

สารบัญ

	หน้าที่
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ง
สารบัญ	จ
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญตาราง	ถ
Executive Summary	ธ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและทบทวนเอกสารทางวิชาการ	
2.1 บทนำ	6
2.2 ทฤษฎีและโมเดลโครงสร้าง	6
2.2.1 พื้นฐานความเป็นโพธิโซอิเล็กทริกในของแข็ง	6
2.2.2 ปรากฏการณ์โพธิโซอิเล็กทริกในเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก	8
2.2.3 โดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric domains)	11
2.2.4 การเปลี่ยนทิศทางของโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric domain switching)	13
2.2.5 โครงสร้างและสมบัติของสารประกอบโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต ($K_{1-x}Na_xNbO_3$)	17

	หน้า
2.3 กลุ่มวัสดุไพโรซีอิกทรูปลดสารตะกั่ว	19
2.4 ต้นทุนการผลิตและความเป็นพิษ	21
2.5 ผลของการเติมสารเจือ (dopant) เข้าไปในโครงสร้างของ KNN	22
2.5.1 การเติมสารเจือเพื่อปรับเปลี่ยนวัฏภาค (Phase diagram)	24
2.5.2 การเติมสารเจือเพื่อปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของการเผาผลาญ (Sintering behavior)	34
2.6 พฤติกรรมความล้าทางไฟฟ้า และ ความสามารถในการสลับเปลี่ยนทิศทางของ โดเมน (Electrical fatigue behavior and domain switchability)	37
2.7 สรุป	40
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	
3.1 บทนำ	41
3.2 การเตรียมตัวอย่างและสารเคมี	44
3.3 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทำการทดสอบ	51
3.3.1 การขัดชิ้นงานตัวอย่าง	52
3.3.2 การทำขั้วไฟฟ้า (Electroding)	53
3.3.3 การเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า (Poling)	53
3.4 การหาความหนาแน่น (bulk density)	55
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างและการตรวจสอบวัฏภาค	56
3.6 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	56
3.7 วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า	57
3.7.1 วิเคราะห์วงวนฮิสเทอรีซิสและวงวนปีกผีเสื้อ	58
3.7.2 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)	60
3.7.3 การหาค่าคงที่ไพโรซีอิกทรูป (d_{33})	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 บทนำ	62
4.2 ทดสอบหาอุณหภูมิเผาผลาญที่เหมาะสม	62

	หน้าที่
4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่เติมสารเจือ Ta ⁵⁺ ก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	69
4.3.1 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น (Bulk density)	69
4.3.2 ผลการทดสอบค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance: C _p) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant: ϵ_r) และค่าสูญเสีย ไดอิเล็กทริก (Dielectric loss: $\tan \sigma$)	70
4.3.3 การทดสอบวงวนฮีสเทอรีซิสที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสนามไฟฟ้า และความถี่	75
4.3.4 ผลการทดสอบค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric charge constant, d ₃₃)	77
4.4 ผลการทดสอบทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่เติมสารเจือ Ta ⁵⁺ หลังทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	79
4.4.1 ผลของการเติมสารเจือแทนทาลัม (Ta ⁵⁺) ที่มีต่อวงวนโพลาริเซชัน ฮีสเทอรีซิส (polarization hysteresis loop)	79
4.4.2 ค่าโพลาริเซชันคงค้าง (Remnant polarization, P _r) และ ค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง (Coercive field, E _c)	83
4.4.3 ผลการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)	89
4.4.4 ผลการทดสอบค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric charge constant, d ₃₃)	93
4.5 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ห้วงภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)	95
4.5.1 ผลการวิเคราะห์ห้วงภาค ในสารตัวอย่างก่อนการเหนี่ยวนำซ้ำ (Unpoled sample) ก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้า (Unfatigued) และสารตัวอย่างที่ทดสอบความล้าทางไฟฟ้าแล้ว (Fatigued sample)	95

