ผลการวิจัยและอธิปรายผลการวิจัย

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการวิจัยของสารละลายของแข็งบิสมัทโซเดียมโพแทสเซียมไททาเนต และสารสตรอนเชียมไอรอนแทนทาเลท ในระบบ (1-x)BNKT–xSFT โดยที่ × เท่ากับ 0.00, 0.01, 0.02, 0.025, 0.03, 0.035, 0.04, 0.05 และ 0.06 โดยการตรวจสอบทางด้านสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติ ทางกายภาพ และเชิงกล ตลอดจนการวิเคราะห์ผลการวิจัยโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก

4.1.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก เทียบกับ อุณหภูมิห้อง

จากศึกษาการเปลี่ยนแปลงเซรามิก (BNKT-SFT) ที่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการ สูญเสียไดอิเล็กทริกเทียบกับความถี่ ณ อุณหภูมิห้อง ในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงภาพที่ 4.1 และค่าการสูญเสียไดอิเล็ทริกมี แนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.2





ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์– 2 เมกะเฮิรตซ์

จากภาพที่ 4.1 เมื่อพิจารณาผลของความถี่ที่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเซรามิก (BNKT) โดย การเติมสาร (SFT) ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่ที่ใช้ใน การวัดสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของภารตรี ใจตรา (2552) สำหรับค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ดังภาพที่ 4.2 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ความถี่และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก พบว่า มีแนวโน้มที่ เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ที่ใช้ในการวัดสูงขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ SFT ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเทียบ กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะพบว่า เซรามิกที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงจะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงตามไป ด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถในการเก็บประจุลดลง

4.1.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก เทียบกับอุณหภูมิต่างๆ

จากศึกษาการเปลี่ยนแปลงเซรามิก (BNKT-SFT) ที่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการ สูญเสียไดอิเล็กทริกเทียบกับความถี่ ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25-500 ⁰C ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่ลดลง และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมี แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามการเติม SFT ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันในทุกความเข้มข้น และทำให้ช่วงอุณหภูมิ T_d และ T_m กว้างขึ้นด้วย ซึ่งมีผลการตรวจสอบดังนี้

ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25-500 องศาเซลเซียส ที่ ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.00 โดยโมล



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความ เข้มข้นร้อยละ x = 0.00 โดยโมล

จากภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.00 โดยโมล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กเพิ่มสูงขึ้นจน อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (T_m) อยู่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 305 องศาเซลเซียส โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สูงสุดเท่ากับ 4515 ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ แล้วจึงลดลง





ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25-500 องศาเซลเซียส ที่ ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.01 โดยโมล

ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความ เข้มข้นร้อยละ x = 0.01 โดยโมล

จากภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.01 โดยโมล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กเพิ่มสูงขึ้นจน อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (T_m) อยู่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 292 องศาเซลเซียส โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สูงสุดเท่ากับ 4121 ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ แล้วจึงลดลง





ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความ เข้มข้นร้อยละ x = 0.02 โดยโมล

จากภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.02 โดยโมล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กเพิ่มสูงขึ้นจน อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (T_m) อยู่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สูงสุดเท่ากับ 4299 ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ แล้วจึงลดลง



ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25-500 องศาเซลเซียส ที่ ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.025 โดยโมล

ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความ เข้มข้นร้อยละ x = 0.025 โดยโมล

จากภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.025 โดยโมล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กเพิ่มสูงขึ้น จนอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (T_m) อยู่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สูงสุดเท่ากับ 4299 ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ แล้วจึงลดลง



ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25-500 องศาเซลเซียส ที่ ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.03 โดยโมล

ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความ เข้มข้นร้อยละ x = 0.03 โดยโมล

จากภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.03 โดยโมล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กเพิ่มสูงขึ้นจน อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (T_m) อยู่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 304 องศาเซลเซียส โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สูงสุดเท่ากับ 4001 ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ แล้วจึงลดลง



ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25-500 องศาเซลเซียส ที่ ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.035 โดยโมล

ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความ เข้มข้นร้อยละ x = 0.035 โดยโมล

จากภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.035 โดยโมล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กเพิ่มสูงขึ้น จนอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (T_m) อยู่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 297 องศาเซลเซียส โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สูงสุดเท่ากับ 4061 ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ แล้วจึงลดลง

