



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การสังเคราะห์และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกระบบ



จัดทำโดย

ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ 2553



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การสังเคราะห์และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกระบบ



จัดทำโดย

ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ 2553

บทคัดย่อ

191085

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกระบบทวิภาคบิสมัท โปแทสเซียมสตรอนเทียมไททานเนต (BKT-ST) ที่ $x = 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80$ และ 0.90 ซึ่งเตรียมได้จากเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยใช้สารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีการควบคุมบรรยากาศในการเผาซินเตอร์ จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ วัดค่าไดอิเล็กทริก ทำการตรวจสอบสัณฐานทางวิทยา จากผลการทดลองพบว่าสามารถสังเคราะห์ BKT-ST ได้ทุกสัดส่วนองค์ประกอบเนื่องจากไม่พบเฟสแปลกปลอมใดและได้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากเทอร์โกนอลไปเป็นซูโดคิวบิกที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x \geq 0.10$ ผลของค่าไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของ ST เพิ่มมากขึ้นแต่ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.20$ เซรามิกมีค่าไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ประมาณ 3059 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกลดลงเมื่อปริมาณของ ST เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันอีกทั้งอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสนั้นก็ลดลงด้วยเช่นเดียวกัน แต่พีคของค่าไดอิเล็กทริกนั้นมีแนวโน้มที่จะมีฐานกว้างมากขึ้นซึ่งสามารถใช้งานได้หลากหลายช่วงอุณหภูมิ

Abstract

191085

This aim of study is to investigate the electrical property of ceramics in the binary system of bismuth – potassium strontium titanate ($\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3$ - SrTiO_3) in terms of perovskite phase formation, morphology and electrical properties. The polycrystalline samples of $(1-x)\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3 - x\text{SrTiO}_3$ when $x = 0.0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ and 0.9 were prepared by the solid state reaction involving the use of high-purity starting oxides and controlled atmosphere sintering. Phase development of calcined powders, the crystal structure and phase transitions of sintered ceramics were analyzed by X-ray diffraction (XRD), thermal and dielectric measurements. The morphology analyses were undertaken by scanning electron microscopy (SEM). For XRD result, it can be seen that all the ceramics were detected as single perovskite structure. The ceramics with a perovskite structure showed an tetragonal phase at $0.00 \leq x \leq 0.010$ and became pseudo cubic at $x \geq 0.10$ but $x = 0.20$ has maximum dielectric at around 3059. However, Dielectric results showed that dielectric constant and phase transition temperature of and tetragonal–cubic (T_C) decreased when a small amount of ST was added. The ceramic decreased with increasing ST concentration . BKT-ST ceramics exhibited a very broad curve over a wide temperature range.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยในโครงการนี้ ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และ สถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ นักวิจัย อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในทุกด้านของการดำเนินงานของโครงการ

ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุน

1. **Prapapim Phetnoi**, Surasak Niemcharoen, Rangson Muanghlua, Manoon Sutapun and Naratip Vittayakorn “Preparation of Bismuth Potassium Titanate – Strontium Titanate Ceramics” **The 27th Annual Conference of the Microscopy Society of Thailand**, Thailand, 2010, 22-23
2. **Prapapim Phetnoi**, Surasak Niemcharoen, Rangson Muanghlua, Manoon Sutapun and Naratip Vittayakorn “Electrical properties of Bismuth Potassium Titanate – Strontium Titanate Ferroelectric Ceramics” **The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology**, Chiangmai, Thailand, 2010, 962-965
3. Anucha Ruangphanit, **Prapapim Phetnoi**, Surasak Niemcharoen and Rangson Muanghlua “Structure and dielectric properties of $\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-SrTiO}_3$ lead-free ceramics” **Proceeding of the 12th ISEPD Conference**, Chaingmai, Thailand, 2010

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | V |
| สารบัญตาราง..... | VIII |
| สารบัญรูปภาพ..... | IX |
| สัญลักษณ์และคำย่อ..... | XIV |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 2 |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ขอบเขตการวิจัย..... | 3 |
| 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ..... | 5 |
| 2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก..... | 5 |
| 2.2 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก..... | 9 |
| 2.2.1 การเกิดโพลาริเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก..... | 9 |
| 2.2.1.1 การเกิดโพลาริเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก..... | 9 |
| 2.2.1.2 อุณหภูมิกูรีและการเปลี่ยนเฟส..... | 10 |
| 2.2.1.3 เฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมนและวงวนฮิสเทอรีซิส..... | 11 |
| 2.2.2 แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก..... | 13 |

