

## บทที่ 4

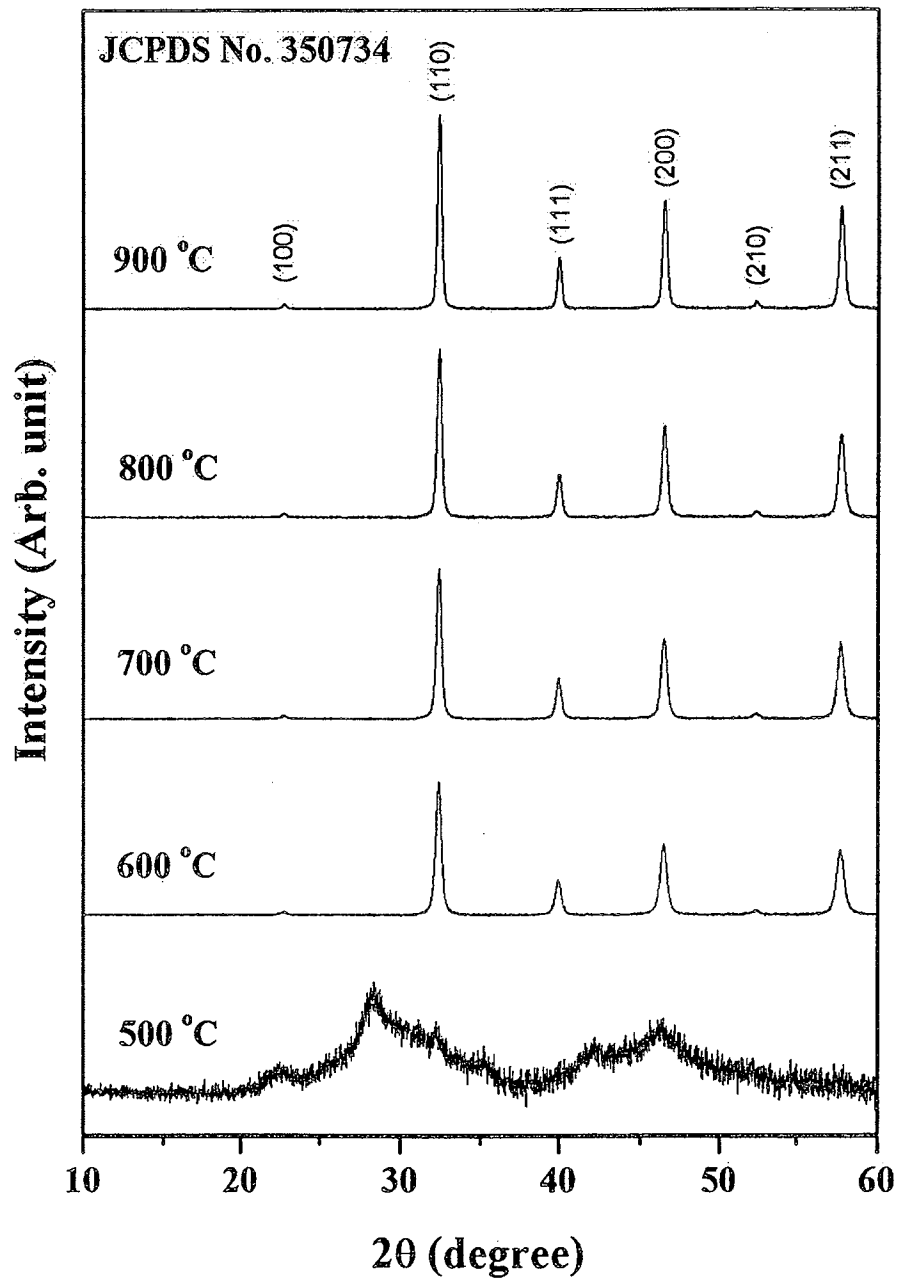
### ผลการวิจัย

ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงผลึกและเซรามิกสตรอนเชียมไททานेट ( $\text{SrTiO}_3$ )

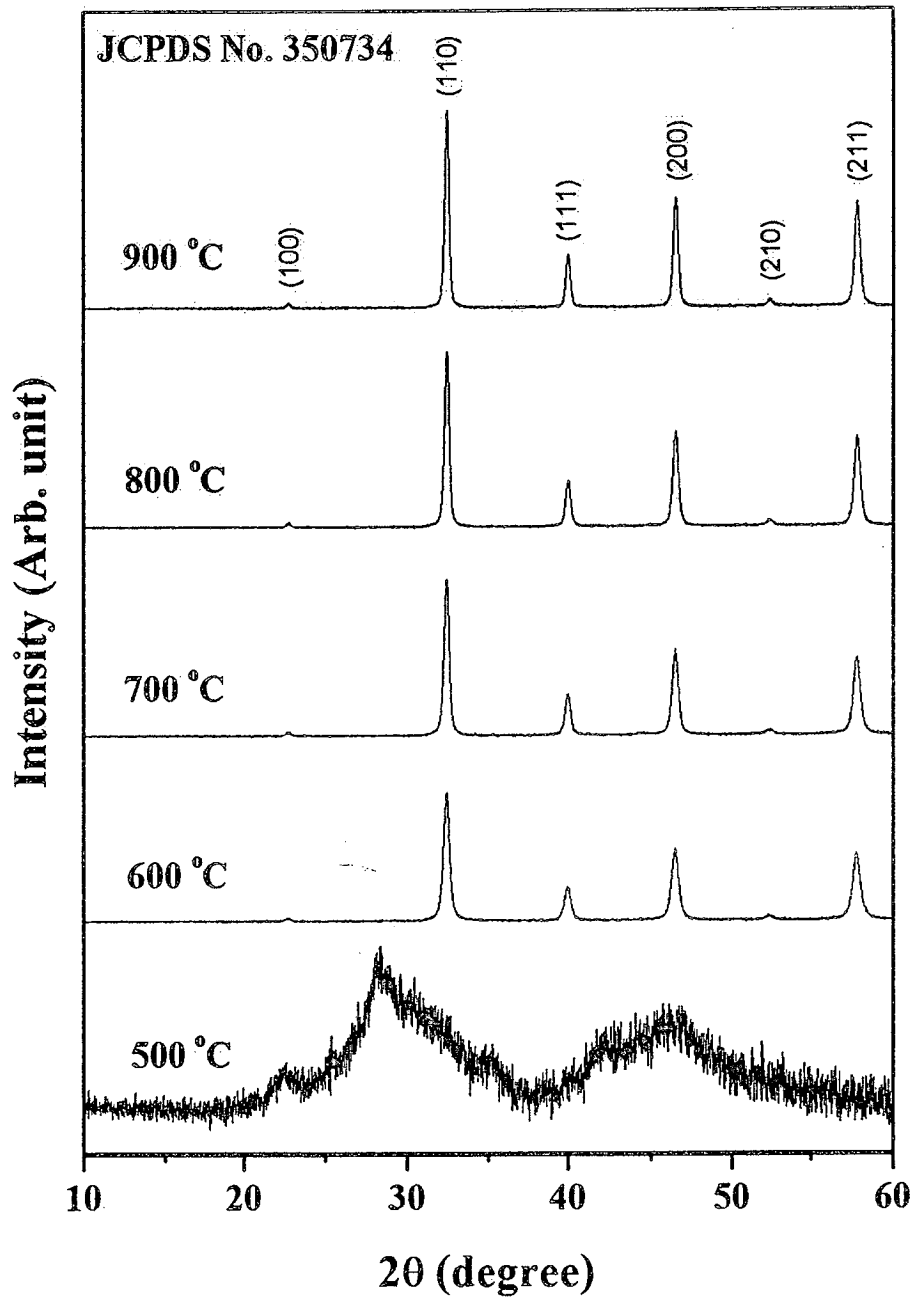
#### 1. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาคของผงผลึก $\text{SrTiO}_3$

จากการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก  $\text{SrTiO}_3$  ที่ใช้กรดซิดริกเป็นสารเชื่อมเพลิงในอัตราส่วนของไฮดรอกไซด์ต่อสารเชื่อมเพลิงเท่ากับ 1:1 1:2 และ 1:3 โดยโมล หลังจากแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500-900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงพบว่า ที่อุณหภูมิ 500 °C ยังไม่เกิดโครงสร้างผลึกของ  $\text{SrTiO}_3$  ลักษณะของเส้นกราฟยังไม่แสดงให้เห็นถึงระนาบการเลี้ยวเบนของผลึก สาเหตุเกิดจากการเผาที่อุณหภูมิต่ำเกินไปจึงไม่เพียงพอต่อการก่อปฏิกิริยาของสารตั้งต้นให้เกิดเป็นผลึก  $\text{SrTiO}_3$  ได้ ที่อุณหภูมิ 600 °C เริ่มมีโครงสร้างเกิดขึ้นและตรวจสอบพบว่า มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกตรงตามข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 35-0734 โครงสร้างที่ตรวจพบเป็นโครงสร้างที่บริสุทธิ์เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 600 °C ไปจนถึงอุณหภูมิ 900 °C ในทุกอัตราส่วน แสดงดังภาพ 23, 24 และ 25 ตามลำดับ

