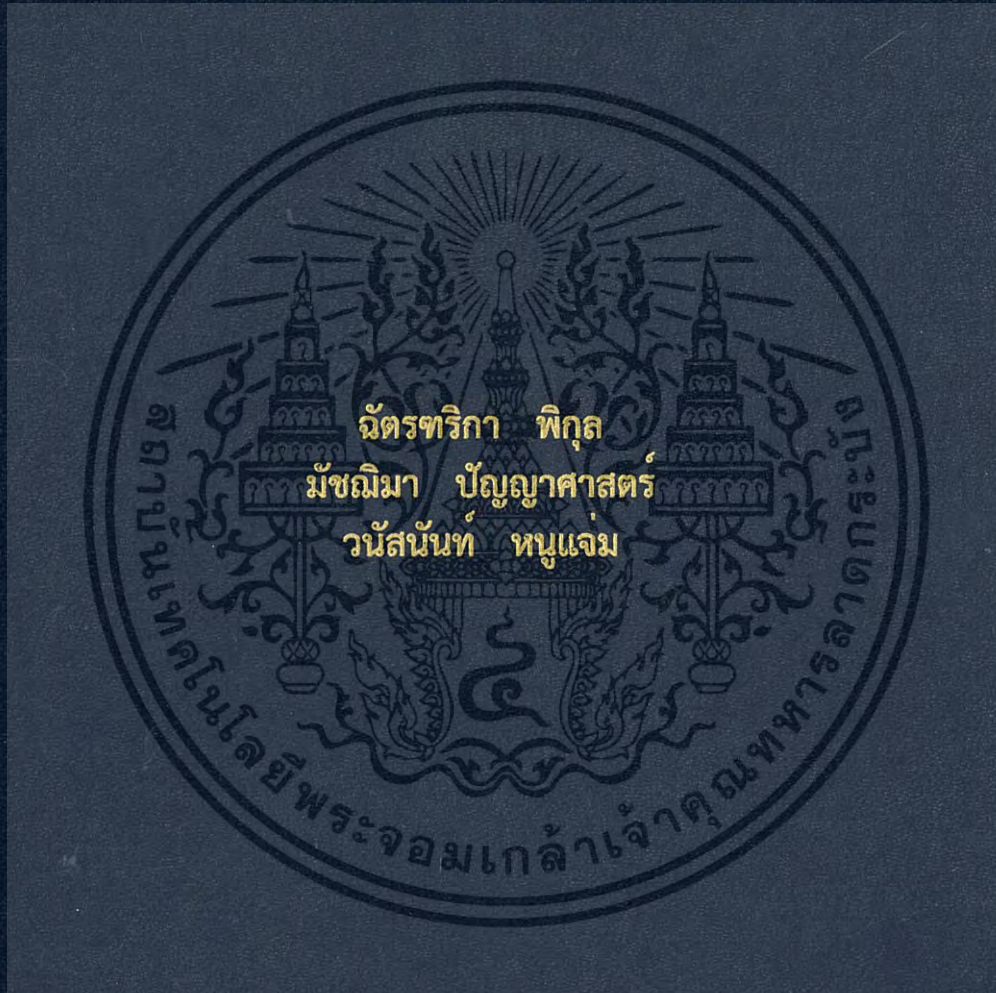


ผลของการแทนที่ตีบุกในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์
ที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริก

EFFECT OF Sn SUBSTITUTION ON THE PEROVSKITE
STRUCTURE TO DIELECTRIC AND
FERROELECTRIC PROPERTIES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

ผลของการแทนที่ดีบุกในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์
ที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริก

EFFECT OF Sn SUBSTITUTION ON THE PEROVSKITE
STRUCTURE TO DIELECTRIC AND
FERROELECTRIC PROPERTIES



โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF Sn SUBSTITUTION ON THE PEROVSKITE
STRUCTURE TO DIELECTRIC AND
FERROELECTRIC PROPERTIES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

ผลของการแทนที่ตีบุกในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ ที่มีผลต่อสมบัติ ไดอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริก

Effect of Sn substitution on the Perovskite structure to dielectric and ferroelectric properties

ชื่อนักศึกษา

นางสาวฉัตรทริกา พิกุล 57050392

นางสาวมัชฌิมา ปัญญาศาสตร์ 57050488

นางสาววันสนันท์ หนูแจ่ม 57050499

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

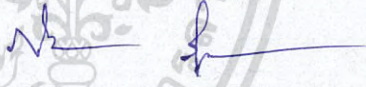

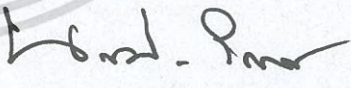
ปีการศึกษา

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.นราธิป วิทยากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช กรรมการ	
รศ.ดร.นราธิป วิทยากร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลของการแทนที่ตีบุกในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ ที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริก		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวฉัตรทริกา	ฟิสิกส์	รหัสนักศึกษา 57050392
	นางสาวมัชฌิมา	ปัญญาศาสตร์	รหัสนักศึกษา 57050488
	นางสาววนันสนันท์	หนูแจ่ม	รหัสนักศึกษา 57050499
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2560		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.นราธิป วิทยากร		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษฉบับนี้ จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของการแทนที่ตีบุกในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยแทนที่ตีบุกลงในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ของสารประกอบแบเรียมไททานेटที่ตำแหน่ง A จะแทนที่ Ba^{2+} ($Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$) และตำแหน่ง B แทนที่ Ti^{4+} ($BaTi_{1-x}Sn_xO_3$) สัดส่วนองค์ประกอบตีบุกที่ใช้ (x) คือ 0.03 0.06 0.09 0.12 ตามลำดับ ในขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกจะทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง และเผาหมึกที่อุณหภูมิต่างกัน เพื่อศึกษาผลของการแทนที่ด้วยธาตุชนิดเดียวกันในตำแหน่งที่ต่างกัน ซึ่งเม็ดเซรามิกที่ได้ทั้ง 2 ระบบ จะนำไปตรวจสอบสมบัติต่างๆ ซึ่งได้ผลดังนี้ เซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ สามารถเจือตีบุกได้สูงสุดที่สัดส่วน $x = 0.03$ เมื่อปริมาณตีบุกเพิ่มขึ้นจะปรากฏฟิสิกส์เปลี่ยนแปลงของพลาสมาไดออกไซด์ขึ้น ในขณะที่ระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ สามารถเจือตีบุกเข้าไปได้ทุกสัดส่วน เมื่อนำมาตรวจสอบสมบัติทางกายภาพพบว่าค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ อยู่ในช่วง 87 ถึง 89 เปอร์เซ็นต์ทุกอุณหภูมิ ส่วนระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ อุณหภูมิที่ให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดคือ 1450 องศาเซลเซียส โดยที่ลักษณะการหดตัวของทั้งสองระบบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือการหดตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาหมึกให้สูงขึ้น เมื่อตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าไดอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งให้เห็นว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (T_C) มีค่าลดลง และวงวนฮิสเทอรีซิสจะมีลักษณะเป็นสลิบลูปมากขึ้นเมื่อปริมาณตีบุกเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ ตีบุก แบเรียมไททานेट

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Effect of Sn substitution on the Perovskite structure to dielectric and ferroelectric properties			
Students	Miss.Chatrarika	Pikul	Student ID	57050392
	Miss.Matchima	Panyasat	Student ID	57050488
	Miss.Wanasanun	Nuchaem	Student ID	57050499
Degree	Bachelor of Science (Chemical Industry)			
Departure	Chemistry			
Faculty	Science			
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)			
Academic Year	2017			
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Naratip Vittayakorn			

Abstract

This special project studied the effect of tin (Sn) substitution on the perovskite structure that affect to dielectric and ferroelectric properties, by substituting Sn at both positions, A and B on perovskite structure of barium titanate. Substituting A with Ba^{2+} ($Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$) and B with Ti^{4+} ($BaTi_{1-x}Sn_xO_3$). Mole ratio of Sn (x) are 0.03, 0.06, 0.09 and 0.12. Ceramics were prepared by solid state reaction and sintering at various temperatures to study the effect of substitution by identical elemental in different positions. From the experiment, Maximum mole ration (x) of Sn-dropped for $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ was 0.03 because others mole ratio (x) would show uncommon peak of tindioxide, while $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ could dope to any positions. From investigating physical properties, relative density of $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ was in the range of 87 – 89% for all temperatures. For $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$, maximum relative density was got by sintering at 1,450°C. Tendency of shrinkage of these two were in the same way. It would be more shrinkage when increase sintering temperature. And from investigating electrical properties, it was showed that curie temperature decreased and hysteresis loop would be more slim loop when increase mole ratio (x) of tin.

Keywords : Barium titanate, Perovskite structure, Tin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จได้ต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นราธิป วิทยากร ที่ให้เกียรติในการเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในหัวข้อโครงการพิเศษนี้ ทั้งคอยให้คำแนะนำช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและความรู้เป็นอย่างดี สอนทักษะในการทำงาน มีความเอาใจใส่ลูกศิษย์กลุ่มนี้ ตลอดจนช่วยตรวจสอบแก้ไขให้ถูกต้องสมบูรณ์ จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณอย่างสูง ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร ที่กรุณามาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ และช่วยแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอย่างสูง ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช ที่กรุณามาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ และช่วยแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ประสิทธิประสาทสนวิชาความรู้ พร้อมทั้งให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่เอื้อเฟื้อให้ความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ในการทำงาน และสารเคมีต่างๆ รวมถึงเครื่องมือในห้องปฏิบัติการทดลอง

ขอขอบพระคุณคุณมณูญ สุตะพันธ์ สำหรับคำแนะนำ กำลังใจ ความปรารถนาดี และทุกๆ ความช่วยเหลือที่มีให้ตลอดงานวิจัย ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกท่านสำหรับคำแนะนำช่วยเหลือต่างๆ และกำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยดำเนินผ่านไปได้อย่างดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องเป็นอย่างยิ่งที่คอยสนับสนุนให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ คำตักเตือน และความห่วงใยในการดำเนินงานวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดซึ่งเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบให้ผู้ที่มิใช่พระคุณและผู้ที่มีความปรารถนาดีต่อผู้เขียนตลอดมา หากมีสิ่งใดผิดพลาดหรือขาดตกบกพร่องผู้เขียนต้องขอภัยเป็นอย่างสูง และหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาหรือสนใจในงานด้านนี้ต่อไป

ฉัตรทริกา พิกุล

มัชฌิมา ปัญญาศาสตร์

วันสนันท์ หนูแจ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุไดอิเล็กทริก.....	4
2.1.1 ธรรมชาติของวัสดุไดอิเล็กทริก (The Nature of Dielectric Material).....	4
2.1.2 ค่าการเก็บประจุ (Capacitance).....	6
2.1.3 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss).....	7
2.2 แบเรียมไททาเนต (Barium titanate; BaTiO ₃).....	8
2.3 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric).....	9
2.3.1 โดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริกและวงวนฮิสเทอรีซิส.....	10
2.3.2 อุณหภูมิกูรี และการเปลี่ยนเฟส.....	13
2.4 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์.....	15
2.5 การเจือฮาตุลงในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 กระบวนการเตรียมผงละเอียดด้วยการสังเคราะห์เฟสของแข็ง (Solid-Phase Synthesis for Fine Powder Processing)	18
2.6.1 การบดย่อย (Milling)	18
2.6.2 เทคนิคการสังเคราะห์แบเรียมไททาเนต (BaTiO ₃)	20
2.7 หลักการที่ใช้วิเคราะห์และตรวจสอบเอกลักษณ์	21
2.7.1 หลักการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD).....	21
2.7.2 หลักการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของสาร (Raman Spectrometer).....	23
2.7.3 หลักการวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant)	24
2.7.4 หลักการวิเคราะห์สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric).....	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.1 สารเคมี	37
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	37
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมเซรามิก.....	37
3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	38
3.3 ขั้นตอนการเตรียมเซรามิก.....	38
3.3.1 การเตรียมผงเซรามิก.....	38
3.3.2 การเตรียมเม็ดเซรามิก.....	40
3.4 การตรวจสอบสมบัติ.....	41
3.4.1 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์.....	41
3.4.2 เทคนิคในการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า.....	42
3.4.3 เทคนิคในการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	44
4.1 การแทนที่ที่บุงลงในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ของแบเรียมไททานเตตำแหน่ง A ($Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$).....	44
4.1.1 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการหาความหนาแน่นของตัวอย่างเซรามิก	44
4.1.2 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการหาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังการเผาผนึก (Firing Shrinkage).....	47
4.1.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD).....	49
4.1.4 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของสารจากการวิเคราะห์รามาน (Raman Spectrometer).....	52
4.1.5 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสารจากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss).....	54
4.1.6 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric).....	56
4.2 การแทนที่ที่บุงลงในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ของแบเรียมไททานเตตำแหน่ง B ($BaTi_{1-x}Sn_xO_3$).....	58
4.2.1 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการหาความหนาแน่นของตัวอย่างเซรามิก	58
4.2.2 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพหาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังการเผาผนึก (Firing shrinkage).....	61
4.2.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)	63
4.2.4 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของสารจากการวิเคราะห์รามาน (Raman Spectrometer).....	66
4.2.5 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสารจากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss).....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.6 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric).....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1 สรุปผลการวิจัย	73
5.1.1 การศึกษาหาคุณลักษณะเฉพาะของเม็ดเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$	73
5.1.2 การศึกษาหาคุณลักษณะเฉพาะของเม็ดเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข.....	83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โมเลกุลของไดอิเล็กทริกแบบมีขั้ว (ก) ขณะไม่ได้รับสนามไฟฟ้า (ข) ขณะได้รับสนามไฟฟ้าเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ	5
2.2 โมเลกุลของไดอิเล็กทริกแบบไม่มีขั้ว (ก) ขณะไม่ได้รับสนามไฟฟ้า (ข) ขณะได้รับสนามไฟฟ้าเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ	6
2.3 โครงสร้างของตัวเก็บประจุอย่างง่ายและองค์ประกอบทางไฟฟ้าต่างๆ	6
2.4 แสดงรูปการจัดเรียงทิศทางโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก	11
2.5 วงวนฮีสเทอรีซิส P-E โดยทั่วไปในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก	12
2.6 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงผลึกของแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) (ข) แลตทิซพารามิเตอร์ของแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) ในแต่ละอุณหภูมิ (ค) ค่าความยินยอมสัมพัทธ์ที่วัดตามแนวแกน a และ c ของสาร $BaTiO_3$ ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	14
2.7 โครงสร้างของผลึกเพอรอฟสไกต์	15
2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคูรีเมื่อเติมสทรอนเชียมลงในแบเรียมไททาเนต	17
2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคูรีเมื่อเติมตะกั่วลงในแบเรียมไททาเนต	17
2.10 แสดงการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและความเครียดภายในผลึก เมื่อเวลาในการบดย่อยนานขึ้น	19
2.11 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball Milling)	20
2.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของ Bragg' law	22
2.13 ตัวอย่างกราฟรามานสเปกตรัม	24
2.14 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่อุณหภูมิห้องสำหรับผงนาโน $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ หลังจากทำเผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	28
2.15 (ก) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดและ (ข) แสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ ที่ความถี่ 105 กิโลเฮิร์ต และแผ่นนิกที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	28
2.16 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BTS โดยเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1375 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	29
2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกแบเรียม ไททาเนตที่บริสุทธิ์และแบเรียมไททาเนตที่ถูกเจือด้วยเซอร์โคเนียม	31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกในระบบ $Ba(Ti_{1-x}Sn_x)O_3$ ที่มีสัดส่วน Sn ต่างกัน (ค่า x).....	32
2.19 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต	35
2.20 แสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต.....	36
3.1 กราฟแสดงขั้นตอนในการเผาแคลไซน์.....	39
3.2 การจัดเรียงชั้นงานในถ้วยอลูมินาสำหรับเผาผนึก	40
3.3 กราฟแสดงขั้นตอนในการเผาผนึก.....	41
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความหนาแน่นกับอุณหภูมิการเผาผนึกที่สัดส่วน	
องค์ประกอบต่างๆของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$	46
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวของเซรามิก (%S) ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ และอุณหภูมิการเผาผนึกที่ 1300 1350 1375 และ 1400 องศาเซลเซียส ของเซรามิกระบบ	48
4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$	50
4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$	50
4.5 แสดงสเปกตรัมรามานของชิ้นงานเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$	53
4.6 แสดงสเปกตรัมรามานในช่วง (ก) 100 ถึง 300 ต่อเซนติเมตร (ข) 400 ถึง 600 ต่อเซนติเมตร และ (ค) 650 ถึง 850 ต่อเซนติเมตร.....	54
4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$	55
4.8 แสดงวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$	57
4.9 แสดงค่าโพลาไรเซชันคงเหลือ (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าบังคับ (E_c) ของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ ที่สัดส่วน 0.03 0.06 0.09 และ 0.12.....	58
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความหนาแน่นสัมพันธ์กับกับอุณหภูมิการเผาผนึกที่สัดส่วน ... องค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$	60
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวของเซรามิก (%S) ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ และอุณหภูมิการเผาผนึกที่ 1400 1450 1500 และ 1550 องศาเซลเซียส ของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$	62
4.12 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$	64

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$	64
4.14 แสดงสเปกตรัมรามานของชิ้นงานเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$	67
4.15 แสดงสเปกตรัมรามานในช่วง (ก) 100 ถึง 300 ต่อเซนติเมตร (ข) 400 ถึง 600 ต่อเซนติเมตร และ (ค) 650 ถึง 850 ต่อเซนติเมตร.....	68
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$	69
4.17 แสดงวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$	71
4.18 แสดงค่าโพลาริเซชันคงเหลือ (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าบังคับ (E_c) ของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ ที่สัดส่วน 0.03 0.06 0.09 และ 0.12	72



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) เป็นหนึ่งในเซรามิกไดอิเล็กทริกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมตัวเก็บประจุ นับตั้งแต่มีการค้นพบแบเรียมไททาเนตมาเป็นเวลากว่า 60 ปีถือได้ว่าแบเรียมไททาเนตเป็นหนึ่งในวัสดุเซรามิกไดอิเล็กทริกที่สำคัญที่สุดที่ใช้ในการประยุกต์ใช้งาน และสาเหตุที่นิยมนำแบเรียมไททาเนตมาใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากแบเรียมไททาเนตมีคุณสมบัติที่โดดเด่นมากมาย เช่น มีเสถียรภาพทางเคมีและทางกลที่ดี มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่น เช่น สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric) สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) ทั้งนี้ยังสามารถจัดเตรียมและใช้งานได้ง่ายในรูปของวัสดุเซรามิกและใช้ต้นทุนต่ำ ด้วยเหตุนี้แบเรียมไททาเนตส่วนใหญ่จึงถูกนำมาใช้งานเป็นตัวเก็บประจุแบบแผ่นกลม และตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น (MLC) จากความสามารถในการเก็บและคายประจุของตัวเก็บประจุ จึงนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมาย ตัวอย่างเช่น การกรองไฟตีซี (Filter) การถ่ายทอดสัญญาณและเชื่อมโยงระหว่างวงจร (Coupling) การกรองความถี่ (Bypass) การกั้นการไหลของกระแสไฟตีซี (Blocking) เป็นต้น โดยมีปริมาณการใช้ถึงประมาณ 14 ล้านปอนด์ต่อปี ซึ่งเท่ากับประมาณ 3 หมื่นล้านตัวเก็บประจุ [1]

แบเรียมไททาเนตเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ โดยมีสูตรโครงสร้างทั่วไปเป็น ABO_3 ซึ่งข้อดีของโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์คือเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบ นั่นคือสามารถใส่สารเติมแต่ง (Additives) แทนที่ตำแหน่ง A และตำแหน่ง B ของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ได้และมีผลให้สมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยสมบัติหนึ่งที่จะเปลี่ยนแปลงไป นั่นคือ สมบัติไดอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้งานของวัสดุเซรามิกไดอิเล็กทริก [2] [3] นอกจากนี้ธาตุหรือสารเติมแต่งที่จะสามารถเข้าแทนที่กันได้จะต้องมีขนาดและเลขออกซิเดชันที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงมีเพียงธาตุบางชนิดที่สามารถแทนที่ตำแหน่งนั้นๆได้ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ A. Ianculescu และคณะ [4] ได้ศึกษาผลการเติมสตรอนเชียม (Sr^{2+}) ลงในแบเรียมไททาเนต พบว่าสตรอนเชียมจะเข้าไปในตำแหน่ง A แทนที่แบเรียมได้ และมีผลให้อุณหภูมิคูรีลดลงจาก 120 องศาเซลเซียส ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นหรืองานวิจัยของ L.Amarande และคณะ [5] ได้ศึกษาผลการเติมเซอร์โคเนียม (Zr) ลงในแบเรียมไททาเนต พบว่าเซอร์โคเนียมจะเข้าไปในตำแหน่ง B แทนที่ไทเทเนียม และมีผลให้อุณหภูมิคูรีและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง หรืองานวิจัยของ S. Marković และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาผลการเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีบุก (Sn^{4+}) ลงในแบเรียมไททาเนต พบว่าดีบุกจะเข้าไปในตำแหน่ง B แทนที่ไทเทเนียม ปริมาณดีบุกที่เพิ่มขึ้นจะมีผลให้อุณหภูมิคูรีลดลง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งและลดลง จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าสมบัติที่เปลี่ยนไปจะขึ้นกับชนิดของธาตุที่ใช้ และธาตุนั้นจะแทนที่ตำแหน่งใดจะขึ้นกับขนาดและเลขออกซิเดชัน นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Chung-Eun Lee และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาผลการเติมดีบุกลงในแบเรียมไททาเนตที่มีผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้า พบว่าสามารถควบคุมให้ดีบุกเข้าแทนที่ได้ทั้งสองตำแหน่งในโครงสร้าง และยังส่งผลให้สมบัติการนำไฟฟ้าของแบเรียมไททาเนตเปลี่ยนไป แต่งานวิจัยนี้ยังไม่ครอบคลุมถึงผลที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ เช่น สมบัติไดอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริก เป็นต้น และความสามารถในการละลายของดีบุกในสารประกอบแบเรียมไททาเนต

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของการแทนที่ดีบุกในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยทำการแทนที่ดีบุกลงในแบเรียมไททาเนตทั้งตำแหน่ง A และตำแหน่ง B เพื่อศึกษาผลของการแทนที่ด้วยธาตุชนิดเดียวกันในตำแหน่งที่ต่างกัน รวมถึงความสามารถในการละลายของดีบุก โดยเจือดีบุกลงในแบเรียมไททาเนตปริมาณ 0.03 0.06 0.09 และ 0.12 โมล และเลือกใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid State Reaction) ในการสังเคราะห์แบเรียมไททาเนตที่เจือดีบุกในปริมาณที่ต่างกัน พร้อมทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้าง และสมบัติทางไฟฟ้าของสารดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการแทนที่ของดีบุกในสารประกอบแบเรียมไททาเนตโดยศึกษาการแทนที่ในตำแหน่งแบเรียมและไททาเนียม
- 2) ศึกษาโครงสร้างผลึก สมบัติทางไฟฟ้า และสัญญาณวิทยาของเซรามิกแบเรียมไททาเนตที่เจือดีบุกในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สังเคราะห์ผงผลึก $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ เมื่อ $x = 0.03$ 0.06 0.09 และ 0.12 ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
- 2) สังเคราะห์ผงผลึก $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ เมื่อ $x = 0.03$ 0.06 0.09 และ 0.12 ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
- 3) เตรียมเซรามิก $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ และ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ ให้มีความหนาแน่นสูง
- 4) ตรวจสอบโครงสร้างผลึก สมบัติทางไฟฟ้า และสัญญาณวิทยาของเซรามิก $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ และ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงความสามารถในการละลายของดีบุกในสารประกอบแบเรียมไททาเนตที่มีการแทนที่ในตำแหน่งที่ต่างกัน
- 2) ทราบถึงสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างผลึกของสารประกอบแบเรียมไททาเนตที่มีการแทนที่ดีบุกในตำแหน่งที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุไดอิเล็กทริก

2.1 วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric Material)

ไดอิเล็กทริก (Dielectric) หรือฉนวน (Insulator) ไฟฟ้าที่สามารถเกิดโพลาริเซชันได้จะมีพฤติกรรมตรงกันข้ามกันกับตัวนำ ประกอบด้วยประจุที่มีพันธะ (Bond) ยึดอยู่กับจุดศูนย์กลางของนิวเคลียสอย่างเหนียวแน่น ประจุเหล่านี้จะเคลื่อนที่ในระยะสั้นๆ เท่านั้น อย่างไรก็ตามประจุเหล่านี้สามารถสร้างสนามไฟฟ้าตัวที่สองที่สามารถเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟารวมทั้งด้านในและด้านนอกวัสดุได้

2.1.1 ธรรมชาติของวัสดุไดอิเล็กทริก (The Nature of Dielectric Material)

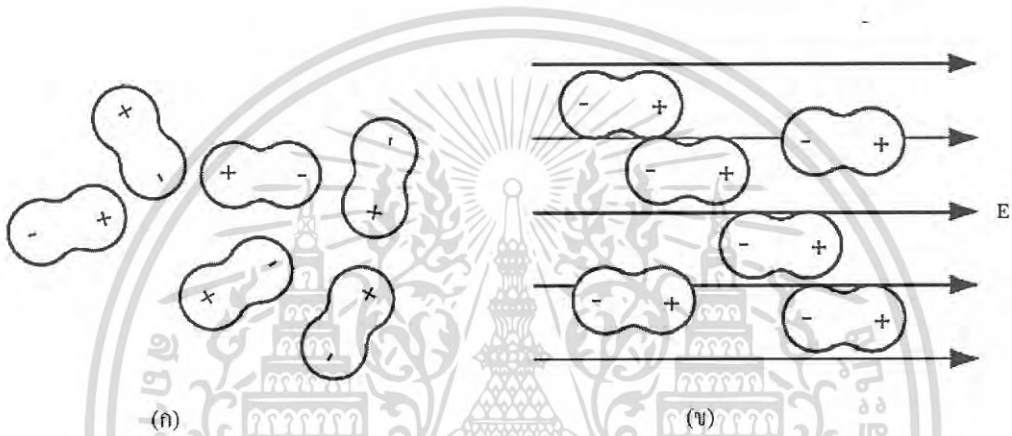
ฉนวนไฟฟ้า คือ สารที่ภายในไม่มีประจุไฟฟ้าอิสระ หรือถ้ามีก็น้อยมากหากนำไปวางไว้ในสนามไฟฟ้าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากการกระตุ้นก็จะมีค่าน้อยมาก แต่ถ้าเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าไปถึงระดับหนึ่งจะทำให้ไดอิเล็กทริกหนึ่งๆ สามารถเปลี่ยนไปเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ ซึ่งสมบัติไดอิเล็กทริกจะเกิดในวัสดุไดอิเล็กทริกที่แสดงความเป็นขั้ว โดยวัสดุไดอิเล็กทริกจะไม่นำไฟฟ้าเป็นฉนวน สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้า โดยเมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกยังไม่ได้มีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุโพลาริเซชันจะจัดเรียงตัวแบบสุ่มแต่เมื่อให้สนามไฟฟ้าวัสดุจะเกิดการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชัน (Polarization) เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยโพลาริเซชันจะหันทิศทางขั้ว (Domain) ในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้ามา ซึ่งค่าผลรวมของโพลาริเซชันเทียบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Net Polarization/Unit Volume) การโพลาริเซชันแปรผันตรงกับค่าความจุในการกักเก็บประจุไฟฟ้า ถ้าเกิดโพลาริเซชันสูงค่าความจุจะสูงตามไปด้วย ซึ่งค่าความจุ (Capacitance) เป็นค่าจำเพาะขึ้นกับวัสดุ ซึ่งสมบัติไดอิเล็กทริกจะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative Permittivity, ϵ_r) ค่าความทนไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss) ส่วนความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ไดอิเล็กทริกรับได้โดยไม่เปลี่ยนคุณสมบัติการเป็นตัวนำจะถูกเรียกว่าความแข็งแรงของไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) ของวัตถุนั้น เช่น อากาศ ปกติอากาศจะมีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กทริก กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ผ่านอากาศไม่ได้ แต่ถ้าอากาศในบริเวณนั้นมีสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มเท่ากับ 3×10^6 N/C อากาศบริเวณนั้นก็จะกลายเป็นตัวนำทันที โดยปกติวัสดุทุกชนิดจะมีคุณลักษณะเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกไม่มากนักน้อย ไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊ส โดยพวกมันจะมีความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ การเก็บพลังงานเหล่านั้นเกิดจากการเลื่อนตำแหน่งสัมพัทธ์ภายในพันธะประจุบวกและประจุลบ ซึ่งตรงกันข้ามกับแรงโมเลกุลและแรงปริมาตร (Atomic Force) ในสภาวะปกติ [8] โดยปกติโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กทริกหรือฉนวนจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) แบบมีขั้ว (Polar)

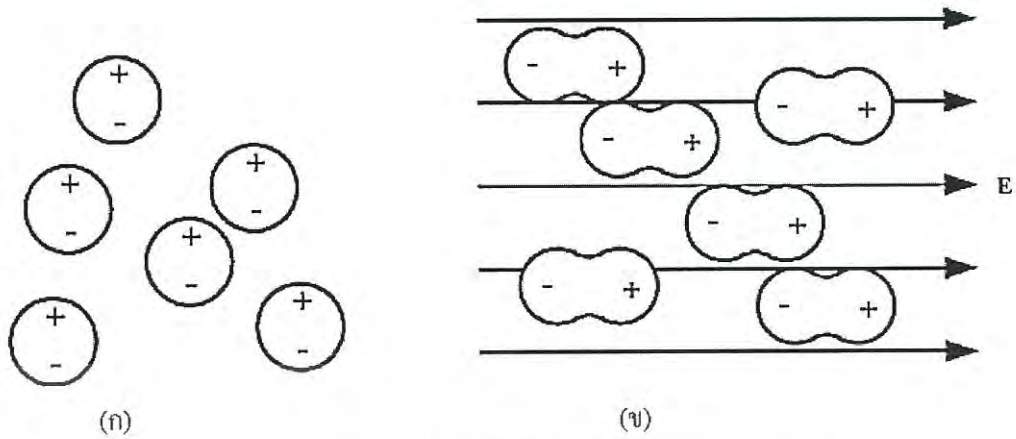
โมเลกุลแบบมีขั้ว ประกอบด้วยอิเล็กตรอนและโปรตอนดังรูปที่ 2.1 (ก) หรือเรียกโมเลกุลแบบนี้ว่า “เพอร์มาเนนต์ไดโพล (Permanent Dipole)” เมื่อวางไว้ในสนามไฟฟ้า E จะทำให้ได้ผลดังรูปที่ 2.1 (ข)



รูปที่ 2.1 โมเลกุลของไดอิเล็กทริกแบบมีขั้ว (ก) ขณะไม่ได้รับสนามไฟฟ้า (ข) ขณะได้รับสนามไฟฟ้าเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ [8]

2) แบบไม่มีขั้ว (Non-Polar)