สารบัญ (ต่อ)

| | | |
|---------|--|----|
| 2.2.2.1 | การเกิดโพลาริเซชันไดโอดและปรากฏการณ์ไฟโรอิเล็กทริก | 13 |
| 2.2.2.2 | อุณหภูมิกูรีและการเปลี่ยนเฟส | 14 |
| 2.2.2.3 | เฟอร์โรอิเล็กทริกโคเมนและวงวนฮิสเทอรีซิส | 14 |
| 2.2.3 | รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก | 17 |
| 2.2.3.1 | การเกิดโพลาริเซชันไดโอดและปรากฏการณ์ไฟโรอิเล็กทริก | 13 |
| 2.2.3.2 | อุณหภูมิกูรีและการเปลี่ยนเฟส | 18 |
| 2.2.3.3 | เฟอร์โรอิเล็กทริกโคเมนและวงวนฮิสเทอรีซิส | 20 |
| 2.3 | โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ | 23 |
| 2.4 | วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก | 26 |
| 2.5 | วัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว | 29 |
| 2.6 | บิสมาทโพแทสเซียมไททานेट ($\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3$; BKT) | 31 |
| 2.7 | สตรอนเทียมไททานेट (SrTiO_3 ; ST) | 36 |
| 2.8 | สารละลายของแข็ง | 41 |
| 2.8.1 | สารละลายของแข็งชนิดแทนที่ | 41 |
| 2.8.2 | สารละลายของแข็งชนิดแทรกตัว | 42 |
| 2.9 | กระบวนการเตรียมผงด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง | 42 |
| 2.9.1 | กระบวนการบดย่อย ผสมด้วยลูกบอล | 43 |
| 2.9.2 | ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง | 43 |
| บทที่ 3 | วิธีการทดลอง | 45 |
| 3.1 | สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง | 45 |
| 3.2 | อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง | 45 |
| 3.3 | กระบวนการเตรียมผงผลึก BKT-ST | 46 |
| 3.4 | กระบวนการเตรียมเซรามิก | 48 |
| 3.5 | การตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดเฟสด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ | 49 |
| 3.6 | การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการหาค่าความหนาแน่นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ | 51 |
| 3.7 | การตรวจสอบสัณฐานวิทยา | 52 |
| 3.8 | การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยสมบัติทางไดอิเล็กทริก | 52 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล..... | 54 |
| 4.1 ผลการตรวจสอบโครงผลึกของเซรามิก... BKT-ST..... | 54 |
| 4.2 ผลการหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ BKT-ST..... | 57 |
| 4.2.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก..... | 57 |
| 4.2.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเซรามิก..... | 59 |
| 4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก..... | 64 |
| | |
| บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ..... | 77 |
| 5.1 สรุปผล..... | 77 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 78 |
| | |
| เอกสารอ้างอิง..... | 79 |
| | |
| ภาคผนวก..... | 84 |
| | |
| ประวัติผู้เขียน..... | 91 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 2.1 | ข้อแตกต่างระหว่างสมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก.....22 |
| 2.2 | ลำดับเหตุการณ์ที่สำคัญในการศึกษา คั้นคว่ำและพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....27 |
| 2.3 | สมบัติต่างๆของสารเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วชนิดต่างๆ30 |
| 4.1 | สมบัติทางกายภาพของเซรามิก BKT-ST.....58 |
| 4.2 | ค่าพารามิเตอร์ของการกระจายกับสัดส่วนองค์ประกอบ ST.....75 |
| 4.3 | ตารางพารามิเตอร์ต่างๆที่ความถี่ 1 MHz ของเซรามิก BKT-ST.....76 |

