3$  และ  $\text{PbTiO}_3$  สารประกอบในกลุ่มเซอร์โคเนต (Zirconates) เช่น  $\text{PbZrO}_3$  และ  $\text{BaZrO}_3$  สารประกอบในกลุ่มอื่นๆ เช่น  $\text{LaGaO}_3$   $\text{LaAlO}_3$  และ  $\text{KNbO}_3$  เป็นต้น นอกจากนี้โครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ยังจัดเป็นส่วนประกอบย่อยของหน่วยโครงสร้างที่อยู่ภายในโครงสร้างที่มีความสลับซับซ้อนบางประเภทอย่างเช่น สารตัวนำยวดยิ่ง (Superconductor) อีกด้วย

## 2.5 แบเรียมไททานेट [8]

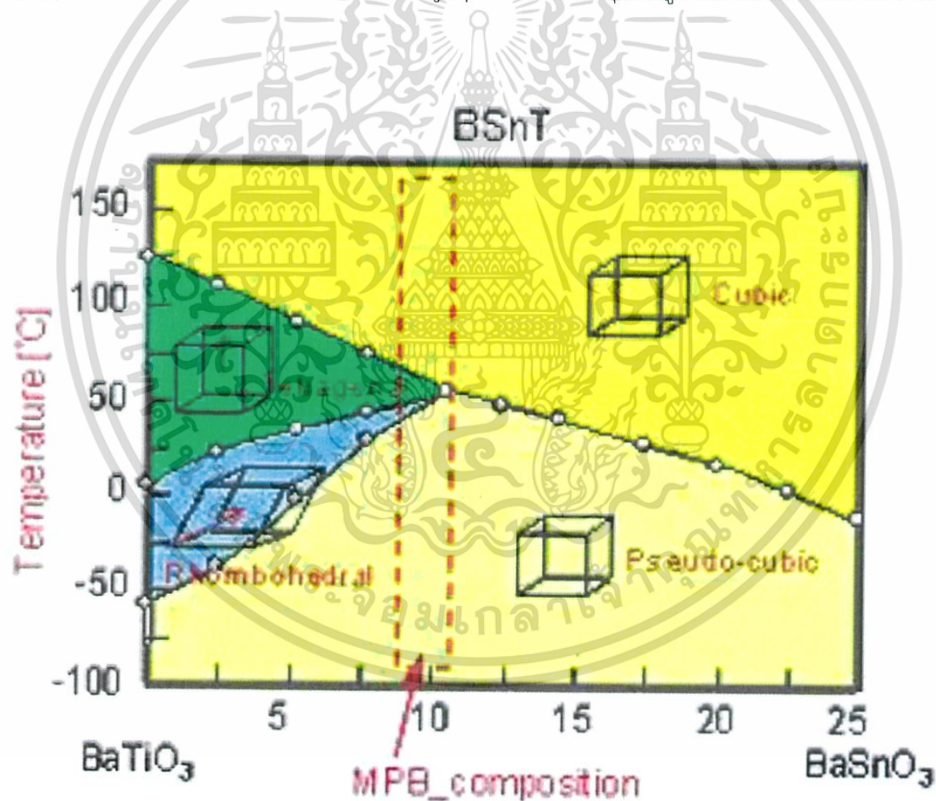
แบเรียมไททานेट ( $\text{BaTiO}_3$ ) เป็นสารกลุ่มไม่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบที่มีการค้นพบพฤติกรรมเพอร์โรอิเล็กทริก มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเกิดขึ้นส่งผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าและมีโครงสร้างจุลภาคแบบเพอร์รอฟสไกต์ที่อุณหภูมิเหนือคูรี (ประมาณ  $130^\circ\text{C}$ ) สูงขึ้น หน่วยเซลล์ของ  $\text{BaTiO}_3$  จะเป็นแบบลูกบาศก์ (Cubic) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดคูรีลงมานั้นโครงสร้างของ  $\text{BaTiO}_3$  จะเกิดการบิดเบี้ยวขึ้นเล็กน้อย เข้าสู่รูปแบบของเตตระโกนอล (Tetragonal) และจะมีโมเมนต์ขั้วคู่เกิดขึ้นมาทิศทางด้านแนวแกน C ส่วนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอื่นนั้นจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 0 องศาเซลเซียส และ 80 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ยูนิตเซลล์จะเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) โดยมีแกนเชิงซ้าย วางตามแนวทแยงมุมผ่านกลางหน่วยเซลล์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอย่างสอดคล้องตลอดจนถึงเกิดการโพลาไรเซชันขึ้นเอง ในทางปฏิบัติแล้ว ไดอิเล็กทริกที่สนามไฟฟ้าขึ้นกับกระบวนการเตรียมและตัวแปรอื่นๆ

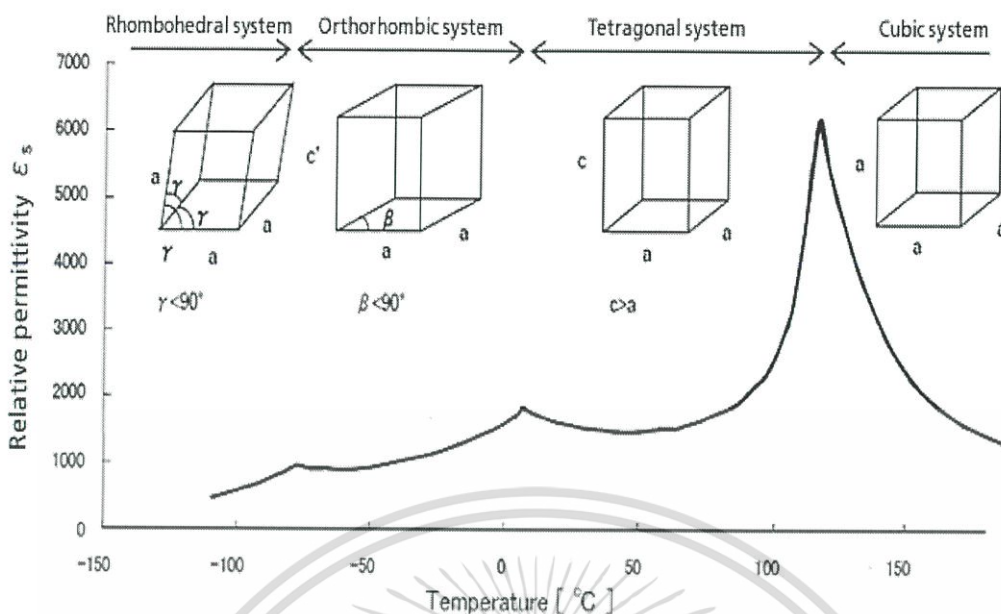
## 2.6 อุณหภูมิและการเปลี่ยนเฟส

ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกสามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสได้หลายเฟสตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป มีผลต่อลักษณะทางแม่เหล็กด้วย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมเกิดการสั่น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกไปจากเดิม โดยอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของโครงสร้างผลึกจะเรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase transition temperature) สำหรับวัสดุที่มีสภาพเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นควิบิกพาราอิเล็กทริก จะเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature หรือ  $T_C$ ) ที่อุณหภูมิคูรีมีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงสุดและยังเป็นอุณหภูมิที่เป็นตัวกำหนดในการใช้งาน



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคูรีของ BSnT [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของผลึกแบเรียมไททาเนต [9]

## 2.7 มาตรการควบคุมผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของสหภาพยุโรป [3]

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อให้สามารถแข่งขันกับผู้ผลิตอื่นได้ในตลาดโลกปัจจุบันนั้น ผู้ผลิตจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบพื้นฐานหลายด้าน เช่น ความต้องการของตลาด ประสิทธิภาพความปลอดภัย กฎระเบียบภายในประเทศ และข้อกำหนดเฉพาะของประเทศคู่ค้า เป็นต้น นอกเหนือจากมาตรฐานคุณภาพสินค้าและมาตรฐานด้านความปลอดภัยแล้วประเทศต่างๆ ได้เริ่มหันมาให้ความสนใจและจริงจังต่อปัญหาผลกระทบของสินค้าต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ความเข้มงวดในด้านการใช้วัตถุดิบและการใช้สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมของประเทศคู่ค้าสำคัญที่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ประกอบกับแนวโน้มในการบริโภคสินค้าที่อนุรักษ์สิ่งแวดล้อมของผู้บริโภคที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ผู้ผลิตต้องหันมาปรับปรุงเพื่อเปลี่ยนภาพลักษณ์ของสินค้าให้เป็น "ผลิตภัณฑ์สะอาด" เพื่อให้สามารถแข่งขันในตลาดเสรีได้ โดยสหภาพยุโรปซึ่งเป็นตลาดการค้าที่สำคัญของโลกได้ออกมาตรการในการควบคุมการทิ้งและทำลายซากจากผลิตภัณฑ์อุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อควบคุมปริมาณขยะสารพิษจากซากขยะที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และสารพิษที่เป็นองค์ประกอบในอุปกรณ์เหล่านั้นที่ส่งเข้ามายังสหภาพยุโรปดังนี้

### 2.7.1 ระเบียบเศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ [3]

ระเบียบเศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Waste Electric and Electronic Equipment หรือ WEEE) เป็นระเบียบการจัดการซากเครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ระเบียบนี้มีผลบังคับใช้ภายในประเทศสมาชิกสหภาพยุโรปภายใน วันที่ 13 สิงหาคม 2547 วัตถุประสงค์ของระเบียบนี้เพื่อวางมาตรการในการป้องกันการเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษซากผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ส่งเสริมการนำชิ้นส่วนวัสดุกลับคืน (Recovery) และการใช้ซ้ำหรือการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) โดยผ่านระบบการรับคืน (Return) และการจัดเก็บรวบรวม (Collection) ของผู้ผลิตและเพื่อลดความเสี่ยงและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการกำจัด ขี้ขาก ระเบียบ WEEE นี้พัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักความรับผิดชอบของผู้ผลิตในกลุ่มประเทศสหภาพยุโรปใช้วิธีกำหนดมาตรฐานขั้นต่ำในการจัดการเศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์และกำหนดเป้าหมายขั้นต่ำในการ Recovery/Reuse/Recycle และใช้กลไกตลาดเป็นเครื่องมือในการบังคับให้ผู้ผลิตหากลยุทธ์ในการจัดการกับซากผลิตภัณฑ์ที่หมดอายุให้มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด โดยการกำหนดให้ผู้ผลิตต้องเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการกำจัดทั้งหมด

### 2.7.2 ระเบียบว่าด้วยการจำกัดการใช้สารอันตรายบางชนิดในผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ [3]

ระเบียบว่าด้วยการจำกัดการใช้สารอันตรายบางชนิดในผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Restriction of use of certain Hazardous Substance in electrical and electronics equipment หรือ RoHS) เป็นระเบียบการจำกัดการใช้สารอันตรายบางชนิดในเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นระเบียบของสหภาพยุโรปซึ่งประกาศอย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 27 มกราคม 2546 และมีผลการบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2549 โดยระเบียบนี้มีวัตถุประสงค์ในการจำกัดการใช้สารอันตรายที่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในสินค้าเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้สามารถจัดการซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ได้ปลอดภัยมากยิ่งขึ้น สารอันตรายต้องห้ามนำเข้า 6 ชนิด ในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่จะนำเข้าสหภาพยุโรป ซึ่ง ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) เฮกซะโครเมียม ( $Cr^{6+}$ ) โพลีโบรมิเนท-ไบฟีนิล (PBB) และโพลีโบรมิเนท-ไดฟีนิล-อีเธอร์ (PBDE) แต่อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่สามารถหาสารอื่นทดแทนได้ก็สามารถใช้สารทั้ง 6 ประเภทดังกล่าวได้แต่ต้องมีในปริมาณความเข้มข้นจำกัดดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายต้องห้าม 6 ชนิด

สาร	ปริมาณความเข้มข้น
ตะกั่ว (Pb)	100
ปรอท (Hg)	1000
แคดเมียม (Cd)	1000
เฮกซะโครเมียม ( $Cd^{6+}$ )	1000
โพลีโบรมิเนท-ไบฟีนิล (PBB)	1000
โพลีโบรมิเนท-ไดฟีนิล-อีเธอร์ (PBDE)	1000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากระเบียบทั้งสองส่งผลกระทบต่อผู้ประกอบการอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีสารประกอบ PZT เป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ซึ่งใน PZT มีสารตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นจึงเกิดมีการค้นคว้าหาสารเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกเพื่อมาทดแทน PZT

## 2.8 กระบวนการเตรียมผงด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

การเตรียมเซรามิกที่นิยมกันมากที่สุดคือ การเตรียมเซรามิกจากการใช้ผง (Powders) เป็นวัตถุดิบ ซึ่งคุณภาพของผงที่นำมาใช้นั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของเซรามิกที่ได้โดยจะพิจารณาขนาด (Size) รูปร่าง (Shape) การแจกแจงของขนาด (Size distribution) สถานะของการรวมกลุ่มกัน (State of agglomeration) องค์ประกอบทางเคมีของสาร (Chemical composition) องค์ประกอบของเฟส (Phase composition) โครงสร้าง (Structure) และสมบัติทางเคมีของพื้นผิว (Chemical properties of surface) ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของอนุภาคผง เพื่อความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการผลิตเป็นเซรามิกต่อไป

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งสำหรับเตรียมผง ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปโดยมีข้อดีคือ อุปกรณ์ที่ใช้ไม่ซับซ้อน ราคาถูก และสามารถเตรียมได้ในปริมาณมาก แต่มีข้อเสียคือ สารผสมที่ได้ไม่ค่อยเป็นเนื้อเดียวกัน มีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค (Agglomerate) และอาจจะมีสิ่งปนเปื้อน (Impurity) ได้ง่ายจากกระบวนการเตรียม โดยกระบวนการเตรียมผงวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งนั้น มีขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอนดังนี้

### 2.8.1 กระบวนการบดย่อยผสมด้วยเครื่องบดสารด้วยแรงสั่น [4]

กระบวนการเตรียมผงให้มีขนาดเล็กด้วยการทำให้อนุภาคขนาดใหญ่แตกออกโดยอาศัยแรงกลเรียกว่า การบด (Commination) กระบวนการบดนี้ได้รับความนิยมสูง ในการนำมาใช้เพื่อลดขนาดอนุภาคผงเฉลี่ยใช้ทำลายอนุภาคผงที่มีรูพรุนหรือสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ข้างในให้แตกออก ช่วยปรับพฤติกรรมแจกแจงอนุภาคด้วยการลดขนาดของอนุภาคที่โตที่สุดลง ทำให้จำนวนของอนุภาคขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ช่วยปรับปรุงรูปร่างของอนุภาค ช่วยแยกกลุ่มก้อนหรือกระจุกอนุภาคออกจากกัน และนอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการผสมอนุภาคผงต่างชนิดกันให้เกิดการผสมผสานเข้าไปพร้อมๆ กับการลดขนาดของอนุภาคเครื่องบดสารด้วยแรงสั่น (Vibration Mill) เป็นเครื่องมือบดที่อาศัยการสั่นให้ลูกบดที่ใส่บดกระแทกเข้ากับวัตถุดิบ รวมทั้งการกระแทกกันเองของวัตถุดิบเองด้วย เป็นเครื่องบดวัสดุเซรามิกให้มีขนาดละเอียดเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ โดยเครื่องประกอบด้วยจานรองหมุนด้วยความเร็วสูงมีวงแหวนกลิ้งอยู่บนจานทำให้เกิดการกระแทกและเสียดสี จะมีแท่นแบบคั่นโยกเพื่อสะดวกต่อการยึดหม้อบดกับแท่นบดผงละเอียดในเวลา 2 - 3 นาที และสามารถบดอนุภาคไม่น้อยกว่า 12 มิลลิเมตร สามารถทำการบดทั้งแบบเปียกและแบบแห้งซึ่งสามารถให้ความละเอียดสุดท้าย 10 - 20 ไมโครเมตร จานและวงแหวนทำจากวัสดุพิเศษ 11 - 12%Cr บดได้อย่างน้อยครั้งละ 250 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 เครื่องบดสารด้วยแรงสั่น (Vibration Mill) [5]

### 2.8.2 ปฏิริยาสถานะของแข็ง [3]

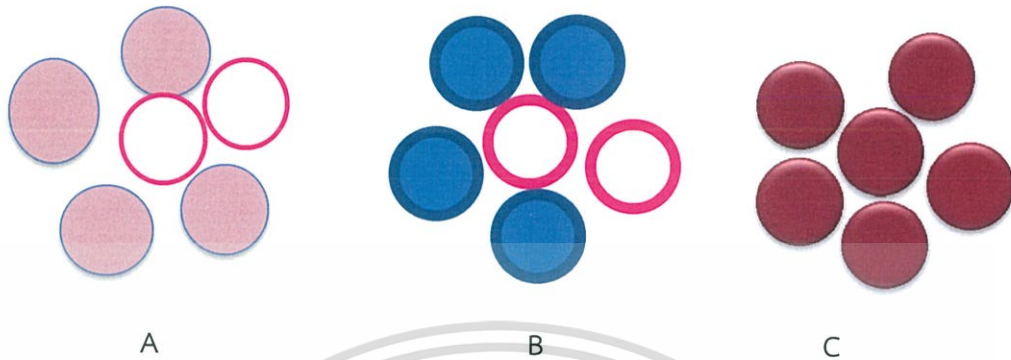
การเตรียมผงของสารประกอบออกไซด์อย่างง่ายนิยมใช้วิธีปฏิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ซึ่งจะให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็ง เพื่อทำให้เกิดการสลายตัวหรือเกิดการทำปฏิริยากันระหว่างสารตั้งต้นต่างชนิดกัน แล้วเกิดเป็นของแข็งชนิดใหม่ขึ้นมา โดยเรียกกระบวนการดังกล่าวว่าการแคลไซน์ (Calcination) ซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้สารตั้งต้นเกิดอันตรปฏิริยาต่อกัน โดยอาศัยการแพร่ระหว่างกันของไอออน ซึ่งช่วยลดขอบเขตของการแพร่ในขั้นตอนการซินเทอร์ได้โดยการสลายตัวนั้นจะถูกควบคุมด้วยปัจจัยทางจลน์พลศาสตร์ต่างๆ ซึ่งปัจจัยทางจลน์พลศาสตร์ของการสลายตัวนั้น อาจถูกควบคุมจากหนึ่งในสามของกระบวนการต่อไปนี้คือ

- (1) ปฏิริยาพื้นผิว
- (2) การถ่ายเทความร้อนไปยังพื้นผิวที่เกิดปฏิริยา
- (3) การแพร่ของแก๊ส หรือการซึมผ่านจากพื้นผิวที่เกิดปฏิริยาเข้าไปตามช่องรูพรุนในชั้นต่างๆของผง

นอกจากนี้ยังขึ้นกับลักษณะธรรมชาติทางเคมีของตัวทำปฏิริยาด้วย ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิริยาสถานะของแข็งระหว่างอนุภาคผงของตัวทำปฏิริยานั้นมีหลายอย่าง เช่น ธรรมชาติทางเคมีของตัวทำปฏิริยาระหว่างสารที่เกิดขึ้นใหม่ ขนาดของอนุภาค ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ความแตกต่างของขนาดอนุภาคในผงผสม ความเป็นเนื้อเดียวกันของผงผสม สภาวะของบรรยากาศ อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิริยาโดยที่อัตราการเกิดปฏิริยาจะลดลง เมื่อขนาดของตัวทำปฏิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะทางของการแพร่เพิ่มขึ้นและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิริยาก็เพิ่มขึ้น การเตรียมผงด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายน้อย แต่จะเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคผงทำให้ต้องใช้กระบวนการบดย่อยมาช่วยในการลดขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะทำให้เกิดสิ่งเจือปนเนื่องจากเศษของลูกบดปะปนมาก นอกจากนี้การควบคุมขนาดอนุภาค เนื่องจากการบดทำได้ยาก



รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) เมื่อ (A) ผงผสมกันอยู่ก่อน การเกิดปฏิกิริยา (B) มีการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นบางส่วน และ (C) เมื่อปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ [3]

## 2.9 กระบวนการอัดผง [3]

กระบวนการอัดวัตถุดิบของเซรามิกที่อยู่ในรูปของอนุภาคสามารถถูกกดอัดได้ในสภาวะแห้ง เหนียวในแม่แบบโลหะ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างลักษณะตามที่ต้องการโดยที่กระบวนการอัดแน่นในแนวแกนเดียว (Uniaxial) จะใช้วิธีการอัดผงในแม่พิมพ์ด้วยแรงทิศทางเดียวขึ้นรูปได้เฉพาะรูปร่างที่ไม่ซับซ้อนเท่านั้น สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปได้นั้นก็จะถูกเผาซินเทอร์ (Sintered) เพื่อให้ได้ความแข็งแรงและโครงสร้างตามที่ต้องการ ในระหว่างเผาชินงานจะมีการหดตัวปริมาณรูพรุนลดลง กระบวนการอัดแกนเดียวถูกใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว มีความสม่ำเสมอและอัตราการผลิตสูง ราคาถูก



รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนการอัดขึ้นรูปแบบอัดแกนเดียว [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 เครื่องอัดแกนเดี่ยวแบบไฮดรอลิก

## 2.10 กระบวนการเผาซินเทอร์ [3]

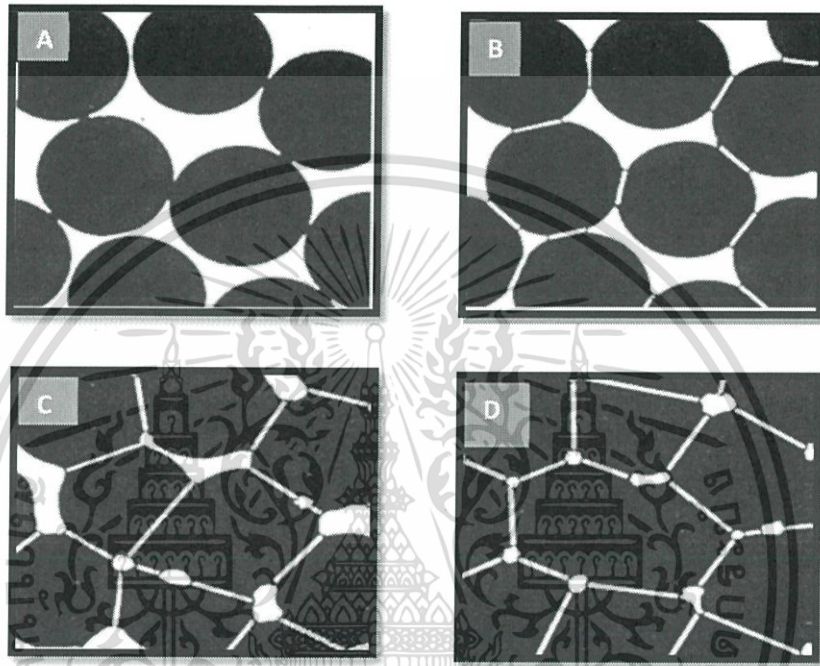
กระบวนการเผาซินเทอร์ (Sintering) เป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้ผงที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วเกิดกระบวนการแน่นตัว เกิดการสร้างพันธะกันอย่างสมดุล แล้วกลายเป็นเซรามิกที่มีความแข็งแรงพอที่จะคงรูปร่างที่ได้ขึ้นรูปเอาไว้ได้ ทำให้เซรามิกที่ขึ้นรูปได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีพลังงานลดลง ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการใช้อุณหภูมิสูง เพื่อให้อะตอมของสารเกิดการแพร่เข้าไปยึดเกาะกันแน่นยิ่งขึ้นโดยการใช้พลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้อะตอมของสารเกิดการแพร่เข้าหากันทำให้เกิดจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคผลที่ติดกันมากขึ้นที่เรียกว่า คอ (Neck) มีความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยในการเผาซินเทอร์ที่มีเพียงสถานะของแข็ง (Solid solution sintering) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะ คือ

1. การซินเทอร์ช่วงเริ่มต้น (Initial sintering) จะเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวใหม่อีกครั้งของอนุภาคผงภายในชิ้นงานและการเกิดพันธะที่แข็งแรง คือ คอ (Neck) ขึ้นมาที่บริเวณจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคผง ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานในช่วงนี้อาจจะเพิ่มขึ้นจาก 50 - 60% ได้ ซึ่งส่วนใหญ่ก็เนื่องมาจากการแพ็คตัวกันของผงเซรามิกมากยิ่งขึ้น (รูปที่ 2.12 (B))

2. การซินเทอร์ช่วงกลาง (Intermediate sintering) เป็นช่วงที่ขนาดของคอเริ่มเกิดขึ้นเป็นช่วงที่มีการกำจัดรูพรุนแบบเปิด (Open pore) และปริมาณของความพรุนในชิ้นงานจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอนุภาคเริ่มเข้ามาชิดติดกันมากยิ่งขึ้นทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวลงอย่างชัดเจนเริ่มมีเกรนและขอบเกรนเกิดขึ้นพร้อมมีการเคลื่อนที่ของสิ่งต่างๆ เหล่านี้ทำให้เกิดการเติบโตของเกรนบางเกรนขึ้นขั้นตอนนี้จะดำเนินไปเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ช่องว่างของรูพรุนจะเริ่มเกิดการเชื่อมต่อกัน (พวกรูพรุนเปิด) การหดตัวของชิ้นงานจะเกิดขึ้นมากที่สุดในการซินเทอร์ช่วงกลางนี้ และอาจจะทำให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่มีค่าสูงถึงประมาณ 90% ได้ (รูปที่ 2.12 (C))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การซินเทอร์ช่วงสุดท้าย (Final state sintering) เป็นระยะที่มีการกำจัดรูพรุนแบบปิด (Close pore) และซึ่งจะค่อยๆ ถูกกำจัดให้หมดไปจากชิ้นงานอย่างช้าๆ โดยอาศัยกลไกการแพร่ของอากาศจากรูพรุนออกมาตามแนวขอบเกรน แล้วหลุดออกไปจากผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลให้สารตัวอย่างนั้นมีการหดตัวและทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นในการซินเทอร์ช่วงสุดท้ายนี้ (รูปที่ 2.12 (D))



รูปที่ 2.12 แสดงกลไกการรวมกันของอนุภาคในระหว่างกระบวนการซินเทอร์ (A) อนุภาคของผงก่อนเผาซินเทอร์ (B) ระยะแรก (C) ระยะกลาง และ (D) ระยะสุดท้าย [3]

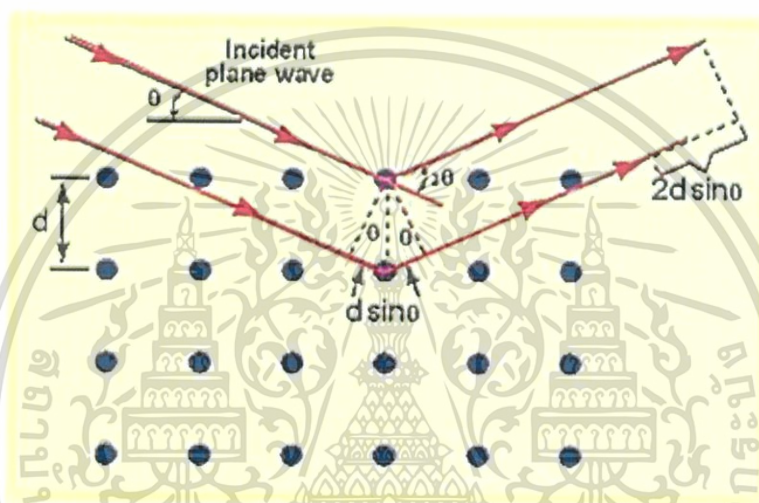
การเกิดคอ (Neck) จำนวนมากและเกรนมีขนาดใหญ่ จะช่วยทำให้ชิ้นตัวอย่างเซรามิกมีความหนาแน่นและแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเทอร์เป็นปัจจัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการเผาแซ่ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเผาซินเทอร์เช่นกัน ซึ่งอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาซินเทอร์นั้นจะมีความเกี่ยวข้องกันอยู่คือ เมื่อใช้อุณหภูมิซินเทอร์สูงๆ อะตอมของสารจะเกิดการแพร่อย่างรวดเร็วทำให้สามารถเตรียมเซรามิกได้โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแซ่สั้น แต่ถ้าใช้อุณหภูมิในการเผาซินเทอร์ต่ำจะทำให้การแพร่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่ถ้าใช้เวลาในการเผาซินเทอร์ที่นานมากพอก็จะเตรียมเซรามิกที่มีความแข็งแรงมากขึ้นก็ได้เช่นกัน

## 2.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD) เป็นเทคนิควิเคราะห์เชิงคุณภาพใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น อยู่ระหว่าง 0.01

แอกซันนี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึง 10 นาโนเมตร จึงเป็นคลื่นที่มีพลังงานมาก มีอำนาจทะลุทะลวงสูงใช้วิเคราะห์หาลักษณะโครงสร้างของธาตุต่างๆ ในสารตัวอย่างเพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างหรือเฟสของผลึกดังนั้นสารตัวอย่างต้องมีโครงสร้างที่มีรูปผลึกหรือโครงสร้างแบบสัณฐาน (Crystalline) เช่น ดิน หินแร่ ปูนซีเมนต์ เซรามิก โลหะ ยาง พอลิเมอร์บางชนิด การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆ โดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ชนิด ปริมาณของสารประกอบแบบผลึกต่างๆ และโครงสร้างในชิ้นงานได้ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก [14]

จากรูปสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg's Law คือ

$$2d \sin \theta = n \lambda \dots \dots \dots (2.14)$$

- เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก
- θ คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- n คือ เลขจำนวนเต็มใดๆ (n = 1, 2, 3, ...)
- λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (1.54056 Å)

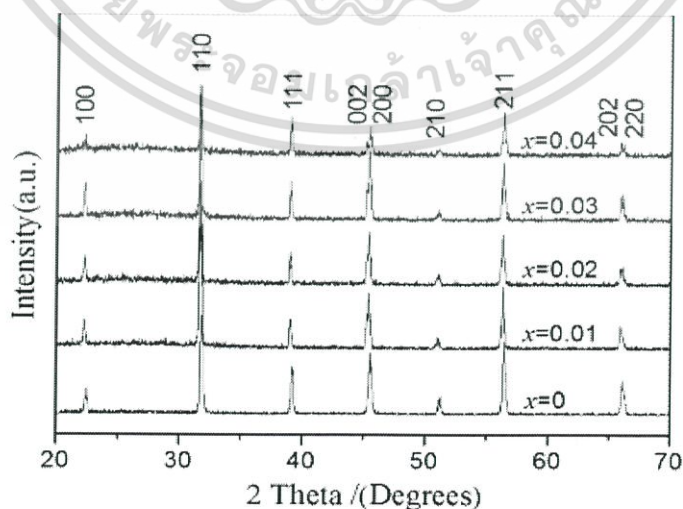
ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ธาตุสามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติ ว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยองค์กร JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอมสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัวเปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน จากหลักการการทำงานของ XRD มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน

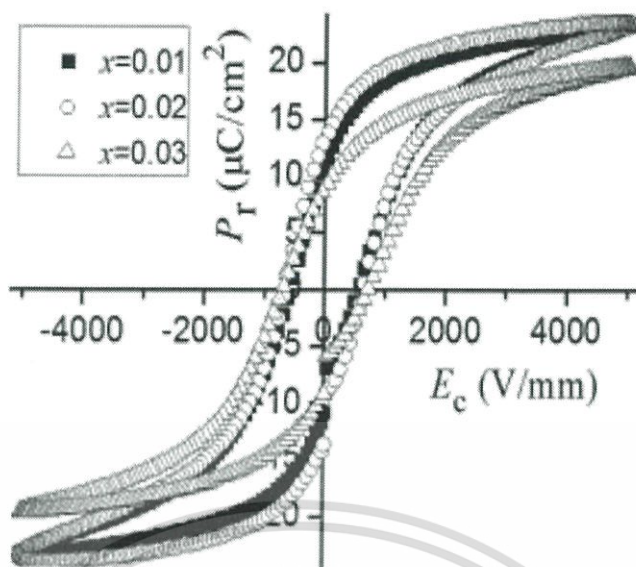
## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2011 Wei Li และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$  : BCTS เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) โดยใช้การเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะแข็ง (Solid state reaction) เป็นเซรามิกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มีสมบัติเด่นทางเพียโซอิเล็กทริก ลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นเฟสของรอมโบฮีดรอล (Rhombohedral) อยู่ร่วมกับเฟสเตตระโกนอล (Tetragonal) จึงได้ศึกษาแบเรียมไททาเนตที่หาธาตุที่จะสามารถเข้ามาแทนที่ตะกั่วจึงเลือกใช้ดีบุก (Sn) แต่ทำให้อุณหภูมิให้การใช้งาน (อุณหภูมิคูรี) ลดลง จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า BCTS ที่มีโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์เกิดการรวมตัวกันของ Ca และ Sn เข้าในโครงสร้างจากปฏิกิริยาสถานะแข็ง โดยสัดส่วนที่  $x=0$  จะเป็นโครงสร้างแบบออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) และเมื่อ Ca เพิ่มขึ้น  $0.01 \leq x \leq 0.03$  จะเกิดการเปลี่ยนจากเฟสโครงสร้างออร์โธรอมบิกเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) อยู่ร่วมกันและเมื่อ  $x=0.04$  จะเปลี่ยนเป็นเฟสเตตระโกนอลทั้งหมด ดังรูปที่ 2.14 วรรณฮีสเทอรีซิสของโพลาริเซชันขึ้นอยู่กับปริมาณของ Ca เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นจะเป็นการบังคับสนามไฟฟ้า (Coercive fields) ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยค่าโพลาริเซชันที่คงเหลือในสนามไฟฟ้าที่สูงที่สุดคือ  $x=0.02$  มีค่า  $13.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  ดังรูปที่ 2.15

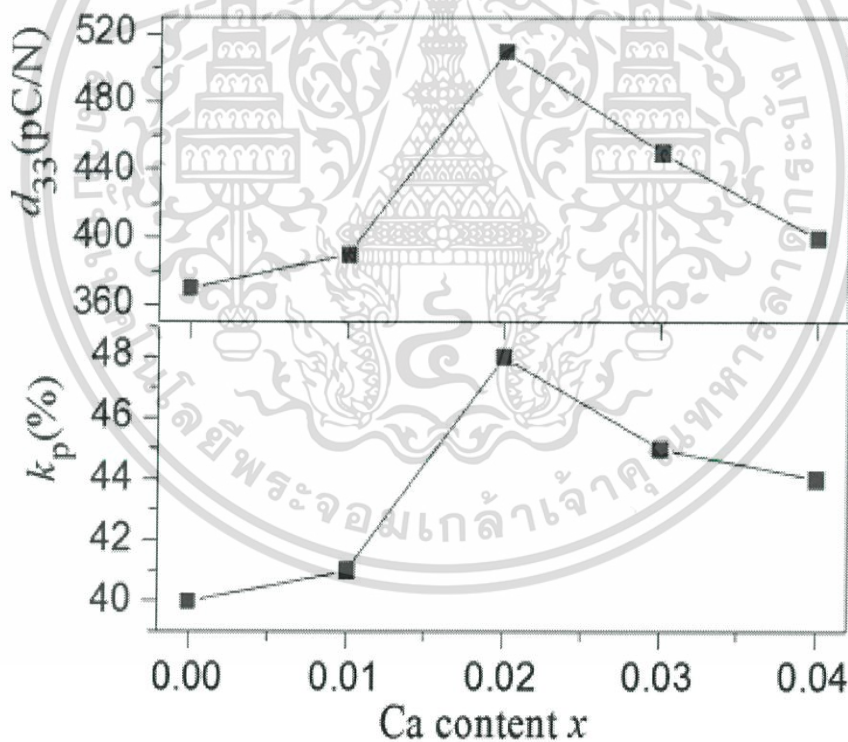


รูปที่ 2.14 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$  [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 กราฟวงวนฮีสเทอรีซิสของโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าของเซรามิกที่อุณหภูมิห้อง [11]

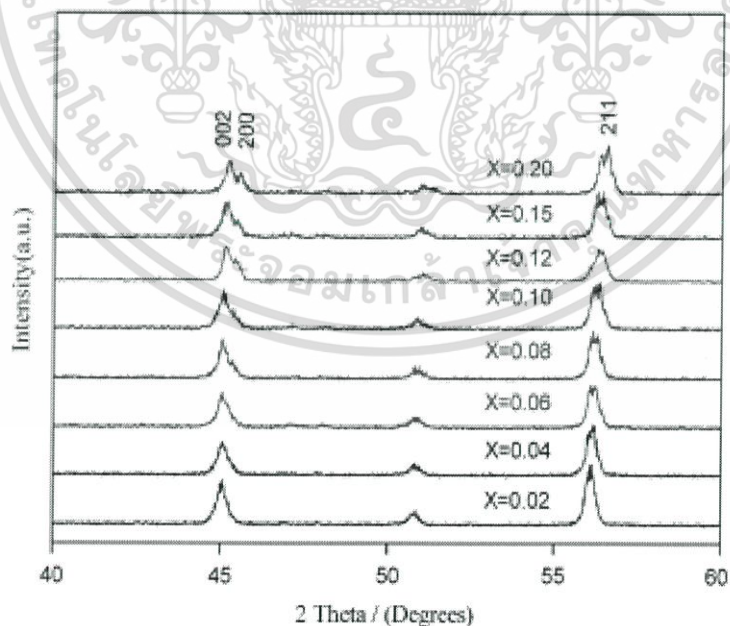


รูปที่ 2.16 กราฟแสดงค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกและค่าแฟกเตอร์การเชื่อมต่อพลังงานกล-ไฟฟ้าของเซรามิกระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$  ที่เป็นฟังก์ชันของปริมาณ [11]

จากกราฟที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติม Ca ถูกเจือเข้าไปในโครงสร้างจะมีผลทำให้ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก ( $d_{33}$ ) และค่าแฟกเตอร์การเชื่อมต่อพลังงานกล-ไฟฟ้า ( $k_p$ ) เพิ่มขึ้นสูงสุดที่  $x = 0.02$  มีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

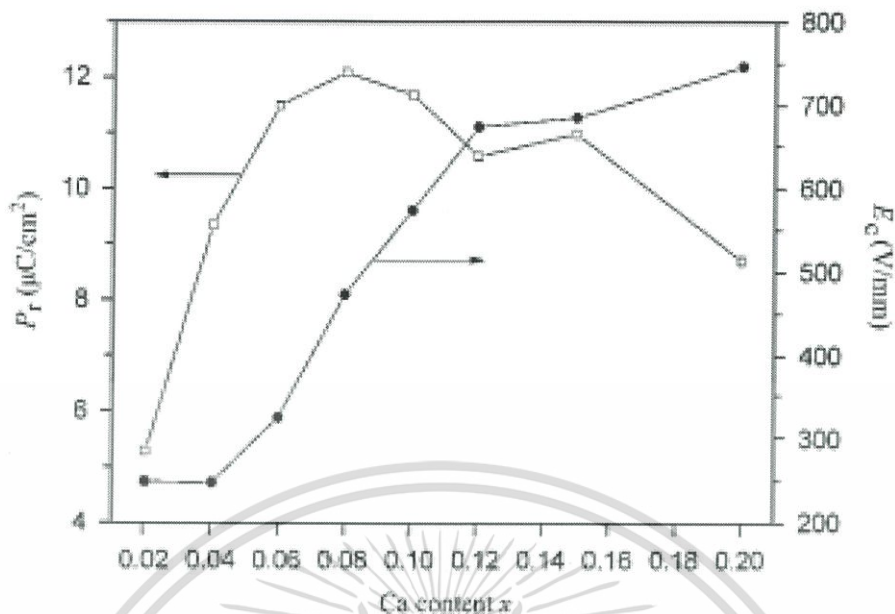
$d_{33} = 510$  pC/N และ  $k_p = 48\%$  เพราะปริมาณเฟสโครงสร้างของออร์โธโรมบิกเปลี่ยนไปเป็นเฟสโครงสร้างเตตระโกนอลยั้งน้อยอยู่จึงยังคงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิห้อง จากการทดลองทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของ BCTS และเลดเซอร์โคเนตไททานต (PZT) โดยใช้วิธีการเตรียมด้วยปฏิกิริยาสถานะแข็ง (Solid state reaction) พบว่าเกิดการเปลี่ยนเฟสจากออร์โธโรมบิกไปเป็นเตตระโกนอล ในสัดส่วนที่  $0.01 \leq x \leq 0.03$  และที่สัดส่วน  $x = 0.02$  มีค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกสูงที่สุด 510 pC/N