	หน้าทึ่
4.5.2 ผลวิเคราะห์การเติมสารเจือแทนทาลัม (Ta^{5+}) ที่มีต่อ การเปลี่ยนทิศทางของโดเมน	102
4.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM)	106
4.6.1 ผลของการเติมสารเจือ Ta^{5+} ในสารตัวอย่างก่อนทดสอบ ความล้าทางไฟฟ้า (Poled / Unfatigued)	106
4.6.2 ผลของการเติมสารเจือ Ta^{5+} ในสารตัวอย่างที่ทดสอบ ความล้าทางไฟฟ้าแล้ว (Fatigued)	110
4.7 ผลการทดลองซ้ำ	117
4.8 สรุป	132
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุป	135
5.2 ข้อเสนอแนะ	137
เอกสารอ้างอิง	138
Output ที่ได้จากโครงการ	144
ภาคผนวก	

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้าที่
1.1 สัญลักษณ์ RoHs และตัวอย่างอุปกรณ์ที่ผ่านการรับรอง	2
1.2 แผนภูมิแสดงแนวโน้มการพัฒนาวัสดุในอนาคต	3
2.1 ความสัมพันธ์ของการแบ่งกลุ่มไพโซอิเล็กทริกและกลุ่มผลึก 32 กลุ่ม	7
2.2 โครงสร้างสารประกอบ (Na,K)NbO ₃ มีโครงสร้างเป็น Perovskites (ABO ₃)	7
2.3 ทิศทางของแรงที่กระทำต่อวัสดุไพโซอิเล็กทริก	9
2.4 ภาพโครงสร้างผลึกเทอร์โกนัลที่ไม่สมมาตร ของ PbTiO ₃ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี (a) การจัดเรียงตัวของข้อ P _s ขณะที่ไม่มีแรงกระทำ (b) P _i + ΔP ขณะที่มีการกระทำ	10
2.5 ภาพโครงสร้างผลึกเทอร์โกนัล ที่ไม่สมมาตร ของ PbTiO ₃ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี (a) ยูนิตเซลล์ขณะที่ไม่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอกกระทำ (b) ยูนิตเซลล์ขณะที่มีการเกิดความเครียด (strain, s) โดยการให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกกระทำ	11
2.6 (a) ภาพโครงสร้างโดเมนเทอร์โกนัลเฟร์โรอิเล็กทริก ของ PbTiO ₃ ที่ผนังโดเมน 180° และ 90° โดยใช้สารละลาย HF และ HCl ในการ etching ทำให้เห็นเส้นขนานบนเกรน (UCONN 2012) (b) ภาพวาดแสดง ผนังโดเมน 180° และ 90° ในวัสดุเฟร์โรอิเล็กทริก	12
2.7 (a) การให้สนามไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของแต่ละยูนิตเซลล์ ที่มีตามธรรมชาติใหม่ให้เป็นตามทิศทางของสนามไฟฟ้า (b) ผลรวมของโดเมนขนาดเล็ก (microscopic piezoelectricity) รวมเป็นโดเมนขนาดใหญ่ (macroscopic piezoelectricity) ภายในวัสดุไพโซอิเล็กทริกเซรามิก	14
2.8 ภาพแสดงวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส เส้นประคือ การจัดเรียงตัวโดเมน กระบวนการเริ่มแรกสถานการณ์จัดเรียงตัวเป็นไปตามลูกศรที่แสดงในภาพ	15
2.9 ลักษณะเป็นแบบวงวนรูปผีเสื้อ (butterfly hysteresis) แสดงความสัมพันธ์ของความเครียดกับสนามไฟฟ้า	17
2.10 แผนภูมิวิวัฒนาการของระบบ KNbO ₃ และ NaNbO ₃	18

