



ผลของการเติมสารเจือต่อสมบัติของเซรามิกแคลเซียมคอปเปอร์ไททานेट ที่เตรียมโดยวิธี
เกลือหลอมเหลว



ธนวรรณ วงศ์รีรัก

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

ผลของการเติมสารเจือต่อสมบัติของเซรามิกแคลเซียมคอปเปอร์ไททานต ที่เตรียมโดยวิธี
เกลือหลอมเหลว



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "ผลของการเติมสารเจือต่อสมบัติของเซรามิกแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ที่
เตรียมโดยวิธีเกลือหลอมเหลว"

ของ ธนวรรณ วงศ์รักรัก

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัตน์ดิพร สำอางค์)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุช วรวงคณากุล)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชจิรา ดีแจ๋ง)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	ผลของการเติมสารเจือต่อสมบัติของเซรามิกแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ที่เตรียมโดยวิธีเกลือหลอมเหลว
ผู้วิจัย	ธนวรรณ วงศรีรัก
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุช วรางคณากุล
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. ฟิสิกส์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	เซรามิก CLCTO, เซรามิก CCYO, เซรามิก CCTZO, วิธีเกลือหลอมเหลว

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติของเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ ได้แก่ $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12+x/2}$ (CLCTO) แปรค่า $x = 0.05-0.1$ โดยโมล $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Y}_x\text{O}_{12-x/2}$ (CCTYO) และ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Zr}_x\text{O}_{12-x/2}$ (CCTZO) แปรค่า $x = 0.01-0.05$ โดยโมล ที่สังเคราะห์ผงผลึกด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว เฝ้าแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ $1050-1080^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบหาความหนาแน่นโดยใช้วิธีอาร์คิมิดีส ตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกโดยการทำให้ด้วยกาวเงินและใช้เครื่อง LCZ ต่อพ่วงกับคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลอัตโนมัติ ใช้ความถี่ในการวัด 1, 10, 100, 500 และ 1000 kHz และแปรค่าอุณหภูมิในการวัด $35-450^\circ\text{C}$ ตรวจสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาค และหาค่าความต้านทานต่อรอยแยก พบว่าเซรามิกทั้งหมดมีโครงสร้างเฟสเป็นแบบคิวบิกเพอรอฟสไกด์ สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน หมายเลข 75-2188 เกรนของเซรามิกทั้งหมดมีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงเหลี่ยม ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาซินเตอร์มากขึ้น และเซรามิกทั้งหมดมีความหนาแน่นสูงสุดเมื่อเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิกที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C มีค่าค่อนข้างคงที่ ณ ช่วงอุณหภูมิในการวัดที่ $35-150^\circ\text{C}$ แต่เมื่อความถี่ในการวัดสูงขึ้นจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง ณ อุณหภูมิห้องที่ความถี่ 1 kHz เซรามิก $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12+x/2}$ ($x = 0.07$), $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Y}_x\text{O}_{12-x/2}$ ($x = 0.01$) และ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Zr}_x\text{O}_{12-x/2}$ ($x = 0.01$) มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุดเท่ากันอยู่ที่ 0.04 และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 8067, 13940 และ 12902 ตามลำดับ เซรามิกในแต่ละเงื่อนไข มีค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบบิกเกอร์ ใกล้เคียงกันในช่วง 8-11 GPa และจากค่าความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิกทั้งหมด มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ $1.32-2.68 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$



Title	EFFECT OF ADDITIVES ON PROPERTIES OF CCTO CERAMICS PREPARED BY MOLTEN SALT METHOD
Author	THANAWAN WONGSRIRAK
Advisor	Assistant Professor Chompoonuch Warangkanagool, Ph.D.
Academic Paper	M.S. Thesis in Applied Physics, Naresuan University, 2021
Keywords	CLCTO ceramic CCTYO ceramic CCTZO ceramic Molten salt method

ABSTRACT

In this research, study effect of additives on properties of CCTO ceramics namely $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12+x/2}$ (CLCTO) various $x = 0.05-0.1$ by mol, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Y}_x\text{O}_{12-x/2}$ (CCTYO) and $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Zr}_x\text{O}_{12-x/2}$ (CCTZO) were various $x = 0.01-0.05$ by mol, these powders were synthesis with molten salt method. All powders were calcined at 800°C for 8 hours and sintered at $1050-1080^\circ\text{C}$ for 8 hours. The phase structure was examined by X-ray diffraction technique (XRD) and the microstructure was examined by scanning electron microscope (SEM). The density was measured by Archimedes method. For dielectric property measurement, silver electrodes were pasted on the samples and then subjected to an automated dielectric system measurement controlled by LCZ meter with a computer, measured at 1, 10, 100, 500 and 1000 kHz and various measurement temperature at $35-450^\circ\text{C}$. The mechanical property was examined by micro-hardness and then the fracture toughness was calculated. It was found that, All XRD patterns of all ceramics display a cubic perovskite structure. These patterns could be matched with a JCPDS file number 75-2188. The microstructures of all ceramics were rather rectangular appearance, and the average grains size was increased with increasing sintering temperature. The highest density of all ceramic was found at 1050°C with sintering temperature. The dielectric constant and dielectric loss of all ceramics sintered at 1050°C were found quite stable at $35-150^\circ\text{C}$ but the dielectric constant was decreased with increased the frequency measurement. The dielectric constant of $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12+x/2}$ ($x = 0.07$), $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Y}_x\text{O}_{12-x/2}$ ($x = 0.01$) and $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Zr}_x\text{O}_{12-x/2}$ ($x = 0.01$) at room

temperature with 1 kHz frequency were found 8067, 13940 and 12902, respectively and their dielectric loss was 0.04 of all samples. The Vickers micro-hardness of all ceramics was close to each other in ranges 8-11 GPa and the fracture toughness was close together approximately $1.32\text{-}2.68 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.



ประกาศคุณูปการ

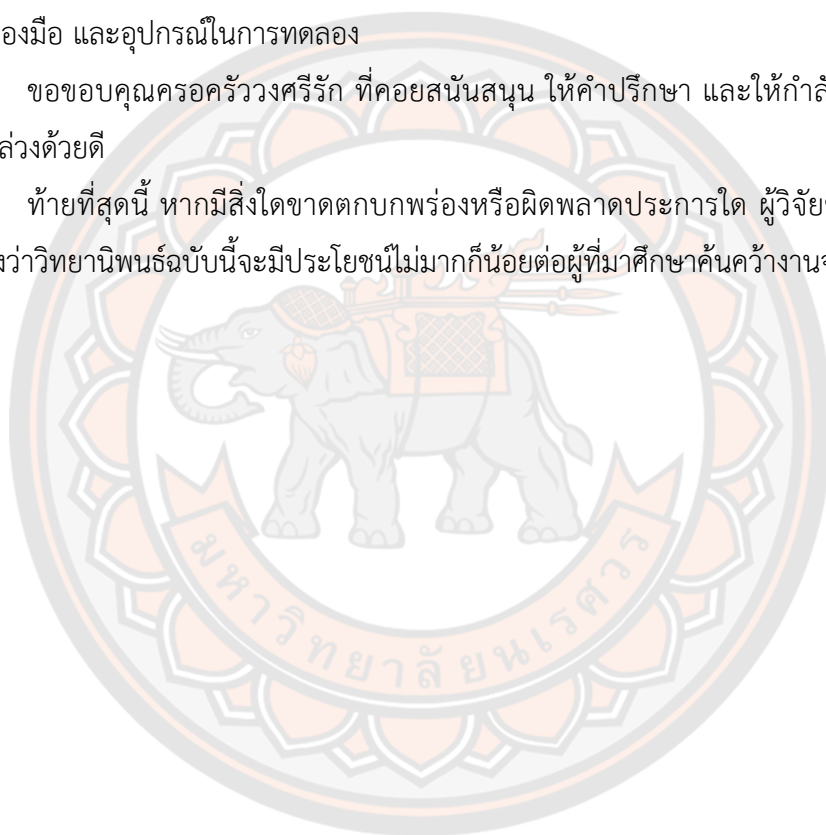
วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุช วรางคณากุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคณะกรรมการทุกท่าน ที่กรุณาให้ความรู้และคำปรึกษา ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่อำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอขอบคุณครอบครัววงศ์รั้ง ที่คอยสนับสนุน ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจในการศึกษาจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอภัยเป็นอย่างสูง และหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ไม่มากนักน้อยต่อผู้ที่มาศึกษาค้นคว้างานจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ธนวรรณ วงศ์รั้ง

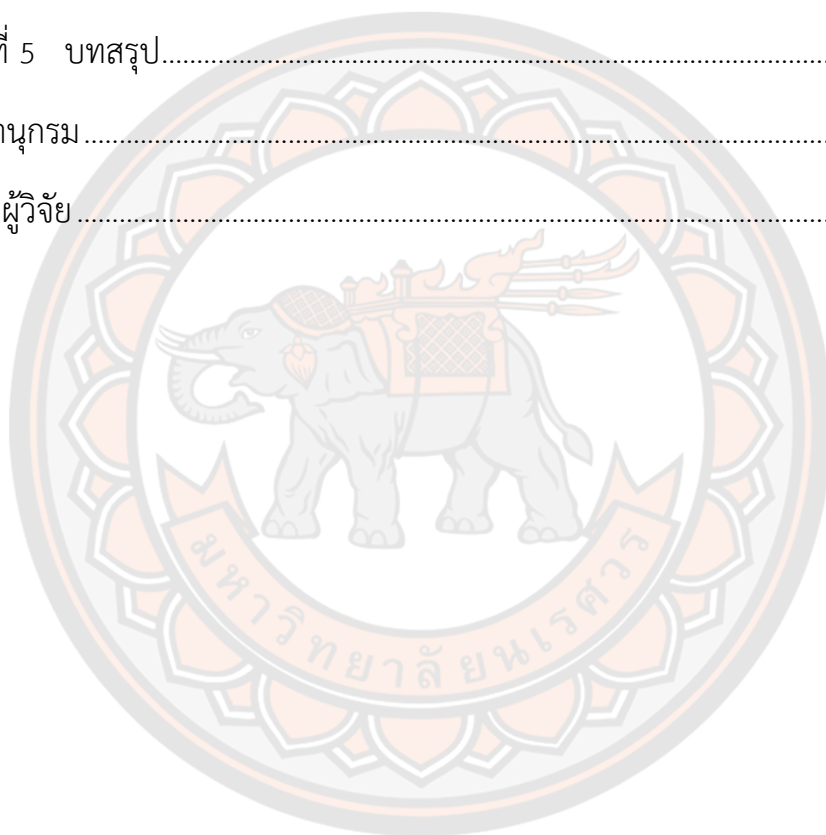


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศศุญประกอบการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	4
สมบัติไพโซอิเล็กทริก.....	4
สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก.....	5
การซินเตอร์.....	7
สมบัติเชิงกล.....	8
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	18

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	18
อุปกรณ์การทดลอง.....	19
วิธีการทดลอง	20
การตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD).....	27
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	28
การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของสมบัติเซรามิก.....	29
การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก.....	30
การตรวจสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์และแบบนูน.....	31
บทที่ 4 ผลการวิจัย	33
ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของผงผลึก CLCTO CCTYO และ CCTZO ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	33
ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	38
ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	41
ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	47
ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO	69
ผลการตรวจสอบร้อยละของน้ำหนัที่สูญเสีของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO	73
ผลการตรวจสอบร้อยละการหดตัวของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO	77
ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO	81

ผลการตรวจสอบค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO.....	93
ผลการตรวจสอบค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนูและผลการตรวจสอบค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CLCTO,CCTYO และ CCTZO.....	111
ผลการตรวจสอบความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO	118
บทที่ 5 บทสรุป.....	122
บรรณานุกรม.....	124
ประวัติผู้วิจัย.....	127



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO เพาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	34
ตาราง 2 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO เพาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	36
ตาราง 3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO เพาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	39
ตาราง 4 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	48
ตาราง 5 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	51
ตาราง 6 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	53
ตาราง 7 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	54
ตาราง 8 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	56
ตาราง 9 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.03$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	58
ตาราง 10 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	60

ตาราง 11 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	61
ตาราง 12 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	63
ตาราง 13 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	65
ตาราง 14 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล ที่ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	67
ตาราง 15 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	68
ตาราง 16 ความหนาแน่นของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	69
ตาราง 17 ความหนาแน่นของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล ที่เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	71
ตาราง 18 ความหนาแน่นของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	72
ตาราง 19 ร้อยละของน้ำหนัที่สูญเสีของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	73
ตาราง 20 ร้อยละของน้ำหนัที่สูญเสีของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล ที่เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	74
ตาราง 21 ร้อยละของน้ำหนัที่สูญเสีของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล ที่เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	75
ตาราง 22 ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	77

ตาราง 23 ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ๓ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	78
ตาราง 24 ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ๓ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	79
ตาราง 25 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ๓ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	94
ตาราง 26 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.07$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ๓ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	96
ตาราง 27 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.1$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ๓ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	98
ตาราง 28 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ๓ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	100
ตาราง 29 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ๓ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	102
ตาราง 30 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ๓ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	104
ตาราง 31 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ๓ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	106

ตาราง 32 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	108
ตาราง 33 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	110
ตาราง 34 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนูป โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	111
ตาราง 35 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนูป โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	112
ตาราง 36 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนูป โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	113
ตาราง 37 ค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	115
ตาราง 38 ค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	116
ตาราง 39 ค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	117
ตาราง 40 ค่าความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	118
ตาราง 41 ค่าความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	119

ตาราง 42 ค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล
 เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง 120



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 การเปลี่ยนแปลงทิศทางโพลาริเซชัน [5]	4
ภาพ 2 (ก) ภาพจำลอง electric dipoles ในวัสดุ piezoelectric (ข) การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกกดอัด และ (ค) การเปลี่ยนแปลงของขนาดเมื่อวัสดุถูกใส่ความต่างศักย์เข้าไป [7].....	5
ภาพ 3 ตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนาน [7]	6
ภาพ 4 แผนภาพเวกเตอร์ loss tangent [9]	7
ภาพ 5 สภาวะการหลอมตัวของเซรามิกขณะผ่านกระบวนการซินเตอร์ (ก) และ (ข) อนุภาคเกิดพันธะซึ่งกันและกันและกันและเกิดคอคอด และ (ค) ภาพคอคอดที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างอนุภาคเซรามิก [8]	8
ภาพ 6 หัวกดการทดสอบความแข็ง (ก) แบบวิกเกอร์ และ (ข) แบบนูนูป [8].....	9
ภาพ 7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก CCTO ที่ใช้เกลือผสม (ก) NaCl-KCl เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 750-1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ (ข) Na ₂ SO ₄ -K ₂ SO ₄ เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 850-1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [2].....	11
ภาพ 8 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก CCTO ที่ใช้เกลือผสม (ก) NaCl-KCl และ (ข) Na ₂ SO ₄ -K ₂ SO ₄ เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [2].....	11
ภาพ 9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTO ที่ใช้เกลือผสม (ก) NaCl-KCl และ (ข) Na ₂ SO ₄ -K ₂ SO ₄ เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1060°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง [2].....	12
ภาพ 10 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซรามิก CCTO ที่ใช้เกลือผสม (ก) NaCl-KCl และ (ข) Na ₂ SO ₄ -K ₂ SO ₄ เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [2].....	12

ภาพ 11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTO, CCTZO, CCTYO และ CCTYZO [3]14

ภาพ 12 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซรามิก (ก) CCTO, (ข) CCTZO, (ค) CCTYO และ (ง) CCTYZO [3]14

ภาพ 13 สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTO, CCTZO, CCTYO และ CCTYZO ณ อุณหภูมิห้อง ที่ความถี่ช่วง 10^2 - 10^6 Hz เมื่อ (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และ (ข) การสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) [3]15

ภาพ 14 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTO และ CCTO ที่เจือด้วย La_2O_3 ในปริมาณ 3, 6 และ 9 mol% [4]16

ภาพ 15 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของเซรามิก CCTO และ CCTO ที่เจือด้วย La_2O_3 ในปริมาณ 3, 6 และ 9 mol% [4]16

ภาพ 16 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซรามิก CCTO ที่เติมปริมาณ La_2O_3 (ก) 0, (ข) 3, (ค) 6 และ (ง) 9 mol% [4]17

ภาพ 17 สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTO ที่เจือด้วย La_2O_3 ในปริมาณ 3, 6 และ 9 mol% วัด ณ อุณหภูมิห้อง ที่ความถี่ช่วง 10^{-1} - 10^8 Hz เมื่อ (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ') และ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) [4]17

ภาพ 18 เตอบไฟฟ้า ยี่ห้อ Leisure รุ่น HW-805821

ภาพ 19 เครื่องชั่งสารความละเอียด 0.0001 กรัม ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PA 214 ประเทศสหรัฐอเมริกา22

ภาพ 20 แท่นหมุนพร้อมมอเตอร์สำหรับหมุนกระป๋อง เพื่อบดย่อยผสมสารแบบ Ball milling22

ภาพ 21 เตาแผ่นให้ความร้อนแบบมีเครื่องคนสารด้วยแม่เหล็ก23

ภาพ 22 กระบวนการเผาแคลไซน์ โดย T_C คือ อุณหภูมิเผาแคลไซน์ และ T_R คือ อุณหภูมิห้อง23

ภาพ 23 เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง ผลิตโดยบริษัท ซิวโซติ จำกัด ประเทศไทย.....	24
ภาพ 24 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ด้วยวิธีเกลือ หลอมเหลว.....	24
ภาพ 25 เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก ยี่ห้อ ENERPAC รุ่น P77 ความดันสูงสุด 700 bar/10000 psi บริษัท Enerpac ประเทศไทย.....	25
ภาพ 26 การวางชิ้นงานเซรามิกในการเผาซินเตอร์.....	26
ภาพ 27 กระบวนการเผาซินเตอร์ โดย T_s คือ อุณหภูมิซินเตอร์ และ T_R คือ อุณหภูมิห้อง	26
ภาพ 28 แผนผังขั้นตอนการเตรียมเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO.....	27
ภาพ 29 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก CLCTO เมื่อแปร $La_2O_3=0.05-0.1$, CCTYO เมื่อแปร $Y_2O_3=0.01-0.05$ และ CCTZO เมื่อแปร $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เเผาแคล ไซน์ ณ อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	33
ภาพ 30 ร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก CLCTO เมื่อแปร $La_2O_3=0.05-0.1$, CCTYO เมื่อ แปร $Y_2O_3=0.01-0.05$ และ CCTZO เมื่อแปร $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เเผาแคลไซน์ ณ อุณ ภูมิ $800^{\circ}C$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	35
ภาพ 31 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของผงผลึก CLCTO เมื่อแปร $La_2O_3=0.05-0.1$, CCTYO เมื่อ แปร $Y_2O_3=0.01-0.05$ และ CCTZO เมื่อแปร $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เเผาแคลไซน์ ณ อุณ ภูมิ $800^{\circ}C$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	36
ภาพ 32 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก CLCTO เมื่อแปร $La_2O_3=$ (ก) 0.05 (ข) 0.07 (ค) 0.1, CCTYO เมื่อแปร $Y_2O_3=$ (ง) 0.01 (จ) 0.03 (ฉ) 0.05 และ CCTZO เมื่อแปร $ZrO_2=$ (ช) 0.01 (ซ) 0.03 (ฌ) 0.05 โดยโมล เเผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	38
ภาพ 33 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$, CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ และ CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เเผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	39

ภาพ 34 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล
 เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง41

ภาพ 35 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล
 เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง42

ภาพ 36 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล
 เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง42

ภาพ 37 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01$ โดยโมล
 เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง43

ภาพ 38 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.03$ โดยโมล
 เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง44

ภาพ 39 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล
 เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง44

ภาพ 40 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $\text{ZrO}_2=0.01$ โดยโมล
 เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง45

ภาพ 41 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $\text{ZrO}_2=0.03$ โดยโมล
 เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง45

ภาพ 42 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $\text{ZrO}_2=0.05$ โดยโมล
 เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง46

ภาพ 43 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหัก
 ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข)
 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง47

ภาพ 44 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ
 อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง49

ภาพ 45 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	49
ภาพ 46 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	51
ภาพ 47 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	52
ภาพ 48 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	53
ภาพ 49 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	54
ภาพ 50 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	55
ภาพ 51 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	56
ภาพ 52 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.03$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	57
ภาพ 53 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.03$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	58
ภาพ 54 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	59

ภาพ 55 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	60
ภาพ 56 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	61
ภาพ 57 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	62
ภาพ 58 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	63
ภาพ 59 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	64
ภาพ 60 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	65
ภาพ 61 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	66
ภาพ 62 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	67
ภาพ 63 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	69
ภาพ 64 ความหนาแน่นของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	70
ภาพ 65 ความหนาแน่นของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	71

ภาพ 66 ความหนาแน่นของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	72
ภาพ 67 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	74
ภาพ 68 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	75
ภาพ 69 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	76
ภาพ 70 ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	78
ภาพ 71 ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	79
ภาพ 72 ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	80
ภาพ 73 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	81
ภาพ 74 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	81
ภาพ 75 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.07$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	82

ภาพ 76 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	82
ภาพ 77 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	83
ภาพ 78 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	83
ภาพ 79 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	85
ภาพ 80 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	85
ภาพ 81 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.03$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	86
ภาพ 82 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.03$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	86
ภาพ 83 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	87

ภาพ 84 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	87
ภาพ 85 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	89
ภาพ 86 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	89
ภาพ 87 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	90
ภาพ 88 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	90
ภาพ 89 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	91
ภาพ 90 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	91
ภาพ 91 รูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่าของรอยกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้โหลด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	93

ภาพ 92 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง94

ภาพ 93 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.07$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....95

ภาพ 94 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.07$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง96

ภาพ 95 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....97

ภาพ 96 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง98

ภาพ 97 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....99

ภาพ 98 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง 100

ภาพ 99 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง..... 101

ภาพ 100 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล ซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	102
ภาพ 101 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	103
ภาพ 102 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	104
ภาพ 103 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	105
ภาพ 104 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	106
ภาพ 105 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	107
ภาพ 106 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	108
ภาพ 107 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	109

ภาพ 108 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	110
ภาพ 109 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนूप โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	112
ภาพ 110 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนूप โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	113
ภาพ 111 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนूप โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	114
ภาพ 112 ค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	115
ภาพ 113 ค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	116
ภาพ 114 ค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	117
ภาพ 115 ค่าความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	119
ภาพ 116 ค่าความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	120
ภาพ 117 ค่าความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	121

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว โดยมีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น ซึ่งสมบัติทางด้านไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญที่สุด ที่ส่งผลให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานได้ดีขึ้น เช่น นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น มีความจุไฟฟ้าสูงขึ้น เป็นต้น การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกและวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากนำไปประยุกต์และพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ เช่น ตัวเก็บประจุ (capacitor) สิ่งประดิษฐ์ความจำ (memory devices) เป็นต้น [1]

วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงถูกนำมาใช้งานในด้านเทคโนโลยีกันอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น BaTiO_3 (BT) และ $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) แต่เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเป็นอย่างมาก จึงเป็นข้อจำกัดในการพัฒนา นอกจากนี้วัสดุ PZT ยังมีตะกั่วเป็นองค์ประกอบอีกด้วย ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าตะกั่วหนักนั้นเป็นสารพิษ [1] ภายหลังได้มีการค้นพบวัสดุ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) ซึ่งเป็นสารพีโซอิเล็กทริกโดยได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากไม่มีสารตะกั่วเป็นองค์ประกอบ และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงประมาณ 10^4 ณ อุณหภูมิ 100-500 K จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มากมาย ตัวอย่างเช่น ตัวเก็บประจุ, ระบบการหาตำแหน่งทั่วโลก (global positioning system) และตัวกรอง (filters) เป็นต้น [2] แต่เนื่องจาก CCTO มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูง ทำให้เมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานต้องเติมสารเจือเพิ่มเข้าไป เพื่อปรับปรุงสมบัติไดอิเล็กทริกให้ดีขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เป็น La_2O_3 , Y_2O_3 , และ ZrO_2 จากการศึกษาผลงานวิจัยอื่นพบว่าเมื่อเจือสารทั้ง 3 ตัวดังกล่าว เข้าไปในเซรามิก CCTO แล้วพบว่าช่วยปรับปรุงให้สมบัติของไดอิเล็กทริกดีขึ้น [1, 3-4]

อย่างไรก็ตาม กระบวนการสังเคราะห์สารก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการผลิตวัสดุไดอิเล็กทริก กระบวนการสังเคราะห์สารนั้น มีหลากหลายวิธีมาก วิธีการที่เทียบเคียงกับในทางอุตสาหกรรม คือ วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เป็นวิธีการที่สามารถสังเคราะห์สารได้คราวละปริมาณมากๆ แต่ใช้อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สูง กระบวนการดังกล่าวจะช่วยลดอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ลง จึงกล่าวได้ว่า เตรียมสารแบบวิธีเกลือหลอมเหลวเป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อกระบวนการเตรียมสารไดอิเล็กทริก โดยเป็นการเพิ่มขั้นตอนอีกขั้นตอนหนึ่งในวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก

ส่งผลให้วิธีเกลือหลอมเหลวได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากใช้อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ต่ำกว่าวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง [2]

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลของการเติมสารเจือ ซึ่งได้แก่ La_2O_3 , Y_2O_3 , และ ZrO_2 ที่มีต่อสมบัติของเซรามิก CCTO ที่เตรียมโดยวิธีเกลือหลอมเหลว โดยแปรค่าสารเจือ $\text{La}_2\text{O}_3 = 0.05-0.1$, $\text{Y}_2\text{O}_3 = 0.01-0.05$, และ $\text{ZrO}_2 = 0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ และตรวจสอบสมบัติของเซรามิก

จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการเตรียมผงผลึกและเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 , และ ZrO_2 ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างเฟสและโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกและเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 , และ ZrO_2
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 , และ ZrO_2

ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมผงผลึก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 , และ ZrO_2 ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว โดยแปรค่า $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$, $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ และ $\text{ZrO}_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน $5^\circ\text{C}/\text{นาท}$
2. เตรียมเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2 ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว โดยแปรค่า $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$, $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ และ $\text{ZrO}_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน $5^\circ\text{C}/\text{นาท}$
3. ตรวจสอบโครงสร้างเฟสและโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกและเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 , และ ZrO_2 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตามลำดับ
4. ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 , และ ZrO_2

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมผงผลึกและเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2 ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว
2. สามารถวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของผงผลึกและเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)
3. สามารถวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผงผลึกและเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
4. ทราบถึงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2

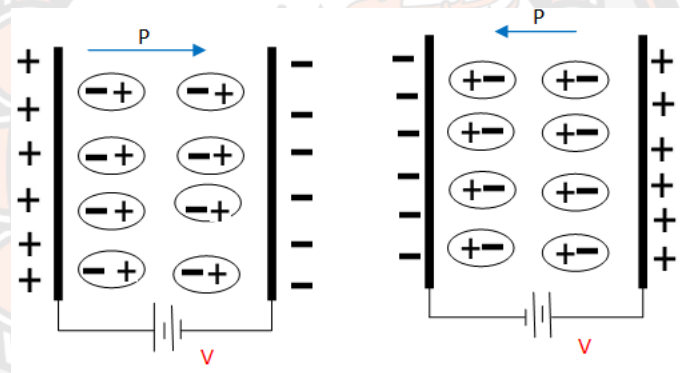


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกค้นพบครั้งแรกใน rochelle salt โดย Valasek ในปี ค.ศ.1921 เป็นวัสดุที่สามารถเกิดโพลาไรเซชันได้เอง [5] ในวัสดุนั้นขั้วไฟฟ้ามีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน ถึงแม้จะไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงมีการจัดเรียงในทิศทางเดียวกันและวัสดุสามารถกลับทิศ โดยการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปได้ ดังแสดงในภาพ 1 โดยสนามไฟฟ้านั้นจะต้องไม่มีค่าสูงไปกว่า dielectric breakdown ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด ก่อนที่วัสดุนั้นจะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า (electrical conductor) [6]

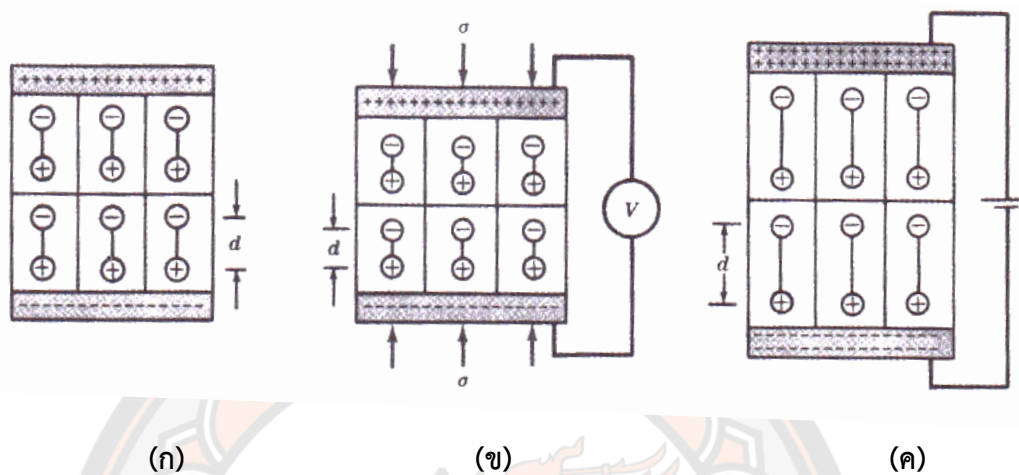


ภาพ 1 การเปลี่ยนแปลงทิศทางโพลาไรเซชัน [5]

สมบัติพิโซอิเล็กทริก

เมื่อพิจารณาตัวอย่างของวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งมีค่าไดโพลโมเมนต์เนื่องจากการจัดเรียงตัวของไดโพลหน่วยเล็กๆ หลายๆ หน่วย ดังภาพ 2(ก) ที่ด้านหนึ่งของวัสดุจะมีประจุบวกและอีกด้านหนึ่งจะมีประจุลบ เมื่อวัสดุถูกกดอัดด้วยแรง ดังแสดงในภาพ 2(ข) แรงกดอัดจะลดระยะห่างระหว่างไดโพล ซึ่งจะมีผลทำให้ไดโพลโมเมนต์ของวัสดุทั้งหมดลดลง การเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ของวัสดุนี้จะมีผลทำให้ความหนาแน่นของประจุและความแตกต่างของศักย์ที่ปลายทั้งสองด้านเกิดการเปลี่ยนแปลง ที่มีประจุตรงกันข้าม ถ้ามีการใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุ ความหนาแน่นของประจุที่ปลายทั้งสองจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น และมีผลทำให้ขนาดของวัสดุมีขนาดยืดยาวมากขึ้น ดังแสดงในภาพ 2(ค) การยืดตัวของวัสดุเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณประจุบวกซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดขั้วลบของไดโพล และเกิดในลักษณะกลับกันที่อีกด้านหนึ่งของวัสดุ [7]

ผลของ piezoelectric เป็นผลทาง electromechanical ของวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแรงทางกลไปเป็นกระแสไฟฟ้า หรือในทางตรงกันข้ามคือ สามารถเปลี่ยนแรงทางไฟฟ้าไปเป็นแรงทางกลได้ [7]

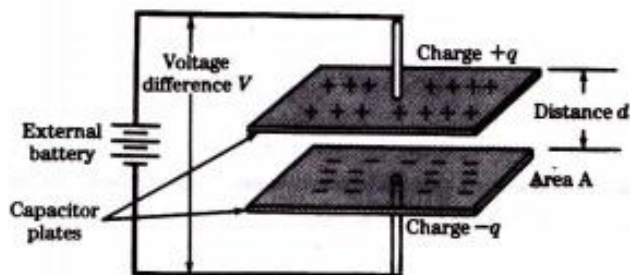


ภาพ 2 (ก) ภาพจำลอง electric dipoles ในวัสดุ piezoelectric (ข) การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกกดอัด และ (ค) การเปลี่ยนแปลงของขนาดเมื่อวัสดุถูกใส่ความต่างศักย์เข้าไป [7]

สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก

เซรามิกปกติแล้วจะเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและมีความนำไฟฟ้าต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากพันธะโคเวเลนต์หรือไอออนิกที่แข็งแรง อย่างไรก็ตาม มีเซรามิกบางประเภทที่นำไฟฟ้าได้ดี เช่น แกรไฟต์ หรือซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่นำไฟฟ้าได้ ขณะเดียวกันก็มีความต้านทานไฟฟ้าในตัวเองที่สูงจึงถูกนำมาใช้เป็นตัวให้ความร้อนแบบความต้านทาน [8] มีวัสดุเซรามิกหลายชนิดที่ถูกใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าทั้งต่ำและสูง และยังได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดต่างๆ ที่มีขนาดเล็ก [7]

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) หรือความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุ เป็นการวัดความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้าของวัสดุ พลังงานที่ถูกเก็บสะสมไว้ในตัวเก็บประจุยิ่งมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดความต่างศักย์มาก สามารถนำไปใช้ผลิตเป็นตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็กๆ ได้ ถ้าวัสดุมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง [8] พิจารณาตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนานที่ประกอบด้วยแผ่นโลหะที่มีพื้นที่ A และแยกห่างกันเป็นระยะ d ดังแสดงในภาพ 3



ภาพ 3 ตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนาน [7]

ในกรณีที่ช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะเป็นสุญญากาศ เมื่อใส่ความต่างศักย์ V ให้กับแผ่นโลหะที่แผ่นโลหะแผ่นหนึ่งจะมีประจุสุทธิเป็น $+q$ และอีกแผ่นหนึ่งจะเป็น $-q$ ค่าประจุ q จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์ V ดังนี้คือ

$$q = CV \text{ หรือ } C = \frac{q}{V} \quad (1)$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ หน่วยเป็น คูลอมบ์/โวลต์ (C/V) หรือ ฟารัด (F)

ค่าความจุของตัวเก็บประจุเป็นค่าวัดความสามารถในการเก็บประจุทางไฟฟ้า กล่าวคือ ถ้าค่าความจุมีค่าสูงประจุที่ถูกเก็บไว้ในแผ่นโลหะก็จะมากด้วย ค่าความจุ C จะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของแผ่นโลหะและระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ ดังนี้

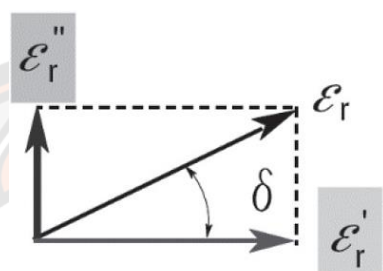
$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ permittivity ของ free space = 8.854×10^{-12} F/m

ถ้าช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะถูกใส่ด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก ค่าความจุของตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยตัวคูณ K ซึ่งเรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของวัสดุไดอิเล็กทริก ดังสมการ (3)

$$C = \frac{K\epsilon_0 A}{d} \quad (3)$$

ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss factor) โดยปกติ ถ้าความต่างศักย์ที่ใช้ในการรักษาประจุบนตัวเก็บประจุจะมีรูปร่างสัญญาณเป็นลักษณะ sinusoidal เช่น ความต่างศักย์จากไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสไฟฟ้าจะอยู่นำหน้าความต่างศักย์ 90° เสมอ เมื่อไม่มีการสูญเสียพลังงานระหว่างแผ่นโลหะ แต่โดยความเป็นจริงแล้วกระแสไฟฟ้าจะนำหน้าความต่างศักย์ $90^\circ - \delta$ ซึ่ง δ คือ dielectric loss angle และผลคูณของ $K \tan \delta$ คือ loss factor ซึ่งเป็นค่าปริมาณที่บอกถึงพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อนของตัวเก็บประจุในวงจรกระแสไฟฟ้าสลับ [7]



ภาพ 4 แผนภาพเวกเตอร์ loss tangent [9]

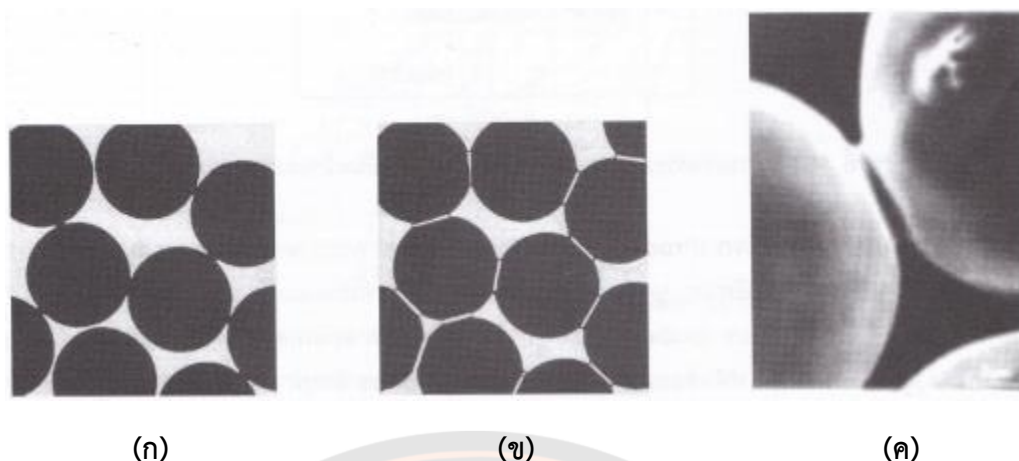
เมื่อ ϵ_r คือ สภาวะยอมสัมพัทธ์เชิงซ้อน (complex relative permittivity)

ϵ_r'' คือ ตัวประกอบการสูญเสียของไดอิเล็กทริก (dielectric loss factor)

ϵ_r' คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (dielectric constant)