ในปี 2011 Wei Li และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.95}\text{Sn}_{0.05})\text{O}_3$  : BCTS โดยใช้วิธีการเตรียมสารตัวอย่างด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) โดยเพิ่ม  $x = 0.02$  0.04 0.06 0.08 0.10 0.12 0.15 และ 0.20 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากเฟสออร์โธโรมบิกไปเป็นเฟสเตตระโกนอลที่  $x \leq 0.06$  โดยช่วง  $2\theta$  ที่  $46.5^\circ$  เป็นพีคของเฟสออร์โธโรมบิก (200) และเมื่อปริมาณ Ca เพิ่มขึ้นในช่วง  $x = 0.08$  0.10 พีคแตกเป็นสองเส้น (002)/(200)  $2\theta$  ที่  $46.5^\circ$  เริ่มจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นเตตระโกนอล  $x \geq 0.12$  เป็นเพราะ  $\text{Ca}^{2+}$  ( $1.12 \text{ \AA}$ ) มีขนาดเล็กกว่า  $\text{Ba}^{2+}$  ( $1.42 \text{ \AA}$ ) จึงทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณ Ca แคลเซียม จะเข้าไปแทรกในโครงสร้างทำให้เฟสมีการเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.17 และจะเห็นได้ว่าเมื่อเราเพิ่ม Ca เรื่อยค่าสนามไฟฟ้าลบล้างจะเพิ่มขึ้นเมื่อ  $x = 0.08$  จะมีโพลาริเซชันคงค้างมีค่าสูงที่สุดถึง  $12.1 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  ดังรูปที่ 2.18 จากกราฟแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่ม Ca เพิ่มขึ้นสามารถบังคับสนามไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.19

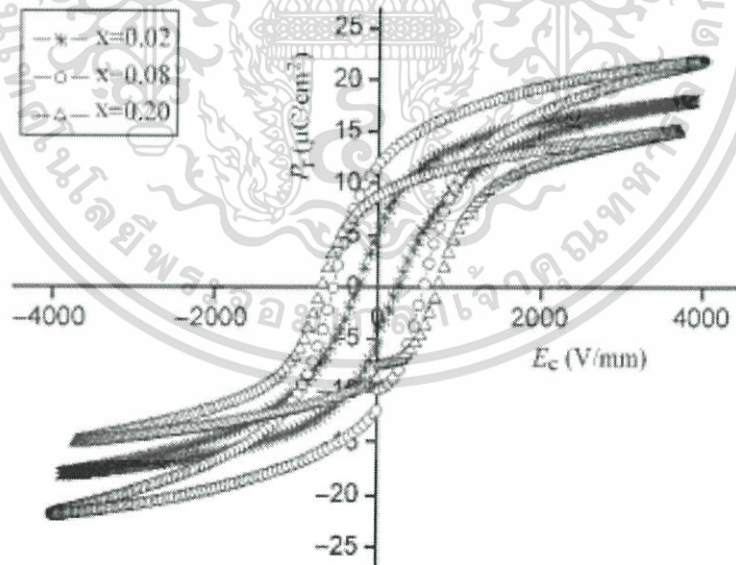


รูปที่ 2.17 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิก [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนกับค่าโพลาริเซชันคงค้าง และค่าสนามไฟฟ้าลบล้างของเซรามิก [12]

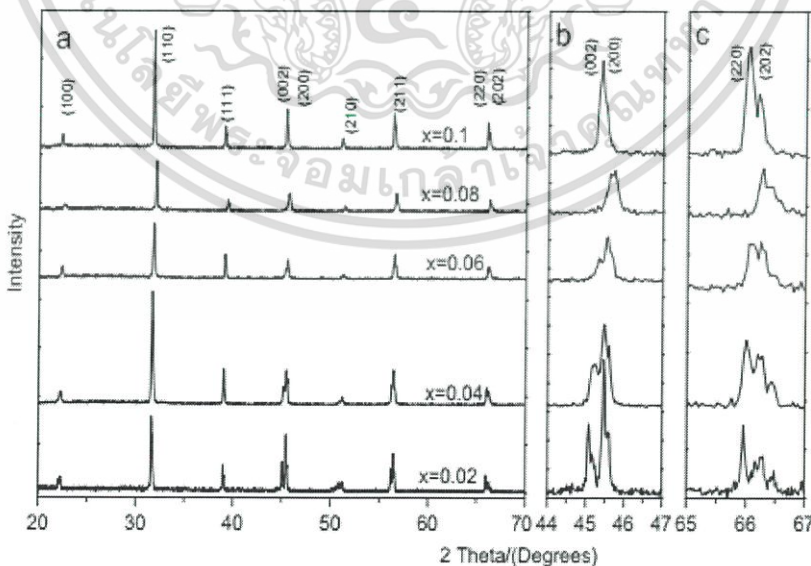


รูปที่ 2.19 กราฟวงวนฮิสเทอรีซิสของโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

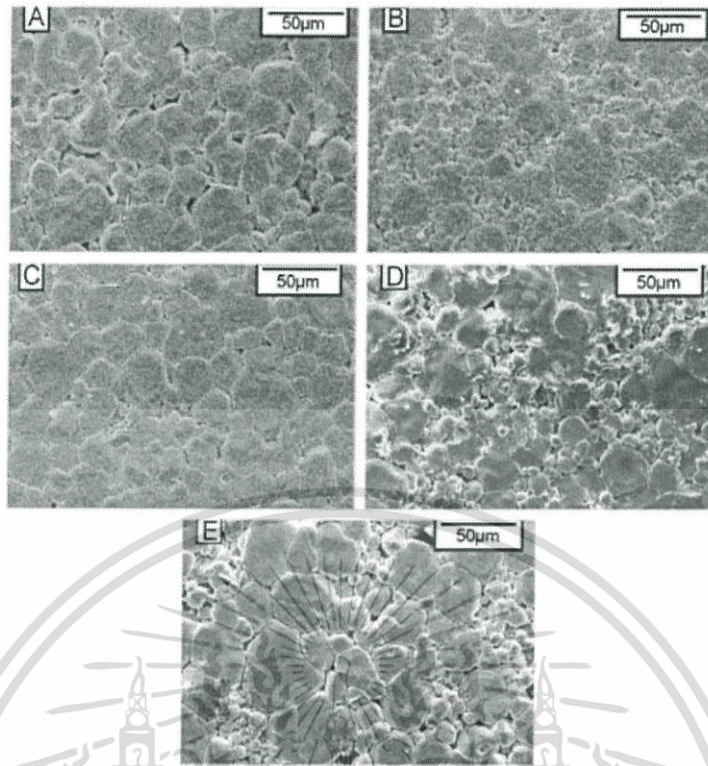
จากการทดลองได้ทำการศึกษาสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกในระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.95}\text{Sn}_{0.05})\text{O}_3$  โดยใช้วิธีการเตรียมสารตัวอย่างด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะแข็ง (Solid state reaction) โดยเพิ่ม  $x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.15$  และ  $0.20$  พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเฟสโครงสร้างจากเฟสออร์โธโรมบิกไปเป็นเฟสเตตระโกนอลที่สัดส่วน  $0.06 \leq x \leq 0.10$  และที่  $x = 0.08$  จะแสดงคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่ดีที่สุดคือ  $d_{33} = 365 \text{ pC/N}$   $k_p = 48.5\%$  และมีอุณหภูมิใช้งาน ( $T_c$ ) ได้สูงถึง  $110^\circ\text{C}$

ในปี 2013 Mingli Chen และคณะ [13] การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสและการศึกษาสมบัติด้านเพียโซอิเล็กทริกของ  $(\text{Ba}_{0.9}\text{Ca}_{0.1})(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)\text{O}_3$  โดยการเจือ Sn ในสัดส่วน  $x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$  เข้าไปในโครงสร้างเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงเฟสและผลทางเพียโซอิเล็กทริกที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงเฟส เตรียมสารโดยใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะแข็งจากรูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่าในช่วง  $2\theta$  ที่  $44 - 47^\circ$  และ  $66 - 67^\circ$  เซรามิกสัดส่วนองค์ประกอบของ  $x = 0.02$  พิคจะแตกเป็นสองพิคซึ่งเป็นพิคเอกลักษณ์ของเตตระโกนอล (002)/(200) และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ Sn ที่  $0.04 \leq x \leq 0.08$  จะเป็นเฟสผสมกันระหว่างเตตระโกนอลและรอมโบอีตรอล  $x = 0.10$  จะเป็นเฟสของรอมโบอีตรอลอย่างเดียวดังรูปที่ 2.20 เมื่อนำมาส่องด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อดูลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่า  $x = 0.02$  จะเริ่มเห็นการเติบโตของแกรน  $x = 0.04$  เห็นการเติบโตของแกรนมีลักษณะของแกรนเล็กผสมแกรนใหญ่เรียกว่า (Bimodal microstructure) เป็นลักษณะของการเติบโตของแกรน โดยที่สัดส่วน  $x = 0.06$  แกรนเริ่มเติบโตจนเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งส่งผลให้เซรามิกมีความหนาแน่นสูงและสมบัติทางไฟฟ้าดีด้วย Sn มีผลต่อการโตของแกรนด้วย เมื่อ Sn มากขนาดของแกรนก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามภาพที่ 2.21

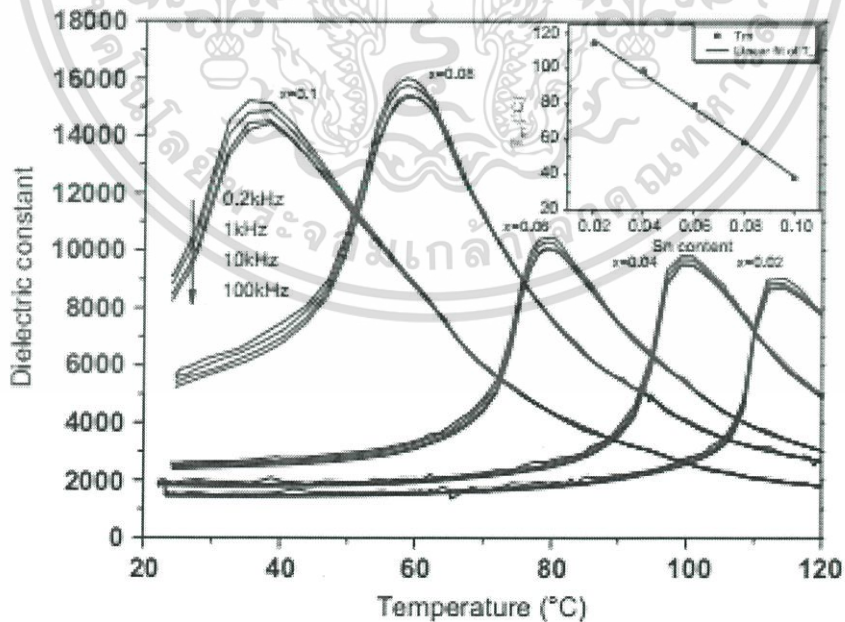


รูปที่ 2.20 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกระบบ  $(\text{Ba}_{0.9}\text{Ca}_{0.1})(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)\text{O}_3$  [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



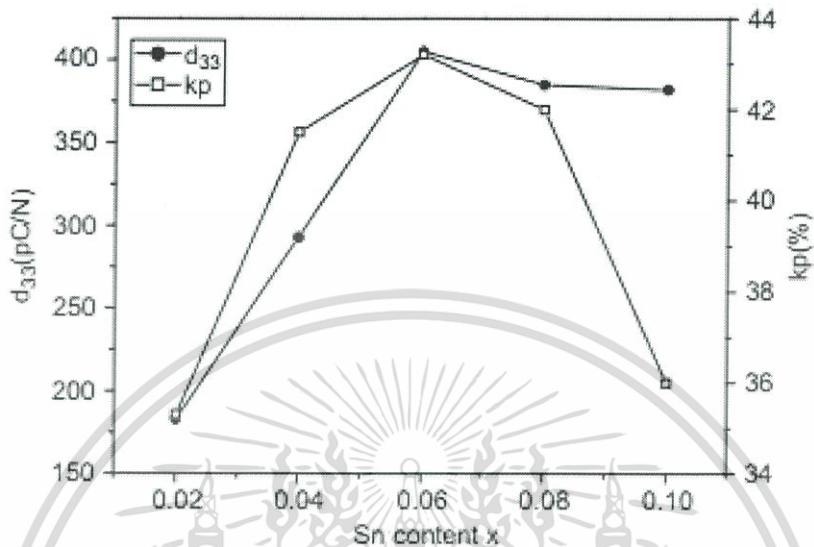
รูปที่ 2.21 แสดงสัณฐานวิทยาของแบเรียมไททาเนตด้วยกลองอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด (A)  $x = 0.02$  : (B)  $x = 0.04$  : (C)  $x = 0.06$  : (D)  $x = 0.08$  : (E)  $x = 0.10$  ตามลำดับ [13]



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.22 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้งานสูงกลับขึ้นจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ลดลงด้วยดังนั้นวัสดุที่เจือด้วย Sn จึงเหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิห้องมากกว่าอุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ [13]

จากกราฟรูปที่ 2.23 อธิบายได้ว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีเฟสอยู่ร่วมกันสองเฟสจะแสดงสมบัติเด่นทางเพียโซอิเล็กทริกดังนั้นสัดส่วนที่มีเฟสอยู่ร่วมกัน  $0.04 \leq x \leq 0.08$  แต่สัดส่วนที่ให้ค่า  $d_{33}$  มากที่สุดคือ  $x = 0.06$  มีค่าเท่ากับ 405 pC/N และค่าแฟกเตอร์การเชื่อมต่อพลังงานกล-ไฟฟ้าเท่ากับ 43.2% ซึ่งมีเฟสเตตระโกนอลอยู่ร่วมกับเฟสโรมโบฮีดรอล

จากทดลองการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสและการศึกษาสมบัติด้านเพียโซอิเล็กทริกของ  $(\text{Ba}_{0.9}\text{Ca}_{0.1})(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)\text{O}_3$  โดยการเจือ Sn ในสัดส่วน  $x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$  พบว่าที่สัดส่วน  $x = 0.06$  จะมีเฟสร่วมกันของเตตระโกนอลและโรมโบฮีดรอลอยู่ร่วมกันทำให้มีค่า  $d_{33}$  มากที่สุดคือ 405 pC/N และค่าแฟกเตอร์การเชื่อมต่อพลังงานกล-ไฟฟ้าเท่ากับ 43.2%

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ผงผลึกบริสุทธิ์ ของสารในระบบแบเรียมไททานเต-แคลเซียมไททานเต-แบเรียมทินออกไซด์  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  : (BT-CT-BS) เมื่อ  $x = 0.0250$   $0.0375$   $0.0625$   $0.0750$   $0.1000$   $0.1125$  ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) จากนั้นนำผงผลึกบริสุทธิ์ที่ได้มาเตรียมเซรามิก เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลทำให้ได้เซรามิกที่มีความหนาแน่นสูง และศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสาร (Crystal structure) สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) และการเปลี่ยนเฟส (Phase transition) ของผงผลึกและเซรามิกที่ขึ้นรูปได้ โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง วัสดุอุปกรณ์ กระบวนการเตรียม และการหาลักษณะเฉพาะทางเซรามิกแสดงไว้ในลำดับต่อไป

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ผงไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ความบริสุทธิ์ มากกว่า 99.9% ผลิตโดยบริษัท Inframat Advanced Materials

3.1.2 ผงแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ความบริสุทธิ์ มากกว่า 98.5 - 100.5% ผลิตโดยบริษัท Sigma-Alarich ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.3 ผงแบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) ความบริสุทธิ์ มากกว่า 99.9% ผลิตโดยบริษัท Inframat Advanced Materials

3.1.4 ผงทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ความบริสุทธิ์ มากกว่า 99.9% ผลิตโดยบริษัท Sigma-Alarich ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.5 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส

3.1.6 เอทานอล ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) ความบริสุทธิ์ มากกว่า 95% ผลิตโดยบริษัท Carlo-Erba ประเทศฝรั่งเศส

3.1.7 กาวเงิน (Silver plate) ผลิตโดยบริษัท Heraeus รุ่น C1000

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ขวดพลาสติกพร้อมฝาปิด

3.2.1 ลูกบิดเซอร์โคเนียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร 250 กรัม

3.2.2 ลูกบิดเซอร์โคเนียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร 250 กรัม

3.2.3 กระดาษฟอยล์ (Foil)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.4 ปีกเกอร์ขนาด 100 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- 3.2.5 แม่เหล็กสำหรับกวนสาร ขนาด 5 เซนติเมตร
- 3.2.6 ซ้อนตักสาร
- 3.2.7 ครกบดสาร (Aqate mortar)
- 3.2.8 ตะแกรงร่อนสาร
- 3.2.9 กระดาษทรายเบอร์ 600
- 3.2.10 เวอร์เนีย
- 3.2.11 เตาเผาให้ความร้อน (Hotplate)
- 3.2.12 แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตร
- 3.2.13 เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 3.2.14 เครื่องบดย่อยผสมสารแบบลูกบด
- 3.2.15 เครื่องขัดสาร (Grinder-polisher )
- 3.2.16 เตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง
- 3.2.17 ตู้อบสาร 200 องศาเซลเซียส
- 3.2.18 แผ่นรองอะลูมินา
- 3.2.19 เครื่องอัลตราโซนิกส์ผลิตโดยบริษัท Fight ประเทศสวีตเซอร์แลนด์
- 3.2.20 เครื่องขัดสาร (Grinder-polisher)
- 3.2.21 เครื่องอัดแกนเดี่ยวแบบไฮดรอลิก
- 3.2.22 เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer : XRD) ผลิตโดยบริษัท Siemens รุ่น D8 Advance

