

สารบัญเรื่อง

บทที่		หน้า
	กิตติกรรมประกาศ	ก
	บทคัดย่อภาษาไทย	ข
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
	Executive Summary	ง
	สารบัญเรื่อง	จ
	สารบัญตาราง	ช
	สารบัญภาพ	ฎ
	คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ณ
1	บทนำ	1
	วัตถุประสงค์ของโครงการโครงการวิจัย	2
	ขอบเขตโครงการวิจัย	2
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
	2.1 สมบัติไดอิเล็กทริก	4
	2.2 สมบัติเชิงกลของเซรามิก	5
	2.3 เลดเซอร์โคเนตไททาเนต	9
	2.4 เซอร์โคเนียมออกไซด์	10
	2.5 แมกนีเซียมออกไซด์	11
	2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
3	วิธีการวิจัย	19
	3.1 สารเคมี	19
	3.2 อุปกรณ์	20
	3.3 กระบวนการเตรียมผงเลดเซอร์โคเนตไททาเนต	22
	3.4 กระบวนการเตรียมผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมสารเจือที่มีอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2	25
	3.5 กระบวนการเตรียมเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2	27
	3.6 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	31

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

บทที่		หน้า
	3.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$, ผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมสารเจือระดับนาโนของ MgO , ZrO_2 และ เซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมสารเจือระดับนาโนของ MgO , ZrO_2	33
	3.8 การตรวจสอบค่าความหนาแน่น และความหนาแน่นสัมพัทธ์	34
	3.9 การศึกษาค่าร้อยละการหดตัวหลังการเผา	36
	3.10 การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทาง ไดอิเล็กทริก	36
	3.11 การหาค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์	38
4	ผลการวิจัย และอภิปรายผลการวิจัย	40
	4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของผงผลึกเลดเซอร์โคเนตไททานेट	40
	4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกเลดเซอร์โคเนตไททานेट	43
	4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO	45
	4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO	46
	4.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2	48
	4.6 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2	49
	4.7 ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO	50
	4.8 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO	51
	4.9 ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2	53
	4.10 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2	54

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.11 ผลการศึกษาความหนาแน่นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO	57
4.12 ผลการศึกษาความหนาแน่นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2	58
4.13 ผลการศึกษาค่าร้อยละของการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO	60
4.14 ผลการศึกษาค่าร้อยละของการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2	61
4.15 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อน ทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับ นาโนของ MgO	63
4.16 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อน ทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับ นาโนของ ZrO_2	71
4.17 ผลการศึกษาค่าความแข็งแรงระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO	79
4.18 ผลการศึกษาค่าความแข็งแรงระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2	81
5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	84
5.1 สรุปผลการทดลอง	84
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารอ้างอิง	87
Output ที่ได้จากโครงการ	90
ภาคผนวก	91

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกบางชนิด	5
2.2	สมบัติเชิงกลของเซรามิกบางชนิด	6
4.1	ร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เพาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 500–900 °C	41
4.2	ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C	52
4.3	ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C	55
4.4	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C	57
4.5	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C	58
4.6	ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C	60
4.7	ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C	61
4.8	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.9	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ใน ปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 10 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	65
4.10	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ใน ปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	66
4.11	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ใน ปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 500 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	67
4.12	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ใน ปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง	68
4.13	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ใน ปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิห้อง	70
4.14	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ใน ปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	72
4.15	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ใน ปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 10 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.16	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ใน ปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	74
4.17	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ใน ปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 500 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	75
4.18	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ใน ปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง	76
4.19	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ใน ปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิห้อง	78
4.20	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อ เติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	80
4.21	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อ เติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	82

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ลำดับความแข็งของวัสดุตามสเกล Mohs	7
2.2	ลักษณะห้วกดและรอยกดแบบวิกเกอร์	8
2.3	ลักษณะห้วกดและรอยกดแบบนูน	9
2.4	เฟสไดอะแกรมของสารในระบบ PZT	10
2.5	ความหนาแน่นของเซรามิก PZT ที่มีความพรุนเทียบกับปริมาณ PMMA	12
2.6	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่มีความพรุนเทียบกับความถี่	13
2.7	ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่มีความพรุนเทียบกับความถี่	13
2.8	ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยหักของเซรามิก PZT ที่มีความพรุนต่างกันของ (ก) PZT/10PMMA, (ข) PZT/30PMMA และ (ค) PZT/50PMMA	14
2.9	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงผลึก PMS-PZT ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	15
2.10	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก PMS-PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	15
2.11	ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยหักของเซรามิก PMSZT2 ที่แปรค่าอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ (ก) 1100 °C, (ข) 1150 °C, (ค) 1200 °C, (ง) 1250 °C และ (จ) 1300 °C	16
2.12	ค่า K_p และ Q_m เทียบกับปริมาณการเติม PMS ของเซรามิก PMS-PZT	16
2.13	ค่า d_{33} เทียบกับปริมาณการเติม PMS ของเซรามิก PMS-PZT	17
2.14	ค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับปริมาณการเติม PMS ของเซรามิก PMS-PZT	17
2.15	(ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผง PZT บริสุทธิ์ ผง ZnO ในระดับนาโน และผง PZT/ZnO (ข) ภาพถ่าย SEM ของเซรามิก ZnO/PZT เมื่อเติม ZnO ระดับนาโนในปริมาณ 20 vol%	18
2.16	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของไดอิเล็กทริก ϵ เทียบกับปริมาณการเติม ZnO ระดับนาโนของเซรามิก ZnO/PZT คอมโพสิต (a) ที่ความถี่ 10^3 และ 10^6 Hz (25 °C) และ (b) ที่ -100 และ 10 °C (10^3 Hz)	18