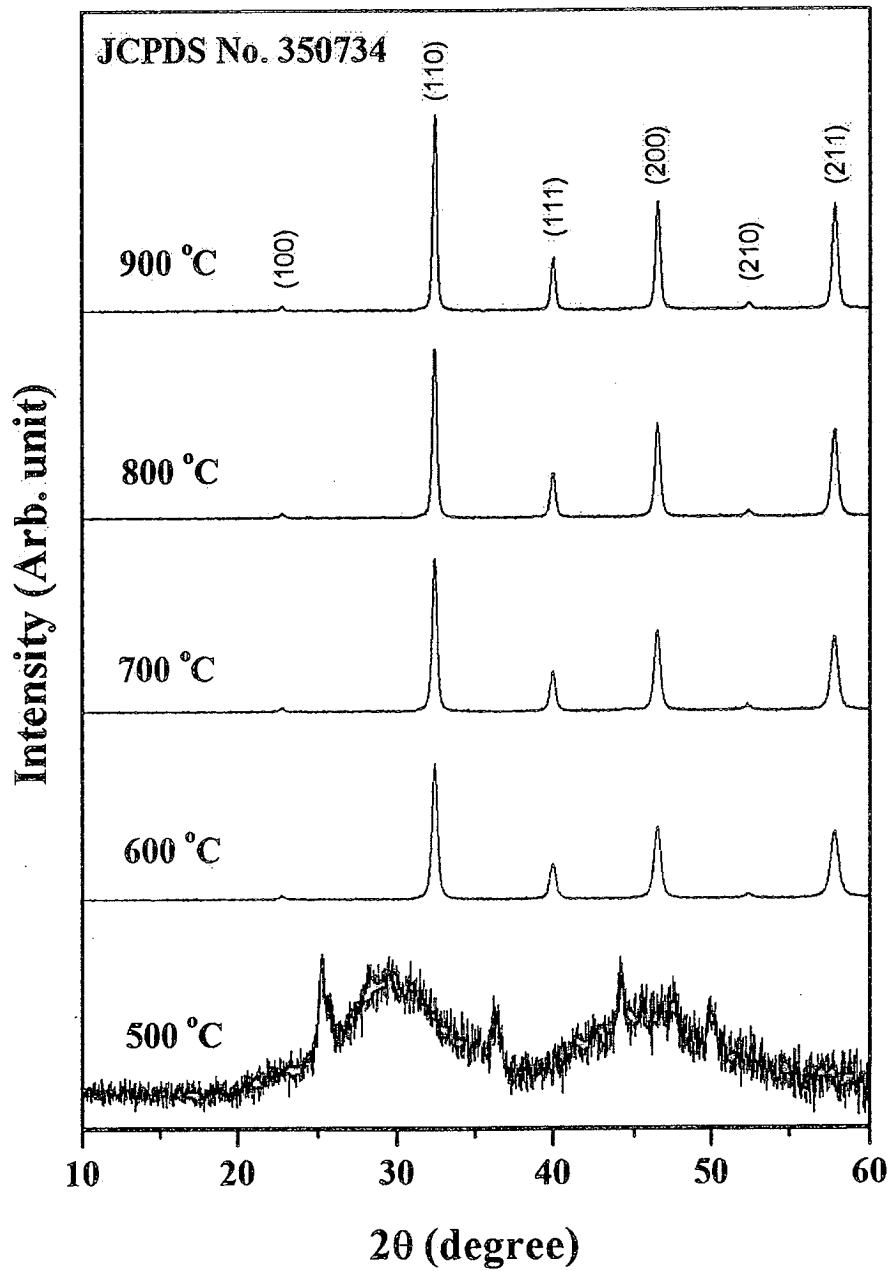
นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ผงผลึก  $\text{SrTiO}_3$  ถูกนำมาคำนวณหาค่าความบริสุทธิ์และค่าขนาดของผงผลึกอีกด้วย โดยค่าความบริสุทธิ์ของสาร  $\text{SrTiO}_3$  หลังจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 600-900 °C มีค่าความบริสุทธิ์เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์พบที่อัตราส่วน 1:1 1:2 และ 1:3 แต่ที่อุณหภูมิ 500 °C ไม่สามารถคำนวณหาค่าความบริสุทธิ์ได้เนื่องจากยังไม่เกิดโครงสร้างเฟสของ  $\text{SrTiO}_3$  ขึ้น ขนาดเฉลี่ยของผงผลึกคำนวณได้จากการสมการเชียร์เรอร์ โดยวัดจากค่า FWHM มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรซึ่งขนาดเล็กที่สุดคำนวณได้เท่ากับ 19.8 นาโนเมตร พบในสารตัวอย่างที่ใช้กรดซิดริกเป็นสารเชื่อมเพลิงที่อัตราส่วน 1:2 โดยโมล ดังนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมเซรามิก  $\text{SrTiO}_3$  คือ ผงผลึกที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C ที่ผสมสารเชื่อมเพลิงชนิดกรดซิดริกที่อัตราส่วน 1:2 เพราะแสดงโครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิต่ำและมีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดสังเกตได้จากตาราง 1



ภาพ 23 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก  $\text{SrTiO}_3$  แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500-900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้กรดซิดริกเป็นสารเชื่อมเพลิงที่อัตราส่วน 1:1



ภาพ 24 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก  $\text{SrTiO}_3$  แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500-900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้กรดซิดริกเป็นสารเชื่อมเพลิงที่อัตราส่วน 1:2



ภาพ 25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก  $\text{SrTiO}_3$  แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500-900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้กรดซิดริกเป็นสารเชื่อมเพลิงที่อัตราส่วน 1:3

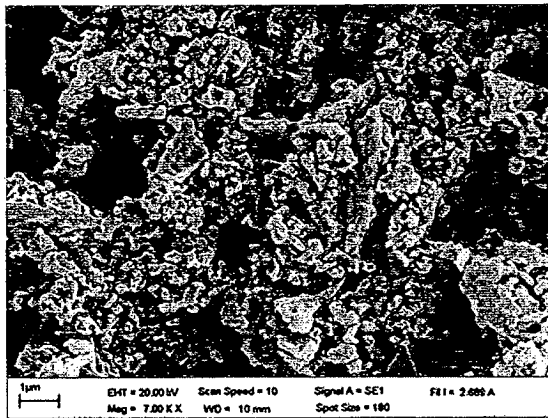
ตาราง 1 การเปรียบเทียบร้อยละความบริสุทธิ์และ ขนาดผลึกของผงผลึก SrTiO<sub>3</sub> ที่ แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิแคลไซน์ (°C)	ร้อยละความบริสุทธิ์			ขนาดของผลึก (FWHM)		
	(%)			(nm)		
อัตราส่วน ไสล ST : สารเชื้อเพลิง						
	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
500	-	-	-	-	-	-
600	100	100	100	22.9	19.8	23.4
700	100	100	100	25.0	22.1	22.1
800	100	100	100	24.9	24.8	24.5
900	100	100	100	31.6	26.1	29.5

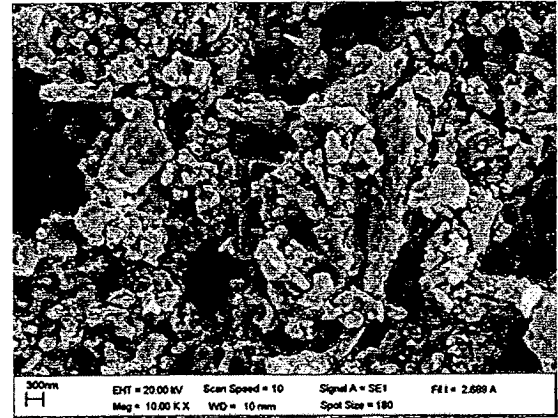
จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของผงผลึก SrTiO<sub>3</sub> หลังจากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500-900°C ที่อัตราส่วน 1:1 1:2 และ 1:3 โดยไมล พบว่าอุณหภูมิ ยังไม่เกิดโครงสร้างผลึก SrTiO<sub>3</sub> หลังจากตรวจสอบโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ลักษณะของผงมีการเกาะกลุ่มก้อนกันอย่างหนาแน่น รูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกันโดยผงที่ได้ทั้งหมดเป็นเพียงผงของสารตั้งต้นที่ยังทำปฏิกิริยากันไม่สมบูรณ์ จึงยังไม่มีอนุภาคของผงผลึก SrTiO<sub>3</sub> เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิ 500°C แสดงดังภาพ 26 เมื่ออุณหภูมิ แคลไซน์สูงขึ้นที่อุณหภูมิ 600°C เริ่มมีการเกิดอนุภาคของผงผลึก SrTiO<sub>3</sub> ซึ่งจากภาพที่ได้แสดงให้เห็นอนุภาคขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร มีรูปร่างเป็นทรงกลม เกิดการเกาะกลุ่มก้อนกันอย่างหนาแน่น การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ลักษณะโดยรวมมีรูพรุน พู ในขณะที่อุณหภูมิสูงจนถึง 900°C ขนาดของอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสังเกตจากภาพ 27, 28 และ 29 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของสารเชื้อเพลิง(กรดซิตริก) ที่ใช้ในปฏิกิริยาการเผาไหม้ร่วมกับ ไสล-เจลส่งผลต่อขนาดอนุภาคของผงผลึก SrTiO<sub>3</sub> โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค พบว่า อัตราส่วนของโอสสารตั้งต้นต่อสารเชื้อเพลิง 1:2 โดยไมล (ภาพ 30) เกิดอนุภาคผงผลึก ขนาดเล็กที่สุดในช่วงอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 600°C โดยมีขนาดเล็กกว่าสารตั้งต้นที่ผสมสาร เชื้อเพลิงในอัตราส่วน 1:1 (ภาพ 27) และ 1:3 (ภาพ 29) อนุภาคนาโนของผงผลึก SrTiO<sub>3</sub> วัดได้จากภาพถ่าย TEM และคำนวณโดยวัดค่าการกระจายตัวของอนุภาคโดยวิธีการหาค่าขนาดอนุภาค

แบบ จุดตัดเส้นตรงเฉลี่ย (mean linear intercept) อนุภาคผงผลึกมีขนาดเฉลี่ยเล็กที่สุดประมาณ 32.69 นาโนเมตร สังเกตได้จากภาพ 30

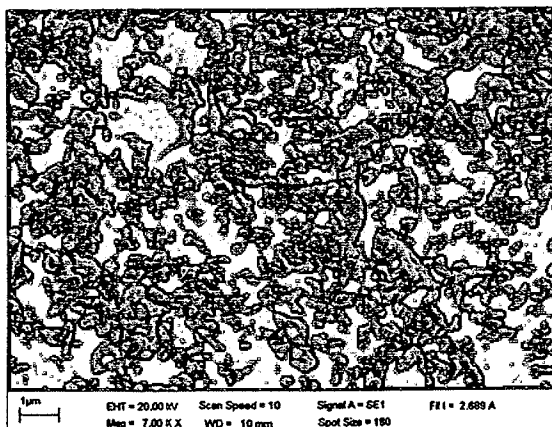


(ก)

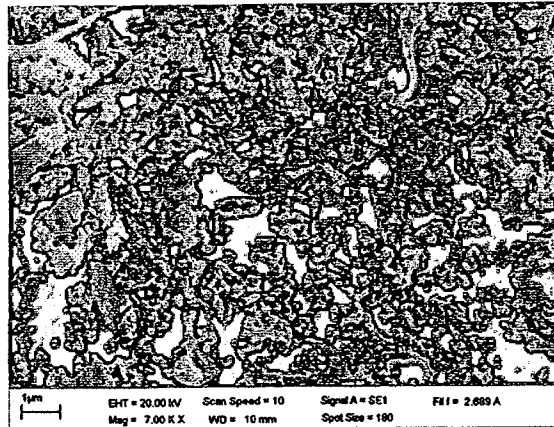


(ข)

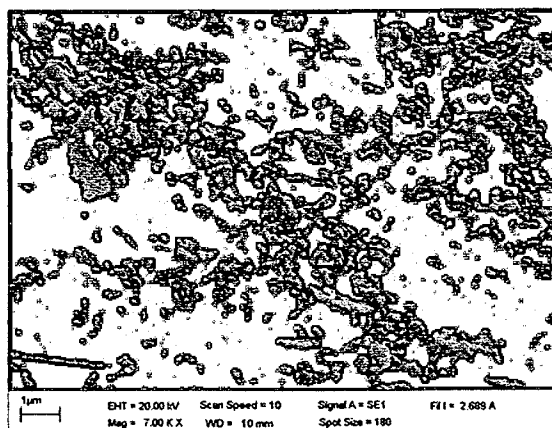
ภาพ 26 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก  $\text{SrTiO}_3$  ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้กรดซิดริกเป็นสารเชื่อมเพลิงที่อัตราส่วน 1:1 (ก) กำลังขยาย 7,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า



