ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242248

การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกเฟร์โรอิเล็กทริก ที่มีแบเรียมไทเทเนตเป็นฐาน

พรสวาท ใบหยวาสน์

วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มกราคม 2554

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242248

การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกเฟร์โรอิเล็กทริก ที่มีแบเรียมไทเทเนตเป็นฐาน

พรสวาท ใบพายวาสน์

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มกราคม 2554

การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกเฟร์โรอิเล็กทริกที่มีแบเรียมไทเทเนตเป็นฐาน

พรสวาท ใบพายวาสน์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
ดร. อธิพงศ์ งามจารุโรจน์

.....กรรมการ
ดร. ละอองนวล ศรีสมบัติ

.....กรรมการ
ผศ.ดร. รัตติกร ยิ้มนิรัญ

.....กรรมการ
รศ.ดร. สุพล อนันตา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
รศ.ดร. สุพล อนันตา

27 มกราคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สุพล อนันตา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร ยิ้มนิรัญ ดร.อธิพงศ์ งามจารุโรจน์ และดร.ละอองนวล ศรีสมบัติ ที่กรุณารับเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ศูนย์วิจัยนาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี - Nanoscience and Nanotechnology Center, CMU คณะวิทยาศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่กรุณาสนับสนุนทุนช่วยในการวิจัยแก่ผู้เขียนในระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณ อาจารย์หนุ่ม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เตาเผาไฟฟ้า อาจารย์สุคนธ์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer และ Differential scanning calorimetry อาจารย์อนุสรณ์ นิยมพันธ์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง X-ray diffractometer ตลอดงานวิจัย เจ้าหน้าที่ศูนย์จุลทรรศน์อิเล็กตรอน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับการช่วยเหลือพัฒนาทักษะในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พี่ยุทธ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องของอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนให้ข้อแนะนำและคำปรึกษาต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี รวมทั้งเพื่อนฝูง พี่น้อง รวมทั้งญาติทุกคน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณพ่อ คุณแม่ อาจารย์นิโรจน์ และอาจารย์นวพรรณ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยเป็นอย่างสูงในข้อบกพร่องและความผิดพลาดนั้น และผู้เขียนหวังว่าวิทยานิพนธ์นี้คงมีประโยชน์บ้างไม่มากก็น้อยสำหรับผู้ที่สนใจจะศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับสารเซรามิกเฟร์โรอิเล็กทริกที่มีแบเรียมไทเทเนตเป็นฐานต่อไป

พรสวาท ใบพายวาสน์

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกเฟร์โรอิเล็กทริกที่มีแบเรียมไทเทเนตเป็นฐาน

ผู้เขียน นางสาว พรสวาท ใบพายวาสน์

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพล อนันตา

บทคัดย่อ

242248

งานวิจัยนี้ ได้มีการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ การศึกษาสารเซรามิกในระบบแบเรียมไทเทเนต ($BaTiO_3$) และในระบบแบเรียมไทเทเนตชนิดที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียม ด้วยเทคนิคมิกซ์ออกไซด์ที่ใช้ผง BT ขนาดอนุภาคนาโนเป็นสารตั้งต้น โดยในส่วนแรกนั้น จะศึกษาอิทธิพลของเวลาในการบดย่อย และอุณหภูมิซินเตอร์ต่อพฤติกรรมการเกิดเฟส โครงสร้างจุลภาค รวมไปถึงสมบัติทางไฟฟ้าของสารเซรามิก BT พบว่า โครงสร้างผลึกของสารเซรามิก BT เป็นแบบ tetragonal ซึ่งที่เวลาในการบดย่อยนาน 20 ชั่วโมง และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1400 °ซ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้สารเซรามิก BT สามารถแสดงโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี โดยสารเซรามิก BT จะมีความหนาแน่นสูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ($\varepsilon_r max$) ค่า saturation polarization (P_s) และ remnant polarization (P_r) มีค่าสูงขึ้น

