

การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของ  
เพียโซอิเล็กทริกโรสารตะกั่วในระบบ  $BaTiO_3$ -  $BaZrO_3$ -  $CaTiO_3$

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF LEAD-FREE  
PIEZOELECTRIC CERAMICS IN  $BaTiO_3$ -  $BaZrO_3$ -  $CaTiO_3$  SYSTEM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของ  
เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ  $BaTiO_3 - BaZrO_3 - CaTiO_3$

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF LEAD-FREE  
PIEZOELECTRIC CERAMICS IN  $BaTiO_3 - BaZrO_3 - CaTiO_3$  SYSTEM



นางสาวกฤศริล

ตัณฐศิริ

นางสาววารภรณ์

มะลิวัลย์

นางสาวกานต์พิชชา

เหมื่องสอง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF LEAD-FREE PIEZOELECTRIC  
CERAMICS IN  $\text{BaTiO}_3$  -  $\text{BaZrO}_3$  -  $\text{CaTiO}_3$  SYSTEM



MISS KRISSARIN TUNSIRI  
MISS WARAPORN MALIWAN  
MISS KANPITCHA HMUNGSONG

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ  $BaTiO_3 - BaZrO_3 - CaTiO_3$   
 Synthesis And Characterization Of Lead-Free Piezoelectric Ceramics In  $BaTiO_3 - BaZrO_3 - CaTiO_3$

**ชื่อนักศึกษา** นางสาว กฤศริล ตัญศิริ 54050119  
 นางสาว วราภรณ์ มะลิวัลย์ 54050261  
 นางสาว กานต์พิชชา เหมืองสอง 54050324


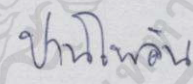
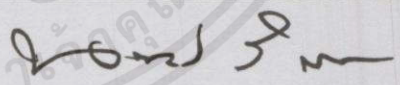
**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

**ภาควิชา** เคมี

**ปีการศึกษา** 2557

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ.ดร. นราธิป วิทยากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. ณัฐพล แรงทน ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร. ปานไพลิน สีหาราช กรรมการ	
ผศ.ดร. นราธิป วิทยากร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ $BaTiO_3 - BaZrO_3 - CaTiO_3$		
ชื่อนักศึกษา	นางสาว กฤศริล	ตัณษิรี	รหัสนักศึกษา 54050119
	นางสาว วราภรณ์	มะลิวัลย์	รหัสนักศึกษา 54050261
	นางสาว กานต์พิชชา	เหมืองสอง	รหัสนักศึกษา 54050324
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นราธิป วิทยากร		

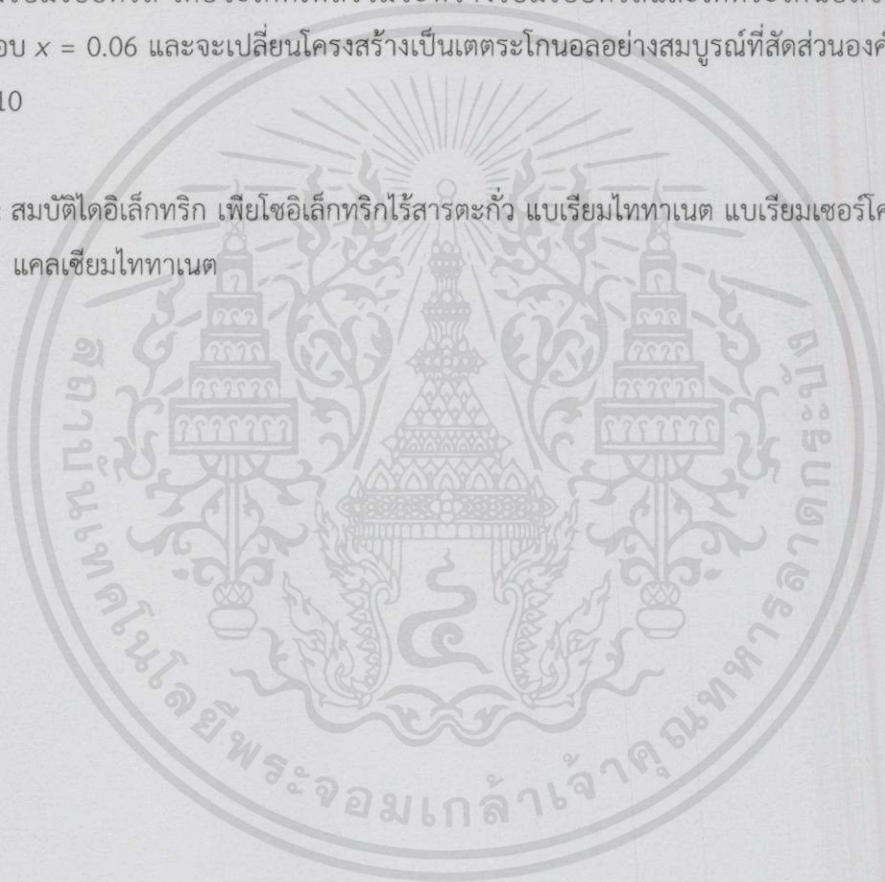
### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษฉบับนี้ จัดทำขึ้นเพื่อทำการสังเคราะห์และหาลักษณะเฉพาะของเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ แบเรียมไททาเนต-แบเรียมเซอร์โคเนต-แคลเซียมไททาเนต ซึ่งมีสูตรสมการ คือ  $0.86BaTiO_3 - (0.12-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$  โดยที่  $x = 0.02-0.10$  และในระบบสมการ  $0.88BaTiO_3 - (0.14-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$  โดยที่  $x = 0.03-0.11$  ด้วยวิธีปฏิบัติของแข็งในการสังเคราะห์แล้วทำการวัดสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยสมบัติทางกายภาพนั้นจะวัดออกมาในรูปของร้อยละความหนาแน่นและร้อยละการหดตัว ตรวจสอบความบริสุทธิ์และโครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และเทคนิครามาน สมบัติทางไฟฟ้านั้นจะวัดออกมาในรูปของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก วงฮิสเทอรีซิส โพลาไรเซชัน รวมถึงค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ซึ่งผลที่ได้พบว่าเซรามิกในระบบ  $0.86BaTiO_3 - (0.12-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$  นั้นมีค่าความหนาแน่นเท่ากับร้อยละ  $95.9 \pm 1.21$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.09$  และการหดตัวเท่ากับร้อยละ  $9.4 \pm 1.29$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.07$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 และ 1,425 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นั้นจะมีสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่นที่สุด ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดเท่ากับ 15,000 ค่าโพลาไรเซชันสูงสุดเท่ากับ  $12.28 \mu C/cm^2$  ในขณะที่วัดค่าความเครียดออกมาได้ร้อยละ 0.1411 และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และเทคนิครามาน ณ อุณหภูมิห้องแล้ว พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03-0.05$  เซรามิกจะแสดงโครงสร้างรอมโบฮีดรัล โดยจะเกิดเฟสร่วมระหว่างรอมโบฮีดรัลและเตตระโกนอลขึ้นที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  ที่  $= 0.07$  และจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเตตระโกนอลอย่างสมบูรณ์ที่สัดส่วนองค์ประกอบ

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$x = 0.09-0.11$  ส่วนเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  นั้นมีค่าความหนาแน่นเท่ากับร้อยละ  $94.7 \pm 0.11$  และการหดตัวเท่ากับร้อยละ  $13.4 \pm 0.00$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  นั้นจะส่งผลให้เซรามิกมีสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่นที่สุด โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดเท่ากับ 11,774 ค่าโพลาริเซชันสูงสุดเท่ากับ  $16.7 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  ในขณะที่วัดค่าความเครียดออกมาได้ร้อยละ 0.1580 และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และเทคนิครามาน ณ อุณหภูมิห้องแล้ว พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02-0.04$  เซรามิกจะแสดงโครงสร้างรอมโบฮีดรัล โดยจะเกิดเฟสร่วมระหว่างรอมโบฮีดรัลและเตตระโกนอลขึ้นที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.06$  และจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเตตระโกนอลอย่างสมบูรณ์ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08-0.10$

**คำสำคัญ :** สมบัติไดอิเล็กทริก เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว แบบเรียมไททาเนต แบบเรียมเซอร์โคเนต แคลเซียมไททาเนต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Synthesis And Characterization Of Lead-Free Piezoelectric Ceramics In $\text{BaTiO}_3 - \text{BaZrO}_3 - \text{CaTiO}_3$ System		
Students	Miss Krissarin	Tunsiri	student ID 54050119
	Miss Waraporn	Maliwan	student ID 54050261
	Miss Kanpitcha	Hmungsong	student ID 54050324
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2557		
Advisor	Asst.Professor. Dr. Naratip	Vitthayakorn	

### ABSTRACT

The aim of this study is synthesis and investigate the particularity of Lead-Free piezoelectric were prepared by the solid state reaction in 2 systems. First is  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  when  $x = 0.02-0.10$  and the second is  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  when  $x = 0.03-0.11$ . The physical properties were analyzed by measurement in term of density and shrinkage. The purity and the phase structure were analyzed by X-ray diffraction (XRD) and Raman spectroscopy. The dielectric properties were undertaken by dielectric constant and dielectric loss. Piezoelectric and ferroelectric properties were measured in term of field induced strain and hysteresis loop, respectively. The result of 0.86BT-BZ-CT showed the % of density is  $95.9 \pm 1.21$  when  $x = 0.09$  and % of shrinkage is  $9.4 \pm 1.29$  when  $x = 0.07$  at the sintering temperature is  $1,400^\circ\text{C}$  and  $1,425^\circ\text{C}$  respectively. At  $x = 0.05$  showed the best dielectric properties. It showed the highest dielectric constant is 15000, the highest polarization is  $12.28 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  while the strain is 0.14 %. XRD and Raman spectroscopy at room temperature results when  $x = 0.03-0.05$  showed the rhombohedral structure. When  $x = 0.07$  showed the co-existence between rhombohedral and tetragonal phases and will be changed completely to tetragonal structure when  $x = 0.07-0.11$ . The result of 0.88BT-BZ-CT showed the % of

density is  $94.7 \pm 0.11$ , % of shrinkage is  $13.4 \pm 0.00$  when  $x = 0.08$  at the sintering temperature is  $1,400^\circ\text{C}$  and  $1,425^\circ\text{C}$  respectively. At  $x = 0.05$  showed the best dielectric properties. It showed the highest dielectric constant is 15000, the highest polarization is  $12.28 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  while the strain is 0.14 %. XRD and Raman spectroscopy at room temperature results when  $x = 0.03-0.05$  showed the rhombohedral structure. When  $x = 0.07$  showed the co-existence between rhombohedral and tetragonal phases and will be changed completely to tetragonal structure when  $x = 0.07-0.11$ . The result of 0.88BT-BZ-CT showed the % of

temperature is 1,425 °C and 1,450 °C respectively. At  $x = 0.08$  showed the best dielectric properties. It showed the highest dielectric constant is 11,774, the highest polarization is  $16.7 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  while the strain is 0.1580 %. XRD and Raman spectroscopy at room temperature results when  $x = 0.02-0.04$  showed the rhombohedral structure. When  $x = 0.06$  showed the co-existence between rhombohedral and tetragonal phase and will be changed completely to tetragonal structure when  $x = 0.08-0.10$ .

**Keywords :** Barium titanate, Barium zirconate, Calcium titanate, Dielectric property, Lead-Free Piezoelectric.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่สำเร็จลุล่วงได้นั้นมาจากความกรุณาของ ผศ.ดร. นราธิป วิทยากร ที่ได้ให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในหัวข้อรายงานพิเศษฉบับนี้ อีกทั้งช่วยเป็นผู้สอนถ่ายทอดวิชาความรู้ทางวิชาการ ทักษะในการทำงานภาคปฏิบัติ ตลอดจนความเอาใจใส่ดูแลต่อลูกศิษย์กลุ่มนี้มาเสมอจึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงกับ ผศ.ดร. ปานไพลิน สีหาราช ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงงานพิเศษ และช่วยให้ข้อคิดเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขโครงงานพิเศษฉบับนี้ให้มีเนื้อหาถูกต้องครบถ้วนสมบูรณ์ดียิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงกับ อ.ดร. ณัฐพล แรงทน ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงงานพิเศษ และช่วยให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงแก้ไขโครงงานพิเศษฉบับนี้ให้มีเนื้อหาถูกต้องครบสมบูรณ์ดียิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี และศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้การเอื้อเฟื้ออำนวยความสะดวกต่อการทำงานในเรื่องอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนเครื่องมือการทดลองต่างๆ

ขอขอบคุณพี่ๆ ปริญญาโทและปริญญาเอกทุกท่านที่ได้คอยให้การช่วยเหลือสอนงาน ช่วยคิดสนับสนุนการทดลอง ให้ความหวังใยตลอดจนโครงงานพิเศษสำเร็จเสร็จสิ้นเป็นที่เรียบร้อย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่ได้เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำขอมอบให้ผู้ที่มิใช่พระคุณและผู้ที่มีความปรารถนาดีต่อการให้ความช่วยเหลือ หากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่องไปทางผู้จัดทำจึงขอภัยเป็นอย่างยิ่ง และหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในการศึกษาทางด้านนี้ต่อไป

นางสาว กฤศริล	ตัณศิริ
นางสาว วราภรณ์	มะลิวัลย์
นางสาว กานต์พิชชา	เหมืองสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ท
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	5
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....</b>	<b>7</b>
2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	7
2.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก.....	10
2.3 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว.....	11
2.4 แบเรียมไททาเนต.....	12
2.5 แบเรียมแคลเซียมไททาเนต.....	15
2.6 แบเรียมเซอร์โคเนียมไททาเนต.....	16
2.7 แบเรียมเซอร์โคเนียมแคลเซียมไททาเนต.....	16
2.8 อุกมุกุมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส.....	19
2.9 กระบวนการโพลีลิ่งหรือกระบวนการซั้ว.....	20
2.10 โพลารไรเซชัน.....	21
2.11 การอัดขึ้นรูปผงเซรามิกด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกกำลังแรงสูง.....	22
2.12 กระบวนการเตรียมผงด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง.....	23
2.12.1 กระบวนการบดย่อยผสมด้วยลูกบอล.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

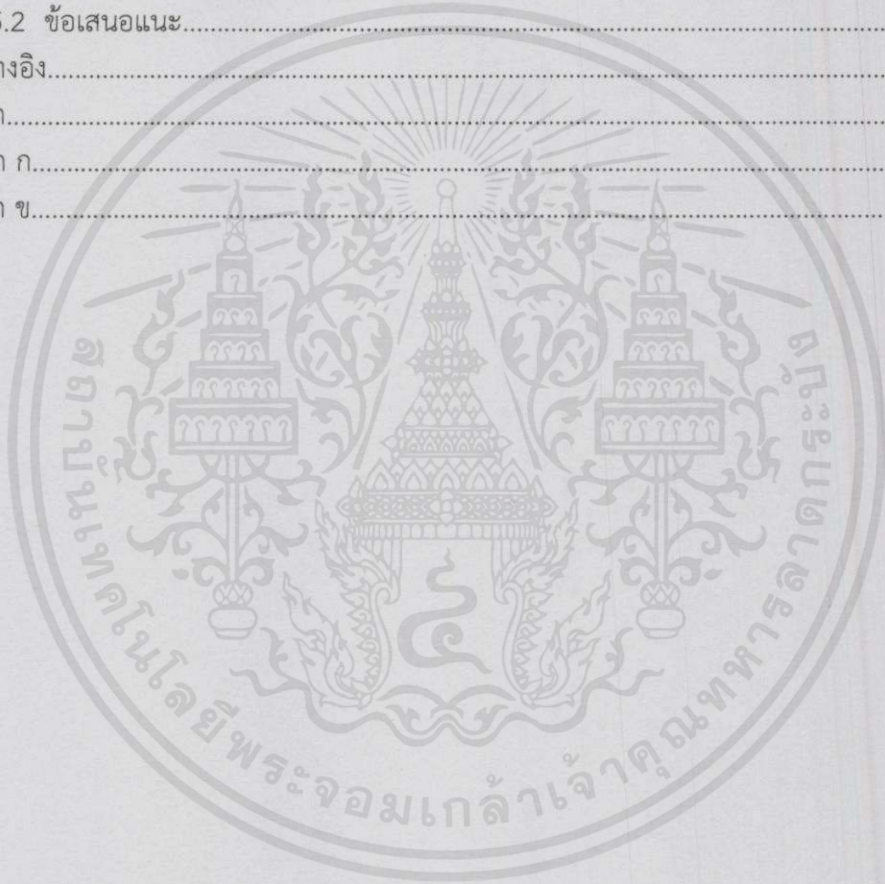
## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12.2 ปฏิกริยาสถานะของแข็ง.....	24
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
<b>บทที่ 3 การทดลอง.....</b>	<b>29</b>
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.3 ขั้นตอนกระบวนการเตรียมผงเซรามิก.....	32
3.3.1 การเตรียมผงในระบบ $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ และ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ .....	32
3.3.2 กระบวนการเตรียมเม็ดเซรามิก.....	33
3.4 การตรวจสอบพฤติกรรมเกิดการเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	34
3.5 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ.....	36
3.5.1 การหาค่าความหนาแน่น.....	36
3.5.2 การหาค่าหดตัวของเซรามิกหลังการเผาซินเตอร์.....	37
3.6 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า.....	38
3.6.1 ตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก.....	38
3.6.2 ตรวจสอบวงฮิสเทอรีซิส.....	39
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....</b>	<b>40</b>
4.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก.....	40
4.1.1 ร้อยละความหนาแน่นและร้อยละการหดตัว.....	40
4.1.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเม็ดเซรามิก.....	44
4.1.2.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	44
4.1.2.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน.....	50
4.1.3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก.....	55
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>82</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	82
5.1.1 การหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)$ $\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ .....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.2 การหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ $0.88\text{BaTiO}_3-(0.12-x)\text{BaZrO}_3-x\text{CaTiO}_3$ .....	84
5.1.3 การศึกษาการเปรียบเทียบผลของลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ และ $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ .....	85
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
เอกสารอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก.....	91
ภาคผนวก ข.....	92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่า $P_s, P_r$ และ $E_c$ ของเซรามิกในระบบ $Ba(Zr_xTi_{1-x})O_3$ ที่อุณหภูมิ $30^\circ C$ .....	25
4.1 แสดงค่าร้อยละความหนาแน่นของเซรามิกในระบบ $0.86BaTiO_3 - (0.14-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,350 1,375 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	41
4.2 แสดงค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิกในระบบ $0.86BaTiO_3 - (0.14-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,350 1,375 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	41
4.3 แสดงค่าร้อยละความหนาแน่นของเซรามิกในระบบ $0.88BaTiO_3 - (0.12-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,350 1,375 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	42
4.4 แสดงค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิกในระบบ $0.88BaTiO_3 - (0.12-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,350 1,375 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	42
4.5 แสดงค่า $\epsilon_r$ กับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.86BaTiO_3 - (0.14-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ วัดที่อุณหภูมิห้อง.....	66
4.6 แสดงค่า $\epsilon_r$ กับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.88BaTiO_3 - (0.12-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ วัดที่อุณหภูมิห้อง.....	67
4.7 แสดงสรุปสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกในระบบ $0.86BaTiO_3 - (0.14-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ .....	80
4.8 แสดงสรุปสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกในระบบ $0.88BaTiO_3 - (0.12-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ .....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 (a) แผนภูมิวัฏภาคในระบบไตรภาคในระบบ BT-BZ-CT โดยเส้นประทึบสีดำนั้น แสดงสัดส่วนของสารในระบบของ Liu และ Ren ส่วนเส้นประจุดสีดำทั้งสามเส้นนั้น (Line A B และ C) แสดงระบบที่ศึกษาในงานวิจัย (b) เฟสไดอะแกรมของ 0.5 $[Ba(Zr_{0.2}Ti_{0.8})O_3] - 0.5[(Ba_{0.7}Ca_{0.3})O_3]$ ที่ทำโดย Liu และ Ren.....	2
1.2 เฟสไดอะแกรมเพียโซอิเล็กทริกในระบบ BT-BZ-CT ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ.....	3
2.1 (ก) ปฏิกิริยาการเกิดเพียโซอิเล็กทริกโดยตรงและ (ข) ปฏิกิริยาการเกิดเพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม.....	7
2.2 ทิศทางของโพลาริเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าและความเค้นแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	8
2.3 แผนผังแสดงการแบ่งกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก.....	9
2.4 เฟสไดอะแกรมของสารในระบบ $PbZrO_3 - PbTiO_3$ .....	11
2.5 แสดงโครงสร้างของ $BaTiO_3$ .....	13
2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงผลึกโครงสร้างของแบเรียมไททาเนตที่อุณหภูมิต่างๆ.....	14
2.7 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆของเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบ $(Ba_{1-x}Ca_x)TiO_3$ .....	15
2.8 แสดงค่า $d_{33}$ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆของเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบ $(Ba_{0.95}Ca_{0.05})(Ti_{1-x}Zr_x)O_3$ .....	17
2.9 แสดงค่า $d_{33}$ และสัมประสิทธิ์ $k_p$ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x$ ต่างๆของเซรามิกในระบบ $(Ba_{1-x}Ca_x)(Ti_{0.98}Zr_{0.02})O_3$ .....	18
2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาวะยอมสัมพันธ์กับอุณหภูมิของผลึก แบเรียมไททาเนต.....	19
2.11 การโพลาริเซชันของวัสดุเซรามิกเพื่อสร้างปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (ก) ก่อนทำการโพลลิ่ง (ข) ระหว่างการโพลลิ่ง (ค) ภายหลังการโพลลิ่ง.....	21
2.12 การกระจายในโพลาริเซชันของวัสดุไดอิเล็กทริก.....	22
2.13 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอล.....	24
2.14 แสดงการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เมื่อ (ก) ผงผสมกันอยู่ก่อนการเกิดปฏิกิริยา (ข) มีการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นบางส่วน และ (ค) เมื่อปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะฉับใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15 แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_c$ ) $T_{o-t}$ และค่า $\epsilon_m$ ของเซรามิกในระบบ $Ba(Zr_xTi_{1-x})O_3$ ที่มีการเติม Zr ในปริมาณ $x$ ต่างๆ ที่ความถี่ 10 kHz.....	26
2.16 แสดงผลจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ $(Ba_{1-x}Ca_x)(Ti_{0.95}Zr_{0.05})O_3$ โดยที่ $x = 0.05$ 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35 และ 0.40.....	27
2.17 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกในระบบ $(Ba_{1-x}Ca_x)(Ti_{0.95}Zr_{0.05})O_3$ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x$ ต่างๆ.....	28
3.1 กราฟแสดงขั้นตอนการเผาแคลไซน์.....	33
3.2 กราฟแสดงขั้นตอนการเผาซินเตอร์.....	34
4.1 (a), (b) และ (c) แสดงรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ $0.86BaTiO_3 - (0.12-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส.....	45
4.2 (a), (b) และ (c) แสดงรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ $0.88BaTiO_3 - (0.12-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส.....	48
4.3 (a), (b) และ (c) แสดงค่ารามานของเซรามิกในระบบ $0.86BaTiO_3 - (0.14-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส.....	51
4.4 (a), (b) และ (c) แสดงค่ารามานของเซรามิกในระบบ $0.88BaTiO_3 - (0.12-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส.....	53
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.86BaTiO_3 - (0.14-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่ความถี่ 100 Hz 1 kHz และ 10 kHz.....	55
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.86BaTiO_3 - (0.14-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส.....	57
4.7 แผนภาพเฟสไดอะแกรมของเซรามิกในระบบ $0.86BaTiO_3 - (0.14-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส.....	58
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.88BaTiO_3 - (0.12-x)BaZrO_3 - xCaTiO_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่ความถี่ 100 Hz 1 kHz และ 10 kHz.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคูรีกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.88 \text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส.....	60
4.10 แผนภาพเฟสไดอะแกรมของเซรามิกในระบบ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ .....	61
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่ความถี่ 100 Hz 1 kHz และ 10 kHz.....	63
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่ความถี่ 100 Hz 1 kHz และ 10 kHz.....	65
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 10 kV 20 kV 30 kV และ 40 kV.....	68
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันสูงสุดกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 30 kV.....	69
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 10 kV 20 kV 30 kV และ 40 kV.....	70
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันสูงสุดกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 10 kV.....	71
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันคงค้างกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 30 kV.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันคงค้างกับสัดส่วนองค์ประกอบของ เซรามิกในระบบ $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 30 kV.....	73
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามลบล้างโพลาไรเซชันกับสัดส่วนองค์ประกอบของ เซรามิกในระบบ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 30 kV.....	74
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามลบล้างโพลาไรเซชันกับสัดส่วนองค์ประกอบของ เซรามิกในระบบ $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 30 kV.....	75
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับสัดส่วนของเซรามิกในระบบ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สนาม ไฟฟ้า 30 kV.....	76
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับสัดส่วนของเซรามิกในระบบ $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สนาม ไฟฟ้า 30 kV.....	77
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d_{33}^*$ กับสัดส่วนของเซรามิกในระบบ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้ สนามไฟฟ้า 30 kV.....	78
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d_{33}^*$ กับสัดส่วนของเซรามิกในระบบ $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้ สนามไฟฟ้า 30 kV.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

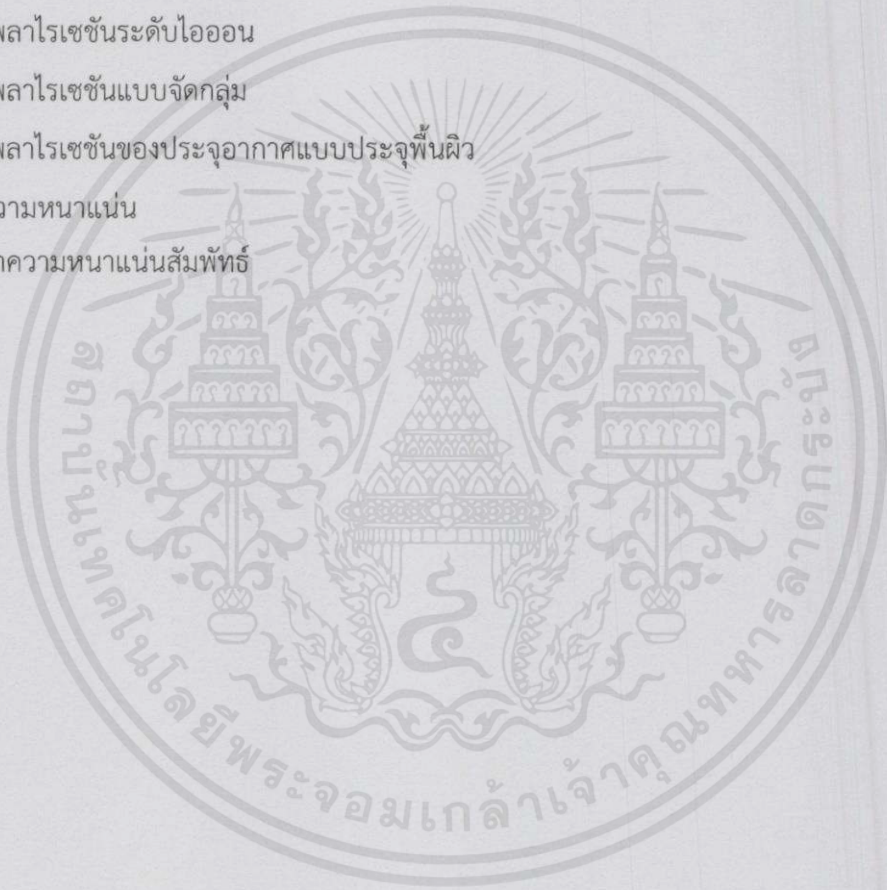
## คำย่อ/สัญลักษณ์

BCT	แบเรียมแคลเซียมไททาเนต
BT	แบเรียมไททาเนต
BZ	แบเรียมเซอร์โคเนต
BZT	แบเรียมเซอร์โคเนียมไททาเนต
BZCT	แบเรียมเซอร์โคเนียมแคลเซียมไททาเนต
CT	แคลเซียมไททาเนต
$d_{33}^*$	ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก
E	สนามไฟฟ้า
$E_c$	สนามไฟฟ้าลบล้าง
$k_p$	สัมประสิทธิ์คัพคูไฟฟ้าเชิงกล
MLC	ตัวเก็บประจุหลายชั้น
MPB	รอยต่อระหว่างเฟส
P	โพลาริเซชัน
PbO	เลดออกไซด์
PBB	โพลีโบรมิเนตไบฟีนิลส์
PBDE	โพลีโบรมิเนตไบฟีนิลส์
PLZT	เลดแลนทานัมเซอร์โคเนียมไททาเนต
PNN	เลดนิเกิลโนโอเบต
PVA	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์
PZN	เลดซิงค์โนโอเบต
PZT	เลดเซอร์โคเนียมไททาเนต
$P_r$	โพลาริเซชันคงค้าง
$P_s$	โพลาริเซชันเกิดเอง
RoHs	ระเบียบว่าด้วยการควบคุมการนำเข้าสินค้าในประเทศสมาชิก
SEM	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด
$T_c$	อุณหภูมิคูรี, องศาเซลเซียส
$T_m$	อุณหภูมิสูงสุด, องศาเซลเซียส
XRD	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์ (ต่อ)

WEEE	ระบุว่าด้วยการกำจัดเศษซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
$\epsilon$	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์
$\epsilon_0$	ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ ( $8.854 \times 10^{-12}$ F/m)
$\epsilon_e$	โพลาริเซชันระดับอิเล็กทรอนิกส์
$\epsilon_d$	โพลาริเซชันแบบขั้วคู่
$\epsilon_i$	โพลาริเซชันระดับไอออน
$\epsilon_o$	โพลาริเซชันแบบจัดกลุ่ม
$\epsilon_s$	โพลาริเซชันของประจุอากาศแบบประจุพื้นผิว
$\rho$	ความหนาแน่น
%TD	ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

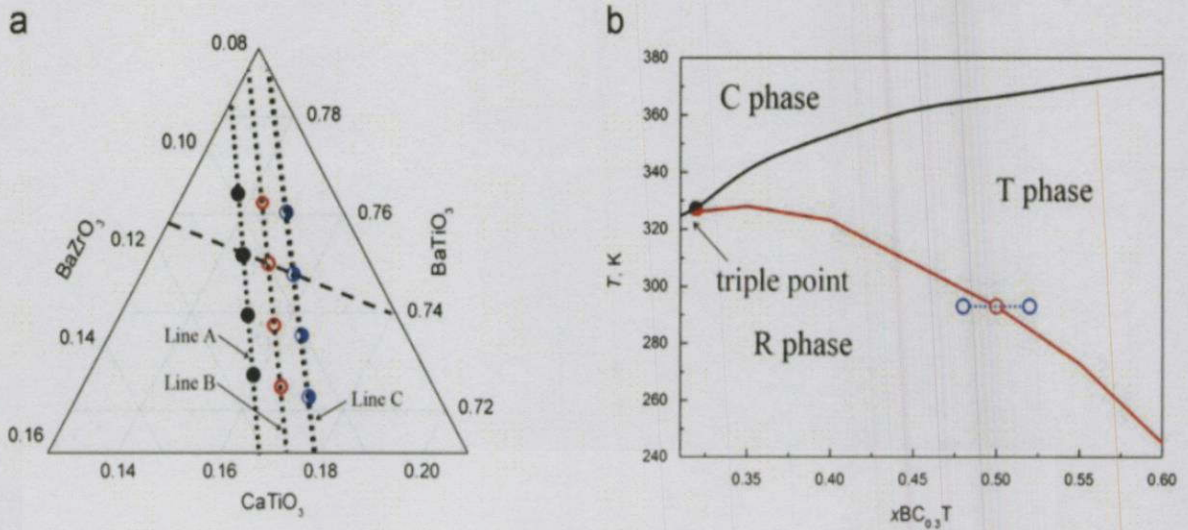
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันวัสดุได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในเกือบทุกวงการ ไม่ว่าจะเป็นการดำรงชีวิตในแต่ละวัน กิจการอุตสาหกรรม ระบบการขนส่ง หรือแม้แต่วิทยาการทางการแพทย์ โดยวัสดุที่กำลังได้รับความนิยมกันมากในหมู่นักวิจัยทางวัสดุศาสตร์ คือ วัสดุเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมากในวงการอุตสาหกรรมไทย ยกตัวอย่างเช่น ลำโพง แปรงสีพินชนิดแบบหมุนตัวเอง อุปกรณ์หัวฉีดภายในเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท อุปกรณ์ล้างแว่นตาหรือแม้แต่ใช้เป็นเซนเซอร์ของถุงลมนิรภัยในรถยนต์เมื่อเกิดอุบัติเหตุ เนื่องจากว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นเป็นวัสดุที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เมื่อได้รับแรงกระทำทำให้เปลี่ยนรูปร่างหรือจะมีการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าเข้าไป

และเนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้งานในปัจจุบันนี้มีตะกั่ว (Pb) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งถึงแม้ว่าจะให้ประโยชน์ต่อสิ่งของที่จำเป็นในชีวิตประจำวันมากแค่ไหน หากมองในด้านของสิ่งแวดล้อม ก็พบว่าสารตะกั่ว นั้นเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและยากต่อการกำจัด ซึ่งเรียกได้ว่าอุปกรณ์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารตะกั่ว นั้น เมื่ออยู่ในสภาพที่ใช้งานไม่ได้แล้วนั้นจะกลายเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ทันทีและวิธีเดียวที่จะกำจัดได้คือการฝังกลบ เมื่อมีขยะเหล่านี้มากขึ้นจนเวลาผ่านไปสิ่งแวดล้อมในบริเวณนั้นก็จะเสื่อมโทรมทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารพิษที่ก่อให้เกิดอันตรายกับสิ่งมีชีวิตที่อยู่บริเวณนั้นได้

ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากไม่น้อยที่พยายามศึกษาและพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในระบบไร้สารตะกั่วขึ้น ซึ่งที่ผ่านมาก็พบว่ามีงานวิจัยของ W. Wang และคณะ [1] ที่ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ  $\text{BaTiO}_3$  -  $\text{BaZrO}_3$  -  $\text{CaTiO}_3$  (BT-BZ-CT) โดยใช้สัดส่วนในการเตรียมเป็น  $x[\text{Ba}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3] - (1-x)[(\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3})\text{O}_3]$  พบว่าที่สัดส่วน  $x = 0.5$  นั้น เซรามิกที่สังเคราะห์ได้จะเกิดเฟสสองเฟสร่วมกันระหว่างเตตระโกนอลกับรอมโบฮีดรัลขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ตัวเซรามิกนั้นแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 1.1

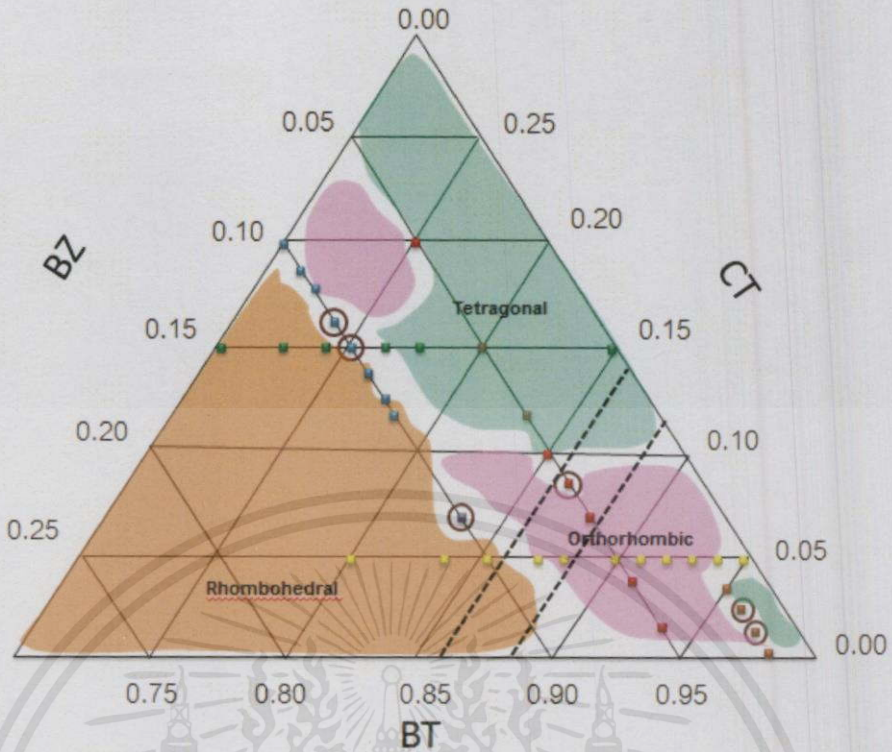
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 (a) แผนภูมิวิภูภาคในระบบไตรภาคในระบบ BT-BZ-CT โดยเส้นประที่บสีดำนั้นแสดงสัดส่วนของสารในระบบของ Liu และ Ren ส่วนเส้นประจุดสี 4 ด้าทั้งสามเส้นนั้น (Line A B และ C) แสดงระบบที่ศึกษาในงานวิจัย[1] (b) เฟสไดอะแกรมของ  $0.5[\text{Ba}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3] - 0.5[(\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3})\text{O}_3]$  ที่ทำโดย Liu และ Ren