การซินเตอร์

การเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ตัวประสานเกิดการหลอมตัวและเชื่อมประสานกันซึ่งเรียกว่าซินเตอร์ (sintering) และทำให้อนุภาคของผงเซรามิกยึดเหนี่ยวกันได้ การเผาในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้ผิวของอนุภาคเซรามิกเกิดการหลอมเหลวและประสานยึดเหนี่ยวกับอนุภาคอื่นๆ หรือเกิดการซินเตอร์ อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาวะเฟสของเหลว (liquid phase sintering) และสภาวะเฟสของแข็ง (solid phase sintering) ขั้นตอนการเกิดซินเตอร์ในเฟสของแข็ง ดังแสดงในภาพ 5 โดยเริ่มจากผงเซรามิกที่มีผิวสัมผัสกันได้รับความร้อนและเริ่มต้นเกิดพันธะซึ่งกันและกัน ดังแสดงในภาพ 5(ก)-(ข) ช่วงนี้จะทำให้เกิดคอคอด (neck) ระหว่างอนุภาคเซรามิก ดังภาพ 5(ค) [8]



ภาพ 5 สถานะการหลอมตัวของเซรามิกขณะผ่านกระบวนการซินเตอร์ (ก) และ (ข) อนุภาคเกิดพันธะซึ่งกันและกันและเกิดคอคอด และ (ค) ภาพคอคอดที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างอนุภาคเซรามิก [8]

สมบัติเชิงกล

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ จะใช้หัวกดทดสอบรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งทำมาจากเพชรกดลงไปบนชิ้นงาน การทดสอบวิธีนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีลักษณะอ่อนไปจนถึงแข็งมาก โดยมีขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการนำชิ้นงานสำหรับทดสอบวางบนแท่นรองรับ แล้วกดเลือกแรงที่ต้องการทดสอบ จากนั้นให้หัวกดทำงาน โดยหัวกดจะเริ่มเคลื่อนที่กดลงบนผิวชิ้นงานช้าๆ เพื่อป้องกันการไม่ให้เกิดการกระแทกขณะกด และปล่อยระยะเวลากดตามต้องการ เมื่อได้ระยะเวลาในการกดตามที่ต้องการแล้ว ทำการวัดขนาดรอยบุ๋มของชิ้นงานที่ถูกกด โดยวัดขนาดเส้นทแยงทั้ง 2 ด้านของรอยบุ๋มที่ปรากฏบนจอภาพ แล้วหาค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความแข็งแบบหัวกดวิกเกอร์จากสมการ (4) [8, 10-11]

$$HV = (1.854) \frac{F}{d^2} \quad (4)$$

เมื่อ HV คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ หน่วยเป็น จิกะปาสคาล (GPa)

F คือ แรงหรือน้ำหนักกด หน่วยเป็น นิวตัน (N)

d คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมรอยกด หน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm)

การทดสอบความแข็งแบบนूप (Knoop hardness test)

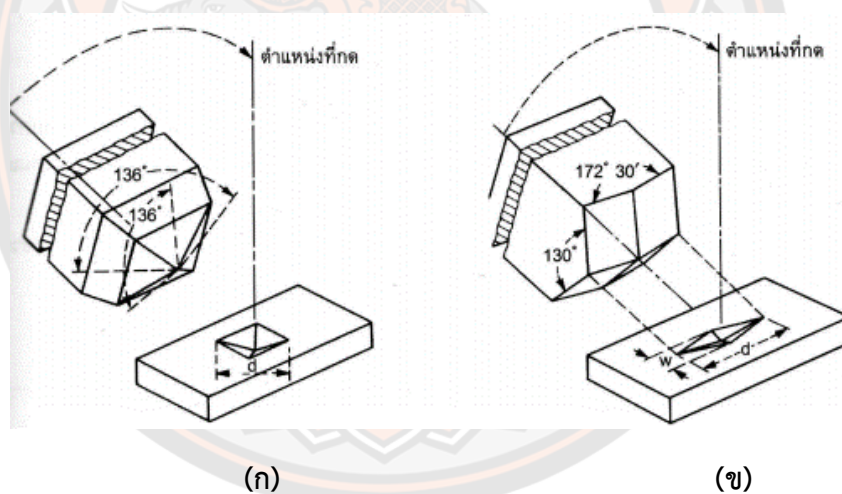
การทดสอบความแข็งแบบนूप จะมีวิธีทดสอบคล้ายกับแบบวิกเกอร์แต่หัวกดที่ใช้จะมีลักษณะเรียวยาวกว่า จึงสร้างรอยกดที่มีความยาวของเส้นทแยงมุมได้มากกว่า ทำให้สามารถเห็นภาพรอยกดได้อย่างชัดเจนแม้ใช้แรงกดต่ำ เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับการทดสอบวัสดุที่เปราะแตกง่าย เช่น แก้ว เซรามิก สามารถคำนวณหาค่าความแข็งแบบหัวกดนूपได้จากสมการ (5) [8, 10-11]

$$HK = (14.229) \frac{F}{d^2} \quad (5)$$

เมื่อ HK คือ ค่าความแข็งแบบนूप หน่วยเป็น จิกะปาสคาล (GPa)

F คือ แรงหรือน้ำหนักกด หน่วยเป็น นิวตัน (N)

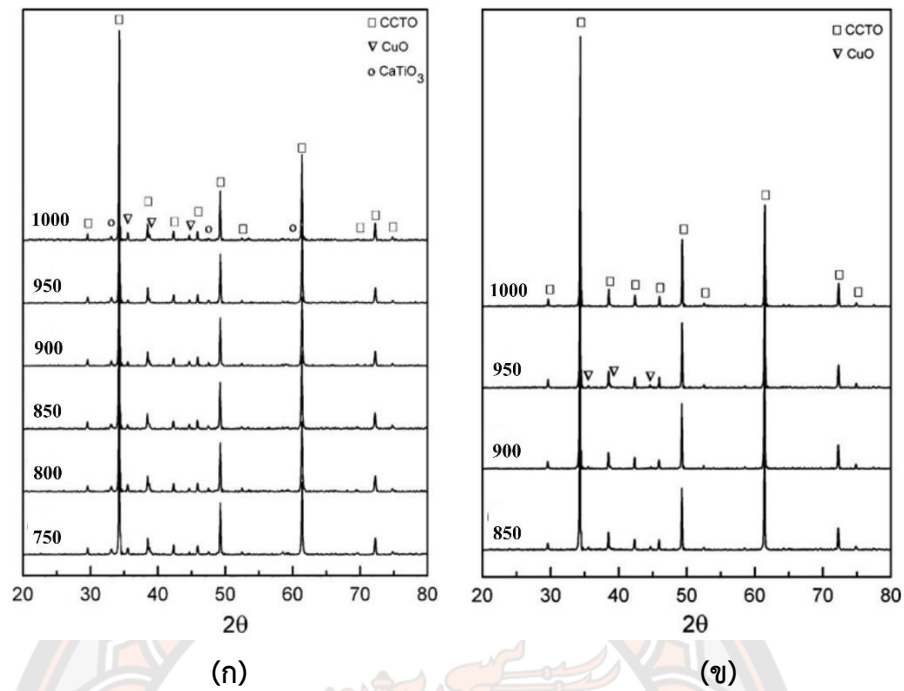
d คือ ความยาวของรอยกดตามแนวยาว หน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm)



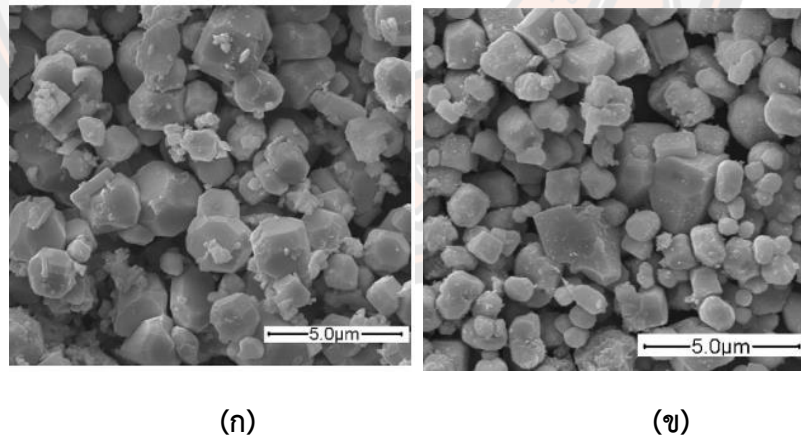
ภาพ 6 หัวกดการทดสอบความแข็ง (ก) แบบวิกเกอร์ และ (ข) แบบนूप [8]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

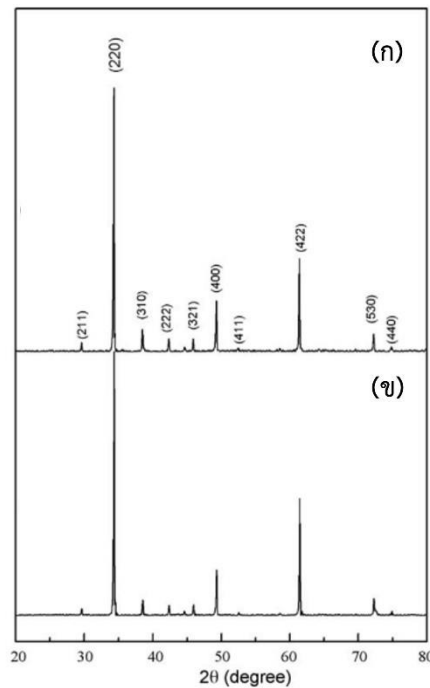
ในปี ค.ศ.2010 Chen และ Zhang [2] ได้ศึกษาการสังเคราะห์เซรามิก CCTO ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว โดยใช้เกลือผสมเป็น NaCl-KCl และ $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4$ เมาแคลไซต์ ณ อุณหภูมิ 750-1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ 850-1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามลำดับ เมาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1060°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการตรวจสอบโครงสร้างเฟสพบว่า ผงผลึกจากทั้ง 2 เจริญโพรมตัวเป็น CCTO ในทุกๆ อุณหภูมิ แต่ผงผลึกที่ใช้เกลือผสมเป็น NaCl-KCl พบว่ามีเฟสของ CuO และ CaTiO_3 เกิดขึ้น แม้จะเพิ่มอุณหภูมิเมาแคลไซต์ให้เพิ่มสูงขึ้นถึง 1000°C ก็ยังพบทั้ง 2 เฟสนี้อยู่ ดังภาพ 7(ก) นั้นแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเมาแคลไซต์ตั้งแต่ช่วง 750-1000°C ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของผงผลึกน้อยมาก ในขณะที่ผงผลึก CCTO ที่ใช้เกลือผสมเป็น $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4$ พบว่าโพรมตัวเป็น CCTO ในทุกๆ อุณหภูมิเช่นเดียวกับตัวที่ใช้เกลือผสม NaCl-KCl แต่ ณ อุณหภูมิเมาแคลไซต์ 850°C พบว่ายังมีเฟสของ CuO เกิดขึ้น แม้จะเพิ่มอุณหภูมิเป็น 950°C แต่ก็ยังพบเฟสนี้หลงเหลืออยู่ แต่จะพบว่าเฟสนี้หายไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเป็น 1000°C ดังภาพ 7(ข) ซึ่งจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงผลึก CCTO ที่ใช้เกลือผสม NaCl-KCl พบว่าผงผลึกมีรูปร่างเป็นทรงเหลี่ยมหลายหน้า ดังภาพ 8(ก) ซึ่งต่างกับผงผลึก CCTO ที่ใช้เกลือผสม $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4$ เล็กน้อย โดยตัวที่ใช้เกลือผสมเป็น $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4$ จะมีลักษณะของอนุภาคเป็นทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลม ดังภาพ 8(ข) และนำเซรามิกทั้ง 2 เจริญไปตรวจสอบโครงสร้างเฟส พบว่าเซรามิกดังกล่าวมีโครงสร้างแบบคิวบิกเฟสเดียวของ CCTO ดังภาพ 9 และเซรามิกทั้ง 2 เจริญมีลักษณะเกรนแบบละเอียด (fine grain) โดยตัวที่ใช้เกลือผสม NaCl-KCl มีขนาดเกรนประมาณ 5 μm ดังภาพ 10(ก) ขณะที่ตัวที่ใช้เกลือผสม $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4$ มีขนาดประมาณ 7 μm ดังภาพ 10(ข)



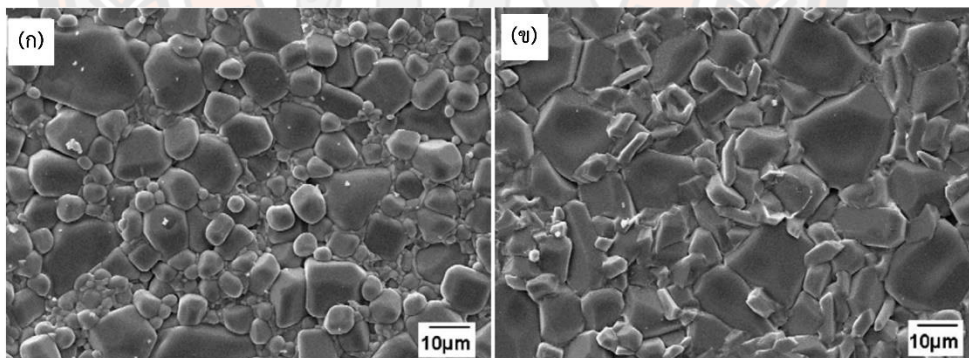
ภาพ 7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก CCTO ที่ใช้เกลือผสม (ก) NaCl-KCl เพลาคัลไซน์ที่อุณหภูมิ 750-1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ (ข) Na₂SO₄-K₂SO₄ เพลาคัลไซน์ที่อุณหภูมิ 850-1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [2]



ภาพ 8 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก CCTO ที่ใช้เกลือผสม (ก) NaCl-KCl และ (ข) Na₂SO₄-K₂SO₄ เพลาคัลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [2]

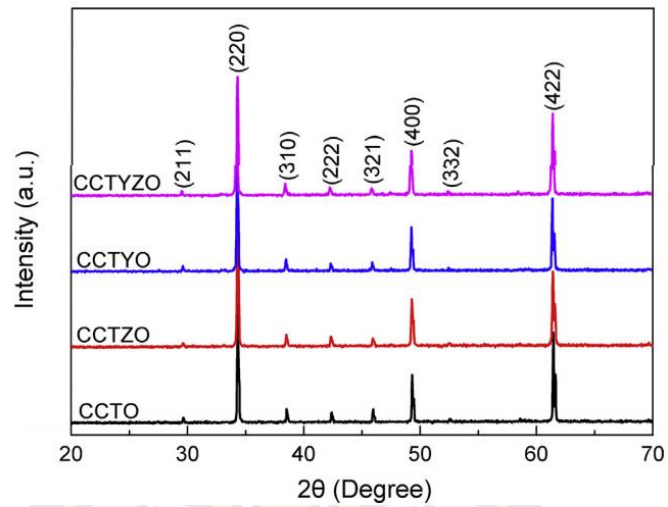


ภาพ 9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTO ที่ใช้เกลือผสม (ก) NaCl-KCl และ (ข) $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4$ เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1060°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง [2]

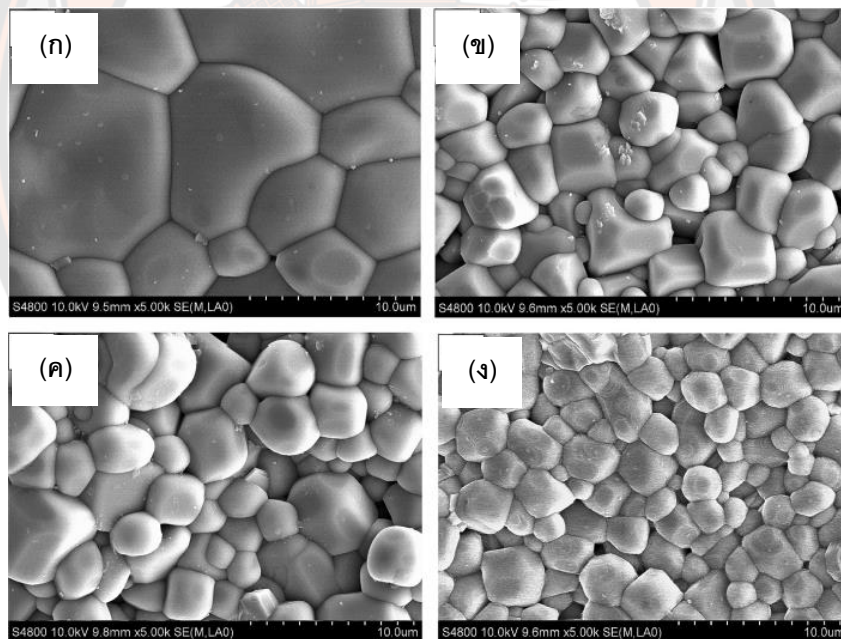


ภาพ 10 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซรามิก CCTO ที่ใช้เกลือผสม (ก) NaCl-KCl และ (ข) $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4$ เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [2]

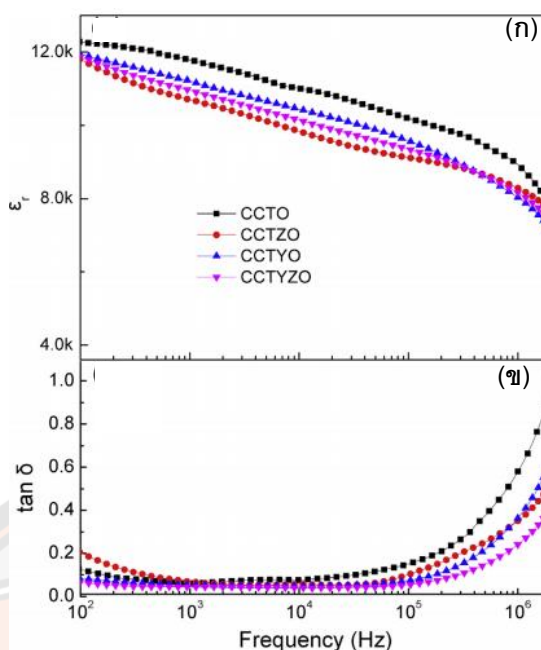
ในปี ค.ศ. 2017 Xu และคณะ [3] ได้ศึกษาการเตรียมเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{3.95}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{12}$, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{3.97}\text{Y}_{0.03}\text{O}_{11.985}$ และ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{3.92}\text{Y}_{0.03}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{11.985}$ ทั้งหมดเขียนสัญลักษณ์แทนเป็น CCTO, CCTZO, CCTYO และ CCTYZO ตามลำดับ ด้วยวิธีการเผาไหม้ เเผาแคลไซน์และซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าในทุกเงื่อนไข เซรามิกมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกเพอโรฟสไกต์ (cubic perovskite) โดยไม่พบเฟสแปลกปลอม ดังภาพ 11 ซึ่งจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่า เซรามิก CCTO มีขนาดเกรนใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับเซรามิก CCTZO, CCTYO และ CCTYZO โดยมีขนาดเกรนอยู่ที่ 3.5-15 μm ดังภาพ 12(ก) แต่เมื่อทำการเจือด้วย Y_2O_3 และ ZrO_2 พบว่าเกรนมีขนาดเล็กลง ซึ่งเซรามิกทั้ง 2 เงื่อนไขดังกล่าว มีขนาดเกรนเฉลี่ยใกล้เคียงกัน โดยมีขนาดประมาณ 1.8-5.5 μm และ 1.8-4.5 μm ตามลำดับ ดังภาพ 12(ข)-(ค) ส่วนเซรามิก CCTYZO มีขนาดเกรนเล็กที่สุด ซึ่งมีขนาดเล็กลงเป็นมากเมื่อเทียบกับเซรามิก CCTO มีขนาดประมาณ 1.3-3.5 μm ดังแสดงในภาพ 12(ง) การเข้าไปแทนที่ของ Zr^{4+} และ Y^{3+} ไม่เพียงแต่ช่วยให้ลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคดีขึ้น แต่ยังช่วยให้สมบัติไดอิเล็กทริกดีขึ้นได้อีกด้วย ซึ่งจากผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกนั้นพบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO, CCTYO และ CCTYZO ลดลงอย่างเล็กน้อย เมื่อเทียบกับเซรามิก CCTO ดังภาพ 13(ก) ถึงแม้ว่าจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเล็กน้อย แต่พบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีสมบัติที่ดีขึ้น โดยมีการสูญเสียไดอิเล็กทริกน้อยกว่าเซรามิก CCTO ซึ่งเซรามิก CCTYZO มีการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำถึง 0.039 เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 10 kHz แต่เซรามิก CCTO มีการสูญเสียไดอิเล็กทริกมากกว่า 0.061 เมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 2 MHz และมีการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงมาอยู่ที่ 0.061 เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 kHz ในขณะที่ทำการวัด ณ ช่วงความถี่ 200 Hz ถึง 60 kHz มีการสูญเสียไดอิเล็กทริกน้อยกว่า 0.05 ดังภาพ 13(ข)



ภาพ 11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTO, CCTZO, CCTYO และ CCTYZO [3]

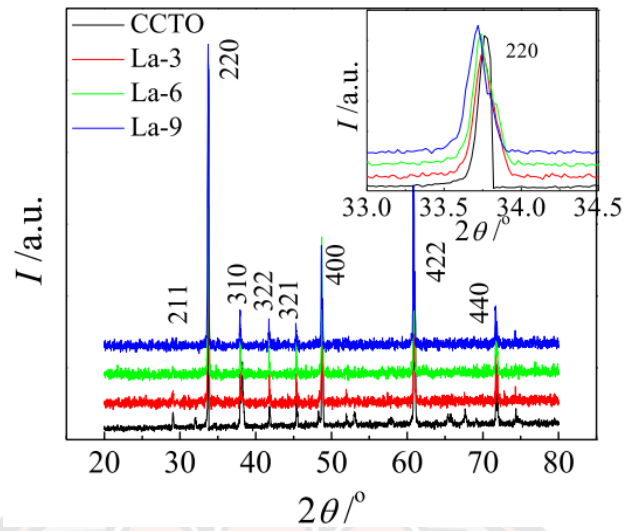


ภาพ 12 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซรามิก (ก) CCTO, (ข) CCTZO, (ค) CCTYO และ (ง) CCTYZO [3]

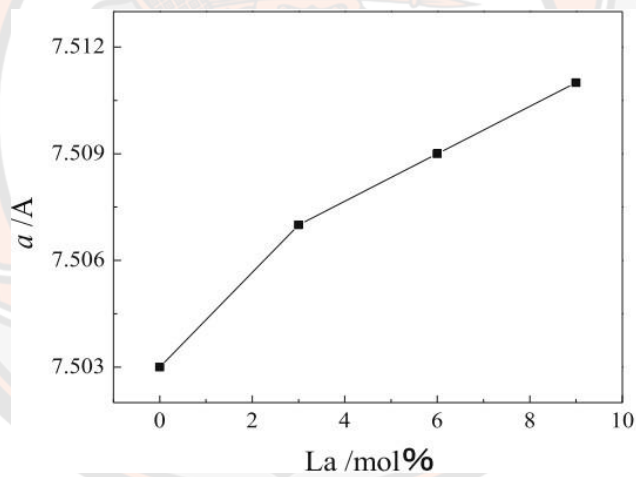


ภาพ 13 สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTO, CCTZO, CCTYO และ CCTYZO ณ อุณหภูมิห้อง ที่ความถี่ช่วง 10^2 - 10^6 Hz เมื่อ (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และ (ข) การสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) [3]

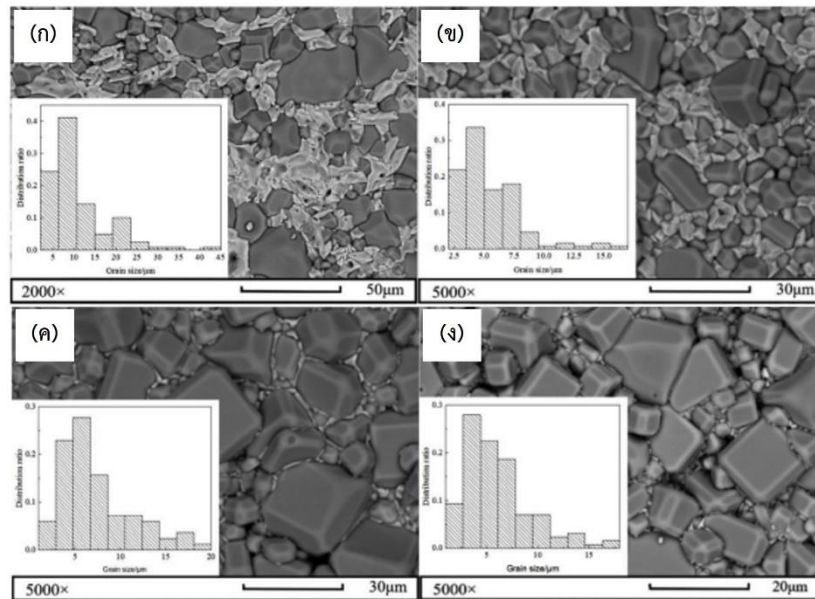
ในปี ค.ศ. 2019 Cheng และคณะ [4] ได้ศึกษาการเตรียมเซรามิก $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ แปรค่า x หรือ La_2O_3 เท่ากับ 0, 3, 6 และ 9 mol% แทนด้วยสัญลักษณ์ CCTO, La-3, La-6 และ La-9 ตามลำดับ ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เผาแคลไซน์และซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และ 1050°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า ในทุกๆ เงื่อนไขเซรามิกมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกเพอรอฟสไกต์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ดังภาพ 14 และเมื่อนำไปหาค่าแลคทิจพารามิเตอร์จากสมการของแบรกก์ จะได้ว่าแนวโน้มของค่าแลคทิจพารามิเตอร์ของเซรามิกจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือของ La_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ดังภาพ 15 โดยเซรามิกที่มีการเจือด้วย La_2O_3 ทั้งหมดนั้นพบว่า มีขนาดเกรนเล็กลงเมื่อเทียบกับเซรามิก CCTO ดังภาพ 16 โดยเซรามิก La-6 ส่วนมากจะมีขนาดเกรนอยู่ที่ 2-9 μm และเซรามิกในทุกๆ เงื่อนไขมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความถี่ในการวัดสูงขึ้น โดยเฉพาะในช่วงความถี่การวัด 10^3 Hz และลดลงอย่างรวดเร็วที่ 10^6 Hz ดังภาพ 17(ก) และเซรามิกทุกตัวที่เจือด้วย La_2O_3 จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าเซรามิก CCTO โดยในช่วงความถี่กลางๆ ที่ใช้วัดนั้นพบว่าเซรามิก CCTO มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ที่ 0.2 แต่เมื่อเจือด้วย La_2O_3 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงมาเป็น 0.05 ดังแสดงในภาพ 17(ข)



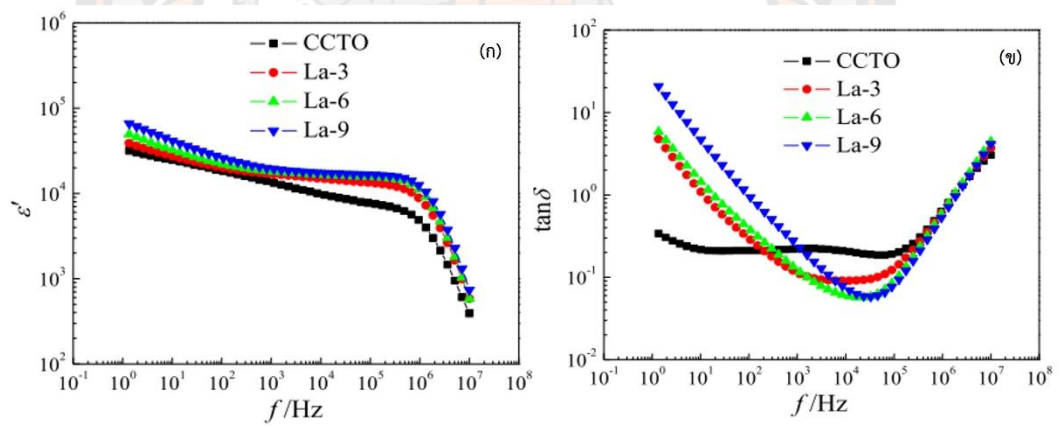
ภาพ 14 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTO และ CCTO ที่เจือด้วย La₂O₃ ในปริมาณ 3, 6 และ 9 mol% [4]



ภาพ 15 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของเซรามิก CCTO และ CCTO ที่เจือด้วย La₂O₃ ในปริมาณ 3, 6 และ 9 mol% [4]



ภาพ 16 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซรามิก CCTO ที่เติมปริมาณ La_2O_3 (ก) 0, (ข) 3, (ค) 6 และ (ง) 9 mol% [4]



ภาพ 17 สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTO ที่เจือด้วย La_2O_3 ในปริมาณ 3, 6 และ 9 mol% วัด ณ อุณหภูมิห้อง ที่ความถี่ช่วง 10^{-1} - 10^8 Hz เมื่อ (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ') และ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) [4]

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ความบริสุทธิ์ 98% ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ความบริสุทธิ์ 99+% ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ความบริสุทธิ์ $\geq 99\%$ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. แลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.99% ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.99% ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) ความบริสุทธิ์ 99% ผลิตโดยบริษัท Riedel-de Haën ประเทศเยอรมนี
7. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความบริสุทธิ์ $\geq 99.5\%$ ผลิตโดยบริษัท Merck Group ประเทศเยอรมนี
8. โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความบริสุทธิ์ $\geq 99.5\%$ ผลิตโดยบริษัท Merck Group ประเทศเยอรมนี
9. ซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ความบริสุทธิ์ 99.8% ผลิตโดยบริษัท Quality Reagent Chemical ประเทศนิวซีแลนด์
10. เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) ความบริสุทธิ์ 99.8% ผลิตโดย องค์การสุรา กรมสรรพสามิต
11. ผงอลูมินา (Al_2O_3) ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศเยอรมนี
12. PVA (polyvinyl alcohol) ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมนี
13. กาวเงิน (silver paste)
14. น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

อุปกรณ์การทดลอง

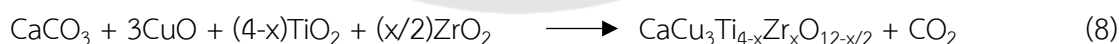
1. กระจกพลาสติกที่ใช้ผสมสาร
2. เครื่องชั่งสารแบบดิจิตอล ความละเอียด 0.0001 ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PA 214 ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. ช้อนตักสาร
4. ลูกบดอิตเทีย-เซอร์โคเนีย
5. แท่นหมุนพร้อมมอเตอร์สำหรับหมุนกระป๋องเพื่อบดย่อยผสมสารแบบ ball-milling
6. ปีกเกอร์
7. ตะแกรงสำหรับร่อนสารเพื่อคัดขนาดและกรองล้างสารออกจากลูกบดอิตเทีย-เซอร์โคเนีย
8. กระจกฟอยล์
9. แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร
10. เตาแผ่นให้ความร้อนสำหรับกวนสาร
11. ตู้อบความร้อนสำหรับอบสาร
12. ครกหยกสำหรับบดสาร
13. ถ้วยอะลูมินาพร้อมฝาปิด
14. เตาเผาอุณหภูมิสูง ผลิตโดยบริษัท ซวโชติ จำกัด
15. แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm
16. เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก ยี่ห้อ ENERPAC รุ่น P77 ความดันสูงสุด 700 bar/10000 psi บริษัท Enerpac ประเทศอินเดีย
17. กระจกทรายเบอร์ 360, 600 และ 1200
18. กระจกขัด DP-Pan บริษัท Struers ประเทศเนเธอร์แลนด์
19. ผงขัดเพชรสเปย์ขนาดอนุภาค 1 และ 3 μm บริษัท Kemet International ประเทศเนเธอร์แลนด์
20. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ CD800a รุ่น M920 ประเทศไทย
21. ดิจิตอลเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ยี่ห้อ CORAL ประเทศญี่ปุ่น
22. กระจกสไลด์
23. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ผลิตโดยบริษัท Carl Zeiss ยี่ห้อ Carl Zeiss Microscopy ประเทศเยอรมนี

24. กล้องดิจิทัลต่อเลนส์ตา (Digital camera for eyepiece) รุ่น Axiocam 105 color บริษัท Carl Zeiss ประเทศเยอรมนี ต่อพ่วงกับคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Zeiss Zen core V3.1
25. เครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาค (microhardness tester) ยี่ห้อ Jinan Testin Equipment IE Corporation รุ่น HV-1000 หัวกดแบบวิกเกอร์ (Vickers) และหัวกดแบบนूप (Knoop)
26. เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (x-ray diffractometer) ผลิตโดยบริษัท Bruker AXS GmbH รุ่น D2phaser ประเทศเยอรมนี
27. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) รุ่น LEO 1455VP บริษัท JOEL ประเทศอังกฤษ

วิธีการทดลอง

1. กระบวนการเตรียมผงผลึก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2 ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว

นำสารตั้งต้น ซึ่งได้แก่ CaCO_3 , CuO , TiO_2 , La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2 นำไปอบในเตาอบไฟฟ้า ดังภาพ 18 ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำสารตั้งต้นมาชั่งด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม ดังภาพ 19 ตามสัดส่วนปริมาณสารสัมพันธ์ที่คำนวณได้จากสมการ (6) (7) และ (8)



ในงานวิจัยนี้จะใช้สัญลักษณ์แทน $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12+x/2}$ ว่า CLCTO, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Y}_x\text{O}_{12-x/2}$ ว่า CCTYO และ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Zr}_x\text{O}_{12-x/2}$ ว่า CCTZO

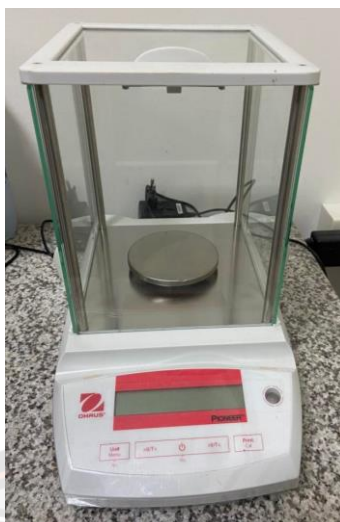
นำสารตั้งต้นที่ชั่งได้ใส่ในขวดพลาสติก ซึ่งภายในขวดบรรจุลูกบดอิตเทีย-เซอร์โคเนีย จากนั้นเติมแอลกอฮอล์ความบริสุทธิ์ 99.8% ลงไปเพื่อเป็นการช่วยหล่อลื่น ปิดฝาขวดให้สนิทแล้วนำไปวางบนแท่นหมุนของเครื่องบดย่อยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังภาพ 20 เพื่อบดผสม จากนั้นนำสารที่ได้มาทำแห้งโดยใช้เตาแผ่นให้ความร้อน ตามภาพ 21 และนำมาคัดขนาดโดยร่อนผ่านตะแกรง สารที่ได้จะเรียกว่า ผงผสม

เตรียมเกลือผสมโดยนำ NaCl และ KCl ไปอบในเตาอบไฟฟ้าที่ 100°C ดังภาพ 18 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น นำมาชั่งให้ได้สัดส่วนเป็น 1:1 โดยโมล จากนั้นนำมาบดผสมกันในครกหยกบดสาร แล้วนำไปผสมกับผงผสมที่ได้มาก่อนหน้านี้ โดยมีสัดส่วนเป็น 1:1 โดยน้ำหนัก และนำมาใส่ถ้วยอะลูมินาปิดฝา แล้วเผาแคลไซน์ตามกระบวนการเผาดังภาพ 22 ด้วยเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง ดังภาพ 23 ที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที่ โดยผงที่ได้นี้ จะได้เป็นผงผลึก CCTO ที่เจือด้วย La₂O₃, Y₂O₃ และ ZrO₂ หรือเรียกสั้นๆ ว่า ผงผลึก CLCTO CCTYO และ CCTZO ตามลำดับ

จากนั้นนำผงผลึกดังกล่าวข้างต้นมาล้างเกลือออกด้วยน้ำร้อนที่ปราศจากไอออน โดยทดสอบเกลือด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต และทำแห้งอีกครั้ง นำผงผลึกที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างเฟสและโครงสร้างจุลภาค ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตามลำดับ ภาพ 24 แสดงแผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึกดังกล่าวข้างต้น



ภาพ 18 เตาอบไฟฟ้า ยี่ห้อ Leisure รุ่น HW-8058



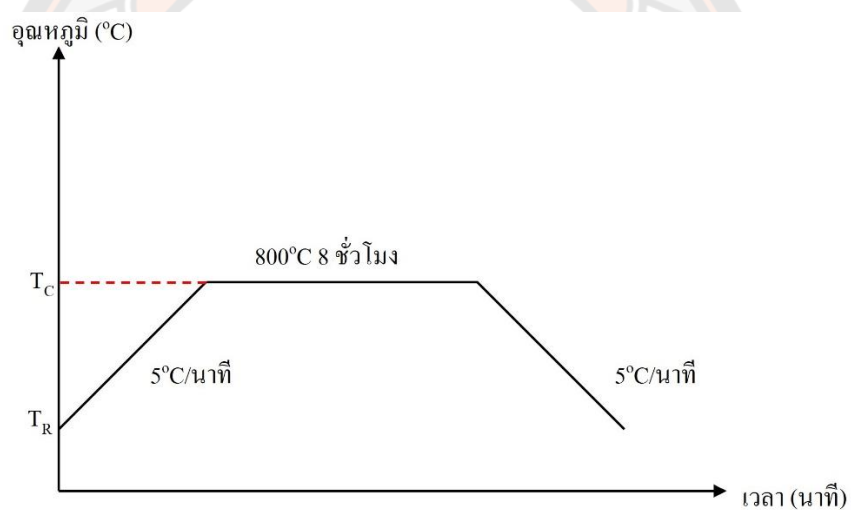
ภาพ 19 เครื่องชั่งสารความละเอียด 0.0001 กรัม ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PA 214 ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพ 20 แท่นหมุนพร้อมมอเตอร์สำหรับหมุนกระป๋อง เพื่อบดย่อยผสมสารแบบ Ball milling



