สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฑ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทรรศน์	
2.1 เซรามิกบิสมัทโซเดียมไทเทเนต	5
2.2 วิธีเรียทเวลด์	7
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	14
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	14

3.3 การเตรียมตัวอย่าง 16

3.3.1 การเตรียมสาร $Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$, $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Zr_xO_3$, $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{0.41}Zr_{0.59}O_3$ เจือด้วยแลนทานัม และ $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{0.41}Zr_{0.59}O_3$ เจือด้วยไนโอเบียม 16

3.3.1.1 การเตรียมผง 16

3.3.1.2 การเตรียมเซรามิก 18

3.3.2 การเตรียมสารบิสมัทโซเดียมเซอร์โคเนต 21

3.3.2.1 การเตรียมผง 21

3.3.2.1.1 การเตรียมผงที่ช่วงอุณหภูมิ 700 – 850 °C 21

3.3.2.1.2 การเตรียมผงที่ปริมาณสารตั้งต้นต่างกัน 22

3.3.2.1.3 การเตรียมผงที่ผ่านการบดให้เนื้อละเอียดและเผาแคลไซน์อีกครั้ง 23

3.3.3 การเตรียมสารบิสมัทโซเดียมไททาเนตเจือโคบอลต์ 23

3.3.3.1 การเตรียมผงและเซรามิก 23

3.4 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก 25

3.5 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ 26

3.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 27

3.7 การตรวจสอบชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ 31

3.8 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ 33

3.8.1 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร 34

3.8.2 ค่าความแข็งแบบนูป 35

3.8.3 ค่ามอดูลัสของยัง 35

3.8.4 ค่าความต้านทานต่อรอยแยก 36

3.9 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า 36

3.9.1 สมบัติไดอิเล็กทริก 36

3.9.2 ค่าการนำไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้า 37

3.10 การตรวจสอบสมบัติเฟอโรอิเล็กทริกของเ.เซรามิก 38

3.11 การตรวจสอบสมบัติเพียซอิเล็กทริกของเซรามิก 39

3.12 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยโปรแกรม Powder Cell 41

3.13 การศึกษาโครงสร้างผลึกวิธีเรียทเวลต์โดยโปรแกรม GSAS 46

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 สารบิสมัทโซเดียมไทเทเนต ($Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$) 55

4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$ โดยวิธีเรียทเวลด์ 55

4.2 สารบิสมัทโซเดียมไทเทเนตเซอร์โคเนต ($Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Zr_xO_3$) 58

4.2.1 ผลการเตรียมผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Zr_xO_3$ ($0 < x < 1$) 58

4.2.1.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของผง 58

4.2.1.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผง 60

4.2.1.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของผง 62

4.2.1.4 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผง 63

4.2.2 ผลการเตรียมเซรามิก $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Zr_xO_3$ ($0 < x < 1$) 66

4.2.2.1 ผลตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก 66

4.2.2.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเซรามิก 70

4.2.2.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิก 74

4.2.2.4 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี 79

4.2.3 การศึกษาสมบัติของเซรามิก $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Zr_xO_3$ ($0 < x < 1$) 88

4.2.3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของเซรามิก 88

ค่าความแข็งแบบนูปและวิกเกอร์ส 88

ค่ามอดูลัสของยัง 91

ค่าความต้านทานต่อการแตกหัก 92

4.2.3.2 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก 95

สมบัติไดอิเล็กทริก 95

สมบัติการนำไฟฟ้า 98

สมบัติเฟร์โรอิเล็กทริก 101

4.2.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก โดยวิธีเรียทเวลด์ 104

4.2.4 สารบิสมัทโซเดียมไททาเนตเซอร์โคเนตเจือแลนทานัม 113

4.2.5 สารบิสมัทโซเดียมไททาเนตเซอร์โคเนตเจือไนโอเบียม 116

4.3 สารบิสมัทโซเดียมเซอร์โคเนต ($Bi_{0.5}Na_{0.5}ZrO_3$) 120

4.3.1 ผลการเตรียมผงบิสมัทโซเดียมเซอร์โคเนต $Bi_{0.5}Na_{0.5}ZrO_3$ 120

4.3.1.1 การสังเคราะห์ผง BNZ โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 121