นอกจากนี้ ในส่วนที่ 2 ของงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของโลหะแทรนซิชัน (เหล็กและไนโอเบียม) ต่อพฤติกรรมการเกิดเฟส โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของสารเซรามิก BT ที่มีสูตรเป็น $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$ เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.025 ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคมิกซ์ออกไซด์ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของไนโอเบียมเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความหนาแน่น และขนาดเกรนของสารเซรามิก BT ชนิดที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียมลดลง แต่เมื่อศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และสมบัติฮิสเทอรีซิสของสารเซรามิก $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$ พบว่า อุณหภูมิคูรี (T_c) มีค่าสูงขึ้น แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลง ส่วนค่า saturation polarization (P_s) และ remnant polarization (P_r) มีค่าสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของไนโอเบียมเพิ่มขึ้น

Thesis Title	Preparation and Characterization of Barium Titanate-Based Ferroelectric Ceramics
Author	Miss Phornsawat Baipaywad
Degree	Master of Science (Materials Science)
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Supon Ananta

ABSTRACT

242248

This research has been studies 2 parts of barium titanate ($BaTiO_3$) and Fe^{3+}/Nb^{5+} doped barium titanate ceramic systems derived from starting $BaTiO_3$ nanopowders. First, effects of milling time and sintering temperature on phase formation, microstructure and electrical properties of ceramics were investigated. It was found that the crystal structure of BT ceramics was showed tetragonal phase and the best of microstructure and electrical properties was achieved at 20 h of ball-milling and sintered at 1400 °C for 4 h with heating/cooling rates of 10 °C/min. BT ceramics sintered exhibit higher density for 99% that the result for relative permittivity (ε_r), saturation polarization (P_s) and remnant polarization (P_r) were higher.

In the part 2: this research has been investigated effect of transition metal (Fe and Nb) on phase behavior, microstructure and electrical properties of $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$ ceramics when x = 0.01 and 0.025 were prepared by mixed oxide method. It was found that the density and grain size of Fe^{+3}/Nb^{+5} doped BT ceramics were decreased when the concentration of Nb was increased. Temperature dependence of dielectric properties and hysteresis properties for $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$ ceramics were studied. It was found that Curie temperature, saturation polarization (P_s) and remnant polarization (P_r) were increased but relative permittivity was decreased when increase the concentration of Nb.

สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญตาราง	ซ
สารบาญภาพ	ฌ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฑ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การทบทวนทฤษฎี และเอกสารทางวิชาการ	3
2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของสารแบเรียมไทเทเนต	3
2.2 ข้อมูลของสารเซรามิกแบเรียมไทเทเนตชนิดที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียม	15
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	21
3.1 การเตรียมชิ้นงาน	21
3.1.1 การเตรียมผงแบเรียมไทเทเนตที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร	22
3.1.2 การเตรียมผงแบเรียมไทเทเนตที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียม	24
3.1.3 กระบวนการประดิษฐ์เซรามิก	25
3.2 การตรวจสอบชิ้นงาน	27
3.2.1 การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analyzer และ Differential scanning calorimetry	27
3.2.2 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	29
3.2.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวขนาดอนุภาค	31
3.2.4 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก	32
3.2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	33
3.2.6 การวัดสมบัติไดอิเล็กทริก	35
3.2.7 การวัดสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริก	37

บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล (ส่วนที่ 1) : แบเรียมไทเทเนต 39
4.1 ผงแบเรียมไทเทเนต 39
4.2 เซรามิกแบเรียมไทเทเนต 50

บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปรายผล (ส่วนที่ 2) : แบเรียมไทเทเนตชนิดที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียม 61
5.1 ผงแบเรียมไทเทเนตชนิดที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียม 61
5.2 เซรามิกแบเรียมไทเทเนตชนิดที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียม 70

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 82
6.1 สรุปผลการทดลอง 82
6.2 ข้อเสนอแนะ 83