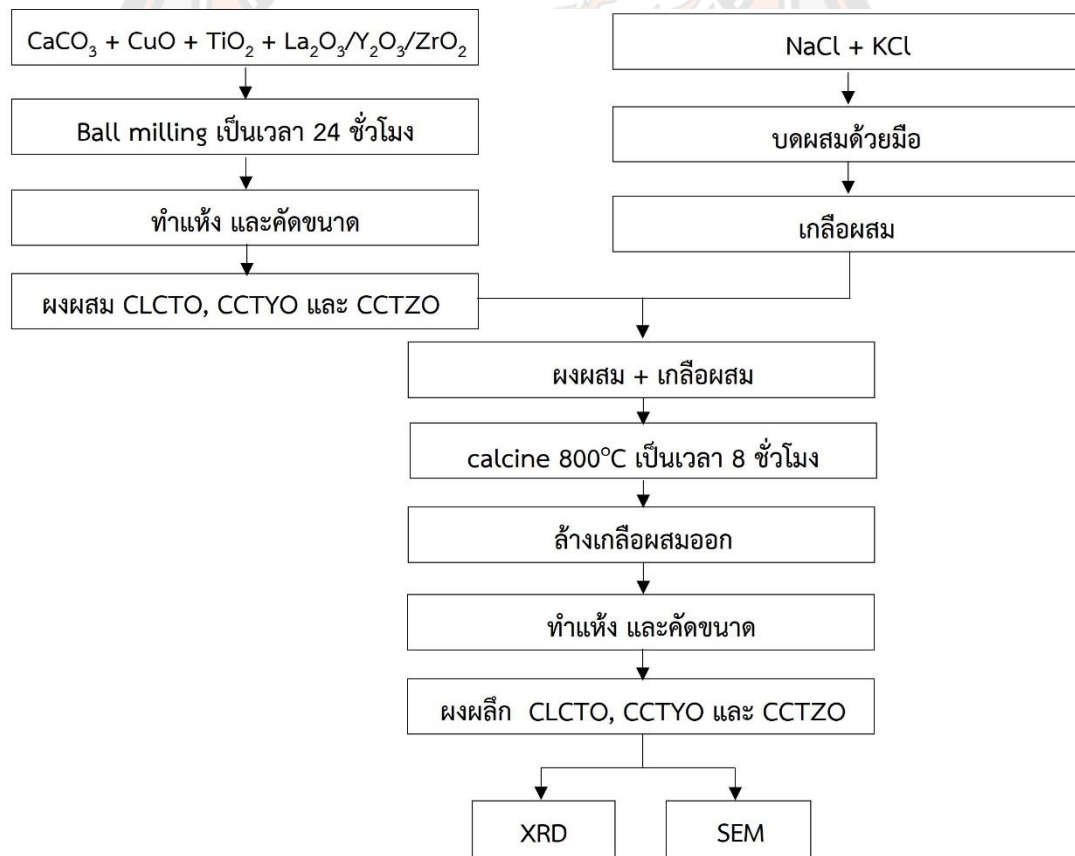
ภาพ 21 เตาแผ่นให้ความร้อนแบบมีเครื่องคนสารด้วยแม่เหล็ก



ภาพ 22 กระบวนการเผาแคลไซน์ โดย T_C คือ อุณหภูมิเผาแคลไซน์ และ T_R คือ อุณหภูมิห้อง



ภาพ 23 เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง ผลิตโดยบริษัท ชวโชติ จำกัด ประเทศไทย



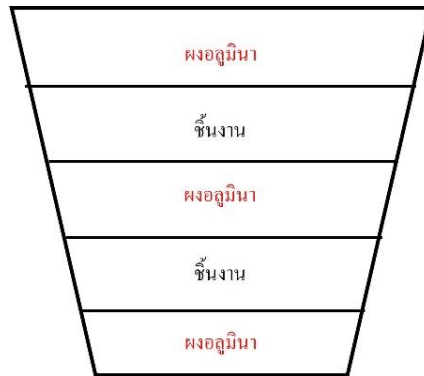
ภาพ 24 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว

2. กระบวนการเตรียมเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2

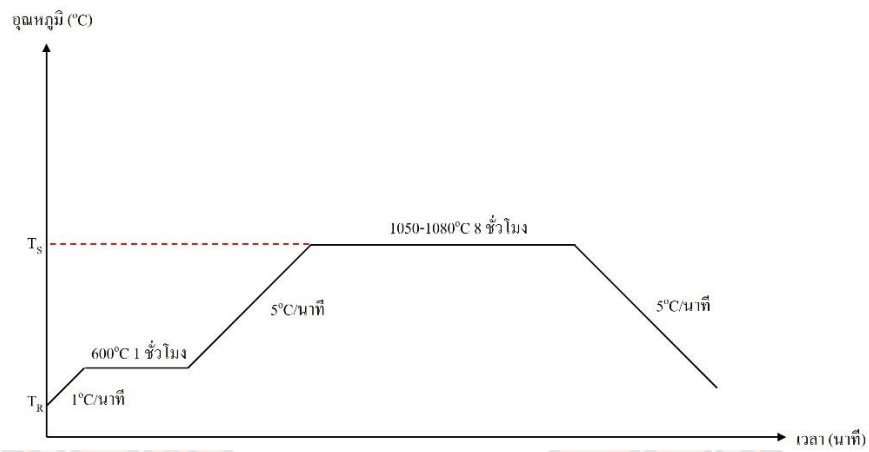
นำผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ที่ผ่านการเผาแคลไซน์และล้างเกลือออกแล้วมาผสมกับสารละลาย PVA (Polyvinyl alcohol) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารยึดเหนี่ยว โดยมีสัดส่วนเป็นผงผลึก 1 กรัมต่อ PVA 1 หยด นำไปผสมเปียกเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำแห้งและคัดขนาด นำไปอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์โลหะที่เป็นแผ่นกลม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 mm และหนาประมาณ 1-2 mm ด้วยเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก ดังภาพ 25 ใช้ความดันประมาณ 40 bar เป็นเวลา 30 วินาที เมื่อได้ชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว นำมาวางใส่ถ้วยซิลิโคนที่มีฝาปิดโดยมีการวางชิ้นงานดังภาพ 26 นำไปให้ความร้อนด้วยเตาเผาไฟฟ้า อุณหภูมิสูง ดังภาพ 23 เพื่อเผาไล่ PVA โดยให้ความร้อนที่ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราการให้ความร้อน $1^\circ\text{C}/\text{นาท}$ จากนั้นนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน $5^\circ\text{C}/\text{นาท}$ ชั่วโมง ตามกระบวนการเผาซินเตอร์ดังภาพ 27 และจะได้ออกมาเป็นเซรามิก CCTO ที่เติมสารเจือ La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2 สามารถเรียกสั้นๆ ได้ว่า เซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO จากนั้นนำเซรามิกที่ได้ไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก แล้วทำให้แห้ง และนำไปวิเคราะห์ตรวจสอบสมบัติต่างๆ ของเซรามิก ถ้านำขั้นตอนการเตรียมเซรามิกดังกล่าวข้างต้นมาเขียนในรูปแบบของแผนผังจะได้ดังภาพ 28



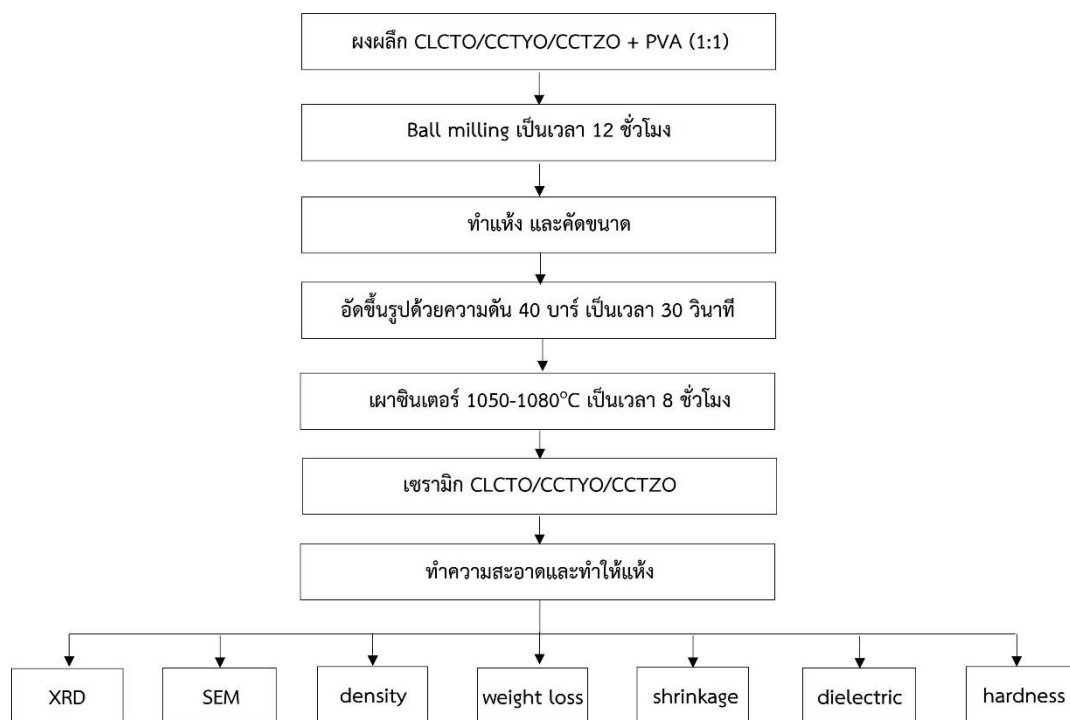
ภาพ 25 เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก ยี่ห้อ ENERPAC รุ่น P77 ความดันสูงสุด 700 bar/10000 psi บริษัท Enerpac ประเทศอินเดีย



ภาพ 26 การวางชั้นงานเซรามิกในการเผาซินเตอร์



ภาพ 27 กระบวนการเผาซินเตอร์ โดย T_S คือ อุณหภูมิซินเตอร์ และ T_R คือ อุณหภูมิห้อง



ภาพ 28 แผนผังขั้นตอนการเตรียมเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการตกกระทบของรังสีเอกซ์บนผิววัสดุแล้วเกิดการกระเจิง (scattering) และเลี้ยวเบน โดยมีมุมในการเลี้ยวเบนแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึก และระนาบ (hkl) ที่รังสีตกกระทบภายในวัสดุ โดยที่รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุแต่ละชนิดนั้นก็จะมีเฉพาะเจาะจงสำหรับวัสดุนั้นๆ ดังนั้น เมื่อนำเครื่องมือสำหรับตรวจวัด (detector) มารองรับรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่างๆ ก็จะสามารถตรวจสอบได้ว่าเป็นวัสดุหรือสารชนิดใด โดยพิจารณาจากข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมของแบรกก์ (bragg's angle) และความเข้มของพีครังสีเอกซ์ของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏ ซึ่งดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่เป็นลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไปจึงสามารถนำรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตรวจสอบได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลของสารชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในงานวิจัยอื่นๆ เพื่อตรวจสอบชนิดของผลึกที่เกิดขึ้นได้ โดยเริ่มจากนำผงหรือชิ้นงานที่เราต้องการตรวจสอบไปวางใส่ในที่บรรจุตัวอย่าง (sample holder) จากนั้นนำไปวางที่บริเวณช่องใส่ชิ้นงานในเครื่อง X-ray Diffractometer แล้วเดินเครื่องโดยใช้เป้าทองแดง ($\text{CuK}\alpha$) ที่ให้รังสีเอกซ์ค่าความยาวคลื่นประมาณ 1.54 \AA ออกมา จากค่ามุม 2θ ตั้งแต่ 20° - 80° [6]

นำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างเฟสไปหาร้อยละความบริสุทธิ์และค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของผลึกได้ ดังสมการ (9) [12] และ (10) [13] ตามลำดับ

$$\text{ร้อยละความบริสุทธิ์ (\%)} = \frac{I_p}{(I_p + I_l)} \times 100 \quad (9)$$

เมื่อ I_p คือ ค่าความเข้มสูงสุดของพีค X-ray ของเฟสหลัก

I_l คือ ความเข้มสูงสุดของพีค X-ray ของเฟสแปลกปลอม

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (10)$$

เมื่อ $h k l$ คือ ระนาบของผลึก

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

a คือ แลตทิซพารามิเตอร์

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อนำข้อมูลมาใช้ประกอบในการอธิบายโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกายภาพของผงผลึกและเซรามิก CLCTO CCTYO และ CCTZO โดยเริ่มจากนำชิ้นงานที่ทำความสะอาดแล้วมาหักเป็นชิ้นๆ นำแต่ละชิ้นติดบนฐานวางสารตัวอย่างด้วยเทปกาวคาร์บอน (carbon tape) โดยจัดผิวหน้า (surface) และรอยหัก (fracture) วางตัวอย่างในแนวที่เหมาะสมต่อการสำรวจด้วยเครื่อง SEM แล้วนำมาเคลือบผิวของชิ้นงานด้วยทองคำ โดยใช้เครื่อง sputtering เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า และนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [6]

การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของสมบัติเซรามิก

การหาความหนาแน่น (density) ของชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมได้ โดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำของอาร์คิมิดีส (archimedes) ที่กล่าวว่า “เมื่อจุ่มของแข็งลงในของเหลวจะมีแรงพยุงเกิดขึ้นบนของแข็ง โดยแรงพยุงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยปริมาตรของของแข็ง” เริ่มที่นำเซรามิกที่ต้องการทราบค่ามาต้มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำแทนที่อากาศภายในชิ้นงาน ทิ้งไว้ให้เย็นในอากาศ จากนั้นนำมาชั่งในน้ำ (W_1) ชั่งขณะเปียก (W_2) และนำไปไปอบในเตาอบไฟฟ้าที่ 100°C ดังภาพ 18 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อนำมาชั่งขณะแห้ง (W_3) แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นจากสมการ (11) ดังนี้ [6]

$$\rho_c = \left(\frac{W_3}{W_2 - W_1} \right) \times \rho_{\text{H}_2\text{O}} \quad (11)$$

เมื่อ ρ_c คือ ค่าความหนาแน่นของเซรามิก หน่วยเป็น กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิขณะทำการทดลอง หน่วยเป็น กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

W_1 คือ น้ำหนักของเซรามิกขณะแห้ง หน่วยเป็น กรัม (g)

W_2 คือ น้ำหนักของเซรามิกขณะเปียก หน่วยเป็น กรัม (g)

W_3 คือ น้ำหนักของเซรามิกขณะชั่งในน้ำ หน่วยเป็น กรัม (g)

การหาร้อยละการหดตัว (percentage shrinkage) นำเซรามิกที่ได้มาตรวจสอบหาค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิกหลังทำการเผาซินเตอร์ในรูปของการหดตัวเชิงเส้น (linear shrinkage) ด้วยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนเผาและหลังเผาซินเตอร์ หลังจากนั้นนำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละการหดตัวของเซรามิก ดังสมการ (12) [6]

$$\text{การหดตัวเชิงเส้น (\%)} = \left(\frac{d_1 - d_2}{d_1} \right) \times 100\% \quad (12)$$

เมื่อ d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเซรามิกก่อนเผาซินเตอร์ หน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเซรามิกหลังเผาซินเตอร์ หน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

การหาลักษณะของน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนัก (weight loss) นำเซรามิกที่ได้มาตรวจสอบหาค่าร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักของเซรามิกหลังทำการเผาซินเตอร์ ด้วยการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานก่อนเผา และหลังเผาซินเตอร์ หลังจากนั้นนำค่าที่ชั่งได้มาคำนวณหาลักษณะน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักของเซรามิก ดังสมการ (13) [14]

$$\text{น้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนัก (\%)} = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100\% \quad (13)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของเซรามิกก่อนเผาซินเตอร์ หน่วยเป็น กรัม (g)

W_2 คือ น้ำหนักของเซรามิกหลังเผาซินเตอร์ หน่วยเป็น กรัม (g)

การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก

เริ่มจากการเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบโดยการขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 360, 600, 1000 และ 1200 เพื่อให้ผิวทั้งสองข้างของเซรามิกอยู่ในระนาบและเรียบสม่ำเสมอ นำชิ้นงานไปทำความสะอาด จากนั้นนำไปอบให้แห้งแล้วจึงเคลือบผิวหน้าของชิ้นงานด้วยกาวเงิน (silver paste) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยอัตราการร้อน $5^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ ทำการตรวจสอบขั้วที่เคลือบว่าติดกันทั่วทั้งแผ่นหรือไม่ด้วยโอมมิเตอร์ นำชิ้นงานที่ได้มาทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง LCZ meter ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าที่ได้นั้นสามารถนำมาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้จากสมการ (14) [6, 15]

$$\epsilon_r = \frac{tC}{\epsilon_0 A} \quad (14)$$

เมื่อ ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงาน

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่าประมาณ $8.854 \times 10^{-15} \text{ F/mm}$
(ฟารัดต่อมิลลิเมตร)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า หน่วยเป็น ฟารัด (F)

t คือ ความหนาของชิ้นงาน หน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน หน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

การตรวจสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์และแบบนूप

เริ่มจากการเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบโดยการขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 360, 600, 1000 และ 1200 เพื่อให้ผิวทั้งสองข้างของเซรามิกอยู่ในระนาบ และนำชิ้นงานด้านที่เรียบสม่ำเสมอไปขัดด้วยผงเพชรที่มีขนาด 1 และ 3 μm เพื่อให้เกิดความเงา จากนั้นนำชิ้นงานไปทำความสะอาดและอบให้แห้ง นำชิ้นงานที่ได้มาทำการวัดค่าความแข็งระดับจุลภาคด้วยเครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาคที่มีหัวกดแบบวิกเกอร์และแบบนूप โดยสามารถคำนวณค่าที่ได้จากสมการ (4) สำหรับหัวกดแบบวิกเกอร์ และสมการ (5) สำหรับหัวกดแบบนूप [8, 10]

นำค่าความแข็งระดับจุลภาคและขนาดรอยกดที่ได้จากหัวกดแบบนूप มาคำนวณด้วยสมการ (15) [16] เพื่อทำการหาค่ามอดูลัสของยังต่อไป

$$E = \frac{\alpha HK}{\left[\left(\frac{b}{a} \right) - \left(\frac{b'}{a'} \right) \right]} \quad (15)$$

เมื่อ E คือ ค่ามอดูลัสของยัง หน่วยเป็น จิกะปาสคาล (GPa)

α คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง สำหรับเซรามิกโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.45 [17-18]

HK คือ ความแข็งระดับจุลภาคในหน่วยของนूप หน่วยเป็น จิกะปาสคาล (GPa)

b/a คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นทแยงมุมของหัวกดด้านสั้นต่อเส้นทแยงมุมของหัวกดด้านยาว

b'/a' คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นทแยงมุมของรอยกดด้านสั้นต่อเส้นทแยงมุมของรอยกดด้านยาว

นำค่าความแข็งระดับจุลภาคและขนาดรอยกุดที่ได้จากหัตถ์แบบวิกเกอร์และค่ามอดูลัสของยังมาคำนวณด้วยสมการ (16) [19] เพื่อทำการหาค่าความต้านการแตกหักแบบเปราะต่อไป

$$K_{Ic} = 0.016 \left(\frac{F}{C^{1.5}} \right) \left(\frac{E}{HV} \right)^{1/2} \quad (16)$$

เมื่อ F คือ แรงหรือน้ำหนักกด หน่วยเป็น นิวตัน (N)

C คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมรอยกุด หน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm)

E คือ ค่ามอดูลัสของยัง หน่วยเป็น จิกะปาสคาล (GPa)

HV คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ หน่วยเป็น จิกะปาสคาล (GPa)



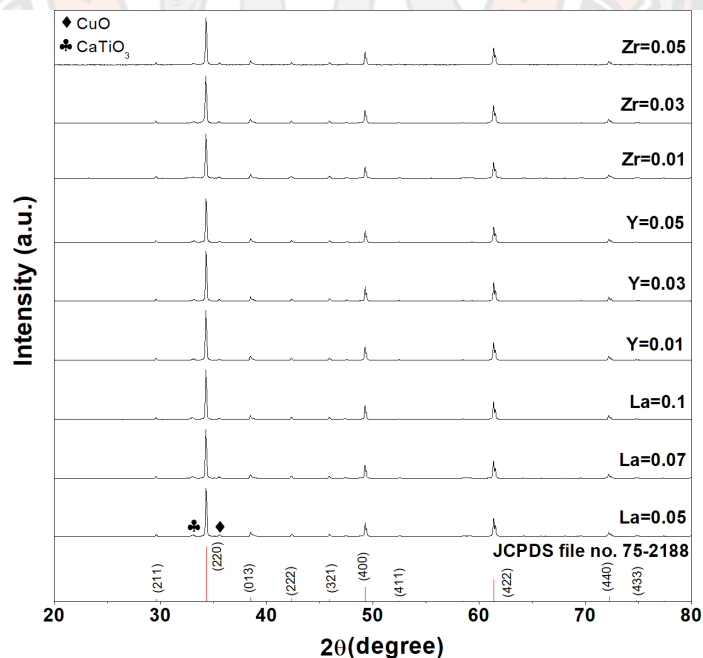
บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมผงผลึกและเซรามิก CCTLO CCTYO และ CCTZO ดังที่กล่าวมาจากบทก่อนหน้า โดยมีผลการทดลองประกอบไปด้วย ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสและโครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่น ร้อยละของน้ำหนักร้อยละที่สูญเสีย ร้อยละการหดตัว สมบัติไดอิเล็กทริก ค่าความแข็งแรงระดับจุลภาค ค่ายังของมอดูลัส และค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก

ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของผงผลึก CLCTO CCTYO และ CCTZO ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

นำผงผลึก CLCTO CCTYO และ CCTZO ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลวเผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที มาตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ได้ผลดังภาพ 29



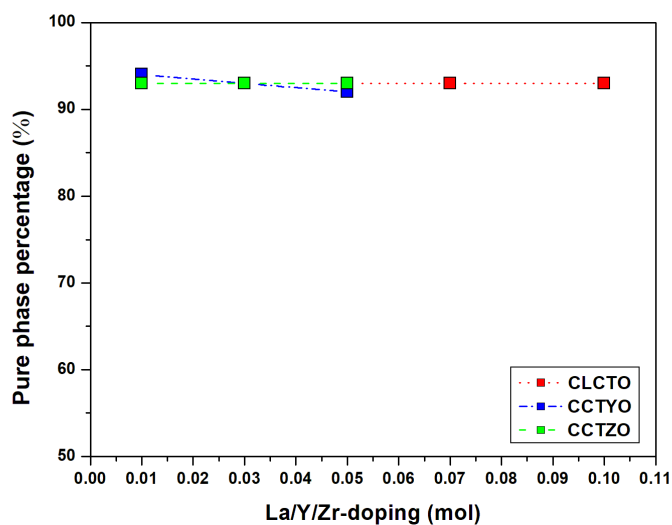
ภาพ 29 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก CLCTO เมื่อแปร $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$, CCTYO เมื่อแปร $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ และ CCTZO เมื่อแปร $\text{ZrO}_2=0.01-0.05$ โดยโม่ลเผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากภาพ 29 นำข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ในทุกๆ ปริมาณมาเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน CCTO เนื่องจากปริมาณของ La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2 ที่เติมเข้าไปน้อยมากๆ และไม่พบฐานข้อมูลของ CLCTO, CCTYO และ CCTZO จึงเลือกใช้ฐานข้อมูลมาตรฐานของ CCTO หมายเลข 75-2188 [20] ซึ่งจากภาพ 29 เป็นการสังเคราะห์ผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$, $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ และ $\text{ZrO}_2=0.01-0.05$ โดยโมล ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลวเฟาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน $5^\circ\text{C}/\text{นาท}$ พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึกทั้งหมดนั้น มีลักษณะที่สอดคล้องกับฐานข้อมูลตามหมายเลขดังที่กล่าวมา และผงผลึกทั้งหมดพบว่ามีพีคของ CaTiO_3 และ CuO เกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และ Zhang [2] ที่ทำการสังเคราะห์ผงผลึก CCTO ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว เฟาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ $750-1000^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยพบว่าผงผลึก CCTO ในทุกๆ อุณหภูมิมีพีคของ CaTiO_3 และ CuO เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งเดียวกันกับงานวิจัยนี้

นำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างเฟสไปหาร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึกจากสมการ (9) ได้ดังตาราง 1

ตาราง 1 ร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO เฟาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ x (mol)	ร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก (%)		
	$\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12+x/2}$	$\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Y}_x\text{O}_{12-x/2}$	$\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Zr}_x\text{O}_{12-x/2}$
0.01	-	94	93
0.03	-	93	93
0.05	93	92	93
0.07	93	-	-
0.1	93	-	-



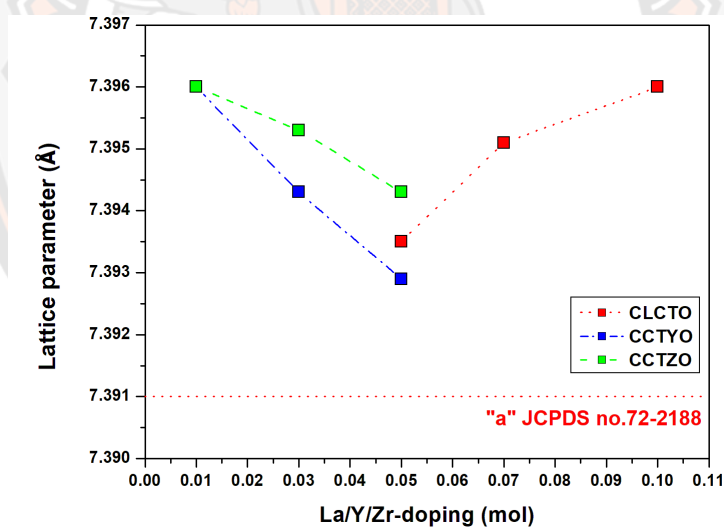
ภาพ 30 ร้อยละความบริสุทธิ์ของผลึก CLCTO เมื่อแปร $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$, CCTYO เมื่อแปร $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ และ CCTZO เมื่อแปร $\text{ZrO}_2=0.01-0.05$ โดยโมล เพาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากตาราง 1 เป็นการหาร้อยละความบริสุทธิ์ของผลึก CLCTO เมื่อแปร $\text{La}=0.05-0.1$, CCTYO เมื่อแปร $\text{Y}=0.01-0.05$ และ CCTZO เมื่อแปร $\text{Zr}=0.01-0.05$ โดยโมล ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว เพาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน $5^\circ\text{C}/\text{นาท}$ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างเฟสมาคำนวณด้วยสมการ (9) ซึ่งพบว่าผลึกทั้งหมดในทุกๆ เจ็อนไซ มีค่าร้อยละความบริสุทธิ์ที่สูง โดยมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังภาพ 29 ที่แสดงถึงโครงสร้างเฟสของ CCTO โดยมีลักษณะคล้ายคลึงกับฐานข้อมูลหมายเลข 75-2188 [20]

นำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างเฟสไปหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของผงลึกจากสมการ (10) [13] ได้ดังตาราง 2

ตาราง 2 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของผงลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO เฝ้าแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ x (mol)	ค่า Lattice parameter "a" (Å)		
	$\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12+x/2}$	$\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Y}_x\text{O}_{12-x/2}$	$\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Zr}_x\text{O}_{12-x/2}$
0.01	-	7.3960	7.3960
0.03	-	7.3943	7.3953
0.05	7.3935	7.3929	7.3943
0.07	7.3951	-	-
0.1	7.3960	-	-



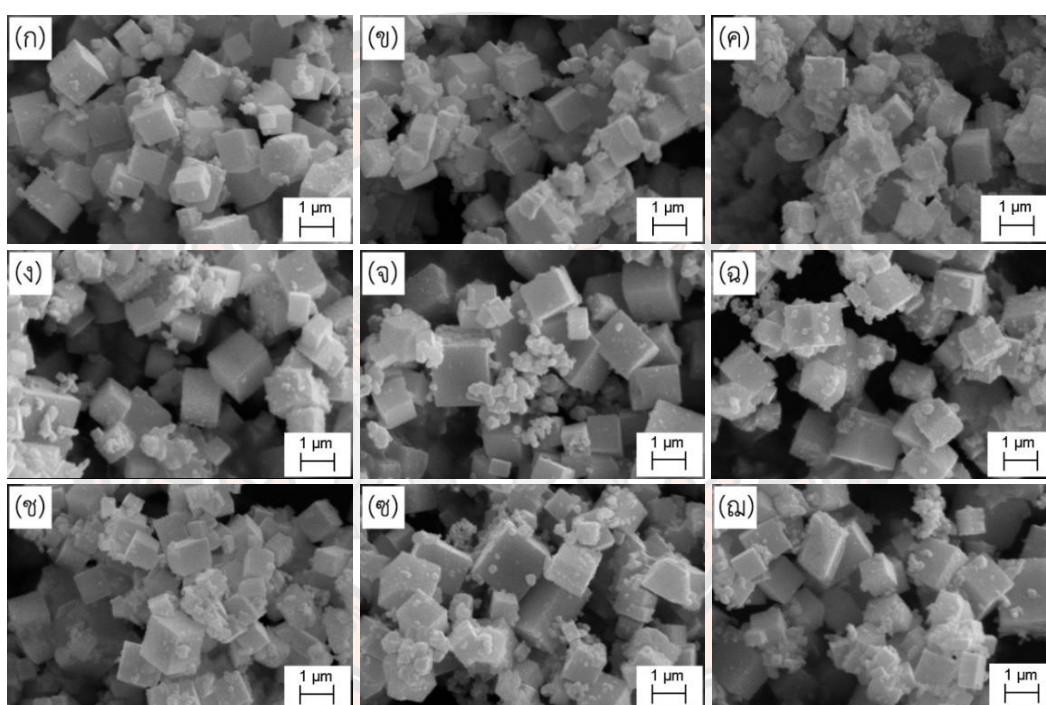
ภาพ 31 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของผงลึก CLCTO เมื่อแปร $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$, CCTYO เมื่อแปร $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ และ CCTZO เมื่อแปร $\text{ZrO}_2=0.01-0.05$ โดยโมล เฝ้าแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากตาราง 2 เป็นการหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของผงผลึก CLCTO เมื่อแปร $La=0.05-0.1$, CCTYO เมื่อแปร $Y=0.01-0.05$ และ CCTZO เมื่อแปร $Zr=0.01-0.05$ โดยโม่ ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน $5^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างเฟสมาคำนวณด้วยสมการ (10) [13] พบว่าผงผลึกของทุกๆ เจือไนซ์มีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ที่แตกต่างจากฐานข้อมูลหมายเลข 75-2188 [20] ดังตาราง 2 นั้นอาจจะหมายความว่าสารเจือทั้ง 3 ตัว ซึ่งได้แก่ La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2 ได้เข้าไปในโครงสร้างของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO จริง โดยผงผลึกทั้งหมดดังกล่าว จะมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ใหญ่กว่าของฐานข้อมูลหมายเลข 75-2188 [20] อาจจะเนื่องมาจากรัศมีอะตอมของธาตุตัวที่ถูกแทนที่มีขนาดรัศมีอะตอมเล็กกว่าธาตุตัวที่มาแทนที่ [4] โดยผงผลึก CLCTO มีค่าแลตทิซพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือ La_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น แต่ในส่วนของผงผลึก CCTYO และ CCTZO มีค่าลดลง เมื่อปริมาณการเจือของ Y_2O_3 และ ZrO_2 เพิ่มขึ้น



ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ทั้งหมดที่สังเคราะห์ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลวเผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาทึ มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะได้ผลดังภาพ 32 และนำรูปถ่ายที่ได้จาก SEM มาหาขนาดเฉลี่ยของอนุภาคของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO จะได้ดังตาราง 3 และกราฟในภาพ 33 ดังนี้



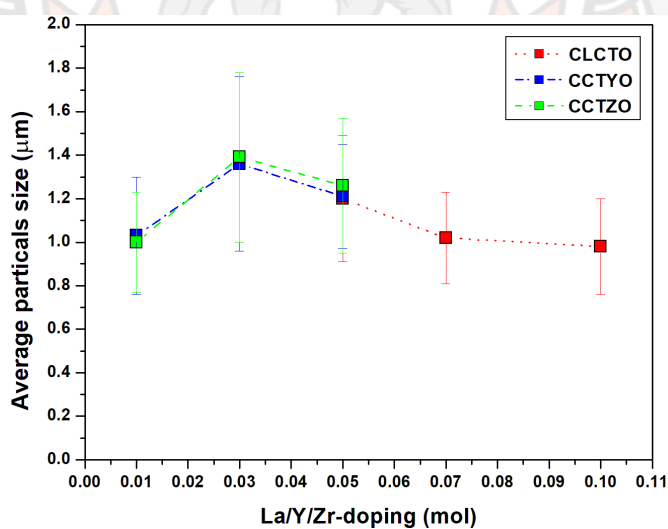
ภาพ 32 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก CLCTO เมื่อแปร $\text{La}_2\text{O}_3 =$ (ก) 0.05 (ข) 0.07 (ค) 0.1, CCTYO เมื่อแปร $\text{Y}_2\text{O}_3 =$ (ง) 0.01 (จ) 0.03 (ฉ) 0.05 และ CCTZO เมื่อแปร $\text{ZrO}_2 =$ (ช) 0.01 (ซ) 0.03 (ฅ) 0.05 โดยโมล เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากภาพ 32 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลวเผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาทึ พบว่าผงผลึกของ CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3 = 0.05-0.1$ โดยโมล อนุภาคที่ได้จะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียว มีรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยม ดังภาพ 32(ก)-(ค) โดยที่จะมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กลง เมื่อปริมาณ La_2O_3 เพิ่มขึ้น ดังตาราง 3 และกราฟ

ในภาพ 33 และจากภาพ 32(ง)-(ฉ) ของผงผลึก CCTYO และภาพ 32(ช)-(ฉ) ของผงผลึก CCTZO เมื่อปริมาณของ Y_2O_3 และ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล พบว่าอนุภาคมีลักษณะและรูปร่างคล้ายคลึงกันกับผงผลึก CLCTO ดังภาพ 32(ก)-(ค) แต่จะมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณของ Y_2O_3 และ ZrO_2 เพิ่มขึ้น ดังตาราง 3 และกราฟ 33

ตาราง 3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ $800^\circ C$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ x (mol)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึก (μm)		
	$Ca_{1-x}La_xCu_3Ti_4O_{12+x/2}$	$CaCu_3Ti_{4-x}Y_xO_{12-x/2}$	$CaCu_3Ti_{4-x}Zr_xO_{12-x/2}$
0.01	-	1.03 ± 0.27	1.00 ± 0.23
0.03	-	1.36 ± 0.40	1.39 ± 0.39
0.05	1.20 ± 0.29	1.21 ± 0.24	1.26 ± 0.31
0.07	1.02 ± 0.21	-	-
0.1	0.98 ± 0.22	-	-



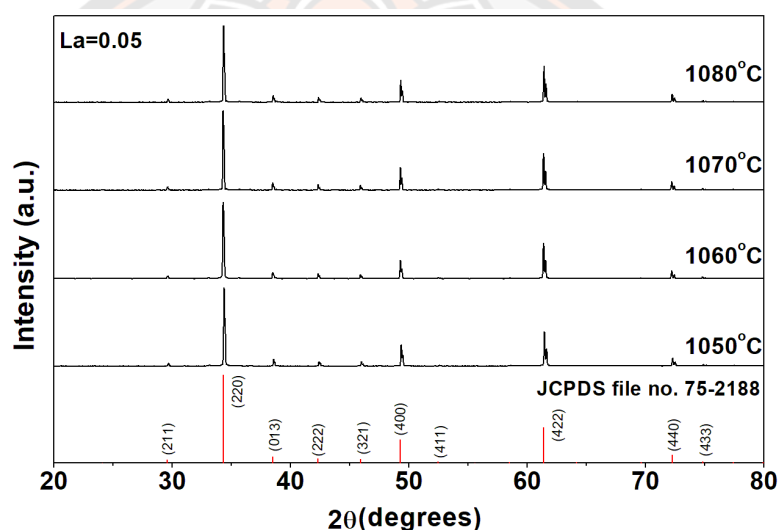
ภาพ 33 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$, CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ และ CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ $800^\circ C$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วย XRD ของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ดังภาพ 29 ที่แปรค่า La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2 ในปริมาณต่างๆ นั้น แสดงให้เห็นว่า ในทุกๆ เงื่อนไขมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เหมือนกันและมีลักษณะสอดคล้องกับฐานข้อมูลหมายเลข 75-2188 [20] โดยมีร้อยละความบริสุทธิ์ที่สูง ดังตาราง 1 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าผงผลึกทั้งหมดมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ที่แตกต่างจากฐานข้อมูลหมายเลข 75-2188 [20] ดังตาราง 2 นั้น อาจจะหมายความว่า สารเจือได้เข้าไปแทนที่ในผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO จริง โดยผงผลึกดังกล่าวพบว่ามีค่าแลตทิซพารามิเตอร์มากกว่าของฐานข้อมูลหมายเลข 75-2188 [20] อาจจะเนื่องมาจากรัศมีอะตอมของธาตุตัวที่ถูกแทนที่มีขนาดรัศมีอะตอมเล็กกว่าธาตุตัวที่มาแทนที่ [4] และจากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO พบว่าทั้งหมดมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีรูปร่างค่อนข้างเป็นทรงสี่เหลี่ยม ดังภาพ 32(ก)-(ง) โดยผงผลึก CLCTO มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลง เมื่อปริมาณการเจือ La_2O_3 เพิ่มขึ้น แต่ผงผลึก CCTYO และ CCTZO มีขนาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือ Y_2O_3 และ ZrO_2 ดังตาราง 3 และกราฟในภาพ 33