ซึ่งในแต่ละงานวิจัยต่างก็มีความพยายามที่จะศึกษาเพียโซอิเล็กทริกไรสารตะกั่วในระบบนี้อีกมากมาย เพื่อต้องการพัฒนาและสังเคราะห์ให้ได้เพียโซอิเล็กทริกที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับระบบที่ใช้ตะกั่วเป็นองค์ประกอบ โดยในการศึกษานั้นจะมุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงอัตราสัดส่วนองค์ประกอบของแผนภูมิวิภูภาค BT-BZ-CT เพื่อให้ได้เซรามิกที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น คือ สามารถแสดงความหลากหลายของเฟสหรือพหุสัณฐานขึ้นเกิดเป็นจตุรรอยต่อร่วม 3 เฟสระหว่าง คิวบิก-รอมโบฮีดรัล-เตตระโกนอลขึ้นได้ ซึ่งที่ผ่านมาก็พบว่าม้งานวิจัยจำนวนไม่น้อยที่ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเพื่อสังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกไรสารตะกั่วในระบบ BT-BZ-CT โดยสัดส่วนองค์ประกอบที่ค้นพบในแต่ละจุดนั้นก็มีทั้งที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกโดยไม่มีเฟสร่วมหรือจุดที่แสดงสมบัติร่วมสองเฟส ซึ่งก็พบว่าสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกเป็น  $x = 0.5$  ของ  $0.5[\text{Ba}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3] - 0.5[(\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3})\text{O}_3]$  จากงานวิจัยของ Liu และ Ren นั้นจะให้สมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นที่สุด โดยจะให้ค่า  $d_{33}$  ออกมาสูงถึง 620 pC/N ซึ่งใกล้เคียงกับเพียโซอิเล็กทริกในระบบเลดเซอร์โคเนียมไททานेट (PZT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 เฟสไดอะแกรมเพียโซอิเล็กทริกในระบบ BT-BZ-CT ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ โดยที่

- แสดงสัดส่วนองค์ประกอบที่สังเคราะห์ในระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.98}\text{Zr}_{0.02})\text{O}_3$  โดย Wei Li และคณะ ในปี 2010
- แสดงสัดส่วนองค์ประกอบที่สังเคราะห์ในระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.95}\text{Zr}_{0.05})\text{O}_3$  โดย Wei Li และคณะ ในปี 2010
- แสดงสัดส่วนองค์ประกอบที่สังเคราะห์ในระบบ  $(\text{Ba}_{0.95}\text{Ca}_{0.05})(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$  โดย Su-Wei Zhang และคณะ ในปี 2010
- แสดงสัดส่วนองค์ประกอบที่สังเคราะห์ในระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1})\text{O}_3$  โดย Wei Li และคณะ ในปี 2010
- แสดงสัดส่วนองค์ประกอบที่สังเคราะห์ในระบบ  $(\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15})(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$  โดย Jiagang Wu และคณะ ในปี 2011
- แสดงสัดส่วนองค์ประกอบที่สังเคราะห์ในระบบ  $(\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15})(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$  โดย Ye Tian และคณะ ในปี 2013
- แสดงสัดส่วนองค์ประกอบที่สังเคราะห์ในงานวิจัยนี้โดยระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$

เอกสารนี้เป็น ■ แสดงสัดส่วนองค์ประกอบที่เซรามิกสามารถแสดงสมบัติที่โดดเด่น (มีเฟสรวมกันสองเฟส) งานการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเฟสไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 1.2 จะพบว่างานวิจัยส่วนมากมุ่งเน้นไปที่การศึกษาหาจุดที่มีเฟสร่วมระหว่างเฟสอยู่หลายเฟส เพื่อพัฒนาสมบัติเพียโซอิเล็กทริกไว้สารตะกั่วให้โดดเด่นขึ้นบนพื้นฐานงานวิจัยต่างๆที่ได้ทำการศึกษาก่อนหน้านี้

ซึ่งเมื่อเราได้พิจารณาจากเฟสไดอะแกรมแล้ว พบว่ายังมีบริเวณหรือสัดส่วนองค์ประกอบอื่นๆอีกมากมายที่ยังไม่เคยมีใครศึกษา และเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบความเป็นไปได้ที่บริเวณเหล่านี้อาจแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่มีเฟสร่วมระหว่างเฟสได้ เพราะบริเวณสัดส่วนองค์ประกอบเหล่านี้เป็นจุดที่ใกล้เคียงกับสัดส่วนองค์ประกอบของเพียโซอิเล็กทริกที่แสดงสมบัติที่โดดเด่น มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก  $d_{33}$  ที่สูง และยังเป็นเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่มีเฟสร่วมสองเฟสอีกด้วยเมื่อศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาระเบียบวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ปราศจากตะกั่วในระบบ BT-BZ-CT ซึ่งมีสูตรสมการดังนี้  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  โดยที่  $x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$  และในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  โดยที่  $x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.11$  ตามลำดับ โดยใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ในการสังเคราะห์พร้อมทั้งจะทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติไดอิเล็กทริก เพอร์โรอิเล็กทริกและการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารในระบบดังกล่าว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อทำการสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ปราศจากสารตะกั่วในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ;  $x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$  และในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ ;  $x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.11$  ด้วยเทคนิควิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
- 2) เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนขององค์ประกอบที่สามารถแสดงสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจากการสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ปราศจากสารตะกั่วในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$
- 3) เพื่อสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดี โดยดูจากความบริสุทธิ์ของสารที่สังเคราะห์ขึ้น ร้อยละการหดตัวและร้อยละความหนาแน่น
- 4) เพื่อสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี โดยหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก และวิเคราะห์ออกมาในรูปวงฮิสเตอร์ซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ปราศจากสารตะกั่ว ด้วยเทคนิควิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
- 2) สังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ปราศจากตะกั่วในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ;  $x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$  และในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ;  $x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.11$  ตามลำดับ
- 3) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$
- 4) ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ร้อยละการหดตัว ร้อยละความหนาแน่นและตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) ของผงอัดเม็ดเซรามิก (BT-BZ-CT) ที่สังเคราะห์ได้
- 5) ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการเปลี่ยนเฟส (Dielectric property and phase transition) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและตรวจสอบวงฮิสเทอรีซิสของผงอัดเม็ดเซรามิก (BT-BZ-CT) ที่สังเคราะห์ได้

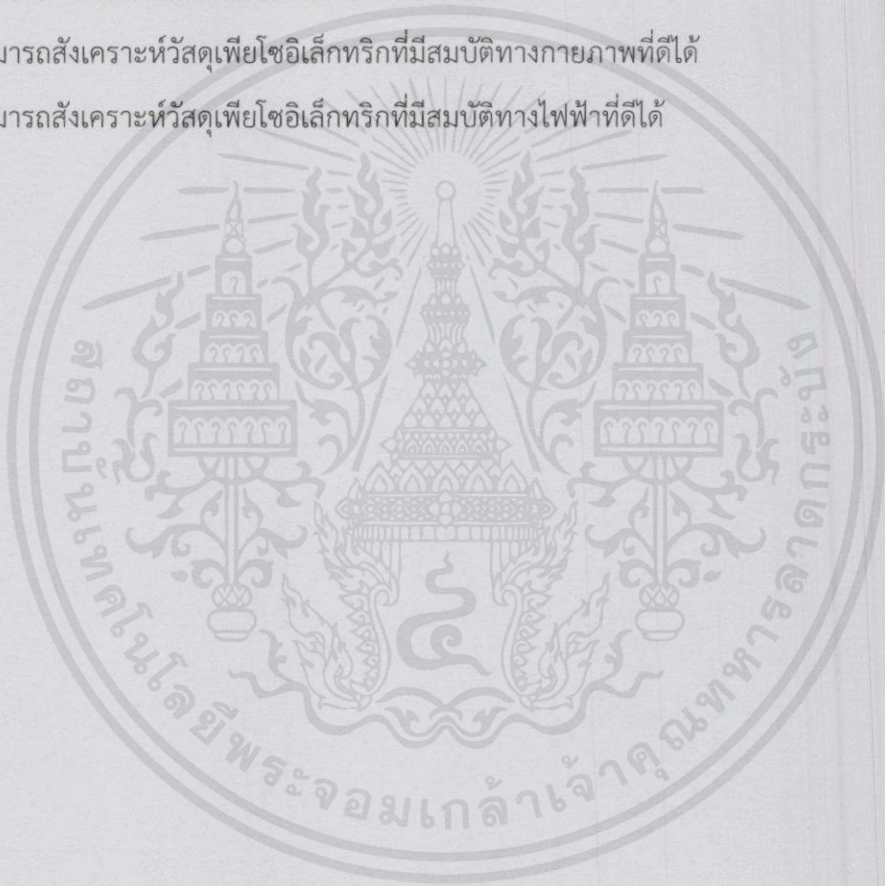
### 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

- 1) ทำการเตรียมผงสารในระบบ BT-BZ-CT ด้วยเทคนิควิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
- 2) นำผงที่เตรียมได้ไปเผาแคลไซน์ เพื่อทำให้เกิดความหนาแน่นแก่ผงเม็ดเซรามิกที่อัดขึ้นรูป
- 3) ทำการขึ้นรูปเป็นเม็ดเซรามิก โดยการนำผงสารมาอัดเม็ดเพื่อทำการเผาซินเตอร์
- 4) นำเม็ดที่เตรียมได้ไปทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ
- 5) ตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 6) ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพโดยการวัดความหนาแน่นของเม็ดเซรามิก หาค่าร้อยละความหนาแน่นและร้อยละการหดตัว
- 7) ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าไดอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริกส์ของเม็ดเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมวัสดุผงเพียโซอิเล็กทริกที่ปราศจากตะกั่วในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ด้วยเทคนิควิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งเพื่อให้ได้ผงที่มีความบริสุทธิ์และความหนาแน่นสูง
- 2) ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่สามารถทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่สังเคราะห์ได้นั้นแสดงสมบัติที่โดดเด่นออกมาได้
- 3) สามารถสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดีได้
- 4) สามารถสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีได้



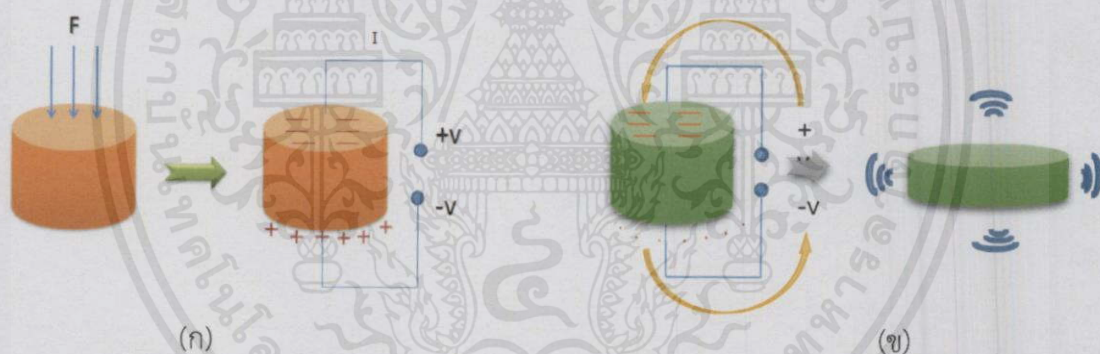
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric property)

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกถูกค้นพบขึ้นในปี 1880 โดย Jacques และ Pierre Curie ซึ่งได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแรงกดต่อประจุไฟฟ้าของผลึก เช่น ควอตซ์ (Quartz) ทัวร์มาไลน์ (Tourmaline) ซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) เป็นต้น โดยคำว่า “piezo” นั้นมีรากศัพท์มาจากภาษากรีก หมายถึง “การกด” ดังนั้นปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกก็คือ ปรากฏการณ์ที่วัสดุสามารถเกิดขั้วไฟฟ้า (Electrical polarization) ขึ้นเนื่องจากความเครียด (Strain) ในตัววัสดุเมื่อได้รับความเค้น (Stress) เข้าไป โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง” ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก) และในทางกลับกัน เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกแล้วสามารถเกิดความเครียด ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปได้นั้นจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม” ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) [2]



รูปที่ 2.1 (ก) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรงและ(ข) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม [ดัดแปลงจาก 3]

สมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทั้ง 2 ปรากฏการณ์ โดยพิจารณาจากสมบัติทางไฟฟ้าและการยืดหยุ่นของวัสดุ [2] คือ

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

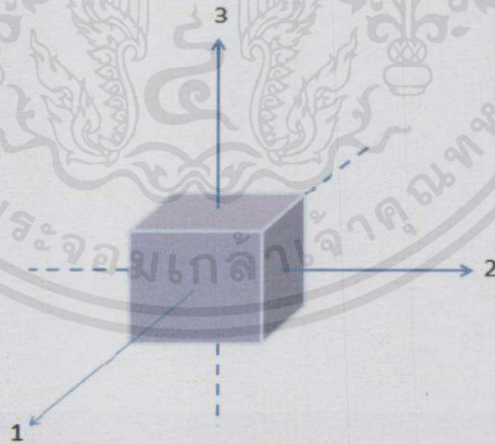
$$S = s^E T + dE \quad (\text{motor}) \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ D คือ ค่าการแทนที่ทางไฟฟ้า (Dielectric displacement)  
 T คือ ความเค้น (Stress)  
 E คือ สนามไฟฟ้า (Electric field)  
 S คือ ความเครียด (Strain)  
 d คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient)  
 s คือ ความหยุ่นของวัสดุ (ส่วนกลับของมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น)  
 $\epsilon$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity)

จากรูปแบบของสมการที่ 2.1 และ 2.2 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของการจัดเรียงตัวในวัสดุ ซึ่งจะสัมพันธ์กับสมบัติของวัสดุนั้นๆ นอกจากนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังมีสมบัติที่ขึ้นกับทิศทาง จึงต้องมีการระบุเป็นตัวห้อยไว้เพื่อแสดงถึงเงื่อนไขของสภาวะที่กำหนด ตัวอย่างเช่น  $d_{31}$  เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่แสดงถึงความสัมพันธ์ในการเกิดโพลาริเซชันในแนวตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้าในทิศทาง 3 เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 1 หรือด้านข้างของวัสดุ (ดังรูปที่ 2.2) หรือค่า  $d_{33}$  ที่แสดงการเกิดโพลาริเซชันในทิศทาง 3 เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 3 เป็นต้น

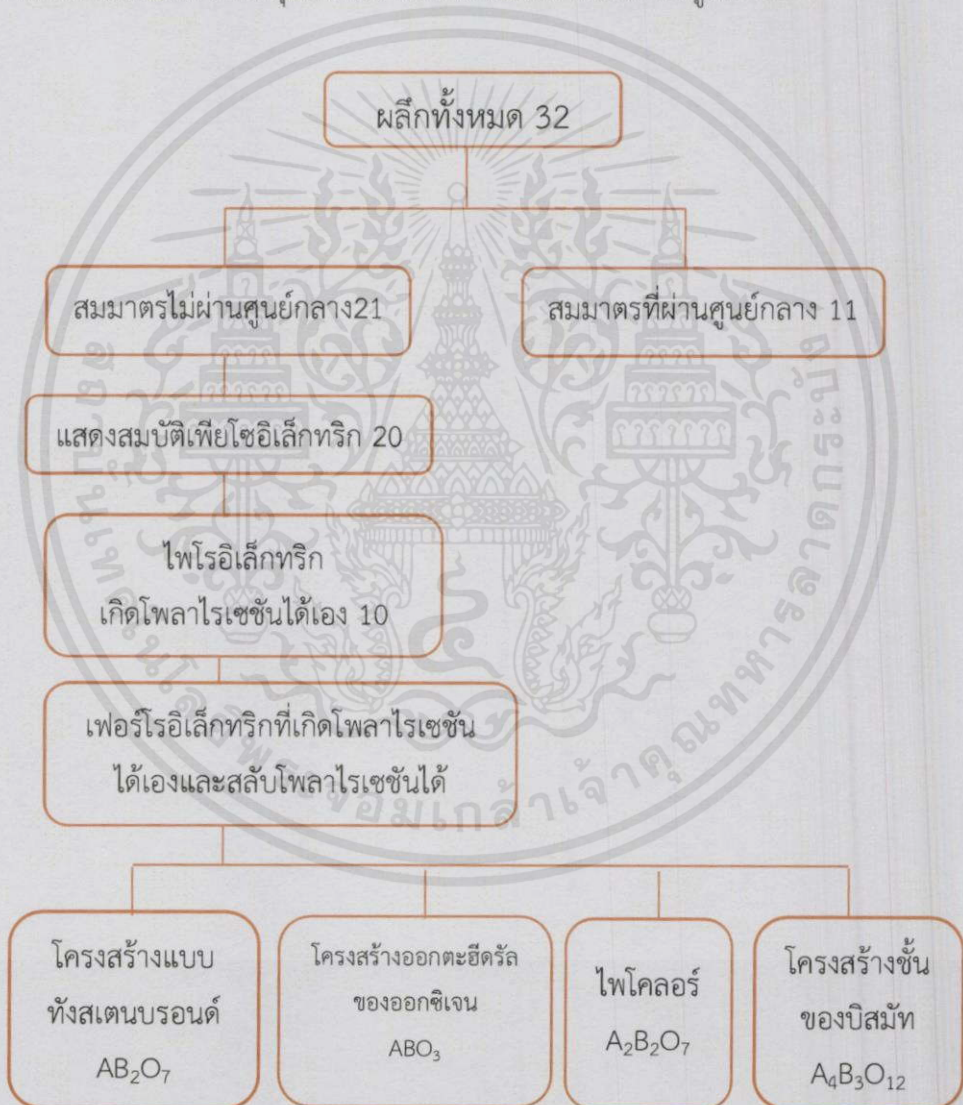
สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นต้องการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง เพื่อนำไปใช้ในอุปกรณ์ที่มีการสั่นและการเคลื่อนไหว เช่น เครื่องสัญญาณสะท้อนและเครื่องสำหรับรับฟัง [2]



รูปที่ 2.2 ทิศทางของโพลาริเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าและความเค้นแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริก [ดัดแปลงจาก [2]]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วผลึกจะสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามสมมาตรได้ 32 ระบบ โดย 11 ระบบนั้นมีลักษณะสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง ส่วนที่เหลืออีก 21 กลุ่มจะมีลักษณะของผลึกเป็นสมมาตรไม่ผ่านจุดศูนย์กลาง ซึ่งผลึกในกลุ่มนี้จะมีเพียง 20 กลุ่มที่สามารถแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกได้ ส่วนอีก 1 กลุ่มนั้นจะไม่แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากว่าผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างที่มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลางเมื่อได้รับแรงกระทบ และส่วนในผลึกเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 20 กลุ่มนี้จะมีเพียง 10 กลุ่มที่สามารถเกิดโพลาริเซชันได้เอง ถ้าหากการเกิดโพลาริเซชันนี้สามารถเกิดการสลับขั้วไปในทิศทางตรงกันข้ามได้เองเมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไปแก่ตัววัสดุจะเรียกผลึกกลุ่มนี้ว่า “เฟอร์โรอิเล็กทริก” ซึ่งผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนี้ก็สามารถแบ่งย่อยตามโครงสร้างได้อีก คือ กลุ่มโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ กลุ่มโครงสร้างทังสเตนบรอนซ์ และกลุ่มโครงสร้างชั้นของบิสมัท ดังแสดงในรูปที่ 2.3



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.3 แผนผังแสดงการแบ่งกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก [ดัดแปลงจาก2] การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

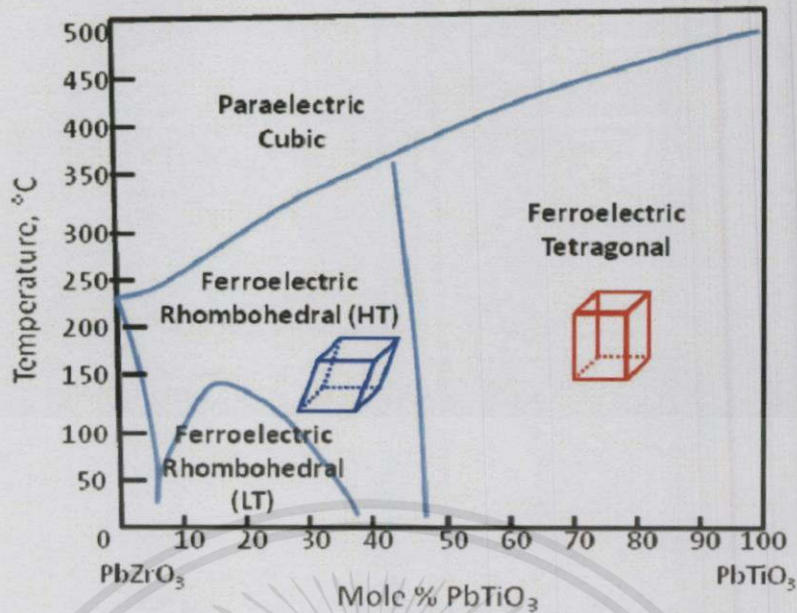
## 2.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก [4]

ในอดีตที่ผ่านมาโดยเฉพาะในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง ได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกกันอย่างแพร่หลาย เพื่อจะนำไปสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ในสงครามดังกล่าว เริ่มแรกได้มีการพัฒนาสารเพื่อผลิตตัวเก็บประจุจากไมก้า โทเทเนียมไดออกไซด์ แมกนีเซียมไททาเนตและแคลเซียมไททาเนต ซึ่งมีค่าไดอิเล็กทริกประมาณ 100 และต่อมาในปี 1941 Wainer และ Solomon ได้ค้นพบแบเรียมไททาเนต ซึ่งเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่ที่ได้รับการสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากมีค่าไดอิเล็กทริกสูงถึง 1,100 จึงเป็นเหตุให้แบเรียมไททาเนตมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ต่อมาได้มีการค้นพบว่าสารประกอบกลุ่มของตะกั่วก็มีค่าไดอิเล็กทริกสูงเช่นเดียวกัน ยิ่งไปกว่านั้น สารประกอบกลุ่มของตะกัวยังมีข้อดีกว่าสารประกอบกลุ่มของไททาเนต คือ สามารถเผาซินเตอร์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจึงทำให้สามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตลงได้อย่างมาก

ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้สารประกอบกลุ่มนี้ได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนากันอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น สารในระบบเลดไททาเนต ( $\text{PbTiO}_3$ ) เลดเซอร์โคเนียมไททาเนต (PZT) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนียมไททาเนต (PLZT) เลดนิเกิลโนโบเตต (PNN) และเลดซิงค์โนโบเตต (PZN) เป็นต้น

สำหรับ PZT นั้นถูกค้นพบโดย Jaffe และคณะ ในปี 1952 หลังจากนั้นก็กลายเป็นเซรามิกที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมจนถึงปัจจุบัน เนื่องจาก PZT มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นมาก โดยสามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูง โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส (Morphotropic Phase Boundary, MPB) ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างเฟสโรมโบฮีดรัลกับเตตระโกนอลโดยมีอัตราส่วนระหว่างเซอร์โคเนียมกับไททาเนียมเป็น 52:48 ดังรูปที่ 2.4

นอกจากนี้ PZT ยังมีอุณหภูมิคูรีที่สูงถึง 390 องศาเซลเซียส (ที่ MPB) และยังมีค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบเชิงกลที่สูงอีกด้วย ทำให้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าได้ง่าย มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงและง่ายต่อการเผาซินเตอร์เพราะใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก ยิ่งไปกว่านั้นการเตรียมเซรามิก PZT ให้มีความบริสุทธิ์สูงและความหนาแน่นสูงนั้นสามารถเตรียมได้ไม่ยุ่งยากมากนักเมื่อเทียบกับสารในกลุ่มไททาเนต



รูปที่ 2.4 เฟสไดอะแกรมของสารในระบบ  $\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3$  [4]

### 2.3 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว (Lead-free piezoelectric material)

ถึงแม้ว่า PZT เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นกลุ่มวัสดุที่มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก ไดอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ดีเยี่ยม โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส แต่อย่างไรก็ตามวัสดุเพียโซอิเล็กทริกดังกล่าวนี้มีปริมาณของเลดออกไซด์ ( $\text{PbO}$ ) เป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นโลหะหนักที่เป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ยิ่งไปกว่านั้นผู้ที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีสารประเภทนี้เป็นองค์ประกอบย่อมมีโอกาสเสี่ยงที่จะได้รับสารตะกั่วที่สูงอันเนื่องมาจากการสัมผัส การปนเปื้อนและการสูดดมสารตะกั่วที่ระเหิดจากความร้อนเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีผลต่ออวัยวะส่วนต่างๆของร่างกายโดยตรง เช่น สมอง ระบบประสาท ตับและไต เป็นต้น ดังนั้นจึงมีประเทศต่างๆได้ให้ความสำคัญในเรื่องนี้เป็นอย่างมาก โดยในปี 2006 สหภาพยุโรป (EU) ได้ออกระเบียบที่มีใจความสำคัญอยู่สองข้อ โดยข้อแรกเป็นระเบียบว่าด้วยการกำจัดเศษซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือ WEEE ซึ่งมีใจความว่า “บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องเป็นผู้รับผิดชอบเศษซากวัสดุที่บริษัทตนเองผลิตขึ้น โดยจะต้องรับคืนจากผู้บริโภค เพื่อนำกลับไปทำลายหรือซ่อมแซมเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่” ส่วนข้อที่สองเป็นระเบียบว่าด้วยการควบคุมการนำเข้าสินค้าเข้าไปในประเทศสมาชิกหรือ RoHS เพื่อควบคุมและห้ามนำเข้าสินค้าต่างๆที่มีสารที่เป็นอันตรายหรือสารต้องห้ามเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม ( $\text{Cr}^{6+}$ ) โพลีโบรมิเนตไบฟีนิลส์ (PBB) และโพลีโบรมิเนตไดฟีนิลส์อีเทอร์ (PBDE) นอกจากนี้ยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีประเทศญี่ปุ่น จีนและเกาหลีใต้ได้เริ่มออกระเบียบในลักษณะดังกล่าว สำหรับนักวิจัยเองก็ได้มีการตื่นตัวในเรื่องนี้ด้วยเช่นเดียวกัน โดยมีนักวิจัยหลายกลุ่มได้พยายามศึกษาค้นคว้าและพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกไรสารตะกั่ว เพื่อมาทดแทนสารเพียโซอิเล็กทริกที่มีสารตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก ดังเห็นได้จากการตีพิมพ์งานวิจัยที่เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไรสารตะกั่วในกลุ่มต่างๆ อย่างไรก็ตามสมบัติของสารในกลุ่มดังกล่าวนี้ยังด้อยกว่าสารเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกในกลุ่มนี้ให้มีประสิทธิภาพทัดเทียมหรือมากกว่าสารเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ [4]

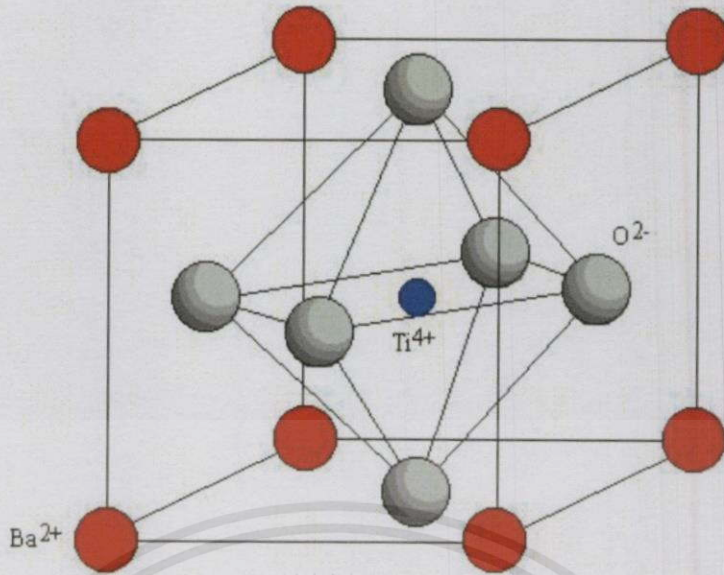
## 2.4 แบเรียมไททาเนต (BT)

การค้นพบปรากฏการณ์เพอร์โรอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริก เริ่มได้รับความสนใจในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 (กลางปี 1940) ซึ่งมีความต้องการใช้งานตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากขึ้น วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุประเภทสเตียไทต์ (Steatite) ไมก้า (Mica) ไททาเนีย ( $TiO_2$ ) แมกนีเซียมไททาเนต ( $MgTiO_3$ ) ซึ่งมีค่าไดอิเล็กทริกเท่ากับ 100 หรือน้อยกว่านั้น จากการศึกษาของ Thurnauer Wainer และ Solomon มีผลยืนยันว่าแบเรียมไททาเนต ( $BaTiO_3$ ) มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่า 1,100 ซึ่งมากกว่าวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดอื่นๆ ในช่วงปลายสงครามโลกครั้งที่ 2 จึงเริ่มมีการตีพิมพ์งานวิจัยในเรื่องเหล่านี้ออกสู่สาธารณะมากขึ้นและหลายประเทศให้ความสนใจศึกษา เช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ รัสเซียและญี่ปุ่น

ในปี 1945 และ 1946 มีรายงานการศึกษาของ Wul และ Goldman จากรัสเซียและกลุ่มของ Hipple จาก MIT เสนอว่าแบเรียมไททาเนตมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงเพราะมีคุณสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก และกลุ่มของ Gray พบว่าการให้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกสามารถจัดเรียงโดเมนภายในเกรนทำให้เซรามิกมีคุณสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งการจัดเรียงตัวด้วยกระแสไฟฟ้าเช่นนี้เรียกว่าโพลลิ่ง (Poling) ต่อมากระบวนการนี้จึงเป็นกุญแจสำคัญที่เปลี่ยนเซรามิกที่เฉื่อยไปเป็นวัสดุที่ตอบสนองต่อเชิงกล-ไฟฟ้า (Electromechanical)

แบเรียมไททาเนต ( $BaTiO_3$  หรือ BT) มีโครงสร้างอยู่ในกลุ่มเพอโรฟสไกต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่พบมากในสารประกอบที่มีสูตรทางเคมีแบบ  $ABO_3$  ที่มี Ba อะตอมอยู่ตรงตำแหน่ง A มุมของรูปลูกบาศก์ มี Ti อะตอมอยู่ตรงตำแหน่ง B กึ่งกลางของรูปลูกบาศก์ และมี O อะตอมอยู่ตรงตำแหน่งกลางหน้าของรูปลูกบาศก์ดังแสดงในรูปที่ 2.5

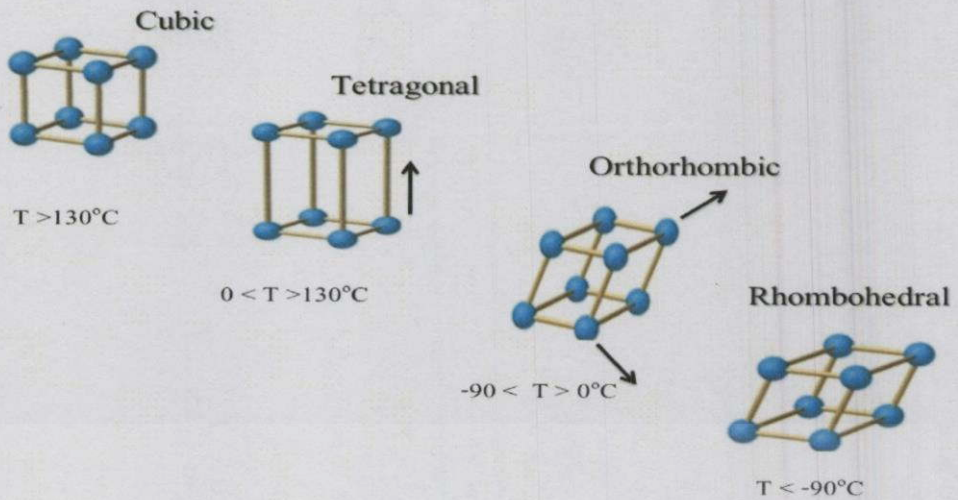
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของ  $\text{BaTiO}_3$  [8]

แบเรียมไททาเนตมีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ 130 องศาเซลเซียส โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี แบเรียมไททาเนตจะมีโครงสร้างเป็นแบบลูกบาศก์ซึ่งเป็นวัฏภาคที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นที่อุณหภูมินี้แบเรียมไททาเนตจึงเป็นพาราอิเล็กทริก แต่เมื่อทำการลดอุณหภูมิลงมาในช่วงระหว่าง 0 ถึง 130 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอลซึ่งเกิดจากการยืดตัวไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งของลูกบาศก์ และการหดตัวในอีก 2 ทิศทางที่เหลือ โครงสร้างจึงมีทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ต่างกันในกลุ่ม  $\langle 100 \rangle$  อยู่ทั้งหมด 6 ทิศทาง เพราะฉะนั้นที่อุณหภูมินี้จึงมีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous polarization) ทั้งหมด 6 ทิศทาง และเมื่อลดอุณหภูมิลงมาในช่วงระหว่าง -90 ถึง 0 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างเป็นแบบออร์โธโรมบิกเกิดจากการยืดตัวในทิศขแยงมุมของด้านหน้าด้านหนึ่งของลูกบาศก์และการหดตัวของด้านหน้าด้านหนึ่งในทิศขแยงมุมของลูกบาศก์ จึงมีทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ที่ต่างกันในกลุ่ม  $\langle 110 \rangle$  อยู่ทั้งหมด 12 ทิศทาง เพราะฉะนั้นที่อุณหภูมินี้จึงมีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองทั้งหมด 12 ทิศทาง และเมื่อลดอุณหภูมิลงมาในช่วงที่ต่ำกว่า -90 องศาเซลเซียส แบเรียมไททาเนตจะมีโครงสร้างเป็นแบบรอมโบฮีดรัลเกิดจากการยืดตัวในทิศขแยงมุมของลูกบาศก์และการหดตัวในทิศขแยงมุมของลูกบาศก์จึงมีทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ที่ต่างกันในกลุ่ม  $\langle 111 \rangle$  อยู่ทั้งหมด 8 ทิศทาง เพราะฉะนั้นที่อุณหภูมินี้จึงมีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองทั้งหมด 8 ทิศทาง แสดงดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงผลึกโครงสร้างของแบเรียมไททาเนตที่อุณหภูมิต่างๆ [ดัดแปลงจาก7]

ปัจจุบันได้มีการนำแบเรียมไททาเนตมาใช้ในการผลิตอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ ตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์สูงและตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น (Multilayer capacitor, MLC) เนื่องจากสมบัติพื้นฐานของแบเรียมไททาเนตที่สำคัญมี 2 ประการดังนี้ [9]

- 1) อุณหภูมิคูรี (Curie temperature,  $T_c$ ) ของแบเรียมไททาเนตมีค่าต่ำ คือ 130 องศาเซลเซียส
- 2) แฟกเตอร์การเชื่อมต่อพลังงานกล-ไฟฟ้า (Electromechanical coupling factor) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ PZT (0.35 สำหรับ BaTiO<sub>3</sub> และ 0.65 สำหรับ PZT) โดยสิ่งที่ทำให้ BaTiO<sub>3</sub> แตกต่างกับระบบโซลิดโซลูชันของ PZT ที่มีองค์ประกอบเป็น PbO ซึ่งระเหยได้นั้น เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของ BaTiO<sub>3</sub> มีความเสถียรสูงทำให้ง่ายต่อการเผาซินเตอร์ โดยมีความแน่นอนทางองค์ประกอบเคมีที่ดีกว่า

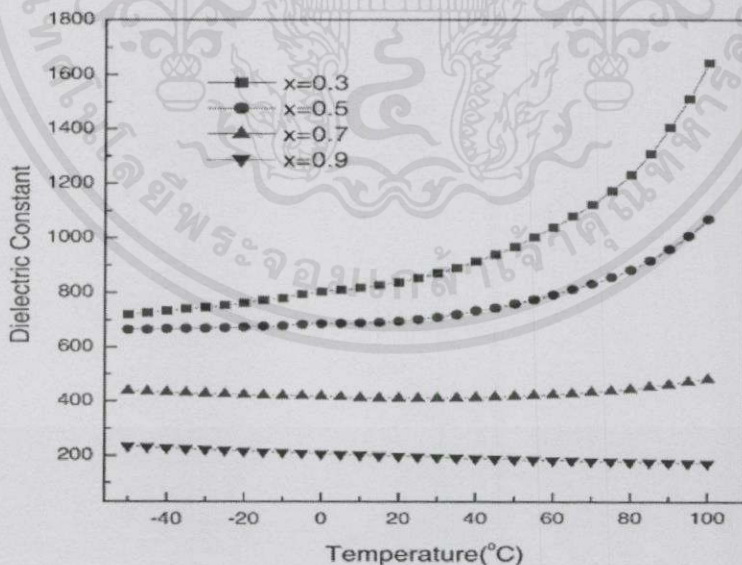
อย่างไรก็ตามการใช้งานวัสดุดังกล่าวมักมีการใส่สารเติมแต่งบางอย่างลงไปด้วยเพื่อปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงสมบัติพื้นฐาน โดยทั่วไปนั้นสารเติมสำหรับวัสดุทรานสดิวเซอร์ BaTiO<sub>3</sub> ที่ใช้หลายชนิด เช่น สารเติมพวก Sr<sup>2+</sup> สำหรับการลดอุณหภูมิคูรี สารเติมพวก Ca<sup>2+</sup> ช่วยในการเพิ่มช่วงอุณหภูมิเสถียรของเฟสเตตระโกนอล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 แบเรียมแคลเซียมไททานेट (BCT)