เอกสารอ้างอิง 85
ประวัติผู้เขียน 89

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงอิทธิพลของเวลาในการบดย่อยต่ออุณหภูมิแคลไซน์ และขนาดอนุภาคของ $BaTiO_3$ ด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน	10
2.2 อิทธิพลของขนาดเกรนต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด ($\varepsilon_{r(max)}$) และอุณหภูมิคูรี (T_c) ของสารเซรามิก BT ที่มีขนาดเกรนเฉลี่ยค่าต่าง ๆ	11
2.3 แสดงสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริกของสาร BT ในรูปของเซรามิกและฟิล์มบาง	13
2.4 อิทธิพลของสารเจือเหล็ก/ไนโอเบียมที่มีต่อโครงสร้างผลึกและค่าแลตทิซพารามิเตอร์ ของสารเซรามิกในระบบ $BaTi_{1-x}(Fe_{0.5}Nb_{0.5})_xO_3$	17
3.1 แสดงลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้นที่ใช้ศึกษา	21
4.1 อิทธิพลของเวลาในการบดย่อยและอุณหภูมิแคลไซน์ต่อขนาดอนุภาคของผง BT	43
4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิซินเตอร์ต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ การหดตัว และขนาดเกรน ของเซรามิก BT	51
4.3 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก BT ที่เผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิแตกต่างกัน	55
5.1 แสดงปริมาณสารเจือของไนโอเบียม และอุณหภูมิแคลไซน์ต่อขนาดอนุภาคของ สารสูตร $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$	66
5.2 อิทธิพลของอุณหภูมิซินเตอร์ต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ การหดตัว และช่วงขนาดเกรน ของเซรามิก BT	71
5.3 แสดงสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$ เมื่อ x = 0.01 และ x = 0.025 เผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิแตกต่างกัน	76

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
1.1	แสดงการประยุกต์ใช้งานสารเซรามิกเฟร์โรอิเล็กทริก	2
2.1	โครงสร้าง Perovskite ของสาร $BaTiO_3$ เฟส cubic	3
2.2	พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลง: (ก) เฟส หรือ unit cell (ข) Spontaneous polarization และ (ค) ค่า Relative permittivity ที่วัดตามแนวแกน a และ c ของสาร $BaTiO_3$ ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	5
2.3	วงวนฮิสเทอรีซิสของ (ก) ผลึกเชิงเดี่ยว $BaTiO_3$ ที่มีเพียงโดเมนเดียว และ (ข) เซรามิก $BaTiO_3$ ที่มีหลายโดเมน	6
2.4	ตัวอย่าง Applications ของสาร $BaTiO_3$	8
2.5	X-ray diffraction patterns ของผงแบเรียมไทเทเนตที่เตรียมโดยวิธี (ก) Ball milling นาน 2 ชั่วโมง, กับวิธี Planetary milling นาน (ข) 2 ชั่วโมง และ (ค) 10 ชั่วโมง โดย ○ แทนเฟสของ $BaCO_3$, □ : TiO_2 (anatase), ■ : TiO_2 (rutile), ● : $BaTiO_3$, ◁ : Ba_2TiO_4, ▼ : $BaTi_2O_5$	9
2.6	แสดงพฤติกรรมของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 kHz ของสารเซรามิก $BaTiO_3$ ที่มีขนาดเกรนแตกต่างกัน 3 ช่วง	12
2.7	แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 kHz ของสารเซรามิก $BaTiO_3$ ที่มีขนาดเกรนแตกต่างกัน เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1100 (ข) 1200 และ (ค) 1300 °ซ เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง	14
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสกับความเข้มข้นของแคตไอออนชนิดต่างๆ ที่เจือลงไปในสารเซรามิก $BaTiO_3$	16
2.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ε_r และ (ข) ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิ ของสารเซรามิก BT ที่มีการเจือสาร Fe_2O_3 ในปริมาณต่าง ๆ กัน (ที่ 10 kHz)	18
2.10	การเสื่อมตามอายุของ (ก) ค่าคงที่ทางไดอิเล็กทริก (ข) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ในเซรามิก $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$ เมื่อ x = 0.005-0.020	19
2.11	การเสื่อมตามอายุของวงวนฮิสเทอรีซิสในเซรามิก $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$ เมื่อ (ก) x = 0.005, (ข) x = 0.010, (ค) x = 0.015 และ (ง) x = 0.020 (วัดที่ความถี่ 50 Hz และ 25 °C)	20

