

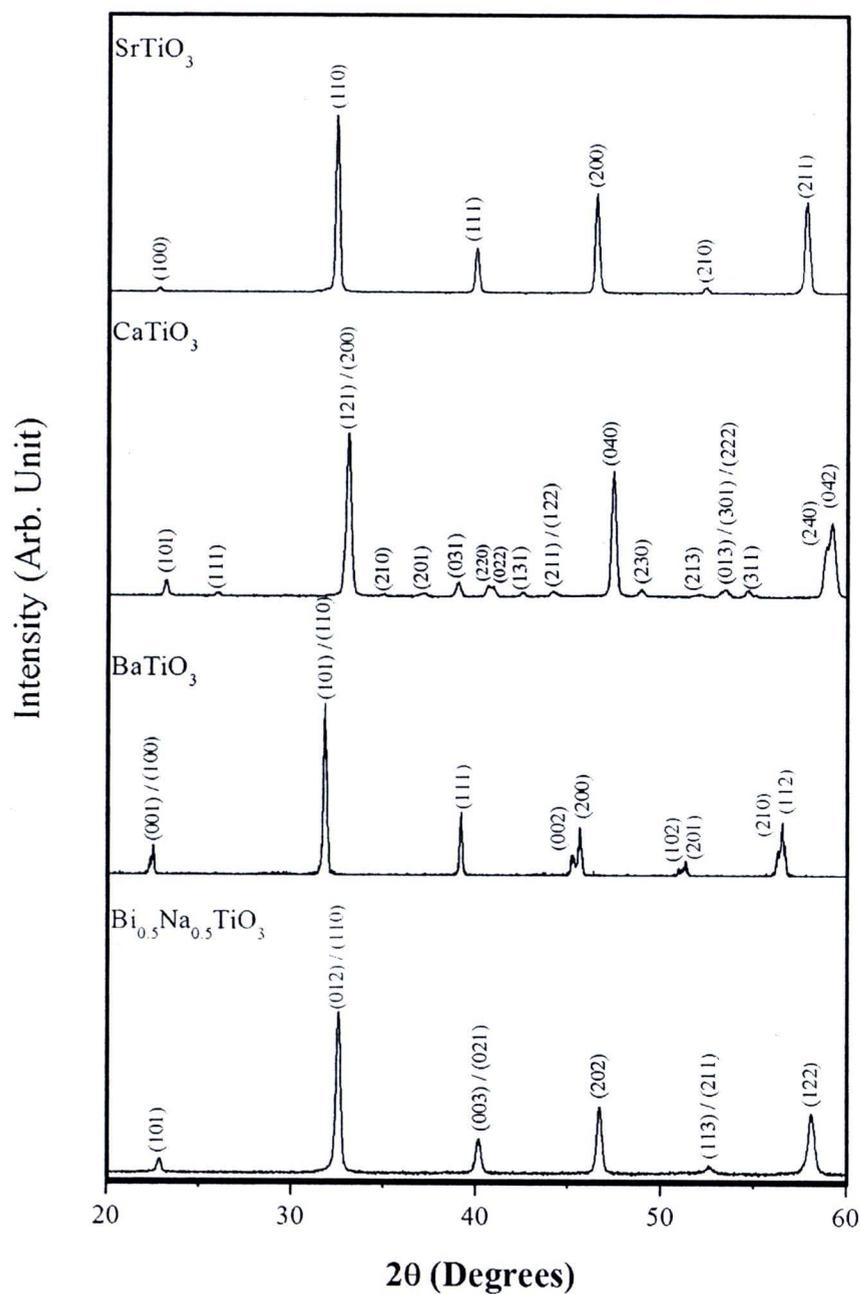
บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงผลึกบิสมัทโซเดียมไททาเนต ผงผลึกแบเรียมไททาเนต ผงผลึกแคลเซียมไททาเนต และผงผลึกสทรอนเซียมไททาเนต

1. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD)

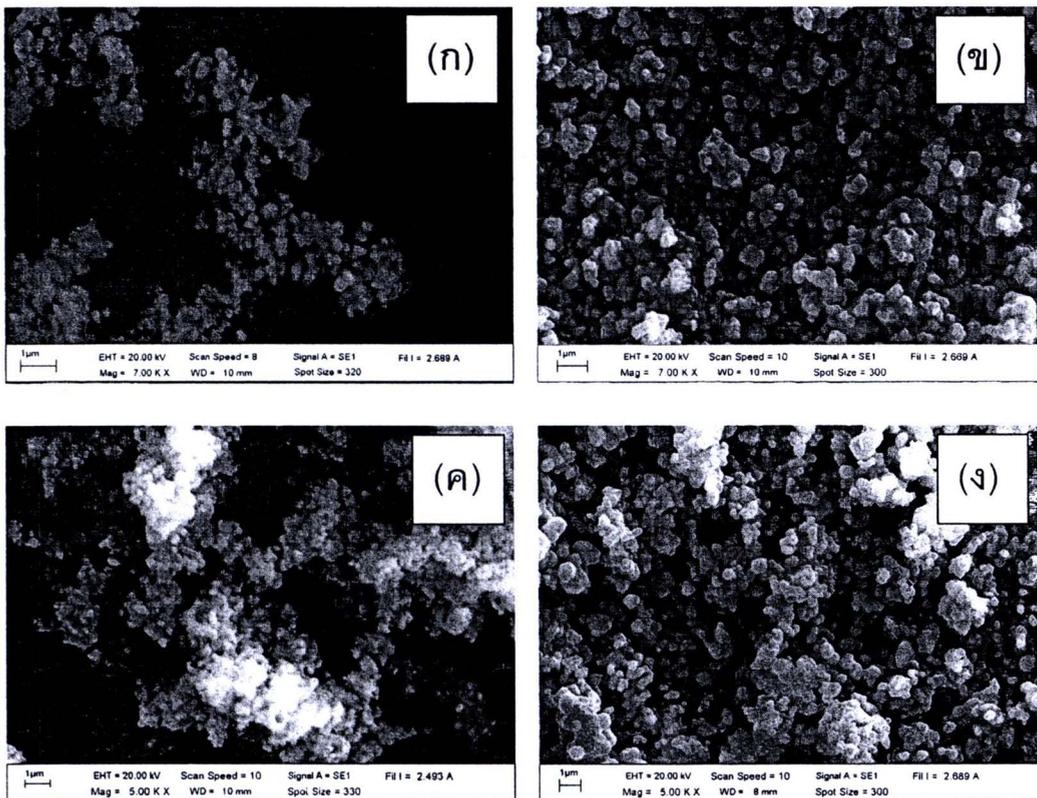
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึกบิสมัทโซเดียมไททาเนต ($\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$; BNT) ผงผลึกแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3 ; BT) ผงผลึกแคลเซียมไททาเนต (CaTiO_3 ; CT) และผงผลึกสทรอนเซียมไททาเนต (SrTiO_3 ; ST) แสดงดังภาพ 23 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของผงผลึก BNT ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีโครงสร้างเป็นแบบรอมโบฮีดรอลและตรงกับแฟ้มข้อมูลของ JCPDS หมายเลข 36-0340 และไม่พบพีคที่บ่งบอกถึงสารเจือปนใดๆ ส่วนรูปแบบการเลี้ยวเบนของผงผลึก BT ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีโครงสร้างเป็นแบบเทตระโกนอลและพีคที่ปรากฏตรงกับแฟ้มข้อมูลของ JCPDS หมายเลข 03-0752 และไม่พบเฟสแปลกปลอมของสารเจือปนใดๆ สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนของผงผลึก CT ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่ามีโครงสร้างเป็นแบบออโรโรมบิคสัมพันธ์กับแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 42-0423 และไม่พบพีคที่บ่งบอกถึงสารเจือปนใดๆ และรูปแบบการเลี้ยวเบนของผงผลึก ST ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่ามีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิกสัมพันธ์กับแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 05-0634 และไม่พบเฟสแปลกปลอมของสารเจือปนใดๆ



ภาพ 23 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึกบิสมาทไทเทเนียมไททานเตด ($\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$) ผงผลึกแบเรียมไททานเตด (BaTiO_3) ผงผลึกแคลเซียมไททานเตด (CaTiO_3) และผงผลึกสทรอนเทียมไททานเตด (SrTiO_3) ที่เตรียมด้วยวิธีเผาไหม้

2. ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกบิส്മัทโซเดียมไททานเตต ($\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$; BNT) ผงผลึกแบเรียมไททานเตต (BaTiO_3 ; BT) ผงผลึกแคลเซียมไททานเตต (CaTiO_3 ; CT) และผงผลึกสตรอนเชียมไททานเตต (SrTiO_3 ; ST) แสดงในภาพ 24 พบว่าผงผลึก BNT, BT, CT และ ST ที่ได้จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650, 1200, 1000 และ 1200 องศาเซลเซียส มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.42, 0.80, 0.50 และ 1.00 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยอนุภาคส่วนใหญ่ของผงผลึกทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะคล้ายเป็นทรงกลมและมีการเกาะกลุ่มกัน



ภาพ 24 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของผงผลึกต่างๆ โดยที่ (ก) ผงผลึกบิส്മัทโซเดียมไททานเตต (ข) ผงผลึกแบเรียมไททานเตต (ค) ผงผลึกแคลเซียมไททานเตต และ (ง) ผงผลึกสตรอนเชียมไททานเตต

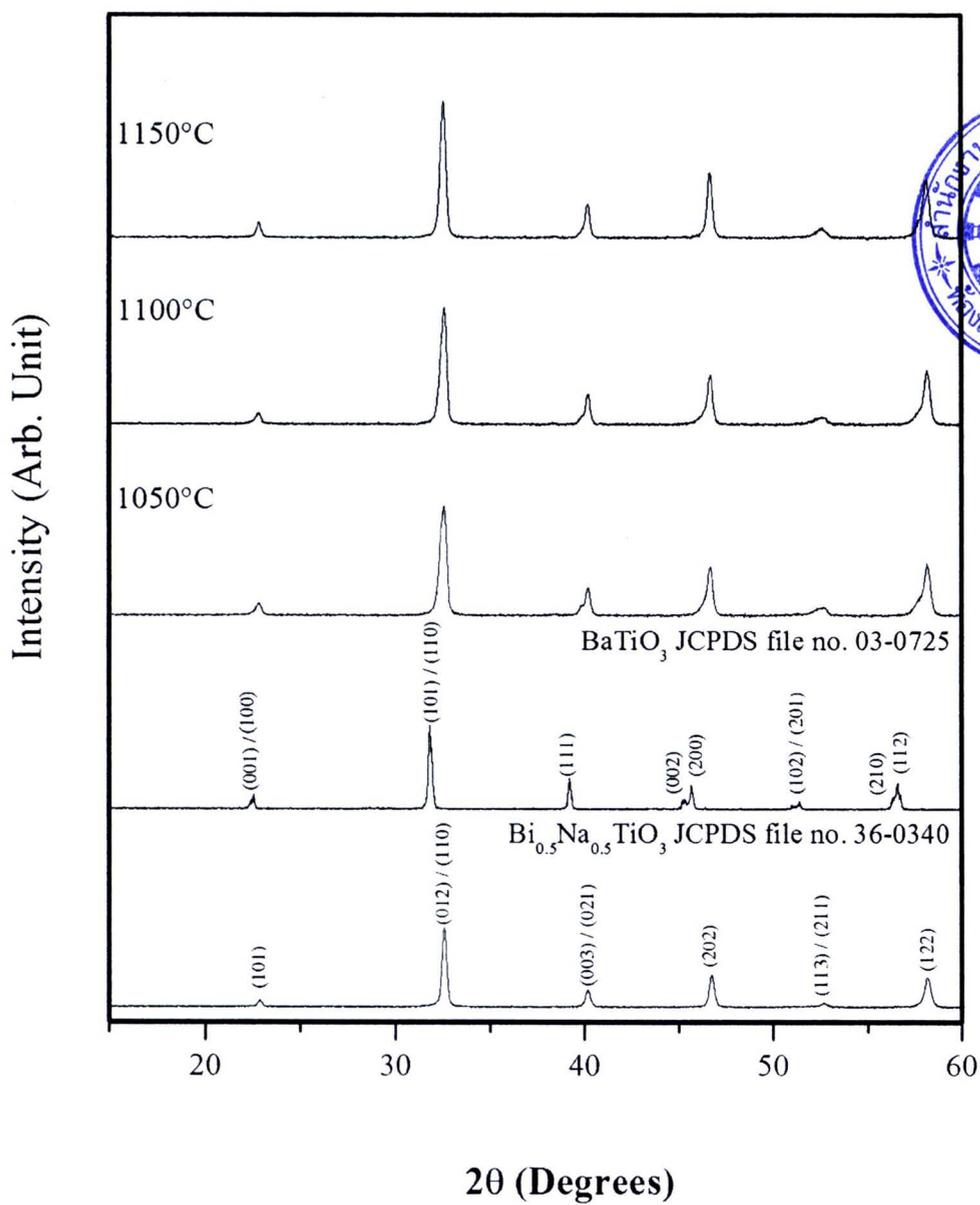
ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของเซรามิกบิสมาทโชเดียมไททานเด-แบเรียมไททานเด เซรามิกบิสมาทโชเดียมไททานเด-แคลเซียมไททานเด และเซรามิกบิสมาทโชเดียมไททานเด-สทรอนเซียมไททานเด

1. ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของเซรามิกบิสมาทโชเดียมไททานเด-แบเรียมไททานเด (1-x)BNT-xBT; BNTBT100x

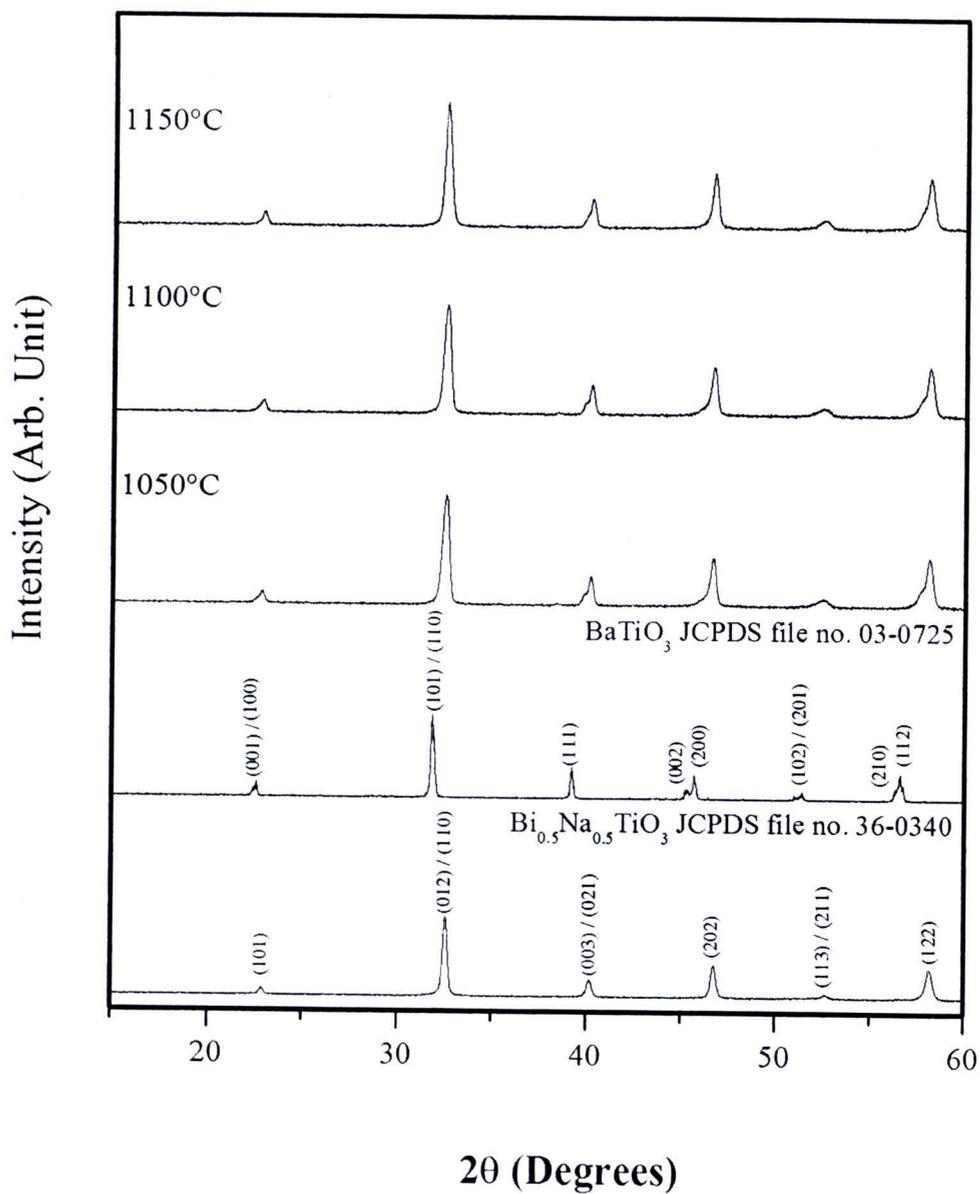
1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD)

นำผงผลึก BNT และ BT มาผสมกันตามสัดส่วนโดยโมลโดยใช้อัตราส่วน $x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$ และ 0.12 (BNTBT2, BNTBT4, BNTBT6, BNTBT8, BNTBT10 และ BNTBT12) เพื่อนำมาอัดเม็ดและเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1050-1200 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปเซรามิก BNT มีโครงสร้างรอมโบอีดรอลซึ่งตรงกับแฟ้มข้อมูลของ JCPDS หมายเลข 36-0340 โดยมีพีคคู่ของ (003)/(021) เกิดขึ้น ที่มุมระหว่าง 38-42 องศา และมีพีคเดี่ยวของ (202) เกิดขึ้นที่มุมระหว่าง 45-48 องศา [8, 38] ในขณะที่เซรามิก BT มีโครงสร้างเทตระโกนอลซึ่งตรงกับแฟ้มข้อมูลของ JCPDS หมายเลข 03-0725 โดยมีพีคเดี่ยวของ (111) เกิดขึ้นที่มุมระหว่าง 38-42 องศา และมีพีคคู่ของ (002)/(200) เกิดขึ้นที่มุมระหว่าง 45-48 องศา [5] จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของเซรามิก BNTBT2, BNTBT4, BNTBT6, BNTBT8, BNTBT10 และ BNTBT12 ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1050-1210 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพ 25, ภาพ 26, ภาพ 27, ภาพ 28, ภาพ 29 และภาพ 30 ตามลำดับ พบว่าในกรณีนี้ที่ $x = 0.02$ และ 0.04 (BNTBT2 และ BNTBT4) ซินเตอร์ที่อุณหภูมิมากกว่า 1150 องศาเซลเซียส เซรามิกหายไป เนื่องจากที่อุณหภูมิซินเตอร์สูงๆ เกิดการระเหยของ Bi^{3+} และ Na^+ (ภาพ 25 และ 26) ในขณะที่ $x > 0.04$ (BNTBT6, BNTBT8, BNTBT10 และ BNTBT12) พบว่าการระเหยของ Bi^{3+} และ Na^+ ทำให้เกิดเฟสแปลกปลอมของ $\text{BaO}_{4.977}$, Ti และ Ba_2BiO_4 เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200 ดังแสดงในภาพ 27 – 30

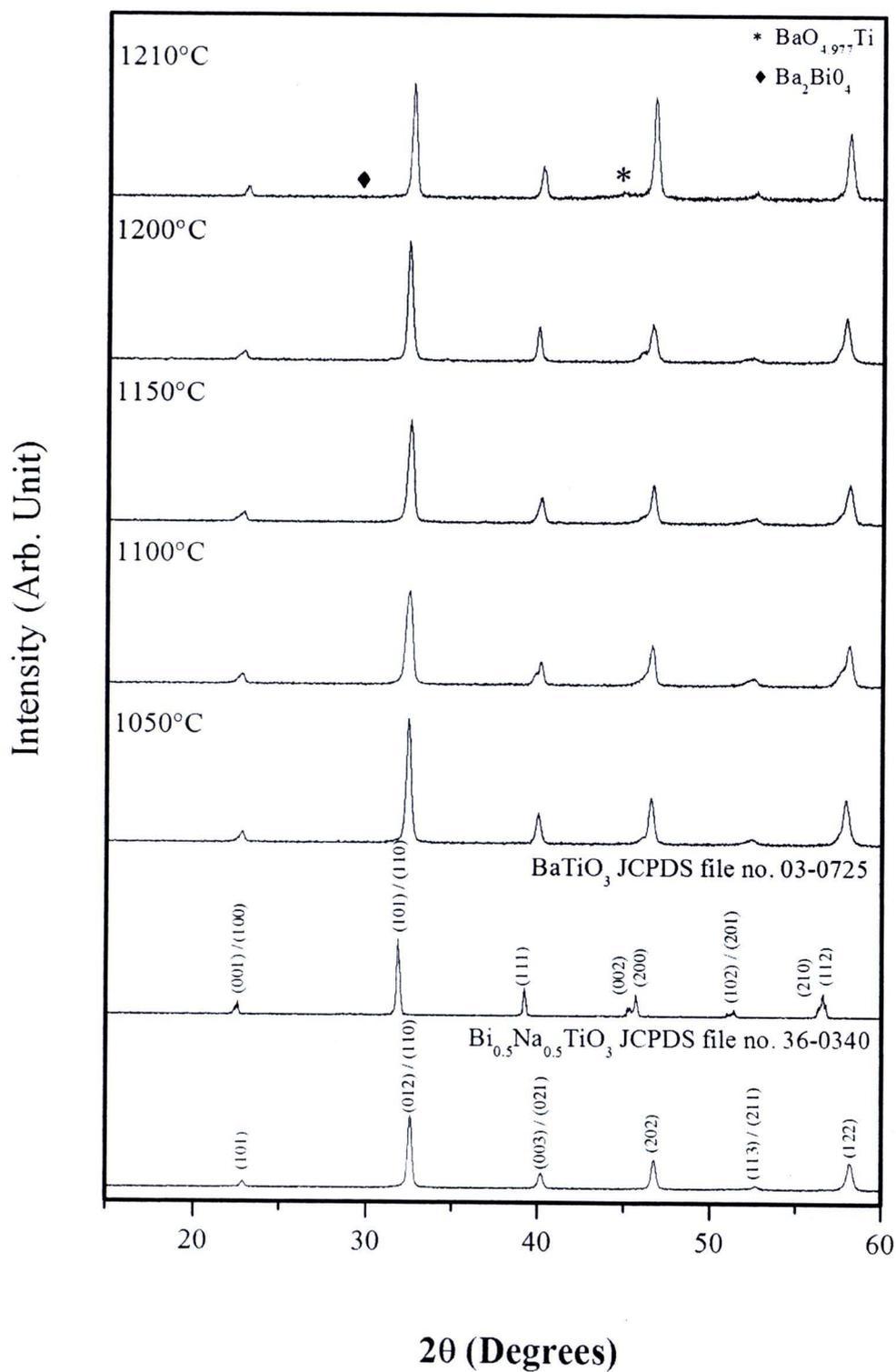
ที่ $x \leq 0.04$ เซรามิก BNTBT2 และ BNTBT4 พบว่ามีโครงสร้างเป็นแบบรอมโบอีดรอลซึ่งเหมือนกับ BNT เมื่อปริมาณ BT เพิ่มขึ้น เซรามิกมีความเป็นเทตระโกนอลลิต์มากขึ้น ในขณะที่ $x \geq 0.10$ เซรามิก BNTBT10 และ BNTBT12 มีโครงสร้างเป็นแบบเทตระโกนอลซึ่งเหมือนกับ BT และสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ [12, 13, 35, 37] ดังแสดงในภาพ 31 และที่ $x = 0.06$ และ 0.08 เซรามิก BNTBT6 และ BNTBT8 จะมีโครงสร้างร่วมระหว่างเทตระโกนอลและรอมโบอีดรอลเกิดขึ้น โดยสังเกตจากพีคของ (002)/(200) และ (003)/(021) เกิดขึ้นที่มุมระหว่าง 45-48 องศาและ 39-41 องศา ตามลำดับ