4.3.1.2 การสังเคราะห์ผง BNZ โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตั้งต้น 123

4.3.1.3 การเปลี่ยนแปลงส่วนผสม BNZ โดยการเพิ่มปริมาณ Na_2CO_3 และ Bi_2O_3 130

4.3.1.4 ผง BNZ/Na_2CO_3 เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 2 ครั้ง 130

4.3.1.5 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคผง 133

4.3.1.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผง 134

4.3.1.7 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของผงผสม 136

4.3.2 ผลการการเตรียมเซรามิก BNZ 137

4.3.2.1 เผาเซรามิกที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ BNZ/10wt%Na_2CO_3 137

4.3.2.2 เผาเซรามิกที่อุณหภูมิ 900 องศาและเปลี่ยนแปลงเวลาในการเผาโดยใช้ BNZ/10wt%Na_2CO_3 140

4.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}ZrO_3$ โดยวิธีเรียทเวลด์ 143

4.4 **สารบิสมัทโซเดียมไทเทเนตเจือโคบอลต์** ($Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Co_xO_{3-x}$) 148

4.4.1 ผลการเตรียมผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Co_xO_{3-x}$ 148

4.4.1.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของผง 148

4.4.1.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผง 149

4.4.2 ผลการเตรียมเซรามิก $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Co_xO_{3-x}$ 150

4.4.2.1 ผลตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก 150

4.4.2.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเซรามิก 153

4.4.2.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิก 154

4.4.2.4 ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของเซรามิก 160

4.2.3 การศึกษาสมบัติของเซรามิก $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Zr_xO_3$ 168

4.2.3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของเซรามิก 168

4.2.3.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก 170

สมบัติไดอิเล็กทริก 170

สมบัติการนำไฟฟ้า 173

สมบัติเพียโซอิเล็กทริก 175

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย 177

5.2 ข้อเสนอแนะ 179

เอกสารอ้างอิง 180

Output จากโครงการวิจัย 188

ภาคผนวก 193

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ของแลคทิซของโครงสร้างผลึก 3 แบบของสาร BNT	5
3.1 ผงเซรามิก BNZ ที่ปริมาณสารตั้งต้นต่างกัน	22
4.1 ผลของข้อมูลโครงสร้างผลึกที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเรียทเวลด์	57
4.2 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุในผง BNTZ ด้วยเทคนิค EDX	65
4.3 ค่าความหนาแน่นของเซรามิก BNTZ ผ่านการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ	69
4.4 ขนาดเกรนและภาพถ่าย SEM ของเซรามิก BNTZ	77
4.5 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก BNTZ เมื่อ Zr เท่ากับ 0.20 เศษส่วนโดยโมล	80
4.6 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก BNTZ เมื่อ Zr เท่ากับ0.35 เศษส่วนโดยโมล	81
4.7 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก BNTZ เมื่อ Zr เท่ากับ 0.40 เศษส่วนโดยโมล	82
4.8 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก BNTZ เมื่อ Zr เท่ากับ 0.45 เศษส่วนโดยโมล	83
4.9 องค์ประกอบของธาตุของเซรามิก BNTZ เมื่อ Zr เท่ากับ 0.60 เศษส่วนโดยโมล	85
4.10 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก BNTZ เมื่อ Zr เท่ากับ 0.80 เศษส่วนโดยโมล	87
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่น และขนาดเกรนที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลจากกล้องจุลทรรศน์แสง (OM)	94
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น และขนาดเกรนที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	94

4.13 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTZ 97

4.14 สภาพต้านทานไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าของเซรามิก BNTZ 100

4.15 ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BNTZ เมื่อ x = 0.20, 0.35, 0.40, 0.45, 0.60 และ 0.80 เศษส่วนโดยโมล 102

4.16 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยวิธี Rietveld โดยใช้ Space group R3m ของผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Zr_xO_3$ 106

4.17 ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติไฟฟ้าของเซรามิก BNLTZ 116

