

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



190709

การเตรียมและบทบาทกึ่งตัวนำของเซรามิกในระบบ

$(1-x)BaTiO_3-xSr(Mg_{1/2}Nb_{1/2})O_3$

ราชานฤนธ์ รุ่งท้าว

วิทยาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

พฤษภาคม 2554



190709

การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ



ราชานุสรณ์ รุ่งเต่า

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พฤษภาคม 2554

การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ



ราชนาสุรณี รุ่งเต่า

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

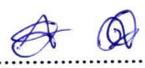
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
ผศ.ดร. ศุภกร รักใหม่


.....
ดร. วรณวิทย์ วิทยากร


.....กรรมการ
รศ.ดร. สุพล อนันตา


.....กรรมการ
ดร. ละอองนวล ศรีสมบัติ


.....กรรมการ
ดร. วรณวิทย์ วิทยากร

16 พฤษภาคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.วรรณวิไล วิทยากร อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหา และตรวจแก้วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุพล อนันตา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภกร รักใหม่ และ ดร. ละอองนวล ศรีสมบัติ ที่กรุณาได้รับเป็นกรรมการในการสอบและช่วยตรวจทาน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ให้การสนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาแก่ผู้เขียนในระดับปริญญาโท ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอบคุณเพื่อนนักศึกษา อาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกคนในห้องปฏิบัติการที่คอยช่วยเหลือ แนะนำ และให้คำปรึกษาทางด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ทุกคนที่คอยเสนอแนะ และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ชายที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจแก่ผู้เขียน ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ตลอดมา

สุดท้ายนี้หากมีข้อบกพร่องหรือความผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยเป็นอย่างสูงในความบกพร่องหรือข้อผิดพลาดนั้น และผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ศึกษาและสนใจงานทางด้านนี้ในอนาคตต่อไป

ราชานุสรณ์ รุ่งเต่า

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์

การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกใน
ระบบ $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$

ผู้เขียน

นางสาวราชานุสรณ์ รุ่งเต่า

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร. วรณวิไลย์ วิทยาการ

บทคัดย่อ

190709

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมและหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{BT}-x\text{BMN}$ ที่มีสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ กัน โดยนำเซรามิกที่ได้จากการเตรียมผงด้วยวิธีการผสมออกไซด์แบบดั้งเดิม มาหาความหนาแน่นด้วยวิธีอาร์คิมิดีส (Archimedes) วิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และโครงสร้างในระดับอะตอมด้วยเทคนิคการดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ (XAS) รวมทั้งทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเซรามิกที่ได้เป็นแบบสารละลายของแข็ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจากระบบเตตระโกนอล (tetragonal) ไปเป็นคิวบิก (cubic) ที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่ออัตราการเจือสูงขึ้น และพบว่าเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{BT}-x\text{BMN}$ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดเมื่อ $x = 0.02$

Thesis Title	Preparation and Characterization of Ceramics in the (1-x)BaTiO ₃ -xBa(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ System
Author	Miss Rachanusorn Roongtao
Degree	Master of Science (Materials Science)
Thesis Advisor	Dr. Wanwilai Vittayakorn

ABSTRACT

190709

In this research, the ceramics in the (1-x)BT-xBMN system were prepared and characterized by the powders synthesized via a conventional mixed-oxide method. The bulk densities of the sintered ceramics were determined by using the Archimedes principle in water. Phase formation and microstructure evolution are examined via X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), respectively. Moreover, the local structure of the Ti and Nb in the structure of materials was investigated using X-ray absorption spectroscopy (XAS). For the electrical properties, the capacitance was measured by LCR meter. From the results, it can be seen that complete solid solutions in the BT-BMN system was obtained. As concentration of dopant increases, the crystal structure of ceramics changes from tetragonal to cubic phase and causes a noticeable decrease in dielectric properties. The highest dielectric constant for the (1-x)BT-xBMN ceramics obtained at $x = 0.02$.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	3
2.1 เซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก	3
2.2 สารไดอิเล็กทริก	6
2.2.1 สารไดอิเล็กทริกประเภท I	8
2.2.2 สารไดอิเล็กทริกประเภท II	9
2.2.3 สารไดอิเล็กทริกประเภท III	13
2.3 เซรามิกแบเรียมไทเทเนต	14
2.4 สารละลายของแข็ง	18
2.5 สารละลายของแข็งที่มี BaTiO_3 เป็นองค์ประกอบหลัก	21
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	26
3.1 สารเคมี	26
3.2 อุปกรณ์	27
3.3 กระบวนการเตรียมผง	28
3.3.1 การเตรียมผงแบเรียมไทเทเนต	28
3.3.2 การเตรียมผงแบเรียมแมกนีเซียมไนโอเบต	29
3.3.3 การเตรียมผงในระบบแบเรียมไทเทเนต-แบเรียมแมกนีเซียมไนโอเบต	30

3.4	กระบวนการเตรียมเซรามิก	32
3.5	การวิเคราะห์เชิงความร้อน	35
3.6	การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	38
3.7	การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคการดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์	40
3.8	การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก	43
3.8.1	การหาความหนาแน่น	43
3.8.2	การหาค่าการหดตัวหลังการเผา	44
3.8.3	การหาปริมาณน้ำหนัที่สูญเสีหลังการเผา	44
3.9	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก	45
3.10	การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก	45
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปรายผล	47
4.1	สารแบเรียมไทเทเนต	47
4.1.1	ผลการตรวจสอบผง BT	47
4.1.2	ผลการตรวจสอบเซรามิก BT	48
4.2	สารแบเรียมแมกนีเซียมไนโอเบต	51
4.2.1	ผลการตรวจสอบผง BMN	51
4.2.1	ผลการตรวจสอบเซรามิก BMN	55
4.3	แบเรียมไทเทเนต-แบเรียมแมกนีเซียมไนโอเบต	57
4.3.1	ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนของผงในระบบ BT-BMN	57
4.3.2	ผลการตรวจสอบเฟสของผงในระบบ BT-BMN	58
4.3.3	ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของผงในระบบ BT-BMN	66
4.3.4	ผลการตรวจสอบโครงสร้างของผงในระบบ BT-BMN ด้วยเทคนิค XAS	68
4.3.5	ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของเซรามิกในระบบ BT-BMN	73
4.3.6	ผลการตรวจสอบเฟสของเซรามิกในระบบ BT-BMN	78
4.3.7	ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิกในระบบ BT-BMN	79
4.3.8	ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกในระบบ BT-BMN	84
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	93
5.1	สรุปผลการทดลอง	93

5.2 ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารอ้างอิง	95
ประวัติผู้เขียน	100

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สารเซรามิกไดอิเล็กทริกที่มีค่า Q สูง และมีค่า τ_f ต่ำ	11
2.2 รหัสสำหรับช่วงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุ สำหรับตัวเก็บประจุประเภท II ตามกฎเกณฑ์ของ EIA	13
2.3 การแทนที่ของสารที่มีประจุแตกต่างกัน	20
3.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเคลือบของผง $(1-x)BT-xBMN$ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ	31
3.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์เพื่อเตรียมเซรามิก $(1-x)BT-xBMN$	34
4.1 เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การหดตัวและเปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักที่สูญเสียไปของเซรามิก BT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ	49
4.2 Cell parameter ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และช่วงขนาดอนุภาคของผง BMN ที่เผาเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ	54
4.3 เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การหดตัวและเปอร์เซ็นต์ของ น้ำหนักที่สูญเสียไปของเซรามิก BMN ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ	55
4.4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและช่วงขนาดอนุภาคของเซรามิกในระบบ $(1-x)BT-xBMN$ ที่อุณหภูมิเคลือบที่ดีที่สุด	68
4.5 เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่น ขนาดเกรนเฉลี่ย และช่วงขนาดเกรนของ เซรามิกในระบบ $(1-x)BT-xBMN$ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ที่ดีที่สุด	84
4.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ที่อุณหภูมิ คูรีและอุณหภูมิห้องของเซรามิกในระบบ $(1-x)BT-xBMN$ ที่ความถี่ 1 kHz	92

