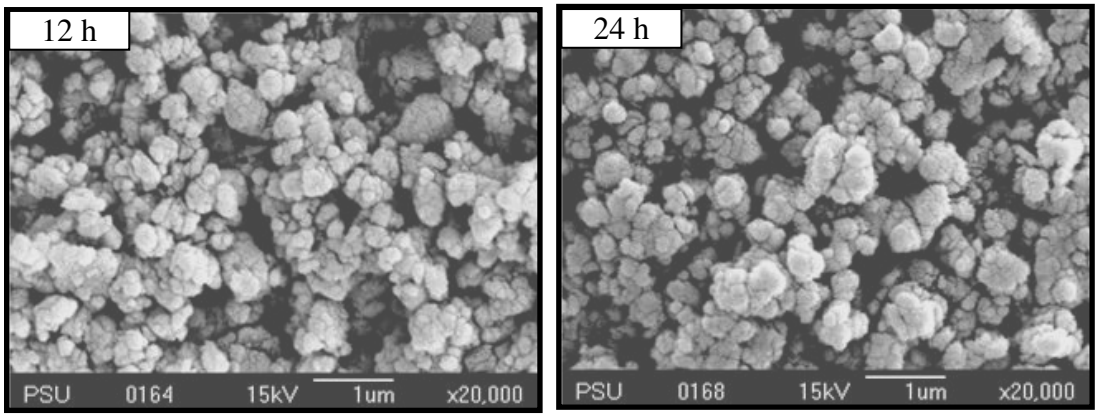


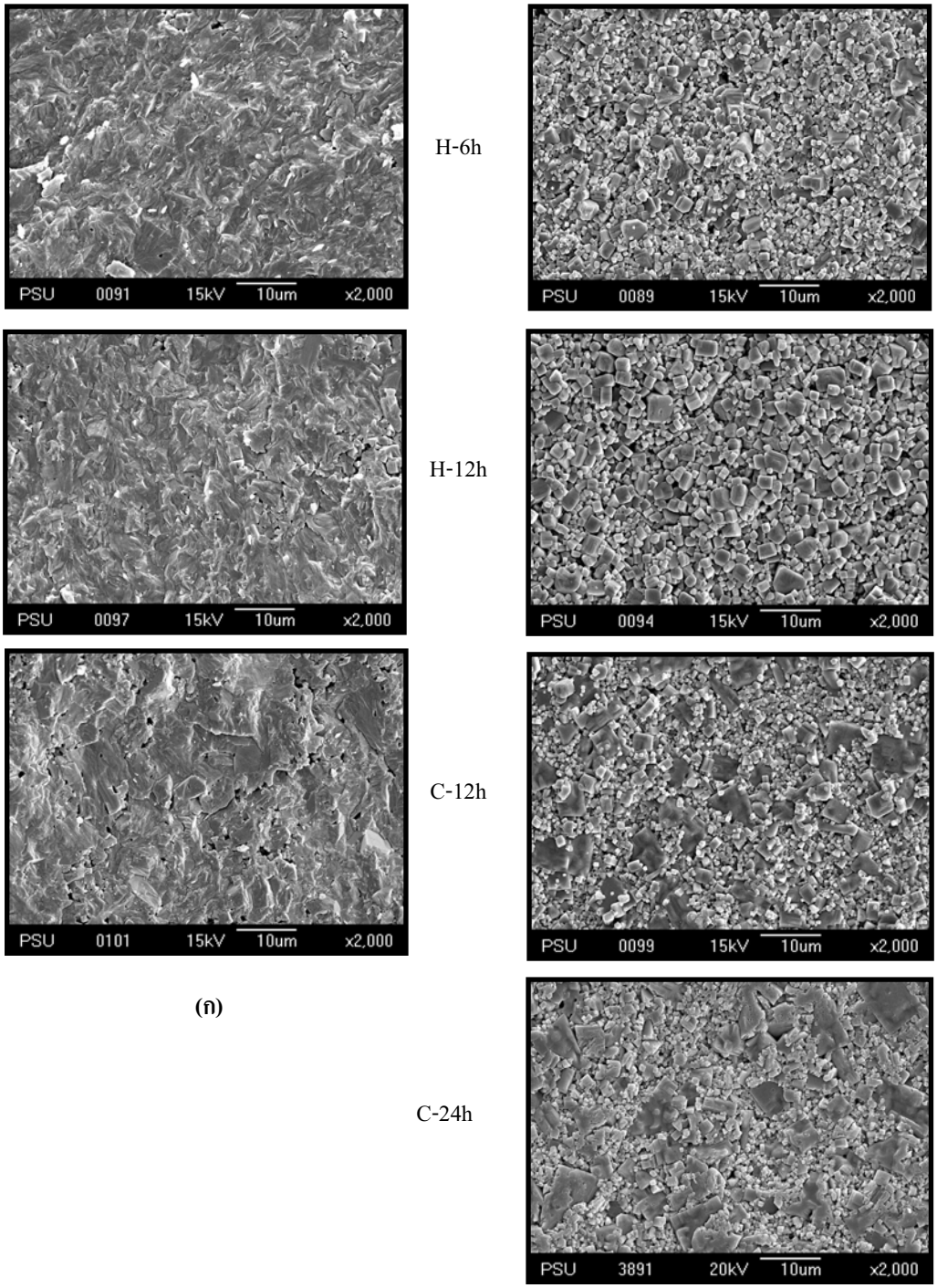
รูปที่ 3.52 ภาพถ่าย SEM ของผงสารในระบบ $\{(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ ที่ผ่านการบดผสมแบบที่ใช้กันทั่วไป เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก $\{(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ ที่ผ่านการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมพลังงานสูง (H) เป็นเวลา 6 และ 12 ชั่วโมง และผ่านการบดผสมเครื่องบดผสมแบบที่ใช้กันทั่วไป (C) เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 และ 1075 ^{o}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (รูปที่ 3.53 – 3.54) พบว่ารูปร่างและขนาดของเกรนขึ้นอยู่กับเวลาและชนิดของเครื่องบดผสมสาร และอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์

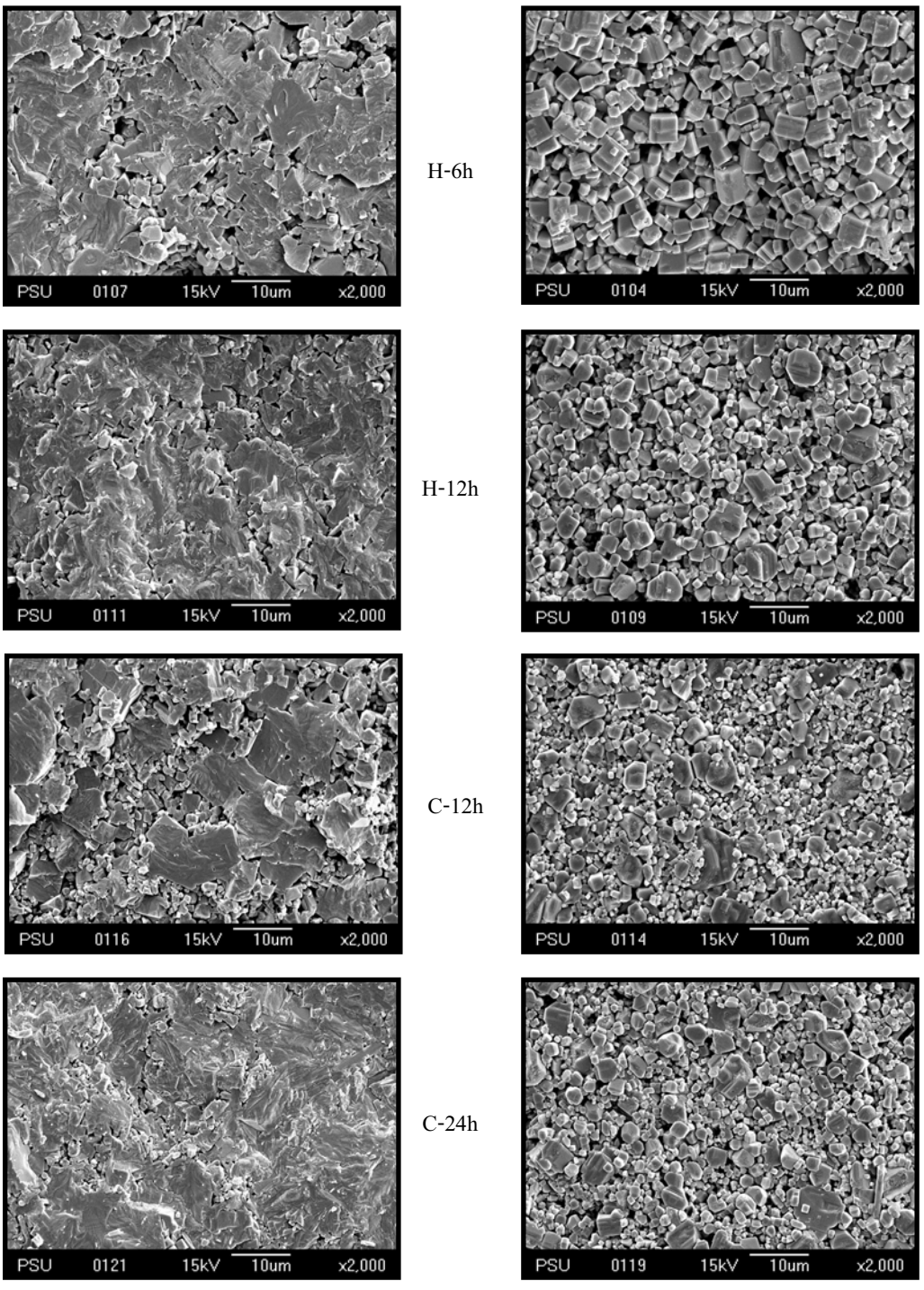
เมื่อพิจารณาชิ้นงานเซรามิกที่ผ่านการบดผสมแบบพลังงานสูง เป็นเวลา 6 และ 12 ชั่วโมง เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 ^{o}C พบว่าลักษณะเกรนเป็น abnormal grain growth มีรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยม ขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกัน โดยขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่และใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อบดผสมนาน 12 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 3.5และเพิ่มอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์เป็น 1075 ^{o}C นอกจากนี้ เซรามิกที่ผ่านการบดผสมเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ลักษณะรูปร่างของเกรนมีแนวโน้มเป็นทรงกลม ซึ่งแสดงถึงการมีเฟสของเหลวเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการซินเตอริง

เมื่อพิจารณาชิ้นงานเซรามิกที่ผ่านการบดผสมเครื่องบดผสมแบบที่ใช้กันทั่วไป (C) เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ 1050 ^{o}C พบว่าพบว่าลักษณะเกรนเป็น abnormal grain growth มีรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยม มี 2 ขนาด คือ ขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกัน ซึ่งเกรนขนาดโตของการบดผสม 24 ชั่วโมง มีขนาดโตกว่าการบดผสม 12 ชั่วโมง โดยขนาดเกรนจะมีขนาดใหญ่และใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์เป็น 1075 ^{o}C ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และลักษณะรูปร่างของเกรนมีแนวโน้มเป็นทรงกลม ซึ่งแสดงถึงการมีเฟสของเหลวเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการซินเตอริงเช่นเดียวกับกรณีการบดผสมแบบพลังงานสูง

เมื่อพิจารณาปริมาณรูพรุนจากภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวาง พบว่าการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1075 ^{o}C มีปริมาณมากกว่าที่อุณหภูมิ 1050 ^{o}C ทั้งนี้เนื่องจากคาดว่ามีการระเหยของสารตั้งต้นไปในระหว่างกระบวนการซินเตอริง



รูปที่ 3.53 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานเซรามิกในระบบ $\{(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เตรียมจากการบดผสมพลังงานสูง (H) เป็นเวลา 6 และ 12 ชั่วโมง และผ่านการบดผสมเครื่องบดผสมแบบที่ใช้กันทั่วไป (C) เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ1050 ^{o}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) ภาคตัดขวาง (ข) ผิวหน้า



รูปที่ 3.54 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานเซรามิกในระบบ $\{(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ ที่เตรียมจากการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมพลังงานสูง (H) เป็นเวลา 6 และ 12 ชั่วโมง และผ่านการบดผสมเครื่องบดผสมแบบที่ใช้กันทั่วไป (C) เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1075 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) ภาคตัดขวาง (ข) ผิวหน้า