PA/ABHAT



ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25-500 องศาเซลเซียส ที่ ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.04 โดยโมล



จากภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.04 โดยโมล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กเพิ่มสูงขึ้นจน อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (T_m) อยู่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 294 องศาเซลเซียส โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สูงสุดเท่ากับ 3551 ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ แล้วจึงลดลง



ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25-500 องศาเซลเซียส ที่ ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.05 โดยโมล



จากภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.05 โดยโมล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กเพิ่มสูงขึ้นจน อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (T_m) อยู่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 289 องศาเซลเซียส โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สูงสุดเท่ากับ 3535 ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ แล้วจึงลดลง

RAIABHAT

ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25-500 องศาเซลเซียส ที่ ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.06 โดยโมล





จากภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.06 โดยโมล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กเพิ่มสูงขึ้นจน อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (T_m) อยู่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 284 องศาเซลเซียส โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สูงสุดเท่ากับ 3393 ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ แล้วจึงลดลง



ผลการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ณ อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับทุกความเข้มข้นที่ ความถี่ 1000 เฮิรตซ์

ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด เปรียบเทียบกับทุกความ เข้มข้นที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์

จากภาพที่ 4.12 การตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ เปรียบเทียบกับ ทุกความเข้มข้น เมื่อเติม SFT พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อพิจารณาการเติม SFT ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความเข้มข้น 0.00 ได้ค่าไดอิเล็กทริกมากที่สุด และค่าไดอิเล็กทริกน้อย ที่สุดที่ความเข้มข้น 0.06 ซึ่งมีค่าลดลงตามปริมาณการเติม ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (T_m) อยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 305 องศาเซลเซียส ทำให้ช่วงของอุณหภูมิ (T_d) และอุณหภูมิ (T_m) กว้างตามการเติม SFT ดังตารางที่ 1 ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง

ความเข้มข้น	T _d	T _m	ε _r ที่ T _d	ε_rที่ T _m	Tanδที่ T _d	Tan ง ที่	(T _m -T _d)
ร้อยละโดยโมล	(°C)	(°C)	577	in.		T _m	
0.00	132.64	305.03	2845.47	4515.59	0.03	0.02	172.39
0.01	110.16	292.37	2164.42	4121.65	0.04	0.01	182.21
0.02	117.92	300.16	3360.69	4449.05	0.05	0.02	182.24
0.025	108.59	300.16	2898.01	4299.75	0.03	0.02	191.57
0.03	121.06	304.83	3390.55	4001.24	0.02	0.02	183.77
0.035	128.84	297.03	3492.66	4061.59	0.04	0.02	183.78
0.04	97.83	294.06	2528.54	3451.58	0.05	0.02	196.23
0.05	91.47	289.26	2583.58	3535.34	0.04	0.02	197.79
0.06	33.68	284.59	2555.14	3393.11	0.04	0.02	250.91

ตารางที่ 4.1 แสดงช่วงของอุณหภูมิ (T_d) และอุณหภูมิ (T_m) ทุกความเข้มข้น ที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์

ผลการตรวจสอบคงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ณ อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25-500 องศา เซลเซียส ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ พบว่า พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการ สูญเสียไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 150-250 องศาเซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 250-500 องศาเซลเซียส ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น และที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าการสูญเสียไดอิ เล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด ณ ความถี่ ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.00 โดยโมล

จากภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.00 โดยโมล พบว่า ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงในช่วงอุณหภูมิ 114 – 250 องศาเซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 250 – 500 องศาเซลเซียส ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เท่ากับ 0.156



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.01 โดยโมล

จากภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.01 โดยโมล พบว่า ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงในช่วงอุณหภูมิ 100 – 200 องศาเซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เท่ากับ 0.179



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.02 โดยโมล

จากภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.02 โดยโมล พบว่า ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงในช่วงอุณหภูมิ 119 – 200 องศาเซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตาม



อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เท่ากับ 0.169

ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.025 โดยโมล

จากภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.025 โดยโมล พบว่า ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงในช่วงอุณหภูมิ 86 – 200 องศา เซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เท่ากับ 0.221