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสารเพียโซอิเล็กทริกและสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ในระบบสมมาตร	5
2.2 โครงสร้างเพอร์อสไกต์ของสารแบเรียมไทเทเนต	6
2.3 การเกิดการโพลาริเซชันในหน่วยเซลล์ของสารแบเรียมไทเทเนต	6
2.4 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานและตัวเก็บประจุที่เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก	7
2.5 การเปรียบเทียบ (ก) ช่วงความถี่ของการใช้งานและ (ข) ค่าความจุ ของตัวเก็บประจุประเภทต่างๆ	9
2.6 เฟสไดอะแกรมของสารในระบบ BaO-TiO ₂	15
2.7 ทิศทางการเกิดการโพลาริเซชันในหน่วยเซลล์ที่มีระบบผลึกในแบบต่างๆ	15
2.8 การเปลี่ยนเฟสเมื่อเทียบอุณหภูมิของสารแบเรียมไทเทเนต	16
2.9 ภาพ SEM ของ (A) BaTiO ₃ สารที่เจือด้วย Nb (B) 0.05 (C) 0.15 (D) 0.30 (E) 0.60 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เคาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350 °ซ เวลา 2 ชั่วโมง	18
2.10 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดในโครงสร้างผลึก	20
2.11 การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ทางไฟฟ้าและโครงสร้างผลึกของ BaTiO ₃ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ	22
2.12 ภาพ SEM BaTiO ₃ ที่เจือด้วย BMN (a) 3 (b) 4 และ (c) 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล	23
2.13 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก xBMN-(1-x)BT เมื่อ x = 0-5 โมลเปอร์เซ็นต์ที่ความถี่ 1kHz	25
3.1 เครื่องบดย่อยผสมสารแบบ Ball-milling	28
3.2 เตาไฟฟ้า	29
3.3 แผนผังแสดงการเผาแคลไซน์ (T _c คืออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์)	29
3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมผง (1-x)BT-xBMN	32
3.5 แม่พิมพ์โลหะ	33
3.6 เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก	33

3.7	การจัดเรียงชิ้นงานในถ้วยอลูมินาสำหรับการเผาซินเตอร์	34
3.8	แผนผังแสดงการเผาซินเตอร์ (Ts คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์)	35
3.9	หลักการทำงานของเครื่องมือในการวิเคราะห์น้ำหนักเชิงความร้อน	36
3.10	เครื่อง TGA รุ่น TGA7	37
3.11	แผนภาพวิธีการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ โดย T_s คือ อุณหภูมิของสารตัวอย่าง T_r คืออุณหภูมิของสารอ้างอิง	37
3.12	เครื่อง DTA รุ่น DTA7	38
3.13	หลักการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิค XRD และตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	39
3.14	เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น X'Pert MPD	39
3.15	วิธีการวัดสเปกตรัม XAS ในแบบต่างๆ (a) Transmission mode (b) Fluorescence-yield mode และ (c) กัม (d) Electron-yield mode	41
3.16	สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ในชั้น K (K-edge absorption) ของอะตอมแมงกานีส (Mn) ซึ่งแสดงโครงสร้าง XANES และ EXAFS	42
3.17	สถานีทดลอง XAS ในอาคารห้องปฏิบัติการแสงสยาม	43
3.18	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-6335F	45
3.19	เครื่อง LCR Meter รุ่น HP-4284	46
4.1	XRD ของผง BT ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ ต่อนาที	47
4.2	SEM ของผง BT ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1300 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ ต่อนาที	48
4.3	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก BT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350 °ซ	49
4.4	ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) รอยแตก ของเซรามิก BT ที่อุณหภูมิเผาซินเตอร์ 1350 °ซ เวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ	50
4.5	กราฟค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) กับอุณหภูมิที่ความถี่ต่างๆ ของเซรามิก BT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350 °ซ	51
4.6	กราฟการวิเคราะห์เชิงความร้อน (TG-DTA) ของผงผสม BMN	52
4.7	กราฟ XRD ของผง BMN ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ ต่อนาที	53