รูปที่	หน้าที่
2.11 จำนวนรายงานการวิจัยเกี่ยวกับวัสดุไพโซอิเล็กทริกตลอดสารตะกั่วที่ได้รับการตีพิมพ์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 ถึงเดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 2008	20
2.12 ค่าสภาพยอมไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องโดยฟังก์ชันของอุณหภูมิคูรีของ PZT และวัสดุปลอดสารตะกั่ว	21
2.13 ค่าสัมประสิทธิ์ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องโดยฟังก์ชันของอุณหภูมิคูรีของ PZT และวัสดุปลอดสารตะกั่ว	21
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและระดับความเป็นพิษของธาตุที่น่าสนใจ	22
2.15 สารเจือที่มีความเป็นไปได้สำหรับตำแหน่งอะตอม A B และ oxygen ในโครงสร้างเพอรอฟสไกต์	23
2.16 ความเป็นโพลาไรเซชันในรูปแบบ cation ในหน่วย $\text{\AA}^3$	24
2.17 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปที่ 1000 kHz	26
2.18 วงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสที่ปริมาณสารเจือ CuO 0.4 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่ 50 Hz	26
2.19 แสดงความสัมพันธ์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ KNN เจือลิเทียม	27
2.20 เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (d_{33}) ที่ 25 °C	28
2.21 เปรียบเทียบ morphotropic phase boundary (MPB) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	28
2.22 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ของ KNN ที่เติมสารเจือ Li และ Ta	29
2.23 แสดงวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสผลการเติมแทนทาลัมและแอนติโมนี	30
2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ ของ (1-x)KNN-xLS ที่ความถี่ 10 kHz	31
2.25 สารประกอบ NKNS-LT _{x/y} เมื่อปริมาณของ Sb (y) และ LiTaO ₃ (x) ที่สอดคล้องกับค่า d_{33} สำหรับหาบริเวณที่มีวัฏภาคของอยู่ระหว่างออร์โธโรมบิกและเทตระโกนัล (PPT)	31
2.26 สมบัติไพโซอิเล็กทริกและค่าไดอิเล็กทริกที่เติม Ta ในอัตราส่วนต่างๆ	32
2.27 ลำโพงไพโซอิเล็กทริกแบบบางพิเศษ	32
2.28 สมบัติไดอิเล็กทริก (a) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (b) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ขึ้นกับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 1 MHz ของเซรามิกที่เผาผลาญที่ 1125°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง	33

รูปที่	หน้าที่
2.29 แสดงการวางตัวของโดเมนและทิศทางจัดเรียงตัวของขั้วภายใน	34
2.30 สภาพความล้าในฟิล์ม (PZT) ที่มี Pt เป็นขั้วไฟฟ้า	37
2.31 การเกิดความล้าทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง PZT ที่มี SrRuO_3 เป็นขั้วไฟฟ้าด้านล่าง และมี Pt เป็นขั้วไฟฟ้าด้านบน ที่ความถี่ต่าง ๆ	38
2.32 ค่าโพลาริเซชันคงค้างแบบสัมพัทธ์ ของวัสดุเซรามิก PZT ที่ความถี่ 10, 50 และ 100 Hz	38
2.33 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของเซรามิก PZT ก่อนและหลังทดสอบความล้า แสดงการเติมโตของรอยแตกกร้าว ที่ความถี่ (a) 10, (b) 50 และ (c) 100 Hz	39
2.34 การเปลี่ยนแปลงของ polarization ฮิสเทอรีซิส ของ KNN-LS เมื่อจำนวนรอบการให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น	40
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์สารด้วยวิธี Solid-state reaction	43
3.2 ขวดบดสารที่เติมสารตั้งต้น ปิดฝาพร้อมบด	45
3.3 (a) กรองสารประกอบที่สังเคราะห์ออกจากลูกบด (b) การต้มไล่สารละลายเอทานอล บนเครื่องคนผสม (stirrer) ที่อุณหภูมิ 180 °C	45
3.4 อบแห้งสารที่สังเคราะห์ได้ในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	46
3.5 (a) สารสังเคราะห์หลังอบแห้งที่จับกันเป็นก้อน (b) การบดย่อยให้เป็นผง	47
3.6 ผงสารสังเคราะห์บรรจุในภาชนะเผา (alumina crucible) สำหรับเผาให้ความร้อน (calcine) และเผาผนึก (sintering)	47
3.7 วิธีการเผาให้ความร้อน (calcine) ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ	48
3.8 วิธีการเผาผนึก (sintering) ที่อุณหภูมิ 1130°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ	48
3.9 (a) ถังยางสำหรับห่อหุ้มสารตัวอย่าง (b) การใส่สารตัวอย่างในถังยาง	49
3.10 (a) การดูดอากาศออกจากถังด้วยเครื่องสุญญากาศ (b) สารตัวอย่างในถังยาง หลังดูดอากาศ	50

