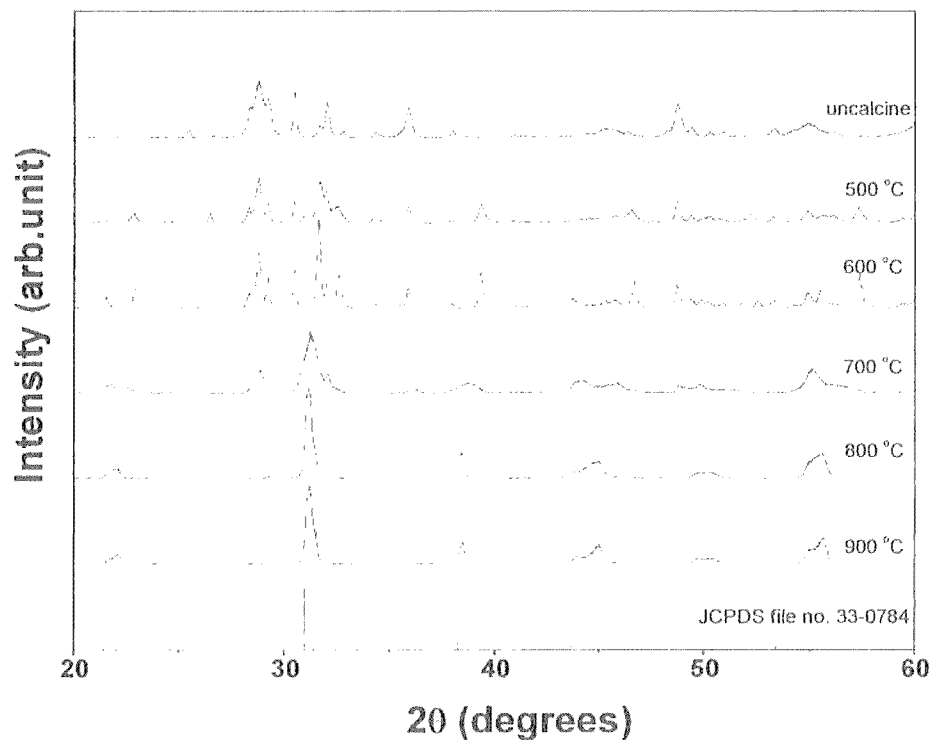


บทที่ 4

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของผงผลึกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต ($\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$)

จากการเตรียมผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ โดยแปรค่าอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ตั้งแต่ 500 – 900 °C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 °C/นาที นำมาวิเคราะห์การก่อเกิดเฟสโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเผาแคลไซน์แล้วให้ได้เฟสบริสุทธิ์ของผงผลึก รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ยังไม่เผาแคลไซน์ และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงได้ดังรูป 4.1



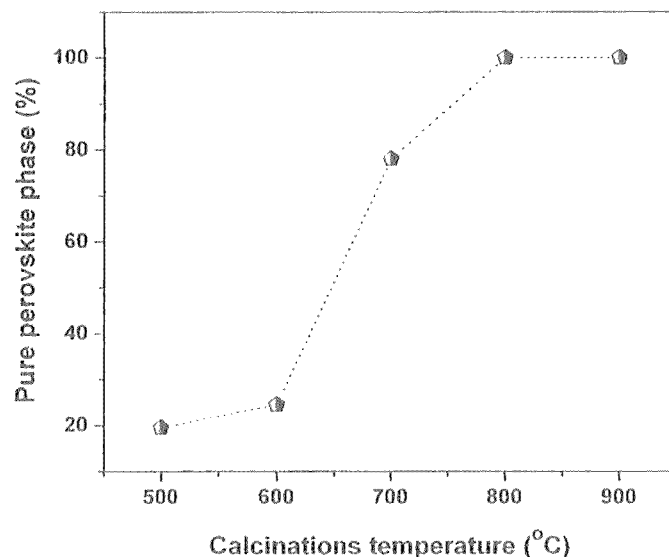
รูป 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ยังไม่เผาแคลไซน์และที่เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 500 – 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 °C/นาที

จากรูป 4.1 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ทำการเผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 500 – 700 °C นั้น ยังพบเฟสของสารตั้งต้นเหลืออยู่โดยเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผสมที่ยังไม่ได้ทำการเผาแคลไซน์ และเมื่ออุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เพิ่มขึ้นเป็น 800-900 °C พบเฟสบริสุทธิ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ซึ่ง

สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐานของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ในแฟ้มข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 33-0784 [32] เมื่อทำการคำนวณหาร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์ตั้งแต่ 500 – 900 °C ตามสมการ (3.2) จะได้ผลดังตาราง 4.1 และดังกราฟในรูป 4.2

