

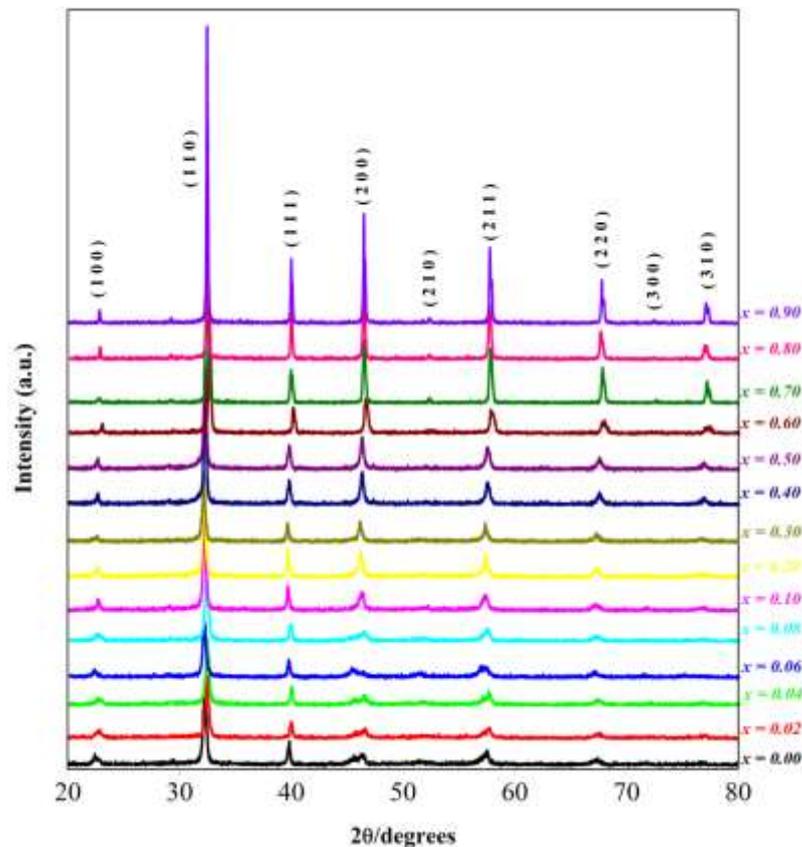
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมเซรามิกในระบบ  $(1-x)\text{BKT}-x\text{ST}$  โดยที่  $x$  มีค่าเท่ากับ 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80 และ 0.90 ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) ซึ่งประกอบไปด้วย ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่เตรียมได้ พร้อมทั้งอภิปรายผลการทดลองที่ได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเซรามิก BKT-ST

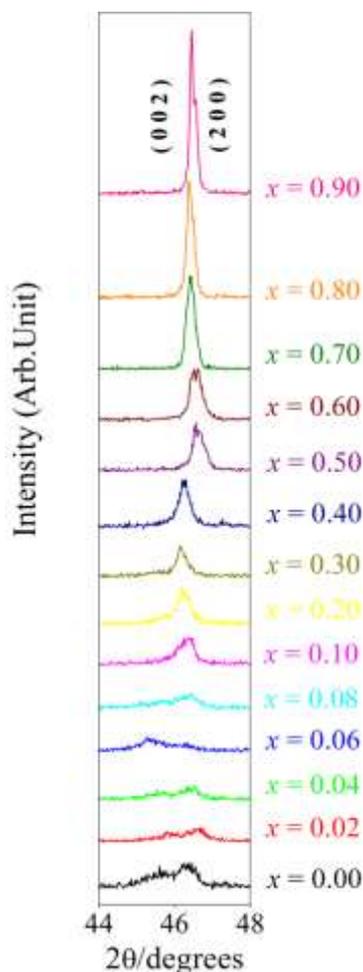
ทำการเลือกเซรามิกที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุดของทุกสัดส่วนองค์ประกอบมา ตรวจสอบโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ  $(1-x)\text{BKT}-x\text{ST}$

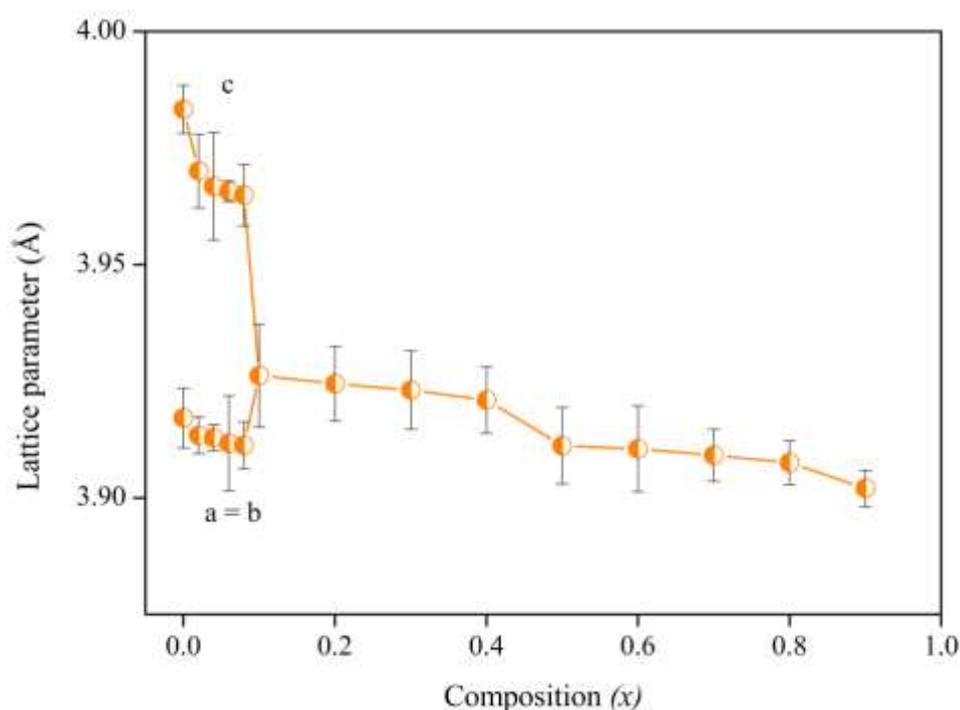
จากรูปที่ 4.1 พบว่าลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในระบบ  $(1-x)\text{BKT}-x\text{ST}$  โดยเซรามิก BKT มีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลของสารประกอบบิสมัท

โพแทสเซียมไททานेट (BKT) ที่มีสูตรโมเลกุลเป็น  $\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3$  ในแฟ้มข้อมูล JCPDS file no. 36-0152 ซึ่งมีโครงสร้างแบบเทตระโกนอล มีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ที่  $a = 3.918 \text{ \AA}$  และ  $c = 4.013 \text{ \AA}$  โดยพบความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 22.11 22.68 31.91 32.29 39.52 45.17 46.32 6.64 เมื่อเพิ่มสัดส่วนของสตรอนเทียมไททานेटมากขึ้นพบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ  $(1-x)\text{BKT}-(x)\text{ST}$  จะใกล้เคียงกับข้อมูลของสารประกอบสตรอนเทียมไททานेट (ST) ที่มีสูตรโมเลกุลเป็น  $\text{SrTiO}_3$  ในแฟ้มข้อมูล JCPDS file no. 05-0634 ซึ่งมีโครงสร้างเป็นคิวบิก และมีพิคความเข้มขึ้นที่ตำแหน่งของค่า  $2\theta$  เท่ากับ 22.816 32.467 39.944 46.468 52.313 57.751 67.809 72.567 77.189 และมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์  $a = b = c = 3.9051 \text{ \AA}$  จากผลข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของบิสมัทโพแทสเซียมไททานेट (BKT) ไปยังรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสตรอนเทียมไททานेट (ST) ตามปริมาณของสตรอนเทียมไททานेट (ST) ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ  $(1-x)\text{BKT}-(x)\text{ST}$  ที่มีการเลื่อน (shift) ของพิค

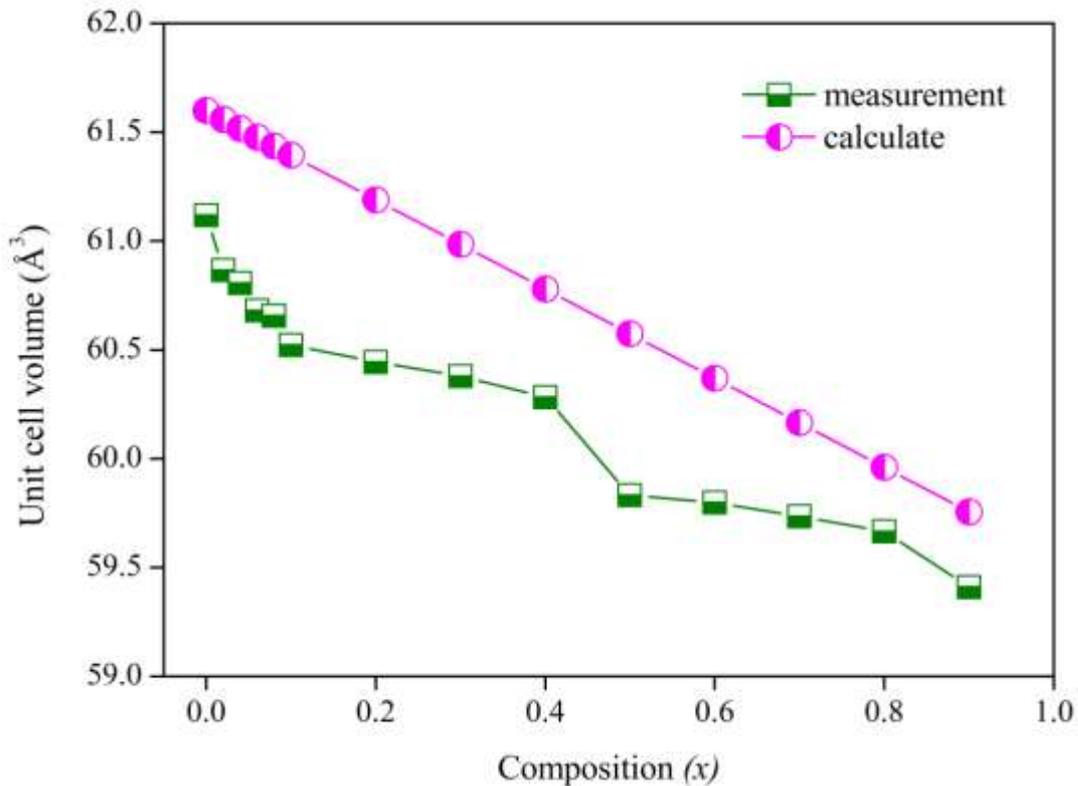
จากรูปที่ 4.2 เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ  $(1-x)\text{BKT}-(x)\text{ST}$  ที่ระนาบ (200) พบว่าที่  $x = 0.00$  (BKT) พิกมีการแยกเป็น 2 พิก เนื่องจากว่าที่  $x = 0.00$  หรือ BKT นั้นเป็นโครงสร้างเทระโกนอล ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวมีระนาบ (200) และ (002) ไม่เท่ากัน คือด้าน a เท่ากับ b แต่ไม่เท่ากับ c ระยะห่างระหว่างระนาบมีค่าต่างกัน ส่งผลให้เมื่อทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จึงเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ได้ไม่เท่ากันทำให้ได้พิกที่มีการแยกเป็น 2 พิก และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเจือ ST พิก (200) จะเปลี่ยนเป็นพิกเดียว ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเป็นสมมาตรแบบคิวบิกเสมือนมีแลตทิซพารามิเตอร์เท่ากัน จึงเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์เท่ากัน และสามารถสรุปได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ ST นั้นมีอิทธิพลในการเปลี่ยนเฟสของระบบ BKT ดังรูปที่ 4.2 นอกจากนี้ นอกจากนี้นูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ยังสามารถนำมาคำนวณแลตทิซพารามิเตอร์และปริมาตรของหน่วยเซลล์ได้ดังรูปที่ 4.3



