ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249123

การเตรียมและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอบตสิเทียมแอนติโมเนตเซรามิกไร้สารตะกั่วที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการเผาผนึกเหลว

ธนเทพ ปะทังตาแม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
เมษายน 2554

b00253631

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249123

การเตรียมและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตเซรามิกไร้สารตะกั่วที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการเกลือหลอมเหลว

ธนเทพ ปะตังถาเน

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
เมษายน 2554

การเตรียมและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตเซรามิกไร้สารตะกั่วที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการเกลือหลอมเหลว

ธนเทพ ปะตังถาเน

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. จีระพงษ์ ตันตระกูล

.....กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. กอบวุฒิ รุจิจนากุล

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กมลพรรณ เพ็งพัด

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
รองศาสตราจารย์ ดร. กอบวุฒิ รุจิจนากุล

29 เมษายน 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้ด้วยความกรุณาจากรองศาสตราจารย์ ดร. กอบวุฒิ รุจิจนากุล อาจารย์ที่ให้คำปรึกษาตลอดงานวิจัย ผู้มอบความรู้คำแนะนำต่างๆและยังมอบโอกาส พร้อมกับความช่วยเหลือในทุกๆสิ่ง ตลอดจนสละเวลาเพื่อช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่อง ต่างๆ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. จีระพงษ์ ตันตระกูล ที่กรุณารับเป็น ประธานสอบวิทยานิพนธ์และชี้แนะแนวทางข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ จนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพรรณ เพ็งพัด ที่กรุณารับเป็นกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์และชี้แนะแนวทางข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์จนทำให้ วิทยานิพนธ์สำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. สุขุม อิสเสงี่ยม ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในทุกๆสิ่ง ตลอดจนสละเวลาเพื่อช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้ สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นทั้งกำลังใจทั้งแรงผลักดันที่ สำคัญและคอยช่วยเหลือเสมอมา

ขอขอบพระคุณสมาชิกทุกท่านในห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กโทรเซรามิกที่กรุณาให้ความรู้และ คำแนะนำต่างๆตลอดงานวิจัยจนทำให้การทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนหวังว่าการทำวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นประโยชน์ไม่มากก็น้อยสำหรับผู้ที่สนใจ และหากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่องในงานวิจัยนี้ ผู้เขียนก็ขอกราบอภัยไว้ ณ ที่นี้

ธนเทพ ปะตังถาแน

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การเตรียมและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตเซรามิกไร้สารตะกั่วที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการเกลือหลอมเหลว

ผู้เขียน นายธนเทพ ปะตังถาเน

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. กอบวุฒิ รุจิจนากุล

บทคัดย่อ

249123

โพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต (K_xNa_{1-x})NbO_3; KNN) เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบไร้สารตะกั่ว ที่มีความสำคัญและถูกศึกษาอย่างกว้างขวางเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เพียโซอิเล็กทริก, แอคซูเอเตอร์, เซนเซอร์ และทรานซ์ดิวเซอร์ โดย KNN และ KNN ที่ถูกปรับปรุงแล้วล้วนมีการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคที่อุณหภูมิสูง, สมบัติเฟร์โรอิเล็กทริกและสัมประสิทธิ์กลไฟฟ้าคู่ควบที่สูง อย่างไรก็ตามการที่จะทำให้ได้คุณสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริกในเซรามิกที่สูงนั้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเตรียมวัสดุดังกล่าวจากผงที่มีคุณภาพสูงเป็นหลัก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงประยุกต์ใช้กระบวนเกลือหลอมเหลวในการสังเคราะห์ผงของโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต ($0.948K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3 - 0.052LiSbO_3$; KNN-LS) คุณลักษณะเฉพาะของผงที่เตรียมได้ถูกพิสูจน์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่ามีโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ที่อุณหภูมิแคลไซน์ 700 °C ซึ่งต่ำกว่าผงที่ถูกสังเคราะห์ด้วยเทคนิคมิกซ์ออกไซด์แบบธรรมดาอยู่ 200 °C อีกทั้งยังพบว่าที่อุณหภูมิแคลไซน์ 700 °C ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผง KNN-LS ที่เตรียมได้นั้นมีขนาดประมาณ 200 nm นอกจากนั้นแล้วเราคาดว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก KNN-LS ที่เตรียมได้จากกระบวนการเกลือหลอมเหลวน่าจะมีค่าสูง

Thesis Title	Preparation and Piezoelectric Properties of Lead-free Sodium Potassium Niobate Lithium Antimonate Ceramics Synthesised by Molten-salt Process
Author	Mr. Thanatep Phatungthane
Degree	Master of Science (Physics)
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Gobwute Rujijanagul

Abstract

249123

Potassium sodium niobate (K_xNa_{1-x})NbO_3; KNN) system is an important lead-free ferroelectric materials. This material has been widely studied due to their potential application in electronic devices such as piezoelectric actuators, sensors and transducers. The KNN and modified KNN show high transition temperature, high remnant polarization, and high radial coupling coefficients. In order to get high piezoelectric and ferroelectric properties, a high quality of starting powder is essentially considered. Various approached have been used to obtain the KNN powders.