ตาราง 4.1 ร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 500–900 °C

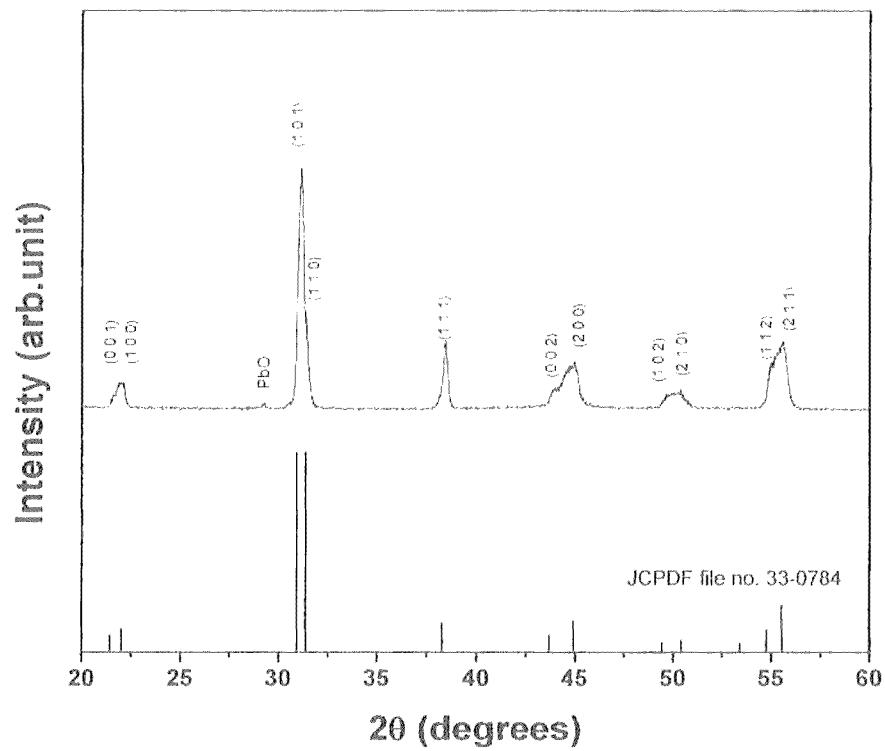
อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ (°C)	ร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก (%)
500	19.52
600	24.52
700	78.01
800	100
900	100



รูป 4.2 ร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 500 – 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 °C/นาที

นำรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C มาเขียนกราฟเทียบกับข้อมูลมาตรฐานของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ในแฟ้มข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 33-0784 [32] ดังรูป 4.3 พบว่าทุกพีคตรงตามข้อมูล

ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ในฐานข้อมูลมาตรฐาน ส่วนพีคที่ 20 ประมาณ 28 องศา มาจากการเพิ่มจำนวน PbO จำนวน 3 mol% ลงในสารตั้งต้น เพื่อชดเชยการสูญเสียของ PbO เมื่อทำการเผาแคลไซน์ และเผาซินเตอร์

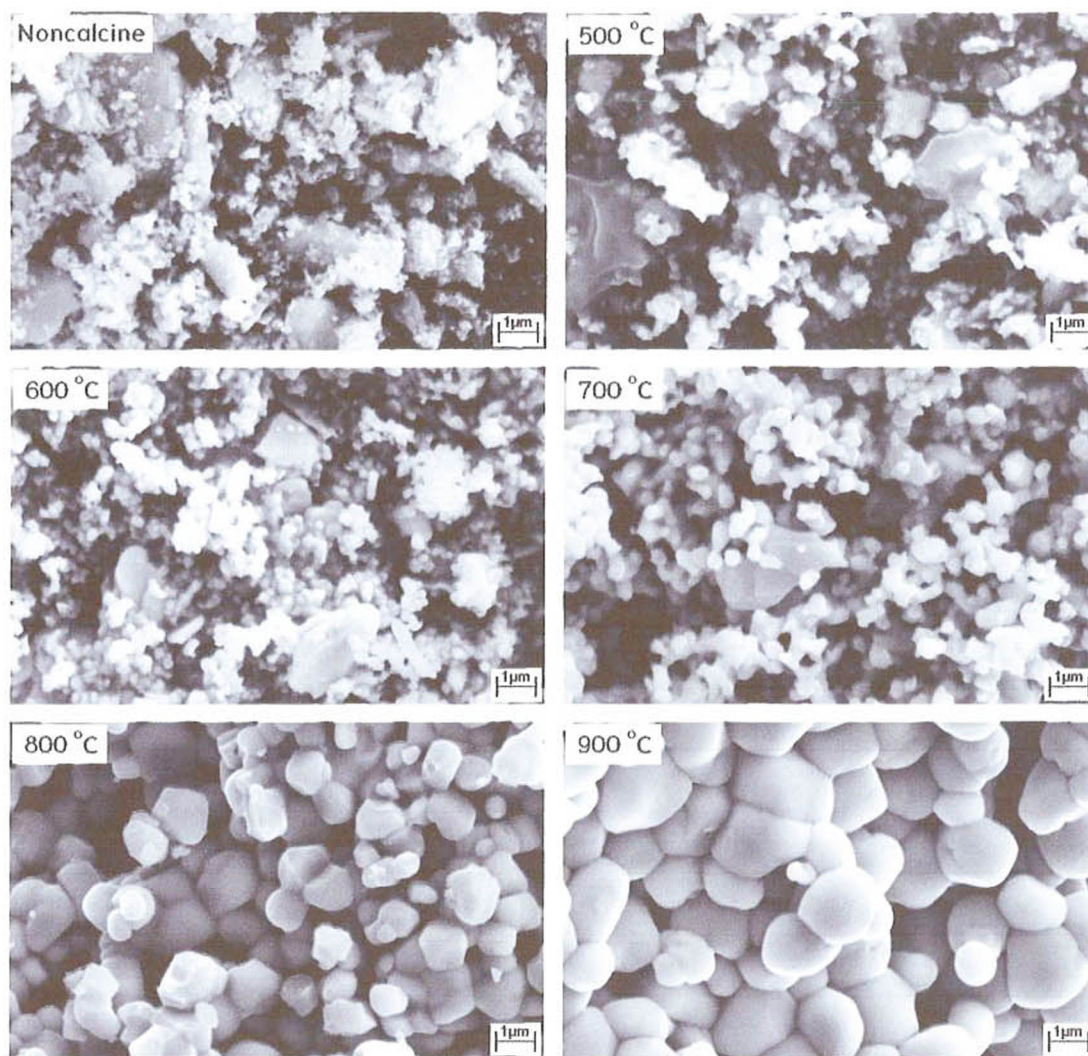


รูป 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เทียบกับข้อมูลมาตรฐานในแฟ้มหมายเลข 33-0784



