ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249769

การหาอัตลักษณ์เฉพาะของเขตอุตสาหกรรมไทยในการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน

โดยการเปรียบเทียบกับเขตอุตสาหกรรมต่างประเทศ ที่ศึกษาด้วยวิธีการเชิงคุณภาพ

ปกรณ์กา สิทธิเขตรกรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาที่ดิกรีประชุกต์
พฤษภาคม 2551
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b00254937

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249769

การหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกเฟร์โรอิเล็กทริกปราศจากตะกั่วที่มีบิสมัทโซเดียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบหลัก ที่เตรียมด้วยวิธีการเผาไหม้

ปนัดดา สิทธิเขตรกรณ์

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
พฤษภาคม 2555
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ เรื่อง "การหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกเฟร์โรอิเล็กทริกปราศจากตะกั่วที่มีบิสมัทโซเดียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบหลัก ที่เตรียมด้วยวิธีการเผาไหม้" ของ ปนัดดา สิทธิเขตรกรณ์ เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ของมหาวิทยาลัยนเรศวร

.....ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฑิราณี ขำล้ำเลิศ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระชัย บงการณ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรือโทหญิง ดร.นิภาภัทร เจริญไทย)

.....กรรมการ
(ดร.ศราวุฒิ เถื่อนถ้ำ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรวรรณ ฤทธิเดช)

อนุมัติ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คนึงนิจ ภู่พัฒน์วิบูลย์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
11 พฤษภาคม 2555

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระชัย บงการณ์ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้อุตส่าห์สละเวลาอันมีค่ามาเป็นที่ปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรือโทหญิง ดร. นิภาภัทร เจริญไทย ดร.ศราวุฒิ เถื่อนถ้ำ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฑิราณี ขำล้ำเลิศ กรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรวรรณ ฤทธิเดช กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทำให้งานวิจัยนี้มีความทรงคุณค่าแห่งการศึกษา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ และบุคลากร ของคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณโครงการพัฒนากำลังคนด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) ที่ให้ทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัยตลอดหลักสูตรการศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในทุน MAG Window II ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์ที่พึงมีจากการศึกษาค้นคว้าในครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ท้ายสุด หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขออภัยเป็นอย่างสูงในข้อบกพร่องและผิดพลาดนั้น และข้าพเจ้าหวังว่างานวิจัยนี้คงมีประโยชน์ไม่มากก็น้อยสำหรับผู้ต้องการศึกษาต่อไป

ปนัดดา สิทธิเขตรกรณ์

ชื่อเรื่อง	การหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกเฟร์โรอิเล็กทริกปราศจากตะกั่วที่มีบิสมัทโซเดียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบหลัก ที่เตรียมด้วยวิธีการเผาไหม้
ผู้วิจัย	ปนัดดา สิทธิเขตรกรณ์
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีระชัย บงการณ์
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรือโทหญิง ดร. นิภาภัทร เจริญไทย ดร.ศราวุฒิ เถื่อนถ้ำ
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2554
คำสำคัญ	บิสมัทโซเดียมไททาเนต แบเรียมไททาเนต แคลเซียมไททาเนต สทรอนเชียมไททาเนต วิธีการเผาไหม้การเผาไหม้ เฟร์โรอิเล็กทริก ที่ปราศจากตะกั่ว