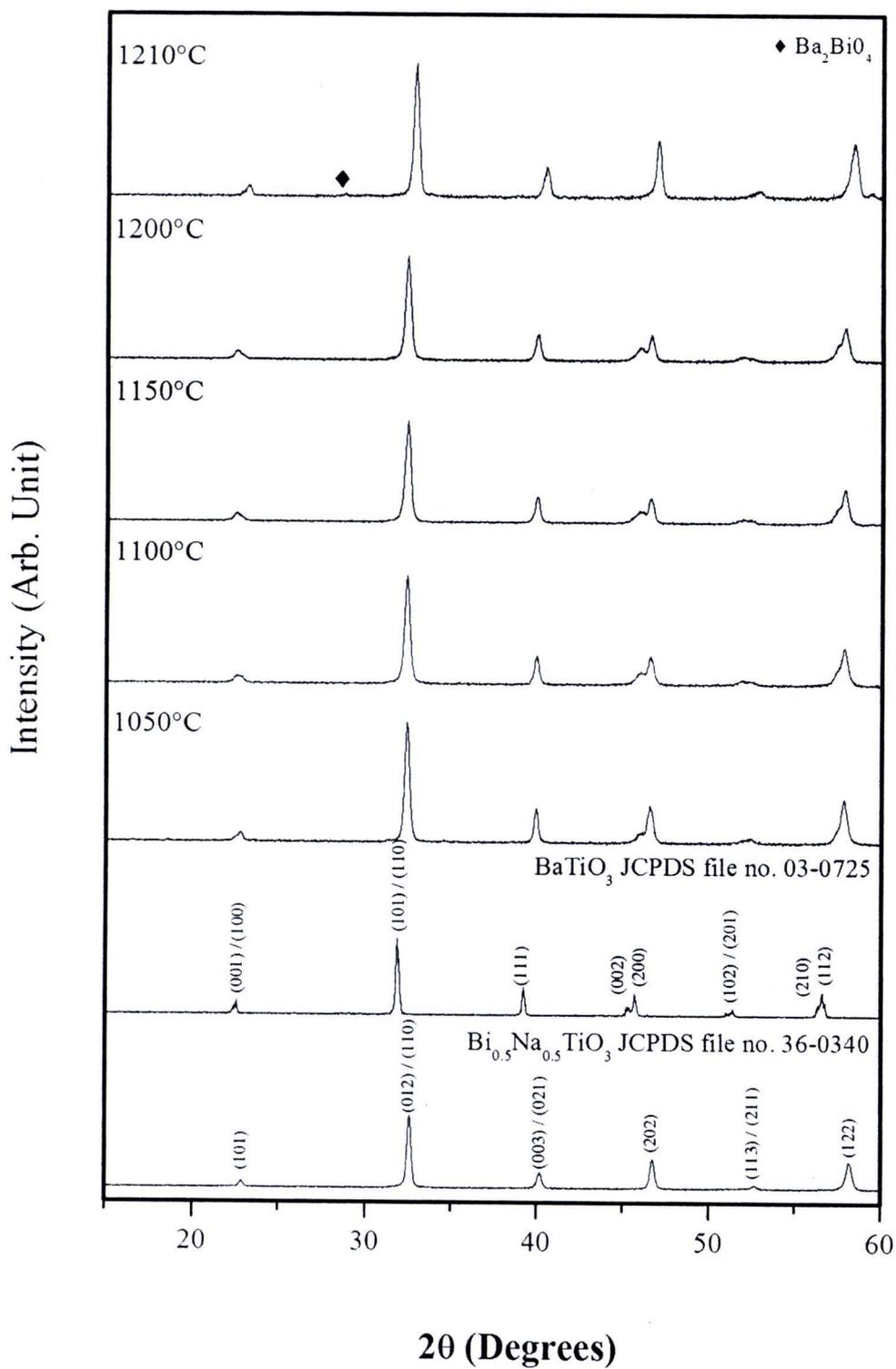
ภาพ 25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT2 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ



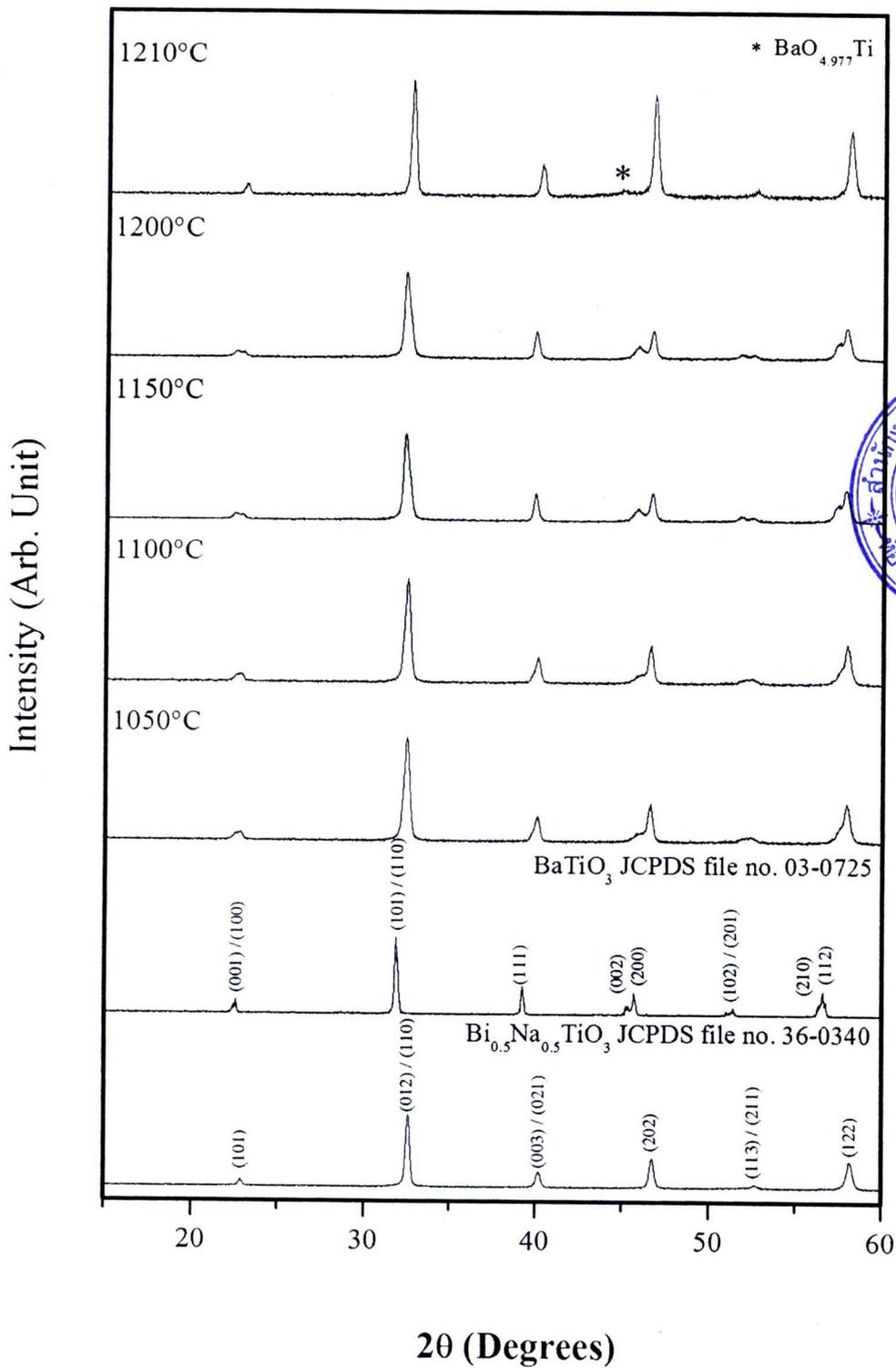
ภาพ 26 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT4 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ



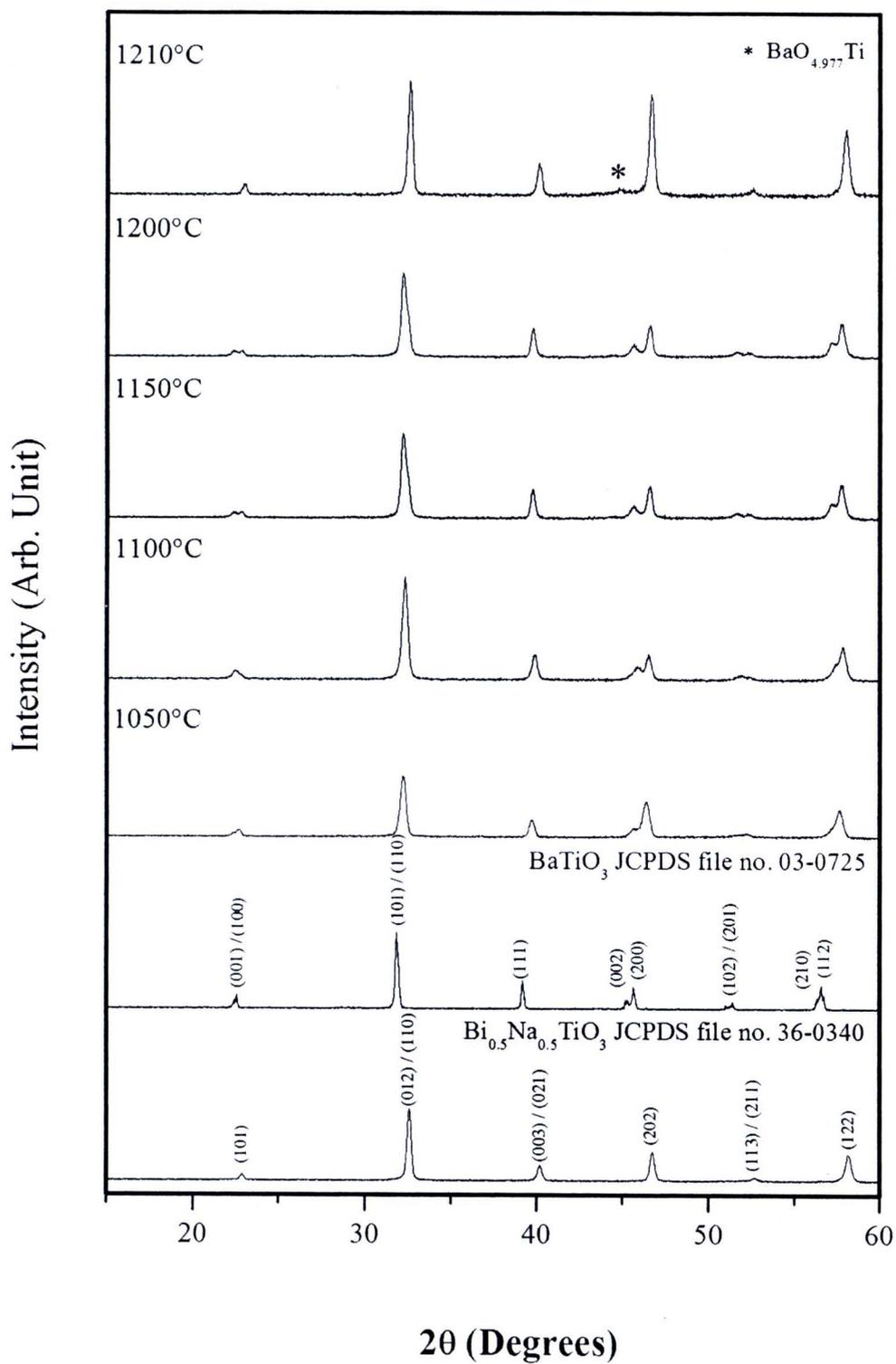
ภาพ 27 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT6 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ



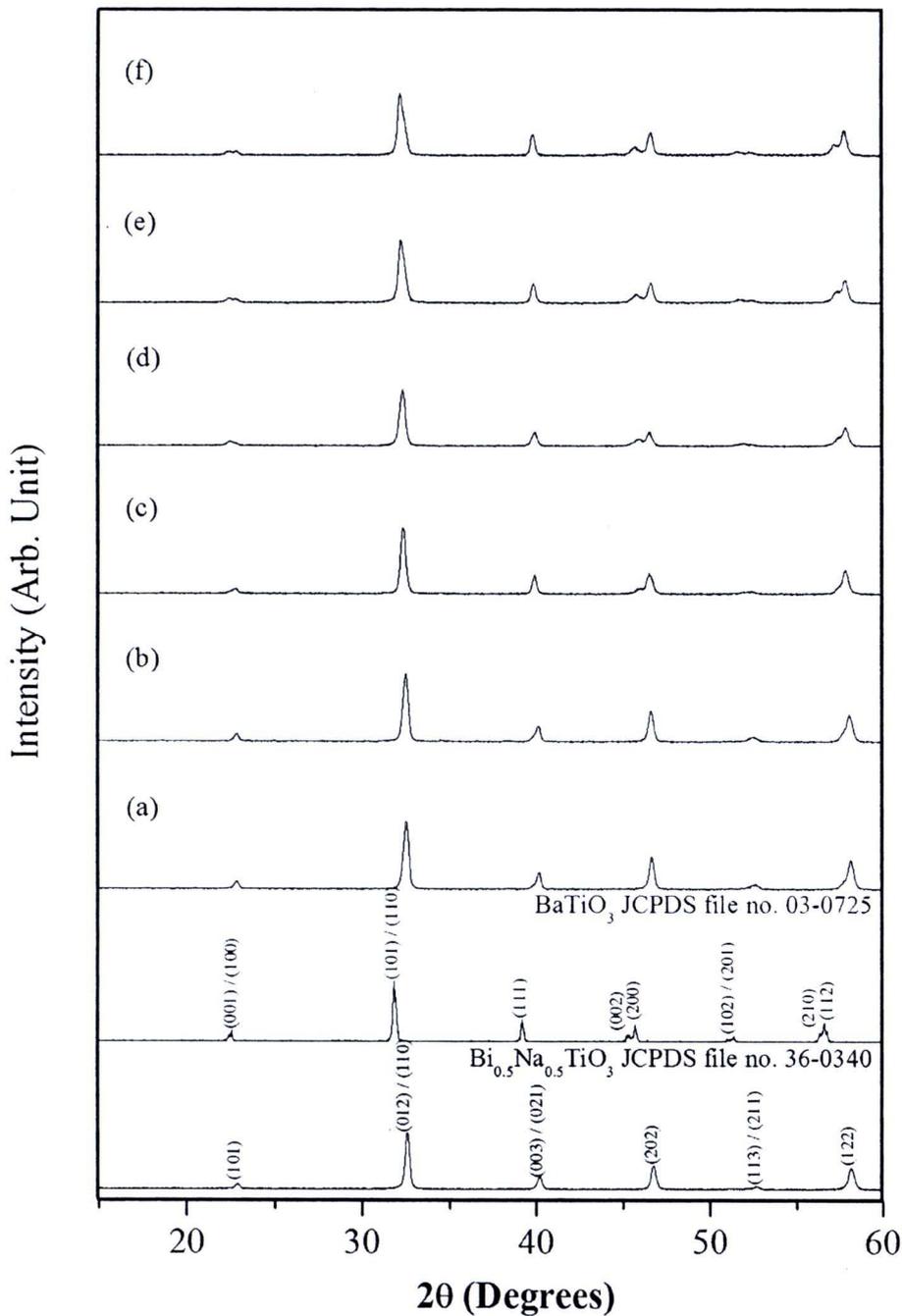
ภาพ 28 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT8 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ



ภาพ 29 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT10 ที่อุณหภูมิซินเตอร์
ต่างๆ



ภาพ 30 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT12 อุณหภูมิที่ซินเตอร์
ต่างๆ



ภาพ 31 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTBT100x (a) $x = 0.02$ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส (b) $x = 0.04$ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส (c) $x = 0.06$ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส (d) $x = 0.08$ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส (e) $x = 0.10$ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส และ (f) $x = 0.12$ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

ตาราง 1 แสดงค่าแลตทิซแสดงความเป็นรอมโบอีตรอล ค่าคงที่แลตทิซและอัตราส่วน c/a ของเซรามิก BNTBT100x

x	โครงสร้าง	แลตทิซพารามิเตอร์			อัตราส่วน c/a
		a_R (Å)	a_T (Å)	c_T (Å)	
0.02	รอมโบอีตรอล	3.8853	-	-	-
0.04	รอมโบอีตรอล	3.9033	-	-	-
0.06	รอมโบอีตรอล+เทตระโกนอล	3.9054	3.9035	3.9205	1.0043
0.08	รอมโบอีตรอล+เทตระโกนอล	3.9067	3.8950	3.9412	1.0118
0.10	เทตระโกนอล	-	3.8967	3.9577	1.0156
0.12	เทตระโกนอล	-	3.8982	3.9666	1.0175

คำนวณหาค่าแลตทิซแสดงความเป็นรอมโบอีตรอล (a_R) จากสมการ

$$a_R = \frac{1}{3} \sqrt{3(a_H)^2 + c_H^2}$$

โดยที่ a_H คือค่าแลตทิซพารามิเตอร์ a ของโครงสร้างเฮกซะโกนอล และ c_H คือค่าแลตทิซพารามิเตอร์ c ของโครงสร้างเฮกซะโกนอล และคำนวณหาค่าคงที่แลตทิซ a และ c ของโครงสร้างเทตระโกนอล (a_T และ c_T) และอัตราส่วน c/a จากสมการที่ 12 พบว่า ที่ $0.02 \leq x \leq 0.08$ ค่าแลตทิซแสดงความเป็นรอมโบอีตรอล a_R มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ BT เพิ่มขึ้น และที่ $0.06 \leq x \leq 0.12$ ค่าคงที่แลตทิซ a_T , c_T และอัตราส่วน c/a มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ BT เพิ่มขึ้น เนื่องจากการแทนที่ของ BT ในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ของ BNT บริเวณ A – site โดยมีรัศมีไอออนของ Ba^{2+} (161 pm) Na^+ (139 pm) และ Bi^{3+} (140 pm) พบว่า Ba^{2+} มีขนาดรัศมีไอออนใหญ่กว่าขนาดรัศมีไอออนเฉลี่ยของ A – site จึงเป็นสาเหตุให้ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ต่างๆมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ BT เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 1 ทั้งนี้ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ L.V. Yinong และคณะ [12]

1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก BNTBT2, BNTBT4, BNTBT6, BNTBT8, BNTBT10 และ BNTBT12 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ โดยถ่ายภาพบริเวณผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพ 32, ภาพ 33, ภาพ 34, ภาพ 35, ภาพ 36 และภาพ 37 ตามลำดับ พบว่าเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 2 เมื่อสังเกตภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT2 และ BNTBT4 พบว่าซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (≤ 1100 องศาเซลเซียส) มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในภาพ 32 (ก) และ(ข) และเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึง 1150 องศาเซลเซียส เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนคล้ายเป็นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังแสดงในภาพ 32 (ค) สำหรับเซรามิก BNTBT6, BNTBT8, BNTBT10 และ BNTBT12 พบว่าที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่ำๆผลที่ได้คล้ายกับเซรามิก BNTBT2 และ BNTBT4 ในขณะที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200 พบว่าเกรนเริ่มหลอมละลาย (ภาพ 34, ภาพ 35, ภาพ 36 และภาพ 37) ซึ่งผลที่ได้จาก SEM สอดคล้องกับผลที่ได้จาก XRD ที่อุณหภูมิซินเตอร์เดียวกัน พบว่าเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น ขนาดของเกรนเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงจาก 1.60 – 2.33 μm ดังแสดงในตาราง 3

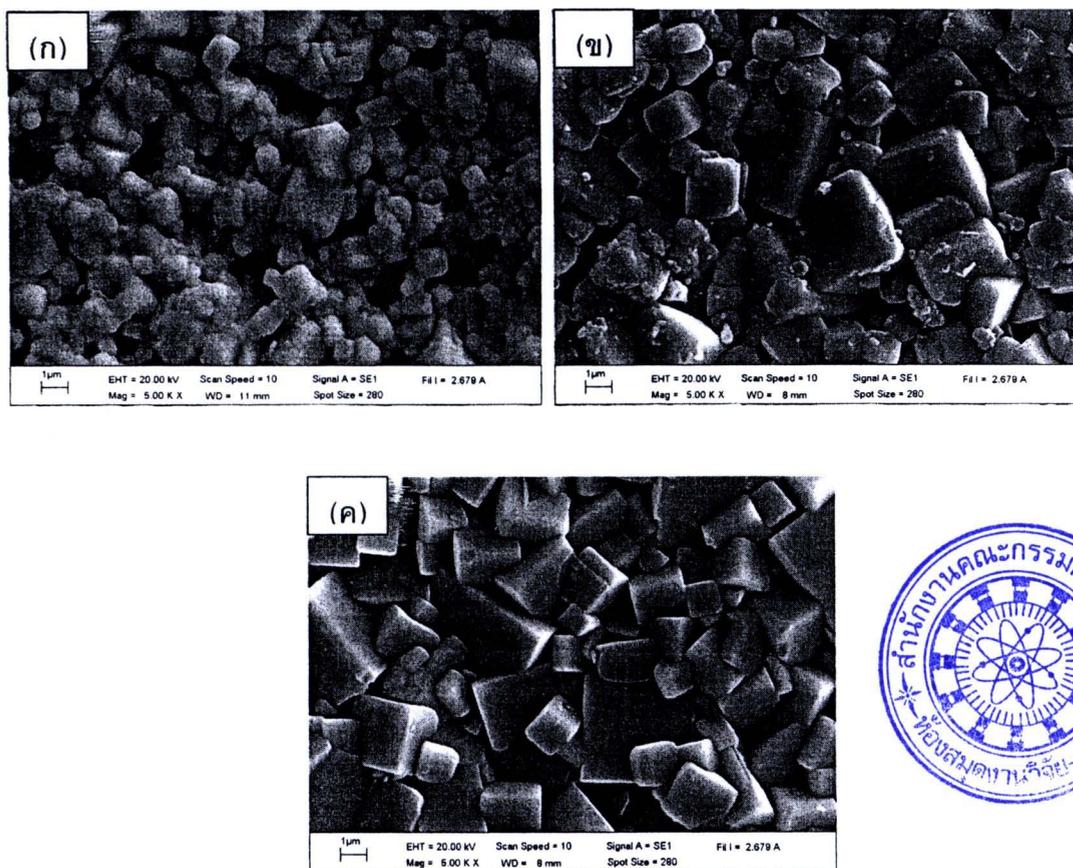
ภาพ 38 แสดงรูปถ่ายรอยหักของเซรามิก BNTBT8 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ที่อุณหภูมिन้อยกว่าหรือเท่ากับ 1100 องศาเซลเซียส เป็นรอยหักชนิดหักตามเกรน และพบรูพรุนแบบเปิด ในขณะที่อุณหภูมิซินเตอร์สูงขึ้น เซรามิกจะหักแบบผ่าเกรนแสดงให้เห็นว่ามีความหนาแน่นมาก แต่อย่างไรก็ตามยังพบรูพรุนแบบปิด ด้วยเหตุนี้ทำให้เซรามิกที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200 องศาเซลเซียสมีความหนาแน่นน้อยลง