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.03 โดยโมล

จากภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.03 โดยโมล พบว่า ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงในช่วงอุณหภูมิ 75 – 200 องศา เซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เท่ากับ 0.182

SHAT



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.035 โดยโมล

จากภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.035 โดยโมล พบว่า ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงในช่วงอุณหภูมิ 105 – 230 องศาเซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 230 – 500 องศาเซลเซียส ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เท่ากับ 0.193

SHAT



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.04โดยโมล

จากภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.04 โดยโมล พบว่า ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงในช่วงอุณหภูมิ 107 – 208 องศาเซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 208 – 500 องศาเซลเซียส ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เท่ากับ 0.338

PA/ABHAT



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.05 โดยโมล

จากภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.05 โดยโมล พบว่า ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงในช่วงอุณหภูมิ 68 – 200 องศา เซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เท่ากับ 0.203

PA/ABHAT



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้วัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.06 โดยโมล

จากภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด ณ ความถี่ต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ x = 0.06 โดยโมล พบว่า ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 กิโลเฮิรตซ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงในช่วงอุณหภูมิ 64 – 250 องศา เซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 250 – 500 องศาเซลเซียส ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เท่ากับ 0.454

4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริก

ผลการตรวจสอบสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริก ด้วยวงวนฮีสเทอรีซีส (P-E hysteresis loop) ที่ ความถี่ 1 เฮิรตซ์ โดยใช้ค่าความต่างศักย์ตั้งแต่ 4000 – 6000 โวลต์ ลักษณะของวงวนฮีสเทอรีซีส เมื่อเพิ่มปริมาณการเติม SFT จะมีลักษณะของวงวนฮีสเทอรีซีสที่แคบลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jae-shin Lee (2012) เมื่อเกิดการโพลาไรเซชั่นอิ่มตัว ปริมาณที่เติม SFT ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีค่า คงเหลือของโพลาไรเซชั่น และสนามไฟฟ้าลบล้างลดลง อันเป็นผลเนื่องมาจากเซรามิกใช้สนามไฟ ฟ้าที่น้อย และใช้เวลาที่รวดเร็วในการลบล้างสภาพโพลาไรเซชั่นที่เกิดขึ้น โดยโมเมนต์ไดโพลสามารถ กลับทิศทางได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ เมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 วงวนฮีสเทอรีซีส (P-E hysteresis loop) ที่ความเข้มข้น (a) x=0.00, (b) x=0.01, (c) x=0.02, (d) x=0.025, (e) x=0.03, (f) x=0.035, (g) x=0.04, (h) x=0.05 และ (i) x=0.06 ร้อยละ โดยโมล ตามลำดับ



ภาพที่ 4.22 (ต่อ) วงวนฮีสเทอรีซีส (P-E hysteresis loop) ที่ความเข้มข้น (a) x=0.00, (b) x=0.01, (c) x=0.02, (d) x=0.025, (e) x=0.03, (f) x=0.035, (g) x=0.04, (h) x=0.05 และ (i) x=0.06 ร้อยละโดยโมล ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความเป็นเหลี่ยมของวงวนฮีสเทอรีซีส พบว่า ที่ค่าความเข้มข้น 0.06 โดยโมล มี ค่าความเป็นเหลี่ยมน้อยที่สุด ประมาณ 1.25 และมีค่าความเป็นเหลี่ยมมากที่สุด ที่ความเข้มข้น 0.00 ประมาณ 1.91 แสดงให้เห็นว่าสมบัติความเป็นเฟร์โรอิเล็กทริกของสารนั้น ถ้ามีค่าความเป็นเหลี่ยม ของวงวนฮีสเทอรีซีสมากจะมีสมบัติความเป็นเฟร์อิเล็กทริกที่ดีกว่าสารที่มีค่าความเป็นเหลี่ยมของวง วนฮีสเทอรีซีสน้อย ดังแสดงตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ค่า (P_r/P_{max}) มีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งสามารถ บอกได้ว่าเซรามิกจะสามารถรักษาค่าโพลาไรเซชั่นภายในได้ดีน้อยเพียงได จากค่าโพลาไรเซชั่นสูงสุด ที่เกิดขึ้น (P_{max})