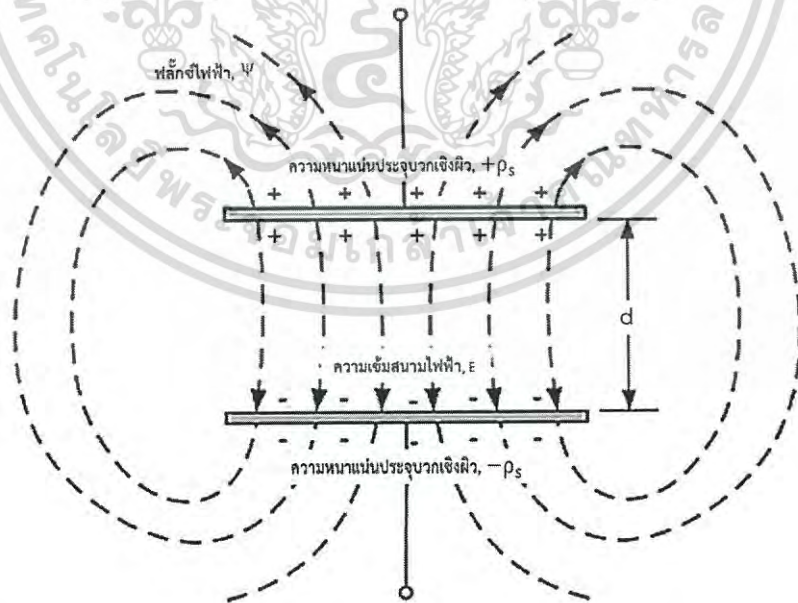
โมเลกุลแบบไม่มีขั้ว ประกอบด้วยอิเล็กตรอนและโปรตอนที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันดังรูปที่ 2.2 (ก) และเมื่อวางไว้ในสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดดังรูปที่ 2.2 (ข) ผลจากรูปดังกล่าวทำให้ถูกแยกขั้วหรือที่เรียกว่า “โพลารไรซ์” เราสามารถเรียกโมเลกุลแบบนี้ว่า “อินดิวซ์ไดโพล (Induced Dipoles)” และโดยทั่วไปโมเลกุลแบบนี้ เมื่อหยุดจ่ายสนามไฟฟ้าจะคืนกลับมาอยู่ในสถานะเดิมดังรูปที่ 2.2 (ก) ให้สังเกตว่า ไม่ว่าจะป็นโมเลกุลแบบใดเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า จะให้ผลเหมือนดังรูปที่ 2.1 (ข) และรูปที่ 2.2 (ข)



รูปที่ 2.2 โมเลกุลของไดอิเล็กทริกแบบไม่มีขั้ว (ก) ขณะไม่ได้รับสนามไฟฟ้า (ข) ขณะได้รับสนามไฟฟ้าเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ [8]

2.1.2 ค่าการเก็บประจุ (Capacitance)

หากเราวางตัวนำใดๆ แยกห่างจากกัน และตรงกลางคั่นไว้ด้วยฉนวน (Dielectric) หรืออากาศว่างเปล่าไว้จะทำให้ตัวนำดังกล่าวมีความสามารถที่จะเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ได้ โครงสร้างแบบนี้จึงถูกเรียกว่า ตัวเก็บประจุ (Conductor) โดยเราสามารถนิยามค่าการเก็บประจุของโครงสร้างตัวเก็บประจุได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของตัวเก็บประจุอย่างง่ายและองค์ประกอบทางไฟฟ้าต่างๆ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บประจุ 1 ฟารัด จะมีค่าเท่ากับประจุระหว่างเพลตทั้งสองที่มีค่า 1 คูลอมบ์ต่อแรงดันแตกต่างบนเพลตที่มีค่าเท่ากับ 1 โวลต์ องค์ประกอบทางไฟฟ้าใดๆ ที่เกิดบนตัวเก็บประจุอย่างง่ายจะเป็นดังรูปที่ 2.3 และนิยามค่าการเก็บประจุของโครงสร้างตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ 2.1

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อโวลต์ (C/V) หรือฟารัด (F)

Q คือ ค่าประจุรวมทั้งหมดที่อยู่บนตัวนำทั้งสอง มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)

V คือ ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำทั้งสอง มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

จากสมการที่ (2.1) ข้างต้น ทำให้เราได้ความสัมพันธ์อื่นๆได้อีก ดังนี้

$$Q = \rho_s s \quad (2.2)$$

และ

$$V = \frac{\rho_s d}{\epsilon} \quad (2.3)$$

หากจัดรูปสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 แทนลงในสมการที่ 2.1 จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ใหม่ดังสมการที่ 2.4

$$C = \frac{\epsilon_0 s}{d} \quad (2.4)$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อโวลต์ (C/V) หรือฟารัด (F)

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เทียบสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร (F/m)

s คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ถ้าในกรณีที่มีสารไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นขนานจะทำให้ตัวเก็บประจุสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากในวัสดุจะมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity, ϵ_r) ซึ่งเป็นค่าจำเพาะขึ้นกับวัสดุดังสมการที่ 2.5

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r s}{d} \quad (2.5)$$

2.1.3 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss)

ในวัสดุเซรามิกค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก เป็นค่าที่เกิดจากการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปแล้วส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นมาก ทำให้โพลาริเซชันภายในวัสดุไดอิเล็กทริกเกิดการกลับตัวของทิศทางชั่วไม่ทัน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นและนำไปสู่การสูญเสียไดอิเล็กทริกเกิดขึ้น ซึ่งสามารถประมาณได้จากสัดส่วนของความได้เปรียบทางพลังงานของวงจรแผ่นตัวนำที่ขนานและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถวัดได้จากอิมพีแดนซ์ ซึ่งปริมาณของค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นสามารถประมาณได้ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ [9]

2.2 แบเรียมไททาเนต (Barium titanate; BaTiO₃)

แบเรียมไททาเนต (BaTiO₃) เป็นสารประกอบที่น่าสนใจมานานกว่า 60 ปี โดยการนำแบเรียมไททาเนตมาใช้งานครั้งแรกเกิดในช่วงสงครามโลกครั้งที่สองโดยนำมาเพื่อใช้เป็นโซนาร์ทรานสดิวเซอร์ใต้น้ำมีไว้เพื่อระบุตำแหน่งของเรือดำน้ำ ต่อมาเมื่อมาถึงยุคที่สงครามสงบลงจึงมีการนำมาใช้งานเป็นอุปกรณ์กำเนิดอัลตราซาวด์ (Ultrasonic Sound Generator) และเครื่องอัลตราโซนิกสำหรับการทำความสะอาด (Ultrasonic Cleaner) สาเหตุที่นิยมนำแบเรียมไททาเนตมาใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นมากมาย ประการแรกเพราะแบเรียมไททาเนตมีเสถียรภาพทางเคมีและทางกลที่ดีมาก ประการที่สองเนื่องจากสารประกอบแบเรียมไททาเนตมีคุณสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) และประการสุดท้ายคือสามารถจัดเตรียมและใช้งานได้ง่ายให้อยู่ในรูปของวัสดุเซรามิก ตัวอย่างเช่น แบเรียมไททาเนตส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้งานเป็นตัวเก็บประจุแบบแผ่นกลม และตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น (MLC) ซึ่งตัวเก็บประจุแบบหลายชั้นจะมีจำนวนชั้นของแบเรียมไททาเนตอยู่ถึง 250 ชั้นโดยแต่ละชั้นหนาประมาณ 4 ถึง 7 ไมครอน เคลือบด้วยโลหะเป็นขั้วไฟฟ้า โดยมีปริมาณการใช้ถึงประมาณ 14 ล้านปอนด์ต่อปี ซึ่งเท่ากับประมาณ 3 หมื่นล้านตัวเก็บประจุ หรือแม้แต่การนำแบเรียมไททาเนตมาทำการเจือธาตุชนิดอื่นเข้าไป เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆด้านอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductors) ตัวรักษาระดับอุณหภูมิ (Thermistors) อุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เป็นต้น และยังกลายเป็นเซรามิกที่สำคัญที่สุดเป็นอันดับหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกด้วย

เนื่องจากแบเรียมไททาเนตไม่สามารถพบได้ในธรรมชาติ จึงจำเป็นที่จะต้องสังเคราะห์ขึ้นด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งเทคนิคการสังเคราะห์แบเรียมไททาเนตมีด้วยกันหลายวิธีและถูกกล่าวถึงในงานวิจัยจำนวนมาก ในการเลือกเทคนิคสำหรับการสังเคราะห์แบเรียมไททาเนตนั้นมักคำนึงถึงค่าใช้จ่ายเป็นหลัก แต่ที่สำคัญกว่าคือผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ และคุณภาพของแบเรียมไททาเนตไม่เพียงขึ้นกับกระบวนการสังเคราะห์เท่านั้นยังขึ้นกับสารตั้งต้นที่ใช้อีกด้วย

คุณสมบัติทั่วไปของแบเรียมไททาเนต คือ อุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) ของแบเรียมไททาเนตมีค่าต่ำอยู่ที่ 120 องศาเซลเซียส และแฟกเตอร์การเชื่อมต่อพลังงานกลไฟฟ้า (Electromechanical Coupling Factor) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Leadzirconate Titanate ; PZT) โดยค่าคูรีของแบเรียมไททาเนต คือ 0.35 และค่าคูรีของกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลดเซอร์โคเนตไททานต คือ 0.65 สิ่งที่ทำให้แบเรียมไททานตแตกต่างกับเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของแบเรียมไททานตมีความเสถียรสูงกว่า ทำให้ง่ายต่อการเผาขึ้น (Sintering) โดยมีความแน่นอนทางองค์ประกอบเคมีที่ดีกว่า [1]

นอกจากนี้แบเรียมไททานตยังเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) โดยวัสดุเซรามิกที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์จะถือเป็นวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญมากในระดับหนึ่ง [1] และยังมีอีกหลายคุณสมบัติของแบเรียมไททานตที่ได้รับการรายงานและตีพิมพ์ในงานวิจัยเป็นจำนวนมาก

2.3 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric)

ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกถูกค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวอเมริกันชื่อ โจเซฟ วาลาเซค (Joseph Valasek) โดยเขาได้ทำการวิจัยเรื่อง “Piezoelectric and Allied Phenomena in Rochelle Salt” ในการประชุมวิชาการของสมาคมฟิสิกส์สหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ.1920 โดยเขาได้กล่าวตอนหนึ่งว่า “เกลือโรเชลล์แสดงพฤติกรรมของวงวนฮิสเทอรีซิสที่ตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าคล้ายคลึงกับวงวนฮิสเทอรีซิสที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยโพลาริเซชัน (P) และสนามไฟฟ้า (E) มีความคล้ายคลึงกับความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (B) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ในวัสดุแม่เหล็ก” และหลังจากการประชุมครั้งนี้ เขาได้มีการนำเสนอวงวนฮิสเทอรีซิสของเกลือโรเชลล์ หรือโพแทสเซียมโซเดียมทาทเรต ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) นับได้ว่าเป็นการนำเสนอการค้นพบปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกขึ้นเป็นครั้งแรก โดยปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกมีข้อจำกัดวัสดุอยู่สองประการที่บ่งบอกความเป็นสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ คือ วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกสามารถเกิดโพลาริเซชันได้เองซึ่งเรียกว่า โพลาริเซชันเกิดเอง (Spontaneous Polarization) โดยไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก และโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองนี้สามารถกลับทิศได้เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าภายนอกอย่างเหมาะสม [10]

หลังจากมีการค้นพบปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกในเกลือโรเชลล์แล้ว ทำให้การศึกษาวัดเฟอร์โรอิเล็กทริกได้รับความสนใจอย่างมาก หลังจากช่วงสงครามโลกครั้งที่สองมีเป้าหมายพัฒนาวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์โซนาร์ในการตรวจจับเรือดำน้ำของศัตรูฝ่ายตรงข้าม และต่อมาเซรามิกแบเรียมไททานตก็มีการถูกสังเคราะห์ขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา รัสเซีย และญี่ปุ่นเพื่อใช้แทนตัวเก็บประจุชนิดเดิมที่ทำจากไมก้า เนื่องจากแบเรียมไททานตเป็นวัสดุออกไซด์ชนิดแรกที่สามารถแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกได้โดยไม่ต้องมีพันธะไฮโดรเจน และมีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์

ตารางที่ 2.1 ลำดับเหตุการณ์สำคัญในการพัฒนาวัสดุแบเรียมไททาเนตที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก [10]

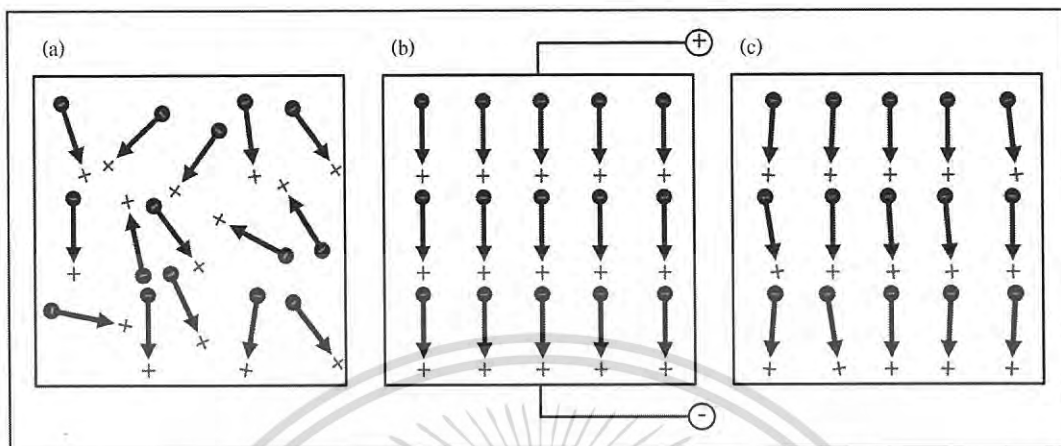
ปี ค.ศ.	เหตุการณ์
1921	การค้นพบปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกในเกลือโรเชลล์
1941	การพัฒนาแบเรียมไททาเนตซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูง (มากกว่า 2000) เป็นตัวเก็บประจุ
1944	การค้นพบปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกในวัสดุที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (ABO_3)
1945	การพัฒนาแบเรียมไททาเนตเป็นทรานสดิวเซอร์
1957	การพัฒนาแบเรียมไททาเนตเป็นตัวเก็บประจุหลายชั้น (MLC)
1977	การพัฒนาการสังเคราะห์ฟิล์มบางของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

ด้วยความสามารถและประโยชน์ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ส่งผลให้ความต้องการในการใช้งานมีเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆทุกปี โดยในปี ค.ศ.2010 ได้มีการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นองค์ประกอบคิดเป็นมูลค่าสูงสุด 14.8 พันล้านเหรียญสหรัฐ และคาดว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปีอย่างน้อยปีละ 15 เปอร์เซ็นต์ จนถึงปี ค.ศ.2022 [11] และจากผลการสำรวจยังพบอีกว่ามากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ ไม่ว่าจะเป็นแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) เลดไทเทเนต (PbTiO_3) โพแทสเซียมไนโอเบต (KNbO_3) เป็นต้น [11] ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่สามารถแสดงสมบัติโดดเด่นได้หลายด้าน การเข้าใจถึงทฤษฎีและความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติต่างๆของวัสดุกลุ่มนี้ จึงถือได้ว่าเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนา และปรับปรุงประสิทธิภาพของวัสดุและอุปกรณ์ โดยส่วนใหญ่การพัฒนาวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกในปัจจุบันจะมุ่งเน้นไปที่การหาวัสดุชนิดใหม่ๆ ที่สามารถแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นกว่าของเดิม ทำให้สมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริกมีคุณสมบัติสูงมากยิ่งขึ้นเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆด้านตามความต้องการ

2.3.1 โดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริกและวงวนฮิสเทอรีซิส

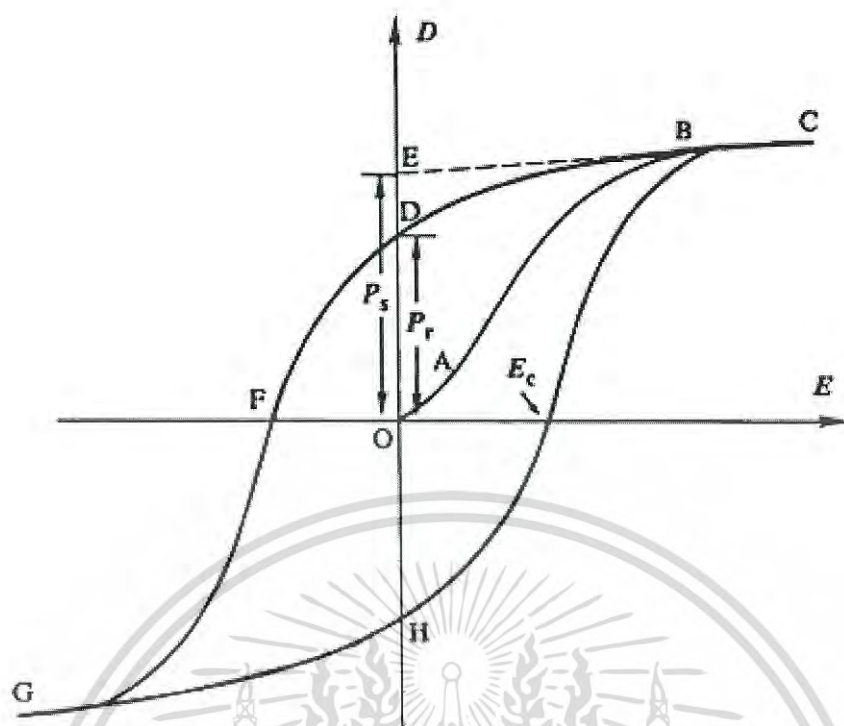
วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีความเป็นขั้วในตัวเอง คือ โพลาริเซชันเกิดขึ้นเองได้แม้ไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำ แต่ขั้วเหล่านี้ก็สามารถจัดเรียงตัวใหม่ได้เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (b) ซึ่งโดยทั่วไปการจัดเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอของขั้วทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในบริเวณที่แน่นอนภายในผลึกนั้นๆ ในขณะที่บริเวณอื่นจะเรียงตัวในทิศตรงข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 2.4 (a) ซึ่งบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชันอย่างสม่ำเสมอนั้นเรียกว่า “โดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก

(Ferroelectric Domains)” และมีรอยต่อระหว่างโดเมนสองโดเมนเรียกว่า “ผนังโดเมน (Domain Wall)” อย่างไรก็ตามยังไม่มีคำอธิบายชัดเจนเกี่ยวกับจุดกำเนิดการเกิดโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริกนี้ [10]



รูปที่ 2.4 แสดงรูปการจัดเรียงทิศทางโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก [12]

นอกจากโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริกแล้วยังมีลักษณะเฉพาะอีกอย่างที่สำคัญของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก คือ วงวนฮิสเทอรีซิส (Ferroelectric Hysteresis loop) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าโพลาริเซชัน (P) ที่สัมพันธ์กับ ค่าสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป (E) โดยวงวนฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเมื่อเริ่มให้สนามไฟฟ้าภายนอก เข้าไปเพียงเล็กน้อยจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้าแบบเชิงเส้น เนื่องจากค่าสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปยังไม่มากพอที่จะสลับขั้วโดเมนได้ ดังนั้นผลึกจะเปรียบเสมือนเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกปกติ (พาราอิเล็กทริก) ซึ่งก็คือเส้น OA บนกราฟในรูปที่ 2.5 และเมื่อสนามไฟฟ้ามีความเข้มมากขึ้นจะทำให้โดเมนที่มีทิศตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้า (ทิศลบ) ค่อยๆ เปลี่ยนทิศและเรียงตัวใหม่ให้อยู่ในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า (ทิศบวก) ส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (เส้น AB) จนกระทั่งโดเมนทั้งหมดเรียงในทิศทางเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้าภายนอก (เส้น BC) โดยเรียกสถานะนี้ว่าเป็นสถานะอิ่มตัวซึ่งผลึกนี้จะประกอบด้วยโดเมนเดียว



รูปที่ 2.5 วงวนฮิสเทอรีซิส P-E โดยทั่วไปในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก [13]

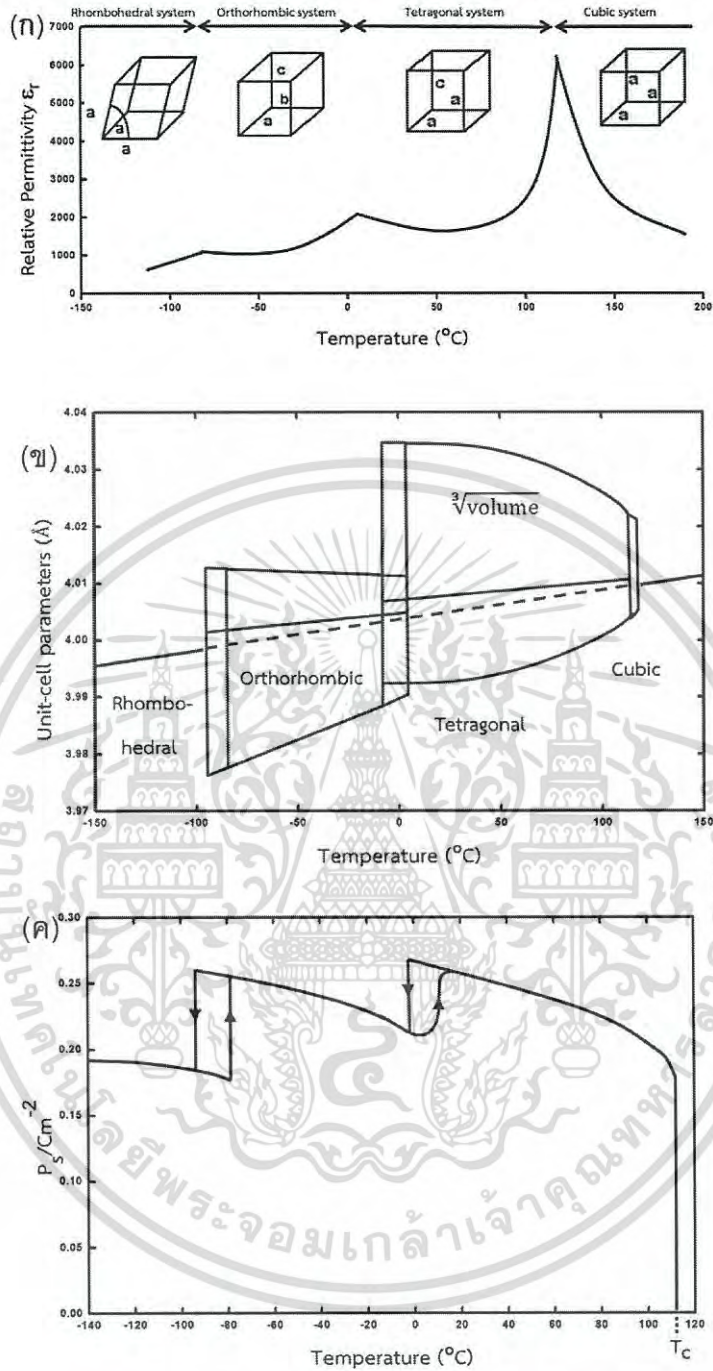
เมื่อทำการลดความเข้มของสนามไฟฟ้าภายนอกค่าโพลาไรเซชันก็จะค่อยๆ ลดลง (ที่จุด D ในรูปที่ 2.5) แต่จะไม่กลับไปศูนย์ เนื่องจากว่าที่สนามไฟฟ้าเท่ากับศูนย์จะยังคงมีบางโดเมนที่เรียงตัวในทิศทางบวกอยู่ โดยจะเรียกค่าโพลาไรเซชันที่สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ว่า โพลาไรเซชันคงค้าง หรือ P_r (Remanent Polarization) และเมื่อทำการลากเส้นตรงต่อมาจากแนวเส้นตรง BC ให้มาตัดแกน y (จุด E) จะเรียกค่าโพลาไรเซชันที่จุดนี้ว่า โพลาไรเซชันเกิดเอง หรือ P_s (Spontaneous Polarization) ส่วนค่า P_r ในผลึกนี้จะไม่สามารถกำจัดออกไปได้จนกว่าจะให้สนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไปในทิศทางตรงข้าม (ทิศลบ) จนถึงค่าหนึ่ง (จุด F) ซึ่งค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ทำให้ค่าโพลาไรเซชันกลายเป็นศูนย์ ($P=0$) นี้จะเรียกว่า สนามไฟฟ้าลบกลับ หรือ E_c (Coercive field) และเมื่อทำการเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าเข้าไปอีกในทิศทางลบจะส่งผลต่อ การจัดเรียงตัวของโดเมนเช่นเดียวกันกับในทิศบวก และเมื่อโดเมนจัดเรียงตัวตามทิศลบได้อย่างสมบูรณ์แล้ว หากทำการเพิ่มสนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไปในทิศบวกอีกครั้ง โดเมนก็จะจัดเรียงตัวใหม่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้ ซึ่งค่าโพลาไรเซชันที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้นจนบรรจบกันกลายเป็นวงที่สมบูรณ์เรียกความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชัน และสนามไฟฟ้าภายนอกนี้ว่า วงวนฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop)

2.3.2 อุณหภูมิคูรี และการเปลี่ยนเฟส

ลักษณะเฉพาะที่สำคัญอีกอย่างของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก คือ อุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสที่เรียกว่า อุณหภูมิคูรี หรือ จุดคูรี (Curie point ; T_c) ซึ่งเมื่อทำการลดอุณหภูมิลงผ่านจุดคูรีแล้ว ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกจะเปลี่ยนโครงสร้างเฟสจากพาราอิเล็กทริกไปเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดคูรีผลึกจะไม่สามารถแสดงพฤติกรรมของเฟอร์โรอิเล็กทริกออกมา ในขณะที่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดคูรีผลึกจะสามารถแสดงพฤติกรรมของเฟอร์โรอิเล็กทริกออกมาได้ ซึ่งจากข้อเท็จจริงนี้เชื่อว่า โครงสร้างในเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึกเกิดขึ้นจากการบิดเบี้ยวเล็กน้อยของโครงสร้างในเฟสพาราอิเล็กทริก ส่งผลให้ระบบสมมาตรของแลตทิซในเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกมีค่าต่ำกว่าในเฟสพาราอิเล็กทริก สำหรับกรณีที่มีผลึกมีเฟสที่สามารถแสดงความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกได้มากกว่าหนึ่งเฟส จุดคูรีจะเป็นอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริกเท่านั้น ส่วนอุณหภูมิที่ผลึกเปลี่ยนจากเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกอื่นไปเป็นอีกเฟอร์โรอิเล็กทริกหนึ่งนั้นจะเรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (Transition Temperature) ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสและค่าโพลาริเซชันเกิดเอง (P_s) ที่อุณหภูมิห้องสำหรับวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกแต่ละชนิด เช่น จุดคูรีของแบเรียมไททานเตคือ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก ซึ่งแบเรียมไททานเตจะมีเฟสที่สามารถแสดงความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ 3 เฟส เฟสที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกหนึ่งไปเป็นเฟสอื่นๆ ได้แก่ 0 องศาเซลเซียส และ -90 องศาเซลเซียสซึ่งจะไม่เรียกว่าจุดคูรี อย่างไรก็ตามยังมีผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกบางชนิด เช่น กัวนิตินอะลูมิเนียมซิลิเกตเฮกซะไฮเดรต (GASH) และลิเทียมไตรไฮโดรเจนเซเลไนต์ ($\text{LiH}_3(\text{SeO}_3)_2$) จะไม่มีจุดคูรีเนื่องจากสามารถคงความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกไว้ได้จนถึงอุณหภูมิการสลายตัว [14]

จากรูปที่ 2.6 (ข) และ รูปที่ 2.6 (ค) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า -90 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนจากเฟสจากรอมโบฮีดรอลไปเป็นเฟสออร์ทอโรมบิก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมาถึงที่อุณหภูมิประมาณ 5 องศาเซลเซียส เฟสออร์ทอโรมบิกจะเกิดการบิดเบี้ยวและเปลี่ยนไปเป็นเฟสเตตระโกนอล โดยมีโมเมนต์ขั้วคู่เกิดขึ้นมาในทิศทางตามแนวแกน C ตามลำดับ ดังแผนภาพแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงจนถึงจุดอุณหภูมิคูรีที่ 120 องศาเซลเซียส ก็จะเกิดการเปลี่ยนเป็นเฟสคิวบิกที่เสถียร สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกจะหายไป

ในอีกรูปแบบหนึ่ง คือ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ซึ่งไม่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Non-Ferroelectric Hexagonal) ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเสถียรที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 1460 องศาเซลเซียส และยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิห้องได้ดีอีกด้วย

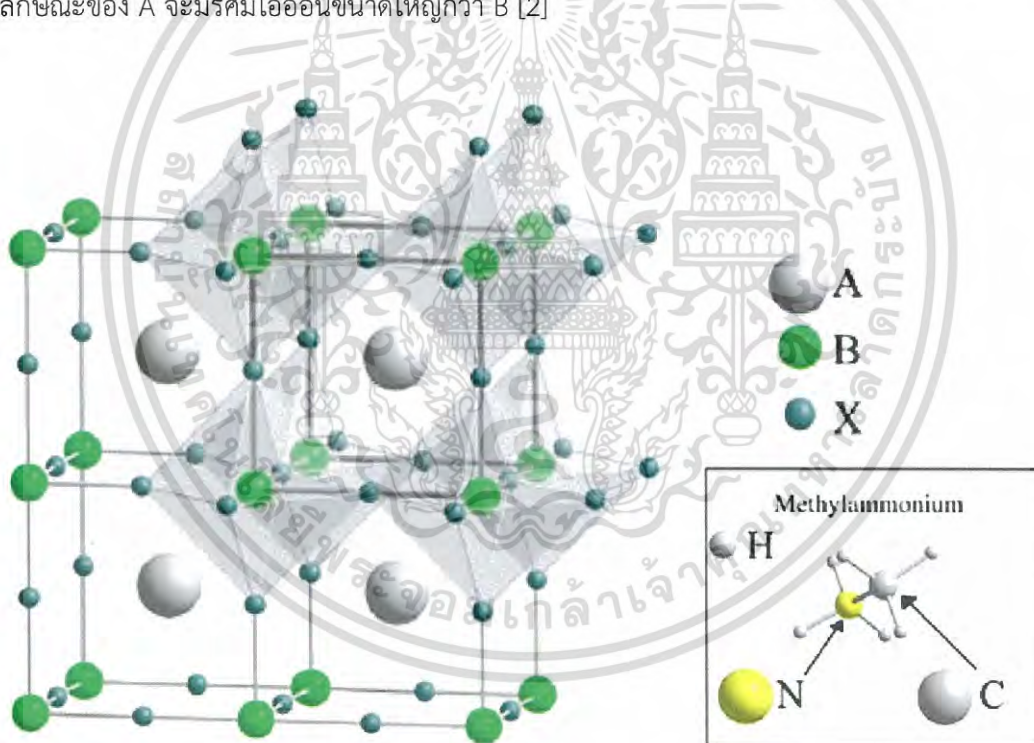


รูปที่ 2.6 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงผลึกของแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) (ข) แลตทิซพารามิเตอร์ของแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) ในแต่ละอุณหภูมิ (ค) ค่าความยินยอมสัมพัทธ์ที่วัดตามแนวแกน a และ c ของสาร BaTiO_3 ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์

โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์เป็นชื่อที่เรียกกันตามแร่แคลเซียมไททานเนต (CaTiO_3) ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Gustav Rose นักธรณีวิทยาชาวรัสเซีย และตั้งชื่อเป็นเกียรติให้แก่ Lev Perovski นักธรณีวิทยาที่มีชื่อเสียงชาวรัสเซีย โดยเพอโรฟสไกต์เป็นชื่อทั่วไปที่ใช้เรียกวัสดุประกอบที่มีสูตรโครงสร้างทั่วไปเป็น ABO_3 ซึ่งจะแสดงให้เห็นจากรูปที่ 2.7 เมื่อ A คือไอออนบวกที่ทำหน้าที่ตุลประจุให้เป็นกลาง (ซึ่งอาจจะมาจากโลหะหรือสารไฮโดรคาร์บอน) ซึ่งวัสดุเพอโรฟสไกต์ดังกล่าวมีมากมายกว่า 100 ชนิด ทั้งแบบอนินทรีย์และแบบไฮบริด (มีการแทนที่ไอออนบวกหมู่ A ในสูตร ABX_3 ด้วยสารอินทรีย์) และมีสมบัติที่เด่นหลายประการ เช่น แอนติเฟอร์โรแมกเนติก (Antiferromagnetic) เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) วัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconducting) วัสดุนำ (Conducting) และ ตัวนำแบบยิ่งยวด (Superconducting) ในขณะที่ B คือไอออนบวกของโลหะ เช่น ตะกั่ว (Pb) ดีบุก (Sn) และ X คือ อะตอมเฮไลด์ โดยที่ลักษณะของ A จะมีรัศมีไอออนขนาดใหญ่กว่า B [2]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของผลึกเพอโรฟสไกต์ [15]

โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์มีพื้นฐานมาจากการเชื่อมต่อกันในแบบสามมิติของทรงแปดหน้า (Octahedral) ที่เกิดจาก BO_6 ซึ่งไอออนบวก A และไอออนลบของออกซิเจนจะจัดเรียงตัวแบบบรรจุชิดรูปลูกบาศก์ (Cubic Closed Packed) โดยไอออนบวก A จะอยู่ที่มุมของหน่วยเซลล์

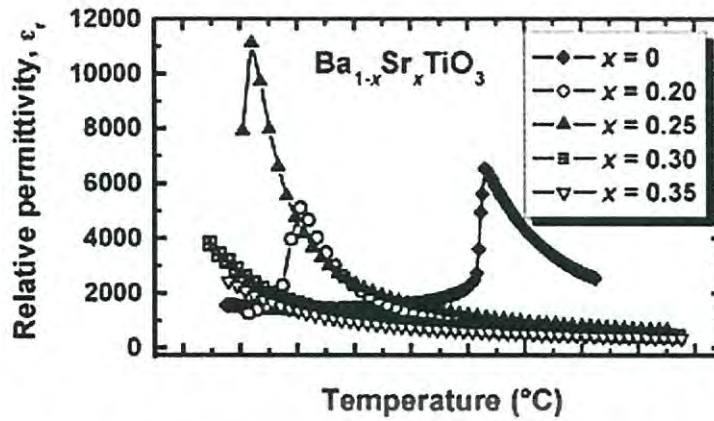
ส่วนออกซิเจนจะอยู่ที่หน้าของหน่วยเซลล์ และไอออนบวก B จะแทรกอยู่ในช่องว่างกลางทรงแปดหน้า (Octahedral Side)

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบที่มีสูตรเคมีเป็น $A^{+2}B^{+2}O^{-2}_3$ หรือ $A^{+1}B^{+5}O^{-2}_3$ ส่วนสารประกอบเพอโรฟสไกต์ที่มีสูตรเคมีเป็น $A^{+3}B^{+3}O^{-2}_3$ มีอยู่หลายชนิดแต่ไม่พบที่แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก นอกจากนี้ยังพบว่าในสารประกอบเพอโรฟสไกต์ชนิดต่างๆ ค่ารัศมีไอออนิกของไอออน A และ B มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่กว้าง โดยโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ถูกจัดเป็นส่วนประกอบย่อยของหน่วยโครงสร้างที่อยู่ภายในโครงสร้างที่มีความสลับซับซ้อนมากบางประเภท

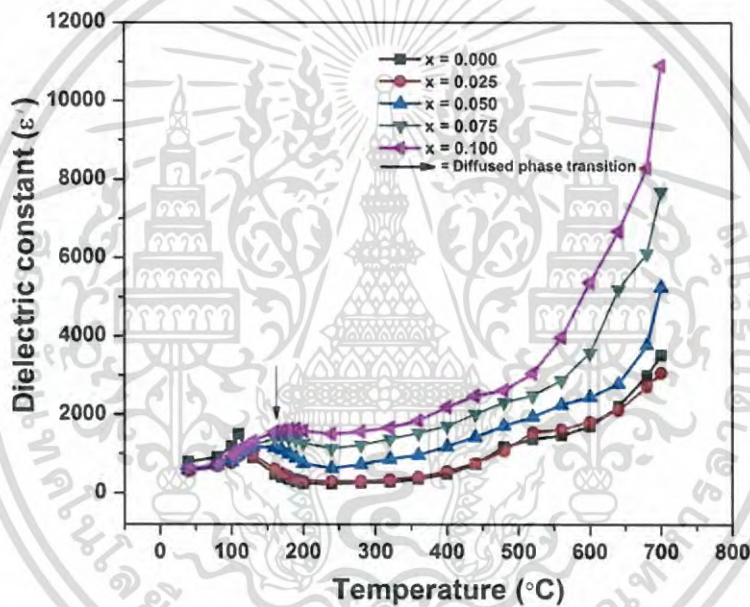
2.5 การเจือธาตุลงในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์

ส่วนในด้านการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแบเรียมไททาเนตส่วนใหญ่สามารถทำได้โดยการเติมโลหะทรานซิชันในกลุ่ม 3d เช่น แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) และ นิกเกิล (Ni) เป็นสารที่ใช้เจือลงไป ในงานวิจัยส่วนใหญ่ในปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสารแบเรียมไททาเนตที่เจือด้วยแมงกานีส (Mn-doped $BaTiO_3$) โดยพบว่าสามารถทำให้โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal Polymorph) ของสารประกอบเซรามิกมีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างผลึกและคุณสมบัติของสารแบเรียมไททาเนตที่เจือด้วยแมงกานีสจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งโครงสร้างที่อยู่บริเวณรอบๆ อะตอม และสถานะทางวาเลนซ์ของแมงกานีสที่เติมเข้าไป ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีรายงานการวิจัยที่ยืนยันข้อมูลดังกล่าวได้อย่างแน่ชัด

อย่างไรก็ตามการใช้งานวัสดุแบเรียมไททาเนตมักมีการใส่สารเติมแต่ง (Additives) บางอย่างลงไปด้วยเพื่อเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงสมบัติพื้นฐาน โดยทั่วไปนั้นสารตัวเติมสำหรับวัสดุทรานสดีวเซอร์แบเรียมไททาเนตที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น สารเติมพวกสทรอนเซียม (Sr^{2+}) ใช้สำหรับการลดอุณหภูมิคูรี (T_c) จาก 120 องศาเซลเซียสให้ต่ำลงดังรูปที่ 2.8 สารตัวเติมตะกั่ว (Pb^{2+}) ใช้เติมเพื่อเพิ่มให้อุณหภูมิคูรี (T_c) สูงขึ้นดังรูปที่ 2.9 สารตัวเติมแคลเซียม (Ca^{2+}) ช่วยในการเพิ่มช่วงอุณหภูมิที่เสถียรของเฟสเตตระโกนอล และสารตัวเติมโคบอลต์ (Co^{2+}) จะช่วยลดค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกโดยที่ไม่มีผลกระทบต่อค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกอีกด้วย [3]



รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคูรีเมื่อเติมสทรอนเซียมลงในแบเรียมไททานेट [4]



รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคูรีเมื่อเติมตะกั่วลงในแบเรียมไททานेट [16]

สิ่งที่ต้องคำนึงในการนำแบเรียมไททานेटที่ใช้ทำเกี่ยวกับตัวเก็บประจุมาใส่สารเติมแต่ง จะมีการใช้สารที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้เพื่อลดสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริกให้ได้มากที่สุด แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องรักษาหรือเพิ่มค่าคงที่ทางไดอิเล็กทริกเอาไว้ โดยทั่วไปจะนิยมลดอุณหภูมิคูรีลงมากกว่า เพื่อให้มีค่าสภาพยอมสูง (High Permittivity) ในช่วงที่ใกล้กับอุณหภูมิห้อง หรือช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับใช้งาน ตัวอย่างสารเติมแต่งจำพวกที่ใช้ลดค่าอุณหภูมิคูรีเช่น NiSnO_3 [17] ซึ่งจะเติมลงในแบเรียมไททานेटในปริมาณที่ไม่มากนักประมาณร้อยละ 1-8 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้ลดหรือกีดความสูงของพีคค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ณ อุณหภูมิคูรี ซึ่งส่งผลให้กราฟระหว่างค่าคงที่

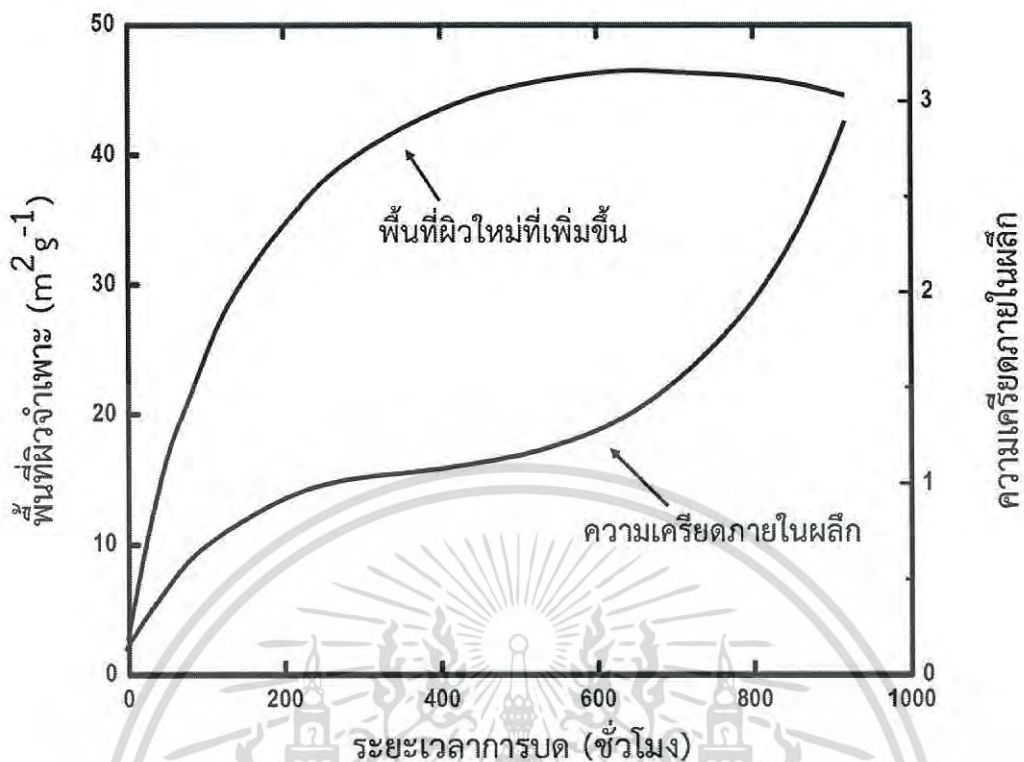
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดอิเล็กทริกกับอนุภาคมีลักษณะแบบต่ำลง ส่วนสารเติมแต่งที่ช่วยเลื่อนอนุภาคให้เพิ่มหรือลด เช่น SrTiO_3 ซึ่งส่งผลให้อนุภาคมีค่าสูงขึ้นหรือลดลงได้เช่นกัน

2.6 กระบวนการเตรียมผงละเอียดด้วยการสังเคราะห์เฟสของแข็ง (Solid-Phase Synthesis for Fine Powder Processing)

2.6.1 การบดย่อย (Milling)

อนุภาคผงที่ผ่านกระบวนการบดหยาบจนทำให้มีขนาดเล็กระดับหนึ่งมาแล้วจำเป็นต้องผ่านกระบวนการบดย่อยในระบบปิดอีกหนึ่งขั้นตอน เพื่อให้ได้อนุภาคขนาดที่มีความละเอียดสูงพอที่จะนำไปใช้เตรียมขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเซรามิกขั้นสูงต่อไป ซึ่งกระบวนการบดย่อยมีด้วยกันหลายเทคนิค ยกตัวอย่างเช่น การบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball Mill) การบดย่อยแบบลูกกลิ้งแรงอัดสูง (High Compression Roller Mill) การบดย่อยแบบสั่นกระแทก (Vibratory Ball Mill) การบดย่อยแบบพลังงานจากลมไอพ่น (Jet Mill or Fluid Energy Mill) แต่เทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอลจะเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการใช้งานมากที่สุด และสามารถแบ่งออกได้อีกหลายชนิดด้วยกัน หากทำการเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงาน (Energy Utilization of Comminution) และอัตราการบด (Grinding Rate) ของการบดย่อยกับการบดหยาบ พบว่าการบดย่อยจะให้ค่าอัตราการใช้พลังงานและอัตราการบดที่ต่ำกว่า เนื่องจากระบบที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นระบบปิด และการบดย่อยอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะทำได้ยากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ในกระบวนการบดย่อยนั้นอนุภาคจะได้รับความเค้นเชิงกล (Mechanical Stresses) เนื่องจากแรงจากการกดอัด (Compression) แรงจากการกระแทก (Impact) และแรงจากการเฉือน (Shear) ณที่อนุภาคผงสัมผัสกับลูกบอลหรือสัมผัสระหว่างอนุภาคด้วยกันเอง ซึ่งความเค้นเชิงกลนี้ส่งผลให้เกิดการผิดรูปแบบยืดหยุ่นหรือไม่ยืดหยุ่นขึ้น (Elastic or Inelastic Deformations) และเมื่อความเค้นเชิงกลนี้สูงมากเกินกว่าความแข็งแรงของอนุภาค อนุภาคผงจะแตกออก (Fracture) ส่งผลทำให้เกิดพื้นที่ผิวใหม่ขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการบดย่อย [18] ดังแสดงในรูปที่ 2.10

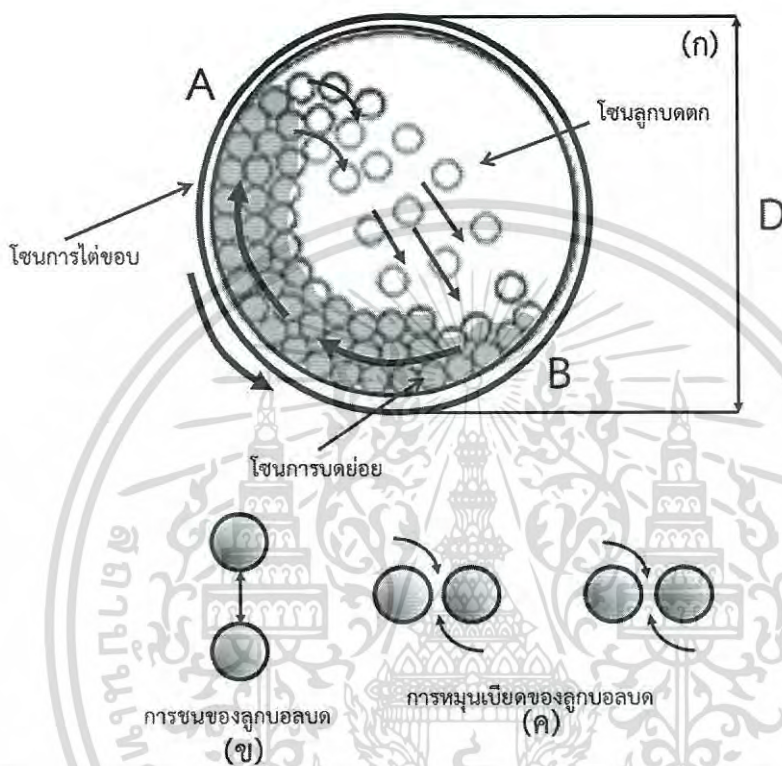


รูปที่ 2.10 แสดงการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว และความเคียดภายในผลึก
เมื่อเวลาในการบดย่อยนานขึ้น [18]

กระบวนการบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball Milling) เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมในการใช้งานมากที่สุด ในอุตสาหกรรมเซรามิกเพื่อลดค่าขนาดอนุภาคผงเฉลี่ย ใช้ทำลายอนุภาคผงที่มีรูพรุนหรือสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ข้างในให้แตกออก ช่วยแยกกลุ่มอนุภาคออกจากกัน และนอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการผสมอนุภาคต่างชนิดกันให้เกิดการผสมผสานเข้าด้วยกันพร้อมกับการลดขนาดของอนุภาค ซึ่งกระบวนการนี้จะอาศัยการหมุนของหม้อบดซึ่งภายในบรรจุลูกบอลบดและอนุภาคผงที่จะทำการบด โดยอาศัยแรงเชิงกลซึ่งได้แก่ แรงกดอัด แรงกระแทก และแรงเฉือน ที่เกิดขึ้นระหว่างลูกบอลบดและอนุภาคผงที่ต้องการบดทำให้อนุภาคขนาดใหญ่แตกออก หม้อบดจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีฝาเปิดปิด คุณสมบัติต้องมีความแข็งแรงทนทานสูง ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ทนต่อการเสียดสี หรือขีดถูสูง วัสดุที่ควรเลือกใช้ต้องไม่เกิดการปนเปื้อนระหว่างกระบวนการ แต่หากเกิดการปนเปื้อนต้องสามารถกำจัดทิ้งไปได้ง่าย สำหรับหม้อบดในห้องปฏิบัติการวัสดุทั่วไปที่เตรียมเซรามิกขั้นสูงนิยมใช้พลาสติกกลุ่มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ทำหม้อบด เนื่องจากสามารถกำจัดเศษพลาสติกที่ปนเปื้อนในกระบวนการบดย่อยได้โดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิต่ำ การบรรจุอนุภาคผงลงในหม้อบดจะมีการใส่สารที่จะทำการบดผสมพร้อมกับลูกบอลบด (Grinding Media) รวมถึงสารช่วยในการหล่อลื่นลงไป ในปริมาณที่พอเหมาะกับขนาดหม้อบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะต้องปรับอัตราส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้ในหม้อบดให้ระบบทั้งชุดสามารถเกิดพฤติกรรมการบดย่อย ลักษณะการบดย่อยของลูกบอลลจะต้องมีการเคลื่อนที่คล้ายๆกับตัวอักษร D โดยการเคลื่อนที่ไล่จากตำแหน่ง B ขึ้นไปยังตำแหน่ง A แล้วตกลงมากระแทกกับวัสดุด้านล่าง จากนั้นจะมีการหมุนเบียดเสียดกันและมีการเลื่อนไหลเป็นวัฏจักรแบบนี้ไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball Milling) [18]

2.6.2 เทคนิคการสังเคราะห์แบเรียมไททาเนต (BaTiO_3)

ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) เป็นการเตรียมผงของสารประกอบออกไซด์อย่างง่ายส่วนมากนิยมใช้วิธีนี้ ซึ่งเป็นวิธีการที่อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นที่มีสถานะของแข็งผสมกันอยู่ ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการเตรียมผงสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนโดยใช้สารตั้งต้นในกลุ่มคาร์บอเนตไนเตรทซัลไฟด์ แอซิเตทและออกซาลेट การสังเคราะห์สารแบเรียมออกซอไททาเนต (Ba_2TiO_4) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) และแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3)

การเตรียมด้วยวิธีการเผาไหม้ที่สถานะของแข็งเป็นวิธีการที่อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นที่สถานะเป็นของแข็งผสมกันอยู่ วิธีนี้สามารถเตรียมได้โดยการนำสารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง

มาซึ่งน้ำหนักให้ได้สัดส่วนตามต้องการ แล้วนำมาบดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันหลังจากนั้นให้ความร้อนเข้าไปเพื่อให้เกิดการสลายตัวหรือเกิดปฏิกิริยากันระหว่างสารตั้งต้นต่างชนิดกันแล้วเกิดเป็นสารชนิดใหม่ขึ้นมา กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การแคลไซน์ (Calcination) ซึ่งมีปัจจัยหลายประการที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งระหว่างอนุภาคผงของตัวทำปฏิกิริยา เช่น ธรรมชาติทางเคมีของตัวทำปฏิกิริยาและสารที่เกิดขึ้นใหม่ ขนาดของอนุภาค ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค ความแตกต่างของอนุภาคในวัสดุผสม ความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุผสมสภาวะของบรรยากาศ อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาโดยทั่วไป แล้วถ้าใช้อนุภาคของวัสดุที่มีขนาดใหญ่ อัตราการเกิดปฏิกิริยาในวัสดุผสมก็จะลดลงเนื่องจากอนุภาคของวัสดุต้องเคลื่อนที่ด้วยระยะทางที่ไกลขึ้น นอกจากนี้คุณภาพของการผสมอนุภาคของตัวทำปฏิกิริยาก็มีผลต่อระยะทางในการแพร่และจำนวนผิวที่อนุภาคสัมผัสกันด้วย การเตรียมวัสดุผงจากการเผาไหม้ของแข็งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างน้อย แต่วัสดุผงที่เตรียมได้มักจะมีปัญหาเรื่องการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ (Agglomeration) ทำให้ต้องมีการบดย่อยลดขนาดอยู่เสมอจึงมีโอกาสนำวัสดุที่เตรียมได้มีสารแปลกปลอม (Contamination) ปะปนมาด้วยและเมื่อนำไปใช้อาจจะทำให้เกิดเฟสที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ได้ [1]

2.7 หลักการที่ใช้วิเคราะห์และตรวจสอบเอกลักษณ์

2.7.1 หลักการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

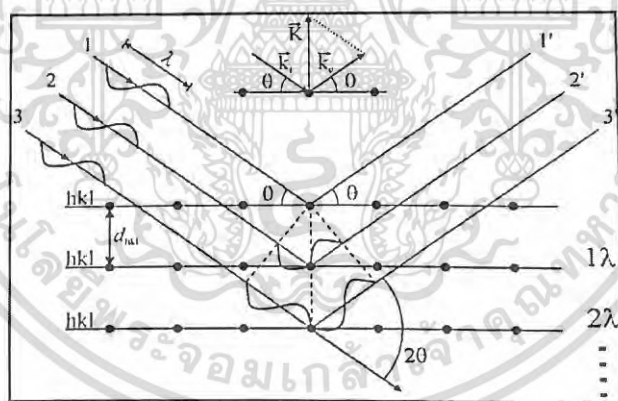
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ X-ray Diffractometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive Method) โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกันดังรูปที่ 2.12 ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและยังสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดขนาดของหน่วยเซลล์ (Unit Cell) ที่ไม่เท่ากัน รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จึงออกมาไม่เท่ากัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่าในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรบ้าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการของ Bragg' law ตามสมการที่ 2.8 ดังนี้

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกัน
 θ คือ มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
 n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม คือ 1,2,3...n
 2θ คือ มุมเลี้ยวเบนที่เป็นมุมระหว่างรังสีตกกระทบทำกับรังสีสะท้อน

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD ที่สามารถหาค่าประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหาได้อีกหลายอย่าง เช่น คำนวณหาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ (Unit Cell) ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่าง นอกจากนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบางและคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย แต่ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือหาค่าประกอบตัวอย่างที่เป็นอสัณฐานได้ (Amorphous) เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่อาจสามารถใช้ XRD คำนวณหาปริมาณของส่วนที่เป็นอสัณฐานในตัวอย่างว่ามีสัดส่วนกี่เปอร์เซ็นต์ได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน



รูปที่ 2.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของ Bragg' law [19]

ลักษณะตัวอย่างที่เหมาะสมในการวิเคราะห์เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็นผงได้ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 เมช หรือประมาณ 40 ไมครอน (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง อยู่ประมาณ 1 ถึง 2 กรัม ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อนต้องมีขนาดกว้างและยาวไม่เกิน 10 เซนติเมตร

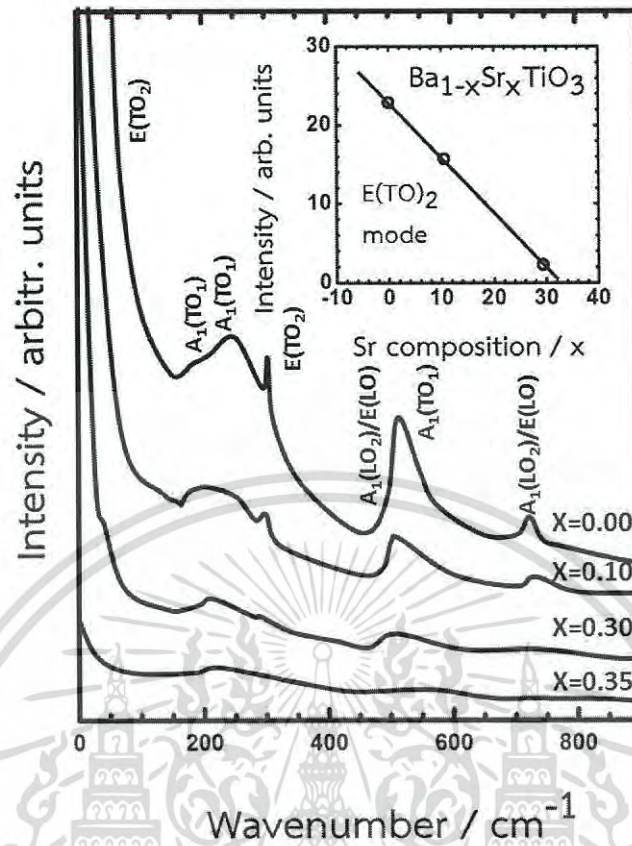
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้พื้นที่ที่จะทำการทดสอบเป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ประมาณ 10 มิลลิเมตรเท่านั้น ในกรณีที่ว่าอย่าง มีปริมาณน้อยมากๆ ก็อาจทำการทดสอบได้ โดยทางห้องปฏิบัติการจะใช้แผ่น Zero Background ในการวางตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ และในกรณีที่ต้องการทดสอบฟิล์มบาง (Thin Film) เพื่อหาความหนาของชั้นฟิล์มความหนาของฟิล์มที่เตรียมต้องอยู่ระหว่าง 10 นาโนเมตร ถึง 100 นาโนเมตร ผลการทดสอบจะผิดพลาดมากและหากมีความหนาเกิน 100 นาโนเมตร จะไม่สามารถคำนวณความหนาได้ [19]

2.7.2 หลักการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของสาร (Raman Spectrometer)

การกระเจิงในรามานเกิดขึ้นได้โดยใช้ลำแสงโมนโครมาติกที่มีความเข้มสูง เช่น ลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งแสง แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้ แต่จะมีแสงส่วนน้อยบางส่วนเกิดการกระเจิงไปทุกทิศทางด้วยการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) แต่มีการชนส่วนน้อยอีกส่วนหนึ่งคือ การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปเล็กน้อย เรียกว่า การกระเจิงแบบรามาน (Raman Scattering) เมื่อกล่าวถึงปรากฏการณ์ของการเกิดกระเจิง ในกระบวนการกระเจิงนั้นสิ่งสำคัญที่จะต้องเน้น คือ การดูดกลืนแสงหรือโฟตอนเริ่มต้น และการให้การคายการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นเป็นกระบวนการเกิดอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพของการเกิดอันตรกิริยานี้ขึ้นอยู่กับอิเล็กทรอนิกส์ในโมเลกุลถูกรบกวนได้ง่ายเพียงใด คุณสมบัตินี้เรียกว่า โพลาริเซชัน (Polarization) ถ้าโพลาริเซชันของโมเลกุลเปลี่ยนไปในระหว่างการสั่นของโมเลกุล จะมีผลต่อการเกิดรามานของโฟตอนจากการเกิดอันตรกิริยาหรือโฟตอนเริ่มต้น ด้วยพลังงานแสง ดังนั้นโมเลกุลที่ทำให้แสงโมนโครมาติกเกิดการกระเจิงแล้วเกิดได้โมเลกุลนั้นจะต้องเกิดการสั่นทำให้โพลาริเซชันของสารนั้นเปลี่ยนไป ส่วนสำคัญของเครื่องรามานที่ต้องมีคือ เครื่องที่สามารถวัดแสงที่กระเจิงได้ซึ่งโดยปกติแล้วเป็นแสงที่มัน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความเข้มสูง เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ก็ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความเข้มสูง ระบบใส่สารตัวอย่าง (Sample Illumination system) และเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่เหมาะสม [20]

การสั่นสะเทือนต้องทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันเกิดขึ้นภายในโมเลกุล ถ้าโพลาริเซชัน (Polarizability) ของโมเลกุลถูกเปลี่ยนไประหว่างการสั่นของโมเลกุลจะมีผลต่อการเกิดรามาน ดังนั้นโมเลกุลที่ทำให้แสงเดี่ยวเกิดการกระเจิงแล้วทำให้เกิดเส้นรามานได้ โมเลกุลนั้นจะต้องเกิดการสั่นทำให้โพลาริเซชันของสารเปลี่ยนไป การสั่นสะเทือนแบบนี้จึงแสดงให้เห็นได้ในสเปกตรัมของรามาน ซึ่งสเปกตรัมของรามานแสดงแกน y เป็นค่าความเข้มชน (Intensity) และแกน x เป็นค่าเลขคลื่น (Wave number) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างกราฟรามานสเปกตรัม [20]

2.7.3 หลักการวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant)

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกส่วนมากไม่นำไฟฟ้าแต่แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกได้ดี ดังนั้นสิ่งสำคัญในการนำวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกไปใช้งานจึงจำเป็นต้องทราบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกก่อน (Dielectric Loss) นอกจากนี้ในการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกจะทำให้ทราบข้อมูลและเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างอะตอมและกลไกการเกิดโพลาริเซชันทางไฟฟ้าในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกด้วย

หากตัวเก็บประจุแผ่นโลหะคู่ขนานประกอบไปด้วยตัวกลางไดอิเล็กทริก เมื่อให้แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ (ϵ) กับความถี่ (ω) บนตัวเก็บประจุนี้พบว่ามีค่ากระแสสลับ (i) ไหลผ่านตัวเก็บประจุเป็นดังสมการที่ 2.9

$$i = j\omega\epsilon_r C_0 \epsilon \quad ; (j = \sqrt{-1}) \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ C_0 คือค่าความจุของตัวเก็บประจุแผ่นโลหะคู่ขนานที่ไม่มีตัวกลาง เช่น ตัวกลางเป็นสุญญากาศ และ ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant) ที่เป็นฟังก์ชันกับ ω เนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กทริกรวมทั้งการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้ายังคงมีอยู่ในวัสดุไดอิเล็กทริก ϵ_r จึงต้องเขียนในรูปจำนวนเชิงซ้อนดังสมการที่ 2.10

$$\epsilon_r^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) \quad (2.10)$$

เมื่อ $\epsilon_r'(\omega)$ คือ ส่วนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ $\epsilon_r''(\omega)$ คือ ส่วนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นการแสดงค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกโดยใช้ค่า $\tan \delta$ แทนค่า ϵ_r'' ในการหาค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก และนิยามไว้ว่า

$$\tan \delta = \epsilon_r''/\epsilon_r'$$

โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) ในตัวเก็บประจุแผ่นโลหะคู่ขนานหาได้จากสมการที่ 2.11

$$J = j\omega\epsilon_0\epsilon_r'E + \omega\epsilon_0\epsilon_r''E \quad (2.11)$$

เมื่อ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า โดยส่วนจริงของอัตราส่วน J/E คือ สภาพนำไฟฟ้า (σ) ในวัสดุไดอิเล็กทริก ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.12

$$\sigma(\omega) = \omega\epsilon_0\epsilon_r''(\omega) \quad (2.12)$$

ผลของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่เกิดจากกลไกทั้งหมดจะแสดงด้วยค่า $\sigma(\omega)$ ดังนั้นการใช้ค่า ϵ_r' ร่วมกับตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งใน 3 ตัวแปรซึ่งได้แก่ ϵ_r'' , $\tan \delta$ และ σ นั้นจะสามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุไดอิเล็กทริกในสนามไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ [2]