4.18 ข้อมูลน้ำหนักที่หายไประหว่างการเตรียมและการเผาแคลไซน์ระหว่างการเตรียม 122

4.19 ข้อมูลน้ำหนักที่หายไประหว่างการเตรียมและการเผาแคลไซน์โดยเปลี่ยนแปลง Bi_2O_3 124

4.20 ข้อมูลน้ำหนักที่หายไประหว่างการเตรียมและการเผาแคลไซน์โดยเปลี่ยนแปลง ZrO_2 125

4.21 ข้อมูลน้ำหนักที่หายไประหว่างการเตรียมและการเผาแคลไซน์โดยเปลี่ยนแปลงNa_2CO_3 127

4.22 ข้อมูลน้ำหนักที่หายไประหว่างการเตรียมและการเผาแคลไซน์โดยการเพิ่มปริมาณ Na_2CO_3 และ Bi_2O_3 130

4.23 มวลที่หายไปหลังการเตรียมและการเผาแคลไซน์ที่ 800 องศา 2 ชั่วโมง 131

4.24 ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางทฤษฎีและที่วัดด้วย EDX 135

4.25 ข้อมูลโครงสร้างผลึกของผงเซรามิก SNZ 146

4.26 ข้อมูลโครงสร้างผลึกของผงเซรามิก BNZ 147

4.27 ค่าความหนาแน่น และร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรของเซรามิก $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Co_xO_{3-x}$ 152

ที่เจือด้วย Co ปริมาณต่างๆ

4.28 ขนาดเกรนของเซรามิก $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Co_xO_{3-x}$ ที่เจือด้วย Co ปริมาณต่างๆ 157

4.29 ช่วงการกระจายตัวของขนาดเกรนที่ปริมาณการเจือ Co ต่างๆ 158

4.30 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.005 เศษส่วนโดยโมล 160

4.31 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก เมื่อ Co เท่ากับ 0.010 เศษส่วนโดยโมล 162

4.32 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก เมื่อ Co เท่ากับ 0.020 เศษส่วนโดยโมล 164

4.33 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก เมื่อ Co เท่ากับ 0.030 เศษส่วนโดยโมล 166

4.34 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก ที่อุณหภูมิห้อง (29°C) 172

4.35 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าของเซรามิก $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Co_xO_{3-x}$ 174

4.36 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของเซรามิก $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Co_xO_{3-x}$ ที่ทำขั้วด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรง 3.5 kV/mm และ 4.5 kV/mm วัดหลังการทำขั้วทันที และหลังการทำขั้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 176

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 โครงสร้างผลึกแบบ ABO_3 ของ BNT	6
2.2 (a) การวิเคราะห์แผนภาพเลี้ยวเบนของนิวตรอนด้วยวิธี Rietveld สำหรับ $Ca_3Al_2(O_4D_4)_3$ และ (b) การจัดเรียงตัวอะตอมภายในผลึก	8
2.3 ความแตกต่างระหว่างแผนภาพการเลี้ยวเบนของ (a) นิวตรอน และ (b) รังสีเอกซ์	9
3.1 ขั้นตอนการเตรียมผง BNTZ	17
3.2 ลักษณะการจัดเรียงเม็ด BNTZ สำหรับเผาซินเทอร์	18
3.3 แผนผังการใช้อุณหภูมิในการเผาซินเทอร์เซรามิก เมื่อ T_R คือ อุณหภูมิห้อง และ 900°C คือ อุณหภูมิซินเทอร์	19
3.4 แผนภาพขั้นตอนการเตรียมเซรามิก BNTZ	20
3.5 กระบวนการทางความร้อนของการเผาแคลไซน์ของผงเซรามิก BNZ	22
3.6 กระบวนการทางความร้อนของการเผาซินเตอร์ของผงเซรามิก BNZ	24
3.7 เครื่องชั่งอัตโนมัติที่สามารถชั่งได้ทั้งในน้ำและอากาศ	26
3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	29
3.9 วิธีการหาขนาดของเกรนแบบ Mean linear intercept	30
3.10 หลักการเกิดรังสีเอกซ์	31