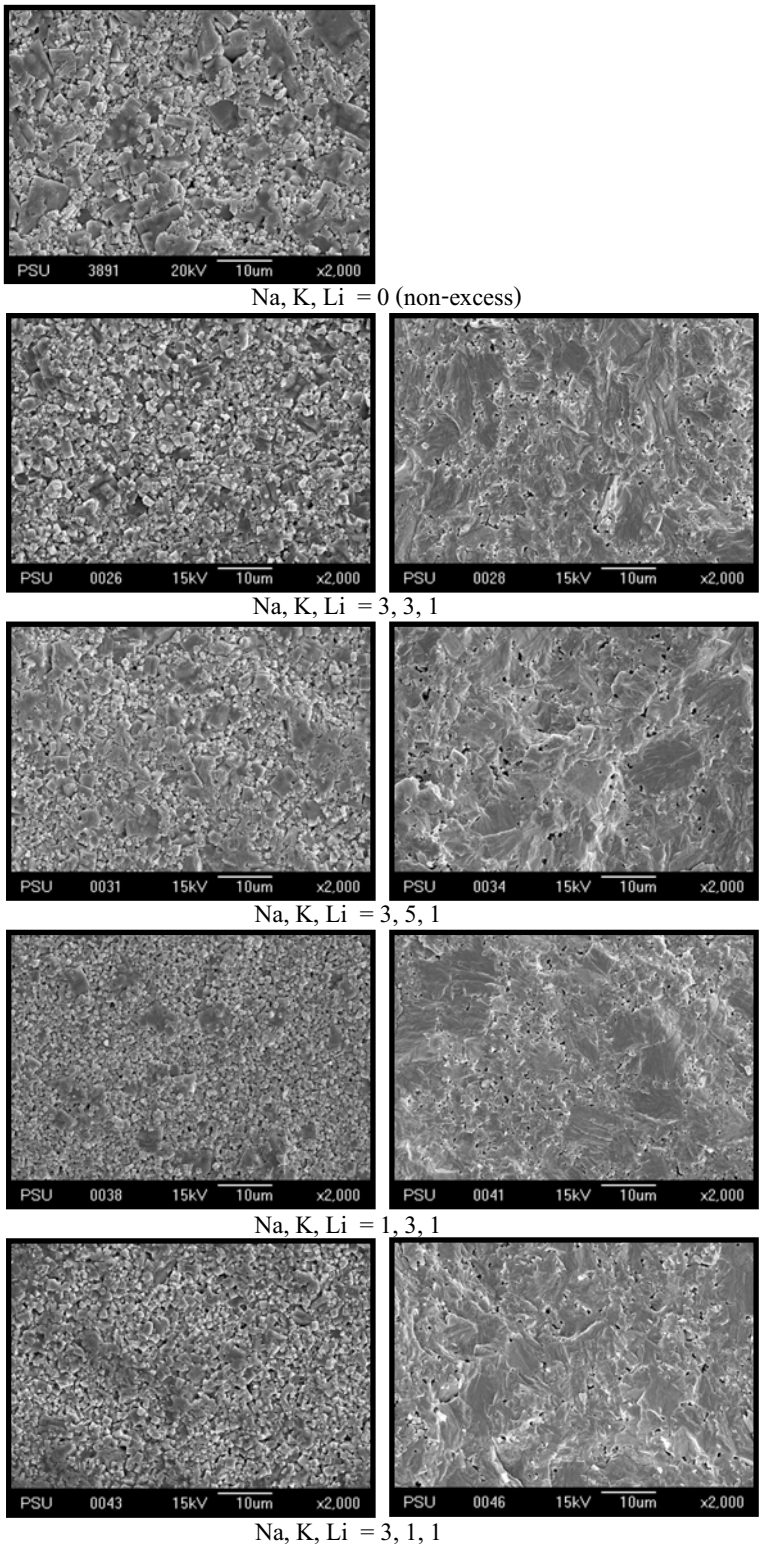
ตารางที่ 3.5 ขนาดเกรนของเซรามิกในระบบ $\{(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}$ $(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ ที่ผ่านการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมพลังงานสูง (H) เป็นเวลา 6 และ 12 ชั่วโมง และผ่านการบดผสมเครื่องบดผสมแบบที่ใช้กันทั่วไป (C) เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 และ 1075 ^{o}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เงื่อนไขในการบดผสม	ขนาดเกรน (μm)	
	1050 ^{o}C	**1075 ^{o}C**
H-6h	2.14 ± 1.57	2.64 ± 1.37
H-12h	2.36 ± 1.18	2.95 ± 1.05
C-12h	2.72 ± 2.11	2.22 ± 1.57
C-24h	3.01 ± 2.53	2.51 ± 1.46

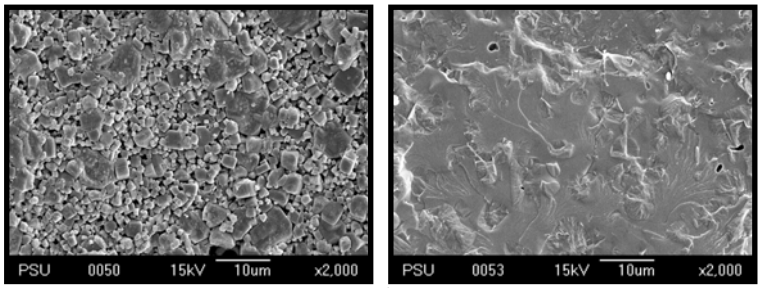
สำหรับโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณ 0; 3, 3, 1; 3, 5, 1; 1, 3, 1 และ 3, 1, 1 wt% และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 และ 1075 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.55 – 3.56 พบว่าปริมาณของ Na, K, Li ส่วนเกินส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกอย่างมีนัยสำคัญ โดยเซรามิกส่วนใหญ่มีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือทรงกลม เกรนเกิดการโตแบบ abnormal grain growth มี 2 ขนาด คือ เล็กและใหญ่ปะปนกันและมีรูพรุนเกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก โดยขนาดเกรนเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 3.6

เมื่อพิจารณาเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 ^{o}C พบว่าชิ้นตัวอย่างส่วนใหญ่มีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยม เกรนมีขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกัน ซึ่งส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก เกิดรูพรุนขนาดเล็กขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณต่างๆ พบว่าเกรนมีขนาดเล็กลง โดยเมื่อเติม Na, K , Li ส่วนเกินในปริมาณ 3, 1, 1 wt% เกรนมีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ย 1.31 ± 0.35 μm

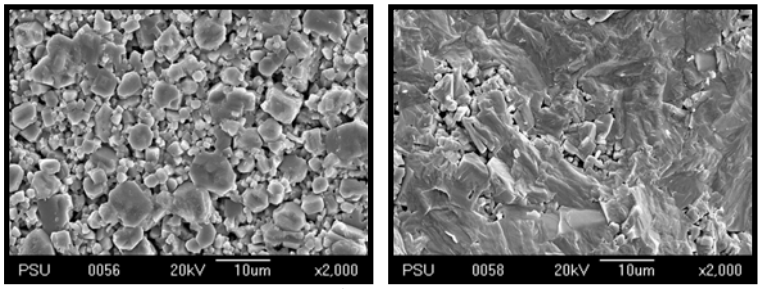
เมื่อพิจารณาชิ้นตัวอย่างเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1075 °C พบว่าลักษณะเกรนส่วนใหญ่มีแนวโน้มเป็นทรงกลม เกรนและรูพรุนมี 2 ขนาด คือ ขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกัน โดยรูพรุนจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย สาเหตุที่เกรนส่วนใหญ่ของชิ้นตัวอย่างเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1075 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีขนาดใหญ่ เนื่องมาจากใช้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบชิ้นตัวอย่างที่เติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณต่างๆ พบว่าเมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกินลงไป ชิ้นตัวอย่างเซรามิกมีขนาดเกรนเล็กลง โดยเมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณ 1, 3, 1 wt% เกรนมีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุด มีขนาดเกรนเฉลี่ย 1.34 ± 0.33 μm



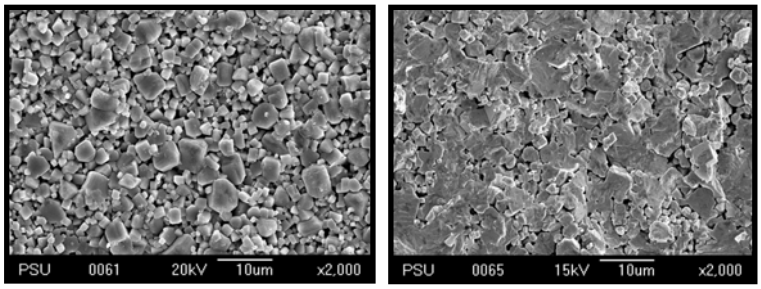
รูปที่ 3.55 ภาพถ่าย SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวางของเซรามิก $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}$ $(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณต่าง ๆ กัน และซินเตอร์ที่ 1050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



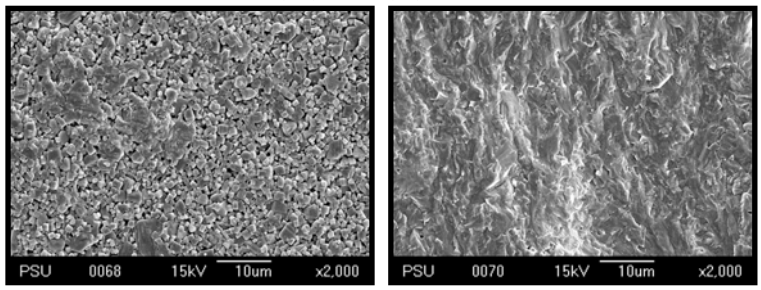
Na, K, Li = 0



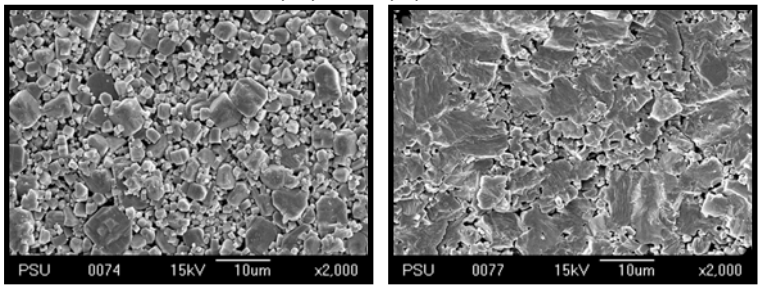
Na, K, Li = 3, 3, 1



Na, K, Li = 3, 5, 1



Na, K, Li = 1, 3, 1



Na, K, Li = 3, 1, 1

ก) **ข)**

รูปที่ 3.56 ภาพถ่าย SEM (ก) พื้นผิว (ข) ภาคตัดขวางของเซรามิก $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}$ $(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณต่าง ๆ กัน และซินเตอร์ที่ 1075 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.6 ขนาดเกรนของเซรามิกในระบบ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณ 0; 3, 3, 1; 3, 5, 1; 1, 3, 1 และ 3, 1, 1 wt% และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C และ 1075 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ปริมาณ Na : K : Li ส่วนเกิน (wt.%)	ขนาดเกรน (μm)	
	1050 °C	1075 °C
0	3.01 ± 2.53	2.51 ± 1.46
3 : 3 : 1	1.40 ± 0.42	2.63 ± 1.15
3 : 5 : 1	1.56 ± 0.99	2.45 ± 0.93
1 : 3 : 1	1.50 ± 0.79	1.34 ± 0.33
3 : 1 : 1	1.31 ± 0.35	2.16 ± 0.97

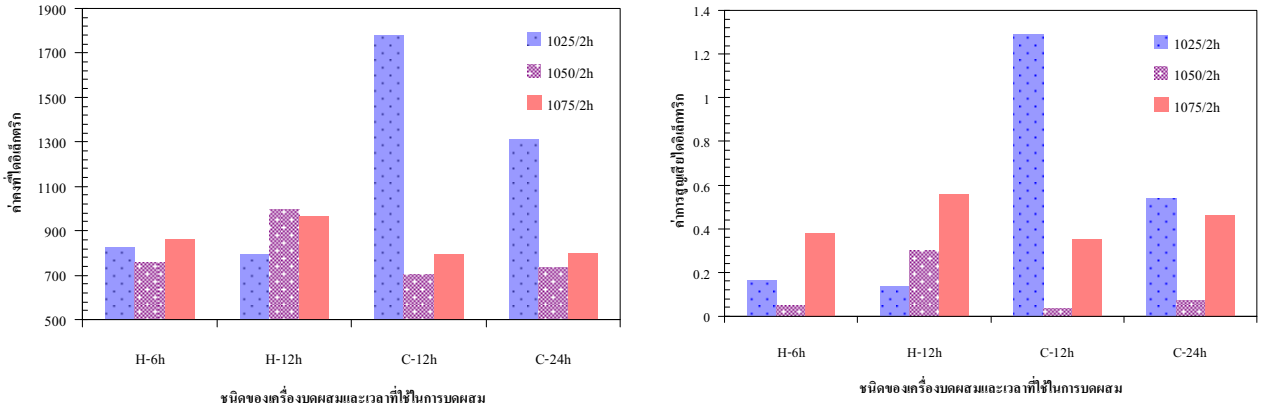
3.4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกในระบบ $(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}$ $(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$

สำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานเซรามิก $(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}$ $(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ จะเลือกชิ้นงานที่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันของทุกสูตร มาสูตรละ 2 ชิ้น เมื่อผ่านการทำอิเล็กโทรดแล้ว นำมาทำการศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกโดยแปรค่าความถี่และอุณหภูมิ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 1 kHz (รูปที่ 3.57) พบว่าชนิดของเครื่องบดผสมและเวลาที่ใช้ในการบดผสมสารมีอิทธิพลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของเซรามิก โดยเซรามิกที่เตรียมจากการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมพลังงานสูง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และซินเตอร์ ที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และชิ้นงานที่บดผสมเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1025 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี คือ มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกน้อย เท่ากับ 758.1, 793.6, 0.051 และ 0.139 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นสูง (4.748 - 4.848 g/cm^3) และมีเกรนขนาดเล็ก

เมื่อพิจารณาเซรามิกที่เตรียมจากการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบที่ใช้กันทั่วไป เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1025 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียในไดอิเล็กตริกมากที่สุด มีค่าความหนาแน่นน้อย และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าคงที่ไดอิเล็ก - ตริกมากและมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกน้อย เท่ากับ 704.6 และ 0.039 ตามลำดับ เนื่องจากชิ้นงานเซรามิกมีค่าความหนาแน่นสูง เท่ากับ 4.810 ± 0.031 g/cm^3

เมื่อพิจารณาชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมจากการบดผสมธรรมดา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ 1050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีสมบัติทางไฟฟ้าดีที่สุดสำหรับสูตรนี้ เพราะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากและมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกน้อย เท่ากับ 736.8 และ 0.076 ตามลำดับ เนื่องจากชิ้นงานเซรามิกมีค่าความหนาแน่นสูง เท่ากับ 4.806 ± 0.005 g/cm^3

ซึ่งสรุปได้ว่าชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมจากการบดผสมพลังงานสูงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุด เนื่องจากเกรนมีขนาดเล็กและมีค่าความหนาแน่นมากที่สุด



รูปที่ 3.57 สมบัติไดอิเล็กตริก (ที่ความถี่ 1 kHz) ของเซรามิกในระบบ $\{(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}$ $(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ ซึ่งเตรียมจากการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมพลังงานสูง (H) เป็นเวลา 6 และ 12 ชั่วโมง และการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบที่ใช้กันทั่วไป (C) เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1025 °C - 1075 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