4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกเลเซอร์โคเนดไททาเนต ($\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$)

นำผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ยังไม่เผาแคลไซน์ และที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500–900 °C ไปทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูลักษณะรูปร่างของผงผลึกที่ได้ ประกอบกันกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลจากการ XRD เพื่อนำไปเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเผาแคลไซน์ต่อไป ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ นี้ เป็นดังรูป 4.4



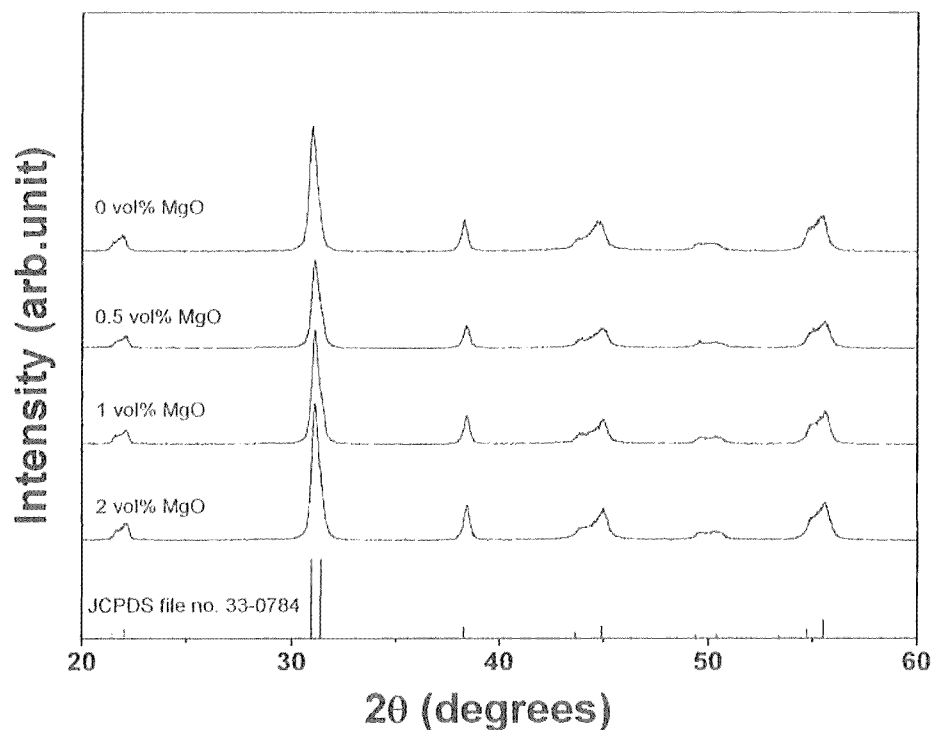
รูป 4.4 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ยังไม่ได้เผาแคลไซน์ และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 – 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ยังไม่ได้เผาแคลไซน์ และที่เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 500 – 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังรูป 4.4 พบว่าเมื่อยังไม่เผาแคลไซน์นั้น จะเห็นรูปร่างของผงผสมหลายๆ อย่างผสมคลุกเคล้ากันอยู่ทั้งก้อนเล็กและใหญ่ เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 – 600 °C ยังเห็นเป็นรูปร่างของผงผสมหลายๆ อย่างคลุกเคล้ากันอยู่เช่นกัน และเมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C ผงผลึกจะเริ่มมีความเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เป็น 800 °C จะพบว่าผงผลึกมีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีขนาดของอนุภาคเล็กใหญ่ผสมกันอยู่แต่ก็มีขนาดใกล้เคียงกัน และเมื่ออุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เป็น 900 °C พบว่าผงผลึกมีรูปร่างคล้ายคลึงกันทั้งหมด มีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นพร้อมจะเป็นเกรน

จากข้อมูลที่ได้จากภาพถ่าย SEM และจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะเห็นว่ากราฟที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ และภาพถ่าย SEM นี้ มีความสอดคล้องกัน นั่นคือที่ยังไม่เผาแคลไซน์ และที่เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 °C นั้น กราฟที่ได้ยังไม่เป็นรูปแบบของผงผลึกที่สมบูรณ์ แต่เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C กราฟที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ฟอร์มตัวเป็นผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ตรงกับข้อมูลในแฟ้มข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 33-0784 [32] แล้ว และภาพถ่ายจาก SEM ก็ได้ผงผลึกที่มีเนื้อสม่ำเสมอแล้วเช่นกัน ดังนั้นจึงได้เลือกอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ 800 °C

4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคนาโนของ MgO

นำสารเจือที่มีอนุภาคนาโนของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มาทำการเจือลงในผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2 โดยปริมาตร พร้อมทั้งเติม PVA ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในปริมาณ 1 หยดต่อผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ 1 กรัม ทำการบดผสมเปียกอีกครั้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำแห้ง และคัดขนาดอีกครั้ง แล้วนำไปวิเคราะห์การก่อเกิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังรูป 4.5