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ได้ศึกษาและพัฒนาเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วโดยการแทนที่สารใหม่ลงในเซรามิก  $\text{BaTiO}_3$  โดยที่ผ่านมานั้นก็มีงานวิจัยจำนวนมากไม่น้อยที่นำ  $\text{Ca}^{2+}$  มาแทนที่เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบ  $\text{BaTiO}_3$  ที่ตำแหน่ง A ( $\text{Ba}^{2+}$ ) ซึ่ง  $\text{CaTiO}_3$  นั้นจัดเป็นสารที่สามารถนำมาแทนที่ลงใน  $\text{BaTiO}_3$  แล้วส่งผลทำให้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นมีค่าลดลง และในขณะเดียวกันก็จะไปเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกให้สูงขึ้นด้วย ซึ่งในปี 2001 Natesan Baskaran และ Hua Chang[10] ได้ทำการศึกษาผลของการเจือ Ca ลงใน  $\text{BaTiO}_3$  เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น เนื่องจากว่ายังมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่ได้ทำการศึกษาผล Ca ที่มีต่อเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก  $\text{BaTiO}_3$  Natesan Baskaran และ Hua Chang จึงได้ทำการสังเคราะห์เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ  $\text{Ca}_x\text{Ba}_{1-x}\text{TiO}_3$  โดยที่  $0 < x < 0.3$  ขึ้น ซึ่งพบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.15$  จะส่งผลให้เซรามิกมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดและมีอุณหภูมิการใช้งานที่สูงขึ้น

ต่อมาในปี 2004 Chen และ Wang[11] ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยการเจือ Ca ลงใน  $\text{BaTiO}_3$  ดังสมการในระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)\text{TiO}_3$  ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยที่  $x = 0.10, 0.30, 0.50, 0.70$  และ  $0.90$  ซึ่งก็พบว่าที่  $x = 0.30$  นั้นจะส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุด Chen และ Wang จึงให้ข้อสรุปว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7



เอกสารรูปที่ 2.7 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ของเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบการคำนวณ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)\text{TiO}_3$ [11] ทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 แบเรียมเซอร์โคเนียมไททานेट (BZT)

ในปี 2007 F.Moura และคณะ [12] ได้ทำการสังเคราะห์เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบแบเรียมเซอร์โคเนียมไททานेट (BZT) ซึ่งเป็นการเจือ  $ZrO_2$  ลงไปใน  $BaTiO_3$  โดย  $Zr^{4+}$  จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่ง B คือ  $Ti^{4+}$  ซึ่ง F.Moura และคณะต้องการที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วจากสารตั้งต้น  $BaCO_3$ ,  $ZrO_2$  และ  $TiO_2$  ให้เทียบเท่ากับเพียโซอิเล็กทริกที่สังเคราะห์ขึ้นจากสารตะกั่วในสามสัดส่วนองค์ประกอบ คือ  $Ba(Ti_{0.95}Zr_{0.05})O_3$ ,  $Ba(Ti_{0.9}Zr_{0.1})O_3$  และ  $Ba(Ti_{0.85}Zr_{0.15})O_3$  ซึ่งจากผลการทดลองก็พบว่ายิ่งเราเพิ่มอัตราส่วนของ  $ZrO_2$  ให้สูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย

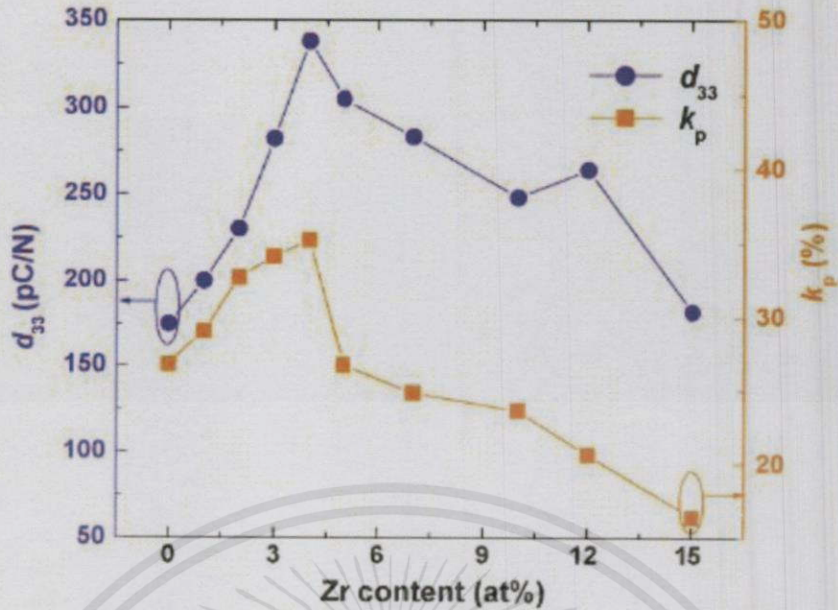
ต่อมาในปี 2009 S.J Kuang และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ  $ZrO_2$  ที่เจือลงไปเพื่อพัฒนาและปรับปรุงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิก  $BaTiO_3$  ในระบบ  $Ba(Zr_xTi_{1-x})O_3$  โดยที่  $0 \leq x \leq 0.12$  ซึ่งจากผลงานวิจัยก็พบว่าอุณหภูมิคูรีมีค่าลดลงจาก 131 องศาเซลเซียสเป็น 74 องศาเซลเซียส เมื่อสัดส่วน  $x$  เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.12 ในเซรามิกระบบ  $Ba(Zr_xTi_{1-x})O_3$

## 2.7 แบเรียมเซอร์โคเนียมแคลเซียมไททานेट (BZCT)

ในปี 2010 Wei Li และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาและพัฒนาสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในระบบ BZT ให้ดีขึ้นโดยได้สังเคราะห์เซรามิกในระบบ  $(Ba_{1-x}Ca_x)(Ti_{0.95}Zr_{0.05})O_3$  โดยที่  $x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.15$  และ  $0.20$  ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  นั้นเซรามิกจะแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นขึ้นมาคือ จะแสดงเฟสร่วม 2 เฟสระหว่างออร์โธโรมบิกกับเตตระโกนอล อีกทั้งยังให้ค่า  $d_{33}$  ที่สูงที่สุดถึง 365 pC/N เมื่อเปรียบเทียบกับที่สัดส่วน  $x$  อื่นๆ

ต่อมาในปีเดียวกัน Hailong Zhang และคณะ [15] ได้ทำการพัฒนาสมบัติเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วเพื่อให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นทัดเทียมกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว โดยได้สังเคราะห์เซรามิกในระบบ BZCT ดังสมการ  $(Ba_{0.95}Ca_{0.05})(Ti_{1-x}Zr_x)O_3$  โดยที่  $0 < x < 15$  at% ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ซึ่งเป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปร Zr ที่มีต่อสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ BZCT พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 4$  at% นั้นจะส่งผลให้เซรามิกมีค่า  $d_{33}$  สูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่สัดส่วนองค์ประกอบอื่นๆ คือ 338 pC/N ดังแสดงในรูปที่ 2.8

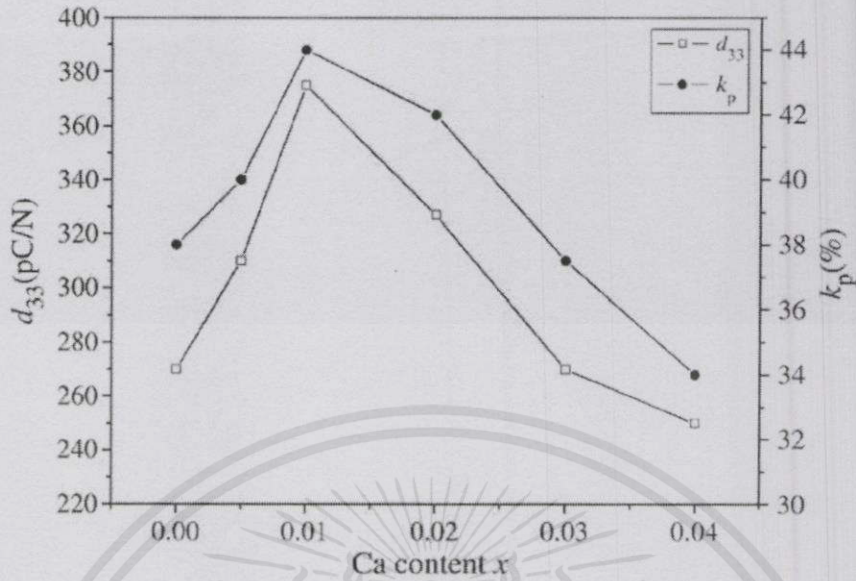
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงค่า  $d_{33}$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆของเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบ  $(\text{Ba}_{0.95}\text{Ca}_{0.05})(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$  [15]

ต่อมา Wei Li และคณะได้ทำการสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว [16] เพื่อพัฒนาและปรับปรุงให้มีสมบัติที่ดีขึ้น โดยได้ทำการเปลี่ยนระบบสมการเป็นดังสมการ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.98}\text{Zr}_{0.02})\text{O}_3$  โดยที่  $x = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03$  และ  $0.04$  โดยจะวัดผลค่า  $d_{33}$  และเฟสที่เกิดขึ้นของเซรามิกที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ โดยที่  $x = 0.01$  นั้นจะส่งผลให้เซรามิกในระบบนี้แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นขึ้นมาเนื่องจากมีเฟสรวมกัน 2 เฟสระหว่างออร์โธโรมบิกกับเตตระโกนอล อีกทั้งยังให้ค่า  $d_{33}$  สูงถึง  $375 \text{ pC/N}$  ซึ่งถือว่ามีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  อื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงค่า  $d_{33}$  และสัมประสิทธิ์  $k_p$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  ต่างๆ ของเซรามิกในระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.98}\text{Zr}_{0.02})\text{O}_3$  [16]

Wei Li และคณะ [17] ก็ยังได้พยายามศึกษาและพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้ดียิ่งขึ้น โดยได้ทำการสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1})\text{O}_3$  ขึ้น โดยที่  $x = 0.12$  0.14 0.16 และ 0.18 ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.16$  นั้นจะส่งผลให้เซรามิกมีค่า  $d_{33}$  ที่สูงที่สุดถึง 328 pC/N และยังแสดงคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นขึ้นมาได้เนื่องจากที่สัดส่วนนี้จะแสดงเฟสรวม 2 เฟสระหว่างเฟสอโรโทรมบิอิตรัลกับเฟสอโรโทรมบิกซัน แต่อุณหภูมิคูรีของเซรามิกในทุกๆ สัดส่วนองค์ประกอบที่ได้จากระบบนี้ จะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับอุณหภูมิคูรีของ  $\text{BaTiO}_3$  และใกล้เคียงกันในทุกๆ สัดส่วน คือ ประมาณ 64-65 องศาเซลเซียส

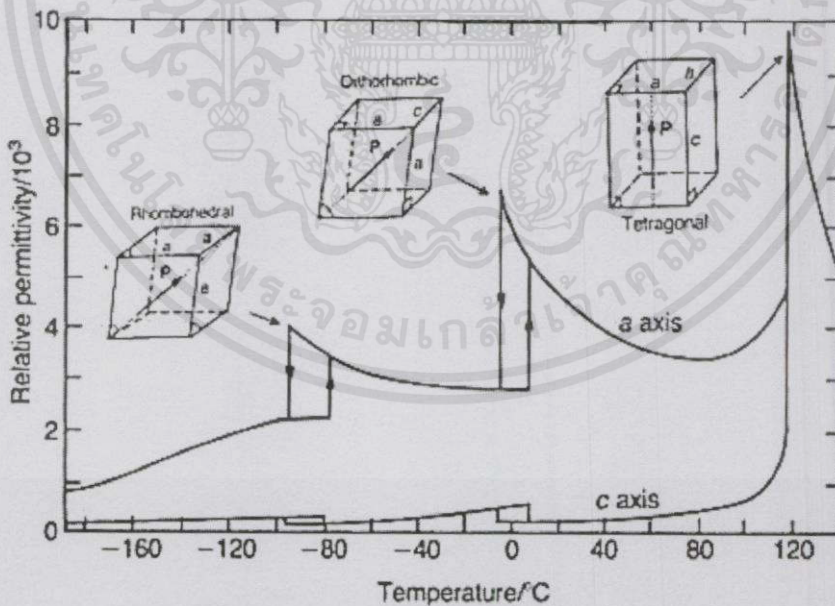
ในปี 2011 Jiagang Wu และคณะ [18] ได้ทำการสังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วขึ้นในระบบ  $(\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15})(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$  โดยที่  $x = 0.00$  0.05 0.09 0.10 0.125 0.15 และ 0.20 พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.10$  นั้นจะส่งผลให้วัสดุเซรามิกที่สังเคราะห์ได้นั้นมีค่า  $d_{33}$  ที่สูงมากถึง 423 pC/N อีกทั้งยังเป็นจุดที่ทำให้เซรามิกสามารถแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นขึ้นมาได้ คือ มีการแสดงเฟสร่วมกันสองเฟสระหว่างเฟสเตตระโกนอลกับเฟสอโรโทรมบิอิตรัล

ต่อมาในปี 2012 Ye Tian และคณะ [19] ได้ทำการสังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ  $(\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15})(\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9})\text{O}_3$  ขึ้นมา โดยที่  $0 \leq x \leq 0.02$  พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.15$  นั้นเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบนี้มีค่า  $d_{33}$  ที่สูงมากถึง 600 pC/N อีกทั้งยังเป็นสัดส่วนองค์ประกอบที่ไม่มีการค้นพบอีกทางหนึ่ง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำมาใช้

ทำให้เซรามิกแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นขึ้นมาได้เนื่องจากเป็นจุดที่เกิดเฟสรวม 2 เฟสระหว่าง รอมโบฮีดรัลกับเตตระโกนอลนั่นเอง

## 2.8 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส

ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นสามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนเฟสได้หลายเฟส เช่น การเปลี่ยนเฟสจาก เตตระโกนอลไปเป็นเฟสรอมโบฮีดรัล หรือจากเฟสเตตระโกนอลไปเป็นเฟสออร์โธโรมบิกตามอุณหภูมิที่ เปลี่ยนแปลงไป โดยอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของผลึกจะเรียกว่า “อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส” ซึ่ง ถ้ามีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริก (ไม่มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง) ไปเป็นควิบิกพาราอิเล็กทริก (มี สมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง) จะเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสนี้ว่า “อุณหภูมิคูรี (Curie temperature,  $T_C$ )” ซึ่งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ณ อุณหภูมิคูรีนี้จะมีค่าสูงที่สุด โดยพีคของค่าสภาพยอม สัมพัทธ์ของเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีลักษณะเป็นพีคแหลม (Sharp peak) ไม่ขึ้นกับความถี่ ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงเฟสของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบเรียมไททาเนตที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีการ เปลี่ยนเฟสจากรอมโบฮีดรัลไปเป็นออร์โธโรมบิก และจากออร์โธโรมบิกไปเป็นเตตระโกนอล ตามลำดับ โดยมีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ประมาณ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมินี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสจาก เฟอร์โรอิเล็กทริกเตตระโกนอลไปเป็นควิบิกพาราอิเล็กทริก [3]



เอกกรุปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับอุณหภูมิของผลึกแบเรียมไททาเนต (BaTiO<sub>3</sub>) [3] อัน อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎคูรี-ไวส์ (Curie-Weiss law) ดังสมการที่ 2.3 [3]

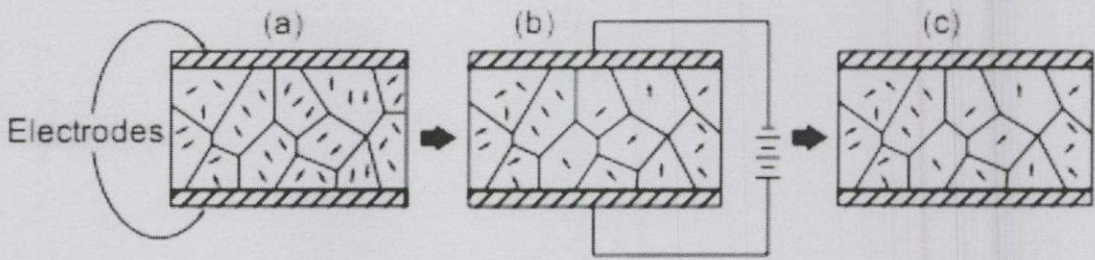
$$\epsilon = \epsilon_0 + C/(T-T_0) \quad (2.3)$$

- โดย  $\epsilon$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ของวัสดุที่ตรวจวัด  
 $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m)  
 $C$  คือ ค่าคงที่คูรี (Curie constant)  
 $T_0$  คือ อุณหภูมิคูรี (มีหน่วยเป็น  $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T$  คือ อุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ (มีหน่วยเป็น  $^{\circ}\text{C}$ )

## 2.9 กระบวนการโพลีลิ่งหรือกระบวนการทำขั้ว (poling)

กระบวนการโพลีลิ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญที่จะทำให้เกิดสภาพเพียโซอิเล็กทริกในเซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก เนื่องจากก่อนที่เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกจะผ่านกระบวนการโพลีลิ่งนั้น เซรามิกจะยังคงไม่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกออกมา เพราะโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริกมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม และเมื่อทำการโพลีลิ่งโดยให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในตัววัสดุ เพื่อบังคับให้โดเมนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่และเมื่อเราเอาสนามไฟฟ้าออกในวัสดุก็จะยังคงมีค่าโพลาริเซชันคงค้าง (Remanent polarization) และความเครียดคงค้าง (Remanent strain) อยู่ในตัววัสดุ ดังนั้นวัสดุเซรามิกดังกล่าวนี้ก็จะสามารถแสดงสมบัติความเป็นเพียโซอิเล็กทริกออกมาได้ [3] โดยในระหว่างกระบวนการโพลีลิ่งนั้นวัสดุจะเกิดการขยายตัวตามแนวแกนสนามไฟฟ้าเล็กน้อย และเกิดการหดตัวในทิศทางที่ตั้งฉากทั้งสองทิศทางเล็กน้อยเช่นกัน ระดับความแรงของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิในการโพลีลิ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดการจัดทิศทาง และสมบัติที่ได้ของวัสดุเซรามิกทุกชนิดที่ผ่านการเผาซินเตอร์แล้วจะมีสมบัติโดยรวมที่เหมือนกันในทุกทิศทาง หากไม่มีการโพลีลิ่งเซรามิกจะไม่เปลี่ยนสภาพแม้ว่าแต่ละผลึกจะมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกอยู่แล้วก็ตามดังแสดงในรูปที่ 2.10 เซรามิกที่ผ่านการโพลีลิ่งมีประโยชน์มากเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกินอุณหภูมิคูรีเพราะเซรามิกจะเสียสภาพโพลาริเซชันที่เกิดจากการโพลีลิ่งที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

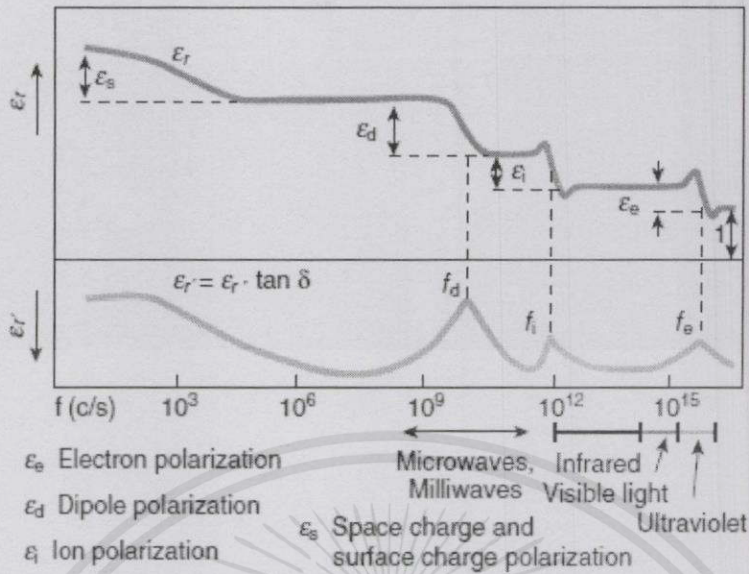


รูปที่ 2.11 การโพลาริเซชันของวัสดุเซรามิกเพื่อสร้างปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (ก) ก่อนทำการโพลี (ข) ระหว่างการโพลี (ค) ภายหลังจากโพลี [5]

## 2.10 โพลาริเซชัน (Polarization)

เมื่อให้สนามไฟฟ้ากับวัสดุเซรามิกประจุไฟฟ้าภายในวัสดุจะเกิดการเลื่อนและการโพลาริเซชันจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดของบริเวณที่ได้รับผลกระทบนั้น โดยประกอบไปด้วยโหมดที่ต่างกัน 5 โหมดของการเกิดโพลาริเซชันสามารถที่จะอธิบายได้คือ การเกิดโพลาริเซชันระดับอิเล็กทรอนิกส์หรือ  $E_e$  การเกิดโพลาริเซชันระดับไอออนหรือ  $E_i$  การเกิดโพลาริเซชันแบบขั้วคู่หรือ  $E_d$  การเกิดโพลาริเซชันของประจุอากาศแบบประจุพื้นผิวหรือ  $E_s$  และแนวการเรียงตัวของโพลาริเซชันแบบการจัดกลุ่มหรือ  $E_o$  การโพลาริเซชัน 4 แบบแรกจะเกิดที่อุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่การโพลาริเซชันแบบที่ 5 หรือแนวการเรียงตัวของโพลาริเซชันแบบการจัดกลุ่มนั้นจะมีการจัดวางแนวของขั้วคู่ในทิศทางตามสนามไฟฟ้าที่ให้ ซึ่งจะเป็นสัดส่วนอย่างตรงกันข้ามกับอุณหภูมิ ในการปรากฏของกระแสที่มาแทนที่การโพลาริเซชันของวัสดุสามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามสนามไฟฟ้าทั้งหมดในช่วงของความถี่ต่ำมาก และเมื่อความถี่สูงขึ้นการโพลาริเซชัน [14] จะไม่เป็นช่วงยาวตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และในทางตรงกันข้ามการกระจายค่าของสภาพยอมไดอิเล็กทริกจะเกิดขึ้นเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การกระจายในโพลาไรเซชันของวัสดุไดอิเล็กทริก [5]

## 2.11 การอัดขึ้นรูปผงเซรามิกด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกกำลังแรงสูง

การอัดขึ้นรูป คือ การอัดผงเซรามิกด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกกำลังแรงสูงเพื่อให้อนุภาคของวัสดุเกิดการแพ็คตัวติดกันแน่นตามแม่แบบที่ใช้อัดขึ้นรูปซึ่งทำจากโลหะ ข้อดีของวิธีการอัดแบบนี้คือใช้น้ำในการขึ้นรูปน้อยที่สุดส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หลังเผาซินเตอร์มีการแน่นตัวหรือมีการหดตัวน้อยกว่าวิธีอื่น แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียคือการแพ็คตัวหรือมีความเหนียว เมื่อได้รับแรงอัดส่งผลต่อความหนาแน่นก่อนเผาที่แยกว่า

สิ่งที่สำคัญคือ

- 1) สารที่ผสมในเนื้อสารที่เป็นผงเซรามิก เช่น PVA (Poly Vinyl Alcohol) ที่ใช้เป็นตัวประสาน (Binder) ให้ผงเซรามิกยึดติดดียิ่งขึ้น แต่หากใส่มากเกินไปจะทำให้ PVA เกาะอยู่ที่อุปกรณ์ที่ใช้อัดขึ้นรูปหรือ Block แต่หากใส่น้อยเกินไปเม็ดที่ทำกรอัดขึ้นรูปอาจเกิดการเสียหายหรือแตกได้ ซึ่งที่บริเวณมุมขอบเม็ดการอัดตัวจะไม่แน่นเท่าบริเวณอื่นอาจทำให้ชิ้นงานมีจุดบกพร่องได้ การอัดเม็ดเป็นวงกลมจะช่วยให้ลดมุมการอัดตัวที่ต่ำลงได้
- 2) แรงอัดที่ใช้ในการอัดลงบนชิ้นงานขึ้นอยู่กับชนิดของเม็ดผงเซรามิก หากให้แรงอัดที่ไม่เหมาะสม เช่น มากหรือน้อยเกินไป อาจจะทำให้เม็ดแตก หรือเกิดการหดตัวของชิ้นงานหลังการเผาซินเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

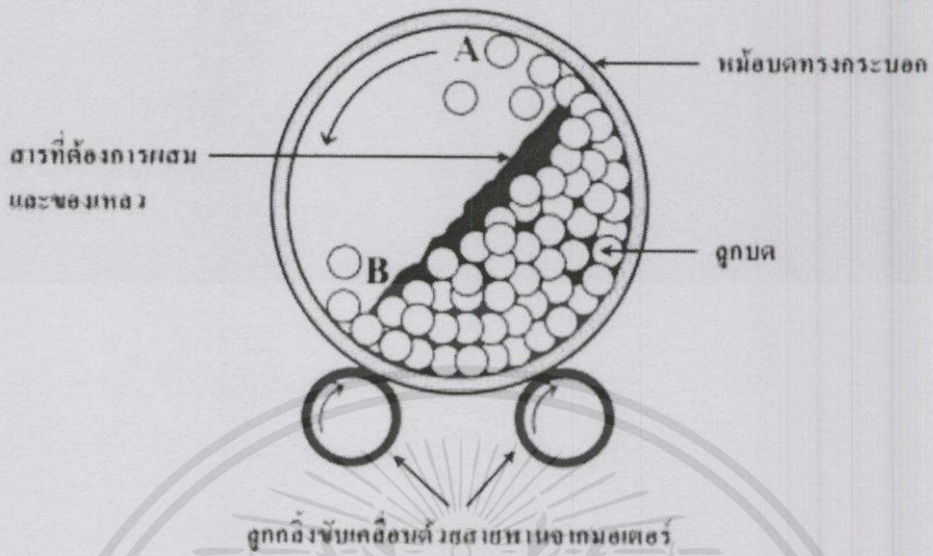
## 2.12 กระบวนการเตรียมผงด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

การเตรียมเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่นิยมกันมากที่สุด คือการผลิตเซรามิกจากการใช้ผง (Powders) เป็นวัตถุดิบ ซึ่งคุณภาพของผงที่นำมาใช้นั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะกำหนดคุณภาพของเซรามิกที่ได้ โดยจะพิจารณาขนาด (Size) รูปร่าง (Shape) การแจกแจงของขนาด (Size distribution) สถานะของการรวมกลุ่ม (State of agglomeration) องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) องค์ประกอบของเฟส (Phase composition) โครงสร้าง (Structure) และสมบัติทางเคมีของพื้นผิว (Chemical properties of surface) ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของอนุภาคผงเพื่อความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการผลิตเป็นเซรามิกต่อไป [3]

### 2.12.1 กระบวนการบดย่อยผสมด้วยลูกบอล

กระบวนการเตรียมผงให้มีขนาดเล็กด้วยการทำให้อนุภาคขนาดใหญ่แตกออก โดยอาศัยแรงกล เรียกว่า การบด (Comminution) ซึ่งได้แก่ การบดหยาบ (Crushing) การบดละเอียด (Grinding) และการบดย่อย (Milling) กระบวนการเหล่านี้ได้รับความนิยมสูงในการนำมาใช้เพื่อลดค่าขนาดอนุภาคผงเฉลี่ย ใช้ทำลายอนุภาคผงที่มีรูพรุนหรือสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ข้างในให้แตกออก ช่วยปรับพฤติกรรมการแจกแจงอนุภาคด้วยการลดขนาดของอนุภาคที่โตที่สุดลงทำให้จำนวนของอนุภาคขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ช่วยปรับปรุงรูปร่างของอนุภาค ช่วยแยกกลุ่มก้อนหรือกลุ่มอนุภาคออกจากกัน และนอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการผสมอนุภาคผงต่างชนิดกันให้เกิดการผสมผสานเข้าไปพร้อมกับการลดขนาดของอนุภาค กระบวนการบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball milling) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ยิยมใช้ในปัจจุบันเป็นกระบวนการบดย่อยผสมอนุภาคโดยอาศัยการหมุนหม้อบด ซึ่งเป็นแท่งกลวงทรงกระบอกมีฝาเปิด-ปิดอยู่ปลายด้านหนึ่ง ดังรูปที่ 2.16 สำหรับหม้อบดในระดับห้องปฏิบัติการมักทำด้วยพลาสติกที่สามารถกำจัดเศษพลาสติกที่ปนเปื้อนมากับการบดย่อยได้ด้วยการเผาที่อุณหภูมิต่ำ ในหม้อบดจะมีการใส่สารที่จะทำการบดผสมพร้อมลูกบอลบด (Grinding media) และสารที่ช่วยในการหล่อลื่นลงไป ปริมาณที่เหมาะสมกับขนาดของหม้อบด โดยจะต้องพยายามปรับอัตราส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้ในหม้อบดให้ระบบทั้งชุดสามารถเกิดพฤติกรรมการบดย่อย ลักษณะของลูกบดจะต้องเคลื่อนที่ในลักษณะคล้ายกับตัวอักษร D โดยมีการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง B ขึ้นไปจนถึงตำแหน่ง A แล้วตกลงมากระแทกกับวัสดุด้านล่าง จากนั้นมีการหมุนเบียดเสียดกันและมีการเลื่อนไหลเป็นวัฏจักรเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ทำให้อนุภาคของสารมีขนาดลดลง เนื่องจากการกระแทกของลูกบดถูกขัดสีระหว่างหม้อบดและลูกบดกับผนังหม้อบด ในขณะที่พฤติกรรมเหล่านี้สามารถช่วยให้อนุภาคมีขนาดลดลง การเกิดสิ่งเจือปนก็อาจมีขึ้นในขั้นตอนเหล่านี้เช่นกัน ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วนของลูกบดหรือผนังของหม้อบดที่สึกกร่อนหลุดปะปนออกมาด้วย ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถป้องกันได้โดยการเลือกใช้ลูกบดที่มีคุณภาพสูงและหม้อบดที่สามารถกำจัดออกได้ที่อุณหภูมิต่ำ เช่น หม้อบดพลาสติก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิจัยไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

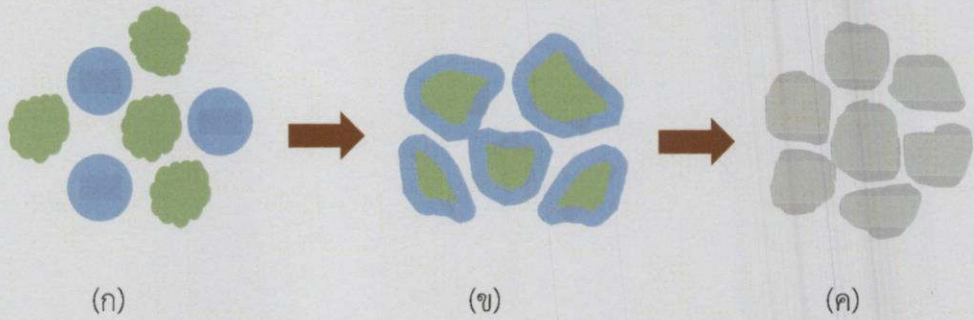


รูปที่ 2.13 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball milling) [3]

### 2.12.2 ปฏิกริยาสถานะของแข็ง

ในการเตรียมผงของสารประกอบออกไซด์อย่างง่ายต่างนิยมใช้วิธีนี้ ซึ่งจะให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็ง เพื่อทำให้เกิดการสลายตัวหรือเกิดการทำปฏิกริยากันระหว่างสารตั้งต้นต่างชนิดกันแล้วเกิดเป็นของแข็งชนิดใหม่ขึ้นมา โดยเรียกกระบวนการดังกล่าวว่าการแคลไซน์ (Calcination) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้สารตั้งต้นเกิดอันตรปฏิกริยาต่อกัน โดยอาศัยการแพร่ระหว่างกันของไอออน ซึ่งช่วยลดขอบเขตของการแพร่ในขั้นตอนการซินเตอร์ได้ โดยการสลายตัวนั้นจะถูกควบคุมด้วยปัจจัยทางจลนพลศาสตร์ต่างๆ ซึ่งปัจจัยทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวนั้นอาจถูกควบคุมจากหนึ่งในสามของกระบวนการต่อไปนี้คือ (1) ปฏิกริยาพื้นผิว (2) การถ่ายเทความร้อนไปยังพื้นผิวที่เกิดปฏิกริยาและ (3) การแพร่ของแก๊สหรือการซึมผ่านจากพื้นผิวที่เกิดปฏิกริยาเข้าไปตามช่องรูพรุนในชั้นต่างๆของผง นอกจากนี้ยังขึ้นกับลักษณะธรรมชาติทางเคมีของตัวทำปฏิกริยาด้วย ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกริยาระหว่างอนุภาคผงของตัวทำปฏิกริยานั้นมีหลายอย่าง เช่น ธรรมชาติทางเคมีของตัวทำปฏิกริยาระหว่างสารที่เกิดขึ้นใหม่ ขนาดของอนุภาค ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ความแตกต่างของขนาดอนุภาคในผงผสม ความเป็นเนื้อเดียวกันของผงผสม สภาวะของบรรยากาศ อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เมื่อ (ก) ผงผสมกันอยู่ก่อนการเกิดปฏิกิริยา (ข) มีการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นบางส่วนและ (ค) เมื่อปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ [ดัดแปลงจาก 3]

### 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2007 N.Narakorn [20] และคณะ ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิคูรีของระบบแบเรียมไททาเนตที่สามารถปรับปรุงได้โดยการแทนที่ด้วยการเติมสารไปที่ตำแหน่ง A หรือตำแหน่ง B ซึ่งจะช่วยการยับยั้งช่วงของการเปลี่ยนอุณหภูมิ คือ ลดอุณหภูมิคูรีและเพิ่มการเปลี่ยนเฟสจากเฟสออร์โธโรมบิกเป็นเฟสออร์โธโรมบิก และจากเฟสออร์โธโรมบิกไปเป็นเฟสเตตระโกนอลที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจากงานวิจัยนี้ก็ได้ทำการสังเคราะห์เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกในระบบ  $Ba(Zr_xTi_{1-x})O_3$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.00, 0.02, 0.05$  และ  $0.08$

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า  $P_s, P_r$  และ  $E_c$  ของเซรามิกในระบบ  $Ba(Zr_xTi_{1-x})O_3$  ที่อุณหภูมิ  $30^\circ C$  [20]

$BaZr_xTi_{1-x}O_3$	$P_s(\mu C/cm^2)$	$P_r(\mu C/cm^2)$	$E_c(kV/cm)$
$x = 0.00$	35.862	4.424	0.696
$x = 0.02$	12.324	2.143	0.912
$x = 0.05$	57.920	25.033	1.048
$x = 0.08$	63.320	29.451	1.344

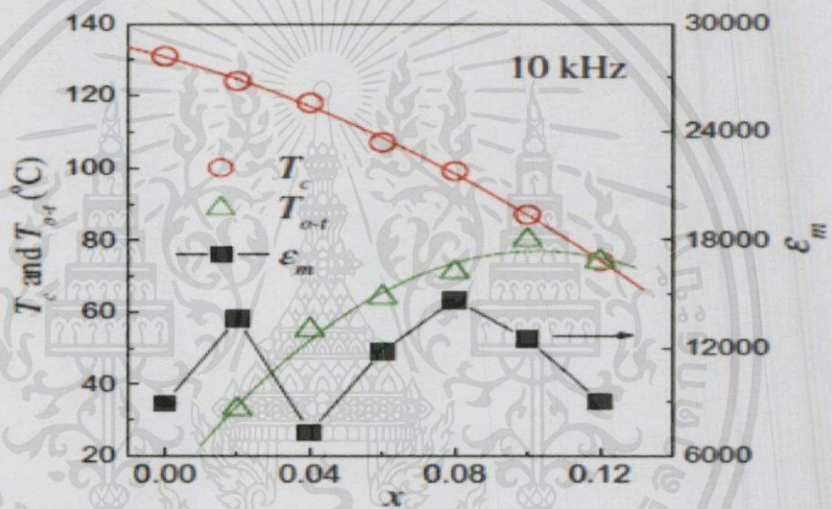
(Narakorn, N. Jalupoom, P. Vaveesorn, N. Thanaboonsombut, A. 2008. "Dielectric and ferroelectric properties of  $Ba(Zr_xTi_{1-x})O_3$  ceramics." *Ceramics International*. 34(4): 779-782.)