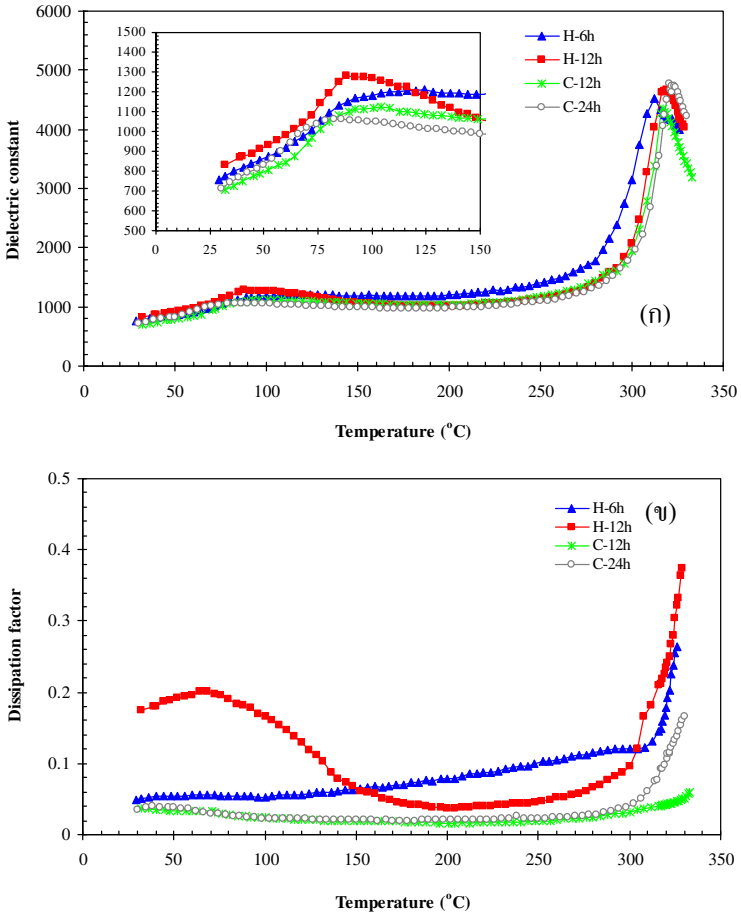
สมบัติไดอิเล็กตริกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ$\{(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ ซึ่งเตรียมจากการบดผสมด้วยเครื่องบดพลังงานสูง(H) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และการบดผสมแบบ conventional ball mill (C) เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C และจากการบดผสมแบบ high energy mill (H) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1025 °C ดังแสดงในรูปที่ 3.58 พบว่า สารตัวอย่างเซรามิกแสดงพีคการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกขึ้นที่อุณหภูมิ transition 2 อุณหภูมิ คือ T_{O-T} และ T_C เช่นเดียวกับกรณี $(1-x)Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3 - xLiTaO_3$ โดย T_{O-T} มีค่าลดลง ในขณะที่ T_C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการบดผสมเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและแฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิเล็กตริกของเซรามิกในระบบ $\{(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ ซึ่งเตรียมจากการบดผสมแบบ high energy ball mill (H) เป็นเวลา 6 และ 12 ชั่วโมง และการบดผสมแบบ conventional ball mill (C) เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง

เงื่อนไขในการบดผสม	T_{O-T}* (°C)	$\varepsilon_{r(T_{O-T})}$	$\tan\delta_{(T_{O-T})}$	T_C **(°C)	$\varepsilon_{r(T_C)}$	$\tan\delta_{(T_C)}$
H-6h	124	1212	0.058	313	4517	0.130
H-12h	88	1282	0.182	319	4669	0.226
C-12h	104	1124	0.024	317	4350	0.045
C-24h	86	1061	0.026	321	4778	0.107

T_{O-T} * : อุณหภูมิการเปลี่ยนจากเฟส orthorhombic เป็นเฟส tetragonal

T_C ** : อุณหภูมิการเปลี่ยนจากเฟส tetragonal เป็นเฟส cubic (อุณหภูมิคูรี)



รูปที่ 3.58 สมบัติไดอิเล็กตริกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $\{(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ ซึ่งเตรียมจากการบดผสมพลังงานสูง (H) เป็นเวลา 6 และ 12 ชั่วโมง และการบดผสมแบบ conventional ball mill (C) เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง

(ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

(ข) แฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิเล็กตริก

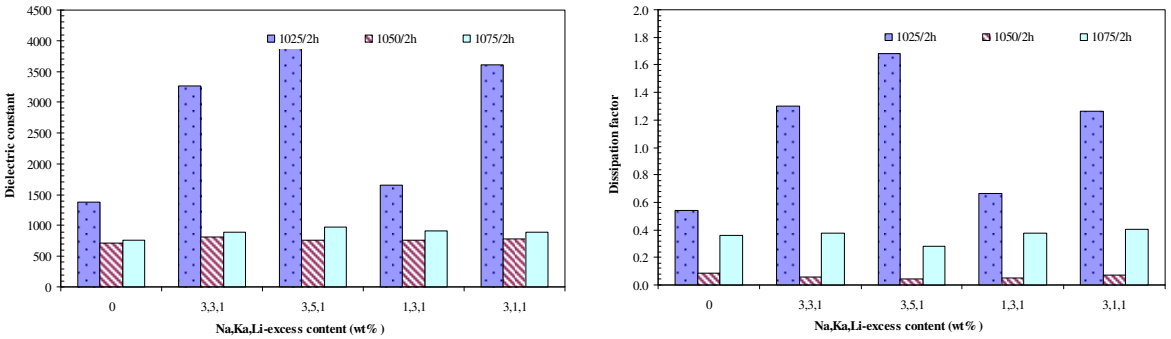
สำหรับสมบัติไดอิเล็กตริกของเซรามิก $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณ 0; 3, 3, 1; 3, 5, 1; 1, 3, 1 และ 3, 1, 1 wt% และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1025 °C, 1050 °C และ 1075 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการวัดที่อุณหภูมิห้องโดยแปรค่าความถี่ 0.1- 200 kHz พบว่าเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิเล็กตริกมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 1 kHz (รูปที่ 3.59) พบว่าชิ้นตัวอย่างเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1025 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทุกสูตรมีค่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิเล็กตริกสูงด้วย เนื่องมาจากอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ต่ำจนเกินไป เซรามิกเกิดการแน่นตัวไม่สมบูรณ์ ความหนาแน่นมีค่าต่ำ จึงทำให้สมบัติทางไฟฟ้าที่ได้ไม่ดี

เซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิเล็กตริกต่ำ และพบว่าการเติม Na, K, Li ส่วนเกินลงไปทำให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่ม

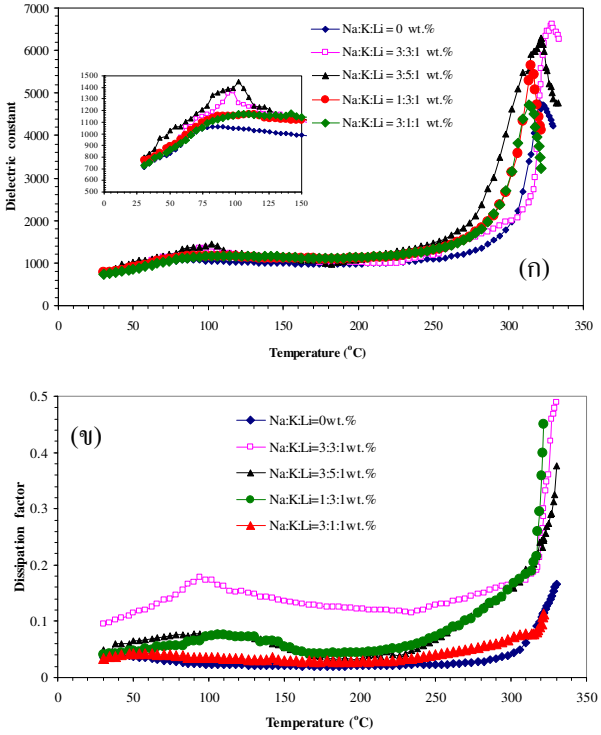
สูงขึ้น โดยสูตรที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงที่สุดและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิเล็กตริกต่ำที่สุด คือ สารตัวอย่างที่เติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณ 3, 5, 1 wt% ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 766 และมีค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิ - เล็กตริกเท่ากับ 0.042 ตามลำดับ เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด

สำหรับเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1075 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็ก - ตริกและมีค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิเล็กตริกสูงกว่าชิ้นตัวอย่างเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เนื่องมาจากใช้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงจนเกินไป ซึ่งส่งผลทำให้ชิ้นตัวอย่างเซรามิกมีค่าความหนาแน่นลดลง และเกรนส่วนใหญ่มีขนาดแตกต่างกัน จึงทำให้สมบัติทางไดอิเล็กตริกที่ได้ไม่ดีเนื่องจากมีค่าแฟก เตอร์การสูญเสียในไดอิเล็กตริกสูง



รูปที่ 3.59 สมบัติไดอิเล็กตริก (1 kHz) ของเซรามิก $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}\ Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณ 0; 3, 3, 1; 3, 5, 1; 1, 3, 1 และ 3, 1, 1 wt% เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1025 - 1075 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิของเซรามิก $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณ 0; 3, 3, 1; 3, 5, 1; 1, 3, 1 และ 3, 1, 1 wt% และซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า การเติม Na, K, Li ส่วนเกิน ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของสารตัวอย่าง คือ อุณหภูมิ T_{O-T} มีค่าอยู่ในช่วง 86 – 112 °C โดยมีค่าสูงขึ้นในสารตัวอย่างที่เติม Na, K, Li ส่วนเกิน ในขณะที่ อุณหภูมิ T_C มีค่าอยู่ในช่วง 312 – 321 °C โดยมีค่าลดลงเมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกิน โดย T_C มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกิน ปริมาณ 3, 1, 1 wt% ดังแสดงในรูปที่ 3.60 และ ตารางที่ 3.8



รูปที่ 3.60 สมบัติไดอิเล็กตริกของเซรามิก$\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณ 0; 3, 3, 1; 3, 5, 1; 1, 3, 1 และ 3, 1, 1 wt% เมื่อผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

(ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

(ข) แฟกเตอร์การสูญเสียในรูปความร้อนของไดอิเล็กตริก

ตารางที่ 3.8 แสดงอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและแฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิเล็ตริกของเซรามิกในระบบ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณ 0; 3, 3, 1; 3, 5, 1; 1, 3,1 และ 3, 1, 1 wt% เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

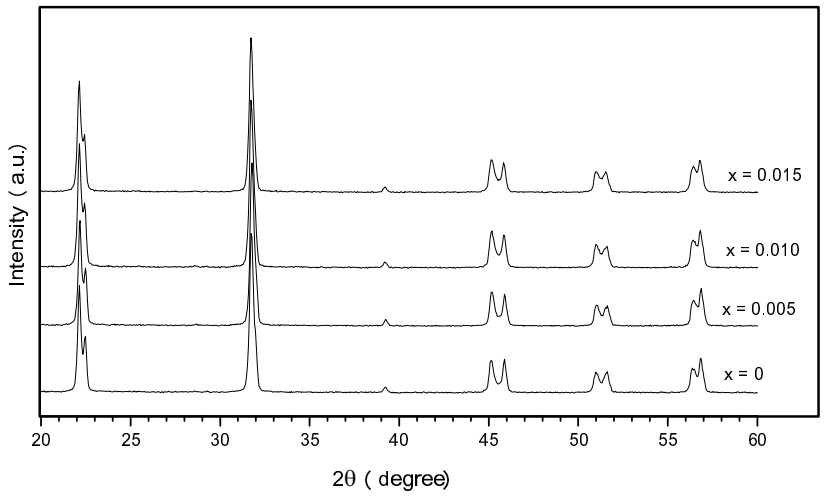
ปริมาณ Na, K, Li ส่วนเกิน (wt%)	T_{O-T} (°C)	$\varepsilon_{r(T_{O-T})}$	$\tan\delta_{(T_{O-T})}$	T_C (°C)	$\varepsilon_{r(T_C)}$	$\tan\delta_{(T_C)}$
0	86	1061	0.026	320.7	4778	0.107
3, 3, 1	96	1364	0.172	324	6987	0.532
3, 5, 1	100	1451	0.08	317	6474	0.243
1, 3, 1	112	1167	0.046	316	5642	0.207
3, 1, 1	108	1170	0.03	312	4719	0.077

3.5 ผลการศึกษาเซรามิกในระบบ $(0.995\text{-}x)\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -0.005MnO –x CuO

เนื่องจากมีรายงานว่า MnO ช่วยส่งเสริมการแน่นตัวและปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า และ CuO เป็นสารช่วยการซินเตอร์ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิซินเตอร์ให้ต่ำลง [42-43] จึงได้ทำการเตรียมสารตัวอย่างในระบบ $(0.995\text{-}x)\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -0.005MnO –x CuO เมื่อ x มีค่า 0, 0.005, 0.01 และ 0.015 โมล ด้วยวิธีผสมออกไซด์แบบที่ใช้กันทั่วไป โดยนำไปเผาซินเตอร์แบบกลบด้วยผงอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 1050 – 1070 °C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ได้ผลการวิจัยดังนี้

3.5.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการเกิดเฟสของสารตัวอย่างในระบบ $(0.995\text{-}x)\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -0.005MnO –x CuO ด้วยเทคนิค XRD

เมื่อนำสารตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่า $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ สามารถเกิดการฟอร์มตัวเป็นสารละลายของแข็งกับ MnO และ CuO ได้เป็นอย่างดี คือ เซรามิก $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -0.005MnO + x CuO มีโครงสร้างผลึกแบบ orthorhombic และ tetragonal ร่วมกัน คาดว่าจะทำให้มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น แต่หลังจากเติม CuO ในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างผลึกมีแนวโน้มเปลี่ยนไปสู่เฟส orthorhombic มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.61



