

	หน้า
3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง	24
3.3.1 การเตรียมสารเลดเมตาโนโอเบต	24
3.3.2 การเตรียมเลดแมกนีเซียมออกไซด์	28
3.3.3 การเตรียมเลดแมกนีเซียมในโอเบต	28
3.4 การตรวจสอบสารตัวอย่าง	29
3.4.1 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อน	29
3.4.2 การตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดเฟส	31
3.4.3 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ	31
3.4.3.1 การหาค่าความหนาแน่น	31
3.4.3.2 การหาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร	32
3.4.3.3 การหาน้ำหนักที่สูญหาย	33
3.4.4 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	35
4.1 ผลการตรวจสอบสารตัวอย่าง PN	35
4.1.1 ผลการตรวจสอบผง PN ด้วยเทคนิค DTA	35
4.1.2 ผลการตรวจสอบผง PN ด้วยเทคนิค XRD	36
4.1.3 ผลการตรวจสอบผง PN ด้วยกล้อง SEM	42
4.1.4 ผลการตรวจสอบผง PN ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค	42
4.1.5 ผลการตรวจสอบเซรามิก PN ด้วยเทคนิค XRD	43
4.1.6 ผลการตรวจสอบค่าความหดตัวของเซรามิก PN	46
4.1.7 ผลการตรวจสอบค่าน้ำหนักที่สูญหายของเซรามิก PN	49
4.1.8 ผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของเซรามิก PN	52
4.1.9 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PN	54
4.1.10 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กตริกของเซรามิก PN	57

4.2 ผลการตรวจสอบสารตัวอย่าง PM	60
4.2.1 ผลการตรวจสอบผง PM ด้วยเทคนิค DTA	60
4.2.2 ผลการตรวจสอบผง PM ด้วยเทคนิค XRD	61
4.2.3 ผลการตรวจสอบผง PM ด้วยกล้อง SEM	65
4.2.4 ผลการตรวจสอบผง PM ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค	65
4.2.5 ผลการตรวจสอบเซรามิก PM ด้วยเทคนิค XRD	66
4.2.6 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PM	68
4.3 ผลการตรวจสอบสารตัวอย่าง PMN ที่เตรียมจากวิธีมิทซ์ออกไซด์แบบ ดั้งเดิม	69
4.3.1 ผลการตรวจสอบผง PMN ด้วยเทคนิค DTA	69
4.3.2 ผลการตรวจสอบผง PMN ด้วยเทคนิค XRD	69
4.3.3 ผลการตรวจสอบผง PMN ด้วยกล้อง SEM	76
4.3.4 ผลการตรวจสอบผง PMN ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค	77
4.3.5 ผลการตรวจสอบเซรามิก PMN ด้วยเทคนิค XRD	77
4.3.6 ผลการตรวจสอบค่าความหดตัวของเซรามิก PMN	82
4.3.7 ผลการตรวจสอบค่าน้ำหนักที่สูญหายของเซรามิก PMN	85
4.3.8 ผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของเซรามิก PMN	87
4.3.9 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PMN	89
4.3.10 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กตริกของเซรามิก PMN	92
4.4 ผลการตรวจสอบสารตัวอย่าง PMN ที่เตรียมจากวิธีมิทซ์ออกไซด์แบบดัดแปลง	93
4.4.1 ผลการตรวจสอบผง PMN ด้วยเทคนิค XRD	93
4.4.2 ผลการตรวจสอบผง CPMN ด้วยกล้อง SEM	99
4.4.3 ผลการตรวจสอบผง CPMN ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค	99
4.4.4 ผลการตรวจสอบเซรามิก PMN ด้วยเทคนิค XRD	100
4.4.5 ผลการตรวจสอบค่าความหดตัวของเซรามิก PMN	104

	หน้า
4.4.6 ผลการตรวจสอบค่าน้ำหนักที่สูญหายของเซรามิก PMN	107
4.4.7 ผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของเซรามิก PMN	109
4.4.8 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PMN	111
4.4.9 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กตริกของเซรามิก PMN	115
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	117
5.1 สรุปผล	117
5.2 ข้อเสนอแนะ	118
เอกสารอ้างอิง	119
ประวัติการศึกษา	122