รูปที่	หน้าที่
3.11 (a) ถูสารตัวอย่างในตะกร้าใส่ลงในเครื่อง (b) เครื่องอัดเท่ากันทุกทิศทาง (CIP)	50
3.12 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	51
3.13 ชิ้นงานตัวอย่างก่อนขัดและหลังขัดผิวหน้า	52
3.14 ลักษณะของชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้ว	52
3.15 เครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง	54
3.16 ชุดควบคุมอุณหภูมิ	54
3.17 (a) ชิ้นงานตัวอย่างที่เขียนสัญลักษณ์ (b) การต้มชิ้นงานตัวอย่างเพื่อไล่อากาศ	56
3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	57
3.19 (a) อ่างใส่ชิ้นงานตัวอย่าง และ (b) ชุดตรวจวัดค่าการขยายและหดตัว	59
3.20 (a) ชุดทดสอบวงวนฮีสเทอรีซิส และวงวนปีกผีเสื้อ (b) ลักษณะจอแสดงผลระหว่าง การทดสอบ ที่ห้องปฏิบัติการ กลุ่มวิจัย Smart material and intelligent system มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	59
3.21 การติดตั้งอุปกรณ์วัดสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวอย่าง	60
3.22 เครื่อง d_{33} Meter ที่อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	61
4.1 กราฟเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของสารตัวอย่างเจือ Ta^{5+} (a) $2\theta=20-70^\circ$ (b) กราฟ XRD อย่างละเอียด $2\theta=44-47^\circ$ และ $2\theta=55-58^\circ$	63
4.2 ภาพถ่าย SEM ของสาร (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.12$ เมื่อ x คือปริมาณ สารเจือ Ta^{5+} ที่อุณหภูมิเผาผนึก $1000^\circ C$	64
4.3 ภาพถ่าย SEM ของสารตัวอย่าง (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.12$ เมื่อ x คือปริมาณสารเจือ Ta^{5+} ที่อุณหภูมิเผาผนึก $1130^\circ C$	65
4.4 ภาพถ่าย SEM ของสารตัวอย่าง (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.12$ เมื่อ x คือปริมาณสารเจือ Ta^{5+} ที่อุณหภูมิเผาผนึก $1200^\circ C$	66
4.5 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของสารตัวอย่าง KNN-LST ที่อุณหภูมิ เผาผนึกต่างๆ	68

รูปที่	หน้า
4.6 ผลการทดสอบค่าคงที่โพธิ์ไอเล็กทริกของสารตัวอย่าง KNN-LST ที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ	69
4.7 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น (bulk density) ของสารตัวอย่าง KNN-LST	70
4.8 ผลการทดสอบค่าความจุไฟฟ้าของสารตัวอย่าง KNN-LST ที่ค่าความถี่ต่างๆ	71
4.9 ผลการทดสอบค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของสารตัวอย่าง KNN-LST ที่ค่าความถี่ต่างๆ	71
4.10 ผลการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ของสารตัวอย่าง KNN-LST ที่อุณหภูมิต่างๆ	72
4.11 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารตัวอย่าง KNN-LST ที่อุณหภูมิต่างๆ	74
4.12 ผลการทดสอบค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของสารตัวอย่าง KNN-LST ที่อุณหภูมิต่างๆ	74
4.13 สูญเสียไดอิเล็กทริกของสารตัวอย่าง KNN-LST ที่อุณหภูมิต่างๆ	75
4.14 ผลการทดสอบวงวนฮิสเทอรีซิสของสารตัวอย่างที่มีการเติมสารเจือ Ta ⁵⁺ 0.12 โมล ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 3.5 kV ที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่	76
4.15 ผลการทดสอบวงวนฮิสเทอรีซิสของสารตัวอย่างที่มีการเติมสารเจือ Ta ⁵⁺ 0.12 โมล ที่ความถี่ 50 Hz ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง	77
4.16 ผลการทดสอบค่าความเสื่อมสภาพ (aging) ตามเวลา ของสารตัวอย่าง KNN-LST	78
4.17 วงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส ของสารตัวอย่าง KNN-LST ก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV ความถี่ 50 Hz	80
4.18 วงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV ความถี่ 50 Hz	80
4.19 ค่าโพลาริเซชันคงค้าง (remnant polarization) ระหว่างการทดสอบความล้าทางไฟฟ้าที่จำนวนรอบต่าง ๆ เมื่อปริมาณ Ta ⁵⁺ ที่เพิ่มขึ้น	84
4.20 ค่าโพลาริเซชันคงค้างแบบสัมพัทธ์ ระหว่างการทดสอบความล้าทางไฟฟ้าที่จำนวนรอบต่าง ๆ ของสารตัวอย่าง KNN-LST	86
4.21 ค่าสนามไฟฟ้าลบล้างระหว่างการทดสอบความล้าทางไฟฟ้าของสารตัวอย่าง KNN-LST	88
4.22 ค่าสนามไฟฟ้าลบล้างแบบสัมพัทธ์ระหว่างการทดสอบความล้าทางไฟฟ้าของสารตัวอย่าง KNN-LST	88