จากการทดสอบ P-E hysteresis loops ของตัวอย่าง BZT ที่องค์ประกอบ  $x = 0.05$  และ  $0.08$  เหนืออุณหภูมิ  $1,400$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่าที่ได้ดังในตารางจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสจากเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นเฟสพาราอิเล็กทริก (ใกล้กับ  $T_c$  ของเซรามิก) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสของตัวอย่าง BZT ที่องค์ประกอบ  $x = 0.05$  และ  $0.08$  มีค่า  $P_r$  อยู่ที่  $25 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  และ  $29 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  มีค่า  $E_c$  อยู่ที่  $1.048 \text{ kV}/\text{cm}$  และ  $1.344 \text{ kV}/\text{cm}$  ตามลำดับ และจากรูปที่ 2.12 จะพบว่าอุณหภูมิคูรีของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ BZT จะลดลงขึ้นกับปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ Zr ที่เติมลงไป

ต่อมาในปี 2009 S.J. Kuang และคณะ [13] ได้ทำการสังเคราะห์เซรามิกในระบบ  $\text{Ba}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  หรือ BZT ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $0 \leq x \leq 0.12$  ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ดังรูปที่ 2.13 แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_c$ )  $T_{o-t}$  และค่าสูงสุดของ  $\epsilon_m$  ที่มีการเติมของ Zr ในปริมาณสัดส่วน  $x$  ต่างๆ ที่  $10 \text{ kHz}$



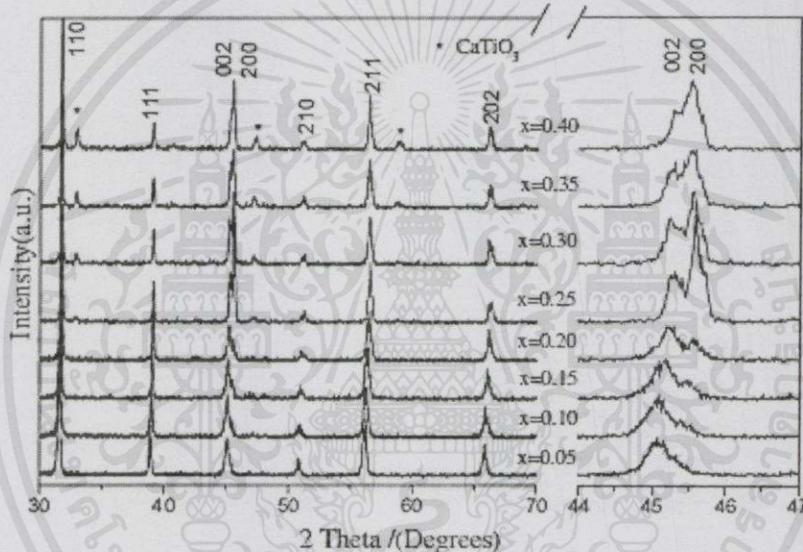
รูปที่ 2.15 แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_c$ )  $T_{o-t}$  และค่า  $\epsilon_m$  ของเซรามิกในระบบ  $\text{Ba}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  ที่มีการเติม Zr ในปริมาณ  $x$  ต่างๆ ที่ความถี่  $10 \text{ kHz}$  [13]

สำหรับเซรามิก  $\text{Ba}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  และ  $T_{o-t}$  พบว่าค่า  $T_{o-t}$  เพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเส้นตรงจากอุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียสเป็น 80 องศาเซลเซียส จากปริมาณ  $x = 0.08$  ค่า  $T_c$  และ  $T_{o-t}$  จะเท่ากับ 99 องศาเซลเซียสและ 71 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในช่วงสัดส่วนองค์ประกอบนี้ของระบบ BZT เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสพาราอิเล็กทริกลดลงเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกหรือค่า  $T_c$  จะลดลงและจากเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นพาราอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้น ( $T_{o-t}$ ) สำหรับเซรามิกบริสุทธิ์อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกจะต่ำกว่าการเติม Zr ลงไป ซึ่งจะไม่พบพีกที่สองของไดอิเล็กทริกที่สังเกตเห็นได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงอุณหภูมินี้ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนเฟสสองเฟสนี้จะเห็นพีคไดอิเล็กทริกเพียงพีคเดียวเนื่องจากการเติมสาร Zr ในการศึกษานี้เซรามิก BZT มีโครงสร้างเฟสเป็นออร์โธโรมบิกที่อุณหภูมิห้อง

หรือสรุปได้ว่าอุณหภูมิกูรีจะลดลงแบบไม่เป็นเส้นตรงจาก 131 องศาเซลเซียสเป็น 74 องศาเซลเซียส เมื่อ  $x$  เพิ่มขึ้น (0 ถึง 12 ในเซรามิก BZT) และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างเตตระโกนอลเป็นออร์โธโรมบิก ( $T_{c \rightarrow t}$ ) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ Zr เพิ่มขึ้น

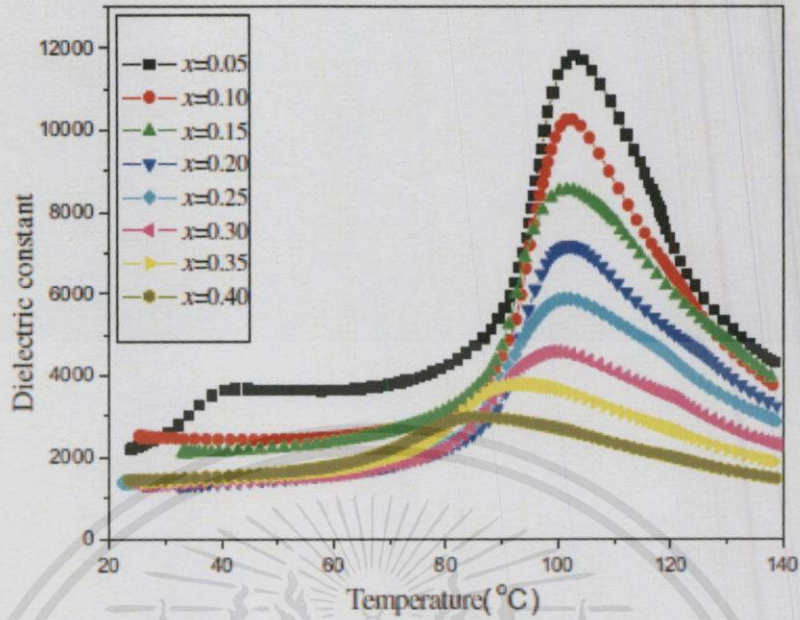
และในปี 2012 Wei Li และคณะ [21] ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติไดอิเล็กทริกเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่สังเคราะห์ขึ้นในระบบ  $(Ba_{1-x}Ca_x)(Ti_{0.95}Zr_{0.05})O_3$  โดยที่  $x = 0.05-0.40$  ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง



รูปที่ 2.16 แสดงผลจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ  $(Ba_{1-x}Ca_x)(Ti_{0.95}Zr_{0.05})O_3$  โดยที่  $x = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35$  และ  $0.40$  [21]

จากรูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่  $x < 0.30$  จะแสดงเพียงโครงสร้างเพอรอฟสไกต์เพียงอย่างเดียว ส่วนที่สัดส่วนที่  $x > 0.30$  จะแสดงเฟสของออร์โธโรมบิกด้วย โดยสังเกตที่พีค 200 จะเห็นว่าพีคมีความเข้มมากขึ้นเมื่อปริมาณ Ca เพิ่มขึ้นและในขณะเดียวกันเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ  $x$  เพิ่มขึ้นนั้นการกระจายของพีคจะมีการเคลื่อนตัวมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่าแลตทิซพารามิเตอร์จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ Ca ลงไปในระบบ เนื่องจากรัศมีไอออนของ  $Ca^{2+}$  นั้นมีค่าน้อยกว่ารัศมีไอออน

ของ  $Ba^{2+}$  จึงทำให้การแทนที่ของ  $Ca^{2+}$  ลงไปนั้นเกิดการหดตัวของผลึกและค่าแลตทิซพารามิเตอร์ก็ลดลง การคำนวณตามไปด้วยยิ่งสั้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกในระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.95}\text{Zr}_{0.05})\text{O}_3$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  ต่างๆ [21]

จากรูปที่ 2.17 ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (ออร์โธโรมบิก-เตตระโกนอล) และที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (เตตระโกนอล-คิวบิก) ที่อุณหภูมิห้อง โครงสร้างของเซรามิกจะมีการเปลี่ยนแปลงทีละน้อย จากเฟสออร์โธโรมบิกเข้าสู่เฟสเตตระโกนอลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของ Ca ที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และสังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นของ Ca จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิคูรีที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  ถึง  $x = 0.30$  นั้นเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก แต่เมื่อปริมาณสัดส่วน  $x > 0.30$  ขึ้นไปนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิคูรีอย่างเห็นได้ชัด คืออุณหภูมิคูรีจะลดต่ำลงมากเมื่อปริมาณของ Ca เพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงและพิคไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิคูรีกว้างขึ้น เมื่อปริมาณ Ca เพิ่มขึ้น (ที่  $x > 0.30$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ ขั้นตอนกระบวนการเตรียมการทดลอง และการหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ของที่องค์ประกอบต่างกัน โดยที่  $x$  มีค่าตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.11 ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผงเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว การเตรียมเม็ดเซรามิกและการตรวจวัดสมบัติต่างๆ ได้แก่ การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกที่เตรียมขึ้นดังต่อไปนี้

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการบดและผสมตัวเนื้อสาร

- 3.1.1 ขวดพลาสติกใส่ลูกบดพร้อมฝาปิด
- 3.1.2 ลูกบดเซอรัโคเนียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 และ 10 มิลลิเมตร
- 3.1.3 ดรอปเปอร์ (Doppler)
- 3.1.4 กระจกบ่อน้ำกลั่น
- 3.1.5 ยางในรถจักรยานยนต์
- 3.1.6 คีมหนีบ
- 3.1.7 ช้อนตักสแตนเลส (Spatula)
- 3.1.8 ช้อนตักสารพลาสติก
- 3.1.9 บีกเกอร์ขนาด 100 600 และ 1,000 มิลลิลิตร
- 3.1.10 ตะแกรงกรอง
- 3.1.11 แท่งแม่เหล็กสำหรับปั่นกวนสาร (Magnetic bar)
- 3.1.12 อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum foil)
- 3.1.13 แผ่นให้ความร้อน (Hot plate) พร้อมตัวผสมสารแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- 3.1.14 หน้ากากทนสารเคมี
- 3.1.15 ถังมือยาง
- 3.1.16 เครื่องชั่งดิจิทัล ความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific

ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1.17 ตู้อบสารอุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
- 3.1.18 เครื่องบดย่อยผสมสารแบบบด

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาแคลไซน์

- 3.1.19 ครกบดสารพร้อมโกร่ง (Agate mortar) สำหรับบดและผสมสาร
- 3.1.20 ถ้วยครุชีเบิลอลูมินา (Alumina crucible) พร้อมฝาปิดจำนวน 2 ลูก
- 3.1.21 แผ่นรองเตาสำหรับวางเม็ดอัดผงเซรามิค
- 3.1.22 เตเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง 1,600 องศาเซลเซียส

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการคัดขนาดผงและการอัดเม็ดเซรามิค

- 3.1.23 ถูชิปพลาสติกสำหรับใส่สารเบอร์ 2 5 และ 7
- 3.1.24 ผ้ากรองตาข่ายขนาด 150 mesh และท่อพีวีซี
- 3.1.25 แปรงขนเส้นเล็กสำหรับคัดขนาด
- 3.1.26 กระจาดฟอยล์
- 3.1.27 ซ้อนตักสแตนเลส
- 3.1.28 แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูป (Block) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตร
- 3.1.29 เครื่องอัดไฮดรอลิก ผลิตโดยบริษัท แสงไทยอินเตอร์เทรด จำกัด ประเทศไทย
- 3.1.30 กล่องใส่เม็ดอัดเซรามิค

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาซินเตอร์และเตรียมขีดผิวเม็ดชิ้นงาน

- 3.1.31 เตเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง 1,600 องศาเซลเซียส
- 3.1.32 กระจาดทรายเบอร์ 600 และ 2,000
- 3.1.33 อุปกรณ์ที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า
- 3.1.34 กาวเงิน
- 3.1.35 พู่กันเบอร์ 26
- 3.1.36 ตู้อบสารอุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาร้อยละการหดตัวและความหนาแน่น

3.1.37 เวอร์เนียแบบดิจิทัล ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร

3.1.38 เครื่องตรวจวัดความหนาแน่น

3.1.39 ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) แบบดิจิทัล

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำขั้วหรือการโพลลิ่ง

3.1.40 น้ำมันซิลิโคน

3.1.41 ดิจิทัลมัลติมิเตอร์

3.1.42 ชุดอุปกรณ์โพลลิ่งสารตัวอย่าง

3.1.43 ชุดควบคุมความร้อน

3.1.44 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์สูง โดยให้ความต่างศักย์ในช่วง 0-10 กิโลโวลต์ กระแส 0-2,000 มิลลิแอมป์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้า

3.1.45 เครื่องวัดฮิสเทอรีซิส ผลิตโดยบริษัท Radiant Technosies, Inc.

3.1.46 เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลิตโดยบริษัท Siemens รุ่น D8 Advance ประเทศเยอรมัน

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 แบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) ความบริสุทธิ์ > 98.5% ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.2 เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ( $\text{ZrO}_2$ ) ความบริสุทธิ์ 99% ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ความบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดยบริษัท Imframmat Advance Materials ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.4 แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ความบริสุทธิ์ 98.5–100.5% ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.5 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ความบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส

3.2.6 เอทานอลความบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

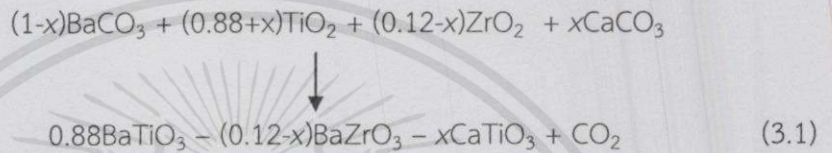
3.2.7 กาวเงิน ผลิตโดยบริษัท Heraeus รุ่น C1000

3.2.8 น้ำดีไอออนในเซชั่น (Deionize Water)

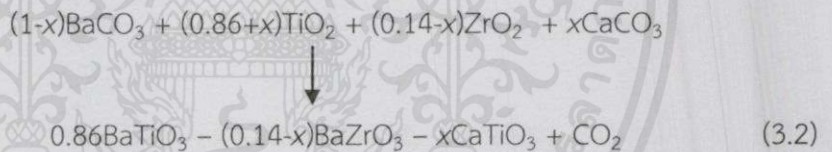
### 3.3 ขั้นตอนกระบวนการเตรียมผงเซรามิก

3.3.1 การเตรียมผงในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$

- 1) คำนวณปริมาณสารในการเตรียมผงในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ซึ่งสามารถเตรียมได้จาก (สมการ 3.1) เมื่อ  $x$  มีค่าเท่ากับ 0.02 0.04 0.06 0.08 และ 0.10



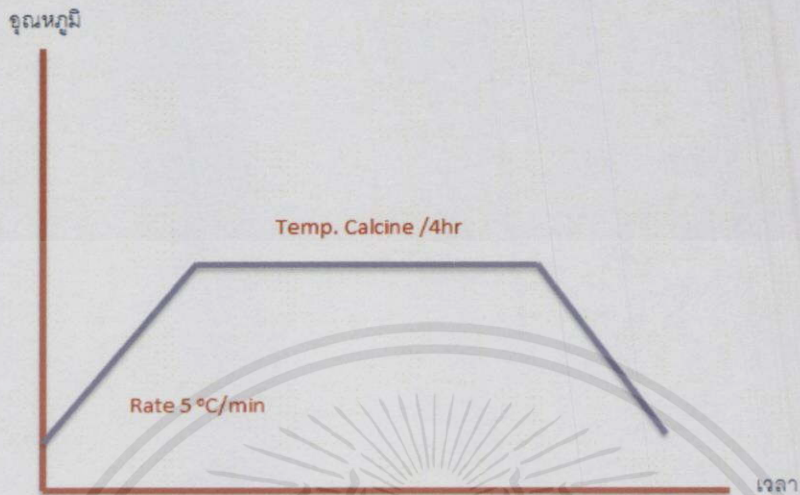
- 2) คำนวณปริมาณสารในการเตรียมผงในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ซึ่งสามารถเตรียมได้จาก (สมการ 3.2) เมื่อ  $x$  มีค่าเท่ากับ 0.01 0.03 0.05 0.07 0.09 และ 0.11



- 3) ชั่งปริมาณสารตามที่คำนวณใส่ลงบนกระดาษฟอยล์
- 4) ใส่สารลงในขวดพลาสติกที่มีลูกบดเซอร์โคเนียบรรจุอยู่ เทตัวทำละลายเอทานอลลงไปจนท่วมเพื่อช่วยให้สารตั้งต้นผสมเข้ากันได้ดี
- 5) ปิดฝาให้สนิทนำขวดพลาสติกไปทำการบดย่อยด้วยลูกบดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 6) นำขวดพลาสติกที่ทำการบดย่อยด้วยลูกบดออก จากนั้นนำมากรองโดยใช้ตะแกรงกรองใสบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร และใช้เอทานอลล้างลูกบดจนสะอาด
- 7) ใส่แท่งแม่เหล็กลงในบีกเกอร์และนำไปประเหยตัวทำละลายเอทานอลบนแผ่นให้ความร้อน โดยทำการปั่นกววนตลอดเวลา เมื่อตัวทำละลายระเหยออกจะแห้งจนเหลือตะกอนของสารที่ต้องการ นำไปอบไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสทิ้งไว้ประมาณ 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะมีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) นำสารที่สังเคราะห์ที่ได้มาบดด้วยครกบดสารแล้วนำไปเผาแคลไซน์ โดยนำสารที่บดแล้วใส่ในครูซิเบิลและปิดฝา ส่วนการใช้ขั้นตอนการเผาแคลไซน์แสดงดังรูป 3.1
- 9) นำสารที่ได้มาบดด้วยครกบดสาร แล้วนำไปคัดขนาดอนุภาค (Sieve)



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงขั้นตอนการเผาแคลไซน์

### 3.3.2 กระบวนการเตรียมเม็ดเซรามิก

โดยนำผงผลึกมาอัดขึ้นรูปเพื่อทำการเผาซินเตอร์ โดยแสดงลำดับขั้นตอนดังนี้

- 1) นำผงสารที่เตรียมได้มาชั่งลงบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ประมาณ 0.90-1.00 กรัม
- 2) นำผงสารมาบดด้วยครกอย่างละเอียดและบดผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ประมาณ 0.5-1 หยด เพื่อช่วยในการประสานให้ผงเกาะกันได้ดีขึ้น
- 3) นำผงสารใส่ลงในแม่พิมพ์โลหะ นำไปอัดด้วยเครื่องอัดระบบไฮดรอลิกด้วยความดัน 1.5 ตันเป็นเวลา 1 นาทีและ 2 ตันเป็นเวลา 1 นาที จะได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 11 มิลลิเมตร
- 4) นำเม็ดที่อัดเรียบร้อยแล้ววางเรียงลงบนแผ่นรองเตา
- 5) นำเข้าเตาเผาเพื่อทำการเผาซินเตอร์ โดยเผาที่อุณหภูมิ 1,350 1,370 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส เพื่อเลือกอุณหภูมิที่ทำให้เซรามิกมีความหนาแน่นมากที่สุด โดยเผาแช่ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อกำจัด PVA ออกไป จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการเผาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงขั้นตอนการเผาซินเตอร์

### 3.4 การตรวจสอบพฤติกรรมกการเกิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) [14]

วิธีการวิเคราะห์จะเริ่มจากการนำเม็ดเซรามิกที่ได้จากการเผาแคลไซน์และการเผาซินเตอร์ไปทำการศึกษาพฤติกรรมกการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง เพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นในตัววัสดุได้ โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นจะประกอบไปด้วย ค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) และค่าความเข้มของรังสีที่ตรวจวัดได้ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแสดงพารามิเตอร์ ชนิดของเฟสที่ปรากฏ โครงสร้างผลึกอย่างคร่าวๆ รวมถึงขนาดของเกรนได้

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.01-10 นาโนเมตร เมื่อรังสีเอกซ์เกิดอันตรกิริยากับสารจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆขึ้น เช่น การดูดกลืน การกระเจิง การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะมีลักษณะเฉพาะที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่าง เพราะของแข็งที่มีความเป็นผลึกนั้นจะมีการจัดเรียงโครงสร้างอะตอมอย่างเป็นระเบียบในสามมิติและมีหลายระนาบ ดังนั้นเมื่อรังสีเอกซ์มาตกกระทบบนผิวของระนาบต่างๆ ด้วยค่ามุมที่เหมาะสมก็จะทำให้เกิดพฤติกรรมกการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นมา เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ จากผลการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ การนำข้อมูลหรือข้อความใด ๆ ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบที่ได้จะถูกนำไปเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบค่าความเป็นผลึกของสารตัวอย่าง โดยปกติผลึกจะมีลักษณะการเรียงตัวของอะตอมเป็นชั้นๆ ซึ่งลักษณะการเรียงตัวนี้จะแตกต่างกันไปในผลึกแต่ละชนิดเป็นค่าเฉพาะตัว เมื่อรังสีเอกซ์กระทบผลึกจะทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีเอกซ์จากระนาบเหล่านี้ โดยจะเป็นไปตามกฎของแบรกก (Bragg's law) ซึ่งสามารถหาระยะห่างระหว่างระนาบได้ โดยอาศัยสมการที่ 3.3

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.3)$$

เมื่อ  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก  $hkl$

$\theta$  คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบนจากรังสีเอกซ์

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

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ได้จากทองแดงมีค่า  $1.54056 \text{ \AA}$

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้สภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้

อุณหภูมิในการวิเคราะห์ 25 องศาเซลเซียส

มุม  $2\theta$  เริ่มต้น-สิ้นสุด 20-80 องศา

Step size 0.02 องศา

Time step 1 วินาที

ข้อมูลที่ได้จากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้สามารถนำมาใช้หาองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้ นอกจากนี้ยังสามารถทำการคำนวณหาปริมาณของเฟสหลัก ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์ที่เกิดขึ้นในเชิงเปรียบเทียบกับเฟสแปลกปลอม โดยอาศัยสมการที่ 3.4

$$\text{ปริมาณของเฟสหลัก (\%wt)} = \frac{I_{\text{perov.}} \times 100}{I_{\text{perov.}} + I_{\text{pyro.}}} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $I_{\text{perov.}}$  คือ ความเข้มสูงสุดของพีค XRD ของเฟสเพอโรฟสไกต์

$I_{\text{pyro.}}$  คือ ความเข้มสูงสุดของพีค XRD ของเฟสแปลกปลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

#### 3.5.1 การหาค่าความหนาแน่น (Density, $\rho$ )

ทำการหาความหนาแน่นของเซรามิกที่เตรียมได้ โดยอาศัยหลักการของอาร์คิมิดีสที่กล่าวไว้ว่า “เมื่อจุ่มของแข็งลงในของเหลวจะมีแรงพยุงที่เกิดขึ้นบนของแข็งนั้น โดยแรงพยุงที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับน้ำหนักของๆเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยน้ำปริมาตรของของแข็ง” วิธีการทำโดยนำเซรามิกที่เตรียมได้นำมาต้มในน้ำกลั่น โดยให้น้ำกลั่นท่วมเม็ดเซรามิกเป็นเวลา 5 ชั่วโมงเพื่อให้น้ำเข้าไปแทนที่อากาศที่อยู่ในรูพรุนของเม็ดเซรามิก จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วทำการชั่งน้ำหนักเม็ดเซรามิกที่อมน้ำโดยการแทนที่ของน้ำเป็น  $w_1$  จากนั้นนำเม็ดเซรามิกไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปชั่งหาน้ำหนักในอากาศเป็น  $w_2$  แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นดังสมการที่ 3.5

$$\rho = \frac{W_2 \times \rho_1}{W_2 - W_1}$$

(3.5)

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของเซรามิก ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_1$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิที่วัด ( $\text{g/cm}^3$ )

$w_1$  คือ น้ำหนักของเซรามิกที่ชั่งในน้ำ (g)

$w_2$  คือ น้ำหนักของเซรามิกที่ชั่งในอากาศ (g)

และสามารถคำนวณได้จากสูตรความหนาแน่นสัมพัทธ์ในสมการที่ 3.6

$$\%TD = \frac{\rho}{\rho_{TD}} \times 100$$

(3.6)

เมื่อ %TD คือ ร้อยละความหนาแน่นเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_{TD}$  คือ ความหนาแน่นของสารตัวอย่างตามทฤษฎี ( $\text{g/cm}^3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 การหาค่าการหดตัวของเซรามิกหลังการเผาซินเตอร์ (Firing shrinkage)

โดยทั่วไปการหดตัวหมายถึงการมีขนาดเล็กลง ซึ่งในทางกายภาพสามารถวัดได้ทั้งเชิงเส้นได้แก่ ความยาว ความกว้าง ความสูงที่มีขนาดลดลงกว่าเดิมหรือสามารถวัดได้ในเชิงปริมาตรนั้นคือความจุ ซึ่งสาเหตุของการหดตัวนี้อาจเนื่องมาจากการสูญเสียองค์ประกอบหรือโครงสร้าง ทำให้องค์ประกอบอื่นเข้ามาใกล้ชิดกันเป็นผลให้ขนาดในภาพรวมลดลงหรือเล็กลง หรืออาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในทำให้เกิดความแน่นตัวมากขึ้น ส่งผลให้ขนาดที่พิจารณาได้จากภายนอกลดลง ในทางเซรามิกนั้น การหดตัวเกิดขึ้นจากทั้งสองสาเหตุ คือการสูญเสียองค์ประกอบและการรวมตัวกันของโครงสร้างภายใน เมื่อทำการเผาซินเตอร์ของชิ้นงานเซรามิกแล้วนำไปทำการตรวจวัดหาค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังเผาซินเตอร์ โดยคำนวณจากสูตรการหดตัวเชิงปริมาตร (Volume Shrinkage) ซึ่งจะคำนวณจากปริมาตรชิ้นงานก่อนเผาและหลังการเผาซินเตอร์ ได้จากสมการที่ 3.7

#### การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก

หลักการแทนที่ด้วยน้ำของอาร์คิมิดีส โดยเริ่มจากการนำเซรามิกที่ต้องการทราบค่ามาต้มในน้ำกลั่นเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในอากาศ จากนั้นจึงนำมาชั่งในน้ำ ( $w_1$ ) ซึ่งขณะเปียกในอากาศ ( $w_2$ ) และนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อกำจัดน้ำออกไปแล้ว นำมาชั่งในอากาศ ( $w_3$ )

$$\rho = \frac{w_3}{w_2 - w_1} \times \rho_{H_2O}$$

(3.7)

#### ขั้นตอนอย่างละเอียด

- 1) นำเม็ดยาไปต้มในน้ำกลั่น นาน 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น 1 วัน
- 2) นำเม็ดยาเซรามิกไปชั่งด้วยวิธีการแทนที่ของน้ำโดยใช้เครื่องชั่งที่มีการจัดอุปกรณ์ให้สามารถชั่งได้ทั้งในน้ำและในอากาศ และบันทึกค่า  $w_1$
- 3) คีบชิ้นงานขึ้นจากน้ำ ชับน้ำส่วนเกินที่ผิวชิ้นงานอย่างรวดเร็วใน 1 นาที โดยไม่ทำให้ผิวชิ้นงานแห้ง แล้วชั่งน้ำหนัก  $w_2$
- 4) นำเม็ดยาเซรามิกไปอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก  $w_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ร้อยละการหดตัว

$$S_L(\%) = \left[ \frac{D_1 - D_2}{D_1} \right] \times 100 \quad (3.8)$$

โดยที่  $S_L$  = ร้อยละการหดตัวของเซรามิก

$D_1$  = เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนเผาผนึก

$D_2$  = เส้นผ่านศูนย์กลางหลังเผาผนึก

## 3.6 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

3.6.1 ตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss)

ที่มาที่ไปของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เริ่มจากการที่โมเลกุลที่มีขั้วเมื่อนำมาวางในสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุลดังกล่าว เกิดเป็นสนามไฟฟ้าภายใน (Internal electric field) ขึ้น ซึ่งอาจจะเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า “Dipole polarization” ซึ่งปริมาณของประจุไฟฟ้า (Electric charge) ที่สะสมอยู่ในสนามไฟฟ้าภายในนี้จะเรียกว่าค่า Capacitance ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่เป็นฉนวนซึ่งวัสดุไดอิเล็กทริก คือ วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric material) มีความเป็นขั้ว (polar) สูงสามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดีหรือเป็นฉนวนไฟฟ้า

สำหรับการตรวจสอบจะทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเม็ดเซรามิกที่ถูกเตรียม เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความถี่นั้นจะมีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำเซรามิกที่ต้องการทดสอบมาทำการขีดให้เรียบและขนานกันทั้ง 2 ด้าน ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 1,000 และ 2,000 เซรามิกที่ได้จะมีความหนา  $\approx$  1 มิลลิเมตร
- 2) ทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 10 นาที
- 3) วัดความหนาแน่นและเส้นผ่านศูนย์กลาง แล้วนำมาหาขั้วโดยใช้กาวเงินทาที่ผิวหน้าของเซรามิกทั้งสองด้าน เเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้อัตราในการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที เพื่อให้กาวเงินแห้งและติดกับผิวเซรามิกได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) นำไปวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LCR meter ที่ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 170 องศาเซลเซียสและความถี่ 1 10 และ 100 kHz แล้วนำไปคำนวณหาความจุไฟฟ้าที่ได้ (สมการที่ 3.9)

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

โดยที่ ;  $\epsilon_r$  = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารตัวอย่าง  
 $d$  = ความหนาของสารตัวอย่าง  
 $\epsilon_0$  = ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ในสุญญากาศ ( $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ )  
 $A$  = พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่าง  
 $C$  = ค่าความจุไฟฟ้าของสารตัวอย่าง

### 3.6.2 ตรวจสอบวงฮิสเทอรีซิส

สำหรับการตรวจสอบวงฮิสเทอรีซิส จะนำเอาชิ้นงานเซรามิกที่ได้ทำขั้วไฟฟ้าไว้มาวางระหว่างตัวยึดจับแล้วนำไปแช่ในน้ำมันซิลิโคนของชุดควบคุมความร้อน เปิดสวิตซ์แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High Voltage Amplifier) และโปรแกรมศึกษาวงฮิสเทอรีซิส RT-66 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ ใสข้อมูลความหนาและพื้นที่ผิวของชิ้นงานเม็ดเซรามิกที่ศึกษา จำนวนเกรนทั้งหมดที่วัดได้ ขนาดเกรนเฉลี่ย ความยาวของเส้นพาดผ่านเกรนและกำหนดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ 3,500 กิโลโวลต์/มิลลิเมตร จากนั้นบันทึกข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและโพลาริเซชันลงแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อนำไปวิเคราะห์และพล็อตเป็นกราฟต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการสังเคราะห์ผงเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว BT-BZ-CT ใน 2 ระบบ คือ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  โดยที่  $x = 0.02-0.11$  ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จากนั้นนำผงเซรามิกที่เตรียมได้ไปทำการอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเซรามิกแล้วนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างกัน ตั้งแต่อุณหภูมิ 1,350 - 1,450 องศาเซลเซียส เพื่อทำการศึกษาหาอัตราส่วนและอุณหภูมิซินเตอร์ที่ดีที่สุดที่ทำให้เม็ดเซรามิกที่เตรียมได้นั้นมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด แล้วจึงนำมาตรวจสอบสมบัติทางกายภาพโดยวัดหาค่าร้อยละความหนาแน่น ร้อยละการหดตัว ตรวจสอบพิกัดเอกลักษณะโครงสร้างของผลึก การเปลี่ยนเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์และเทคนิครามาน (Raman Spectrometer) หลังจากนั้นจึงนำเม็ดเซรามิกที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยวัดค่าไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก เพอร์โรอิเล็กทริกและความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นภายในเม็ดเซรามิก

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก

##### 4.1.1 ร้อยละความหนาแน่นและร้อยละการหดตัว

เมื่อเราทำการสังเคราะห์และขึ้นรูปจนได้เม็ดเซรามิก ก็จะนำเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้มาตรวจวัดหาค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) โดยเริ่มจากการนำเม็ดเซรามิกมาต้มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อนำมาคำนวณหาร้อยละความหนาแน่นและร้อยละการหดตัวของเม็ดเซรามิก ( $s$ ) เป็นลำดับต่อไป ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงร้อยละความหนาแน่นของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,350 1,375 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

สัดส่วนองค์ประกอบ (x)	% ค่าความหนาแน่น ( $\rho$ )				
	$T_s = 1,350$	$T_s = 1,375$	$T_s = 1,400$	$T_s = 1,425$	$T_s = 1,450$
0.03	84.9±0.49	86.9±0.95	86.3±0.00	82.5±4.12	86.0±0.00
0.05	90.9±0.00	89.3±1.70	91.0±1.69	92.0±0.00	90.5±0.00
0.07	85.9±2.90	84.3±0.52	84.2±1.07	85.2±1.29	86.3±1.56
0.09	93.8±0.00	92.7±3.27	95.9±1.21	83.7±0.79	86.3±0.42
0.11	87.3±7.18	87.2±6.37	91.8±0.61	84.5±0.53	84.6±2.83

ตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละการหดตัวของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,350 1,375 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

สัดส่วนองค์ประกอบ (x)	% การหดตัว (s)				
	$T_s = 1,350$	$T_s = 1,375$	$T_s = 1,400$	$T_s = 1,425$	$T_s = 1,450$
0.03	1.3±0.39	1.9±0.06	6.9±1.29	7.6±0.58	7.6±0.71
0.05	2.4±0.32	2.5±0.39	7.5±0.71	9.3±0.06	7.5±0.58
0.07	1.4±0.13	1.3±0.06	9.3±0.13	9.4±1.29	7.3±0.06
0.09	1.9±0.13	2.2±0.19	8.0±0.06	8.1±0.96	8.4±0.71
0.11	1.5±0.13	2.0±0.26	8.1±0.06	8.1±0.06	8.2±0.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละความหนาแน่นของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,350 1,375 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

สัดส่วน องค์ประกอบ (x)	% ความหนาแน่น ( $\rho$ )				
	$T_s = 1,350$	$T_s = 1,375$	$T_s = 1,400$	$T_s = 1,425$	$T_s = 1,450$
0.02	88.9±0.89	89.5±0.34	91.2±0.08	90.7±0.28	90.5±0.59
0.04	83.6±0.11	85.1±0.58	89.1±1.05	87.4±1.52	87.7±1.29
0.06	82.3±0.53	82.7±0.13	84.7±0.28	86.4±1.35	89.15±0.38
0.08	89.8±2.49	90.6±0.28	93.3±0.85	94.7±0.11	93.6±0.76
0.10	79.5±0.31	80.8±0.59	79.9±2.16	82.9±0.93	81.8±1.27

ตารางที่ 4.4 แสดงร้อยละการหดตัวของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,350 1,375 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

สัดส่วน องค์ประกอบ (x)	% การหดตัว (s)				
	$T_s = 1,350$	$T_s = 1,375$	$T_s = 1,400$	$T_s = 1,425$	$T_s = 1,450$
0.02	9.2±0.45	10.4±0.13	11.6±0.77	10.8±0.26	11.8±0.58
0.04	4.9±0.38	5.5±0.20	7.1±0.70	7.1±0.19	9.0±0.38
0.06	3.5±0.07	3.6±0.13	5.9±0.90	6.4±0.13	8.3±0.45
0.08	10.6±0.52	10.8±0.00	12.2±1.10	11.7±0.51	13.4±0.00
0.10	2.0±0.06	2.5±0.26	3.3±0.83	3.8±0.13	5.8±0.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 และ 4.3 ซึ่งแสดงร้อยละความหนาแน่นของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1,350-1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าเม็ดเซรามิกที่สังเคราะห์ได้จากทั้งสองระบบมีค่าความหนาแน่นมากที่สุดโดยเฉลี่ยอยู่ที่  $5.65 \pm 0 \text{ g/cm}^3$  และ  $5.70 \pm 0 \text{ g/cm}^3$  ตามลำดับ ซึ่งในทางทฤษฎีนั้น แบริยมโททานเตมีค่าความหนาแน่นอยู่ที่  $6.02 \text{ g/cm}^3$  และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของเม็ดเซรามิกที่สังเคราะห์ได้กับค่าความหนาแน่นในทางทฤษฎี พบว่าเม็ดเซรามิกที่สังเคราะห์จากทั้งสองระบบมีค่าความหนาแน่นที่ร้อยละ  $95.9 \pm 1.21$  และร้อยละ  $94.7 \pm 0.11$  ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความหนาแน่นที่วัดได้นั้นเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับผู้ทดลองและตัวแปรอื่นๆ เช่น เครื่องมืออาจมีความผิดพลาดเกิดการสั่นสะเทือนเป็นผลอาจทำให้การวัดค่าความหนาแน่นนั้นไม่สม่ำเสมอหรือไม่เท่ากันในทุกๆ เม็ดของเซรามิกในระบบ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จึงไม่ใช่นัยสำคัญกับอุณหภูมิการเผาซินเตอร์มากนัก

และเมื่อพิจารณาค่าร้อยละการหดตัวที่วัดได้จากตารางที่ 4.2 และ 4.4 ซึ่งแสดงร้อยละการหดตัวของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1,350-1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าค่าการหดตัวที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1-9 และอยู่ในช่วงร้อยละ 2-13 ตามลำดับ โดยเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มสูงขึ้นค่าร้อยละการหดตัวของเม็ดเซรามิกจะมีค่าสูงขึ้น ค่าร้อยละการหดตัวแปรผันตรงกับอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ เนื่องจากกระบวนการเผาซินเตอร์จะทำให้อนุภาคในเม็ดเซรามิกเกิดการยึดเกาะกันมากขึ้นด้วยขอบเกรน การเติบโตของเกรนจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการลดความบิดเบี้ยวและความบกพร่องของเกรนลง ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มสูงขึ้น อะตอมจะเกิดการเคลื่อนที่อย่างรุนแรงมากขึ้น ทำให้พื้นที่ระหว่างเกรนสองเกรนมีการสัมผัสกันมากขึ้น เนื่องจากเกรนมีการขยายตัวทางความร้อนสูงขึ้น ทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาซินเตอร์แล้วเม็ดเซรามิกมีค่าการหดตัวสูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าร้อยละความหนาแน่นและร้อยละการหดตัวที่เกิดขึ้นของเม็ดเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในสองระบบนี้ ก็จะพบว่าที่อุณหภูมิสูงของการเผาซินเตอร์นั้นต่างก็ผลทำให้เม็ดเซรามิกมีค่าความหนาแน่นและการหดตัวของเม็ดเซรามิกที่สูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสมบัติทางกายภาพของวัสดุนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางไฟฟ้า นั่นก็หมายความว่า ถ้าสามารถสังเคราะห์วัสดุที่มีความหนาแน่นและการหดตัวที่สูงได้ ก็มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้อำนาจไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัววัสดุนั้นมีค่าที่ดีตามไปด้วย เพราะหากเม็ดเซรามิกมีความหนาแน่นสูง การที่อนุภาคจะเกิดการยึดเกาะกันและความแน่นตัวก็จะมีมากขึ้น โดยไม่ปรากฏรูพรุนหรือช่องว่างระหว่างอนุภาคมากเกินไป เมื่อเรานำไปวัดสมบัติทางไฟฟ้าก็จะสามารถวัดค่าออกมาได้เท่ากันในทุกๆ ระยะเวลาบนพื้นที่ของเม็ดเซรามิก หากเม็ดเซรามิกนั้นมีความหนาแน่นต่ำหรือปรากฏช่องว่างระหว่างอนุภาคมากเกินไป ก็อาจจะส่งผลให้อำนาจไฟฟ้าที่วัดได้ไม่

