

## สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
ขอบเขตงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ระบบและโครงสร้างผลึก (Crystal System and Crystal Structure).....	4
การจัดกลุ่มแลตทิซ (The Arrangement of lattice).....	9
สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric Properties).....	11
สมบัติไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Properties).....	14
สมบัติไฟฟ้าของเซรามิก (Electrical Properties).....	16
โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite Structure).....	19
การบดย่อย (Milling).....	20
การซินเตอร์เซรามิก (Sintering).....	21
การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD).....	28
การวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง Differential thermal analysis (DTA)....	33
การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA).....	37
การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC).....	38
การหาค่าความหนาแน่น (Density).....	44
ค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของสารตัวอย่าง (Percentage Linear Shrinkage)	45
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	57
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	57
อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร.....	57
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	57
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	58
วิธีการทดลอง.....	58
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	61
ผลการตรวจสอบผงผลึกเลดสเตอร์อนเซียมไททานเนตที่มีอนุภาคที่มีการเคลือบ ต่างๆ.....	61
ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อน (DTA) และการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) .....	61
ผลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์.....	64
ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	71
ผลการตรวจสอบเซรามิกเลดสเตอร์อนเซียมไททานเนตที่มีอนุภาคชนิดอื่น ต่างๆ.....	76
ผลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD).....	76
ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด.....	82
ผลการคำนวณหาค่าความหนาแน่นและค่าความหดตัว.....	82
ผลที่ได้จากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก.....	89
ผลการตรวจสอบผงผลึกเลดสเตอร์อนเซียมไททานเนตที่มีปริมาณตะกั่วส่วนเกิน ต่างๆ .....	93

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ผลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD).....	92
ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	98
ผลการตรวจสอบเซรามิกเคลือบสตรอนเทียมไททาเนตที่มีปริมาณตะกั่วส่วนเกินต่างๆ.....	104
ผลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	102
ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	108
ผลการคำนวณหาค่าความหนาแน่นและค่าความหดตัว.....	108
ผลที่ได้จากการวัดค่าคงที่ได้อิเล็กทริก.....	117
ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเครื่องมือ DSC.....	118
5 บทสรุป.....	122
สรุปผลการวิจัย.....	122
ข้อเสนอแนะ.....	125
บรรณานุกรม.....	126
ประวัติผู้วิจัย.....	132

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 การจัดกลุ่มแลตทิซ .....	9
2 กลไกการซินเตอร์.....	26
3 ตัวอย่างการใช้ DTA ในการทำงานต่างๆ.....	36
4 ร้อยละเพอร์ออฟสโทด์ อัตราส่วน $c/a$ ปริมาตรของหน่วยเซลล์ ขนาดอนุภาค เฉลี่ยของผงผลึก PST25 PST50 และ PST75 .....	75
5 ขนาดเกรนเฉลี่ย ค่าความหนาแน่น ค่าความหดตัว และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ เซรามิก PST25 PST50 และ PST75 .....	92
6 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ $a$ $c$ และอัตราส่วน $c/a$ ของผงผลึก PST25 PST50 และ PST75 .....	102
7 ร้อยละเพอร์ออฟสโทด์ ปริมาตรของหน่วยเซลล์ และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ ผงผลึก PST25 PST50 และ PST75 .....	103
8 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ $a$ $c$ และอัตราส่วน $c/a$ ของเซรามิก PST25 PST50 และ PST75.....	115
9 ขนาดเกรนเฉลี่ย ค่าความหนาแน่น และอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสของเซรามิก PST25 PST50 และ PST75.....	116

## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 เซลล์หน่วยแบบต่างๆ .....	4
2 ค่าคงตัวแลตทิซของเซลล์หน่วย .....	5
3 ระบบคิวบิก .....	6
4 ระบบออร์โธโรมบิก .....	6
5 ระบบผลึกแบบเทตระโกนอล.....	7
6 ระบบผลึกแบบโมโนคลินิก.....	7
7 ระบบผลึกแบบรอมโบอีดรอล.....	8
8 ระบบผลึกแบบไตรคลินิก.....	8
9 ระบบผลึกแบบเฮกซาโกนอล.....	9
10 ความต่างเฟสระหว่างกระแสลับ ( $I$ ) และศักย์ไฟฟ้า ( $V$ ) ของวัสดุ ไดอิเล็กทริก ( $\kappa$ ) กรณีไม่มีการสูญเสียพลังงาน ( $\chi$ ) กรณีมีการสูญเสีย พลังงาน.....	13
11 วงรอบฮิสเทอรีซิสระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้าในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริก.....	13
12 แผนภาพแสดงการแบ่งกลุ่มพีโซอิเล็กทริกและกลุ่มย่อย.....	15
13 ปฏิกิริยาการแผ่ไพโซอิเล็กทริกในวัสดุ ( $\kappa$ ) แบบตรง ( $\chi$ ) แบบผกผัน.....	16
14 ตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนาน (parallel-plate capacitor) แบบธรรมดา.....	17
15 ตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนาน (parallel-plate capacitors) 2 ตัว ที่ถูกให้ความ ต่างศักย์เหมือนกัน .....	18
16 โครงสร้างเพอร์รอสไกต์ .....	20
17 ลักษณะการบิดแบบเลือนหล่น (cascading).....	21
18 พลังงานขับเคลื่อนสำหรับการซินเตอร์.....	22
19 กลไกที่มีผลต่อการซินเตอร์ของอนุภาคผลึก.....	25
20 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขณะซินเตอร์ .....	27
21 ภาคตัดขวาง (cross section) ของหลอดรังสีเอกซ์.....	28

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
22	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ก) การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ข) ทางเดินรังสีเอกซ์.....	29
23	การเกิดสเปกตรัมรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ.....	30
24	การเกิดรังสีเอกซ์จากการถูกหน่วง.....	32
25	วงจรของเครื่อง DTA.....	33
26	ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อกราฟ.....	34
27	ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของตัวอย่างต่อกราฟ.....	35
28	กราฟแสดง DTA , TG และ DTG ของดิน kaolin.....	36
29	กราฟแสดง DTA , TG และ DTG ของดิน bentonite.....	37
30	เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย TGA.....	38
31	Heat Flux DSC.....	39
32	Tzero Technology.....	41
33	Thermal network model.....	42
34	ลักษณะการเกิด Baseline.....	43
35	(ก) แลตทิซพารามิเตอร์ (ข) ปริมาตรของหน่วยเซลล์ของผงผลึก $Pb_{1-x}Sr_xTiO_3$ ที่ x ต่างๆ.....	46
36	แลตทิซพารามิเตอร์ของผงผลึก (ก) $Pb_{0.85}Sr_{0.15}TiO_3$ (ข) $Pb_{0.80}Sr_{0.20}TiO_3$ ที่ อุณหภูมิต่างๆ.....	47
37	แลตทิซพารามิเตอร์ของผงผลึก (ก) $Pb_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ (ข) $Pb_{0.1}Sr_{0.9}TiO_3$ และ (ค) $SrTiO_3$ ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	47
38	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ $Pb_{1-x}Sr_xTiO_3$ .....	48
39	ค่าแลตทิซพารามิเตอร์และอัตราส่วน $c/a$ ที่ได้จากการทดลองของ Jain, et al กับค่าที่ได้จากงานวิจัยของ Kang, et al .....	49
40	โครงสร้างจุลภาคของเซรามิกเลดสตรอนเชียมไททานตที่มีปริมาณสตรอนเชียม ต่างๆ.....	49