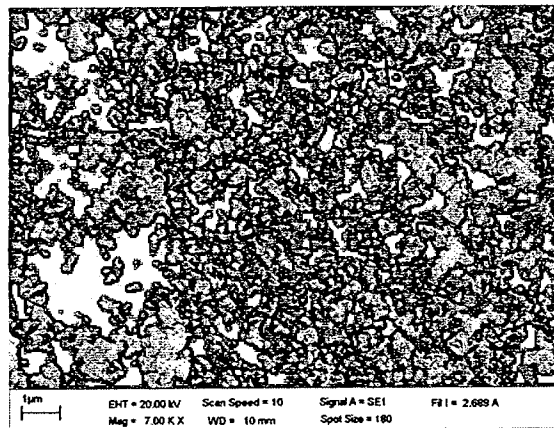
(ก)



(ข)

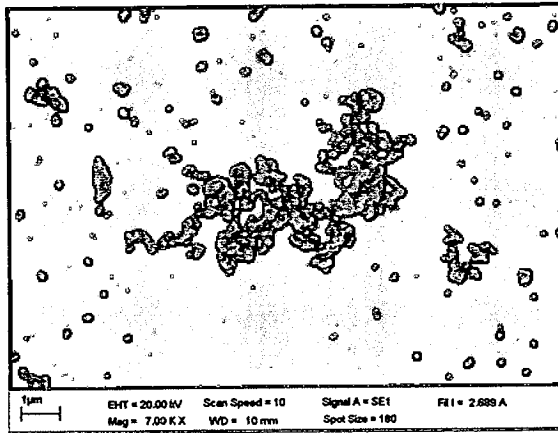


(ค)

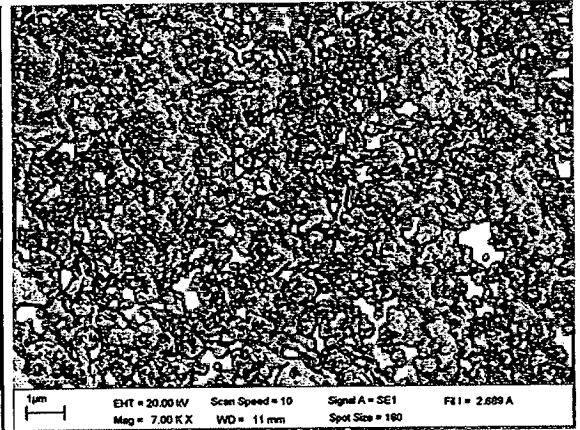


(ง)

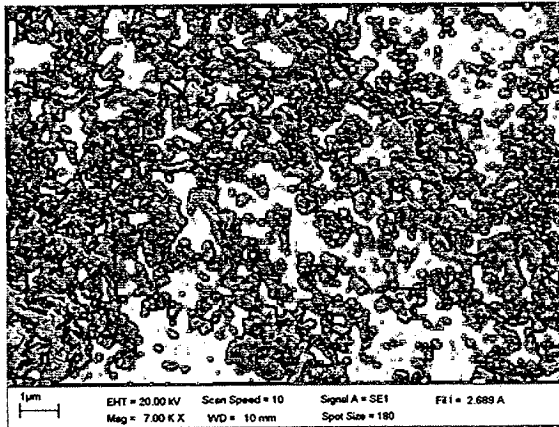
ภาพ 27 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก  $\text{SrTiO}_3$  ที่เผาแคลไซน์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้กรดซิดริกเป็นสารเชื่อมเพลิงที่อัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ (ก)  $600^\circ\text{C}$  (ข)  $700^\circ\text{C}$  (ค)  $800^\circ\text{C}$  และ (ง)  $900^\circ\text{C}$



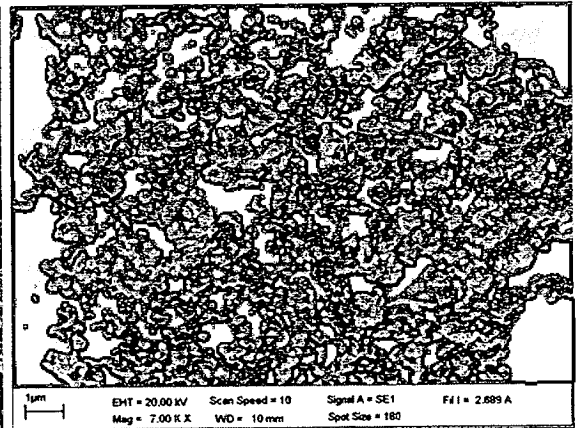
(ก)



(ข)



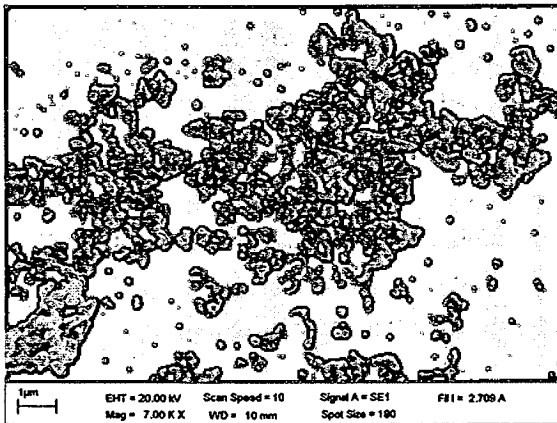
(ค)



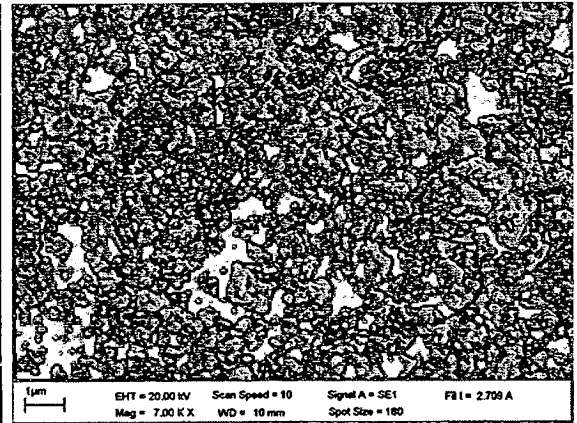
(ง)

ภาพ 28 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก SrTiO<sub>3</sub> ที่เผาเคลือบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้กรดซิดริกเป็นสารเชื่อมเพลิงที่อัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิ (ก) 600°C (ข) 700°C (ค) 800°C และ (ง) 900°C

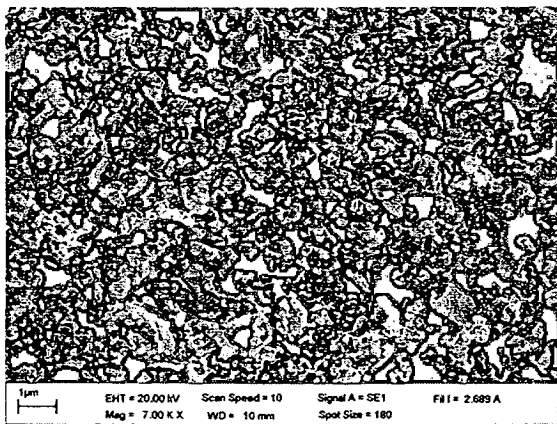




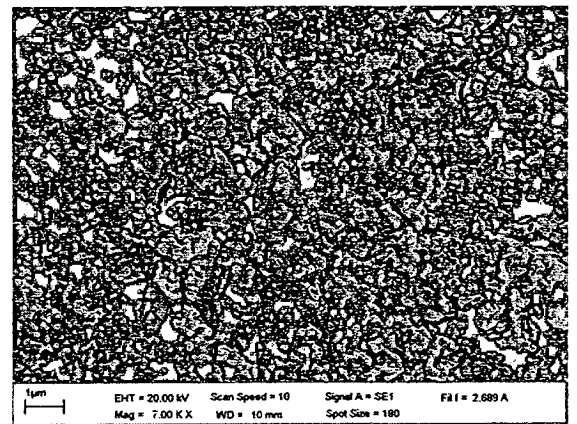
(ก)



(ข)

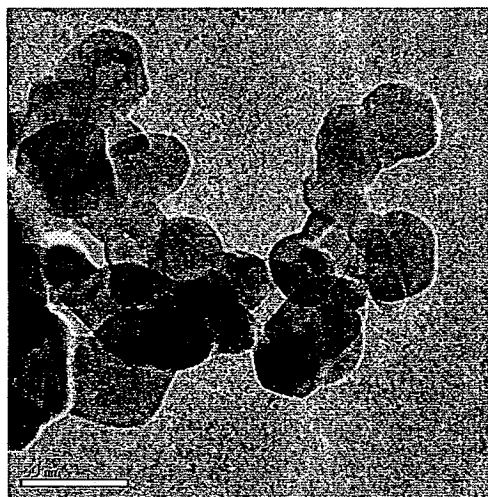


(ค)

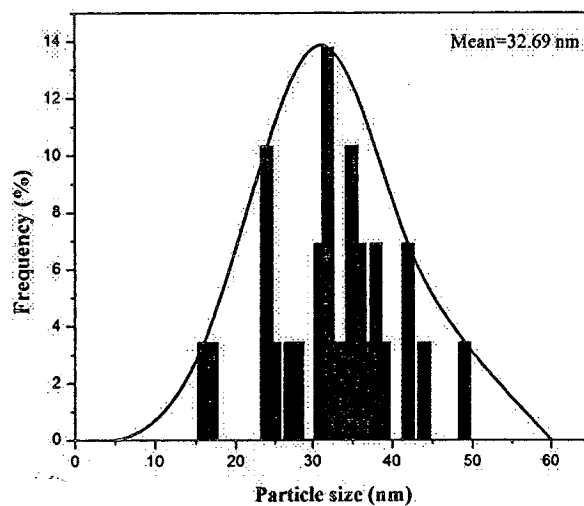


(ง)

ภาพ 29 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก  $\text{SrTiO}_3$  ที่เผาแคลไซน์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารเชื่อมเพลิงที่อัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ (ก)  $600^\circ\text{C}$  (ข)  $700^\circ\text{C}$  (ค)  $800^\circ\text{C}$  และ (ง)  $900^\circ\text{C}$



(ก)



(ข)

ภาพ 30 (ก) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงผลึก  $\text{SrTiO}_3$  ที่แคล-ไซน์ที่อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้กรดซิดริกเป็นสารเชื่อมเพลิงที่อัตราส่วน 1:2 กำลังขยาย 235000 เท่า (ข) กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาค  $\text{SrTiO}_3$