**รูปที่ 4.3** ความสัมพันธ์ระหว่างแลตทิซพารามิเตอร์กับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $(1-x)\text{BKT}-(x)\text{ST}$

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของแลตทิซพารามิเตอร์ได้อย่างเด่นชัดเมื่อทำการเจือ ST เข้าไป โดยพบว่าแลตทิซพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ ST นั้นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่ตำแหน่ง A-site นั้น  $\text{Sr}^{2+}$  ที่เข้าแทนที่มีขนาดรัศมีไอออนที่เล็กกว่า  $(\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5})^{2+}$  ที่ถูกแทนที่เข้าไป ซึ่งทำให้ปริมาตรของหน่วย

เซลล์ก็มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน สำหรับโครงสร้างผลึกของเซรามิกในระบบนี้สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของหน่วยเซลล์กับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ  $(1-x)\text{BKT}-(x)\text{ST}$

#### 4.2 ผลการหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ BKT-ST

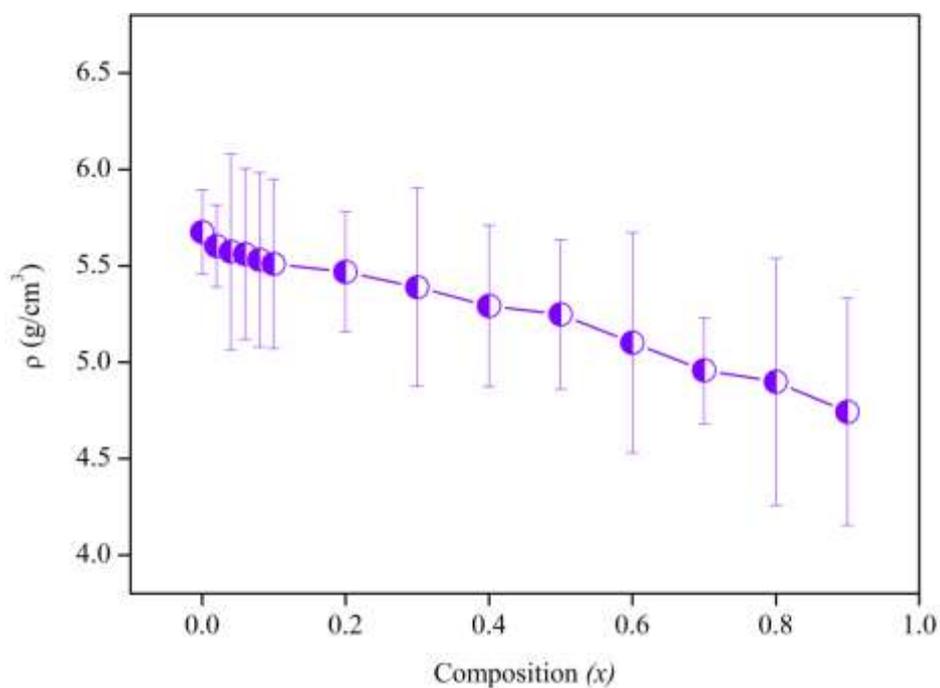
เมื่อได้นำผงผลึกทำการเตรียมเซรามิกและทำการเผาซินเตอร์แล้ว จากนั้นทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ การเปลี่ยนเฟส สมบัติทางไดอิเล็กทริกและสัณฐานวิทยาต่อไป

##### 4.2.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก

นำเซรามิกที่เตรียมได้มาวัดความหนาแน่น ( $\rho$ ) ซึ่งเป็นการทดสอบด้วยหลักการแทนที่น้ำของอาร์คิมิดีสและคำนวณเป็นร้อยละ โดยเป็นการเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีหรือความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%TD) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก BKT-ST

สัดส่วนองค์ประกอบ ( $x$ )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	TD (%)
0	5.6742	96.0069
0.02	5.6018	95.0585
0.04	5.5731	94.8618
0.06	5.5606	94.4649
0.08	5.5306	94.3955
0.10	5.5098	94.3292
0.20	5.4675	95.0214
0.30	5.3888	95.1267
0.40	5.2916	94.8321
0.50	5.2476	94.043
0.60	5.1009	94.3569
0.70	4.9573	93.2004
0.80	4.8988	93.631
0.90	4.7429	92.1846



รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นและสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิก  $(1-x)$ BKT- $x$ ST

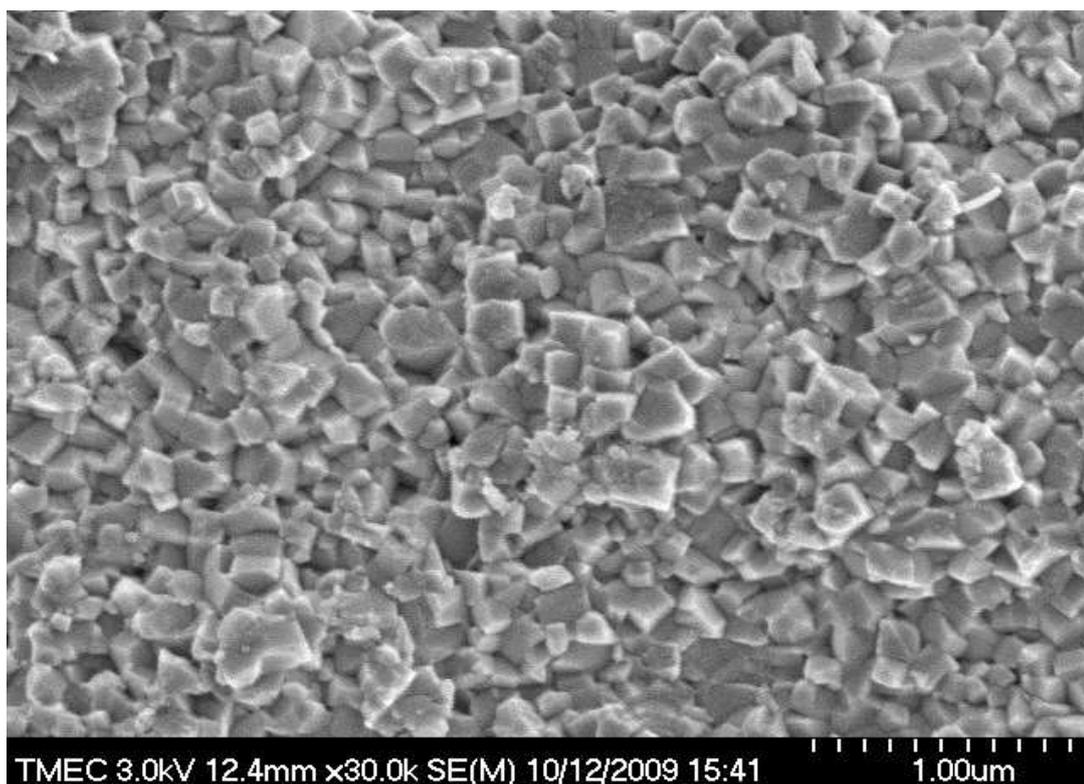
จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่าเซรามิกในระบบ BKT-ST ที่เตรียมได้นั้นมีความหนาแน่นเปลี่ยนไปตามสัดส่วนองค์ประกอบของสารเจือคือเมื่อทำการเจือ ST มากยิ่งขึ้นทำให้ความหนาแน่นลดลง และเมื่อนำค่าความหนาแน่นที่ได้มาทำการคำนวณเพื่อหาความหนาแน่นสัมพัทธ์นั้นมีแนวโน้มลดลงซึ่งมีค่าสูงสุดที่ BKT ที่ไม่ได้ทำการเจือ ST มีค่าเป็น 96.0069% และลดลงจนถึงเซรามิก 0.1BKT-0.9ST ซึ่งมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เป็น 92.1846% คาดว่าเนื่องจากในการเจือสาร ST มากขึ้นนั้นจำเป็นต้องทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงเป็นเหตุทำให้สารบางชนิดที่เป็นองค์ประกอบในเซรามิกนั้นเกิดการระเหยไปในระหว่างขั้นตอนการซินเตอร์ ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนของค่าความหนาแน่นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิกที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งจากผลดังกล่าวเป็นไปตามที่ต้องการเนื่องจากความหนาแน่นสัมพัทธ์นั้นเซรามิก BKT-ST ที่ทุกสัดส่วนองค์ประกอบมีค่ามากกว่า 90% ซึ่งเป็นความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันซึ่งจำนำเซรามิกดังกล่าวไปทำการวัดค่าทางไฟฟ้าต่อไป