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
51	การจัดเรียงชิ้นงานของเลดสเตอร์อนเซียมไททาเนตที่อัดขึ้นรูปแล้วในถ้วย อะลูมินาที่มีฝาปิด.....	59
52	ขั้นตอนการเตรียมเซรามิกเลดสเตอร์อนเซียมไททาเนต.....	60
53	กราฟการวิเคราะห์ทางความร้อน (DTA) และการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) ของผงผลึก PST25.....	61
54	กราฟการวิเคราะห์ทางความร้อน (DTA) และการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) ของ ผงผลึก PST50.....	62
55	กราฟการวิเคราะห์ทางความร้อน (DTA) และการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) ของ ผงผลึก PST75.....	63
56	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PST25 ที่มีอุณหภูมิในการ แคลไซน์ต่างๆ: (* PbO), ( $\nabla$ SrCO <sub>3</sub> ), ( $\square$ TiO <sub>2</sub> ) และ (o TiO).....	66
57	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PST50 ที่มีอุณหภูมิในการ แคลไซน์ต่างๆ: (* PbO), ( $\nabla$ SrCO <sub>3</sub> ), ( $\square$ TiO <sub>2</sub> ) และ (o TiO).....	67
58	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PST75 ที่มีอุณหภูมิในการ แคลไซน์ต่างๆ: (* PbO), ( $\nabla$ SrCO <sub>3</sub> ), ( $\square$ TiO <sub>2</sub> ) และ (o TiO).....	68
59	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PST75 ใช้เวลาในการแช่ 2 - 6 ชั่วโมง: (* PbO).....	69
60	แลตทิซพารามิเตอร์ของผงผลึก PST25 ที่มีอุณหภูมิแคลไซน์ต่างๆ.....	69
61	แลตทิซพารามิเตอร์ของผงผลึก PST50 ที่มีอุณหภูมิแคลไซน์ต่างๆ.....	70
62	แลตทิซพารามิเตอร์ของผงผลึก PST75 ที่มีอุณหภูมิแคลไซน์ต่างๆ.....	70
63	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของผงผลึก PST25 ที่อุณหภูมิแคลไซน์ต่างๆ: (ก) 600 °C (ข) 800 °C (ค) 850 °C (ง) 900 °C (จ) 950 °C (ฉ) 1000 °C (ช) 1100 °C.....	72

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
64	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของผงผลึก PST50 ที่อุณหภูมิแคลไซต์ันต่างๆ: (ก) 600 °C (ข) 800 °C (ค) 850 °C (ง) 900 °C (จ) 950 °C (ฉ) 1000 °C (ช) 1100 °C.....	73
65	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของผงผลึก PST75 ที่อุณหภูมิแคลไซต์ันต่างๆ : (ก) 600 °C (ข) 800 °C (ค) 850 °C (ง) 900 °C (จ) 950 °C (ฉ) 1000 °C (ช) 1100 °C.....	74
66	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PST25 ที่มีอุณหภูมิใน การซินเตอร์ต่างๆ .....	77
67	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PST50 ที่มีอุณหภูมิใน การซินเตอร์ต่างๆ.....	78
68	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PST75 ที่มีอุณหภูมิใน การซินเตอร์ต่างๆ.....	79
69	แลตทิซพารามิเตอร์ของเซรามิก PST25 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	80
70	แลตทิซพารามิเตอร์ของเซรามิก PST50 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	80
71	แลตทิซพารามิเตอร์ของเซรามิก PST75 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	81
72	เปรียบเทียบอัตราส่วน $c/a$ ของเซรามิก PST25 และ PST50.....	81
73	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้า (ข) 1050 °C (ง) 1100 °C (ฉ) 1150 °C (ช) 1200 °C (ญ) 1250 °C และบริเวณภาคตัดขวาง (ก) 1050 °C (ค) 1100 °C (จ) 1150 °C (ช) 1200 °C (ฉ) 1250 °C ของเซรามิก PST25 ที่ อุณหภูมิซินเตอร์ต่าง ๆ.....	83
74	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้า (ข) 1050 °C (ง) 1100 °C (ฉ) 1150 °C (ช) 1200 °C (ญ) 1250 °C และบริเวณภาคตัดขวาง (ก) 1050 °C (ค) 1100 °C (จ) 1150 °C (ช) 1200 °C (ฉ) 1250 °C ของเซรามิก PST50 ที่ อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ .....	85

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
75	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้า (ข) 1050 °C (ง) 1100 °C (ฉ) 1150 °C (ช) 1200 °C (ญ) 1250 °C และบริเวณภาคตัดขวาง (ก) 1050 °C (ค) 1100 °C (จ) 1150 °C (ข) 1200 °C (ฉ) 1250 °C ของเซรามิก PST75 ที่อุณหภูมิ ซินเตอร์ต่างๆ .....	87
76	ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของเซรามิก PST25 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	90
77	ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PST25 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	91
78	ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของเซรามิก PST50 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	91
79	ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PST50 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	92
80	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PST25 ที่มีปริมาณตะกั่ว ส่วนเกินต่างๆ: (*) PbO และ (O) PbO <sub>2</sub> .....	95
81	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PST50 ที่มีปริมาณตะกั่ว ส่วนเกินต่างๆ: (*) PbO และ (O) PbO <sub>2</sub> .....	96
82	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PST75 ที่มีปริมาณตะกั่ว ส่วนเกินต่างๆ: (*) PbO และ (O) PbO <sub>2</sub> .....	97
83	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก PST25 ที่มี ปริมาณตะกั่วส่วนเกินต่างๆ: (ก) 0 wt.%, (ข) 1 wt.%, (ค) 3 wt.%, (ง) 5 wt.%, (จ) 10 wt.% .....	99
84	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก PST50 ที่มี ปริมาณตะกั่วส่วนเกินต่างๆ: (ก) 0 wt.%, (ข) 1 wt.%, (ค) 3 wt.%, (ง) 5 wt.%, (จ) 10 wt.%.....	100
85	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก PST75 ที่มี ปริมาณตะกั่วส่วนเกินต่างๆ: (ก) 0 wt.%, (ข) 1 wt.%, (ค) 3 wt.%, (ง) 5 wt.%, (จ) 10 wt.%.....	101
86	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PST25 ที่มีปริมาณตะกั่ว ส่วนเกินต่างๆ.....	105

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
87 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PST50 ที่มีปริมาณตะกั่ว ส่วนเกินต่างๆ .....	106
88 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PST75 ที่มีปริมาณตะกั่ว ส่วนเกินต่างๆ .....	107
89 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้า (ข) 0 wt.%, (ง) 1 wt.%, (ฉ) 3 wt.%, (ช) 5 wt.%, (ญ) 10 wt.% และบริเวณภาคตัดขวาง (ก) 0 wt.%, (ค) 1 wt.%, (จ) 3 wt.%, (ข) 5 wt.%, (ฉ) 10 wt.% ของเซรามิกPST25.....	109
90 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้า (ข) 0 wt.%, (ง) 1 wt.%, (ฉ) 3 wt.%, (ช) 5 wt.%, (ญ) 10 wt.% และบริเวณภาคตัดขวาง (ก) 0 wt.%, (ค) 1 wt.%, (จ) 3 wt.%, (ข) 5 wt.%, (ฉ) 10 wt.% ของเซรามิก PST50.....	111
91 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้า (ข) 0 wt.%, (ง) 1 wt.%, (ฉ) 3 wt.%, (ช) 5 wt.%, (ญ) 10 wt.% และบริเวณภาคตัดขวาง (ก) 0 wt.%, (ค) 1 wt.%, (จ) 3 wt.%, (ข) 5 wt.%, (ฉ) 10 wt.% ของเซรามิก PST75.....	113
92 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PST25 ที่มีปริมาณตะกั่วส่วนเกินต่างๆ.....	119
93 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PST25 ที่มีปริมาณตะกั่วต่างๆ.....	119
94 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PST50 ที่มีปริมาณตะกั่วส่วนเกินต่างๆ.....	120
95 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิกPST50 ที่มีปริมาณตะกั่วต่างๆ .....	120
96 กราฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของเซรามิก PST25 ที่มีปริมาณตะกั่วส่วนเกินต่างๆ.....	121
97 กราฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของเซรามิก PST50 ที่มีปริมาณตะกั่วส่วนเกินต่างๆ .....	121