In the present work, the molten-salt method was applied to synthesize $0.948K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3 - 0.052LiSbO_3$ powder for the first time. Characteristics of the powder were investigated. Based on X-ray diffraction technique, pure perovskite phase was observed at a calcination temperature of 700°C which is lower than that required by the conventional solid-state reaction technique for ~200 °C. Raman spectroscopy technique showed that the powder had an orthorhombic symmetry which consistent with the X-ray diffraction results. The powder exhibited very fine grain with narrow size distribution. Particle size of the obtained powders increased with increasing calcination temperature. Based on the obtained results the molten-salt method is a simple and effective method to synthesize $0.948K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3 - 0.052LiSbO_3$ fine powder.

สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญ	ฉ
สารบาญตาราง	ญ
สารบาญภาพ	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 จุดประสงค์ของการศึกษาวิจัย	6
1.3 แผนดำเนินการ ขอบเขต และวิธีการวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา เชิงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์	7
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	8
2.1 ประวัติโดยสังเขปของการค้นพบวัสดุชนิดเฟร์โรอิเล็กทริก	8
2.1.1 การค้นพบเซรามิกชนิดเฟร์โรอิเล็กทริก	8
2.1.2 เฟร์โรอิเล็กทริก	9
2.2 พื้นฐานปรากฏการณ์เซรามิกชนิดเพียโซอิเล็กทริกในของแข็ง	12
2.2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริก	12
2.2.2 อุณหภูมิคูรี และการเปลี่ยนเฟส	19
2.3 โพลาไรเซชัน	19
2.4 สมบัติไดอิเล็กทริก	20
2.3.1 ค่าสภาพะยอมสัมพัทธ์ (ε_r)	21

2.3.2 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (tanδ) 23
2.3.3 ค่าคงที่ความถี่ (N) 24
2.5 การประยุกต์ใช้งานของเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก 25
2.6 โซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต 27
2.7 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 32

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง 44
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 44
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 45
3.3 วิธีการทดลอง 46
3.3.1 การเตรียมด้วยวิธีแบบการผสมเกลือหลอมเหลว 48
3.3.1.1 องค์ประกอบทางเคมี 48
3.3.1.2 การเตรียมสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต ลิเทียมแอนติโมเนต 50
3.3.1.3 การเตรียมเกลือ 52
3.4 การวิเคราะห์ทางความร้อน 53
3.5 การตรวจสอบขนาดอนุภาค 54
3.6 การศึกษาอุณหภูมิการแคลไซน์ 55
3.7 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) 56
3.8 กระบวนการเตรียมเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต 59
3.9 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก 64
3.9.1 การหาค่าความหนาแน่น 64
3.9.2 การหาค่าการหดตัวหลังการเผา 65
3.9.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 66
3.10 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก 68

3.10.1 การตรวจสอบค่าสภาพะยอมสัมพันธ์ (ε_r) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (tanδ) ที่อุณหภูมิห้อง 68

3.10.2 การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพะยอมสัมพันธ์กับอุณหภูมิ 69

3.10.3 การตรวจสอบสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริก 70

3.10.4 การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) 71

3.10.5 แฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบ 73

3.10.6 ค่าคงที่ความถี่ (N) 74

3.10.7 ค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ (g) 74

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 75

4.1 การเตรียมโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต ด้วยกระบวนการเกลือหลอมเหลว 75

4.1.1 การเตรียมผงโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต 76

4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA 76

4.1.1.2 ผลการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของเฟสด้วยเทคนิค XRD 77

4.1.1.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิครามานน์สเปกโตสโกปี 79

4.1.1.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค SEM 80

4.1.1.5 ผลการตรวจสอบขนาดของอนุภาคด้วยเทคนิค DLS 81

4.2 การเตรียมเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต 82

4.2.1 ผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่น และการหดตัว 83

4.2.2 ผลการการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 88

4.2.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค SEM 90

4.2.4 ผลการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพะยอมสัมพัทธ์กับอุณหภูมิ 92