สารบัญรูปภาพ

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 (ก) ปรางค์การณั้เพียโซอิเล็ทริกโดยตรงและ (ข) ปรางค์การณั้เพียโซอิเล็ทริกโดยอ้อม..... | 5 |
| 2.2 ทิศทางของโพลาริเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าและความเค้นแก่ วัสดุเพียโซอิเล็ทริก..... | 7 |
| 2.3 การจัดแบ่งกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก..... | 8 |
| 2.4 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการเกิดโพลาริเซชัน ของผลึก BaTiO ₃ | 10 |
| 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับอุณหภูมิของผลึก แบเรียมไททานเต (BaTiO ₃)..... | 11 |
| 2.6 ลักษณะโดเมนของผลึกเฟอร์โรอิเล็ทริกแบบปกติ..... | 12 |
| 2.7 โดเมนบนผิวผลึกเฟอร์โรอิเล็ทริกของ PT-BT..... | 12 |
| 2.8 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรอิเล็ทริก..... | 13 |
| 2.9 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของผลึก PZ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง..... | 14 |
| 2.10 ลักษณะโดเมนของผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็ทริก..... | 15 |
| 2.11 โดเมนบนผิวผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็ทริกของ PZST..... | 15 |
| 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้าของผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็ทริก..... | 16 |
| 2.13 การเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาริเซชันเทียบอุณหภูมิของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็ทริก และเฟอร์โรอิเล็ทริกแบบปกติ..... | 18 |
| 2.14 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสาร PMN..... | 19 |
| 2.15 การเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาริเซชันและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เทียบอุณหภูมิของ รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็ทริก..... | 19 |
| 2.16 นาโนโดเมนบนผิวผลึกรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็ทริกของ PZN-PZT..... | 20 |
| 2.17 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็ทริก..... | 21 |
| 2.18 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเฟอร์โรอิเล็ทริกแบบปกติ แอนติเฟอร์โรอิเล็ทริก และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็ทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ..... | 21 |
| 2.19 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์..... | 23 |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 2.20 | ภาพตัดขวางของหน่วยเซลล์เพอโรฟสไกต์ในอุดมคติ (ABO_3) ในระนาบ (100) และ (200).....24 |
| 2.21 | การเกิดโพลาริเซชันในหน่วยเซลล์เนื่องจากการเลื่อนตำแหน่งของไอออน Ti^{4+} ในผลึก เพอโรฟสไกต์ของ $BaTiO_3$25 |
| 2.22 | ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของไอออน Ti^{4+} ในผลึกเพอโรฟสไกต์ของ $BaTiO_3$ กับพลังงาน.....26 |
| 2.23 | รูปแบบเฟสไดอะแกรมของสารในระบบ $PbZrO_3 - PbTiO_3$28 |
| 2.24 | วงวนฮิสเทอรีซิสของ BKT จากเทคนิคการครีอนที่อุณหภูมิ $1060^\circ C$ และ $1080^\circ C$32 |
| 2.25 | ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคูรีกับปริมาณ $(Bi_{1/2}K_{1/2})TiO_3$ ของเซรามิกส์ในระบบ BTBK ที่ความถี่ 1 MHz.....32 |
| 2.26 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ กับ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกในระบบ BTBK ที่ความถี่ 1 MHz.....33 |
| 2.27 | แผนภาพแสดงค่าโพลาริเซชันคงเหลือ.....33 |
| 2.28 | ความสัมพันธ์ของ d_{33} , K_p , ϵ_r และ $\tan \delta$ ที่เปรียบเทียบกับอุณหภูมิใน การซินเตอร์ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.18$34 |
| 2.29 | อุณหภูมิสภาพการสูญเสียขั้วของเซรามิก BNLKT0 - 100z, BNLKT4 - 100z และ BNLKT8-100z35 |
| 2.30 | ความสัมพันธ์ของ $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$, K_{33} , และ d_{33} ที่เปรียบเทียบกับสัดส่วน องค์ประกอบต่างๆ.....35 |
| 2.31 | ขนาดเกรนโดยเฉลี่ยและค่าความหนาแน่นเปรียบเทียบกับ ปริมาณ ของสารเจือ ST.....36 |
| 2.32 | ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง, กราฟค่าไดอิเล็กทริกสูงสุด, ค่าประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก และอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส.....37 |
| 2.33 | การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก $(1-x)NKN-xST$38 |
| 2.34 | ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกระบบ $(1-x)NKN-xST$ ที่ความถี่ 10 kHz.....38 |
| 2.35 | ความสัมพันธ์ $\log(1/\epsilon - 1/\epsilon_m)$ และฟังก์ชันของ $\log(T-T_m)$ ของ เซรามิก $(1-x)NKN-xST$39 |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.36 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาณสารเจือ ST ต่างๆ..... | 40 |
| 2.37 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิที่ปริมาณสารเจือ ST ต่างๆ..... | 40 |
| 2.38 สารละลายของแข็งชนิดแทนที่..... | 41 |
| 2.39 ภาพของสารละลายของแข็งชนิดแทรกตัว..... | 42 |
| 2.40 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอล | 44 |
| 3.1 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึก BKT-ST โดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง..... | 47 |
| 3.2 แผนผังการเผาแคลไซน์..... | 48 |
| 3.3 การจัดเรียงชั้นงานในถ้วยอลูมินาแบบสองชั้น..... | 49 |
| 3.4 แผนผังแสดงการเผาซินเตอร์..... | 49 |
| 3.5 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเซรามิกส์..... | 52 |
| 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ $(1-x)BKT-(x)ST$ | 54 |
| 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ $(1-x)BKT-(x)ST$ ที่มี การเลื่อนของพีค..... | 55 |
| 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแลคทิซพารามิเตอร์กับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ $(1-x)BKT-(x)ST$ | 56 |
| 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของหน่วยเซลล์กับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกใน ระบบ $(1-x)BKT-(x)ST$ | 57 |
| 4.5 ความหนาแน่นและสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิก $(1-x)BKT-xST$ | 58 |
| 4.6 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก BKT..... | 60 |
| 4.7 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.98BKT-0.02ST..... | 61 |
| 4.8 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.96BKT-0.04ST..... | 61 |
| 4.9 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.94BKT-0.06ST..... | 62 |
| 4.10 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.92BKT-0.08ST..... | 62 |
| 4.11 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.9BKT-0.1ST..... | 63 |
| 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนเฉลี่ยของเซรามิกในระบบ $(1-x)BKT-xST$ | 63 |
| 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเซรามิก BKT-ST..... | 64 |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.98BKT-0.02ST..... | 64 |
| 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.96BKT-0.04ST..... | 65 |
| 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.94BKT-0.06ST..... | 65 |
| 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.92BKT-0.08ST..... | 66 |
| 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.9BKT-0.1ST | 66 |
| 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.8BKT-0.2ST | 67 |
| 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.7BKT-0.3ST | 67 |
| 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.6BKT-0.4ST | 68 |
| 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.5BKT-0.5ST..... | 68 |
| 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.4BKT-0.6ST..... | 69 |
| 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.3BKT-0.7ST..... | 69 |
| 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.2BKT-0.8ST..... | 70 |
| 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.1BKT-0.9ST..... | 70 |
| 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ เซรามิก เมื่อ $x = 0-0.10$ ที่ความถี่ 1 MHz..... | 71 |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของ เซรามิก เมื่อ $x = 0.20-0.90$ ที่ความถี่ 1 MHz..... | 72 |
| 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับสัดส่วนองค์ประกอบ ของเซรามิก BKT-ST..... | 72 |
| 4.30 ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสที่วัดได้ และค่า T_m ทางทฤษฎี เมื่อเทียบกับสัดส่วน ที่ความถี่ 1 MHz..... | 73 |
| 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln (K_m / K_{(T)})$ กับ $(T-T_m)^2$ | 74 |
| 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (T-T_m)$ กับ $\log [(\epsilon_m / \epsilon)-1]$ ที่ความถี่ 1 MHz..... | 74 |