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงข้อแตกต่างระหว่างสมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบธรรมดาและแบบปริแลกเซอร์	18
2 แสดงปริมาณเฟสของผง PN ที่ผ่านการแคลไซน์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ กัน	38
3 แสดงปริมาณเฟสของเซรามิก PN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1200 °ซ	44
4 แสดงค่าการหดตัวของเซรามิก PN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1200 °ซ	47
5 แสดงค่าการหดตัวของเซรามิก PN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1250 °ซ	47
6 แสดงค่าน้ำหนักที่สูญหายของเซรามิก PN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ	50
7 แสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก PN ที่เตรียมด้วยเงื่อนไขต่างๆ	53
8 แสดงปริมาณเฟสของผง PMN ที่ผ่านการแคลไซน์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ กัน	71
9 แสดงปริมาณเฟส PMN ของเซรามิกที่ผ่านการซินเตอร์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ กัน	78
10 แสดงสมบัติกายภาพของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ	83
11 แสดงปริมาณเฟส CPMN ของผงที่ผ่านการแคลไซน์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ กัน	95
12 แสดงปริมาณเฟส PMN ของเซรามิกที่ผ่านการซินเตอร์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ	101
13 แสดงสมบัติทางกายภาพของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ	

สารบัญภาพประกอบ

รูป	หน้า
2.1 แสดงการเกิดโพลาไรซ์ของอะตอม	4
2.2 ลักษณะของโมเลกุลมีขั้วที่วางตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ	4
2.3 แสดงการเกิดโพลาไรซ์ของสารไดอิเล็กตริก	5
2.4 แสดงกระบวนการเกิดโพลาไรเซชัน	6
2.5 แสดงการวัดค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุอย่างง่าย	7
2.6 ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของกระแสไฟฟ้ากับเฟสของความต่างศักย์ไฟฟ้าในสารไดอิเล็กตริก	9
2.7 แสดงความสัมพันธ์ของค่า ϵ_r กับ $1/(T-T_0)$ ในสภาวะพาราอิเล็กตริกของสารที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์	10
2.8 แสดงผลของขนาดเกรนที่มีต่อค่า ϵ_r ของเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กตริก	13
2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) หรือโครงสร้างแบบโพแทสเซียม ทั้งสเดน บรอนด์ ของเลดเมตาไนโอเบต	14
2.10 เฟสไดอะแกรมของสารประกอบในระบบ $Pb_{1-x}Ba_xNb_2O_6$ (BPN)	16
2.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพันธ์ (ϵ'_r) และค่าตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อน (ϵ''_r) ของ PMN กับอุณหภูมิและความถี่	19
2.12 แสดงเฟสไดอะแกรมของสารประกอบในระบบ $PMN_x - PT_{1-x}$	20
3.1 แสดงแผนผังการเตรียมสารผสมเลดเมตาไนโอเบตด้วยวิธีการมิกซ์ออกไซด์แบบดั้งเดิม	25
3.2 แสดงแผนผังการเผาแคลไซน์ที่ใช้	26
3.3 แสดงแผนผังการเผาซินเตอร์ที่ใช้	27
3.4 แสดงลักษณะการจัดวางตัวของสารตัวอย่างสำหรับการเผาซินเตอร์	27
3.5 แสดงกราฟสัญญาณที่ได้จาก DTA	29