1.3 ผลการคำนวณค่าความหนาแน่นและการหดตัวเชิงเส้น

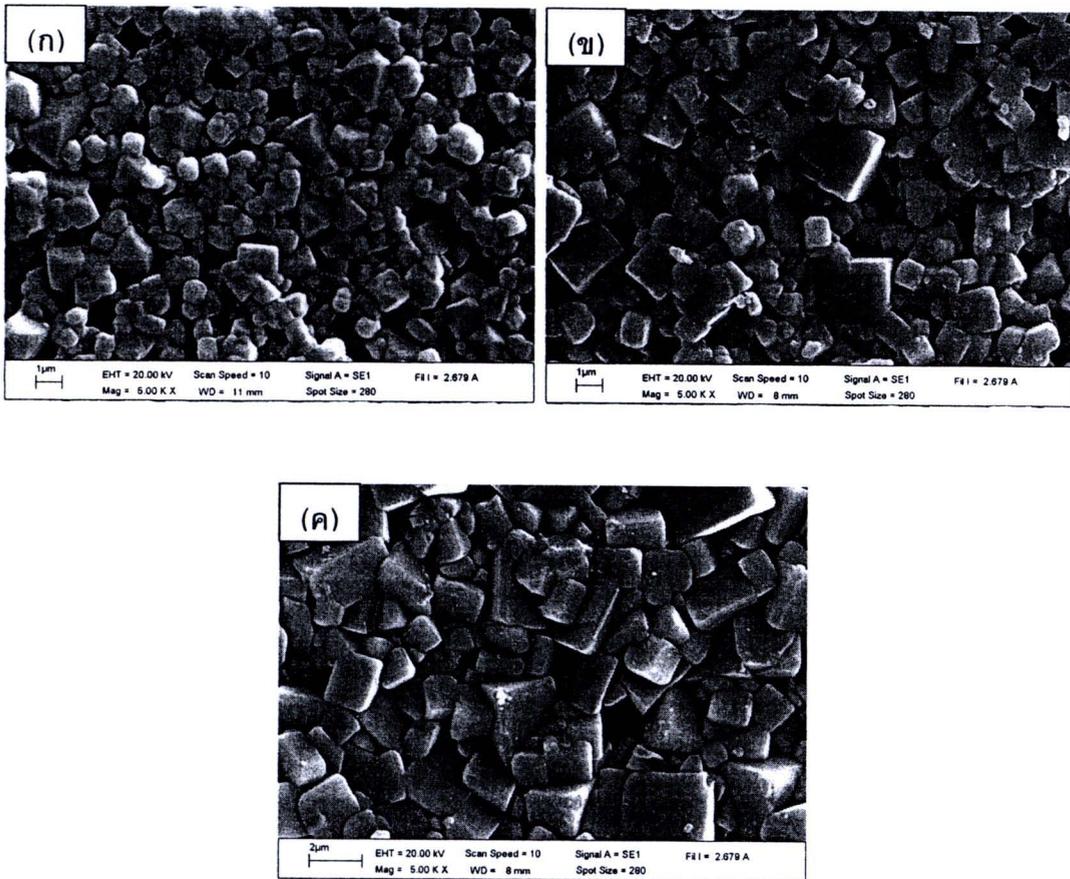
ค่าความหนาแน่นและค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิก BNTBT2, BNTBT4, BNTBT6, BNTBT8, BNTBT10 และ BNTBT12 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ แสดงดังตาราง 2 พบว่าเซรามิก BNTBT2 และ BNTBT4 มีค่าความหนาแน่นและการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึง 1150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นไม่สามารถหาค่าได้ สำหรับเซรามิก BNTBT6, BNTBT8, BNTBT10 และ BNTBT12 พบว่า ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึง 1200 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น และการหดตัวเชิงเส้นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น (แสดงดังตาราง 2)

ค่าความหนาแน่นและการหดตัวเชิงเส้นสูงสุดของเซรามิก BNTBT100x ที่ปริมาณ x ต่างๆ จากตัวอย่างซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำ 1050 - 1200 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความ

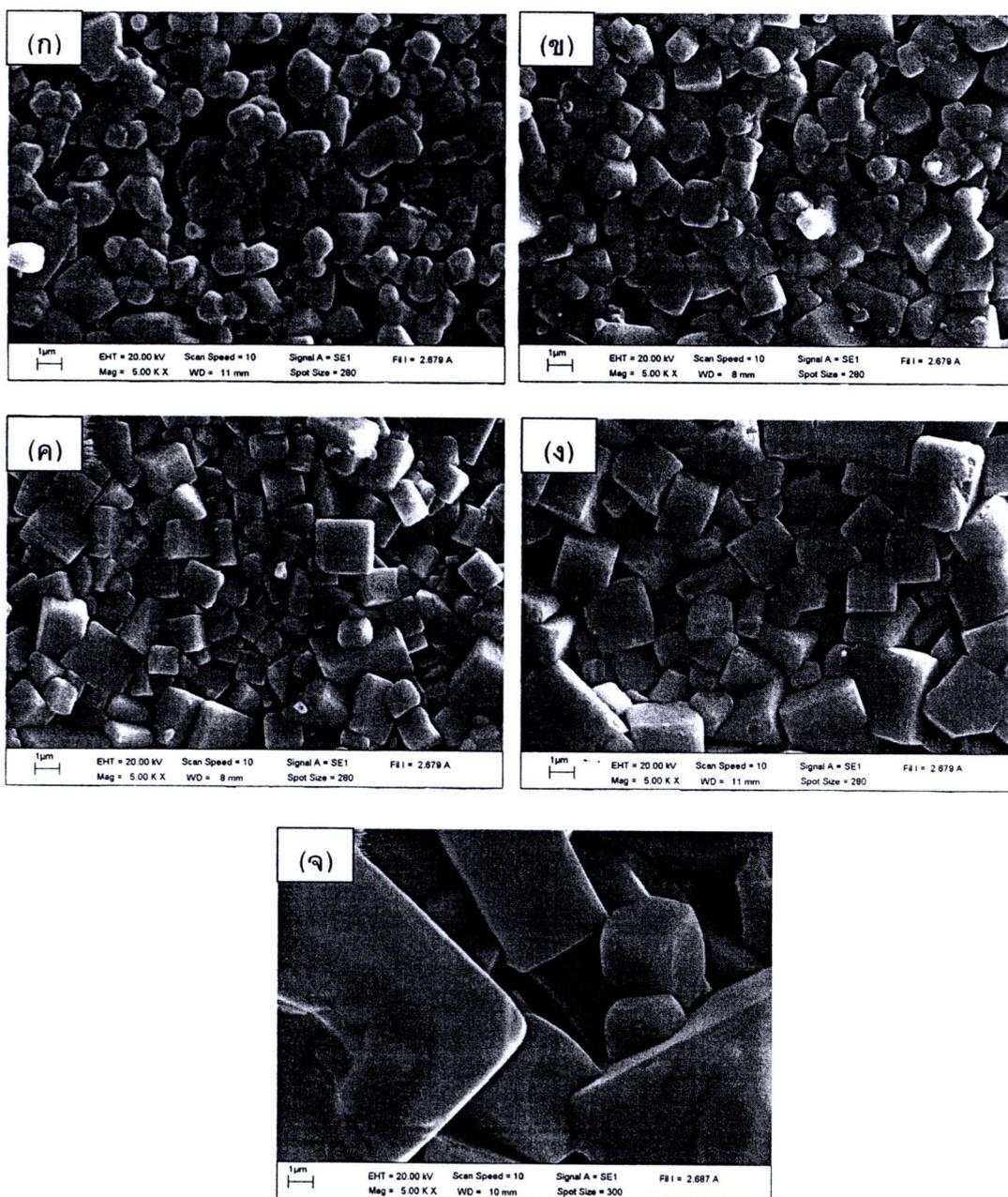
หนาแน่นของเซรามิกมีค่ามีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง $5.70 - 5.78 \text{ g/cm}^3$ สำหรับการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิกมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ $14.5 - 16.4$ ดังแสดงในตาราง 3 ค่าความหนาแน่นสูงสุดมีค่ามากที่สุดคือ 5.78 g/cm^3 ที่เซรามิก BNTBT8



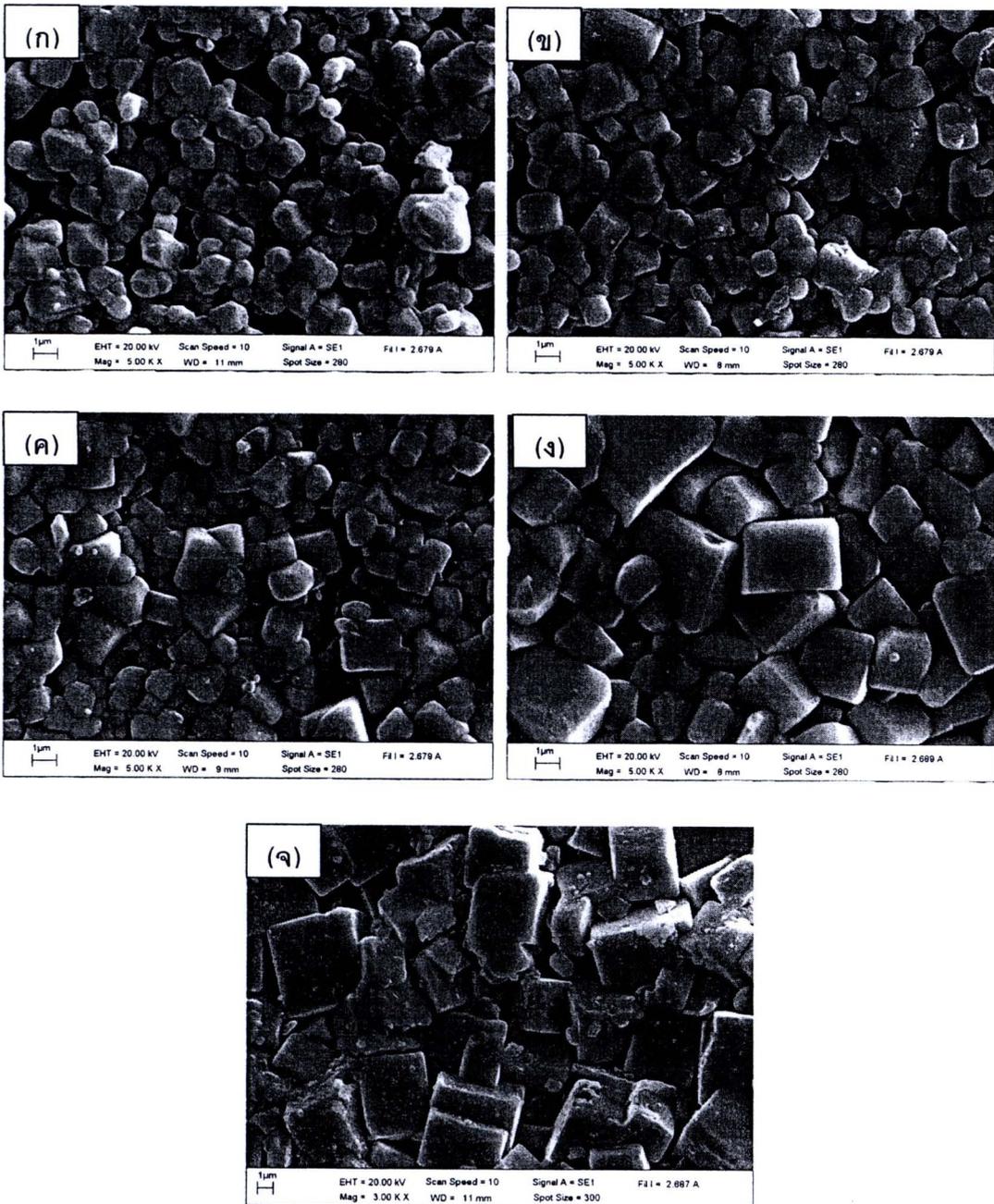
ภาพ 32 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT2 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส และ (ค) 1150 องศาเซลเซียส



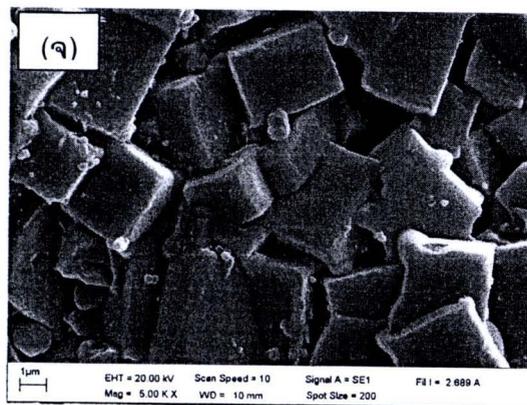
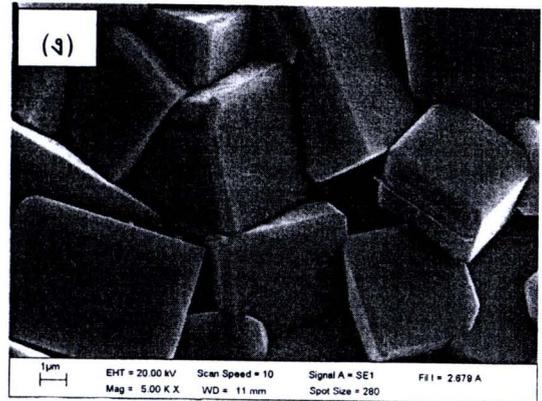
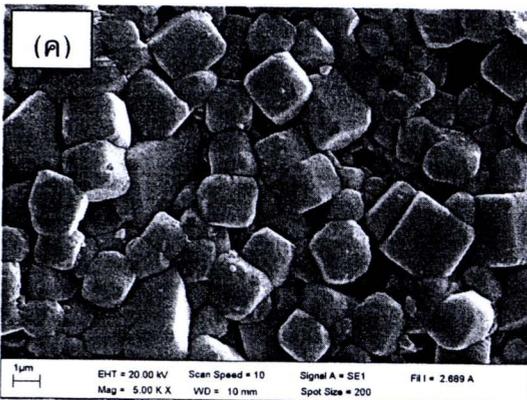
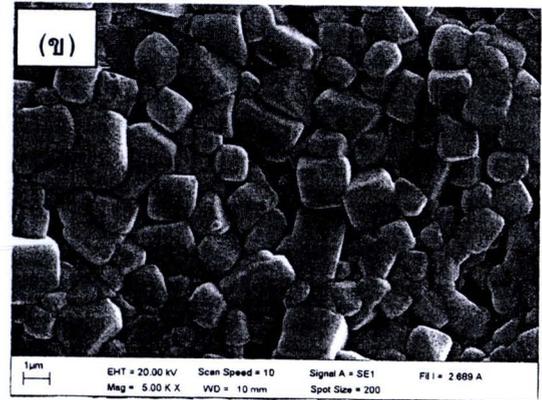
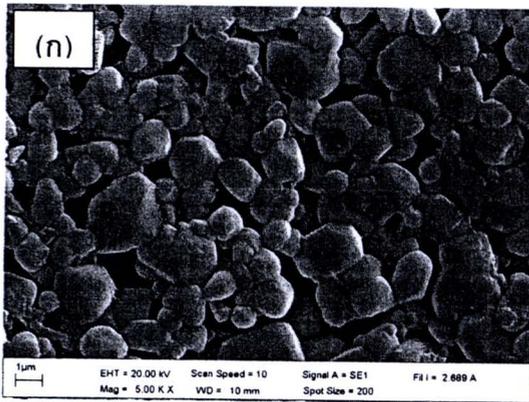
ภาพ 33 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT4 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส และ (ค) 1150 องศาเซลเซียส



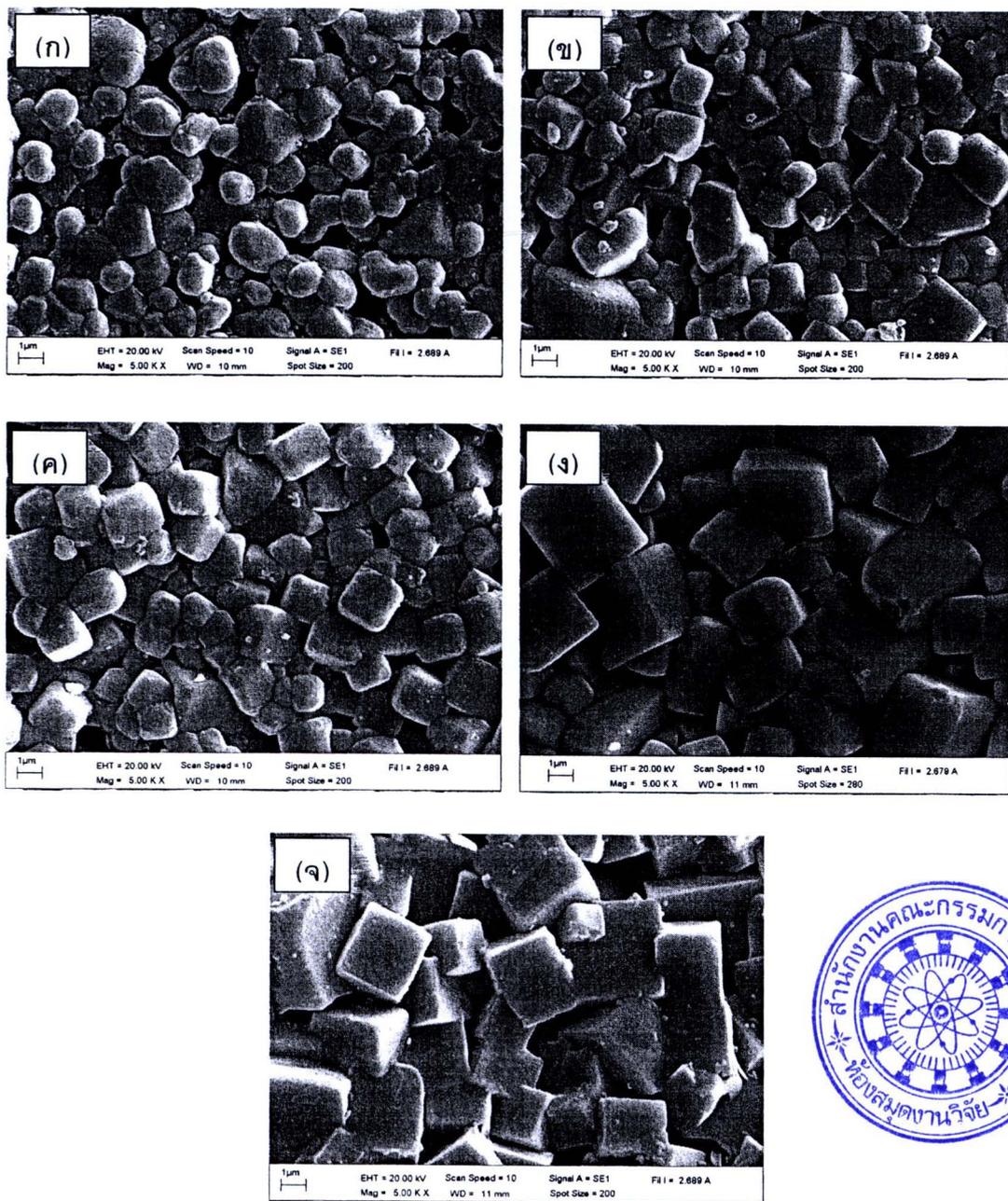
ภาพ 34 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT6 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส (ง) 1200 องศาเซลเซียส และ (จ) 1210 องศาเซลเซียส



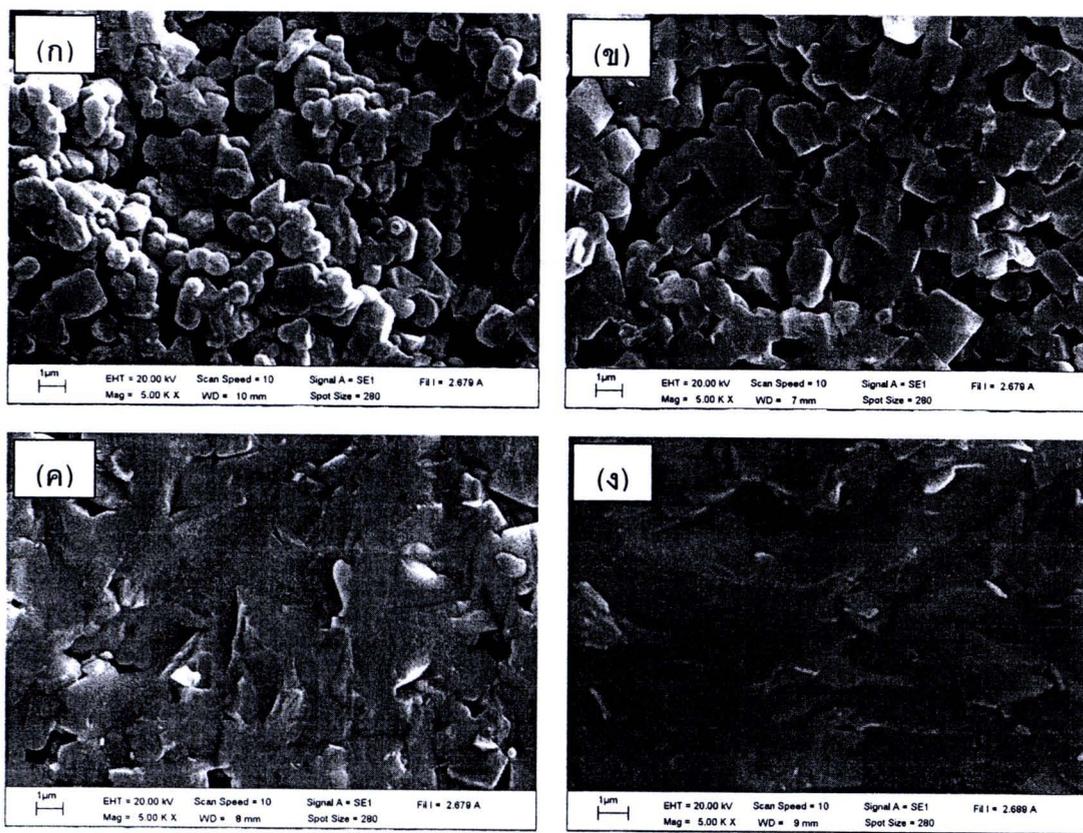
ภาพ 35 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT8 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส (ง) 1200 องศาเซลเซียส และ (จ) 1210 องศาเซลเซียส



ภาพ 36 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT10 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส (ง) 1200 องศาเซลเซียส และ (จ) 1210 องศาเซลเซียส



ภาพ 37 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTBT12 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส (ง) 1200 องศาเซลเซียส และ (จ) 1210 องศาเซลเซียส



ภาพ 38 ภาพถ่ายบริเวณรอยหักของเซรามิก BNTBT8 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส

ตาราง 2 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ย ความหนาแน่น และการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก BNTBT100x ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ

เซรามิก	อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	การหดตัวเชิงเส้น (%)
BNTBT2	1050	1.42	5.47	6.9
	1100	1.73	5.58	12.1
	1150	2.05	5.71	15.8
BNTBT4	1050	1.21	5.49	9.2
	1100	1.57	5.62	13.8
	1150	1.75	5.73	16.4
BNTBT6	1050	1.15	5.59	9.2
	1100	1.51	5.64	10.2
	1150	1.63	5.74	14.8
	1200	2.19	5.79	16.1
	1210	-	5.10	17.1
BNTBT8	1050	1.04	5.62	9.5
	1100	1.41	5.69	12.1
	1150	1.60	5.78	15.1
	1200	2.09	5.80	16.8
	1210	-	-	-
BNTBT10	1050	1.67	5.48	9.2
	1100	2.07	5.62	11.7
	1150	2.33	5.72	14.8
	1200	5.05	5.77	15.4
	1210	-	-	-

ตาราง 2 (ต่อ)

เซรามิก	อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	การหดตัวเชิงเส้น (%)
BNTBT12	1050	1.66	5.47	9.0
	1100	2.09	5.59	12.2
	1150	2.29	5.70	14.5
	1200	3.99	5.75	16.1
	1210	-	-	-

ตาราง 3 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ย ความหนาแน่น และการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก
BNTBT100x ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

เซรามิก	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	การหดตัวเชิงเส้น (%)
BNTBT2	2.05	5.71	15.8
BNTBT4	1.75	5.73	16.4
BNTBT6	1.63	5.74	14.8
BNTBT8	1.60	5.78	15.1
BNTBT10	2.33	5.72	14.8
BNTBT12	2.29	5.70	14.5