#### 4.2.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเซรามิก

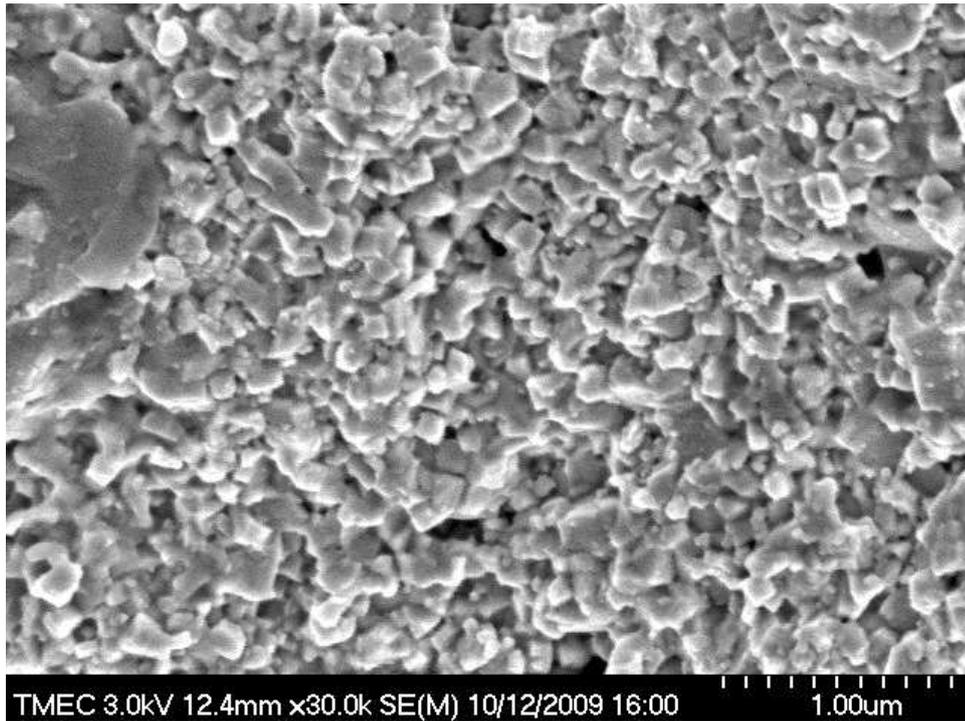
จากนั้นทำการตรวจสอบสัณฐานทางวิทยาของเซรามิกระบบ  $(1-x)\text{BKT}-x\text{ST}$  โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นภาพถ่ายของผิวจากรอยแตกหักของเซรามิก BKT-ST ในสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ พบว่า เกรนของเซรามิก BKT ( $x = 0.00$ ) จะมีรูปร่างลักษณะลูกบาศก์เกาะกันอยู่อย่างหนาแน่นและมีรูพรุนต่ำ และไม่มีเฟสไพโรคลอร์ (Pyrochlore) ขนาดของเกรนนั้นค่อนข้างสม่ำเสมอ และการกระจายตัวค่อนข้างดี แต่เมื่อทำการเติมสารเจือ ST ลงเข้าไปในระบบ BKT มากขึ้นเรื่อยๆ ขนาดของเกรนนั้นมีขนาดที่เล็กลง การจับตัวกันของเกรนนั้นลดลงปริมาณของรูพรุนนั้นมากขึ้น สำหรับขนาดของเกรนเฉลี่ยของเซรามิกนั้นสามารถหาได้โดยวิธีนับช่วงตัดบนเส้นตรง (Linear intercept) พบว่าปริมาณของ ST มีผลต่อขนาดของเกรนเฉลี่ยกล่าวคือขนาดของเกรนมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของ ST เพื่อแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนองค์ประกอบของ ST นั้นมีผลต่อขนาดเกรนเฉลี่ยโดยเซรามิก BKT มีขนาดของเกรนอยู่ในช่วงประมาณ 0.173-0.201  $\mu\text{m}$  ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการแทนที่ของ  $\text{Sr}^{2+}$  ใน  $(\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5})^{2+}$  ที่ตำแหน่ง A-site โดยรัศมีไอออนที่เล็กกว่าของ  $\text{Sr}^{2+}$  (1.44 Å) เข้าไปแทนที่ในตำแหน่ง A-site ทำให้โครงสร้างของผลึกเล็กลงทำให้ขนาดของเกรนนั้นลดลงเมื่อปริมาณสารเจือ ST นั้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนจากกราฟที่ 4.13

รูปที่ 4.14 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ  $(1-x)\text{BKT}-x\text{ST}$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0-0.9$  เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ต่างๆ จากรูปแสดงค่าไดอิเล็กทริกที่สัดส่วน  $x = 0.00$  ที่อุณหภูมิห้องจนถึงประมาณ 300°C ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเกือบเป็น

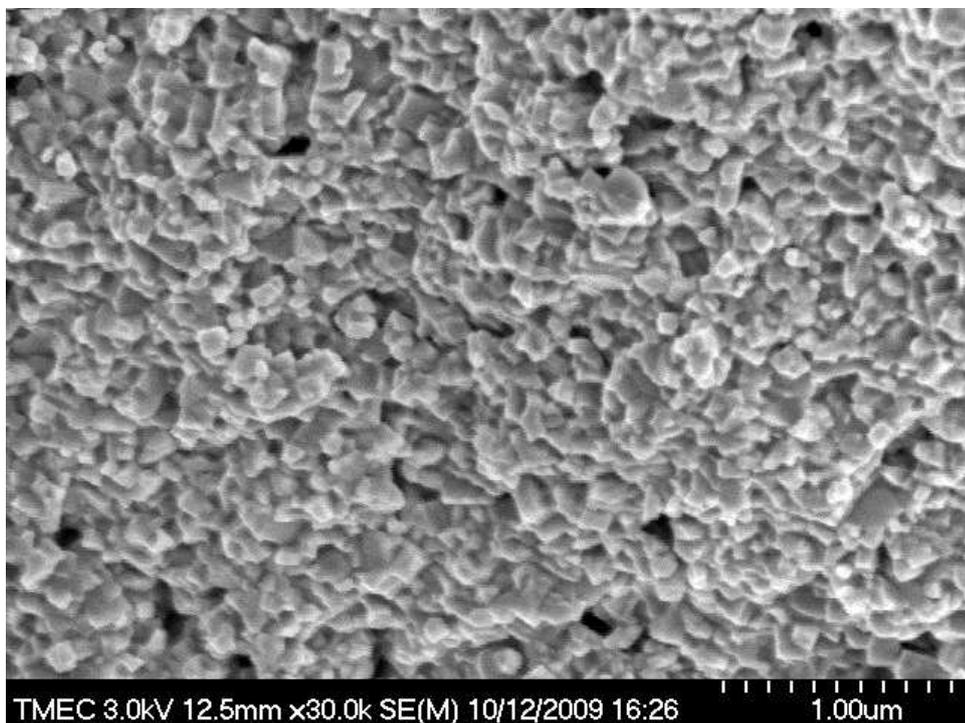
เส้นตรง เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 300 °C พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟนั้นเป็นทรงระฆังคว่ำและมีพีคค่อนข้างกว้าง โดยที่สัดส่วนอื่นดังกราฟที่ 4.15-4.27 จะแสดงในลักษณะดังกล่าวเช่นเดียวกันดังนั้นบริเวณของอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กทริกอย่างฉับพลันคืออุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส ( $T_m$ ) โดยเป็นการเปลี่ยนสมบัติจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก ยกเว้นรูปที่ 4.25-4.27 เนื่องจากว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสของทั้ง 3 สัดส่วนองค์ประกอบนั้นต่ำกว่าอุณหภูมิห้องดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะหาค่าต่างๆได้



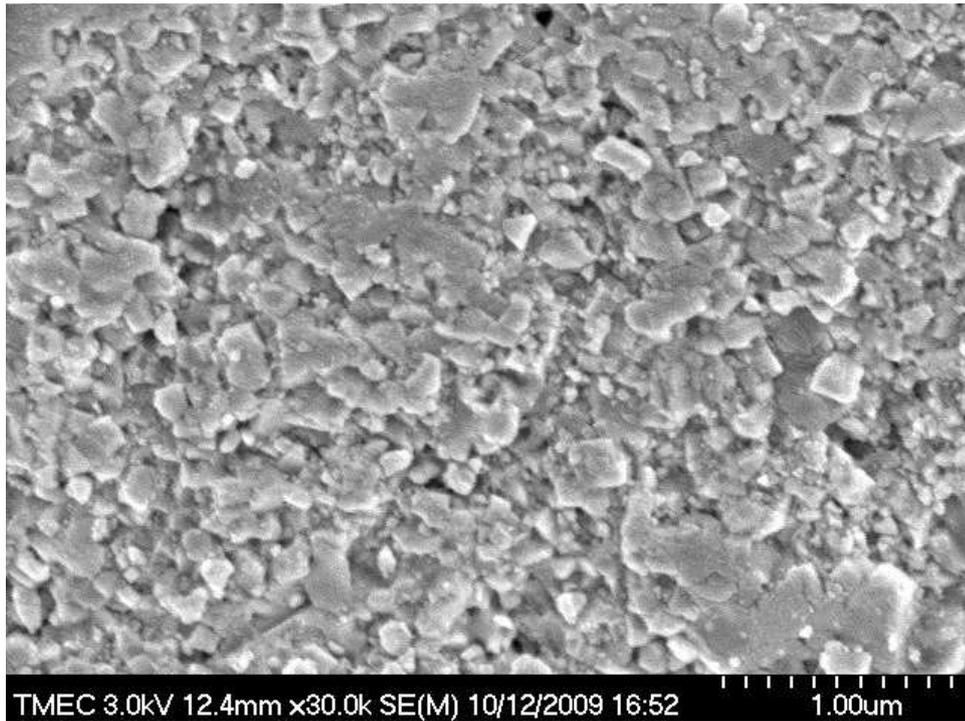
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก BKT