รูป	หน้า	
4.1	กราฟแสดงพฤติกรรมทางความร้อนของสารผสม PbO กับ Nb ₂ O ₅	36
4.2	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง PN ที่ผ่านการแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ ค่าต่างๆ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที่	39
4.3	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง PN ที่ผ่านการแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 900 °ซ โดยใช้เวลาเผาเช่นกันต่างกัน ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที่	40
4.4	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง PN ที่ผ่านการแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 900 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างๆ กัน	41
4.5	แสดงภาพถ่าย SEM ของผง PN ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 900 °ซ โดยใช้เวลาเผาเช่นกัน 5 ชั่วโมง ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที่	42
4.6	แสดงพฤติกรรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผง PN	43
4.7	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วย อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 3 °ซ/นาที่	45
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงเส้นและเชิงปริมาตรของเซรามิก PN กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ เมื่อเผาด้วยอัตราการขึ้น/ลงเป็น 3 °ซ/นาที่	48
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวกับระยะเวลาในการเผาแซ่ของเซรามิก PN โดยการใช้อัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °ซ/นาที่ ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ และ 1250 °ซ	48
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวกับอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิของ เซรามิก PN เมื่อเผาซินเตอร์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ	49
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่สูญหายกับอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ ของเซรามิก PN เมื่อเผาซินเตอร์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ	51
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่สูญหายกับระยะเวลาในการเผาแซ่ของ เซรามิก PN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1200 °ซ และ 1250 °ซ ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	51

รูป	หน้า
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์กับระยะเวลาในเผาแช่ของเซรามิก PN เมื่อเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1200 °ซ และ 1250 °ซ ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที	54
4.14 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวแตกหักของเซรามิก PN ที่ผ่านการซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิต่างๆ โดยมีระยะเวลาเผาแช่นาน 3 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที	55
4.15 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวแตกหักของเซรามิก PN ที่ผ่านการซินเตอร์ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที ที่อุณหภูมิ และระยะเวลาเผาแช่นานต่างกัน	56
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และ ค่าตัวประกอบ การสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กตริกกับความถี่ของเซรามิก PN เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ	58
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และค่าตัวประกอบ การสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กตริกกับความถี่ของเซรามิก PN เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250 °ซ	58
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และค่าตัวประกอบ การสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กตริกกับอุณหภูมิของเซรามิก PN เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ	59
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และค่าตัวประกอบ การสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กตริกกับอุณหภูมิของเซรามิก PN เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250 °ซ	59
4.20 แสดงพฤติกรรมทางความร้อนของสารผสม PbO กับ MgO	60
4.21 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง PM ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิค่าต่างๆ กันโดยมีระยะเวลาเผาแช่นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที	62

รูป	หน้า
4.22 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง PM ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 800 °ซ โดยใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที่ ที่มีระยะเวลาในการเผาแช่ นานต่างกัน	63
4.23 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง PM ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 800 °ซ ที่มีระยะเวลาเผาแช่นาน 4 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างกัน	64
4.24 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง PM ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 800 °ซ โดยมีระยะเวลาเผาแช่นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 5 °ซ/นาที่	65
4.25 แสดงพฤติกรรมของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผง PM	66
4.26 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PM ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วย อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาแช่ต่างๆ กัน	67
4.27 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวแตกหักของเซรามิก PM ที่ผ่านการซินเตอร์ด้วย อุณหภูมิ 850 °ซ โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแช่นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลง ของอุณหภูมิ 3 °ซ /นาที่	68
4.28 กราฟแสดงพฤติกรรมทางความร้อนของสารผสม PbO, MgO กับ Nb ₂ O ₅	69
4.29 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง PMN ที่ผ่านการแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ ค่าต่างๆ โดยมีระยะเวลาเผาแช่นาน 3 ชั่วโมง ที่ใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	72
4.30 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง PMN ที่ผ่านการแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 900 °ซ โดยมีระยะเวลาในการเผาแช่นานต่างกัน ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	73
4.31 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง PMN ที่ผ่านการแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 900 °ซ โดยมีระยะเวลาเผาแช่นาน 5 ชั่วโมง ที่ใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างๆ กัน	74
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟส PMN ที่ได้กับอุณหภูมิเผาแคลไซน์ที่ใช้ โดยมีระยะเวลาในการเผาแช่นาน 3 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	75
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟส PMN ที่ได้กับระยะเวลาที่ใช้ในการเผา แช่เมื่อเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 900 °ซ ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	75