สัญลักษณ์และคำย่อ

| | |
|-------|--|
| BKT | บิสมัทโพแทสเซียมไททานेट ($\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3$) |
| BLT | บิสมัทลิเทียมไททานेट ($\text{Bi}_{0.5}\text{Li}_{0.5}\text{TiO}_3$) |
| BNT | บิสมัทโซเดียมไททานेट ($\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$) |
| BT | แบเรียมไททานेट (BaTiO_3) |
| c/a | อัตราส่วนของโครงสร้างความเป็นทอระโกนอล |
| C | ค่าความจุไฟฟ้า |
| E | สนามไฟฟ้า |
| E_c | สนามไฟฟ้าบังคับ (Coercive field) |
| HP | การกดร้อน (Hot pressed) |
| k_p | สัมประสิทธิ์เชิงกลคู่ควบ |
| KN | โพแทสเซียมไนโอเบต (KNbO_3) |
| KNN | โพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต ($\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$) |
| NN | โซเดียมไนโอเบต (NaNbO_3) |
| MPB | รอยต่อระหว่างเฟส |
| PLZT | เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานेट |
| PMN | เลดแมกนีเซียมไนโอเบต ($\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$) |
| PNN | เลดนิเกิลไนโอเบต ($\text{PbNi}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$) |
| PZN | เลดซิงค์ไนโอเบต ($\text{PbZn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$) |
| P_c | เฟสพาราอเล็กทริก |
| P_r | โพลาริเซชันคงเหลือ |
| P_s | โพลาริเซชันอิ่มตัว |
| PT | เลดไททานेट (PbTiO_3) |
| PVA | พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ |
| PZT | เลดเซอร์โคเนตไททานेट ($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)$) |
| RoHS | ระเบียบว่าด้วยการควบคุมการนำเข้าสินค้าในประเทศสมาชิก |
| s | การหดตัวเชิงปริมาตร |
| SEM | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด |
| ST | สตรอนเทียมไททานेट |
| t | ทอโลแรนซ์เฟลคเตอร์ |

สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | |
|---------------|---|
| $\tan \delta$ | ค่าตัวประกอบการสูญเสียด้วยความร้อน |
| T | อุณหภูมิ |
| T_c | อุณหภูมิคูรี |
| WEEE | ระเบียบว่าด้วยการกำจัดซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ |
| XRD | การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ |
| π | ค่าสัมประสิทธิ์ของไพโรอิเล็กทริก |
| ϵ_0 | ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในสุญญากาศ (มีค่า $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$) |
| σ | ความหนาแน่น |
| ϵ_r | ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก |
| %TD | ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ |