สารบัญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ก
บทคัดย่อภาษาไทย		ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ค
สารบัญ		ง
สารบัญตาราง		ฉ
สารบัญรูป		ช
บทที่ 1 บทนำ		
1.1	ที่มาและความสำคัญ	1
1.2	วัตถุประสงค์	2
1.3	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4	ขอบเขตงานวิจัย	3
1.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง		
2.1	สมบัติพิโซอิเล็กทริก (piezoelectric property)	10
2.2	เฟร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric)	11
2.3	แอนติเฟร์โรอิเล็กทริก (antiferroelectric)	15
2.4	พาราอิเล็กทริก (paraelectric)	15
2.5	เพอรอพสไกด์เฟร์โรอิเล็กทริก (perovskite ferroelectric)	16
2.6	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)	17
2.7	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer)	19
2.8	การหาความหนาแน่น (density)	23
2.9	เครื่อง Differential Thermal Analyzer (DTA)	24
2.10	เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA)	27
2.11	ค่าความหดตัว (shrinkage) ของสารตัวอย่าง	30
2.12	การบดย่อยด้วยลูกบอล (ball milling)	30
2.13	การเตรียมผงจากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	31

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
2.14	การซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง	32
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง		
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	37
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร	37
3.3	วิธีการทดลอง	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง		
4.1	ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential thermal analysis (DTA) และ Thermogravimatric analysis (TGA) ของผงผสมของสารตั้งต้น	42
4.2	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer) ของผงผลึก $(Pb_{1-x}Ba_x)TiO_3$	42
4.3	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ของผงผลึก $(Pb_{1-x}Ba_x)TiO_3$	50
4.4	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer) ของเซรามิก $(Pb_{1-x}Ba_x)TiO_3$	56
4.5	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ของเซรามิก $(Pb_{1-x}Ba_x)TiO_3$	60
4.6	ผลการหาค่าความหดตัวเชิงเส้นและความหนาแน่น	61
4.7	ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง		
5.1	สรุปผลการตรวจสอบผงผลึกของสารตั้งต้นที่ผสมกัน	64
5.1	สรุปผลการตรวจสอบผงผลึกเลดแบเรียมไททาเนตที่เตรียมได้	64
5.2	สรุปผลการตรวจสอบเซรามิกเลดแบเรียมไททาเนตที่เตรียมได้	65
บรรณานุกรม		66

สารบัญตาราง

		หน้า
ตาราง 2.1	ตัวอย่างการใช้ DTA ในการงานต่าง ๆ	27
ตาราง 4.1	แสดง lattice parameter *c* และ *a*, อัตราส่วน *c/a* ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และ ปริมาตรหน่วยเซลของผงผลึก $(Pb_{1-x}Ba_x)TiO_3$ ที่อุณหภูมิ และปริมาณแบเรียมไอออนต่างกัน	51
ตาราง 4.2	แสดง lattice parameter *c* และ *a*, อัตราส่วน *c/a*, ขนาดของเกรนเฉลี่ย ปริมาตรหน่วยเซล, ความหนาแน่น, ความหดตัว, ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ของเซรามิก $(Pb_{1-x}Ba_x)TiO_3$ ที่อุณหภูมิต่างและปริมาณแบเรียมไอออนต่างกัน	59

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	XRD patterns ของเลดไททาเนตโดยเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	5
รูปที่ 1.2	XRD patterns ของผงผลึก $(Pb_{0.5}Ba_{0.5})TiO_3$ โดยอัตราส่วนโมลของน้ำต่อไททาเนียมไอโซโปรพอกไซด์เทากับ 17 ซึ่งแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	6
รูปที่ 1.3	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก $(Pb_{0.5}Ba_{0.5})TiO_3$ ที่เตรียมโดยใช้ปริมาณน้ำต่างกันและเผาแคลไซน์ที่ 550 องศาเซลเซียส	7
รูปที่ 1.4	XRD patterns ของ $Ba_{1-x}Pb_xTiO_3$ เมื่อปริมาณตะกั่วต่างกัน	8
รูปที่ 1.5	(a) พารามิเตอร์ของเซรามิก $(Ba_{1-x}Pb_x)TiO_3$ เมื่อปริมาณตะกั่วต่างกัน (b) ปริมาตรเซลของเซรามิก $(Ba_{1-x}Pb_x)TiO_3$ เมื่อปริมาณตะกั่วต่างกัน	8
รูปที่ 1.6	XRD patterns ของผงผลึกเลดไททาเนตที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที	9
รูปที่ 1.7	รูปถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึกเลดไททาเนตที่เผาแคลไซน์ที่ 550องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที	9
รูปที่ 2.1	ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกในวัสดุ (a) แบบตรง (b) แบบผันกลับ	10
รูปที่ 2.2	แผนภาพการแบ่งกลุ่มพิโซอิเล็กทริกและกลุ่มย่อย	12
รูปที่ 2.3	ความต่างเฟสระหว่างกระแสสลับ (*I*) และศักย์ไฟฟ้า (*V*) ของวัสดุไดอิเล็กทริก (a) กรณีไม่มีการสูญเสียพลังงาน (b) กรณีมีการสูญเสียพลังงาน	14
รูปที่ 2.4	วงรอบฮิสเทอรีซิสระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้า ในสารเฟร์โรอิเล็กทริก	15
รูปที่ 2.5	วงรอบฮิสเทอรีซิสระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้า ใน (a) สารแอนติเฟร์โรอิเล็กทริก (b) สารพาราอิเล็กทริก	16
รูปที่ 2.6	หน่วยเซลล์แบบเพอรอฟสไกต์ (ABO_3) ของแบเรียมไททาเนต	17
รูปที่ 2.7	แบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์	21
รูปที่ 2.8	แสดงวงจรของเครื่อง DTA	25
รูปที่ 2.9	แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อกราฟ	25
รูปที่ 2.10	แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของตัวอย่างต่อกราฟ	26

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.11	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของแคลเซียมออกซาเลต	28
รูปที่ 2.12	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของแคลเซียมคาร์บอเนตในบรรยากาศต่าง ๆ	30
รูปที่ 2.13	(a) ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอล (ball-milling), (b) แสดงลักษณะพฤติกรรมการบดย่อยแบบเลื่อนหลั่นกันไป (cascading)	33
รูปที่ 2.14	แสดงลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) ระหว่าง (a) พวกผลึกเชิงเดี่ยว และ (b) อนุภาคผงที่ผสมกันอยู่	34
รูปที่ 2.15	แสดงพฤติกรรมการซินเตอร์แบบสถานะของแข็งทั่วไปในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา	35
รูปที่ 2.16	แสดงพัฒนาการของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง (a) อนุภาคผงยึดกันอยู่แบบหลวม ๆ หลังการอัดขึ้นรูป (b) การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น (c) การซินเตอร์ช่วงกลาง และ (c) การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย	36
รูปที่ 3.1	แผนภูมิขั้นตอนการเตรียมเซรามิกเลดแบรียมไททาเนตบริสุทธิ์	40
รูปที่ 3.2	การจัดเรียงชิ้นงานเลดแบเรียมไททาเนตที่ขึ้นรูปแล้วในถ้วยอลูมินาที่มีฝาปิด	41
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงผล DTA และ TGA ของสารตั้งต้น PbO, $BaCO_3$ และ TiO_2 ที่ผสมกัน โดยอัตราของ PbO: $BaCO_3$ คือ 0.975: 0.025	43
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงผล DTA และ TGA ของสารตั้งต้น PbO, $BaCO_3$ และ TiO_2 ที่ผสมกัน โดยอัตราของ PbO: $BaCO_3$ คือ 0.90: 0.10	43
รูปที่ 4.3	XRD pattern ของผงผลึก $(Pb_{0.975}Ba_{0.025})TiO_3$ เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (*) TiO, (+) TiO_2, (χ) $BaCO_3$, (∇) PbO_2 และ (Φ) PbO.	44
รูปที่ 4.4	XRD pattern ของผงผลึก $(Pb_{0.950}Ba_{0.050})TiO_3$ เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (*) TiO, (+) TiO_2, (χ) $BaCO_3$, (∇) PbO_2 และ (Φ) PbO.	44

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5 XRD pattern ของผงผลึก $(Pb_{0.925}Ba_{0.075})TiO_3$ เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (*) TiO, (+) TiO_2, (χ) $BaCO_3$, (∇) PbO_2 และ (Φ) PbO. 45

รูปที่ 4.6 XRD pattern ของผงผลึก $(Pb_{0.90}Ba_{0.10})TiO_3$ เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (*) TiO, (+) TiO_2, (χ) $BaCO_3$, (∇) PbO_2 และ (Φ) PbO. 45

รูปที่ 4.7 แสดงแลตทิซพารามิเตอร์ *c* และ *a* ของผงผลึก $(Pb_{0.975}Ba_{0.025})TiO_3$ ที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ต่าง ๆ 47

รูปที่ 4.8 แสดงแลตทิซพารามิเตอร์ *c* และ *a* ของผงผลึก $(Pb_{0.950}Ba_{0.050})TiO_3$ ที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ต่าง ๆ 47

รูปที่ 4.9 แสดงแลตทิซพารามิเตอร์ *c* และ *a* ของผงผลึก $(Pb_{0.925}Ba_{0.075})TiO_3$ ที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ต่าง ๆ 48

รูปที่ 4.10 แสดงแลตทิซพารามิเตอร์ *c* และ *a* ของผงผลึก $(Pb_{0.90}Ba_{0.10})TiO_3$ ที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ต่าง ๆ 48

รูปที่ 4.11 อัตราส่วน *c/a* ของผงผลึกที่อุณหภูมิซินเตอร์และปริมาณแบเรียมไอออนต่างๆ; (■) $(Pb_{0.975}Ba_{0.025})TiO_3$, (●) $(Pb_{0.950}Ba_{0.050})TiO_3$, (▼) $(Pb_{0.925}Ba_{0.075})TiO_3$ และ (★) $(Pb_{0.90}Ba_{0.10})TiO_3$ 49

รูปที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์เททระโกนอลเพอรอพสไกด์เฟสของผงผลึกที่อุณหภูมิและปริมาณแบเรียมไอออนต่างๆ; (■) $(Pb_{0.975}Ba_{0.025})TiO_3$, (●) $(Pb_{0.950}Ba_{0.050})TiO_3$, (▼) $(Pb_{0.925}Ba_{0.075})TiO_3$ และ (★) $(Pb_{0.90}Ba_{0.10})TiO_3$ 49

รูปที่ 4.13 รูปถ่ายจากกล้อง SEM ของผงผลึก $(Pb_{0.975}Ba_{0.025})TiO_3$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (a) 600 °C, (b) 700 °C, (c) 750 °C, (d) 800 °C, (e) 850 °C และ (f) 900 °C 52

รูปที่ 4.14 รูปถ่ายจากกล้อง SEM ของผงผลึก $(Pb_{0.950}Ba_{0.050})TiO_3$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (a) 600 °C, (b) 700 °C, (c) 750 °C, (d) 800 °C, (e) 850 °C และ (f) 900 °C 53

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.15 รูปถ่ายจากกล้อง SEM ของผงผลึก $(Pb_{0.925}Ba_{0.075})TiO_3$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (a) 600 °C, (b) 700 °C, (c) 750 °C, (d) 800 °C, (e) 850 °C และ (f) 900 °C 54

รูปที่ 4.16 รูปถ่ายจากกล้อง SEM ของผงผลึก $(Pb_{0.90}Ba_{0.10})TiO_3$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (a) 600 °C, (b) 700 °C, (c) 750 °C, (d) 800 °C, (e) 850 °C และ (f) 900 °C 55

รูปที่ 4.17 XRD pattern ของเซรามิก $(Pb_{0.975}Ba_{0.025})TiO_3$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 56

รูปที่ 4.18 XRD pattern ของเซรามิก $(Pb_{0.950}Ba_{0.050})TiO_3$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 57

รูปที่ 4.19 XRD pattern ของเซรามิก $(Pb_{0.925}Ba_{0.075})TiO_3$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 57

รูปที่ 4.20 XRD pattern ของเซรามิก $(Pb_{0.90}Ba_{0.10})TiO_3$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 58

รูปที่ 4.21 รูปถ่ายจากกล้อง SEM ของเซรามิก $(Pb_{0.975}Ba_{0.025})TiO_3$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (a) 1100 °C, (b) 1150 °C, (c) 1200 °C และ (d) 1225 °C 60

รูปที่ 4.22 รูปถ่ายจากกล้อง SEM ของเซรามิก $(Pb_{0.950}Ba_{0.050})TiO_3$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (a) 1100 °C, (b) 1150 °C, (c) 1200 °C และ (d) 1225 °C 61

รูปที่ 4.23 รูปถ่ายจากกล้อง SEM ของเซรามิก $(Pb_{0.925}Ba_{0.075})TiO_3$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (a) 1100 °C, (b) 1150 °C, (c) 1200 °C และ (d) 1225 °C 62

รูปที่ 4.24 รูปถ่ายจากกล้อง SEM ของเซรามิก $(Pb_{0.90}Ba_{0.10})TiO_3$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย (a) 1100 °C, (b) 1150 °C, (c) 1200 °C และ (d) 1225 °C 63