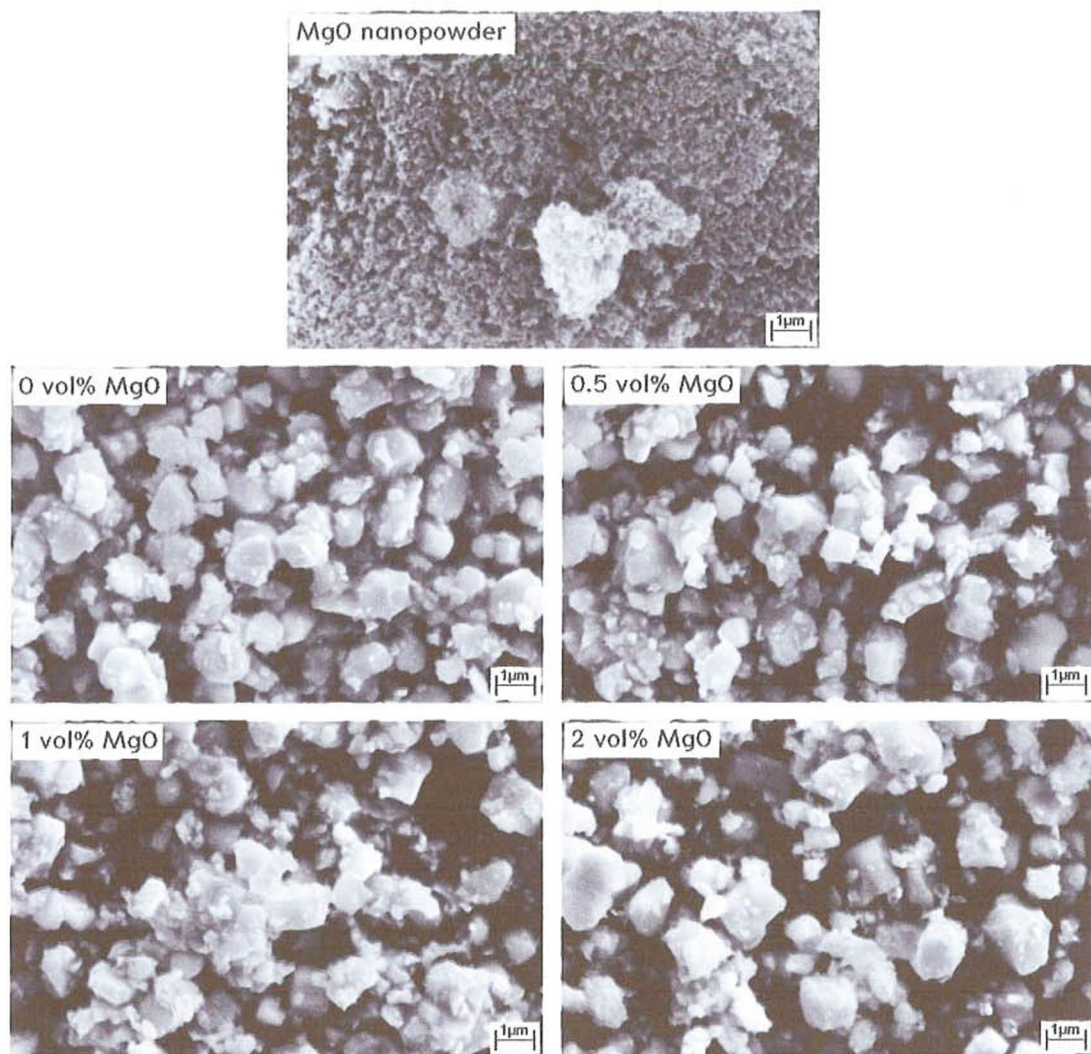


รูป 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์แล้ว เมื่อเติมอนุภาคนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร

จากกราฟรูป 4.5 จะเห็นว่า ผงผลึกของ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมสารเจือในระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร ยังคงสอดคล้องกับเฟสของ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ในฐานข้อมูลมาตรฐานหมายเลข 33-0784 [32] ทั้งหมด

4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO

นำผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติมสารเจือที่มีอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2 โดยปริมาตร พร้อมทั้งเติม PVA ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในปริมาณ 1 หยดต่อผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ 1 กรัม ทำการบดผสมเปียกอีกครั้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำแห้ง และคัดขนาดอีกครั้ง แล้วนำไปมาศึกษาลักษณะสัณฐานด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูป 4.6

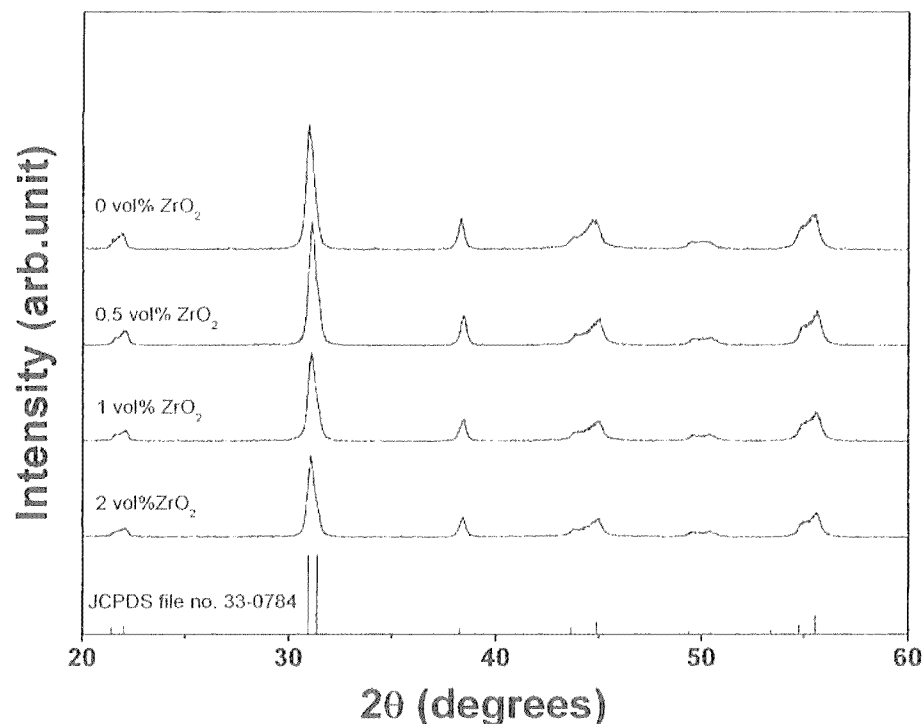


รูป 4.6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์แล้ว เติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร

จากภาพถ่าย SEM ในรูป 4.6 จะเห็นว่าลักษณะของอนุภาคในระดับนาโนของ MgO เกาะกันเป็นก้อนมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 50 นาโนเมตร ส่วนผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์แล้วผสมกับตัวประสาน (PVA) แต่ยังไม่เติมอนุภาคในระดับนาโนของ MgO จะมีลักษณะเป็นก้อนและมีริ้วๆ ของตัวประสานเกาะอยู่ และที่เติมอนุภาคนาโนของ MgO ตั้งแต่ร้อยละ 0.5 – 2 โดยปริมาตร จะเห็นว่าผงผลึกมีการเกาะของตัวประสานและอนุภาคของ MgO ปะปนอยู่ แต่ลักษณะคล้ายๆ กัน เนื่องจากอนุภาคของ MgO เล็กมากๆ จึงดูกลมกลืนกับตัวประสานนั่นเอง

4.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2

นำสารเจือที่มีอนุภาคระดับนาโนของเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) มาทำการเจือลงในผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2 โดยปริมาตร พร้อมทั้งเติม PVA ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในปริมาณ 1 หยดต่อผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ 1 กรัม ทำการบดผสมเปียกอีกครั้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำแห้ง และคัดขนาดอีกครั้ง แล้วนำไปวิเคราะห์การก่อเกิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังรูป 4.7

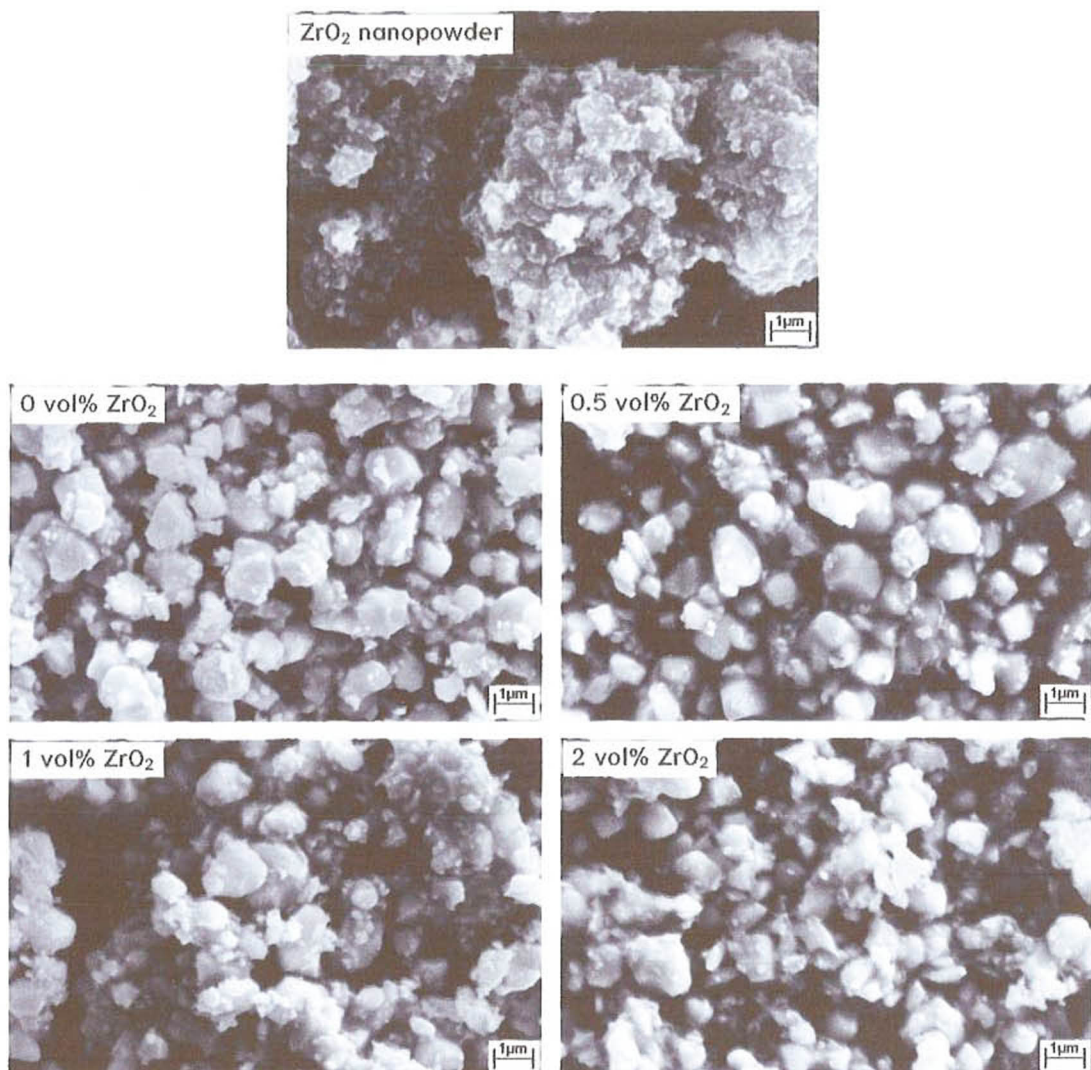


รูป 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์แล้ว เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร

จากการาปรูป 4.7 จะเห็นว่า ผงผลึกของ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมสารเจือในระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร ยังคงสอดคล้องกับเฟสของ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ในฐานข้อมูลมาตรฐานหมายเลข 33-0784 [32] ทั้งหมด