รูปที่	หน้าที่
4.23 ผลการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ระหว่างการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่จำนวนรอบต่าง ๆ โดยใช้ความถี่ (a) 1 kHz (b) 10 kHz (c) 50 kHz (d) 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	90
4.24 ผลการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ระหว่างการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่จำนวนรอบต่าง ๆ โดยใช้ความถี่ (a) 1 kHz (b) 10 kHz (c) 50 kHz (d) 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	91
4.25 ปริมาณการลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกระหว่างการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า เทียบกับก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ความถี่ 50 Hz	92
4.26 ผลการทดสอบค่าคงที่โพสิซิวิตีระหว่างการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่จำนวนรอบสนามไฟฟ้าต่าง ๆ	93
4.27 ปริมาณการลดลงของค่าคงที่โพสิซิวิตีระหว่างการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า เทียบกับก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่จำนวนรอบต่าง ๆ	94
4.28 กราฟเอ็กเรย์ดิฟแฟรกชันของสารตัวอย่าง KNN-LST ก่อนการทำซ้ำ	96
4.29 กราฟเอ็กเรย์ดิฟแฟรกชันของสารตัวอย่าง KNN-LST หลังเหนี่ยวนำซ้ำ และก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	97
4.30 กราฟเอ็กเรย์ดิฟแฟรกชันของสารตัวอย่าง KNN-LST หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	97
4.31 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโดเมนที่มีความสัมพันธ์กับการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค XRD ของผลึกที่มีวัฏภาคแบบเตตระโกนอล (a) ก่อนเหนี่ยวนำซ้ำ (b) ก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้า (c) หลังทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	98
4.32 แบบจำลองลักษณะการจัดเรียงตัวโดเมนของ Pole density ที่เท่ากับ 0, 1, และ 3 m.r.d	99
4.33 กราฟเอ็กเรย์ดิฟแฟรกชันอย่างละเอียดที่ $2\theta:45-47^\circ$ ของสารตัวอย่าง KNN-LST (a) ก่อนการเหนี่ยวนำซ้ำ (b) ก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้า (c) หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	101