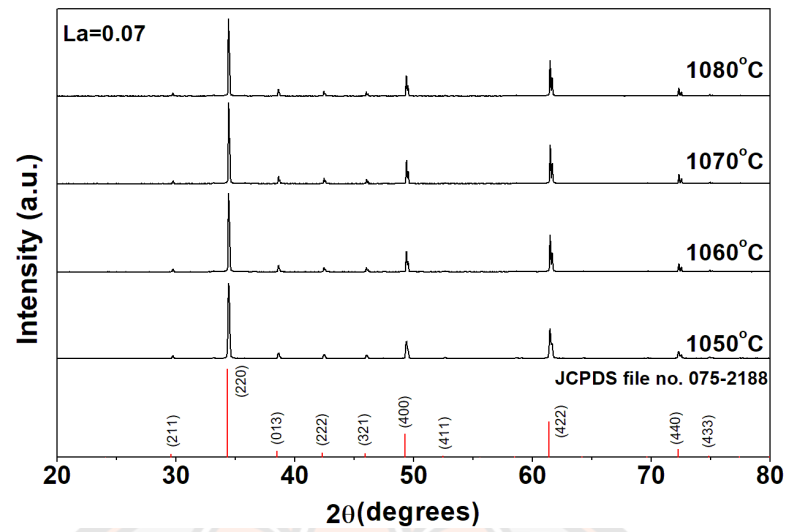


ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

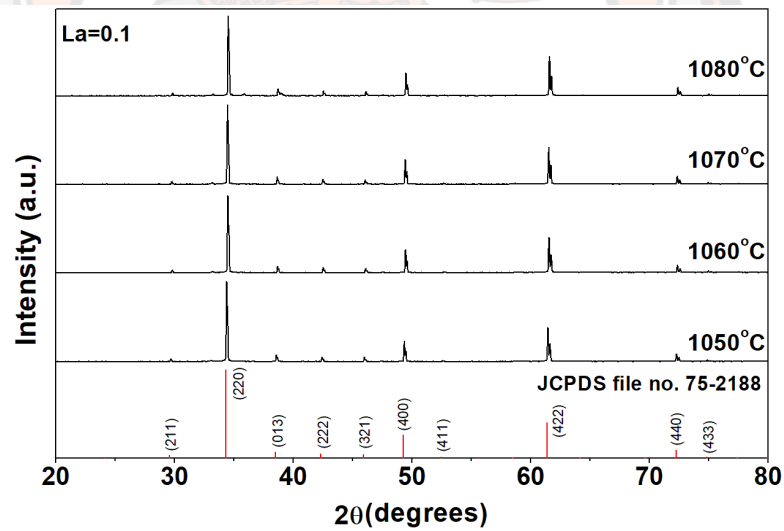
นำเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที มาตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) โดยนำข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ในทุกๆ ปริมาณมาเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน CCTO เนื่องจากปริมาณของ La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2 ที่เติมเข้าไปน้อยมากๆ และไม่พบฐานข้อมูลของ CLCTO, CCTYO และ CCTZO จึงเลือกใช้ฐานข้อมูลมาตรฐานของ CCTO หมายเลข 75-2188 [20] ซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้



ภาพ 34 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

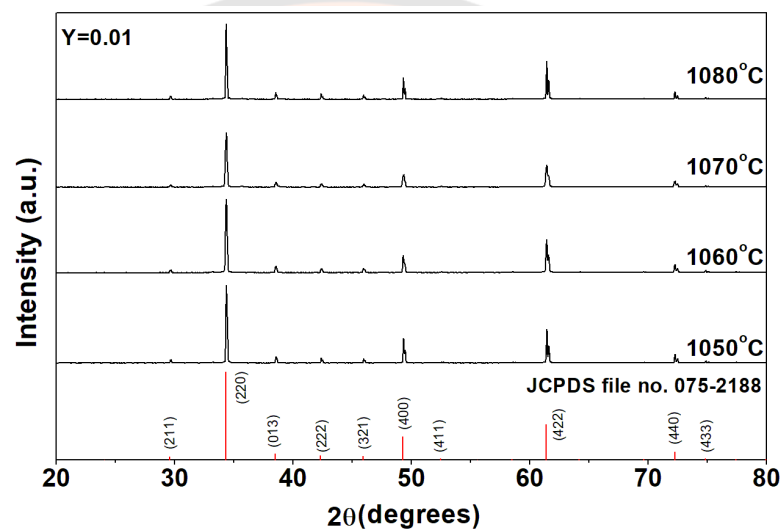


ภาพ 35 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3 = 0.07$ โดยโมล
เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

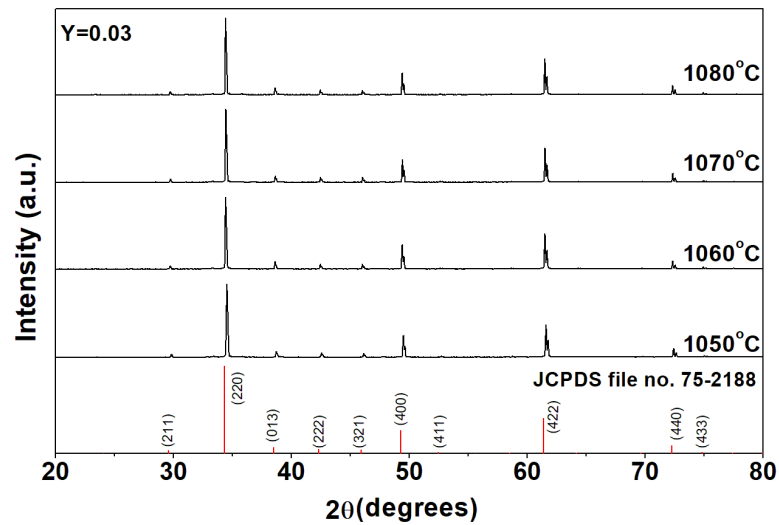


ภาพ 36 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3 = 0.1$ โดยโมล
เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

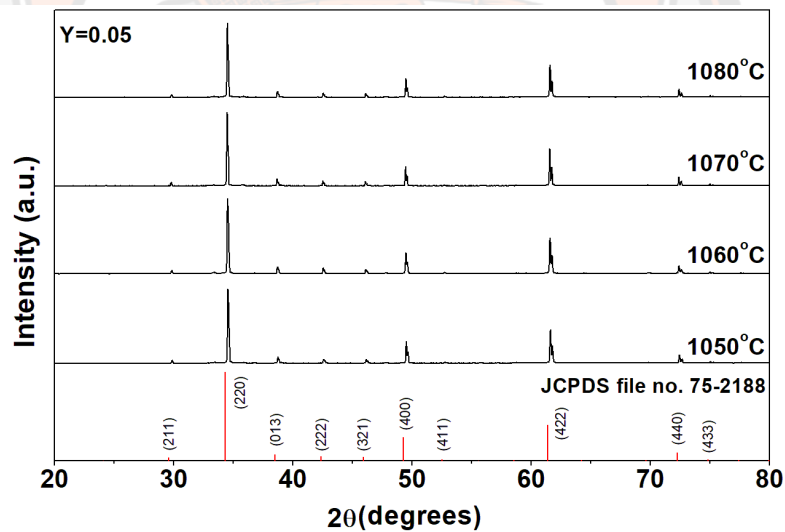
จากภาพ 34-36 เป็นการเตรียมเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที่ พบว่าในทุกๆ ปริมาณการเจือของ La_2O_3 และอุณหภูมิการเผาซินเตอร์จะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เหมือนกัน โดยมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สอดคล้องกับของฐานข้อมูลหมายเลข 75-2188 [20] และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cheng และคณะ [4] ซึ่งได้ศึกษาการเตรียมเซรามิก $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ แปรค่า x หรือ La_2O_3 เท่ากับ 0, 3, 6 และ 9 mol% ด้วยกระบวนการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง



ภาพ 37 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



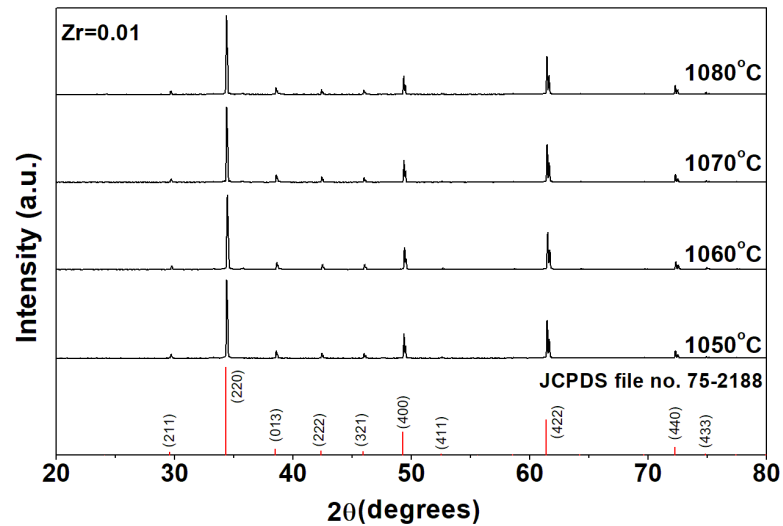
ภาพ 38 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



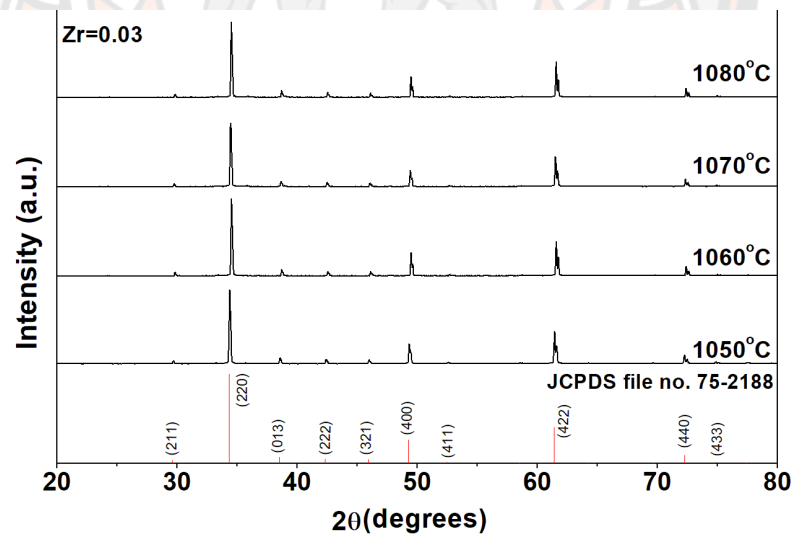
ภาพ 39 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากภาพ 37-39 เป็นการเตรียมเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าในทุกๆ ปริมาณการเจือของ Y_2O_3 และอุณหภูมิการเผาซินเตอร์จะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เหมือนกัน โดยมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สอดคล้องกับของฐานข้อมูลหมายเลข 75-2188 [20] และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu และคณะ [3]

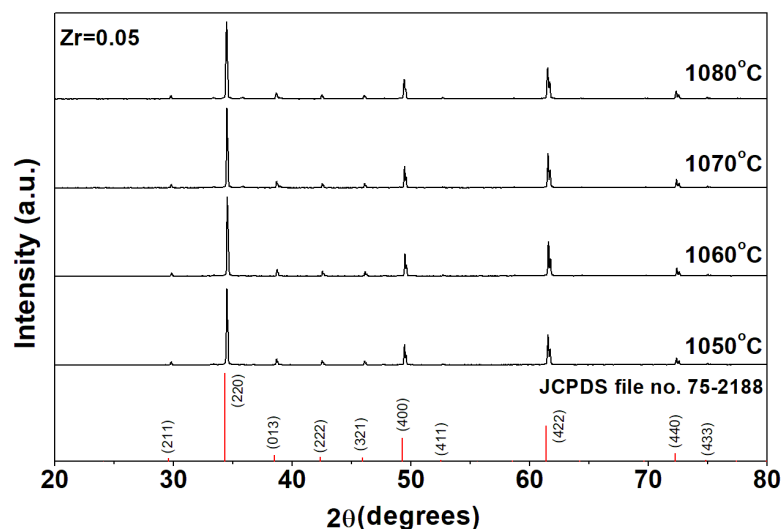
ที่ได้ศึกษาการเตรียมเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{3.95}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{12}$, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{3.97}\text{Y}_{0.03}\text{O}_{11.985}$ และ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{3.92}\text{Y}_{0.03}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{11.985}$ ด้วยวิธีการเผาไหม้



ภาพ 40 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $\text{ZrO}_2=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



ภาพ 41 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $\text{ZrO}_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

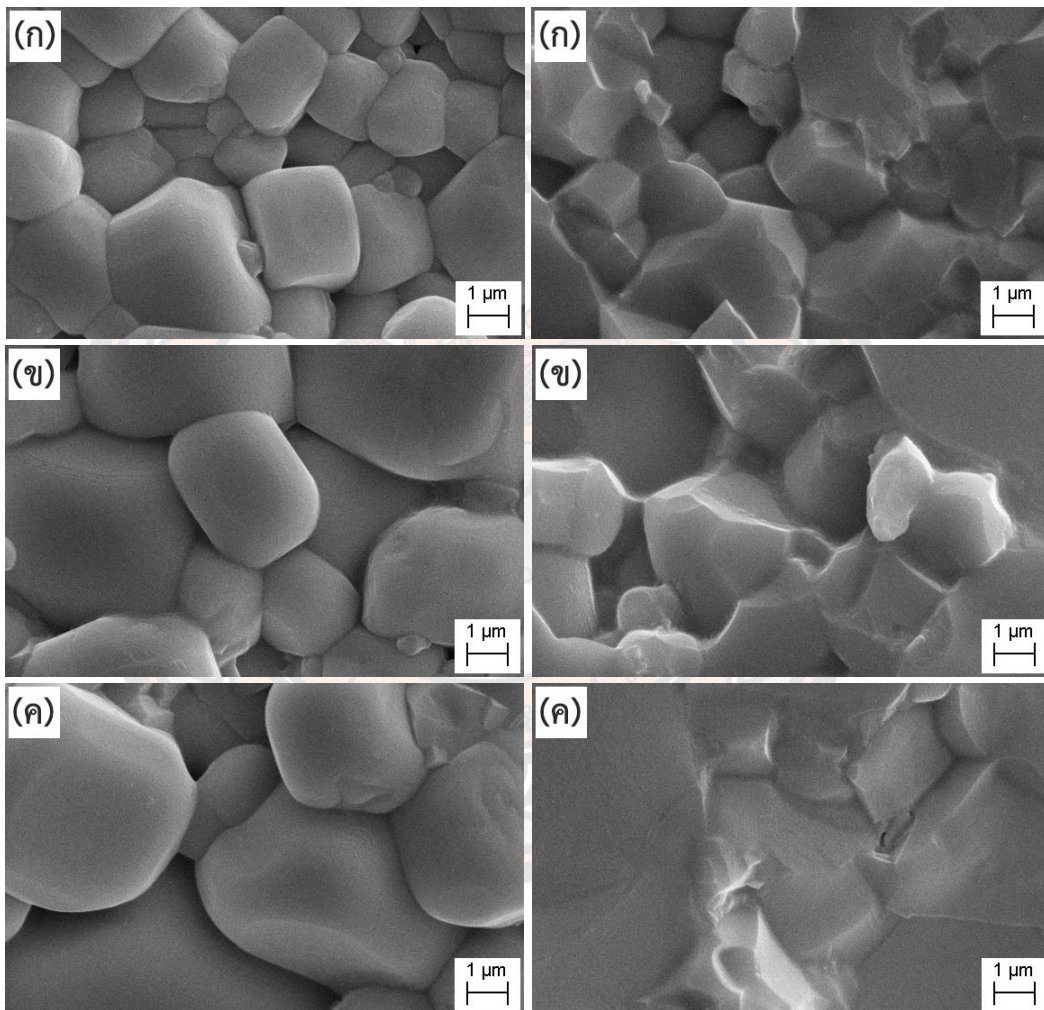


ภาพ 42 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

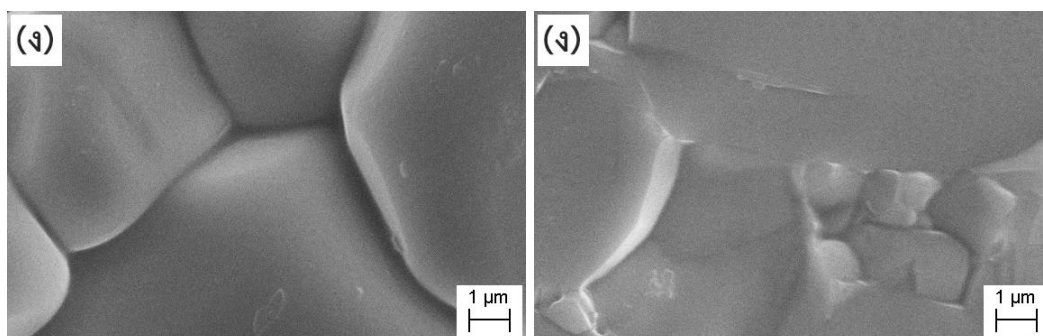
จากภาพ 40-42 เป็นการเตรียมเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าในทุกๆ ปริมาณการเจือของ ZrO_2 และอุณหภูมิการเผาซินเตอร์จะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เหมือนกัน โดยมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สอดคล้องกับของฐานข้อมูลหมายเลข 75-2188 [20] และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu และคณะ [3] ได้ศึกษาการเตรียมเซรามิก $CaCu_3Ti_4O_{12}$, $CaCu_3Ti_{3.95}Zr_{0.05}O_{12}$, $CaCu_3Ti_{3.97}Y_{0.03}O_{11.985}$ และ $CaCu_3Ti_{3.92}Y_{0.03}Zr_{0.05}O_{11.985}$ ด้วยวิธีการเผาไหม้

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ทั้งหมดที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และนำรูปถ่ายที่ได้จาก SEM มาหาขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO จะได้ผลดังนี้



ภาพ 43 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

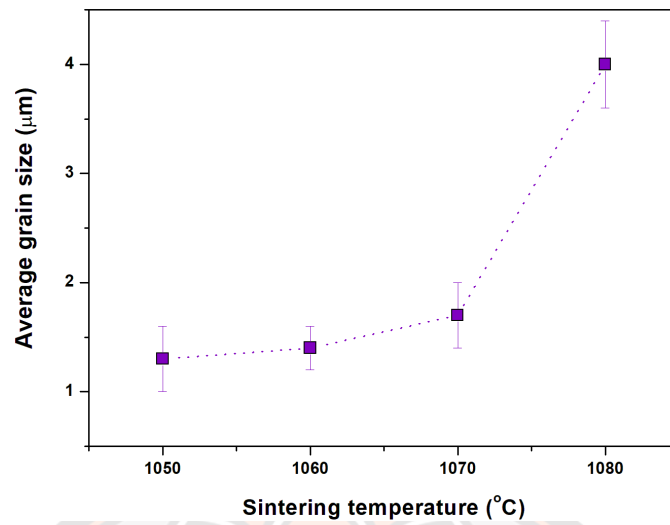


ภาพ 43 (ต่อ)

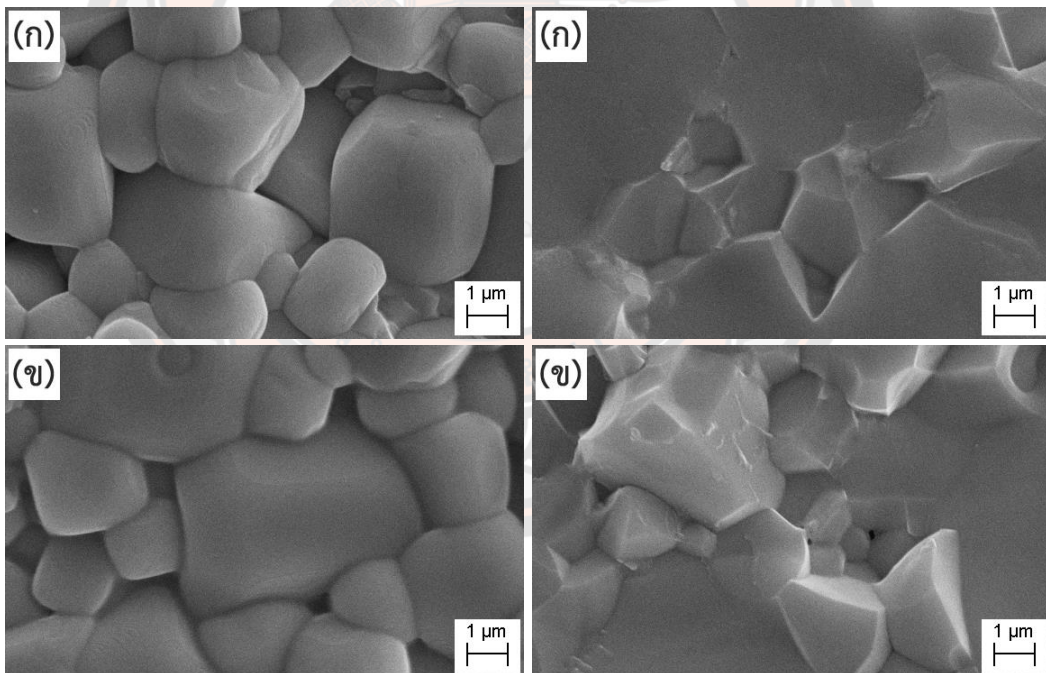
จากภาพ 43 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยหักของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าผิวหน้าของเซรามิกดังกล่าว มีลักษณะเกรนเป็นทรงสี่เหลี่ยม ดังภาพ 43(ก)-(ง) ของฝั่งด้านซ้าย และเมื่อนำมาหาขนาดเกรนเฉลี่ยจะได้ดังตาราง 4 และกราฟในภาพ 44 โดยพบว่า มีขนาดเกรนใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.3-4.0 μm ส่วนรูปถ่ายฝั่งขวามือจะแสดงรอยหักของเซรามิกข้างต้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการแตกพบทั้งการแตกแบบตามขอบเกรนและแตกแบบผ่าเกรน

ตาราง 4 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

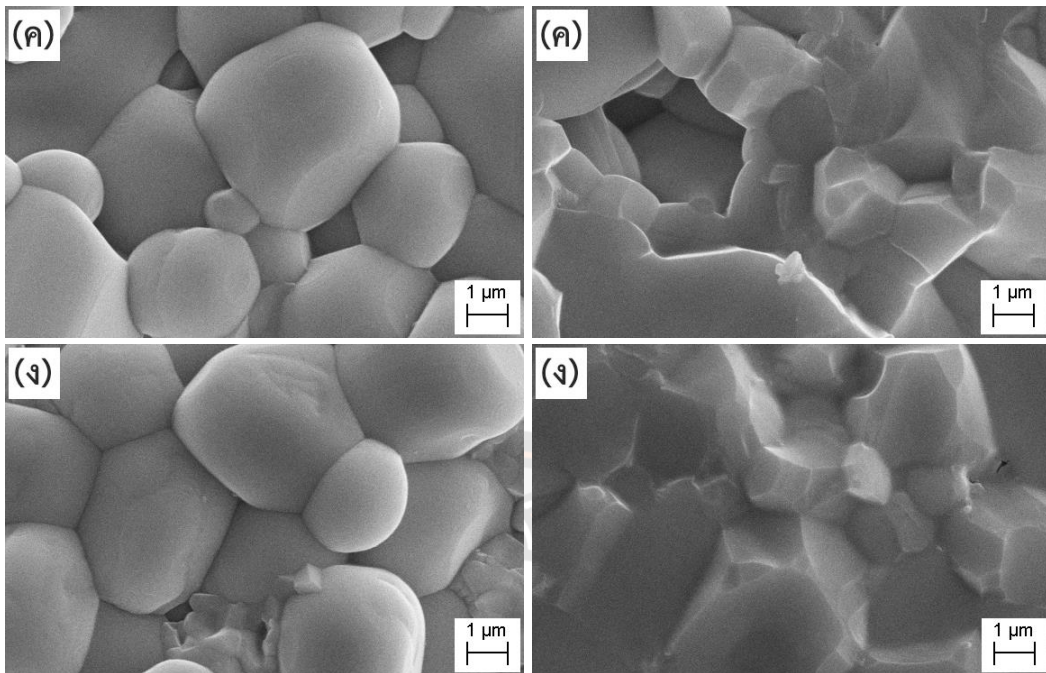
อุณหภูมิ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
1050	1.3 ± 0.3
1060	1.4 ± 0.2
1070	1.7 ± 0.3
1080	4.0 ± 0.4



ภาพ 44 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



ภาพ 45 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

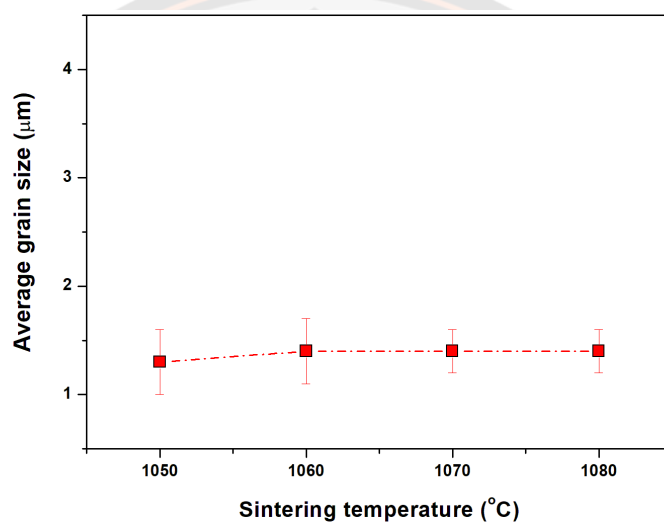


ภาพ 45 (ต่อ)

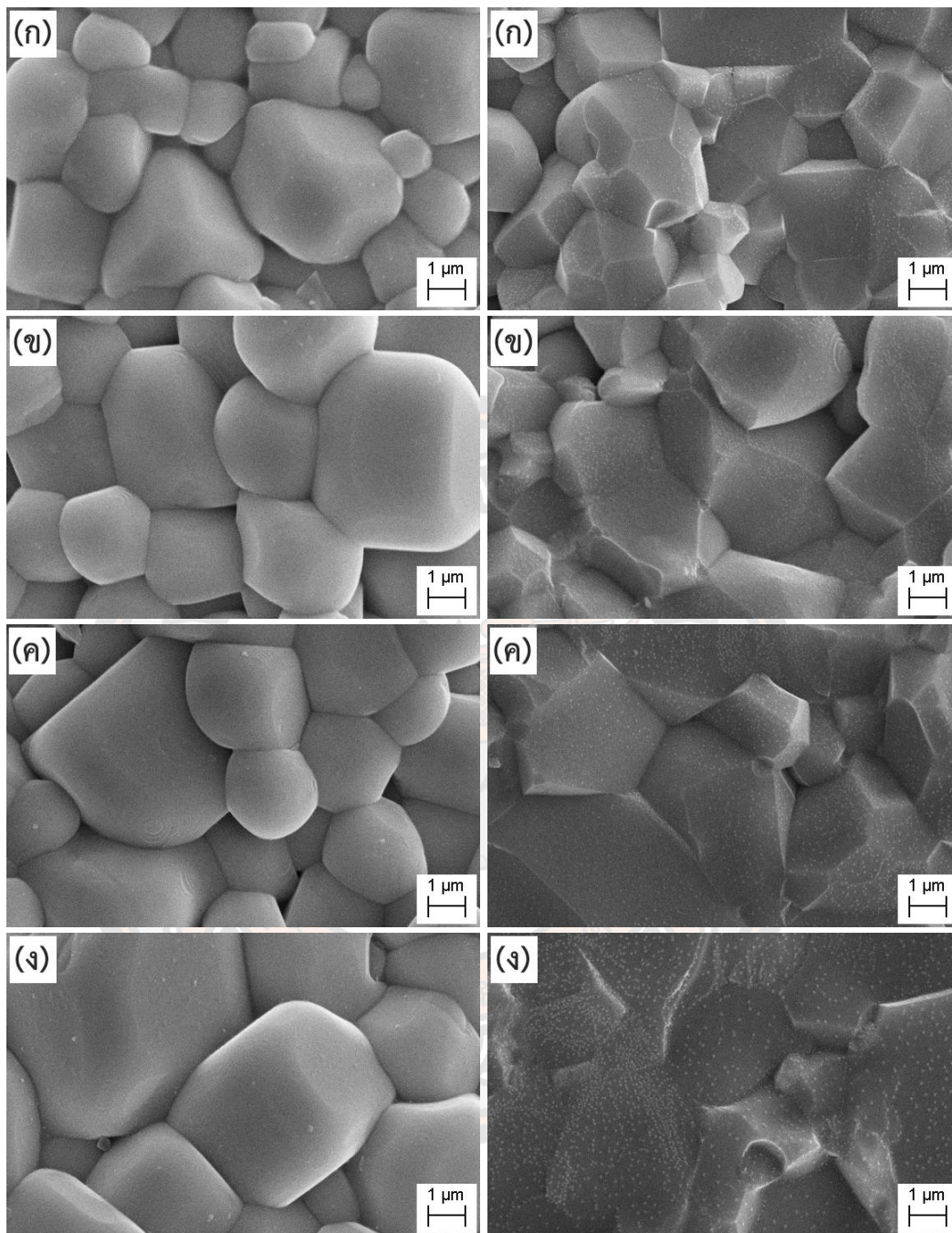
จากภาพ 45 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยหักของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ $1050-1080^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน $5^\circ\text{C}/\text{นาที่}$ พบว่าผิวหน้าของเซรามิกดังกล่าว มีลักษณะเกรนเป็นทรงสี่เหลี่ยม ดังภาพ 45(ก)-(ง) ของฝั่งด้านซ้าย ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับผิวหน้าของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ ดังภาพ 43 และเมื่อนำมาหาขนาดเกรนเฉลี่ยจะได้ดังตาราง 5 และกราฟในภาพ 46 โดยพบว่ามีขนาดเกรนใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ $1.3-1.6 \mu\text{m}$ และรูปถ่ายฝั่งขวามือจะแสดงรอยหักของเซรามิกข้างต้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการแตกพบทั้งการแตกตามขอบเกรนและแตกแบบผ่าเกรน

ตาราง 5 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
1050	1.3 ± 0.3
1060	1.4 ± 0.3
1070	1.4 ± 0.2
1080	1.6 ± 0.4



ภาพ 46 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

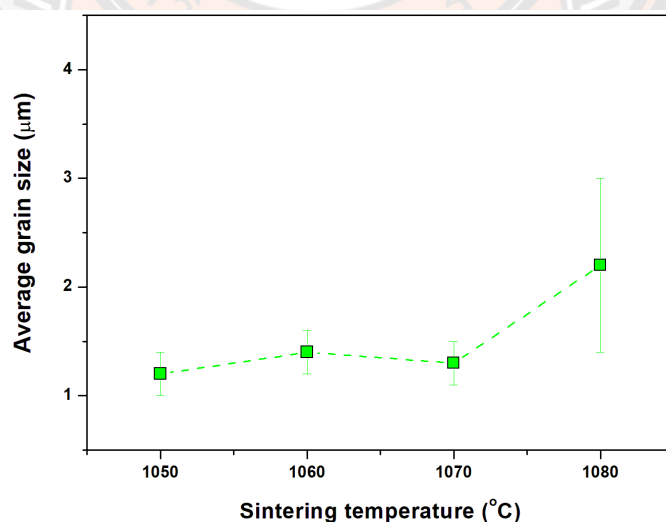


ภาพ 47 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของ เซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากภาพ 47 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยหักของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าผิวหน้าของเซรามิกดังกล่าว มีลักษณะเกรนเป็นทรงสี่เหลี่ยม โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์ที่เพิ่มสูงขึ้น ดังภาพ 47(ก)-(ง) ของฝั่งด้านซ้าย ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับผิวหน้าของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.07$ โดยโมล ดังภาพ 43 และ 45 ตามลำดับ และเมื่อนำมาหาขนาดเกรนเฉลี่ยจะได้ดังตาราง 6 และกราฟในภาพ 48 โดยพบว่าขนาดเกรนใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.2-2.2 μm ส่วนรูปถ่ายฝั่งขวามือจะแสดงรอยหักของเซรามิกข้างต้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการแตกพบทั้งการแตกตามขอบเกรนและแตกแบบผ่าเกรน

ตาราง 6 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
1050	1.2 ± 0.2
1060	1.4 ± 0.2
1070	1.3 ± 0.2
1080	2.2 ± 0.8

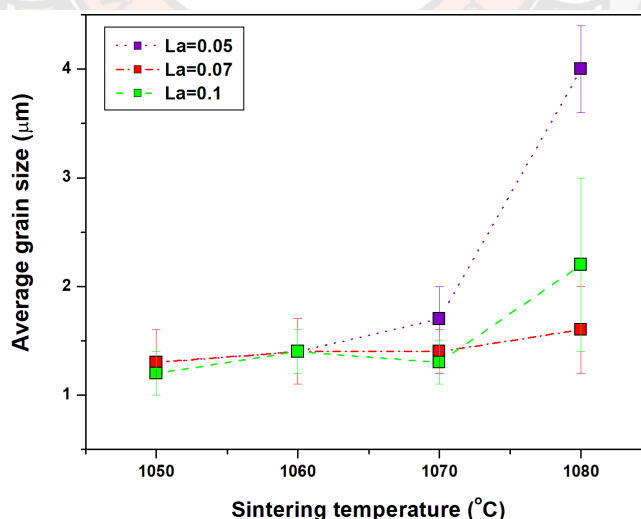


ภาพ 48 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

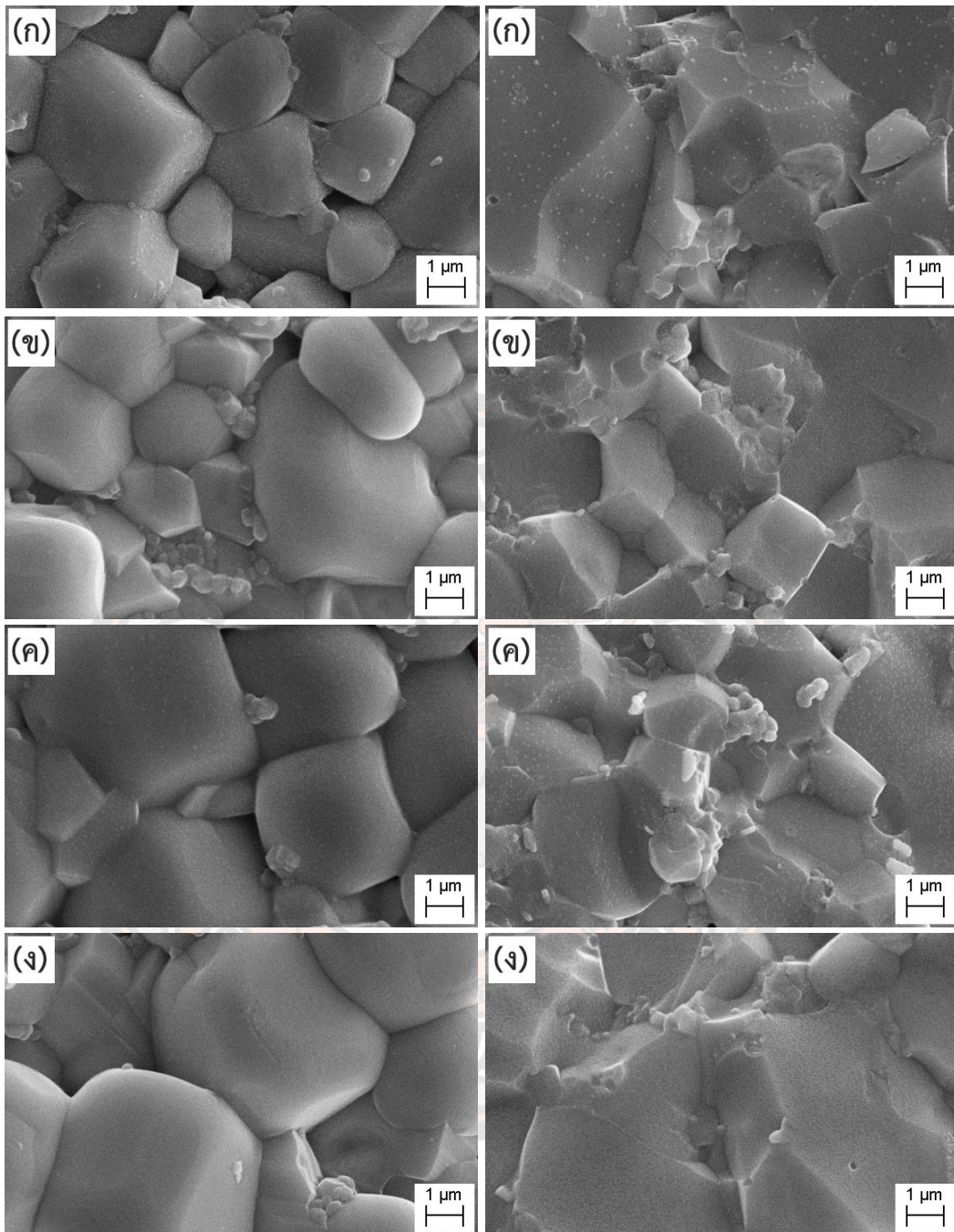
จากภาพ 43, 45 และ 47 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยหักของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล ตามลำดับ ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าผิวหน้าของเซรามิกในทุกๆ เงื่อนไข เกรนมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม และเมื่อนำเซรามิกทั้งหมดมาหาขนาดเกรนเฉลี่ยจะสามารถสรุปได้ดังตาราง 7 และกราฟในภาพ 49 โดยพบว่าขนาดเกรนใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น และถ้าพิจารณาตามปริมาณสารเจือ La_2O_3 ขนาดเกรนเฉลี่ยจะมีแนวโน้มลดลงถ้าเพิ่มปริมาณการเจือของ La_2O_3 นอกจากนี้ผลการตรวจสอบรอยหักของเซรามิกข้างต้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการแตกพบทั้งการแตกตามขอบเกรนและแตกแบบผ่าเกรน

ตาราง 7 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ La_2O_3 (mol)	ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก (μm) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.05	1.3 ± 0.3	1.4 ± 0.2	1.7 ± 0.3	4.0 ± 1.4
0.07	1.3 ± 0.3	1.4 ± 0.3	1.4 ± 0.2	1.6 ± 0.4
0.1	1.2 ± 0.2	1.4 ± 0.2	1.3 ± 0.2	2.2 ± 0.8