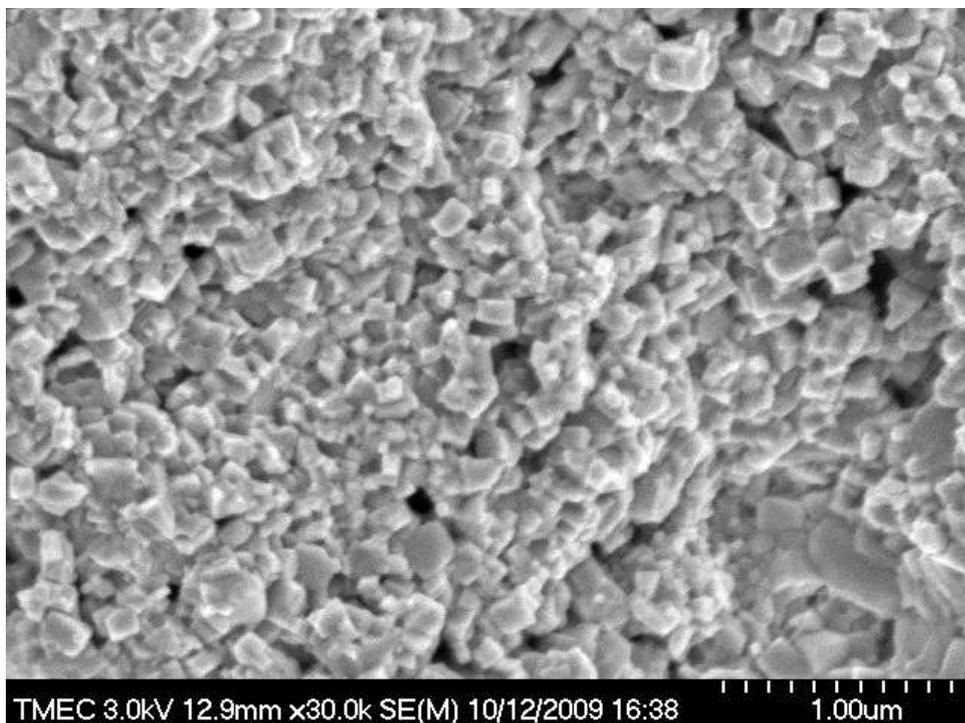
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.98BKT-0.02ST



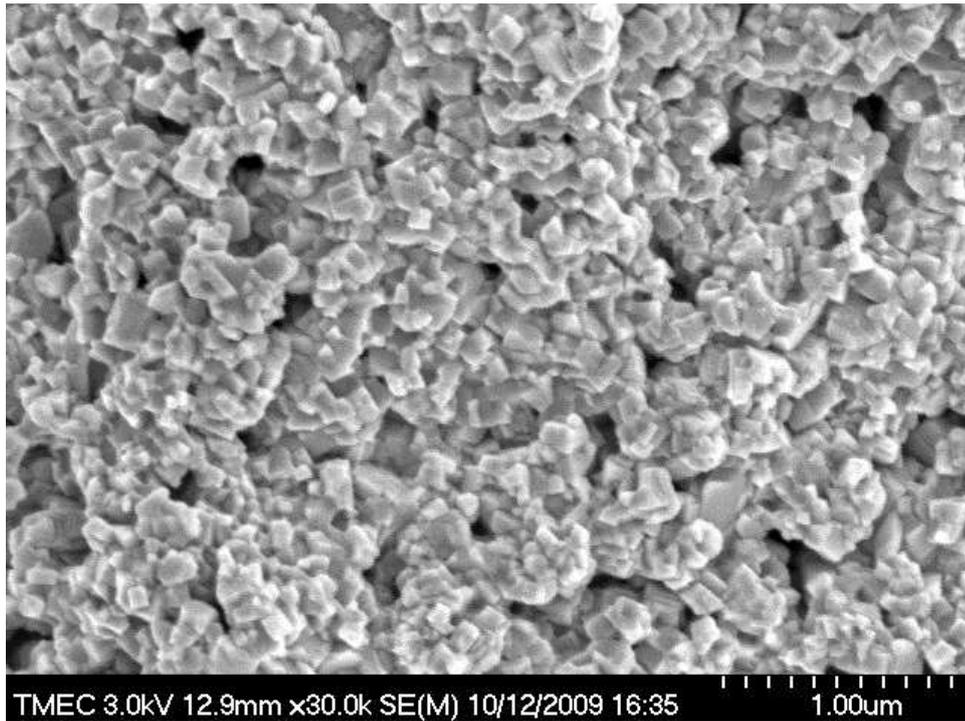
รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.96BKT-0.04ST



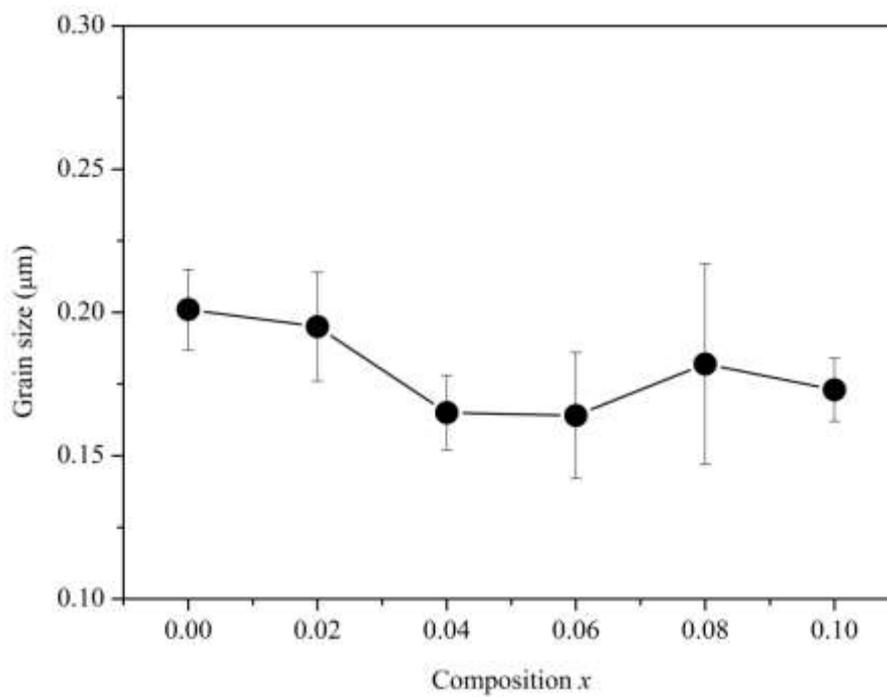
รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.94BKT-0.06ST



รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.92BKT-0.08ST

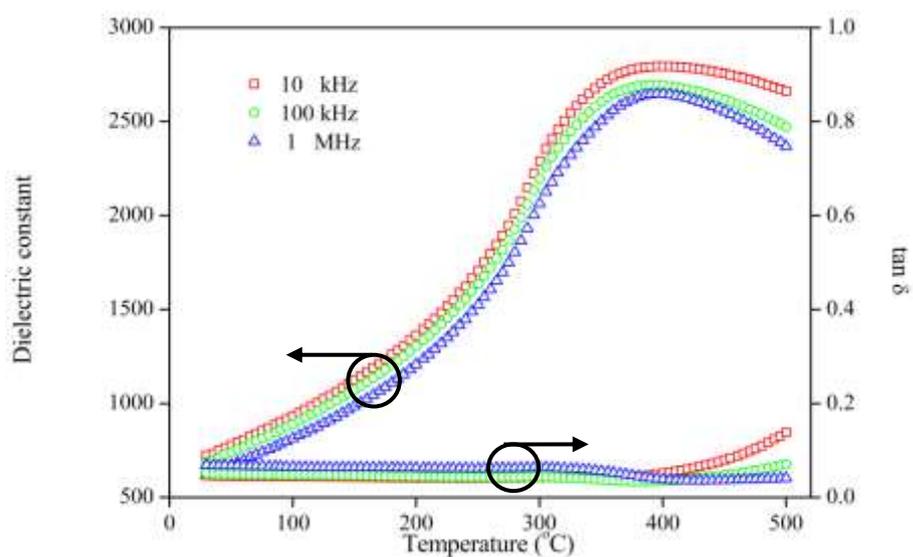


รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.9BKT-0.1ST

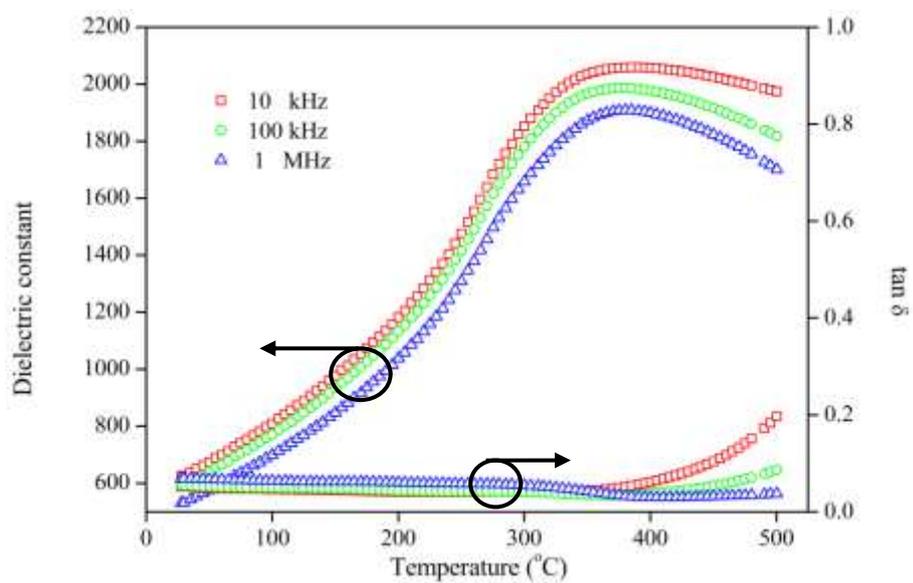


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนเฉลี่ยของเซรามิกในระบบ  $(1-x)$ BKT- $x$ ST