SFT	Pr	Ec	Ps	P _r / P _{max}	R _{sq}
(ร้อยละโดยโมล)	(µc/cm ²)	kV/cm	(µc/cm ²)		
0.00	33.02	41.05	37.12	0.89	1.91
0.01	33.52	38.59	39.19	0.86	1.86
0.02	32.47	34.24	39.14	0.83	1.84
0.025	41.60	33.06	36.52	0.89	1.90
0.03	25.04	19.69	37.73	0.66	1.67
0.035	12.48	14.61	37.39	0.33	1.39
0.04	8.62	12.08	32.47	0.27	1.35
0.05	6.51	10.61	31.42	0.21	1.31
0.06	6.51	12.79	25.79	0.25	1.25

PALABHAT U

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก (1-x)BNKT-xSFT ที่ความต่างศักย์ 6000 V

4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติความเครียดที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้า

ผลการตอบสอบความเครียดที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้ารูปผีเสื้อของเซรามิก (BNKT) ดัง แสดงในภาพที่ 21ซึ่งมีการกลับทิศทางของโดเมน ความเครียดเชิงลบเพิ่มขึ้น ทำให้มีโดเมนของเฟร์ โรอิเล็กทริกลดลง เมื่อเพิ่มการเติม SFT ส่งผลให้ความเครียดภาพ (S-E) ลดลงอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและสนามไฟฟ้า (S-E) ที่ความเข้มข้น (a) x=0.00, (b) x=0.01, (c) x=0.02, (d) x=0.025, (e) x=0.03, (f) x=0.035, (g) x=0.04, (h) x=0.05 และ (i) x=0.06 ร้อยละโดยโมล ตามลำดับ



ภาพที่ 4.23 (ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและสนามไฟฟ้า (S-E) ที่ความเข้มข้น (a) x=0.00, (b) x=0.01, (c) x=0.02, (d) x=0.025, (e) x=0.03, (f) x=0.035, (g) x=0.04, (h) x=0.05 และ (i) x=0.06 ร้อยละโดยโมล ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและสนามไฟฟ้า (S-E) พบว่า เมื่อ เพิ่มปริมาณการเติม SFT ค่า S_{max}/E_{max} มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จากนั้นเริ่มมีแนวโน้มที่ลดลง โดยค่า d₃₃ สูงสุดเท่ากับ 506 pm/V ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.025 โดยโมล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jaeshin Lee (2012)

4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึก

จากการนำเม็ดเซรามิกที่เตรียมได้ไปทาการตรวจสอบเฟสและโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ได้ผลดังภาพที่ 4.24 ซึ่งแสดงผลที่มุมตั้งแต่ 10 – 80 องศา พบว่าเซรามิกที่ เตรียมได้ทุกความเข้มข้นแสดงเฟสเป็นแบบเพอร์รอฟสไกต์บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นเฟสผสมระหว่างเฟสรอม โบฮีดรอลและเฟสเตตระโกนอล หรือที่เรียกว่าตาแหน่ง MPB ตรงกับแฟ้มข้อมูลมาตรฐาน JCPDS 36 - 0343 ของ BNT (รอมโบฮีดรอล) และ BKT (เตตระโกนอล) โดยไม่แสดงเฟสของ SFT เลย ซึ้ให้เห็น ว่า SFT ที่เติมลงไปไม่ทาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเฟสของ BNKT เนื่องจากมีการเติมใน ปริมาณที่น้อยมาก ๆ



ภาพที่ 4.24 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก (1 – x)BNKT – xSFT

4.5 ผลการตรวจสอบสมบัติความหนาแน่นและร้อยละการหดตัว

จากการตรวจสอบเซรามิก (1 – x)BNKT – xSFT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1125 องศาเซลเซียส พบว่า มีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่นกลมสมส่วนไม่มีการบิดเบี้ยวหรือเกิดรอยแตกร้าว และเมื่อนำมาตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ซึ่งได้แก่ ค่าความหนาแน่น และค่าร้อยละการหดตัวเชิง เส้น พบว่าได้ผลดังต่อไปนี้