ภาพ 49 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

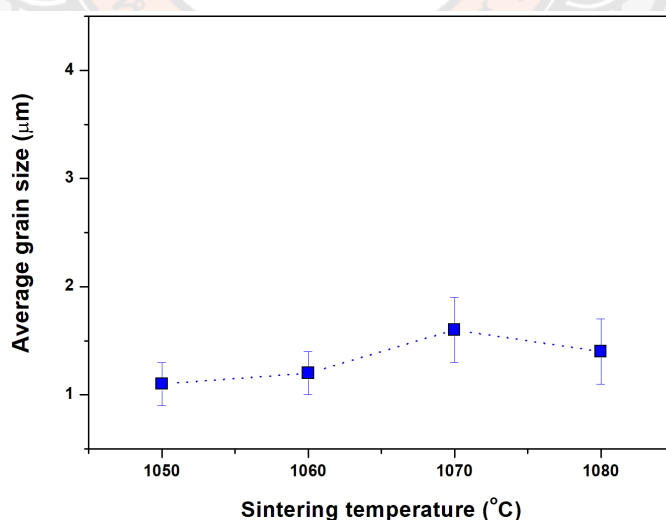


ภาพ 50 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของ เซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

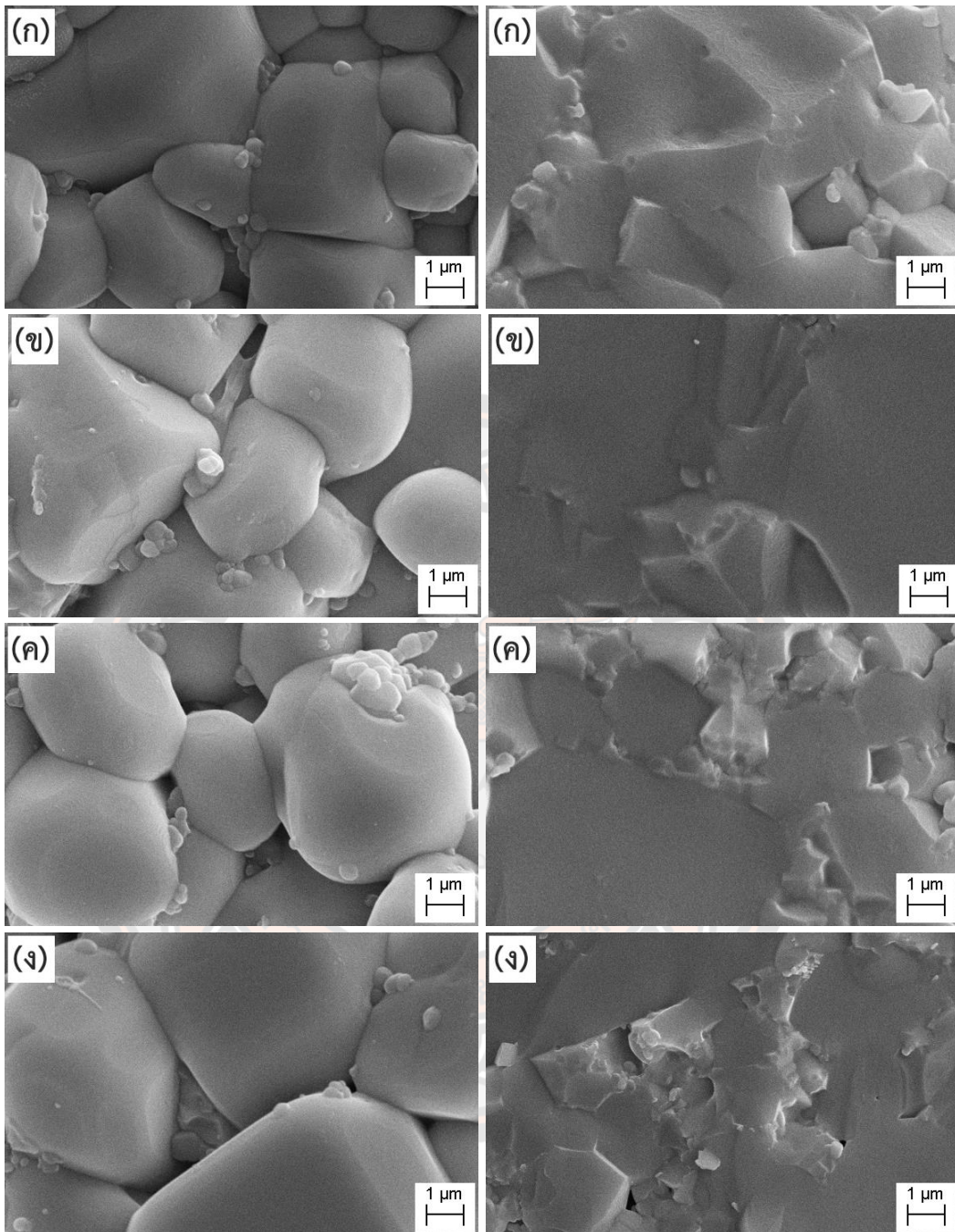
จากภาพ 50 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยหักของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าผิวหน้าของเซรามิกดังกล่าว มีลักษณะเกรนเป็นทรงสี่เหลี่ยม โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์ที่เพิ่มสูงขึ้น ดังภาพ 50(ก)-(ง) ของฝั่งด้านซ้าย และเมื่อนำมาหาขนาดเกรนเฉลี่ยจะได้ดังตาราง 8 และกราฟในภาพ 51 โดยพบว่าขนาดเกรนใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.3-2.1 μm ส่วนรูปถ่ายฝั่งขวามือจะแสดงรอยหักของเซรามิกข้างต้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการแตกพบทั้งการแตกตามขอบเกรนและแตกแบบผ่าเกรน

ตาราง 8 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
1050	1.3 ± 0.2
1060	1.5 ± 0.3
1070	1.9 ± 0.3
1080	2.1 ± 0.6



ภาพ 51 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

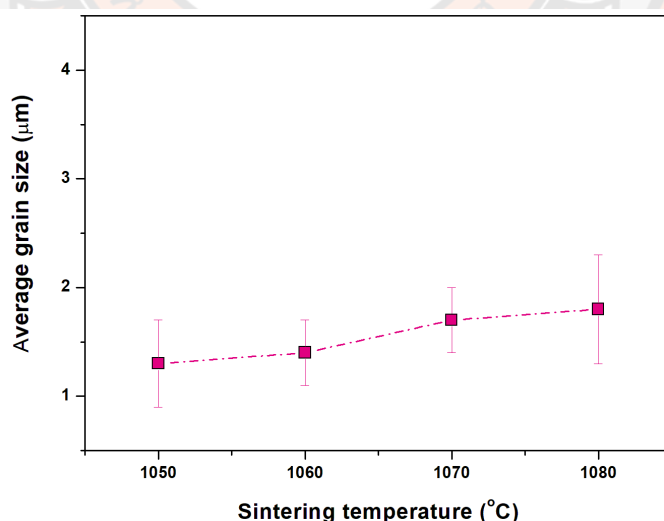


ภาพ 52 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

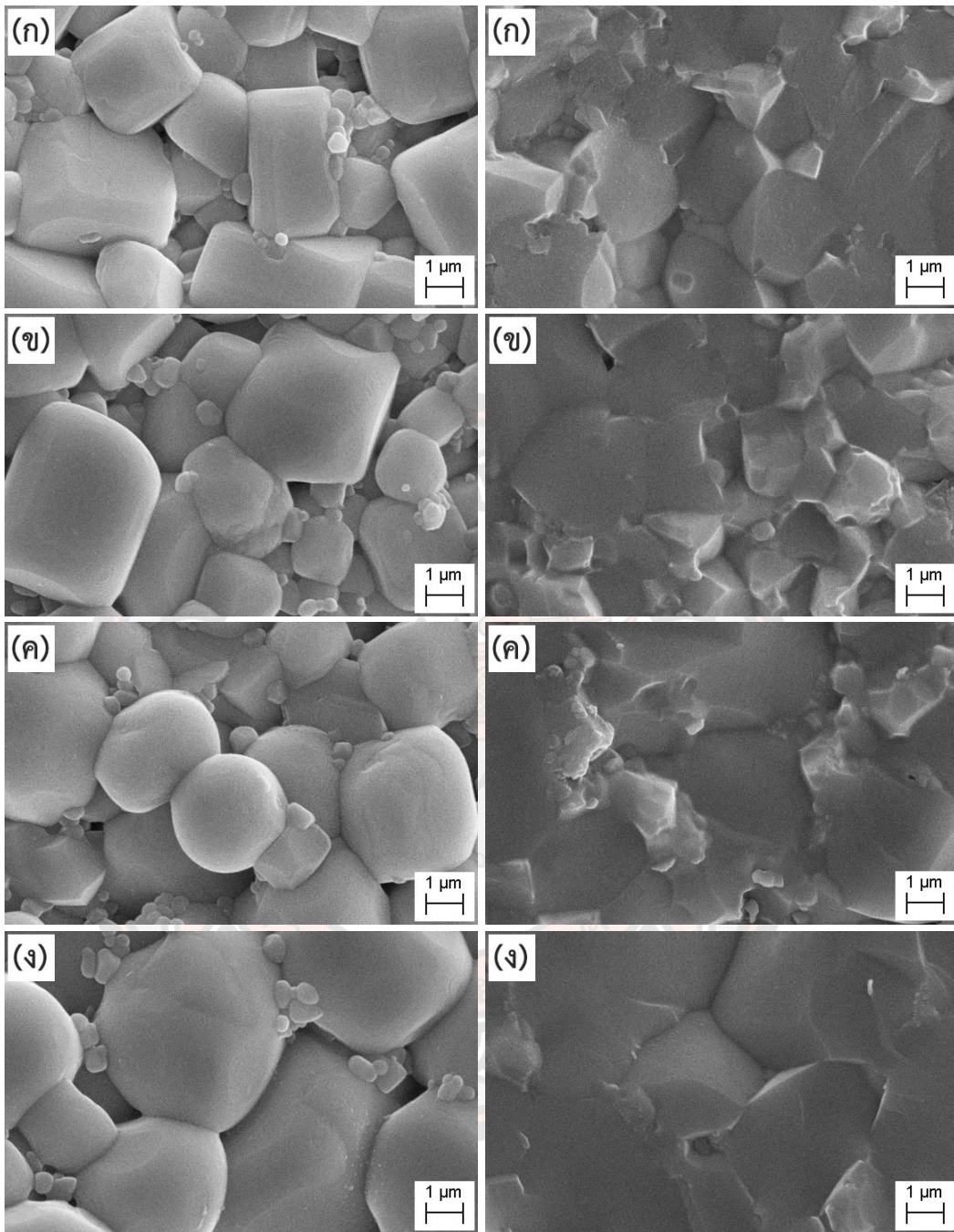
จากภาพ 52 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยหักของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าผิวหน้าของเซรามิกดังกล่าวมีลักษณะเกรนเป็นทรงสี่เหลี่ยม โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์ที่เพิ่มสูงขึ้น ดังภาพ 52(ก)-(ง) ของฝั่งด้านซ้าย และเมื่อนำมาหาขนาดเกรนเฉลี่ยจะได้ดังตาราง 9 และกราฟในภาพ 53 โดยพบว่ามีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.5-2.2 μm ส่วนรูปถ่ายฝั่งขวามือจะแสดงรอยหักของเซรามิกข้างต้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการแตกพบทั้งการแตกตามขอบเกรนและแตกแบบผ่าเกรน

ตาราง 9 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
1050	1.5 ± 0.4
1060	1.5 ± 0.3
1070	2.0 ± 0.6
1080	2.2 ± 0.4



ภาพ 53 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

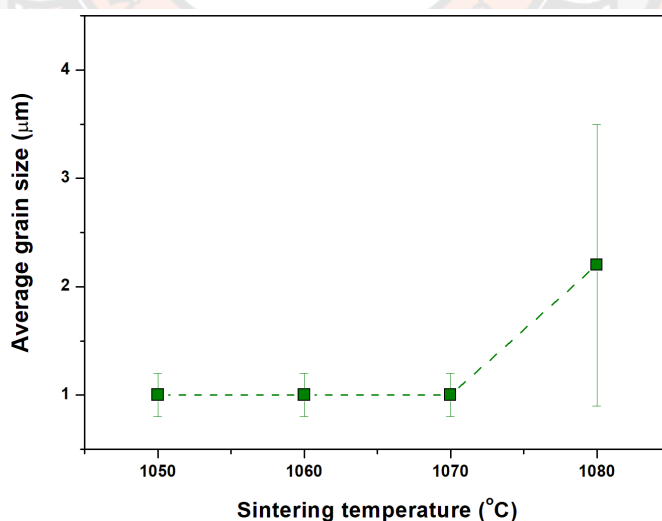


ภาพ 54 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของ เซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากภาพ 54 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยหักของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าผิวหน้าของเซรามิกดังกล่าวมีลักษณะเกรนเป็นทรงสี่เหลี่ยม โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์ที่เพิ่มสูงขึ้น ดังภาพ 54(ก)-(ง) ของฝั่งด้านซ้าย และเมื่อนำมาหาขนาดเกรนเฉลี่ยจะได้ดังตาราง 10 และกราฟในภาพ 55 โดยพบว่าขนาดเกรนใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.1-2.6 μm ส่วนรูปถ่ายฝั่งขวามือจะแสดงรอยหักของเซรามิกข้างต้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการแตกพบทั้งการแตกตามขอบเกรนและแตกแบบผ่าเกรน

ตาราง 10 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
1050	1.1 ± 0.2
1060	1.2 ± 0.2
1070	1.5 ± 0.3
1080	2.6 ± 1.3

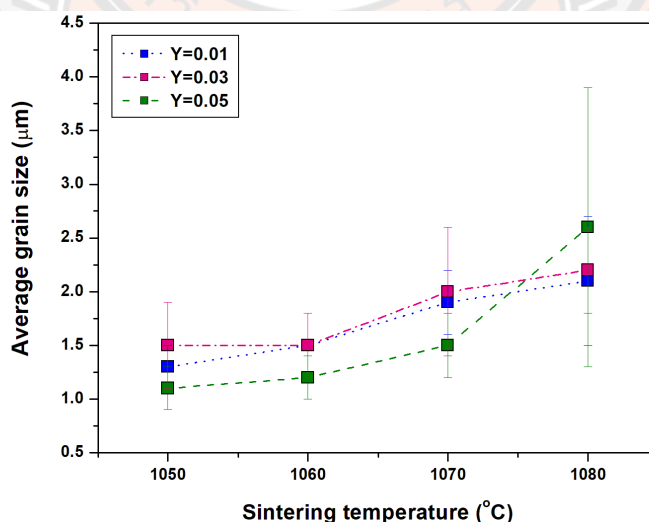


ภาพ 55 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

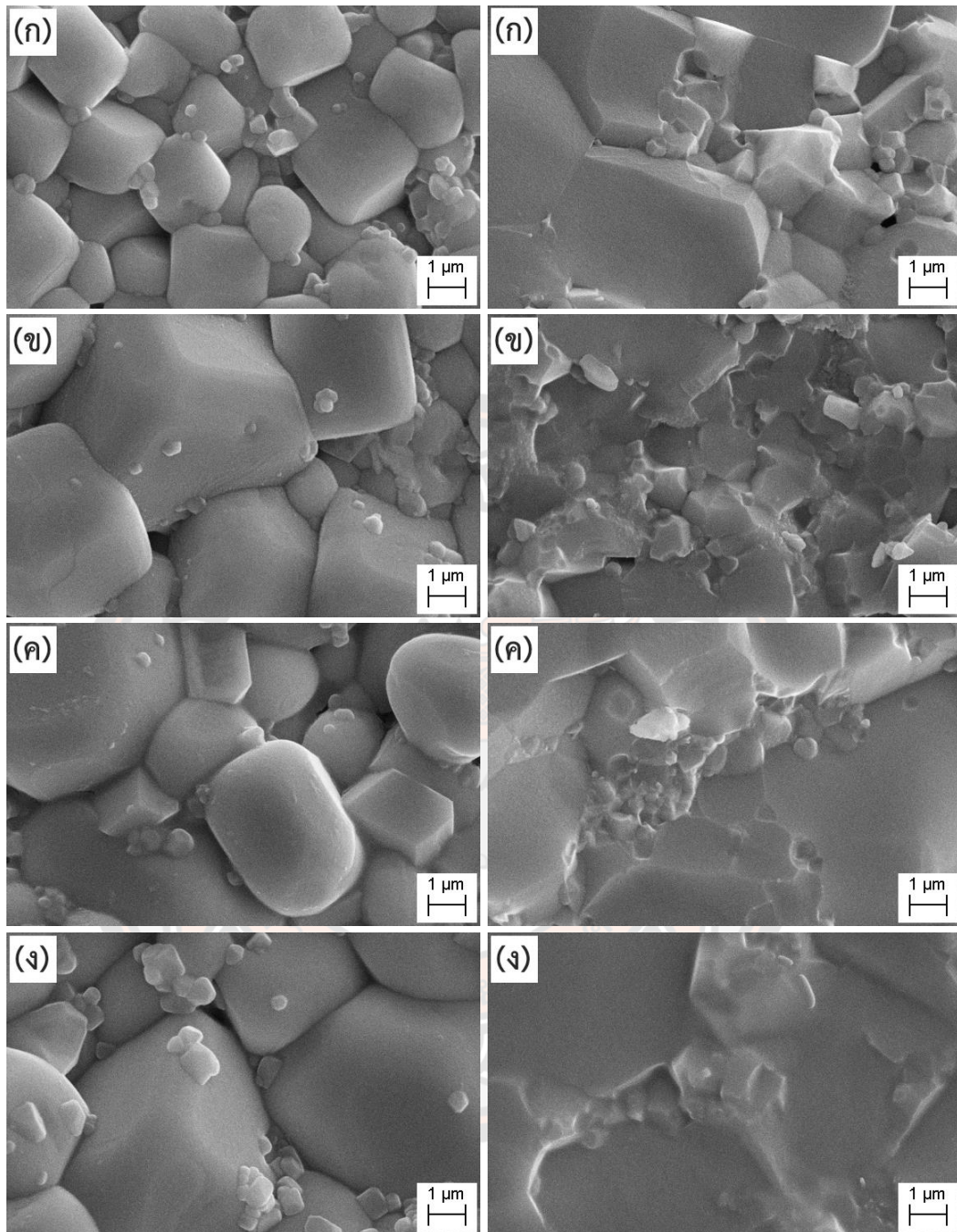
จากภาพ 50, 52 และ 54 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยหักของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าผิวหน้าของเซรามิกในทุกๆ เงื่อนไข เกรนมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม และเมื่อนำเซรามิกทั้งหมดมาหาขนาดเกรนเฉลี่ยจะสามารถสรุปได้ดังตาราง 11 และกราฟในภาพ 58 โดยพบว่ามีความหนาแน่นของเกรนใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น และถ้าพิจารณาตามปริมาณสารเจือ Y_2O_3 ซึ่งถ้าเพิ่มปริมาณการเจือของ Y_2O_3 ขนาดเกรนเฉลี่ยส่วนใหญ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ ณ อุณหภูมิ 1080°C มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ผลการตรวจสอบรอยหักของเซรามิกข้างต้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการแตกพบทั้งการแตกตามขอบเกรนและแตกแบบผ่าเกรน

ตาราง 11 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ Y_2O_3 (mol)	ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก (μm) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	1.3 ± 0.2	1.5 ± 0.3	1.9 ± 0.3	2.1 ± 0.6
0.03	1.5 ± 0.4	1.5 ± 0.3	2.0 ± 0.6	2.2 ± 0.4
0.05	1.1 ± 0.2	1.2 ± 0.2	1.5 ± 0.3	2.6 ± 1.3



ภาพ 56 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

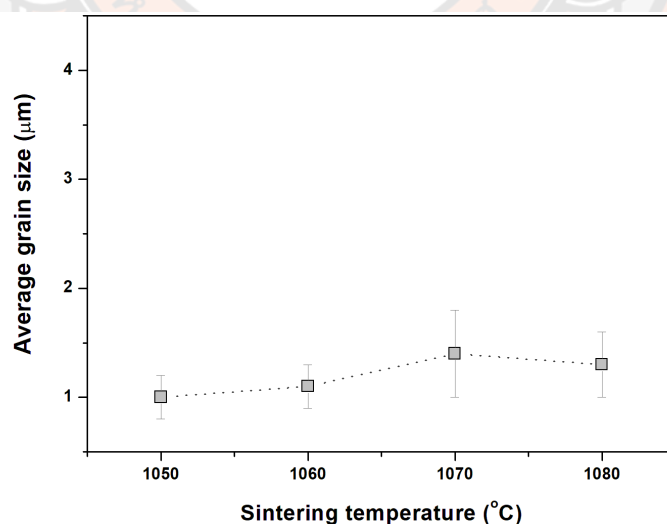


ภาพ 57 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของ เซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

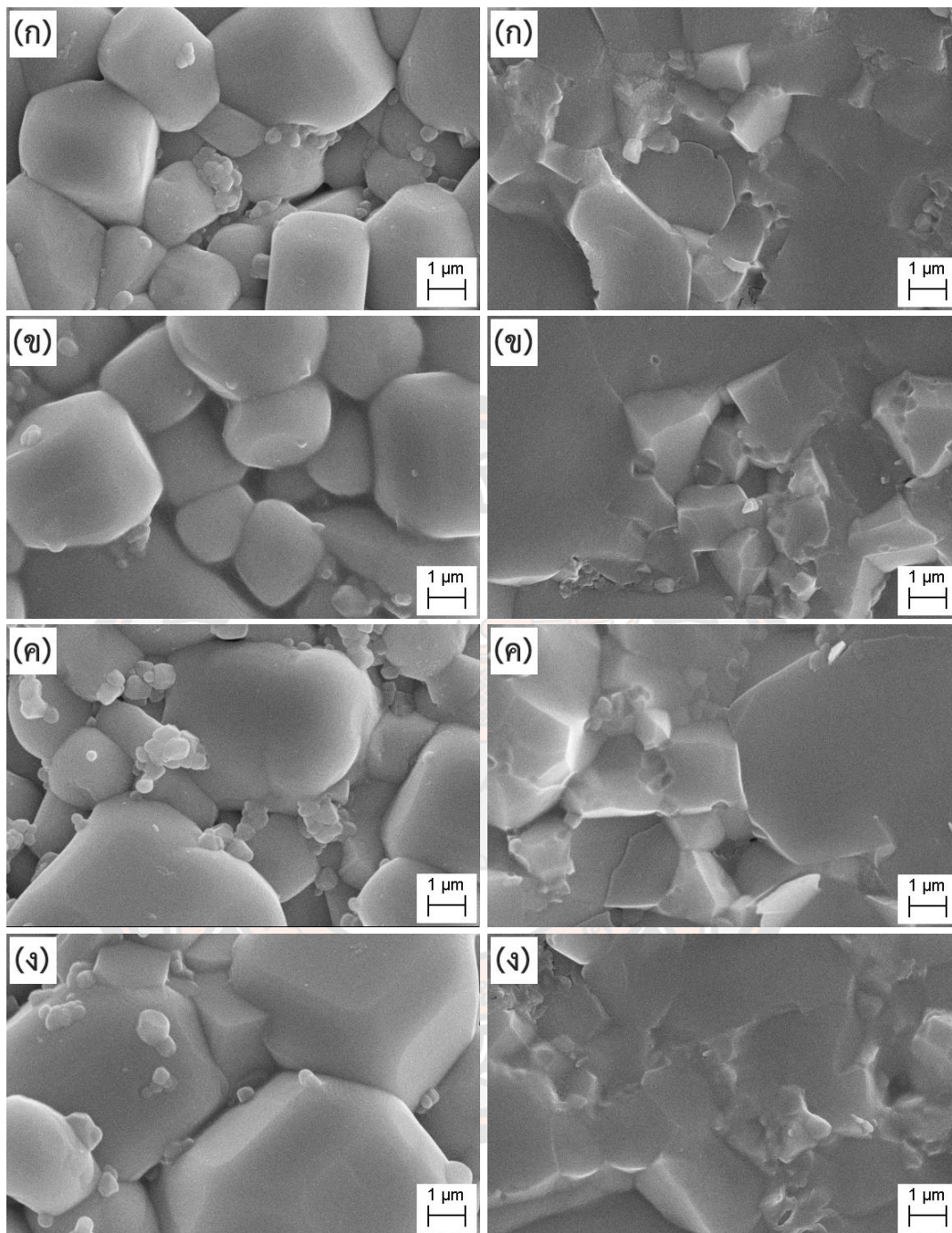
จากภาพ 57 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยหักของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าผิวหน้าของเซรามิกดังกล่าวมีลักษณะเกรนเป็นทรงสี่เหลี่ยม โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์ที่เพิ่มสูงขึ้น ดังภาพ 57(ก)-(ง) ของฝั่งด้านซ้าย และเมื่อนำมาหาขนาดเกรนเฉลี่ยจะได้ดังตาราง 12 และกราฟในภาพ 58 โดยพบว่ามีขนาดเกรนใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.2-1.8 μm ส่วนรูปถ่ายฝั่งขวามือจะแสดงรอยหักของเซรามิกข้างต้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการแตกพบทั้งการแตกตามขอบเกรนและแตกแบบผ่าเกรน

ตาราง 12 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
1050	1.2 ± 0.3
1060	1.3 ± 0.2
1070	1.7 ± 0.5
1080	1.8 ± 0.3



ภาพ 58 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

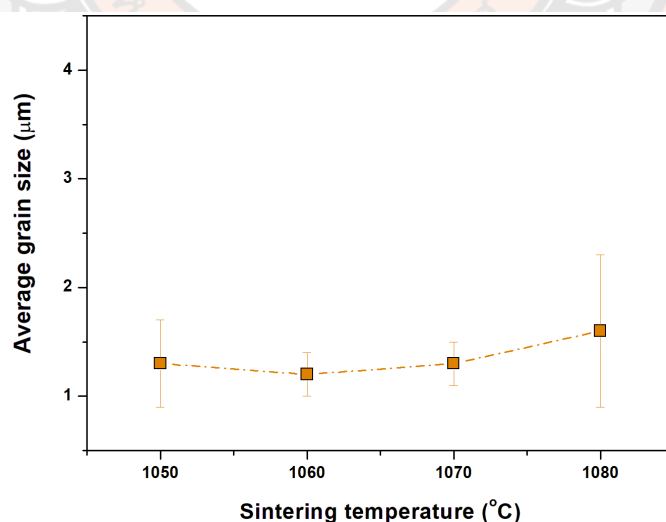


ภาพ 59 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

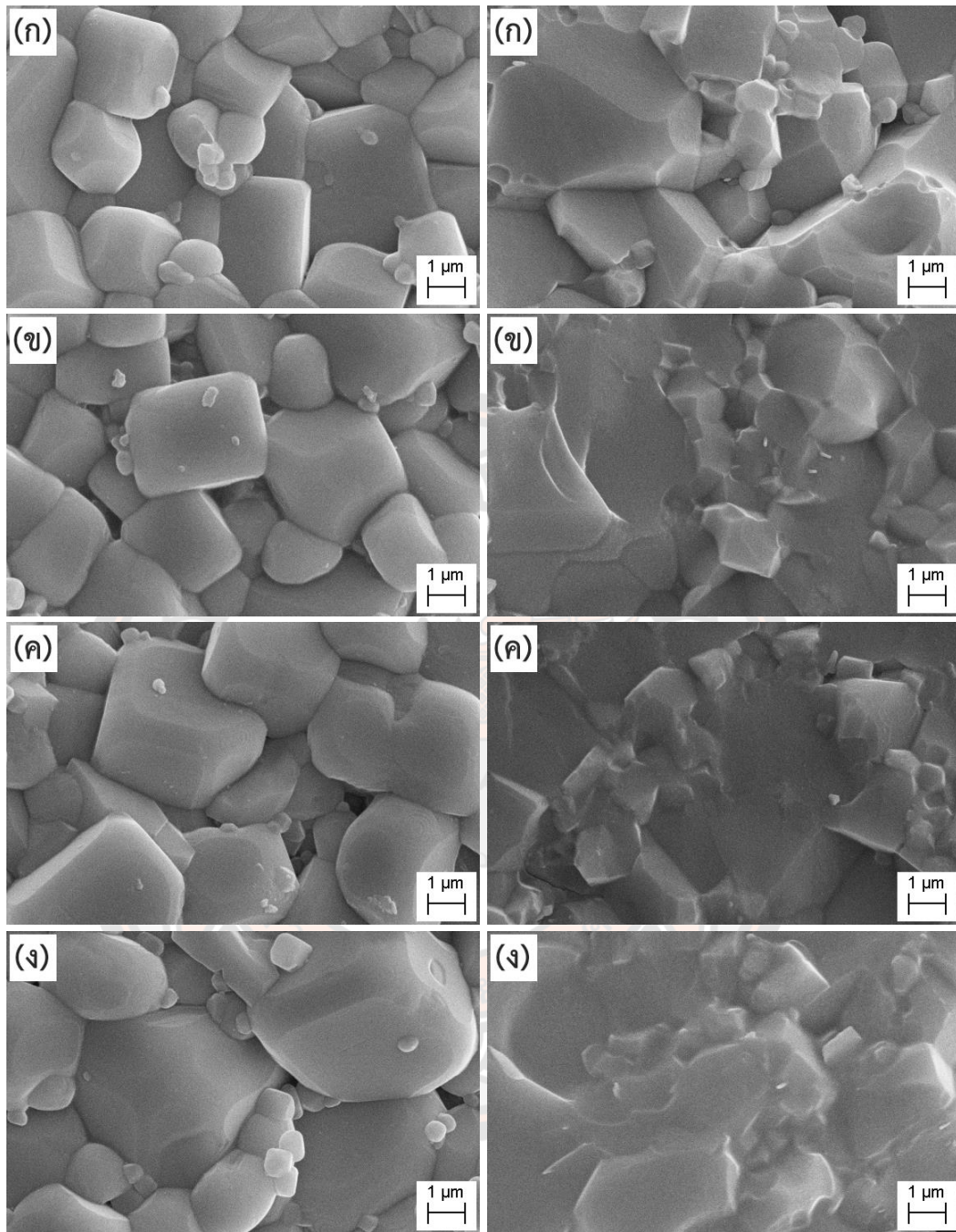
จากภาพ 59 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยหักของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าผิวหน้าของเซรามิกดังกล่าว มีลักษณะเกรนเป็นทรงสี่เหลี่ยม โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์ที่เพิ่มสูงขึ้น ดังภาพ 59(ก)-(ง) ของฝั่งด้านซ้าย และเมื่อนำมาหาขนาดเกรนเฉลี่ยจะได้ดังตาราง 13 และกราฟในภาพ 60 โดยพบว่ามีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.5-2.5 μm ส่วนรูปถ่ายฝั่งขวามือจะแสดงรอยหักของเซรามิกข้างต้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการแตกพบทั้งการแตกตามขอบเกรนและแตกแบบผ่าเกรน

ตาราง 13 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
1050	1.5 ± 0.3
1060	1.6 ± 0.3
1070	1.6 ± 0.3
1080	2.5 ± 1.0



ภาพ 60 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

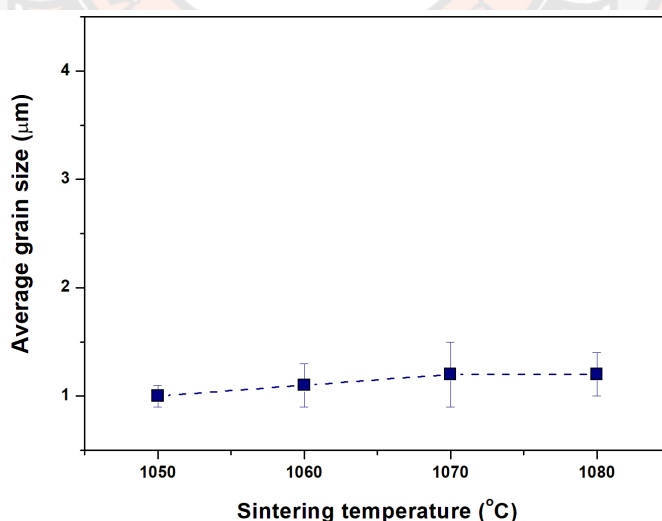


ภาพ 61 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยแตกหักของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากภาพ 61 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยหักของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าผิวหน้าของเซรามิกดังกล่าว มีลักษณะเกรนเป็นทรงสี่เหลี่ยม โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์ที่เพิ่มสูงขึ้น ดังภาพ 61(ก)-(ง) ของฝั่งด้านซ้าย และเมื่อนำมาหาขนาดเกรนเฉลี่ยจะได้ดังตาราง 14 และกราฟในภาพ 62 โดยพบว่ามีความหนาแน่นของเกรนใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.2-1.6 μm ส่วนรูปถ่ายฝั่งขวามือจะแสดงรอยหักของเซรามิกข้างต้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการแตกพบทั้งการแตกตามขอบเกรนและแตกแบบผ่าเกรน

ตาราง 14 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล ที่ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
1050	1.2 ± 0.2
1060	1.3 ± 0.2
1070	1.5 ± 0.3
1080	1.6 ± 0.4

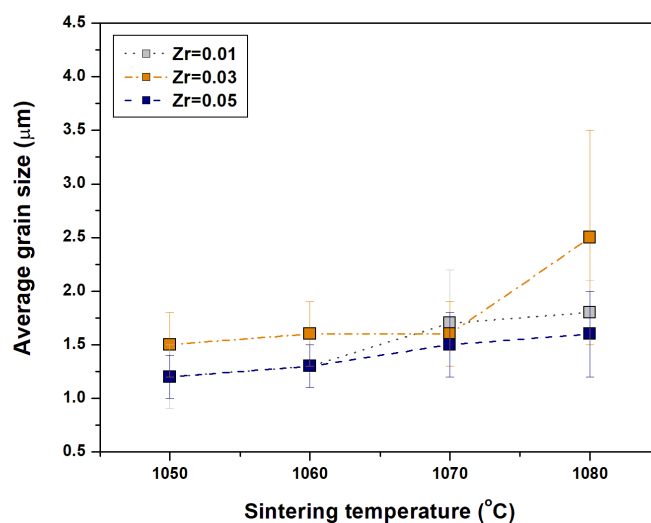


ภาพ 62 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากภาพ 57, 59 และ 61 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าและรอยหักของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที พบว่าผิวหน้าของเซรามิกในทุกๆ เงื่อนไข เกรนมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม และเมื่อนำเซรามิกทั้งหมดมาหาขนาดเกรนเฉลี่ยจะสามารถสรุปได้ดังตาราง 15 และกราฟในภาพ 63 โดยพบว่าขนาดเกรนใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้น และถ้าพิจารณาจากการเติมสารเจือ ZrO_2 จะพบว่าถ้าเพิ่มปริมาณของ ZrO_2 จาก 0.01 โดยโมล เป็น 0.03 โดยโมล ขนาดเกรนเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเป็น 0.05 โดยโมล ขนาดเกรนเฉลี่ยมีขนาดเล็กลง ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันกับที่เจือ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล นอกจากนี้ผลการตรวจสอบรอยหักของเซรามิกข้างต้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการแตกพบทั้งการแตกตามขอบเกรนและแตกแบบผ่าเกรน

ตาราง 15 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ ZrO_2 (mol)	ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก (μm) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	1.2 ± 0.3	1.3 ± 0.2	1.7 ± 0.5	1.8 ± 0.3
0.03	1.5 ± 0.3	1.6 ± 0.3	1.6 ± 0.3	2.5 ± 1.0
0.05	1.2 ± 0.2	1.3 ± 0.2	1.5 ± 0.3	1.6 ± 0.4



ภาพ 63 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

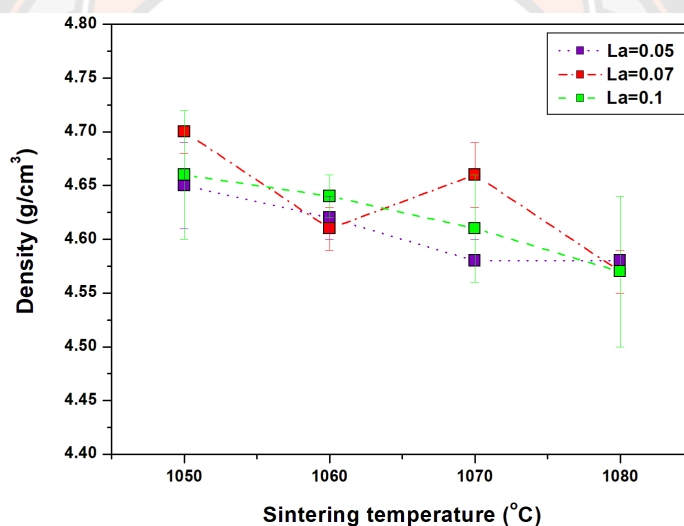
ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO

นำเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ทั้งหมดที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มาตรวจสอบหาความหนาแน่นด้วยวิธีอาร์คิมิดีส และคำนวณหาความหนาแน่นของเซรามิกทั้งหมดด้วยสมการ (11) จะได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตาราง 16 ความหนาแน่นของเซรามิก CLCTO เมื่อ $La_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ La_2O_3 (mol)	ความหนาแน่นของเซรามิก CLCTO (g/cm^3) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.05	4.65 ± 0.04	4.62 ± 0.02	4.58 ± 0.02	4.58 ± 0.00
0.07	4.70 ± 0.02	4.61 ± 0.02	4.66 ± 0.03	4.57 ± 0.02
0.1	4.66 ± 0.06	4.64 ± 0.02	4.61 ± 0.05	4.57 ± 0.07

จากตาราง 16 เป็นการตรวจสอบหาค่าความหนาแน่นของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามสมการ (11) จากตารางดังกล่าวข้างต้น พบว่าถ้าพิจารณาตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์ เซรามิกทั้ง 3 เงื่อนไขของปริมาณ La_2O_3 ซึ่งเท่ากับ 0.05-0.1 โดยโมลนั้น ค่าความหนาแน่นที่ได้จะมีลักษณะแนวโน้มเหมือนกัน นั่นคือ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ในอีกแง่หนึ่งถ้าพิจารณาตามปริมาณการเจือ La_2O_3 ที่เพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาแน่นที่ได้ส่วนมากจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ ณ อุณหภูมิเผาซินเตอร์ 1080°C ค่าความหนาแน่นจะลดลงอย่างเล็กน้อย ซึ่งใกล้เคียงกันมาก โดยเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล มีค่าอยู่ที่ 4.58-4.65, 4.57-4.7 และ 4.57-4.66 g/cm^3 ตามลำดับ และเมื่อนำค่าความหนาแน่นที่ได้ทั้งหมดมาเขียนแสดงผลให้อยู่ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่น จะได้กราฟดังภาพ 64

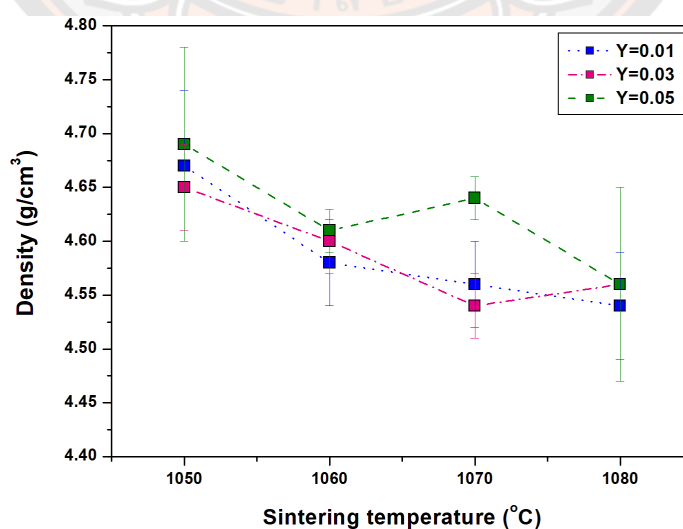


ภาพ 64 ความหนาแน่นของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตาราง 17 ความหนาแน่นของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ Y_2O_3 (mol)	ความหนาแน่นของเซรามิก CCTYO (g/cm^3) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	4.67 ± 0.07	4.58 ± 0.04	4.56 ± 0.04	4.54 ± 0.05
0.03	4.65 ± 0.04	4.60 ± 0.03	4.54 ± 0.03	4.56 ± 0.00
0.05	4.69 ± 0.09	4.61 ± 0.02	4.64 ± 0.02	4.56 ± 0.09

จากตาราง 17 เป็นการตรวจสอบหาค่าความหนาแน่นของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามสมการ (11) จากตารางดังกล่าวข้างต้น พบว่าถ้าพิจารณาตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์ เซรามิกทั้ง 3 เงื่อนไขของปริมาณ Y_2O_3 ซึ่งเท่ากับ 0.01-0.05 โดยโมลนั้น ค่าความหนาแน่นที่ได้จะมีลักษณะแนวโน้มเหมือนกัน นั่นคือ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ในอีกแง่หนึ่งค่าความหนาแน่นที่ได้ส่วนมากจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการเจือ Y_2O_3 ที่เพิ่มมากขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเซรามิก CLCTO เมื่อ $Y_2O_3=0.05-0.1$ โดยโมล มีค่าอยู่ที่ 4.54-4.67, 4.54-4.65 และ 4.56-4.69 g/cm^3 ตามลำดับ และเมื่อนำค่าความหนาแน่นที่ได้ทั้งหมดมาเขียนแสดงผลให้อยู่ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่น จะได้กราฟดังภาพ 65

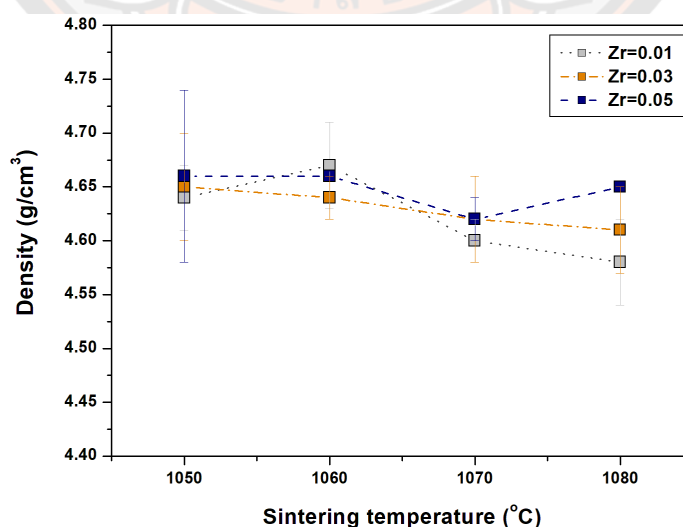


ภาพ 65 ความหนาแน่นของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตาราง 18 ความหนาแน่นของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ ZrO_2 (mol)	ความหนาแน่นของเซรามิก CCTZO(g/cm^3) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080 °C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	4.64 ± 0.03	4.67 ± 0.04	4.60 ± 0.02	4.58 ± 0.04
0.03	4.65 ± 0.05	4.64 ± 0.02	4.62 ± 0.04	4.61 ± 0.04
0.05	4.66 ± 0.08	4.66 ± 0.00	4.62 ± 0.02	4.65 ± 0.02

จากตาราง 18 เป็นการตรวจสอบหาค่าความหนาแน่นของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามสมการ (11) จากตารางดังกล่าวข้างต้น พบว่าถ้าพิจารณาตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์เซรามิกทั้ง 3 เงื่อนไขของปริมาณ ZrO_2 ซึ่งเท่ากับ 0.01-0.05 โดยโมลนั้น ค่าความหนาแน่นที่ได้จะมีลักษณะแนวโน้มเหมือนกัน นั่นคือ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น และค่าความหนาแน่นที่ได้ส่วนมากจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการเจือ ZrO_2 ที่เพิ่มมากขึ้น และใกล้เคียงกัน โดยเซรามิก CLCTO เมื่อ $ZrO_2=0.05-0.1$ โดยโมล มีค่าอยู่ที่ 4.58-4.67, 4.61-4.65 และ 4.62-4.66 g/cm^3 ตามลำดับ เมื่อนำค่าความหนาแน่นที่ได้ทั้งหมดมาเขียนแสดงผลให้อยู่ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่น จะได้กราฟดังภาพ 66



ภาพ 66 ความหนาแน่นของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

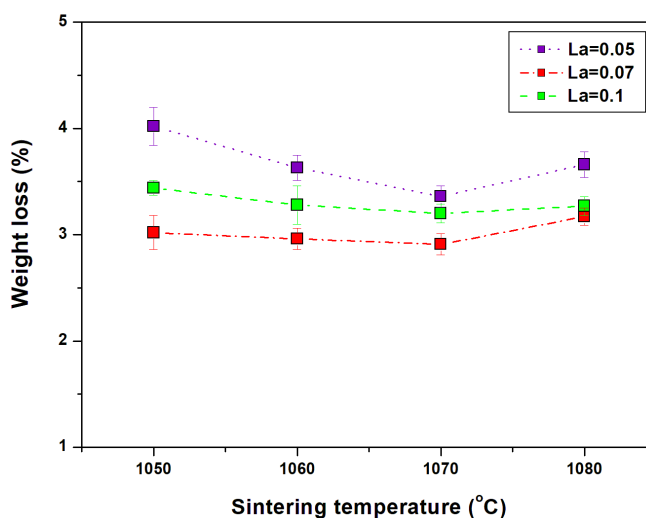
ผลการตรวจสอบร้อยละของน้ำหนักรั่วซึมของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO

นำเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ทั้งหมดที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มาตรวจสอบหาร้อยละของน้ำหนักรั่วซึมของเซรามิกทั้งหมดด้วยสมการ (13) จะได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตาราง 19 ร้อยละของน้ำหนักรั่วซึมของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ La_2O_3 (mol)	ร้อยละของน้ำหนักรั่วซึมของเซรามิก CLCTO (%) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.05	4.02 ± 0.18	3.63 ± 0.12	3.36 ± 0.10	3.66 ± 0.12
0.07	3.02 ± 0.16	2.96 ± 0.10	2.91 ± 0.10	3.17 ± 0.08
0.1	3.44 ± 0.07	3.28 ± 0.18	3.20 ± 0.09	3.27 ± 0.09

จากตาราง 19 เป็นการตรวจสอบหาร้อยละของน้ำหนักรั่วซึมของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามสมการ (13) จากตารางดังกล่าวข้างต้น พบว่าถ้าพิจารณาตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์เซรามิกทั้ง 3 เจือปนของปริมาณ La_2O_3 ซึ่งเท่ากับ 0.05-0.1 โดยโมลนั้น พบว่าร้อยละของน้ำหนักรั่วซึมที่ได้จะมีลักษณะแนวโน้มเหมือนกัน นั่นคือ มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาซินเตอร์ ในอีกแง่หนึ่งถ้าพิจารณาตามปริมาณการเจือ La_2O_3 ที่เพิ่มมากขึ้น ร้อยละของน้ำหนักรั่วซึมจะมีแนวโน้มลดลง และเมื่อนำร้อยละของน้ำหนักรั่วซึมที่ได้ทั้งหมดจากการคำนวณด้วยสมการ (13) มาเขียนแสดงผลให้อยู่ในรูปแบบของกราฟ จะได้กราฟดังภาพ 67



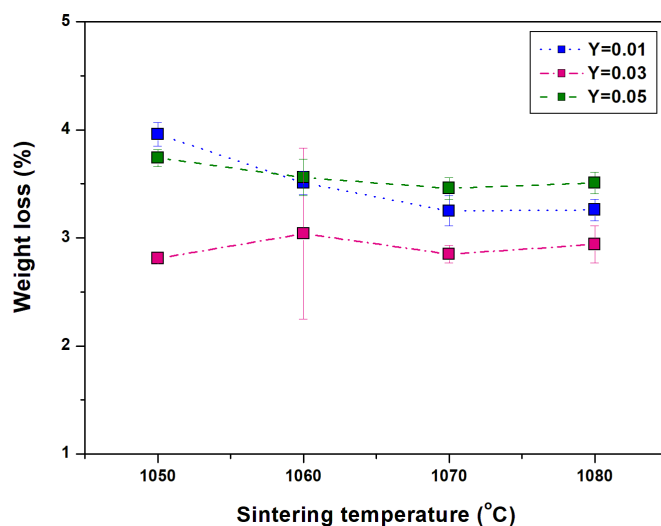
ภาพ 67 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตาราง 20 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ โดยโมล ที่ เเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ Y_2O_3 (mol)	ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของเซรามิก CCTYO (%) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	3.96 ± 0.11	3.51 ± 0.11	3.25 ± 0.14	3.26 ± 0.10
0.03	2.81 ± 0.04	3.04 ± 0.79	2.85 ± 0.08	2.94 ± 0.17
0.05	3.74 ± 0.08	3.56 ± 0.17	3.46 ± 0.10	3.51 ± 0.10

จากตาราง 20 เป็นการตรวจสอบหาร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามสมการ (13) จากตารางดังกล่าวข้างต้น พบว่าถ้าพิจารณาตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์เซรามิกทั้ง 3 เงื่อนไขของปริมาณ Y_2O_3 ซึ่งเท่ากับ 0.01-0.05 โดยโมลนั้น พบว่าร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียที่ได้จะมีลักษณะแนวโน้มเหมือนกัน มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาซินเตอร์ อย่างไรก็ตาม ที่เงื่อนไข $\text{Y}_2\text{O}_3=0.03$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ในอีกแง่หนึ่งถ้าพิจารณาตามปริมาณการเจือ Y_2O_3 ที่เพิ่มมากขึ้น ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียจะมีแนวโน้มลดลง และเมื่อนำ

ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียที่ได้ทั้งหมดจากการคำนวณด้วยสมการ (13) มาเขียนแสดงผลให้อยู่ในรูปแบบของกราฟ จะได้กราฟดังภาพ 68



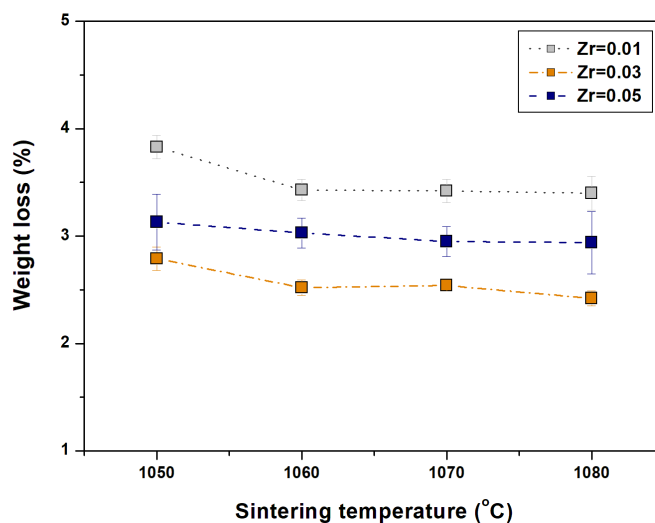
ภาพ 68 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตาราง 21 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ ZrO_2 (mol)	ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของเซรามิก CCTZO (%) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	3.83 ± 0.11	3.43 ± 0.10	3.42 ± 0.11	3.40 ± 0.16
0.03	2.79 ± 0.11	2.52 ± 0.07	2.54 ± 0.04	2.42 ± 0.07
0.05	3.13 ± 0.26	3.03 ± 0.14	2.95 ± 0.14	2.94 ± 0.29

จากตาราง 21 เป็นการตรวจสอบหาร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามสมการ (13) จากตารางดังกล่าวข้างต้น พบว่าถ้าพิจารณาตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์เซรามิกทั้ง 3 เงื่อนไขของปริมาณ ZrO_2 ซึ่งเท่ากับ 0.01-0.05 โดยโมลนั้น พบว่าร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียที่ได้จะมีลักษณะแนวโน้มเหมือนกัน นั่นคือ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ในอีกแง่

หนึ่งถ้าพิจารณาตามปริมาณการเจือ ZrO_2 ที่เพิ่มมากขึ้น ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียจะมีแนวโน้มลดลง และเมื่อนำร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียที่ได้ทั้งหมดจากการคำนวณด้วยสมการ (13) มาเขียนแสดงผลให้อยู่ในรูปแบบของกราฟ จะได้กราฟดังภาพ 69



ภาพ 69 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

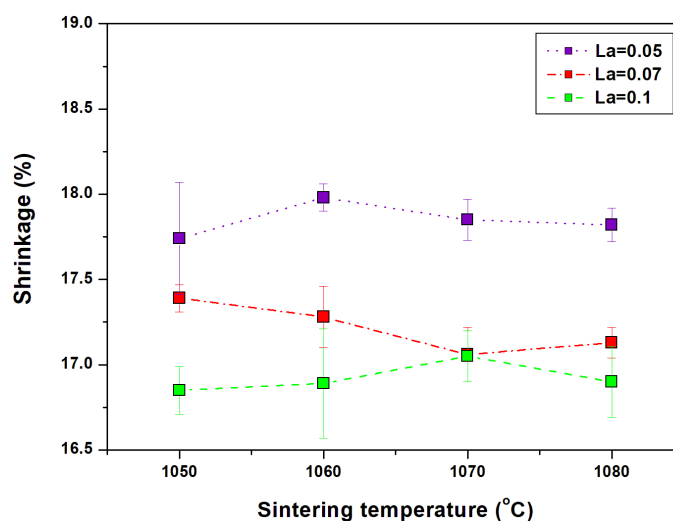
ผลการตรวจสอบร้อยละการหดตัวของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO

นำเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ทั้งหมดที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มาหาคำนวณหาค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิก โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซรามิกก่อนและหลังเผาซินเตอร์จากนั้นนำค่าที่วัดได้มาคำนวณด้วยสมการ (12) จะได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตาราง 22 ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ La_2O_3 (mol)	ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CLCTO (%) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.05	17.74 ± 0.33	17.98 ± 0.08	17.85 ± 0.12	17.82 ± 0.10
0.07	17.39 ± 0.08	17.28 ± 0.18	17.06 ± 0.16	17.13 ± 0.09
0.1	16.85 ± 0.14	16.89 ± 0.32	17.05 ± 0.15	16.90 ± 0.21

จากตาราง 22 แสดงร้อยละการหดตัวของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามสมการ (12) จากตารางดังกล่าวข้างต้น พบว่าอุณหภูมิเผาซินเตอร์เซรามิกทั้ง 3 เงื่อนไขของปริมาณ La_2O_3 ซึ่งเท่ากับ 0.05-0.1 โดยโมลนั้น ร้อยละการหดตัวที่ได้ในแต่ละเงื่อนไขมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นที่ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล ร้อยละการหดตัวจะลดลงเล็กน้อย ในอีกแง่หนึ่งถ้าพิจารณาตามปริมาณการเจือ La_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ร้อยละการหดตัวของเซรามิกที่ได้ส่วนมากจะมีแนวโน้มลดลง และเมื่อนำมาเขียนให้อยู่ในรูปแบบของกราฟ จะได้กราฟดังภาพ 70 ดังนี้

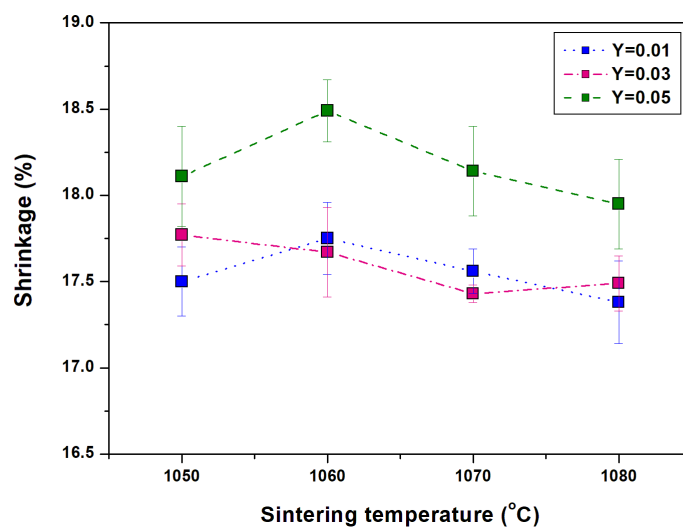


ภาพ 70 ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตาราง 23 ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ Y_2O_3 (mol)	ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CCTYO (%) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	17.50 ± 0.20	17.75 ± 0.21	17.56 ± 0.13	17.38 ± 0.24
0.03	17.77 ± 0.18	17.67 ± 0.26	17.43 ± 0.05	17.49 ± 0.16
0.05	18.11 ± 0.29	18.49 ± 0.18	18.14 ± 0.26	17.95 ± 0.26

จากตาราง 23 แสดงร้อยละการหดตัวของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ โดยโมล ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลวเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามสมการ (12) จากตาราง 23 พบว่าอุณหภูมิเผาซินเตอร์เซรามิกทั้ง 3 เงื่อนไขของปริมาณการเติม $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ โดยโมลนั้น ร้อยละการหดตัวที่ได้จะมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ในอีกแง่หนึ่งถ้าพิจารณาตามปริมาณการเจือ Y_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ร้อยละการหดตัวของเซรามิกที่ได้ส่วนมากจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อนำมาเขียนให้อยู่ในรูปแบบของกราฟ จะได้กราฟดังภาพ 71 ดังนี้

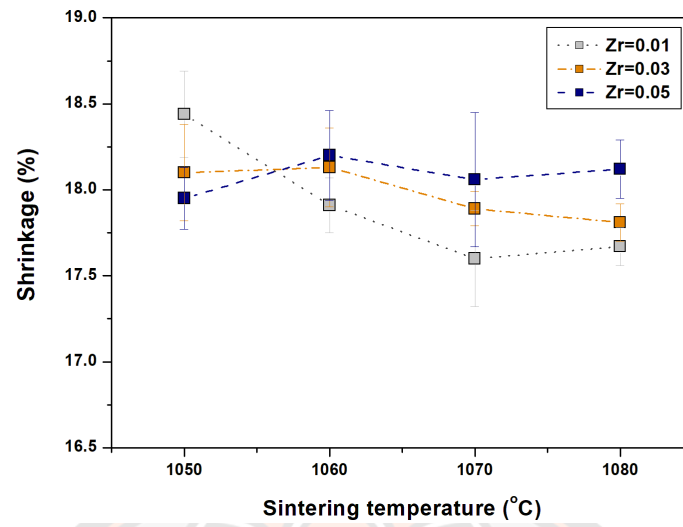


ภาพ 71 ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

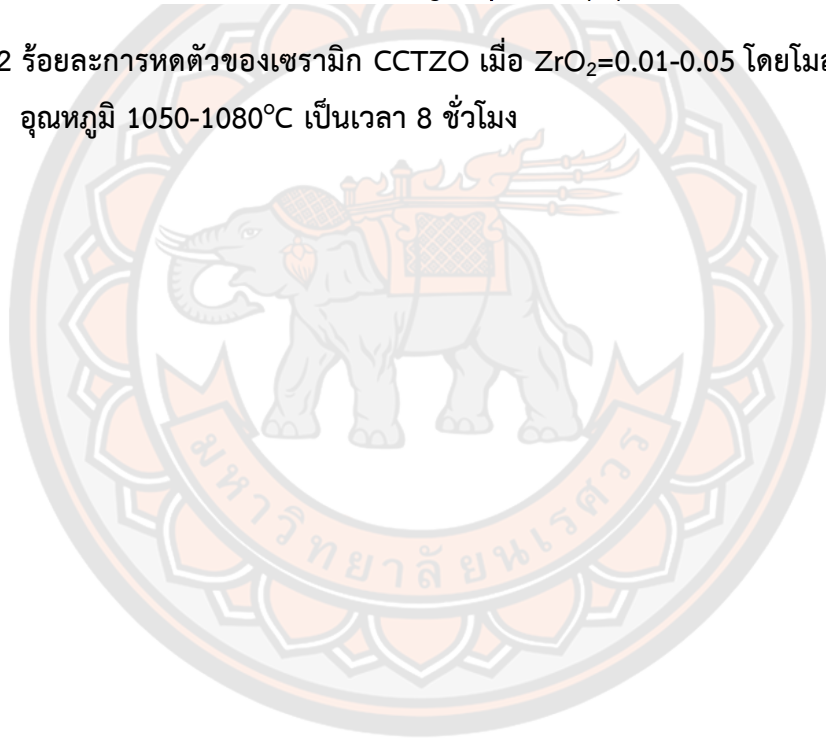
ตาราง 24 ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ Y_2O_3 (mol)	ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CCTYO (%) ที่เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1050	1080
0.01	18.44 ± 0.25	17.91 ± 0.16	17.60 ± 0.28	17.67 ± 0.11
0.03	18.10 ± 0.28	18.13 ± 0.23	17.89 ± 0.10	17.81 ± 0.11
0.05	17.95 ± 0.18	18.20 ± 0.26	18.06 ± 0.39	18.12 ± 0.17

จากตาราง 24 แสดงร้อยละการหดตัวของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล ที่เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามสมการ (12) พบว่าทั้ง 3 เงื่อนไขของปริมาณ ZrO_2 ซึ่งเท่ากับ 0.01-0.05 โดยโมล ร้อยละการหดตัวที่ได้จะมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิเฝ้าซินเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นที่ $ZrO_2=0.05$ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ร้อยละการหดตัวของเซรามิกที่ได้ส่วนมากจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 1050°C จะมีค่าลดลงเล็กน้อย แสดงดังภาพ 72

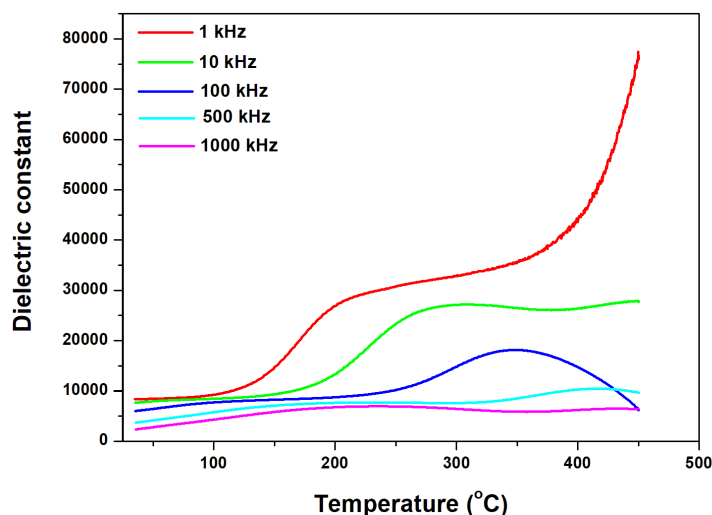


ภาพ 72 ร้อยละการหดตัวของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

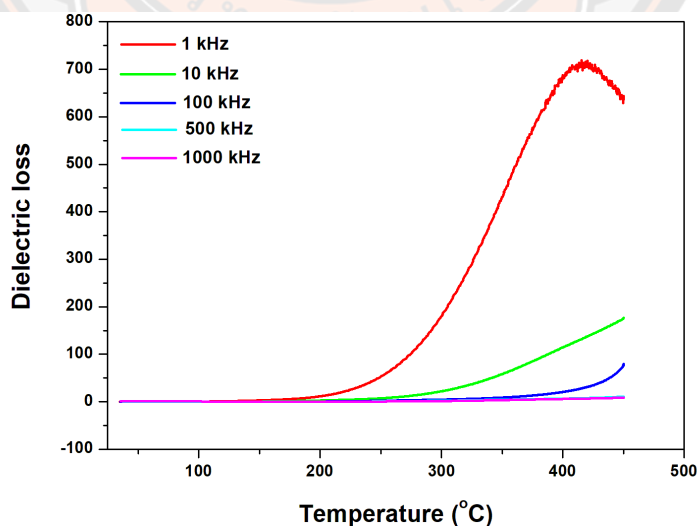


ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO

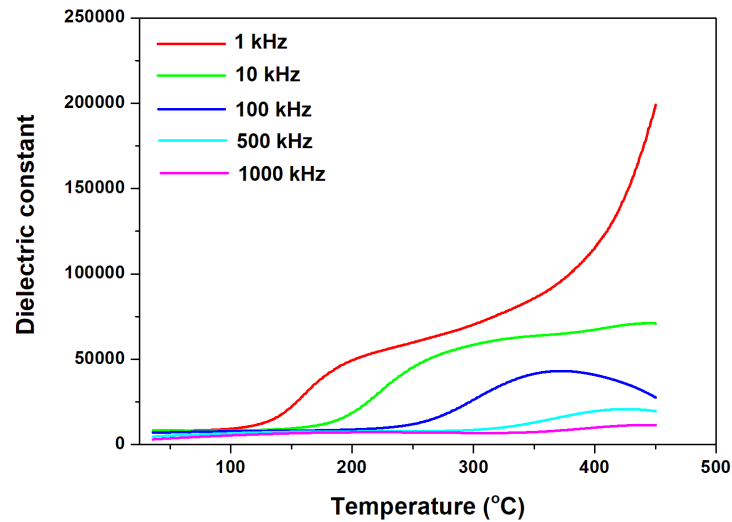
จากผลการวัดค่าความหนาแน่น พบว่าเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าความหนาแน่นมากที่สุดในทุกเงื่อนไขการเติมปริมาณสารเจือ จึงนำเซรามิกดังกล่าวไปวัดสมบัติไดอิเล็กทริก โดยทำการวัดหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 และ 1000 kHz เทียบกับอุณหภูมิตั้งแต่ 35-450°C ได้ผลดังต่อไปนี้



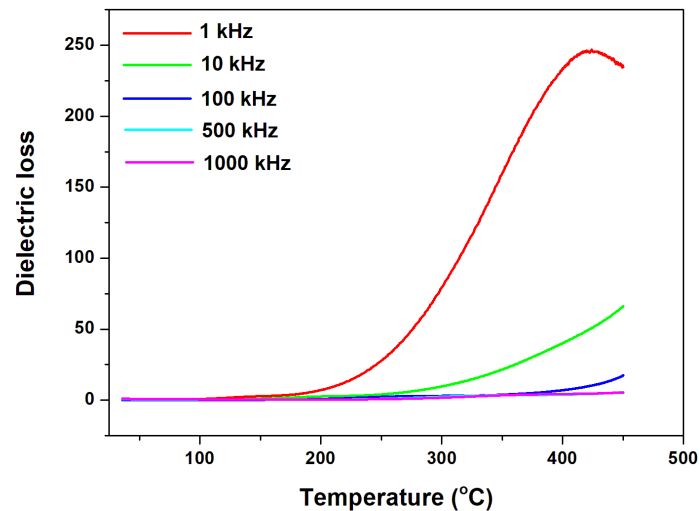
ภาพ 73 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



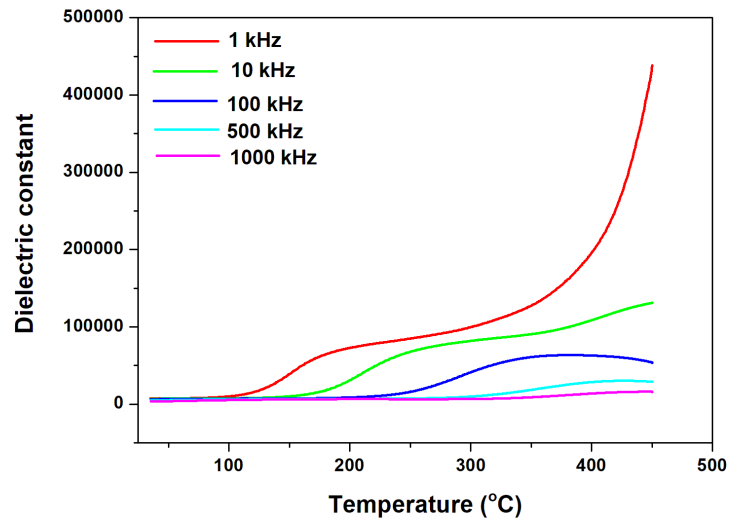
ภาพ 74 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



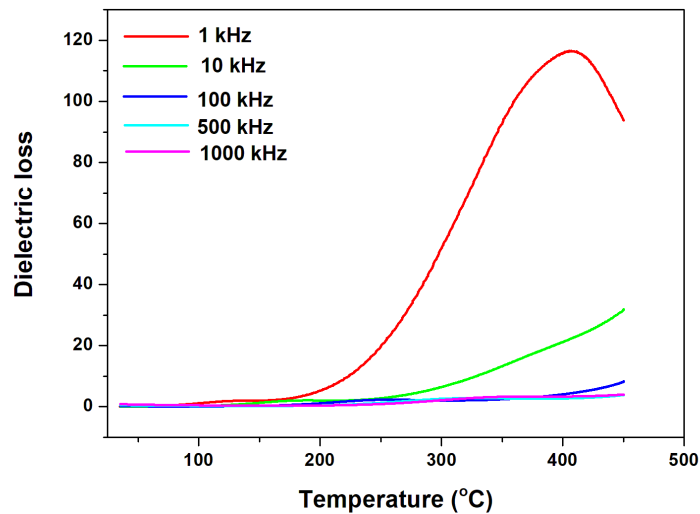
ภาพ 75 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



ภาพ 76 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

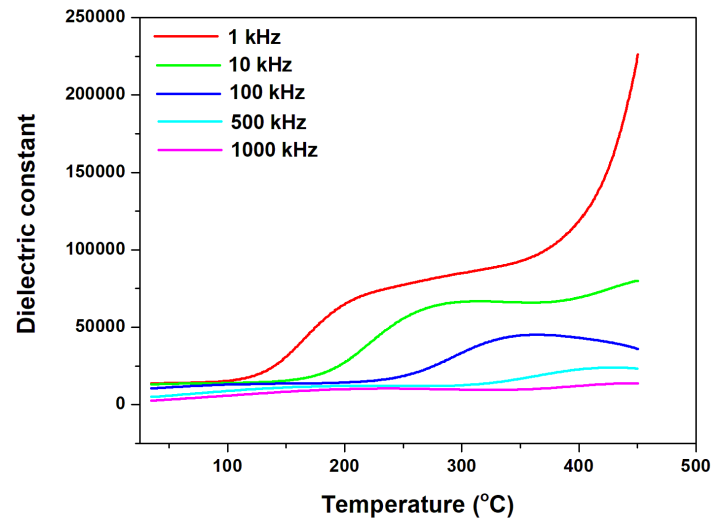


ภาพ 77 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

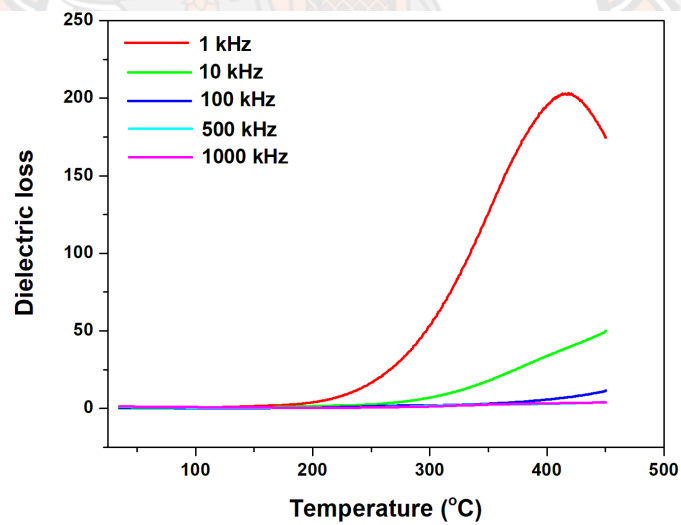


ภาพ 78 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

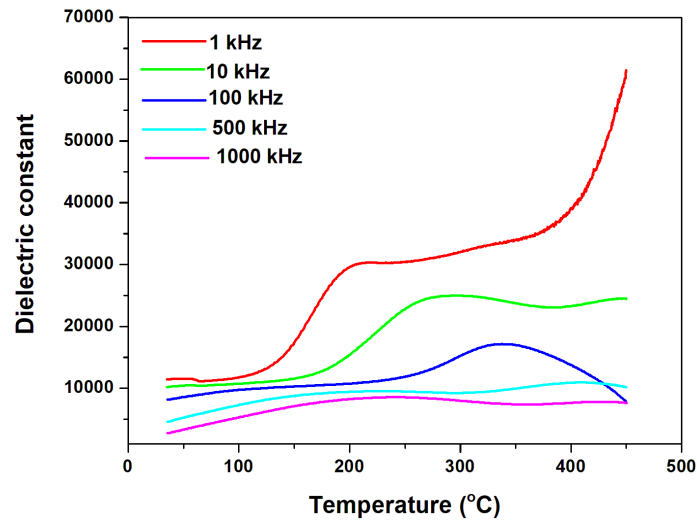
จากภาพ 73-78 เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าในทุกๆ เจือปนของเซรามิกจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าสูงมาก พบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำที่สุดของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล ทำการวัดที่ความถี่ 1 kHz มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.04 และ 0.06 ตามลำดับ และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 8342, 8067 และ 7259 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณการเจือ La_2O_3 เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลง โดยเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล จะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุด เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Cheng และคณะ [4] ที่ได้ศึกษาการเตรียมเซรามิก $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ แปรค่า x หรือ La_2O_3 เท่ากับ 0, 3, 6 และ 9 mol% ด้วยกระบวนการปฏิกิริยาสถานะของแข็งของเซรามิก $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ เมื่อ $x=0$ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงประมาณ 10000 และมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงซึ่งอยู่ที่ 0.2 เมื่อทำการวัด ณ อุณหภูมิห้อง ที่ความถี่ 10^3 Hz จะเห็นได้ว่าการเจือ La_2O_3 ทำให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงอย่างมีนัยยะ โดยเฉพาะการลดค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลงไปอย่างมาก นอกจากนี้ยังพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกทั้งหมดในทุกๆ ช่วงความถี่ที่ทำการวัด มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 35-150°C



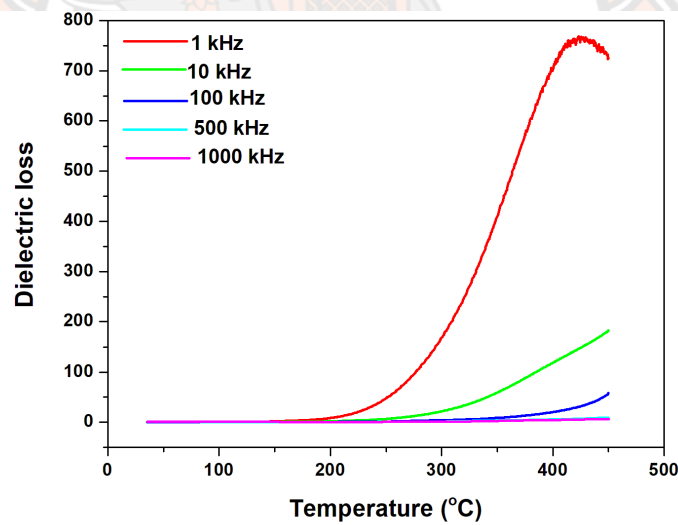
ภาพ 79 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



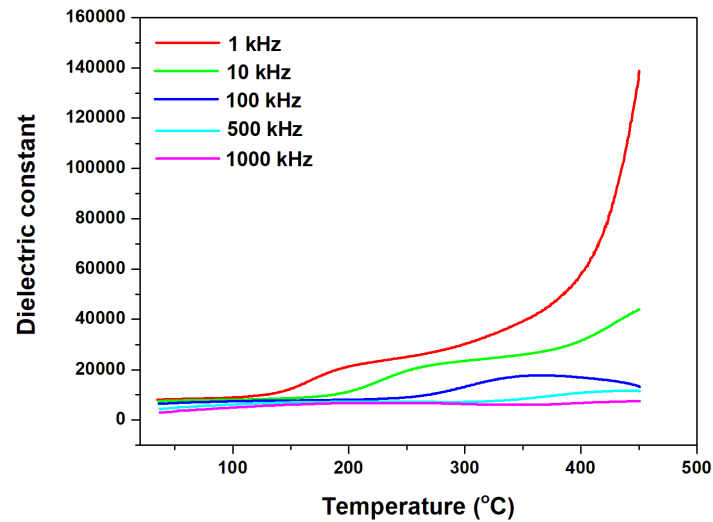
ภาพ 80 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



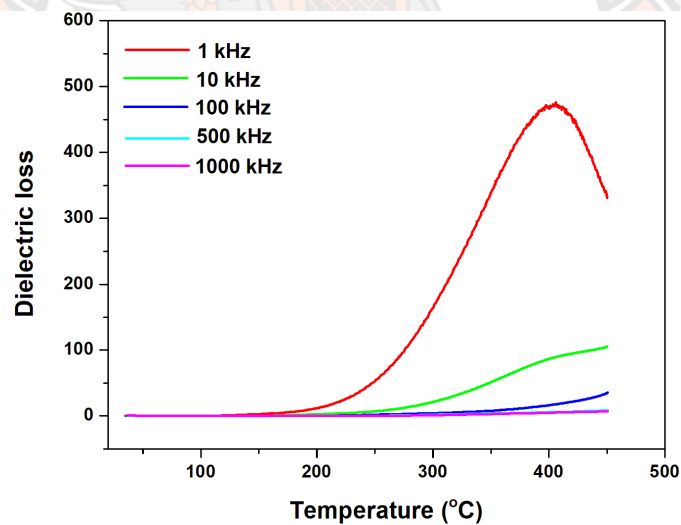
ภาพ 81 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