4.6 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2

นำผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติมสารเจือที่มีอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2 โดยปริมาตร พร้อมทั้งเติม PVA ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในปริมาณ 1 หยดต่อผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ 1 กรัม ทำการบดผสมเปียกอีกครั้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำแห้ง และคัดขนาดอีกครั้ง แล้วนำไปมาศึกษาลักษณะสัณฐานด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูป 4.8

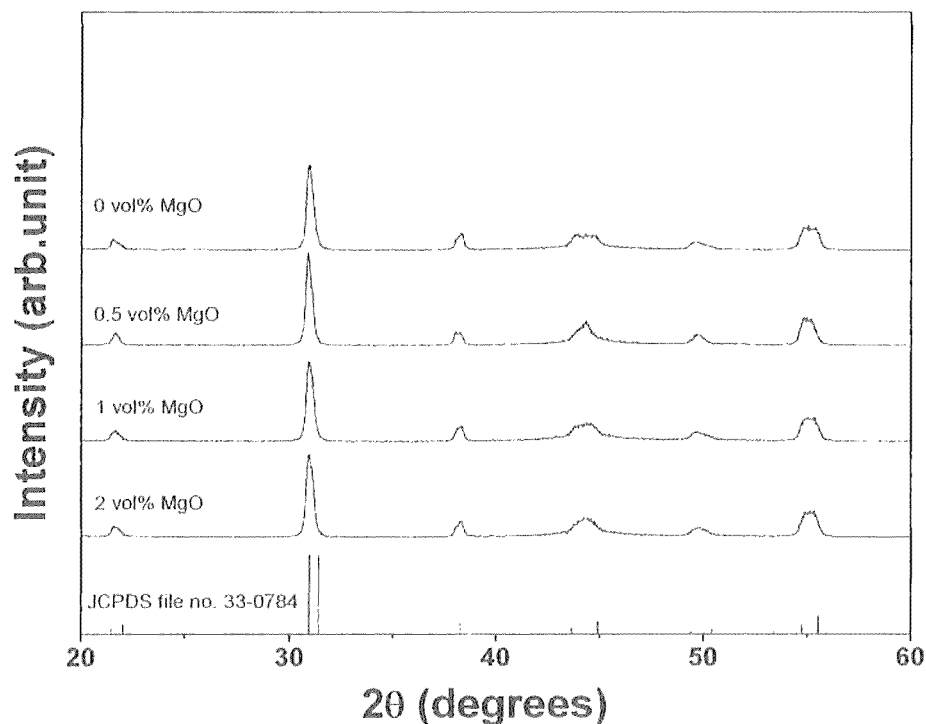


รูป 4.8 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์แล้ว เติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร

จากภาพถ่าย SEM ในรูป 4.8 จะเห็นว่าลักษณะของอนุภาคในระดับนาโนของ ZrO_2 เกาะกันเป็นก้อนมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ส่วนผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์แล้วผสมกับตัวประสาน (PVA) แต่ยังไม่เติมอนุภาคในระดับนาโนของ ZrO_2 จะมีลักษณะเป็นก้อนและมีริ้วๆ ของตัวประสานเกาะอยู่ และที่เติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ตั้งแต่ร้อยละ 0.5 – 2 โดยปริมาตร จะเห็นว่าผงผลึกมีการเกาะของตัวประสานและอนุภาคของ ZrO_2 ปะปนอยู่ เช่นกันกับผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมอนุภาค MgO

4.7 ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO

นำเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + (0-2) \text{ vol\% MgO}$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นดังรูป 4.9



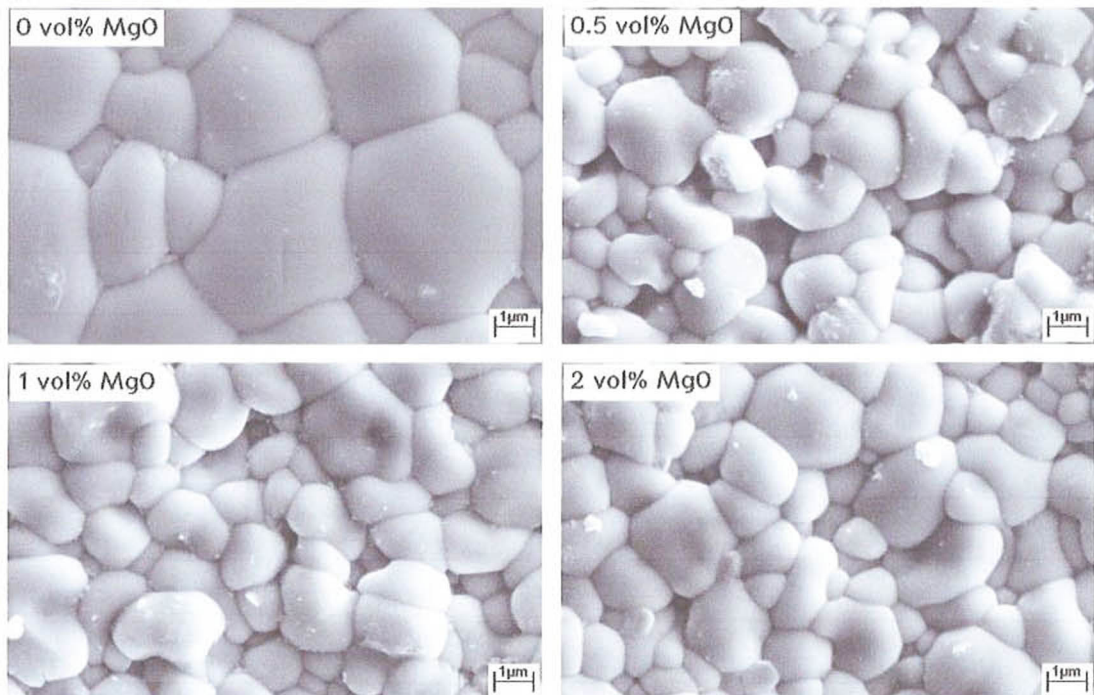
รูป 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200°C