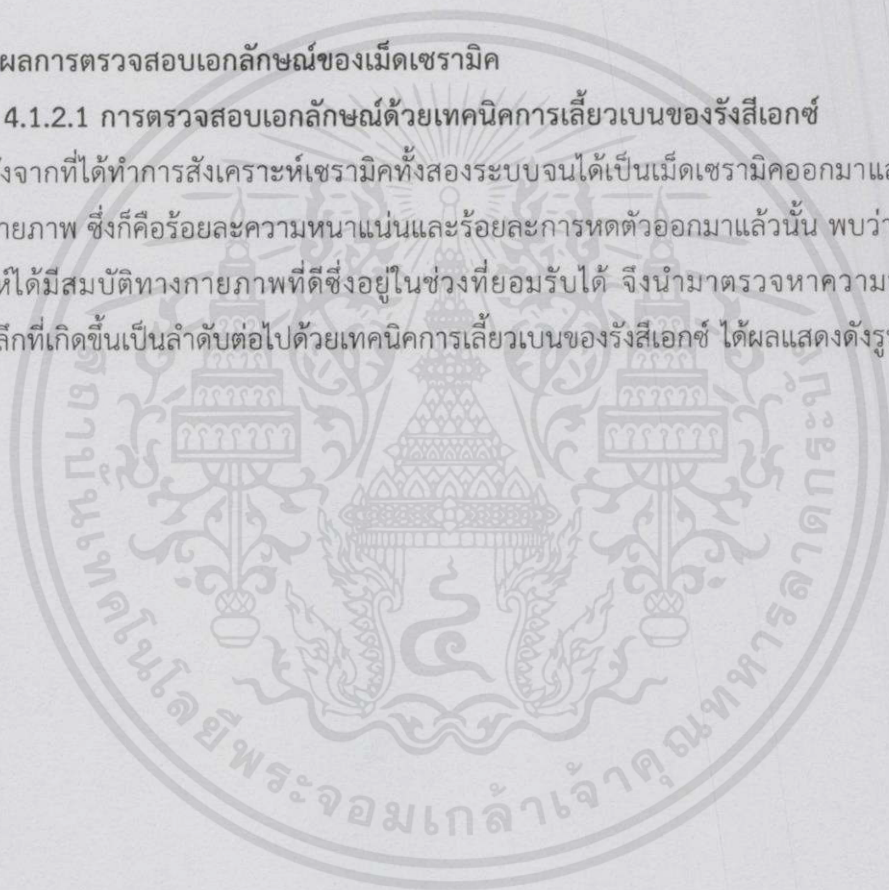
เท่ากันในทุกๆระนาบที่ทำการวัด เนื่องจากบริเวณที่เป็นรูพรุนนั้นวัสดุจะแสดงสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้าขึ้นมา หรือกล่าวได้ว่า สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกในเม็ดเซรามิก ณ จุดที่เกิดรูพรุนนั้นจะไม่สามารถวัดค่าออกมาได้

ซึ่งจากผลการในงานวิจัยนี้ก็พบว่าเซรามิกที่เตรียมได้ในทั้งสองระบบนี้ต่างก็สามารถเตรียมให้มีทั้งค่าความหนาแน่นและการหดตัวที่สูงได้ด้วยการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยมีประโยชน์ในแง่ของการลดพลังงาน ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ในทั้งสองระบบ

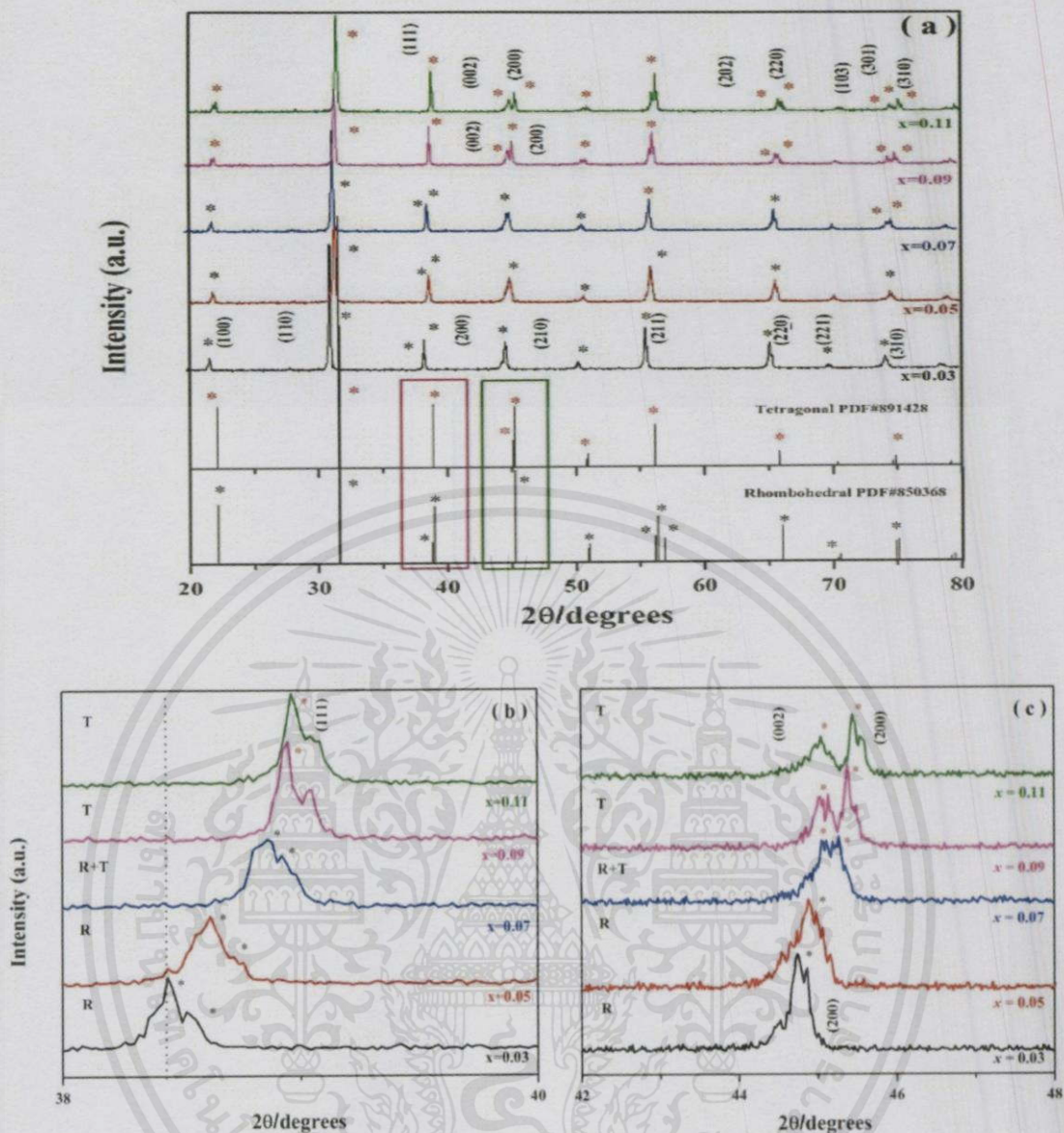
#### 4.1.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเม็ดเซรามิก

##### 4.1.2.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

หลังจากที่ได้ทำการสังเคราะห์เซรามิกทั้งสองระบบจนได้เป็นเม็ดเซรามิกออกมาและทำการวัดสมบัติทางกายภาพ ซึ่งก็คือร้อยละความหนาแน่นและร้อยละการหดตัวออกมาแล้วนั้น พบว่าเม็ดเซรามิกที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติทางกายภาพที่ดีซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จึงนำมาตรวจหาความบริสุทธิ์และโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นเป็นลำดับต่อไปด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 (a) แสดงรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  (b) แสดงการขยายพิกในช่อง  $2\theta$  เท่ากับ 38-40 และ (c) แสดงการขยายพิกในช่อง  $2\theta$  เท่ากับ 42-48 ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการศึกษาเฟสที่เกิดขึ้นและโครงสร้างผลึกของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1 (a), (b) และ (c) ซึ่งจากรูปพบว่าสามารถเตรียมผลึกของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ให้มีความบริสุทธิ์ได้ เนื่องจากลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับค่ามาตรฐานจาก PDF#850368 ซึ่งมีเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์แบบรอมโบฮีดรัลและจากรูปแบบของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นนั้นพบว่าสามารถเตรียมเพอโรฟสไกต์ที่มีความบริสุทธิ์ได้ในทุกๆสัดส่วนองค์ประกอบ เนื่องจากไม่พบฟีกของเฟสแปลกปลอมอื่นปรากฏอยู่ในโครงสร้างเลย

โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03$  นั้นฟีกหลักที่เกิดขึ้นนั้นก็จะเป็นฟีกเอกลักษณ์ของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์สอดคล้องกับไฟล์มาตรฐาน PDF#850368 และเมื่อสัดส่วนของ  $x$  เพิ่มขึ้นจะพบว่าฟีกที่ปรากฏจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงไปแสดงฟีกโครงสร้างเฟสเตตระโกนอลขึ้น ซึ่งจะชัดเจนที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  ซึ่งจะแสดงรูปแบบฟีกที่ปรากฏเฉพาะเฟสของเตตระโกนอลเพียงเฟสเดียวเท่านั้น ตามรูปแบบไฟล์มาตรฐาน PDF#891428 และเพื่อให้เห็นความแตกต่างได้ชัดเจนมากขึ้น จึงได้ทำการขยายฟีกในช่วง  $2\theta$  เท่ากับ  $38-40$  และช่วง  $2\theta$  เท่ากับ  $42-48$  ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (b) และ (c) ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.1 (b) พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03-0.07$  นั้นที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $38.4$  (ระนาบ 111) จะมีฟีกเกิดขึ้นสองฟีกซึ่งแสดงโครงสร้างเฟสของรอมโบฮีดรัล ตามไฟล์มาตรฐาน PDF #850368 และเมื่อปริมาณของ  $x$  หรือ  $\text{CaTiO}_3$  ที่เจือลงไปเพิ่มสูงขึ้น คือ ตั้งแต่ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.09-0.11$  นั้นจะปรากฏฟีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $38.4$  (ระนาบ 111) เกิดขึ้นเพียงฟีกเดียวซึ่งเป็นฟีกแสดงเอกลักษณ์ที่แสดงโครงสร้างเฟสแบบเตตระโกนอล ตามไฟล์มาตรฐาน PDF#891428 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  นั้นก็อาจเป็นเพราะว่าเกิดเฟสเตตระโกนอลในโครงสร้างขึ้นเพียงเฟสเดียวเท่านั้น นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นอีกด้วยว่าฟีกในระนาบ 111 นี้ เมื่อปริมาณของ  $\text{CaTiO}_3$  เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ฟีกเกิดการเลื่อนตำแหน่งไปทางขวามากยิ่งขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าผลึกมีขนาดเล็กลงเป็นผลมาจากการเจือปริมาณของ  $\text{CaTiO}_3$  ลงไปเพิ่มมากขึ้น จะทำให้อะตอมของ  $\text{Ca}^{2+}$  เข้าไปแทนที่อะตอมของ  $\text{Ba}^{2+}$  มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการเข้าไปแทนที่อะตอมของ  $\text{Ba}^{2+}$  ด้วย  $\text{Ca}^{2+}$  นั้นมีผลทำให้ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ในแต่ละยูนิตเซลล์นั้นลดลง ส่งผลให้อนุภาคยึดติดกันแน่นขึ้นและส่งผลให้ผลึกโดยรวมของเม็ดเซรามิกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  หรือปริมาณการเจือของแคลเซียมไททานตเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง

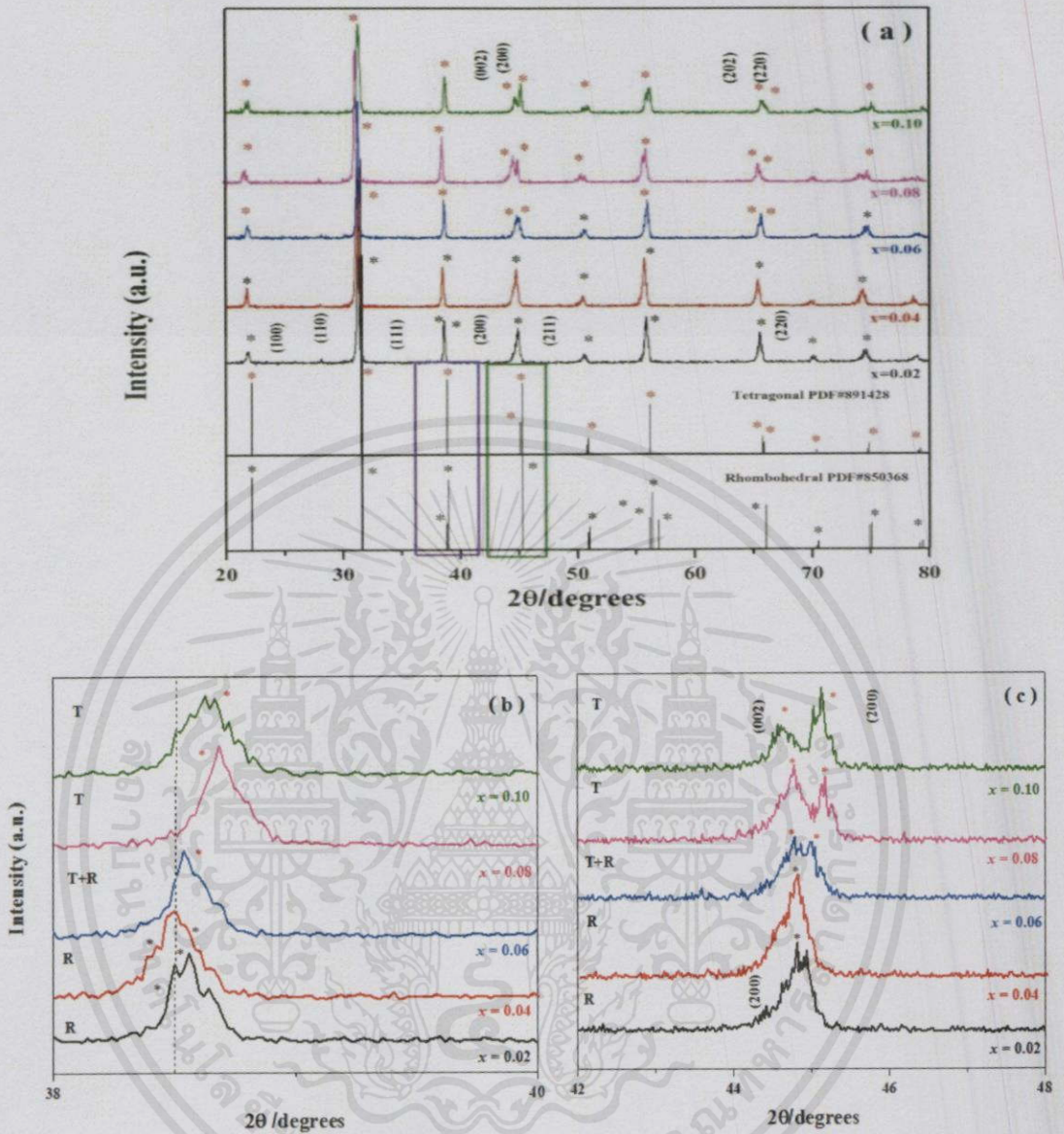
จากรูปที่ 4.1 (c) พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03-0.05$  ฟีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $38.4$  (ระนาบ 111) จะเกิดขึ้นเพียงฟีกเดียวซึ่งแสดงโครงสร้างเฟสของรอมโบฮีดรัลตามไฟล์มาตรฐาน PDF #850368 และเมื่อปริมาณของ  $x$  หรือ  $\text{CaTiO}_3$  ที่เจือลงไปเพิ่มสูงขึ้นก็จะส่งผลให้ฟีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $38.4$  (ระนาบ 111) นั้นเกิดการแยกออกเป็นสองฟีกซึ่งเป็นฟีกเอกลักษณ์แสดงโครงสร้างเฟสแบบเตตระโกนอล ตามไฟล์มาตรฐาน PDF#891428 โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  นั้นก็อาจเป็นเพราะว่าเกิดเฟสเตตระโกนอลขึ้นเพียงเฟสเดียวเท่านั้น นั่นก็หมายความว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03-0.05$  นั้นเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ 0.86BT-BZ-CT จะแสดงโครงสร้างผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบรอมโบฮีดรัล ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.07$  นั้นจะแสดงโครงสร้างผลึกแบบผสม คือมีทั้งเฟสรอมโบฮีดรัลและเฟสเตตระโกนอลเกิดขึ้นในโครงสร้าง แต่เมื่อปริมาณ  $x$  หรือ  $\text{CaTiO}_3$  เพิ่มสูงขึ้นที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.09-0.11$  นั้นโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจะเหลือเพียงเฟสเดียวคือเฟสของเตตระโกนอลเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  ซึ่งก็พบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้ให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wei Li ซึ่งได้ทำการสังเคราะห์เฟสโซอิลิกทริกไรสารตะกั่วในระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.95}\text{Zr}_{0.05})\text{O}_3$  โดยที่  $x = 0.12-0.18$  พบว่าเซรามิกจะมีการเปลี่ยนโครงสร้างเฟสจากรอมโบฮีดรัลไปเป็นโครงสร้างเตตระโกนอล เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  หรือปริมาณของแคลเซียมไททานेटเพิ่มสูงขึ้น [17]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 (a) แสดงรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  (b) แสดงการขยายพีกในช่วง  $2\theta$  เท่ากับ 38-40 และ (c) แสดงการขยายพีกในช่วง  $2\theta$  เท่ากับ 42-48 ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการศึกษาเฟสที่เกิดขึ้นและโครงสร้างผลึกของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.2 (a), (b) และ (c) พบว่าสามารถเตรียมผลึกของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ให้มีความ

บริสุทธิ์ได้ เนื่องจากลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับไฟล์มาตรฐานตาม PDF#850368 ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์แบบรอมโบฮีดรัล และจากรูปแบบของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นนั้นพบว่าสามารถเตรียมเพอโรฟสไกต์ที่มีความบริสุทธิ์ได้ในทุกๆ สัดส่วนองค์ประกอบเนื่องจากไม่พบฟีกของเฟสแปลกปลอมอื่นปรากฏอยู่ในโครงสร้างเลย

โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  จะมีฟีกที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นฟีกที่แสดงโครงสร้างเฟสรอมโบฮีดรัลตามไฟล์มาตรฐาน PDF#850368 แต่เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  เพิ่มขึ้นหรือปริมาณของ  $\text{CaTiO}_3$  เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้โครงสร้างเฟสเกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยจะสังเกตได้จากรูปแบบของฟีกบางตำแหน่งเกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.10$  ซึ่งจะปรากฏรูปแบบฟีกของโครงสร้างเฟสเตตระโกนอลเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยฟีกที่เกิดขึ้นก็สอดคล้องกับไฟล์มาตรฐาน PDF#891428 ซึ่งแสดงโครงสร้างเตตระโกนอล และเพื่อให้ได้เห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นจึงได้ทำการขยายฟีกในช่วง  $2\theta$  เท่ากับ 38-40 และช่วง 44-48 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (b) และ (c) จากรูปที่ 4.2 (b) พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02-0.04$  นั้นฟีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 38.4 (ระนาบ 111) จะเกิดขึ้นสองฟีกซึ่งแสดงโครงสร้างเฟสของรอมโบฮีดรัลตามไฟล์มาตรฐาน PDF#850368 ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.06$  นั้นจะแสดงโครงสร้างผลึกแบบผสมคือมีทั้งเฟสรอมโบฮีดรัลและเตตระโกนอลเกิดขึ้นในโครงสร้าง แต่เมื่อปริมาณของ  $x$  หรือ  $\text{CaTiO}_3$  ที่เจือลงไปเพิ่มสูงขึ้นคือตั้งแต่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08-0.10$  นั้นฟีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 38.4 นั้นจะปรากฏเหลือเพียงฟีกเดียว (ระนาบ 111) ซึ่งแสดงเอกลักษณ์ของโครงสร้างแบบเตตระโกนอลตามไฟล์มาตรฐาน PDF#891428 นอกจากนี้ จะสังเกตเห็นอีกด้วยว่า ฟีกในระนาบ 111 นี้เมื่อปริมาณของ  $\text{CaTiO}_3$  เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ฟีกเกิดการเลื่อนตำแหน่งไปทางขวามากยิ่งขึ้น นั่นก็อาจเป็นเพราะว่าผลึกรวมมีขนาดเล็กลง ซึ่งก็เป็นผลมาจากการเจือปริมาณของ  $\text{CaTiO}_3$  ลงไปเพิ่มมากขึ้นจะทำให้อะตอมของ  $\text{Ca}^{2+}$  ที่จะเข้าไปแทนที่อะตอมของ  $\text{Ba}^{2+}$  นั้นมีมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการเข้าไปแทนที่อะตอมของ  $\text{Ba}^{2+}$  ด้วย  $\text{Ca}^{2+}$  นั้นจะมีผลทำให้ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ในแต่ละยูนิตเซลล์นั้นลดลง จึงส่งผลให้อนุภาคยึดติดกันแน่นขึ้นและส่งผลให้ผลึกโดยรวมของเม็ดเซรามิกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  หรือปริมาณการเจือของแคลเซียมไททานตเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง

และจากรูปที่ 4.2 (c) พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02-0.04$  นั้นฟีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 45 (ระนาบ 200) เกิดเพียงฟีกเดียวซึ่งเป็นฟีกเอกลักษณ์ของโครงสร้างเฟสรอมโบฮีดรัลตามไฟล์มาตรฐาน PDF#850368 ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.06-0.10$  นั้นฟีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 45 นั้นเกิดการแยกออกเป็นสองฟีกอย่างชัดเจนคือ ฟีกระนาบ 002 และ 200 ซึ่งแสดงโครงสร้างเฟสของเตตระโกนอลตามไฟล์มาตรฐาน PDF#891428 นั่นก็หมายความว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.06$  นั้นเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  จะแสดงโครงสร้างผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

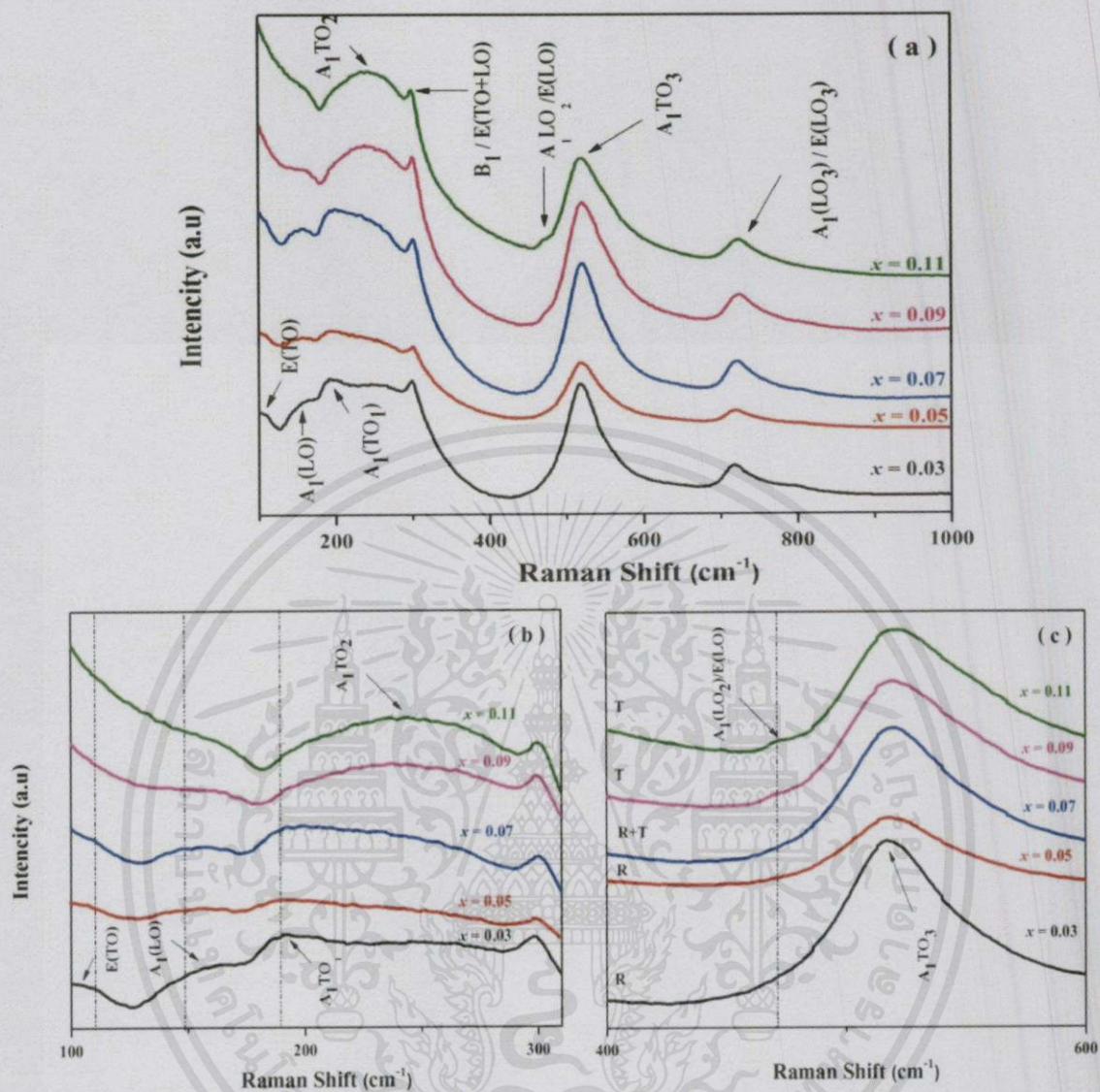
แบบผสมคือมีทั้งเฟสรวมโบฮีตรัลและเตตระโกนอลในโครงสร้าง แต่เมื่อปริมาณ  $x$  หรือ  $\text{CaTiO}_3$  เพิ่มสูงขึ้นที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08-0.11$  นั้นโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจะเหลือเพียงเฟสเดียวคือเฟสของเตตระโกนอลเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในเซรามิกทั้งสองระบบแล้วนั้น พบว่าเซรามิกทั้งสองระบบต่างก็มีจุดร่วมเฟสหรือรอยต่อพหุสัมพันธ์ระหว่างเฟสรวมโบฮีตรัลกับเตตระโกนอลขึ้นในโครงสร้าง โดยเมื่อพิจารณาจากรูปแบบพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น พบว่าเซรามิกทั้งสองระบบมีจุดร่วมเฟสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่คล้ายกัน คือ เซรามิกจะแสดงเฟสร่วมระหว่างเฟสรวมโบฮีตรัลกับเตตระโกนอลที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02-0.05$  เท่านั้น โดยเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  หรือ  $\text{CaTiO}_3$  เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนเฟสไปอย่างสมบูรณ์เหลือเพียงเฟสของเตตระโกนอลเพียงเฟสเดียว ซึ่งจะเห็นพีคที่เกิดขึ้นแสดงโครงสร้างของเตตระโกนอลได้อย่างชัดเจนที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  มากที่สุดในทั้งสองระบบ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงพีคที่เกิดขึ้น จะพบว่าทั้งสองระบบต่างก็สามารถเตรียมเซรามิกที่มีความบริสุทธิ์ได้เท่าเทียมกัน ซึ่งสังเกตได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะไม่พบพีคของสิ่งเจือปนใดๆเกิดขึ้น ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและส่งผลต่อการวัดสมบัติทางไฟฟ้าในลำดับต่อไป เนื่องจากหากเซรามิกที่เราเตรียมมีสิ่งเจือปนอยู่อาจส่งผลให้ค่าสมบัติทางไฟฟ้าที่วัดได้เกิดการผิดเพี้ยนไป ดังนั้นการตรวจสอบความบริสุทธิ์และโครงสร้างผลึกในเม็ดเซรามิกก่อนนำไปทำการตรวจวัดหาสมบัติทางไฟฟ้าจึงถือว่ามีความสำคัญมาก

#### 4.1.2.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน

เนื่องจากการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นั้นเป็นการหาความบริสุทธิ์และโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้น โดยข้อมูลที่ตรวจได้จะไม่ละเอียดเท่าที่ควร ซึ่งหากวัสดุมีเฟสร่วมหลายเฟสโดยที่เฟสใดเฟสหนึ่งเกิดขึ้นน้อยมาก การตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นั้นจะไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคอื่นที่มีความละเอียดมากกว่า ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกเทคนิครามานมาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นในตัวเซรามิก ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 (a) แสดงค่ารามานของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  (b) แสดงกราฟการขยายพิกัดที่ช่วง  $100\text{ cm}^{-1}$  และ (c) แสดงกราฟการขยายพิกัดที่ช่วง  $400 - 600\text{ cm}^{-1}$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์  $1,400$  องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.3 (a) พบว่าโครงสร้างเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  โดยที่  $x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.09$  และ  $0.11$  ตามลำดับ จะมีโครงสร้างเป็นเพอร์โรอิเล็กทริก (เป็นลักษณะโครงสร้างที่ไม่สมมาตร) เนื่องจากเทคนิครามานจะไม่ตอบสนองต่อวัสดุที่มีโครงสร้างสมมาตร แต่จากรูปที่ 4.2 (a) นั้นพบว่าเกิดพิกรามานขึ้น เมื่อนำวัสดุไปตรวจวัดทำให้สามารถคาดเดาได้ว่าเซรามิกที่สังเคราะห์ขึ้นมีความเป็นเพอร์โรอิเล็กทริก และเมื่อพิจารณาพิกที่เพิ่มขึ้นพบว่าจะมี

3 พีคหลักที่แสดงเอกลักษณ์ความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกได้แก่ พีคที่ตำแหน่ง  $311 \text{ cm}^{-1}$  [ $B_1/E(\text{TO}+\text{LO})$ ],  $530 \text{ cm}^{-1}$  [ $A_1(\text{TO}_3)$ ] และที่ตำแหน่ง  $717 \text{ cm}^{-1}$  [ $A_1(\text{LO}_3)/E(\text{LO}_3)$ ] ซึ่งจะพบ 3 พีคหลักนี้ปรากฏในทุกๆ สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เซรามิกที่เรานำมาตรวจวัดนั้นมีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก

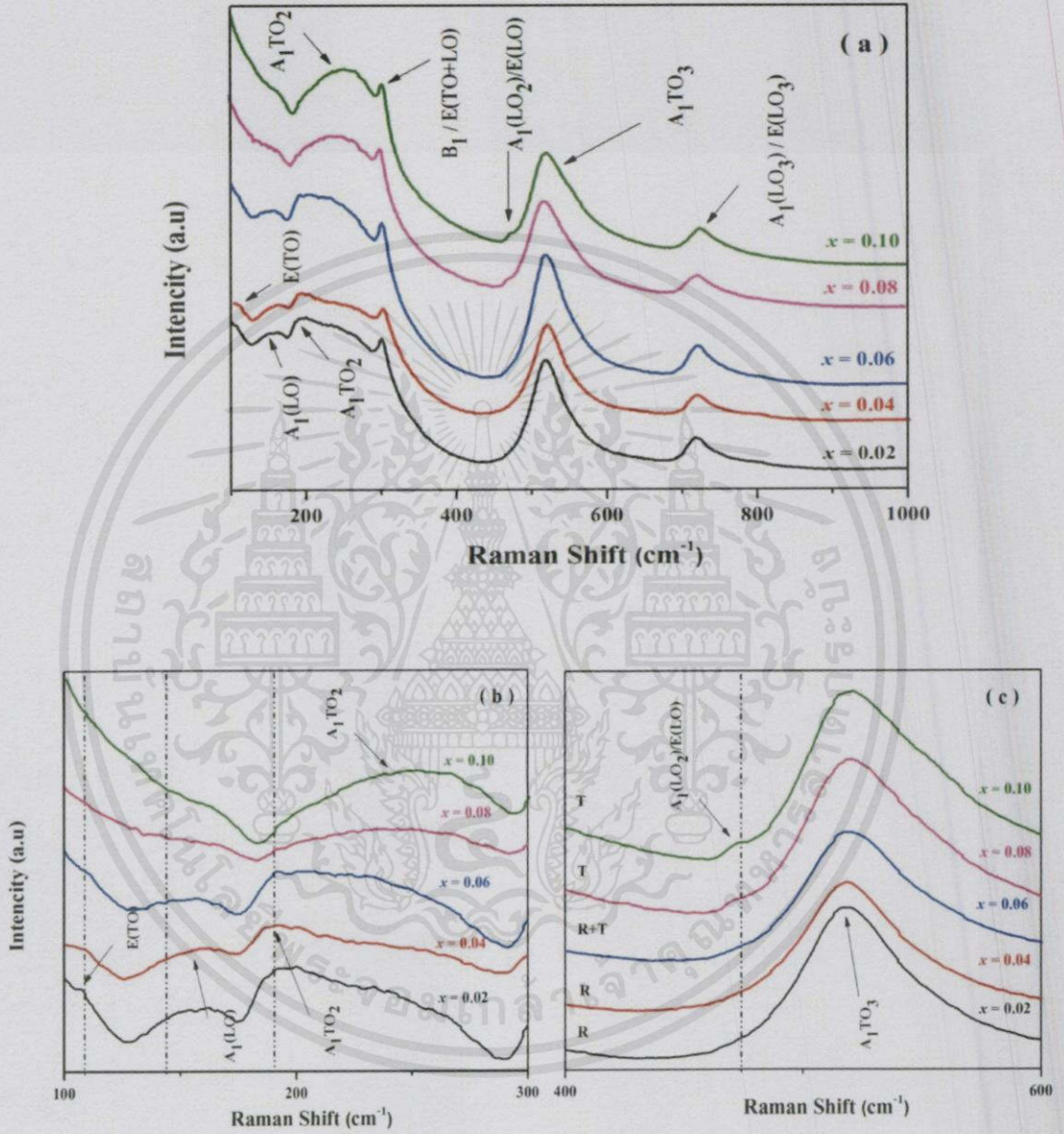
ต่อมาเมื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้น พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03-0.05$  นั้น จะแสดงพีคเอกลักษณ์ของโครงสร้างเฟสรวมโบฮีตรัลเกิดขึ้น 3 พีคหลักคือ พีคที่ตำแหน่งตำแหน่ง  $105 \text{ cm}^{-1}$  [ $E(\text{TO})$ ],  $152 \text{ cm}^{-1}$  [ $A_1(\text{LO})$ ] และพีคที่ตำแหน่ง  $184 \text{ cm}^{-1}$  [ $A_1(\text{TO}_1)$ ] นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าที่ พีค [ $A_1\text{TO}_1$ ] จะพบจุดร่วมเฟสคาดว่าเป็นจุดร่วมระหว่างเฟสรวมโบฮีตรัลกับเฟสออร์โธโรมบิก แต่เนื่องจากว่าเราไม่สามารถเห็นพีคที่แสดงเฟสออร์โธโรมบิกเพราะว่าที่ตำแหน่งนี้มีเฟสรวมโบฮีตรัลอยู่มาก เกิน (Rhombohedral rich) ขณะที่เฟสออร์โธโรมบิกมีน้อยมาก ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในรูป 4.3 (b) ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.07$  นั้นจะยังคงพบพีคของเฟสรวมโบฮีตรัลที่เกิดขึ้นและยังปรากฏ พีคเอกลักษณ์ของเฟสเตตระโกนอลเพิ่มขึ้นมาที่ตำแหน่ง  $266 \text{ cm}^{-1}$  [ $A_1(\text{TO}_2)$ ] นั้นหมายความว่าที่สัดส่วน องค์ประกอบ  $x = 0.07$  นั้นเกิดเฟสร่วมระหว่างรวมโบฮีตรัลและเตตระโกนอลขึ้นในโครงสร้าง ซึ่ง สอดคล้องกับผลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ก่อนหน้านี้ที่สามารถยืนยันได้ ว่า ณ สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05-0.07$  นั้นมีเฟสร่วมหรือรอยต่อพหุสัณฐานระหว่างรวมโบฮีตรัลกับ เตตระโกนอลขึ้น

เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.09-0.11$  นั้นจะเห็นได้ว่าพีคตำแหน่งที่แสดง เอกลักษณ์ของเฟสรวมโบฮีตรัลนั้นหายไป แต่จะปรากฏพีคที่ตำแหน่งใหม่ซึ่งเป็นพีคที่แสดงเฟสของ เตตระโกนอล คือ พีคที่ตำแหน่ง  $266 \text{ cm}^{-1}$  [ $A_1(\text{TO}_2)$ ] และพีคที่ตำแหน่ง  $487 \text{ cm}^{-1}$  [ $A_1\text{LO}_2/E(\text{LO})$ ] [22] โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.3 (c) และจากสัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  ซึ่งหมายความว่า เซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x \text{CaTiO}_3$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.09-0.11$  นั้นจะไม่แสดงเฟสร่วมระหว่างรวมโบฮีตรัลกับเตตระโกนอลขึ้นแต่จะเหลือเพียงโครงสร้าง ผลึก เตตระโกนอลเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสี เอกซ์ก่อนหน้านี้โดยสามารถยืนยันได้ว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.09-0.11$  วัสดุเซรามิกจะไม่สามารถ แสดงเฟสร่วมเกิดขึ้นได้