3.11 ลักษณะข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ EDX 32

3.12 เครื่องวัดแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker hardness indentation) 33

3.13 เครื่องวัดแข็งแบบนูป (Knoop hardness indentation) 34

3.14 ชุดเครื่องมือในกระบวนการสร้างขั้ว 40

3.15 เครื่อง d_{33} มิเตอร์ รุ่น S5865 40

3.16 input data screen 41

3.17 crystal structure representation 42

3.18 แสดง powder pattern 43

3.19 Powder cell screen 44

3.20 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เริ่มต้น 44

3.21 การ save ไฟล์นามสกุล .ASCII 45

3.22 (a), (b) และ (c) ลำดับการสร้างไฟล์ผลการทดลอง 46

3.23 (a), (b) และ (c) ลำดับการตั้งค่าเฟส และอะตอมเริ่มต้นก่อนทำการทดลอง 47

3.24 (a), (b) และ(c) ลำดับการกำหนดข้อมูล Histogram 49

3.25 (a) และ (b) ลำดับการเปรียบเทียบข้อมูล 51

3.26 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้จากการคำนวณและสังเกตการณ์เปรียบเทียบกัน 52

3.27 การปรับเปลี่ยนตัวแปรที่มีผลต่อรูปร่างของพีค 53

3.28 บังคับการเคลื่อนที่ของอะตอมที่อยู่ตำแหน่งเดียวกัน และอัตราส่วนของสาร 54

3.29 การปรับเปลี่ยนตัวแปรของอะตอม 54

4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของผง BNT เริ่มต้นก่อนทำการวิเคราะห์ 55

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลแผนภาพเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ด้วยวิธีเรียทเวลด์จากโปรแกรม GSAS 56

4.3 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$ โดยใช้โปรแกรม Crystal Maker 56

4.4 ผง BNTZ เมื่อ (a) 0.20, (b) 0.35, (c) 0.40 และ (d) 0.45 เศษส่วนโมล ตามลำดับ เผาอุณหภูมิแคลไซด์ 800 °C 58

4.5 ผง BNTZ เผาอุณหภูมิแคลไซน์ 800 °C (a) 0.60 และ (b) 0.80 เกิดการหลอมละลายแข็งขึ้น จึงลดอุณหภูมิแคลไซน์เป็น 750 °C (c) 0.60 และ (d) 0.80 จนถึงอุณหภูมิแคลไซน์ที่เหมาะสมคือ 700 °C (e) 0.60 และ (f) 0.80 ตามลำดับ 59

4.6 (a) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง BNTZ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ Zr สูงขึ้นทำให้ (b) ไม่ปรากฏพีคที่ระนาบ (110) รวมทั้ง (c) พีคที่ระนาบ (211) และ (220) เกิดการแยกตัวแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก 61

4.7 ภาพถ่าย SEM ของผง BNTZ (a) 0.20, (b) 0.35, (c) 0.40 และ (d) 0.45 เศษส่วนโมล แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C ส่วน (e) 0.60 และ (f) 0.80 แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C 62

4.8 ภาพถ่าย BEI ที่กำลังขยาย 3000 และ Spectrum 1 ใช้วิเคราะห์ EDX (a) 0.20, (b) 64

0.35 (c) 0.40 และ (d) 0.45 แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C

4.9 ภาพถ่าย BEI ที่กำลังขยาย 5000 และ Spectrum 1 ใช้วิเคราะห์ EDX (a) 0.60 และ (b) 0.80 แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C 65

4.10 เซรามิก BNTZ เมื่อเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ (a), (b) 1000 (c) 950 และ (d) 900 °C 68

4.11 ความหนาแน่น BNTZ เซรามิก ที่อุณหภูมิซินเทอร์ 1000, 950 และ 900 °C 69

4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ BNTZ เซรามิก ผ่านการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ (a) 1000 °C และ (b) 950 °C ด้วยอัตราขึ้นลง 5 °C/min เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 71