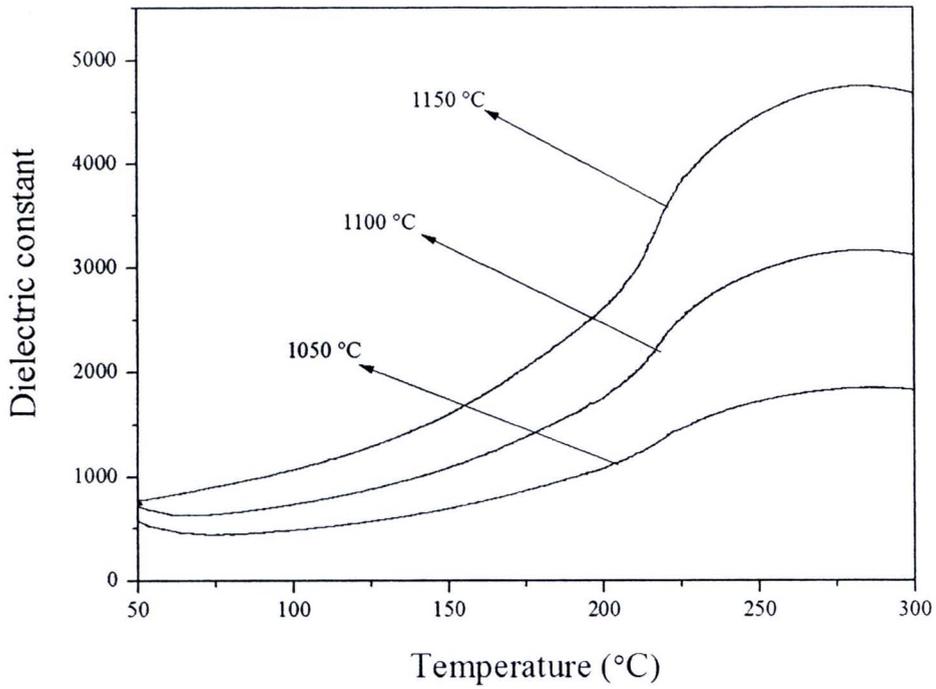
1.4 ผลที่ได้จากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก

ศึกษาผลจากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT2, BNTBT4, BNTBT6, BNTBT8, BNTBT10 และ BNTBT12 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ โดยใช้ความถี่ 1 kHz ดังแสดงในภาพ 39, ภาพ 40, ภาพ 41, ภาพ 42, ภาพ 43 และ ภาพ 44 ตามลำดับ พบว่ามีพีคเกิดขึ้น 2 พีค โดยพีคแรกเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ depolarization (T_d) ประมาณ 110 - 224 องศาเซลเซียส สามารถหาได้จากอุณหภูมิที่มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกพีคแรก ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก และพีคที่สองเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิคูรี (T_m) ประมาณ 260 - 288 องศาเซลเซียส สามารถหาได้จากอุณหภูมิที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนเฟสจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นพาราอิเล็กทริก การเปลี่ยนเฟสดังกล่าวมีการรายงานโดยงานวิจัยของ T. Takenaka [10] ในกรณีที่มี $x = 0.02$ และ 0.04 T_d เพิ่มขึ้นในขณะที่ T_m ลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 4 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึง 1150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากเซรามิกระเหยจนหมดไปที่อุณหภูมิสูง ดังแสดงในภาพ 39, 40 และตาราง 4 สำหรับที่ $x \geq 0.06$ T_d และ T_m ลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 4 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึง 1200 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากเซรามิกเปราะและแตกที่อุณหภูมิสูง ดังแสดงในภาพ 41, 42, 43, 44 และตาราง 4

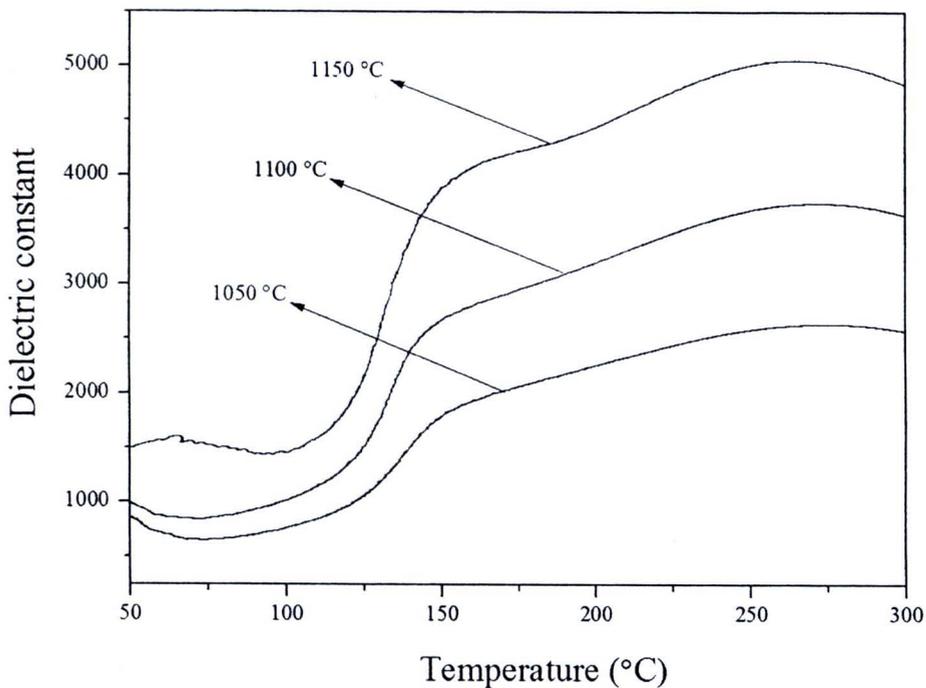
จากภาพ 45 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT100x ซินเตอร์ที่อุณหภูมิที่มีค่าความหนาแน่นสูงสุด พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้นถึง 0.08 หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น ที่ $x \leq 0.06$ T_d มีค่าลดลงหลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น ในขณะที่ T_m มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 46 ในกรณีที่มี T_d ของเซรามิก BNTBT6 มีค่าต่ำสุด อาจะเกิดจากเมื่อเข้าใกล้บริเวณ MPB มีการบิดเบี้ยวของ oxygen octahedron [35]

จากภาพ 46 แสดงความสัมพันธ์ของ T_d และ T_m ของเซรามิก BNTBT100X ที่ปริมาณ x ต่างๆ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส พบว่าในกรณีที่มี $x = 0.02, 0.10$ และ 0.12 มีค่า T_d และ T_m เข้าใกล้กันมาก ส่งผลให้เส้นกราฟไดอิเล็กทริกของเซรามิกเหล่านี้มองเห็นเป็นพีคเดียวอาจจะเกิดจากการรวมกันของพีค T_d และ T_m ที่อยู่ใกล้กันมากๆ (ภาพ 45) สำหรับที่ $x = 0.04, 0.06$ และ 0.08 มีค่า T_d และ T_m ห่างกันมาก ส่งผลให้เส้นกราฟไดอิเล็กทริกของเซรามิกเหล่านี้มองเห็นเป็นพีคสองพีค อาจะเกิดพีค T_d และ T_m ที่อยู่ใกล้กันมากๆ ทำให้มองเห็นพีคทั้ง

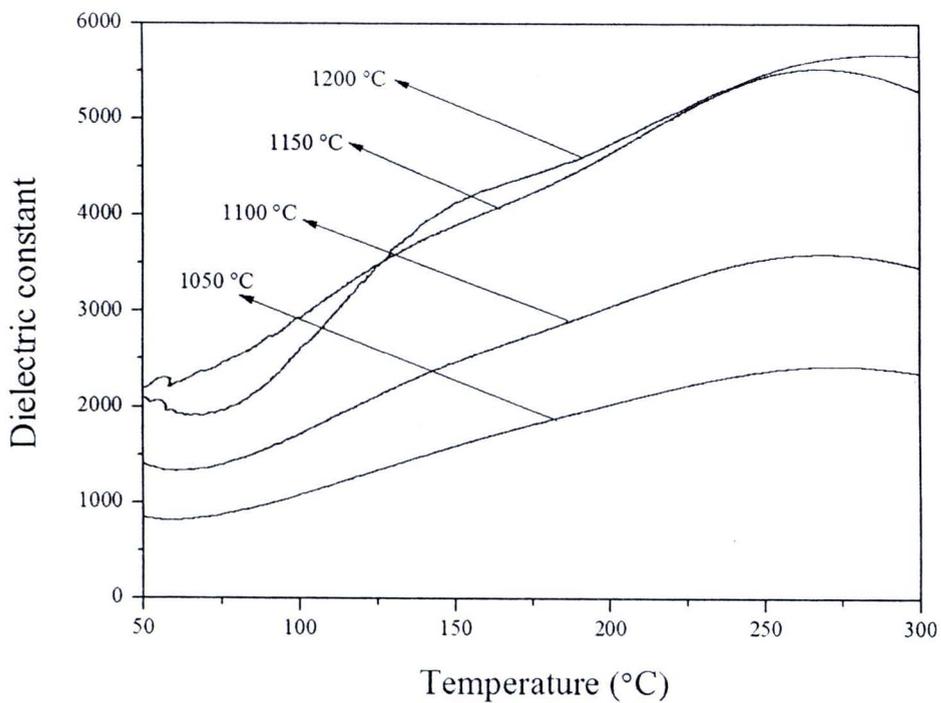
สองแยกออกจากกันอย่างชัดเจน (ภาพ 45) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ C. Xu และคณะ [35]



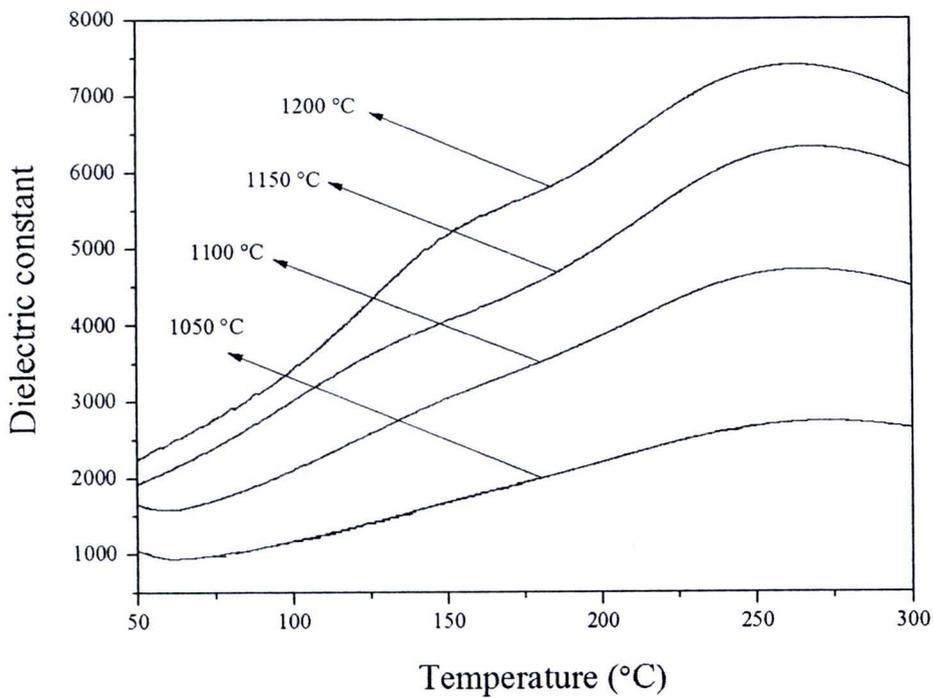
ภาพ 39 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT2 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ



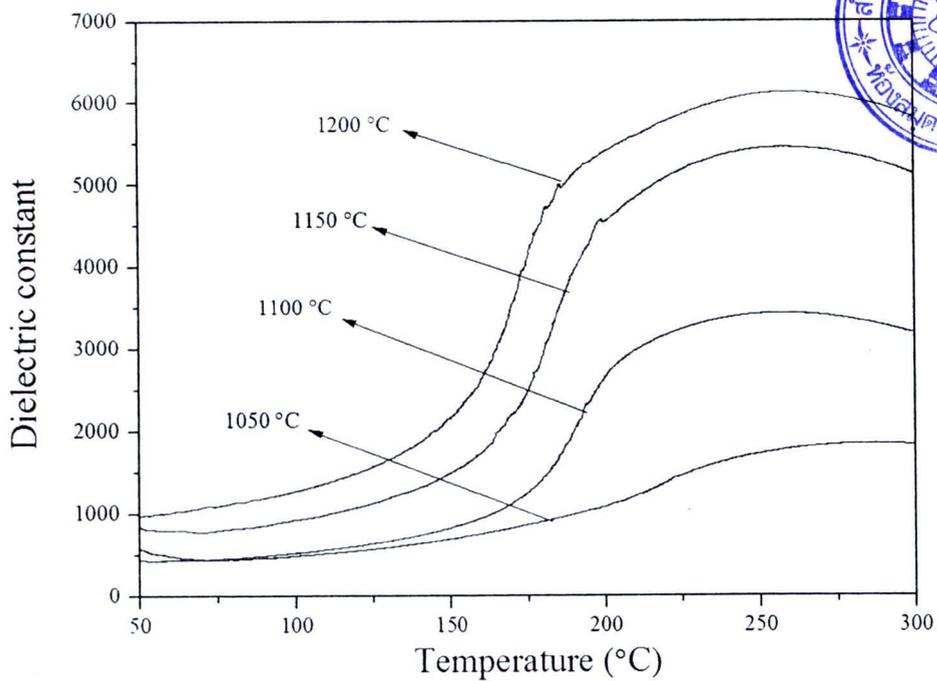
ภาพ 40 ค่าคงที่ได้คือเล็กทริกของเซรามิก BNTBT4 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ



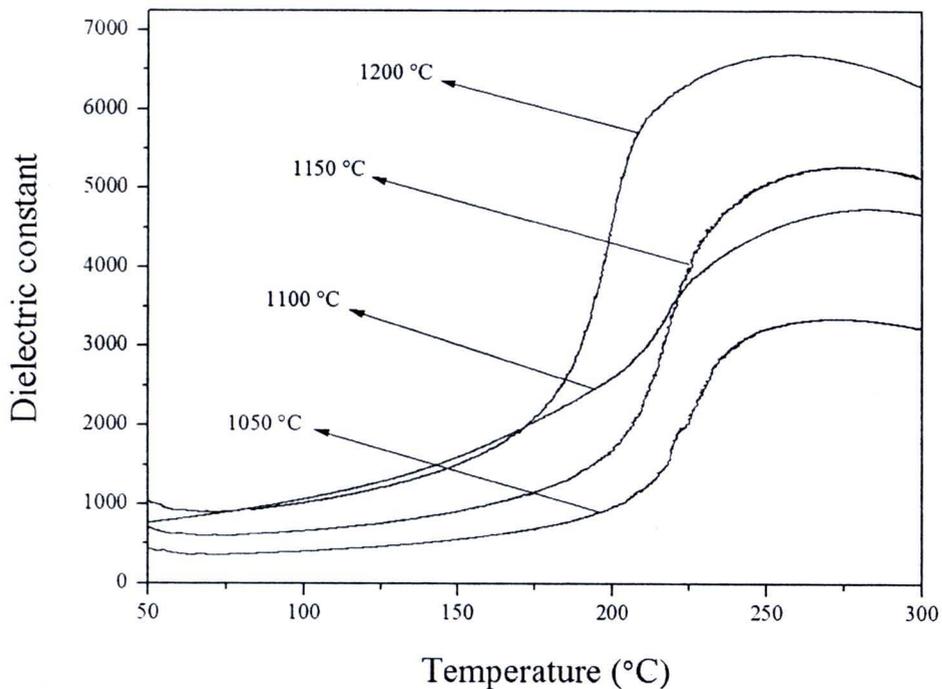
ภาพ 41 ค่าคงที่ได้คือเล็กทริกของเซรามิก BNTBT6 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ



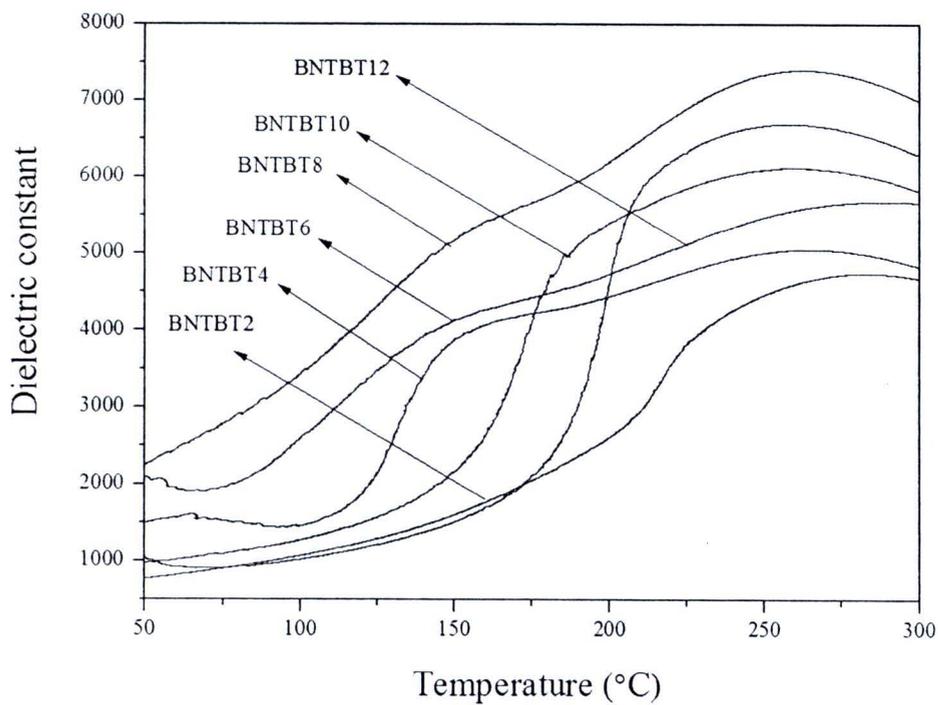
ภาพ 42 ค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกของเซรามิก BNTBT8 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ



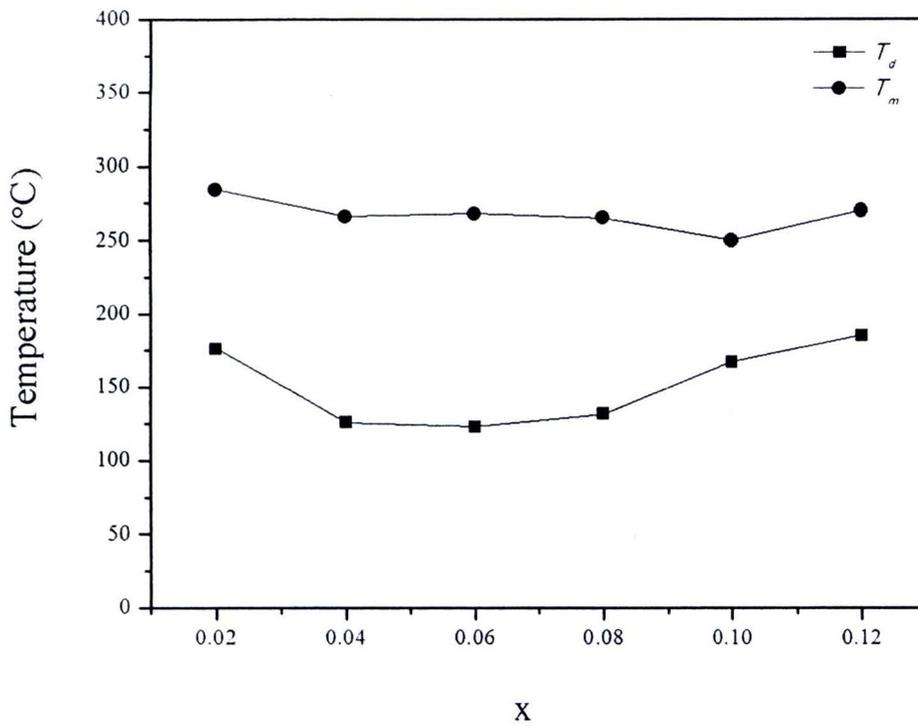
ภาพ 43 ค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกของเซรามิก BNTBT10 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพ 44 ค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกของเซรามิก BNTBT12 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ



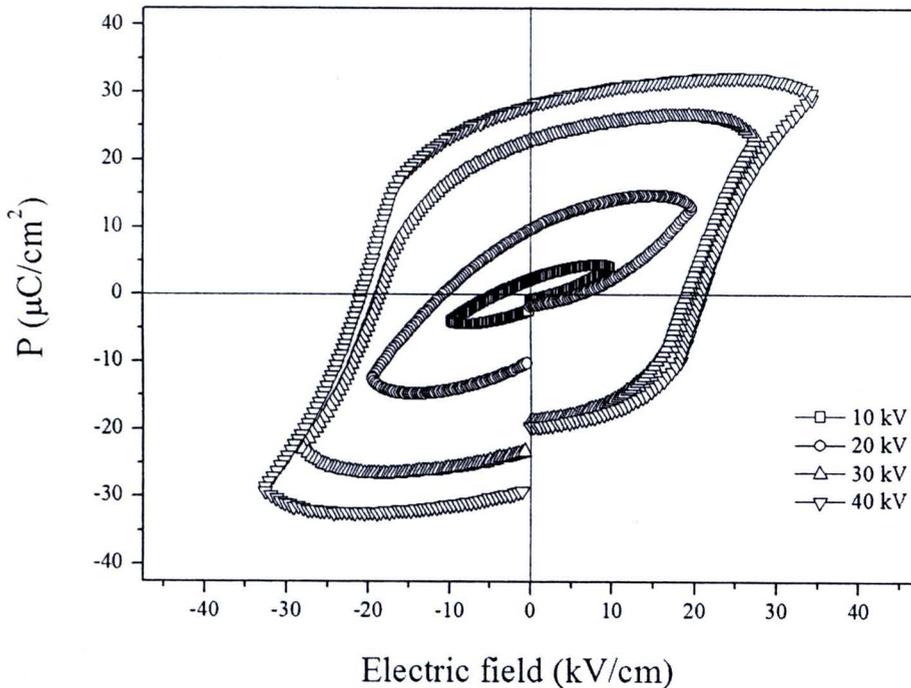
ภาพ 45 ค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกของเซรามิก BNTBT100x ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 - 1200 องศาเซลเซียส



ภาพ 46 T_d และ T_m ของเซรามิก BNTBT100x ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

ตาราง 4 แสดงอุณหภูมิ depolarization (T_d) อุณหภูมิคูรี (T_m) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ที่ T_m ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ที่ T_m ของเซรามิก BNTBT100x ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ

เซรามิก	อุณหภูมิซินเตอร์ ($^{\circ}\text{C}$)	T_d ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ϵ_r ที่ T_m	$\tan \delta$ ที่ T_m
BNTBT2	1050	162	287	1853	0.0292
	1100	168	286	3165	0.0607
	1150	176	284	4747	0.0758
BNTBT4	1050	125	275	2637	0.0255
	1100	125	271	3743	0.0215
	1150	126	266	5574	0.0298
BNTBT6	1050	145	272	2427	0.0451
	1100	131	270	3600	0.0252
	1150	123	268	5530	0.0334
	1200	110	288	5682	0.1762
BNTBT8	1050	151	270	2730	0.3464
	1100	145	268	4721	0.0157
	1150	132	265	6327	0.0120
	1200	130	263	7400	0.0372
BNTBT10	1050	192	282	1855	0.0291
	1100	184	225	3249	0.0389
	1150	167	250	5440	0.0329
	1200	103	260	6125	0.0453
BNTBT12	1050	224	275	3350	0.0376
	1100	220	282	4747	0.0753
	1150	185	270	5272	0.0504
	1200	130	260	6692	0.0423



ภาพ 47 วงรอบฮิสเทอรีซิสของเซรามิก BNTBT8 ที่ค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ

1.5 ผลการวัดค่าโพลาริเซชัน (P) และค่าคงที่พีโซอิเล็กทริก (d_{33})

การศึกษาลักษณะสมบัติเพโรอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT8 ที่มีความหนาแน่นสูงสุด โดยการวัดวงรอบฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ที่สนามไฟฟ้าต่างๆ แสดงดังภาพ 47 พบว่าโพลาริเซชันอิ่มตัว (P_s) โพลาริเซชันคงค้าง (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง (E_c) ของเซรามิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่เซรามิกมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังตาราง 5 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ $29.94 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $28.10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และ $21.02 \text{ kV}/\text{cm}$ ตามลำดับ เมื่อใช้สนามไฟฟ้า $40 \text{ kV}/\text{cm}$ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้อ การเจือสาร BT ในเซรามิก BNT ช่วยทำให้ค่าโพลาริเซชันคงค้างสูงขึ้น และสนามไฟฟ้าลบล้างต่ำกว่าเซรามิก BNT [12, 13]

การศึกษาลักษณะสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT8 ที่มีความหนาแน่นสูงสุด โดยการวัดค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก d_{33} ทำการโพลลิง (polling) ภายใต้สนามไฟฟ้า $35 \text{ kV}/\text{cm}$ ใน silicone oil ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เท่ากับ $169 \text{ pC}/\text{N}$ แสดงดังตาราง 5 นอกจากนี้แล้วค่าพีโซอิเล็กทริกของเซรามิก BNTBT8 ที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยที่เคยศึกษามาก่อน [37]