4.5.1 ความหนาแน่นของเซรามิก

เมื่อนำเซรามิกมาตรวจสอบค่าความหนาแน่นโดยใช้หลักการของอาร์คีมีดิส ได้ผลแสดงดัง ตารางที่ 4.3 และเมื่อนาค่ามาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับปริมาณของ SFT ได้ดังภาพที่ 4.25 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ SFT เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเติม SFT ในปริมาณที่มากเกินไป เลยทาให้ SFT ส่วนเกินไม่สามารถ ละลายเข้าไปในโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ได้หมดและอาจเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างขอบเกรนของ BNKT ซึ่งจะไปขัดขวางการแพร่ของผลึก ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงตามไปด้วย



ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกที่ปริมาณ SFT ต่างๆ





4.5.2 ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก

เมื่อนาเซรามิกมาตรวจสอบร้อยละการหดตัวเชิงเส้น ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.4 และเมื่อรำ ค่ามาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นกับปริมาณของ SFT ได้ดัง ภาพที่ 4.26 ซึ่งจากภาพพบว่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณของ SFT คือ ยิ่ง เติม SFT มากขึ้นก็จะทำให้ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นมากขึ้นตาม แต่เมื่อเติม SFT ที่ 0.025 เป็นต้นไป ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นจะลดลง เนื่องจากบริเวณที่สาร SFT แทรกเข้าไปในเซรามิก BNKT จะทำให้ มีการแพร่ของผลึกได้น้อยกว่าบริเวณที่มีสาร SFT อยู่เลย จึงส่งผลให้เกิดการหดตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ของระบบ (non-uniform shrinkage) กล่าวคือ เกิดการหดตัวได้ไม่เท่ากันในแต่ละบริเวณ ส่งผลให้ อัตราการหดตัวโดยรวมลดน้อยลง



ตารางที่ 4.4 ค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิกที่ปริมาณ SFT ต่างๆ



ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวเชิงเส้นกับปริมาณของ SFT ของเซรามิก (1 – ×)BNKT – ×SFT

4.6 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก โดยพิจารณาอิทธิพลของปริมาณการเติม SFT ที่มีผลต่อขนาดเกรนพบว่า การเติม SFT ทาให้ขนาดเกรนเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงไป ดังตารางที่ 4.5 เมื่อนำข้อมูลในตารางมาเขียนกราฟ จะได้กราฟดังภาพที่ 4.27 เมื่อพิจารณากราฟจะพบว่า ที่การเติม SFT ทาให้ขนาดเกรนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากไอออน Nb⁵⁺ ที่มีรัศมีไอออนเท่ากับ 0.640 อังสตรอม เข้าไปแทนที่ไอออน Ti⁴⁺ ที่มีรัศมีไอออนเท่ากับ 0.605 อังสตรอม บริเวณ B-site ของโครงสร้างเพอร์ รอฟสไกต์ของ BNKT เนื่องจากมีรัศมีไอออนที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อความเข้มข้นของ SFT เพิ่มขึ้นจะทา ให้ขนาดเกรนลดลง เนื่องจากปรากฏการณ์หน่วงจากตัวละลาย (solute drag effect) โดย ปรากฏการณ์นี้เป็นผลมาจากจากอัตราการแพร่ของ SFT เพื่อที่จะข้ามระนาบของขอบเกรนซ้ากว่า อัตราการแพร่ของ BNKT จึงทำให้ SFT เป็นตัวจำกัดอัตราการแพร่ของระบบ ดังนั้นสาร SFT ที่เติม ลงไปจึงกระจายตัวอยู่บริเวณขอบเกรน และทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการเจริญเติบโตของเกรน (grain growth) จึงส่งผลทาให้เกรนมีขนาดเล็กลง



ตารางที่ 4.5 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกที่ปริมาณ SFT ต่าง ๆ



(a)



(b)

ภาพที่ 4.28 ภาพถ่ายผิวหน้าของเซรามิกระบบ (1-x)BNKT-xSFT ด้วยกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 7,000 เท่า (a) x=0.00 (b) x=0.01 (c) x=0.02 (d) x=0.025 (e) x=0.03 (f) x=0.035 (g) x=0.04 (h) x=0.05 และ (i) x=0.06 ตามลำดับ



(c)