ภาพ 82 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

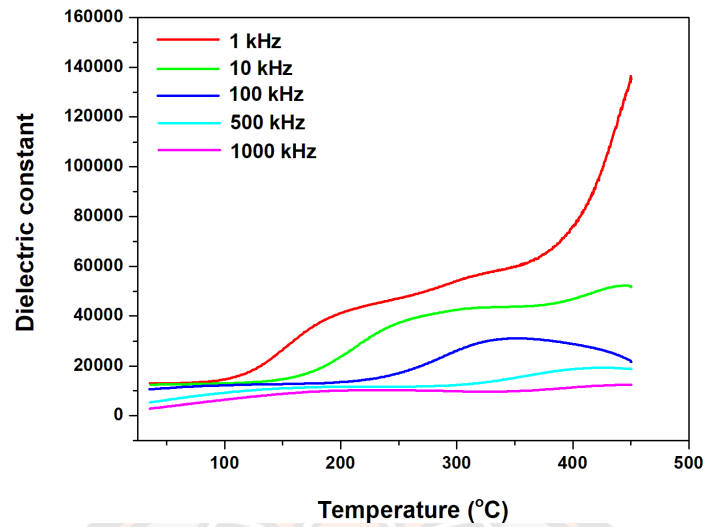


ภาพ 83 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

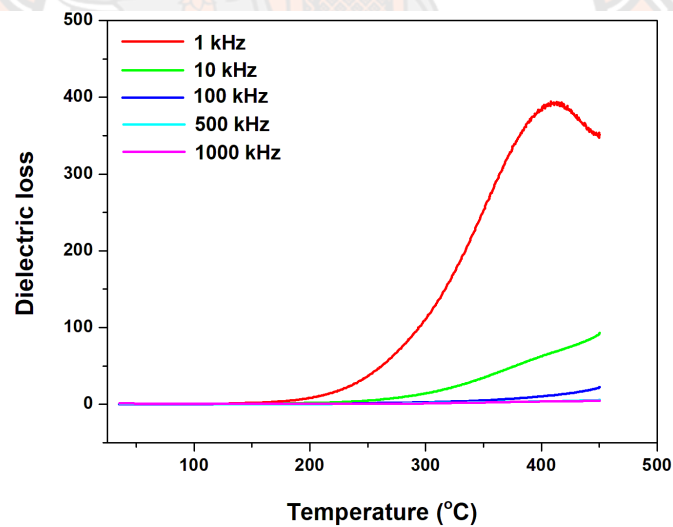


ภาพ 84 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

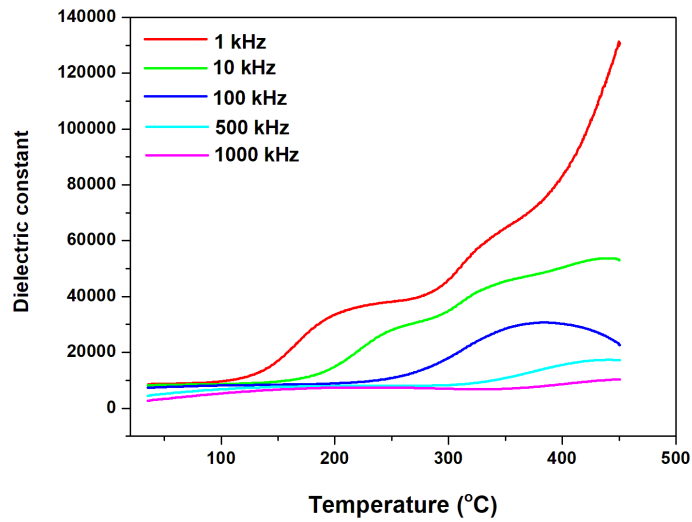
จากภาพ 79-84 เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าในทุกๆ เงื่อนไขของเซรามิกจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง เมื่อความถี่ในการวัดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกยังถือว่ามีค่าค่อนข้างสูง แต่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ได้มีค่าสูงมาก โดยพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำที่สุดของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล พบ ณ ความถี่ที่ใช้ในการวัดเท่ากับ 1 kHz มีค่าเท่ากับ 0.04, 0.07 และ 0.06 ตามลำดับ และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 13940, 11592 และ 8186 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณการเจือ Y_2O_3 เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลง โดยเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล จะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุด ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Xu และคณะ [3] ได้ศึกษาการเตรียมเซรามิก $CaCu_3Ti_4O_{12}$, $CaCu_3Ti_{3.95}Zr_{0.05}O_{12}$, $CaCu_3Ti_{3.97}Y_{0.03}O_{11.985}$ และ $CaCu_3Ti_{3.92}Y_{0.03}Zr_{0.05}O_{11.985}$ ด้วยวิธีการเผาไหม้ ซึ่งเซรามิก $CaCu_3Ti_4O_{12}$ ทำการวัด ณ อุณหภูมิห้อง ที่ความถี่ 10 kHz มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงประมาณ 10994 และมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ที่ 0.07 จะเห็นได้ว่าการเจือ $Y_2O_3=0.01$ ทำให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่างานวิจัยของ Xu และคณะ [3] แต่ที่สำคัญคือสามารถช่วยลดค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลงได้ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกทั้งหมดในทุกๆ ช่วงความถี่ของการวัด มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 35-150°C



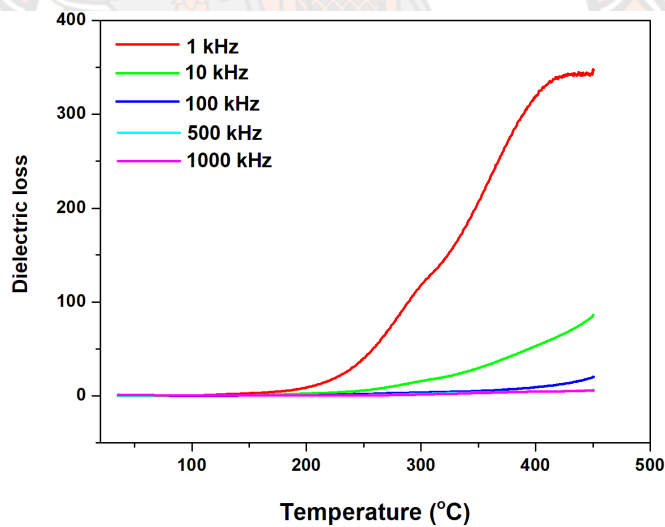
ภาพ 85 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



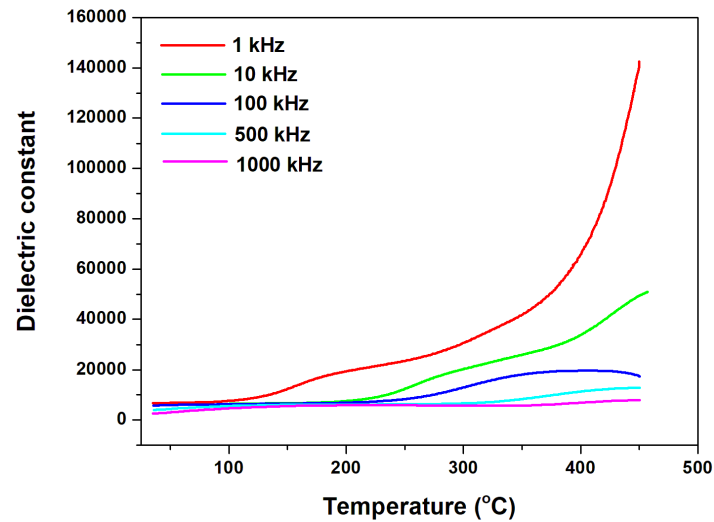
ภาพ 86 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



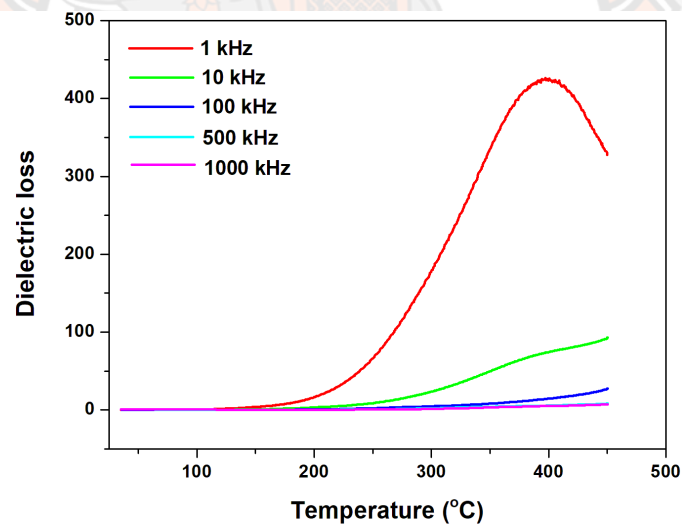
ภาพ 87 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



ภาพ 88 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เฝ้าซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



ภาพ 89 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

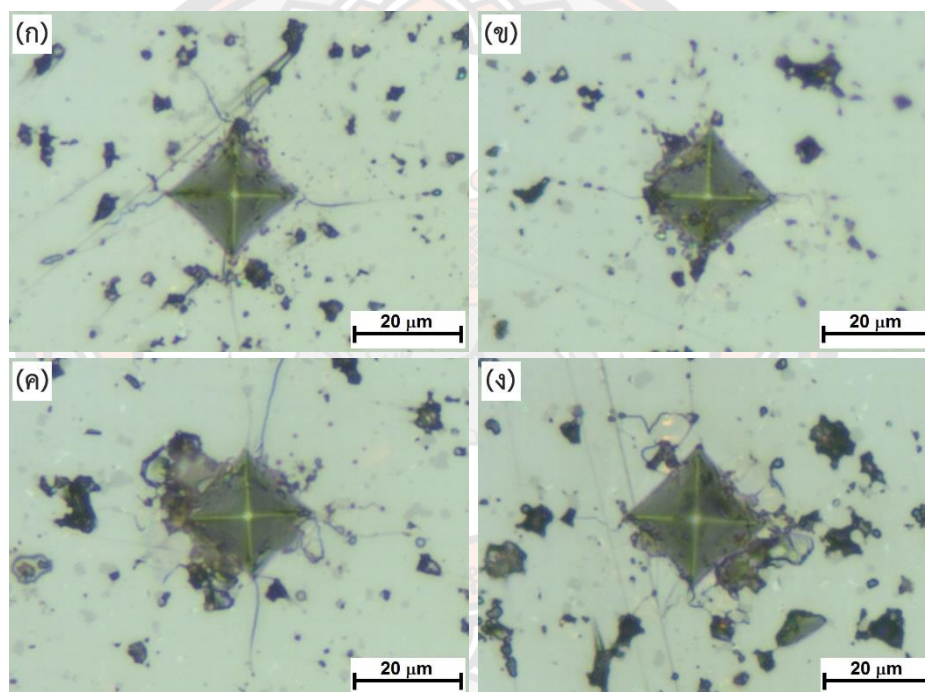


ภาพ 90 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากภาพ 85-90 เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล ทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C ที่ความถี่ 1-1000 kHz เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าในทุกๆ เจ็อนไซของเซรามิกจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง เมื่อความถี่ในการวัดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกยังถือว่ามีค่าค่อนข้างสูง แต่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ได้มีค่าสูงมาก โดยพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำที่สุดของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล พบ ณ ความถี่ที่ใช้ในการวัดเท่ากับ 1 kHz มีค่าเป็น 0.04, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 12902, 8648 และ 6757 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณการเจือ ZrO_2 เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลง โดยเซรามิก CCTYO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.03$ โดยโมล จะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุด ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Xu และ คณะ [3] ได้ศึกษาการเตรียมเซรามิก $CaCu_3Ti_4O_{12}$, $CaCu_3Ti_{3.95}Zr_{0.05}O_{12}$, $CaCu_3Ti_{3.97}Y_{0.03}O_{11.985}$ และ $CaCu_3Ti_{3.92}Y_{0.03}Zr_{0.05}O_{11.985}$ ด้วยวิธีการเผาไหม้ ซึ่งเซรามิก $CaCu_3Ti_4O_{12}$ เมื่อทำการวัด ณ อุณหภูมิห้อง ที่ความถี่ 10 kHz มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงประมาณ 10994 และมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ที่ 0.07 จะเห็นได้ว่าการเจือ $ZrO_2=0.01$ ทำให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่างานวิจัยของ Xu และคณะ [3] แต่ที่สำคัญคือสามารถช่วยลดค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลงได้ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกทั้งหมดในทุกๆ ช่วงความถี่ของการวัด มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 35-150°C

ผลการตรวจสอบค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO

นำเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ทั้งหมดที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มาหาตรวจสอบค่าความแข็งระดับจุลภาคด้วยเครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาคที่มีหัวกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงในการกด 300 กรัม เป็นเวลา 15 วินาที โดยกดตัวอย่างละ 10 จุด จากนั้นนำรอยกดไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้กำลังขยาย 50 เท่า และนำรอยกดที่ได้มาวัดเส้นทแยงมุมเฉลี่ยเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความแข็งระดับจุลภาคจากสมการ (4) ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

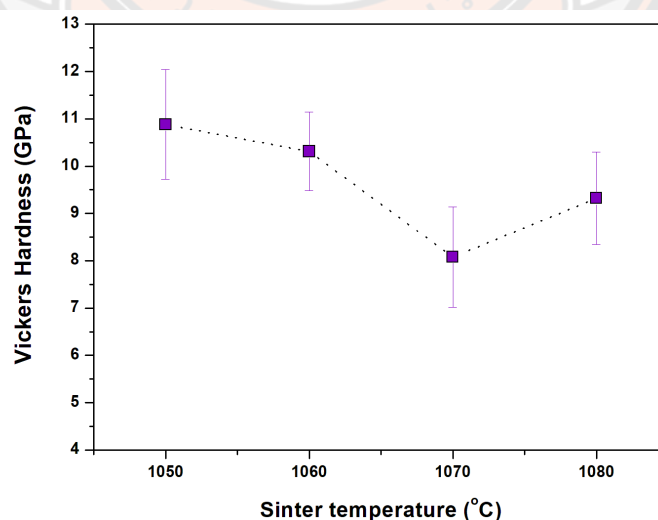


ภาพ 91 รูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่าของรอยกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้โหลด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

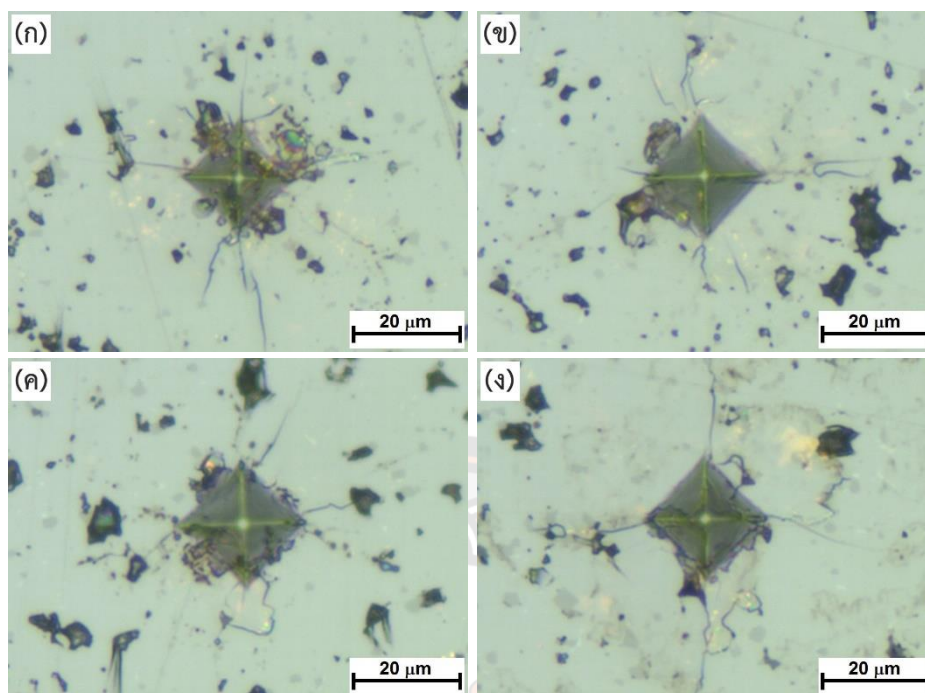
จากภาพ 91 เป็นรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่าของรอยกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้โหลด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์สูงขึ้น รอยกดที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อนำไปหาค่าความแข็งระดับจุลภาค จะได้ตาราง 25 พบว่าแนวโน้มของค่าความแข็งระดับจุลภาคลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่มีค่าความหนาแน่นลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มเช่นกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8.08-10.88 GPa เมื่อนำค่าความแข็งระดับจุลภาคที่ได้จากตาราง 25 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์ จะได้ดังกราฟในภาพ 92

ตาราง 25 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (GPa)
1050	10.88 ± 1.16
1060	10.31 ± 0.83
1070	8.08 ± 1.06
1080	9.32 ± 0.98



ภาพ 92 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

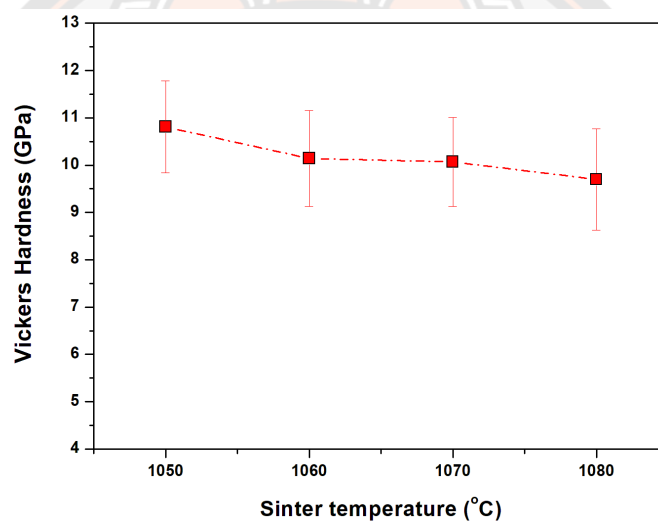


ภาพ 93 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

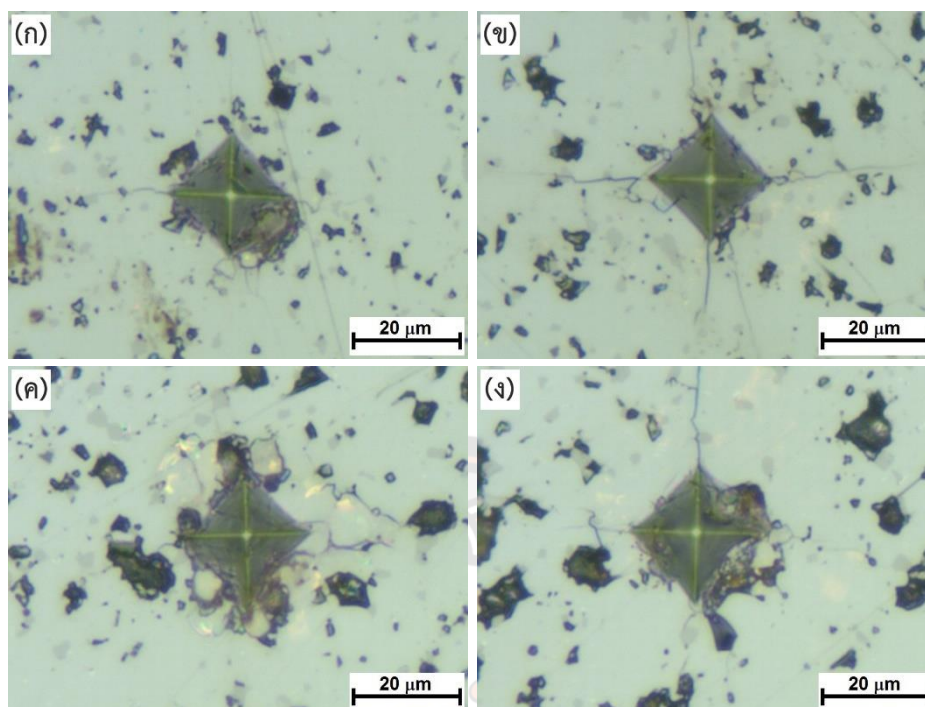
จากภาพ 93 เป็นรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่าของรอยกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้โหลด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์สูงขึ้น รอยกดที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อนำไปหาค่าความแข็งระดับจุลภาค จะได้ตาราง 26 พบว่ามีแนวโน้มของค่าความแข็งระดับจุลภาคลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่มีค่าความหนาแน่นลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มเช่นกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 9.70-10.81 GPa เมื่อนำค่าความแข็งระดับจุลภาคที่ได้จากตาราง 26 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์จะได้ดังกราฟในภาพ 94

ตาราง 26 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (GPa)
1050	10.81 ± 0.97
1060	10.14 ± 1.01
1070	10.07 ± 0.94
1080	9.70 ± 1.07



ภาพ 94 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.07$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

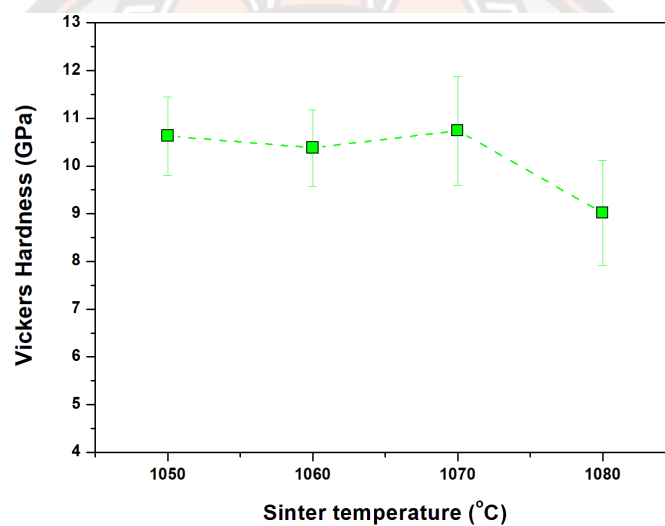


ภาพ 95 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

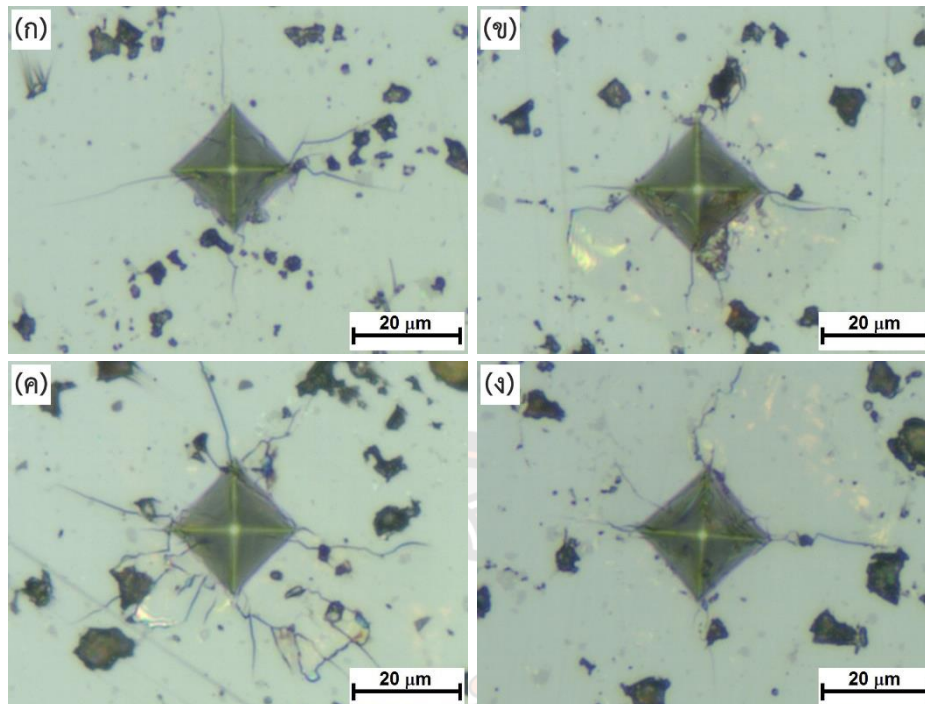
จากภาพ 95 เป็นรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่าของรอยกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้โหลด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์สูงขึ้น รอยกดที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อนำไปหาค่าความแข็งระดับจุลภาค จะได้ตาราง 27 พบว่ามีแนวโน้มของค่าความแข็งระดับจุลภาคลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่มีค่าความหนาแน่นลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มเช่นกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 9.02-10.74 GPa เมื่อนำค่าความแข็งระดับจุลภาคที่ได้จากตาราง 27 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์จะได้ดังกราฟในภาพ 96

ตาราง 27 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (GPa)
1050	10.63 ± 0.82
1060	10.38 ± 0.80
1070	10.74 ± 1.14
1080	9.02 ± 1.10



ภาพ 96 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

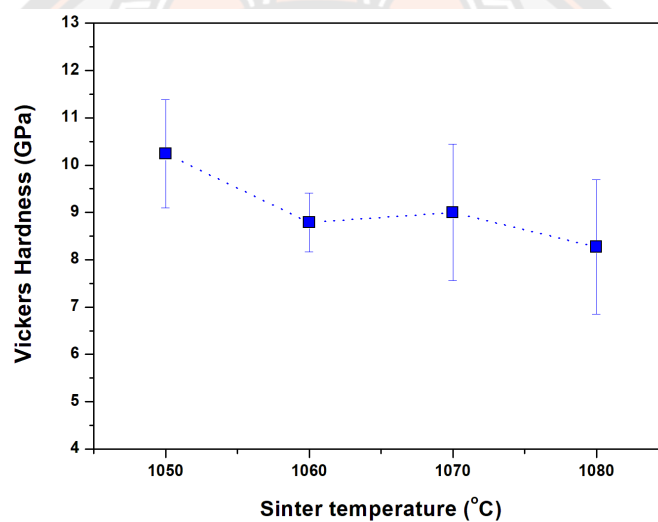


ภาพ 97 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

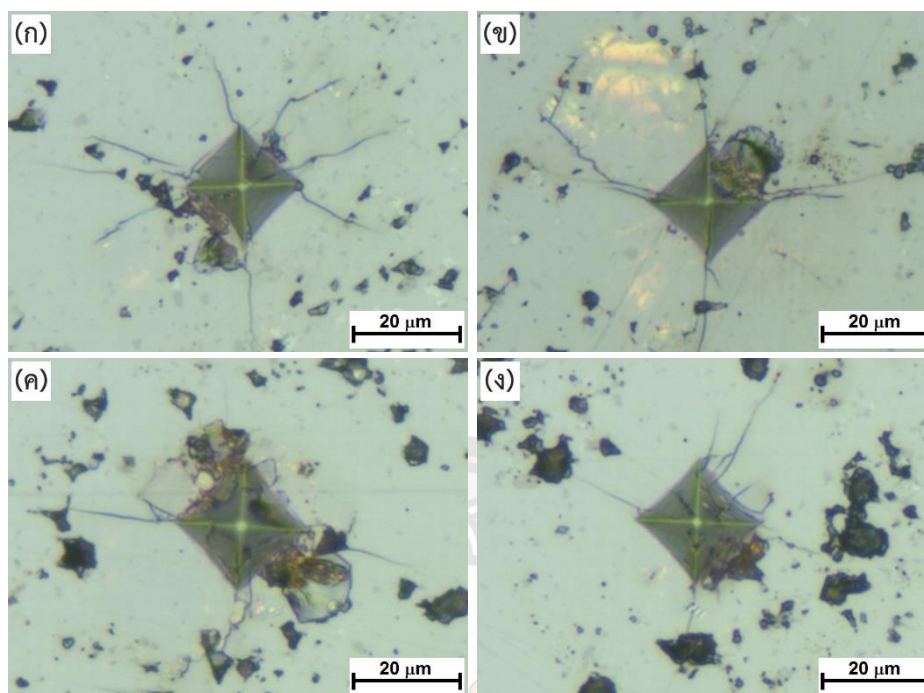
จากภาพ 97 เป็นรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่าของรอยกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้โหลด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์สูงขึ้น รอยกดที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อนำไปหาค่าความแข็งระดับจุลภาค จะได้ตาราง 28 พบว่ามีแนวโน้มของค่าความแข็งระดับจุลภาคลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่มีค่าความหนาแน่นลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มเช่นกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8.27-11.84 GPa เมื่อนำค่าความแข็งระดับจุลภาคที่ได้จากตาราง 28 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์จะได้ดังกราฟในภาพ 98

ตาราง 28 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (GPa)
1050	10.24 ± 1.14
1060	8.79 ± 0.62
1070	9.00 ± 1.44
1080	8.27 ± 1.42



ภาพ 98 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

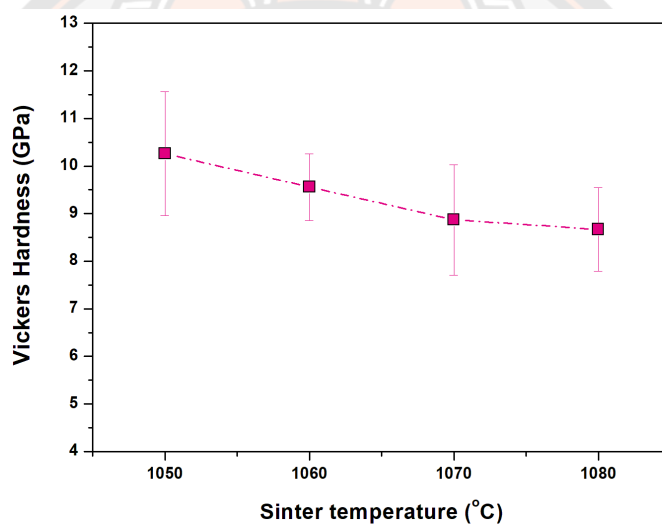


ภาพ 99 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

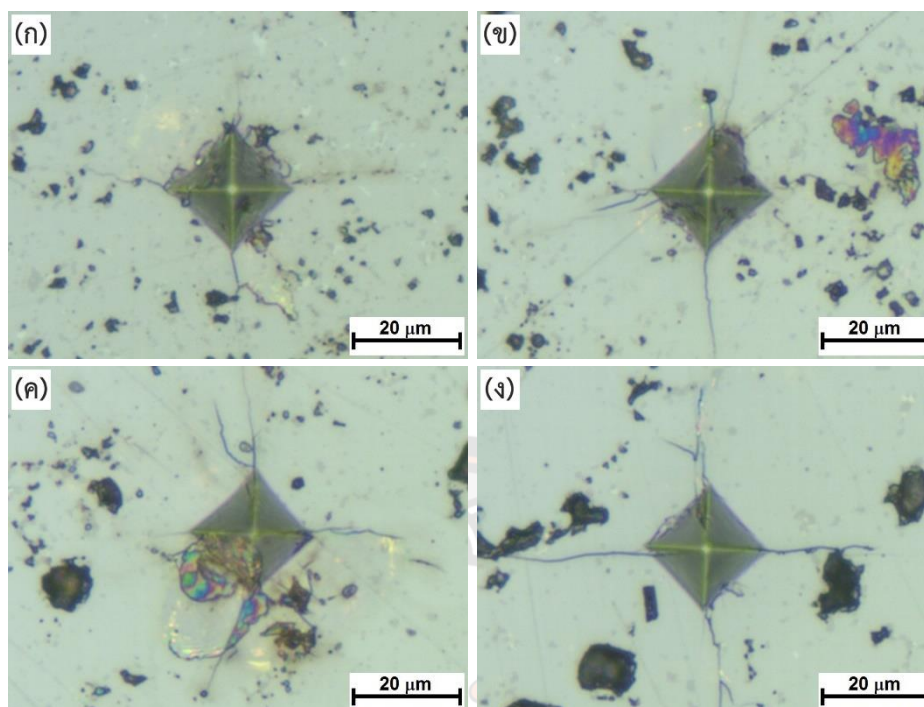
จากภาพ 99 เป็นรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่าของรอยกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้โหลด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์สูงขึ้น รอยกดที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์สูงขึ้น เมื่อนำไปหาค่าความแข็งระดับจุลภาค จะได้ดังตาราง 29 พบว่ามีแนวโน้มของค่าความแข็งระดับจุลภาคลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่มีค่าความหนาแน่นลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8.67-10.26 GPa เมื่อนำค่าความแข็งระดับจุลภาคที่ได้จากตาราง 29 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์จะได้ดังกราฟในภาพ 100

ตาราง 29 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (GPa)
1050	10.26 ± 1.30
1060	9.56 ± 0.70
1070	8.87 ± 1.16
1080	8.67 ± 0.88



ภาพ 100 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.03$ โดยโมล ซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

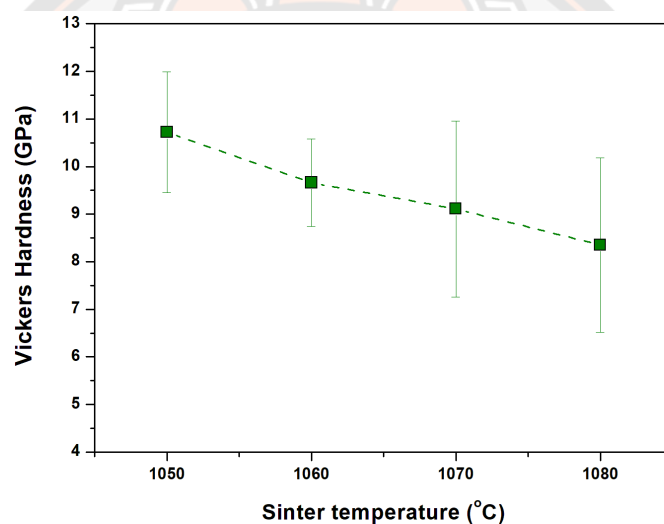


ภาพ 101 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โมล เปอร์เซ็นต์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

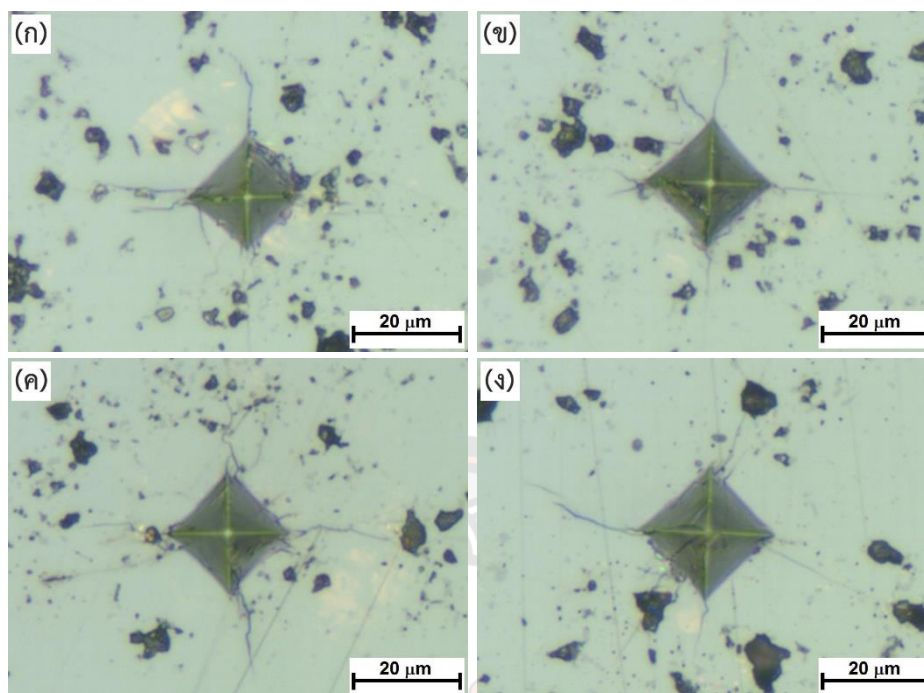
จากภาพ 101 เป็นรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่าของรอยกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้โหลด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โมล เปอร์เซ็นต์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากรอยกดที่ได้พบว่ามีขนาดใกล้เคียงกัน แต่เมื่อนำไปหาค่าความแข็งระดับจุลภาค จะได้ตาราง 30 พบว่ามีแนวโน้มของค่าความแข็งระดับจุลภาคลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่มีค่าความหนาแน่นลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาขึ้นเช่นกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8.35-10.72 GPa เมื่อนำค่าความแข็งระดับจุลภาคที่ได้จากตาราง 30 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาขึ้นจะได้กราฟในภาพ 102

ตาราง 30 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (GPa)
1050	10.72 ± 1.27
1060	9.66 ± 0.92
1070	9.11 ± 1.85
1080	8.35 ± 1.83