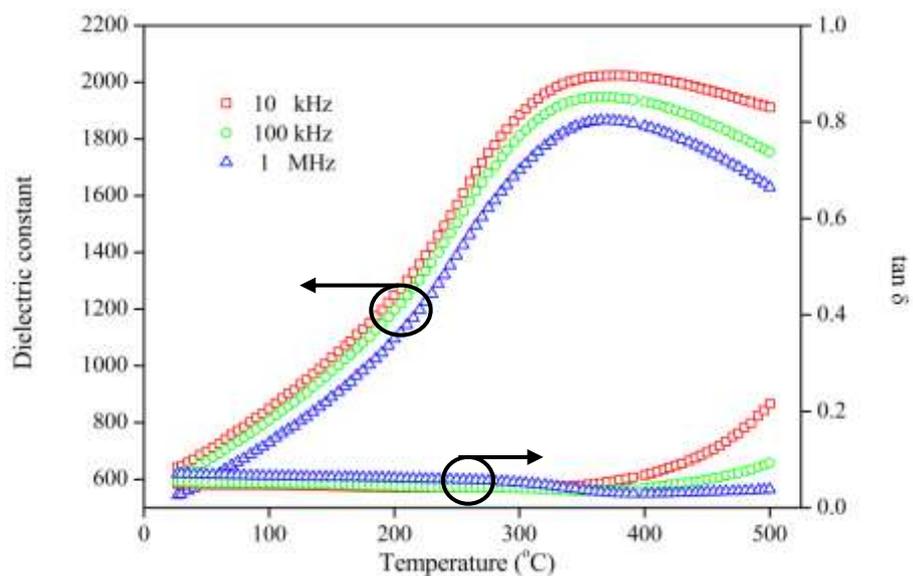
#### 4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก



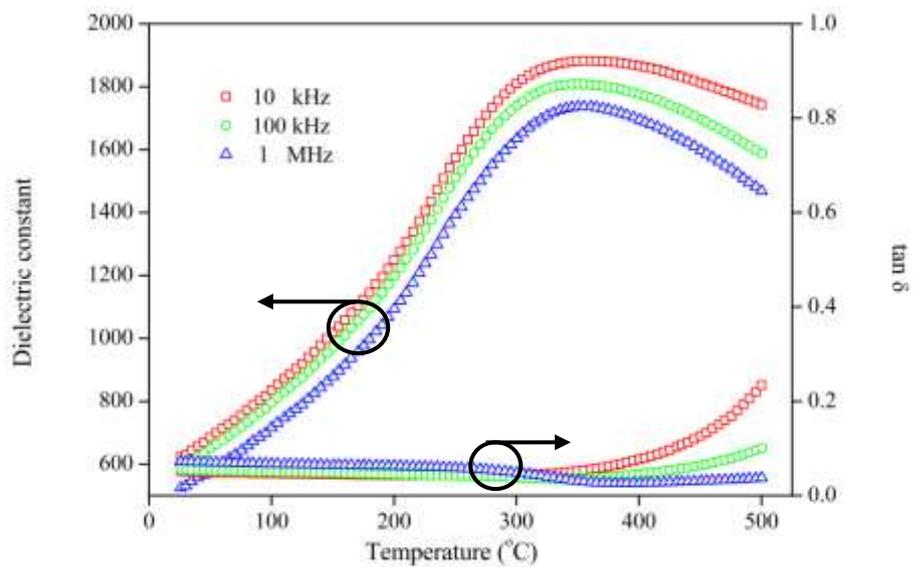
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก BKT-ST



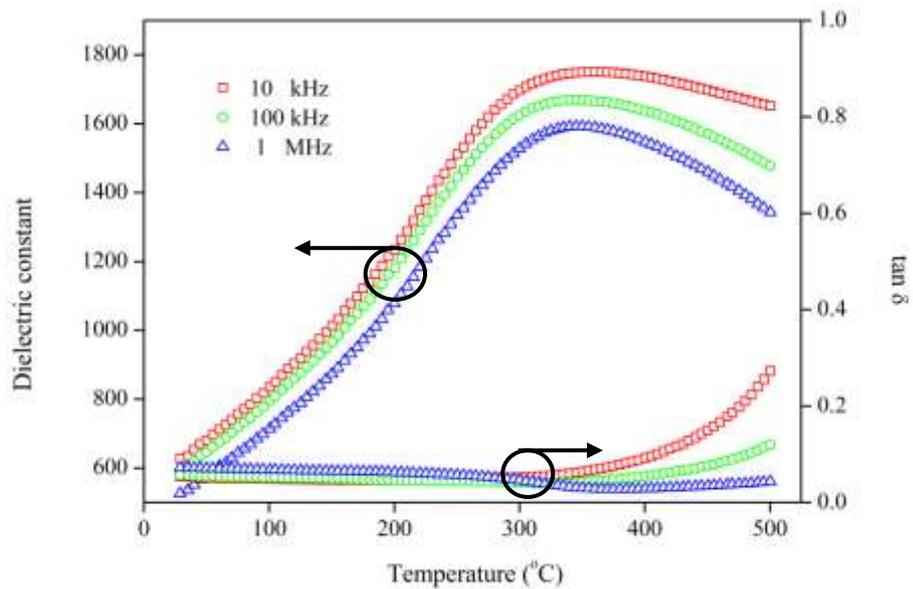
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.98BKT-0.02ST



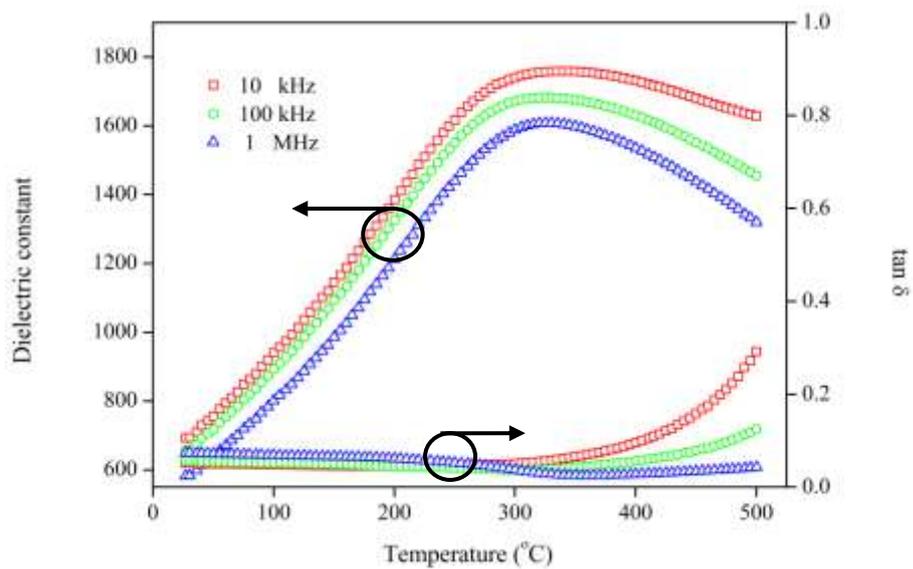
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.96BKT-0.04ST



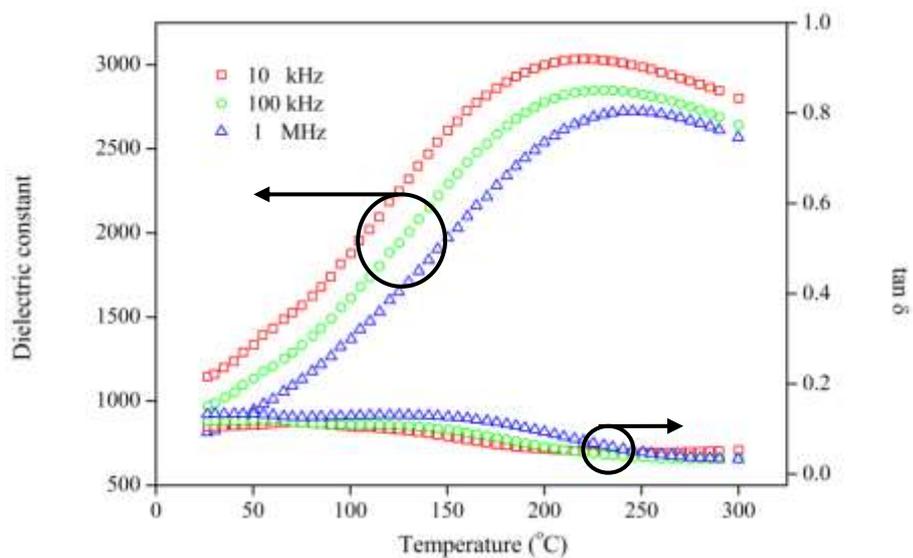
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.94BKT-0.06ST



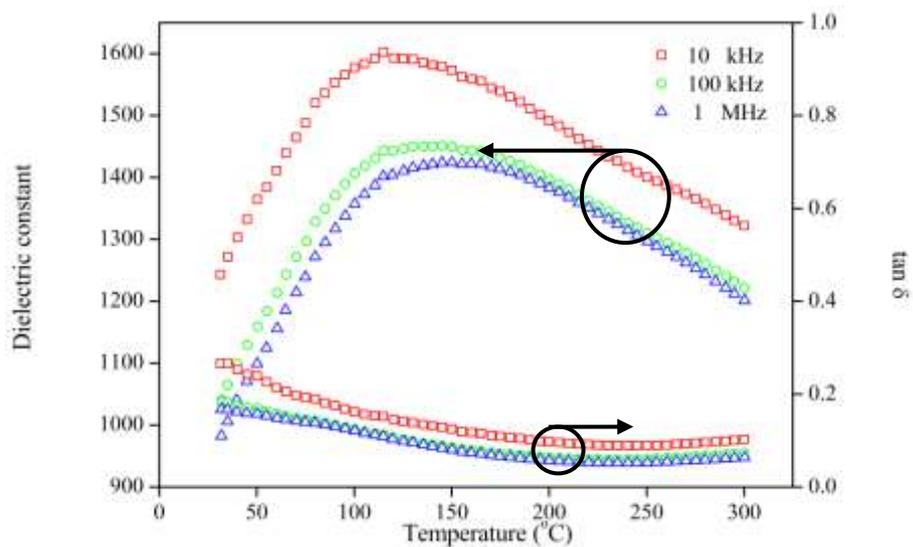
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.92BKT-0.08ST