จากรูปที่ 4.4 (a), (b) และ(c) แสดงค่ารามานของเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  พบว่าเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x \text{CaTiO}_3$  นั้นมีโครงสร้างเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก เนื่องจากสามารถตรวจวัดด้วยเทคนิครามานได้ในทุกๆ สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปจะพบพีคหลักที่สำคัญ ซึ่งแสดงสมบัติเฉพาะตัวของ เฟอร์โรอิเล็ก ทริกดังนี้ คือ พีคที่ตำแหน่ง  $311 \text{ cm}^{-1}$  [ $B_1/E(\text{TO}+\text{LO})$ ],  $530 \text{ cm}^{-1}$  [ $A_1(\text{TO}_3)/E(\text{TO})$ ] และที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง  $717 \text{ cm}^{-1}$  [ $A_1(\text{LO})/\text{E}(\text{LO})$ ] ซึ่งจะพบ 3 พีกหลักนี้ปรากฏในทุกๆ สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซรามิกที่เรานำมาตรวจวัดนั้นมีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก



รูปที่ 4.4 (a) แสดงคาร์รามานของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  (b) แสดงกราฟการขยายพีกที่ช่วง  $100 \text{ cm}^{-1}$  และ (c) แสดงกราฟการขยายพีกที่ช่วง  $400 - 600 \text{ cm}^{-1}$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์  $1,400$  องศาเซลเซียส

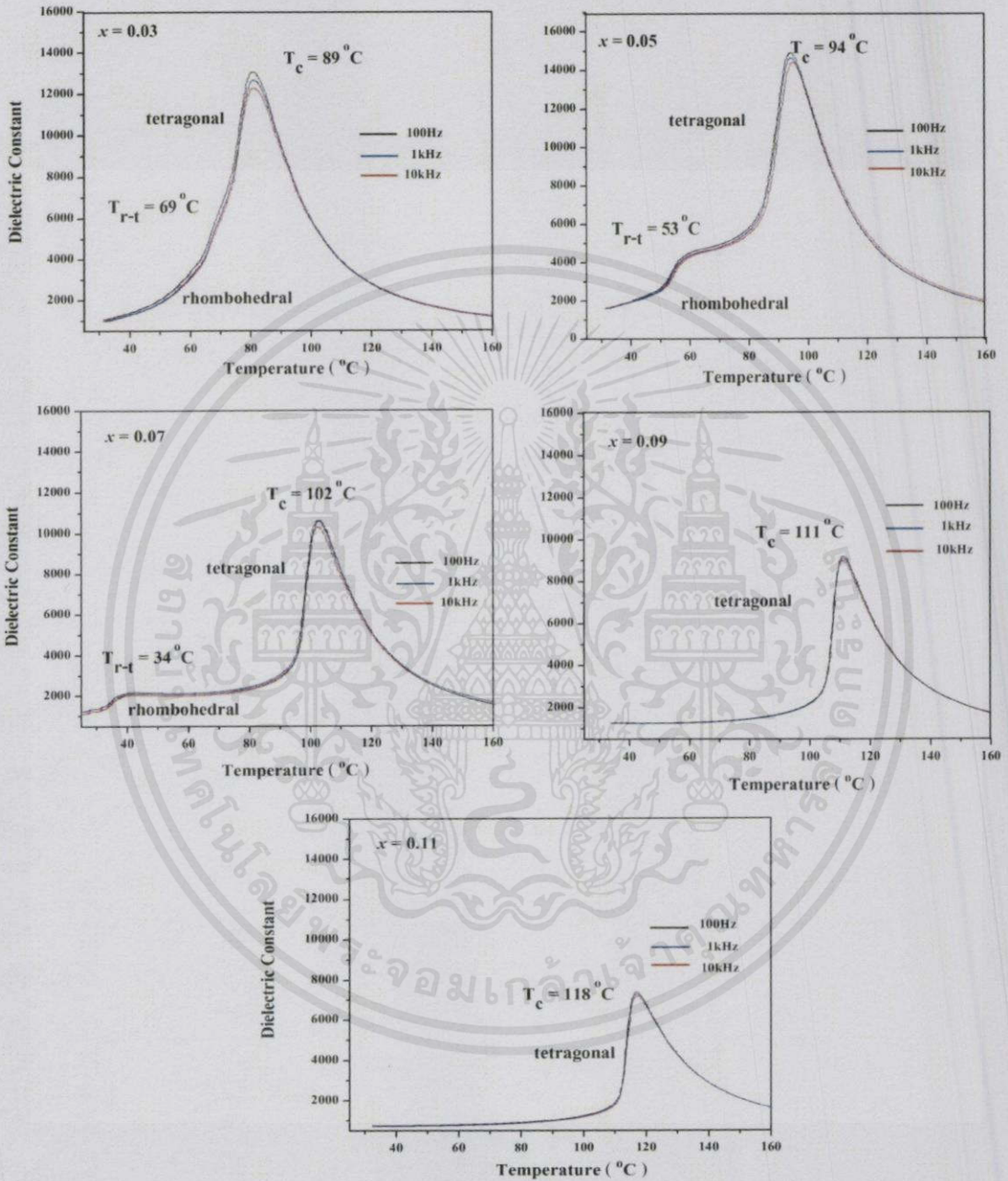
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาเมื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างเฟสที่เกิดในผลึก พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02-0.04$  นั้นจะปรากฏรูปแบบพีคที่แสดงถึงโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรัลดังนี้ คือพีคที่ตำแหน่งตำแหน่ง  $105 \text{ cm}^{-1}$ ,  $152 \text{ cm}^{-1}$  และพีคที่ตำแหน่ง  $184 \text{ cm}^{-1}$  [ $A_1(\text{TO}_1)$ ] ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในรูป 4.4 (b) ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.06$  นั้นพีคที่แสดงโครงสร้างรอมโบฮีดรัลจะเริ่มหายไปแต่ยังคงปรากฏอยู่บ้าง และที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้กลับพบพีคใหม่เพิ่มขึ้นมา คือพีคที่ตำแหน่ง  $266 \text{ cm}^{-1}$  [ $A_1(\text{TO}_2)$ ] ซึ่งเป็นพีคแสดงโครงสร้างเฟสเตตระโกนอล นั่นก็หมายความว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้จะเกิดเฟสร่วมระหว่างรอมโบฮีดรัลและเตตระโกนอลขึ้นในโครงสร้าง และเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  เพิ่มขึ้นจาก  $x = 0.08$  เป็น  $0.10$  จะพบว่าพีคที่แสดงเฟสรอมโบฮีดรัลได้หายไปแต่พีคของเฟสเตตระโกนอลกลับชัดเจนขึ้นซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (c) ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08-0.10$  จะปรากฏพีคใหม่ คือที่ตำแหน่ง  $473 \text{ cm}^{-1}$  [ $A_1\text{LO}_2/\text{E}(\text{LO})$ ] [22] ซึ่งจะปรากฏแค่ในสองสัดส่วนองค์ประกอบนี้เท่านั้น หรืออธิบายได้ว่าเมื่อปริมาณของ  $\text{CaTiO}_3$  เพิ่มขึ้นเป็น  $0.08$  และ  $0.10$  เซรามิกจะไม่มีจุดร่วมเฟสที่เกิดขึ้นจะเหลือเพียงโครงสร้างเดียวเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้

เมื่อทำการวิเคราะห์รูปแบบพีคที่เกิดขึ้นจากเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในทั้งสองระบบนั้น จะเห็นได้ว่าเซรามิกทั้งสองระบบต่างก็มีเฟสร่วมเกิดขึ้นที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.06$  และ  $x = 0.07$  ในเซรามิกระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ตามลำดับ แต่เมื่อสัดส่วน  $x$  เพิ่มสูงขึ้นจะไม่พบจุดร่วมเฟสเกิดขึ้นเนื่องจากเฟสรอมโบฮีดรัลหายไปเหลือเพียงแต่โครงสร้างเฟสเตตระโกนอล ซึ่งผลจากเทคนิครามานก็สอดคล้องกับรูปแบบพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ นั่นก็สามารถยืนยันได้ว่าทั้งเซรามิกในสองระบบนี้ต่างก็มีสัดส่วนที่เกิดจุดร่วมเฟสและอัตราส่วนที่มีโครงสร้างผลึกเพียงเฟสเดียว ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  มากที่สุดนั่นเอง นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าพีคที่ตำแหน่ง  $807 \text{ cm}^{-1}$  ของทั้งสองระบบเป็นการยืนยันได้ถึงการแทนที่ของอะตอมแคลเซียมที่เราได้ทำการเจือลงไป เพื่อเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมแบเรียมส่งผลการจัดเรียงตัวภายในโครงสร้างของผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ก่อนหน้านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก



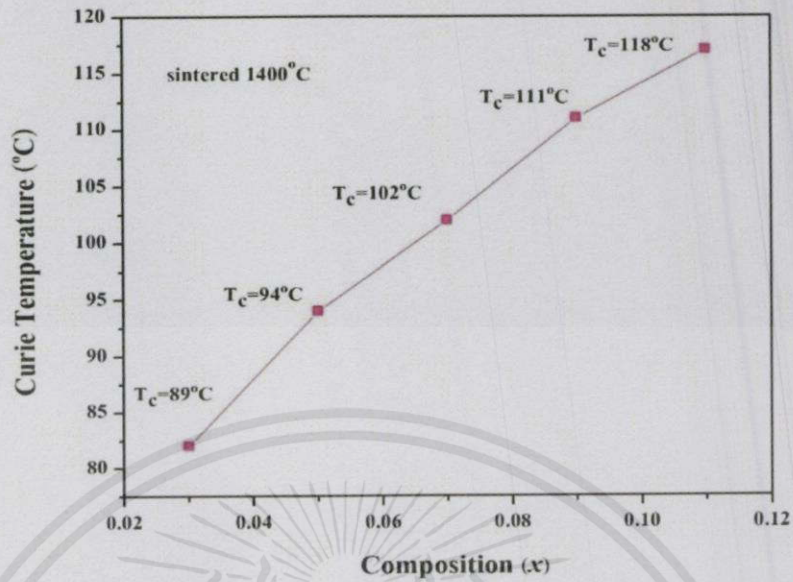
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบ

ของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาขึ้นเตอร์ 1,400 °C

องศาเซลเซียส โดยวัดที่ความถี่ 100 Hz 1 kHz และ 10 kHz

โดยผลจากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่ความถี่ 100 Hz 1 kHz และ 10 kHz ซึ่งเป็นการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 33–160 องศาเซลเซียส พบว่าเม็ดเซรามิกที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นั้นแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  อื่นๆ เนื่องจากที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้มีเฟสรวมหรือรอยต่อพหุสัณฐานระหว่างโครงสร้างเฟสระหว่างโครงสร้างรอมโบฮีดรัลและเตตระโกนอล ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และเทคนิครามานก่อนหน้านี้ พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้จะปรากฏพีดเอกลักษณ์ของทั้งโครงสร้างรอมโบฮีดรัลและเตตระโกนอล โดยจตุรรอยต่อพหุสัณฐานที่เกิดขึ้นที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นี้จะอยู่ที่อุณหภูมิ 53 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปเรื่อยๆ จะพบว่าค่าไดอิเล็กทริกจะมีค่าสูงขึ้นจนถึงที่อุณหภูมิหนึ่งที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่วัดได้จะมีค่าสูงที่สุด และจะลดต่ำลงเมื่อได้ทำการเพิ่มอุณหภูมิขณะที่ทำการวัดต่อไป ซึ่งอุณหภูมิที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดนั้นจะเรียกว่า อุณหภูมิคูรี โดยถ้าอุณหภูมินี้มีค่าสูงมากเท่าไรก็จะยิ่งทำให้วัสดุนั้นสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิใช้งานที่มากขึ้นเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเม็ดเซรามิกมีค่าสูงมากเท่าไรก็จะยิ่งเป็นการเพิ่มช่วงอุณหภูมิการใช้งานของวัสดุให้กว้างขึ้นมากขึ้น โดยจากรูปที่ 4.5 ถึงแม้ว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นั้นจะให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจริง แต่อุณหภูมิคูรีจะมีค่าน้อยกว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  นั้นจะให้ค่าไดอิเล็กทริกที่น้อยกว่า ซึ่งอาจมาจากการที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้ไม่พบจตุรรอยต่อพหุสัณฐานที่แสดงเฟสรวมระหว่างเฟสรอมโบฮีดรัลกับ เตตระโกนอล ซึ่งก็สามารถยืนยันได้จากการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และเทคนิครามาน จะพบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้จะปรากฏโครงสร้างของเตตระโกนอลเพียงโครงสร้างเดียวเช่นเดียวกับที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.09$  นั่นก็หมายความว่าเซรามิกที่เราสังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.09-0.11$  นั้นจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ไม่สูงมากนักเทียบเท่ากับที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03-0.07$  เนื่องจากไม่มีจตุรรอยต่อพหุสัณฐานหรือจตุรรอยต่อพหุสัณฐาน แต่ถ้าพิจารณาในเรื่องของการนำไปประยุกต์ใช้งานจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิคูรีของระบบจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของแคลเซียมเพิ่มขึ้น หมายความว่าเราเจือปริมาณของแคลเซียมไปเพื่อช่วยอุณหภูมิคูรีของระบบมีค่าสูงขึ้น ทำให้วัสดุสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น ซึ่งสามารถนำอุณหภูมิคูรีที่เกิดขึ้นในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบมาพล็อตเพื่อให้เห็นได้ชัดเจนขึ้นได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

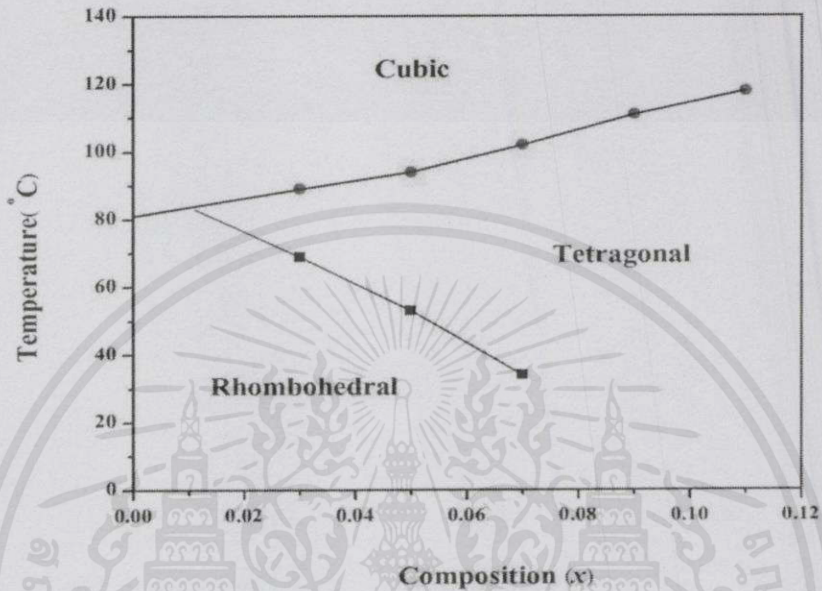


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคูรีกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้จากรูปที่ 4.5 แสดงค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกที่เกิดขึ้นของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ยังสามารถบ่งบอกถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสได้อีกด้วย ซึ่งจากรูปจะพบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  จะอยู่ที่ 53 องศาเซลเซียส และที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.07$  จะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็น 34 องศาเซลเซียส ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03-0.07$  นั้น เซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  จะมีจุดที่เกิดเฟสร่วมหรือเกิดรอยต่อพหุสัณฐานขึ้น ซึ่งก่อนหน้านี้นี้ได้ทำการตรวจสอบเอกลักษณ์และโครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้น ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และเทคนิครามานก็พบว่าสอดคล้องกับผลได้อิเล็กทริกที่ได้ คือ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03-0.07$  นั้นเซรามิกจะมีจุดรอยต่อพหุสัณฐานระหว่างเฟสรอมโบอีดรัลกับเตตระโกนอลเกิดขึ้น ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.09-0.11$  นั้นจะไม่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นในกราฟได้อิเล็กทริก ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และเทคนิครามานซึ่งไม่ปรากฏโครงสร้างเฟสของรอมโบอีดรัลอีกเลยเหลือเพียงแค่โครงสร้างเฟสของเตตระโกนอลเพียงโครงสร้างเดียวเท่านั้น

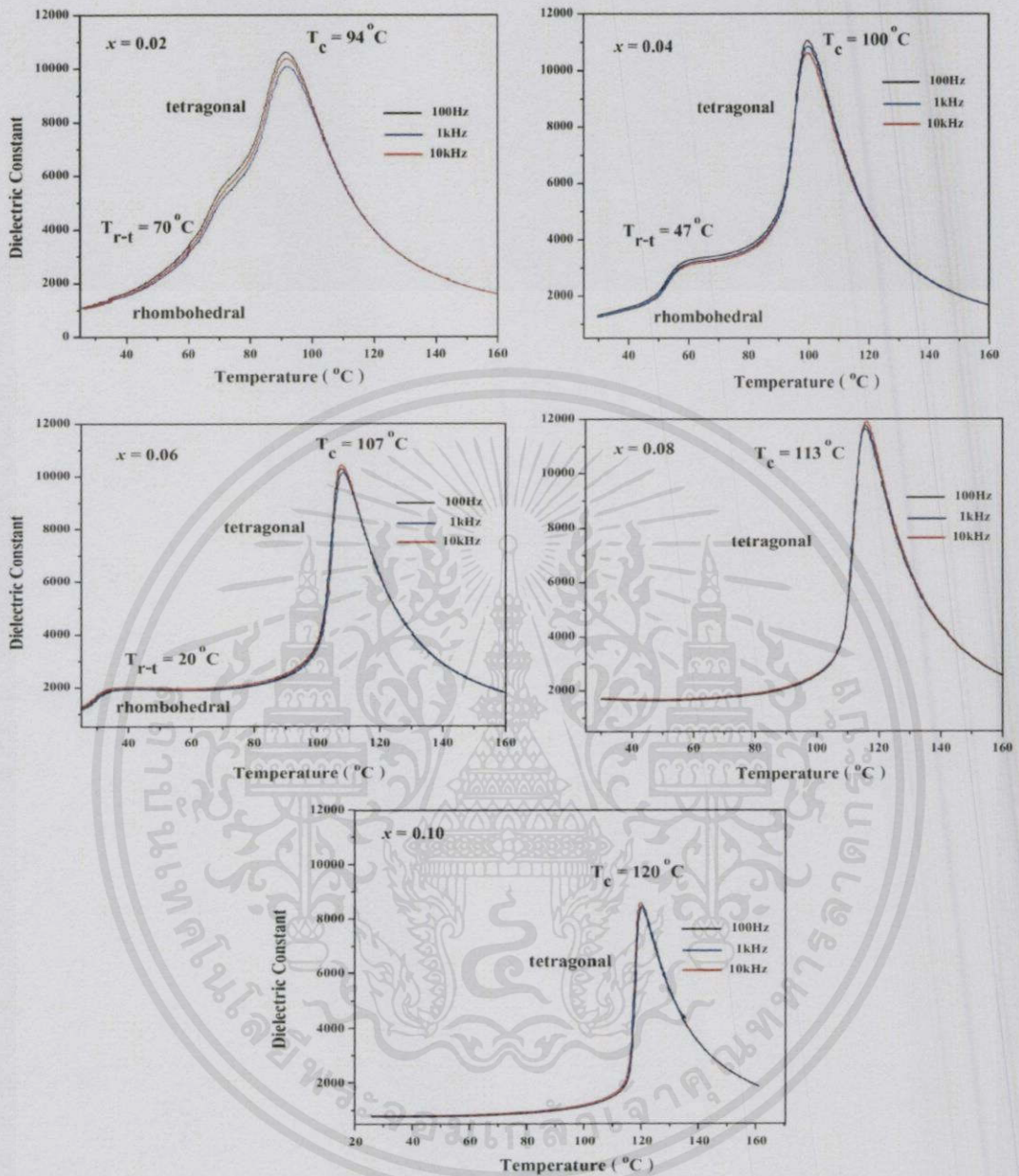
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากผลไดอิเล็กทริกที่ได้จากรูปที่ 4.5 ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิคูรีและอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03-0.11$  โดยสามารถนำมาสรุปเป็นแผนภาพเฟสไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนภาพเฟสไดอะแกรมของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



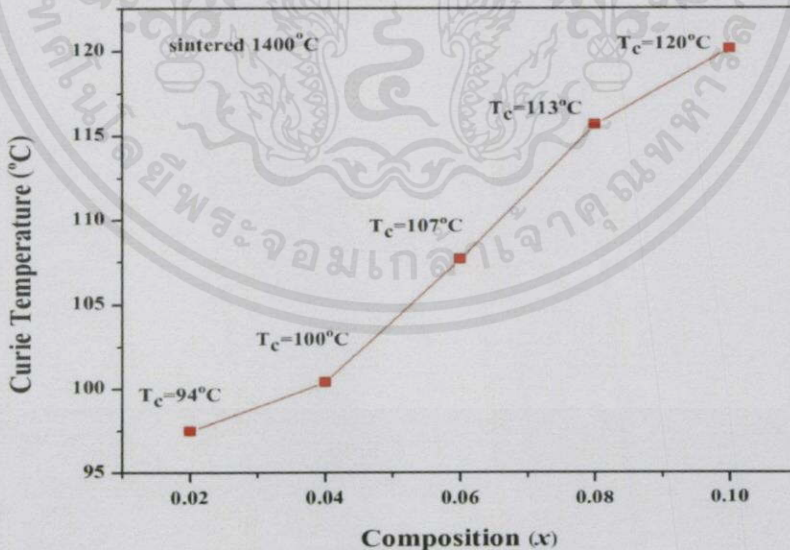
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่ความถี่ 100 Hz 1 kHz และ 10 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้

จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อเซรามิกที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  นั้นแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  อื่นๆ โดยเมื่อพิจารณาเทียบร่วมกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของ

ริงส์เอกซ์และเทคนิครามานจากก่อนหน้า พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  นี้ไม่มีจุดที่แสดงเฟสร่วมหรือรอยต่อพหุสัณฐานเกิดขึ้นเลย ซึ่งโครงสร้างผลึกที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้จะแสดงเพียงโครงสร้างเตตระโกนอลตามไฟล์มาตรฐาน PDF#891428 เท่านั้น

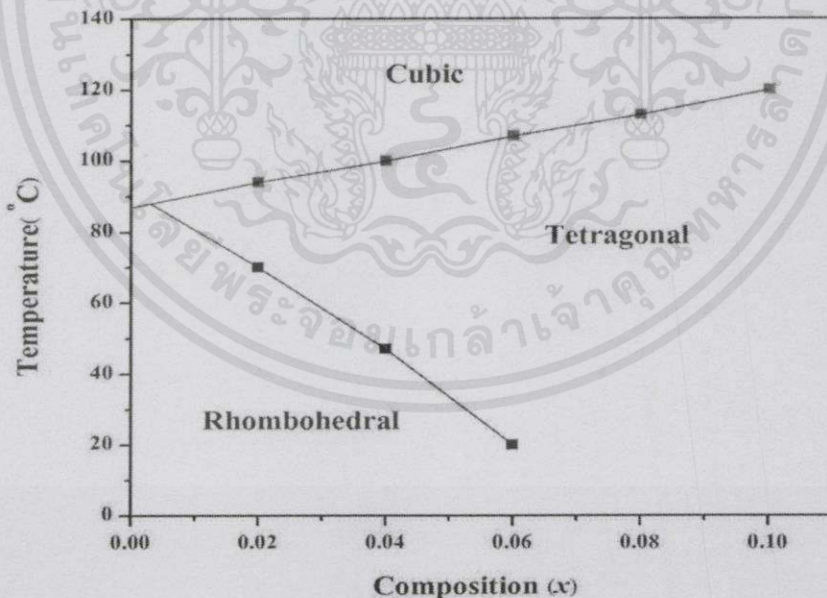
นอกจากนี้แล้วเมื่อพิจารณาจากกราฟค่าไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นยังสามารถบอกถึงอุณหภูมิคูรีและอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสได้อีกด้วย ซึ่งจากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิคูรีของเซรามิกในระบบนี้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อสัดส่วน  $x$  หรือปริมาณของ  $\text{CaTiO}_3$  เพิ่มสูงขึ้น โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  นั้นจะมีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ 94 องศาเซลเซียส ที่  $x = 0.04$  มีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ 100 องศาเซลเซียส ที่  $x = 0.06$  มีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ 107 องศาเซลเซียส ที่  $x = 0.08$  มีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ 113 องศาเซลเซียส และที่  $x = 0.10$  มีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ 120 องศาเซลเซียส นั้นหมายความว่า การเจือ  $\text{CaTiO}_3$  ลงไปนั้นช่วยทำให้อุณหภูมิคูรีของระบบเซรามิกมีค่าสูงขึ้นซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อดี เพราะการที่วัสดุมีอุณหภูมิคูรีสูงขึ้นก็เหมือนกับเป็นการเพิ่มช่วงอุณหภูมิการใช้งานของวัสดุให้กว้างขึ้น และเมื่อพิจารณาจากในรูปนี้ก็พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  นั้นถึงแม้ว่าจะเป็นสัดส่วนที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงก็ตามแต่อุณหภูมิคูรีของสัดส่วนเซรามิกในระบบนี้ก็ยังมีค่าน้อยกว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.10$  เพราะฉะนั้นจะสรุปได้ว่าเซรามิกที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.10$  สามารถนำไปใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้างกว่า ในขณะที่เซรามิกที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  สามารถนำไปใช้งานกับวัสดุประเภทที่ต้องการค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง (มีค่าความสามารถการเก็บประจุสูง) ได้ดีกว่า จากค่าอุณหภูมิคูรีที่พิจารณาได้จากกราฟไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นสามารถนำมาพล็อตเพื่อให้เห็นได้ชัดเจนขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคูรีกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้แล้วจากกราฟแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกยังบ่งบอกถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นในเซรามิกระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ได้อีกด้วย เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.8 พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  นั้นจะมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสอยู่ที่ 70 องศาเซลเซียส ในขณะที่  $x = 0.04$  จะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็น 47 องศาเซลเซียส และที่  $x = 0.06$  จะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็น 20 องศาเซลเซียส โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08-0.10$  นั้นจะไม่พบอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์และเทคนิครามานก่อนหน้าที่สามารถยืนยันได้ว่า ณ สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02-0.06$  นั้นมีเฟสร่วมเกิดขึ้นจริง ซึ่งจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และพิครามานก็ยืนยันได้ว่า จุดรอยต่อพหุสัณฐานที่เกิดขึ้นนั้นเป็นจุดที่เกิดเฟสร่วมระหว่างเฟสออร์โธโรมบิกกับเตตระโกนอล ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08-0.10$  นั้นจะไม่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้น เมื่อสังเกตจากรูปไดอิเล็กทริกซึ่งก็สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และพิครามานที่บ่งบอกได้ชัดเจนที่สัดส่วนนี้จะไม่ปรากฏโครงสร้างเฟสของออร์โธโรมบิกอีกเลยจะเหลือก็เพียงโครงสร้างเฟสของเตตระโกนอลเพียงโครงสร้างเดียวเท่านั้น

และจากผลค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ก็ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิคูรีและอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02-0.10$  โดยสามารถนำมาสรุปเป็นแผนภาพเฟสไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แผนภาพเฟสไดอะแกรมของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

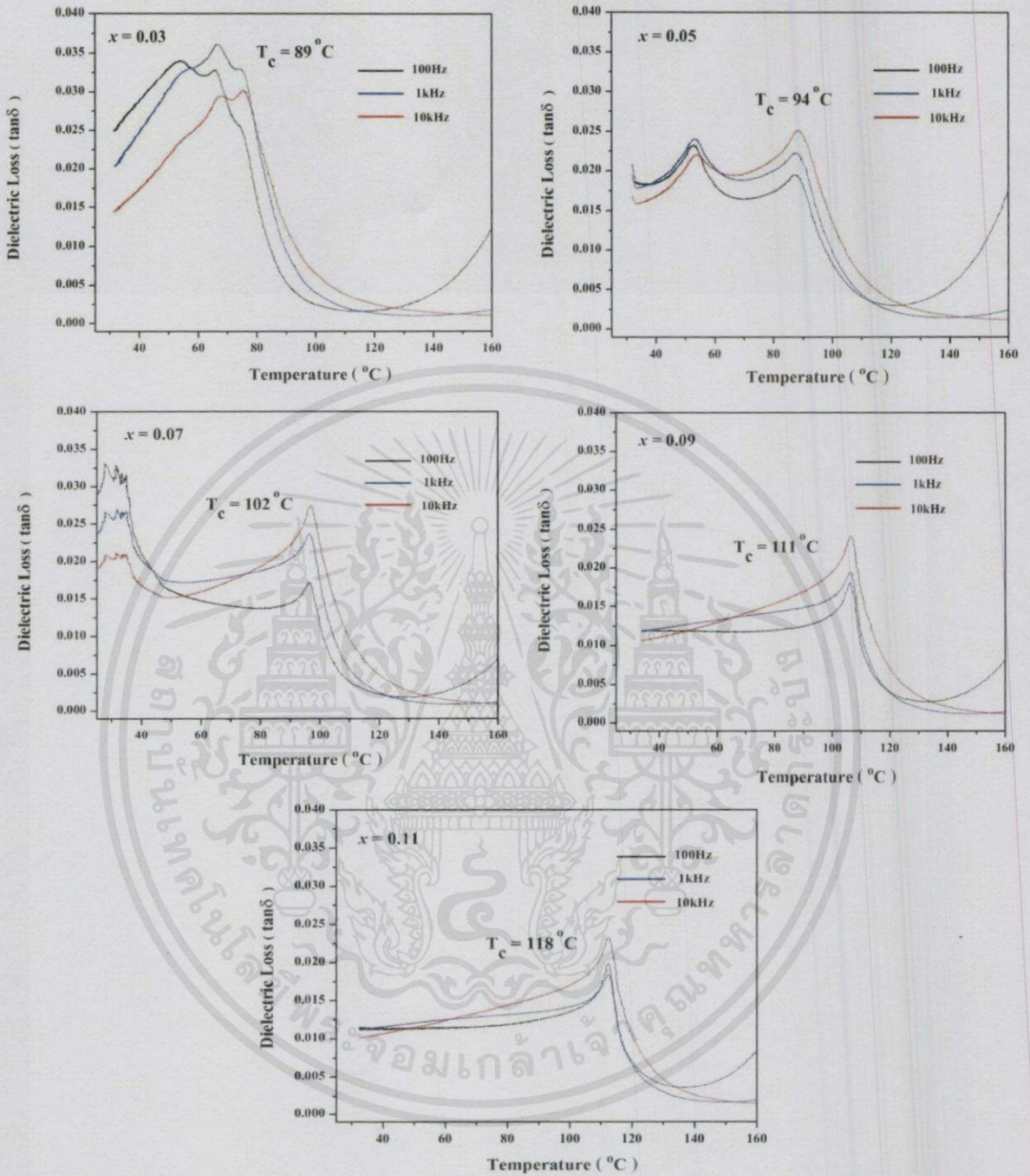
เพราะฉะนั้นเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในสองระบบระบบนี้ถ้าพิจารณาในเรื่องค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นจะพบว่าต่างกันมาก โดยเซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT นั้นจะให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกออกมามากกว่าเซรามิกในระบบ 0.88BT-BZ-CT

เซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT นั้นยังแสดงสมบัติที่โดดเด่นกว่า คือ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นอกจากจะเป็นสัดส่วนที่ทำให้เซรามิกมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง ยังมีจุดร่วมระหว่างเฟสโรมโบฮีดรัลกับเฟสเตตระโกนอลเกิดขึ้นในโครงสร้างอีกด้วย ในขณะที่เซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ 0.88BT-BZ-CT ณ สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  ที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดนั้น (ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกออกมาเท่ากับ 11587) พบว่ามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT อีกทั้งที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้ก็ยังไม่มีจุดร่วมระหว่างเฟสหรือรอยต่อพหุสัณฐานเกิดขึ้นในโครงสร้างเลย เพราะฉะนั้นเมื่อเปรียบเทียบในเรื่องของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง จึงถือว่าเซรามิกในระบบ 0.88BT-BZ-CT มีความโดดเด่นน้อยกว่าเซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT

และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิคูรีที่เกิดขึ้นในเซรามิกทั้งสองระบบนี้จะพบว่า เซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ 0.88BT-BZ-CT จะให้ค่าอุณหภูมิคูรีที่สูงกว่าเซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT ซึ่งสัดส่วนที่ให้ค่าอุณหภูมิคูรีสูงที่สุดคือที่  $x = 0.10$  พบว่ามีอุณหภูมิคูรีสูงถึง 120 องศาเซลเซียส (เทียบเท่ากับเพียโซอิเล็กทริก-แบเรียมไททานเต) ในขณะที่เซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT นั้นให้ค่าอุณหภูมิคูรีสูงที่สุดที่ 117 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อมาพิจารณาเปรียบเทียบกันในระบบนี้จะพบว่าทั้งสองระบบให้ค่าอุณหภูมิคูรีไม่ต่างกันมาก ดังนั้นจึงนำค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมาพิจารณาร่วมกันด้วย พบว่าถึงแม้ว่าเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ 0.88BT-BZ-CT จะให้อุณหภูมิคูรีสูงกว่าก็จริง แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าต่ำกว่าเซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT มาก ในขณะที่อุณหภูมิคูรีของทั้งสองระบบไม่ต่างกันมาก

นอกจากนี้อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสก็มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าอุณหภูมิคูรี เพราะเป็นตัวที่สามารถบอกได้ว่าเซรามิกที่เราสังเคราะห์ขึ้นนั้นมีเฟสร่วมหรือรอยต่อพหุสัณฐานเกิดขึ้นหรือไม่ โดยเมื่อพิจารณาเซรามิกในทั้งสองระบบจะพบว่าการที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  หรือปริมาณของ  $\text{CaTiO}_3$  เพิ่มขึ้นนั้นมีผลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกในระบบลดต่ำลง ดังเช่นในงานวิจัยของ Wei Li [14] ที่ได้ทำการสังเคราะห์เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในระบบ  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.95}\text{Zr}_{0.05})\text{O}_3$  ซึ่งพบว่าเมื่อเจือปริมาณ  $\text{CaTiO}_3$  ไปเพิ่มสูงขึ้นจะมีผลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกลดต่ำลงเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

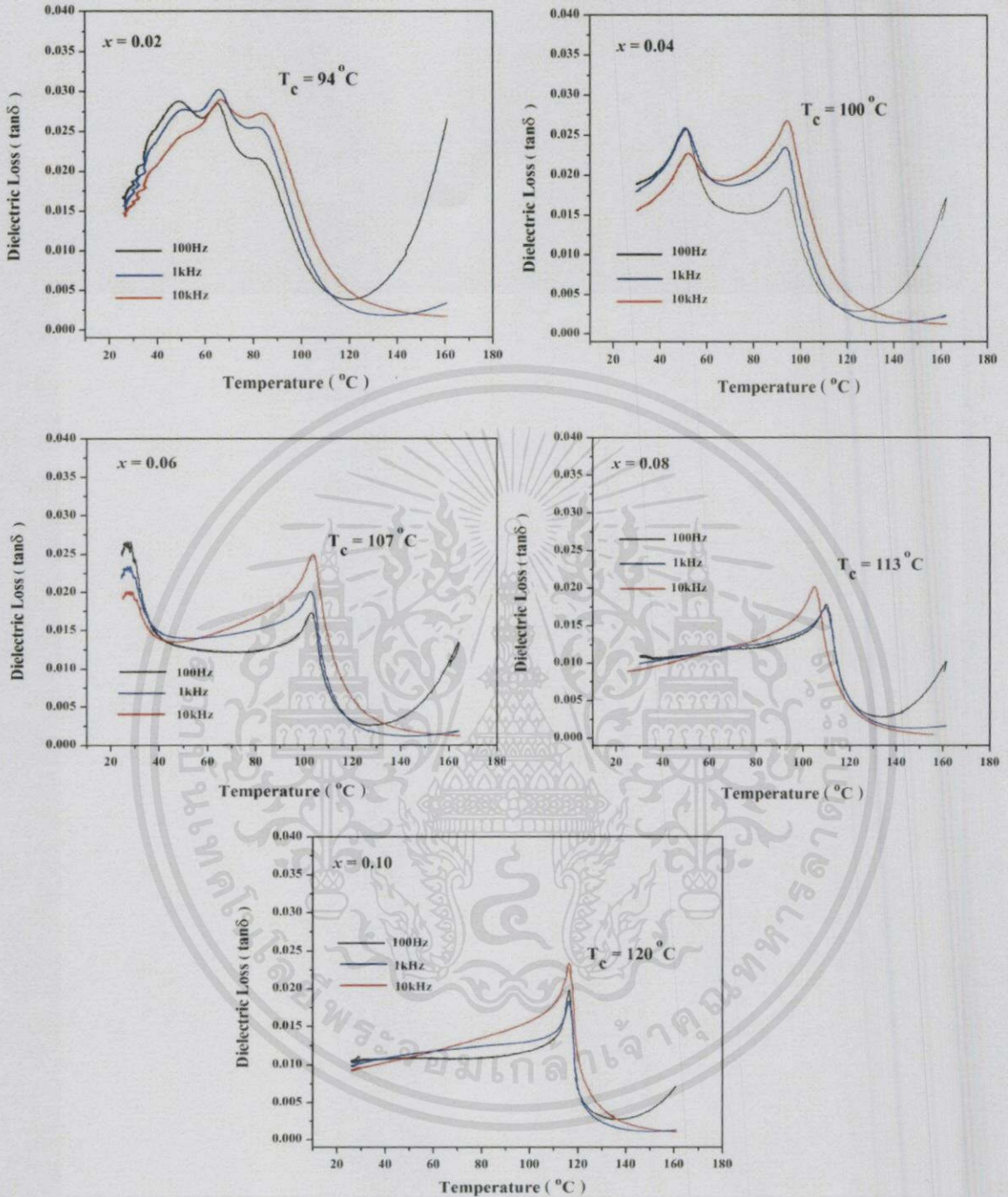


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผา 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่ความถี่ 100 Hz 1 kHz และ 10 kHz นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่จำกัดสิทธิ์อื่น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03$  นั้นจะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมากที่สุด ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.09$  นั้นมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกน้อยที่สุด นั้นหมายความว่า เมื่อนำเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ 0.86BT-BZ-CT โดยที่  $x = 0.03$  ไปใช้งานวัสดุจะปล่อยความร้อนออกมามากที่สุดเมื่อเทียบกับที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  อื่นๆ และเมื่อนำไปพิจารณาร่วมกับค่าไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นนั้น พบว่าค่าไดอิเล็กทริกที่วัดได้นั้นมีค่ามากที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  ซึ่งที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ หมายความว่าสามารถสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีค่าไดอิเล็กทริกที่สูงในขณะที่มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ไม่สูงมากเกินไป ซึ่งจะมีประโยชน์ในด้านการยืดอายุการใช้งานของวัสดุให้มากขึ้นกว่าเดิมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิในแต่ละสัดส่วน