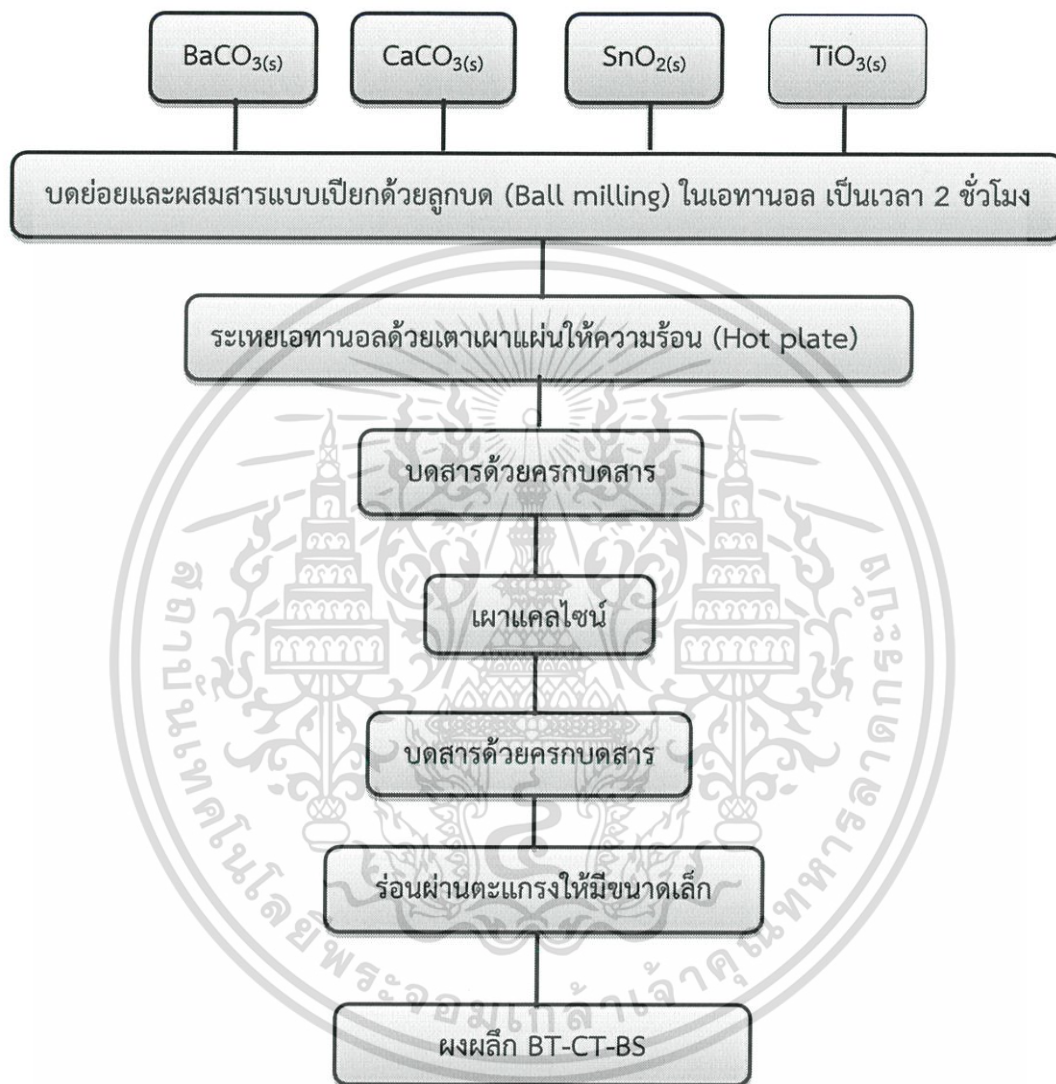
### 3.3 กระบวนการเตรียมผงผลึก BT-CT-BS

#### 3.3.1 การเตรียมผงด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

ทำการเตรียมผงผลึกวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) จากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์สูง ได้แก่  $\text{BaCO}_3$   $\text{CaCO}_3$   $\text{SnO}_2$  และ  $\text{TiO}_2$  เมื่อ  $x$  คือ สัดส่วนโดยมวลมีค่าเป็น 0.0250 0.0375 0.0625 0.0750 0.1000 0.1125 ตามลำดับ โดยเริ่มจากการเตรียมสารโดยการชั่งสารตั้งต้น  $\text{BaCO}_3$   $\text{CaCO}_3$   $\text{SnO}_2$   $\text{TiO}_2$  ตามสัดส่วนที่คำนวณได้จากสมการ แล้วนำมาใส่ในขวดพลาสติกที่บรรจุลูกบดเซอร์โคเนียเต็มเอทานอลลงไป เพื่อเป็นตัวทำละลายช่วยในการหล่อลื่น แล้วปิดฝาให้สนิท นำไปบดย่อยผสมสารด้วยเครื่องบดย่อยผสมสาร (Ball-milling) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำให้แห้งโดยการระเหยตัวทำละลายออกด้วยเตาเผาแผ่นให้ความร้อน (Hot plate) พร้อมกับกวนผสมสารด้วยแม่เหล็ก นำไปอบให้แห้งสนิทด้วยตู้อบสารที่อุณหภูมิประมาณ 120 องศาเซลเซียส เมื่อเตรียมผงผลึกเสร็จ นำผงที่ได้

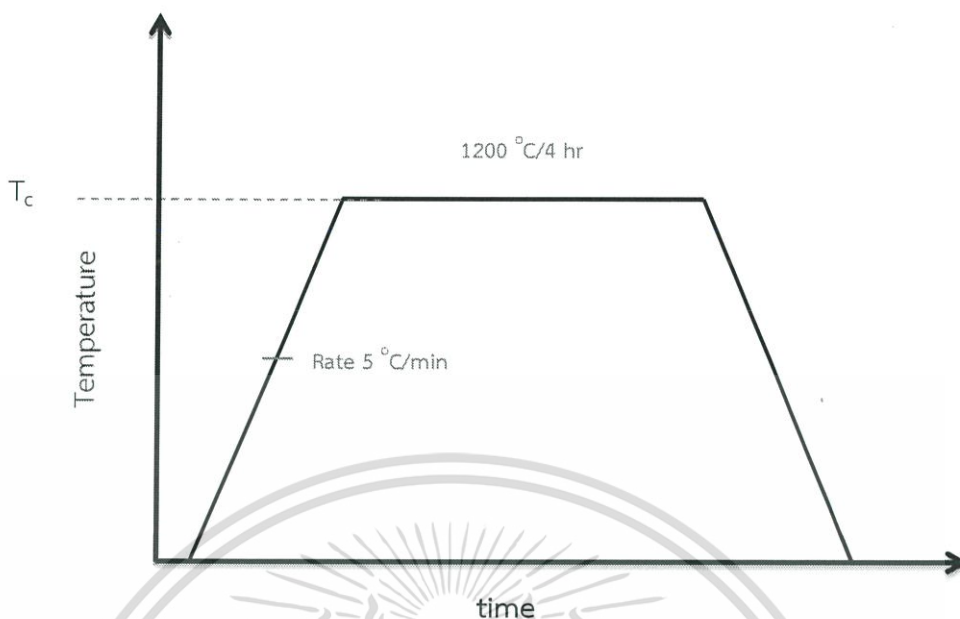
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปบดด้วยครกบดสาร แล้วนำผงที่ละเอียดไม่ติดกันเป็นก้อนใส่ลงในถ้วยอะลูมินาปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปเผาแคลไซน์ที่ช่วงอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้น – ลงของ อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส/นาที่ โดยอาศัยแผนผังแคลไซน์ที่จะแสดงในรูปที่ 3.2 ต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึก BT-CT-BS โดยวิธีปฏิบัติการสถานะของแข็ง

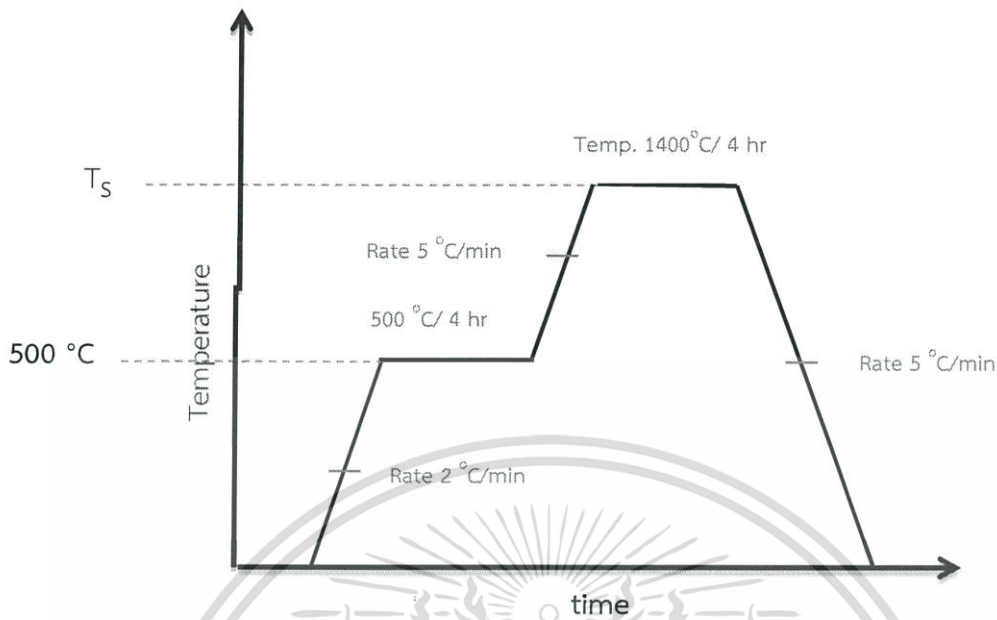
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการเผาแคลไซน์ ( $T_c$  คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์)

### 3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิก

เมื่อทำการเตรียมผงผลึกเซรามิกได้แล้วนำผงที่เตรียมได้ ทำการชั่งด้วยเครื่องชั่งครั้งละประมาณ 0.8 กรัม จากนั้นนำไปผสมด้วยครกบด โดยใช้ PVA ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นตัวประสาน (Binder) เพื่อให้สารที่เป็นผงสามารถเกาะยึดกันได้ดีขึ้น โดยจะขึ้นรูปเป็นรูปทรงกลม (Dies) จะทำการอัดขึ้นรูปโดยเครื่องอัดไฮดรอลิก ในแม่พิมพ์ที่เป็นโลหะ ด้วยความดัน 2 ตันเป็นเวลา 2 นาที โดยเม็ดเซรามิกที่ขึ้นรูปได้ (Green body) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปเผาซินเทอร์แบบทั่วไปโดยใช้แผ่นรองอะลูมินา นำเม็ด เซรามิกที่ขึ้นรูปได้มาจัดเรียงบนแผ่นรองอะลูมินา ในกระบวนการเผาเซรามิกจะต้องทำการแช่ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงอัตราเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส/นาที เพื่อกำจัด PVA ออกไปก่อน จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการเผาซินเทอร์ โดยอุณหภูมิเผาซินเทอร์อยู่ที่อุณหภูมิ 1275 1300 1325 1350 และ 1400 องศาเซลเซียส โดยแช่ไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการเป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการขึ้น - ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส/นาที โดยอาศัยแผนผังแสดงในรูปที่ 3.3 ต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงการเผาซินเทอร์ (T<sub>s</sub> คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเทอร์)

### 3.5 การตรวจสอบพฤติกรรมเกิดการเกิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เมื่อได้เม็ดเซรามิกที่เผาซินเทอร์แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง (X-Ray diffractometer : XRD) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมแตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานจะสามารถระบุวิฎภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยผลึกจะมีการจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ซึ่งผลึกแต่ละชนิดจะมีลักษณะการเรียงตัวแตกต่างกัน เนื่องจากเป็นลักษณะเฉพาะตัวโดย Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ Theta รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน Theta เท่ากับมุมตกกระทบ ความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ถูกเสนอในรูปสมการของแบรค (Bragg's law) ซึ่งสามารถหาระยะห่างระหว่างระนาบได้โดยอาศัยตามสมการ 3.2

$$2d\sin\theta = n\lambda \dots \dots \dots (3.2)$$

- เมื่อ  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก  
 $\theta$  คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์  
 $n$  คือ เลขจำนวนเต็มใดๆ ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ได้จากเป้าของทองแดงมีค่า  $1.54056 \text{ \AA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ ใช้สภาวะการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

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

ซึ่งข้อมูลที่ได้จากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถนำมาใช้หาองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้นอกจากนั้นยังสามารถทำการคำนวณหาปริมาณของเฟสหลักซึ่งมีโครงสร้างเป็นเพอร์รอฟสไกต์ที่เกิดขึ้นในเชิงเปรียบเทียบกับเฟสแบล็กพลอม (Pyrochlore) โดยอาศัยสมการที่ 3.3

$$\text{ปริมาณของเฟสหลัก (\%wt)} = \frac{I_{\text{perov.}} \times 100}{I_{\text{perov.}} + I_{\text{pyro.}}} \dots\dots\dots (3.3)$$

เมื่อ  $I_{\text{perov.}}$  คือ ความเข้มสูงสุดของพีค XRD ของเฟสเพอร์รอฟสไกต์  
 $I_{\text{pyro.}}$  คือ ความเข้มสูงสุดของพีค XRD ของเฟสแบล็กพลอม

### 3.6 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

#### 3.6.1 การหาค่าความหนาแน่น (Density หรือ $\delta$ ) และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%TD)

การหาค่าความหนาแน่นของเซรามิกที่เตรียมได้ โดยจะอาศัยหลักการของอาร์คิมิดีส ที่กล่าวไว้ว่า “เมื่อจุ่มของแข็งลงในของเหลวจะมีแรงพยุงที่เกิดขึ้นบนของแข็งนั้นโดยแรงพยุงที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยปริมาตรของของแข็ง” วิธีการทำจะนำเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้นั้น ไปต้มในน้ำกลั่น โดยให้น้ำกลั่นท่วมเม็ดเซรามิกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำเข้าไปแทนที่อากาศที่อยู่ในรูพรุนของเม็ดเซรามิก จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วทำการชั่งน้ำหนักเม็ดเซรามิกที่อมน้ำโดยการแทนที่ของน้ำเป็น  $W_1$  จากนั้นนำเม็ดเซรามิกไปอบแห้งในตู้อบสารที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปชั่งหาน้ำหนักในอากาศเป็น  $W_2$  แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นดังสมการ 3.4

$$\rho = \frac{W_2 \rho_1}{W_2 - W_1} \dots\dots\dots (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของเซรามิก ( $\text{g/cm}^3$ )
	$W_1$	คือ	น้ำหนักของเซรามิกที่ชั่งได้ในอากาศ (g)
	$W_2$	คือ	น้ำหนักของเซรามิกที่ชั่งได้ในน้ำ (g)
	$\rho_1$	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิที่วัดได้

ยังสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ได้จากสมการที่ 3.5

$$\%TD = \frac{\rho}{\rho_{TD}} \times 10 \dots\dots\dots(3.5)$$

เมื่อ	$\%TD$	คือ	เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง ( $\text{g/cm}^3$ )
	$\rho_{TD}$	คือ	ความหนาแน่นของสารตัวอย่างตามทฤษฎี ( $\text{g/cm}^3$ )

### 3.6.2 การหาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังการเผา

เมื่อทำการเผาชิ้นเทอร์เซรามิกแล้ว จากนั้นจะนำชิ้นงานเซรามิกหลังเผามาทำการวัดค่าการหดตัวของเซรามิก ในรูปการหดตัวเชิงปริมาตร (Volume Shrinkage) โดยคำนวณหาจากปริมาตรของชิ้นงานก่อนและหลังการเผาชิ้นเทอร์โดยใช้สมการที่ 3.6

$$V = \pi r^2 \times d \dots\dots\dots(3.6)$$

เมื่อ	$V$	คือ	ปริมาตรของเม็ดเซรามิก ( $\text{cm}^3$ )
	$R$	คือ	รัศมีของเม็ดเซรามิก (cm)
	$d$	คือ	ความหนาของเม็ดเซรามิก (cm)

นำปริมาตรหลังการเผาชิ้นเทอร์ ( $V_2$ ) มาเปรียบเทียบกับปริมาตรก่อนเผาชิ้นเทอร์ ( $V_1$ ) เพื่อคำนวณหาร้อยละการหดตัวของเซรามิกโดยอาศัยสมการที่ 3.7

$$S = \frac{(V_1 - V_2)}{V_1} \times 100 \dots\dots\dots(3.7)$$

เมื่อ	$S$	คือ	ร้อยละการหดตัวของเซรามิก
	$V_1, V_2$	คือ	ปริมาตรก่อนและหลังการเผาชิ้นเทอร์ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

#### 3.7.1 ตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียไดอิเล็กทริก

การตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิกที่เตรียมได้เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความถี่ โดยนำเซรามิกที่ต้องการทดสอบมาทำการขัดให้เรียบโดยใช้เครื่องขัดสาร (Grinder-polisher) และขนานกันทั้งสองหน้าโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 600 800 และ 1000 เซรามิกที่ได้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคส์เป็นเวลา 10 นาที นำมาอบไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง วัดความหนาเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัดของเซรามิกที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายแล้วจึงนำมาทำขั้วไฟฟ้า (Electrode) โดยใช้กาวเงินชนิดเผาที่ผิวหน้าของเซรามิกทั้งสองด้านและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 20 นาที ด้วยอัตราการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส/นาที เพื่อให้กาวเงินแห้งและติดกับผิวเซรามิกได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LCR meter ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 – 300 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์ และ 110 กิโลเฮิรตซ์ แล้วนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกโดยอาศัยสมการ 3.8

$$\epsilon_r = \frac{dC}{\epsilon_0 A} \dots \dots \dots (3.8)$$

- เมื่อ  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)  
 $D$  คือ ความหนาของสารตัวอย่าง  
 $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ในสุญญากาศ (มีค่า  $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ )  
 $A$  คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่าง  
 $C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance)

#### 3.7.2 ตรวจสอบวนวนฮีสเทอรีซิส

ตรวจสอบวนวนฮีสเทอรีซิส โดยการนำชิ้นงานหนาประมาณ 0.6 มิลลิเมตร ที่ทำขั้วไฟฟ้าแล้วมาวางระหว่างตัวยึดจับ แล้วนำไปแช่ในน้ำมันซิลิโคนของชุดควบคุมความร้อนจากนั้นทำการเปิดสวิทช์ High Voltage Amplifier และโปรแกรมศึกษาวนวนฮีสเทอรีซิส RT-66 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ ใส่ข้อมูลความหนาและพื้นที่ผิวของชิ้นสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษา จำนวนเกรนทั้งหมดที่วัดได้ขนาดเกรนเฉลี่ย ความยาวของเส้นที่พาดผ่านเกรน กำหนดค่าสนามไฟฟ้าที่วัดสูงสุด 40 kV/cm บันทึกข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและโพลาริเซชันที่ได้ลงบนแผ่นบันทึกข้อมูลแล้วนำไปวิเคราะห์และเขียนเป็นกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

สำหรับบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการสังเคราะห์ผงผลึกเซรามิกในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  เมื่อ  $x = 0.0250$   $0.0375$   $0.0625$   $0.0750$   $0.1000$  และ  $0.1125$  ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) จากการนำผงที่ได้ไปอัดขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นเม็ดกลมแบนและนำเม็ดเซรามิกไปเผาซินเทอร์แบบทั่วไปเพื่อให้ได้เซรามิกที่ต้องการเพื่อหาสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกที่เกิดบริเวณเฟสร่วมพหุสัณฐาน (Polymorphic Phase Transtions : PTT) ที่มีสัดส่วนองค์ประกอบที่สูงที่สุด และนำเซรามิกที่ได้นั้นไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพโดยวัดเปอร์เซ็นต์การหดตัว ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์การเปลี่ยนเฟส และสมบัติทางไฟฟ้าพร้อมอภิปรายผลต่อไป

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก

หลังจากการเตรียมเม็ดเซรามิกเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำเม็ดเซรามิกที่ขึ้นรูปด้วยแม่แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตร นำไปเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1275 1300 1325 1350 และ 1400 องศาเซลเซียส นำเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการตรวจวัดสมบัติทางกายภาพด้วยการหาค่าความหนาแน่นของเซรามิกโดยการอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำของอาคีมิติส และคำนวณหาค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีหรือร้อยละความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Theoretical density) ได้ค่าดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BT}-0.075\text{CT}-x\text{BS}$