นอกจากนี้ยังมีวิธีการอีกมากที่สามารถใช้หาค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อน โดยวิธีที่เหมาะสมจะขึ้นกับปัจจัยต่อไปนี้ ช่วงความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปขนาดของ ϵ_r' และ ϵ_r'' และสุดท้ายขนาดและรูปร่างของชิ้นงานตัวอย่าง ทั้งนี้การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนในช่วงความถี่กระแสตรง (d.c.) ถึงช่วงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลาหลายปี โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.7.3.1 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสถิตหรือกระแสตรงจะใช้ทำการวัดค่าคงที่เวลาของตัวเก็บประจุแผ่นโลหะคู่ขนานที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานมาตรฐาน

2.7.3.2 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่ำด้วยสะพานไฟฟ้า เป็นวิธีที่ใช้อย่างกว้างขวางทั่วไป มีวงจรหลายแบบที่สามารถหาค่านี้ได้ซึ่งเป็นการใช้ความถี่ครอบคลุมในช่วง 0.01 เฮิร์ต ถึง 150 เมกะเฮิร์ต

2.7.3.3 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนด้วยวงจรรีโซแนนท์ ซึ่งในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 10 ถึง 100 เมกะเฮิร์ต การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกด้วยสะพานไฟจะทำได้ยาก จึงได้มีการใช้วงจรรีโซแนนท์ในการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในที่มีความถี่สูงกว่าแทน

2.7.4.4 สายส่งกำลังจะใช้ในกรณีที่มีความถี่สูงมากซึ่งวงจรเรโซแนนท์ไม่สามารถวัดได้เพราะมีผลกระทบจากคลื่นวิทยุ และผลของผิวของลวดสายไฟเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นวงจรแบบแพร่กระจาย เช่น สายส่งกำลังหรือสายเคเบิลแกนร่วม จึงถูกนำมาใช้แทนวงจรเรโซแนนท์

2.7.4.5 การวัดในช่วงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเป็นช่วงที่มีความถี่มากกว่า 100 เมกะเฮิร์ต จะต้องใช้ท่อนำคลื่นหรือช่องเรโซแนนท์เข้ามาช่วย โดยในท่อนำคลื่นนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถจะทะลุผ่านได้ต้องเป็นคลื่นที่มีความถี่สูงหรือคลื่นตามขวาง

2.7.4 หลักการวิเคราะห์สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric)

หลักการวิเคราะห์สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกสามารถวิเคราะห์ได้จากลักษณะเฉพาะของโครงสร้างโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริกและวงวนฮิสเทอรีซิส โดยการตรวจสอบโครงสร้างโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริกสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

โดยรูปแบบของโดเมนที่พบในผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีรูปร่างที่หลากหลายขึ้นกับธรรมชาติของโครงสร้างผลึก เช่น โครงสร้างคล้ายสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งพบใน BaTiO_3 และ $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$ โครงสร้างผลึกคล้ายกังปลา ซึ่งพบใน BaTiO_3 และ KNbO_3 โครงสร้างคล้ายวงปีของต้นไม้ซึ่งพบใน LiNbO_3 โครงสร้างคล้ายกระสวยซึ่งพบในไนโตรไกลซีนซิลเฟต และโครงสร้างเป็นชั้นซึ่งพบในเกลือโรเชลล์ เป็นต้น ทั้งนี้ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างแบบหลายโดเมน แต่ตามผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโดเมนเดียวก็สามารถเกิดได้หากมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่มีความเข้มข้นสูงมากพอมากกระทำ โดยสนามไฟฟ้านี้สามารถเข้าไปกลับทิศโพลาริเซชันภายในโดเมนให้อยู่ในทิศตรงข้ามกับทิศเดิมได้ด้วย ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การสลับขั้วโดเมน (Domain Switching)

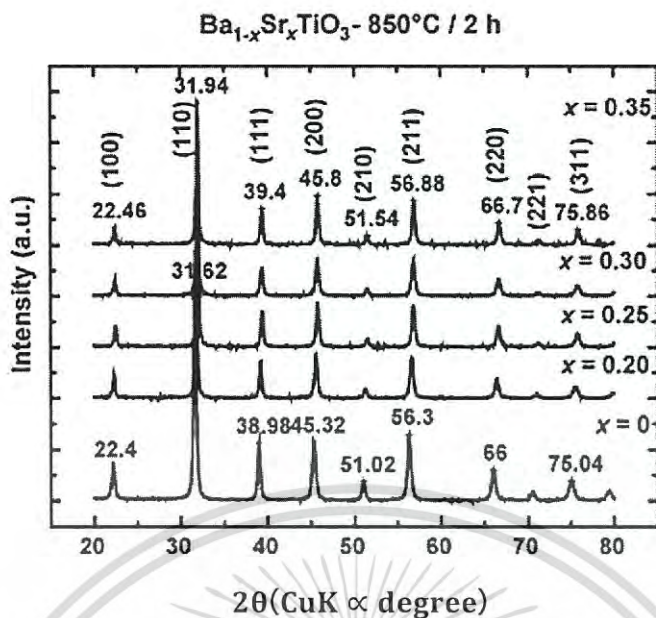
ลักษณะเฉพาะเชิงพลศาสตร์ หรือการสลับขั้วของโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นสมบัติที่ขึ้นกับทิศทางและสัมพันธ์กับอุณหภูมิและสนามไฟฟ้าภายนอกอย่างมาก โดยเมื่อให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกที่ให้เข้าไปมีทิศตรงข้ามกับทิศของโดเมนโพลาริเซชันแล้วจะสามารถเกิดโดเมนขึ้นใหม่ได้ภายในโดเมนเดิมด้วยการเกิดเป็นนิวเคลียสและค่อยๆ โตขึ้นมา

นอกจากนี้ลักษณะเฉพาะที่สำคัญอีกตัวหนึ่งของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก คือ วงวนฮิสเทอรีซิส (Ferroelectric Hysteresis loop) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าโพลาริเซชัน (P) ที่สัมพันธ์กับค่าสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่ให้เข้าไป (E) โดยวงวนฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกสามารถวัดได้ด้วยวงจร Sawyer-Tower [21]

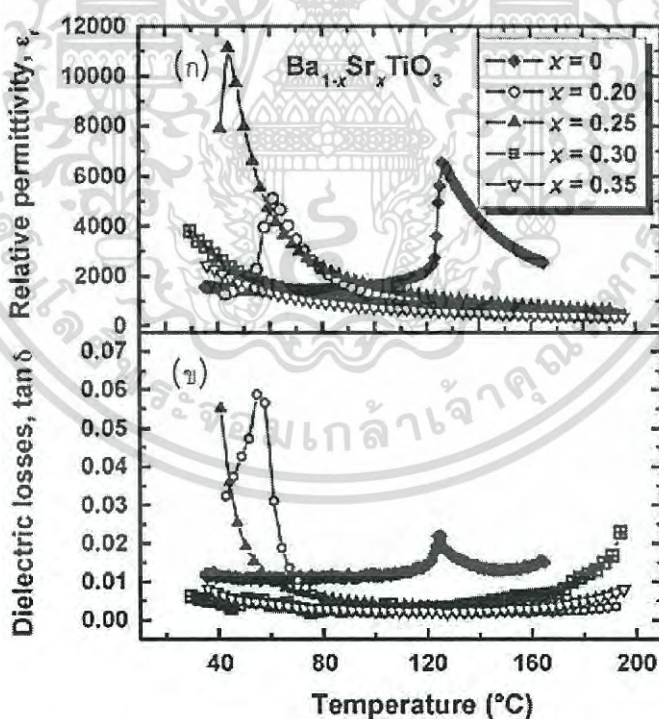
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าพบว่ามีนักวิจัยหลายกลุ่มที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติของแบเรียมไททาเนตโดยการแทนที่ธาตุหลากหลายชนิดลงไปตำแหน่ง A และตำแหน่ง B เพื่อศึกษาทั้งการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง การวัดสมบัติไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก รวมถึงการเพิ่มหรือลดลงของอุณหภูมิคูรี โดยได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้

ในปี 2007 A. Ianculescu และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ผงนาโนในระบบ $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0, 0.20, 0.25, 0.30$ และ 0.35 ซึ่งเป็นการแทนที่แบเรียมด้วยสตรอนเชียม (Sr) ลงในตำแหน่ง A จากนั้นนำสารที่สังเคราะห์แล้วไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารไปอัดเม็ดเซรามิกและนำไปทำการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังเผาพบว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าสูงประมาณ 85 ถึง 93 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าสารละลายของแข็ง $(Ba,Sr)TiO_3$ ไม่เกิดวัฏภาคแปลกปลอมของแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) หรือผลึกออสตรอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ดังรูปที่ 2.14 จากงานวิจัยสรุปได้ว่าเมื่อนำไปวัดสมบัติทางไฟฟ้าพบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงมากประมาณ 1500 ถึง 12000 โดยอัตราส่วนที่ $x = 0.25$ จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุด ดังรูปที่ 2.15 (ก) และยังมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ โดยเซรามิก BST ทั้งหมดจะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกน้อยกว่า 6 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงอุณหภูมิห้องที่ 25 ถึง 200 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.15 (ข) อีกทั้งองค์ประกอบทั้งหมดยังสอดคล้องกับกฎคูรี-เวสส์ (Curie-Weiss) โดยค่าคงที่ของคูรีจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสตรอนเชียมมากขึ้น และจะเกิดการเลื่อนของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริกในช่วงอุณหภูมิ 7 ถึง 127 องศาเซลเซียส โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณสตรอนเชียมด้วย



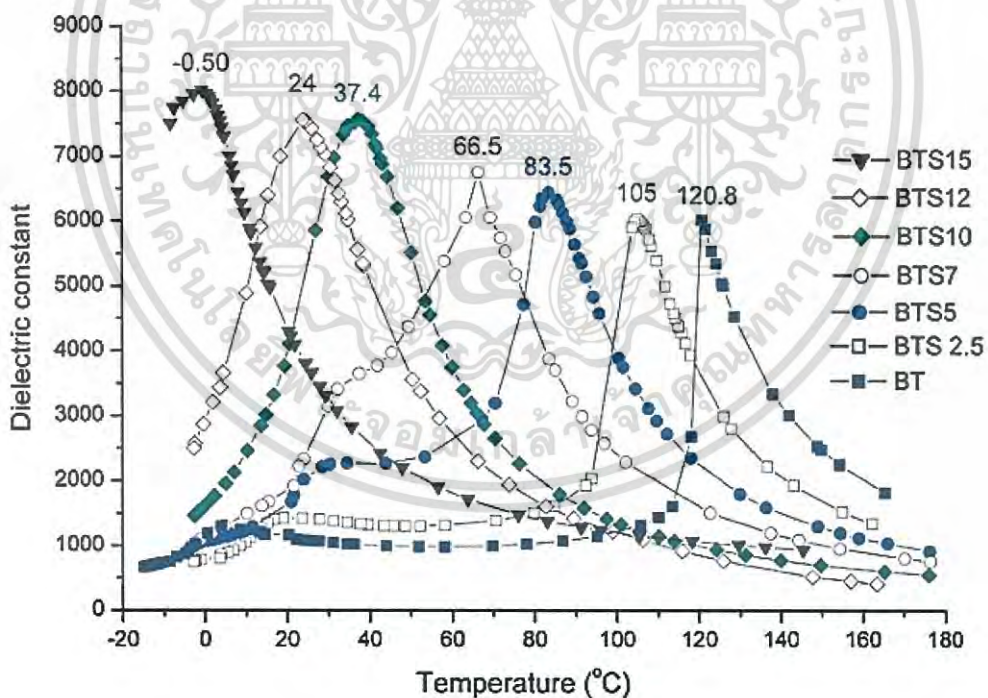
รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่อุณหภูมิห้องสำหรับผงนาโน $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ หลังจากทำเผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [4]



รูปที่ 2.15 (ก) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และ (ข) แสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ ที่ความถี่ 105 กิโลเฮิร์ต และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปีเดียวกัน S. Marković และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาการเตรียมและคุณสมบัติของ เซรามิกแบบหลายชั้นในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ (BTS) ที่สัดส่วนองค์ประกอบ x ตั้งแต่ 0 0.025 0.05 0.07 0.10 0.12 และ 0.15 โดยใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) และเผาที่อุณหภูมิ 1370 องศาเซลเซียส ซึ่งในงานวิจัยได้พิสูจน์เอกลักษณ์ของ ตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และทำการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กทริก จากผลการทดสอบพบว่า การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจะเปลี่ยนจากโครงสร้างแบบเตตระโกนอลไปเป็น โครงสร้างแบบคิวบิกโดยสังเกตได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และเมื่อมีปริมาณติบุกเพิ่มขึ้น อุณหภูมิคูรี (T_c) จะลดลง ในขณะที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.16 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก จะแปรผันตามช่วงอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิมิมีช่วงที่กว้างจะยิ่งส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกให้มีค่าสูงขึ้น ในชั้นเซรามิกโมโนไลติกมัลติเลเยอร์ (Monolithic Multilayered) ของ BTS มีจำนวนชั้นได้มากที่สุด 5 ชั้น ซึ่งในแต่ละชั้นจะมีองค์ประกอบของติบุกในปริมาณที่แตกต่างกัน ในส่วนของ BTS ที่มีชั้นเดียว และมีหลายชั้นจะมีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกที่ดีขึ้นเมื่อนำไปอบด้วยเตาไมโครเวฟเป็นเวลา 10 นาที หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 1370 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.16 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BTS โดยเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1375 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง [6]

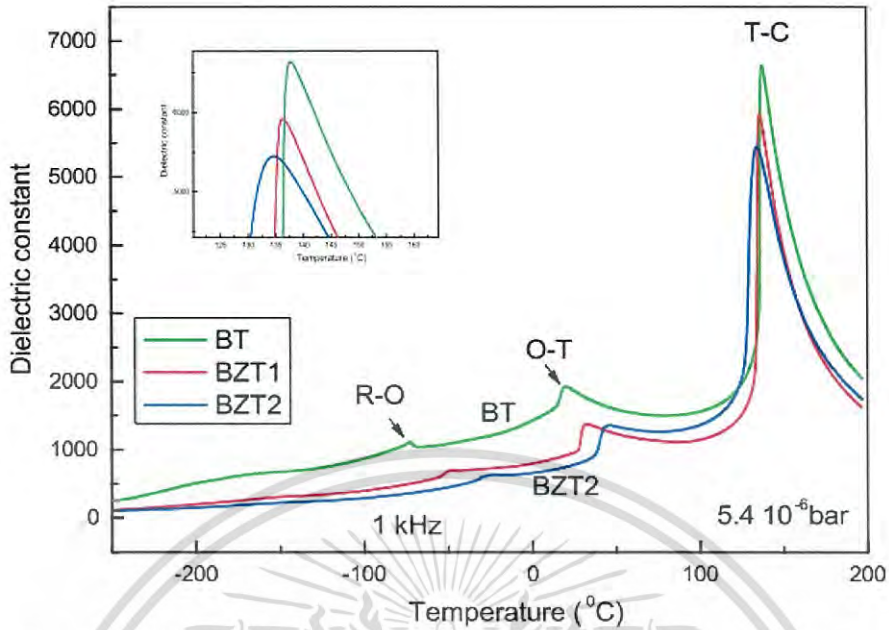
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BTS แบบชั้นเดียวและหลายชั้น ณ อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิคูรี [6]

เซรามิก BTS	เฟาผนึกที่ 1370 องศาเซลเซียส			เฟาผนึกที่ 1370 องศาเซลเซียส และอบด้วยเตาไมโครเวฟ		
	$\epsilon_r(T_{20^\circ c})$	$\epsilon_r(T_c)$	T_c	$\epsilon_r(T_{20^\circ c})$	$\epsilon_r(T_c)$	T_c
BT	1160	6013	120.8	1225	6668	114.3
BTS 2.5	1423	6033	105.0	1516	6901	95.6
BTS 5	1673	6434	83.5	1516	7409	76.9
BTS 7	1835	6751	66.5	2352	7520	64.0
BTS 10	4093	7566	3734	3988	7717	38.5
BTS 12	7364	7559	24.0	8496	89009	24.0
BTS 15	4093	7958	-0.5	4606	8399	-1.1

ในปี 2016 L.Amarande และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาผลกระทบภายในและภายนอกที่เกิดขึ้นใกล้ช่วงการเปลี่ยนเฟสออร์โธโรมบิกและเตตระโกนอล (Orthorhombic – Tetragonal : O-T) ของเซรามิกแบเรียมไททาเนตที่มีผลมาจากการเจือด้วยเซอร์โคเนียม (Zr) ในการทดลองจะเตรียมแบเรียมไททาเนตบริสุทธิ์และแบเรียมไททาเนตที่เจือด้วยเซอร์โคเนียมในปริมาณ 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โมล (BZT1 BZT2) โดยใช้ TiO_2 , ZrO_2 และ BaCO_3 เป็นสารตั้งต้น และใช้วิธีปฏิกิริยาของแข็ง จากนั้นนำไปเฟาผนึกและพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และยังตรวจสอบคุณสมบัติไดอิเล็กทริก เพียโซอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริก จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนเฟสของ R-O และ O-T เปลี่ยนไปสู่อุณหภูมิที่สูงกว่า ขณะที่อุณหภูมิคูรีลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณเซอร์โคเนียม ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็ลดลงเช่นเดียวกันดังรูปที่ 2.17 แบเรียมไททาเนตที่บริสุทธิ์จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 6800 ซึ่งจะสูงกว่าแบเรียมไททาเนตที่ถูกเจือด้วยเซอร์โคเนียม โดยที่ BZT1 จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่า BZT2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 6000 และ 5500 ตามลำดับ และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะลดลงด้วยเมื่อมีปริมาณเซอร์โคเนียมมากขึ้น

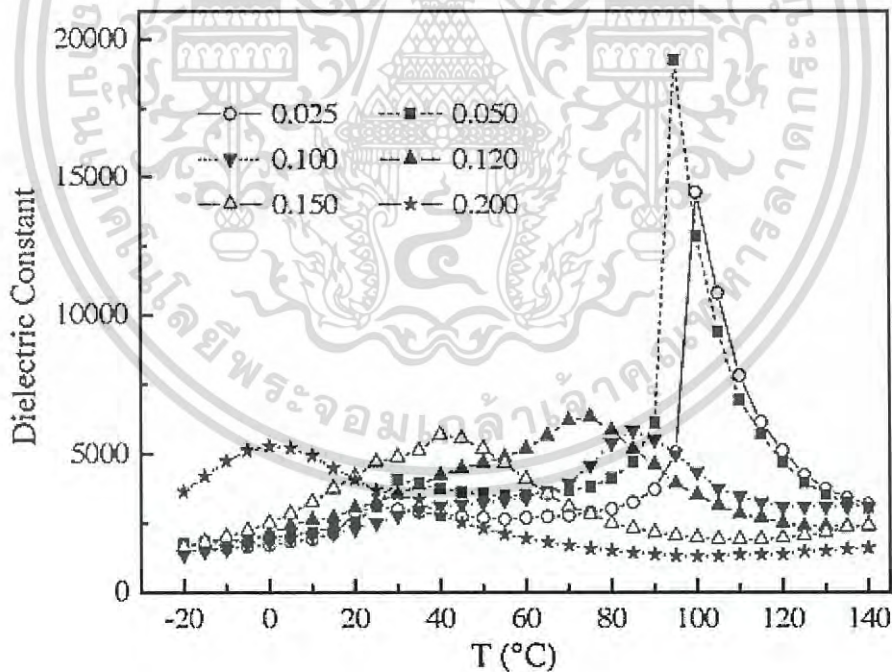
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกแบเรียมไททาเนตที่บริสุทธิ์และแบเรียมไททาเนตที่ถูกเจือด้วยเซอร์โคเนียม [5]

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าชนิดของธาตุที่เจือลงในโครงสร้างมีผลต่อสมบัติแตกต่างกัน และธาตุนั้นจะเข้าแทนที่ตำแหน่งใดจะขึ้นกับขนาดไอออนและเลขออกซิเดชันด้วย ย้อนไปในปี 2014 Chung-Eun Lee และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาผลที่เกิดจากความหลากหลายของตำแหน่งและไอออนของดีบุกที่เจือลงในแบเรียมไททาเนต ซึ่งในงานวิจัยจะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงไอออนของดีบุกที่แทนที่ในแบเรียมไททาเนต และผลต่อการนำไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากปริมาณสารสัมพันธ์ ความเข้มข้นของออกซิเจน และอุณหภูมิ โดยทำการเตรียมตัวอย่าง 3 ชนิด ได้แก่ BaTiO_3 , $\text{Ba}_{1-x}\text{Sn}_x\text{TiO}_3$ และ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ ($x = 0.01$) ใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และนำไปเผาที่บรรยากาศต่างกันเพื่อควบคุมการเกิดไอออนของดีบุก โดย BaTiO_3 , $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ จะเผาในบรรยากาศปกติ และ $\text{Ba}_{1-x}\text{Sn}_x\text{TiO}_3$ จะเผาในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน จากนั้นนำตัวอย่างจากวัสดุเซรามิกไปวัดการนำไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าจากความร้อน ผลการทดลองพบว่า ดีบุกสามารถเข้าในตำแหน่ง B แทนที่ในไทเทเนียมเป็นส่วนใหญ่ และทำหน้าที่เป็นเหมือน Acceptor Dopant ส่วนดีบุกบางส่วนจะเข้าไปในตำแหน่ง A แทนที่แบเรียม โดยรูปแบบการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการเปลี่ยนประจุของไอออนของดีบุก $2+$ ไปเป็น $4+$ เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น แต่งานวิจัยนี้ยังไม่ครอบคลุมถึงผลที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ เช่น สมบัติไดอิเล็กทริก เพอร์โรอิเล็กทริก เป็นต้น และความสามารถในการละลายของดีบุกในสารประกอบแบเรียมไททาเนต

ปี 2009 F. Du และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ การพินิจเอกลักษณะ และสมบัติไดอิเล็กทริกของผงขนาดอนุภาคนาโนและเซรามิก $Ba(Ti_{1-x}Sn_x)O_3$ ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการเตรียมผงและเซรามิกในระบบ $Ba(Ti_{1-x}Sn_x)O_3$ โดยใช้วิธีโซลเจลซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการพินิจเอกลักษณะของตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เทคนิคระบบอินฟราเรด (FT-IR) เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก สรุปผลการทดลองได้ว่าผงที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจลจะมีขนาดของเกรนในระดับนาโนเมตร โดยเกรนที่ถูกสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก และการใช้วิธีโซลเจลจะทำให้ดีบุกสามารถกระจายตัวในแบเรียมไททานเตอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น โดยใช้ไดบิวทิลทินไดลอเรต (Dibutyltin Dilaurate) เป็นสารตั้งต้นของดีบุก จากการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของดีบุก จะทำให้ขนาดของเกรนในเซรามิกระบบ $Ba(Ti_{1-x}Sn_x)O_3$ มีขนาดเพิ่มขึ้น และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด (ϵ_{max}) โดยจะเพิ่มขึ้นช่วงแรกหลังจากนั้นจะลดลง ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งที่ความเข้มข้นของดีบุกร้อยละ 5 โดยโมล จะให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดโดยมีค่า 19236 ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกในระบบ $Ba(Ti_{1-x}Sn_x)O_3$ ที่มีสัดส่วน Sn ต่างกัน (ค่า x) [22]

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติหลักของเซรามิกที่ขึ้นกับสัดส่วนของดีบุก [22]

สัดส่วนดีบุก (Sn) , x	T_m (°C)	ϵ_r (25°C)	ϵ_r (T_m)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
0.025	100	3098	14453	5.68
0.050	95	3084	19236	5.71
0.100	85	2510	5862	5.90
0.120	75	3255	6332	5.80
0.150	40	4716	5681	5.44
0.200	0	3689	5293	5.43

ในปี 2011 N. Horchidan และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมและตรวจวิเคราะห์สารประกอบแบเรียมไททาเนตสแตนเนต (Barium titanate stannate ; BTS) ด้วยวิธีการแทนที่ของแข็ง (Solid Solutions) ซึ่งทำการเตรียมสารละลายของแข็งโดยเติมดีบุก (Sn) เข้าไปแทนที่แบเรียมในแบเรียมไททาเนต ซึ่งมีอัตราส่วนการแทนที่ดังนี้ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ ($x = 0, 0.05, 0.10, 0.15$ และ 0.20) จากนั้นใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ส่งผลให้เกิดขึ้นงานเซรามิกที่มีความเป็นผลึกรวมกันและมีโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเนื้อเดียวกัน ความสมมาตรของโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอลในการแทนที่อัตราส่วน $x \leq 0.10$ เป็นโครงสร้างคิวบิกในการแทนที่อัตราส่วน $x = 0.20$ และ การแทนที่ในอัตราส่วน $x = 0.15$ จะพบโครงสร้างทั้ง เตตระโกนอล และคิวบิก สำหรับในด้านองค์ประกอบอื่นๆ ได้จากการวิเคราะห์ตำแหน่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) การกำหนดเพิ่มเติมหรือลดอุณหภูมิกับความถี่จะส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงจากเดิมที่มีพฤติกรรมแบบเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพฤติกรรมแบบรีแลกเซอร์ (Relaxor) ผลของการเปลี่ยนเฟสจะสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของความเข้มชั้นของดีบุก ทั้งนี้ทุกองค์ประกอบจะปรับค่าความสัมพันธ์ระหว่าง 0.55 (ที่อัตราส่วน $x = 0.2$) และ 0.74 (ที่อัตราส่วน $x = 0.1$) ที่มีสนามไฟฟ้าภายนอก (E) 20 kV/cm.

สำหรับวัสดุประกอบแบเรียมไททาเนตสแตนเนตสามารถแก้ไขอุณหภูมิคูรี และค่าไดอิเล็กทริกของระบบได้โดยการปรับเปลี่ยนความเข้มชั้นของดีบุก ซึ่งในปีที่ผ่านมา Wei และ Yao Shvartsman และคณะ. มุลเลอร์และเบจ Geske และคณะ. Wei และคณะ และ Cai และคณะได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของไดอิเล็กทริก ไดอิเล็กทริกแบบรีแลกเซอร์ เฟร์โรอิเล็กทริกแบบรีแลกเซอร์ ครอสโอเวอร์ รวมถึงลักษณะการเปลี่ยนเฟส ลักษณะการวนลูบภายใต้ตัววงวนฮิสเทอรีซิส และลักษณะเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุประกอบแบเรียมไททาเนตสแตนเนต (BTS) ซึ่ง Wei และ Yao ได้

ทำการเสนอเฟสไดอะแกรมสำหรับระบบนี้ที่ตรวจพบค่าไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิที่มีการปรับเปลี่ยนไปตามโครงสร้างอย่างหลากหลาย คือ รอมโบอีตรอล เตตระโกนอล และคิวบิก ซึ่งองค์ประกอบในช่วงอัตราส่วนการแทนที่ที่ $x = 0.10$ และ 0.15 มีแนวโน้มจะใกล้เคียงที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตาม Markovic และคณะ รายงานเกี่ยวกับการลดลงของเฟสเตตระโกนอลอย่างต่อเนื่องเมื่อทำการเพิ่มปริมาณคิวบิกไปจนถึงค่าหนึ่งจะทำให้เปลี่ยนเป็นเฟสอื่น เช่น คิวบิก ซึ่งจะเกิดในช่วงอัตราส่วนการแทนที่ที่ $x = 0.12$

ผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 2.4 สารประกอบแบเรียมไททานเตสแทนเนตที่เผาผนึก อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าในอัตราส่วนการแทนที่ที่แตกต่างกัน คือ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ ($x = 0, 0.05, 0.10, 0.15$ และ 0.20) จะส่งผลให้โครงสร้างของสารประกอบแบเรียมไททานเตสแทนเนตที่เกิดแตกต่างกันออกไปโดยที่อัตราส่วนการแทนที่ $x = 0$ ถึง 0.10 โครงสร้างจะเป็นเตตระโกนอลทั้งหมด แต่หากอัตราส่วนการแทนที่ที่ $x = 0.15$ โครงสร้างจะเป็นเตตระโกนอลและคิวบิก สุดท้ายหากอัตราส่วนการแทนที่ที่ $x = 0.20$ โครงสร้างจะเป็นแบบคิวบิกทั้งหมด

ตารางที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของสารประกอบแบเรียมไททานเตสแทนเนตที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง [23]

สัดส่วน (x)	โครงสร้าง	พารามิเตอร์แลตทิซ		เตตระโกนอลที่ ดีกรี (c/a)	ปริมาตร หน่วยเซลล์ (cm^3)
		a	c		
0.00	เตตระ โกนอล	3.9713 ± 0.0036	3.9831 ± 0.0047	1.0031 ± 0.0021	62.87 ± 0.19
	เตตระ โกนอล	3.9996 ± 0.0003	4.0062 ± 0.0005	1.0017 ± 0.0002	64.09 ± 0.02
0.10	เตตระ โกนอล	4.0057 ± 0.0018	4.0127 ± 0.0020	1.0017 ± 0.0009	64.38 ± 0.09
	คิวบิก	4.0287 ± 0.0009	4.0287 ± 0.0009	1.0000	65.39 ± 0.05
0.15	เตตระ โกนอล	4.0165 ± 0.0011	4.0219 ± 0.0016	1.0013 ± 0.0007	64.88 ± 0.06
	คิวบิก	4.0234 ± 0.0026	4.0234 ± 0.0026	1.0000	65.13 ± 0.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการแทนที่ทีบุกลงในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งทำการเตรียมผง $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ โดยเจือทีบุก 0.03 0.06 0.09 และ 0.12 และเตรียมเซรามิกด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการในการเตรียมไว้ตามลำดับต่อไปนี้

3.1 สารเคมี

- 1) แบเรียมคาร์บอเนต (Barium carbonate : $BaCO_3$) ความบริสุทธิ์ ≥ 98.5 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich
- 2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO_2) ความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich
- 3) ทินออกไซด์ (Tin oxide : SnO) ความบริสุทธิ์ 97 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich
- 4) ทินไดออกไซด์ (Tin dioxide : SnO_2) ความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich

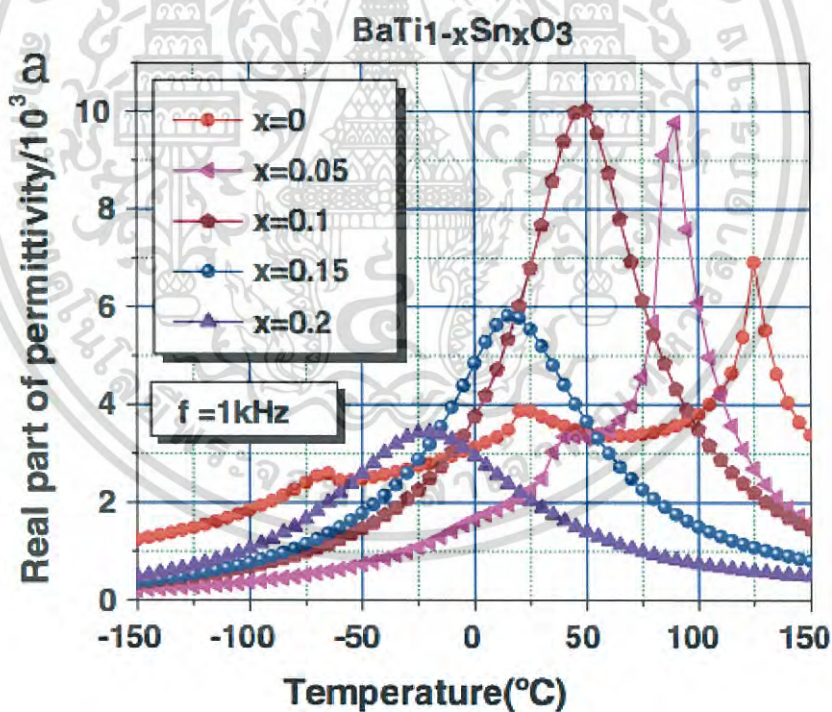
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมเซรามิก

- 1) บีกเกอร์ ขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 2) ช้อนตักสารสแตนเลส (Spatula)
- 3) เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท OHAUS
- 4) อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil)
- 5) ขวดพลาสติกพร้อมฝาปิด
- 6) ลูกบิด Zirconia ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 5 และ 10 มิลลิเมตร
- 7) เครื่องบดย่อยผสมสารแบบบด
- 8) กระจกเอทานอล
- 9) ตะแกรงกรอง

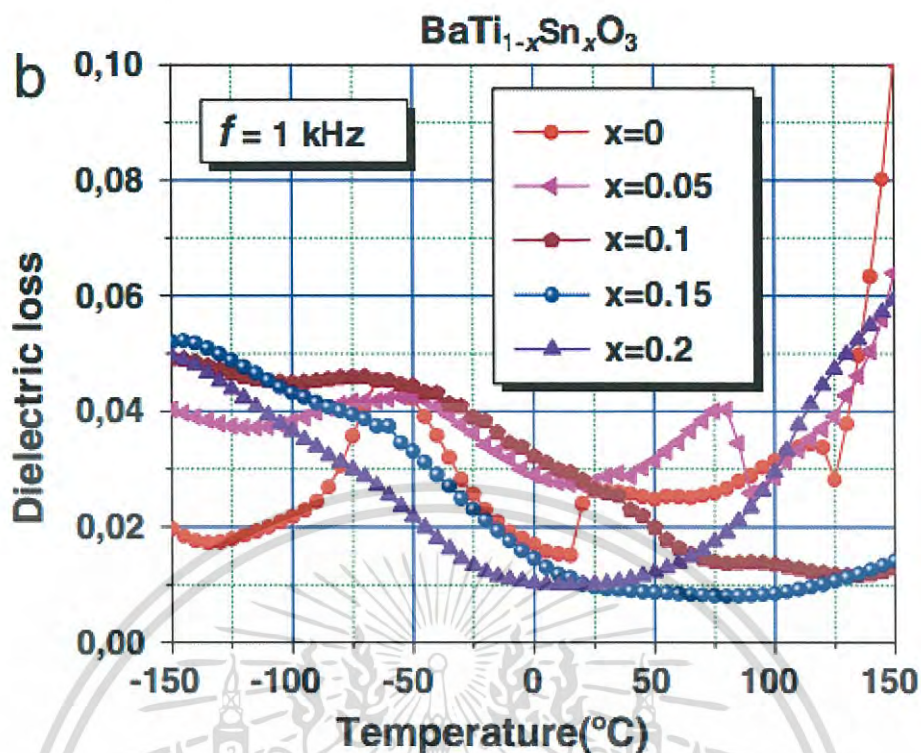
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าสารประกอบโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ บริสุทธิ์ที่มีส่วนผสมของดีบุกในปริมาณที่ต่างกัน คือ $x = 0, 0.05, 0.10, 0.15$ และ 0.20 ซึ่งในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงแนวโน้มให้เห็นการเปลี่ยนเฟสจากเตตระโกนอลไปเป็นเฟสโครงสร้างแบบคิวบิก เมื่อมีการเพิ่มปริมาณดีบุก โดยในช่วงอัตราส่วนที่ $x = 0.15$ ส่งผลให้เกิดเฟสของทั้งสองส่วน (คิวบิก และเตตระโกนอล) มีความทับซ้อนกันและสมมาตรกัน ในส่วนของข้อมูลไดอิเล็กทริกจะแสดงให้เห็นถึงการลดลงของอุณหภูมิคูรีเมื่อมีการเพิ่มปริมาณดีบุกเข้าไป แต่เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ที่ $x = 0.15$ และ $x = 0.20$ จะทำให้คุณสมบัติของไดอิเล็กทริกไม่เป็นเส้นตรง และส่งผลต่อรูปแบบวงวนฮิสเทอรีซิส ดังนั้นหากต้องการคุณสมบัติไดอิเล็กทริกที่ดีอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมที่สุดคือ $x = 0.10$ (ความสามารถในการปรับปรุงค่าได้สูงที่สุดเท่ากับ 0.74 ที่ $E = 20 \text{ kV/cm}$. และมีการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์) ดังรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าเซรามิกมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่า 2000 ที่องค์ประกอบ $x = 0.05$ และ 0.20 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประมาณ 4000 สำหรับ $x = 0$ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากกว่า 5000 ที่องค์ประกอบ $x = 0.10$ และ 0.15 ตามลำดับ



รูปที่ 2.19 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต [23]

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการแทนที่ธาตุลงไปในโครงสร้างแบเรียมไททาเนต (BaTiO₃) ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดที่จะศึกษาผลของการแทนที่ตีบุก (Sn) ลงในโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ของแบเรียมไททาเนต รวมถึงผลจากการแทนที่ในตำแหน่งที่ต่างกัน เนื่องจากมีหลายงานวิจัยได้รายงานผลการแทนที่ตีบุกในตำแหน่ง B เพียงตำแหน่งเดียว โดยผู้วิจัยต้องการศึกษาการแทนที่ตีบุกทั้งในตำแหน่ง A และตำแหน่ง B พร้อมทั้งศึกษาผลที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 10) ตู้อบสารอุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific
- 11) เตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง ผลิตโดยบริษัท ซวโชติ บริษัทจำกัด
- 12) โกร่งบดสาร (Agate Mortar)
- 13) ถูขีปพลาสติกสำหรับใส่สาร
- 14) อุปกรณ์สำหรับการคัดขนาดอนุภาค (Sieve)
- 15) แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.98 มิลลิเมตร
- 16) เครื่องอัดไฮดรอลิก ผลิตโดยบริษัท KC Hydraulic press
- 17) คีมหนีบ (Forceps)
- 18) เทปกาว
- 19) ถ้วยอลูมินา (Alumina Crucible) พร้อมฝาปิด
- 20) กระจาดทราย เบอร์ 600 1000 และ 1200
- 21) เวอร์เนีย

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 1) เครื่องตรวจการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smartlab X-ray Diffractometer (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)
- 2) เครื่อง LCR analyzer ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss) ผลิตโดยบริษัท Hewlett-Packard รุ่น HP4284A ประเทศแคนาดา (ห้องปฏิบัติการวัสดุขั้นสูง คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)
- 3) เครื่อง Ferroelectric Tester ผลิตโดยบริษัท Radiant Technologies, Inc รุ่น RT66A (คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)
- 4) เครื่องมือวิเคราะห์ห้องค้ประกอบของสาร (Raman Spectrometer)

3.3 ขั้นตอนการเตรียมเซรามิก

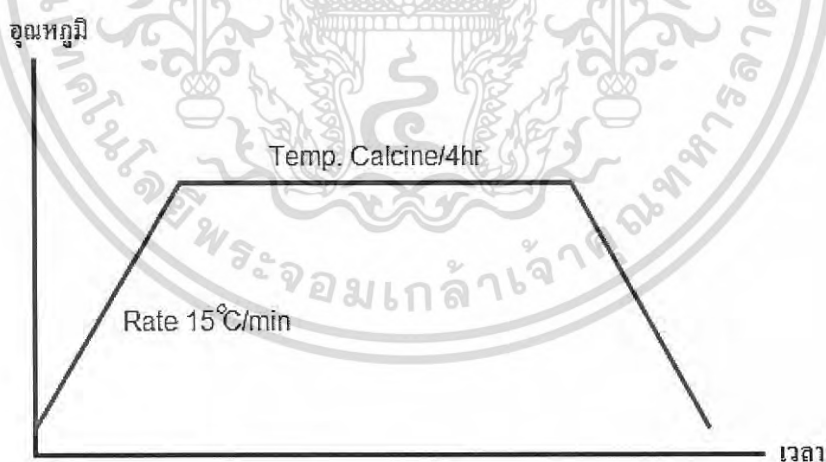
3.3.1 การเตรียมผงเซรามิก

ในการเตรียมผงเซรามิกสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีปฏิบัติการสถานะของแข็ง บดย่อยเป็นเวลา 30 นาที และทำการเผาแคลไซน์ แสดงลำดับขั้นตอนการเตรียมผงเซรามิก ดังนี้

- 1) คำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้เตรียมแบเรียมไททานาเตที่เจือด้วยดีบุก โดยมีสัดส่วนดีบุก ดังนี้ $x = 0.03 \quad 0.06 \quad 0.09$ และ 0.12 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ชั่งสารตั้งต้นตามที่คำนวณได้ ลงบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม โดยที่ ระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ ใช้ทินออกไซด์ ระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ ใช้ทินไดออกไซด์ เป็นสารตั้งต้นดิบๆ
- 3) ใส่สารลงในขวดพลาสติกที่มีลูกบดเซอร์โคเนียบรรจุอยู่ เทตัวทำละลายเอทานอลลงไปจนท่วม เพื่อช่วยให้สารตั้งต้นผสมกันได้ดี
- 4) นำขวดพลาสติกไปทำการบดย่อยด้วยลูกบด (Ball Milling) เป็นเวลา 30 นาที
- 5) นำขวดพลาสติกไปทำการบดย่อยด้วยลูกบดเรียบร้อยแล้ว มารองโดยใช้ตะแกรงกรองใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร และล้างลูกบดด้วยเอทานอลจนสะอาด
- 6) นำสารละลายที่ได้อบในตู้อบอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส
- 7) นำสารที่สังเคราะห์ได้ออกจากตู้อบ ทิ้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำมาบดด้วยโกร่งบดสาร
- 8) นำสารที่บดแล้วใส่ครุชีเบล นำไปเผาแคลไซน์ โดยจะควบคุมบรรยากาศในการเผาต่างกัน ระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ เผาในบรรยากาศไนโตรเจน และระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ เผาในบรรยากาศปกติ โดยใช้ขั้นตอนการเผาแคลไซน์ดังรูปที่ 3.1
- 9) นำสารที่ผ่านการเผาแคลไซน์มาบดด้วยโกร่งบดสารให้เป็นผง แล้วนำไปคัดขนาดอนุภาค



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงขั้นตอนในการเผาแคลไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมเม็ดเซรามิก

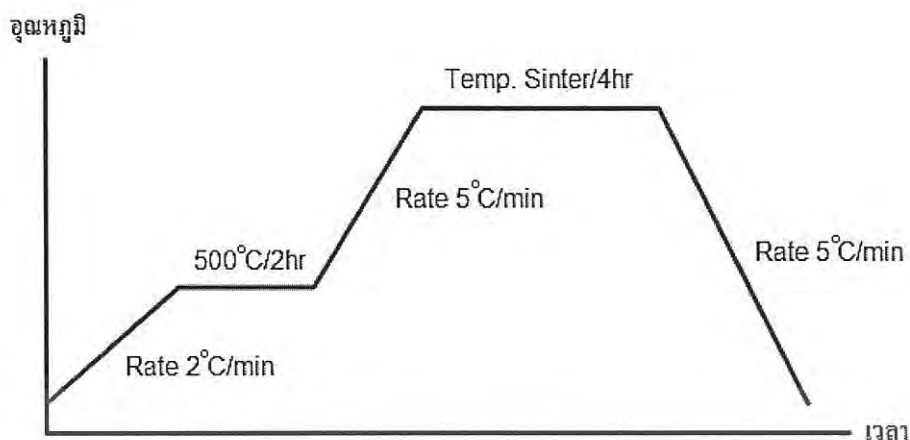
หลังจากการเตรียมผงเซรามิกได้เรียบร้อย นำผงมาอัดขึ้นรูป เพื่อทำการเผาผนึก โดยแสดงลำดับขั้นตอน ดังนี้

- 1) ชั่งผงสารที่เตรียมได้ 1.2 กรัม ลงบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์
- 2) นำผงสารบดผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ประมาณ 1 ถึง 2 หยดให้เข้ากัน เพื่อช่วยประสานให้ผงเกาะกันได้ดีขึ้น
- 3) นำผงสารใส่ลงในแม่พิมพ์โลหะ แล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก แรงอัดขนาด 1000 kg/cm^2 เป็นเวลา 20 วินาที จะได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.98 มิลลิเมตร
- 4) นำเม็ดที่อัดเรียบร้อยแล้ววางเรียงในถ้วยอลูมินาโดยกลบด้วยผงสารแต่ละระบบ เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงอลูมินากับเม็ดเซรามิก และกลบอีกชั้นด้วยผงอลูมินา เพื่อเพิ่มการกระจายความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานดังรูปที่ 3.2
- 5) นำถ้วยอลูมินาที่เรียงชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว เข้าเตาเผา เพื่อทำการเผาผนึก โดยระบบ $\text{Ba}_{1-x}\text{Sn}_x\text{TiO}_3$ จะเผาในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 1300 1350 1375 และ 1400 องศาเซลเซียส และระบบ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ จะเผาในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 1400 1450 1500 และ 1550 องศาเซลเซียส เพื่อเลือกอุณหภูมิที่เซรามิกมีความหนาแน่นมากที่สุด โดยเผาแซ่ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อกำจัด PVA ออกไป จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการเผาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 การจัดเรียงชิ้นงานในถ้วยอลูมินาสำหรับเผาผนึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงขั้นตอนในการเผาผนึก

3.4 การตรวจสอบสมบัติ

3.4.1 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์

- 1) การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer : XRD)

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันเป็นเทคนิคพื้นฐานของการวิเคราะห์ทดสอบวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นลงบนชิ้นงาน จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กัน ทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำกรตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกที่ต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิดจึงมีรูปแบบเฉพาะตัวหรือก็คือ XRD Pattern จากหลักการทำงานของ XRD มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน โดยผลึกแต่ละชนิดจะมีการจัดเรียงอะตอมเป็นชั้นๆ ต่างกันไป ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัว เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบลงบนผลึกจะเกิดการกระเจิงจากชุดระนาบเหล่านี้ โดยจะเป็นไปตามกฎของแบร็ก (Bragg' law) ซึ่งจะสามารถหาระยะห่างระหว่างระนาบได้ โดยอาศัยสมการที่ 3.1

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (d-spacing)
 θ คือ มุมของรังสีเอ็กซ์ที่มาตกกระทบ
 n คือ เลขจำนวนเต็มใดๆ มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ...
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ มีค่าเท่ากับ 1.54 อังสตรอม

2) การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี(Raman Spectrometer)

นำชิ้นงานวัสดุเซรามิกแบบเรียบมีทอทานেন্টที่เตรียมได้มาทำการทดสอบโครงสร้างของสารด้วยเทคนิครามาน เพื่อยืนยันโครงสร้างของสารที่เกิดขึ้น โดยจะทำการวัดในช่วง $100 - 3200 \text{ cm}^{-1}$

3.4.2 เทคนิคในการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

1) ตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss)

นำเซรามิกที่ต้องการทดสอบมาทำการขัดผิวให้เรียบและขนานกันทั้งสองด้าน โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 600 1000 และ 1200 ตามลำดับ ให้ความหนาประมาณ 1.3 มิลลิเมตร จากนั้นทำความสะอาดด้วยเครื่อง อัลตราโวนิกส์เป็นเวลา 5 นาที วัดความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลาง แล้วนำมาทำขั้วไฟฟ้า (Electrode) โดยทาภาวเงินชนิดเผาลงบนผิวหน้าของเม็ดเซรามิกทั้งสองด้าน และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ภาวเงินแห้งและติดกับผิวเซรามิกได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCZ มิเตอร์ วัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss) ทำการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก โดยทำการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ของเซรามิกที่เตรียมได้เทียบกับการเปลี่ยนแปลงความถี่และสัดส่วนองค์ประกอบ แล้วนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้จากสมการที่ 3.2

$$\epsilon_r = \frac{C_p d}{\epsilon_0 A} \quad (3.2)$$

- เมื่อ ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ของสารตัวอย่าง
 C_p คือ ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของสารตัวอย่าง
 d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง (cm)
 A คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่าง (cm^2)
 ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ มีค่า 8.85×10^{-12} ฟารัด/เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การตรวจสอบสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริก

ในการตรวจสอบสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกด้วยการวัดค่าโพลาริเซชันของชิ้นงานเซรามิกเมื่อให้สนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ทำการวัดค่าโพลาริเซชันที่สนามไฟฟ้า 5 10 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร จะเริ่มจากการนำชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมไว้มาทำการขัดผิวให้เรียบขนานกันทั้งสองด้าน โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 800 ทำการขัดหยาบก่อน และนำไปขัดละเอียดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 ตามลำดับ จนได้ชิ้นงานเซรามิกที่มีความหนาประมาณ 1.30 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานเซรามิกไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน นำชิ้นงานเซรามิกที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วไปเข้าในเตาอบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อไล่น้ำออกจากชิ้นงานเซรามิกให้หมด หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทำขั้วไฟฟ้าด้วยการทากาวเงินทั้งสองด้านบริเวณพื้นผิวหน้าของชิ้นงานและทำการเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที นำชิ้นงานที่ผ่านการทากาวเงินแล้วมาติดขดลวดทองแดงด้วยกาวอีพอกซี และนำชิ้นงานไปตรวจวัดค่าโพลาริเซชันของชิ้นงานด้วยการใช้ชุดอุปกรณ์

3.4.3 เทคนิคในการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

การหาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังการเผาผนึก (Firing shrinkage)

เปรียบเทียบขนาดก่อนและหลังการเผาผนึก เพื่อกำหนดหาร้อยละการหดตัวของเซรามิก โดยอาศัยสมการที่ 3.3

$$s = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ s คือ ร้อยละการหดตัวของเซรามิก
 d_1 คือ เส้นผ่าศูนย์กลางก่อนการเผาผนึก (cm³)
 d_2 คือ เส้นผ่าศูนย์กลางหลังการเผาผนึก (cm³)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงผลงานวิจัยและอภิปรายผลการวิจัยของการแทนที่ตีบุกในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยทำการแทนที่ตีบุกลงในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ของแบเรียมไททานเตทั้งตำแหน่ง A ($Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$) และตำแหน่ง B ($BaTi_{1-x}Sn_xO_3$) เพื่อศึกษาผลของการแทนที่ด้วยธาตุชนิดเดียวกันในตำแหน่งที่ต่างกัน โดยเลือกใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid State Reaction) ในการสังเคราะห์แบเรียมไททานเตที่เจือตีบุกในปริมาณที่ต่างกัน จากนั้นจะทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพจากการหาความหนาแน่น และค่าหดตัวของเซรามิกหลังการเผาผนึก (Firing Shrinkage) ตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) ตรวจสอบองค์ประกอบของสารจากการวิเคราะห์รามาน (Raman Spectrometer) ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสารจากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss) รวมถึงวิเคราะห์สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) ของสารดังกล่าวตามลำดับ

4.1 การแทนที่ตีบุกลงในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ของแบเรียมไททานเตตำแหน่ง A ($Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$)

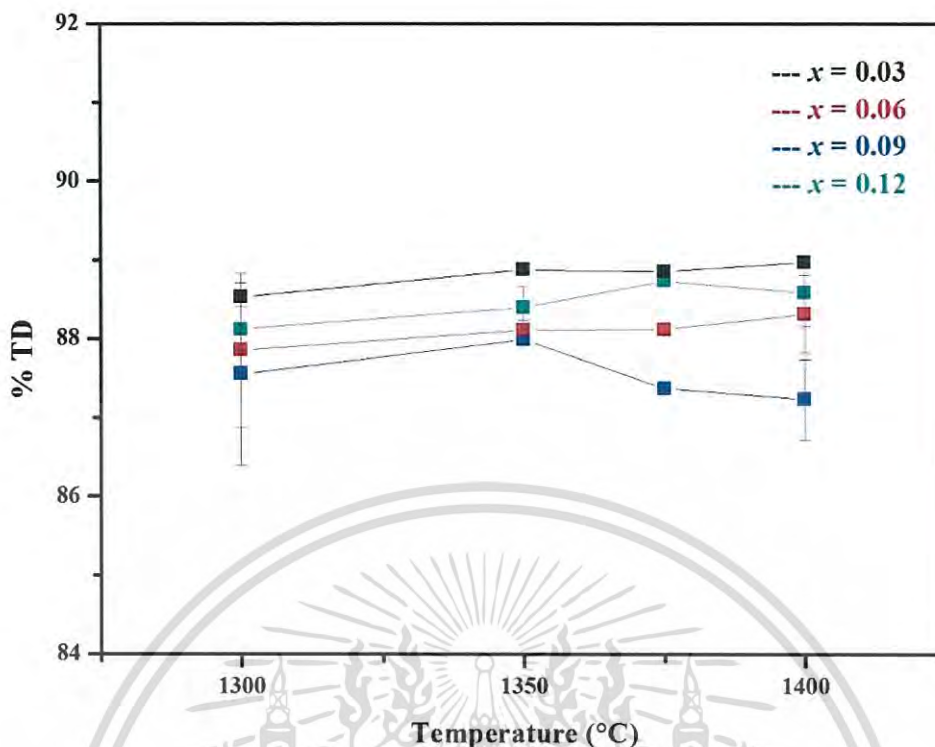
4.1.1 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการหาความหนาแน่นของตัวอย่างเซรามิก

เม็ดเซรามิกที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก แรงอัดขนาด 1000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเรียบร้อยแล้ว ขึ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดกลม เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.98 มิลลิเมตร ซึ่งตัวอย่างเซรามิกจะถูกเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 1350 1375 และ 1400 องศาเซลเซียส จากนั้นจะนำเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการตรวจวัดสมบัติทางกายภาพด้วยการหาค่าความหนาแน่นของเซรามิกโดยอาศัยหลักการแทนที่ด้วยน้ำของอาคิมิติส จากนั้นคำนวณหาค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีและร้อยละความหนาแน่น ซึ่งได้ค่าความหนาแน่นของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี และร้อยละความหนาแน่นของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบ

อุณหภูมิการเผาผนึก (°C)	สัดส่วน (x)	ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี (g/cm^3)	ร้อยละความหนาแน่น
1300	0.03	6.02	88.12 ± 0.28
	0.06	6.00	87.56 ± 1.15
	0.09	5.99	87.86 ± 0.98
	0.12	5.99	88.53 ± 0.78
1350	0.03	6.02	88.39 ± 0.27
	0.06	6.00	87.99 ± 0.05
	0.09	5.99	88.11 ± 0.13
	0.12	5.99	88.88
1375	0.03	6.02	88.73
	0.06	6.00	87.37
	0.09	5.99	88.11
	0.12	5.99	88.85 ± 0.29
1400	0.03	6.02	88.58 ± 0.42
	0.06	6.00	87.23 ± 0.51
	0.09	5.99	88.31 ± 0.49
	0.12	5.99	88.97 ± 0.20

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเซรามิกที่เตรียมได้มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนองค์ประกอบและอุณหภูมิการเผาผนึกอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อนำค่าความหนาแน่นที่ได้มาคำนวณหาค่าร้อยละความหนาแน่นจากสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ แล้วนำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความหนาแน่นกับอุณหภูมิการเผาผนึกที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ จะได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความหนาแน่นกับอุณหภูมิการเผาฟีนิกที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$

จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความหนาแน่นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาฟีนิกพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการเผาฟีนิกเพิ่มขึ้น ร้อยละความหนาแน่นสัมพันธ์เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส สามารถเตรียมเซรามิกที่มีร้อยละความหนาแน่นสัมพันธ์อยู่ในช่วง 87 ถึง 89 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้เผาสูงขึ้นจนถึง 1400 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าร้อยละความหนาแน่นสัมพันธ์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลจากชิ้นงานอยู่ในช่วงที่มีความหนาแน่นสูงสุดทำให้เหลือช่องว่างในโครงสร้างน้อยมาก เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นความหนาแน่นจึงเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังได้มีการตรวจสอบหาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังการเผาฟีนิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ แสดงในหัวข้อถัดไป

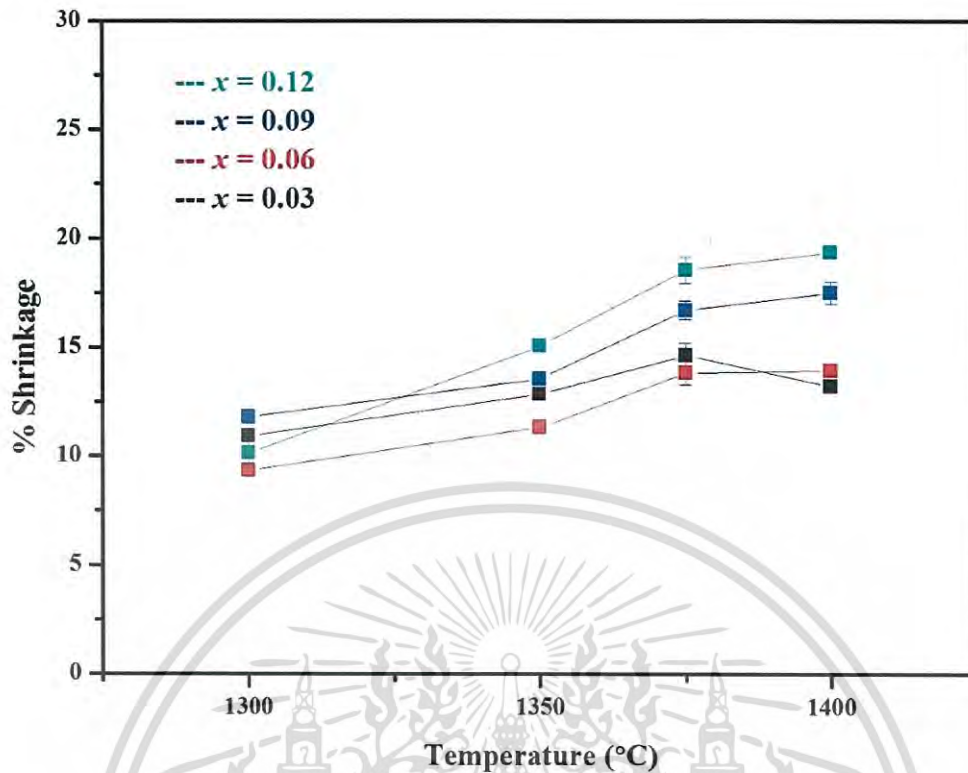
4.1.2 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการหาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังการเผาผืนึก (Firing Shrinkage)

เม็ดเซรามิกที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก แรงอัดขนาด 1000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดกลม เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.98 มิลลิเมตร ซึ่งตัวอย่างเซรามิกจะถูกเผาผืนึกที่อุณหภูมิ 1300 1350 1375 และ 1400 องศาเซลเซียส จากนั้นจะนำเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการตรวจวัดสมบัติทางกายภาพด้วยการหาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังเผาผืนึก และคำนวณค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าร้อยละการหดตัว (%S) ของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบ

อุณหภูมิการเผาผืนึก (°C)	สัดส่วน (x)	ร้อยละการหดตัวของเซรามิก (%S)
1300	0.03	10.91 ± 0.22
	0.06	9.32 ± 0.17
	0.09	11.79 ± 0.29
	0.12	10.14 ± 0.57
1350	0.03	12.84 ± 0.04
	0.06	11.33 ± 0.08
	0.09	13.56 ± 0.11
	0.12	15.04 ± 0.19
1375	0.03	14.61 ± 0.58
	0.06	13.82 ± 0.53
	0.09	16.69 ± 0.42
	0.12	18.54 ± 0.60
1400	0.03	13.23 ± 0.26
	0.06	13.92 ± 0.19
	0.09	17.49 ± 0.50
	0.12	19.34 ± 0.23

จากตารางที่ 4.2 สามารถนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวของเซรามิก (%S) ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ และอุณหภูมิการเผาผืนึก ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวดังรูปที่ 4.2

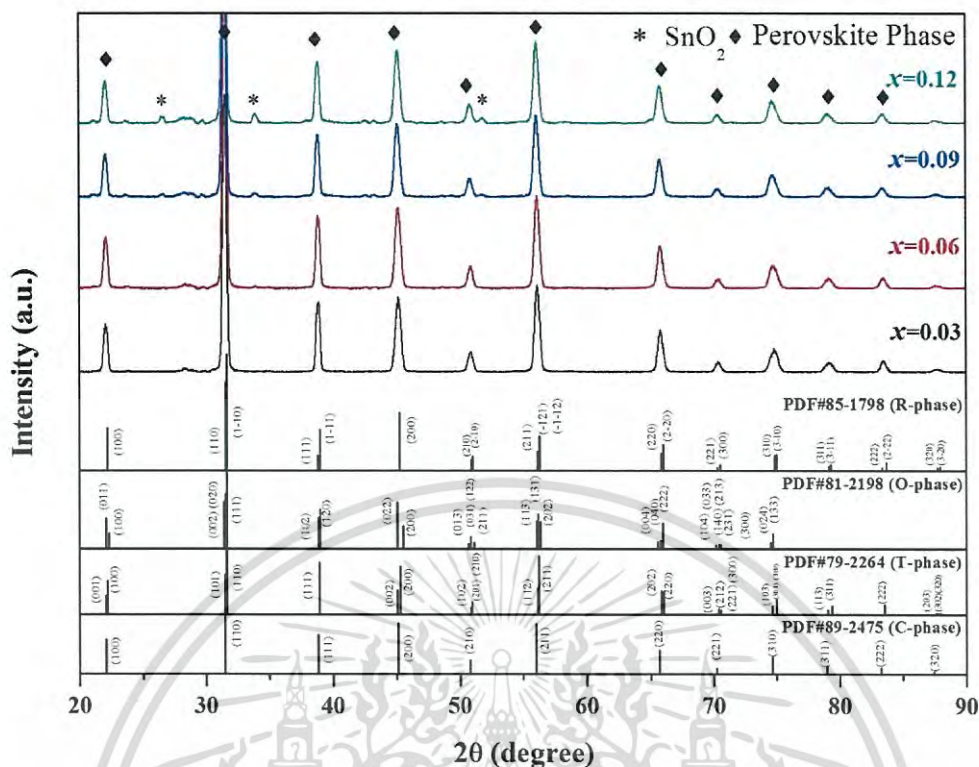


รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวของเซรามิก (%S) ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ และอุณหภูมิการเผาผนึกที่ 1300 1350 1375 และ 1400 องศาเซลเซียส ของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$