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.1	เครื่องชั่งสารความละเอียด 0.0001 กรัม	22
3.2	แท่นหมุนพร้อมมอเตอร์สำหรับหมุนกระป๋อง เพื่อบดย่อยผสมสารแบบ Ball milling	22
3.3	เตาแผ่นให้ความร้อนแบบมีเครื่องคนสารด้วยแม่เหล็ก	23
3.4	เตาไฟฟ้าสำหรับเผาแคลไซน์และเผาซินเตอร์	23
3.5	แผนภาพการเผาแคลไซน์	23
3.6	แผนผังการเตรียมผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$	24
3.7	เครื่อง Ultrasonic Processor ที่ใช้ในการกระจายอนุภาคของสารเจือ MgO และ ZrO_2	26
3.8	แผนภาพขั้นตอนการเตรียมผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ผสมสารเจือระดับ นาโนของ MgO และ ZrO_2	26
3.9	แม่พิมพ์โลหะ	27
3.10	เครื่องอัดระบบไฮโดรลิก	27
3.11	การจัดเรียงชิ้นงานบนถาดอะลูมินา	27
3.12	แผนผังการเผาเพื่อกำจัด PVA	28
3.13	การจัดเรียงชิ้นงานในถาดอะลูมินาสำหรับการเผาซินเตอร์	28
3.14	แผนภาพการเผาซินเตอร์	29
3.15	เครื่องอัลตราโซนิก	29
3.16	เตาอบไฟฟ้า	29
3.17	แผนผังการเตรียมและตรวจสอบสมบัติของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่มีสารเจืออนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2	30
3.18	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากกระนาบของอะตอม	31
3.19	หลักการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิค XRD และตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์	32
3.20	เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น X'Pert บริษัท Philips ประเทศเนเธอร์แลนด์	32
3.21	เครื่อง Sputter coater รุ่น SC7620	33
3.22	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บริษัท LEO รุ่น 1455VP	34

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.23	เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม สำหรับหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน	35
3.24	จานหมุนสำหรับขัดสารตัวอย่าง	37
3.26	ดิจิตอลเวอร์เนียคาลิเปอร์	38
3.22	LCR meter รุ่น E 4980 A 20Hz–2 MHz	31
3.27	เครื่องวัดค่าความแข็งระดับจุลภาค	39
4.1	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ยังไม่เผาแคลไซน์และที่เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 500 – 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 °C/นาที่	40
4.2	ร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 500 – 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 °C/นาที่	41
4.3	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เทียบกับข้อมูลมาตรฐานในแฟ้มหมายเลข 33-0784	42
4.4	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ยังไม่ได้เผาแคลไซน์ และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 – 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	43
4.5	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์แล้ว เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร	45
4.6	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์แล้ว เติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร	46
4.7	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์แล้ว เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร	48

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.8	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์แล้ว เติมนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร	49
4.9	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	50
4.10	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมนุภาคระดับ นาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	51
4.11	ขนาดของเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	52
4.12	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	53
4.13	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	54
4.14	ขนาดของเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	55
4.15	ขนาดของเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	56
4.16	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	57

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.17	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	58
4.18	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	59
4.19	ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	60
4.20	ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	61
4.21	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	62
4.22	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	63
4.23	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 10 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	65
4.24	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	66

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.25	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 500 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	67
4.26	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง	68
4.27	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	69
4.28	ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	69
4.29	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	72
4.30	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 10 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	73
4.31	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	74

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.32	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 500 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	75
4.33	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง	76
4.34	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	77
4.35	ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	77
4.36	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	79
4.37	รูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของรอยกตระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	80
4.38	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	81
4.39	รูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของรอยกตระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	82

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.40	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO หรือ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C	83

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

$\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ คือ สารประกอบเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead zirconate titanate) ที่มีอัตราส่วนของ Zr:Ti เป็น 52:48

vol% คือ ร้อยละโดยปริมาตร

MgO คือ แมกนีเซียมออกไซด์

ZrO_2 คือ เซอร์โคเนียออกไซด์

$\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + (0-2) \text{ vol\% MgO nanoparticles}$ คือ สารประกอบเลดเซอร์โคเนตไททาเนตที่เติมสารเจือที่มีอนุภาคในระดับนาโนของแมกนีเซียมออกไซด์ ในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 2 โดยปริมาตร

$\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + (0-2) \text{ vol\% ZrO}_2 \text{ nanoparticles}$ คือ สารประกอบเลดเซอร์โคเนตไททาเนตที่เติมสารเจือที่มีอนุภาคในระดับนาโนของเซอร์โคเนียออกไซด์ ในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 2 โดยปริมาตร

ρ คือ ความหนาแน่น

ϵ_r หรือ K คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

$\tan \delta$ คือ ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก

H_v คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์