รูปที่	หน้าที่
4.34 ค่า pole density ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวอิเล็กโทรดก่อนทดสอบ ความล้าทางไฟฟ้า ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV ต่อความหนา 1 มิลลิเมตร และหลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า จำนวน 10^6 รอบที่ความถี่ 50 Hz ของสารตัวอย่างเซรามิกส์	101
4.35 กราฟเอ็กเรย์ดิฟแฟรกชันอย่างละเอียดที่ $2\theta:31-33^\circ$ ของสารตัวอย่าง KNN-LST เมื่อ $x=0-0.12$ (a) ก่อนการเหนี่ยวนำขั้ว (b) ก่อนทดสอบ (c) หลังการทดสอบ	103
4.36 กราฟเอ็กเรย์ดิฟแฟรกชันอย่างละเอียดที่ $2\theta:50-53^\circ$ ของสารตัวอย่าง KNN-LST เมื่อ $x=0-0.12$ (a) ก่อนการเหนี่ยวนำขั้ว (b) ก่อนทดสอบ (c) หลังการทดสอบ	103
4.37 ตัวอย่างการหาพื้นที่ใต้กราฟของ peak (002) และ (200) ที่ $2\theta = 45-47^\circ$ ของสารตัวอย่าง $x=0.12$ จาก Fiting curve ด้วย Lorentzian function	104
4.38 ตัวอย่างการหาพื้นที่ใต้กราฟของ peak (102), (201) และ (210) ที่ $2\theta = 50-53^\circ$ ของสารตัวอย่าง $x=0.12$ จาก Fiting curve ด้วย Lorentzian function	104
4.39 อัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของระนาบที่ 1 และ 2 ในช่วง $2\theta:45-47^\circ$ ของสารตัวอย่าง ก่อนเหนี่ยวนำขั้ว ก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้าและหลังทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	105
4.40 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวบริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง KNN-LST ก่อนทดสอบ ความล้าทางไฟฟ้า ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$	106
4.41 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวบริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง KNN-LST ก่อนทดสอบ ความล้าทางไฟฟ้า ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$ (ต่อ)	107
4.42 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวบริเวณกลางของชิ้นสารตัวอย่าง KNN-LST ก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่กำลังขยาย 400 เท่า	108
4.43 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวบริเวณกลางของชิ้นสารตัวอย่าง KNN-LST ก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่กำลังขยาย 400 เท่า (ต่อ)	109
4.44 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวบริเวณกลางของชิ้นสารตัวอย่าง KNN-LST ก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่กำลังขยาย 400 เท่า (ต่อ)	110

รูปที่	หน้าที่
4.45 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวบริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง KNN-LST หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$	112
4.46 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวบริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง KNN-LST หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่กำลังขยาย 2000 เท่า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$ (ต่อ)	113
4.47 ภาพถ่าย SEM ที่พบรอยแตกร้าวบนพื้นผิวบริเวณขอบและส่วนกลางของชิ้นสารตัวอย่าง KNN-LST หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่กำลังขยาย 400 เท่า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$	113
4.48 ภาพถ่าย SEM ที่พบรอยแตกร้าวบนพื้นผิวบริเวณขอบและส่วนกลางของชิ้นสารตัวอย่าง KNN-LST หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่กำลังขยาย 400 เท่า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$ (ต่อ)	114
4.49 ภาพถ่าย SEM ที่พบรอยแตกร้าวบนพื้นผิวบริเวณขอบและส่วนกลางของชิ้นสารตัวอย่าง KNN-LST หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่กำลังขยาย 400 เท่า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$ (ต่อ)	115
4.50 ภาพถ่าย SEM ที่พบรอยแตกร้าวบนพื้นผิวบริเวณขอบและส่วนกลางของชิ้นสารตัวอย่าง KNN-LST หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่กำลังขยาย 400 เท่า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$ (ต่อ)	116
4.51 วงวนโพลาริเซชันอีล็กทริกซ์ของ KNN-LST ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV ความถี่ 50 Hz (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$	117
4.52 วงวนโพลาริเซชันอีล็กทริกซ์ของ KNN-LST ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV ความถี่ 50 Hz (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$ (ต่อ)	118
4.53 วงวนโพลาริเซชันอีล็กทริกซ์ของ KNN-LST ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV ความถี่ 50 Hz (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$ (ต่อ)	119
4.54 วงวนปิกฟิลด์ของ KNN-LST ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV ความถี่ 50 mHz ก่อนการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$	120