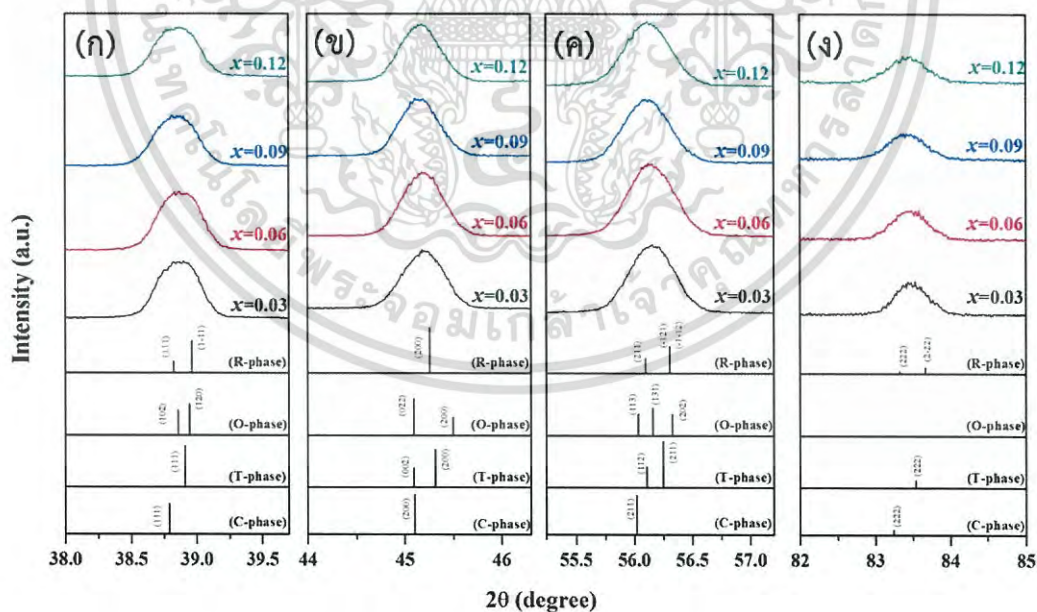
จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวของเซรามิก (%S) ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ และอุณหภูมิการเผาผนึกที่ 1300 1350 1375 และ 1400 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิการเผาผนึก 1300 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเซรามิกมีค่าร้อยละการหดตัวอยู่ในช่วง 9 ถึง 12 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากในการเผาผนึกจะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงเพื่อให้โครงสร้างเกิดการรวมตัวกัน และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอาจเกิดการสูญเสียองค์ประกอบบางชนิดไป ด้วยเหตุผลนี้ทำให้ชิ้นงานเซรามิกเกิดการหดตัว จากผลการทดลองจึงเห็นได้ชัดว่า เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มสูงขึ้น ร้อยละการหดตัวก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยมีค่าร้อยละการหดตัวสูงสุดเท่ากับ 19.34 เปอร์เซ็นต์ ของตัวอย่างเซรามิกสัดส่วน $x = 0.12$ ที่อุณหภูมิการเผา 1400 องศาเซลเซียส

4.1.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

หลังจากได้เม็ดเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ ที่ผ่านการเผาผนึกเรียบร้อยแล้ว จะนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะทำการวัดในช่วง 2θ เท่ากับ 20° ถึง 120° และใช้ข้อมูลมาตรฐานของโครงสร้างของแบเรียมไททาเนตเป็นข้อมูลอ้างอิงในการวิเคราะห์ โดยทำการวิเคราะห์ทุกโครงสร้างที่เป็นไปได้ของสารระบบนี้ ได้แก่ โครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก โครงสร้างแบบเตตระโกนอล โครงสร้างแบบบรอมโบฮีดรอล และโครงสร้างแบบคิวบิก จากการวิเคราะห์พบว่าเซรามิกใน $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ ตรวจพบพีคแปลกปลอมที่สัดส่วน $x = 0.06$ 0.09 และ 0.12 ซึ่งเป็นพีคของ SnO_2 ในช่วง 2θ เท่ากับ 26.5 34 และ 52 เนื่องจากใช้อุณหภูมิสูงในการเผาผนึกทำให้ SnO เกิดการรีดิวส์และเกิดเป็น SnO_2 จากผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า ดิบุกที่ทำการเจือลงไปสามารถเกิดการแพร่เข้าไปในโครงสร้างของแบเรียมไททาเนตเกิดเป็นสารละลายของแข็งได้เพียงสัดส่วนเดียวคือ $x = 0.03$ และส่งผลให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณดิบุกที่เจือเข้าไป เพื่อให้เห็นความแตกต่างที่เด่นชัดขึ้นจึงได้ทำการขยายพีคในช่วง 2θ เท่ากับ 38.2° ถึง 39.5° 44.3° ถึง 46.0° 55.5° ถึง 56.8° และ 82.5° ถึง 84.5° โดยแสดงดังรูปที่ 4.4 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่า เกิดการเลื่อนของพีค (Shift) เกิดขึ้น เซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ พีคควรจะเลื่อนไปทางมุมที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณดิบุกเพิ่มขึ้น เนื่องจากดิบุก ($Sn^{2+} = 0.93$ Å) มีขนาดไอออนที่เล็กกว่าแบเรียม ($Ba^{2+} = 1.35$ Å) ผลการทดลองพบว่าพีคเลื่อนไปทางมุมที่ต่ำลง จึงมีความเป็นไปได้ว่าดิบุก ($Sn^{2+} = 0.93$ Å) อาจเข้าแทนที่ไทเทเนียม ($Ti^{4+} = 0.68$ Å) ในตำแหน่ง B ($BaTi_{1-x}Sn_xO_3$) เนื่องจากที่อุณหภูมิในการเผาสูง มีโอกาสที่ SnO เกิดการรีดิวส์และเกิดเป็น SnO_2 และมีพีคของ SnO_2 เกิดขึ้นจริง



รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$



รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค Rietveld refinement โดยใช้โปรแกรม JANA2006 การวิเคราะห์จะใช้ฐานข้อมูลทางโครงสร้างจาก Crystallographic Information ของแบเรียมไททาเนต เลขที่ 9014492 สำหรับออร์โธโรมบิก และ 1513252 สำหรับเตตระโกนอล หลังจากการวิเคราะห์โครงสร้างแล้ว ได้พารามิเตอร์ต่างๆ ออกมา ได้แก่ R-factor (R_{wp}) และ Goodness of fit (GOF) แสดงดังตารางที่ 4.3 ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างแบบเดี่ยว และแบบโครงสร้างผสมระหว่างสองโครงสร้าง พบว่าชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.03$ มีค่า GOF และ Last wRp ของโครงสร้างเตตระโกนอลต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 1.26 และ 9.61 ตามลำดับ และเมื่อปริมาณดิบุกเพิ่มขึ้น ค่า GOF และ Last wRp ของโครงสร้างเตตระโกนอลสูงขึ้น จึงทำการวิเคราะห์แบบโครงสร้างผสมระหว่างสองโครงสร้างและได้ค่า GOF และ Last wRp ต่ำลง จากการวิเคราะห์ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถสรุปได้ว่า ที่สัดส่วน $x = 0.03$ มีโครงสร้างเป็นโครงสร้างแบบเดี่ยวของเตตระโกนอล ที่สัดส่วน $x = 0.06$ 0.09 และ 0.12 มีโครงสร้างแบบผสมระหว่างเตตระโกนอลและออร์โธโรมบิก นอกจากนี้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยังสามารถนำมาคำนวณหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice Parameter) และปริมาตรของหน่วยเซลล์ได้ แสดงตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ Rwp และ GOF ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ ด้วยเทคนิค Rietveld refinement

สัดส่วน (x)	โครงสร้าง	GOF	Last wRp
0.03	เตตระโกนอล	1.26	9.61
0.06	เตตระโกนอลและ ออร์โธโรมบิก	1.30	9.57
0.09	เตตระโกนอลและ ออร์โธโรมบิก	1.45	10.84
0.12	เตตระโกนอลและ ออร์โธโรมบิก	1.86	13.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแลตทิซพารามิเตอร์และปริมาตรของหน่วยเซลล์ของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$

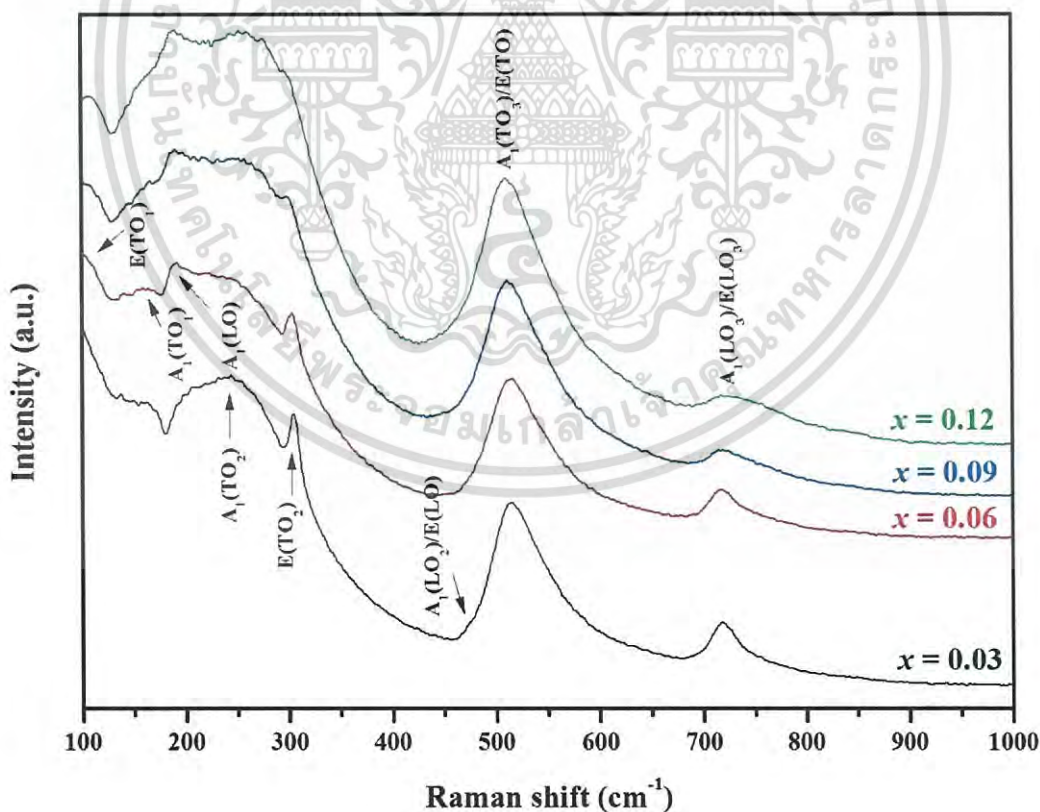
สัดส่วน (x)	แลตทิซพารามิเตอร์ (Å)				ปริมาตรของ หน่วยเซลล์ (Å ³)	เฟส
	a	b	c	c/a		
0.03	4.000568	4.000568	4.022299	1.005431979	64.3750626	เตตระโกนอล
	4.004536	4.004536	4.023608	1.004762599	64.5238195	เตตระโกนอล
0.06	3.987621	5.654455	5.691076	1.427186	128.3214	ออร์โธโรมบิก
	4.007332	4.007332	4.022182	1.003705707	64.5910533	เตตระโกนอล
0.09	3.992455	5.656559	5.690429	1.425296	128.5101	ออร์โธโรมบิก
	3.997123	3.997123	4.042564	1.011368427	64.5880138	เตตระโกนอล
0.12	3.999079	5.673895	5.688518	1.422457	129.0745	ออร์โธโรมบิก

4.1.4 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของสารจากการวิเคราะห์รามาน (Raman Spectrometer)

ผลจากการตรวจสอบองค์ประกอบของสารจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อยืนยันโครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนเฟส หลังจากทำการขัดผิวหน้าเรียบร้อยแล้วโดยทำการวัดสเปกตรัมรามานในช่วง 100 ถึง 1000 ต่อเซนติเมตรที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 4.5 เป็นสเปกตรัมรามานของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ และรูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมรามานในช่วง (ก) 100 ถึง 300 ต่อเซนติเมตร (ข) 400 ถึง 600 ต่อเซนติเมตร และ (ค) 650 ถึง 850 ต่อเซนติเมตร โดยทฤษฎีจะได้ว่าโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยอาจมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล ออร์โธโรมบิก หรือออร์โธโรมบิกสามารถตอบสนองต่อการเกิดรามานได้ ในขณะที่เฟสพาราอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบคิวบิกจะไม่ตอบสนองต่อการเกิดรามาน เนื่องจากมีโครงสร้างที่สมมาตร สำหรับชิ้นงานเซรามิกที่มีแบบเตรียมไททานเตเป็นองค์ประกอบหลักจะปรากฏสเปกตรัมหลัก ได้แก่ $A_1(TO_1)$ ที่ 190 ต่อเซนติเมตร $A_1(TO_2)$ ที่ 261 ต่อเซนติเมตร $E(TO_2)$ ที่ 303 ต่อเซนติเมตร $A_1(TO_3)$ ที่ 516 ต่อเซนติเมตร และ $A_1(LO_3)/E(LO_3)$ ที่ 720 ต่อเซนติเมตร โดยลักษณะของสเปกตรัมรามานจะ

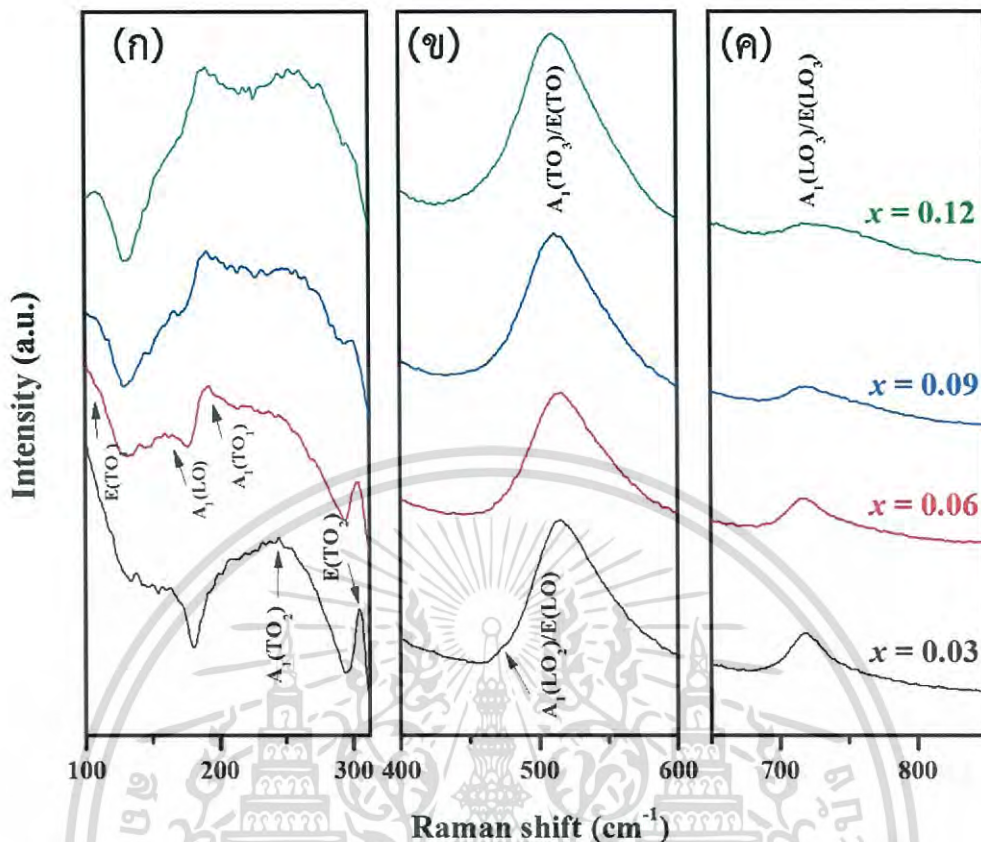
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกันไปตามโครงสร้างของสาร ดังนี้ ลักษณะเฉพาะของโหมดการสั่นของโครงสร้างเตตระโกนอลจะประกอบด้วยพีคของโหมดการสั่น $A_1(TO_2)$ และ $E(TO_2)$ ที่ 244 และ 304 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ลักษณะเฉพาะของโหมดการสั่นของโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิกจะประกอบด้วย พีคของโหมดผสม $E(TO)$ และ $A_1(TO_3)$ ที่ 515 ต่อเซนติเมตร และพีคของโหมดการสั่น $E(TO_1)$ $A_1(TO_1)$ $A_1(LO)$ และ $A_1(TO_2)$ ที่ 108 159 191 และ 244 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ชั้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.03$ จะปรากฏสเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้างแบบเตตระโกนอล สำหรับเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.06$ 0.09 และ 0.12 จะปรากฏสเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทั้งแบบเตตระโกนอลและออร์โธโรมบิก และเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้น ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างแบบเตตระโกนอลค่อยๆ อ่อนลง สังเกตได้ชัดที่พีคของ $E(TO)$ และ $A_1(TO_3)$ ที่ 515 ต่อเซนติเมตร ค่อยๆหายไปเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้น ผลที่ได้จากการวิเคราะห์รามานพบว่า ชั้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.03$ จะมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล ชั้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.06$ 0.09 และ 0.12 จะมีโครงสร้างแบบผสมของเตตระโกนอลและออร์โธโรมบิก ซึ่งสอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมรามานของชั้นงานเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



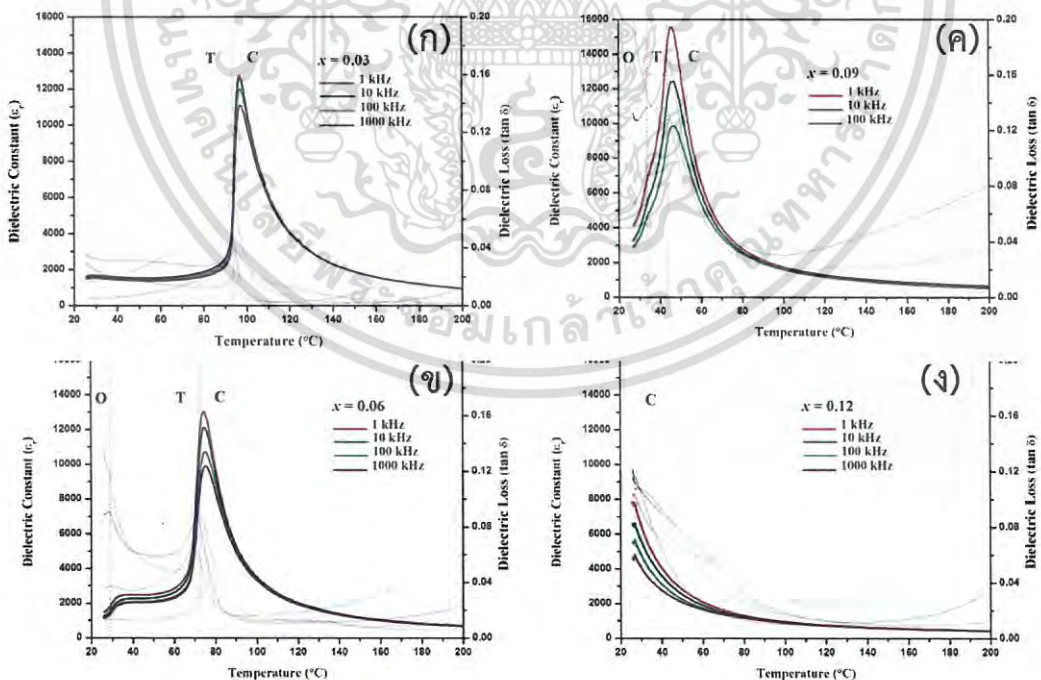
รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมรามานในช่วง (ก) 100 ถึง 300 ต่อเซนติเมตร (ข) 400 ถึง 600 ต่อเซนติเมตร และ (ค) 650 ถึง 850 ต่อเซนติเมตร

4.1.5 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสารจากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss)

ทำการวัดสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก โดยการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 10 100 และ 1000 กิโลเฮิร์ต ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 200 เคลวิน จากรูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ และแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิคูรีที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต จะแสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 (ก) ที่สัดส่วน $x = 0.03$ ตรวจพบพีค 1 พีคที่อุณหภูมิ 93 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าเป็นอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสหรืออุณหภูมิคูรี (T_c) โดยแสดงถึงการเปลี่ยนเฟสจากเตตระโกนอลไปเป็นคิวบิก ในการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกทำการตรวจวัดที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.03$ จึงมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล จากนั้นเมื่อปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นเป็น 0.06 ดังรูปที่ 4.7 (ข) พบการเปลี่ยนแปลงของพีคถึง 2 จุดด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดที่ 1 อุนทงมีคูรีมีค่าลดลงเหลือ 72 องศาเซลเซียส และยังพบการเปลี่ยนแปลงอีก 1 จุดที่อุนทงมีคูรี 29 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับอุนทงมีคูรีห้อง เมื่อพิจารณาพร้อมกับพีคของแบเรียมไททานเตบริสุทธิ คาดว่าพีคที่เกิดขึ้นของชิ้นงานเซรามิกบ่งบอกถึงการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างออร์โธโรมบิกไปเป็นโครงสร้างเตตระโกนอล ดังนั้นชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.06$ จึงมีโครงสร้างเป็นเฟสผสมระหว่างออร์โธโรมบิกและเตตระโกนอล เมื่อปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นเป็น 0.09 ดังรูปที่ 4.7 (ค) พบว่า พีคที่ได้มีลักษณะเป็นพีคเดี่ยวแต่ไม่สมมาตร ซึ่งคาดว่าน่าจะมีการซ้อนทับกันของพีคการเปลี่ยนเฟสที่อุนทงมีคูรีใกล้เคียงกันกับอุนทงมีคูรี ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุนทงมีคูรีเลื่อนต่ำลงมากใกล้กับอุนทงมีคูรีห้องมาก และอุนทงมีคูรีในการเปลี่ยนเฟสออร์โธโรมบิกไปเป็นเตตระโกนอลก็อยู่ใกล้กับอุนทงมีคูรีห้องเช่นกัน ทั้งยังให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุนทงมีคูรีสูงสุดเท่ากับ 15533.58 ดังนั้นชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.09$ จึงมีโครงสร้างเป็นเฟสผสมระหว่างออร์โธโรมบิกและเตตระโกนอล และเมื่อปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นเป็น 0.12 ดังรูป 4.8 (ง) พบว่า ไม่มีพีคปรากฏขึ้น ทั้งนี้คาดว่าอุนทงมีคูรีเลื่อนลงไปต่ำกว่าอุนทงมีคูรีที่ทำการตรวจวัด จึงไม่เห็นพีคปรากฏ จึงคาดว่าโครงสร้างของชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.12$ จะมีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ของชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.12$ นี้ไม่สอดคล้องกับผลในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และรามาน



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับ

อุนทงมีคูรีของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$

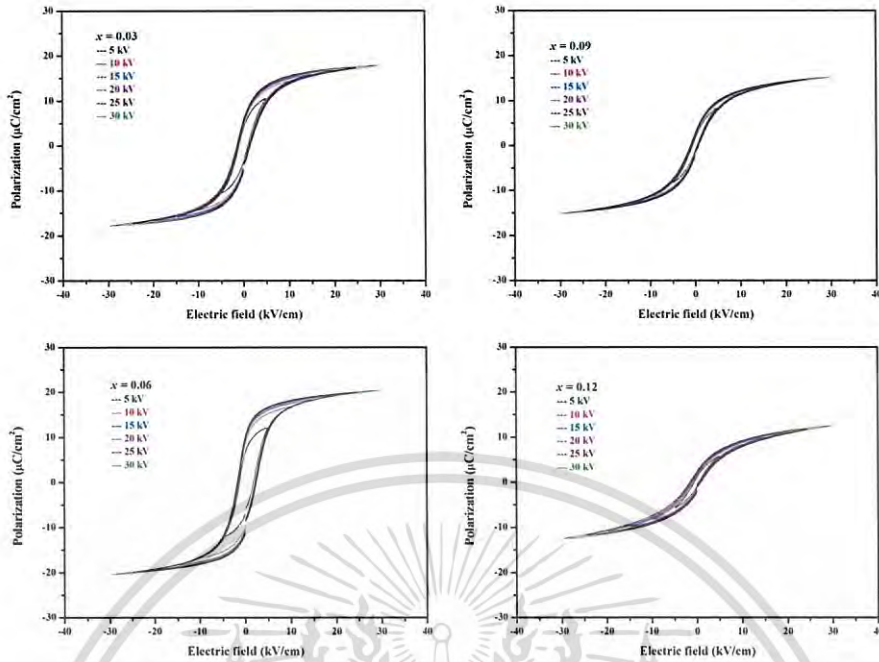
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิคูรี ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรต์

สัดส่วน (x)	เซรามิกระบบ A ($Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$)			
	$\epsilon_r(T_r)$	$\tan\delta(T_r)$	$\epsilon_r(T_c)$	$\tan\delta(T_c)$
0.03	1665.08	0.03	12489.65	0.01
0.06	1469.52	0.14	13021.57	0.04
0.09	4153.85	0.23	15533.58	0.13
0.12	7777.65	0.10	7819.67	0.11

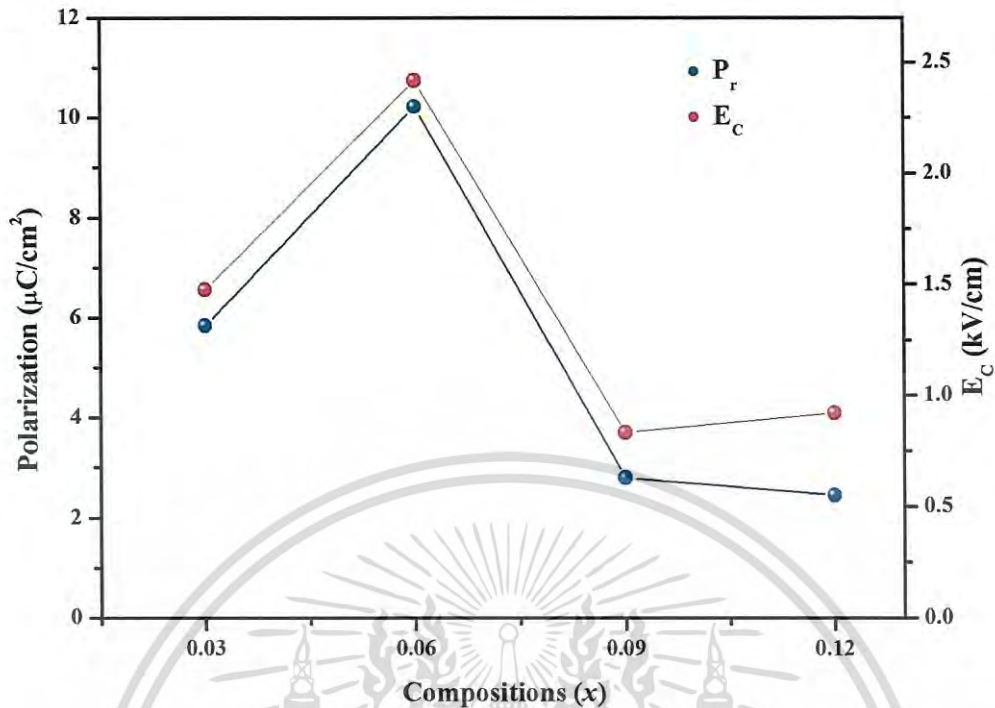
4.1.6 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric)

ผลการตรวจสอบสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกด้วยการวัดค่าโพลาริเซชัน (P) ของชิ้นงานเซรามิกเมื่อให้สนามไฟฟ้า (E) ที่แตกต่างกัน โดยให้สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ 30 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้อง เริ่มจากการนำชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมไว้มาขัดผิวให้เรียบขนานกันทั้งสองด้าน จนได้ชิ้นงานเซรามิกที่มีความหนาประมาณ 1.30 มิลลิเมตร หลังจากทำความสะอาดชิ้นงานแล้วนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทาสีไฟฟ้าด้วยการทากาวเงินทั้งสองด้านบริเวณพื้นผิวหน้าของชิ้นงานและทำการเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจะนำชิ้นงานไปตรวจวัดค่าโพลาริเซชัน โดยผลจากการวัดค่าโพลาริเซชันของชิ้นงานเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ แสดงให้เห็นจากรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$

จากรูปที่ 4.8 รูปที่ 4.8 แสดงวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ พบว่า เซรามิกที่เตรียมได้มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกทุกสัดส่วน เนื่องจากกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นวงวนฮีสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) ในทุกสัดส่วน และจะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นจากสัดส่วน $x = 0.03$ จนถึง 0.12 วงวนฮีสเทอรีซิสของชิ้นงานเซรามิกจะมีลักษณะเป็นสลิมลูป (Slim Loop) มากขึ้น เนื่องมาจากอุณหภูมิคูรีลดลงเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นซึ่งได้จากผลวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก เมื่ออุณหภูมิคูรีเข้าใกล้อุณหภูมิห้องมากขึ้น ทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบคิวบิกมากขึ้น ส่งผลให้วงวนฮีสเทอรีซิสเป็นสลิมลูปมากขึ้นเช่นกัน โดยค่าโพลาริเซชันคงเหลือ (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าบังคับ (E_c) ของเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ จะแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงค่าโพลาริเซชันคงเหลือ (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าบังคับ (E_c) ของเซรามิกระบบ $\text{Ba}_{1-x}\text{Sn}_x\text{TiO}_3$ ที่สัดส่วน 0.03 0.06 0.09 และ 0.12

จากรูปที่ 4.9 ชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.03$ มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือเท่ากับ 5.84 เมื่อปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นเป็น 0.06 ค่าโพลาริเซชันคงเหลือก็จะเพิ่มขึ้นเป็น 10.22 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าโพลาริเซชันคงเหลือสูงสุด เนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นเฟสผสมเลยช่วยส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันคงเหลือสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นเป็น 0.09 และ 0.12 ค่าโพลาริเซชันคงเหลือจะลดลงเหลือ 2.79 และ 2.45 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณดีบุกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิคูริลดลงเข้าใกล้อุณหภูมิห้องมากขึ้น ทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบคิวบิกมากขึ้น ดังนั้น ค่าโพลาริเซชันคงเหลือจึงลดลง

4.2 การแทนที่ดีบุกลงในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ของแบเรียมไททานเตดตำแหน่ง B ($\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$)

4.2.1 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการหาความหนาแน่นของตัวอย่างเซรามิก

เม็ดเซรามิกที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก แรงอัดขนาด 1000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดกลม เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.98 มิลลิเมตร ซึ่งตัวอย่างเซรามิกจะถูกเผาฟืนที่อุณหภูมิ 1400 1450 1500 และ 1550 องศาเซลเซียส จากนั้น

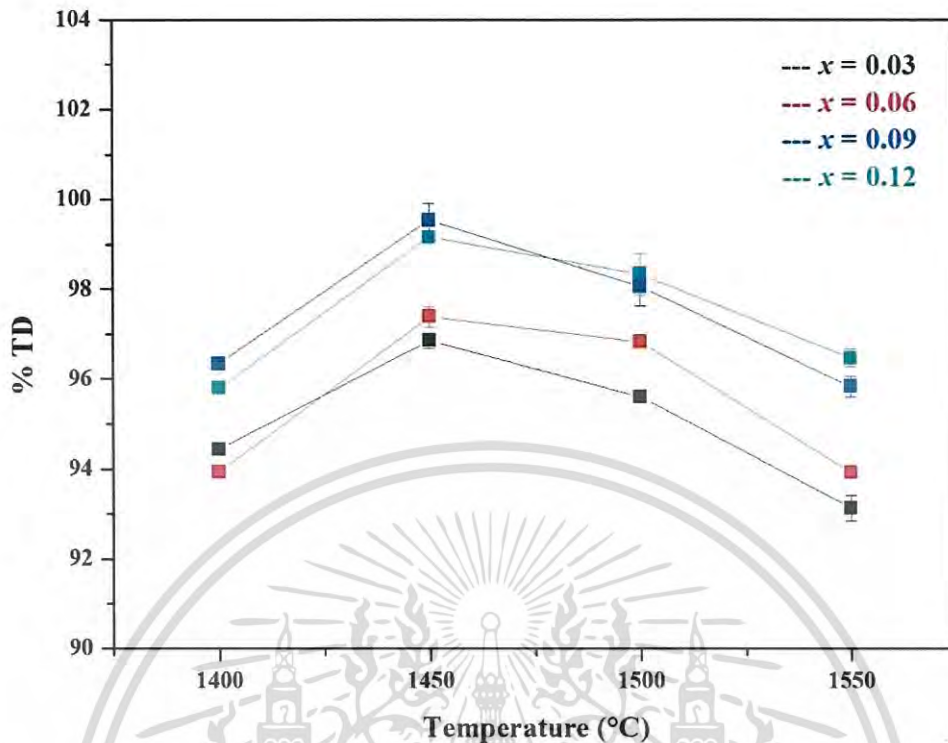
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะนำเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการตรวจวัดสมบัติทางกายภาพด้วยการหาค่าความหนาแน่นของเซรามิกโดยอาศัยหลักการแทนที่ด้วยน้ำของอาร์คิมิดีส และคำนวณหาค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี และร้อยละความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Theoretical Density, %TD) ซึ่งได้ค่าความหนาแน่นของเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าความหนาแน่น (ρ) ทางทฤษฎี และร้อยละความหนาแน่นสัมพัทธ์ (TD %) ของเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบ

อุณหภูมิการเผาผนึก (°C)	สัดส่วน (x)	ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี (g/cm ³)	ร้อยละความหนาแน่นสัมพัทธ์ (TD %)
1400	0.03	6.02	94.43
	0.06	6.01	93.93
	0.09	5.99	96.34
	0.12	6.01	95.79
1450	0.03	6.02	96.85 ± 0.16
	0.06	6.01	97.38 ± 0.22
	0.09	5.99	99.53 ± 0.38
	0.12	6.01	99.16 ± 0.12
1500	0.03	6.02	95.59 ± 0.10
	0.06	6.01	96.83 ± 0.16
	0.09	5.99	98.06 ± 0.43
	0.12	6.01	98.33 ± 0.46
1550	0.03	6.02	93.13 ± 0.29
	0.06	6.01	93.91 ± 0.13
	0.09	5.99	95.83 ± 0.23
	0.12	6.01	96.47 ± 0.19

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเซรามิกที่เตรียมได้มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนองค์ประกอบและอุณหภูมิการเผาผนึกอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อนำค่าความหนาแน่นที่ได้มาคำนวณหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์จากสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ แล้วนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับกับอุณหภูมิการเผาผนึกที่สัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ จะได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความหนาแน่นสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเผาผนึกที่สัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความหนาแน่นสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกจะเห็นได้ว่า ร้อยละความหนาแน่นสัมพันธ์เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาผนึกเพิ่มขึ้น และเมื่อถึงจุดๆ หนึ่ง ร้อยละความหนาแน่นจะลดลงโดยที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส สามารถเตรียมเซรามิกที่มีร้อยละความหนาแน่นสัมพันธ์ได้สูงสุด มีค่าอยู่ในช่วง 96 ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นร้อยละความหนาแน่นสัมพันธ์จะลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการสลายตัวเมื่ออยู่ในอุณหภูมิสูงของสารบางชนิดที่เป็นองค์ประกอบในเซรามิกทำให้เกิดเป็นช่องรูพรุนภายในโครงสร้างเป็นผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง นอกจากนี้ยังได้มีการตรวจสอบหาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังการเผาผนึกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ แสดงในหัวข้อถัดไป

4.2.2 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพหาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังการเผาผนึก (Firing shrinkage)

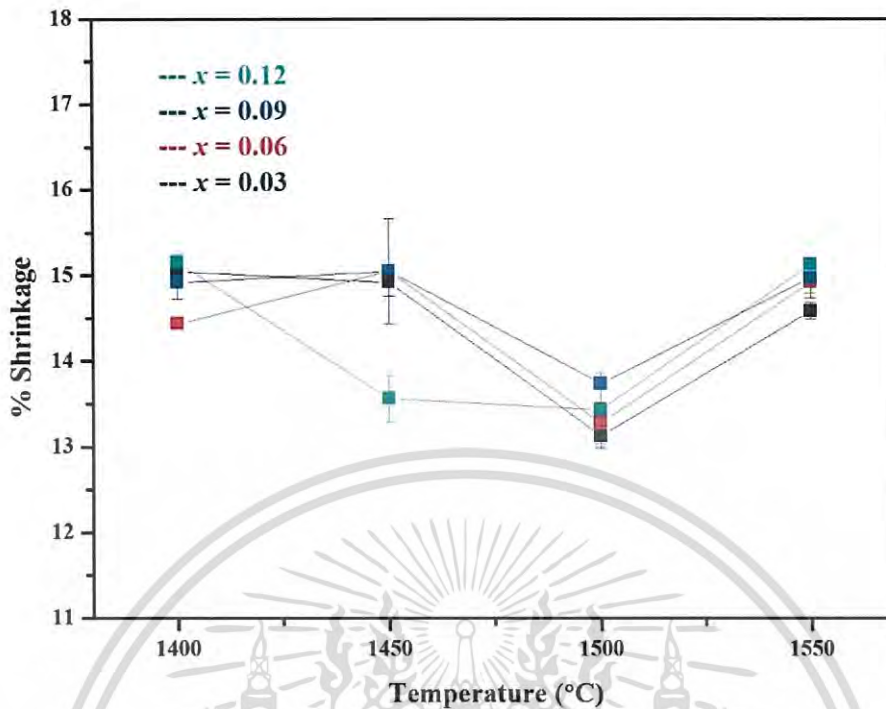
เม็ดยเซรามิกที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก แรงอัดขนาด 1000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเรียบร้อยแล้ว ขึ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดยกลม เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.98 มิลลิเมตร ซึ่งตัวอย่างเซรามิกจะถูกเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1400 1450 1500 และ 1550 องศาเซลเซียส จากนั้นจะนำเม็ดยเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ หาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังเผาผนึก ซึ่งได้ค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าร้อยละการหดตัว (%S) ของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบ

อุณหภูมิการเผา ผนึก (°C)	สัดส่วน (x)	ร้อยละการหดตัวของเซรามิก (%S)
1400	0.03	15.05 ± 0.10
	0.06	14.43 ± 0.04
	0.09	14.92 ± 0.19
	0.12	15.15 ± 0.01
1450	0.03	14.92 ± 0.16
	0.06	15.05 ± 0.61
	0.09	15.05 ± 0.61
	0.12	13.56 ± 0.27
1500	0.03	13.12 ± 0.15
	0.06	13.28 ± 0.24
	0.09	13.74 ± 0.04
	0.12	13.43 ± 0.43
1550	0.03	14.59 ± 0.10
	0.06	14.92 ± 0.13
	0.09	14.97 ± 0.24
	0.12	15.16 ± 0.07

จากตารางที่ 4.7 สามารถนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวของเซรามิก (%S) ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ และอุณหภูมิการเผาผนึก ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

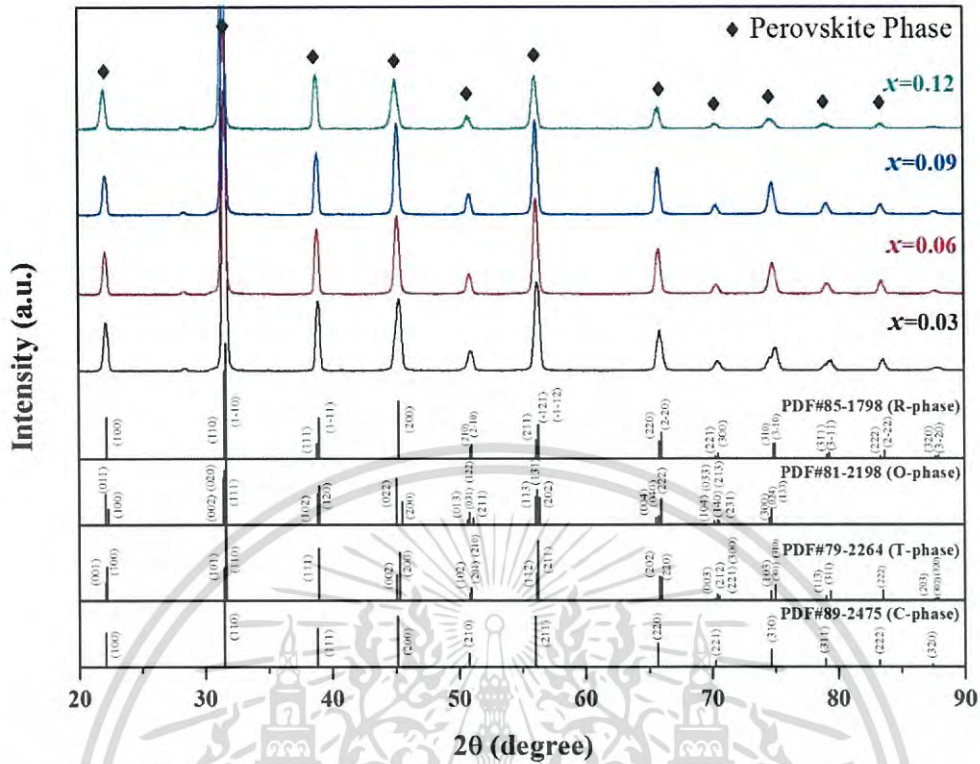


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวของเซรามิก (%S) ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ และอุณหภูมิการเผาผนึกที่ 1400 1450 1500 และ 1550 องศาเซลเซียส ของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$

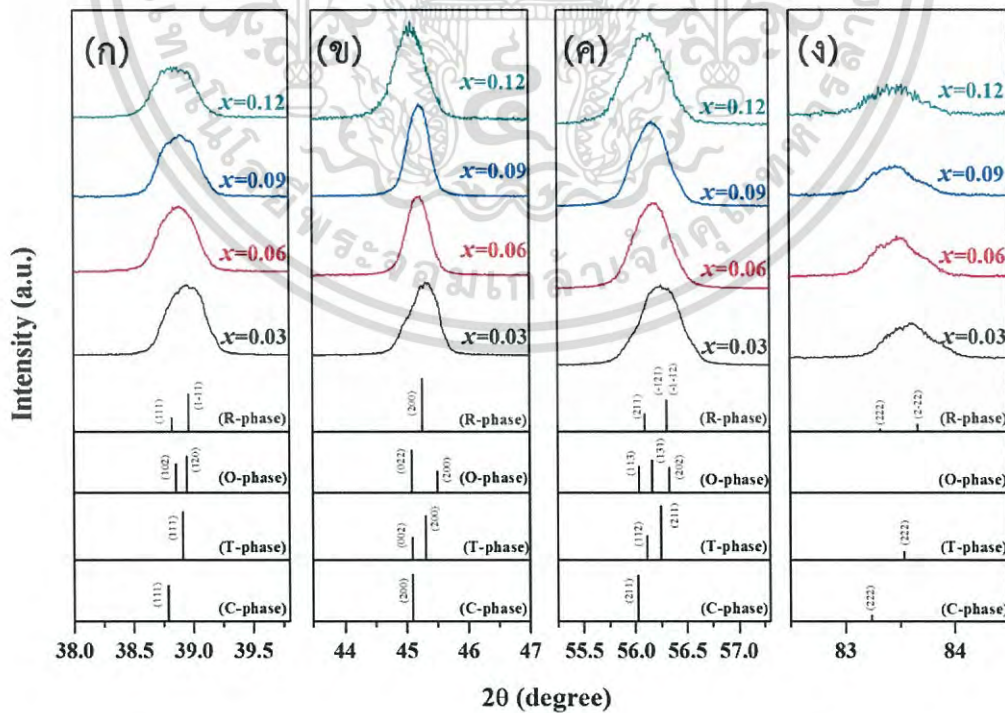
จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวของเซรามิก (%S) ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ และอุณหภูมิการเผาผนึกที่ 1400 1450 1500 และ 1550 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 1400 องศาเซลเซียส ร้อยละการหดตัวของชิ้นงานเซรามิกอยู่ในช่วง 14.43 ถึง 15.15 เปอร์เซ็นต์ และเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น ร้อยละการหดตัวยังคงอยู่ในช่วง 13 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ อาจเพราะชิ้นงานอยู่ในช่วงการหดตัวสูงสุด ทำให้เหลือช่องว่างในโครงสร้างน้อยมาก เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นการหดตัวจึงเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ร้อยละการหดตัวลดลงเล็กน้อยอาจเนื่องจากการสูญเสียองค์ประกอบบางชนิดไป โดยชิ้นงานเซรามิกมีค่าร้อยละการหดตัวสูงสุดเท่ากับ 15.16 เปอร์เซ็นต์ ของตัวอย่างเซรามิกสัดส่วน $x = 0.12$ ที่อุณหภูมิการเผา 1550 องศาเซลเซียส

4.2.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

หลังจากได้เม็ดเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ ที่ผ่านการเผาผนึกเรียบร้อยแล้ว จะนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งจะทำการวัดในช่วง 2θ เท่ากับ 20° ถึง 120° และใช้ข้อมูลมาตรฐานของโครงสร้างของแบเรียมไททาเนตเป็นข้อมูลอ้างอิงในการวิเคราะห์ โดยทำการวิเคราะห์ทุกโครงสร้างที่เป็นไปได้ของสารระบบนี้ ได้แก่ โครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก โครงสร้างแบบเตตระโกนอล โครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอล และโครงสร้างแบบคิวบิก จากการวิเคราะห์พบว่า เซรามิกใน $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ สามารถเตรียมเฟสเพอรอฟสไกต์บริสุทธิ์ของเซรามิกได้ทุกสัดส่วนที่ทำการเตรียม เนื่องจากไม่พบพีกของเฟสแปลกปลอมอื่นๆ จากผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าดีบุกที่ทำการเจือลงไป สามารถเกิดการแพร่เข้าไปในโครงสร้างของแบเรียมไททาเนตได้ เกิดเป็นสารละลายของแข็งอย่างสมบูรณ์และส่งผลให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณดีบุกที่เจือเข้าไปในโครงสร้าง เพื่อให้เห็นความแตกต่างที่เด่นชัดขึ้นจึงได้ทำการขยายพีกในช่วง 2θ เท่ากับ 38.0° ถึง 39.7° 44.0° ถึง 46.3° 55.5° ถึง 57.0° และ 82.5° ถึง 84.5° โดยแสดงดังรูปที่ 4.13 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่า เกิดการเลื่อนของพีก (Shift) โดยเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ พีกจะเลื่อนไปทางมุมที่ต่ำลงเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้น เนื่องจากดีบุก ($Sn^{4+} = 0.71 \text{ \AA}$) มีขนาดไอออนที่ใหญ่กว่าไทเทเนียม ($Ti^{4+} = 0.68 \text{ \AA}$) เมื่อดีบุกเข้าแทนที่ไทเทเนียมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและระยะห่างระหว่างระนาบก็เปลี่ยนไปเช่นกัน ทำให้เห็นการเลื่อนของพีกในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูปที่ 4.12 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$



รูปที่ 4.13 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค Rietveld refinement โดยใช้โปรแกรม JANA2006 การวิเคราะห์จะใช้ฐานข้อมูลทางโครงสร้างจาก Crystallographic Information ของแบเรียมไททาเนต เลขที่ 9014492 สำหรับออร์โธโรมบิก และ 1513252 สำหรับเตตระโกนอล หลังจากการวิเคราะห์โครงสร้างแล้ว ได้พารามิเตอร์ต่างๆ ออกมา ได้แก่ R-factor (R_{wp}) และ Goodness of fit (GOF) แสดงดังตารางที่ 4.8 ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างแบบเดี่ยว และแบบโครงสร้างผสมระหว่างสองโครงสร้าง พบว่าชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.03$ มีค่า GOF และ Last wRp ของโครงสร้างเตตระโกนอลต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 1.49 และ 8.69 ตามลำดับ และเมื่อปริมาณดิบถูกเพิ่มขึ้น ค่า GOF และ Last wRp ของโครงสร้างเตตระโกนอลสูงขึ้น จึงทำการวิเคราะห์แบบโครงสร้างผสมระหว่างสองโครงสร้างและได้ค่า GOF และ Last wRp ต่ำลง จากการวิเคราะห์ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถสรุปได้ว่าที่สัดส่วน $x = 0.03$ มีโครงสร้างเป็นโครงสร้างแบบเดี่ยวของเตตระโกนอล ที่สัดส่วน $x = 0.06$ 0.09 และ 0.12 มีโครงสร้างแบบผสมระหว่างเตตระโกนอลและออร์โธโรมบิก นอกจากนี้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยังสามารถนำมาคำนวณหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice Parameter) และปริมาตรของหน่วยเซลล์ได้ แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ R_{wp} และ GOF ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ เทคนิค Rietveld refinement

สัดส่วน (x)	โครงสร้าง	GOF	Last wRp
0.03	เตตระโกนอล	1.49	8.69
0.06	เตตระโกนอล	1.50	8.69
0.09	เตตระโกนอล	1.54	9.08
0.12	เตตระโกนอล	1.61	25.45

นอกจากนี้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยังสามารถนำมาคำนวณหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice Parameter) และปริมาตรของหน่วยเซลล์ได้ แสดงดังตารางที่ 4.9

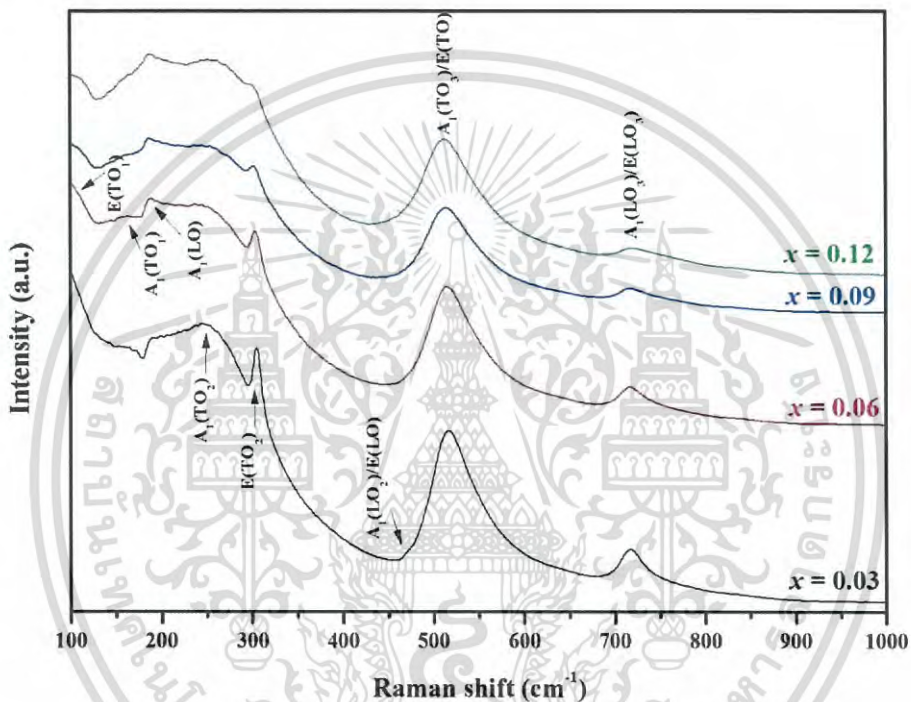
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าแลตทิซพารามิเตอร์และปริมาตรของหน่วยเซลล์ของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$

สัดส่วน (x)	แลตทิซพารามิเตอร์ (Å)				ปริมาตรของ หน่วยเซลล์ (Å ³)	เฟส
	a	b	c	c/a		
0.03	3.997886	3.997886	4.024652	1.006695038	64.3264	เตตระโกนอล
0.06	4.004093	4.004093	4.019248	1.003784877	64.43964	เตตระโกนอล
0.09	4.009072	4.009072	4.020442	1.002836068	64.61919	เตตระโกนอล
0.12	4.000638	4.000638	4.026928	1.006571452	64.45139	เตตระโกนอล

4.2.4 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของสารจากการวิเคราะห์รามาน (Raman Spectrometer)

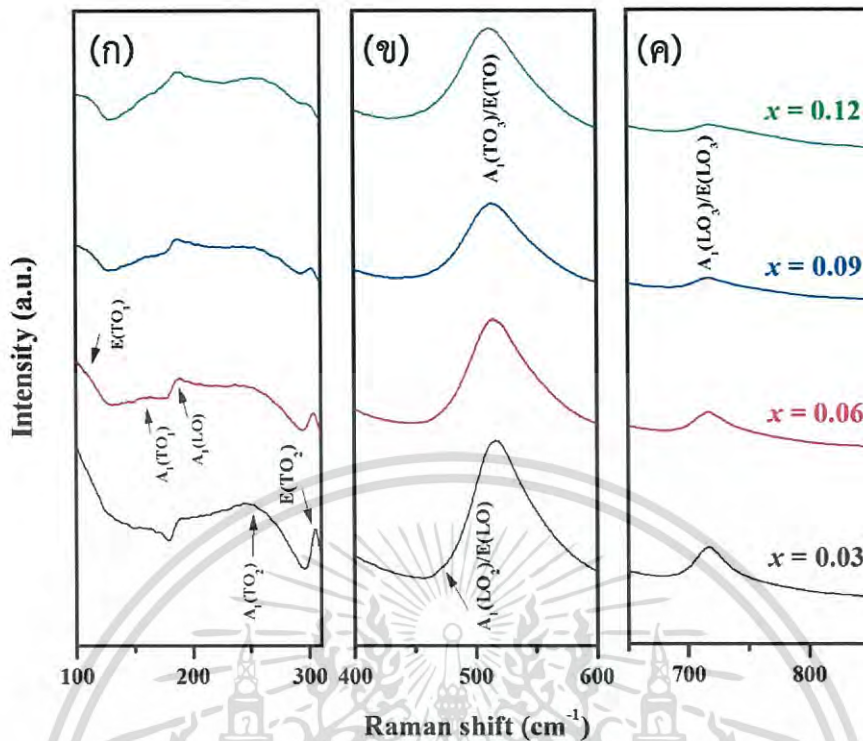
ผลจากการตรวจสอบองค์ประกอบของสารจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อยืนยันโครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนเฟส หลังจากทำการขัดผิวหน้าเรียบร้อยแล้วโดยทำการวัดสเปกตรัมรามานในช่วง 100 ถึง 1000 ต่อเซนติเมตรที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 4.14 เป็นสเปกตรัมรามานของเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ และรูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัมรามานในช่วง (ก) 100 ถึง 300 (ข) 400 ถึง 600 และ (ค) 650 ถึง 850 สำหรับเซรามิกที่มีแบเรียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบหลักจะปรากฏสเปกตรัมหลักได้แก่ $A_1(TO_1)$ ที่ 190 ต่อเซนติเมตร $A_1(TO_2)$ ที่ 261 ต่อเซนติเมตร $E(TO_2)$ ที่ 303 ต่อเซนติเมตร $A_1(TO_3)$ ที่ 516 ต่อเซนติเมตร และ $A_1(LO_3)/E(LO_3)$ ที่ 720 ต่อเซนติเมตร โดยลักษณะของสเปกตรัมรามานจะแตกต่างกันไปตามโครงสร้างของสาร ดังนี้ ลักษณะเฉพาะของโหมดการสั่นของโครงสร้างเตตระโกนอลจะประกอบด้วยพีคของโหมดการสั่น $A_1(TO_2)$ และ $E(TO_2)$ ที่ 249 และ 305 ต่อเซนติเมตรตามลำดับ ลักษณะเฉพาะของโหมดการสั่นของโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิกจะประกอบด้วย พีคของโหมดผสม $E(TO)$ และ $A_1(TO_3)$ ที่ 512 ต่อเซนติเมตร และพีคของโหมดการสั่น $E(TO_1)$ $A_1(TO_1)$ $A_1(LO)$ และ $A_1(TO_2)$ ที่ 111 163 186 และ 249 ต่อเซนติเมตรตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.03$ จะปรากฏสเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้างแบบเตตระโกนอล สำหรับเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.06$ 0.09 และ 0.12 จะปรากฏสเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้างทั้งแบบเตตระโกนอลและออร์

โรธอมบิก และเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้น ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างแบบเตตระโกนอลค่อยๆ อ่อนลง สังเกตได้ชัดที่พีคของ $E(\text{TO})$ และ $A_1(\text{TO}_3)$ ที่ 515 ต่อเซนติเมตร และพีคของ $E(\text{TO}_2)$ ที่ 305 ต่อเซนติเมตร ค่อยๆ อ่อนลงเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้น ผลที่ได้จากการวิเคราะห์รามานพบว่าชั้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.03$ จะมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล ชั้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.06$ 0.09 และ 0.12 จะมีโครงสร้างแบบผสมของเตตระโกนอลและออร์โธโรมบิก ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมรามานของชั้นงานเซรามิกในระบบ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



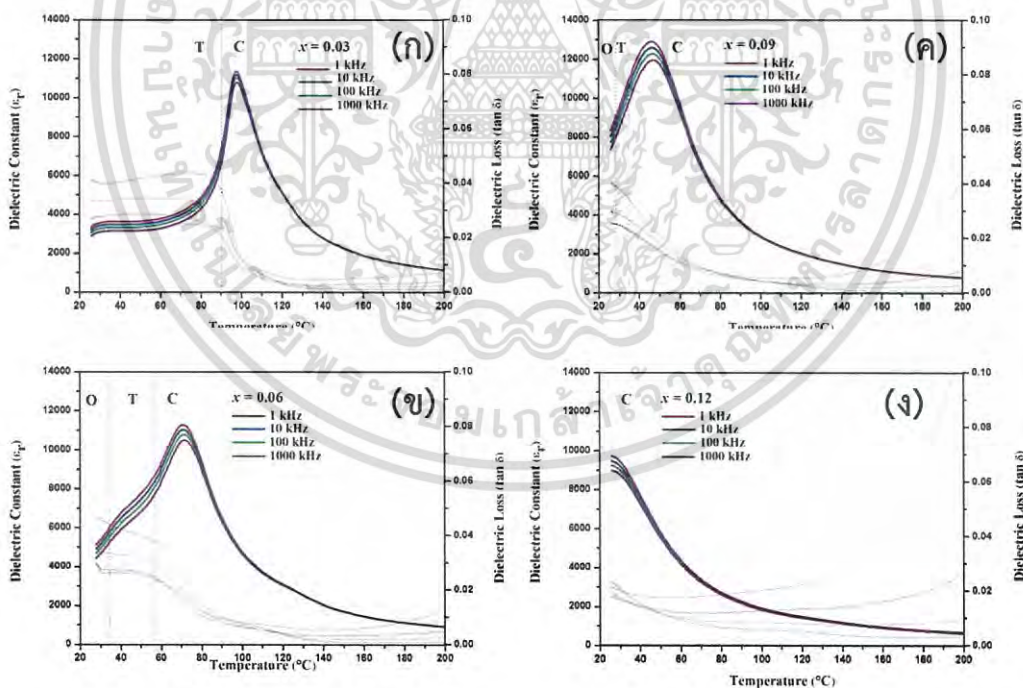
รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัมรามานในช่วง (ก) 100 ถึง 300 ต่อเซนติเมตร (ข) 400 ถึง 600 ต่อเซนติเมตร และ (ค) 650 ถึง 850 ต่อเซนติเมตร

4.2.5 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสารจากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss)

ทำการวัดสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก โดยการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 10 100 และ 1000 กิโลเฮิร์ต ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 200 เคลวิน จากรูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกในระบบ $\text{Ba}_{1-x}\text{Sn}_x\text{TiO}_3$ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิคูรี ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต จะแสดงดังตารางที่ 4.10 เมื่อพิจารณารูปที่ 4.16 (ก) ที่สัดส่วน $x = 0.03$ ตรวจพบพีค 1 พีค ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าเป็นอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสหรืออุณหภูมิคูรี (Tc) โดยแสดงถึงการเปลี่ยนเฟสจากเตตระโกนอลไปเป็นคิวบิก ในการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกทำการตรวจวัดที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.03$ จึงมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล จากนั้นเมื่อปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นเป็น 0.06 ดังรูปที่ 4.16 (ข) พบการเปลี่ยนแปลงของพีคถึง 2 จุดด้วยกัน จุดที่ 1 อุณหภูมิคูรีมีค่าลดลงเหลือ 57 องศาเซลเซียส และยังพบการเปลี่ยนแปลงอีก 1 จุดที่อุณหภูมิ 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง เมื่อพิจารณาร่วมกับพีคของแบเรียมไททาเนตบริสุทธิ์ คาดว่าพีคที่เกิดขึ้นของชิ้นงานเซรามิกบ่งบอกถึงการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างออร์โธโรมบิกไปเป็นโครงสร้างเตตระโกนอล ดังนั้นชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.06$ จึงมีโครงสร้างเป็นเฟสผสมระหว่างออร์โธโรมบิกและเตตระโกนอล เมื่อปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นเป็น 0.09 ดังรูปที่ 4.16 (ค) พบว่า พีคที่ได้มีลักษณะเป็นพีคเดี่ยวแต่ไม่สมมาตร ซึ่งคาดว่าน่าจะมีการซ้อนทับกันของพีคการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันกับอุณหภูมิคูรี ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิคูรีเลื่อนต่ำลงมากไปใกล้อุณหภูมิห้องมาก และอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสออร์โธโรมบิกไปเป็นเตตระโกนอลก็อยู่ใกล้ที่อุณหภูมิห้องมากขึ้นกัน ทั้งยังให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิคูรีสูงสุดเท่ากับ 12915.12 ดังนั้นชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.09$ จึงมีโครงสร้างเป็นเฟสผสมระหว่างออร์โธโรมบิกและเตตระโกนอล และเมื่อปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นเป็น 0.12 ดังรูปที่ 4.16 (ง) พบว่า ไม่มีพีคปรากฏขึ้น ทั้งนี้คาดว่าอุณหภูมิคูรีเลื่อนลงไปต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำการตรวจวัด จึงไม่เห็นพีคปรากฏ จึงคาดว่าโครงสร้างของชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.12$ จะมีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากสมบัติไดอิเล็กทริกของชิ้นงานเซรามิกไม่สอดคล้องกับผลในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และรามาน



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

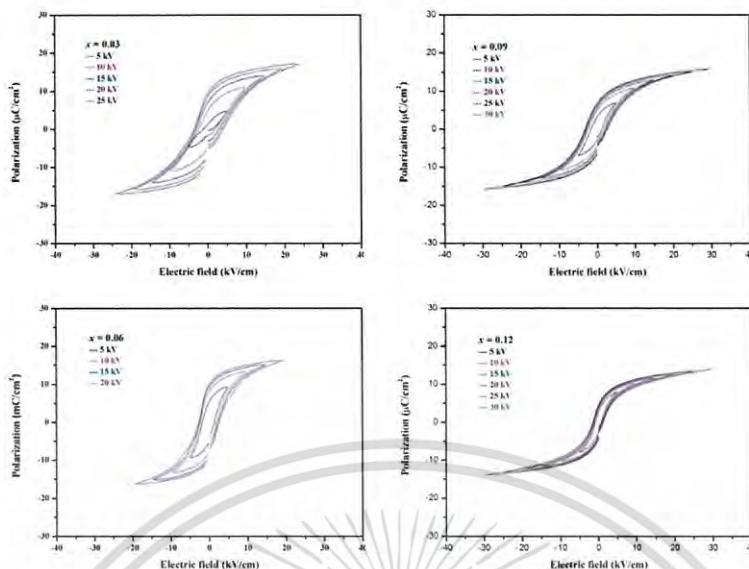
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกระบบ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิคูรี ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์

สัดส่วน (x)	เซรามิกระบบ B ($\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$)			
	$\epsilon_{r(T_r)}$	$\tan\delta(T_r)$	$\epsilon_{r(T_c)}$	$\tan\delta(T_c)$
0.03	3310.74	0.03	11345.13	0.01
0.06	5126.37	0.03	11278.17	0.02
0.09	8351.82	0.03	12915.12	0.02
0.12	9641.80	0.02	9734.83	0.02

4.2.6 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric)