จากรูป 4.9 เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร $[\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 +$

(0–2) vol% MgO] เพาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C พบว่าเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ + (0–2) vol% MgO ทั้งหมดมีโครงสร้างอยู่ระหว่างระบบเตตระโกนอล และรอมโบอีตรอล สังเกตจากพีคหลักในมุมการเลี้ยวเบน $2\theta = 21\text{--}22^\circ$, $30\text{--}31^\circ$, $43\text{--}45^\circ$ และ $54\text{--}55^\circ$ พีคเหล่านี้มีแนวโน้มในการเข้ามารวมกันเป็นโครงสร้างในระบบรอมโบอีตรอล แต่ยังมีร่องรอยให้เห็นการแยกกันอยู่บ้าง [32]

4.8 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO

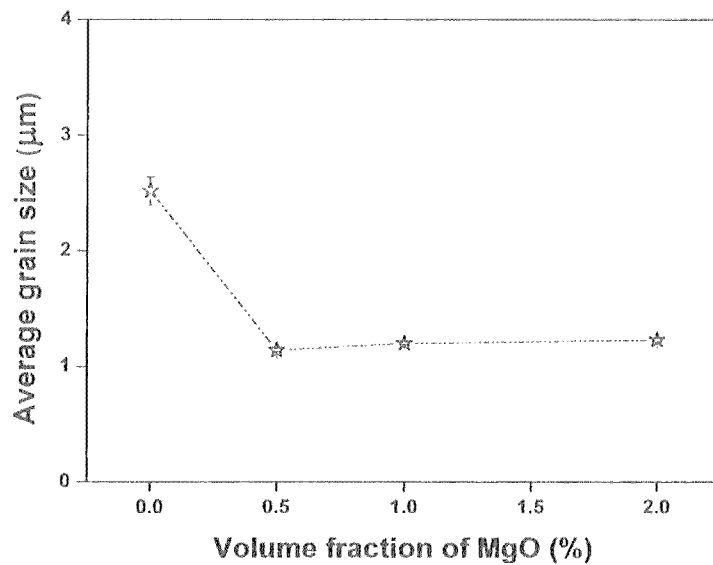
นำเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C ไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของเกรนที่แปรค่าปริมาณอนุภาคระดับนาโนของ MgO เป็นดังรูป 4.10



รูป 4.10 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C ดังรูป 4.10 พบว่าเมื่อเติมอนุภาคในระดับนาโนของ MgO ใน

ปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2 โดยปริมาตร ทำให้ขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทำการหาขนาดของเกรนเฉลี่ยโดยวิธีจุดตัดบนเส้นตรง [33] ได้ค่าดังรูป 4.11 และดังตาราง 4.2 ซึ่งเมื่อยังไม่ได้เติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ประมาณ 3 μm แต่เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในสัดส่วนร้อยละ 0-2 โดยปริมาตร มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.2-1.4 μm ดังรูป 4.11 และดังตาราง 4.2



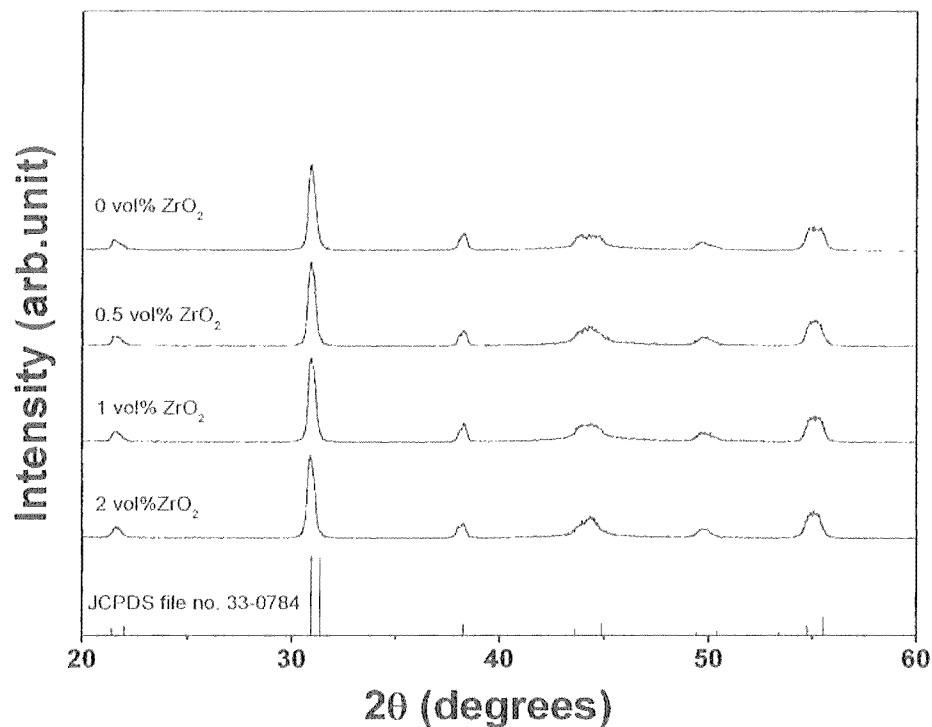
รูป 4.11 ขนาดของเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C