รูป	หน้า
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟส PMN ที่ได้กับอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิที่ใช้เมื่อเผาแคลไซต์ด้วยอุณหภูมิ 900 °ซ โดยมีระยะเวลาในการเผาแช่นาน 5 ชั่วโมง	76
4.35 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง PMN ที่ผ่านการเผาแคลไซต์ด้วยอุณหภูมิ 900 °ซ โดยใช้เวลาเผาแช่นาน 5 ชั่วโมง ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที่	76
4.36 แสดงพฤติกรรมกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผง PMN	77
4.37 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิค่าต่างๆ โดยใช้ระยะเวลาเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	79
4.38 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1200 °ซ โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างกัน	80
4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟส PMN ที่ได้กับอุณหภูมิซินเตอร์ที่ใช้ของเซรามิกที่เผาด้วยการใช้ระยะเวลาเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	81
4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟส PMN ที่ได้กับอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิที่ใช้ของเซรามิกที่เผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1200 °ซ และ 1225 °ซ โดยมีระยะเวลาเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง	81
4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงเส้น และเชิงปริมาตรของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิค่าต่างๆ โดยใช้ระยะเวลาเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	84
4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ และ 1225 °ซ เป็นเวลานานต่างๆ กัน โดยการใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	84
4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างๆ กัน	85

รูป	หน้า
4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่สูญหายของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิค่าต่างๆ โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	86
4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่สูญหายของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1200 °ซ และ 1250 °ซ ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่ โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแช่นานต่างกัน	86
4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่สูญหายของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1200 °ซ และ 1250 °ซ โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างกัน	87
4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิค่าต่างๆ โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	88
4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1200 °ซ และ 1250 °ซ ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่ โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแช่ที่ต่างกัน	88
4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1200 °ซ และ 1250 °ซ โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างกัน	89
4.50 แสดงภาพถ่ายของผิวที่แตกหักของเซรามิก PMN ที่ผ่านการซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ระยะเวลาเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	90
4.51 แสดงภาพถ่ายของผิวที่แตกหักของเซรามิก PMN ที่ผ่านการซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1225 °ซ โดยใช้ระยะเวลาเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ที่ใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างๆ	91
4.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PMN ที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ร้อยละ 94.75 กับอุณหภูมิ ณ ความถี่ต่างๆ	92

รูป	หน้า
4.53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของเซรามิก PMN ที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ร้อยละ 94.75 กับอุณหภูมิ ณ ความถี่ต่างๆ	93
4.54 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง CPMN ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ด้วย อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยมีระยะเวลาเผาแช่นาน 4 ชั่วโมง ที่ใช้อัตราการขึ้น/ลงของ อุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	96
4.55 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง CPMN ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ด้วย อุณหภูมิ 900 °ซ โดยมีระยะเวลาเผาแช่นานต่างกัน ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของ อุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	97
4.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟส CPMN ที่ได้กับอุณหภูมิเผาแคลไซน์ที่ใช้ โดยมีระยะเวลาในการเผาแช่นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	98
4.57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟส CPMN ที่ได้กับระยะเวลาที่ใช้เมื่อเผา แคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 900 °ซ ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	98
4.58 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง CPMN ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 900 °ซ โดยใช้เวลาเผาแช่นาน 6 ชั่วโมง ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	99
4.59 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผง CPMN	100
4.60 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วย อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	102
4.61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟส PMN ที่ได้กับอุณหภูมิซินเตอร์ที่ใช้ของ เซรามิกที่เผาด้วยการใช้ระยะเวลาเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ที่อัตราการขึ้น/ลงของ อุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	103
4.62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟส PMN ที่ได้กับระยะเวลาที่ใช้ในการ เผาแช่ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1225 °ซ ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	103