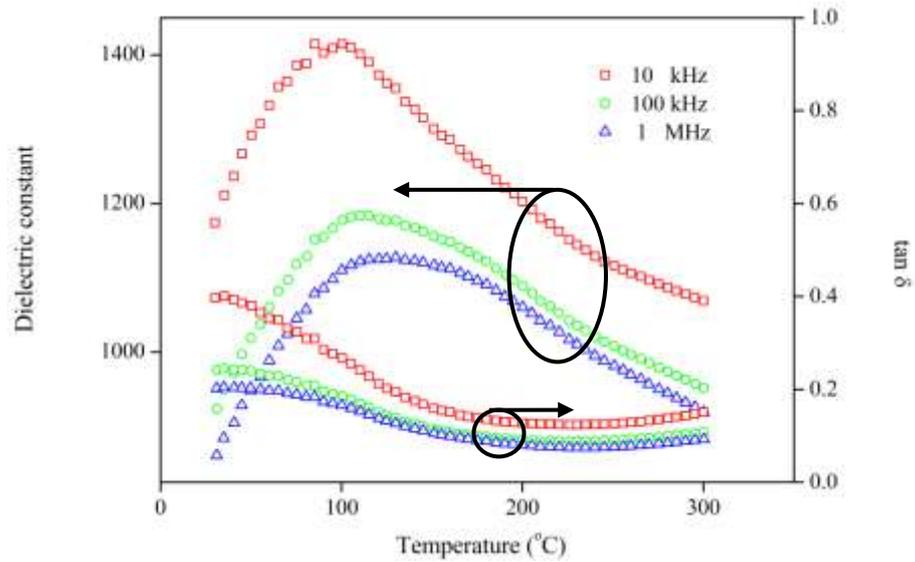
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.90BKT-0.10ST



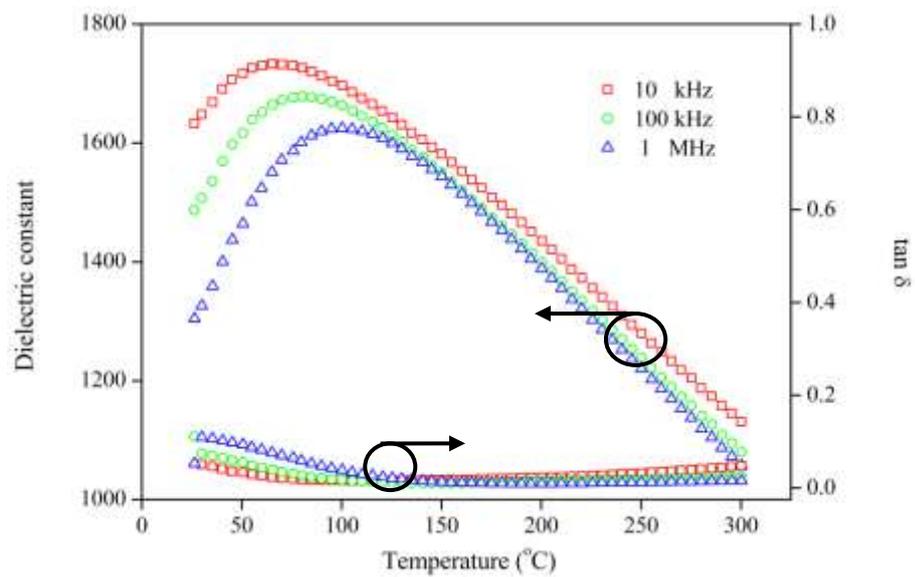
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.8BKT-0.2ST



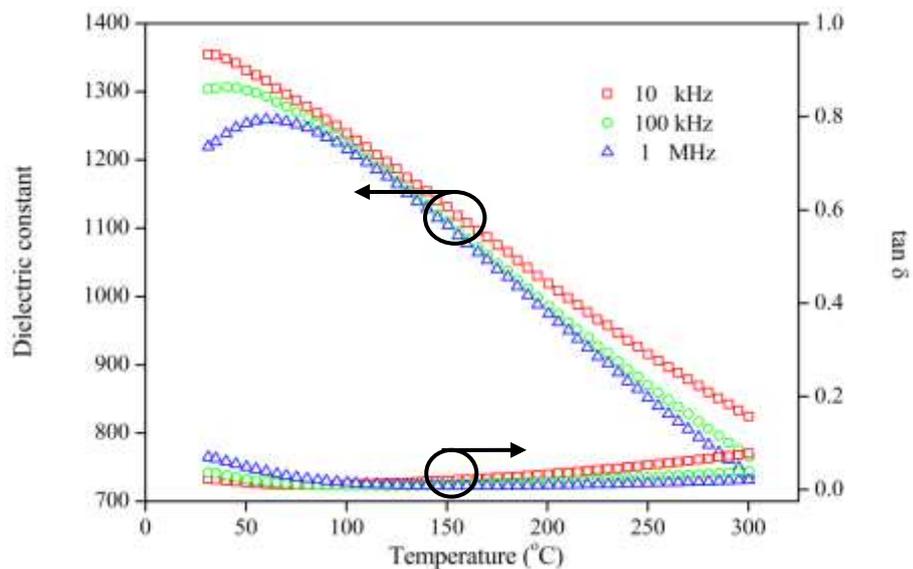
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.7BKT-0.3ST



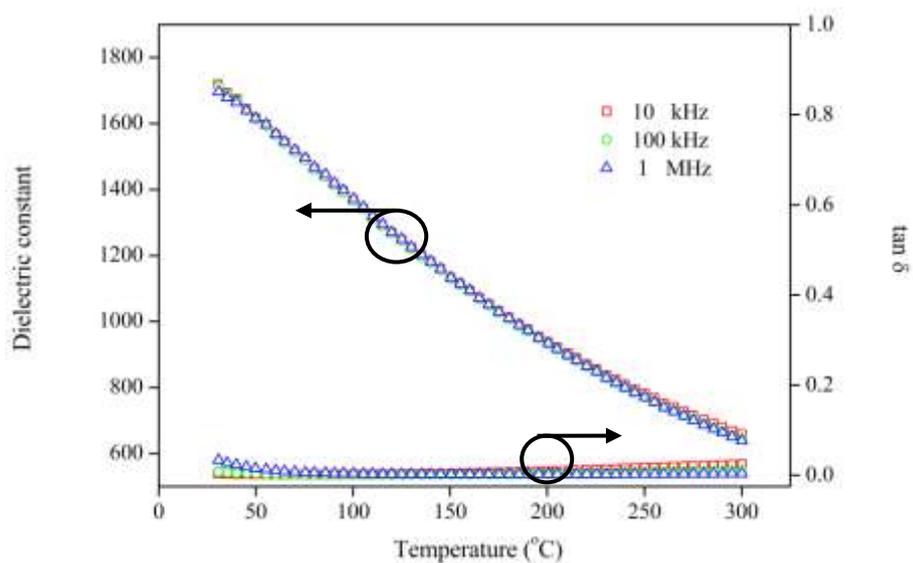
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.6BKT-0.4ST



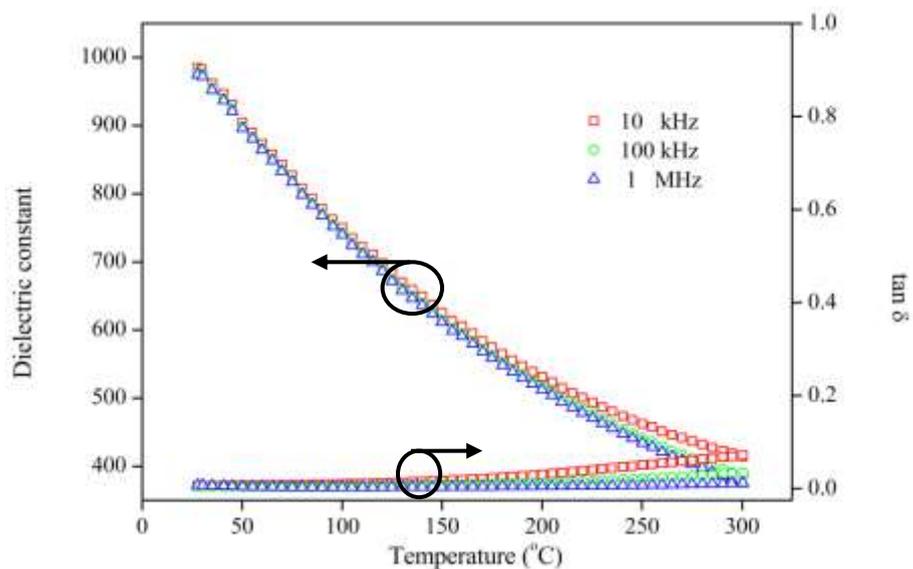
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.5BKT-0.5ST



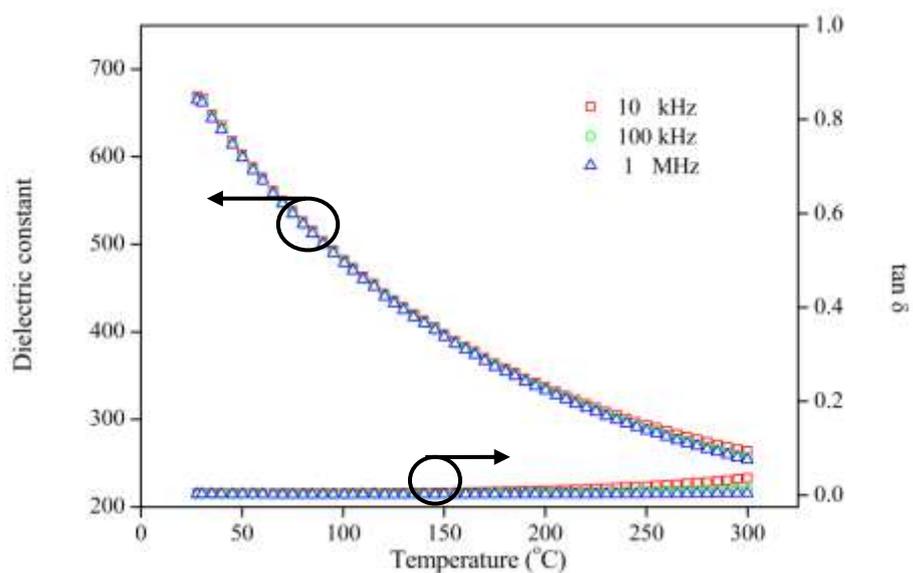
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.4BKT-0.6ST