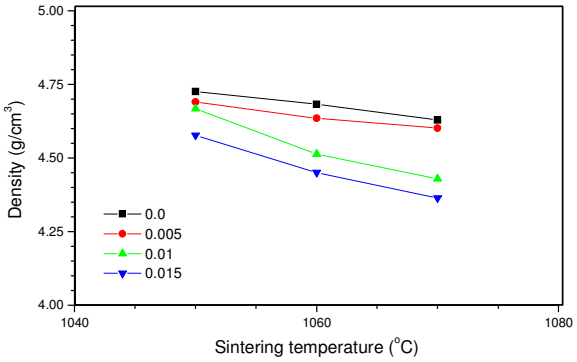
รูปที่ 3.61 พีค XRD ของเซรามิก $(0.995\text{-}x)\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -0.005MnO –x CuO (x = 0, 0.005, 0.01 และ 0.015) เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1060 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารตัวอย่างในระบบ $(0.995\text{-}x)\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -0.005MnO –x CuO

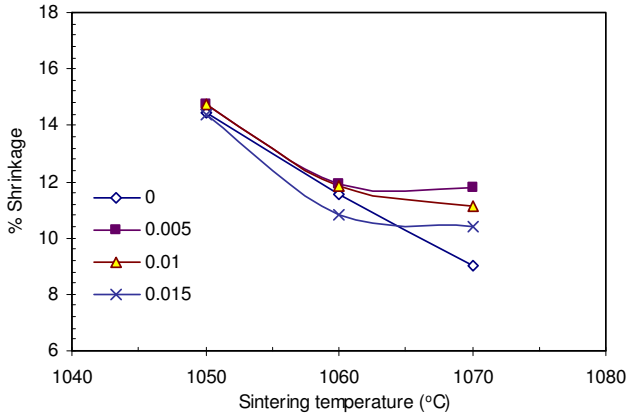
สำหรับสมบัติทางกายภาพพบว่ามีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซินเตอร์และปริมาณ CuO ดังแสดงในรูปที่ 3.62 – 3.63 ซึ่งพบว่า $(0.995\text{-}x)\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -0.005MnO –x CuO (x = 0, 0.005, 0.01 และ 0.015) ความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อเติม CuO ปริมาณเพิ่มขึ้นและซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารตั้งต้นสูญเสียไปใน

ระหว่างกระบวนการซินเตอริง ซึ่งชิ้นตัวอย่างที่เผาซินเตอร์ 1050 °C และไม่เจือ CuO ลงไป (x = 0) คือ มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด คือ 4.725 g/cm^3 (รูปที่ 3.62)

เมื่อพิจารณาค่าการหดตัวของชิ้นงานเซรามิกระบบ (0.995-x)NKNLT-0.005$MnCO_3$-xCuO พบว่าชิ้นตัวอย่างที่เจือ CuO ในปริมาณที่เท่ากันเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มว่าจะลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่น นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์เดียวกันเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเจือ CuO ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.63)



รูปที่ 3.62 ค่าความหนาแน่นของเซรามิก (0.995-x){$(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}$}$(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -0.005MnO –x CuO (x = 0, 0.005, 0.01 และ 0.015) เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 – 1070 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

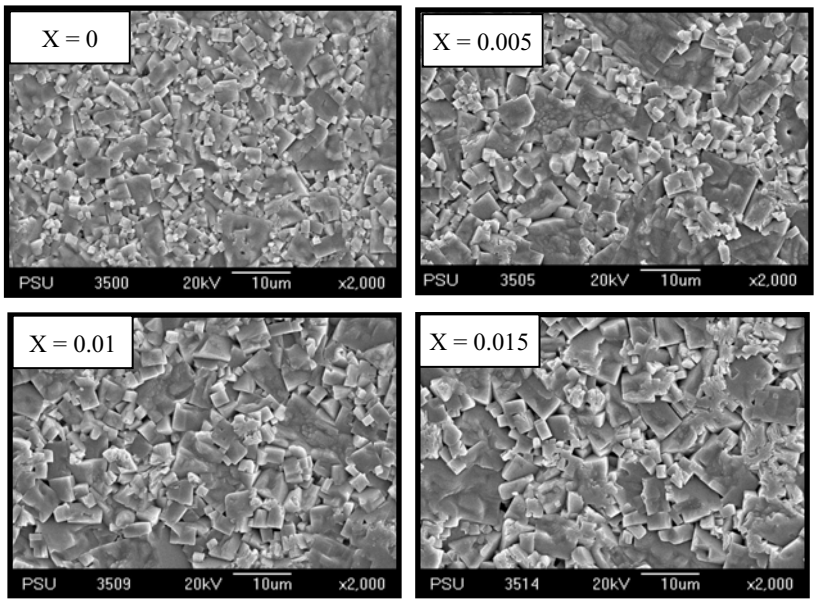


รูปที่ 3.63 ค่าการหดตัวของเซรามิก (0.995-x){$(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}$}$(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -0.005MnO –x CuO (x = 0, 0.005, 0.01 และ 0.015) เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 – 1070 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

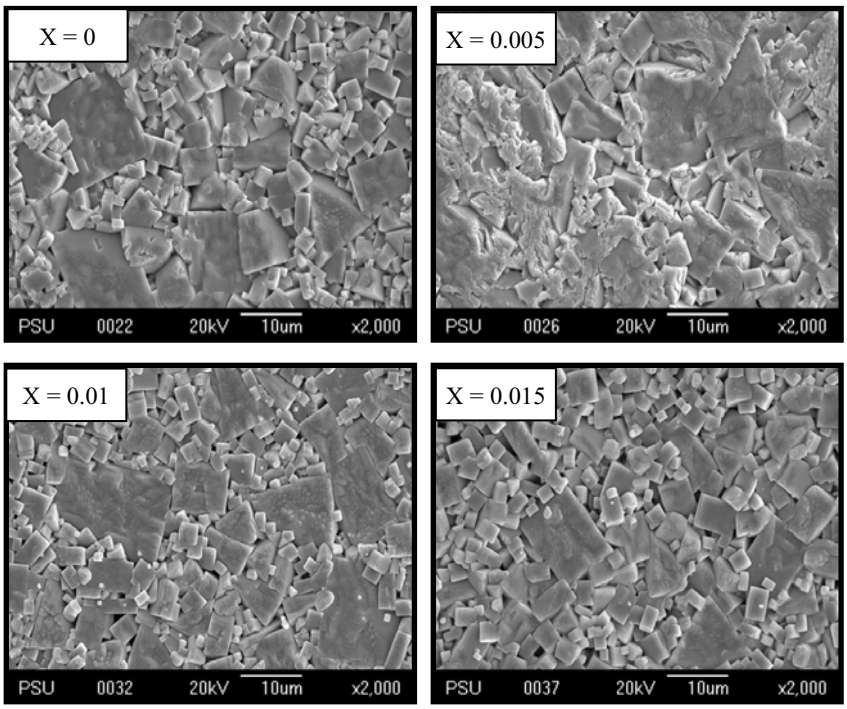
3.5.3 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของสารตัวอย่างในระบบ (0.995-x){$(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}$}$(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - 0.005MnO –x CuO ด้วยเทคนิค SEM

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกในระบบ (0.995-x){$(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}$}$(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - 0.005MnO –x CuO (x = 0, 0.005, 0.01 และ 0.015) เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 – 1060 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (รูปที่ 3.64 – 3.65) พบว่า รูปร่างของเกรนส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมและมีขนาดใหญ่และเล็กปะปนกัน โดย

เมื่อเจือ CuO ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นขนาดเกรนเฉลี่ยจะใหญ่ขึ้น และนอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้นขนาดเกรนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในตารางที่ 3.9



รูปที่ 3.64 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิกระบบ (0.995-x) $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - 0.005MnO - xCuO เมื่อ x = 0, 0.005, 0.01 และ 0.015 และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.65 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิกระบบ (0.995-x) $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - 0.005MnO – x CuO เมื่อ x = 0, 0.005, 0.01 และ 0.015 และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1060 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

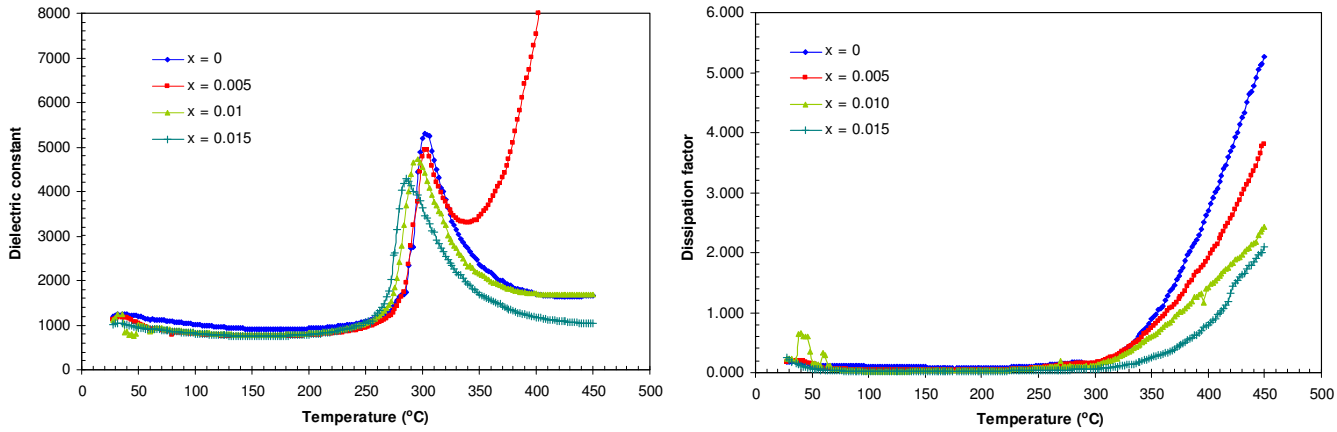
ตารางที่ 3.9 ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานเซรามิกระบบ (0.995-x) $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -0.005$MnCO_3$- x CuO เมื่อ x = 0, 0.005, 0.01 และ 0.015 และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C และ 1060 °C และ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ปริมาณ CuO (mol)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	
	1050 °C	**1060 °C**
X = 0	2.75 ± 1.46	4.67 ± 3.43
X = 0.005	3.33 ± 3.49	6.62 ± 4.71
X = 0.01	4.42 ± 2.34	4.13 ± 3.22
X = 0.015	4.61 ± 2.41	5.33 ± 2.98

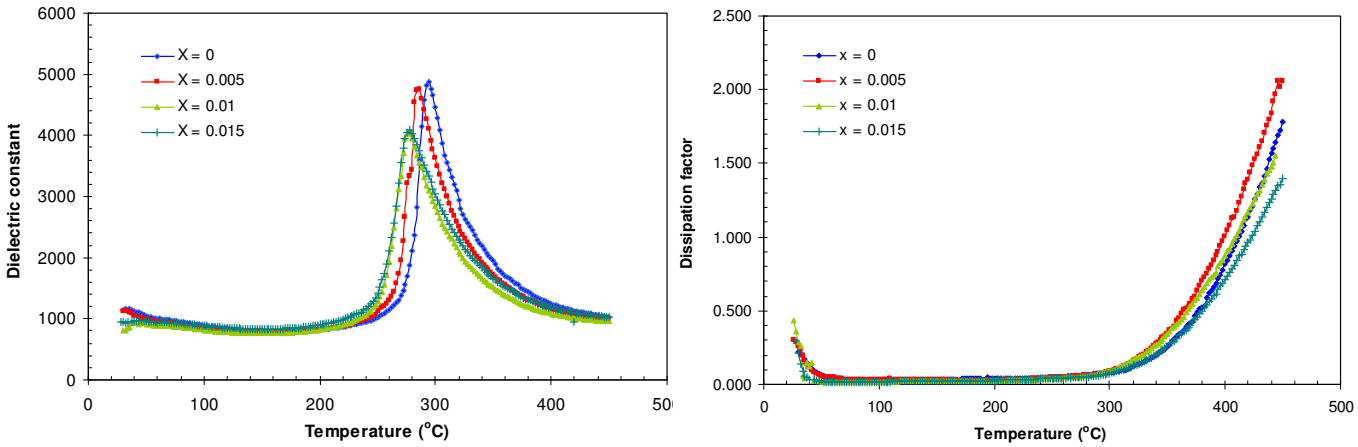
3.5.4 ผลการศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของสารตัวอย่างในระบบ (0.995-x)$\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -0.005MnO –x CuO

สำหรับการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กตริกของชิ้นงานเซรามิก (0.995-x)$\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -0.005MnO –x CuO จะเลือกชิ้นงานที่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิซินเตอร์ในช่วง 1050 – 1060 °C ของทุกสูตร มาสูตรละ 2 ชิ้น เมื่อผ่านการทำอิเล็กโทรดแล้ว นำมาทำการศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 1 kHz พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดๆหนึ่งซึ่งเป็นจุดสูงสุดของพีค คือจุดที่เป็นอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงเฟส หรือ อุณหภูมิคูรี (T_c) และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า (T_c) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และพบว่าสารตัวอย่างเกิดพีค PPT ที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง แสดงว่าเกิดเฟส orthorhombic และ tetragonal ร่วมกัน ซึ่งยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ XRD ดังรูปที่ 3.66 – 3.67 และตารางที่ 3.10

เมื่อพิจารณาชิ้นตัวอย่างที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิเดียวกันแต่เจือ CuO ในปริมาณที่ต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อเจือ CuO ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและ T_c จะมีค่าลดลง และชิ้นตัวอย่างที่ไม่เจือ CuO (x = 0) จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและ T_c สูงที่สุด นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าชิ้นตัวอย่างที่เจือ CuO ในปริมาณที่เท่ากันแต่อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ต่างกันจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าลดลง และอุณหภูมิที่ให้ค่าไดอิเล็กตริกสูงที่สุดคือ 1050 °C เพราะว่าที่อุณหภูมิ 1050 °C มีค่าความหนาแน่นที่สูง สำหรับค่าการสูญเสียในไดอิเล็กตริก พบว่าตัวอย่างที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิเดียวกันแต่เจือ CuO ในปริมาณที่ต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อเจือ CuO ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นค่าสูญเสียทางไดอิเล็กตริกมีแนวโน้มว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงถึง ~ 250 °C ค่าการสูญเสียในไดอิเล็กตริกจะลดลง ซึ่งแสดงว่าการเติม CuO จะสามารถนำชิ้นงานไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากค่าการสูญเสียในไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิสูงลดลง



รูปที่ 3.66 สมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ (0.995-x){$(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}$}$(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - 0.005MnO - xCuO และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.67 สมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ (0.995-x){$(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}$}$(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - 0.005MnO - xCuO และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1060 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.10 สมบัติไดอิเล็กตริกและอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (T_c) ของชิ้นงานเซรามิกในระบบ (0.995-x){$(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}$ $Li_{0.03}$} $(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - 0.005MnO - xCuO และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 – 1060 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ปริมาณ CuO (x; mol)	1050 °C					1060 °C				
	ε_r (RT)	tan δ (RT)*	T_C (°C)	ε_r (T_C)	tan δ (T_{200})**	ε_r (RT)	tan δ (RT)	T_C (°C)	ε_r (T_C)	tan δ (T_{200})
0	1197.2	0.1674	306	5252.5	0.0788	1139.40	0.1283	294	4877.1	0.0318
0.005	1112.3	0.2280	304	4931.0	0.0369	1124.8	0.2090	286	4750.9	0.0264
0.01	1114.7	0.2294	298	4652.7	0.0378	805.0	0.2382	276	4028.2	0.0252
0.015	1007.6	0.2556	288	4274.8	0.0259	942.6	0.2998	278	4034.5	0.0285

* RT หมายถึง อุณหภูมิห้อง

** T_{200} หมายถึง อุณหภูมิ 200 °C

3.6 ผลการศึกษาเซรามิกในระบบ $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ – 0.005 Additive

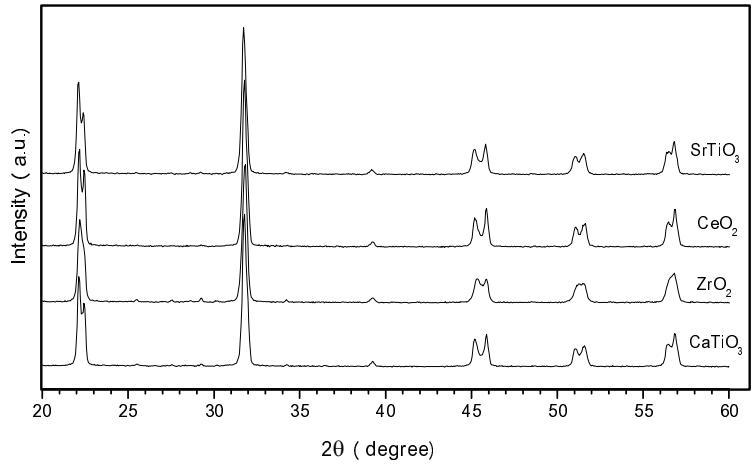
เนื่องจากมีรายงานว่า $CaTiO_3$ [44-45], $SrTiO_3$ [46-47], CeO_2 [48] และ ZrO_2 [49] ช่วยส่งเสริมการแน่นตัว ยับยั้งการโตของเกรนและปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าให้ดีขึ้น จึงได้ทำการเตรียมสารตัวอย่างในระบบ$0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ – 0.005Additive เมื่อ Additive คือ $CaTiO_3$, $SrTiO_3$, CeO_2 และ ZrO_2 ดังสมการต่อไปนี้

- $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - $0.005CaTiO_3$
- $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - $0.005SrTiO_3$
- $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - $0.005CeO_2$
- $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - $0.005ZrO_2$

ด้วยวิธีผสมออกไซด์แบบที่ใช้กันทั่วไป โดยนำไปเผาซินเตอร์แบบกลบด้วยผงอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 1050 – 1100 °C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ได้ผลการวิจัยดังนี้

3.6.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการเกิดเฟสของสารตัวอย่างในระบบ $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ – 0.005 Additive ด้วยเทคนิค XRD

เมื่อนำสารตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่า การเติม $CaTiO_3$, $SrTiO_3$, และ CeO_2 ในปริมาณ 0.005 โมล ลงในระบบ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ สามารถเกิดการฟอร์มตัวเป็นสารละลายของแข็งได้เป็นอย่างดี โดยมีโครงสร้างผลึกแบบ orthorhombic และ tetragonal อยู่ร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.68

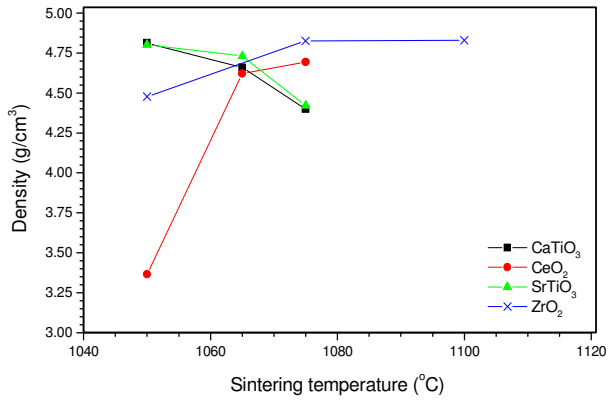


รูปที่ 3.68 พีค XRD ของเซรามิก $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ – 0.005 Additive เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 -1075°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

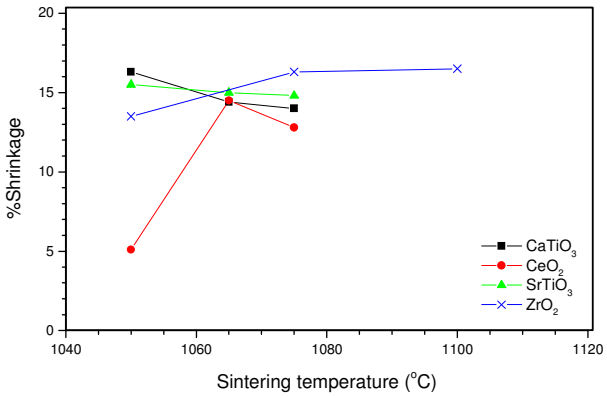
3.6.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารตัวอย่างในระบบ $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ – 0.005 Additive

สำหรับสมบัติทางกายภาพของสารตัวอย่างในระบบ $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ – 0.005 Additive พบว่ามีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของตัว additives ที่ใช้ และอุณหภูมิซินเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.69 – 3.70 ซึ่งพบว่า เมื่อเติม $CaTiO_3$ และ $SrTiO_3$ ในปริมาณ 0.005 โมล ความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนการเติม ZrO_2 และ CeO_2 ในปริมาณ 0.005 โมล ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น คือ 1075 -1100°C และ 1065 °C ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าจะลดลงอีกครั้ง ชิ้นตัวอย่างที่เจือด้วย ZrO_2 และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1075 - 1100°C มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด คือ 4.83 g/cm^3 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าตัว additives ที่เลือกใช้ส่งผลต่อการแน่นตัวและอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิกอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 3.69)

เมื่อพิจารณาค่าการหดตัวของชิ้นงานเซรามิกในระบบนี้ พบว่ามีค่าสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่ได้ (รูปที่ 3.70) โดยการหดตัวมีค่าสูงสุดเมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1075 1100 °C ในสารตัวอย่างที่เติม ZrO_2 คือ 16%



รูปที่ 3.69 ค่าความหนาแน่นของเซรามิก $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - 0.005 additive (additive = $CaTiO_3$, $SrTiO_3$, CeO_2 และ ZrO_2) เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 – 1100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.70 ค่าการหดตัวของเซรามิก $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ - 0.005 additive (additive = $CaTiO_3$, $SrTiO_3$, CeO_2 และ ZrO_2) เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 – 1100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.6.3 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของสารตัวอย่างในระบบ $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ – 0.005 Additive

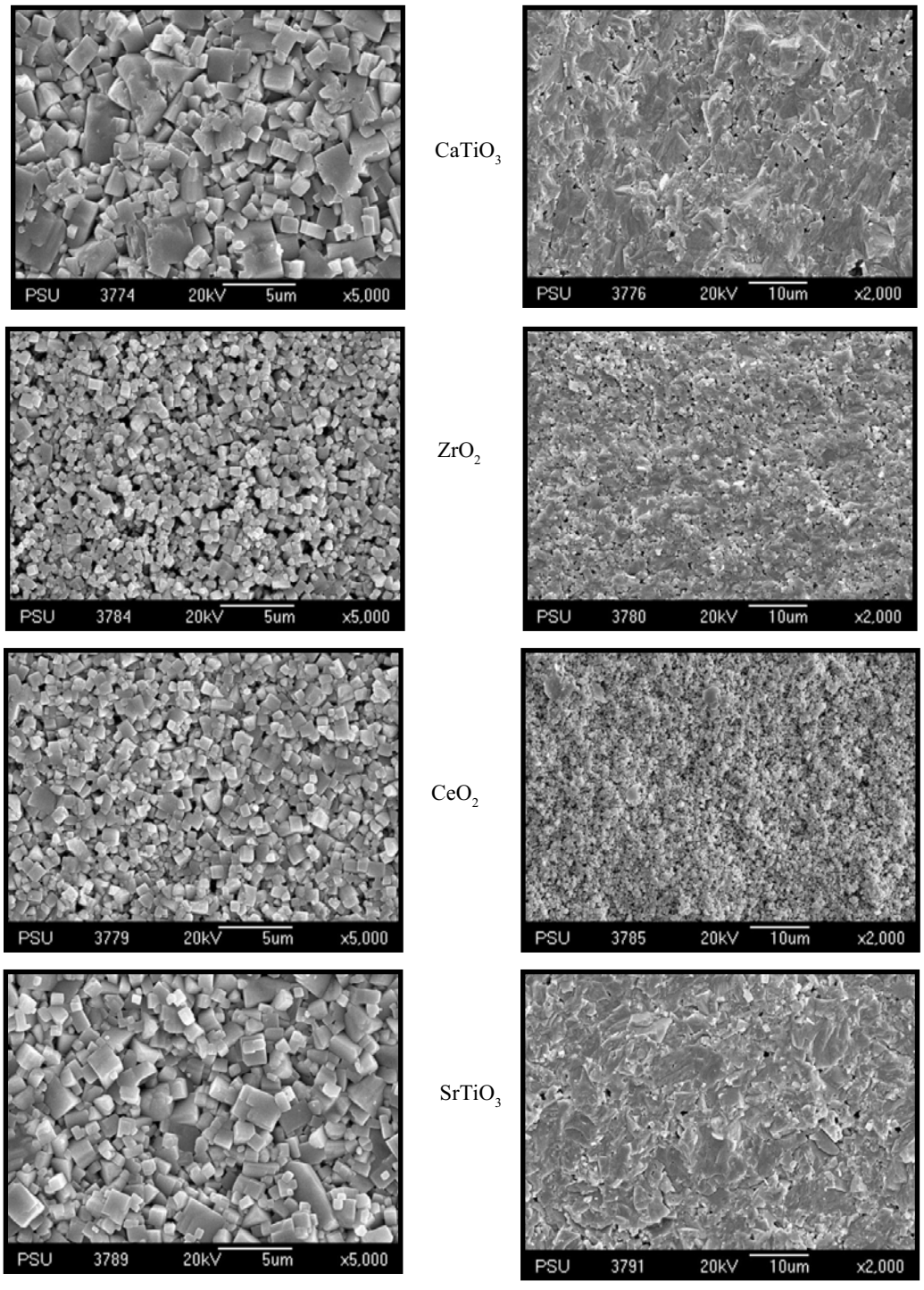
เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของสารตัวอย่างในระบบ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเจือ $CaTiO_3$, ZrO_2, CeO_2 และ $SrTiO_3$ และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C และ 1075 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า เกรนมีลักษณะรูปร่างคล้ายทรงสี่เหลี่ยมและขนาดเล็ก-ใหญ่ปะปนกัน ซึ่งชนิดของสารเจือส่งผลต่อขนาดของเกรนอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 3.71 – 3.72 และตารางที่ 3.11

สำหรับสารตัวอย่างที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C พบว่า การเติม ZrO_2 และ CeO_2 ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ในขณะที่เจือด้วย $CaTiO_3$ และ $SrTiO_3$ ส่งผลให้เกรนเกิดการโตแบบไม่ปกติ

สำหรับสารตัวอย่างที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1075 °C พบว่า ขนาดเกรนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเซรามิกที่เจือด้วย $CaTiO_3$ และ $SrTiO_3$ มีขนาดเกรนที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 ขนาดเกรนของชิ้นงานเซรามิกในระบบ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเติมสารเจือ $CaTiO_3$, ZrO_2, CeO_2 และ $SrTiO_3$ ปริมาณ 0.005 โมล และซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C และ 1075 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