ภาพที่ 4.28 (ต่อ) ภาพถ่ายผิวหน้าของเซรามิกระบบ (1-x)BNKT-xSFT ด้วยกล่องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 7,000 เท่า (a) x=0.00 (b) x=0.01 (c) x=0.02 (d) x=0.025 (e) x=0.03 (f) x=0.035 (g) x=0.04 (h) x=0.05 และ (i) x=0.06 ตามลำดับ



(e)



ภาพที่ 4.28 (ต่อ) ภาพถ่ายผิวหน้าของเซรามิกระบบ (1-x)BNKT-xSFT ด้วยกล่องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 7,000 เท่า (a) x=0.00 (b) x=0.01 (c) x=0.02 (d) x=0.025 (e) x=0.03 (f) x=0.035 (g) x=0.04 (h) x=0.05 และ (i) x=0.06 ตามลำดับ





ภาพที่ 4.28 (ต่อ) ภาพถ่ายผิวหน้าของเซรามิกระบบ (1-x)BNKT-xSFT ด้วยกล่องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 7,000 เท่า (a) x=0.00 (b) x=0.01 (c) x=0.02 (d) x=0.025 (e) x=0.03 (f) x=0.035 (g) x=0.04 (h) x=0.05 และ (i) x=0.06 ตามลำดับ



(i)

ภาพที่ 4.28 (ต่อ) ภาพถ่ายผิวหน้าของเซรามิกระบบ (1-x)BNKT-xSFT ด้วยกล่องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 7,000 เท่า (a) x=0.00 (b) x=0.01 (c) x=0.02 (d) x=0.025 (e) x=0.03 (f) x=0.035 (g) x=0.04 (h) x=0.05 และ (i) x=0.06 ตามลำดับ

4.6 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของเซรามิก

เซรามิกจะถูกนำมาตรวจสอบสมบัติเชิงกล ซึ่งจะนำมาทดสอบด้วยเทคนิคการกดแบบ วิกเกอร์สและนูป (Vickers and Knoop indentation) แล้วนาค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความแข็งแบบ วิกเกอร์ส (HV) ค่าความแข็งแบบนูป (HK) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus; E) และค่าความ ต้านทานต่อการแตก (fracture tougkness; Kc) ซึ่งได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้ (ตารางที่ 4.6)

ตารางที่ 4.6 สมบัติของกลของเซรามิกของเซรามิกที่ปริมาณ SFT ต่างๆ

ปริมาณ SFT (ร้อยละโดยโมล)	ความแข็ง (จิ ฬ แบบวิกเกอร์ส	กะปาสกาล) แบบนูป BHI	ค่าโมดูลัสเชิงเส้น (จิกะปาสกาล)	ค่าความ ต้านทานต่อการ แตกหัก (เมกะ ปาสกาลต่อเมตร ยกกำลังเศษหนึ่ง ส่วนสอง)
0.00	5.99	5.09	149.73	0.022
0.01	5.98	5.11	151.13	0.016



เมื่อนำชิ้นงานเซรามิก มาทาการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งทางจุลภาคที่มีหัวกดแบบ วิกเกอร์ส และนูปโดยใช้แรงกด 1000 กรัม ได้ผลดังตารางที่ดังตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาค่าที่ได้จากงานวิจัย พบว่าค่าความแข็งทั้งแบบวิกเกอร์สและแบบนูปจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งค่าที่ได้ถือว่าไม่ แตกต่างกันมากนัก ที่เป็นแบบนี้อาจเป็นเพราะปริมาณการเติม SFT มีความแตกต่างกันน้อยมากจึง ทำให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน และจากขนาดเกรนที่มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้เกรนมีจำนวนพอ ๆ กัน ตาม ทฤษฎีแล้วบริเวณขอบเกรนจะเป็นจุดศูนย์รวมของความเค้นเมื่อเกิดความเค้นขึ้น และถ้ามีขอบเกรน มากเซรามิกจะมีความแข็งมากตาม แต่ในกรณีนี้ขนาดเกรนมีค่าใกล้เคียงกัน จึงทำให้มีจานวนขอบ เกรนใกล้เคียงกันด้วย ค่าความแข็งที่ได้ทั้งสองชนิด จึงมีค่าใกล้เคียงกันโดยจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เล็กน้อยเมื่อเทียบกับ BNKT บริสุทธิ์



76