รูป	หน้า
4.63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟส PMN ที่ได้จากอัตราการขึ้น/ลงของ อุณหภูมิที่ใช้ของเซรามิกที่เผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1225 °ซ โดยมีระยะเวลาเผาแ ช่นาน 2 และ 4 ชั่วโมง	104
4.64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหดตัวเชิงเส้นและเชิงปริมาตรของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ระยะเวลาเผาแ ช่นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	106
4.65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหดตัวเชิงเส้น และเชิงปริมาตร ของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1225 °ซ โดยใช้ระยะเวลาใน การเผาแ ช่นานต่างกัน ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	106
4.66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหดตัวเชิงปริมาตรของเซรามิก PMN ที่ผ่าน การเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1225 °ซ เป็นระยะเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง ที่ใช้ อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างกัน	107
4.67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่สูญหายของเซรามิก PMN ที่ผ่าน การเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแ ช่นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	108
4.68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่สูญหายของเซรามิก PMN ที่ผ่าน การเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1225 °ซ โดยใช้ระยะเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการ ขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	108
4.69 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่สูญหายของเซรามิก PMN ที่ผ่าน การเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1225 °ซ โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแ ช่นาน 2 และ 4 ชั่วโมง ที่ อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างกัน	109
4.70 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผา ซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ระยะเวลาเผาแ ช่นาน 2 ชั่วโมง ที่ อัตราการขึ้น/ลง ของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที่	110

รูป	หน้า
4.71 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผา ซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1225 °ซ โดยใช้ระยะเวลาเผาแช่นานต่างกัน ที่อัตราการขึ้น/ลง ของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที	110
4.72 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเซรามิก PMN ที่ผ่านการเผา ซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1225 °ซ โดยใช้ระยะเวลาเผาแช่นาน 2 และ 4 ชั่วโมง ที่อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างกัน	111
4.73 แสดงภาพถ่ายของผิวที่แตกหักของเซรามิก PMN ที่ผ่านการซินเตอร์ด้วย อุณหภูมิ 1225 °ซ โดยใช้ระยะเวลาเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงต่างกัน	112
4.74 แสดงภาพถ่ายของผิวที่แตกหักของเซรามิก PMN เมื่อผ่านการซินเตอร์โดยใช้ ระยะเวลาเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน	113
4.75 แสดงภาพถ่ายของผิวที่แตกหักของเซรามิก PMN ที่ผ่านการซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1225 °ซ ที่ใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °ซ/นาที โดยมีระยะเวลาเผาแช่นานต่างๆ กัน	114
4.76 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PMN ที่มีความ หนาแน่นสัมพัทธ์ร้อยละ 94.16 กับอุณหภูมิ ณ ความถี่ต่างๆ กัน	116
4.77 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของ เซรามิก PMN ที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ร้อยละ 94.75 กับอุณหภูมิ ณ ความถี่ต่างๆ กัน	116

อักษรย่อและสัญลักษณ์

PM	เลดแมงनीเซียมออกไซด์
PN	เลดเมตาไนโอเบต
PMN	เลดแมงनीเซียมไนโอเบต
T_c	อุณหภูมิคูรี
ϵ_r	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์
χ	ค่าซึมซาบทางไฟฟ้า
ABO_3	เพอร์รอฟสไกต์
MPB	มอร์โฟโทรบิกเฟสไบวเดรี
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
PVA	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
DTA	ดิฟเฟอเรนเชียล เทอร์มอล อานาไลซิส
XRD	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
T_m	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์
t_s	ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาแซ่
r_1/r_2	อัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา
d	ค่า d-spacing หรือระยะห่างระหว่างคู่ระนาบอะตอม
λ	ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากเป้าทองแดง
θ	มุมของ Bragg
I_p	ความเข้มสูงสุดของพีคของรังสีเอกซ์ของเฟสหลัก
I_r	ความเข้มสูงสุดของพีคของรังสีเอกซ์ของเฟสปลอมปน
ρ	ความหนาแน่น
d	ความหนา
V	ปริมาตร
W	น้ำหนัก
$\tan\delta$	ค่าตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กตริก
A	พื้นที่ผิวไฟฟ้าบนผิวสารไดอิเล็กตริก