4.13 (a) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ BNTZ เซรามิกอุณหภูมิซินเทอร์ 900 °C มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง สังเกตจาก (b) ที่ปริมาณ ZrO_2 ร้อยละ 0.60 โดยโมล 73

4.14 โครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิก BNTZ ที่ปริมาณ Zr ตั้งแต่ (a) 0.20, (b) 0.35 75

(c) 0.40, (d) 0.45, (e) 0.60 และ 0.80 เศษส่วนโดยโมล เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรน และ ความหนาแน่นกับ ปริมาณการเติม Zrของ เซรามิก BNTZ ที่ ร้อยละ (a) 0.20, (b) 0.35 (c) 0.40, (d) 0.45, (e) 0.60 cและ 0.80 โดยโมล เผาอุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 76

4.16 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 (b) Spectrum 2 และ (c) Spectrum 3 ของเซรามิก BNTZ ที่ปริมาณ Zr เท่ากับ 0.20 เศษส่วนโดยโมล 79

4.17 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 และ (b) Spectrum 2 81

ของเซรามิก BNTZ ที่ปริมาณ Zr เท่ากับ 0.35 เศษส่วนโดยโมล

4.18 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 และ (b) Spectrum 2 ของ BNTZ ที่ปริมาณ Zr เท่ากับ 0.40 เศษส่วนโดยโมล 82

4.19 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 และ (b) Spectrum 2 ของเซรามิก BNTZ ที่ปริมาณ Zr เท่ากับ 0.45 เศษส่วนโดยโมล 83

4.20 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 (b) Spectrum 2 ของ BNTZ ที่ปริมาณ Zr เท่ากับ 0.60 เศษส่วนโดยโมล 84

4.21 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ(a) Spectrum 1 (b) Spectrum 2 และ (c) Spectrum 3 ของเซรามิก BNTZ ที่ปริมาณ Zr เท่ากับ 0.60 เศษส่วนโดยโมล 85

4.22 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 และ (3) Spectrum 2 ของเซรามิก BNTZ ที่ปริมาณ Zr เท่ากับ 0.80 เศษส่วนโดยโมล 86

4.23 รอยกดแบบนูปและวิกเกอร์สของเซรามิก BNTZ เมื่อปริมาณการเติม Zr ตั้งแต่ (a) 0.20,(b) 0.35, (c) 0.40, (d) 0.45, (e) 0.60 และ (f) 0.80 เศษส่วนโดยโมล 88

4.24 ค่าความแข็งแบบนูป และแบบวิกเกอร์สของเซรามิก BNTZ 91

4.25 ค่ามอดูลัสของยังเซรามิก BNTZ 92

4.26 ค่าความต้านทานต่อแตกหักของเซรามิก BNTZ 93

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ (b) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกกับปริมาณการเติม Zr ในเซรามิก BNTZ 96

4.28 สมบัติทางไฟฟ้าเซรามิก BNTZ ได้แก่ (a) สภาพต้านทานไฟฟ้า สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า (b) ในสเกลธรรมดา และ (c) ในสเกล log 99

4.29 วงวนฮิสเทอรีซีสของเซรามิก BNTZ ร้อยละ 0.20, 0.35, 0.40, 0.45, 0.60 และ 0.80 โดยโมล โดยวัดที่ค่าสนามไฟฟ้าประมาณ 20 กิโลโวลต์ โดยใช้ความถี่ 50 เฮิรตซ์ 102

4.30 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซีส ก่อนเกิดการ break down เมื่อให้ค่าสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งโดยใช้ความถี่ 50 เฮิรตซ์ 103

4.31 ค่า break down field ของเซรามิก BNTZ เมื่อปริมาณ Zr ตั้งแต่ 0.20, 0.35, 0.40, 0.45, 0.60 และ 0.80 เศษส่วนโดยโมล 104