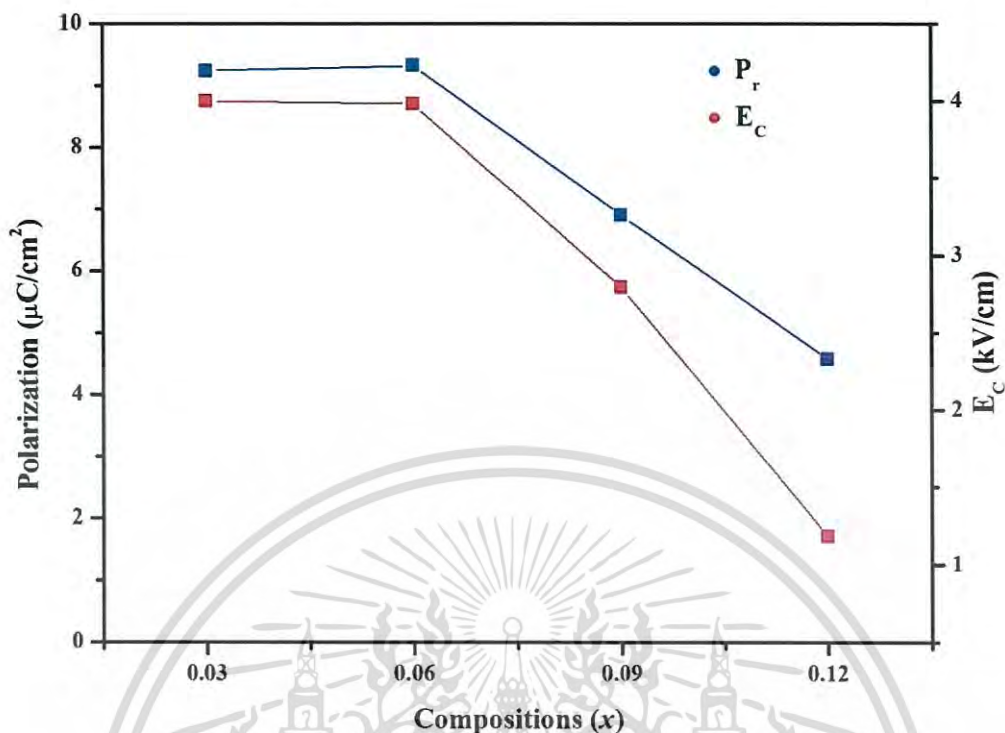
ผลการตรวจสอบสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกด้วยการวัดค่าโพลาริเซชัน (P) ของชิ้นงานเซรามิกเมื่อให้สนามไฟฟ้า (E) ที่แตกต่างกัน โดยให้สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ 30 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้อง เริ่มจากการนำชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมไว้มาขัดผิวให้เรียบขนานกันทั้งสองด้าน จนได้ชิ้นงานเซรามิกที่มีความหนาประมาณ 1.30 มิลลิเมตร หลังจากทำความสะอาดชิ้นงานแล้วนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทาสีไฟฟ้าด้วยการทากาวเงินทั้งสองด้านบริเวณพื้นผิวหน้าของชิ้นงานและทำการเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจะนำชิ้นงานไปตรวจวัดค่าโพลาริเซชัน โดยผลจากการวัดค่าโพลาริเซชันของชิ้นงานเซรามิกระบบ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ แสดงให้เห็นจากรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิกในระบบ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$

จากรูปที่ 4.17 แสดงวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิกในระบบ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ พบว่า เซรามิกที่เตรียมได้มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกทุกสัดส่วน เนื่องจากกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นวงวนฮีสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) ในทุกสัดส่วน และจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นจากสัดส่วน $x = 0.03$ จนถึง 0.12 วงวนฮีสเทอรีซิสของชิ้นงานเซรามิกจะมีลักษณะเป็นสลิมลูป (Slim Loop) มากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิคูรีลดลงเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นซึ่งได้จากผลวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริกเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิห้องมากขึ้น ทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบคิวบิกมากขึ้น ส่งผลให้วงวนฮีสเทอรีซิสเป็นสลิมลูปมากขึ้นเช่นกัน โดยค่าโพลาริเซชันคงเหลือ (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าบังคับ (E_c) ของเซรามิกในระบบ $\text{Ba}_{1-x}\text{Sn}_x\text{TiO}_3$ จะแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงค่าโพลาริเซชันคงเหลือ (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าบังคับ (E_c) ของเซรามิกระบบ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ ที่สัดส่วน 0.03 0.06 0.09 และ 0.12

จากรูปที่ 4.18 พบว่า ชิ้นงานเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.03$ มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือเท่ากับ 9.23 เมื่อปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นเป็น 0.06 ค่าโพลาริเซชันคงเหลือจะเพิ่มขึ้นเป็น 9.32 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าโพลาริเซชันคงเหลือสูงสุด เนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นเฟสผสมเลยช่วยส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันคงเหลือสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นเป็น 0.09 และ 0.12 ค่าโพลาริเซชันคงเหลือจะลดลงเหลือ 6.86 และ 4.55 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ เนื่องมาจากปริมาณดีบุกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิคูรีลดลงเข้าใกล้อุณหภูมิห้องมากขึ้น ทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบคิวบิกมากขึ้น ดังนั้นค่าโพลาริเซชันคงเหลือจึงลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของการแทนที่ที่ตึกในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยทำการแทนที่ที่ตึกลงในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ของแบเรียมไททานเนตทั้งตำแหน่ง A ($Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$) และ ตำแหน่ง B ($BaTi_{1-x}Sn_xO_3$) โดยที่ x คือสัดส่วนองค์ประกอบที่ตึก คือ 0.03 0.06 0.09 และ 0.12 เพื่อศึกษาผลของการแทนที่ด้วยธาตุชนิดเดียวกันแต่อยู่ในตำแหน่งที่ต่างกัน โดยในขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกจะใช้วิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และเผาผนึกที่อุณหภูมิต่างกัน ซึ่งเม็ดเซรามิกของทั้งระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ และระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ ได้นำไปวิเคราะห์ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพจากการหาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังการเผาผนึก (Firing Shrinkage) ตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) ตรวจสอบองค์ประกอบของสารจากการวิเคราะห์รามาน (Raman Spectrometer) ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสารจากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss) รวมถึงวิเคราะห์สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาหาคุณลักษณะเฉพาะของเม็ดเซรามิกในระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$

- 1) สามารถเตรียมเพลสเพอโรฟสไกต์ของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ ได้สูงสุดที่ 3 เปอร์เซ็นต์ โมลของตึกที่ทำการเจือเข้าไป
- 2) จากการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพจากการหาค่าความหนาแน่นของเซรามิกหลังการเผาผนึกของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นร้อยละความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยทุกสัดส่วนมีค่าร้อยละความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเม็ดเซรามิกอยู่ในช่วง คือ 87 ถึง 89 เปอร์เซ็นต์
- 3) จากการศึกษาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังเผาผนึกของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.12$ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส มีค่าการหดตัวของเม็ดเซรามิกสูงสุด คือ 54 เปอร์เซ็นต์ และที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.06$ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส มีค่าการหดตัวของเม็ดเซรามิกน้อยที่สุด คือ 26 เปอร์เซ็นต์ สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิการเผาผนึกมีผลต่อการหดตัวของเซรามิก หากอุณหภูมิในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เผาผนึกสูงขึ้นค่าการหดตัวก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะในช่วงอุณหภูมิการเผาผนึกที่สูงขึ้น โครงสร้างได้มีการสูญเสียองค์ประกอบบางอย่างไปซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจเกิดการสลายตัวของธาตุที่เจือเข้าไปมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึก และยังเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณดีบุกเข้าไปให้มากขึ้นก็ส่งผลต่อการหดตัวของเซรามิกเช่นกัน
- 4) จากการศึกษาหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice Parameter) ของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ จากวิธีปฏิบัติการสถานะของแข็ง พบว่าค่าแลตทิซพารามิเตอร์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้นและปริมาตรของหน่วยเซลล์จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน
 - 5) จากการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) พบว่าสามารถเตรียมเม็ดเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ ที่มีความบริสุทธิ์อยู่ที่สัดส่วน $x = 0.03$ ซึ่งที่สัดส่วนนี้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือมีเฟสแปลกปลอมอื่นปรากฏอยู่ โดยที่สัดส่วน $x = 0.03$ เซรามิกจะมีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอล และที่สัดส่วน $x = 0.06$ และ 0.09 จะมีโครงสร้างแบบผสมระหว่างเตตระโกนอลกับออร์โธโรมบิกและที่สัดส่วน $x = 0.12$ โครงสร้างจะเปลี่ยนไปเป็นคิวบิกทั้งหมด
 - 6) จากการตรวจสอบองค์ประกอบของสารจากการวิเคราะห์รามาน (Raman Spectrometer) ของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ พบว่าพีคที่ได้มีลักษณะที่สอดคล้องกันกับรูปแบบรามานสเปกตรัมของสารประกอบแบเรียมไททาเนต ซึ่งสอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยโครงสร้างมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเตตระโกนอลไปเป็นโครงสร้างออร์โธโรมบิก เมื่อปริมาณของดีบุกเพิ่มมากขึ้น
 - 7) จากการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss) ของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ พบว่าที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ อุณหภูมิ 45.5 องศาเซลเซียส ของสัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.09$ จะให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด มีค่าเท่ากับ 15533.58 และมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.13 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 200 องศาเซลเซียส ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีแนวโน้มลดลงและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณสัดส่วนองค์ประกอบดีบุกจะส่งผลให้อุณหภูมิคูริลลดลง และทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนถึงสัดส่วนองค์ประกอบดีบุกที่ $x = 0.09$ ที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากโครงสร้างที่ผสมกันระหว่างเฟสออร์โธโรมบิก เตตระโกนอล และคิวบิก ไปเป็นโครงสร้างคิวบิกทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) จากการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) ของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ พบว่าสัดส่วน $x = 0.03$ ถึง 0.09 มีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก เพราะมีวงวนฮีสเทอรีซิสที่สมบูรณ์ทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มสนามไฟฟ้าให้สูงขึ้น ค่าโพลาริเซชันจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน และที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.06$ จะมีค่าโพลาริเซชันคงเหลือที่สูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $10.22 \mu C/cm^2$ และและมีค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ $2.42 kV/cm$ ซึ่งมีช่วงวงวนฮีสเทอรีซิสที่กว้างที่สุด

5.1.2 การศึกษาหาคุณลักษณะเฉพาะของเม็ดเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$

- 1) สามารถเตรียมเฟสโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ ได้ทุกสัดส่วนองค์ประกอบดิบที่ใช้เจอเข้าไป คือ 0.03 0.06 0.09 และ 0.12 ตามลำดับ
- 2) จากการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพจากการหาค่าความหนาแน่นของเซรามิกหลังการเผาผนึกของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการเผาผนึก คือ 1450 องศาเซลเซียส เนื่องจากสามารถทำให้เม็ดเซรามิกมีความหนาแน่นสูงสุดได้ โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.09$ ที่อุณหภูมิการเผาผนึก 1450 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเม็ดเซรามิกสูงสุดคือ 96 เปอร์เซ็นต์
- 3) จากการศึกษาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังเผาผนึกของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นร้อยละการหดตัวมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยชิ้นงานเซรามิกมีค่าร้อยละการหดตัวยังคงอยู่ในช่วง 13 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ ร้อยละการหดตัวสูงสุดเท่ากับ 15.16 เปอร์เซ็นต์ ของตัวอย่างเซรามิกสัดส่วน $x = 0.12$ ที่อุณหภูมิการเผา 1550 องศาเซลเซียส
- 4) จากการศึกษาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice Parameter) ของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ จากวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง พบว่าค่าแลตทิซพารามิเตอร์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณดิบเพิ่มขึ้นแต่ปริมาตรของหน่วยเซลล์จะลดลง
- 5) จากการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) พบว่าสามารถเตรียมเม็ดเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ ที่มีความบริสุทธิ์ได้ทุกสัดส่วนองค์ประกอบดิบ ซึ่งไม่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือมีเฟสแปลกปลอมอื่นปรากฏอยู่ โดยที่สัดส่วน $x = 0.03$ เซรามิกจะมีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอล และที่สัดส่วน $x = 0.06$ และ 0.09 จะมีโครงสร้างแบบผสมระหว่างเตตระโกนอลกับออร์โธโรมบิกและที่สัดส่วน $x = 0.12$ โครงสร้างจะเปลี่ยนไปเป็นคิวบิกทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) จากการตรวจสอบองค์ประกอบของสารจากการวิเคราะห์รามาน (Raman Spectrometer) ของเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ พบว่าพีคที่ได้มีลักษณะที่สอดคล้องกันกับรูปแบบรามานสเปกตรัมของสารประกอบแบเรียมไททานेट ซึ่งสอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยโครงสร้างมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเตตระโกนอลไปเป็นโครงสร้างออร์โธโรมบิก เมื่อปริมาณของดีบุกเพิ่มมากขึ้น
- 7) จากการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าจากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss) ของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ พบว่าการเพิ่มปริมาณสัดส่วนองค์ประกอบดีบุกจะส่งผลให้อุณหภูมิคูริลดลง และทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งจากนั้นจะลดลง โดยที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรท์ อุณหภูมิ 46.1 องศาเซลเซียส ของสัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.09$ จะให้ค่าคงที่ไดอิเล็กสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 12915.12 และมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.02
- 8) จากการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) ของเซรามิกระบบ $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ พบว่าชิ้นงานเซรามิกทุกสัดส่วนที่เตรียมมีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก เพราะมีวงวนฮิสเทอรีซิสที่สมบูรณ์ทั้งหมด วงวนฮิสเทอรีซิสเป็นสลิบลูปมากขึ้นเมื่อปริมาณดีบุกที่เจือเพิ่มขึ้น ค่าโพลาริเซชันจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งจากนั้นจะลดลง และที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.06$ จะมีค่าโพลาริเซชันคงเหลือที่สูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $9.32 \mu C/cm^2$ และค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ $3.79 kV/cm$

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการศึกษาผลของการแทนที่ดีบุกในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริก สามารถศึกษาเพิ่มเติมโดยการนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์โพโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโกปี เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุในโครงสร้างและสถานะทางเคมี เช่น เลขออกซิเดชัน
- 2) สำหรับเซรามิกระบบ $Ba_{1-x}Sn_xTiO_3$ สามารถศึกษาเพิ่มเติมโดยการเปลี่ยนบรรยากาศที่ใช้ในการเผา จากเผาในบรรยากาศไนโตรเจนเป็นเผาในบรรยากาศอาร์กอนแทนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาให้ดีขึ้น
- 3) ควรรักษาความสะอาดของเครื่องมือที่ใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์ผงเซรามิก เพื่อป้องกันการปนเปื้อนสารชนิดอื่น ซึ่งอาจส่งผลให้ข้อมูลที่ได้อาจเกิดความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Vijatović, M.M. Petrović, Bobić, D.J. and Stojanović, D.B. 2008. "History and Challenges of Barium Titanate: Part I." *Science of Sintering*. 40(2) : 155-165.
- [2] S. Roth, R. 1957. "Classification of Perovskite and Other ABO_3 - Type Compounds." *Journal of Research of the National Bureau of Standard*. 58(2).
- [3] H. Thurnauer. 1999. *Barium Titanate In Ceramic Innovation in the 20th Century*. Westerville : American Ceramic Society.
- [4] Ianculescu, A. Berger, D. Viviana, M. Ciomaga, C.E. Mitoseriu, L. Vasile, E. Drăgan, N. and Crișan, D. 2007. "Investigation of $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ ceramics prepared from powders synthesized by the modified Pechini route." *Journal of the European Ceramic Society*. 27(13-15) : 3655-3658.
- [5] Amarande, L. Miclea, C. Cioanher, M. Pasuk, I. Iuga, A. and Pintilie, I. 2017. "Intrinsic and extrinsic effects near orthorhombic-tetragonal phase transition in barium titanate ceramics doped with small amounts of zirconium." *Journal of the Ceramics International*. 43(6) : 4919-4925.
- [6] Marković, S. Mitrić, M. Cvjetičanin, N. and Uskokov, D. 2007. "Preparation and properties of $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ multilayered ceramics." *Journal of the European Ceramic Society*. 27(2) : 505-509.
- [7] Chung-Eun Lee, Clive A. Randall, Doo-Young Kim and Sang Hyuk Kim. 2014. "Multi-Site and Multi-Ionization of Sn in the Doping of $BaTiO_3$." *Journal of the American Ceramic Society*. 97(2) : 513-518.
- [8] พจนานุกรม สุวรรณเมณี. 2558. *ไดอิเล็กทริกและตัวเก็บประจุ*. นครศรีธรรมราช : สาขางานไฟฟ้ากำลัง สาขาวิชาเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช สถาบันอาชีวศึกษาภาคใต้ 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] ส. เนียมเจริญ, น. วิทยากร และร. เมืองเหลือ. 2557. วัสดุสมนาโนคอมพอลิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง. กรุงเทพมหานคร : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] ผศ. ดร. นราธิป วิทยากร. 2557. วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์และการประยุกต์ใช้งาน. กรุงเทพมหานคร : สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [11] Acmite Market Intelligence. 2011. World Piezoelectric Device Market. Ratingen : Acmite Market Intelligence.
- [12] วิชชุดา เข้มเพ็ชร. 2557. การศึกษาการสลับเปลี่ยนของโพลาริเซชันของเลดเซอร์โคเนตไททานเนตภายใต้สนามไฟฟ้าโดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอกซ์. นครราชสีมา : สาขาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [13] Xu, Y. 1991. "Introduction: Characteristics of Ferroelectrics." หน้า 1-36. ใน *Ferroelectric Materials and their Applications*. Amsterdam : Elsevier.
- [14] Sahoo, G.K. "Synthesis and characterization of BaTiO₃ Prepared by Molten Salt." Department of Ceramic Engineering National Institute of Technology Rourkela - 769 008. Rourkela.
- [15] Fan, J. Jia, B. and Gu, M. 2014. "Perovskite-based low-cost and high-efficiency hybrid halide solar cells." *Photonics Research*. 2(5) : 111-120.
- [16] Sareecha, N. Shah, W.A. Maqsood, A. Anis-ur-Rehman, M. and Latif Mirza, M. 2017. "Fabrication and electrical investigations of Pb-doped BaTiO₃ ceramics." *Materials Chemistry and Physics*. 193(1) : 42-49.
- [17] ส. ผ่องผิว. "เซรามิกชั้นสูง: แบริยมไททานเนต." สงขลา : สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [18] น. วิทยากร. 2559. กระบวนการสังเคราะห์ผงละเอียดสำหรับเซรามิกชั้นสูง.
กรุงเทพมหานคร : หน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูง คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] ฐานะพงศ์ ตริศายุธ และคณะ. 2557. การสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยท่อไอคาร์บอน
แบบผนังหลายชั้นร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโนและกลูตาไรโอนโดยใช้เทคนิคการขึ้น
รูปแบบขั้นต่อขั้น เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโดพามีนโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.
กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] Dobal, P.S. and Katiyar, R.S. 2002. "Studies on Ferroelectric perovskites and Bi-
layered compounds using micro-Raman." *Journal of Raman Spectroscopy
Society*. 33(6) : 405-423.
- [21] ผศ. ดร. นราธิป วิทยากร. 2556. วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์.
กรุงเทพมหานคร : สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [22] Du, F. Cui, B. Niu, R. and Chang, Z. 2009. "Synthesis, characterization and
dielectric properties of $Ba(Ti_{1-x}Sn_x)O_3$ Nanopowders and ceramics." *Materials
Research Bulletin*. 44(9) : 1930-1934.
- [23] Horchidan, N. Ianculescu, A.C. Curecheriu, L.P. Tudorache, F. Musteata, V.
Stoleriu, S. Dragan, N. Crisan, D. Tascu, S. and Mitoseriu, L. 2011. "Preparation
and characterization of barium titanate stannate solid solutions." *Journal of
Alloys and Compounds*. 509(14) : 4731-4737.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

1) การคำนวณการเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

- การคำนวณ Mw ของสารตั้งต้น



จะคำนวณ Mw ของสารตั้งต้นได้ดังนี้

Mw ของ BaTiO_3 คือ 233.1922

Mw ของ BaCO_3 คือ 197.3395

Mw ของ TiO_2 คือ 79.8658

คิดเป็นหน่วยกรัม

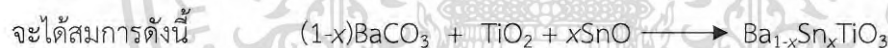
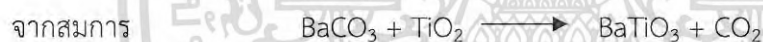
BaTiO_3 233.1922 g ใช้ BaCO_3 197.3395 g และ TiO_2 79.8658 g

ถ้าต้องการ BaTiO_3 20 g จะต้องใช้ BaCO_3 จำนวน $197.3395/11.6596 = 16.9251$ g

และใช้ TiO_2 จำนวน $79.8658/11.6596 = 6.8498$ g

เมื่อ X มีค่า 0.03 0.06 0.09 0.12

1.1 ในระบบ A แทนที่ Sn^{2+} ในตำแหน่ง Ba^{2+}



ตัวอย่างการคำนวณเมื่อแทนที่ $x = 0.03$ ในสมการ

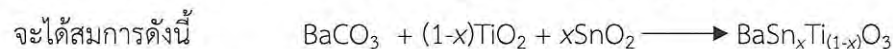
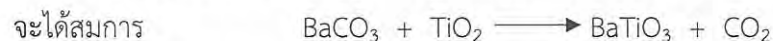
จะได้ $\text{BaCO}_3 = 16.4169$ g

$\text{TiO}_2 = 6.8497$ g

$\text{SnO} = 0.3466$ g

$\text{BaSnTiO}_3 = 20$ g

1.2 ในระบบ B แทนที่ Sn^{4+} ในตำแหน่ง Ti^{4+}



ตัวอย่างการคำนวณเมื่อแทนที่ $x = 0.03$ ในสมการ

จะได้ $\text{BaCO}_3 = 16.9247$ g

$\text{TiO}_2 = 6.6442$ g

$\text{SnO}_2 = 0.3877$ g

$\text{BaSnTiO}_3 = 20$ g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.1 สารในระบบ A : $(1-x)\text{BaCO}_3 + \text{TiO}_2 + x\text{SnO} \longrightarrow \text{Ba}_{1-x}\text{Sn}_x\text{TiO}_3$

สัดส่วน (x)		$(1-x)\text{BaCO}_3$	TiO_2	$x\text{SnO}$	$\text{Ba}_{1-x}\text{Sn}_x\text{TiO}_3$
0.03	Mw	197.3395	79.8658	134.7094	302.1970
	จำนวนกรัมที่ใช้	16.4169	6.8497	0.3466	20.0000
0.06	Mw	197.3395	79.8658	134.7094	302.1970
	จำนวนกรัมที่ใช้	15.9092	6.8497	0.6932	20.0000
0.09	Mw	197.3395	79.8658	134.7094	302.1970
	จำนวนกรัมที่ใช้	15.4014	6.8497	1.0398	20.0000
0.12	Mw	197.3395	79.8658	134.7094	302.1970
	จำนวนกรัมที่ใช้	14.8937	6.8497	1.3864	20.0000

ตาราง ก.2 สารในระบบ B : $\text{BaCO}_3 + (1-x)\text{TiO}_2 + x\text{SnO}_2 \longrightarrow \text{BaSn}_x\text{Ti}_{(1-x)}\text{O}_3$

สัดส่วน (x)		BaCO_3	$(1-x)\text{TiO}_2$	$x\text{SnO}_2$	$\text{BaSn}_x\text{Ti}_{(1-x)}\text{O}_3$
0.03	Mw	197.3395	79.8658	150.7088	302.1970
	จำนวนกรัมที่ใช้	16.9247	6.6442	0.3877	20.0000
0.06	Mw	197.3395	79.8658	150.7088	302.1970
	จำนวนกรัมที่ใช้	16.9247	6.4387	0.7755	20.0000
0.09	Mw	197.3395	79.8658	150.7088	302.1970
	จำนวนกรัมที่ใช้	16.9247	6.2332	1.1633	20.0000
0.12	Mw	197.3395	79.8658	150.7088	302.1970
	จำนวนกรัมที่ใช้	16.9247	6.0277	1.5510	20.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

1) การคำนวณหาร้อยละความหนาแน่นสัมพัทธ์ (ร้อยละความหนาแน่นสัมพัทธ์)

$$\text{จากสูตร} \quad \text{เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นสัมพัทธ์} = \frac{\text{ค่าความหนาแน่นที่วัดได้}}{\text{ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี}} \times 100$$

ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีคำนวณได้ดังนี้

$$\text{จากสูตร} \quad D = \frac{m}{v}$$

ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า m ได้ดังนี้

1.1 การคำนวณหามวล (m) ของเซรามิกในระบบ A ($\text{Ba}_{1-x}\text{Sn}_x\text{TiO}_3$)

สูตรการคำนวณหามวลของเซรามิกในระบบ

$$\text{Ba : } (1-x) \frac{\text{M.W.Ba}}{6.02 \times 10^{23} \text{ atm}} \quad \text{Sn : } (x) \frac{\text{M.W.Sn}}{6.02 \times 10^{23} \text{ atm}}$$

$$\text{Ti : } (1) \frac{\text{M.W.Ti}}{6.02 \times 10^{23} \text{ atm}} \quad \text{O}_3 : (3) \frac{\text{M.W.O}}{6.02 \times 10^{23} \text{ atm}}$$

ตาราง ข.1 ตารางการคำนวณหามวล (m) ของเซรามิกในระบบ A ($\text{Ba}_{1-x}\text{Sn}_x\text{TiO}_3$)

สัดส่วน (x)	Ba	Sn	Ti	O ₃
0.03	2.2127×10^{-22}	$+ 5.9158 \times 10^{-24}$	$+ 7.9513 \times 10^{-23}$	$+ 7.9731 \times 10^{-23}$
m	$= 3.8643 \times 10^{-22}$			
0.06	2.1443×10^{-22}	$+ 1.1832 \times 10^{-23}$	$+ 7.9513 \times 10^{-23}$	$+ 7.9731 \times 10^{-23}$
m	$= 3.8551 \times 10^{-22}$			
0.09	2.0759×10^{-22}	$+ 1.7747 \times 10^{-23}$	$+ 7.9513 \times 10^{-23}$	$+ 7.9731 \times 10^{-23}$
m	$= 3.8458 \times 10^{-22}$			
0.12	2.0074×10^{-22}	$+ 2.3663 \times 10^{-23}$	$+ 7.9513 \times 10^{-23}$	$+ 7.9731 \times 10^{-23}$
m	$= 3.8365 \times 10^{-22}$			

1.2 ตารางการคำนวณหามวล (m) ของเซรามิกในระบบ B ($\text{BaSn}_x\text{Ti}_{(1-x)}\text{O}_3$)

สูตรการคำนวณหามวลของเซรามิกในระบบ

$$\text{Ba : } (1) \frac{\text{M.W.Ba}}{6.02 \times 10^{23} \text{ atm}} \quad \text{Sn : } (x) \frac{\text{M.W.Sn}}{6.02 \times 10^{23} \text{ atm}}$$

$$\text{Ti : } (1-x) \frac{\text{M.W.Ti}}{6.02 \times 10^{23} \text{ atm}} \quad \text{O}_3 : (3) \frac{\text{M.W.O}}{6.02 \times 10^{23} \text{ atm}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.2 ตารางการคำนวณหามวล (m) ของเซรามิกในระบบ B ($\text{BaSn}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$)

สัดส่วน (x)	Ba	Sn	Ti	O ₃
0.03	2.2811×10^{-22}	$+ 5.9158 \times 10^{-24}$	$+ 7.7128 \times 10^{-23}$	$+ 7.9731 \times 10^{-23}$
m	$= 3.9088 \times 10^{-22}$			
0.06	2.2811×10^{-22}	$+ 1.1832 \times 10^{-23}$	$+ 7.4742 \times 10^{-23}$	$+ 7.9731 \times 10^{-23}$
m	$= 3.9442 \times 10^{-22}$			
0.09	2.2811×10^{-22}	$+ 1.7747 \times 10^{-23}$	$+ 7.2357 \times 10^{-23}$	$+ 7.9731 \times 10^{-23}$
m	$= 3.9795 \times 10^{-22}$			
0.12	2.2811×10^{-22}	$+ 2.3663 \times 10^{-23}$	$+ 6.9972 \times 10^{-23}$	$+ 7.9731 \times 10^{-23}$
m	$= 4.0148 \times 10^{-22}$			

และสามารถคำนวณหาปริมาตร (V) ได้จากสูตรดังนี้

โครงสร้างแบบคิวบิก หาได้จาก $v = a^3$

โครงสร้างแบบเตตระโกนอล หาได้จาก $v = a^2c$

*ซึ่งค่า a และ c คือ ค่าแลตทิซพารามิเตอร์

2) การคำนวณหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์

ซึ่งการคำนวณหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของแต่ละโครงสร้างใช้สูตร ดังนี้

- โครงสร้างแบบคิวบิก

$$\text{หาได้จาก } \frac{1}{d^2} = (h^2 + k^2 + l^2) \frac{1}{a^2}$$

- โครงสร้างแบบเตตระโกนอล

$$\text{หาได้จาก } \frac{1}{d^2} = (h^2 + k^2 + (l^2 \times \frac{a^2}{c^2})) \frac{1}{a^2}$$

โดยค่า d สามารถหาได้โดยใช้กฎของแบรกก์ในการคำนวณ ดังสูตรต่อไปนี้

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

โดยที่ h, k, l = ระนาบของผลึก

a = แลตทิซพารามิเตอร์ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นลูกบาศก์

d = ระยะห่างระหว่างระนาบโดยใช้สมการของ Bragg's Law

λ = ค่าความยาวคลื่นที่มีค่าคงที่เท่ากับ 1.5406 อังสตรอม

n = เลขจำนวนคลื่นที่มีค่า เท่ากับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง เซรามิกสัดส่วน $x = 0.12$ มีโครงสร้างแบบคิวบิก ที่มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
ที่ $2\theta = 22.13$ ของระยะนาบ 100

คำนวณหาค่า d โดยที่ $2\theta = 22.130$ และ $\theta = 11.065$

จากสูตร

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

$$d = \frac{1 \times 1.5406}{2 \sin 11.0650}$$

$$d = 4.0136 \text{ g/cm}^3$$

จากนั้นหาแลตทิซพารามิเตอร์ได้

จากสูตร

$$\frac{1}{d^2} = (h^2 + k^2 + l^2) \frac{1}{a^2}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\frac{1}{4.0136^2} = (1^2 + 0^2 + 0^2) \frac{1}{a^2}$$

$$a^2 = 16.1090$$

$$a = 4.0136 \text{ อังสตรอม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มปัญหาพิเศษ

วันที่ 16 เดือน กรกฎาคม พ.ศ 2561

ข้าพเจ้า นางสาวฉัตรทริกา พิกุล รหัสประจำตัว 57050392

นางสาวมัชฌิมา ปัญญาศาสตร์ รหัสประจำตัว 57050488

นางสาวนันทน์ หนูแจ่ม รหัสประจำตัว 57050499

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี
ขอรับรองว่า โครงการงานพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย ผลการแทนที่ตะกั่วในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและ
เฟอร์โรอิเล็กทริก

ชื่อภาษาอังกฤษ Effect of Sn substitution on the perovskite structure to dielectric and
ferroelectric properties

ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่มิได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อน
เรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่ม
ปัญหาพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์.....0.25.....%

ลงชื่อ.....ฉัตรทริกา พิกุล.....

ลงชื่อ.....มัชฌิมา ปัญญาศาสตร์.....

ลงชื่อ.....นันทน์ หนูแจ่ม.....

(นางสาวฉัตรทริกา พิกุล)

(นางสาวมัชฌิมา ปัญญาศาสตร์)

(นางสาวนันทน์ หนูแจ่ม)

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร. นราธิป วิทยากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงานพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการงานพิเศษของ
นักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้
เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....[Signature].....

(รศ.ดร. นราธิป วิทยากร)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้