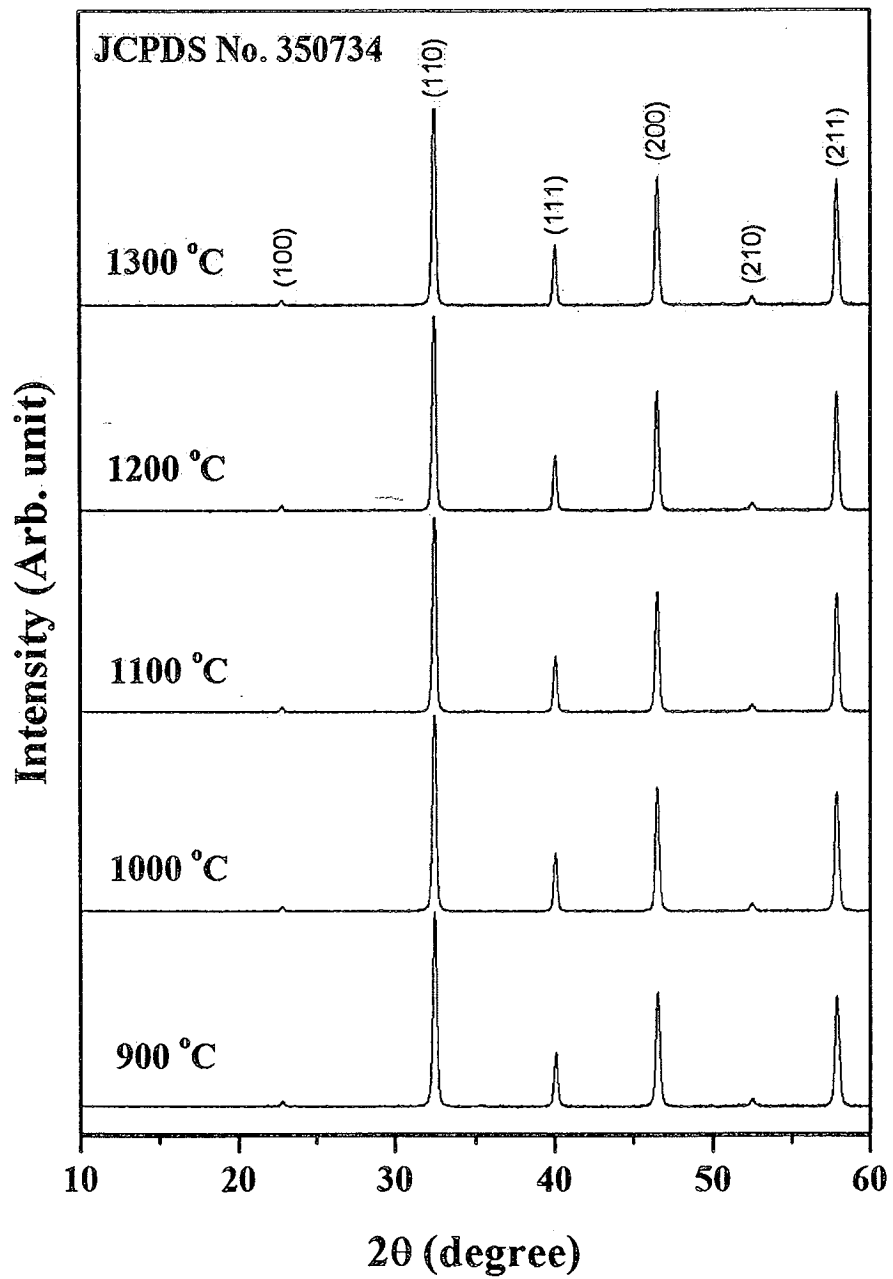
ตาราง 2 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงผลึก  $\text{SrTiO}_3$  ที่แคล-ไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิแคล-ไซน์ ( $^\circ\text{C}$ )	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย [SEM images] (nm)		
	อัตราส่วน ไสลST : สารเชื่อมเพลิง		
	1:1	1:2	1:3
500	-	-	-
600	105.37	94.58	103.05
700	105.88	98.17	106.35
800	111.99	111.52	112.12
900	139.72	133.16	136.28

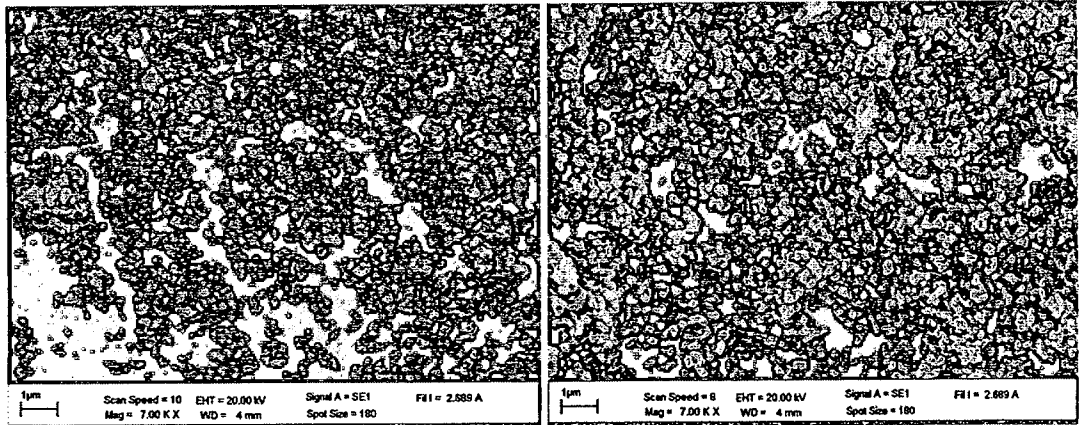
## 2. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub>

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900-1300°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงดังภาพ 31 พบว่าเซรามิกมีโครงสร้างแบบคิวบิกเพอรอฟสไกต์บริสุทธิ์ ตั้งแต่อุณหภูมิ 900°C เป็นต้นไป ตรงตามข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 350734

ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวหน้าของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> แสดงดังภาพ 32 พบว่า เกรนมีรูปร่างเป็นทรงกลม ขนาดเล็กมากและมีการเกาะกลุ่มก้อนกันอย่างหนาแน่น การจัดเรียงตัวแบบไม่สม่ำเสมอ พบรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ที่อุณหภูมิสูงขึ้นขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากเกรนขนาดเล็กเกิดการหลอมรวมกันสังเกตได้จากภาพ 32 (ก) และ (ข) ลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจำนวนมากภายในเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ทำให้ระยะห่างระหว่างเกรนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้พื้นที่ในการหลอมรวมกันบริเวณขอบเกรนมีน้อยลง และทำให้เกิดช่องว่างของรูพรุนมากขึ้น อีกทั้งระยะเวลาในการซินเตอร์ที่ 2 ชั่วโมงอาจจะน้อยเกินไปจึงทำให้เวลาในการหลอมตัวกันของเกรนไม่เพียงพอ เมื่อคำนวณหาขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิกโดยวิธีเชิงเส้นพบว่า มีขนาดเกรนเพิ่มสูงขึ้นจาก 140 -230 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มจาก 900-1300°C

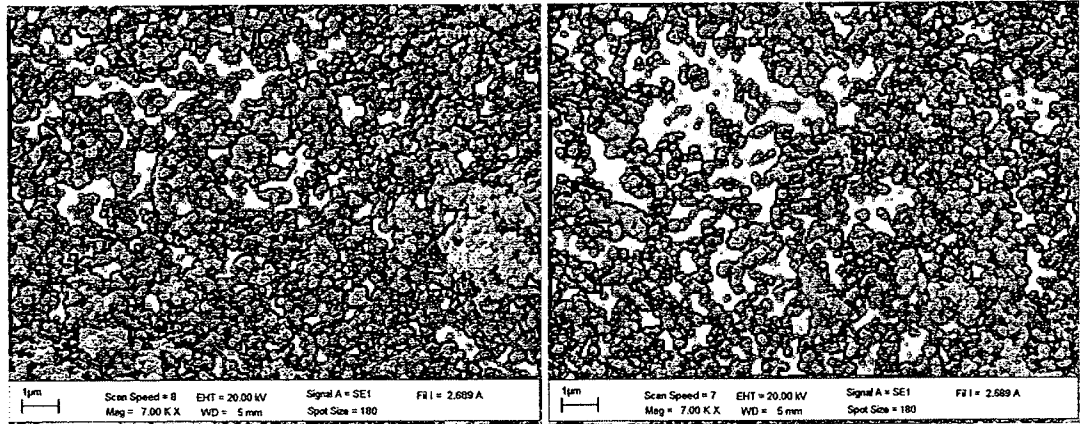


ภาพ 31 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> สินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900-1300 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



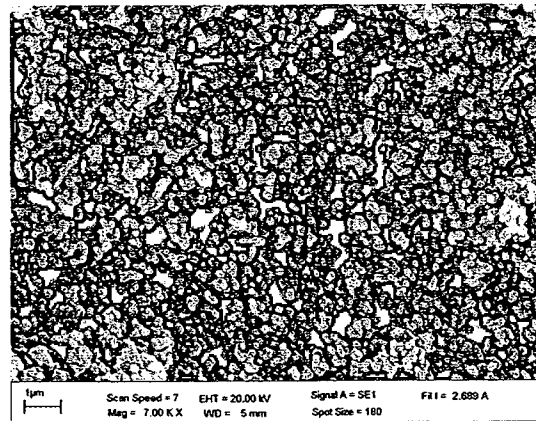
(ก)

(ข)



(ค)

(ง)



(จ)

ภาพ 32 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวหน้าของ เซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ซินเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ (ก) 900°C (ข) 1000°C (ค) 1100°C (ง) 1200°C และ (จ) 1300°C

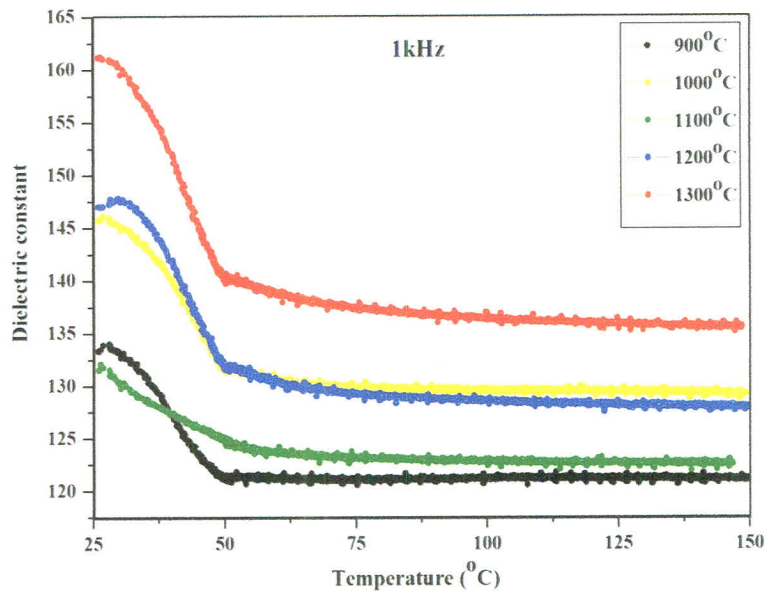
ร้อยละการหดตัว ความหนาแน่นจากการทดลองของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900-1300°C แสดงดังตาราง 3 โดยร้อยละการหดตัวเชิงเส้นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.14 ถึง 6.04% เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.14 g/cm<sup>3</sup> (ตาราง 3) ซึ่งแต่ละอุณหภูมิมีค่าไม่ต่างกันมากนัก จากที่กล่าวมาสังเกตว่าเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> มีค่าความหนาแน่น และร้อยละการหดตัวที่ต่ำสอดคล้องกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สาเหตุอาจเกิดจากระยะเวลาในการซินเตอร์อาจน้อยเกินไปจึงไม่เพียงพอต่อการหลอมตัวของอนุภาค SrTiO<sub>3</sub>