ตาราง 5 แสดงค่าคงที่พิโซอิเล็กทริก (d_{33}) โพลาริเซชันอิมพัลส์ (P_s) โพลาริเซชันคงค้าง (P_r) และสนามไฟฟ้าลบล้าง (E_c) ของเซรามิก BNTBT8

เซรามิก	d_{33} (pC/N)	สนามไฟฟ้า (KV/cm)	โพลาริเซชัน อิมพัลส์ ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	โพลาริเซชัน คงค้าง ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	สนามไฟฟ้า ลบล้าง (kV/cm)
BNTBT8	169	10	4.01	2.21	2.89
		20	12.65	9.62	6.10
		30	23.57	22.82	19.05
		40	29.94	28.10	21.02

2. ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของเซรามิกบิสมาท์โซเดียมไททานेट-แคลเซียมไททานेट (1-x)BNT-xCT; BNTCT100x

2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD)

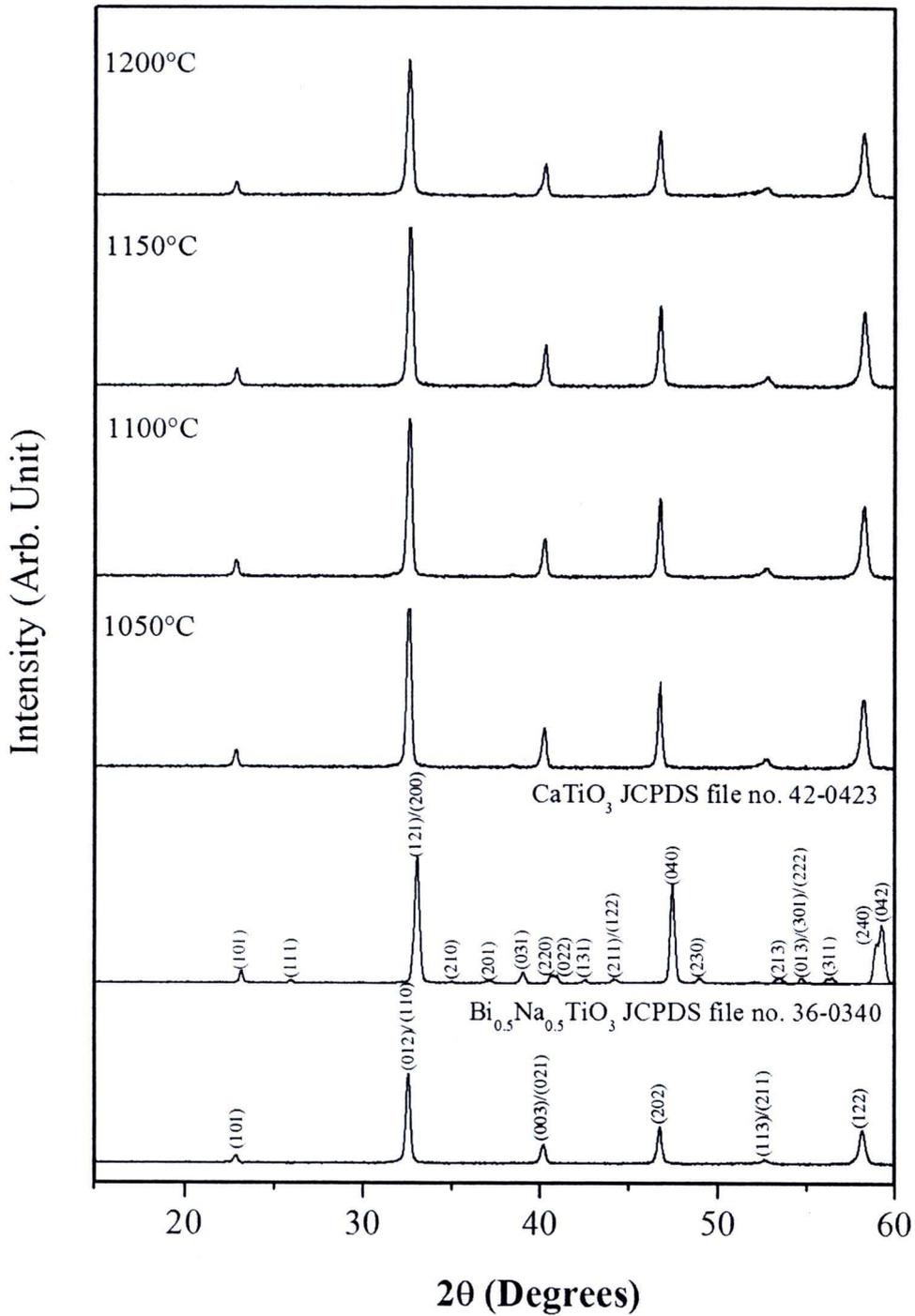
นำผงผลึก BNT และ CT มาผสมกันตามสัดส่วนโดยโมลโดยใช้อัตราส่วน $x = 0.02, 0.04, 0.06$ และ 0.08 (BNTCT2, BNTCT4, BNTCT6 และ BNTCT8) เพื่อนำมาอัดเม็ดและเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1050-1200 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปเซรามิก BNT มีโครงสร้างรอมโบอีดรอลซึ่งตรงกับแฟ้มข้อมูลของ JCPDS หมายเลข 36-0340 [8, 35] ในขณะที่เซรามิก CT มีโครงสร้างแบบอโรธอมบิคซึ่งตรงกับแฟ้มข้อมูลของ JCPDS หมายเลข 42-0423 [6] จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของเซรามิก BNTCT2, BNTCT4, BNTCT6 และ BNTCT8 ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1050-1200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพ 48, ภาพ 49, ภาพ 50 และภาพ 51 ตามลำดับ พบว่าเซรามิกมีโครงสร้างแบบรอมโบอีดรอลซึ่งเหมือนกับ BNT โดยสังเกตจากพีคคู่ของ (003)/(021) เกิดขึ้น ที่มุมระหว่าง 38-42 องศา และมีพีคเดี่ยวของ (202) เกิดขึ้นที่มุมระหว่าง 45-48 องศา และสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษามาก่อน [14, 15] และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเซรามิกมีความเป็นรอมโบอีดรอลมากขึ้น

คำนวณหาค่าแลตทิซแสดงความเป็นรอมโบอีดรอล (a_R) จากสมการ

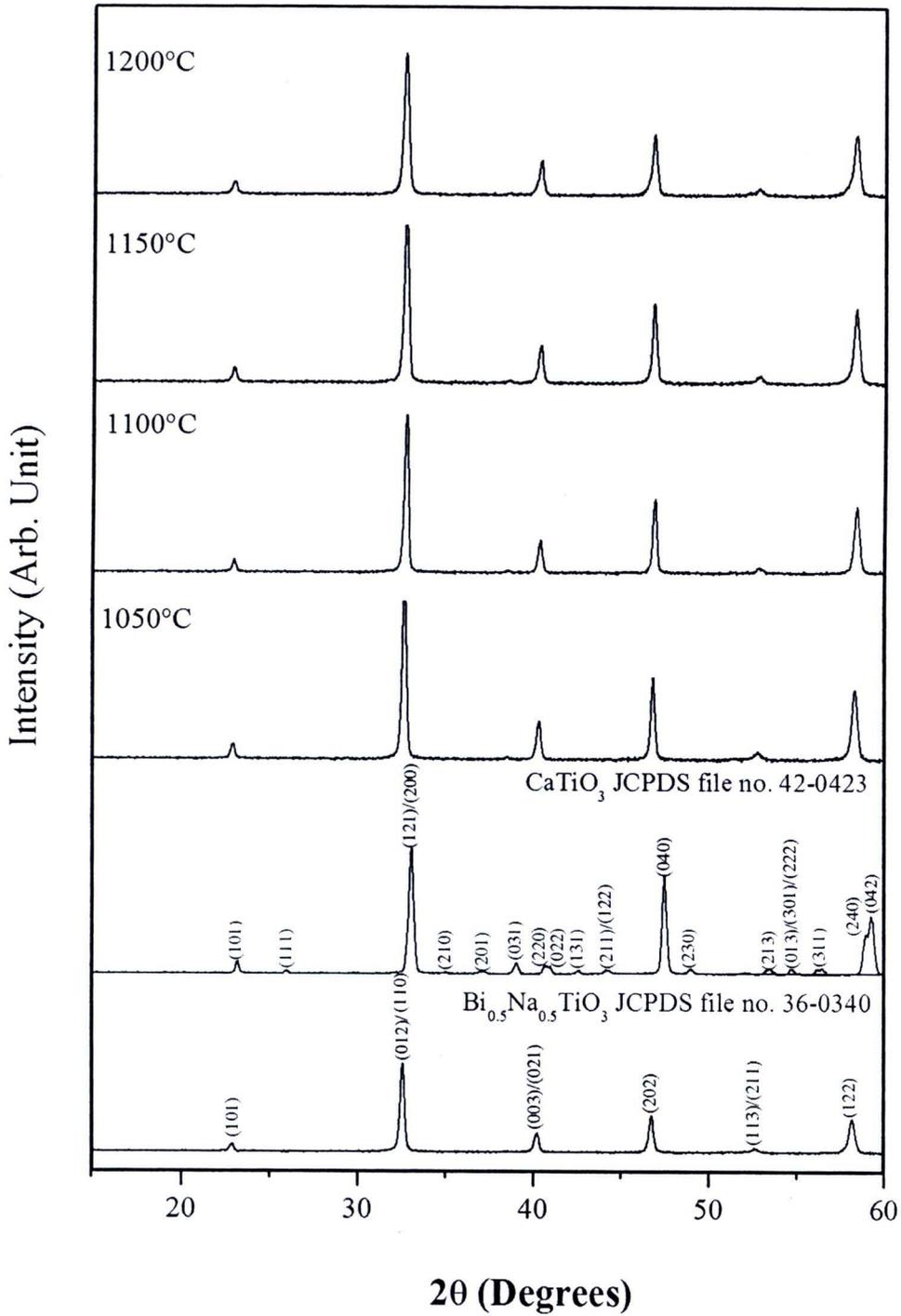
$$a_R = \frac{1}{3} \sqrt{3(a_H)^2 + c_H^2}$$



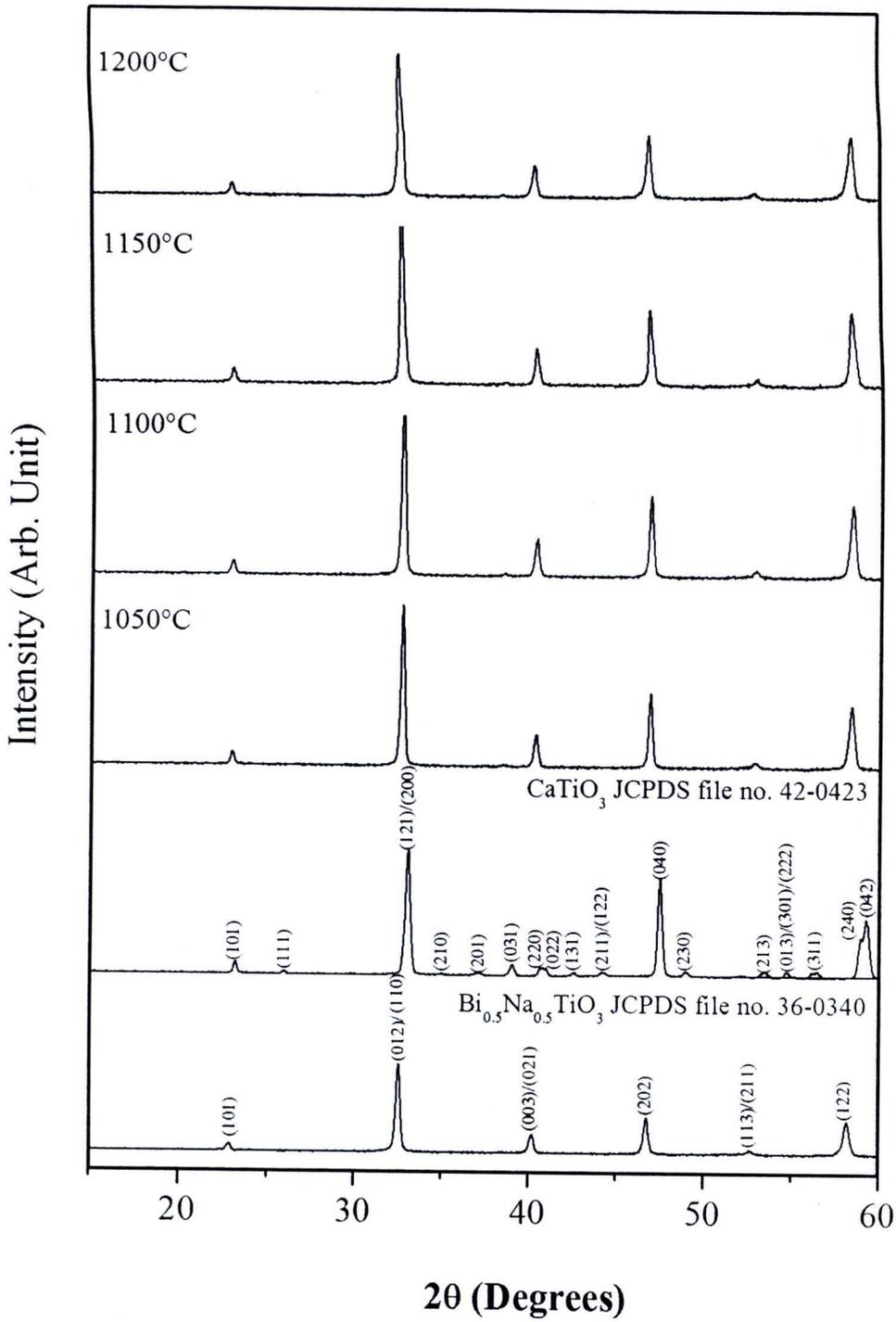
โดยที่ a_H คือค่าแลตทิซพารามิเตอร์ a ของโครงสร้างเฮกซะโกนอล และ c_H คือค่าแลตทิซพารามิเตอร์ c ของโครงสร้างเฮกซะโกนอล พบว่าค่าแลตทิซแสดงความเป็นรอมโบอีดรอล a_R มีค่าอยู่ระหว่าง 3.8664 – 3.8860 Å เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1050 – 1200 องศาเซลเซียส และแลตทิซแสดงความเป็นรอมโบอีดรอล a_R มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CT เพิ่มขึ้น เนื่องจากการแทนที่ของ CT ในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ของ BNT บริเวณ A – site โดยมีรัศมีไอออนของ Ca^{2+} (134 pm) Na^+ (139 pm) และ Bi^{3+} (140 pm) พบว่า Ca^{2+} มีขนาดรัศมีไอออนเล็กกว่าขนาดรัศมีไอออนเฉลี่ยของ A – site จึงเป็นสาเหตุให้ค่าแลตทิซพารามิเตอร์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ CT เพิ่มขึ้น และผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ L.V. Yinong และคณะ [12] ดังแสดงในตาราง 6



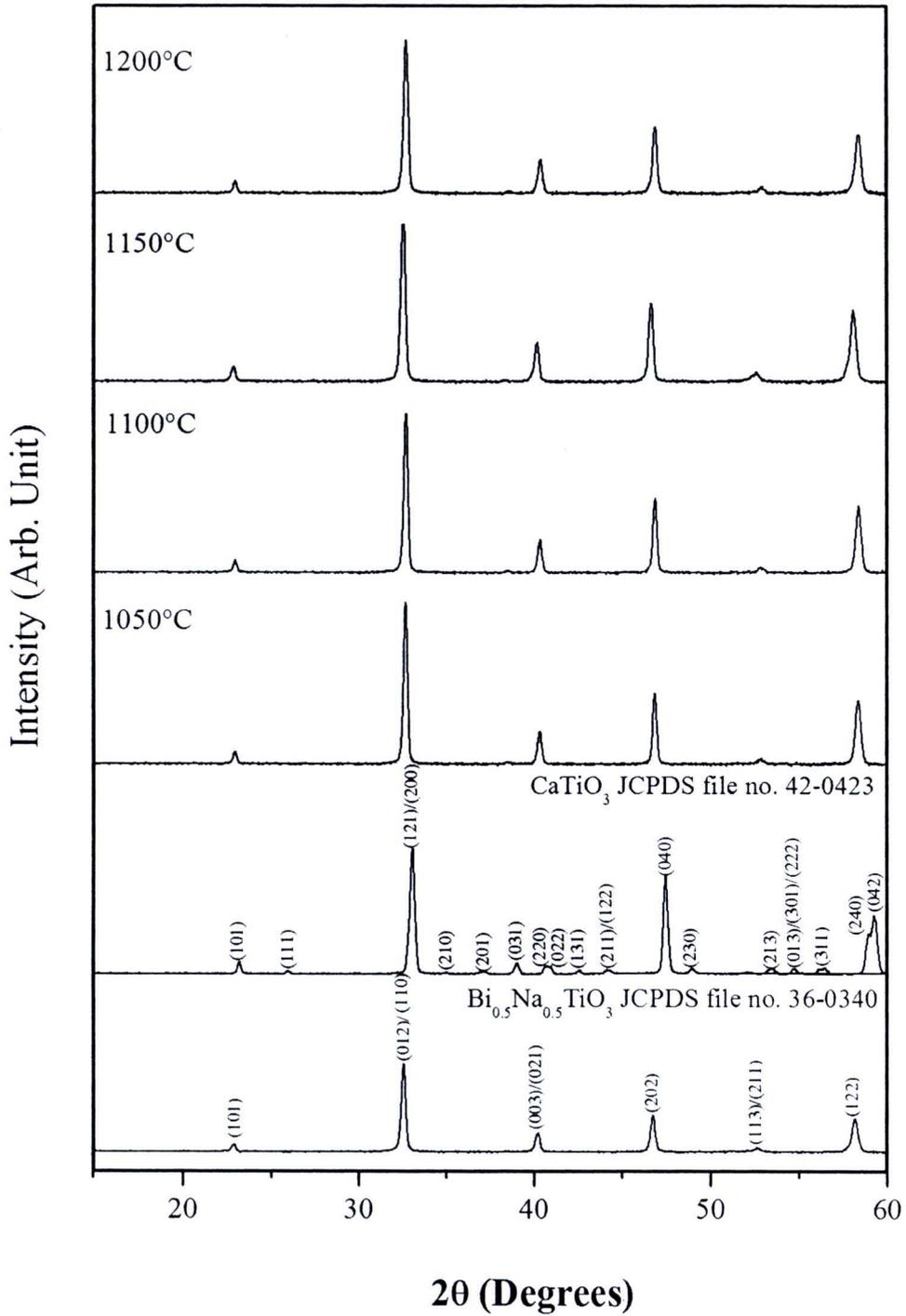
ภาพ 48 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTCT2 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ



ภาพ 49 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTCT4 ที่อุณหภูมิซินเตอร์
ต่างๆ



ภาพ 50 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTCT6 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ



ภาพ 51 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTCT8 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ

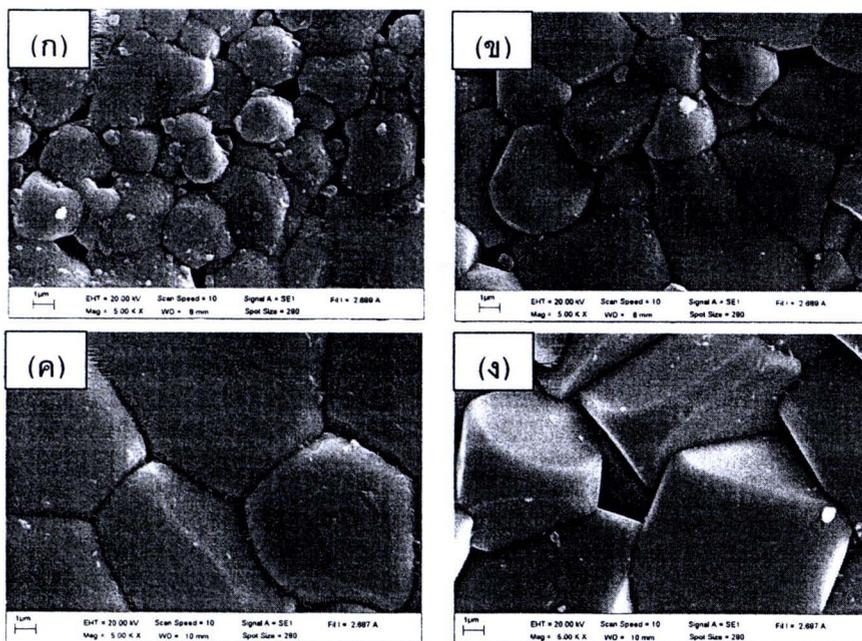
2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก BNTCT2, BNTCT4, BNTCT6 และ BNTCT8 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยถ่ายภาพบริเวณผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพ 52, ภาพ 53, ภาพ 54 และ ภาพ 55 พบว่ารูปร่างเกรนส่วนใหญ่ของเซรามิกมีลักษณะคล้ายเป็นทรงกลมและสี่เหลี่ยมมุมฉาก จากภาพ 52 พบว่าเซรามิก BNTCT2 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1100 องศาเซลเซียส เซรามิกมีรูพรุนมาก (ภาพ 52 (ก) และ (ข)) หลังจากนั้นพบว่ารูพรุนลดลงและเกรนมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพ 52 (ค) และ (ง) สำหรับเซรามิก BNTCT 4, BNTCT6 และ BNTCT8 ขนาดเกรนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 6 นอกจากนั้นพบว่าเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น ขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 2.43 – 8.28 ไมโครเมตร (ตาราง 6)

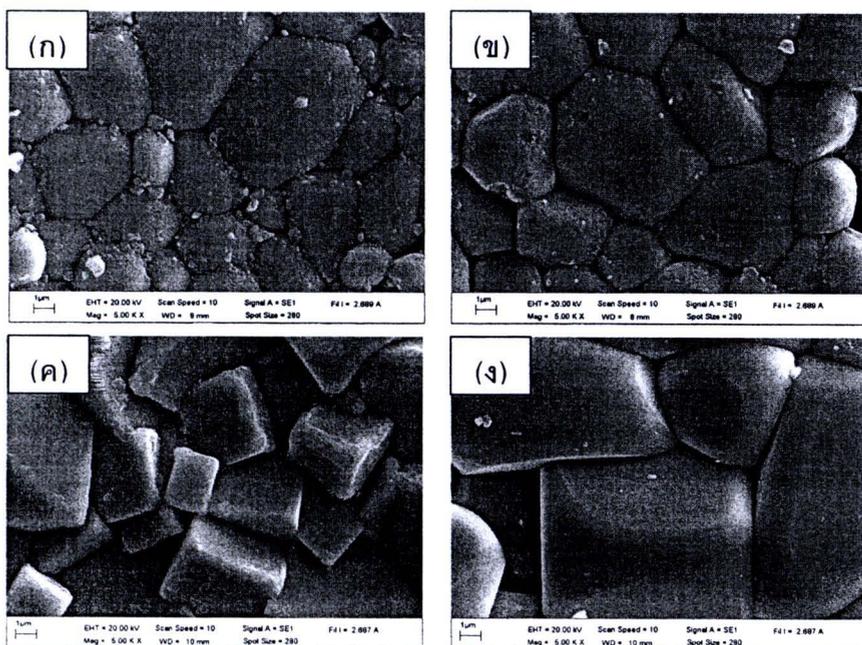
ภาพ 56 แสดงรูปถ่ายรอยหักของเซรามิก BNTCT2 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ที่อุณหภูมಿನ้อยกว่าหรือเท่ากับ 1100 องศาเซลเซียส เป็นรอยหักชนิดหักตามเกรน และพบรูพรุนแบบเปิด ในขณะที่อุณหภูมิซินเตอร์สูงขึ้น เซรามิกจะหักแบบผ่าเกรนแสดงให้เห็นว่ามีความหนาแน่นมาก แต่อย่างไรก็ตามยังพบรูพรุนแบบปิด ด้วยเหตุนี้ทำให้เซรามิกที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสมีความหนาแน่นน้อยลง