สัดส่วนองค์ประกอบ	ความหนาแน่นทางทฤษฎี (%)				
	1275 °C	1300 °C	1325 °C	1350 °C	1400 °C
0.025	76.44	81.19	86.95	83.24	82.05
0.0375	75.15	86.35	85.14	77.49	84.05
0.0625	75.42	78.61	88.13	89.64	95.34
0.0750	83.15	74.00	88.94	83.91	97.44
0.1000	84.20	89.19	89.16	84.42	91.04
0.1125	67.24	80.58	90.11	80.25	96.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเทอร์เพิ่มสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีมีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วยโดยที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส นั้นสามารถเตรียมเซรามิกที่มีค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีสูงที่สุดถึง 97.44% อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มสารเจือตีบุก (Sn) เข้าไปพบว่าค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีจะมีค่าแนวโน้มที่ลดลง ทั้งนี้คาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการสลายตัวของสารบางชนิดที่เป็นองค์ประกอบในเซรามิกทำให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างนั่นเอง

จากนั้นนำเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการตรวจวัดร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร (%S) โดยนำเม็ดเซรามิกที่ขึ้นรูปด้วยแม่แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตร นำไปเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1275 1300 1325 1350 และ 1400 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปวัดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังจากเผาแล้วได้ค่าดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าการหดตัวของเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BT}-0.075\text{CT}-x\text{BS}$

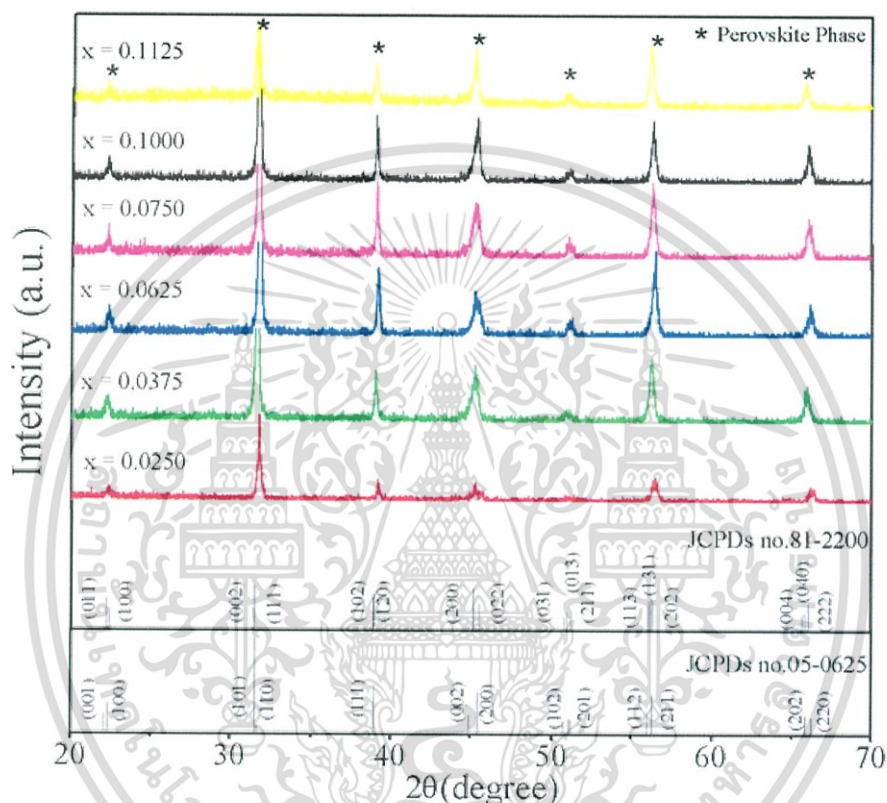
สัดส่วน องค์ประกอบ	ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร(%S)				
	1275 °C	1300 °C	1325 °C	1350 °C	1400 °C
0.025	8.54±0.03	11.34±0.03	13.59±0.03	15.34±0.02	15.56±0.03
0.0375	8.29±0.05	11.00±0.05	13.45±0.02	15.13±0.03	15.25±0.04
0.0625	9.72±0.03	10.72±0.05	14.97±0.04	15.93±0.02	15.85±0.07
0.0750	9.69±0.01	10.25±0.09	14.95±0.03	16.72±0.02	16.95±0.06
0.1000	8.93±0.03	11.59±0.03	13.47±0.05	15.93±0.03	15.86±0.05
0.1125	8.27±0.03	11.34±0.02	13.18±0.04	15.54±0.03	15.93±0.08

จากตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางกายภาพของเซรามิก  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  พบว่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร (%S) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเทอร์เพิ่มสูงขึ้น และยังพบว่าค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร (%S) มีการเปลี่ยนแปลงกับปริมาณสารเจือซึ่งค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร (%S) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Sn เพิ่มขึ้น โดยเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  ที่เผาที่อุณหภูมิซินเทอร์ 1400 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร (%S) อยู่ในช่วง 15 - 16% โดยการหดตัวเชิงปริมาตรนั้นคือ การที่เซรามิกมีขนาดความจุที่เล็กลง ซึ่งสาเหตุของการหดตัวนี้อาจเนื่องมาจากการสูญเสียองค์ประกอบหรือโครงสร้างของเซรามิกทำให้องค์ประกอบอื่นเข้ามาใกล้ชิดกัน ทำให้ขนาดของเซรามิกหลังเผาซินเทอร์นั้นมีขนาดเล็กกว่าก่อนเผาซินเทอร์นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เมื่อนำเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  ที่ผ่านการเผาซินเทอร์ที่ 1400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราเร็ว 5 องศาเซลเซียส/นาทิจากนั้นนำไปตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นและโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบได้ผลแสดงผลดังรูปที่ 4.1

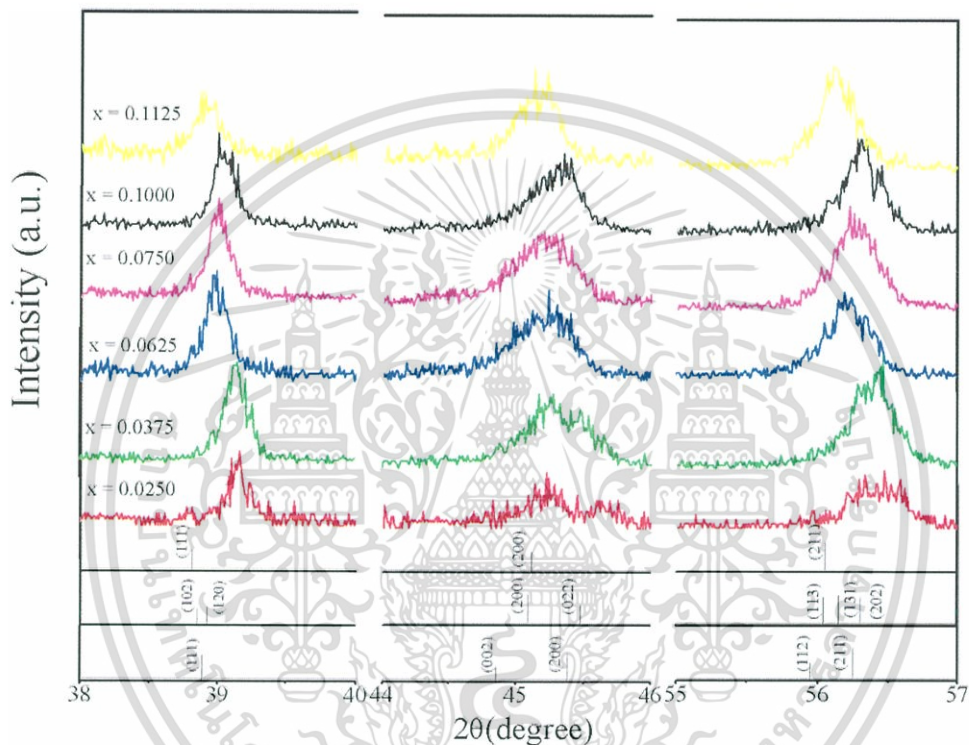


รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก BT-CT-BS

จากรูป 4.1 ผลการตรวจสอบเฟสและโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  โดย  $x = 0.0250, 0.0375, 0.0625, 0.0750, 0.1000$  และ  $0.1125$  โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะเห็นได้ว่าสารเซรามิกในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  ที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์เกิดขึ้นได้ในทุกสัดส่วนองค์ประกอบแสดงด้วยสัญลักษณ์ “\*” และไม่พบเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้น เนื่องจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 05-0625 ซึ่งมีโครงสร้างเตตระโกนอลและเมื่อปริมาณ Sn เพิ่มขึ้น พบเฟสร่วมระหว่างโครงสร้างเตตระโกนอลกับโครงสร้างออร์โธโรมบิก และรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เปลี่ยนไปซึ่งคล้ายกันกับแฟ้มข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

JCPDS หมายเลข 81-2200 ซึ่งมีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิกที่อุณหภูมิห้อง จึงสรุปได้ว่าเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์บริสุทธิ์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ได้สมบูรณ์นั่นเอง อย่างไรก็ตาม เมื่อเจือปริมาณสาร Sn เข้าไปในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสัดส่วนขององค์ประกอบเพิ่มขึ้น เพื่อแสดงให้เห็นได้ชัดเจนขึ้นถึงความแตกต่าง จึงได้ทำการขยายพิกัดในช่วง  $2\theta$  เท่ากับ  $38 - 40^\circ$   $44 - 46^\circ$   $55 - 57^\circ$  แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในช่วงใน ช่วง  $2\theta$  เท่ากับ  $38 - 40^\circ$   $44 - 46^\circ$   $55 - 57^\circ$

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อทำการเจือ Sn เข้าไปพบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $0.0250 \leq x \leq 0.0375$  นั้นมีระบบผลึกเป็นแบบเตตระโกนอลเนื่องจากมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) สอดคล้องกับมาตรฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 05-0625 ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบเตตระโกนอลโดยที่ระนาบ (002)/(200) สามารถสังเกตเห็นพีกสองพีกแยกกันอย่างชัดเจน และพีกระนาบ (111) เกิดพีกเดี่ยวเกิดขึ้น นั้นหมายความว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $0.0250 \leq x \leq 0.0375$  นั้นมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล และเมื่อเจือปริมาณของ Sn เพิ่มขึ้นพบว่าที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  ระนาบ (002)/(200) พีกสองพีกเกิดการเคลื่อนที่เข้าหากันมากขึ้นสามารถสังเกตเห็นพีกสองพีกแยกกันอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเป็นโครงสร้างเตตระโกนอลของเซรามิกเริ่มลดลงและเริ่มเกิดโครงสร้างออร์โธโรมบิก และที่สัดส่วน  $0.0750 \leq x \leq 0.1125$  ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

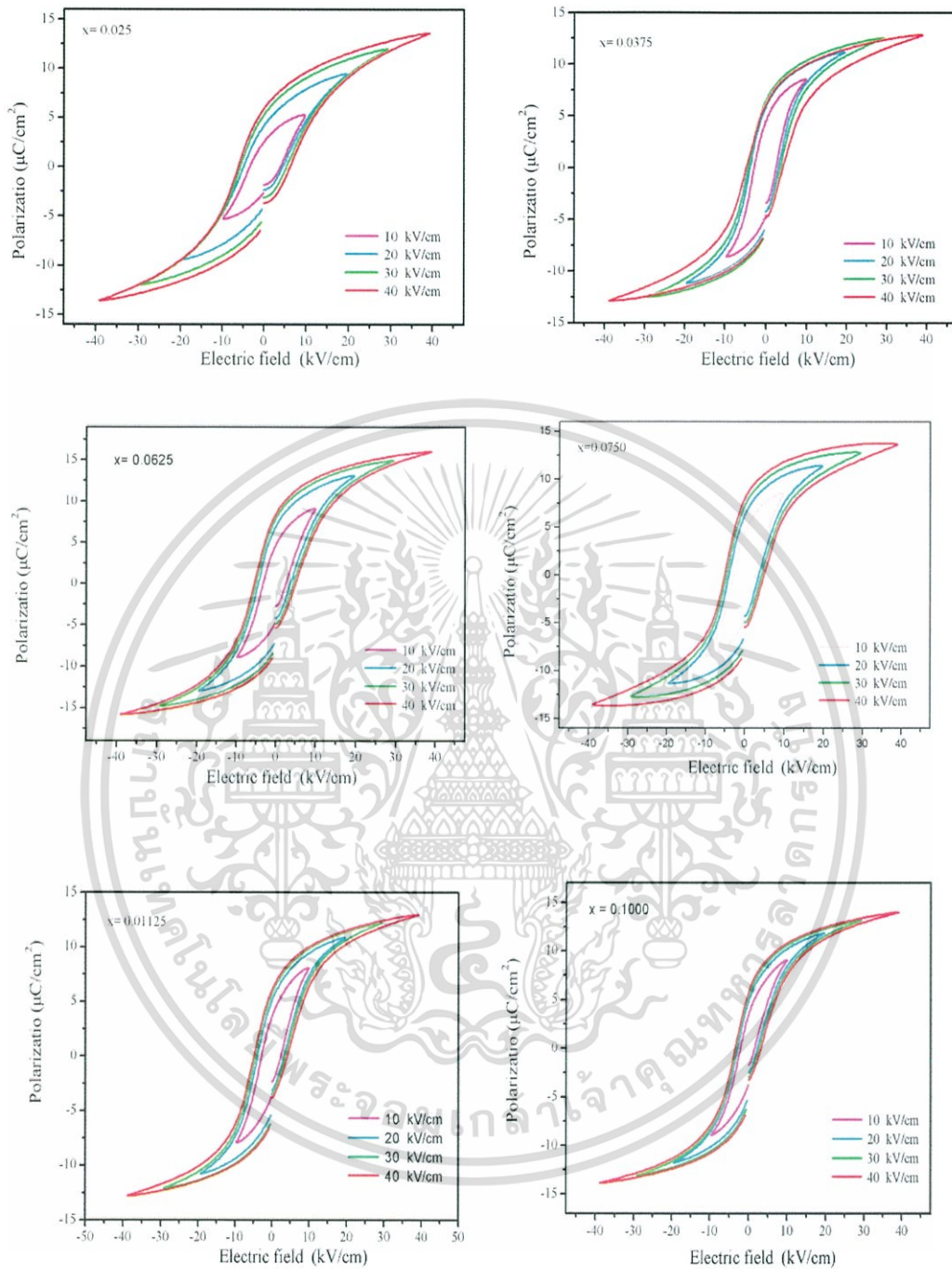
ระนาบ (200)/(200) พิกัดทั้งสองเกิดการแยกออกจากกัน และที่  $2\theta$  ช่วง  $55 - 57^\circ$  เกิดพีคแยกออกจากกันสามพีคซึ่งคาดว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเตตระโกนอลไปเป็นออร์โธโรอมบิกที่สัดส่วนนั้นนั่นเอง

### 4.3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก BT-CT-BS

#### 4.3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

จากนั้นนำเม็ดเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  โดย  $x = 0.0250$  0.0375 0.0625 0.0750 0.1000 และ 0.1125 มาทำการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ด้วยการวัดวงวนฮีสเทรีซิส (P-E loop) โดยแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 โดยตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่ได้รับและค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้น ซึ่งได้ทำการตรวจสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 10 kV 20 kV 30 kV และ 40 kV พบว่าทุกสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกระบบนี้สามารถวัดวงวนฮีสเทรีซิสได้อย่างสมบูรณ์ แสดงว่าสารที่สังเคราะห์ได้ทุกสัดส่วนองค์ประกอบมีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าสูงชันค่าโพลาริเซชันก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของสนามไฟฟ้าที่ให้ และอัตราการเพิ่มของค่าโพลาริเซชันลดลงเมื่อสารเริ่มอิ่มตัว เมื่อเทียบแต่ละสัดส่วนพบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบที่  $x = 0.0625$  นั้น มีค่าโพลาริเซชันสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $8.39 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  และมีค่า  $P_s$  เท่ากับ  $15.94 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  และมีค่า  $E_c$  เท่ากับ  $5.21 \text{ kV}/\text{cm}$  เมื่อสังเกตจากวงฮีสเทรีซิส นั้นสัดส่วนองค์ประกอบที่  $x = 0.0625$  มีช่วงที่กว้างที่สุด อาจเกิดจากสัดส่วนองค์ประกอบที่  $x = 0.0625$  นั้นอยู่ในช่วงรอยต่อบริเวณเฟสรวมพหุสัณฐาน (Polymorphic Phase Transitions : PTT) เปลี่ยนจากโครงสร้างแบบเตตระโกนอลเป็นแบบโครงสร้างออร์โธโรอมบิก

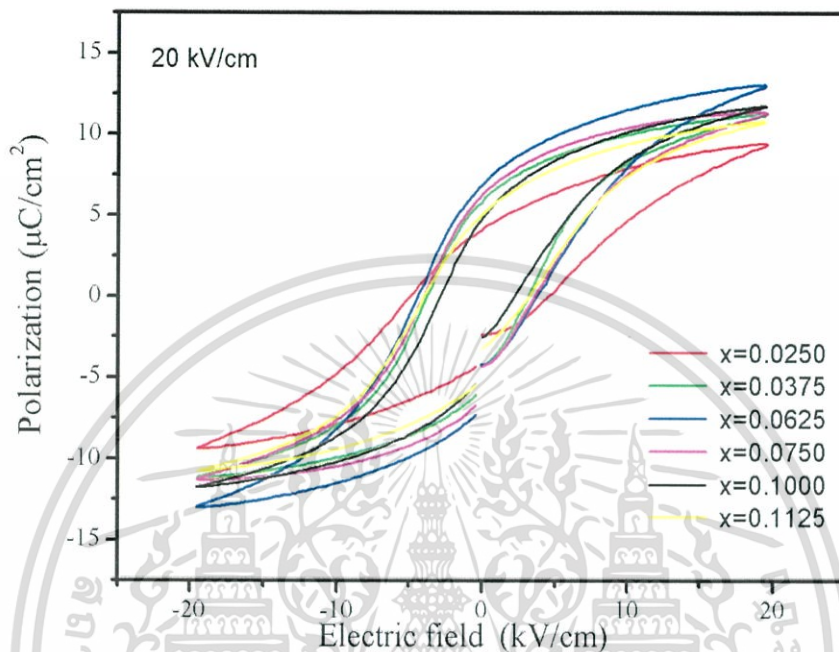
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



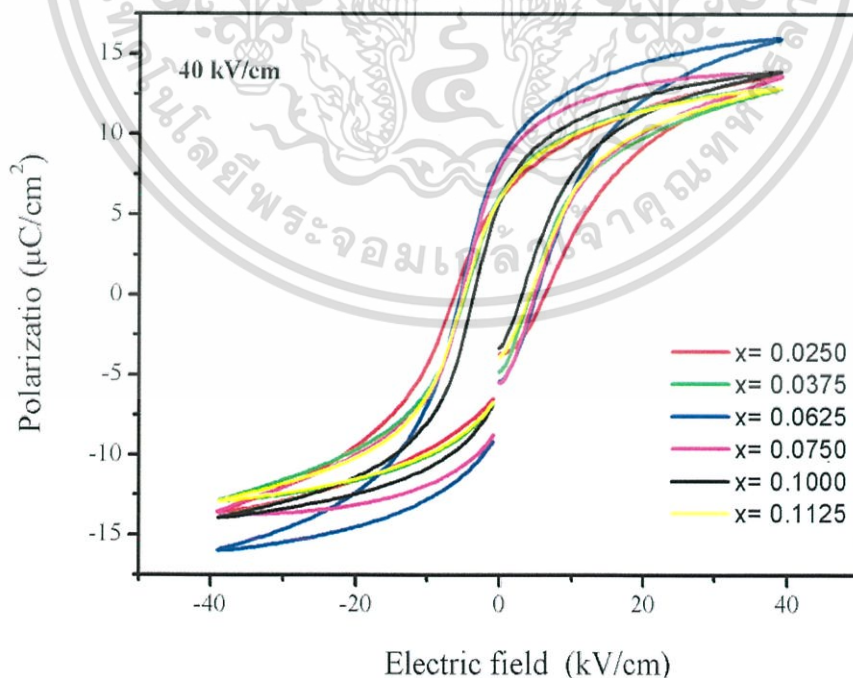
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าที่สัดส่วนต่างๆ

เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่เซรามิกที่สนามไฟฟ้าเท่ากับ 20kV และ 40 kV จะเกิดวงวนฮิสเทอรีซิส จะมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยที่สนามไฟฟ้าต่ำ 20 kV ลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสจะกว้างกว่าแบบที่ให้สนามไฟฟ้าสูง เนื่องจากที่สนามไฟฟ้าน้อยกว่าเกิดการกลับทิศของโดเมนได้ยากกว่าที่สนามไฟฟ้าสูง ทำให้ที่สนามไฟฟ้าสูงวงวนฮิสเทอรีซิสเกิดแคบกว่า และบ่งบอกถึงที่สัดส่วน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบเดียวกัน เมื่อให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงขึ้นวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จะมีลักษณะกว้างขึ้น ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ ( $P_r$ ) ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว ( $P_s$ ) และค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง ( $E_c$ ) ก็จะสูงขึ้นดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



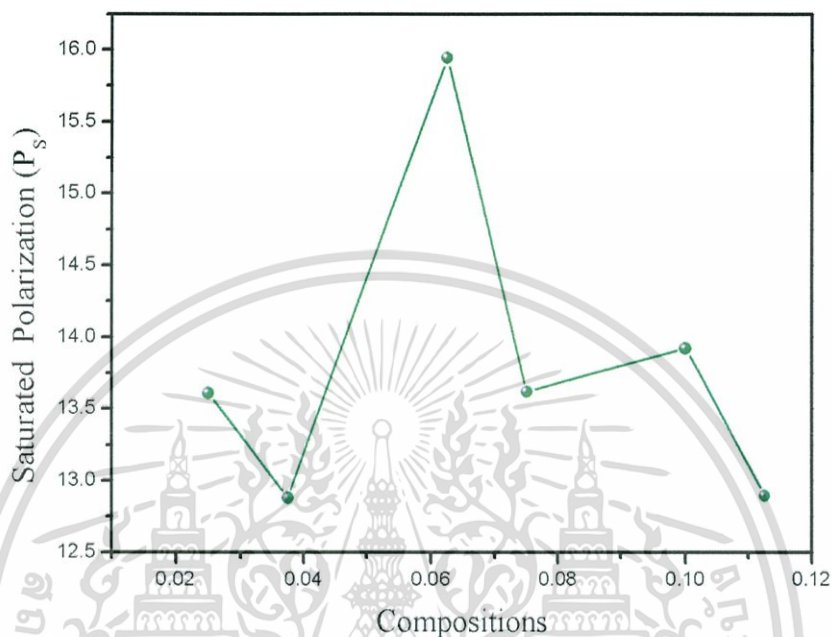
รูปที่ 4.4 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิกในระบบ BT-CT-BS ที่สนามไฟฟ้า 20 kV/cm



รูปที่ 4.5 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิกในระบบ BT-CT-BS ที่สนามไฟฟ้า 40 kV/cm

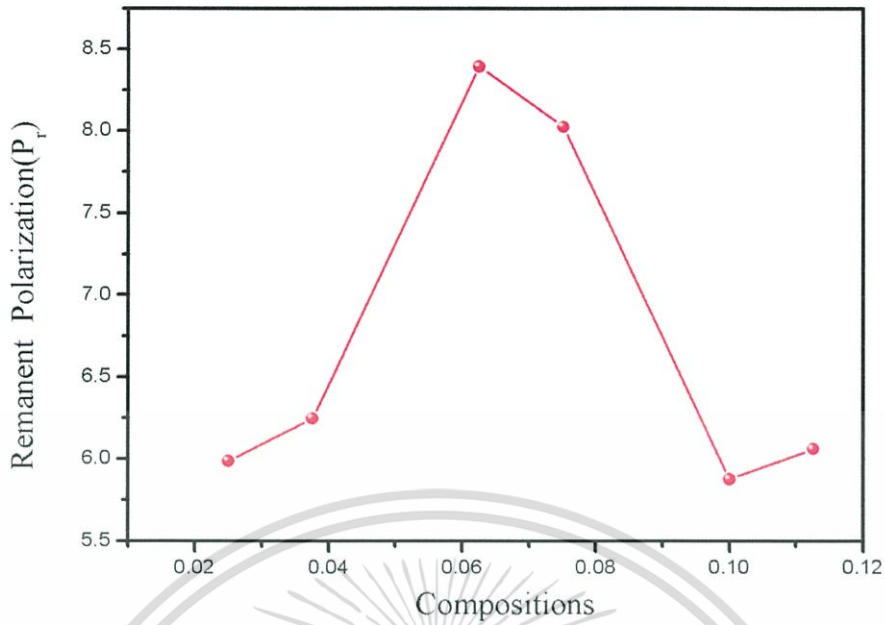
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคำนวณหาค่าโพลาริเซชันคงค้าง ( $P_r$ ) ค่าโพลาริเซชันอิมิตัว ( $P_s$ ) และค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง ( $E_c$ ) ของเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  โดย  $x = 0.0250$   $0.0375$   $0.0625$   $0.0750$   $0.1000$  และ  $0.1125$  จะแสดงในรูปภาพที่ 4.6 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



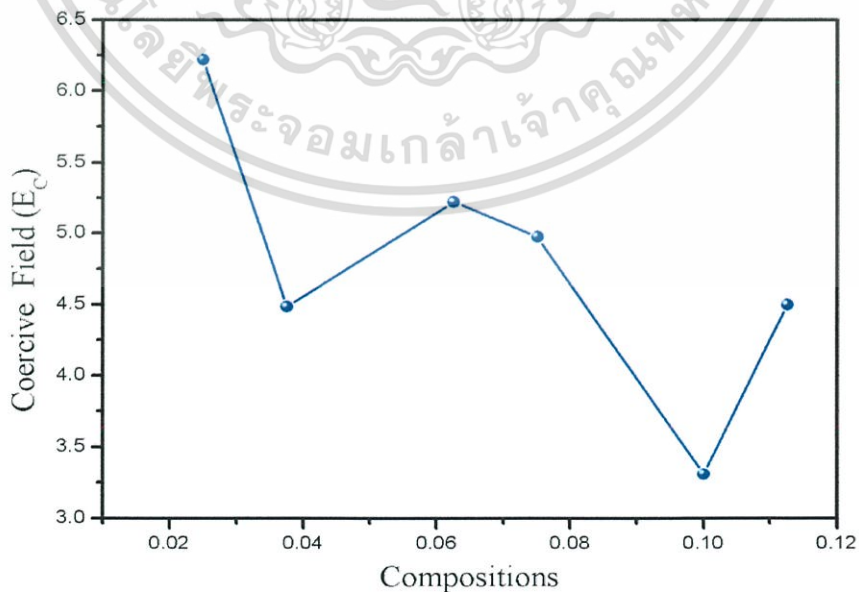
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันอิมิตัวกับสัดส่วนของต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 จะแสดงให้เห็นว่าที่บริเวณสัดส่วนองค์ประกอบที่  $x = 0.0625$  นั้นมีค่าโพลาริเซชันอิมิตัว ( $P_s$ ) ที่สูงโดดเด่นกว่าสัดส่วนอื่นๆ มีค่าเท่ากับ  $15.94 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  ทั้งนี้เนื่องจากการวัดวงวนฮีสเทอรีซิสเป็นการวัดที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งคาดว่าบริเวณสัดส่วนที่  $x = 0.0625$  นั้นเป็นผลมาจากสัดส่วนของโพลาริเซชันที่เกิดจากระบบโครงสร้างแบบเตตระโกนอลและโพลาริเซชันที่เกิดจากระบบโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก ดังนั้นค่าที่วัดได้จึงเกิดโพลาริเซชันของเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  ที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  จึงโดดเด่นที่สุด



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันคงเหลือ ( $P_r$ ) กับสัดส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบที่  $x = 0.0625$  นั้นมีค่าโพลาไรเซชันคงเหลือ ( $P_r$ ) ที่สูงโดดเด่นกว่าสัดส่วนอื่นๆ มีค่า  $8.39 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  ทั้งนี้เนื่องจากการวัดวงฮีสเทอรีซิสเป็นการวัดที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งคาดว่าบริเวณสัดส่วนที่  $x = 0.0625$  นั้นเป็นผลมาจากสัดส่วนของโพลาไรเซชันที่เกิดจากโครงสร้างเตตระโกนอลและโพลาไรเซชันที่เกิดจากโครงสร้างออร์โธโรมบิก ดังนั้นค่าที่วัดได้จึงเกิดโพลาไรเซชันของเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  ที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  จึงโดดเด่นที่สุด

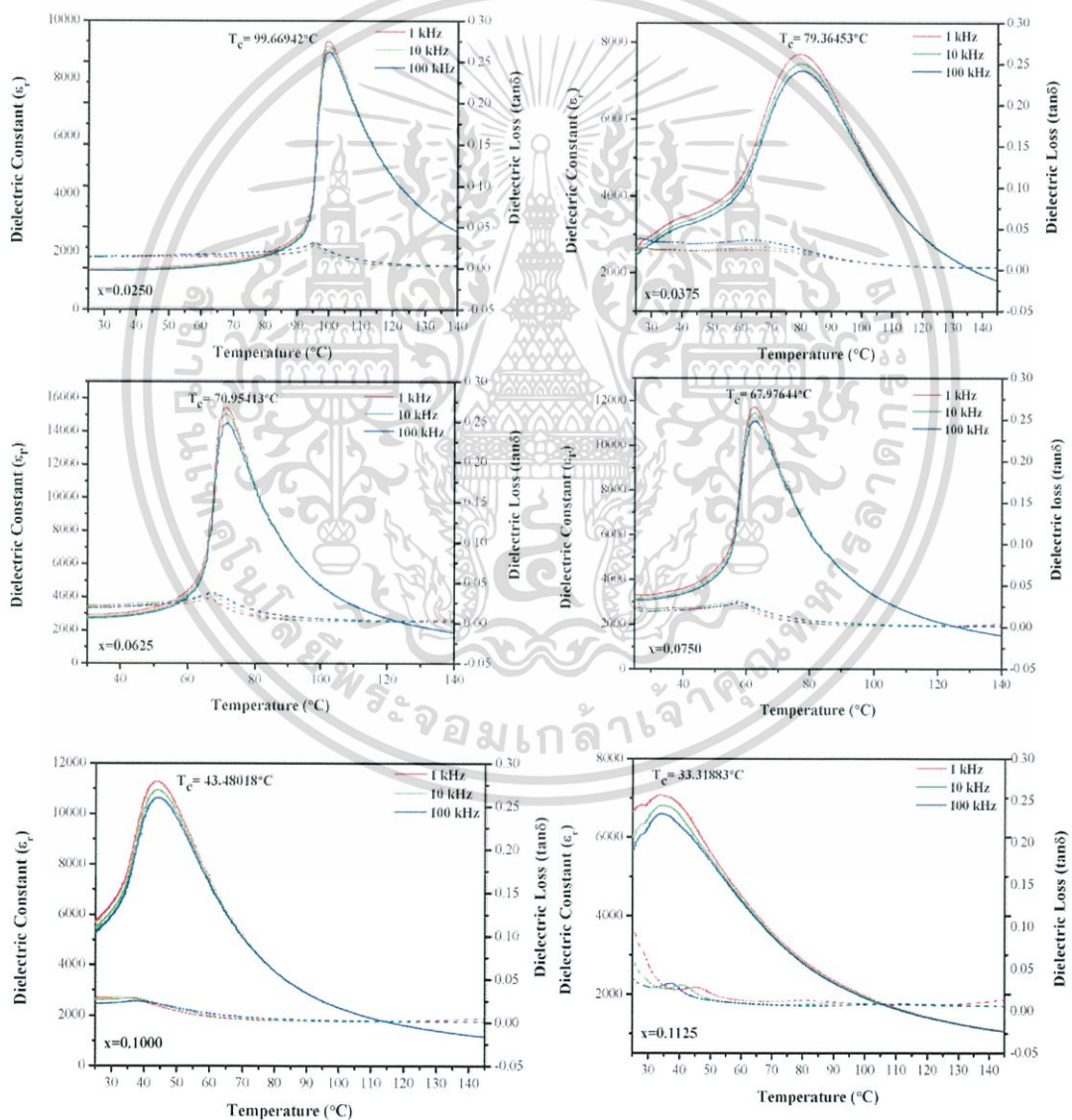


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามลบข้างโพลาไรเซชัน ( $E_c$ ) กับสัดส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

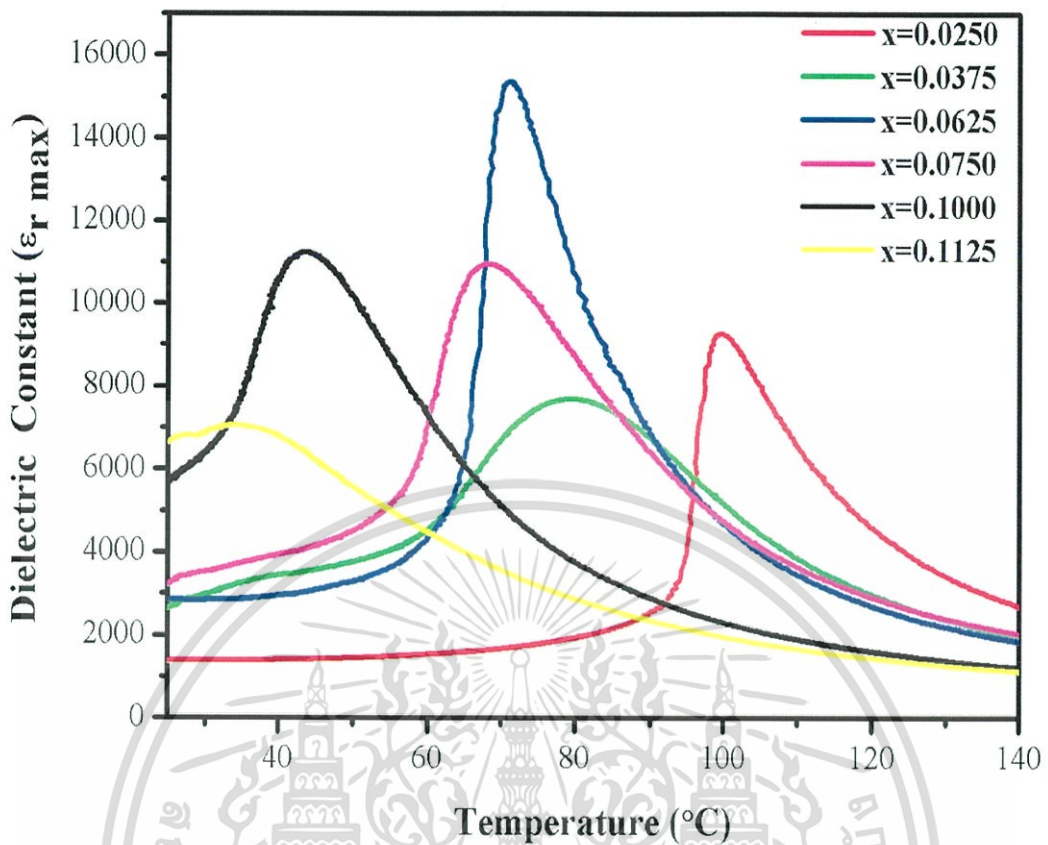
จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามกลางโพลาริเซชันชั้น ( $E_c$ ) กับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  จากกราฟพบว่าค่า  $E_c$  มีแนวโน้มที่ลดลงอาจเป็นผลมาจากการเจือสาร Sn เพิ่มมากขึ้น ทำให้สารที่เจือเข้าไปนั้นเข้าไปอยู่ในโครงสร้างหลัก ส่งผลทำให้ปริมาตรของหน่วยเซลล์ (Unit cell volume) เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นอาจจะทำให้เกิดช่องว่างในโครงสร้าง ซึ่งการเกิดขึ้นของช่องว่างอาจจะไปทำให้ความเค้นภายนอกลดลงทำให้เกิดการเคลื่อนของผนังโดเมนได้ง่ายส่งผลทำให้ค่า  $E_c$  ลดลง

#### 4.3.2 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกและการเปลี่ยนเฟส (Dielectric properties and Phase transition)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของสัดส่วนต่างๆ

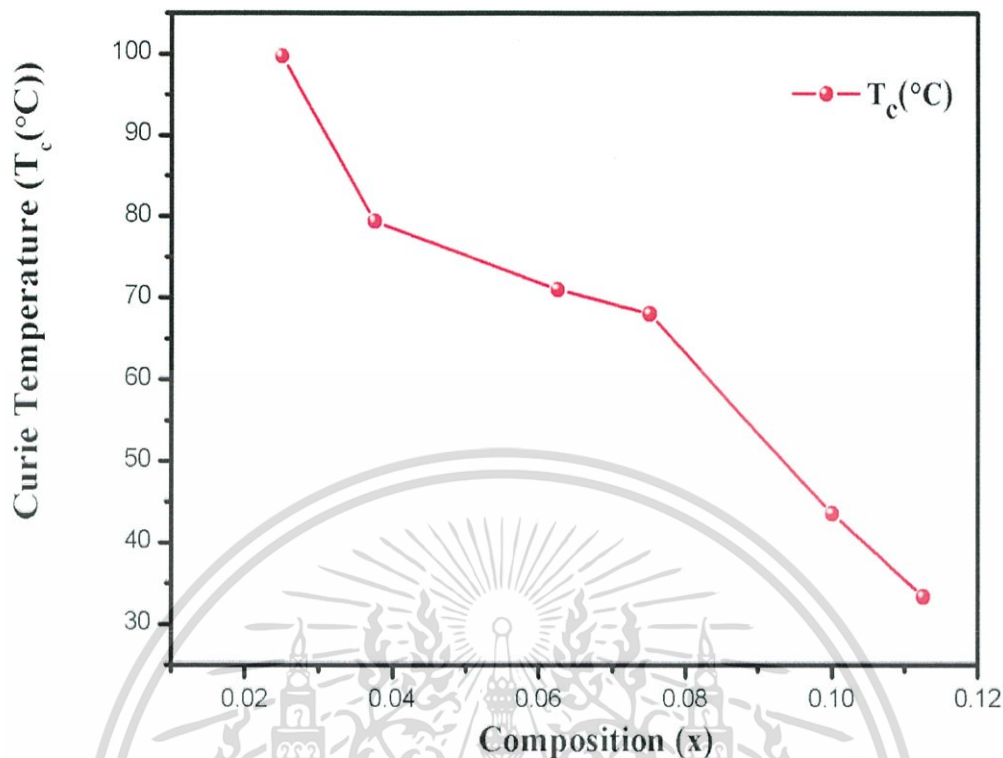
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และอุณหภูมิของสัดส่วนต่างๆ ที่ความถี่ 1 kHz

เมื่อนำเม็ดเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  ที่สัดส่วน  $x = 0.0250$   $0.0375$   $0.0625$   $0.0750$   $0.1000$   $0.1125$  มาวัดค่าสภาพยอมสัมพันธ์ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ความถี่ 1 kHz 10 kHz และ 100 kHz พบว่ากราฟที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ พิกของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ได้เปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความถี่ โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น แสดงผลดังรูปที่ 4.9 ซึ่งจากกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของสัดส่วนต่างๆ พบว่าเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้นั้นที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  ที่อุณหภูมิห้องมีค่าไดอิเล็กทริกสูงสุดเท่ากับ 15353 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.028 ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเตตระโกนอลไปเป็นโครงสร้างออร์โธโรมบิกที่  $T_c = 70.95$  องศาเซลเซียส สอดคล้องกับผลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