3.1 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร 22
3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมผงผลิตภัณฑ์ที่ใช้ 23
3.3 เครื่องบดย่อยผสมสารแบบ Ball-milling 23
3.4 แผนผังแสดงการเผาแคลไซน์ที่ใช้ในการเตรียมผง BT 24
3.5 เครื่องบดย่อยผสมสารแบบ Vibro-milling 25
3.6 (ก) แม่พิมพ์โลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร (ข) เครื่องอัดระบบไฮโดรลิก 26
3.7 การจัดเรียงชิ้นงานบนแผ่นจานอลูมินาสำหรับการเผาซินเตอร์ 26
3.8 แผนผังแสดงการเผาซินเตอร์ของเซรามิก BT 27
3.9 เครื่องวิเคราะห์ Thermogravimetric (Perkin Elmer TGA7) 28
3.10 เครื่องวิเคราะห์ Differential scanning calorimetry (Perkin Elmer DSC7) 28
3.11 หลักการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิค XRD และตัวอย่าง รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 30
3.12 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น JDX-8030 31
3.13 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) 32
3.14 เครื่องชั่งดิจิตอลสำหรับใช้หาค่าความหนาแน่นตามหลักของ Archimedes 33
3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JEOL JSM-840A 34
3.16 เครื่อง LCR meter(TH2819A, Tonghui Inc.) 36
3.17 การนิยาม Loss Tangent ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กทริก 36
3.18 แสดงเครื่องวัดวงวนฮิสเทอรีซิส 38
3.19 แผนผังวงจร Sawyer-Tower 38
4.1 TG-DSC ของผง $BaCO_3$ – TiO_2 ที่ผสมกัน 40
4.2 X-ray diffraction patterns ของผง BT ที่ผ่านการบดย่อยแบบ ball-milling ด้วยเวลานาน 10 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที 41
4.3 X-ray diffraction patterns ของผง BT ที่ผ่านการบดย่อยแบบ ball-milling ด้วยเวลานาน 20 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที 42
4.4 X-ray diffraction patterns ของผง BT ที่ผ่านการบดย่อยแบบ ball-milling ด้วยเวลานาน 30 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที 42

4.5 X-ray diffraction patterns ของผง BT ที่ผ่านการบดย่อยแบบ ball-milling ด้วยเวลาแตกต่างกัน และเผาแคลไซน์ที่ 1250 °ซ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที 44

4.6 ภาพขยายพีค XRD ของผงสาร BT ที่ตำแหน่งพีค (002) และ (200) ในช่วง 2θ ~ 43-47 องศา 45

4.7 ภาพ SEM ของผง BT ที่ผ่านการบดย่อยแบบ ball-milling ด้วยเวลานานแตกต่างกัน และเผาแคลไซน์ที่ 1100 °ซ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที 48

4.8 ผลการตรวจสอบผง BT เผาแคลไซน์ที่ 1100 °ซ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที ด้วยเทคนิค EDS 49

4.9 กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง BT ที่ผ่านการบดย่อยแบบ ball-milling เป็นเวลานานแตกต่างกัน และเผาแคลไซน์ที่ 1100 °ซ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที 49

4.10 กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง BT ที่ผ่านการบดย่อยแบบ ball-milling เป็นเวลานาน10 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที 50

4.11 X-ray diffraction patterns ของเซรามิก BT ที่เผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิค่าต่าง ๆ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 52

4.12 ภาพ SEM ของเซรามิก BT ที่เผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 53

4.13 ภาพรอยหักของเซรามิก BT เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1400 °ซ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 54

4.14 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริก (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ (ข) ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ของเซรามิก BT เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 56

4.15 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริก (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ (ข) ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ที่ความถี่ต่าง ๆ ของเซรามิก BT เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1400 °ซ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 57

4.16 แสดงวงวนฮิสเทอรีซิสที่สนามไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์/เซนติเมตร ของเซรามิก BT เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 59

4.17 แสดงวงวนฮิสเทอรีซิสที่สนามไฟฟ้าแตกต่างกัน ของเซรามิก BT เผาซินเตอร์ที่ อุณหภูมิ 1400 °ซ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 60

5.1 TG-DSC ของผงผสม $BaCO_3 - 0.98TiO_2 - 0.01Fe_2O_3 - 0.01Nb_2O_5$ 62

5.2 TG-DSC ของผงผสม $BaCO_3 - 0.965TiO_2 - 0.01Fe_2O_3 - 0.025Nb_2O_5$ 62

5.3 X-ray diffraction patterns ของผง $Ba(Ti_{0.98}Fe_{0.01}Nb_{0.01})O_3$ ที่ผ่านการบดย่อยแบบ vibro-milling ด้วยเวลานาน 0.5 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที 64