บทคัดย่อ

249769

ศึกษาลักษณะเฉพาะของเซรามิกเฟร์โรอิเล็กทริกปราศจากตะกั่วที่มีบิสมัทโซเดียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบหลัก ที่เตรียมด้วยวิธีการเผาไหม้ เซรามิกในระบบ 1- $x(Bi_{0.5}Na_{0.5})TiO_3$-$xATiO_3$ [A = Ba^{2+}, Ca^{2+} และ Sr^{2+}] หรือ BNTBT100x, BNTCT100x และ BNTCT100x โดยที่ x = 0-0.12, 0-0.08 และ 0-0.12 ตามลำดับ โดยซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1050 และ 1210 องศาเซลเซียส ศึกษาโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่น ขนาดเกรนเฉลี่ย และสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอย่างด้วยเทคนิคการลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิธีของอาร์คิมีดีส วิธีหาค่าเฉลี่ยเชิงเส้น เครื่องวัดไดอิเล็กทริก LCR เครื่องวัดสมบัติเฟร์โร อิเล็กทริก และเครื่องวัดสมบัติพิโซอิเล็กทริก ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก BNTBT100x พบว่ามีโครงสร้างแบบผสมของรอมโบฮีดรอลและเททระโนอล ที่ $x \leq 0.04$ เซรามิกมีโครงสร้างเป็นแบบรอมโบฮีดรอลซึ่งเหมือนกับ BNT เมื่อปริมาณ BT เพิ่มขึ้น เซรามิกมีความเป็นเททระโกนอลลิตี้มากขึ้น ในขณะที่ $x \geq 0.10$ เซรามิกมีโครงสร้างเป็นแบบเททระโกนอลซึ่งเหมือนกับ BT ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก BNTBT100x พบว่ารูปร่างเกรนส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายทรงกลมและสี่เหลี่ยมมุมฉาก เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่ออุณหภูมิซินเตอร์สูงขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิซินเตอร์เดียวกันขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น

249769

สำหรับเซรามิก BNTBT2 และ BNTBT4 ค่าความหนาแน่น ค่าความหดตัวเชิงเส้น และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึง 1150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะเกิดการระเหยของ Bi^{3+} และ Na^{+}. ในขณะที่เซรามิก BNTBT6 BNTBT8 BNTBT10 และ BNTBT12 ค่าความหนาแน่น ค่าความหดตัวเชิงเส้น และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึง 1200 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะพบเฟสแปลกปลอม นอกจากนั้น เซรามิก BNTBT8 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิคูรีสูงสุด ค่าความหนาแน่นสูงสุด ค่าคงที่พิโซอิเล็กทริก โดยมีค่าประมาณ 7400 5.80 g/cm^3 และ 169 pC/N ตามลำดับ และมี ค่า P_r และ E_c (ใช้สนามไฟฟ้าเพิ่ม 40 kV) เท่ากับ 28.10 $\mu C/cm^3$ และ 21.02 kV/cm ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก BNTCT100x พบว่ามีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอลในทุกๆตัวอย่าง และผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่ารูปร่างเกรนส่วนใหญ่ของเซรามิกมีลักษณะคล้ายทรงกลมและสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึง 1150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การหดตัวเชิงเส้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นเซรามิก BNTCT2 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิคูรี สูงสุดค่าความหนาแน่นสูงสุดและค่าคงที่พิโซอิเล็กทริก โดยมีค่าประมาณ 3208 5.57 g/cm^3 และ 40 pC/N ตามลำดับ และมีค่า P_r และ E_c (ใช้สนามไฟฟ้าเพิ่ม 40 kV) เท่ากับ 17.4 $\mu C/cm^3$ และ 30.13 kV/cm ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก BNTST100x พบว่ามีโครงสร้างแบบคิวบิกในทุกๆตัวอย่าง และผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่ารูปร่างเกรนส่วนใหญ่ของเซรามิกมีลักษณะคล้ายทรงกลมและสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ค่าความหนาแน่น และการหดตัวเชิงเส้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นเซรามิก BNTST20 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิคูรีสูงสุด ค่าความหนาแน่นสูงสุด และค่าคงที่พิโซอิเล็กทริก โดยมีค่าประมาณ 4725 5.57 g/cm^3 และ 90 pC/N ตามลำดับ และมี ค่า P_r และ E_c (ใช้สนามไฟฟ้าเพิ่ม 40 kV) เท่ากับ 17.19 $\mu C/cm^3$ และ 29.61 kV/cm ตามลำดับ