4.32 โครงสร้างผลึกจำลองตั้งต้นในระบบ rhombohedral 106

4.33 Rietveld refinement ของผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$ 107

4.34 Rietveld refinement ของผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{0.8}Zr_{0.2}O_3$ 107

4.35 Rietveld refinement ของผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{0.65}Zr_{0.35}O_3$ 108

4.36 Rietveld refinement ของผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{0.6}Zr_{0.4}O_3$ 108

4.37 Rietveld refinement ของผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{0.55}Zr_{0.45}O_3$ 109

4.38 Rietveld refinement ของผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{0.4}Zr_{0.6}O_3$ 109

4.39 Rietveld refinement ของผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{0.2}Zr_{0.8}O_3$ 110

4.40 รูปแบบการเลี้ยวเบนของสารละลายของแข็งระบบ BNTZ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650 °C 111

4.41 รูปแบบการเลี้ยวเบนของสารละลายของแข็งระบบ BNTZ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C 111

4.42 รูปแบบการเลี้ยวเบนของสารละลายของแข็งระบบ BNTZ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750 °C 112

4.43 รูปแบบการเลี้ยวเบนของสารละลายของแข็งระบบ BNTZ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C 112

4.44 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิก $(Bi_{0.5}Na_{0.5})_{1-1.5x}La_xTi_{0.41}Zr_{0.59}O_3$ 114

4.45 โครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิก $(Bi_{0.5}Na_{0.5})_{1-1.5x}La_xTi_{0.41}Zr_{0.59}O_3$ 114

4.46 สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก $(Bi_{0.5}Na_{0.5})_{1-1.5x}La_xTi_{0.41}Zr_{0.59}O_3$ 115

4.47 Hysteresis loops ของเซรามิก $(Bi_{0.5}Na_{0.5})_{1-1.5x}La_xTi_{0.41}Zr_{0.59}O_3$ 115

4.48 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ (a) ผงและ (b) เซรามิก $[Bi_{0.5}Na_{0.5}]_{1-x/2}[Ti_{0.41}Zr_{0.59}]_{1-x}Nb_xO_3$ 117

4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ขนาดของเกรน และปริมาณการเจือ Nb ในเซรามิก $[Bi_{0.5}Na_{0.5}]_{1-x/2}[Ti_{0.41}Zr_{0.59}]_{1-x}Nb_xO_3$ 117

4.50 โครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิก $Bi_{0.5}Na_{0.5}[Ti_{0.41}Zr_{0.59}]O_3$ เจือไนโอเบียม 118

4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน ความต่างศักษ์ และปริมาณการเจือไนโอเบียม ในเซรามิก $[Bi_{0.5}Na_{0.5}]_{1-x/2}[Ti_{0.41}Zr_{0.59}]_{1-x}Nb_xO_3$ 118

4.52 แผนภาพเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง $Bi_{0.5}Na_{0.5}ZrO_3$ 120

4.53 ภาพถ่ายผง BNZ หลักการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อ a-d คือ ที่เผาที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศา ตามลำดับ 121

4.54 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงตั้งต้น และผงเซรามิกแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ 123

4.55 ภาพถ่ายผง BNZ หลักการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศา เมื่อ a-d คือ ที่ปริมาณการเติม Bi_2O_3 เท่ากับ 0, 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 125

4.56 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BNZ/xBi_2O_3 แคลไซน์ที่ 800 °C 126

4.57รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BNZ/xZrO_2 แคลไซน์ที่ 800 °C 126

4.58 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BNZ/xNa_2CO_3 แคลไซน์ที่ 800 °C 127

4.59 XRD ของผง BNZ ที่เพิ่มปริมาณ Na_2CO_3 128

4.60 BNZ/Na_2CO_3 (1-7) ที่ปริมาณการเติมเท่ากับ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 wt% ตามลำดับ 129

4.61 รูปถ่ายของสาร BNZ ที่ถูกเติมด้วย Na_2CO_3 และ Bi_2O_3 อย่างละ 5 wt% 130

4.62 รูปลักษณะของผงก่อนเผาแคลไซน์ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยทั่วไปแล้วทุกส่วนผสมจะมีลักษณะก่อนเผาเหมือนกันหมด จึงยกมาแค่บางรูปเพื่อเป็นตัวอย่าง 132

4.63 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BNZ/xNa_2CO_3 ผ่านการบดให้เนื้อละเอียด และเผาแคลไซน์อีกครั้ง 132