5.4 X-ray diffraction patterns ของผง $Ba(Ti_{0.965}Fe_{0.01}Nb_{0.025})O_3$ ที่ผ่านการบดย่อยแบบ vibro-milling ด้วยเวลานาน 0.5 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที 64

5.5 ภาพ SEM ของผง (ก) $Ba(Ti_{0.98}Fe_{0.01}Nb_{0.01})O_3$ (ข) $Ba(Ti_{0.965}Fe_{0.01}Nb_{0.025})O_3$ ที่ผ่านการบดย่อยแบบ vibro-milling ด้วยเวลานาน 0.5 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที 67

5.6 ผลการตรวจสอบผง (ก) $Ba(Ti_{0.98}Fe_{0.01}Nb_{0.01})O_3$ (ข) $Ba(Ti_{0.965}Fe_{0.01}Nb_{0.025})O_3$ เผาแคลไซน์ที่ 1100 °ซ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที ด้วยเทคนิค EDS 68

5.7 กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง $Ba(Ti_{0.98}Fe_{0.01}Nb_{0.01})O_3$ ที่ผ่านการบดย่อยแบบ vibro-milling เป็นเวลานาน 0.5 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที 69

5.8 กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง $Ba(Ti_{0.965}Fe_{0.01}Nb_{0.025})O_3$ ที่ผ่านการบดย่อยแบบ vibro-milling เป็นเวลานาน 0.5 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที 69

5.9 X-ray diffraction patterns ของเซรามิก $Ba(Ti_{0.98}Fe_{0.01}Nb_{0.01})O_3$ ที่เผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิค่าต่าง ๆ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 72

5.10 X-ray diffraction patterns ของเซรามิก $Ba(Ti_{0.965}Fe_{0.01}Nb_{0.025})O_3$ที่เผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิค่าต่าง ๆ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 73

5.11 ภาพ SEM ของเซรามิก $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$ เมื่อ (ก) x = 0.01 และ (ข) x = 0.025 เผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิแตกต่างกัน เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 75

5.12 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริก (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ (ข) ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ที่ความถี่ต่าง ๆ ของเซรามิก $Ba(Ti_{0.98}Fe_{0.01}Nb_{0.01})O_3$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1400 °ซ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 77

5.13 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริก (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ (ข) ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ที่ความถี่ต่าง ๆ ของเซรามิก $Ba(Ti_{0.965}Fe_{0.01}Nb_{0.025})O_3$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1450 °ซ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 78

5.14 แสดงวงวนฮิสเทอรีซิสที่สนามไฟฟ้าแตกต่างกัน ของเซรามิก $Ba(Ti_{0.98}Fe_{0.01}Nb_{0.01})O_3$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1400 °ซ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 80

5.15 แสดงวงวนฮิสเทอรีซิสที่สนามไฟฟ้าแตกต่างกัน ของเซรามิก $Ba(Ti_{0.965}Fe_{0.01}Nb_{0.025})O_3$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1450 °ซ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที 81

อักษรย่อและสัญลักษณ์

PZT	เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต
PMN	เลดแมกนีเซียมไนโอเบต
PZN	เลดซิงค์ไนโอเบต
BT	แบเรียมไทเทเนต
KNN	โพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต
BNT	บิสมัตโซเดียมไทเทเนต
ε_r	relative permittivity
XRD	X-ray diffraction
SEM	Scanning electron microscopy
h	หน่วยเวลา (ชั่วโมง)
^{o}C	องศาเซลเซียส
tanδ	dielectric loss
T_C	อุณหภูมิคูรี
μm	ไมโครเมตร
T	อุณหภูมิ
kHz	กิโลเฮิรตซ์
P_r	remanent polarization
P_s	spontaneous polarization
E_c	coercive field
μC	ไมโครคูลอมบ์
s	สถานะของแข็ง
g	สถานะแก๊ส
PVA	Polyvinyl alcohol
TC	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์
TS	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์
TGA	Thermogravimetric analyzer
DSC	Differential scanning calorimetry

JCPDS	Joint Committee for Powder Diffraction Standards
Å	อังสตรอม
EDS	energy dispersive X-ray spetroscopy