ตาราง 3 ขนาดเกรนเฉลี่ย ร้อยละความหดตัว และความหนาแน่นของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

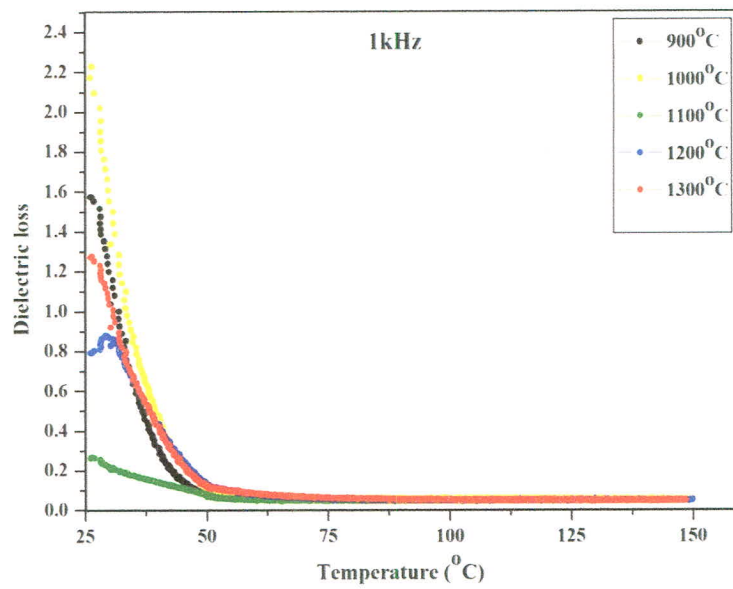
อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (nm)	ร้อยละความหดตัว	
		เชิงเส้น (%)	ความหนาแน่น จากการทดลอง (g/cm <sup>3</sup> )
900	140	2.19	2.14
1000	160	4.06	1.86
1100	190	5.21	2.03
1200	210	6.04	2.12
1300	230	6.04	2.09

### 3. ผลวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ ) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ( $\tan\delta$ ) ของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900-1300 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่ความถี่ต่างๆ พบว่าความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต เส้นกราฟค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกที่ซินเตอร์อุณหภูมิ 1300 °C แสดงค่าสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 162 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับ 1.30 ในช่วงอุณหภูมิห้อง และเซรามิกที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 °C แสดงค่าที่ต่ำที่สุดคือ 132 และ 0.08 แสดงดังภาพ 33 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ให้เพิ่มขึ้นเป็น 10 กิโลเฮิร์ตจะเห็นได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง โดยที่เซรามิกซินเตอร์อุณหภูมิ 1300°C มีค่าเท่ากับ 146 และ 0.24 ดังภาพ 35 ที่ความถี่สูงสุด 100 กิโลเฮิร์ต ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดต่ำลงอีกโดยมีค่าเท่ากับ 123 และ 0.08 ดังภาพ 36 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่ส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> โดยเมื่อให้ค่าความถี่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดต่ำลง และจากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ในช่วงอุณหภูมิ 25-200°C พบว่า อุณหภูมิในการซินเตอร์ที่สูงขึ้นทำให้เซรามิกมีความหนาแน่นสูงและส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในช่วงการวัดสมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุด แต่ที่ความถี่สูงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงสังเกตได้ จากตาราง 4 เซรามิกที่เผาซินเตอร์อุณหภูมิ 1300°C ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดดังภาพ 37



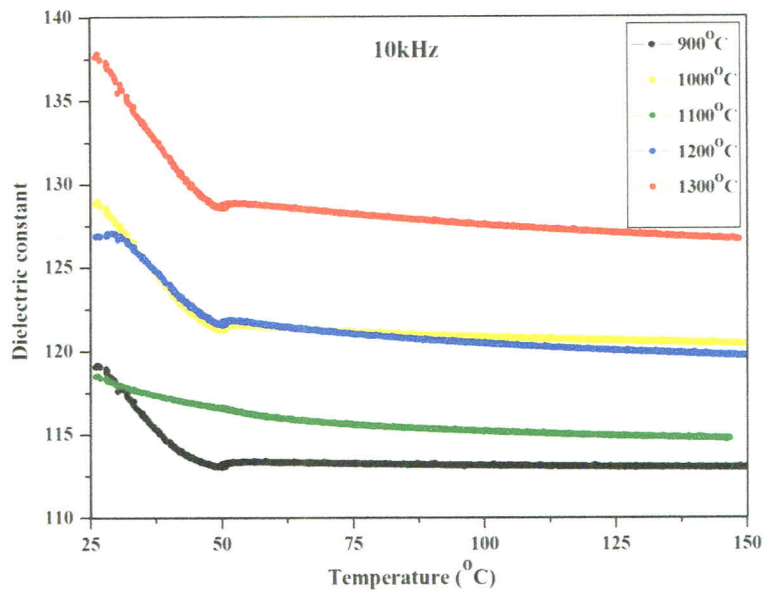
(ก)



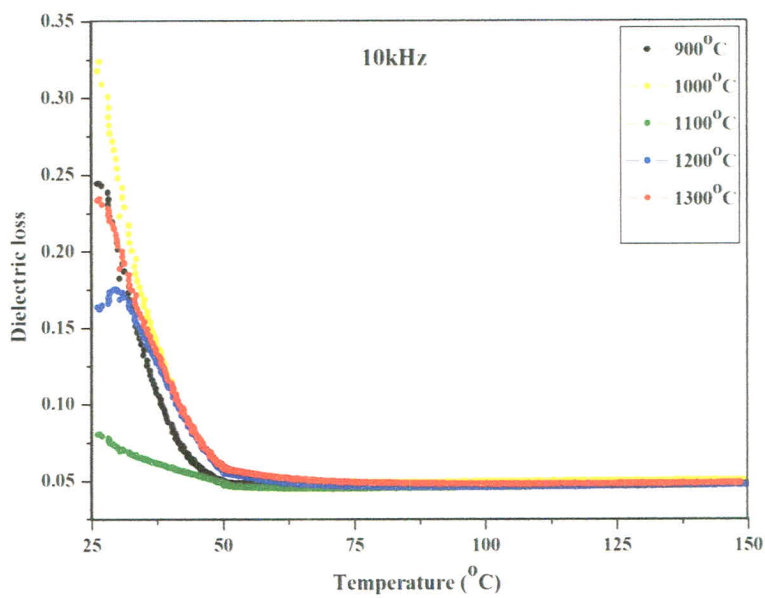
(ข)

ภาพ 33 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก  $\text{SrTiO}_3$  ที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความถี่ 1 KHz



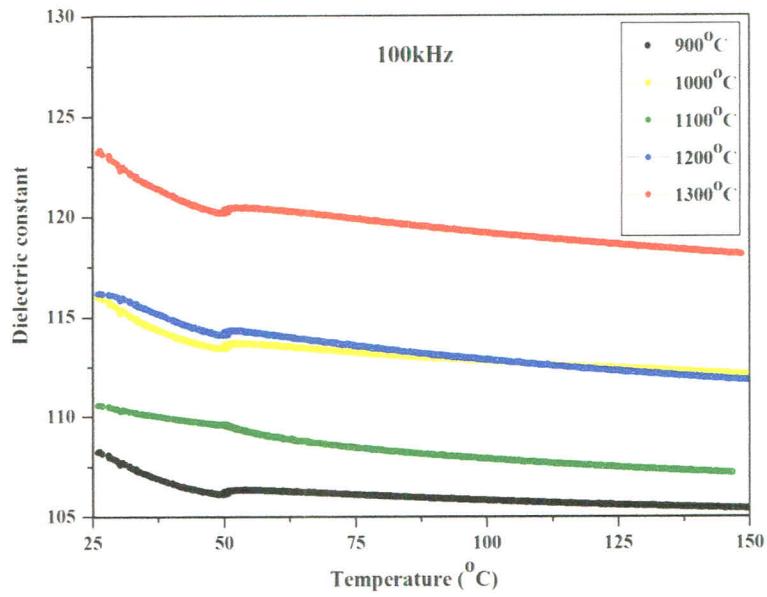


(ก)

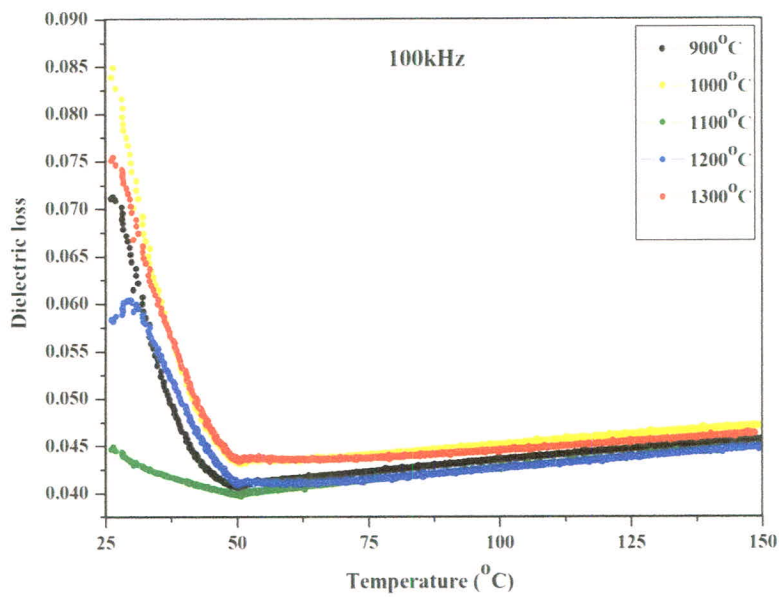


(ข)

ภาพ 34 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก  $\text{SrTiO}_3$  ที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความถี่ 10 KHz

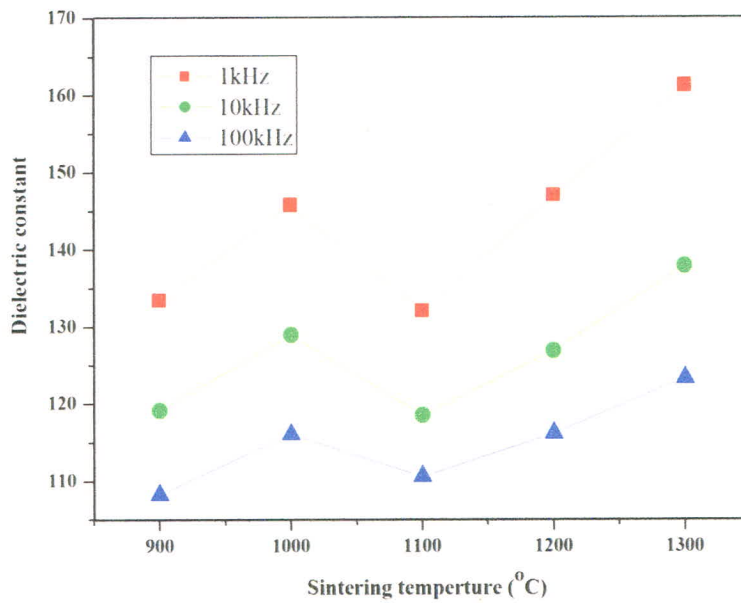


(ก)