Title	CHARACTERIZATION OF LEAD-FREE BISMUTH SODIUM TITANATE BASED FERROELECTRIC CERAMICS PREPARED VIA COMBUSTION METHOD
Author	Panadda Sittiketkorn
Advisor	Assistant Professor Theerachai Bongkarn, Ph.D.
Co-Advisor	Assistant Professor Lieutenanrt Junior Grade Nipaphat Charoenthai, Ph.D. Sarawut Thountom, Ph.D.
Academic Paper	Thesis M.S. in Applied Physics, Naresuan University, 2011
Keyword	bismuth sodium titanate, barium titanate, calcium titanate, strontium titanate, combustion technique, lead-free ferroelectric

ABSTRACT

249769

Characterization of lead-free bismuth sodium titanate based ferroelectric ceramics prepared via combustion method was studies. 1- $x(Bi_{0.5}Na_{0.5})TiO_3$-$xATiO_3$ [A = Ba^{2+}, Ca^{2+} and Sr^{2+}] BNTBT100x, BNTCT100x and BNTCT100x with x = 0-0.12, 0-0.08 and 0-0.12, were sintered between 1050 and 1210 °C. The crystal structure, microstructure, density, average grain sizes and electrical properties of the samples were investigated using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), the Archimedes method, the mean linear intercept method, a LCR impedance analyzer, a ferroelectric test system and a quasistatic d_{33} meter.

The XRD results of BNTBT100x ceramics showed mixed of rhombohedral and tetragonal phase. For $x \leq 0.04$, the sintered pellets were indexed in rhombohedral system which was similar to pure BNT. The tetragonality increased with increase BT content. While $x \geq 0.10$, the sintered pellets were indexed in tetragonall system which was similar to pure BT ceramics. The microstructure of BNTBT100x ceramics exhibited an almost spherical and irregular shape. The average grain size of the samples increased with the increase of sintering temperatures, while the grain sizes decreased with the increase of BT content. The density, linear shrinkage and maximum dielectric

249769

constant of BNTBT2 and BNTBT4 ceramics increased with increasing sintering temperatures up to 1150 °C and then evaporation of $Bi^{3+}$and Na^{+}. While, the density, linear shrinkage and maximum dielectric constant of BNTBT6 BNTBT8 BNTBT10 and BNTBT12 ceramics increased with increasing sintering temperatures up to 1200 °C and then the impurity phases were detected at higher sintering temperatures. Moreover, the BNTBT8 ceramics sintered at 1200 °C showed the highest dielectric constant at T_c, highest density and highest piezoelectric constant of 7400, 5.80 g/cm^3 and 169 pC/N, respectively. The P_r and E_c (using electric flied at 40 kV) were 28.10 μC/cm^3 and 21.02 kV/cm, respectively.

The XRD results of BNTCT100x ceramics exhibited the rhombohedral phase in all the sample. The microstructure of BNTCT100x ceramics exhibited an almost spherical and irregular shape. The average grain size of the samples increased with the increase of sintering temperatures. The density of BNTCT100x ceramics increased with increasing sintering temperatures up to 1150 °C and thereafter they decreased. The linear shrinkage of BNTCT100x ceramics increased with increasing sintering temperatures. Moreover, the BNTCT2 ceramics sintered at 1150 °C showed the highest dielectric constant at T_c, highest density and highest piezoelectric constant of 3208, 5.57 g/cm^3 and 40 pC/N, respectively. The P_r and E_c (using electric flied at 40 kV) were 17.4 μC/cm^3 and 30.13 kV/cm, respectively.

The XRD results of BNTST100x ceramics exhibited the cubic phase in all the sample. The microstructure of BNTST100x ceramics exhibited an almost spherical and irregular shape. The average grain size of the samples increased with the increase of sintering temperatures. The density and linear shrinkage of BNTST100x ceramics increased with increasing sintering temperatures. Moreover, the BNTST20 ceramics sintered at 1200 °C showed the highest dielectric constant at T_c, highest density and highest piezoelectric constant of 4725, 5.57 g/cm^{3}and 90 pC/N, respectively. The P_r and E_c (using electric flied at 40 kV) were 17.19 μC/cm^3 and 29.61 kV/cm, respectively.