4.64 ภาพถ่าย SEM ของผง BNZ 133

4.65 การกระจายตัวขนาดของผง BNZ 134

4.66 การวิเคราะห์ EDX ของผง BNZ 135

4.67 กราฟ TG-DSC ของผงผสม BNZ ก่อนแคลไซน์ 136

4.68 เซรามิก BNZ/10wt%Na_2CO_3 เผาที่อุณหภูมิ (1) 850, (2)900, (3) 950, (4)1000, (5) 1050 และ (6) 1100 องศา ตามลำดับ 137

4.69 XRD ของเซรามิก BNZ/10wt%Na_2CO_3 เผาที่อุณหภูมิ 850, 900, 950, 1000, 1050 และ 1100 องศา 138

4.70 ค่าความหนาแน่นของเซรามิก BNZ/10wt%Na_2CO_3 เผาที่อุณหภูมิ 850, 900, 950, 1000, 1050 และ 1100 องศา 138

4.71 ค่าร้อยละของปริมาตรที่หายไปของเซรามิก BNZ/10wt%Na_2CO_3 เผาที่อุณหภูมิ 850, 900, 950, 1000, 1050 และ 1100 องศา 139

4.72 ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของเซรามิก BNZ/10wt%Na_2CO_3 เผาที่อุณหภูมิ 850, 900, 950, 1000, 1050 และ 1100 องศา 139

4.73 เซรามิก BNZ/10wt%Na_2CO_3 เผาที่อุณหภูมิ 900 องศา โดยเพิ่มเวลาในการเผาคือ (1) 2, (2) 4, (3) 6 และ (4) 8 ชั่วโมง ตามลำดับ 140

4.74 XRD เม็ดเซรามิก BNZ/10wt%Na_2CO_3 เผาที่อุณหภูมิ 900 องศา โดยเพิ่มเวลาในการเผาคือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง 141

4.75 ค่าความหนาแน่นของเม็ดเซรามิก BNZ/10wt%Na_2CO_3 เผาที่อุณหภูมิ 900 องศา โดยเพิ่มเวลาในการเผาคือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง 141

4.76 ค่าร้อยละของปริมาตรที่หายไปของเม็ดเซรามิก BNZ/10wt%Na_2CO_3 เผาที่อุณหภูมิ 900 องศา โดยเพิ่มเวลาในการเผาคือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง 142

4.89 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ใช้ในการวัดขนาดเกรน ที่ปริมาณ Co เท่ากับ (a) 0.000 (b) 0.005 (c) 0.010 (d) 0.020 และ (e) 0.030 เศษส่วนโดยโมล 157
4.90 การกระจายตัวของขนาดเกรน ที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ (a) 0.000 (b) 0.005 (c) 0.010 (d) 0.020 และ (e) 0.030 เศษส่วนโดยโมล 159
4.91 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 (b) Spectrum 2 และ (c) Spectrum 3 ของเซรามิก ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.005 เศษส่วนโดยโมล 161
4.92 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 (b) Spectrum 2 และ (c) Spectrum 3 ของเซรามิก ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.010 เศษส่วนโดยโมล 163
4.93 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 (b) Spectrum 2 และ (c) Spectrum 3 ของเซรามิก ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.020 เศษส่วนโดยโมล 165
4.94 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 (b) Spectrum 2 (c) Spectrum 3 และ (d) Spectrum 4 ของเซรามิก ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.030 เศษส่วนโดยโมล 167
4.95 รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก ที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ (a) 0.000 (b) 0.005 (c) 0.001 (d) 0.002 และ (e) 0.003 เศษส่วนโดยโมล 168
4.96 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สของเซรามิกกับปริมาณการเจือ Co 169
4.97 (a) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (b) สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า 171
4.98 กราฟค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของเซรามิก $Bi_{0.5}Na_{0.5}Ti_{1-x}Co_xO_{3-x}$ ที่ทำขั้วด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรง 3.5 kV/mm และ 4.5 kV/mm วัดหลังการทำขั้วทันทีและหลังทำขั้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 173