4.2.5 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริก 100

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อแสนอแนะ 105

5.1 สรุปผลการทดลอง 105

5.2 ข้อเสนอแนะ 108

เอกสารอ้างอิง 109

ภาคผนวก 112

ประวัติผู้เขียน 117

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	28
2.2 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต	33
2.3 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต	38
2.4 แสดงแลตทิซพารามิเตอร์ของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่ฟลักแตกต่างกัน	41
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	44
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	45
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)	46
3.3 แสดงสภาวะการทดลองของการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์	56
3.3 แสดงสภาวะการทดลองของการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์ (ต่อ)	57
4.1 แสดงผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตที่อุณหภูมิต่างๆ	83
4.2 แสดงผลการตรวจสอบร้อยละการหดตัวของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตที่อุณหภูมิต่างๆ	85
4.3 แสดงผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตที่เวลาในการเผาแช่ต่างๆ	86
4.4 แสดงผลการตรวจสอบร้อยละการหดตัวของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตที่เวลาในการเผาแช่ต่างๆ	88
4.5 พารามิเตอร์ของแลตทิซในเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต	89

สารบาญภาพ

รูป	หน้า
1.1 แสดงการเปลี่ยนเฟสในสารเฟร์โรอิเล็กทริก	3
1.2 แสดงวงฮิสเทอรีซีสของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่อุณหภูมิห้อง	5
2.1 (ก) แสดงโดเมนในผลึกเชิงเดี่ยว (ข) แสดงโดเมนในเซรามิก	10
2.2 แสดงวงฮิสเทอรีซีสของสารเฟร์โรอิเล็กทริก	11
2.3 แสดงกราฟควบุมสัมพันธ์ระหว่างโพราไรซ์เซชันและสนามไฟฟ้า (ก) ผลึกเชิงเดี่ยวของ $BaTiO_3$ (ข) เซรามิก $BaTiO_3$	11
2.4 การแบ่งกลุ่มของผลึกของวัสดุใน 32 กลุ่ม	14
2.5 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสารเพียโซอิเล็กทริก	15
2.6 แสดงไดโพลภายในเนื่อสาร (ก) ก่อนทำการโพลลิง (ข) ระหว่างการโพล (ค) ภายหลังการโพล	15
2.7 แสดงเครื่องหมายของแกนสำหรับ poled เซรามิก	17
2.8 แสดงการจัดเรียงไดโพลภายในเนื้อสารก่อน และภายหลังการให้สนามไฟฟ้า	20
2.9 ตัวเก็บประจุแผ่นขนานเมื่อไม่มีสารไดอิเล็กทริก	21
2.10 แสดงตัวอย่างของการนำเซรามิกเพียโซอิเล็กตริกไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ	26
2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟไกต์ของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต	27
2.12 แสดงโครงสร้างผลึกของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	28
2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิของสารประกอบโซเดียมไนโอเบต โพแทสเซียมไนโอเบตและสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยโมล (ก) ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก	29
2.14 แสดงช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่อัตราส่วนต่างๆ	30
2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบในแนวรัศมี กับอุณหภูมิของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่อัตราส่วนต่างๆ	30

2.16 แสดงสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยโมล 31
2.17 แสดงแผนที่เฟสของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่อัตราส่วนต่างๆ 32
2.18 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ (ก) ผงแคลไซด์ (ข) ชิ้นงานเซรามิกของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต 33
2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับอุณหภูมิ และ (ข) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ 34
2.20 แสดงการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ 35
2.21 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคที่อุณหภูมิ (a) 850, (b) 1000, (c) 1100 °C 35
2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับอุณหภูมิ 36
2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบกับอุณหภูมิ 37
2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ 37
2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ 39
2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบกับอุณหภูมิ 39
2.27 แสดงวงฮีสเทอรีซีสของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตที่อุณหภูมิห้อง 40
2.28 แสดงผล XRD ของ NaCl,NKCl และ NaCl ของฟลักที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 900 °C 41
2.29 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของโซเดียโพแทสเซียมไนโอเบตที่ผสมกับ (a) KCl, (b) NaCl, (c) NKCl เผาที่อุณหภูมิ 900 °C 42
3.1 แสดงแผนภาพขั้นตอนการเตรียมด้วยกระบวนการเกลือหลอมเหลว 47
3.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมด้วยกระบวนการเกลือหลอมเหลว 49
3.3 (a) แสดงเครื่องล้างและ (b) ขั้นตอนการตรวจหาไอออนของคลอไรด์ (b1) มีไอออนของคลอไรด์ (b2) ไม่มีไอออนของคลอไรด์ 49