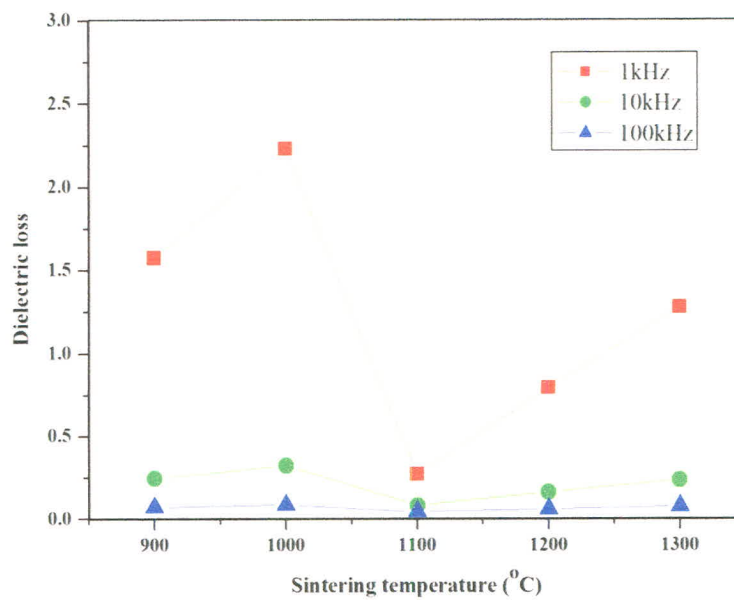


(ข)

ภาพ 35 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความถี่ 100 KHz



(ก)



(ข)

ภาพ 36 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก  $\text{SrTiO}_3$  ที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความถี่ต่างๆ

ตาราง 4 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก			ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก		
	$\epsilon_r$			$\tan \delta$		
	1kHz	10kHz	100kHz	1kHz	10kHz	100kHz
900	134	119	108	1.59	0.25	0.07
1000	146	129	116	2.28	0.33	0.09
1100	132	118	111	0.27	0.08	0.04
1200	147	127	116	0.79	0.16	0.06
1300	162	138	123	1.30	0.24	0.08

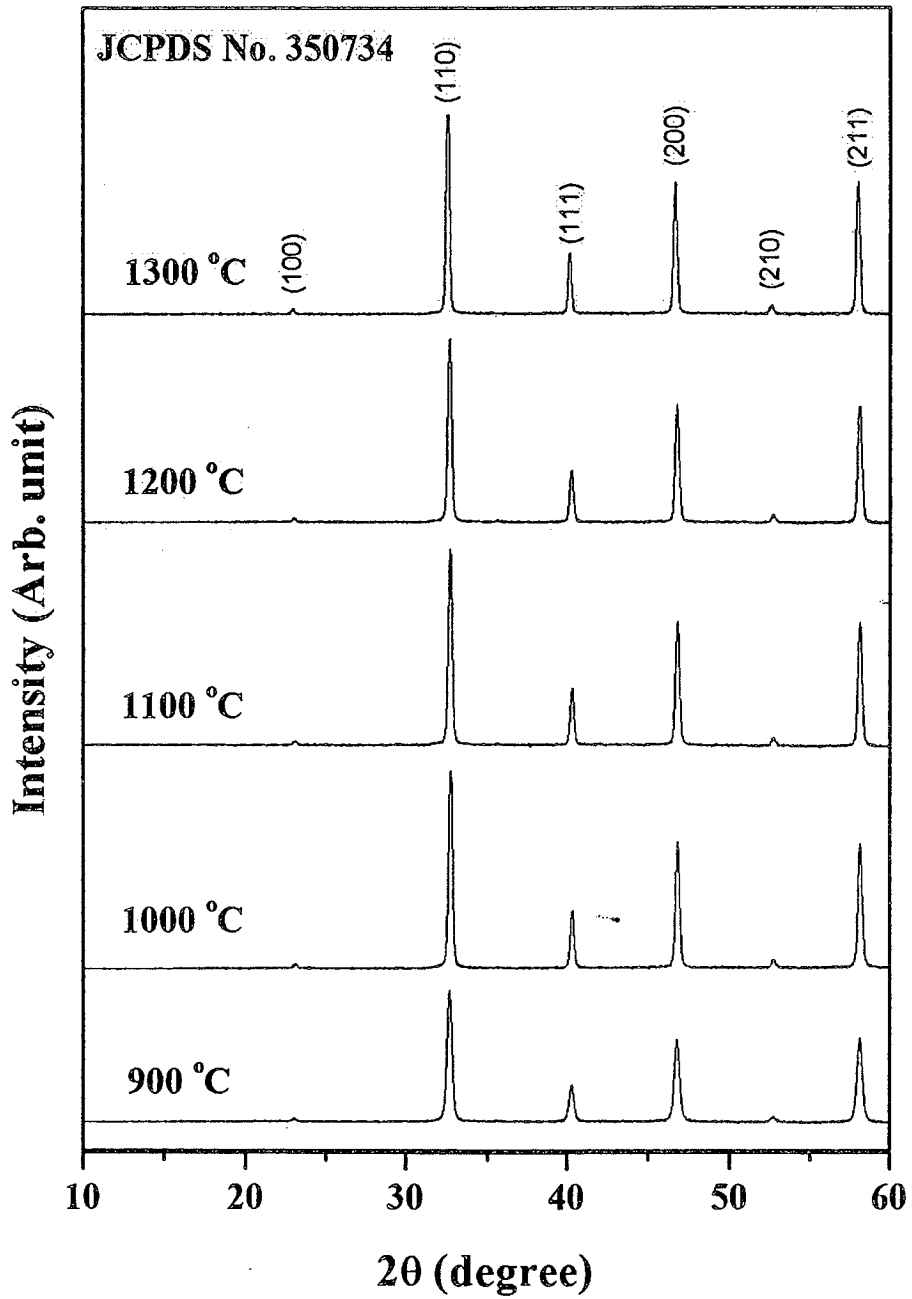
ผลจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900-1300°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> เกรนมีขนาดเล็กและมีรูพรุนจำนวนมากทำให้ส่งผลต่อค่าความหนาแน่น ทำให้มีค่าความหนาแน่นต่ำสอดคล้องกับภาพถ่ายผิวหน้าเซรามิกที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อาจเนื่องจากระยะเวลาในการเผาแซ่ของการซินเตอร์น้อยเกินไปทำให้เวลาในการหลอมรวมกันของเกรนไม่เพียงพอ ส่งผลให้เกิดรูพรุนและเปอร์เซ็นต์การหดตัวน้อย เซรามิกจึงมีความหนาแน่นต่ำโดยวัดได้สูงสุดเท่ากับ 2.14 g/cm<sup>3</sup> และค่าคงไดอิเล็กทริกต่ำลงด้วย ในการทดลองนี้จึงได้ทำการเพิ่มระยะเวลาในการซินเตอร์ โดยเพิ่มขึ้นเป็น 4 ชั่วโมง เพื่อให้เซรามิกได้มีเวลาเพียงพอต่อการหลอมตัวของเกรนให้มากขึ้น โดยได้ทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900-1300°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการศึกษาโครงสร้างเฟส โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ต่อไป

ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของเซรามิกสตรอนเชียมไททาเนต ( $\text{SrTiO}_3$ ) ที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

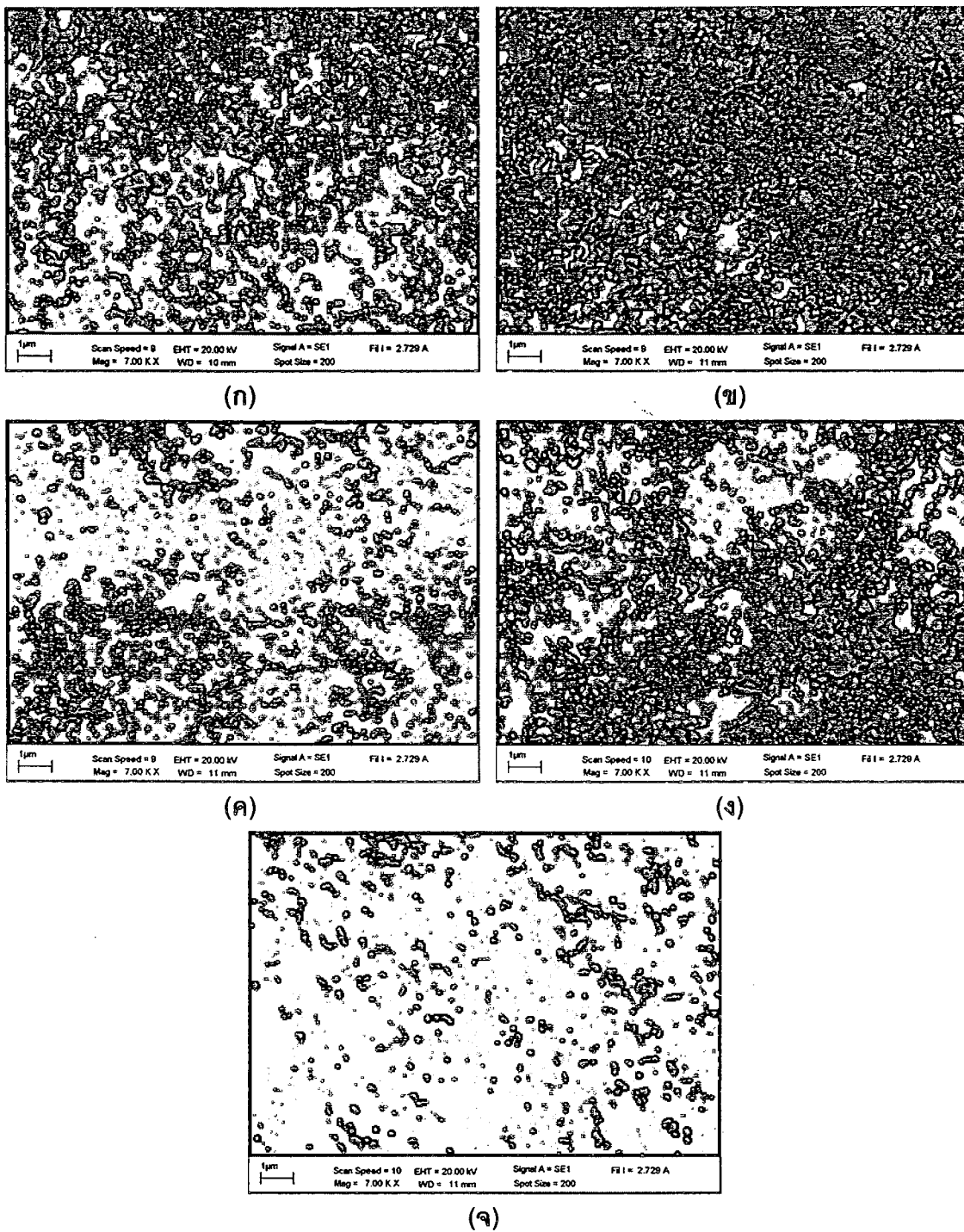
1. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก  $\text{SrTiO}_3$  ที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก  $\text{SrTiO}_3$  ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900-1300°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงดังภาพ 37 พบว่าเซรามิกมีโครงสร้างแบบคิวบิกเพอรอฟสไกต์บริสุทธิ์ ตั้งแต่อุณหภูมิ 900°C เป็นต้นไป ตรงตามข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 350734

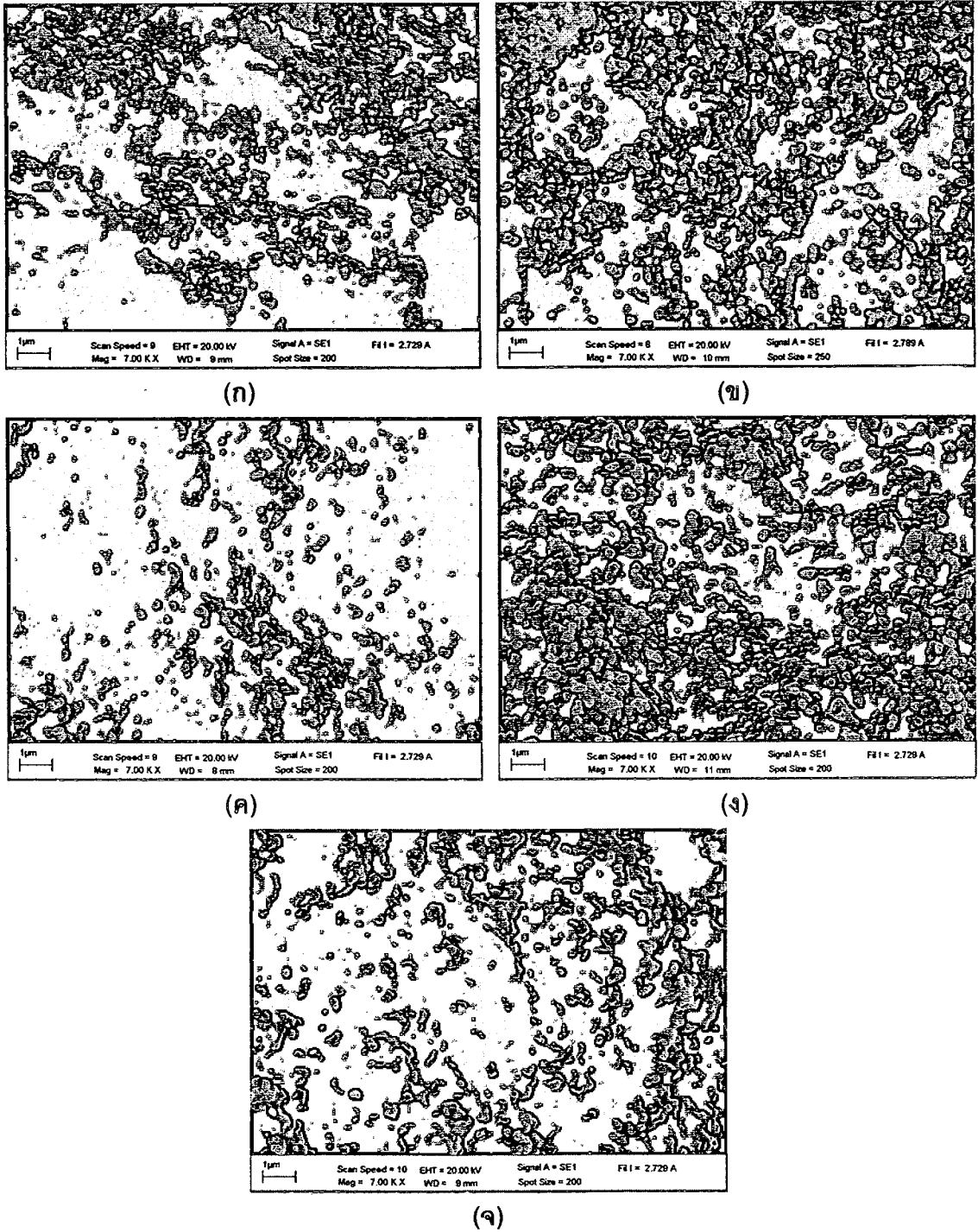
ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวหน้าและรอยหักดังภาพ 38 และ 39 ของเซรามิก  $\text{SrTiO}_3$  ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900-1300°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงพบว่ามีมีการเปลี่ยนแปลงโดยการเพิ่มระยะเวลาในการซินเตอร์โดยเพิ่มขึ้นจาก 2 ชั่วโมงเป็น 4 ชั่วโมง ลักษณะของเกรนเกิดการเปลี่ยนแปลงคือ เกรนมีการหลอมตัวกันมากขึ้น เรียงชิดติดกัน รวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่และมีความหนาแน่นสูง อัตราการเกิดรูพรุนลดน้อยลงจากเดิม ที่อุณหภูมิ 900°C เกรนมีขนาดเล็ก รูปทรงกลมและมีรูพรุนเกิดขึ้นจำนวนมากแต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นที่อุณหภูมิ 1300°C เกรนเกิดการหลอมรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ รูปทรงเป็นเหลี่ยมและมีความหนาแน่นสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเซรามิกที่ซินเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซรามิก ที่เพิ่มระยะเวลาในการซินเตอร์เป็น 4 ชั่วโมงทำให้เห็นว่าระยะเวลาในการหลอมตัวกันของเกรน และบริเวณขอบเกรนมีมากขึ้นส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนรูพรุนลดน้อยลงและมีความหนาแน่นสูง โดยเซรามิก  $\text{SrTiO}_3$  มีความหนาแน่นมากที่สุดที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1300°C โดยขนาดของเกรนเพิ่มจาก 124-360 นาโนเมตรตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นจาก 900-1300°C



ภาพ 37 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900-1300 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ภาพ 38 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวหน้าของเซรามิก  $\text{SrTiO}_3$  เผาซินเตอร์เป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ (ก)  $900^\circ\text{C}$  (ข)  $1000^\circ\text{C}$  (ค)  $1100^\circ\text{C}$  (ง)  $1200^\circ\text{C}$  และ (จ)  $1300^\circ\text{C}$



ภาพ 39 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณรอยหักของเซรามิก  $\text{SrTiO}_3$  ซินเตอร์เป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ (ก)  $900^\circ\text{C}$  (ข)  $1000^\circ\text{C}$  (ค)  $1100^\circ\text{C}$  (ง)  $1200^\circ\text{C}$  และ (จ)  $1300^\circ\text{C}$



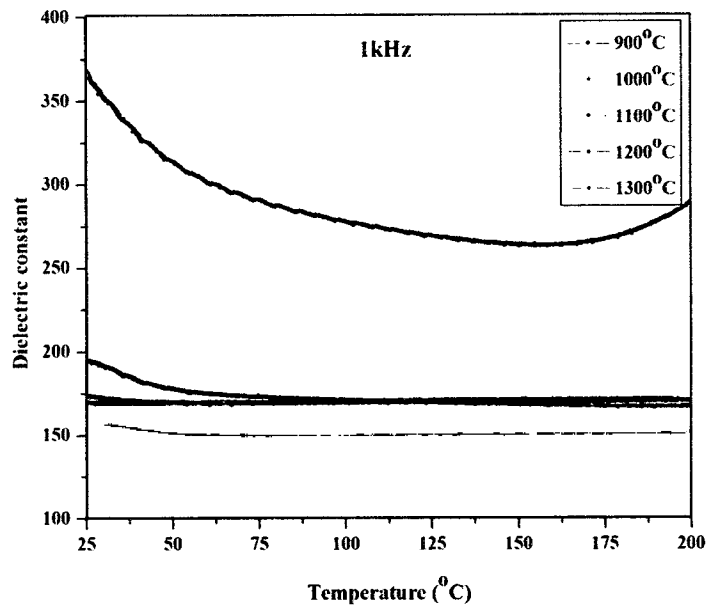
ร้อยละการหดตัว ความหนาแน่นจากการทดลองของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900-1300°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงพบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการซินเตอร์ให้มากขึ้นเป็น 4 ชั่วโมง ค่าการหดตัวของเซรามิกเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมที่ซินเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีค่าการหดตัวสูงสุดที่ 23.96% ขนาดของเกรนมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นจาก 124-360 นาโนเมตร และค่าความหนาแน่นจากการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 4.42 g/cm<sup>3</sup> โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเพิ่มระยะเวลาของการซินเตอร์ให้มากขึ้นจึงทำให้สมบัติต่างๆของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ดีขึ้นจากเดิมโดยค่าสูงที่สุดพบในช่วงการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300°C แสดงดังตาราง 5

ตาราง 5 ขนาดเกรนเฉลี่ย ร้อยละความหดตัว และความหนาแน่นของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> เมาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

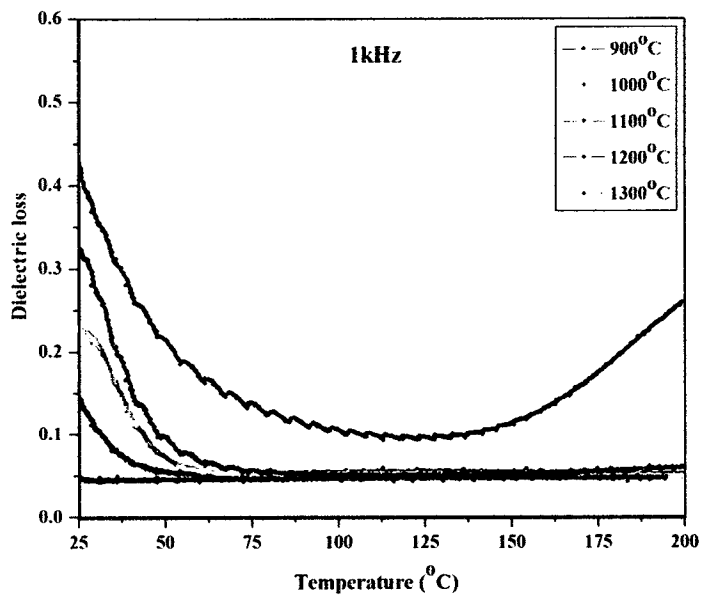
อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (nm)	ร้อยละความหดตัว		ความหนาแน่น จากการทดลอง (g/cm <sup>3</sup> )
		เชิงเส้น (%)		
900	124	1.67		1.88
1000	133	3.44		1.88
1100	188	7.19		2.29
1200	302	12.71		2.85
1300	360	23.96		4.42