4.8	ภาพ SEM ของผง BMN ที่เผาเคลือบที่อุณหภูมิ (ก) 1200 °ซ (ข) 1300 °ซ (ค) 1400 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ ต่อนาที	54
4.9	XRD ของเซรามิก BMN ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1500 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ ต่อนาที	56
4.10	ภาพ SEM ของ (ก) ผิวหน้า (ข) รอยแตกของเซรามิก BMN ที่เผาที่อุณหภูมิ 1500 °ซ เวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ นาที	56
4.11	กราฟค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) กับอุณหภูมิที่ความถี่ต่างๆ ของเซรามิก BT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350 °ซ	57
4.12	กราฟการวิเคราะห์เชิงความร้อน (TG-DTA) ของผงผสมสูตร 0.96BT-0.04BMN	58
4.13	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงในระบบ (1-x)BT-xBMN ที่อัตราส่วนและอุณหภูมิต่างๆ	63
4.14	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงในระบบ (1-x)BT-xBMN ที่มีสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ	64
4.15	Cell parameter ของผงในระบบ (1-x)BT-xBMN ที่อัตราส่วนต่างๆ	65
4.16	ภาพ SEM ของผงในระบบ (1-x)BT-xBMN ที่อัตราส่วนต่างๆ	67
4.17	กราฟ XANES ของ Ti K-edge ของสาร Ti foil BT และ 0.99BT-0.01BMN	69
4.18	กราฟ XANES ของ Nb L3-edge ของสาร Nb foil BMN และ 0.99BT-0.01BMN	69
4.19	กราฟ XANES ของ Ti K-edge ของสาร TiO ₂ BT และสารในระบบ (1-x)BT-xBMN	70
4.20	โครงสร้างของ TiO ₂ (anatase) และ BaTiO ₃	71
4.21	กราฟ XANES ของ Nb L3-edge ของสาร Nb ₂ O ₅ BMN และสารในระบบ (1-x)BT-xBMN	72
4.22	กราฟ EXAFS ของ Ti K-edge ของสาร BT และสารในระบบ (1-x)BT-xBMN	73
4.23	สีและลักษณะทั่วไปของเซรามิกในระบบ (1-x)BT-xBMN ที่มีสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ	74
4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ของเซรามิกในระบบ (1-x)BT-xBMN	76

4.25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ของเซรามิกในระบบ (1-x)BT-xBMN	77
4.26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัที่สูญเสียบกัอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ของเซรามิกในระบบ (1-x)BT-xBMN	78
4.27	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ (1-x)BT-xBMN ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่มีความหนาแน่นสูงที่สุด	79
4.28	ภาพ SEM ผิวหน้า (surface) และรอยแตก (fracture) ของเซรามิกในระบบ (1-x)BT-xBMN ของอัตราส่วนต่างๆ ที่มีความหนาแน่นสูงที่สุด	83
4.29	กราฟค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) กับอุณหภูมิที่ความถี่ต่างๆ ของเซรามิกในระบบ (1-x)BT-xBMN	90
4.30	กราฟค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) กับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ (1-x)BT-xBMN ที่ความถี่ 1 k	91

อักษรย่อและสัญลักษณ์

BT	Barium Titanate
BMN	Barium Magnesium Niobate
C	Capacitance
DTA	Differential Thermal Analysis
EXAFS	Extended X-ray Absorption Fine Structure
JCPDS	Joint Committee for Powder Diffraction Standards
SEM	Scanning Electron Microscope
TG	Thermogravimetric Analysis
XANES	X-ray Absorption Near Edge Structure
XAS	X-ray Absorption Spectroscopy
XRD	X-ray Diffraction
c/a	Tetragonality
ϵ_0	Permittivity in Free Space
ϵ_r	Dielectric Constant
$\tan \delta$	Dielectric loss
T_c	Curie Temperature
x	BMN Content