2.3 ผลการคำนวณหาค่าความหนาแน่นและการหดตัวเชิงเส้น

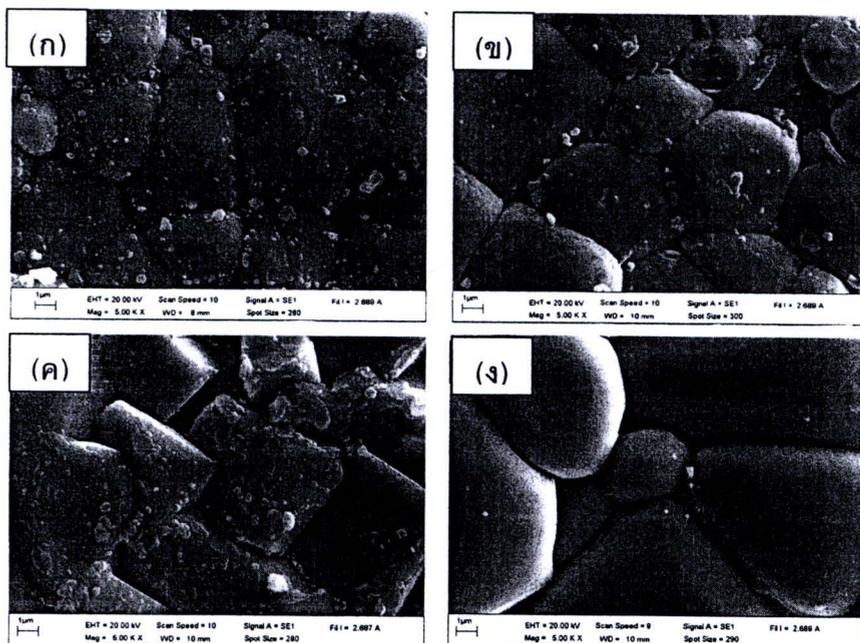
ค่าความหนาแน่นและค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิก BNTCT2, BNTCT4, BNTCT6 และ BNTCT8 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตาราง 6 พบว่าเซรามิกมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึง 1150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น และการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น (ตาราง 5) เมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าการหดตัวเชิงเส้น มีค่าอยู่ระหว่าง 12.5 – 14.4 % ดังแสดงในตาราง 6



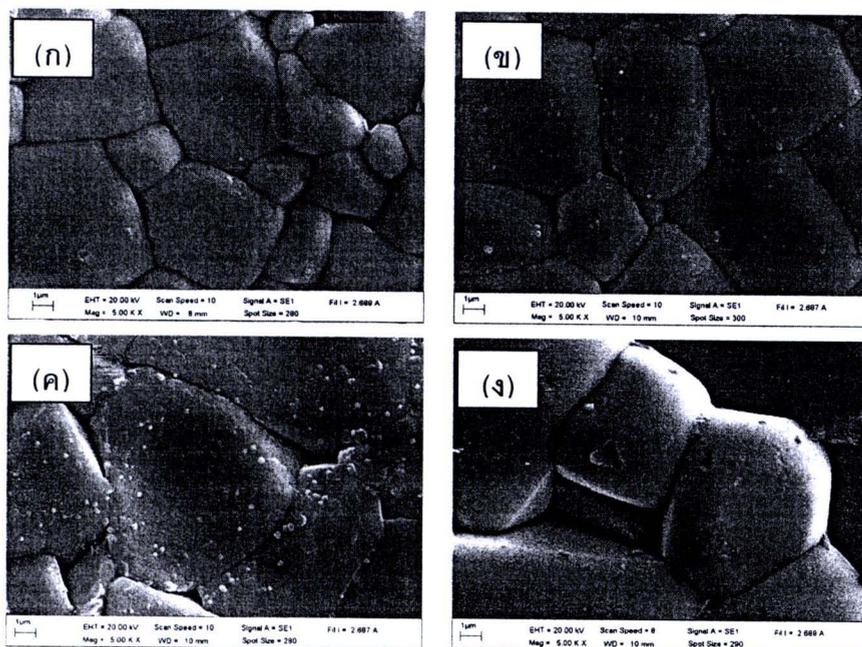
ภาพ 52 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTCT2 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส



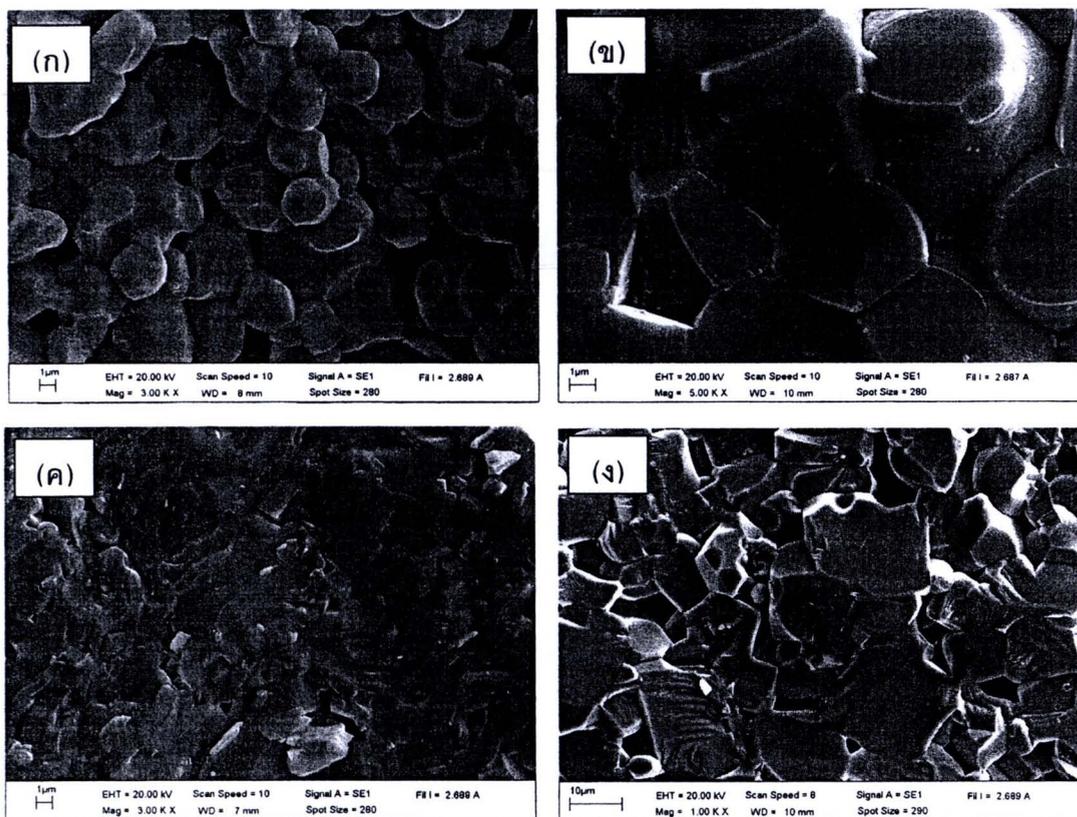
ภาพ 53 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTCT4 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส



ภาพ 54 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTCT6 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส



ภาพ 55 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTCT8 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส



ภาพ 56 ภาพถ่ายบริเวณรอยหักของเซรามิก BNTCT2 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส

ตาราง 6 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ย ความหนาแน่น การหดตัวเชิงเส้น และ แลตทิซพารามิเตอร์ a_R ของเซรามิก BNTCT100x ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ

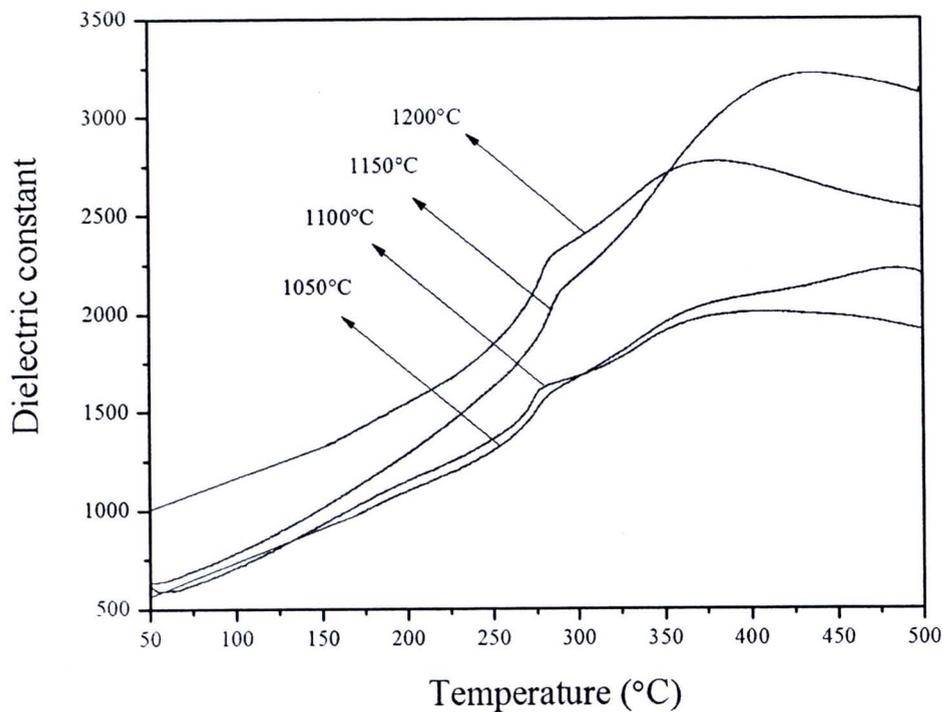
เซรามิก	อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	การหดตัวเชิงเส้น (%)	แลตทิซพารามิเตอร์ a_R (Å)
BNTCT2	1050	2.43	5.19	12.7	3.8782
	1100	4.28	5.37	12.9	3.8746
	1150	6.71	5.57	13.0	3.8776
	1200	8.28	5.45	13.4	3.8765
BNTCT4	1050	3.00	5.10	12.6	3.8758
	1100	3.71	5.24	12.9	3.8766
	1150	4.85	5.55	13.6	3.8724
	1200	8.14	5.41	13.5	3.8753
BNTCT6	1050	3.85	4.99	12.5	3.8722
	1100	4.05	5.17	12.8	3.8757
	1150	5.65	5.50	13.7	3.8719
	1200	8.57	5.40	13.8	3.8707
BNTCT8	1050	5.28	4.80	12.8	3.8709
	1100	5.85	5.09	13.1	3.8664
	1150	5.71	5.30	13.8	3.8860
	1200	6.42	5.40	14.4	3.8706

2.4 ผลที่ได้จากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก

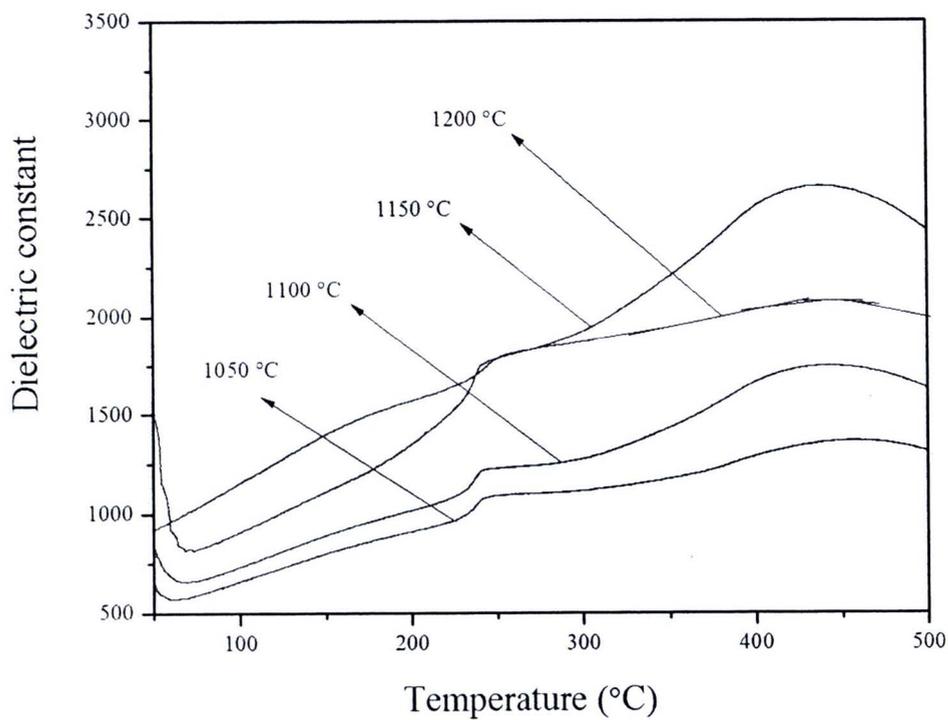
ศึกษาผลจากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTCT2, BNTCT4, BNTCT6 และ BNTCT8 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ โดยใช้ความถี่ 1 kHz ดังแสดงในภาพ 57, ภาพ 58, ภาพ 59 และ ภาพ 60 ตามลำดับ พบว่ามีพีคเกิดขึ้น 2 พีค โดยพีคแรกเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ depolarization (T_d) ประมาณ 119 - 287 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก และพีคที่สองเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิคูรี (T_m) ประมาณ 369 - 494 องศาเซลเซียส สามารถหาได้จากอุณหภูมิที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนเฟสจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นพาราอิเล็กทริก การเปลี่ยนเฟสดังกล่าวมีการรายงานโดยงานวิจัยของ T. Takenaka [14] ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึง 1150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพ 57, ภาพ 58, ภาพ 59 และ ภาพ 60 และการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นดังแสดงในตาราง 7

ที่อุณหภูมิซินเตอร์เดียวกันพบว่า T_d มีค่าลดลงในขณะที่ T_m มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 7 จากงานวิจัยของ Yuan E.Z. และคณะ [14] พบว่าการเติม CT ในเซรามิก BNT ทำให้ T_d มีค่าลดลง เนื่องจาก Ca^{2+} มีขนาดเล็กและมีค่า polarizability ต่ำ จึงทำให้ความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกของ BNT ลดลงเมื่อเติม CT เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจาก ferroelectric macrodomains ไปเป็น polar nanodomains สำหรับการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงเมื่อ x เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดเท่ากับ 3208 ที่ $x = 0.02$ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของค่าความหนาแน่น และผลจากการเตรียมเซรามิก BNTCT100x ด้วยวิธีการเผาไหม้สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่ำกว่าวิธีผสมออกไซด์[15]

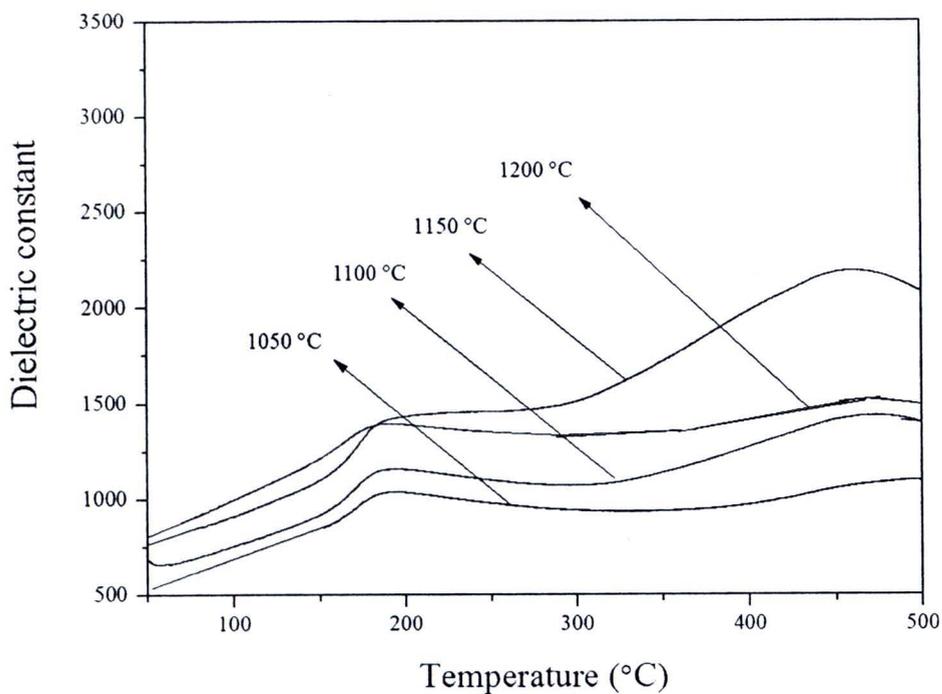




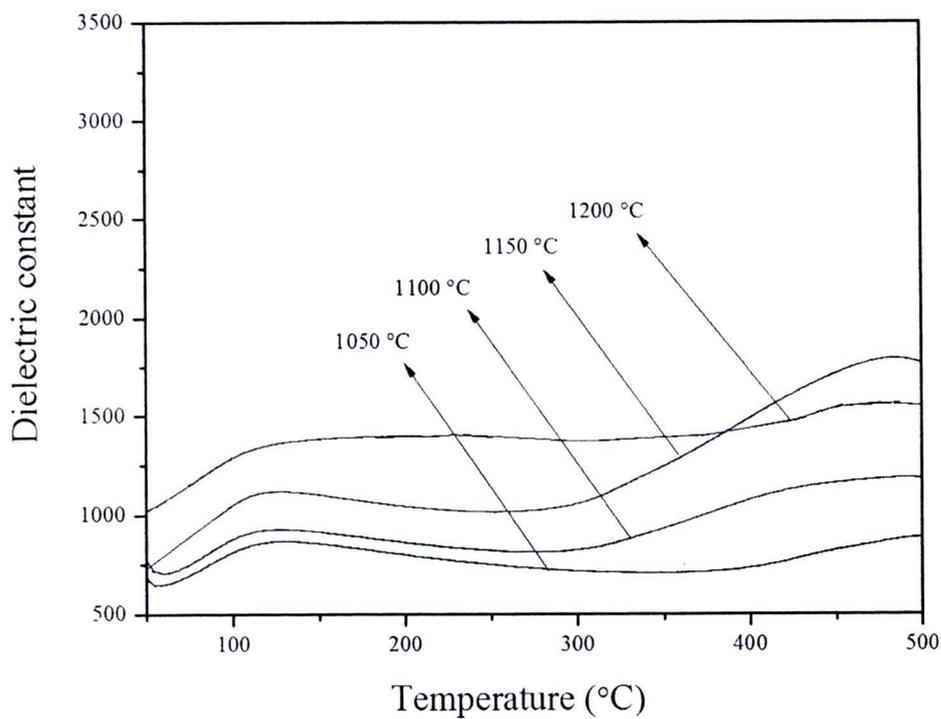
ภาพ 57 ค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ของเซรามิก BNTCT2 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพ 58 ค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ของเซรามิก BNTCT4 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพ 59 ค่าคงที่ได้ิเล็กทริกของเซรามิก BNTCT6 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพ 60 ค่าคงที่ได้ิเล็กทริกของเซรามิก BNTCT8 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

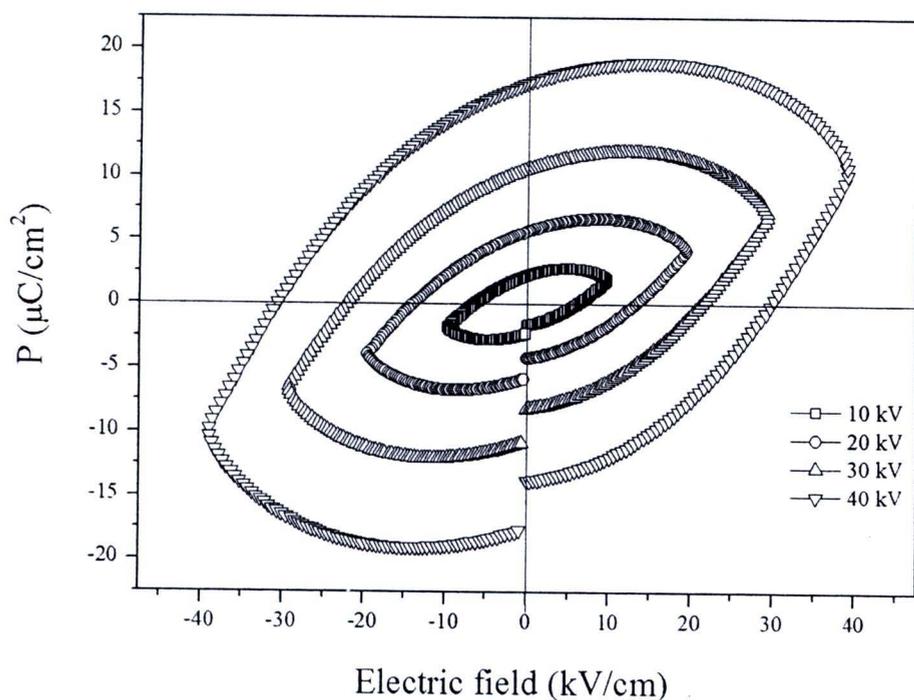
ตาราง 7 แสดงอุณหภูมิ depolarization (T_d) อุณหภูมิคูรี (T_m) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ที่ T_m ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ที่ T_m ของเซรามิก BNTCT100x

เซรามิก	อุณหภูมิซินเตอร์ ($^{\circ}\text{C}$)	T_d ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ϵ_r ที่ T_m	$\tan \delta$ ที่ T_m
BNTCT2	1050	287	389	1999	0.0367
	1100	280	478	2219	0.0450
	1150	284	429	3208	0.0505
	1200	286	369	2777	0.0625
BNTCT4	1050	246	488	1370	0.0464
	1100	243	429	1743	0.0557
	1150	247	430	2066	0.0604
	1200	239	432	2664	0.0692
BNTCT6	1050	189	488	1105	0.0491
	1100	184	474	1435	0.0595
	1150	190	462	2191	0.0629
	1200	181	474	1522	0.0753
BNTCT8	1050	120	494	892	0.0506
	1100	115	485	1188	0.0553
	1150	119	479	1801	0.0662
	1200	119	473	1549	0.0723

2.5 ผลการวัดค่าโพลาริเซชัน (P_r) และค่าคงที่พีซีโอเล็กทริก (d_{33})

การศึกษสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BNTCT2 ที่มีความหนาแน่นสูงสุด โดยการวัดวงรอบฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ที่สนามไฟฟ้าต่างๆ แสดงดังภาพ 61 พบว่า โพลาริเซชันอิ่มตัว (P_s) โพลาริเซชันคงค้าง (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง (E_c) ของเซรามิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่เซรามิกมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังตาราง 8 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ $10.27 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $17.4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และ $30.13 \text{ kV}/\text{cm}$ ตามลำดับ เมื่อใช้สนามไฟฟ้า $40 \text{ kV}/\text{cm}$ ดังนั้น การเจือสาร CT ในเซรามิก BNT ช่วยทำให้ค่าสนามไฟฟ้าลบล้างลดลง (เซรามิก BNT; $E_c = 73 \text{ kV}/\text{cm}$) ดังแสดงในตาราง 8

การศึกษสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิก BNTCT2 ที่มีความหนาแน่นสูงสุด โดยการวัดค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก d_{33} ทำการโพลลิง (polling) ภายใต้สนามไฟฟ้า $35 \text{ kV}/\text{cm}$ ใน silicone oil ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เท่ากับ 40 pC ดังแสดงในตาราง 8



ภาพ 61 วงรอบฮิสเทอรีซิสของเซรามิก BNTCT2 ที่ค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ

ตาราง 8 แสดงค่าคงที่พิโซอิเล็กทริก (d_{33}) โพลาริเซชันอิมพัลส์ (P_s) โพลาริเซชันคงค้าง (P_r) และสนามไฟฟ้าลบกลับ (E_c) ของเซรามิก BNTCT2

เซรามิก	d_{33} (pC/N)	สนาม ไฟฟ้า (KV/cm)	โพลาริเซชัน อิมพัลส์ ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	โพลาริเซชัน คงค้าง ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	สนามไฟฟ้า ลบกลับ (kV/cm)
BNTCT2	40	10	1.95	2.23	6.18
		20	4.16	5.68	13.48
		30	6.89	10.61	21.42
		40	10.27	17.4	30.13

3. ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของเซรามิกบิสมาทโซเดียมไททานเตส- สทรอนเซียมไททานเตด (1-x)BNT-xST; BNTST100x

3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD)

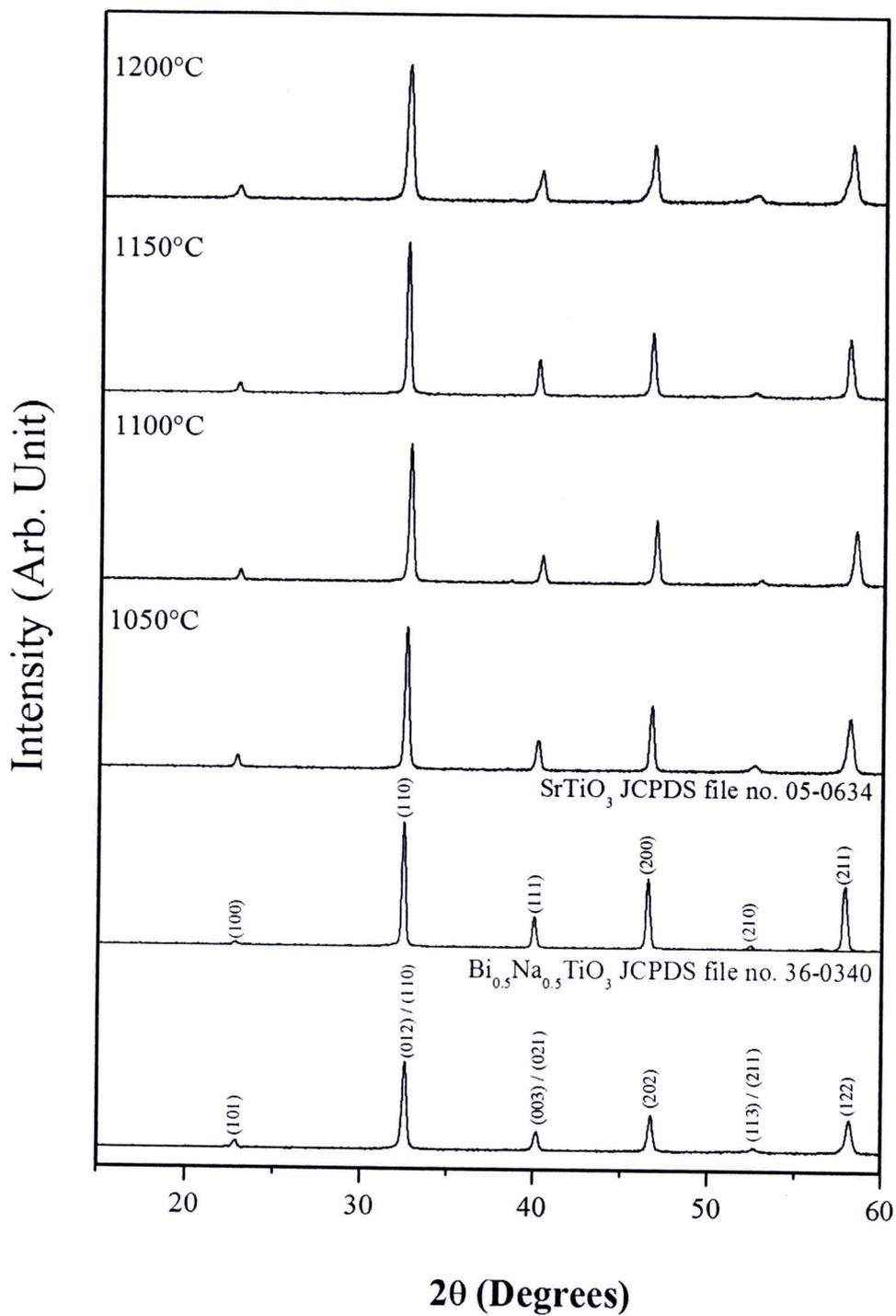
นำผงผลึก BNT และ ST มาผสมกันตามสัดส่วนโดยโมลโดยใช้อัตราส่วน $x = 0.10, 0.20, 0.30$ และ 0.40 (BNTST10, BNTST20, BNTST30 และ BNTST40) เพื่อนำมาอัดเม็ดและเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1050-1200 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปเซรามิก BNT มีโครงสร้างรวมโบฮีตรอลซึ่งตรงกับแฟ้มข้อมูลของ JCPDS หมายเลข 36-0340 [8, 38] ในขณะที่เซรามิก ST มีโครงสร้างแบบคิวบิกตรงกับแฟ้มข้อมูลของ JCPDS หมายเลข 05-0634 [7] จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของเซรามิก BNTST10, BNTST20, BNTST30 และ BNTST40 ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1050-1200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพ 62 ภาพ 63 ภาพ 64 และภาพ 65 ตามลำดับ พบว่าเซรามิกมีโครงสร้างร่วมระหว่างรวมโบฮีตรอลกับคิวบิก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษามาก่อน [16, 36]

คำนวณหาค่าแลตทิซแสดงความเป็นรวมโบฮีตรอล (a_R) จากสูตร

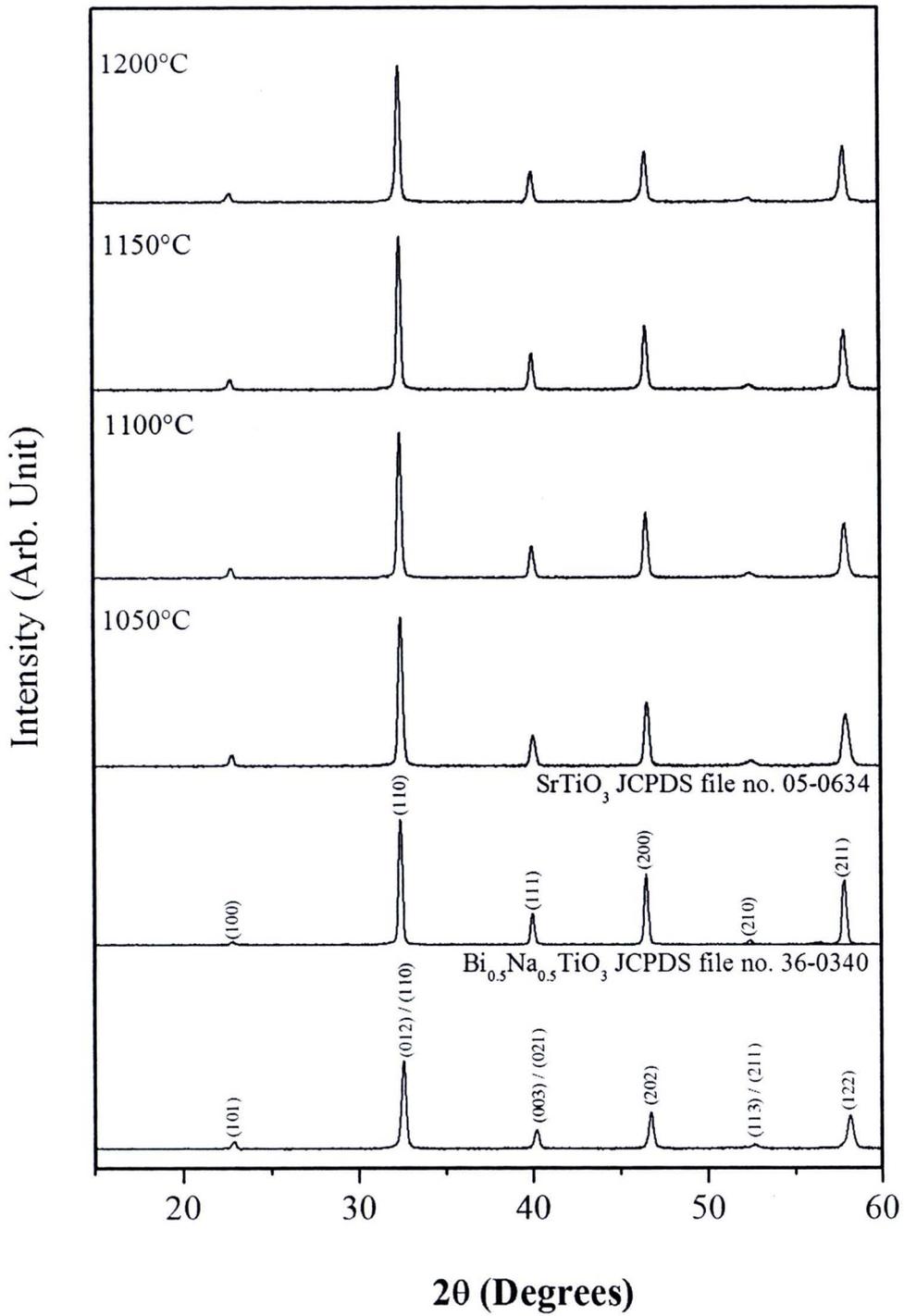
$$a_R = \frac{1}{3} \sqrt{3(a_H)^2 + c_H^2}$$

โดยที่ a_H คือค่าแลตทิซพารามิเตอร์ a ของโครงสร้างเฮกซะโกนอล และ c_H คือค่าแลตทิซพารามิเตอร์ c ของโครงสร้างเฮกซะโกนอล พบว่าค่าแลตทิซแสดงความเป็นรวมโบฮีตรอล a_R มีค่าอยู่ระหว่าง 3.9601 – 3.8702 Å เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1050 – 1200 องศาเซลเซียส และแลตทิซแสดงความเป็นรวมโบฮีตรอล a_R มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ ST เพิ่มขึ้น เนื่องจากการแทนที่ของ ST ในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ของ BNT บริเวณ A – site โดยมีรัศมีไอออนของ Sr^{2+} (144 pm) Na^+ (139 pm) และ Bi^{3+} (140 pm) พบว่า Sr^{2+} มีขนาดรัศมีไอออนใหญ่กว่าขนาดรัศมีไอออนเฉลี่ยของ A – site จึงเป็นสาเหตุให้ค่าแลตทิซพารามิเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ ST เพิ่มขึ้น และผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ L.V. Yinong และคณะ [12] ดังแสดงในตาราง 9

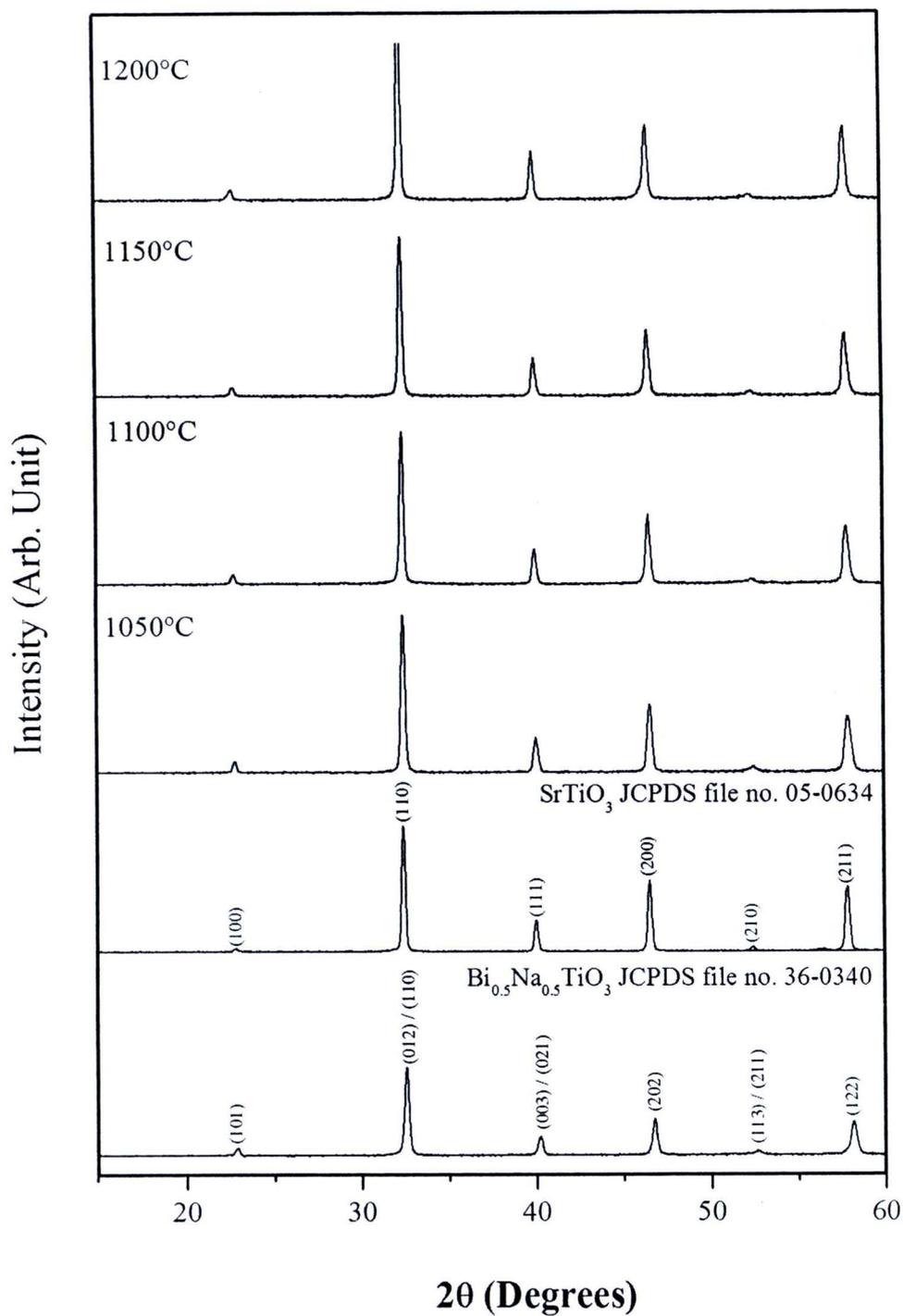




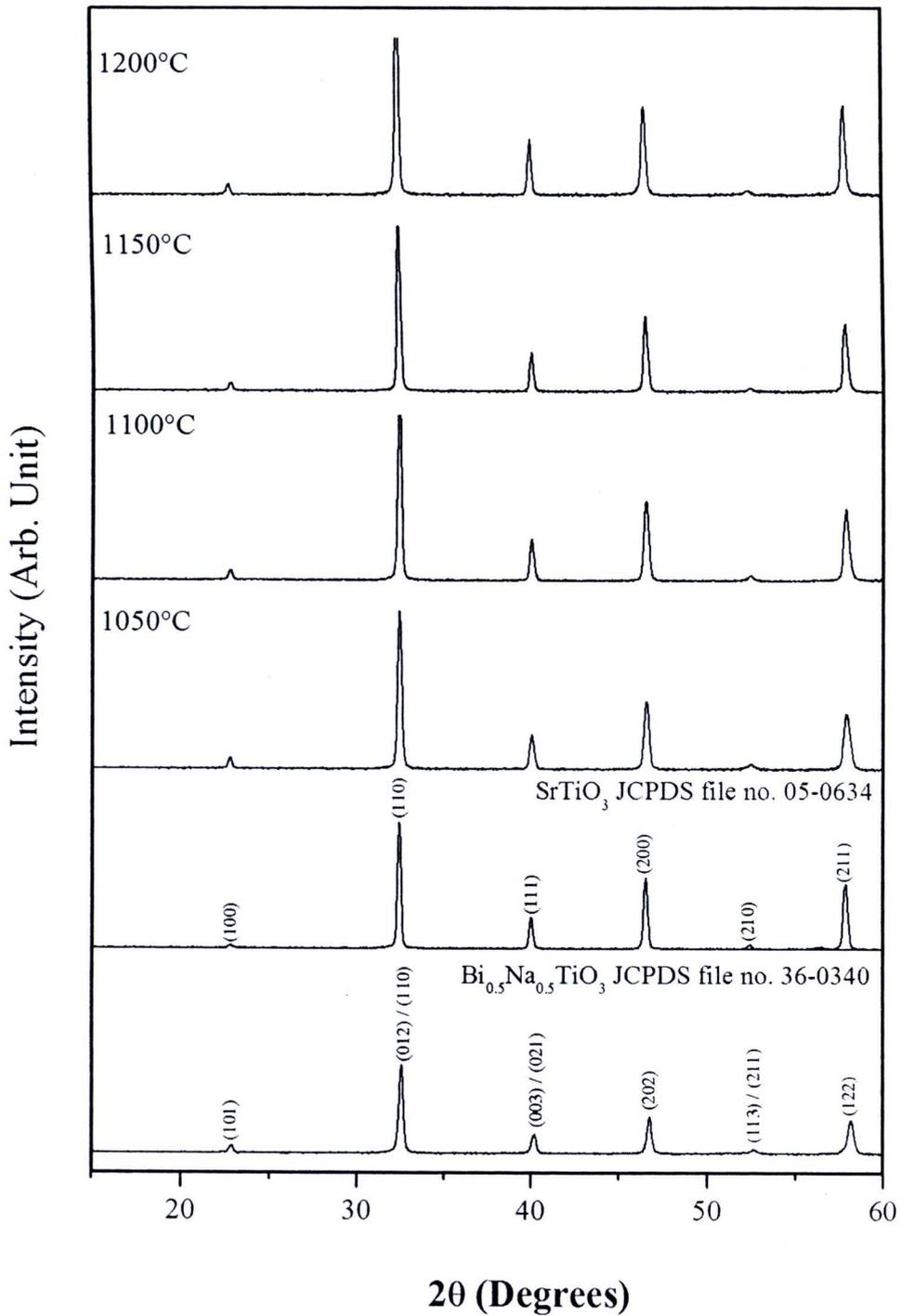
ภาพ 62 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTST10 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ



ภาพ 63 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTST20 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ



ภาพ 64 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTST30 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ



ภาพ 65 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก BNTST40 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ

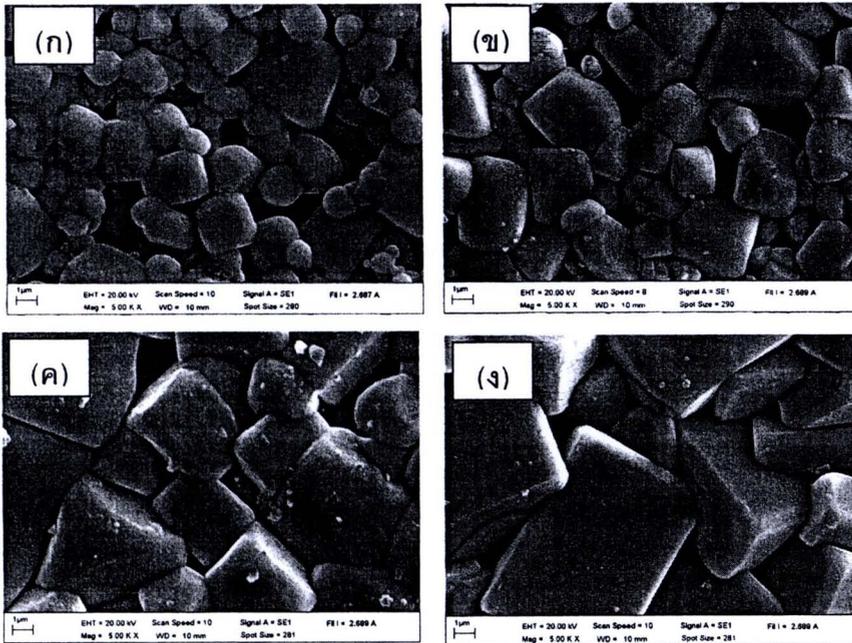
3.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก BNTST10, BNTST20, BNTST30 และ BNTS40T8 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยถ่ายภาพบริเวณผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพ 66, ภาพ 67, ภาพ 68 และ ภาพ 69 พบว่ารูปร่างเกรนส่วนใหญ่ของเซรามิกมีลักษณะคล้ายเป็นทรงกลมและสีเหลืองมอมจาก จากภาพ 66 พบว่าเซรามิก BNTBT10 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1100 องศาเซลเซียส เซรามิกมีรูพรุน (ภาพ 66 (ก) และ (ข)) หลังจากนั้นพบว่าเกรนมีรูพรุนลดลงและเกรนมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพ 66 (ค) และ (ง) สำหรับเซรามิก BNTST 20, BNTST30 และ BNTST40 มีผลคล้ายกับเซรามิก BNTST10 และขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 9 นอกจากนี้พบว่าเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้นขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.85 – 10.12 ไมโครเมตร (ตาราง 9)

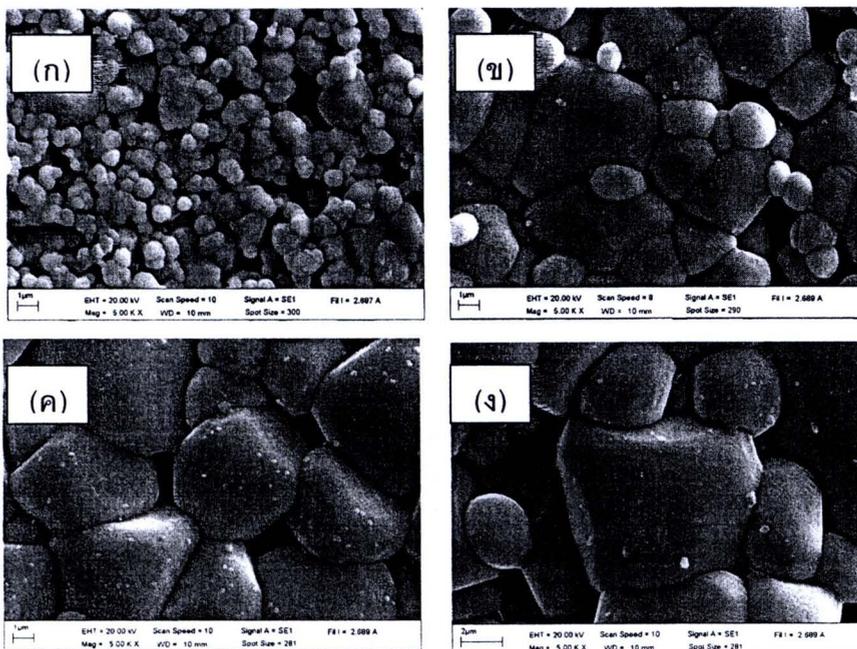
ภาพ 70 แสดงรูปถ่ายรอยหักของเซรามิก BNTST20 ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ที่อุณหภูมิน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1100 องศาเซลเซียส เป็นรอยหักชนิดหักตามเกรน และพบรูพรุนแบบเปิด ในขณะที่อุณหภูมิซินเตอร์สูงขึ้น เซรามิกจะหักแบบผ่าเกรนแสดงให้เห็นว่ามีความหนาแน่นมากขึ้น

3.3 ผลการคำนวณหาค่าความหนาแน่นและร้อยละความหดตัว

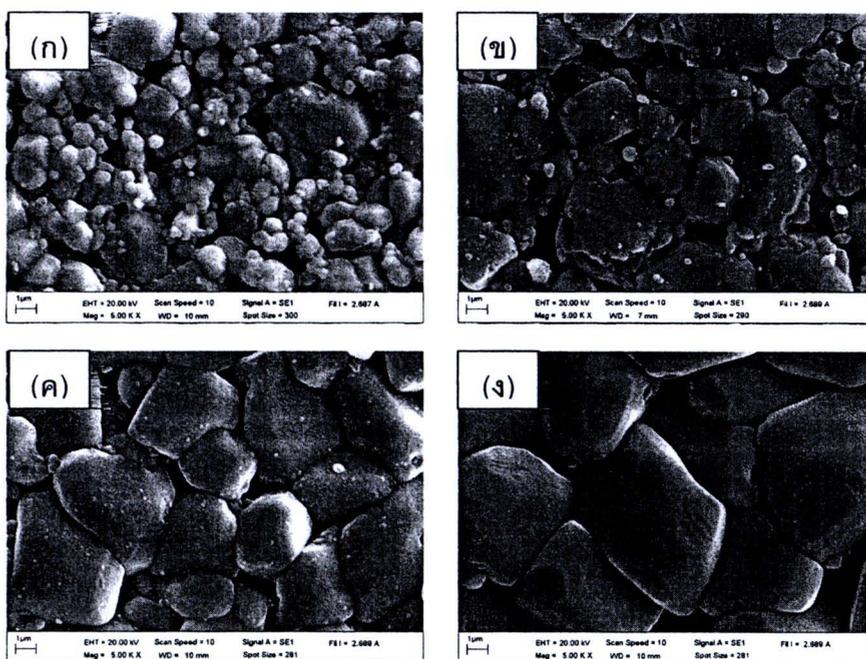
ค่าความหนาแน่นและค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิก BNTST10, BNTST20, BNTST30 และ BNTST40 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ แสดงดังตาราง 9 พบว่าเซรามิกมีค่าความหนาแน่นและการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น (ตาราง 9) และเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าการหดตัวเชิงเส้น มีค่าอยู่ระหว่าง 12.4 – 14.7 % ดังแสดงในตาราง 9