รูปที่	หน้าที่
4.55 วงวนปิกผีเสื้อของ KNN-LST ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV ความถี่ 50 mHz ก่อนการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$ (ต่อ)	121
4.56 วงวนปิกผีเสื้อของ KNN-LST ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV ความถี่ 50 mHz ก่อนการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$ (ต่อ)	122
4.57 วงวนปิกผีเสื้อของ KNN-LST ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV ความถี่ 50 mHz หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$	123
4.58 วงวนปิกผีเสื้อของ KNN-LST ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV ความถี่ 50 mHz หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$ (ต่อ)	124
4.59 วงวนปิกผีเสื้อของ KNN-LST ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV ความถี่ 50 mHz หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า (a) KNN (b) $x=0.00$ (c) $x=0.04$ (d) $x=0.08$ (e) $x=0.12$ (ต่อ)	125
4.60 ภาพถ่ายพื้นผิวบริเวณขอบชิ้นสารตัวอย่าง KNN ที่กำลังขยาย 200 เท่า (a) ก่อนทดสอบ (b) หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า (ต่อ)	127
4.61 ภาพถ่ายพื้นผิวบริเวณขอบชิ้นสารตัวอย่าง $x=0.00$ ที่กำลังขยาย 200 เท่า (a) ก่อนทดสอบ (b) หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	128
4.62 ภาพถ่ายพื้นผิวบริเวณขอบชิ้นสารตัวอย่าง $x=0.04$ ที่กำลังขยาย 200 เท่า (a) ก่อนทดสอบ (b) หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	129
4.63 ภาพถ่ายพื้นผิวบริเวณขอบชิ้นสารตัวอย่าง $x=0.08$ ที่กำลังขยาย 200 เท่า (a) ก่อนทดสอบ (b) หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	130
4.64 ภาพถ่ายพื้นผิวบริเวณขอบชิ้นสารตัวอย่าง $x=0.12$ ที่กำลังขยาย 200 เท่า (a) ก่อนทดสอบ (b) หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	131

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
2.1 ตัวอย่างสมบัติพื้นฐานของสารประกอบ KNN KN และ NN	18
2.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการเติม Li และ Ta	29
2.3 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของสาร KNN ที่เติมสารเจือในปริมาณต่างๆ	30
2.4 ผลการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่มีค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริก (d_{33}) สูงกว่า 100 pC/N	36
2.5 ผลการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่มีค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริก (d_{33}) สูงกว่า 100 pC/N (ต่อ)	36
3.1 สูตรส่วนผสมของการเติมแทนทาลัม (Ta^{5+}) โดยวิธี Solid-state reaction	42
3.2 ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตที่เติมสารเจือแทนทาลัม (Ta^{5+}) จำนวน 20 กรัม โดยวิธี Solid-state reaction	42
4.1 ขนาดเกรนของสารตัวอย่างเซรามิกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ	67
4.2 ค่าความเสื่อมสภาพ (aging) ตามเวลา ของสารตัวอย่าง KNN-LST	79
4.3 การเปรียบเทียบปริมาณการลดลงของค่าโพลาริเซชันคงค้าง ($+P_r$) ระหว่างการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ภายใต้สนามไฟฟ้า ± 2.5 kV/mm ความถี่ 50 Hz	84
4.4 ค่าพารามิเตอร์การลดลงของโพลาริเซชันคงค้างของสารตัวอย่าง KNN-LST	85
4.5 แสดงปริมาณการลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกระหว่างการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า เทียบกับก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้าที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ความถี่ 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง	92
4.6 ปริมาณการลดลงของค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริกระหว่างการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า เทียบกับก่อนทดสอบความล้าทางไฟฟ้า ที่จำนวนรอบต่าง ๆ	94
4.7 ค่าโพลาริเซชันคงค้างในการทดลองซ้ำ ของสารประกอบ KNN-LST	120
4.8 ค่าความเครียดสูงสุด (maximum strain) ของสารประกอบ KNN-LST ก่อนการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	123
4.9 สรุปผลการเติมสารเจือ Ta^{5+} ใน KNN-LST ที่มีต่อสมบัติการเปลี่ยนทิศโดเมน	132
4.10 สรุปผลการเติมสารเจือ Ta^{5+} ใน KNN-LST ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าก่อนการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า	133

ตารางที่

หน้าที่

- 4.11 สรุปผลการเติมสารเจือ Ta^{5+} ใน KNN-LST ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า
หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า (1,000,000 รอบ)

134