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.3BKT-0.7ST



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.2BKT-0.8ST

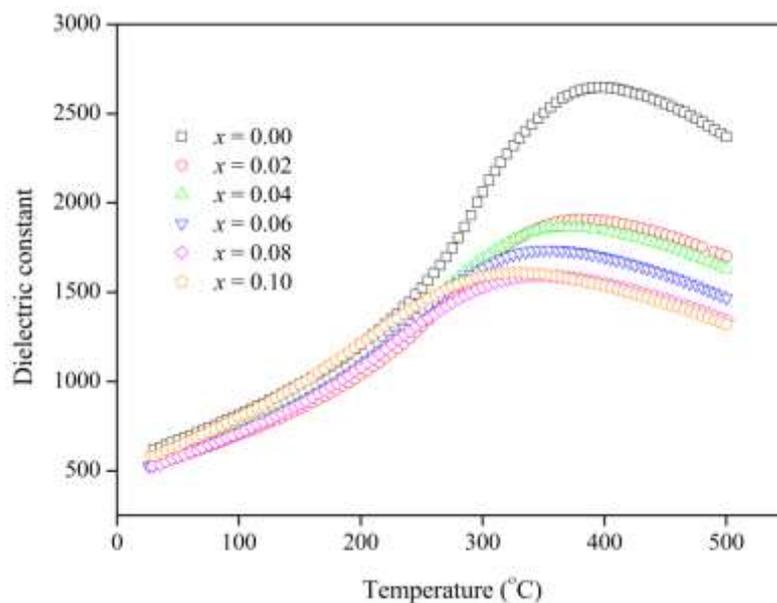


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก 0.1BKT-0.9ST

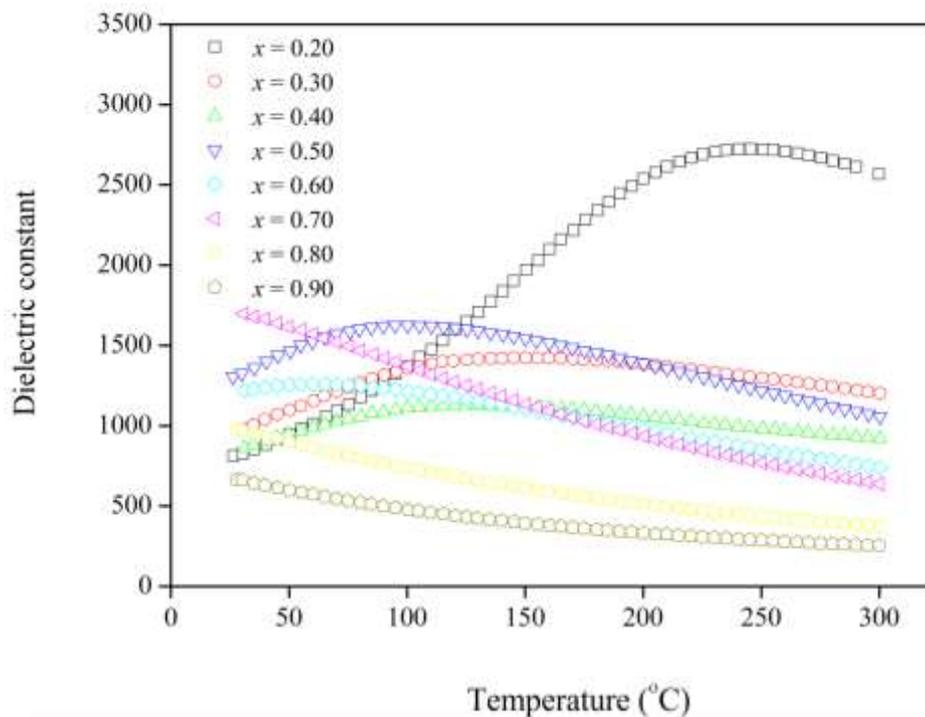
และเมื่อได้เทียบกราฟที่ความถี่ต่างๆพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนั้นจะต่างกันเล็กน้อยคือจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากที่สุดไปน้อยสุด คือที่ความถี่ 10 kHz 100 kHz และ 1 MHz ตามลำดับ และเมื่อทำการเทียบความถี่เดียวคือที่ 1 MHz นั้นค่าไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่ลดลงแต่ที่สัดส่วนองค์ประกอบของ ST ที่  $x = 0.2$  จะเห็นว่ามีความถี่ไดอิเล็กทริกสูงสุดซึ่งเกิดลักษณะของการเปลี่ยนโครงสร้างที่เหมาะสม และสำหรับแนวโน้มที่ลดลงของค่าไดอิเล็กทริกเนื่องมาจากขนาดของเกรนที่เล็กลง ความหนาแน่นของเกรนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และทางสัณฐานวิทยาที่กล่าวไว้ในข้างต้นดังรูปที่ 4.28-4.30 อีกทั้งอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสลดลงเมื่อปริมาณสารเจือ ST เพิ่มมากขึ้นซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสเมื่อเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบของ ST นั้นพบที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสกับปริมาณสารเจือ ST ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบนี้เป็นสารละลายสมบูรณ์ เนื่องจากเกิดการเข้ากันระหว่าง ST กับสารละลายของแข็ง BKT ซึ่งค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสของสารประกอบ BKT และ ST นั้นอยู่ที่  $380^{\circ}\text{C}$  และ  $113\text{ K } (-160^{\circ}\text{C})$  ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณหาอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสจากสมการ

$$T_m = (1-x)(380) + x(-160) \quad (4.1)$$

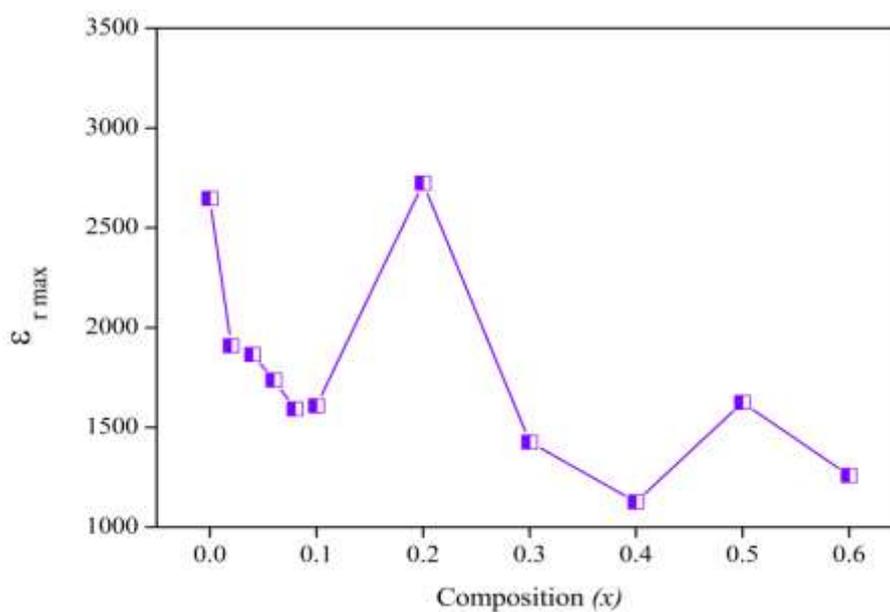
ซึ่งกราฟการเทียบกับค่าทางทฤษฎีนั้นเป็นไปดังรูปที่ 4.31



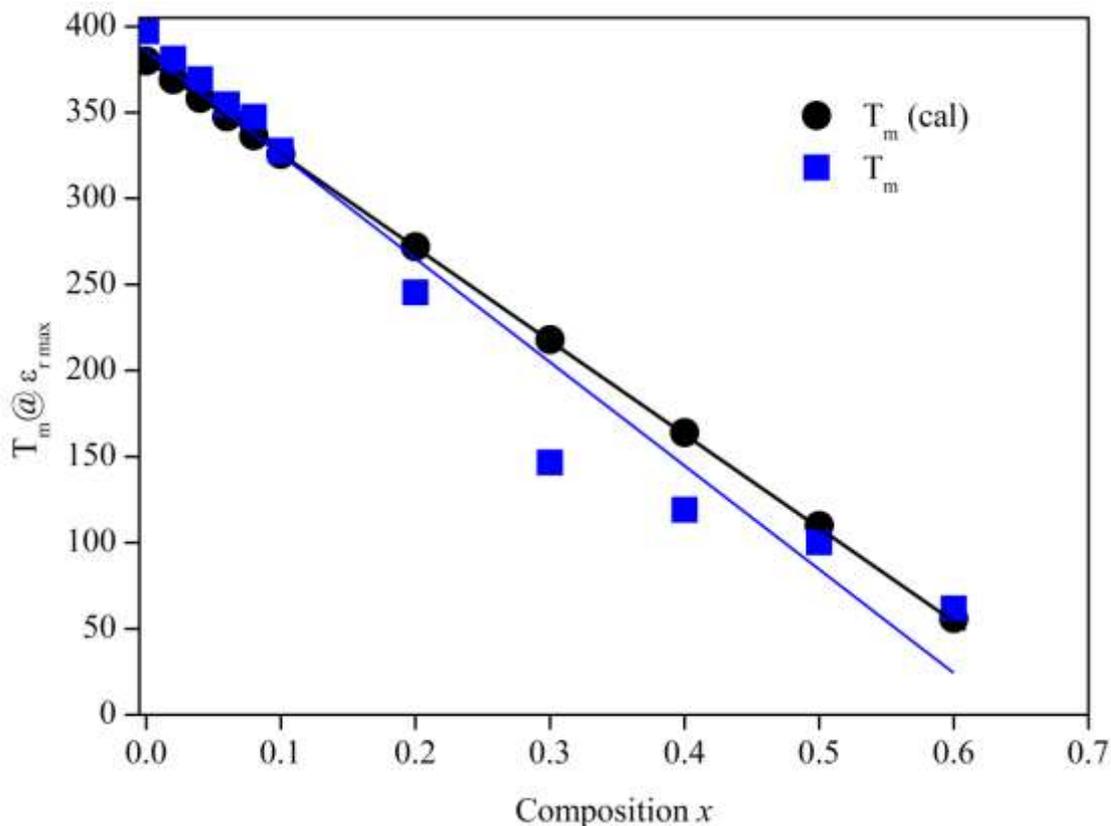
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิกเมื่อ  $x = 0 - 0.10$  ที่ความถี่ 1 MHz