3.4 แสดงแผนภาพขั้นตอนการเตรียมสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต 51
3.5 แสดงแผนภาพขั้นตอนการเตรียมสารประกอบของเกลือ 52
3.6 แสดงเครื่อง Differential thermal analyzer (DTA) 53
3.7 แสดงเครื่อง Mastersizer-S 54
3.8 แสดงเงื่อนไขต่างๆในการแคลไซน์ที่อัตราการขึ้นของอุณหภูมิที่ 100°C/h 55
3.9 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer 58
3.10 แสดงชุดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm 60
3.11 แสดงแผนภาพขั้นตอนการเตรียมเซรามิก ($0.948Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$-$0.052LiSbO_3$) 61
3.12 แสดงแผนภาพการจัดวางชิ้นงานก่อนการเผาผนึก 63
3.13 แสดงภาพการจัดวางชิ้นงานก่อนการเผาผนึก 63
3.14 แสดงเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง 65
3.15 แสดงแผนภาพขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค 67
3.16 แสดงเครื่อง LCR มิเตอร์ Agilent รุ่น E4980A 69
3.17 แสดงเตาควบคุมอุณหภูมิ 70
3.18 แสดงชุดทดสอบสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริก 71
3.19 แสดงวัดเพียโซอิเล็กทริก 72
3.20 แสดงเครื่องมือในขั้นตอนการโพลลิง 72
4.1 แสดงกราฟ DTA ของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต 77
4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต 78
4.3 แสดงรามานน์สเปกโตรสโกปีผงของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอรติโมเนตที่อุณหภูมิแคลไซน์ต่างๆ 79
4.4 แสดงรามานน์สเปกโตรสโกปีผงของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมลิเทียมแอนติโมเนตที่อุณหภูมิแคลไซน์ต่างๆ 80

4.5 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต
ลิเทียมลิเทียมแอนติโมเนตที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 700 °C 81
4.6 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต
ลิเทียมลิเทียมแอนติโมเนตที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 700 °C 82
4.7 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต
ลิเทียมแอนติโมเนตที่อุณหภูมิต่างๆ 84
4.8 แสดงร้อยละการหดตัวของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต
ลิเทียมแอนติโมเนตที่อุณหภูมิต่างๆ 85
4.9 แสดงความหนาแน่นของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต
ลิเทียมแอนติโมเนตที่เวลาเผาแช่ต่างๆ 87
4.10 แสดงร้อยละการหดตัวของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต
ลิเทียมแอนติโมเนตที่เวลาเผาแช่ต่างๆ 88
4.11 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต
ลิเทียมแอนติโมเนต 89
4.12 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิกโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต
ที่เวลา 2h, 4h, และ 6h ตามลำดับ 91
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเผาแช่กับขนาดของเกรนเฉลี่ย
ของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต 92
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพะยอมสัมพัทธ์เทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก
โซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่ความถี่ต่างๆ 94
4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ
ของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่ความถี่ต่างๆ 95
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพยอมสัมพัทธ์เทียบอุณหภูมิเทียบกับความถี่ต่างๆ 96
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกเทียบอุณหภูมิ
ที่เวลาในการเผาแช่ต่างๆ 96
4.18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ Diffusness ที่เวลาในการเผาแช่ต่างๆ 98

4.19 แสดงการเปรียบเทียบค่า Diffusness ที่เวลาในการเผาแช่ต่างๆ 98
4.20 แสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพนำไฟฟ้า ที่เงื่อนไขเวลาในการเผาแช่ต่างๆ
ที่ความถี่ 10 kHz 99
4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า และโพลาไรเซชัน (P-E loop)
ของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่อุณหภูมิห้อง 101
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและพื้นที่ใต้กราฟ
จากวงฮีสเตอร์รีซีสที่เงื่อนไขเวลาต่างๆ 103
4.23 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากวงฮีสเตอร์รีซีสที่เงื่อนไขเวลาต่างๆ 104

อักษรย่อและสัญลักษณ์

$(K_XNa_{1-x})NbO_3$	Sodium Potassium Niobate
$Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$	Sodium Potassium Niobate
KNN	Sodium Potassium Niobate
$LiSbO_3$	Lithium Antimonate
PZT	Lead Zirconate Titanate
Na_2CO_3	Sodium Carbonate
K_2CO_3	Potassium Carbonate
Nb_2O_5	Niobium Oxide
Li_2CO_3	Lithium Carbonate
Sb_2O_5	Antimony Oxide
CO_2	Carbon Dioxide
NaCl	Sodium Chloride
KCl	Potassium Chloride
YSZ	yttrium-stabilized zirconia
DTA	Differential thermal analysis
DLS	Dynamic Light Scattering Particle Size Analysis
XRD	X-ray diffraction technique
SEM	electron microscope
PVA	Polyvinyl alcohol
E_c	coercive electric field
K	electromechanical coupling factor
P_r	remanent polarization
P_s	Saturated Polarization
T_c	Curie temperature

d_{33}	Piezoelectric coefficient
S	mechanical strain
T	mechanical stress
E	electric field
D	dielectric displacement
ε^T	dielectric constant
d	piezoelectric constant
S^E	elasticity constant
χ	electric susceptibility
ε_r	Relative permittivity
tanδ	Dielectric Loss