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	**บทนำ**	1
	ความเป็นมาของปัญหา	1
	จุดมุ่งหมายของการศึกษา	3
	ขอบเขตของงานวิจัย	3
2	**เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	4
	เฟร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric)	4
	สมบัติพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric property)	8
	พาราอิเล็กทริก (Paraelectric)	9
	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer)	10
	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscope)	14
	หลักการเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	14
	การซินเตอร์	16
	การหาความหนาแน่น (Density)	20
	การเตรียมเซรามิกด้วยวิธีการเผาไหม้	21
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
3	**อุปกรณ์และวิธีการทดลอง**	32
	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	32
	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร	32
	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	32
	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง	33
	วิธีการทดลอง	33

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	**ผลการวิจัย**	39
	ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงผลึกบิสมัทโซเดียมไททาเนต ผงผลึกแบเรียมไททาเนต ผงผลึกแคลเซียมไททาเนต และผงผลึกสทรอนเชียม ไททาเนต	39
	ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของเซรามิกบิสมัทโซเดียมไททาเนต-แบเรียมไททาเนต เซรามิกบิสมัทโซเดียมไททาเนต-แคลเซียมไททาเนต และเซรามิกบิสมัทโซเดียมไททาเนต-สทรอนเชียมไททาเนต	42
5	**บทสรุป**	102
	สรุปการตรวจสอบผงผลึกบิสมัทโซเดียมไททาเนต ผงผลึกแบเรียมไททาเนต ผงผลึกแคลเซียมไททาเนต และผงผลึกสทรอนเชียมไททาเนต	102
	สรุปการตรวจสอบเซรามิกบิสมัทโซเดียมไททาเนต-แบเรียมไททาเนต (1-x) BNT-xBT; BNTBT100x	102
	สรุปการตรวจสอบเซรามิกบิสมัทโซเดียมไททาเนต-แบเรียมไททาเนต (1-x) BNT-xCT; BNTCT100x	103
	สรุปการตรวจสอบเซรามิกบิสมัทโซเดียมไททาเนต-แบเรียมไททาเนต (1-x) BNT-xST; BNTST100x	103
บรรณานุกรม		105
ประวัติผู้วิจัย		110

สารบัญตาราง

ตาราง **หน้า**

1 แสดงค่าแลตทิซแสดงความเป็นรอมโบฮีดรอล ค่าคงที่แลตทิซและอัตราส่วน *c/a* ของเซรามิก BNTBT100x 50

2 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ย ความหนาแน่น และการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก BNTBT100x ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ..... 59

3 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ย ความหนาแน่น และการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก BNTBT100x ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส..... 60

4 แสดงอุณหภูมิ depolarization (T_d) อุณหภูมิคูรี (T_m) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε_r) ที่ T_m ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก ($tan\ \delta$) ที่ T_m ของเซรามิก BNTBT100x ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ..... 67

5 แสดงค่าคงที่พิโซอิเล็กทริก (d_{33}) โพลาไรเซชันอิ่มตัว (P_s) โพลาไรเซชันคงค้าง (P_r) และสนามไฟฟ้าลบล้าง (E_c) ของเซรามิก BNTBT8..... 69

6 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ย ความหนาแน่น การหดตัวเชิงเส้น และ แลตทิซพารามิเตอร์ a_R ของเซรามิกBNTBT100x ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ..... 79

7 แสดงอุณหภูมิ depolarization (T_d) อุณหภูมิคูรี (T_m) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε_r) ที่ T_m ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ที่ T_m ของเซรามิก BNTCT100x 83

8 แสดงค่าคงที่พิโซอิเล็กทริก (d_{33}) โพลาไรเซชันอิ่มตัว (P_s) โพลาไรเซชันคงค้าง (P_r) และสนามไฟฟ้าลบล้าง (E_c) ของเซรามิก BNTCT2..... 85

9 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ย ความหนาแน่น การหดตัวเชิงเส้น และแลตทิซพารามิเตอร์ a_R ของเซรามิกBNTST100x ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ 95

10 แสดงค่าคงที่พิโซอิเล็กทริก (d_{33}) โพลาไรเซชันอิ่มตัว (P_s) โพลาไรเซชันคงค้าง (P_r) และสนามไฟฟ้าลบล้าง (E_c) ของเซรามิกBNTST20 และ BNTST30..... 101

สารบัญภาพ

ภาพ หน้า

1 แผนภาพแสดงการแบ่งกลุ่มพิโซอิเล็กทริกและกลุ่มย่อย..... 4

2 ความต่างเฟสระหว่างกระแสสลับ (I) และศักย์ไฟฟ้า (V) ของวัสดุไดอิเล็กทริก (a)กรณีไม่มีการสูญเสียพลังงาน (b) กรณีมีการสูญเสียพลังงาน..... 7

3 วงรอบฮีสเทอรีซีสระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้าในสารเฟร์โรอิเล็กทริก 8

4 ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกในวัสดุ (ก) แบบตรง (ข) แบบผันกลับ..... 9

5 วงรอบฮิสเทอรีซิสระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้าใน (a) สารแอนติเฟร์โร-อิเล็กทริก (b) สารพาราอิเล็กทริก..... 10

6 แบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์ 12

7 แสดงพฤติกรรมการซินเตอร์แบบสถานะของแข็งทั่ว ๆ ไปในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา 17

8 แสดงพัฒนาการของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง (a) อนุภาคผงยึดกันอยู่แบบหลวม ๆ หลังการอัดขึ้นรูป (b) การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น (c) การซินเตอร์ช่วงกลาง และ (d) การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย..... 18

9 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเผาไหม้..... 22

10 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNBT ที่โพล (ε^{T}_{33}) และไม่ได้โพล (ε_s)..... 23

11 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNBT-5 (x = 0.05)..... 24

12 วงรอบฮิสเทอรีซีสของเซรามิก BNBT-5 (a) ที่อุณหภูมิห้อง (b) ที่อุณหภูมิ160 องศาเซลเซียส..... 24

13 ความสัมพันธ์ของปริมาณ $Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$ และ $BaTiO_3$ ในระบบ $(Bi_{0.5}Na_{0.5})_{1-x}Ba_xTiO_3$ โดยที่ F_α คือเฟสเฟร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอล F_β คือเฟสเฟร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเททระโกนอล AF คือเฟสแอนติเฟร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอล P คือเฟสพาราอิเล็กทริก 25

14 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก (1- x)BNT-xBT..... 26

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
15	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเซรามิก (1- x)BNT-xBT ที่เผาซินเตอร์ที่ 1200 องศาเซลเซียส โดย (a) x = 0 และ (b) x = 0.06.....	26
16	แสดงค่า d_{33}, k_p, ε_r และ $tan\delta$ ของเซรามิก(1- x)BNT-xBT	27
17	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก (1-x)BNT-xBT ที่ปริมาณ x ต่างๆ.....	28
18	ค่าคงที่พิโซอิเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์ไฟฟ้าเชิงกลของเซรามิก (1- x)BNT-xBT ที่ปริมาณ x ต่างๆ.....	28
19	ค่าคงที่แลตทิซและค่าแลตทิซแสดงความเป็นรอมโบฮีดรอล (90° - α) ของเซรามิกBNCT100x และ BNST100x ที่ปริมาณ x ต่างๆ	29
20	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNST100x ที่ปริมาณ x ต่างๆ (a) x=0.04 (b) x=0.08, (c) x=0.14, (d) x=0.20 และ (e) x=0.24 โดยวัดที่ความถี่10kHz	30
21	ค่าคงที่พิโซอิเล็กทริก, d_{33} ของ BNBT100x, BNST100x และ BNCT100x ที่ปริมาณ x ต่างๆ.....	31
22	แสดงขั้นตอนการซินเตอร์เซรามิกเซรามิกมิกบิสมัทโซเดียมไททาเนต-แคลเซียมไททาเนต (BNTCT) เซรามิกบิสมัทโซเดียมไททาเนต-สทรอนเซียมไททาเนต (BNTST) และเซรามิกบิสมัทโซเดียมไททาเนต-แบเรียมไททาเนต (BNTBT)	38
23	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึกบิสมัทโซเดียมไททาเนต ($Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$) ผงผลึกแบเรียมไททาเนต($BaTiO_3$) ผงผลึกแคลเซียมไททาเนต($CaTiO_3$) และผงผลึกสทรอนเซียมไททาเนต($SrTiO_3$) ที่เตรียมด้วยวิธีเผาไหม้.....	40
24	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของผงผลึกต่างๆ โดยที่ (ก) ผงผลึกบิสมัทโซเดียมไททาเนต (ข) ผงผลึกแบเรียมไททาเนต (ค) ผงผลึกแคลเซียมไททาเนต และ (ง) ผงผลึกสทรอนเซียมไททาเนต.....	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ หน้า