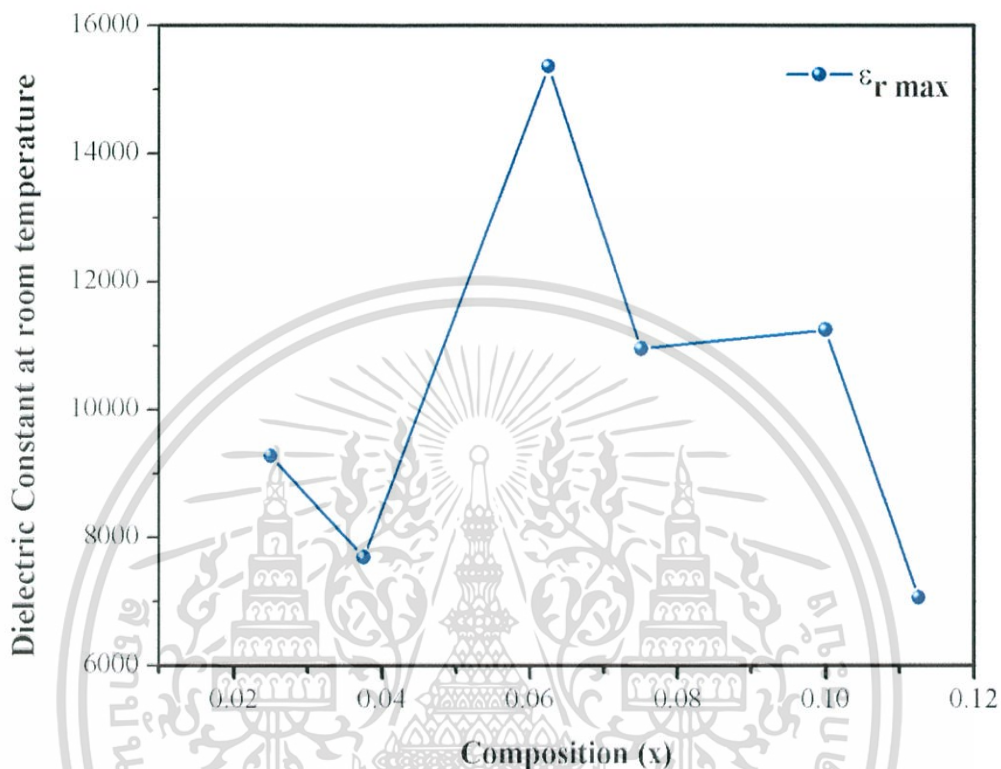
จากรูปที่ 4.10 ที่สัดส่วน  $x = 0.0250 - 0.1125$  จะเห็นว่าลักษณะของพิกมีการเปลี่ยนแปลงไปคือ พิกของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีฐานกว้าง (Broad peak) มากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบรีแลกเซอร์



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคูรีกับสัดส่วนต่างๆ

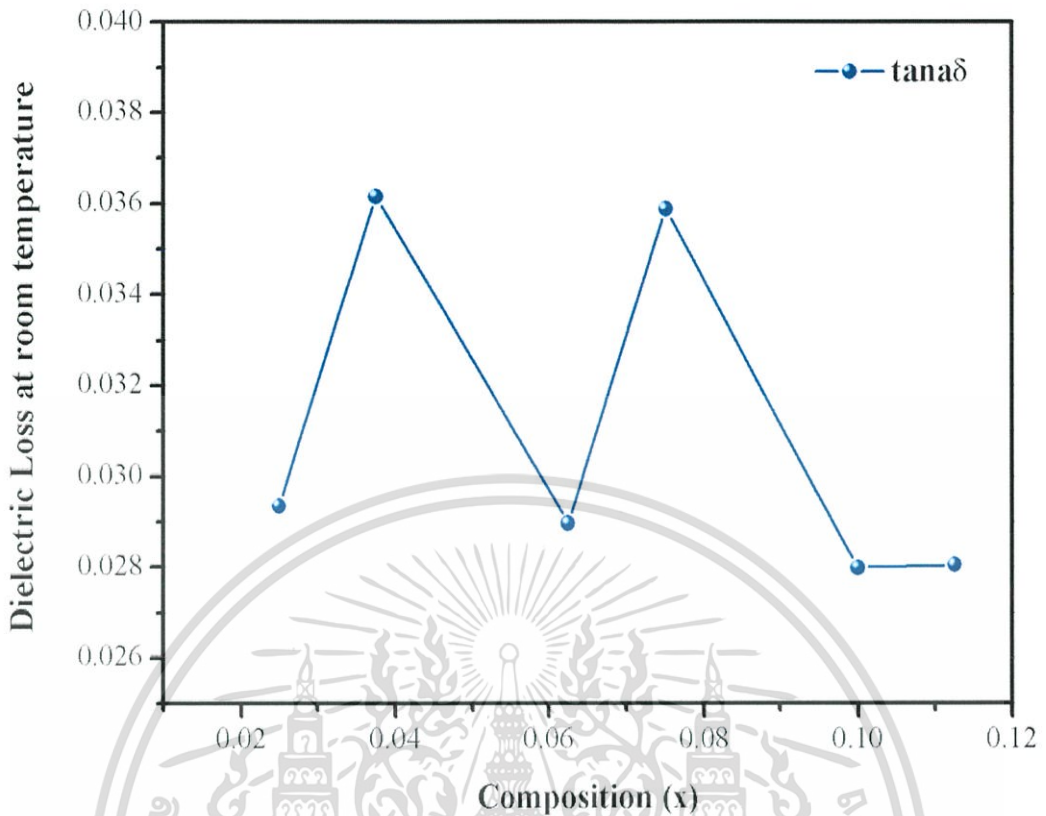
จากรูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคูรีกับสัดส่วนของ Sn ของเซรามิก  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  ที่ความถี่ 1 kHz พบว่าเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิคูรีมีแนวโน้มลดลง ที่สัดส่วนปริมาณสารเจือ Sn ที่  $x = 0.0250 - 0.1125$  มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคูรีเป็นไปตามแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งอย่างสมบูรณ์ ซึ่งตรงกับที่คาดการณ์ว่าเมื่อมีการเจือ Sn ที่สัดส่วนเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิคูรีมีค่าลดลง เนื่องจากจากเมื่อเติม Sn เพื่อเป็นการดึงอุณหภูมิการใช้งานให้ต่ำลงเหมาะสมในการใช้งานที่อุณหภูมิห้องโดยที่เฟสเตตระโกนอลจะอุณหภูมิในการใช้งานที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส และเติม Ca เพื่อให้อุณหภูมิที่ใช้งานนั้นมีความเสถียร

เมื่อทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องที่ความถี่ 1 kHz ของเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องกับสัดส่วนต่างๆ

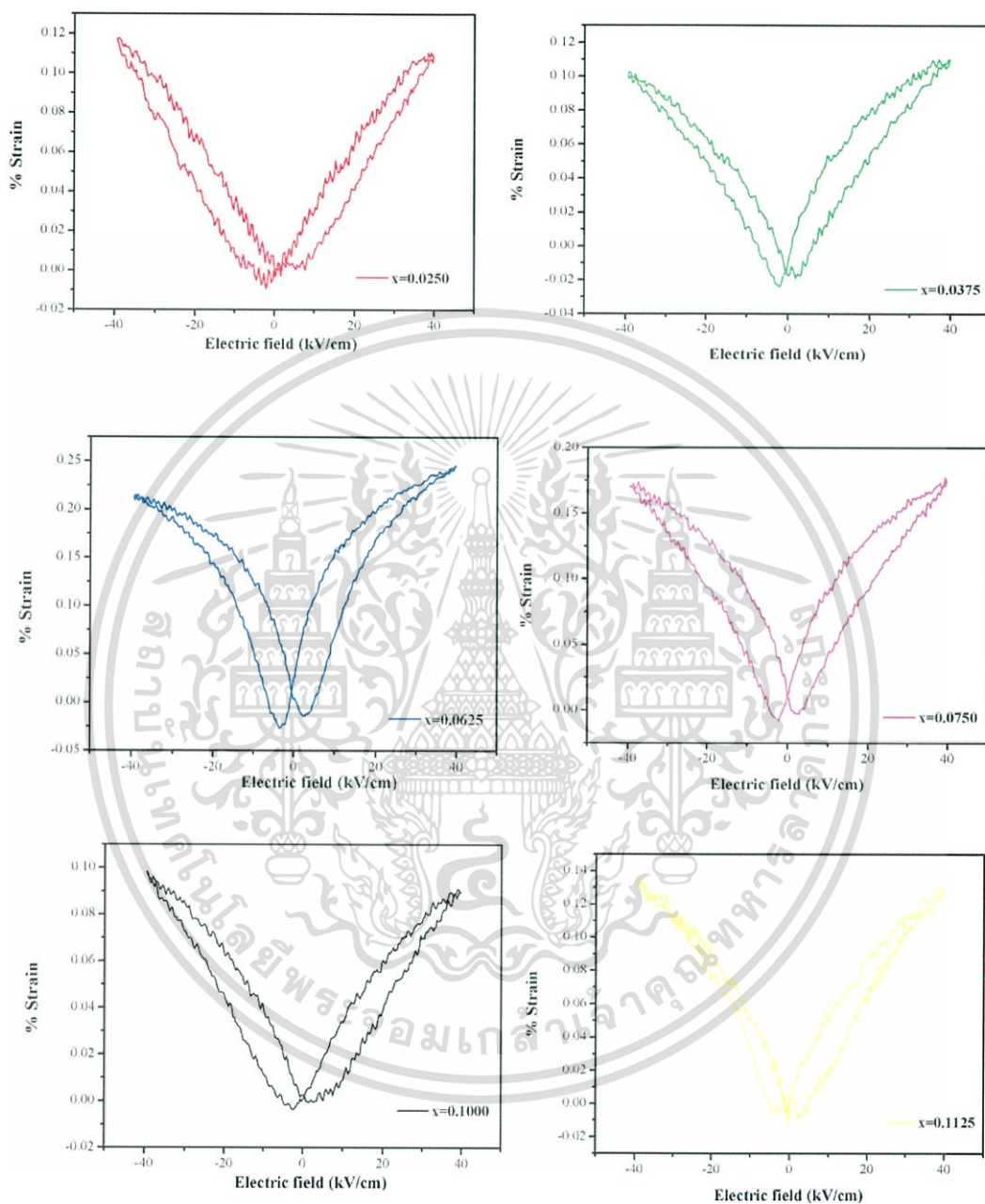
จากรูปที่ 4.12 พบว่าสัดส่วนปริมาณสารเจือ Sn ที่  $x = 0.0250 - 0.0375$  นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงช่วงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกค่อนข้างแคบ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือ Sn เป็น  $x = 0.0625$  พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงถึง 15353 เนื่องจากที่สัดส่วนนี้เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเตตระโกนอลไปเป็นโครงสร้างออร์โธโรมบิกช่วงสัดส่วนนี้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เนื่องจากเมื่อเจือ Sn เข้าไปในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  ซึ่งจะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงสัดส่วนที่  $x = 0.0625$  กราฟมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเนื่องเกิดเฟสผสมขึ้น จึงทำให้เกิดการรบกวนสมดุลงของเฟสจึงทำให้เกิดการนำไฟฟ้าสูงที่สุด



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับสัดส่วนต่างๆ

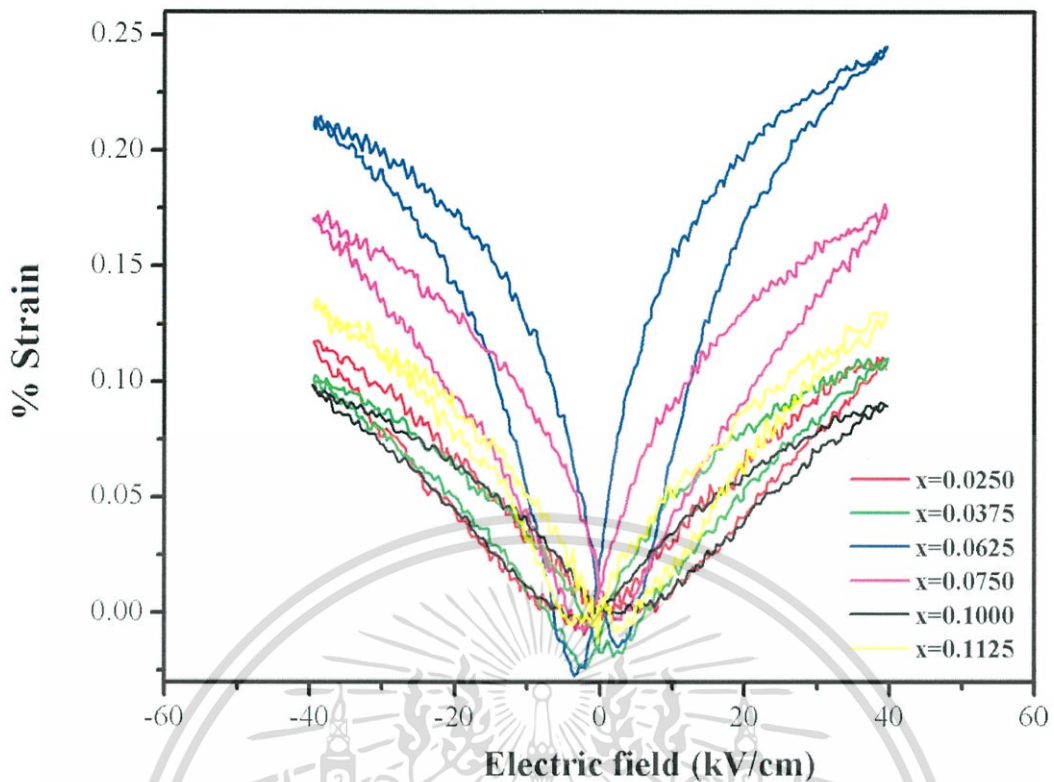
จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับสัดส่วนของปริมาณสารเจือ Sn ที่ความถี่ 1 kHz พบว่าเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อเติม Sn ทำให้อุณหภูมิคูรีลดลง จึงส่งผลให้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงทำให้สามารถเก็บประจุได้มากขึ้นที่อุณหภูมิห้อง

### 4.3.3 ผลการตรวจสอบสมบัติความเครียดของวัสดุต่อสนามไฟฟ้าแบบบัตเตอร์ฟลาย (Butterfly hysteresis loops)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละความเครียดของวัสดุต่อสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

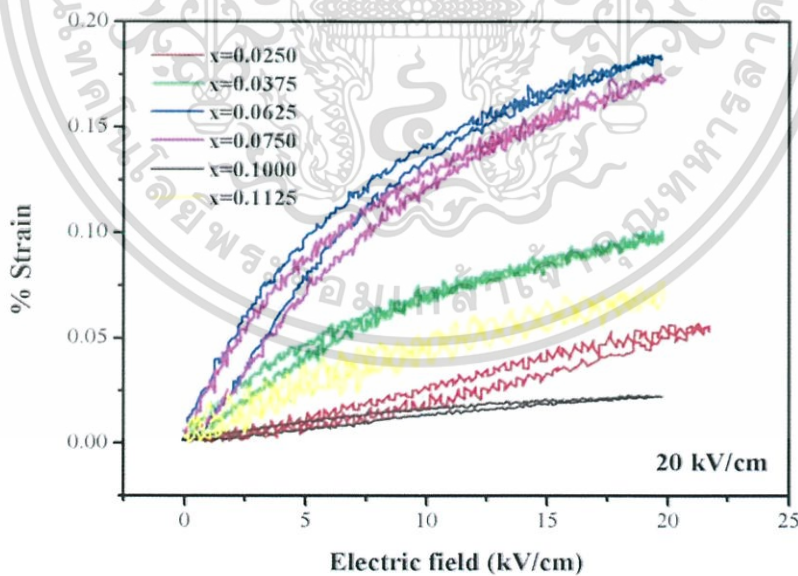


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละความเครียดของวัสดุต่อสนามไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วนั้นค่าร้อยละความเครียดของวัสดุต่อสนามไฟฟ้ายังสามารถแสดงได้ ในรูปของกราฟแบบบัตเตอร์ฟลาย (Butterfly hysteresis loops) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าร้อยละความเครียดของวัสดุต่อสนามไฟฟ้า ในการให้สนามไฟฟ้าจะให้ทั้งสองทิศทาง (Bipolar) เมื่อให้สนามไฟฟ้าค่าบวกวัสดุจะเกิดการยืดตัว และในทางตรงกันข้ามเมื่อให้สนามไฟฟ้าค่าลบ วัสดุจะเกิดการหดตัว หากวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงในอัตราส่วนที่เท่าๆ กันคือมีการยืดตัว และหดตัวเท่าๆกัน กราฟบัตเตอร์ฟลายจะมีความสมมาตรกันสามารถอธิบายได้ว่าวัสดุดังกล่าวมี สมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ดี เนื่องจากมีการยืดตัวและหดตัวที่เท่าๆกัน จากรูปที่ 4.15 พบว่า เซรามิก ในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  ที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  เมื่อให้สนามไฟฟ้าทั้งสอง ด้านปิกทั้งสองข้างมีความสมมาตรกัน และมีค่าร้อยละความเครียดของวัสดุต่อสนามไฟฟ้าสูง

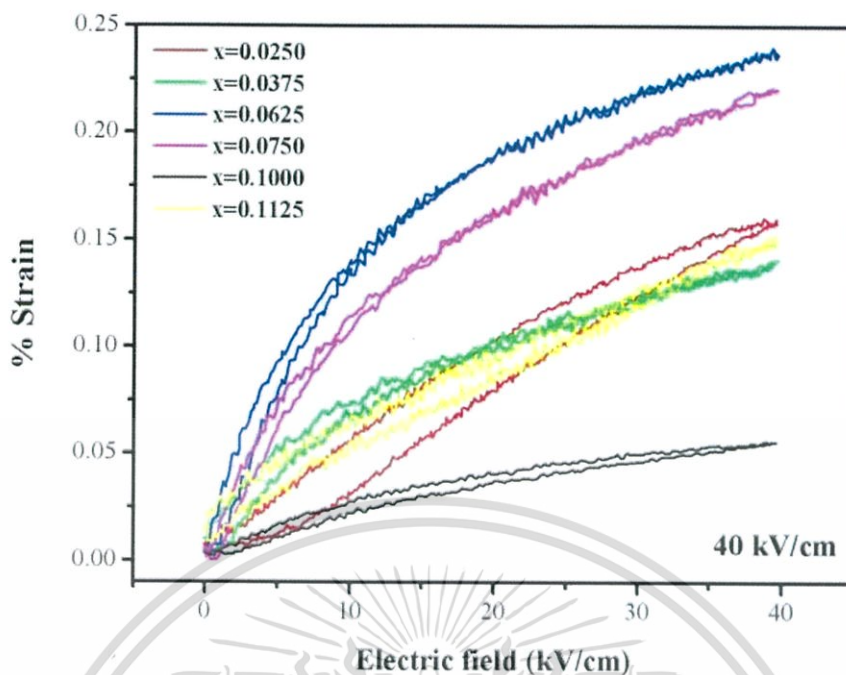
#### 4.3.4 การตรวจสอบสมบัติความเครียดของวัสดุต่อสนามไฟฟ้า

เมื่อนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3-0.075\text{CaTiO}_3$  โดยมีสัดส่วนสารเจือที่  $x = 0.0250$   $0.0375$   $0.0625$   $0.0750$   $0.10100$  และ  $0.1125$  นำมาตรวจสอบความเครียดของวัสดุ (Strain) ของวัสดุซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติที่สอดคล้องกับสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก โดยอธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุซึ่งเทียบจากค่าเปอร์เซ็นต์ร้อยละของความเครียดที่เกิดขึ้นกับค่าสนามไฟฟ้าที่แตกต่าง โดยรูปที่ 4.16 ค่าที่สนามไฟฟ้าต่ำ (Low power field) วัดที่  $20 \text{ kV/cm}$  พบว่าที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  วัสดุมีค่าร้อยละความเครียดสูงที่สุด และที่สนามไฟฟ้าสูงที่สุด (High power field) วัดที่  $40 \text{ kV/cm}$  พบว่าที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  วัสดุมีร้อยละความเครียดสูงที่สุดดังรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อเจือ Sn ตามสัดส่วน  $0.0250$   $0.0375$   $0.0625$   $0.0750$   $0.10100$  และ  $0.1125$  กราฟมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นและจะลดลง เมื่อถึงสัดส่วนที่  $0.0750 \leq x \leq 0.1125$  ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการเกิดโพลาริเซชันที่เกิดจากระบบผลึกเตตระโกนอลและเปลี่ยนไปยังโพลาริเซชันที่เกิดจากระบบออร์โธโรมบิกซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟยังบ่งบอกถึงการเกิดโพลาริเซชันของโครงสร้างของชิ้นงานเซรามิก โดยที่โครงสร้างเตตระโกนอลที่ใช้พลังงานในการจัดเรียงโพลาริเซชันน้อย ส่วนโครงสร้างออร์โธโรมบิกจะใช้พลังงานมากกว่าที่จะทำให้เกิดการจัดเรียงโพลาริเซชันได้ จึงทำให้เส้นกราฟมีความชันที่แตกต่างกันเมื่อมีเฟสผสม (Polymorphic phase transition : PPT)