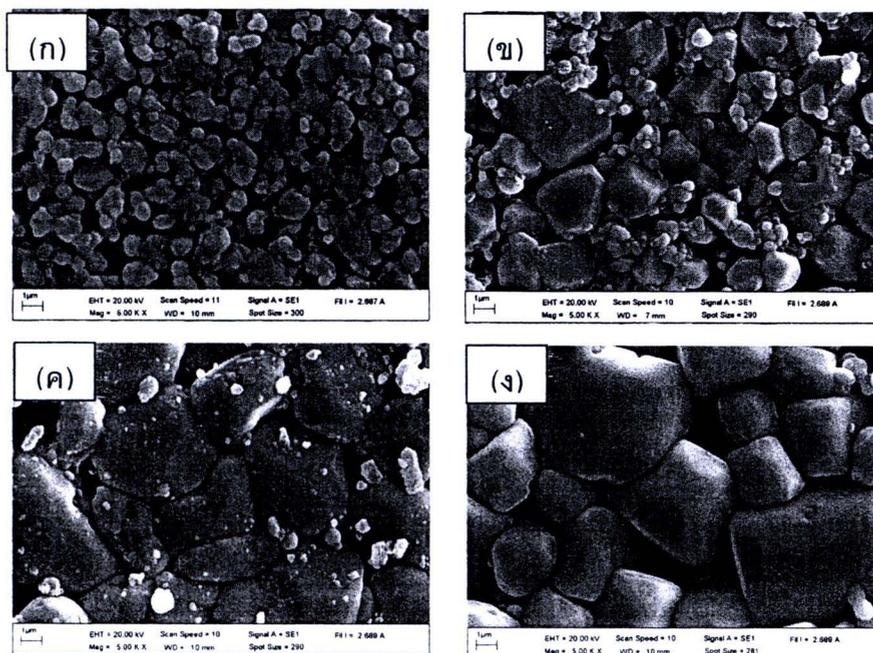
ภาพ 66 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTST10 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส



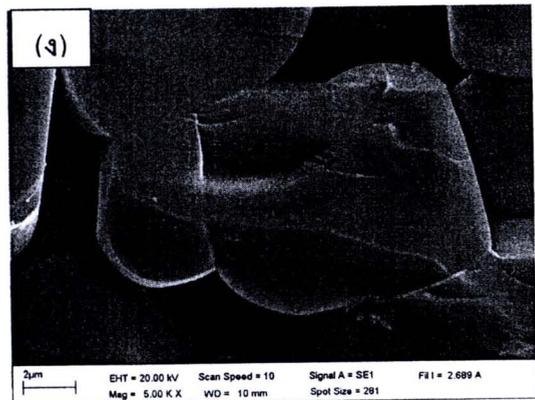
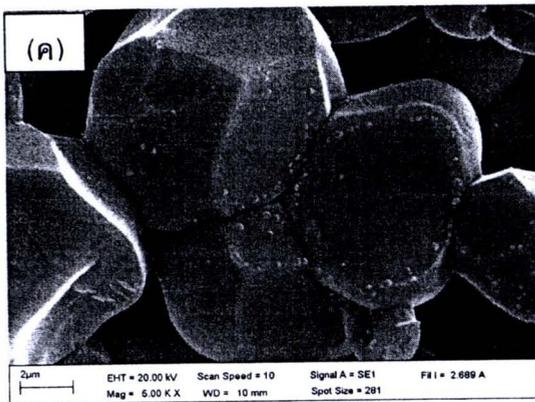
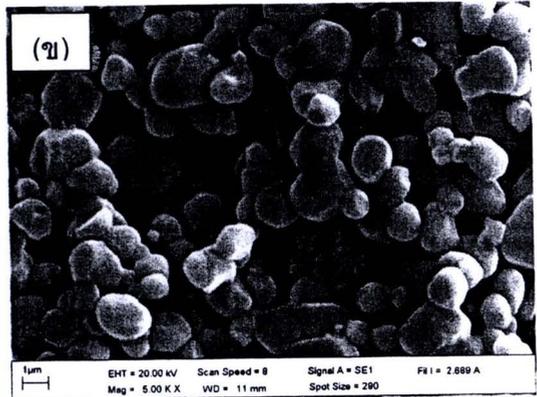
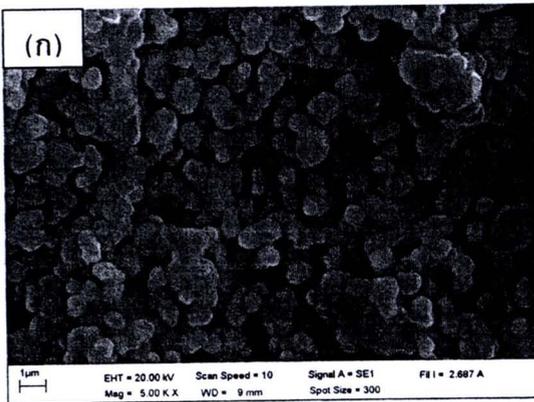
ภาพ 67 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTST20 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส



ภาพ 68 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTST30 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส



ภาพ 69 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก BNTST40 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส



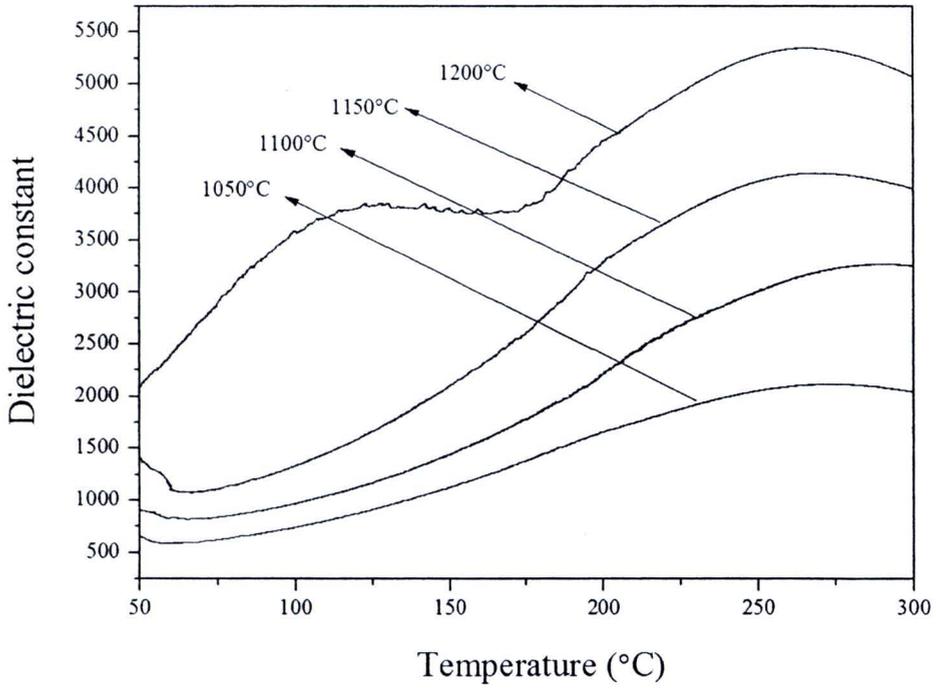
ภาพ 70 ภาพถ่ายบริเวณรอยหักของเซรามิก BNTST20 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ (ก) 1050 องศาเซลเซียส (ข) 1100 องศาเซลเซียส (ค) 1150 องศาเซลเซียส และ (ง) 1200 องศาเซลเซียส

ตาราง 9 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ย ความหนาแน่น การหดตัวเชิงเส้น และแลตทิซพารามิเตอร์ a_R ของเซรามิก BNTST100x ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ

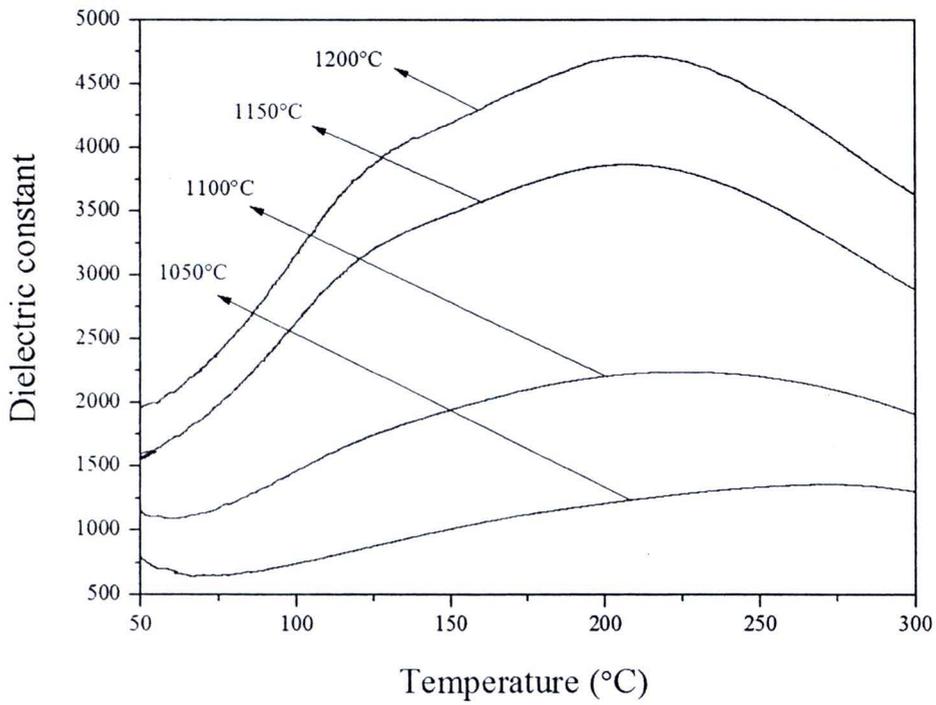
เซรามิก	อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	การหดตัวเชิงเส้น (%)	แลตทิซพารามิเตอร์ a_R (Å)
BNTST10	1050	1.71	4.99	12.4	3.8858
	1100	2.00	5.17	12.7	3.8702
	1150	4.28	5.41	13.0	3.8891
	1200	6.05	5.61	13.2	3.8865
	1250	10.12	5.40	13.7	3.8940
BNTST20	1050	1.14	4.90	12.7	3.8941
	1100	2.85	5.14	13.1	3.8971
	1150	4.85	5.45	13.4	3.8959
	1200	5.42	5.59	13.7	3.8944
	1250	8.75	5.44	14.4	3.9011
BNTST30	1050	1.42	4.81	13.0	3.8957
	1100	2.14	5.21	13.3	3.9025
	1150	3.42	5.43	13.6	3.8961
	1200	5.57	5.56	13.9	3.9008
	1250	8.50	5.45	14.5	3.9088
BNTST40	1050	0.85	4.73	13.2	3.9601
	1100	2.28	4.95	13.8	3.8994
	1150	4.28	5.44	14.1	3.9001
	1200	5.12	5.47	14.8	3.9079
	1250	7.56	5.45	14.7	3.9090

3.4 ผลที่ได้จากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก

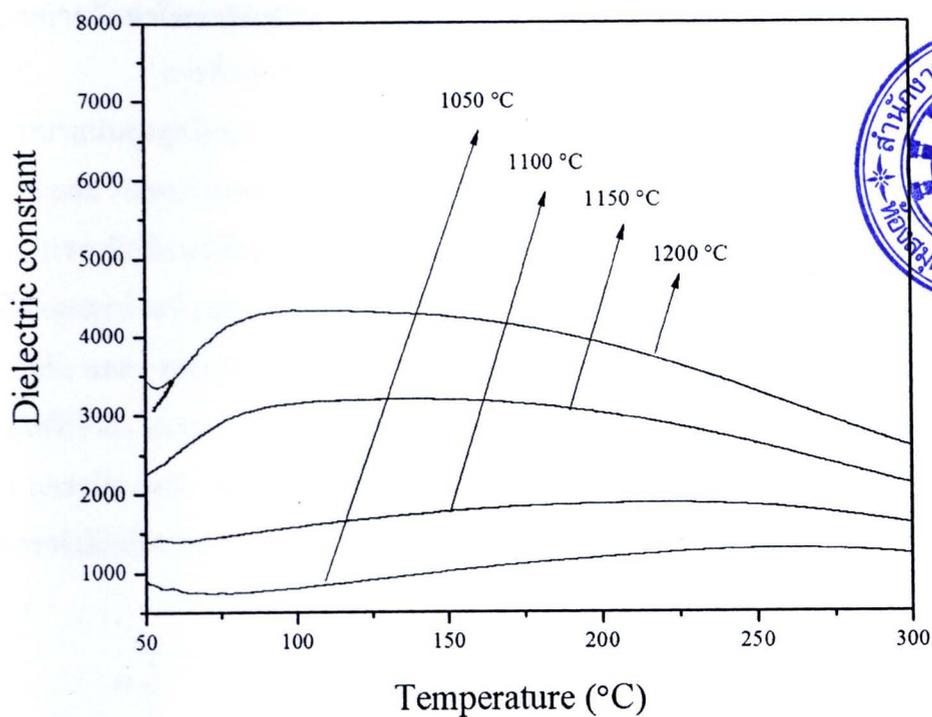
ศึกษาผลจากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTST10, BNTST20, BNTST30 และ BNTST40 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ โดยใช้ความถี่ 1 kHz ดังแสดงในภาพ 71, 72, 73 และ ภาพ 74 ตามลำดับ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTST10 และ BNTST20 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ พบว่ามีพีคเกิดขึ้น 2 พีค โดยพีคแรกเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ depolarization (T_d) ประมาณ 119 - 287 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก และพีคที่สองเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิคูรี (T_m) ประมาณ 369 - 494 องศาเซลเซียส สามารถหาได้จากอุณหภูมิที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนเฟสจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นพาราอิเล็กทริก การเปลี่ยนเฟสดังกล่าวมีการรายงานโดยงานวิจัยของ T. Takenaka [37] ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึง 1200 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพ 71 และ ภาพ 72 และการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นดังแสดงในตาราง ในกรณีเซรามิก BNTST30 และ BNTST40 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ พบว่ามีพีคเกิดขึ้นพีคเดียว โดยเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิคูรี (T_m) ประมาณ 369 - 494 องศาเซลเซียส สามารถหาได้จากอุณหภูมิที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนเฟสจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นพาราอิเล็กทริก การเปลี่ยนเฟสดังกล่าวมีการรายงานโดยงานวิจัยของ T. Takenaka [37] ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึง 1200 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพ 73 และ ภาพ 74



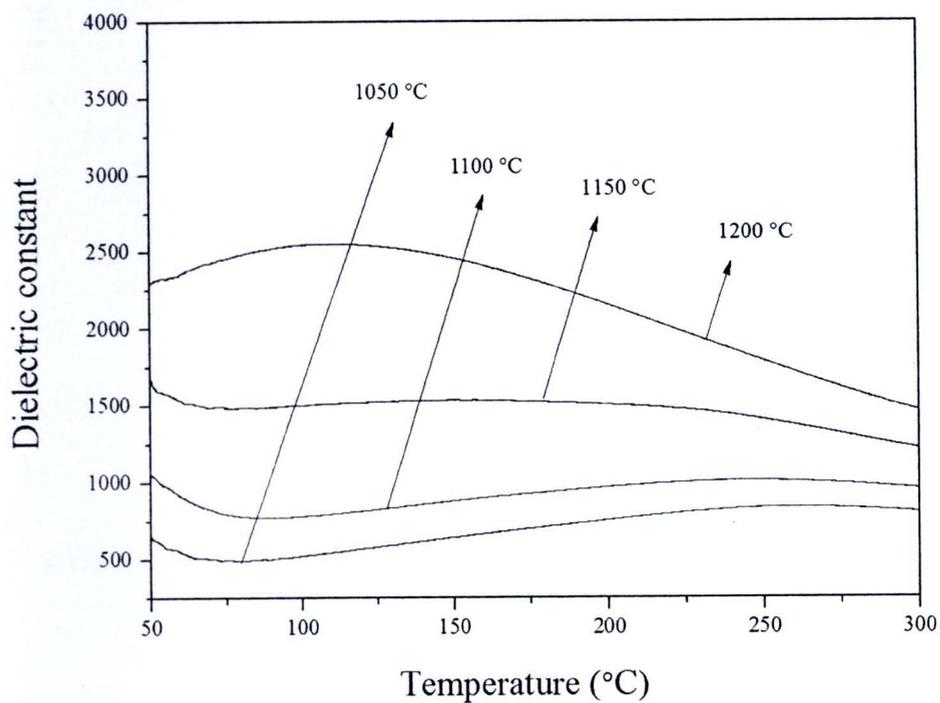
ภาพ 71 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเซรามิก BNTST10 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ



ภาพ 72 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเซรามิก BNTST20 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ



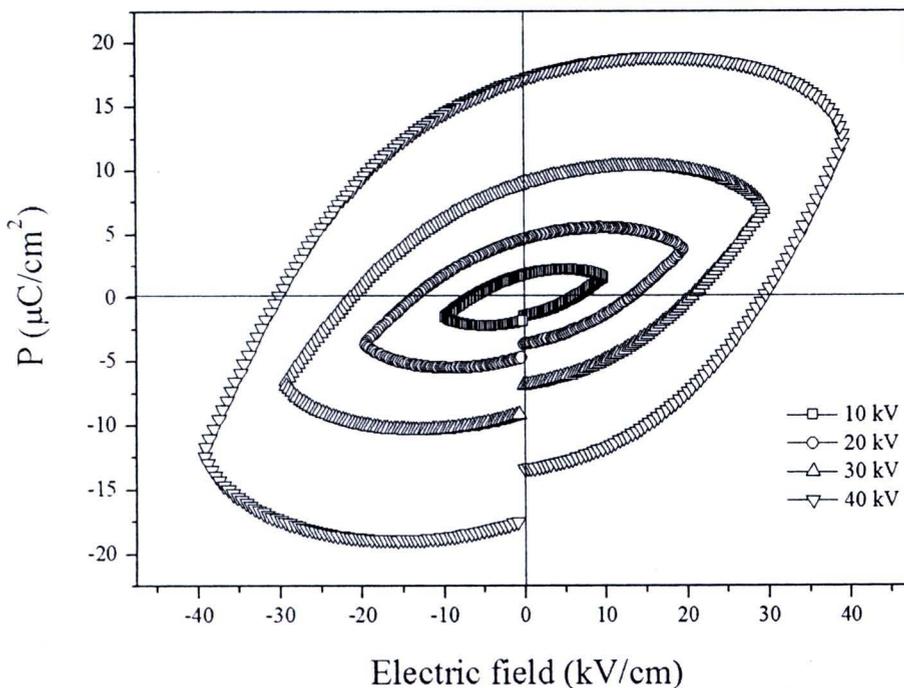
ภาพ 73 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTST30 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ



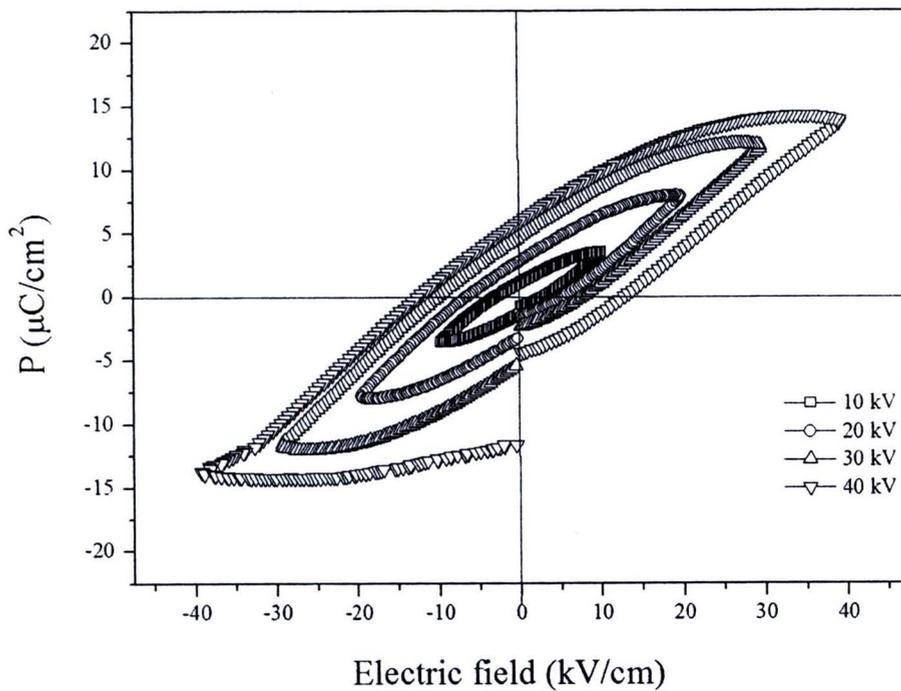
ภาพ 74 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BNTST40 ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ

3.5 ผลการวัดค่าโพลาริเซชัน (P_r) และค่าคงที่พีโซอิเล็กทริก (d_{33})

การศึกษสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BNTST20 และ BNTST30 ที่มีความหนาแน่นสูงสุดโดยการวัดวงรอบฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ที่สนามไฟฟ้าต่างๆ แสดงดังภาพ 75 และ 76 พบว่าโพลาริเซชันอิ่มตัว (P_s) โพลาริเซชันคงค้าง (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง (E_c) ของเซรามิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่เซรามิกมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังตาราง 10 โดยมีค่าสูงสุดสำหรับ BNTST20 เท่ากับ $12.04 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $17.19 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และ $29.61 \text{ kV}/\text{cm}$ ตามลำดับ และ BNTST30 เท่ากับ $13.81 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $6.03 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และ $12.71 \text{ kV}/\text{cm}$ เมื่อใช้สนามไฟฟ้า $40 \text{ kV}/\text{cm}$ ดังนั้นการเจือสาร ST ในเซรามิก BNT ช่วยทำให้ค่าสนามไฟฟ้าลบล้างลดลง (เซรามิก BNT; $E_c = 73 \text{ kV}/\text{cm}$) แสดงดังตาราง 11 และที่ $x > 0.40$ พบว่าจะแสดงความเป็นพาราอิเล็กทริก [15]



ภาพ 75 วงรอบฮิสเทอรีซิสของเซรามิก BNTST20 ที่ค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ



ภาพ 76 วงรอบฮิสเทอรีซิสของเซรามิก BNTST30 ที่ค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ

การศึกษาลักษณะสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิก BNTST20 ที่มีความหนาแน่นสูงสุดโดยการวัดค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก d_{33} ทำการโพลลิง (polling) ภายใต้สนามไฟฟ้า 35 kV/cm ใน silicone oil ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เท่ากับ 90 pC/N แสดงดังตาราง ดังนั้นการเติม ST ในเซรามิก BNT ช่วยทำให้ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ($d_{33} = 71$ pC/N)

ตาราง 10 แสดงค่าคงที่พิโซอิเล็กทริก (d_{33}) โพลาริเซชันอิมิตัว (P_s) โพลาริเซชันคงค้าง (P_r) และสนามไฟฟ้าลบถ่วง (E_c) ของเซรามิก BNTST20 และ BNTST30

เซรามิก	d_{33} (pC/N)	สนาม ไฟฟ้า (KV/cm)	โพลาริเซชัน อิมิตัว ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	โพลาริเซชัน คงค้าง ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	สนามไฟฟ้า ลบถ่วง (KV/cm)
BNTST20	90	10	1.57	1.79	6.2
		20	3.72	4.61	13.23
		30	6.88	8.97	20.67
		40	12.04	17.19	29.61
BNTST30		10	3.46	1.19	2.82
		20	7.88	2.89	5.29
		30	11.84	4.84	7.56
		40	13.81	6.03	12.71