## 2. ผลวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ ) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ( $\tan\delta$ ) ของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> เผา ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900-1300 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่ความถี่ต่างๆ พบว่าที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต เซรามิกแสดงเส้นกราฟไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดในช่วงอุณหภูมิห้องโดยเซรามิกที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300°C ดังภาพ 40 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 382 และมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.49 เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ต เซรามิก SrTiO<sub>3</sub> แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงโดยมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 302 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.14 พบในเซรามิกที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300°C เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้นเป็น 100 กิโลเฮิร์ต เซรามิกแสดงค่าไดอิเล็กทริกที่ลดลงกว่า ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิร์ตดังภาพ 40 และ 41 โดยมีค่าไดอิเล็กทริกสูงที่สุดเท่ากับ 278 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.04 ดังตาราง 6 จากผลการวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริกแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นดังภาพ 43 ผลการศึกษาระยะเวลาในการซินเตอร์โดยการเพิ่มเวลาในการเผาแซ่ให้นานขึ้นเป็น 4 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงจากเดิมที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดย เซรามิก SrTiO<sub>3</sub> แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 382 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.49 มีค่ามากกว่าการซินเตอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมงมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 162 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 1.30

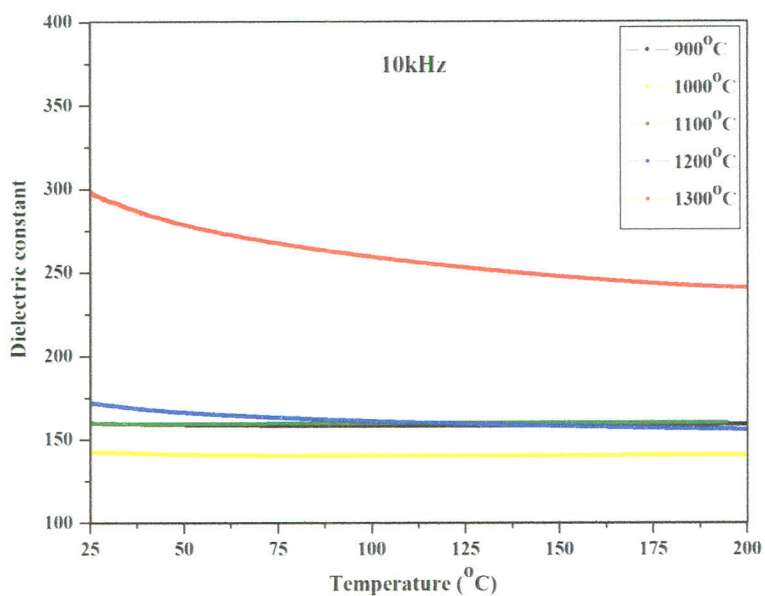


(ก)

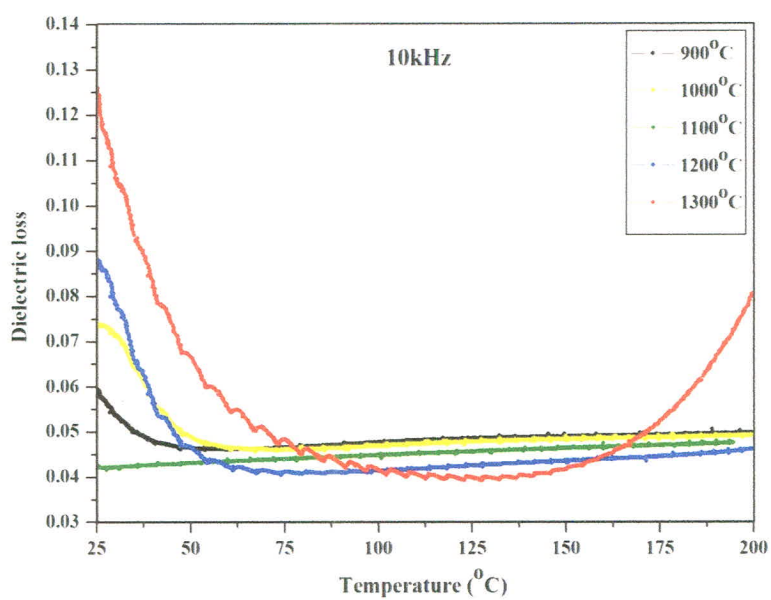


(ข)

ภาพ 40 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ความถี่ 1 KHz

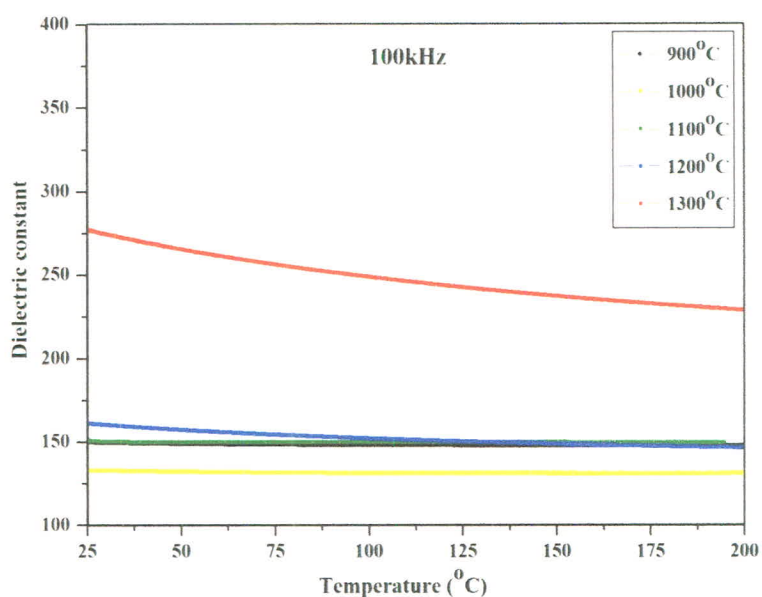


(ก)

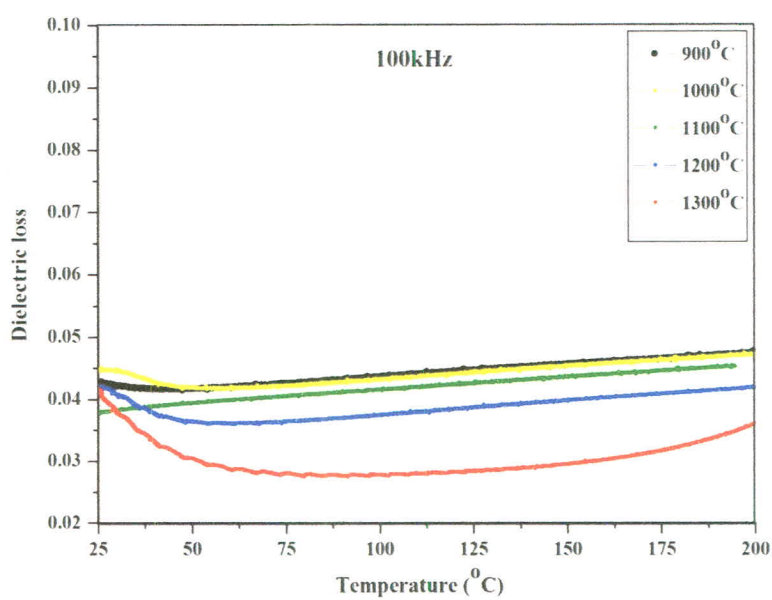


(ข)

ภาพ 41 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ที่ เฝ้าซินเตอร์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ความถี่ 10 KHz

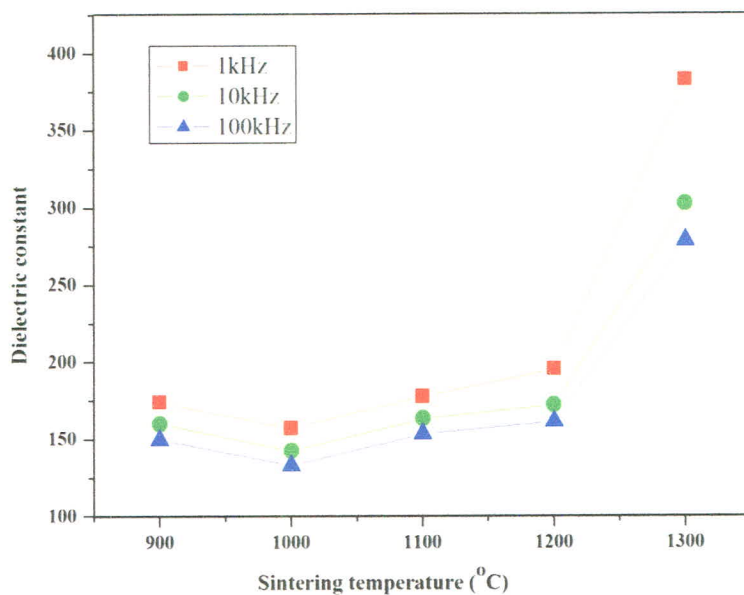


(ก)

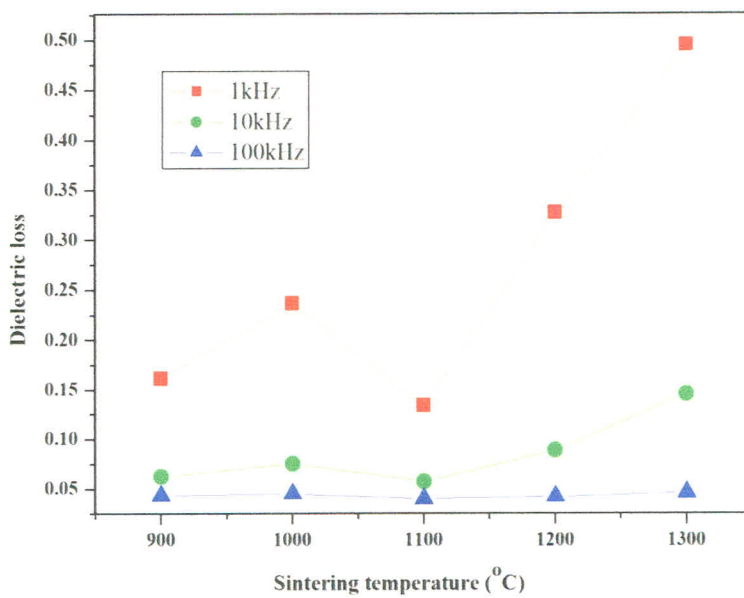


(ข)

ภาพ 42 (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ความถี่ 100 KHz



(ก)



(ข)

ภาพ 43 (ก) ค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกและ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ที่เผาซินเตอร์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ความถี่ต่างๆ

ตาราง 6 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก SrTiO<sub>3</sub> ที่เผา  
ซินเตอร์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก			ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก		
	$\epsilon_r$			$\tan\delta$		
	1kHz	10kHz	100kHz	1kHz	10kHz	100kHz
900	174	160	149	0.16	0.06	0.04
1000	157	142	132	0.23	0.07	0.04
1100	177	163	153	0.13	0.05	0.04
1200	195	172	161	0.32	0.08	0.04
1300	382	302	278	0.49	0.14	0.04