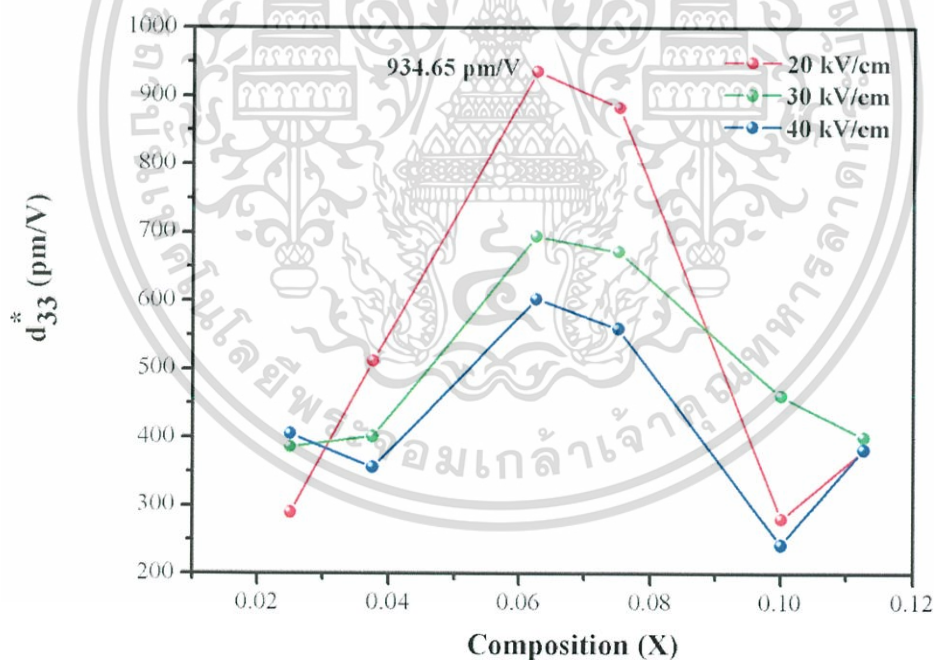


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละความเครียดกับสนามไฟฟ้าที่  $20 \text{ kV/cm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละความเครียดกับสนามไฟฟ้าที่ 40 kV/cm



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและสัดส่วนต่างๆ  
ของเซรามิกในระบบ BT-CT-BS

นอกจากนี้สมบัติเพียโซอิเล็กทริกยังสามารถอธิบายได้จากค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ( $d_{33}^*$ ) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเมื่ออยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้สนามไฟฟ้าโดยเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบของสารที่เจือลงไป เมื่อพิจารณาจากค่า  $d^*_{33}$  สำหรับระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3-0.075\text{CaTiO}_3$  พบว่าที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  วัสดุมีค่า  $d^*_{33}$  โดดเด่นที่สุดมีค่าเท่ากับ  $934.65 \text{ pm/V}$  ที่สนามไฟฟ้า  $20 \text{ kV/cm}$  ซึ่งแสดงได้ถึงเกิดการเกิดเฟสร่วมพหุสัณฐาน (Polymorphic phase transition : PPT) ระหว่างเฟสของเตตระโกนอลและเฟสออร์โธโรมบิกซึ่งจากรูปที่ 4.18 กราฟมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นสูงสุดที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  และมีแนวโน้มที่ลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงผลการเปลี่ยนเฟสจากเตตระโกนอลเปลี่ยนไปยังออร์โธโรมบิก ที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  โครงสร้างผลึกถูกรบกวนโดยเป็นเฟสร่วมกันระหว่างเตตระโกนอลและออร์โธโรมบิกทำให้มีค่า  $d^*_{33}$  ที่สูงที่สุดที่สนามไฟฟ้า  $30 \text{ kV/cm}$  และ  $40 \text{ kV/cm}$  มีค่า  $d^*_{33}$  แนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าขึ้นเรื่อยๆ วัสดุยังสามารถรับพลังงานได้เท่าเดิม จึงทำให้ความสามารถในการยืดหดตัวลดลงเรื่อยๆ และเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าถึงจุดหนึ่งจนไม่สามารถรับพลังงานได้อีกจะทำให้ชิ้นงานวัสดุนั้นเกิดการแตก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 จากการศึกษาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  เมื่อปริมาณสารเจือ Sn ที่  $x = 0.0250$   $0.0375$   $0.0625$   $0.0750$   $0.1000$  และ  $0.1125$  เตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) พบว่าสามารถเตรียมเซรามิกในระบบนี้ได้ที่อุณหภูมิในการซินเทอร์ที่ 1400 องศาเซลเซียส จากข้อมูลศึกษาสมบัติทางกายภาพของเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  พบว่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร (%S) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเทอร์เพิ่มสูงขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Sn เพิ่มขึ้นเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  เมื่อเผาซินเทอร์ที่ 1400 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรอยู่ในช่วง 15 - 16% และสามารถเตรียมเซรามิกที่ความหนาแน่นทางทฤษฎีได้สูงถึง 97.44%

5.1.2 จากการศึกษาตรวจสอบเอกลักษณ์ของเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$  พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $0.0250 \leq x \leq 0.0375$  นั้นมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอลและเมื่อเจือปริมาณของ Sn เพิ่มขึ้นที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.0625$  พบว่าระบบผลึกเกิดเฟสร่วมกันของโครงสร้างแบบเตตระโกนอลและโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก และที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $0.0750 \leq x \leq 0.1125$  เปลี่ยนเป็นเฟสโครงสร้างของออร์โธโรมบิก

#### 5.1.3 จากการศึกษาตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

5.1.3.1 จากการศึกษาตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกพบว่าที่อุณหภูมิห้อง และสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปในช่วงที่ 10 - 40 kV ซึ่งพบว่าทุกสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกระบบนี้สามารถวัดวงวนฮีสเทอรีซิสได้อย่างสมบูรณ์มีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าสูงขึ้น ค่าโพลาริเซชันก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของสนามไฟฟ้า และอัตราการเพิ่มของค่าโพลาริเซชันลดลงเมื่อสารเริ่มอิ่มตัว

5.1.3.2 จากการศึกษาตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกพบว่าทุกสัดส่วนที่เตรียมแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกเนื่องจากทุกสัดส่วนสามารถเกิดวงวนฮีสเทอรีซิสได้ โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.06250$  มีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกที่สูงสุด

5.1.3.3 จากการศึกษาตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกและการเปลี่ยนเฟสพบว่าพีคของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ได้เปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับอุณหภูมิและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ โดยค่าคงที่ไดโพลีทริกจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งพบว่าเม็ดเซรามิกที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  ที่อุณหภูมิห้องมีค่าไดโพลีทริกสูงสุดเท่ากับ 15353 และค่าการสูญเสียไดโพลีทริกเท่ากับ 0.028 เมื่อถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะเกิดการเปลี่ยนเฟสฉับพลัน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเตตระโกนอลไปเป็นโครงสร้างออร์โธโรมบิก ที่  $T_c = 70.95$  องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และช่วงอุณหภูมิการใช้งานมากขึ้น เนื่องจาก  $T_c$  จะลดลงเมื่อปริมาณสัดส่วนของ Sn เพิ่มสูงขึ้น

5.1.3.4 จากการตรวจสอบสมบัติความเครียดของวัสดุต่อสนามไฟฟ้าพบว่าเซรามิกในระบบนี้ที่สนามไฟฟ้าต่ำ (Low power field) วัดที่ 20 kV/cm พบว่าที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  วัสดุมีค่าร้อยละความเครียดสูงสุด และที่สนามไฟฟ้าสูงที่สุด (High power field) วัดที่ 40kV/cm พบว่าที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  วัสดุมีร้อยละความเครียดสูงสุด นอกจากนี้สมบัติเพียโซอิเล็กทริกยังสามารถอธิบายได้จากค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ( $d^*_{33}$ ) พบว่าที่สัดส่วน  $x = 0.0625$  วัสดุมีค่า  $d^*_{33}$  โดเด่นที่สุดมีค่าเท่ากับ 934.65 pm/V เป็นบริเวณเกิดเฟสร่วมพหุสัณฐาน (Polymorphic phase transition : PPT) ระหว่างเฟสของเตตระโกนอลและเฟสออร์โธโรมบิก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมอย่างละเอียดถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการซินเทอร์เม็ดเซรามิกในระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3-0.075\text{CaTiO}_3-x\text{BaSnO}_3$

5.2.2 ทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเซรามิกภายในโครงสร้างของเซรามิกโดยถ่ายภาพสัณฐานวิทยาของเซรามิกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope หรือ SEM) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูง

5.2.3 ควรทำการตรวจสอบการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของสารอนินทรีย์โดยใช้เครื่องรามานสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Raman spectrophotometer) เพื่อให้เห็นความชัดเจนของโครงสร้างผลึกเพิ่มมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1]. Li-FengZhu, Bo-Ping Zhang, Xiao-Kun Zhao, Lei Zhao,Peng-Fei Zhou, and Jing-Feng.2013. “Enhanced Piezoelectric Properties of  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.92}\text{Sn}_{0.08})\text{O}_3$  Lead-Free Ceramics.”The American Ceramic Society
- [2]. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์. ปีที่ 8. ฉบับที่ 1 มิถุนายน 2552. “THE JOURNAL OFAPPLIEDSCIENCE.”
- [3]. กฤษณา กันแปลงและคณะ.2556. “การเตรียมและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกไร้สารตะกั่ว  $(1-x)(\text{Ba}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3-x\text{BiM}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ ;  $M=\text{Mg}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$ .” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรมคณะวิทยาศาสตร์,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4]. [Online]. Available:[http://www.thaiceramicsociety.com/pc\\_pre\\_grindmore.php](http://www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.php)
- [5]. WangfengBai,BoShen,Fang Fu andJiweiZhai.2012. “Dielectric, ferroelectric, and piezoelectric properties of textured BZT–BCT lead-free thick film by screen printing.”Materials Letters :20–22.
- [6]. DunminLina,K.W.Kwok,H.L.W and Chan.2014. “Structure,dielectric and piezoelectric properties of  $\text{Ba}_{0.9}\text{Ca}_{0.10}\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$  lead-free ceramics.” Ceramics International :6841-6846.
- [7]. WangfengBai, Bo Shen, Fang Fu andJiweiZhai.2012. “Dielectric, ferroelectric, and piezoelectric properties of textured BZT–BCT lead-free thick film by screen printing.” Materials Letters :20–22.
- [8]. ผศ.ดร.สุภาสินีลิ้มปานูภาพ. 2556. [Online]Available:<http://www.google.com/โครงสร้างperoskite>
- [9]. ชนิศานวนิลและคณะ.2551. “การสังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ  $[(\text{Bi}_{1/2}\text{K}_{1/2})_{1-x/2}\text{Li}_x]_{0.99}\text{Ba}_{0.01}\text{TiO}_3$ .” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรมคณะวิทยาศาสตร์,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [10]. กมลพรรณ เฟื่องพัด และคณะ.2005. “ผลของอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติเซรามิกแบเรียมไททานेटที่เจือด้วยสารทินออกไซด์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่และภาควิชาเคมีคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวร.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11]. Wei Li, Zhi-jun-Xu, Wui-qing-Chu, Peng-Fu, and Guo-zhong-Zang. 2010. “ Large-Piezoelectric Coefficient  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.96}\text{Sn}_{0.04})\text{O}_3$  Lead-Free Ceramic” J. Am. Ceram. Soc: 2942–2944.

[12]. Wei Li, Zhi-jun-Xu, Wui-qing-Chu, Peng-Fu, and Guo-zhong-Zang. 2010. “ Large-Piezoelectric Coefficient  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.95}\text{Sn}_{0.05})\text{O}_3$  Lead-Free Ceramic” J. Am. Ceram. Soc: 2942–2944.

[13]. Mingli Chen , Zhijun Xu , Ruiqing Chu , Yong Liu , Lin Shao , Wei Li , Shuwen Gong and Guorong Li. 2013. “Polymorphic phase transition and enhanced piezoelectric properties in  $(\text{Ba}_{0.9}\text{Ca}_{0.1})(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)\text{O}_3$  lead-free ceramics. ” Materials Letters : 86–89.

[14]. อุไรวรรณติลลคุณานันท์. 2531. “เทคนิคทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเบื้องต้น” ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์กลางบางเขนสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[15]. Xiao Na Zhu, Wei Zhang and Xiang Ming Chen .2013. “Enhanced dielectric and ferroelectric characteristics in Ca-modified  $\text{BaTiO}_3$  ceramics” Aip Advances



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณการเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

จากสารระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3 - 0.075\text{CaTiO}_3 - x\text{BaSnO}_3$

เมื่อ X คือ 0.0250 0.0375 0.0625 0.0750 0.1000 0.1125

จะได้สมการ  $(0.925)\text{BaCO}_3 + (0.075)\text{CaCO}_3 + (x)\text{SnO}_2 + (0.925-x+0.075)\text{TiO}_2$



$(0.925-x)\text{BaTiO}_3 + (0.075)\text{CaTiO}_3 + (x)\text{BaSnO}_3 + (0.95)\text{CO}_2$

ตัวอย่าง การคำนวณ X=0.0250

จากสารระบบ  $(0.925-x)\text{BaTiO}_3 - (0.075)\text{CaTiO}_3 - (x)\text{BaSnO}_3$

สมการ  $(0.925)\text{BaCO}_3 + (0.075)\text{CaCO}_3 + (x)\text{SnO}_2 + (0.925-x+0.075)\text{TiO}_2$



$(0.925-x)\text{BaTiO}_3 + (0.075)\text{CaTiO}_3 + (x)\text{BaSnO}_3 + (0.95)\text{CO}_2$

เมื่อแทนที่ X = 0.0250 ในสมการ

จะได้  $\text{BaCO}_3 = 0.925$

$\text{CaCO}_3 = 0.075$

$\text{SnO}_2 = 0.025$

$\text{TiO}_2 = 0.975$

$\text{BaTiO}_3 = 0.900$

$\text{CaTiO}_3 = 0.075$

$\text{BaSnO}_3 = 0.025$

การคำนวณ Mw ของสารตั้งต้น

Mw ของ  $\text{BaCO}_3$  คือ 197.3395

คิดเป็น g คือ  $0.9250 \times \text{Mw ของ BaCO}_3$

$$0.9250 \times 197.3395 = 182.5357075$$

Mw ของ  $\text{CaCO}_3$  คือ 100.0869

คิดเป็น g คือ  $0.0750 \times \text{Mw ของ CaCO}_3$

$$0.0750 \times 100.0869 = 7.5065175$$

Mw ของ  $\text{SnO}_2$  คือ 150.7088

คิดเป็น g คือ  $0.0250 \times \text{Mw ของ SnO}_2$

$$0.0250 \times 150.7088 = 3.76772$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{Mw ของ TiO}_2 & \text{ คือ } 79.8658 \\ \text{คิดเป็น g} & \text{ คือ } 0.9750 \times \text{Mw ของ TiO}_2 \\ & 0.9750 \times 79.8658 = 77.869155 \end{aligned}$$

#### การคำนวณ Mwของผลิตภัณฑ์

$$\begin{aligned} \text{Mw ของ BaTiO}_3 & \text{ คือ } 233.1922 \\ \text{คิดเป็น g} & \text{ คือ } 0.9000 \times \text{Mw ของ BaTiO}_3 \\ & 0.9000 \times 233.1922 = 209.87298 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mw ของ CaTiO}_3 & \text{ คือ } 135.9432 \\ \text{คิดเป็น g คือ} & 0.0750 \times \text{Mw ของ CaTiO}_3 \\ & 0.0750 \times 135.9432 = 10.19574 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mw ของ BaSnO}_3 & \text{ คือ } 304.0352 \\ \text{คิดเป็น g} & \text{ คือ } 0.0250 \times \text{Mw ของ BaTiO}_3 \\ & 0.0250 \times 304.0352 = 7.60088 \end{aligned}$$

$$\text{คิดเป็น 25 g คือ } g \times \frac{25}{\text{ผลรวมMwของผลิตภัณฑ์}}$$

$$\text{จำนวนกรัมที่ต้องซ้ BaCO}_3 \text{ คือ } 182.5357075 \times \frac{25}{217.781065} = 20.04392632$$

$$\text{จำนวนกรัมที่ต้องซ้ CaCO}_3 \text{ คือ } 7.5065175 \times \frac{25}{217.781065} = 0.824277539$$

$$\text{จำนวนกรัมที่ต้องซ้ SnO}_2 \text{ คือ } 3.76772 \times \frac{25}{217.781065} = 0.413726734$$

$$\text{จำนวนกรัมที่ต้องซ้ TiO}_2 \text{ คือ } 77.869155 \times \frac{25}{217.781065} = 8.550675518$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 สารในระบบ(0.925-x)BT-0.075CT-xBS

สัดส่วน	0.925	0.075	x	0.925-x+0.075
X=0.0250	BaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	SnO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
จำนวนโมล	0.925	0.075	0.025	0.975
Mw	197.3359	100.0869	150.7088	79.8658
จำนวนกรัม	182.5357075	7.5065175	3.76772	77.869155
ผลิตภัณฑ์ 25 g	20.04392632	0.824277539	0.413726734	8.550675518
X=0.0375	BaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	SnO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
จำนวนโมล	0.925	0.075	0.0375	0.9625
Mw	197.3359	100.0869	150.7088	79.8658
จำนวนกรัม	182.5357075	7.5065175	5.65158	76.8708325
ผลิตภัณฑ์ 25 g	19.96626607	0.821083873	0.618185623	8.408346596
X=0.0625	BaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	SnO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
จำนวนโมล	0.925	0.075	0.075	0.925
Mw	197.3359	100.0869	150.7088	79.8658
จำนวนกรัม	182.5357075	7.5065175	11.30316	73.875865
ผลิตภัณฑ์ 25 g	19.73685458	0.811649657	1.222165396	7.987901242
X=0.0750	BaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	SnO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
จำนวนโมล	0.925	0.075	0.0625	0.9375
Mw	197.3359	100.0869	150.7088	79.8658
จำนวนกรัม	182.5357075	7.5065175	9.4193	74.8741875
ผลิตภัณฑ์ 25 g	19.81273707	0.814770214	1.02238689	8.126972033
X=0.1000	BaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	SnO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
จำนวนโมล	0.925	0.075	0.1	0.9
Mw	197.3359	100.0869	150.7088	79.8658
จำนวนกรัม	182.5357075	7.5065175	15.07088	71.87922
ผลิตภัณฑ์ 25 g	19.58682013	0.805479706	1.617166416	7.7129312
X=0.1125	BaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	SnO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
จำนวนโมล	0.925	0.075	0.1125	0.8875
Mw	197.3359	100.0869	150.7088	79.8658
จำนวนกรัม	182.5357075	7.5065175	16.95474	70.8808975
ผลิตภัณฑ์ 25 g	19.51265506	0.802429775	1.812423431	7.577007931

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้