ภาพ 102 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

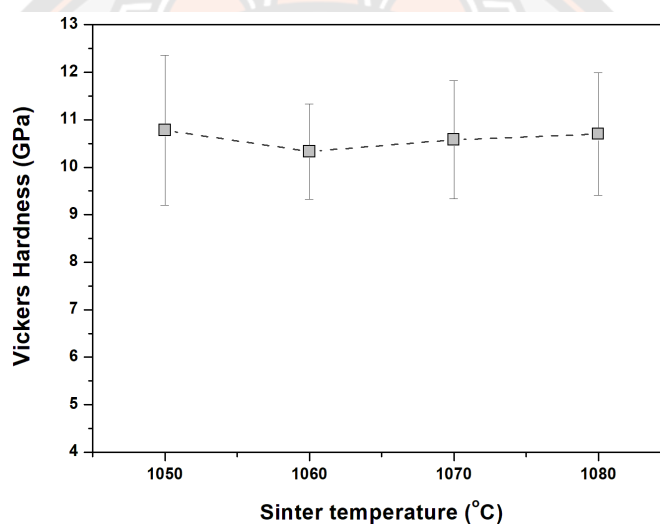


ภาพ 103 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

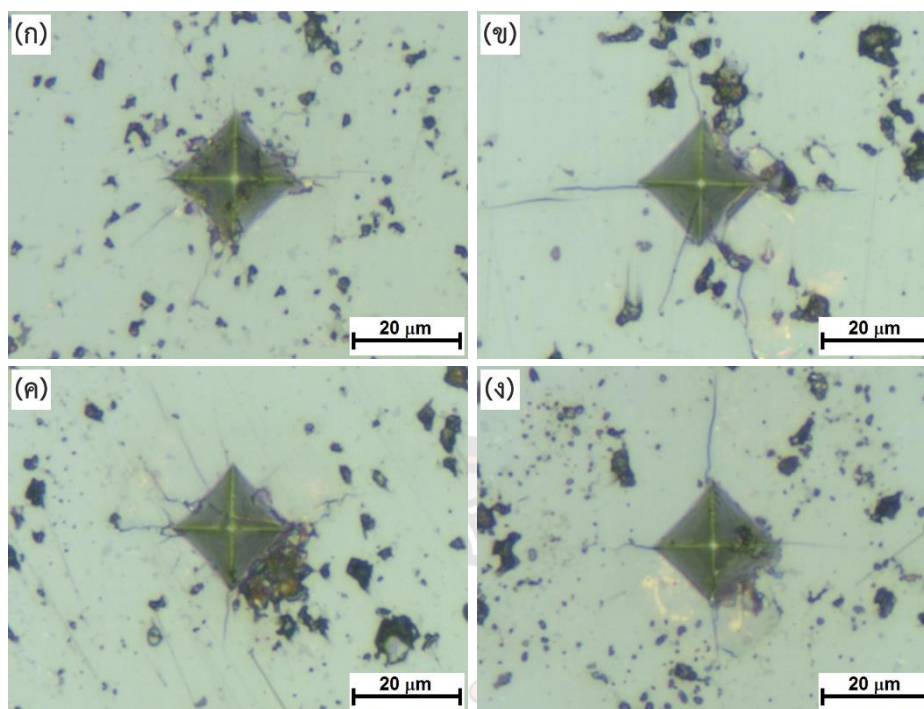
จากภาพ 103 เป็นรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่าของรอยกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้โหลด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่ารอยกดมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปหาค่าความแข็งระดับจุลภาค จะได้ตาราง 31 พบว่ามีแนวโน้มของค่าความแข็งระดับจุลภาคลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ถือว่าค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่มีค่าความหนาแน่นลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มเช่นกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 10.33-10.78 GPa เมื่อนำค่าความแข็งระดับจุลภาคที่ได้จากตาราง 31 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์จะได้ดังกราฟในภาพ 104

ตาราง 31 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โมล เเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (GPa)
1050	10.78 ± 1.58
1060	10.33 ± 1.00
1070	10.58 ± 1.24
1080	10.70 ± 1.29



ภาพ 104 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $ZrO_2=0.01$ โมล เเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

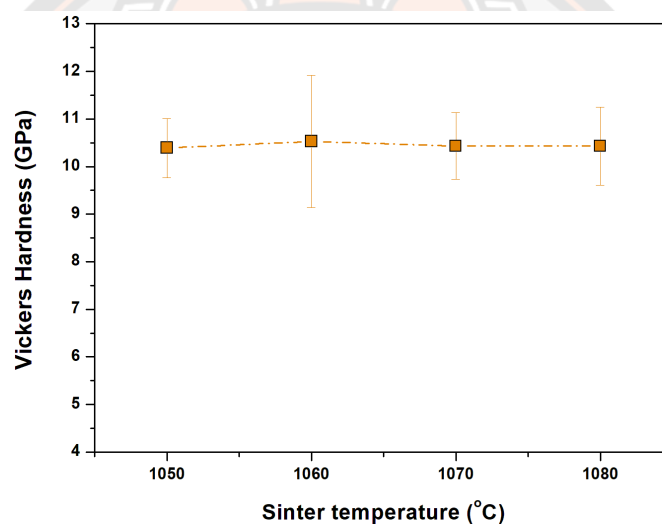


ภาพ 105 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) $1080^{\circ}C$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

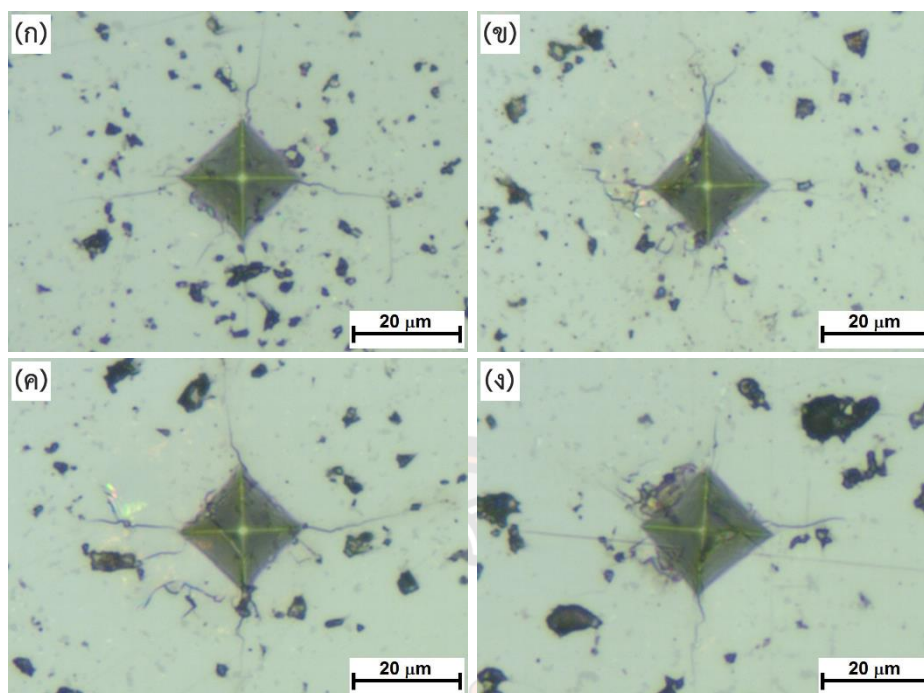
จากภาพ 105 เป็นรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่าของรอยกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้โหลด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050- $1080^{\circ}C$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ถ้าสังเกตจากรอยกดที่ได้พบว่ามีขนาดใกล้เคียงกัน แต่เมื่อนำไปหาค่าความแข็งระดับจุลภาค จะได้ตาราง 32 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จาก $1050^{\circ}C$ เป็น $1060^{\circ}C$ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1070- $1080^{\circ}C$ ค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งค่าที่ได้ทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันมากเพิ่มขึ้นและลดลงเพียงน้อยเท่านั้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 10.39-10.53 GPa เมื่อนำค่าความแข็งระดับจุลภาคที่ได้จากตาราง 32 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์จะได้นี้ดังกราฟในภาพ 106

ตาราง 32 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (GPa)
1050	10.39 ± 0.62
1060	10.53 ± 1.39
1070	10.43 ± 0.70
1080	10.43 ± 0.82



ภาพ 106 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

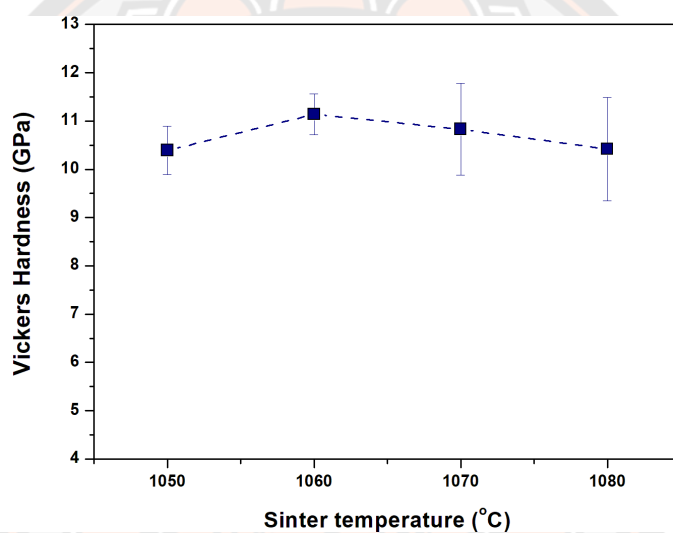


ภาพ 107 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ (ก) 1050 (ข) 1060 (ค) 1070 และ (ง) 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากภาพ 107 เป็นรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่าของรอยกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้โหลด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่ารอยกดมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพาซินเตอร์เพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปหาค่าความแข็งระดับจุลภาค จะได้ดังตาราง 33 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 1050°C เป็น 1060°C แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1070-1080°C ค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งค่าที่ได้ทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันมากเพิ่มขึ้นและลดลงเพียงน้อยเท่านั้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 10.39-11.14 GPa เมื่อนำค่าความแข็งระดับจุลภาคที่ได้จากตาราง 33 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเพาซินเตอร์จะได้ดังกราฟในภาพ 108

ตาราง 33 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ (GPa)
1050	10.39 ± 0.50
1060	11.14 ± 0.42
1070	10.83 ± 0.95
1080	10.42 ± 1.07



ภาพ 108 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

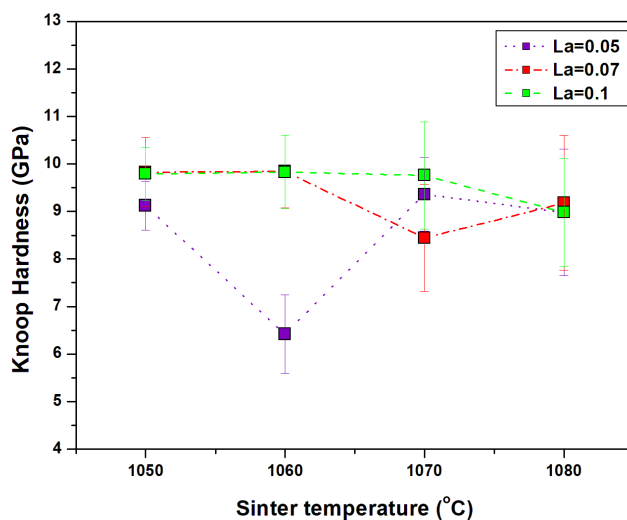
ผลการตรวจสอบค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนและผลการตรวจสอบค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO

นำเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ทั้งหมดที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050, 1060, 1070 และ 1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มาหาตรวจสอบค่าความแข็งระดับจุลภาคด้วยเครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาคที่มีหัวกดแบบนูน โดยใช้แรงในการกด 300 กรัม เป็นเวลา 15 วินาที โดยกดตัวอย่างละ 10 จุด จากนั้นนำรอยกดไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ใช้กำลังขยาย 50 เท่า และนำรอยกดที่ได้มาวัดเส้นทแยงมุมเฉลี่ยเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนจากสมการ (5) แล้วนำค่าความแข็งดังกล่าว ไปคำนวณหาค่ามอดูลัสของยังต่อไป ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตาราง 34 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูน โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ La_2O_3 (mol)	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูน (GPa) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.05	9.12 ± 0.51	6.42 ± 0.83	9.36 ± 0.77	8.98 ± 1.33
0.07	9.83 ± 0.73	9.84 ± 0.76	8.44 ± 1.12	9.18 ± 1.42
0.1	9.79 ± 0.56	9.83 ± 0.77	9.76 ± 1.13	8.98 ± 1.14

จากตาราง 34 แสดงค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูน โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนในทุกๆ เงื่อนไข มีค่าความแข็งลดลง เมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น และค่าความความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการเจือ La_2O_3 เพิ่มขึ้น ซึ่งเซรามิก CLCTO ทั้งหมดมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 6.42-9.98, 8.44-9.84 และ 8.98-9.83 GPa เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล ตามลำดับ เมื่อนำค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนที่ได้จากตาราง 34 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์จะได้ดังกราฟในภาพ 109



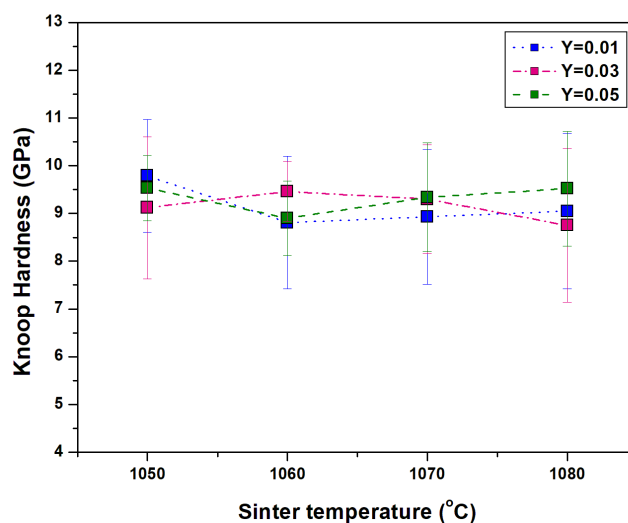
ภาพ 109 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูน โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตาราง 35 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูน โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ Y_2O_3 (mol)	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูน (GPa) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	9.79 ± 1.18	8.81 ± 1.39	8.93 ± 1.41	9.05 ± 1.63
0.03	9.12 ± 1.49	9.46 ± 0.62	9.30 ± 1.14	8.75 ± 1.61
0.05	9.53 ± 0.68	8.90 ± 0.78	9.34 ± 1.14	9.52 ± 1.20

จากตาราง 35 แสดงค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูน โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนในทุกๆ เงื่อนไข มีค่าความแข็งลดลง เมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น และค่าความความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการเจือ Y_2O_3 เพิ่มขึ้น ซึ่งเซรามิก CCTYO ทั้งหมดมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 8.81-9.93, 8.75-9.46 และ 8.90-9.53

GPa เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล ตามลำดับ เมื่อนำค่าความแข็งระดับจุลภาคที่ได้จากตาราง 35 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์จะได้ดังกราฟในภาพ 110

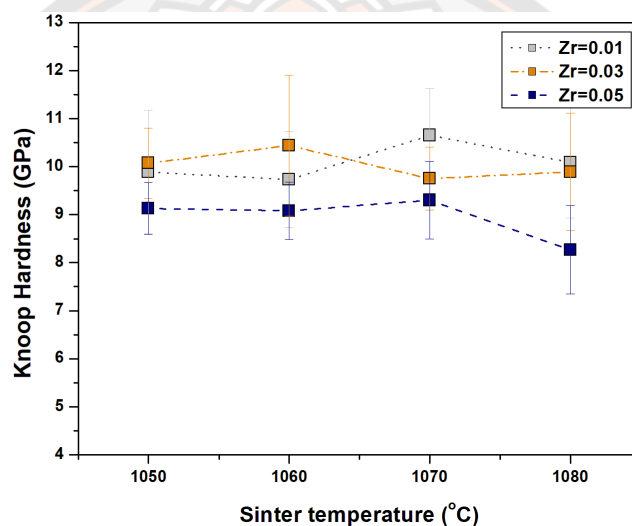


ภาพ 110 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูน โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตาราง 36 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูน โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ ZrO_2 (mol)	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูน (GPa) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	9.89 ± 1.28	9.73 ± 1.00	10.65 ± 0.97	10.09 ± 1.16
0.03	10.07 ± 0.73	10.44 ± 1.47	9.75 ± 0.66	9.89 ± 1.22
0.05	9.13 ± 0.54	9.08 ± 0.60	9.30 ± 0.80	8.27 ± 0.92

จากตาราง 36 แสดงค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนป โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนปของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.03-0.05$ โดยโมล มีค่าความแข็งลดลง เมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ขณะที่ $ZrO_2=0.01$ โดยโมล ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เล็กน้อย และค่าความความแข็งมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณการเจือ ZrO_2 เพิ่มขึ้น ซึ่งเซรามิก CCTZO ทั้งหมดมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 9.73-10.65, 9.75-10.44 และ 8.27-9.30 GPa เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล ตามลำดับ เมื่อนำค่าความแข็งระดับจุลภาคที่ได้จากตาราง 36 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์จะได้ดังกราฟในภาพ 111



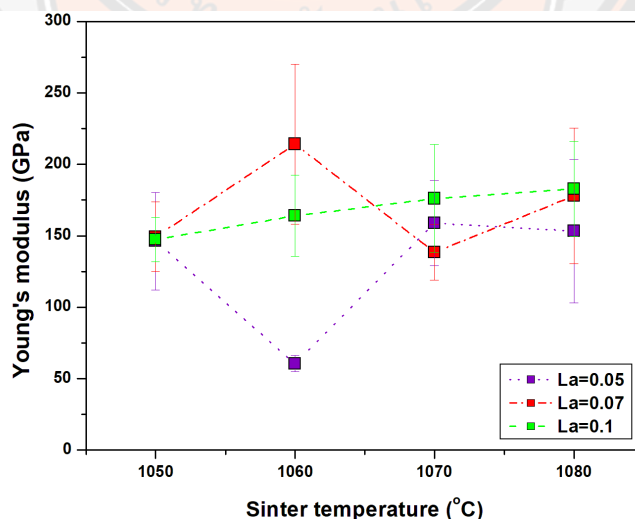
ภาพ 111 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนป โดยใช้แรงกด 300 กรัม ของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

นำค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบนูนของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มาคำนวณหาค่ามอดูลัสของยัง จากสมการ () จะได้ดังนี้

ตาราง 37 ค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ La_2O_3 (mol)	ค่ามอดูลัสของยัง (GPa) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.05	146.20 ± 34.06	60.44 ± 5.74	158.76 ± 29.86	153.23 ± 50.10
0.07	149.25 ± 24.33	214.10 ± 55.96	138.36 ± 19.39	177.85 ± 47.55
0.1	147.38 ± 15.52	163.88 ± 28.32	175.99 ± 37.78	182.75 ± 33.34

จากตาราง 37 แสดงค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าในทุกๆ เจือไนซ์ ค่ามอดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณการเจือ La_2O_3 เพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสของยังก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเซรามิก CLCTO ทั้งหมดมีค่ามอดูลัสของยังใกล้เคียงกัน เมื่อนำค่ามอดูลัสของยังที่ได้จากตาราง 37 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์จะได้ดังกราฟในภาพ 112

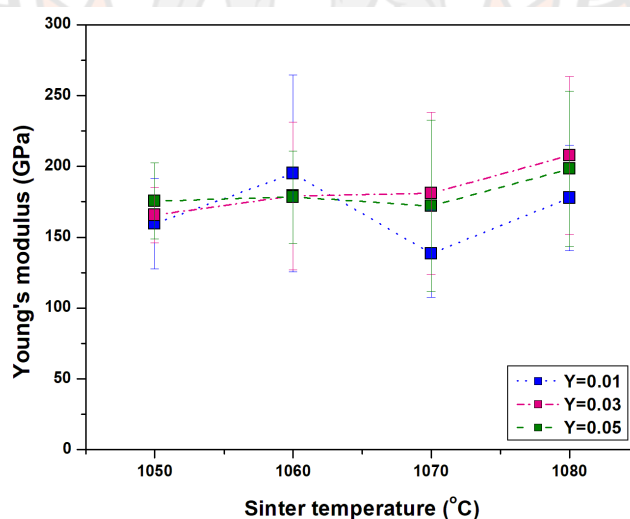


ภาพ 112 ค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตาราง 38 ค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ Y_2O_3 (mol)	ค่ามอดูลัสของยัง (GPa) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	159.50 ± 31.88	194.96 ± 69.63	138.38 ± 30.84	177.65 ± 37.41
0.03	165.50 ± 19.67	179.14 ± 52.17	180.99 ± 57.18	207.66 ± 55.84
0.05	175.56 ± 26.86	178.34 ± 32.58	172.05 ± 60.51	198.15 ± 54.72

จากตาราง 38 แสดงค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าในทุกๆ เงื่อนไข ค่ามอดูลัสของยัง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณการเจือ Y_2O_3 เพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสของยังก็เพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่อุณหภูมิเผาซินเตอร์ 1060°C ค่ามอดูลัสของยังลดลงเล็กน้อย ซึ่งเซรามิก CCTYO ทั้งหมดมีค่ามอดูลัสของยังใกล้เคียงกัน เมื่อนำค่ามอดูลัสของยังที่ได้จากตาราง 38 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์จะได้ดังกราฟในภาพ 113

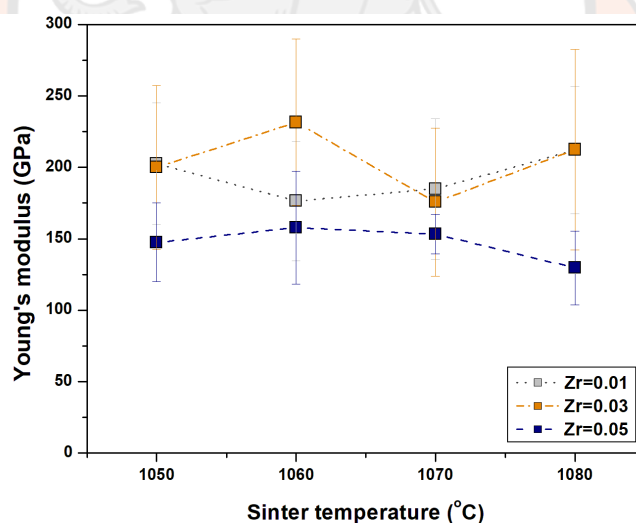


ภาพ 113 ค่ามอดูลัสของยังของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตาราง 39 ค่ามอดุลัสของยังของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ ZrO_2 (mol)	ค่ามอดุลัสของยัง (GPa) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	202.55 ± 42.61	176.30 ± 41.78	184.83 ± 49.37	212.05 ± 44.47
0.03	199.89 ± 57.41	231.45 ± 58.31	175.59 ± 51.95	212.38 ± 70.18
0.05	147.38 ± 27.54	157.67 ± 39.52	153.21 ± 13.89	129.52 ± 25.94

จากตาราง 39 แสดงค่ามอดุลัสของยังของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าในทุกๆ เงื่อนไข ค่ามอดุลัสของยัง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณการเจือ ZrO_2 เพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสของยังก็มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเซรามิก CCTZO ทั้งหมดมีค่ามอดุลัสของยังใกล้เคียงกัน เมื่อนำค่ามอดุลัสของยังที่ได้จากตาราง 39 มาเขียนความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเผาซินเตอร์จะได้ดังกราฟในภาพ 114



ภาพ 114 ค่ามอดุลัสของยังของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

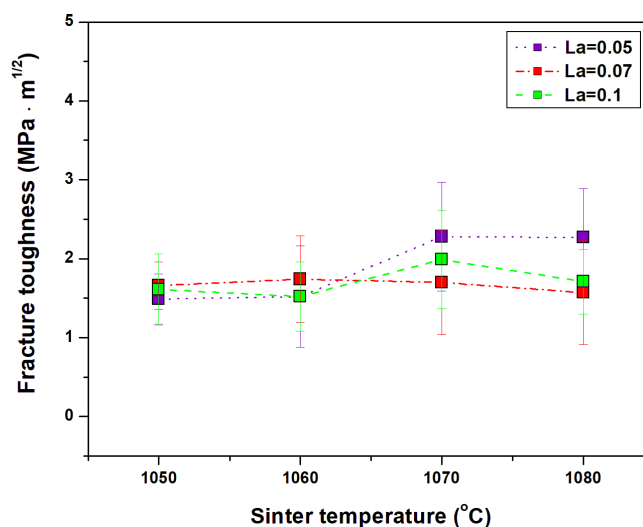
ผลการตรวจสอบความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO

นำค่าความแข็งระดับจุลภาคและขนาดรอยแตกที่ได้จากหัตถ์คแบบวิกเกอร์ของเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มาคำนวณหาความต้านทานการแตกหักแบบเปราะ จากสมการ (16)

ตาราง 40 ค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ La_2O_3 (mol)	ค่าความต้านทานต่อรอยแตก ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.05	1.49 ± 0.32	1.52 ± 0.64	2.28 ± 0.69	2.27 ± 0.62
0.07	1.62 ± 0.30	1.74 ± 0.55	1.70 ± 0.66	1.57 ± 0.66
0.1	1.61 ± 0.45	1.52 ± 0.44	1.99 ± 0.62	1.71 ± 0.41

จากตาราง 40 แสดงค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าเซรามิกทั้งหมด มีค่าความต้านทานต่อรอยแตกใกล้เคียงกัน โดยในแต่ละปริมาณการเจือของ La_2O_3 มีแนวโน้มค่าความต้านทานต่อรอยแตกเพิ่มขึ้น ตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณการเจือ La_2O_3 เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิเผาซินเตอร์ 1050-1060°C จะมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกเพิ่มขึ้น ขณะที่ 1070-1080°C ค่าลดลง เมื่อนำมาเขียนให้อยู่ในความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อรอยแตกกับอุณหภูมิเผาซินเตอร์ จะได้กราฟดังภาพ 115

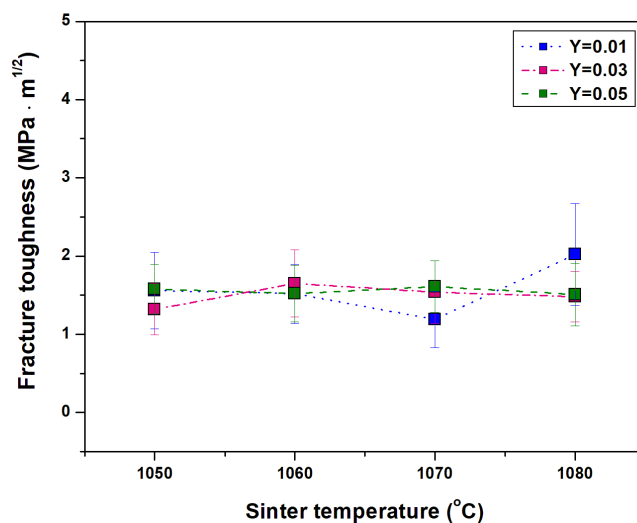


ภาพ 115 ค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก CLCTO เมื่อ $\text{La}_2\text{O}_3=0.05-0.1$ โดยโมล เเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตาราง 41 ค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ โดยโมล เเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ Y_2O_3 (mol)	ค่าความต้านทานต่อรอยแตก ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	1.56 ± 0.49	1.52 ± 0.38	1.19 ± 0.36	2.02 ± 0.65
0.03	1.32 ± 0.33	1.65 ± 0.43	1.54 ± 0.40	1.48 ± 0.32
0.05	1.58 ± 0.32	1.52 ± 0.36	1.61 ± 0.33	1.51 ± 0.40

จากตาราง 41 แสดงค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $\text{Y}_2\text{O}_3=0.01-0.05$ โดยโมล เเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าเซรามิกทั้งหมดมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกใกล้เคียงกัน โดยในแต่ละปริมาณการเจือของ Y_2O_3 มีค่าความต้านทานต่อรอยแตกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์ที่เพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเจือ Y_2O_3 เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิเผาซินเตอร์ 1080°C จะมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกลดลงเล็กน้อย เมื่อนำมาเขียนให้อยู่ในความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อรอยแตกกับอุณหภูมิเผาซินเตอร์ จะได้กราฟดังภาพ 116

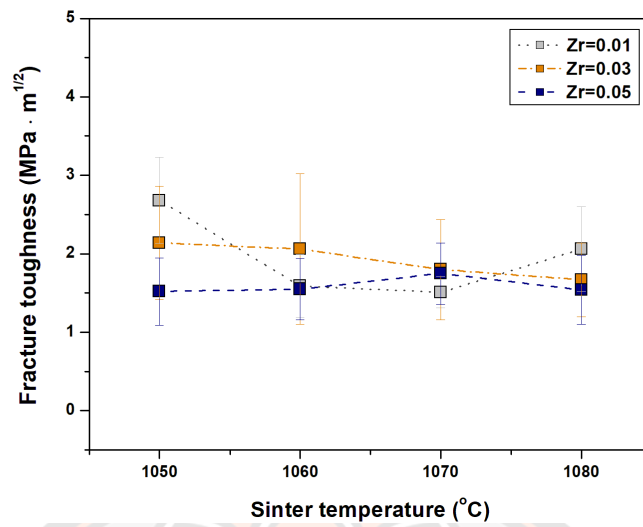


ภาพ 116 ค่าความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิก CCTYO เมื่อ $Y_2O_3=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตาราง 42 ค่าความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ปริมาณ ZrO_2 (mol)	ค่าความต้านทานต่อรอยแยก ($MPa \cdot m^{1/2}$) ที่เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C			
	1050	1060	1070	1080
0.01	2.68 ± 0.55	1.59 ± 0.40	1.51 ± 0.20	2.06 ± 0.54
0.03	2.14 ± 0.72	2.06 ± 0.96	1.80 ± 0.64	1.67 ± 0.47
0.05	1.52 ± 0.43	1.55 ± 0.39	1.75 ± 0.39	1.54 ± 0.44

จากตาราง 42 แสดงค่าความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าเซรามิกทั้งหมดมีค่าความต้านทานต่อรอยแยกใกล้เคียงกัน ในแต่ละปริมาณการเจือของ ZrO_2 มีแนวโน้มค่าความต้านทานต่อรอยแยกลดลง ตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์ที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ $ZrO_2=0.05$ โดยโมล เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยยะ และ ณ อุณหภูมิเผาซินเตอร์ 1050 และ 1080°C ค่าความต้านทานต่อรอยแยกลดลง เมื่อปริมาณการเจือ ZrO_2 เพิ่มขึ้น ขณะที่ ณ อุณหภูมิเผาซินเตอร์ 1060-1070°C ค่าความต้านทานต่อรอยแยกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อนำมาเขียนให้อยู่ในความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อรอยแยกกับอุณหภูมิเผาซินเตอร์ จะได้กราฟดังภาพ 117



ภาพ 117 ค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก CCTZO เมื่อ $ZrO_2=0.01-0.05$ โมล โดยโมล
เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



บทที่ 5

บทสรุป

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการเตรียมเซรามิก $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12+x/2}$ เมื่อ $x = 0.05-0.1$, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Y}_x\text{O}_{12-x/2}$ และ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Zr}_x\text{O}_{12-x/2}$ เมื่อ $x = 0.01-0.05$ โดยโมล ทั้งหมดเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050-1080°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที แล้วนำเซรามิกทั้งหมดไปตรวจสอบสมบัติต่างๆ ได้ผลดังต่อไปนี้

การสังเคราะห์ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลวช่วยลดอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ได้ โดยลดลง 100°C เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Cheng และคณะ [4] ที่สังเคราะห์ CLCTO และงานวิจัยของ Luo และคณะ [21] ที่สังเคราะห์ CCTYO ซึ่งทั้ง 2 งานใช้สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และลดลงไป 150°C เมื่อเทียบกับงานของ Yanli และ Wenqin [22] ใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งสังเคราะห์ CCTZO นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ผงผลึกทั้งหมดมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ขนาดใหญ่กว่าของฐานข้อมูลหมายเลข 75-2188 [20] นั่นอาจจะหมายความว่าสารเจือทั้ง 3 ตัว ได้แก่ La_2O_3 , Y_2O_3 และ ZrO_2 ได้เข้าไปอยู่ในโครงสร้างของผงผลึก CLCTO, CCTYO และ CCTZO จริง [4]

จากการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของเซรามิก พบว่าเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO ในทุกๆ เงื่อนไขมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับลักษณะรูปแบบของฐานข้อมูลหมายเลข 75-2188 [20] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu และคณะ [3] และ Cheng และคณะ [4] โดยผิวหน้าของเซรามิกทั้งหมดมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยม มีขนาดเกรนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น และรอยหักของเซรามิกทั้งหมดพบว่ามีรอยแตกหักทั้งแบบตามเกรนและผ่าเกรน เมื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของเซรามิกทั้งหมด พบว่าเซรามิกในหลายๆ เงื่อนไขมีค่าความหนาแน่นสูง ณ อุณหภูมิ 1050°C นำเซรามิก CLCTO, CCTYO และ CCTZO เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C มาตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก โดยทำการวัด ณ อุณหภูมิ 35-450°C และที่ความถี่ 1-1000 kHz พบว่า เซรามิกทั้งหมดมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกค่อนข้างคงที่ ณ ช่วงอุณหภูมิการวัดที่ 35-150°C โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง เมื่อความถี่ที่ใช้วัดเพิ่มสูงขึ้น ณ อุณหภูมิห้อง และที่ความถี่ 1 kHz ของเซรามิก $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12+x/2}$ เมื่อ $x = 0.07$, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Y}_x\text{O}_{12-x/2}$ และ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Zr}_x\text{O}_{12-x/2}$ เมื่อ $x = 0.01$ โดยโมล พบว่ามีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุดเท่ากันอยู่ที่ 0.04 และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 8067, 13940 และ 12902 ตามลำดับ เซรามิกในแต่ละเงื่อนไข มีค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ ใกล้เคียงกันในช่วง 8-11 GPa ส่วนใหญ่มีแนวโน้ม

สูง ณ อุณหภูมิเผาซินเตอร์ 1050°C และจากค่าความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิกทั้งหมด มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 1.32-2.68 MPa·m^{1/2}

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมานี้ สามารถสรุปได้ว่า เซื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมเซรามิก $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12+x/2}$ พบที่ $x = 0.07$, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Y}_x\text{O}_{12-x/2}$ และ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Zr}_x\text{O}_{12-x/2}$ พบที่ เมื่อ $x = 0.01$ โดยโมล เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1050°C เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลที่ดี ณ อุณหภูมิเผาซินเตอร์ 1050°C และที่สำคัญสารเจือปริมาณดังกล่าว มีสมบัติไดอิเล็กทริกที่ดีที่สุดอีกด้วย โดยสามารถลดค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกลงได้ เมื่อเทียบกับบางวิจัยของ Xu และคณะ [3], Cheng และคณะ [4] และ Luo และคณะ [21]



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- [1] สุวิมล วงศรีเทพ, ประสิทธิ์ ทองใบ. สมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก $\text{Ca}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Dielectric Properties of $\text{Ca}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2562;399-407.
- [2] K. Chen, X. Zhang. Synthesis of calcium copper titanate ceramics via the molten salts method. *Ceram. Int.* 2010;36:1523-27.
- [3] Z. Xu, H. Qiang, Y. Chen, Z. Chen. Microstructure and enhanced dielectric properties of yttrium and zirconium co-doped $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics. *Mater. Chem. Phys.* 2017;191:1-5.
- [4] P. Cheng, Z. Cao, M. Zhou, Q. Wang, S. Li, J. Li. Dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics doped by La^{3+} . *Ceram. Int.* 2019;45:15320-26.
- [5] วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก [อินเทอร์เน็ต]. ประเทศไทย: RIVERGLENNAPTS; [26 สิงหาคม 2563]. ที่มา: <https://riverglennapts.com/th/magnetic-materials/553-ferroelectric-materials.html>
- [6] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2543.
- [7] William F. Smith. วัสดุวิศวกรรม [Principles of Materials Science and Engineering] (แมน อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา, แปล). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์; 2547.
- [8] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: ส.เอเชียเพรส (1989); 2558
- [9] นวรัตน์ พิลาดง, นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์. เทคนิคการวัดสภาพยอมสัมพัทธ์เชิงซ้อน Complex Relative Permittivity Measurement Techniques. *J Sci Technol MSU.* 2562;38:233-246.
- [10] Microhardness Test [อินเทอร์เน็ต]. “ม.ป.ท.”: “ม.ป.พ.”; [19 สิงหาคม 2563]. ที่มา: <https://www.gordonengland.co.uk/hardness/microhardness.htm>
- [11] การทดสอบความแข็ง (Hardness Test). ประเทศไทย: aballtechno; [19 สิงหาคม 2563]. ที่มา: <https://www.aballtechno.com/article/22/การทดสอบความแข็ง-hardness-test>
- [12] Swart, S.L., Shrouf T.R. Fabrication of perovskite lead magnesium niobate. *Mater. Res. Bull.* 1982;17:1245-50.

- [13] Jeremy Karl Cockcroft. Advanced Certificate in Powder Diffraction on the Web Course Material Master Index [อินเทอร์เน็ต]. [ประเทศไทยอังกฤษ]: [School of Crystallography, Birkbeck College, University of London]; [2 มีนาคม 2565] ที่มา: <http://pd.chem.ucl.ac.uk/pdnn/unit1/unintro.htm>
- [14] A. Jock, F. Ayeni, A. Ahmed, U. Sullayman. Evaluation of the Refractory Properties of Nigerian Ozanagogo Clay Deposit. *JMMCE*. 2013;1:321-5.
- [15] สุริยะ ไผชัยภูมิ. ไดอิเล็กทริก [อินเทอร์เน็ต]. ประเทศไทย: slideshare; 2013 [21 สิงหาคม 2563]. ที่มา: <https://www.slideshare.net/ssuser5fb065/ss-26428657>
- [16] D. B. Marshall, T. Noma and A. G. Evans. A Simple Method for Determining Elastic-Modulus-to-Hardness Ratios Using Knoop Indentation Measurements. *J. Am. Ceram. Soc.* 1982;65:175-6.
- [17] J. Li, C. Ding. Determining microhardness and elastic modulus of plasma-sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coatings using Knoop indentation testing. *Surf. Coat. Technol.* 2001;135:229-237.
- [18] P.C. Jindal, D.T. Quinto. LOAD DEPENDENCE OF MICROHARDNESS OF HARD COATINGS. *Surf. Coat. Technol.* 1988;36:683-694.
- [19] A. MORADKHANI, H. BAHARVANDI, M. TAJDARI, H. LATIFI, J. MARTIKAINEN. Determination of fracture toughness using the area of micro-crack tracks left in brittle materials by Vickers indentation test. *J. Adv. Ceram.* 2013;2:87-102.
- [20] Powder Diffraction File, Card No. 01-075-2188. Joint Committee for Powder Diffraction Standards (JCPDS) PDF-4. ICDD. 2000
- [21] F. Luo, J. He, J. Hu and Y. Lin. Electric and Dielectric Behaviors of Y-Doped Calcium Copper Titanate. *J. Am. Ceram. Soc.* 2010;93:3043-5.
- [22] S. Yanli, Z. Wenqin. Dielectric Properties and Electrical Conductivity of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Ceramics Doped with Zr^{4+} . *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 2013;28:343-6.