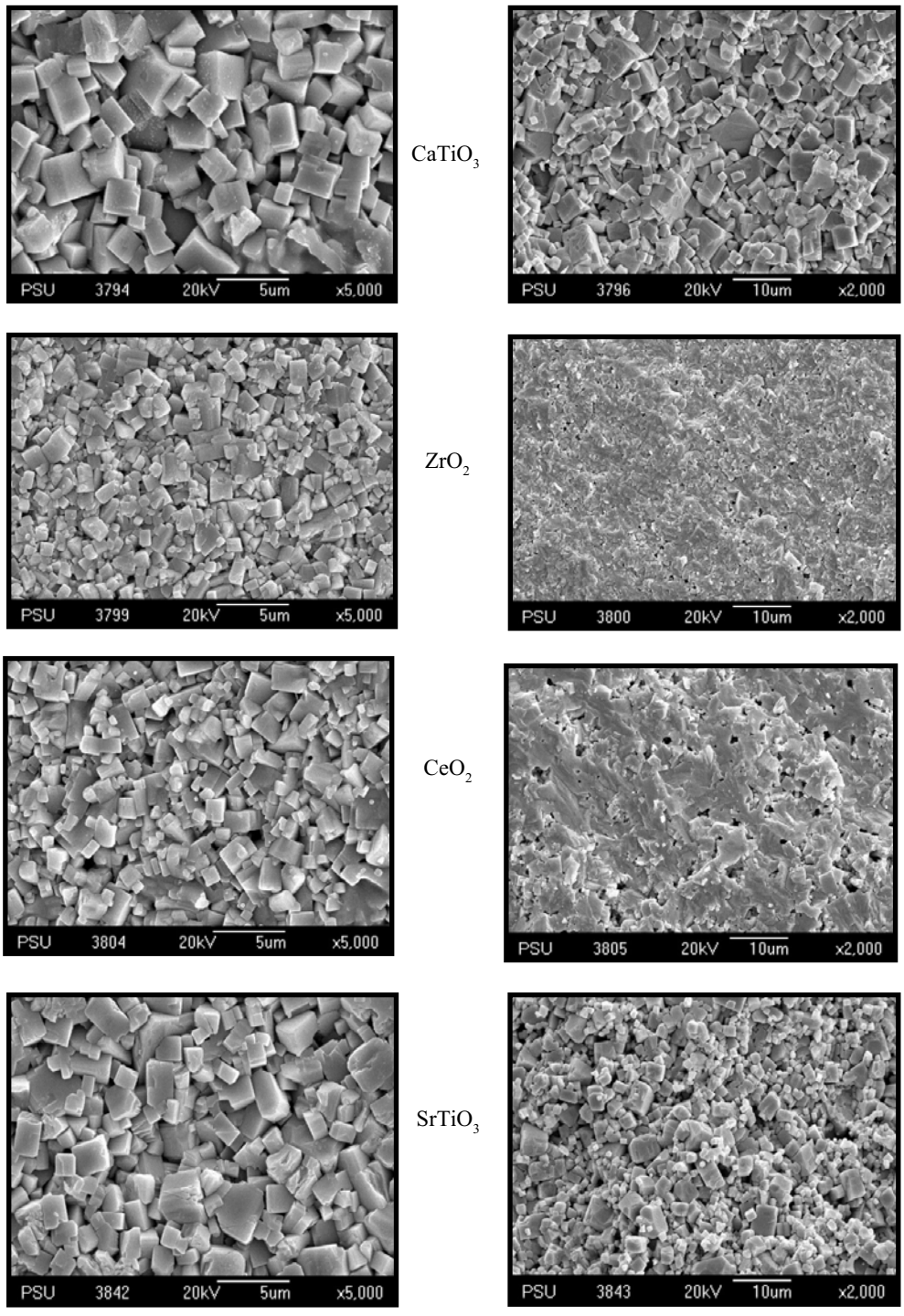
ชนิดของสารเจือ	ขนาดเกรน (μm)	
	1050 °C	1075 °C
$CaTiO_3$	1.2 ± 0.89	1.8 ± 0.44
ZrO_2	0.7 ± 0.11	0.8 ± 0.36
CeO_2	0.5 ± 0.12	0.9 ± 0.47
$SrTiO_3$	0.9 ± 0.56	1.3 ± 0.63



รูปที่ 3.71 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานเซรามิกในระบบ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ **เมื่อ**เติมสารเจือ $CaTiO_3$, ZrO_2, CeO_2 และ $SrTiO_3$ ในปริมาณ 0.005 โมล และซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 ^{o}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

(ก) ผิวหน้า

(ข) ภาคตัดขวาง



รูปที่ 3.72 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานเซรามิกในระบบ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ **เมื่อ**เติมสารเจือ $CaTiO_3$, ZrO_2, CeO_2 และ $SrTiO_3$ ในปริมาณ 0.005 โมล และซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1075 ^{o}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

(ก) ผิวหน้า

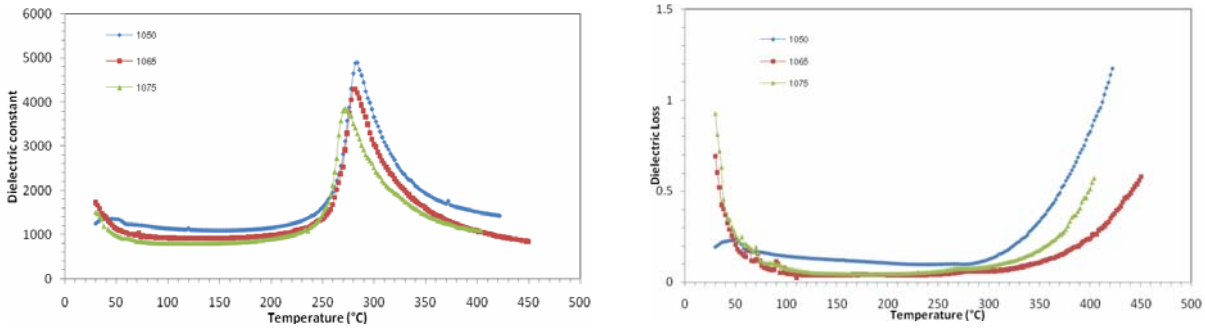
(ข) ภาคตัดขวาง

3.6.4 ผลการศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของสารตัวอย่างในระบบ $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ – 0.005 Additive

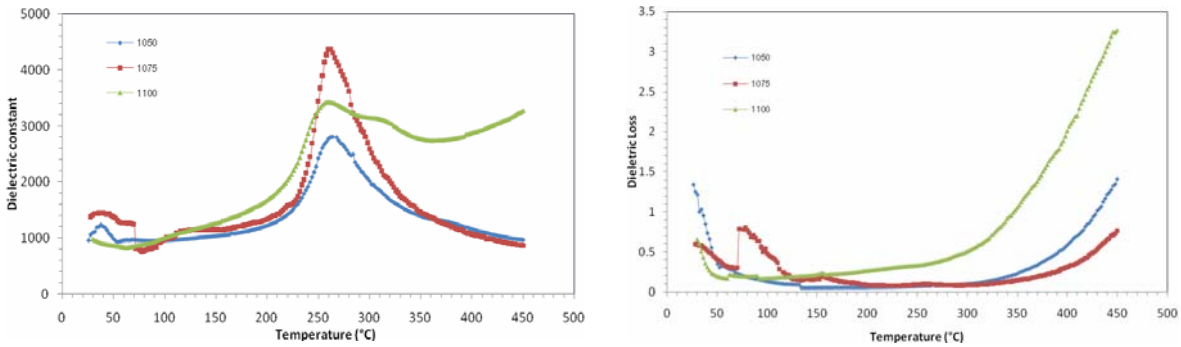
สำหรับสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิของชิ้นงานเซรามิกในระบบ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเจือ $CaTiO_3$, ZrO_2, CeO_2และ $SrTiO_3$ และซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C - 1100 °C พบว่า สมบัติไดอิ - เล็กตริกขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือและอุณหภูมิซินเตอร์ โดยเมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าไดอิเลกตริกลดลง ส่วนค่าการสูญเสียในไดอิเล็กตริกแน้วโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.73 – 3.76

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส T_{O-T} และ T_C (ตารางที่ 3.12) พบว่า มีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือและอุณหภูมิซินเตอร์ โดย T_{O-T} และ T_C มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งชิ้นงานที่เจือด้วย $CaTiO_3$ แสดง T_C ค่าสูงสุด คือ 284 °C เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C และแสดง T_{O-T} ต่ำสุด คือ < 30 °C เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1065 – 1075 °C และนอกจากนี้ยังแสดงค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิเล็กตริกที่ต่ำด้วย

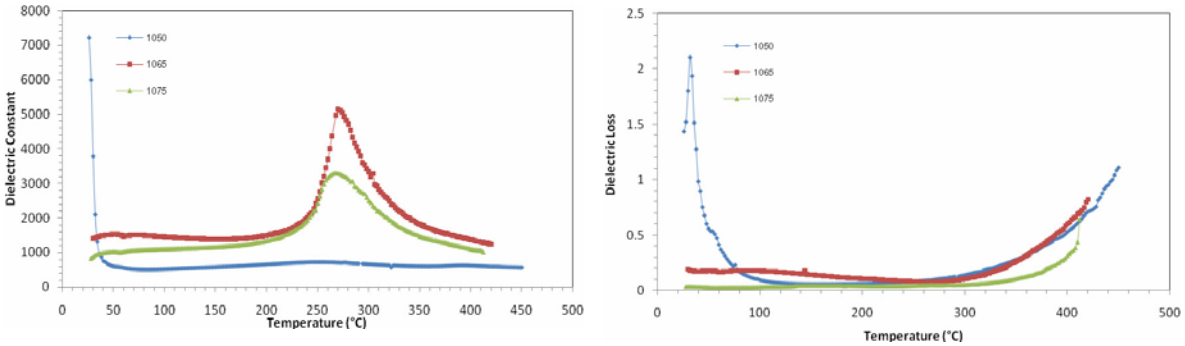
การเปลี่ยนแปลงของค่า T_{O-T} และ T_Cเมื่อเจือด้วย $CaTiO_3$, ZrO_2, CeO_2และ $SrTiO_3$ อาจเนื่องมาจากการเข้าครอบครองตำแหน่ง A และ B sites ของโครงสร้าง perovskite โดยที่ Ca^{2+} และ Sr^{2+} จะเข้าแทนที่ในตำแหน่ง A ในขณะที่ Ce^{4+} และ Zr^{4+} จะเข้าแทนที่ในตำแหน่ง B [21, 50] เนื่องจากมีรัศมีไอออนใกล้เคียงกัน



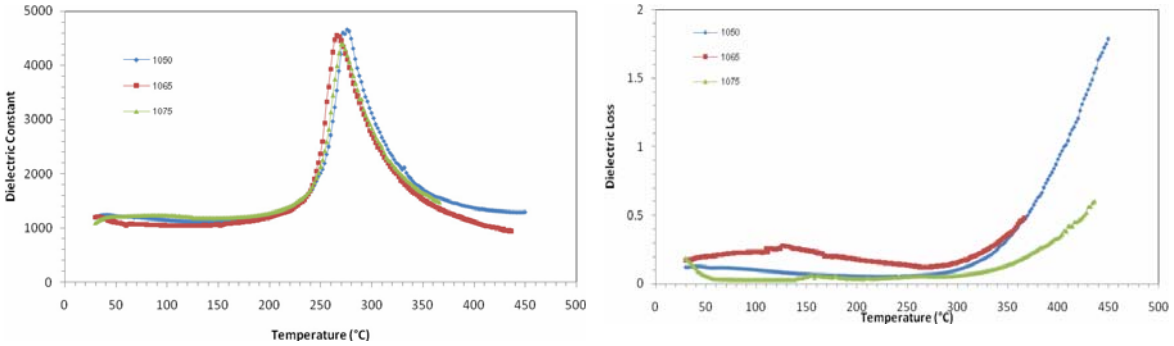
รูปที่ 3.73 สมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (ความถี่ 1 kHz) ของชิ้นงานเซรามิกที่ในระบบ $(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเจือด้วย $CaTiO_3$



รูปที่ 3.74 สมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (ความถี่ 1 kHz) ของชิ้นงานเซรามิกที่ในระบบ $(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเจือด้วย ZrO_2



รูปที่ 3.75 สมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (ความถี่ 1 kHz) ของชิ้นงานเซรามิกที่ในระบบ $(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเจือด้วย CeO_2



รูปที่ 3.76 สมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (ความถี่ 1 kHz) ของชิ้นงานเซรามิกที่ในระบบ $(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเจือด้วย $SrTiO_3$

ตารางที่ 3.12 อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียในไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิของชิ้นงานเซรามิกในระบบ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เมื่อเจือด้วย $CaTiO_3$, ZrO_2, CeO_2และ $SrTiO_3$

สารเจือ	อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	T_C (°C)	ε_r (T_C)	tan δ (T_C)	T_{O-T} (°C)	ε_r (T_{O-T})	tan δ (T_{O-T})
$CaTiO_3$	1050	284	4904	0.1020	44	1338	0.1540
	1065	280	4291	0.0619	< 30	-	-
	1075	274	4081	0.0689	< 30	-	-
ZrO_2	1050	264	2804	0.0716	38	1240	0.6044
	1075	260	4362	0.0959	32	1432	0.5799
	1100	260	3433	0.3489	< 30	-	-
CeO_2	1050	< 30	-	-	-	-	-
	1065	270	5156	0.0745	50	1522	0.1749
	1075	268	3309	0.0483	50	1025	0.025
$SrTiO_3$	1050	276	4653	0.0712	40	1249	0.1294
	1065	270	4394	0.1203	38	1178	0.1813
	1075	266	4555	0.0560	34	1214	0.1619

3.7 ผลการศึกษาสมบัติพิโซอิเล็กตริกของเซรามิกที่เตรียมได้

สำหรับสมบัติพิโซอิเล็กตริกของสารตัวอย่างเซรามิกทุกระบบที่เตรียมได้ พบว่าขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของตัว additive เงื่อนไขที่ใช้ในการเตรียม (อุณหภูมิซินเตอร์ ชนิดของเครื่องบดผสมและเวลาที่ใช้ในการบด และบรรยากาศในการซินเตอร์) และเงื่อนไขในการ poling โดยค่า d_{33} ที่ดีที่สุดของแต่ละระบบ แสดงดังตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 ค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กตริก (d_{33}) ของเซรามิก (1-x) $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$ – x $LiTaO_3$ –based และ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -based

สารตัวอย่าง	ปริมาณสารเจือ (mol)	อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	เวลาเผาแช่ (h)	d_{33} (pC/N)
(1-x) $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$ – x $LiTaO_3$ (x = 0.02, 0.05 และ 0.07)	0.07	1025	2	185, -189
(0.95-x) $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$ – 0.05 $LiTaO_3$ – x $LiSbO_3$ (x = 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.10)	0.04	1075	2	124, -125 เผาแบบกลบอะลูมินา
		1050	2	172, -170 เผาแบบกลบ NKN
(1-x-y) $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$ – x $LiTaO_3$ + y MnO (x = 0.02, 0.05 และ 0.07; y = 0- 1.0 mol%)	x = 0.07, y = 0.01	1025	2	135, -134
$\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ + x wt% Na, K, Li excess (0; 3,3,1; 3,5,1; 3,1,1; 1,3, 1)	3, 1, 1 wt%	1050	2	163, -163
$\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ -vary ball mill type and time ⇢C-24h	-	1050	2	155, -155
(0.995-x)$\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ – 0.005MnO + x CuO (x = 0.005, 0.01, 0.015 และ 0.015)	x = 0	1060	2	213, -213
0.995$\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ – 0.005 Additive ($CaTiO_3$, ZrO_2, CeO_2 และ $SrTiO_3$)	$CaTiO_3$ $SrTiO_3$	1050	2	158, -158 148, -148

4. สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการวิจัย

4.1.1 การเตรียมเซรามิกในระบบ (1-x)($Na_{0.5}K_{0.5}$)NbO_3 –x $LiTaO_3$

สำหรับการเตรียมเซรามิก (1-x)($Na_{0.5}K_{0.5}$)NbO_3 –x $LiTaO_3$ ที่ค่า x ต่างๆ คือ 0.02, 0.05 และ 0.07 และเจือด้วยสารเจือชนิดต่างๆ คือ MnO ปริมาณ 0 – 1.0 mol% และ $LiSbO_3$ ปริมาณ 0.02 – 0.10 mol เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 -850 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 1010 – 1100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C ต่อนาที พบว่า แนวโน้มของอุณหภูมิซินเตอร์จะลดลง เมื่ออัตราส่วนของ x, ปริมาณ MnO และ $LiSbO_3$ มีค่าเพิ่มขึ้น และจากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวอย่าง พบว่า ความหนาแน่น การหดตัว โครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึก สมบัติไดอิเล็กตริก และพิโซอิเล็กตริก มีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซินเตอร์, ค่า x, ชนิดและปริมาณของสารเจือ และบรรยากาศที่ใช้ในการซินเตอร์ ดังนี้

1. สารตัวอย่างในระบบ (1-x)($Na_{0.5}K_{0.5}$)NbO_3 –x $LiTaO_3$ + y mol% MnO

- แสดง polymorphic phase boundary (PPB) ระหว่าง orthorhombic และ tetragonal ที่อุณหภูมิห้องเมื่อ x = 0.05; y = 0.2 – 1.0 mol% ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 – 1075 °C, x = 0.02 และ 0.07; y = 0 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1025 °C และ x = 0.07; y = 0.5 – 1.0 mol% ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C

- ค่าความหนาแน่นสูงสุดเมื่อ x = 0.05; y = 0.5 mol% ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C คือ 4.40 ± 0.01 g/cm^3

- โครงสร้างจุลภาคแสดงลักษณะเกรนเกิดการโตแบบไม่ปกติและมีรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยมทุกสารตัวอย่าง โดยเกรนมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ MnO เพิ่มขึ้น

- สารตัวอย่าง x = 0.05; y = 0.5 mol% มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องสูงสุด คือ 1040 และมีค่าแฟกเตอร์การสูญเสียน้อยที่สุด คือ 0.277 (ที่ความถี่ 1 kHz) นอกจากนี้ยังพบว่าการเติม MnO สามารถลดค่า tan δ ให้ต่ำลง สำหรับสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิแสดงว่า อุณหภูมิ T_{O-T} มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติม y มากขึ้นและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นสำหรับทุกปริมาณของ x โดยค่า T_{O-T} จะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องมากที่สุดเมื่อ x = 0.05 โมล ในขณะที่ อุณหภูมิ T_C มีแนวโน้มลดลงเมื่อ y และอุณหภูมิซินเตอร์มากขึ้นสำหรับทุกปริมาณของ x สำหรับสมบัติพิโซอิเล็กตริกที่ดีที่สุด (d_{33}) คือ 185 pC/N พบในสารตัวอย่างเมื่อ x = 0.07; y = 0

2. สารตัวอย่างในระบบ (0.95-n) ($Na_{0.5}K_{0.5}$)NbO_3 – 0.05 $LiTaO_3$ – n $LiSbO_3$

- แสดง polymorphic phase boundary (PPB) ระหว่าง orthorhombic และ tetragonal ที่อุณหภูมิห้องเมื่อ n = 0.02 – 0.10 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C และมีเฟส $K_6Li_4Nb_{10}O_{30}$ เกิดร่วมด้วย

- ค่าความหนาแน่นสูงสุดเมื่อ n = 0.10 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C คือ 4.44 ± 0.01 g/cm^3

- โครงสร้างจุลภาคแสดงลักษณะเกรนเกิดการโตแบบไม่ปกติและมีรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยมทุกสารตัวอย่าง โดยเกรนมีขนาดลดลงเมื่อปริมาณ n เพิ่มขึ้น

- สารตัวอย่าง n = 0.04 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องสูงสุด คือ 1510 และมีค่าแฟกเตอร์การสูญเสียน้อยที่สุด คือ 0.7 (ที่ความถี่ 1 kHz) สำหรับสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิแสดงว่าการเติม $LiSbO_3$ ไม่ส่งผลต่อ T_{O-T} มากนัก โดยทุกสารตัวอย่างแสดง T_{O-T} ที่อุณหภูมิประมาณ 55 °C ในขณะที่ T_C

ขึ้นอยู่กับปริมาณ $LiSbO_3$ ที่เติมลงไปอย่างมีนัยสำคัญ คือ T_C มีค่าลดลงจาก 422 °C สำหรับสารตัวอย่างที่ไม่เติม $LiSbO_3$ ไปสู่ 340 °C เมื่อเติม $LiSbO_3$ ปริมาณ 0.06 - 0.10 โมล สำหรับสมบัติพิโซอิเล็กตริกที่ดีที่สุด (d_{33}) คือ 124 pC/N พบในสารตัวอย่างเมื่อ n = 0.04

- สำหรับการศึกษาอิทธิพลของบรรยากาศที่ใช้ในการซินเตอร์โดยการแปรค่าผงที่ใช้รองพื้นในครุซิเบิลเพื่อวางสารตัวอย่างหรือกลบสารตัวอย่างเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการซินเตอร์ ในสารตัวอย่าง n = 0.04 พบว่า สารตัวอย่างที่ซินเตอร์แบบกลบด้วยผง NKN จะแสดง polymorphic phase boundary (PPB) ระหว่าง orthorhombic และ tetragonal ที่อุณหภูมิห้อง มีค่าความหนาแน่น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และสมบัติพิโซอิเล็กตริกที่ดีที่สุด (d_{33}) คือ 4.38 ± 0.01 g/cm^3, 998 และ 172 pC/N ตามลำดับ และมีค่าแฟกเตอร์การสูญเสียน้อยที่สุด คือ 0.115 นอกจากนี้พบว่าบรรยากาศในการเผาซินเตอริงไม่ส่งผลต่อ T_{O-T} แต่จะส่งผลต่อ T_C อย่างชัดเจน โดย T_C ของสารตัวอย่างที่เผาซินเตอร์โดยใช้ผงอะลูมินามีค่าสูงกว่าการใช้ผง NKN

4.1.2 การเตรียมเซรามิกในระบบ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$

สำหรับการเตรียมเซรามิก $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ ที่เจือด้วยสารเจือชนิดต่างๆ คือ ปริมาณของสารตั้งต้นส่วนเกิน ในที่นี้คือ Na_2CO_3, K_2CO_3 และ Li_2CO_3 ในปริมาณ Na, K, Li = 0; 3, 3, 1; 3, 5, 1; 3, 1, 1 และ 1, 3, 1 wt%, MnO ปริมาณ 0.05 mol และ CuO ปริมาณ 0 – 0.015 mol, $CaTiO_3$, ZrO_2, CeO_2 และ $SrTiO_3$ ปริมาณ 0.05 mol นอกจากนี้ทำการศึกษาชนิดของเครื่องบดผสมสารและเวลาที่ใช้ในการบดด้วย นำสารตัวอย่างไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 1025 – 1100 °C เป็นเวลา 2 – 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C ต่อนาที พบว่า แนวโน้มของอุณหภูมิซินเตอร์จะลดลงเมื่อเจือด้วย CuO, $CaTiO_3$, $SrTiO_3$ และใช้เครื่องบดผสมสารพลังงานสูง แนวโน้มของอุณหภูมิซินเตอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเจือด้วย Na, K, Li ส่วนเกิน, ZrO_2 และ CeO_2 และจากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวอย่าง พบว่า ความหนาแน่น การหดตัว โครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึก สมบัติไดอิเล็กตริก และพิโซอิเล็กตริก มีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซินเตอร์, ค่า x, ชนิดและปริมาณของสารเจือ ดังนี้

1. สารตัวอย่างในระบบ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$

- แสดงโครงสร้างผลึกแบบ orthorhombic ทั้งการใช้เครื่องบดผสมสารพลังงานสูง (high energy ball mill; planetary ball mill) และเครื่องบดผสมสารแบบที่ใช้ทั่วไป (conventional ball mill) และทุกปริมาณของ Na, K, Li ส่วนเกิน

- ค่าความหนาแน่นสูงสุดพบในสารตัวอย่างที่ผ่านการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมพลังงานสูง (H) และสารตัวอย่างที่เติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณ 3, 5, 1 และ 3, 1, 1 wt% เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C โดยมีค่า 4.85 – 4.86 g/cm^3

- โครงสร้างจุลภาคแสดงลักษณะเกรนเกิดการโตแบบไม่ปกติ โดยเกรนมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น และรูปร่างของเกรนจะเปลี่ยนจากทรงสี่เหลี่ยมเป็นทรงกลมเมื่อใช้เวลาในการบดผสมนานขึ้นและเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น

- สารตัวอย่างเซรามิกที่เตรียมจากการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมพลังงานสูง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสารตัวอย่างที่เติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณ 3, 5, 1 wt% ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มี

สมบัติทางไฟฟ้าที่ดี คือ มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกน้อย เท่ากับ 758, 766, 0.051 และ 0.042 ตามลำดับ สำหรับสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิแสดงว่า อุณหภูมิ T_{O-T} มีค่าลดลง และ T_C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการบดผสมเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิ T_C มีค่าลดลงเมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกิน โดย T_C มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเติม Na, K, Li ส่วนเกิน ปริมาณ 3, 1, 1 wt% สำหรับสมบัติพิโซอิเล็กตริกที่ดีที่สุด (d_{33}) คือ 155 และ 163 pC/N พบในสารตัวอย่างที่ใช้การบดผสมด้วยเครื่อง convention ball-milling เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และสารตัวอย่างที่เติม เติม Na, K, Li ส่วนเกินในปริมาณ 3, 1, 1 wt%

2. สารตัวอย่างในระบบ $(0.995-x)\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$-0.005MnO + xCuO

- แสดง polymorphic phase boundary (PPB) ระหว่าง orthorhombic และ tetragonal ที่อุณหภูมิห้องเมื่อ x = 0 – 0.015 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1060 °C

- ค่าความหนาแน่นสูงสุดเมื่อ x = 0 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C คือ 4.73 ± 0.01 g/cm^3

- โครงสร้างจุลภาคแสดงลักษณะเกรนเกิดการโตแบบไม่ปกติ โดยเมื่อเจือ CuO ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นขนาดเกรนเฉลี่ยจะใหญ่ขึ้น และนอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์สูงขึ้นขนาดเกรนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วย

- สารตัวอย่าง x = 0 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องสูงสุด สำหรับสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิแสดงว่า การเติม CuO ไม่ส่งผลต่อ T_{O-T} มากนัก โดยทุกสารตัวอย่างแสดง T_{O-T} ที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ในขณะที่ T_C ขึ้นอยู่กับปริมาณ CuO ที่เติมลงไปอย่างมีนัยสำคัญ คือ T_C มีค่าลดลงจาก 306 °C สำหรับสารตัวอย่างที่ไม่เติม CuO ไปสู่ 288°C เมื่อเติม CuO ปริมาณ 0.015 โมล และส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงด้วยเช่นกัน สำหรับสมบัติพิโซอิเล็กตริกที่ดีที่สุด (d_{33}) คือ 213 pC/N พบในสารตัวอย่างเมื่อ x = 0

3. สารตัวอย่างในระบบ $0.995\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$-0.005 Additive

- แสดง polymorphic phase boundary (PPB) ระหว่าง orthorhombic และ tetragonal ที่อุณหภูมิห้องในทุกสารตัวอย่าง

- ค่าความหนาแน่นสูงสุดเมื่อเจือด้วย ZrO_2 และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1075 – 1100 °C คือ 4.83 ± 0.01 g/cm^3

- โครงสร้างจุลภาคของสารตัวอย่างที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C พบว่า การเติม ZrO_2 และ CeO_2 ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ในขณะที่เจือด้วย $CaTiO_3$ และ $SrTiO_3$ ส่งผลให้เกรนเกิดการโตแบบไม่ปกติ สำหรับสารตัวอย่างที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1075 °C พบว่า ขนาดเกรนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเซรามิกที่เจือด้วย $CaTiO_3$ และ $SrTiO_3$ มีขนาดเกรนที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น

- สมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิแสดงว่า อุณหภูมิ T_{O-T} และ T_C มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งชิ้นงานที่เจือด้วย $CaTiO_3$ แสดง T_C ค่าสูงสุด คือ 284 °C เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C และแสดง T_{O-T} ต่ำสุด คือ < 30 °C เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1065 – 1075 °C และนอกจากนี้ยังแสดงค่าแฟกเตอร์การสูญเสียในไดอิเล็กตริกที่ต่ำด้วย สำหรับสมบัติพิโซอิเล็กตริกที่ดีที่สุด (d_{33}) คือ 158 pC/N พบในสารตัวอย่างเมื่อเจือด้วย $CaTiO_3$

4.2 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 สำหรับระบบ $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ – $LiTaO_3$ควรเลือกศึกษาในกรณีที่ปริมาณของ Li และ Ta ไม่เท่ากัน เพราะจะทำให้ได้สมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น

4.2.2 สารในระบบนี้มีจุดเหลวค่อนข้างต่ำ จึงควรศึกษาหาตัวเติมเพื่อช่วยลดอุณหภูมิซินเตอร์ให้ต่ำลง เพื่อช่วยป้องกันการสูญเสียของออกไซด์ประเภทอัลคาไลน์

4.2.3 เนื่องจากสมบัติทางไฟฟ้ามีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซินเตอร์ ดังนั้น จึงควรวัดค่าทุกอุณหภูมิ

4.2.4 ศึกษาหาตัวเติมที่เหมาะสมเพิ่มเติมในระบบ $\{(Na_{0.5}K_{0.5})_{0.97}Li_{0.03}\}(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O_3$ เพราะมีแนวโน้มแสดงสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี

เอกสารอ้างอิง

1. Jaffe B, Cook W R, Jaffe H. Piezoelectric Ceramics. Academic press, New York, 1971, pp. 92, 185 – 212.
2. Waanders J W, Piezoelectric Ceramics-Properties and Applications. Philips Component, Eindhoven, 1991.
3. Maeder M D, Damjanovic D, Setter N. Lead Free Piezoelectric materials, J Electroceram 2004; 13 : 385 – 392.
4. Cross E. Materials science: Lead-free at last. Nature 2004; 432 : 24-25.
5. Singh K, Lingwal V, Bhatt S C, Panwar, Semwal B S. Dielectric properties of potassium sodium niobate mixed system. Mater Res Bull 2001; 36 : 2365 – 2374.
6. Wang R, Xie R, Sekiya T, Shimojo. Fabrication and characterization of potassium-sodium niobate piezoelectric ceramics by spark-plasma-sintering method. Mater Res Bull 2004; 39 : 1709 – 1715.
7. Tashiro S, Nagata K. Influence of Mixing condition and nonstoichiometry on piezoelectric properties of (K, Na, Pb)NbO_3 ceramics. Jpn J App Phys 2004; 43[9B] : 6711 – 6715.
8. Ichiki M, Zhang L, Tanaka M, Maeda R. Electrical properties of piezoelectric sodium-potassium niobate. J Eur Ceram Soc 2004; 24 : 1693 – 1697.
9. Guo Y, Kakimoto K-I, Ohsato H. Dielectric and piezoelectric properties of lead-free $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ – $SrTiO_3$ ceramics. Solid State Commun 2004; 129 : 279 – 284.
10. Guo Y, Kakimoto K-I, Ohsato H. $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ – $LiTaO_3$ lead-free piezoelectric ceramics. Mater Lett 2005; 59 : 241-244.
11. Park S-H, Ahn C-W, Nahm S, Song J-S. Microstructure and piezoelectric properties of ZnO-added $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ ceramics. Jpn J Applied Phys 2004; 43[8B] : L1072 – L1074.
12. Guo Y, Kakimoto K-I, Ohsato H. Structure and electric properties of lead-free $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ – $BaTiO_3$ ceramics. Jpn J Applied Phys 2004; 43[9B] : 6662 – 6666.
13. Matsubara M, Yamaguchi Y, Kikuta K, Hirano S-I. Sinterability and piezoelectric properties of (K, Na)NbO_3 ceramics with novel sintering aid. Jpn J Applied Phys 2004; 43[10] : 7159 – 7163.
14. Saito Y, Takao H, Tani T, Nonoyama T, Takatori K, Homma T. Nagaya T, Nakamura M. Lead-free piezoelectrics. Nature 2004; 84 - 87.
15. Matsubara M, Yamaguchi T, Sakamoto W, Kikuta K, Yogo T, Hirano S –I. Processing and piezoelectric properties of lead-free (K, Na)(Nb, Ta)O_3 ceramics. J Am Ceram Soc 2005; 88[5] : 1190 – 1196.
16. Hollenstein E, Davis M, Damjanovic D, Setter N. Piezoelectric properties of Li - and Ta – modified $(K_{0.5}Na_{0.5})NbO_3$ ceramics. App Phys Lett 2005; 87 : 182905.
17. Zhen Y, Li J-F. Normal sintering of (K, Na)NbO_3-based ceramics: influence of sintering temperature on densification, microstructure, and electrical properties. J Am Ceram Soc 2006; 88[12] : 3669 - 3675.

18. Saito Y, Takao H. High performance lead-free piezoelectric ceramics in the (K, Na)NbO_3- $LiTaO_3$ solid solution system. Ferroelectrics 2006; 338 : 17 - 32.
19. Yoo J, Lee K, Chung K, Lee S, Kim K. Piezoelectric and dielectric properties of (LiNaK)(NbTaSb)O_3 ceramics with variation in poling temperature. Jpn App Phys 2006; 45[9B] : 7444 – 7448.
20. Du H, Li Z, Fusheng T, Qu S, Pei Z, Zhou W. Preparation and piezoelectric properties of $(K_{0.5}Na_{0.5})NbO_3$ lead-free piezoelectric ceramics with pressure-less sintering. Mater Sci Eng B 2006; 131 : 83 – 87.
21. Chang Y, Yang Z, Wei L, Liu B. Effects of $AETiO_3$ additions on phase structure, microstructure and electrical properties of $(K_{0.5}Na_{0.5})NbO_3$ ceramics. Mater Sci Eng A 2006; 437 : 301 – 305.
22. Zuo R, RÖdel J, Chen R, Li L. Sintering and electrical properties of lead-free $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$ piezoelectric ceramics. J. Am Ceram Soc 2006; 89[6] : 2010 – 2015.
23. Takao H, Saito Y, Aoki Y, Horibuchi K. Microstructural evolution of crystalline-oriented $(K_{0.5}Na_{0.5})NbO_3$ piezoelectric ceramics with a sintering aids of Cuo. J. Am Ceram Soc 2006; 89[6] : 1951 - 1956.
24. Pettry J-R G, Saïd S, Marchet P, Mercurio J-P. Sodium-bismuth titanate based lead-free ferroelectric materials. J. Eur Ceram Soc 2004; 24 : 1165 - 1169.
25. Hao X, Yang Y F. The dielectric and ferroelectric properties of tungsten bronze ferroelectric $(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.1}(Sr_{0.5}Ba_{0.5})_{0.95}Nb_2O_6$ ceramic. J Mater Sci 2007; 42 : 3276 – 3279.
26. Raghavender M, Kumar G S, Prasad G. Dispersion of relaxation time in impedance measurements of $Na_{1-x}K_xNbO_3$ mixed ceramic. Ferroelectrics 2005; 324 : 43 – 47.
27. Li J-F, Wang K, Zhang B-P, Zhang L-M. Ferroelectric and piezoelectric properties of fine-grained $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$ lead-free piezoelectric ceramics prepared by spark plasma sintering. J. Am Ceram Soc 2006; 89[2] : 706 - 709.
28. Cross L E. Electric Double Hysteresis in $(K_xNa_{1-x})NbO_3$ Single Crystals. Nature 1958; 181 : 178 - 179.
29. Ringgaard E, Wurlitzer T. Lead-free piezoceramics based on alkali niobates. J. Eur Ceram Soc 2005; 25 : 2701 - 2706.
30. Egerton L, Dillon D D. Piezoelectric and dielectric properties of ceramics in the system potassium-sodium niobate. J. Am Ceram Soc 1959; 42[9] : 438 - 442.
31. Jaeger R E, Egerton L. Hot pressing of potassium-sodium niobates. J. Am Ceram Soc 1962; 45[5] : 209 - 213.
32. Haerting G H. Properties of hot-pressed ferroelectric alkali niobate ceramics. J Am Ceram Soc 1967; 50[6] : 329 - 330.
33. Du H, Tang F, Luo F, Zhou W, Qu S, Pei Z. Effect of poling condition on piezoelectric properties of $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$-$LiNbO_3$ lead-free piezoelectric ceramics. Mater Sci Eng B 2007; 137 : 175 -179.
34. Du H, Tang F, Luo F, Zhu D, Qu S, Pei Z, Zhou W. Influence of sintering temperature on piezoelectric properties of $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$-$LiNbO_3$ lead-free piezoelectric ceramics. Mater Res Bull 2007; 42[9] : 1594 – 1601.

35. Shrout T R, Zhang S. Lead-free piezoelectric ceramics: Alternatives for PZT?. J Electroceram 2007; 19 : 111 – 124.
36. Askeland D R. The Science and Engineering of Materials. Chapman & Hall, London, 1996, pp. 67 -68.
37. Powder Diffraction File No. 48-0997, International Centre for Diffraction Data, Newton Squre, PA, 2001.
38. Skidmore T A, Milne S J. Temperature stability of ($[Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3]_{0.93}$–$[LiTaO_3]_{0.07}$) lead-free piezoelectric ceramics. Appl Phys Lett 2009; 94 : 222902.
39. Powder Diffraction File No. 84-2003, International Centre for Diffraction Data, Newton Squre, PA, 2001.
40. Skidmore T A, Milne S J. Phase development during mixed-oxided processing of a $[(Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3)]_{1-x}$ – $[LiTaO_3]_x$ powder. J Mater Res 2007; 22 : 2265 - 2272.
41. Kim M-S, Lee D-S, Park E-C, Jeong S -J, Song J-S. Effect of Na_2O additions on the sinterability and piezoelectric properties of lead-free $95(Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3)$-$5LiTaO_3$ ceramics. J Eur Ceram Soc 2007; 13-15 : 4121 - 4124.
42. Lin D, Kwok K W, Chan H L W. Piezoelectric and ferroelectric properties of $K_xNa_{1-x}NbO_3$ lead-free ceramics with MnO_2 and CuO doping. J Alloy Comp 2008; 461 : 273 – 278.
43. Seo I -T, Cho K -H, Park H –Y, Park S-J, Choi M-K, Nahm S. Effect of CuO on the sintering and piezoelectric properties of $0.95(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ – $0.05SrTiO_3$ lead-free piezoelectric ceramics. J Am Ceram Soc 2008; 91[12] : 3955 - 3960.
44. Chang R-C, Chu S-Y, Lin Y-F, Hong C-S, Wong Y-P. An investigation of $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ – $CaTiO_3$ based lead-free ceramics and surface acoustic wave devices. J Eur Ceram Soc 2007; 27 : 4453 - 4460.
45. Wu J, Xiao D, Wang Y, Wu W, Zhang B, Li Jing, Zhu J. $CaTiO_3$-modified $[(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.94}Li_{0.06}](Nb_{0.94}Sb_{0.06})O_3$ lead-free piezoelectric ceramics with improved temperature stability. Scripta Mater 2008; 59 : 750 – 752.
46. Chang R-C, Chu S-Y, Wong Y-P, Hong C-S, Huang H-H. The effects of sintering temperature on the properties of lead-free $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ – $SrTiO_3$ ceramics. J Alloy Comp 2008; 456 : 308 - 312.
47. Cho K-H, Park H-Y, Ahn C-W, Nahm S, Uchino K, Park S-H, Lee H-G, Lee H-J. Microstructure and piezoelectric properties of $0.95(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ – $0.05SrTiO_3$ ceramics. . J Am Ceram Soc 2007; 90[6] : 1946 - 1949.
48. Lee T, Kwok K W, Chan H L W. Preparation and piezoelectric properties of CeO_2-added $(Na_{0.475}K_{0.475}Li_{0.05})(Nb_{0.92}Ta_{0.05}Sb_{0.03})O_3$ lead-free ceramics. J Phys D: Appl Phys 2008; 41 : 155402.
49. Malic B, Bernard J, Bencan A, Kosec M. Influence of zirconia addition on the microstructure of $K_{0.5}$ $Na_{0.5}NbO_3$ ceramics. J Eur Ceram Soc 2008; 28 : 1191 - 1196.
50. http://en.wikipedia.org/wiki/Ionic_radius (download เมื่อ 1 กรกฎาคม 2552)

OUTPUT
จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

OUTPUT จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานที่ได้รับ/จัดส่งเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ จำนวนทั้งสิ้น 3 เรื่อง ได้แก่

1.1 ผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์แล้ว 2 เรื่อง

- **Bomlai P**, Sinsap P, Muensit S, Milne S J. Effect of MnO on the phase development, microstructures, and dielectric properties of 0.95 $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ – 0.05$LiTaO_3$ ceramics. J Am Ceram Soc 2008; 91[2] : 624 - 627. (ดูเอกสารแนบในภาคผนวก ก)
- **Bomlai P**, Sukprasert S, Muensit S, Milne S J. Reaction-sintering of lead-free piezoceramic compositions: (0.95-x) $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ – 0.05$LiTaO_3$-x $LiSbO_3$. J Mater Sci 2008; 43 : 6116 – 6121. (ดูเอกสารแนบในภาคผนวก ข)

1.2 ผลงานวิจัยที่ได้จัดส่งเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ 1 เรื่อง

- **Bomlai P**, Muensit S, Milne S J. Phase transition behavior and dielectric properties of $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ – $LiTaO_3$- $LiSbO_3$ lead-free piezoceramic. (Manuscript submitted to ScienceAsia) (ดูเอกสารแนบในภาคผนวก ค)

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ คือ ประโยชน์เชิงวิชาการ

- สามารถสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ขึ้นมาใช้แทน PZT
- สามารถใช้งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาการเรียนการสอนในหลักสูตรวัสดุศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- สามารถผลิตผลงานวิจัยเพื่อนำเสนอในงานประชุมเชิงวิชาการ และตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการทั้งในระดับชาติและนานาชาติได้
- สามารถผลิตนักวิจัยรุ่นใหม่ที่มีความรู้ความสามารถ และประสบการณ์ในการทำงานวิจัยที่มีคุณภาพต่อไปได้ในอนาคต
- สามารถสร้างเครือข่ายความร่วมมือในการทำงานวิจัยกับกลุ่มวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งจากภายในและนอกสถาบันได้

3. การนำผลงานไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

4.1 การเข้าร่วมนำเสนอผลงานในงานประชุมเชิงวิชาการ

- ได้ไปเสนอผลงาน ในที่ประชุมการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33 ที่มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราชเมื่อวันที่ 18 – 20 ตุลาคม 2550 (ดูเอกสารแนบในภาคผนวก ง)

Bomlai P, Muensit S, Milne S. J. 2007. Properties of Mn-doped 0.95$Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$ - 0.05$LiTaO_3$ lead-free ceramics. Proc. 33rd Congress on Science and Technology of Thailand, Nakhon Si Thammarat, Thailand, Oct. 18-20, 2007.

- ได้ไปเสนอผลงานวิจัยในการประชุม “นักวิจัยรุ่นใหม่..พบ..เมธีวิจัยอาวุโส สกว ครั้งที่ 8.” ณ โรงแรม ฮอลิเดย์อินน์ รีสอร์ท รีเจนท์ ชะอำ จังหวัดเพชรบุรี ในระหว่างวันที่ 16 – 18 ตุลาคม 2551

Bomlai P, Muensit S, Milne S. Phase development, densification, microstructures ,and dielectric properties of $(1-x)Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$ - x $LiTaO_3$ ceramics with MnO addition. (ดูเอกสารแนบในภาคผนวก จ)