25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT2 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ 43

26 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT4 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ 44

27 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT6 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ 45

28 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT8 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ 46

29 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT10 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ..... 47

30 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT12 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ..... 48

31 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT100x (a) x = 0.02 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส (b) x = 0.04 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส (c) x = 0.06 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส (d) x = 0.08 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส (e) x = 0.10 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200องศาเซลเซียส และ (f) x = 0.12 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส..... 49

32 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT2 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส และ(ค) 1150 องศาเซลเซียส..... 52

33 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT4 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส และ(ค) 1150 องศาเซลเซียส..... 53

34 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT6 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส (ง) 1200 องศาเซลเซียส และ (จ) 1210 องศาเซลเซียส..... 54

35 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT8 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส (ง) 1200 องศาเซลเซียส และ (จ) 1210 องศาเซลเซียส..... 55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
36	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT10 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส (ง) 1200 องศาเซลเซียส และ (จ) 1210 องศาเซลเซียส.....	56
37	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT12 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส (ง) 1200 องศาเซลเซียส และ (จ) 1210 องศาเซลเซียส.....	57
38	ภาพถ่ายบริเวณรอยหักของเซรามิก BNTBT8 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส.....	58
39	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT2 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	62
40	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT4 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	63
41	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT6 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	63
42	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT8 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	64
43	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT10 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	64
44	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT12 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	65
45	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT100x ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 – 1200 องศาเซลเซียส.....	65
46	T_d และ T_m ของเซรามิก BNTBT100x ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส	66
47	วงรอบฮิสเทอรีซิสของเซรามิก BNTBT8 ที่ค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ.....	68
48	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTCT2 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	71
49	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTCT4 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
50	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTCT6 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ	73
51	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTCT8 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	74
52	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTCT2 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส.....	76
53	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTCT4 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส.....	76
54	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTCT6 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส.....	77
55	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTCT8 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส.....	77
56	ภาพถ่ายบริเวณรอยหักของเซรามิก BNTCT2 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส.....	78
57	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTCT2 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	81
58	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTCT4 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	81
59	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTCT6 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	82
60	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTCT8 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	82
61	วงรอบฮิสเทอรีซิสของเซรามิก BNTBT8 ที่ค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ.....	84
62	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTST10 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
63	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTST20 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ	88
64	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTST30 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ	89
65	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTST40 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ	90
66	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTST10 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส	92
67	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTST20 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส	92
68	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTST30 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส	93
69	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTST40 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส	93
70	ภาพถ่ายบริเวณรอยหักของเซรามิก BNTST20 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส	94
71	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTST10 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ	97
72	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTST20 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ	97
73	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTST30 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ	98
74	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTST40 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ	98

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
75	วงรอบฮิสเทอรีซิสของเซรามิก BNTST20 ที่ค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ.....	99
76	วงรอบฮิสเทอรีซิสของเซรามิก BNTST30 ที่ค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ.....	100