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก เมื่อ  $x = 0.20 - 0.90$  ที่ความถี่ 1 MHz



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิก BKT-ST



**รูปที่ 4.30** ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสที่วัดได้ ( $T_m$ ) และค่า  $T_m$  ทางทฤษฎีเมื่อเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบที่มีความถี่ 1 MHz

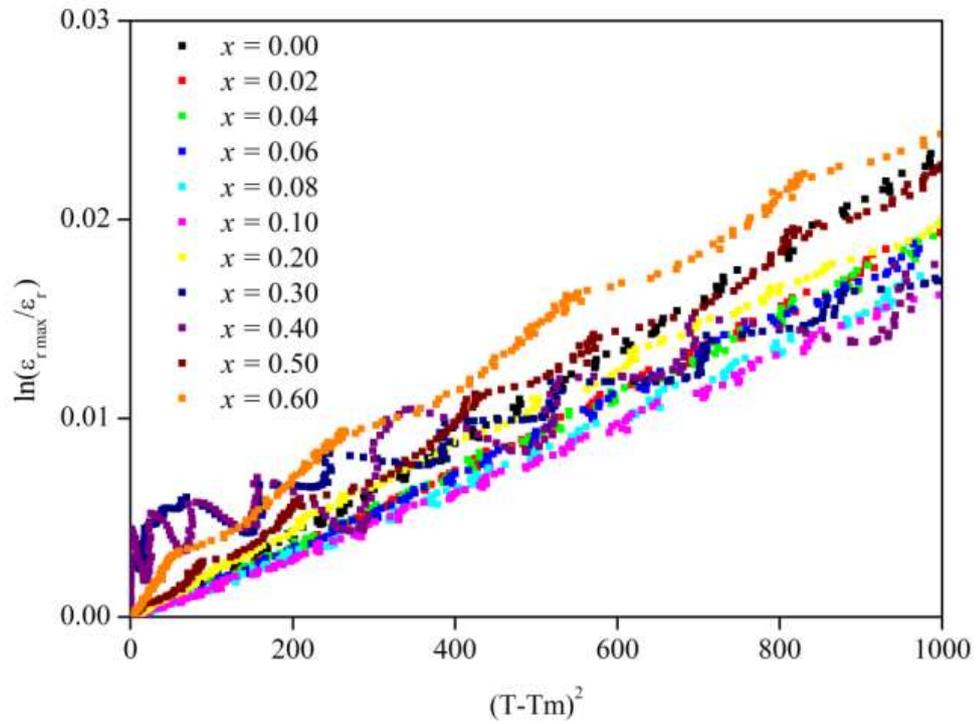
และจากรูปกราฟค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ผ่านมาพบว่าเซรามิกที่มีสัดส่วนของ ST ต่ำๆนั้น พิกของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีลักษณะที่แคบ และจะมีลักษณะที่กว้างขึ้นเมื่อสัดส่วนของ ST ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตัวแปรที่บอกความกว้างของพิกคือ พารามิเตอร์การกระจาย (diffusiveness parameter ;  $\delta$ ) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$K_m / K(f,T) = \exp[(T-T_m(f))^2 / 2\delta^2] \quad (4.2)$$

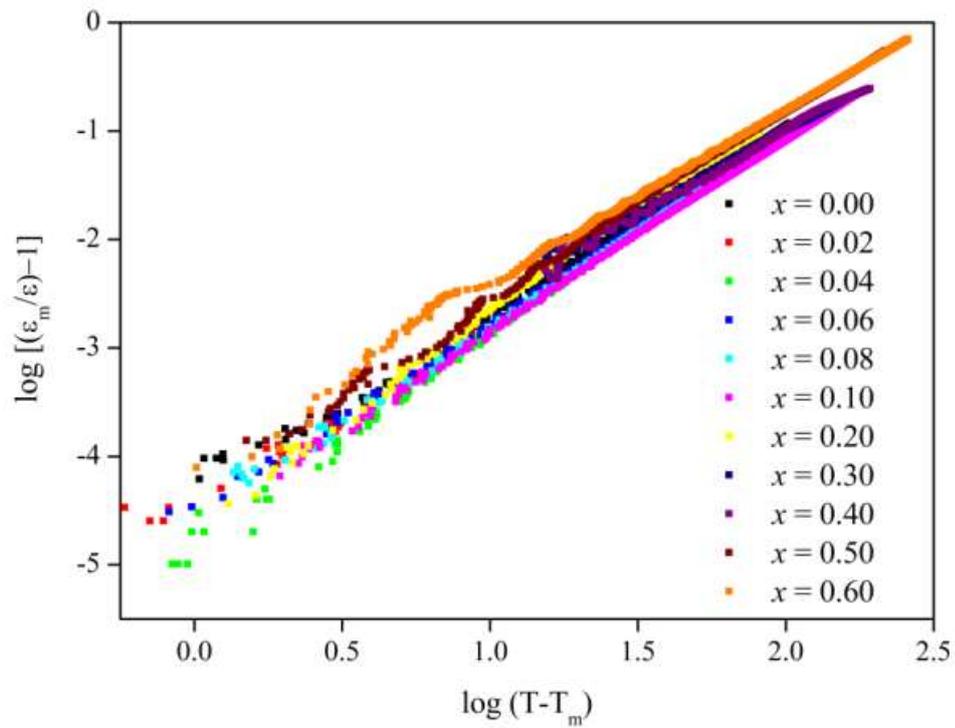
เมื่อ  $K_m$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดที่  $T = T_m(f)$

$K(f,T)$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แท้จริงของสารตัวอย่าง

และจากนั้นนำมาพล็อตกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(K_m/K_{(f,T)})$  กับ  $(T-T_m)^2$  โดยที่  $1/(2\delta^2)$  คือความชันของกราฟ ซึ่งจะทำให้หาค่าพารามิเตอร์ของการกระจายได้ค่าพารามิเตอร์การกระจายนั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณสารเจือ ST เพิ่มมากขึ้น สารละลายของแข็งนี้จะแสดงลักษณะการเปลี่ยนเฟสเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของการกระจายนี้เป็นไปตามตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(K_m/K_{(t,T)})$  กับ  $(T-T_m)^2$



รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(T-T_m)$  กับ  $\log[(\epsilon_m/\epsilon)-1]$  ที่ความถี่ 1 MHz

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของการกระจายกับสัดส่วนองค์ประกอบ ST

สัดส่วนองค์ประกอบ ( $x$ )	พารามิเตอร์ของการกระจาย ( $\delta$ )
0.00	146.7049
0.02	160.4357
0.04	161.9574
0.06	162.5125
0.08	170.5467
0.10	174.1299
0.20	188.1928
0.30	260.7624
0.40	281.5764
0.50	231.8301
0.60	248.7124

จากสมการตามกฎของ Curie-Weiss ได้ให้นำมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหลังอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของสารที่มีสมบัติเป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสระหว่างเฟอร์โรอิเล็กทริกกับพาราอิเล็กทริกที่อุณหภูมิแน่นอน ณ อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสที่เรียกว่า อุณหภูมิคูรี ดังนั้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ จะมีลักษณะเป็นพีกแหลมที่อุณหภูมิคูรี ซึ่งเรียกว่าเป็นการเปลี่ยนเฟสอันดับที่ 1

$$1/\epsilon_r = (T-\theta)/C \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.3 แสดงตารางพารามิเตอร์ต่างๆที่ความถี่ 1 MHz ของเซรามิก BKT-ST

สัดส่วนองค์ประกอบ (x)	$\epsilon_m$	$T_m$	$\gamma$
0.00	2647.6324	397.19	1.7165
0.02	1908.765	381.291	1.7153
0.04	1865.711	369.341	1.7411
0.06	1737.321	354.618	1.7429
0.08	1592.999	347.447	1.747
0.10	1608.529	327.765	1.7634
0.20	3059.109	218.523	1.8568
0.30	1453.02	146.432	1.8012
0.40	1187.91	107.468	1.7476
0.5	1678.353	81.008	1.7039
0.60	1306.538	1306.538	1.789

เมื่อ  $\theta$  คืออุณหภูมิคูรี และ C คือค่าคงที่คูรี ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหลังอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_m$ ) ของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิ มีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสในช่วงที่กว้าง เป็นการเปลี่ยนเฟสอันดับที่ 2 จึงใช้ความสัมพันธ์ควอดราติกดังสมการ

$$\epsilon'_m / \epsilon'(f,T) = [1+(T-T_m(f))^2/2\delta^2]^{-1}; (1 \leq \gamma \leq 2) \quad (4.4)$$

เมื่อ  $\epsilon'_m$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มากที่สุดที่อุณหภูมิ (T) เท่ากับ  $T_m$  ค่าพารามิเตอร์  $\gamma$  จะแสดงสมบัติความเป็นรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก เมื่อค่าพารามิเตอร์  $\gamma$  มีค่าเท่ากับ 1 ตามความสัมพันธ์

จากสมการข้างต้น จะแสดงถึงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติซึ่งเป็นไปตามกฎ Curie-Weiss แต่เมื่อเท่ากับ 2 เป็นความสัมพันธ์แบบควอดราติกโดยที่พารามิเตอร์  $\delta_\gamma$  แสดงค่าพารามิเตอร์การกระจายในสารละลายของแข็งระหว่างเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติกับเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบรีแลกเซอร์ ซึ่งพารามิเตอร์  $\delta_\gamma$  และ  $\gamma$  นั้นเปลี่ยนแปลงขึ้นกับองค์ประกอบโครงสร้างของสาร โดยจากรูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log (T-T_m)$  กับ  $\log [(\epsilon_m / \epsilon)-1]$  ที่ความถี่ 1 MHz ตามความสมการข้างต้นพบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 4.3