องค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผา

เอกสารนี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่ความถี่ 100 Hz 1 kHz และ 10 kHz

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  นั้นจะให้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมากที่สุด ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  นั้นจะให้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาเทียบกับค่าไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นจากรูปที่ 4.8 พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  ให้ค่าไดอิเล็กทริกออกมาสูงที่สุด นั่นก็หมายความว่า สามารถสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ดี คือ มีค่าไดอิเล็กทริกที่สูงและมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำได้จากระบบ  $0.88\text{BT-BZ-CT}$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในทั้งสองระบบนั้นมีแนวโน้มคล้ายกัน คือ เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  มากขึ้นค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่สุด ณ สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  ที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นว่ากราฟค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ในการวัดและอุณหภูมิการวัด นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสและอุณหภูมิคูรีที่เกิดขึ้นในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบได้ โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  ของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BT-BZ-CT}$  นั้นจะให้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกน้อยที่สุด และเมื่อนำผลจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมาวิเคราะห์ร่วมกันจะเห็นว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากที่สุด แม้จะไม่มีเฟสรวมหรือรอยต่อพหุสัณฐานเกิดขึ้นก็ตาม ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกได้ว่า ผลจากค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกยังบอกให้ทราบถึงอุณหภูมิคูรีและอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสได้เช่นเดียวกับผลจากค่าไดอิเล็กทริก ซึ่งจะสังเกตได้จากพีคที่เกิดขึ้นในกราฟ โดยจุดแรกที่เกิดพีคคือจุดที่บอกถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ส่วนพีคที่สองที่เกิดขึ้นนั้นจะบอกถึงอุณหภูมิคูรี ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกราฟค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้น ข้อมูลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลที่อ่านได้จากกราฟของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า  $\epsilon_r$  กับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  วัดที่อุณหภูมิห้อง

$\epsilon_r$	สัดส่วนองค์ประกอบ (x)				
	x = 0.03	x = 0.05	x = 0.07	x = 0.09	x = 0.11
	89 °C	94 °C	102 °C	111 °C	118 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

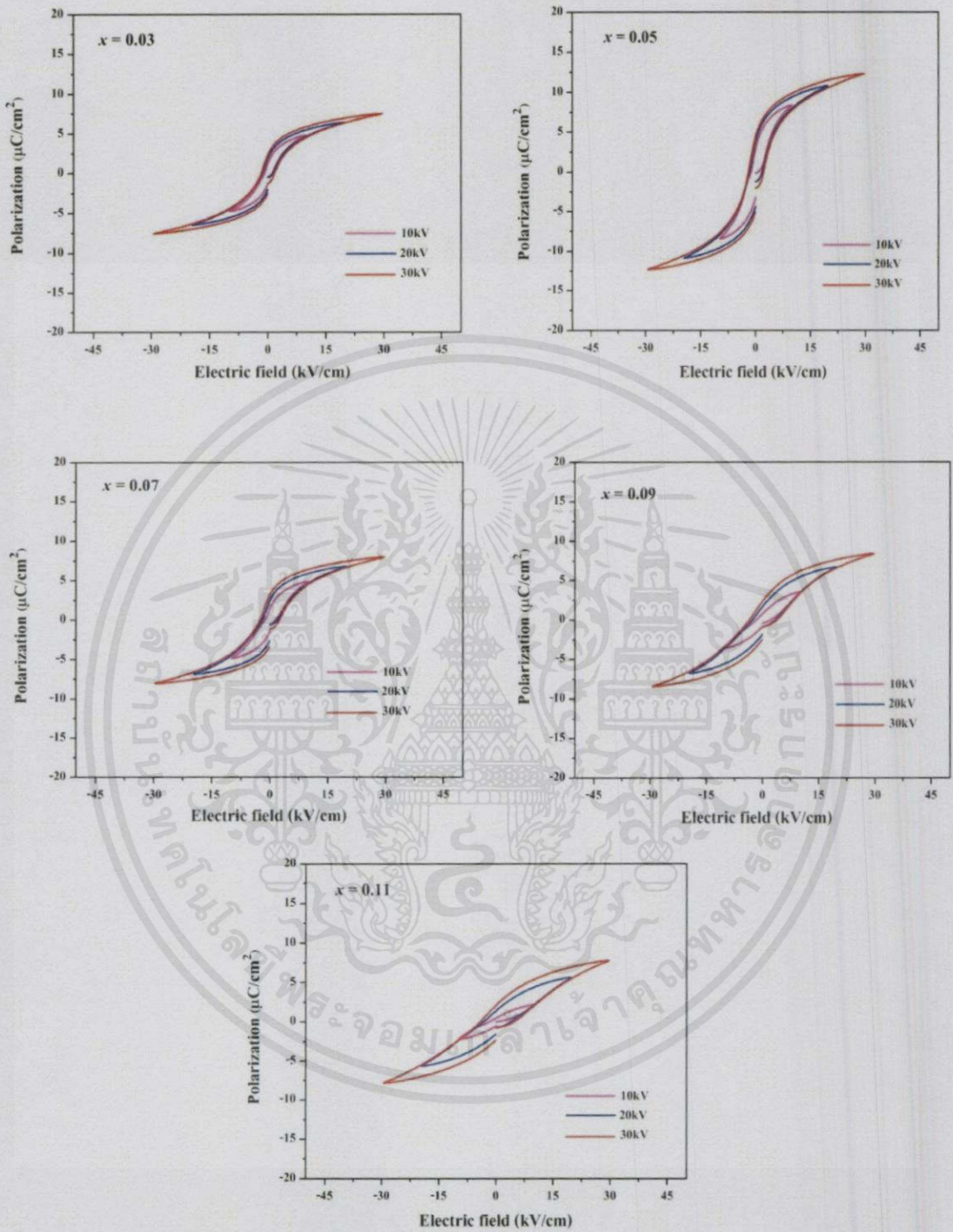
ตารางที่ 4.6 แสดงค่า  $\epsilon_r$  กับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  วัดที่อุณหภูมิห้อง

$\epsilon_r$	สัดส่วนองค์ประกอบ (x)				
	x = 0.02	x = 0.04	x = 0.06	x = 0.08	x = 0.10
	94 °C	100 °C	107 °C	113 °C	120 °C

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงค่า  $\epsilon_r$  กับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ซึ่งวัดที่อุณหภูมิห้อง พบว่าค่า  $\epsilon_r$  จะแสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจากเฟสรวมไบอิตรัลไปเป็นเฟสเตตระโนล เห็นได้ว่าค่า  $\epsilon_r$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบมีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกันในทั้งสองระบบ

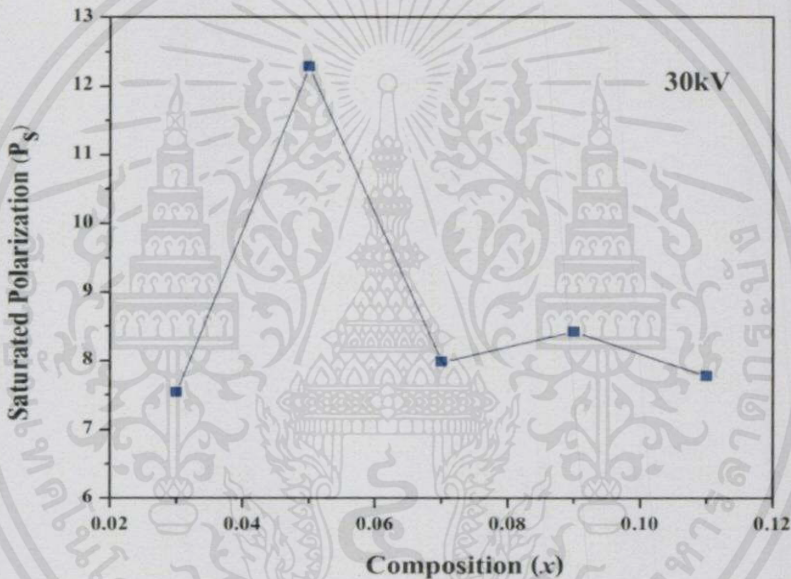
และเมื่อได้ทำการเปรียบเทียบเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ทั้งสองระบบจะพบว่าค่า  $\epsilon_r$  มีลักษณะที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ค่า  $\epsilon_r$  จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบมีค่ามากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับค่าคงที่การสูญเสียไดอิเล็กทริกจะพบว่า ณ จุดการเปลี่ยนเฟสที่วัดได้จากค่าคงที่การสูญเสียไดอิเล็กทริกจะเป็นตำแหน่งเดียวกันและสอดคล้องกันกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของทั้งสองระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



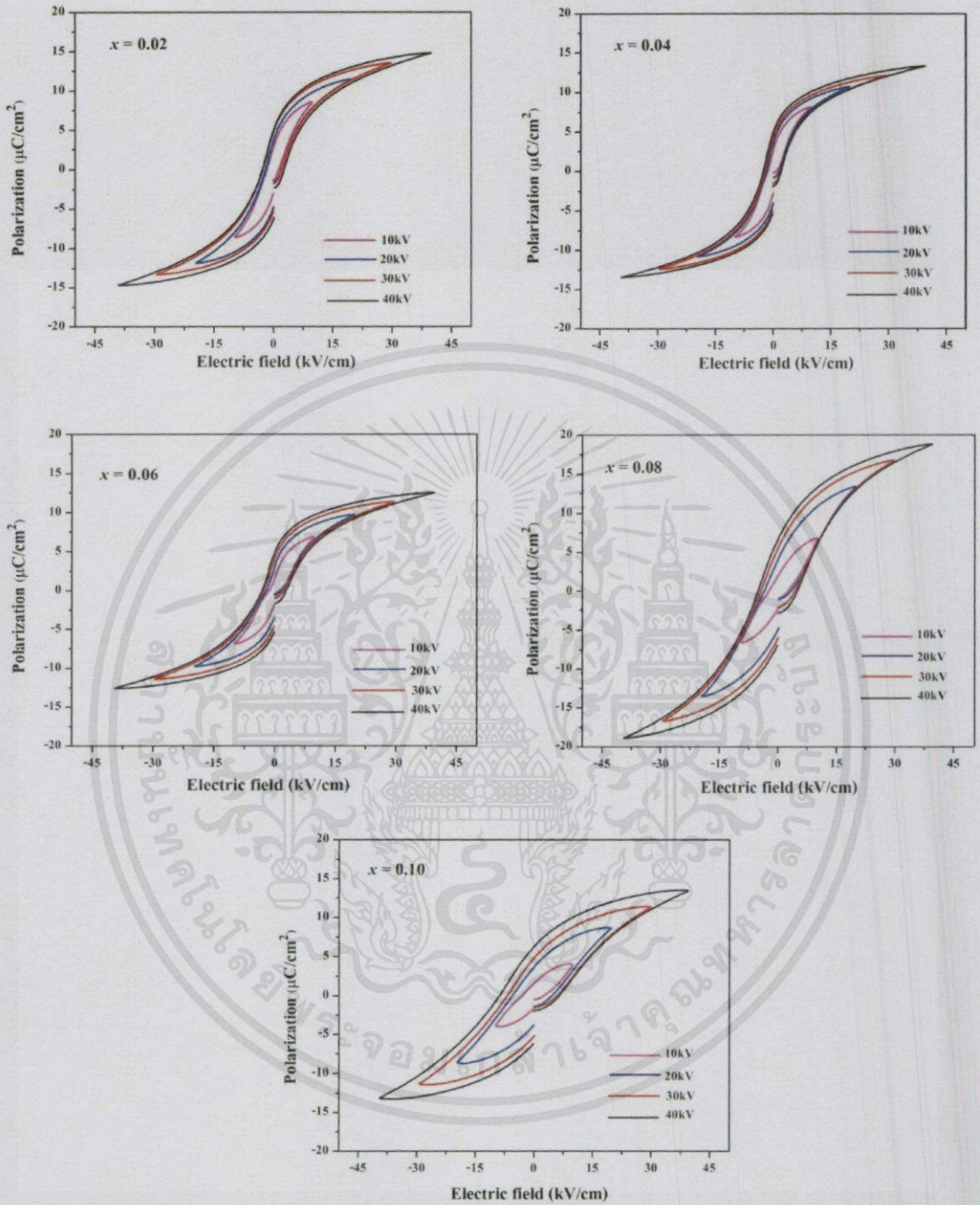
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาไม่ต่ำกว่า 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 10 kV 20 kV 30 kV และ 40 kV

จากรูป 4.13 พบว่าเมื่อเราให้สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นในทุกๆ สัดส่วนองค์ประกอบ ค่าโพลาริเซชันก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย และหากพิจารณาแนวโน้มของค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  นั้น จะพบว่าเมื่อปริมาณของ  $x$  หรือ  $\text{CaTiO}_3$  เพิ่มขึ้น ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นั้นจะให้ค่าโพลาริเซชันสูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  อื่นๆ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้เกิดรอยต่อพหุสัณฐานหรือมีเฟสรวมระหว่างรอมโบฮีดรัลกับเตตระโกนอลเกิดขึ้น ซึ่งยืนยันได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิครามานจากก่อนหน้านี้ อีกทั้งสัดส่วนองค์ประกอบนี้ยังให้ค่าไดอิเล็กทริกสูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่สัดส่วนองค์ประกอบที่  $x$  อื่นๆ อีกด้วย ซึ่งสามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันสูงที่สุดกับสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14



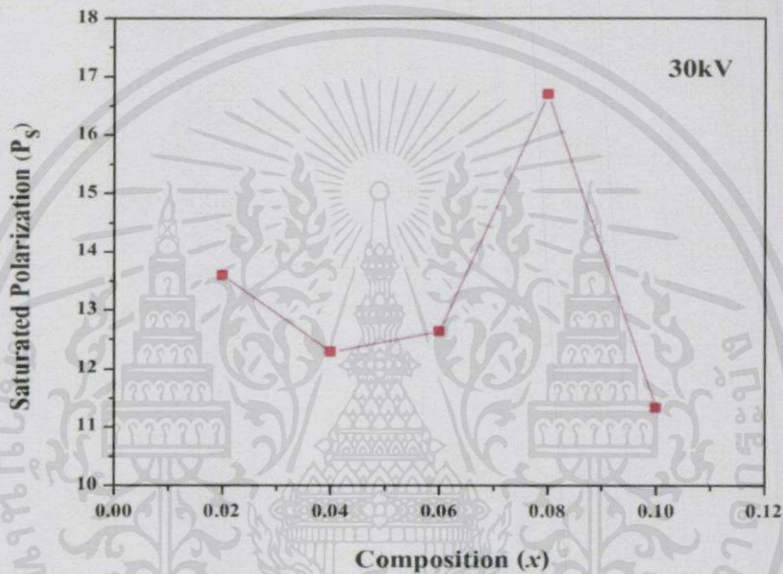
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันสูงที่สุดกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 30 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผา 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 10 kV 20 kV 30 kV และ 40 kV ใช้ประโยชน์ด้านการกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.15 พบว่าเมื่อเราให้สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นในทุกๆ สัดส่วนองค์ประกอบ ค่าโพลาริเซชันก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย และหากพิจารณาแนวโน้มของค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  นั้นจะพบว่าเมื่อปริมาณของ  $x$  หรือ  $\text{CaTiO}_3$  เพิ่มขึ้น ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  นั้นจะให้ค่าโพลาริเซชันสูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  อื่นๆ ประกอบกับที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุด ซึ่งสามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันสูงสุดกับสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  ดังแสดงในรูปที่ 4.16

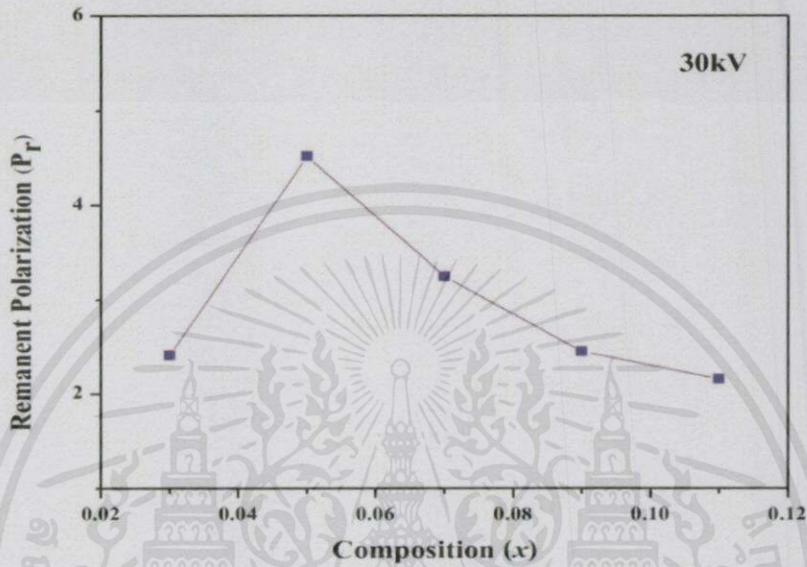


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันสูงที่สุดกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 10 kV

จากรูปที่ 4.16 พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  นั้นจะแสดงค่าโพลาริเซชันสูงที่สุดถึง  $16.7 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  อาจเป็นเพราะที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่โดดเด่นกว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบอื่นๆ แม้ว่าจะไม่พบเฟสรวมหรือจตุรรอยต่อพหุสัณฐานในโครงสร้างก็ตาม

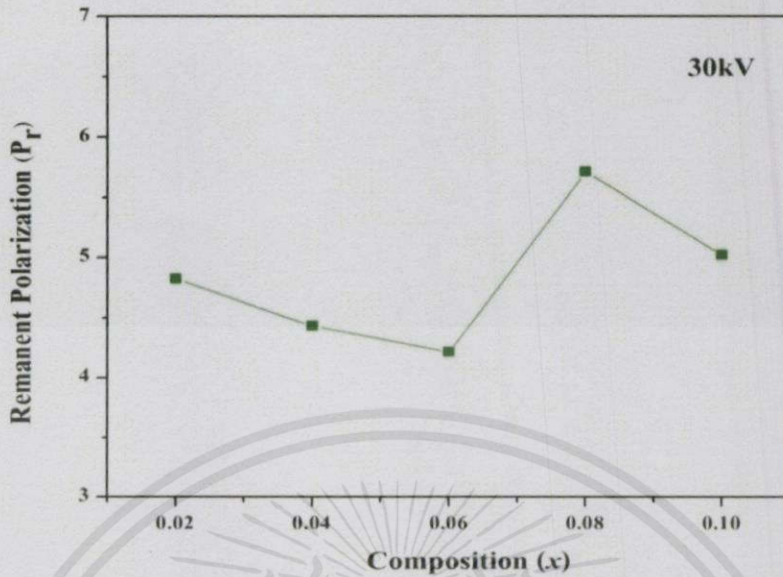
และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าโพลาริเซชันสูงที่สุดที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์เซรามิกในทั้งสองระบบนี้พบว่า เซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.88\text{BT-BZ-CT}$  นั้นจะแสดงค่าโพลาริเซชันได้สูงกว่าเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.86\text{BT-BZ-CT}$  โดยมีค่าอยู่ที่  $16.7 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  และในระบบ  $0.86\text{BT-BZ-CT}$  เม็ดเซรามิกที่สังเคราะห์ได้จะมีค่าโพลาริเซชันอยู่ที่  $12.28 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  อย่างไรก็ตามทั้งสองสัดส่วนองค์ประกอบนี้ต่างก็เป็นสัดส่วน  $x$  ที่ทำให้

เซรามิกแสดงสมบัติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่โดดเด่นขึ้นมาได้ นั่นหมายความว่า การที่สังเคราะห์เซรามิกออกมาแล้วหากมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงอาจมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เซรามิกในระบบนั้นแสดงค่าโพลาริเซชันที่โดดเด่นออกมาได้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันคงค้างกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 30 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



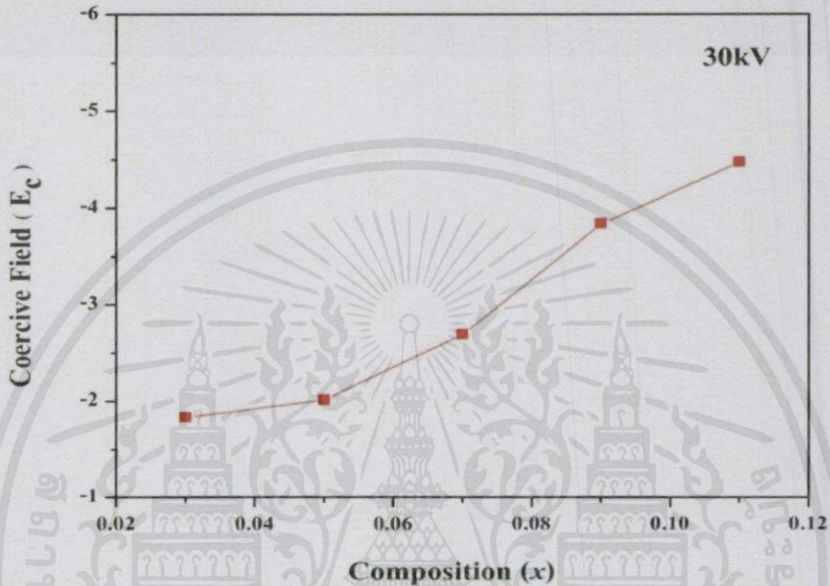
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันคงค้างกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 30 kV

จากรูปที่ 4.17 พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03$  และ  $x = 0.05$  นั้นเมื่อสัดส่วนของแคลเซียมไททานเนตเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ค่าโพลาริเซชันคงค้างมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและค่าโพลาริเซชันคงค้างจะมีค่าสูงที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นอกจากนี้ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.5-0.11$  นั้นค่าโพลาริเซชันคงค้างที่เกิดขึ้นจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของแคลเซียมไททานเนตเพิ่มสูงขึ้น นั่นก็อาจเป็นเพราะว่าจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้พยายามหารอยต่อพหุสัณฐาน จะสังเกตเห็นว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  จะมีค่าโพลาริเซชันคงค้างสูงสุดซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ณ สัดส่วนองค์ประกอบนี้เป็นจุดรอยต่อระหว่างเฟสนั่นเองซึ่งยืนยันได้จากการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะก่อนหน้า

จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันคงค้างกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BT-BZ-CT}$  พบว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบหรือปริมาณของแคลเซียมไททานเนตเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าโพลาริเซชันคงค้างมีแนวโน้มลดต่ำลงที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02-0.10$  จะสังเกตเห็นว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  จะมีค่าโพลาริเซชันคงค้างสูงที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้มีค่าโพลาริเซชันสูงสุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบอื่นและมีค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์สูงสุดแม้ว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้จะไม่เห็นโครงสร้างที่เกิดรอยต่อพหุสัณฐานหรือเฟสร่วมระหว่างสองเฟสเกิดขึ้นก็ตาม

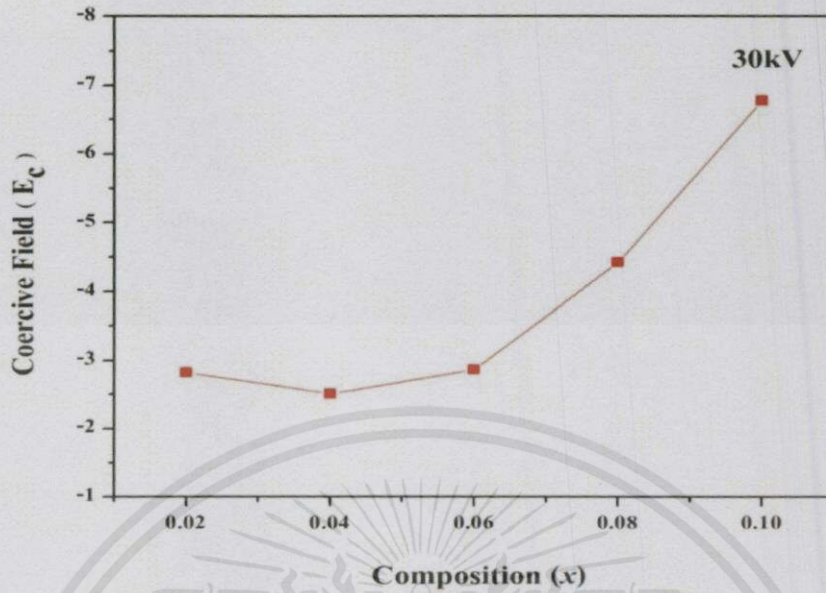
ไม่จำกัดสิทธิ์ในการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่แจ้งให้ทราบก่อน

และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าโพลาริเซชันคงค้างของเซรามิกทั้งสองระบบจะพบว่าเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ 0.88BT-BZ-CT นั้นจะให้ค่าโพลาริเซชันออกมาสูงกว่าเซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT ซึ่งก็หมายความว่าเซรามิกในระบบ 0.88BT-BZ-CT จะให้ค่าโพลาริเซชันได้ดีกว่าภายใต้การหยุดให้ความเข้มของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามลบล้างโพลาริเซชันกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 30 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



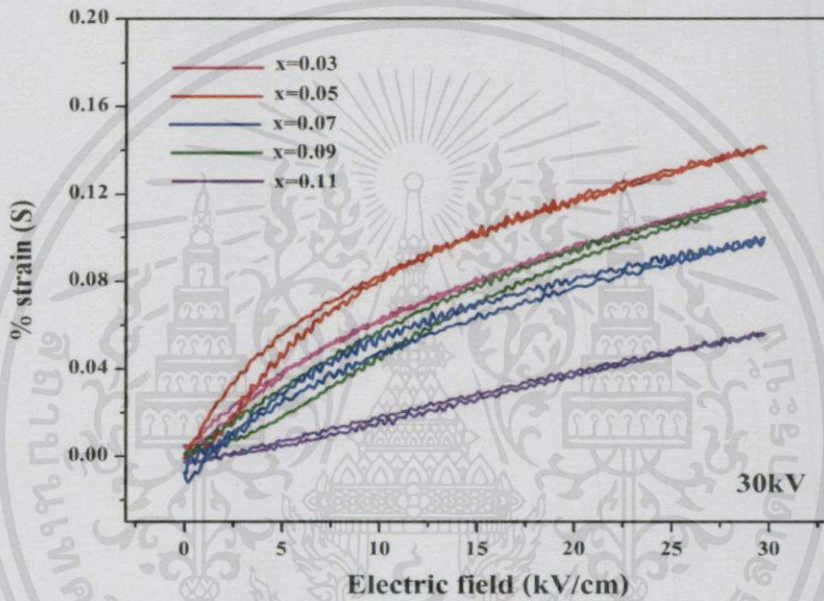
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามลบล้างโพลาริเซชันกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส โดยวัดที่สนามไฟฟ้า 30 kV

จากรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบหรือปริมาณของแคลเซียมไททานเนตเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ค่าสนามลบล้างโพลาริเซชันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03$  จะมีค่าสนามลบล้างโพลาริเซชันต่ำที่สุด และที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  อื่นๆ ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับผลที่มาจากค่าไดอิเล็กทริก

จากรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อสัดส่วนของแคลเซียมไททานเนตเพิ่มสูงขึ้น จะมีผลทำให้ค่าสนามลบล้างโพลาริเซชันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างไม่เป็นแนวโน้ม โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.10$  นั้นจะมีค่าสนามลบล้างโพลาริเซชันสูงที่สุดในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  จะมีค่าสนามลบล้างโพลาริเซชันต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  อื่นๆ ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับผลที่มาจากค่าไดอิเล็กทริก

และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าลบล้างโพลาริเซชันของเซรามิกทั้งสองระบบ โดยรวมแล้วพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบเพิ่มขึ้น ค่าสนามไฟฟ้าลบล้างจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อเปรียบเทียบเซรามิกทั้งสองระบบจะพบว่าเซรามิกในระบบ 0.88BT-BZ-CT นั้นมีค่าสนามไฟฟ้าลบล้างโพลาริเซชันสูงกว่าเซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT ซึ่งหมายความว่าเซรามิกในระบบ 0.88BT-BZ-CT นั้นจะต้องใช้ค่าสนามไฟฟ้าที่มากกว่าในการสลับทิศขั้วโพลาริเซชันในเม็ดเซรามิก

แต่เมื่อมองโดยภาพรวมแล้วจะพบว่าเซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นั้นจะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่นมากทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้น การมีเฟสรวมอยู่ในโครงสร้าง ค่าโพลาริเซชันและค่าโพลาริเซชันคงค้างสูงสุด อีกทั้งยังมีค่าสนามไฟฟ้าลบล้างน้อยที่สุดอีกด้วย ทำให้เซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในสัดส่วน  $x = 0.05$  ของระบบ 0.86BT-BZ-CT นั้นสามารถแสดงสมบัติที่โดดเด่นขึ้นมาเหนือสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  อื่นๆ และยิ่งโดดเด่นกว่าเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ 0.88BT-BZ-CT อีกด้วย

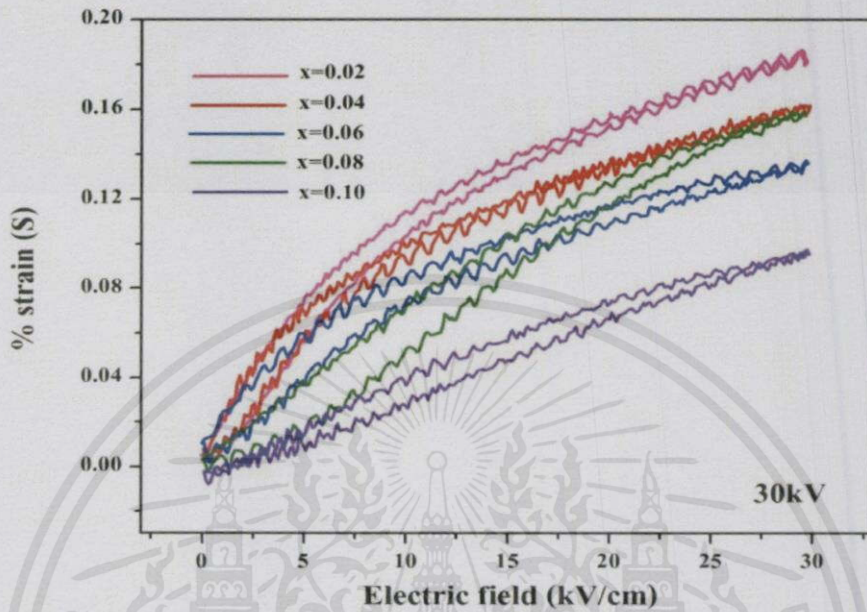


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับสัดส่วนของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สนามไฟฟ้า 30 kV

จากรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับสัดส่วนของเซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สนามไฟฟ้า 30 kV พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นั้นจะให้ค่าความเครียดสูงสุด หรืออาจกล่าวได้ว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงการหดตัวภายใต้สนามไฟฟ้าที่ให้ได้มากที่สุด อาจเป็นเพราะที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้พบช่วงการเปลี่ยนเฟสระหว่างเฟสอโรไบอิตรัลไปเป็นเตตระโกนอล เป็นไปได้ว่าจะปรากฏ

เฟสของอโรไบอิตรัลที่มากซึ่งมันจะตอบสนองต่อการวัดค่าสนามไฟฟ้ามากที่สุด อีกทั้งยังมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นเอกสารถ้วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการสวิตช์เป็น ไมออนูตไดนามิไซประ โยชนคานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กทริกที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  อื่นๆ ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

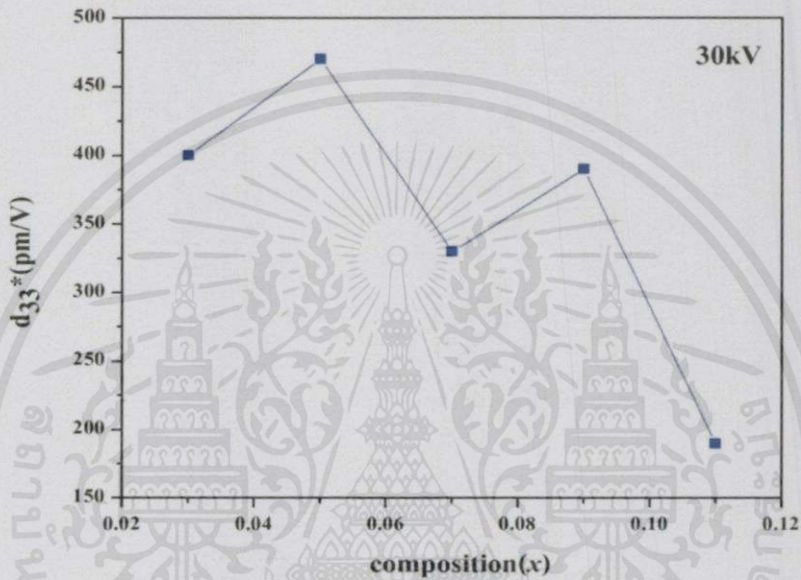


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับสัดส่วนของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สนามไฟฟ้า 30 kV

จากรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับสัดส่วนของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สนามไฟฟ้า 30 kV พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  นั้นจะให้ค่าความเครียดสูงที่สุด หรืออาจกล่าวได้ว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงการหดตัวภายใต้สนามไฟฟ้าที่ให้ได้มากที่สุด อาจเพราะที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้พบช่วงการเปลี่ยนเฟสระหว่างเฟสรอมโบฮีดรัลไปเป็นเตตระโกนอล เป็นไปได้ว่าจะปรากฏเฟสของรอมโบฮีดรัลที่มากซึ่งมันจะตอบสนองต่อการวัดค่าสนามไฟฟ้ามากที่สุด ทำให้แนวโน้มของกราฟความเครียดที่เกิดขึ้นนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  เพิ่มสูงขึ้นจนถึงที่สัดส่วน  $x = 0.11$  นั้นความเป็นเตตระโกนอลของเม็ดเซรามิกจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยสังเกตได้จากกราฟความเครียดที่เกิดขึ้นซึ่งจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟความเครียดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  นั้นเป็นเส้นตรงไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากที่สัดส่วนองค์ประกอบนี้เซรามิกไม่มีจุดที่แสดงเฟสร่วมเกิดขึ้นนั่นเอง

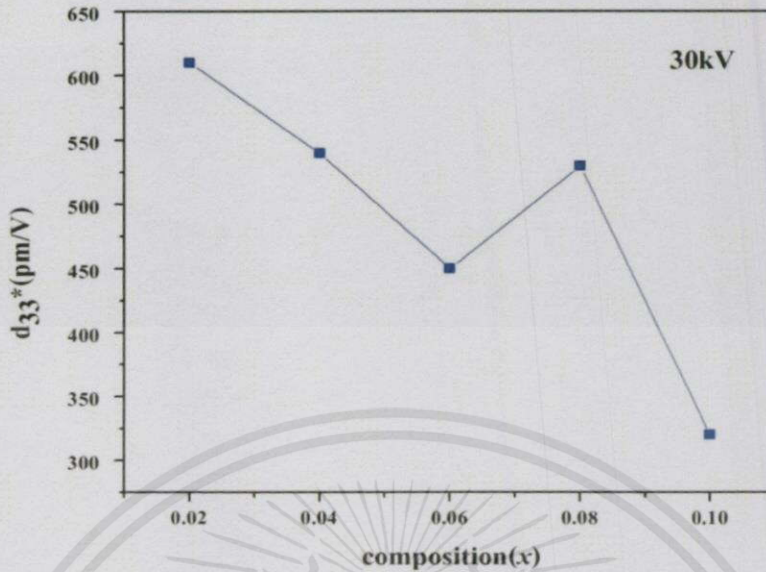
รื่องานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเซรามิกทั้งสองระบบก็พบว่า ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะสนามไฟฟ้าที่ใช้ 30 kV/cm เท่ากันนั้น เซรามิกจะให้ค่าความเครียดออกมาในอัตราที่ใกล้เคียงกัน โดยจะพบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  ที่มีเฟสรวมหรือรอยต่อพหุสัณฐานนั้น เซรามิกจะให้ค่าความเครียดออกมาสูงกว่าเซรามิกที่ไม่มีเฟสรวมอยู่ในโครงสร้างเลย เมื่อดูจากรูปที่ 4.21 และ 4.22 จะเห็นได้ว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  มากที่สุดนั้น ค่าความเครียดที่เซรามิกแสดงออกมานั้นจะมีค่าน้อยที่สุดในเซรามิกทั้งสองระบบ



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $d_{33}^*$  กับสัดส่วนของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สนามไฟฟ้า 30 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $d_{33}^*$  กับสัดส่วนของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สนามไฟฟ้า 30 kV

จากรูปที่ 4.23 พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นั้นจะมีค่า  $d_{33}^*$  สูงที่สุด เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่ให้ค่าความเครียดออกมามากที่สุดเมื่อเทียบกับที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  อื่นๆภายใต้สนามไฟฟ้า 30 kV เท่ากัน ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  นั้นจะให้ค่า  $d_{33}^*$  ออกมาน้อยที่สุดเนื่องจากเป็นสัดส่วนที่ให้ค่าความเครียดออกมาน้อยที่สุด ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.21

จากรูปที่ 4.24 พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  นั้นจะมีค่า  $d_{33}^*$  สูงที่สุดเนื่องจากเป็นสัดส่วนที่ให้ค่าความเครียดออกมามากที่สุดเมื่อเทียบกับที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  อื่นๆภายใต้สนามไฟฟ้า 30 kV เท่ากัน ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.10$  นั้นจะให้ค่า  $d_{33}^*$  ออกมาน้อยที่สุดเนื่องจากเป็นสัดส่วนที่ให้ค่าความเครียดออกมาน้อยที่สุด ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.22

และเมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่า  $d_{33}^*$  ที่เกิดขึ้นในเซรามิกทั้งสองระบบก็พบว่าค่า  $d_{33}^*$  ของเซรามิกในระบบ 0.88BT-BZ-CT นั้นมีค่ามากกว่าเซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT แต่ถือว่าทั้งสองระบบมีค่าไม่ต่างกันเท่าที่ควร โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  นั้นจะให้ค่า  $d_{33}^*$  ออกมามากที่สุดนั่นก็อาจมาจากการที่เซรามิก ณ สัดส่วนองค์ประกอบนี้มีค่าความเครียดสูงที่สุด อีกทั้งยังอาจเป็นสัดส่วนที่มีเฟสรวมหรือรอยต่อพหุสัณฐานระหว่างโครงสร้างรอมโบอีดริลกับออร์โธโรมบิกเกิดขึ้น ส่วนเซรามิกในระบบ 0.88BT-BZ-CT มีสัดส่วนที่มีค่าคงที่ได้อิเล็กทริกและค่าโพลาริเซชันสูงที่สุดนั่นคือสัดส่วน  $x = 0.08$  ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ไม่มีเฟสรวมและมีค่า  $d_{33}^*$  น้อยกว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$

แต่เมื่อพิจารณาเซรามิกในระบบ 0.86BT-BZ-CT พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นั้นให้ค่า  $d_{33}^*$  ออกมาสูงที่สุด ซึ่งถือว่าสอดคล้องกับสมบัติที่ได้วัดมาก่อนหน้านี้แล้วข้างต้น ไม่ว่าจะเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดเนื่องจากเป็นสัดส่วนที่มีเฟสรวมเกิดขึ้นในโครงสร้าง อีกทั้งยังมีค่าโพลาริเซชันและค่าโพลาริเซชันคงค้างมากที่สุด ในขณะที่ค่าสนามไฟฟ้าลบสร้างโพลาริเซชันที่สัดส่วนนี้ก็มิต่ำสุด ดังนั้น จากข้อมูลการวิเคราะห์ที่ผ่านมาทั้งหมด ก็อาจสรุปได้ว่าสามารถสังเคราะห์เซรามิกที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่มีทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีได้ด้วยการสังเคราะห์ในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$

ตารางที่ 4.7 แสดงสรุปสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$

สมบัติทางไฟฟ้า	สัดส่วนองค์ประกอบในระบบ				
	$0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$				
	$x = 0.03$	$x = 0.05$	$x = 0.07$	$x = 0.09$	$x = 0.11$
$d_{33}^*$ , pm/V	399	471	330	390	190
dielectric (100Hz)	13002	14907	10669	9135	7365
dielectric loss (100 Hz)	0.0253	0.0193	0.017	0.0179	0.0198
$T_c$ , °C	89	94	102	111	118
$T_{r \rightarrow t}$ , °C	69	57	34	-	-
$P_r$ (30 kV), pC/cm <sup>-1</sup>	2.41	4.52	3.2	2.45	2.16
$P_s$ (30 kV), pC/cm <sup>-1</sup>	7.54	12.29	7.98	8.42	7.78
$E_c$ (30 kV), pC/cm <sup>-1</sup>	1.93	2.24	2.64	3.98	4.73
Strain (30 kV), pC/cm <sup>-1</sup>	0.12	0.14	0.10	0.12	0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามมิให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงสรุปสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$

สมบัติทางไฟฟ้า	สัดส่วนองค์ประกอบในระบบ				
	$0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$				
	$x = 0.02$	$x = 0.04$	$x = 0.06$	$x = 0.08$	$x = 0.10$
$d_{33}^*$ , pm/V	610	540	450	530	320
dielectric (100Hz)	10598	11077	10266	11755	8430
dielectric loss (100 Hz)	0.0216	0.0205	0.0172	0.0177	0.0198
$T_c$ , °C	94	100	107	113	120
$T_{r \rightarrow t}$ , °C	70	47	20	-	-
$P_r$ (30 kV), pC/cm <sup>-1</sup>	4.82	4.43	4.21	5.71	5.02
$P_s$ (30 kV), pC/cm <sup>-1</sup>	13.6	12.29	11.34	12.7	11.3
$E_c$ (30 kV), pC/cm <sup>-1</sup>	-2.82	-2.51	-2.86	-4.42	-6.77
Strain (30 kV), pC/cm <sup>-1</sup>	0.1819	0.1617	0.1367	0.1587	0.0972

จากตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03 - 0.11$  และระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02 - 0.10$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการสังเคราะห์และศึกษาการเตรียมเม็ดเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกทั้งสองระบบคือที่ระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  โดยที่  $x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.09$  และ  $0.11$  และระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  โดยที่  $x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08$  และ  $0.10$  สามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 การหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$

- 1) สามารถเตรียมเม็ดเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่มีความบริสุทธิ์ได้ในทุกสัดส่วนองค์ประกอบตั้งแต่  $x = 0.03-0.11$  ซึ่งยืนยันได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์และเทคนิครามาน
- 2) จากการศึกษาค่าความหนาแน่นในเรื่องอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความหนาแน่นของเม็ดเซรามิก พบว่าที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์  $1,400$  องศาเซลเซียส สามารถทำให้เม็ดเซรามิกมีค่าความหนาแน่นที่สูงได้เทียบเท่ากับการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะมีประโยชน์ในแง่ของการลดพลังงานลงเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้
- 3) สามารถสังเคราะห์เม็ดเซรามิกที่มีความหนาแน่นมากที่สุดได้ประมาณร้อยละ 95 เมื่อเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นที่วัดได้นั้นเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับผู้ทดลอง เช่น จำนวนเม็ดเซรามิกที่ทำการทดลอง และจากผลการทดลองที่วัดค่าได้นั้นจะเห็นว่าในแต่ละอุณหภูมิ เมื่อทำการเปรียบเทียบกันแล้วมีค่าของความหนาแน่นแตกต่างกันไม่มาก พบว่าที่อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ของเม็ดเซรามิกแต่ละอุณหภูมินั้นมีช่วงห่างระหว่างอุณหภูมิที่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก จึงส่งผลให้ค่าที่วัดออกมาได้มีค่าที่ไม่ห่างกันมากเท่าที่ควร ดังนั้นข้อมูลที่ได้จึงไม่เป็นนัยสำคัญกับอุณหภูมิการเผาซินเตอร์มากนัก
- 4) จากการตรวจสอบความบริสุทธิ์และเฟสที่เกิดขึ้นในเม็ดเซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และเทคนิครามาน พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03-0.05$  นั้นเซรามิกจะแสดงโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรัล ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.07$  เม็ดเซรามิกจะมีจุดรอยต่อระหว่างเฟสรอมโบฮีดรัลและเตตระโกนอลเกิดขึ้นในโครงสร้าง และที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.09-0.11$  นั้นเซรามิกจะแสดงเพียงโครงสร้างเตตระโกนอลเท่านั้น
- 5) จากการตรวจสอบด้วยสมบัติทางไฟฟ้า ได้ผลสรุปดังนี้

5.1 การตรวจสอบสมบัติค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นั้นจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นมากที่สุดถึง  $15,000$  และน้อยที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

7,365

- 5.2 ที่อุณหภูมิห้อง สัดส่วนองค์ประกอบที่มีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกสูงที่สุดคือ  $x = 0.03$  รองลงมาคือ  $x = 0.11$  0.05 0.09 และ 0.07 ตามลำดับ
- 5.3 อุณหภูมิคูรีของเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของ  $\text{CaTiO}_3$  หรือสัดส่วน  $x$  เพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิคูรีที่มีค่าสูงที่สุดคือ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  ซึ่งมีอุณหภูมิคูรีเท่ากับ 118 องศาเซลเซียส และต่ำสุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03$  ซึ่งมีอุณหภูมิคูรีเป็น 89 องศาเซลเซียส
- 5.4 เซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  มีเพียงสามสัดส่วนองค์ประกอบนั้นที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสคือ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03$  0.05 และ 0.07 โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03$  นั้นมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็น 69 องศาเซลเซียส ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นั้นมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็น 57 องศาเซลเซียส และที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.07$  นั้นมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสอยู่ที่ 34 องศาเซลเซียส
- 5.5 จากการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก พบว่ายิ่งเราให้สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นในทุกสัดส่วนองค์ประกอบแล้วค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นก็จะสูงตามไปด้วย และหากพิจารณาแนวโน้มของค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  นั้นก็พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  นั้นจะให้ค่าโพลาริเซชันและค่าโพลาริเซชันคงค้างสูงที่สุด ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  นั้นจะให้ค่าโพลาริเซชันและค่าโพลาริเซชันคงค้างต่ำที่สุด
- 5.6 จากการตรวจสอบค่าสนามลบล้างโพลาริเซชันที่เกิดขึ้น พบว่ามีค่ามากที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.11$  และมีค่าน้อยที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.03$

#### 5.1.2 การหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$

- 1) สามารถเตรียมเม็ดเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่มีความบริสุทธิ์ได้ในทุกๆ สัดส่วนองค์ประกอบตั้งแต่  $x = 0.02-0.10$
- 2) จากการศึกษาค่าความหนาแน่นในเรื่องอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความหนาแน่นของเม็ดเซรามิก พบว่าที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,400 องศาเซลเซียส สามารถทำให้เม็ดเซรามิกมีความหนาแน่นที่สูงได้เทียบเท่ากับการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะมีประโยชน์ในแง่ของการลดพลังงานลงเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้
- 3) สามารถสังเคราะห์เม็ดเซรามิกที่มีความหนาแน่นมากที่สุดได้ประมาณร้อยละ 95 เมื่อเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นที่วัดได้นั้นเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับผู้ทดลอง เช่น จำนวนเม็ดเซรามิกที่ทำการทดลอง และจากผลการทดลองที่วัดค่าได้นั้นจะเห็นได้ว่าในแต่ละอุณหภูมิ เมื่อทำ

การเปรียบเทียบกันแล้วมีค่าความหนาแน่นแตกต่างกันไม่มาก พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ของเม็ดเซรามิคแต่ละอุณหภูมินั้นมีช่วงห่างระหว่างอุณหภูมิที่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก จึงส่งผลให้ค่าที่วัดออกมาได้มีค่าที่ไม่ห่างกันมากเท่าที่ควร ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จึงไม่เป็นนัยสำคัญกับอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์มากนัก

- 4) จากการตรวจสอบความบริสุทธิ์และเฟสที่เกิดขึ้นในเม็ดเซรามิคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และเทคนิครามาน พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02-0.04$  นั้นเซรามิคจะแสดงโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรัล ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.06$  เม็ดเซรามิคจะมีจุดรอยต่อระหว่างเฟสรอมโบฮีดรัลและเตตระโกนอลเกิดขึ้นในโครงสร้าง และที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08-0.10$  นั้นเซรามิคจะแสดงเพียงโครงสร้างเตตระโกนอลเท่านั้น
- 5) จากการตรวจสอบด้วยสมบัติทางไฟฟ้า ได้ผลสรุปดังนี้
  - 5.1. การตรวจสอบสมบัติค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  นั้นจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นมากที่สุดถึง 11,755 และน้อยที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.10$  ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 8,430
  - 5.2. ที่อุณหภูมิห้อง สัดส่วนองค์ประกอบที่มีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกสูงที่สุดคือ  $x = 0.02$  รองลงมาคือ  $x = 0.04$  0.10 0.06 และ 0.08 ตามลำดับ
  - 5.3. อุณหภูมิคูรีของเซรามิคที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของ  $\text{CaTiO}_3$  หรือสัดส่วน  $x$  เพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิคูรีที่มีค่าสูงที่สุดคือ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.10$  ซึ่งมีอุณหภูมิคูรีเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส และต่ำสุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  ซึ่งมีอุณหภูมิคูรีเป็น 94 องศาเซลเซียส
  - 5.4. เซรามิคที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  มีเพียงสามสัดส่วนองค์ประกอบนั้นที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสคือ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  0.04 และ 0.06 โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  นั้นมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็น 70 องศาเซลเซียส ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.04$  นั้นมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็น 47 องศาเซลเซียส และที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.06$  นั้นมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสอยู่ที่ 20 องศาเซลเซียส
  - 5.5. จากการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก พบว่ายิ่งเราให้สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นในทุกๆสัดส่วนองค์ประกอบแล้วค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นก็จะลดต่ำลงตามไปด้วย และหากพิจารณาแนวโน้มของค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  นั้นก็พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  นั้นจะให้ค่าโพลาริเซชันสูงที่สุด และค่าโพลาริเซชันต่ำที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.10$  ส่วนค่าโพลาริเซชันคงค้างสูงที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.06$  ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.04$  นั้นจะให้ค่าโพลาริเซชันและค่าโพลาริเซชันคงค้างต่ำที่สุด
  - 5.6. จากการตรวจสอบค่าสนามลบล้างโพลาริเซชันที่เกิดขึ้น พบว่ามีค่ามากที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.10$  และมีค่าน้อยที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$

120 องศาเซลเซียส และต่ำสุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  ซึ่งมีอุณหภูมิคูรีเป็น 94 องศาเซลเซียส

5.4. เซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  มีเพียงสามสัดส่วนองค์ประกอบนั้นที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสคือ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  0.04 และ 0.06 โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$  นั้นมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็น 70 องศาเซลเซียส ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.04$  นั้นมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็น 47 องศาเซลเซียส และที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.06$  นั้นมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสอยู่ที่ 20 องศาเซลเซียส

5.5. จากการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก พบว่ายิ่งเราให้สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นในทุกๆ สัดส่วนองค์ประกอบแล้วค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นก็จะลดต่ำลงตามไปด้วย และหากพิจารณาแนวโน้มของค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  นั้นก็พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.08$  นั้นจะให้ค่าโพลาริเซชันสูงที่สุด และค่าโพลาริเซชันต่ำที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.10$  ส่วนค่าโพลาริเซชันคงค้างสูงที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.06$  ในขณะที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.04$  นั้นจะให้ค่าโพลาริเซชันและค่าโพลาริเซชันคงค้างต่ำที่สุด

5.6. จากการตรวจสอบค่าสนามลบล้างโพลาริเซชันที่เกิดขึ้น พบว่ามีค่ามากที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.10$  และมีค่าน้อยที่สุดที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.02$

### 5.1.3 การศึกษาการเปรียบเทียบผลของลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$ และ $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$

- 1) เซรามิกที่เตรียมได้ทั้งสองระบบต่างก็มีความบริสุทธิ์เทียบเท่ากันในทุกๆอัตราส่วนที่เตรียมได้
- 2) เซรามิกที่เตรียมได้ทั้งสองระบบสามารถให้ร้อยละความหนาแน่นและร้อยละการหดตัวที่สูงได้ด้วยการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยมีประโยชน์ในแง่ของการลดพลังงานลง ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ในทั้งสองระบบ
- 3) เซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  มีค่าความหนาแน่นมากกว่าเซรามิกที่สังเคราะห์ในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$
- 4) จากการตรวจสอบความบริสุทธิ์และโครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์และเทคนิครามาน พบว่าเซรามิกที่สังเคราะห์ขึ้นทั้งสองระบบนั้นเมื่อปริมาณของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของงานวิจัยที่ดำเนินการขึ้นอย่างนั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้านการคัดค้านการพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคลเซียมไททานเนตหรือปริมาณ  $x$  เพิ่มสูงขึ้น โครงสร้างเฟสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส  
 รมโบฮีตรัลจากเตตระโกนอลเข้าสู่โครงสร้างเฟสแบบเตตระโกนอล

- 5) จากการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก พบว่าเซรามิกที่สังเคราะห์ขึ้นในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  นั้นจะให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด คือที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.05$  ซึ่งให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 15,000 และอุณหภูมิคูรีที่เกิดขึ้นในทั้งสองระบบจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อสัดส่วนของ  $x$  เพิ่มมากขึ้นโดยเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  นั้นจะมีอุณหภูมิคูรีสูงกว่าเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ซึ่งมีค่าอุณหภูมิคูรีที่สูงถึง 120 องศาเซลเซียส
- 6) จากการตรวจสอบค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก พบว่าเซรามิกทั้งสองระบบต่างก็มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นลดลงของค่าที่เกิดขึ้นอย่างไม่เป็นเส้นตรงหรือยากต่อการคาดการณ์ได้
- 7) จากการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกที่สังเคราะห์ขึ้นในทั้งสองระบบนั้น พบว่าเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  แสดงความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ดีกว่า โดยที่ค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นของเซรามิกในระบบนี้มีค่าสูงกว่าเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรทำการตรวจสอบอณูฐานวิทยาของเม็ดเซรามิกด้วยเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อนำมาวิเคราะห์ควบคู่กับการอธิบายผลของค่าร้อยละความหนาแน่นและร้อยละการหดตัวที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

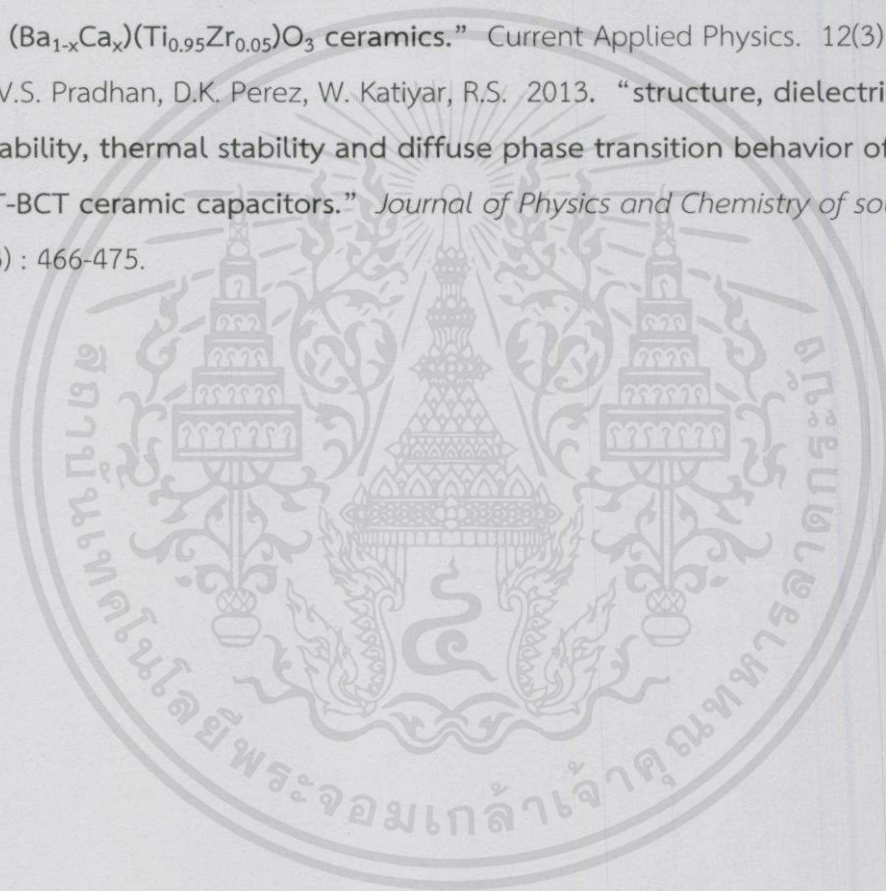
- [1] W. Wang, L.D. Wang, W.L. Li, D. Xu, Y.F. Hou, W.P. Cao, Y. Feng, W.D. Fei. (2014)  
 “Piezoelectric properties of BaTiO<sub>3</sub>-CaTiO<sub>3</sub>-BaZrO<sub>3</sub> ceramics with compositions near the morphotropic phase boundary” *Ceramics International* 40(9) 14907-14912.
- [2] วรณวิไล ไซสาร. 2552. อิทธิพลของความเค้นอัดที่มีต่อสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกแบบเรียบไทเทเนต(และเซรามิกเลดเซอร์โคเนต-เลดนิเกิลไนโอเบต).  
 เชียงใหม่ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [3] รังสรรค์ เมืองเหลือ. 2554. การประดิษฐ์และวัดฮิสเทอรีซิสของ PZ-PNN วัสดุเพอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก. กรุงเทพฯ : สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. 2553. การสังเคราะห์และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกระบบ (Bi<sub>1/2</sub>K<sub>1/2</sub>)TiO<sub>3</sub> - LiSbO<sub>3</sub>. กรุงเทพฯ : สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] ผิวพรรณ ประจันต์ศรี. 2554. การประดิษฐ์ตัวตรวจจับชนิดเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจากระบบที่มีเลดเซอร์โคเนตไททาเนตเป็นสารหลัก. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [6] นราธิป วิทยากร. 2557. วัสดุเพอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์และการประยุกต์ใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มีนเซอร์วิชั่นพลาย.
- [7] อ่อนลมี กมลอินทร์. 2552. “การศึกษาการเติมสารเจือใน PTCR BaTiO<sub>3</sub> โดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปี การดุดกลืนรังสีเอกซ์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [8] Oren, E.E. and A, C.T. 1999. Hydrothermal synthesis of Dy(0.8 at%)-doped BaTiO<sub>3</sub> powders at 90°C, Their sintering behavior and Microstructures of Dy BaTiO<sub>3</sub> powders Heated on Ti-Strips. [online].  
 Available : <http://www.cuneyttas.com/dybatiao3.htm>.
- [9] Barium Titanate ceramics. 2015. Barium titanate ceramics. [online]. Available :  
[http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/ceramic\\_sensor/Barium.htm](http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/ceramic_sensor/Barium.htm).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Baskaran, N. and Chang, H. 2002. "Thermo-Raman and dielectric constant studies of  $\text{Ca}_x\text{Ba}_{1-x}\text{TiO}_3$  ceramics." *Materials Chemistry and Physics*. 77(3) : 889-894.
- [11] Chen, X.M. Wang, T. Li, J. 2004. "Dielectric characteristics and their field dependence of  $(\text{Ba}, \text{Ca})\text{TiO}_3$  ceramics." *Materials science and engineering B*. 113(2) : 117-120.
- [12] Moura, F. Simoes, A.Z. Stojanovic, B.D. Zaghetete, M.A. Longo, E. Varela, J.A. 2008. "Dielectric and Ferroelectric characteristics of barium zirconate ceramics prepared from mixed oxide method." *Journal of Alloys and compounds*. 462(1-2) : 129-134.
- [13] Kuang, S.J. Tang, X.G. Li, L.Y. Jiang, Y.P. Liu, Q.X. 2009. "Influence of Zr dopant on the dielectric properties and Curie temperatures of  $\text{Ba}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 0.12$ ) ceramics." *Scripta materialia*. 61(1) : 68-71.
- [14] Li, W. Xu, Z. Chu, R. Fu, P. Zang, G. 2010. "Piezoelectric and dielectric properties of  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.95}\text{Zr}_{0.05})\text{O}_3$ ." *Journal of the American Ceramic Society*. 93(10) : 2942-2944.
- [15] Zhang, S. Zhang, H. Zhang, B. Yang, S. 2010. "Phase-transition behavior and piezoelectric properties of lead-free  $(\text{Ba}_{0.95}\text{Ca}_{0.05})(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$  ceramics." *Journal of alloys and compounds*. 506(1) : 131-135.
- [16] Li, W. Xu, Z. Chu, R. Fu, P. Zang, G. 2010. "High piezoelectric  $d_{33}$  coefficient in  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.98}\text{Zr}_{0.02})\text{O}_3$  lead-free ceramics with relative high Curie temperature." *Materials Letters*. 64(21) : 2325-2327.
- [17] Li, W. Xu, Z. Chu, R. Fu, P. Zang, G. 2010. "Polymorphic phase transition and piezoelectric properties of  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1})\text{O}_3$  lead-free ceramics." *Physica B Condensed Matter*. 405(21) : 4513-4516.
- [18] Wu, J. Xiao, D. Wu, W. Chen, Q. Zhu, J. Yang, Z. Wang, J. 2012. "Composition and poling condition-induced electrical behavior of  $(\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15})(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$  lead-free piezoelectric ceramics." *Journal of the European Ceramic Society*. 32(4) : 891-898.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] Tian, Y. Wei, L. Chao, X. Liu, Z. Yang, Z. 2013. "Phase transition behavior and large piezoelectricity near the morphotropic phase boundary of lead-free  $(\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15})(\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9})\text{O}_3$  Ceramics." *Journal of American Ceramic Society*. 96(2) : 496-502.
- [20] Narakorn, N. Jalupoom, P. Vaveesorn, N. Thanaboonsombut, A. 2008. "Dielectric and ferroelectric properties of  $\text{Ba}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  ceramics." *Ceramics International*. 34(4) : 779-782.
- [21] Li, W. Xu, Z. Chu, R. Fu, P. Zang G. 2012. "Structural and dielectric properties in the  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ti}_{0.95}\text{Zr}_{0.05})\text{O}_3$  ceramics." *Current Applied Physics*. 12(3) : 748-751.
- [22] Puli, V.S. Pradhan, D.K. Perez, W. Katiyar, R.S. 2013. "structure, dielectric tenability, thermal stability and diffuse phase transition behavior of lead free BZT-BCT ceramic capacitors." *Journal of Physics and Chemistry of solids*. 74(3) : 466-475.



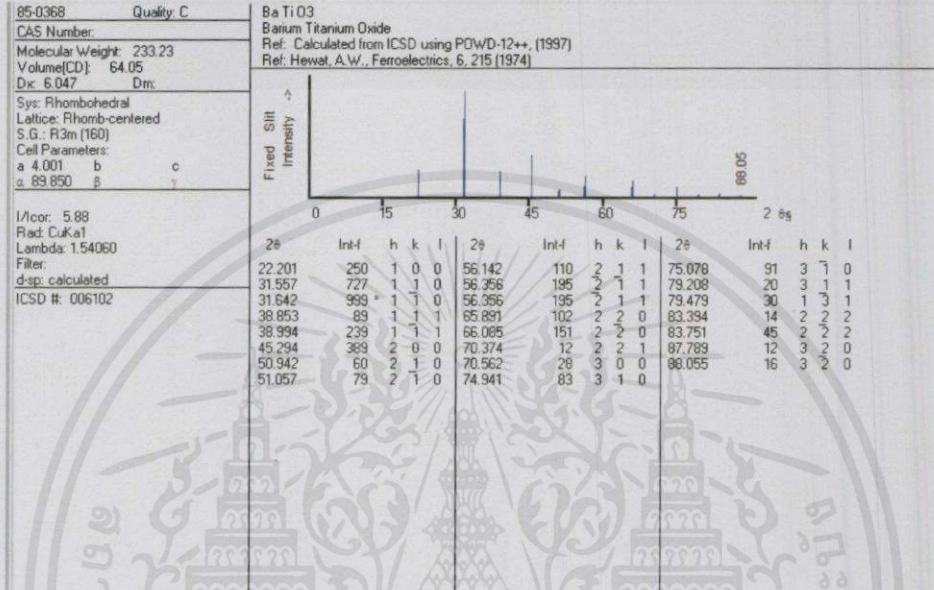
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



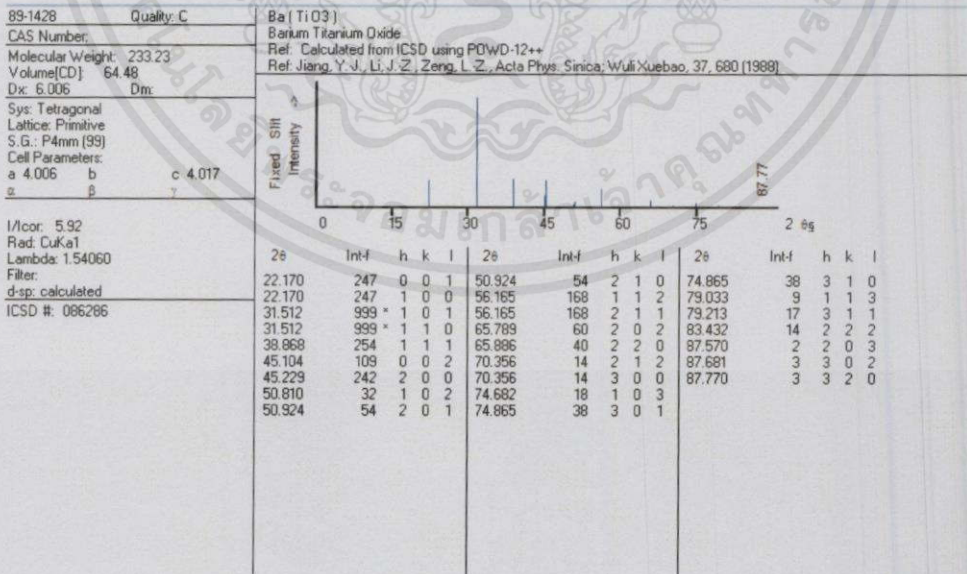
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก

## การตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะของสาร



รูปแบบไฟล์มาตรฐาน PDF #850368, Wavelength = 1.54060



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกรูปแบบไฟล์มาตรฐาน PDF #891428, Wavelength = 1.54060 รังสีที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  และเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$

สมบัติทางกายภาพเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$

Composition (x)	Density				
	$T_{\text{sinter}}$ =1350	$T_{\text{sinter}}$ =1375	$T_{\text{sinter}}$ =1400	$T_{\text{sinter}}$ =1425	$T_{\text{sinter}}$ =1450
0.03	$5.1 \pm 0.49$	$5.2 \pm 0.95$	$5.2 \pm 0.00$	$5.0 \pm 4.12$	$5.2 \pm 0.00$
0.05	$5.5 \pm 0.00$	$5.4 \pm 1.70$	$5.5 \pm 1.69$	$5.5 \pm 0.00$	$5.4 \pm 0.00$
0.07	$5.2 \pm 2.90$	$5.1 \pm 0.52$	$5.1 \pm 1.07$	$5.1 \pm 1.29$	$5.2 \pm 1.56$
0.09	$5.6 \pm 0.00$	$5.6 \pm 3.27$	$5.8 \pm 1.21$	$5.0 \pm 0.79$	$5.2 \pm 0.42$
0.11	$5.3 \pm 7.18$	$5.2 \pm 6.37$	$5.5 \pm 0.61$	$5.1 \pm 0.53$	$5.1 \pm 2.83$

แสดงความหนาแน่นของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,350 1,375 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Composition (x)	Shrinkage (cm)				
	T <sub>sinter</sub> =1350	T <sub>sinter</sub> =1375	T <sub>sinter</sub> =1400	T <sub>sinter</sub> =1425	T <sub>sinter</sub> =1450
0.03	1.3±0.39	1.9±0.06	6.9±1.29	7.6±0.58	7.6±0.71
0.05	2.4±0.32	2.5±0.39	7.5±0.71	9.3±0.06	7.5±0.58
0.07	1.4±0.13	1.3±0.06	9.3±0.13	9.4±1.29	7.3±0.06
0.09	1.9±0.13	2.2±0.19	8.0±0.06	8.1±0.96	8.4±0.71
0.11	1.5±0.13	2.0±0.26	8.3±0.06	8.1±0.06	8.2±0.19

แสดงการหดตัวของเซรามิกในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,350 1,375 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Composition (x)	density				
	T <sub>sinter</sub> =1350	T <sub>sinter</sub> =1375	T <sub>sinter</sub> =1400	T <sub>sinter</sub> =1425	T <sub>sinter</sub> =1450
0.02	5.4±0.89	5.4±0.34	5.5±0.08	5.5±0.28	5.4±0.59
0.04	5.0±0.11	5.1±0.58	5.3±1.05	5.3±1.52	5.3±1.29
0.06	5.0±0.53	5.0±0.13	5.1±0.28	5.2±1.35	5.4±0.38
0.08	5.4±2.49	5.5±0.28	5.7±0.85	5.7±0.11	5.6±0.76
0.10	4.8±0.31	4.9±0.59	4.9±2.16	5.0±0.93	4.9±1.27

แสดงความหนาแน่นของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,350 1,375 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Composition (x)	shrinkage (cm)				
	$T_{\text{sinter}} = 1350$	$T_{\text{sinter}} = 1375$	$T_{\text{sinter}} = 1400$	$T_{\text{sinter}} = 1425$	$T_{\text{sinter}} = 1450$
0.02	9.2±0.45	10.4±0.13	11.6±0.77	10.8±0.26	11.8±0.58
0.04	4.9±0.38	5.5±0.20	7.1±0.70	7.1±0.19	9.0±0.38
0.06	3.5±0.07	3.6±0.13	5.9±0.90	6.4±0.13	8.3±0.45
0.08	10.6±0.52	10.8±0.00	12.2±1.10	11.7±0.51	13.4±0.00
0.10	2.0±0.06	2.5±0.26	3.3±0.83	3.8±0.13	5.8±0.13

แสดงการหดตัวของเซรามิกในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$  ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,350 1,375 1,400 1,425 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.86\text{BaTiO}_3 - (0.14-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$

composition (x)	strain		$d_{33}^*$ (pm/V)	$T_c$ (°C)	$T_{\text{เปลี่ยนเฟส}}$ (°C)
	10 kV	30 V			
0.03	0.04	0.12	399	89	69
0.05	0.07	0.14	471	94	57
0.07	0.04	0.1	330	102	34
0.09	0.04	0.12	390	111	
0.11	0.2	0.05	190	118	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

composition (x)	Dielectric			Dielectric loss		
	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 Hz	1 kHz	10 kHz
0.03	13002	12680	12155	0.0253	0.0328	0.0301
0.05	14907	14653	14323	0.0193	0.0221	0.0249
0.07	10669	10531	10243	0.017	0.0234	273
0.09	9135	9084	8931	0.0179	0.0193	0.024
0.11	7365	7264	7162	0.0198	0.0184	0.0231

composition (x)	$P_s$			$P_r$			$E_c$		
	10 kV	20 kV	30 kV	10 kV	20 kV	30 kV	10 kV	20 kV	30 kV
0.03	4.75	6.5	7.54	1.28	1.9	2.41	-1.04	-1.58	-1.83
0.05	8.36	10.87	12.28	2.94	3.94	4.52	-1.49	-1.75	-2.02
0.07	4.83	6.91	7.98	1.41	2.55	3.25	-1.62	-1.89	-2.69
0.09	3.56	6.8	8.42	0.82	1.77	2.45	-2.51	-3.31	-3.84
0.11	2.1	5.75	7.78	0.5	1.47	2.16	-3.13	-3.93	-4.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกที่สังเคราะห์ได้ในระบบ  $0.88\text{BaTiO}_3 - (0.12-x)\text{BaZrO}_3 - x\text{CaTiO}_3$

composition (x)	strain (30V)	$d_{33}^*$ (pm/V)	$T_c$ (°C)	$T_{\text{เปลี่ยนเฟส}}$ (°C)
0.02	0.1819	610	94	70
0.04	0.1617	540	100	47
0.06	0.1367	50	107	20
0.08	0.1587	530	113	
0.10	0.0972	320	120	

composition (x)	Dielectric			Dielectric loss		
	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 Hz	1 kHz	10 kHz
0.02	10598	10368	10112	0.0216	0.0255	0.0272
0.04	11077	10851	10574	0.0205	0.0235	0.0266
0.06	10266	10140	10342	0.0172	0.0199	0.0249
0.08	11755	11623	11868	0.0177	0.0174	0.02
0.10	8430	8367	8525	0.0198	0.0184	0.0232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

composition (x)	$P_s$				$P_r$				$E_c$			
	10 kV	20 k	30 kV	40 kV	10 kV	20 k	30 kV	40 kV	10 kV	20 k	30 kV	40 kV
0.02	8.55	11.26	13.6	14.89	2.78	4.06	4.82	5.36	-1.49	-2.02	-2.82	-3.09
0.04	8.25	10.83	12.29	13.45	2.66	3.78	4.43	4.96	-1.44	-1.98	-2.51	-2.78
0.06	6.8	9.7	11.34	12.6	1.6	3.19	4.21	4.93	-1.27	-2.07	-2.86	-3.13
0.08	6.7	13.47	16.7	18.78	2.12	4.41	5.71	6.71	-2.55	-3.89	-4.42	-5.49
0.10	4.2	8.81	11.3	11.41	1.59	3.68	5.02	6.18	-3.31	-5.44	-6.77	-8.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้