ตาราง 4.2 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C

PZT + (0-2) vol% MgO nanoparticles	
ร้อยละโดยปริมาตรของ MgO (vol%)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
0	2.52 ± 0.123
0.5	1.20 ± 0.016
1	1.40 ± 0.014
2	1.23 ± 0.010

4.9 ผลการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2

นำเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + (0-2) \text{ vol\% } \text{ZrO}_2$ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นดังรูป 4.12

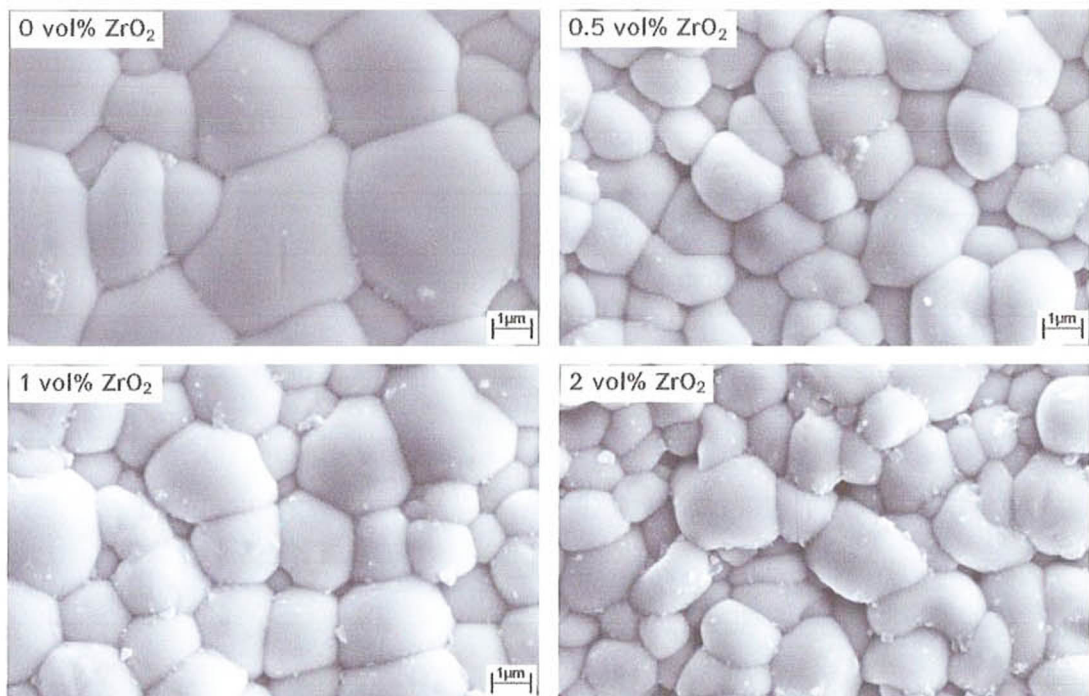


รูป 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200°C

จากรูป 4.12 เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร [$\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + (0-2) \text{ vol\% } \text{ZrO}_2$] เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C พบว่าเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + (0-2) \text{ vol\% } \text{ZrO}_2$ ทั้งหมดมีโครงสร้างอยู่ระหว่างระบบเตตระโกนอล และรอมโบอีตรอล สังเกตจากพีคหลักในมุมการเลี้ยวเบน $2\theta = 21-22^\circ, 30-31^\circ, 43-45^\circ$ และ $54-55^\circ$ พีคเหล่านี้มีแนวโน้มในการเข้ามารวมกันเป็นโครงสร้างในระบบรอมโบอีตรอล แต่ยังมีร่องรอยให้เห็นการแยกกันอยู่บ้าง [32]

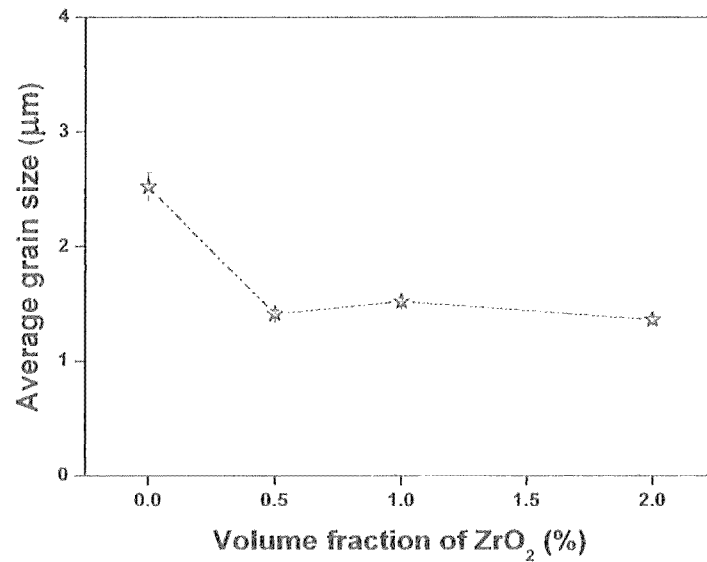
4.10 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2

นำเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200°C ไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของเกรนที่แปรค่าปริมาณอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 เป็นดังรูป 4.13



รูป 4.13 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200°C

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200°C ดังรูป 4.13 พบว่าเมื่อเติมอนุภาคในระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2 โดยปริมาตร ทำให้ขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทำการหาขนาดของเกรนเฉลี่ยโดยวิธีจุดตัดบนเส้นตรง [33] ได้ค่าดังรูป 4.14 และดังตาราง 4.3 ซึ่งเมื่อยังไม่ได้เติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ประมาณ $3\ \mu\text{m}$ แต่เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในสัดส่วนร้อยละ 0-2 โดยปริมาตร มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ในช่วง $1.4\text{--}1.7\ \mu\text{m}$

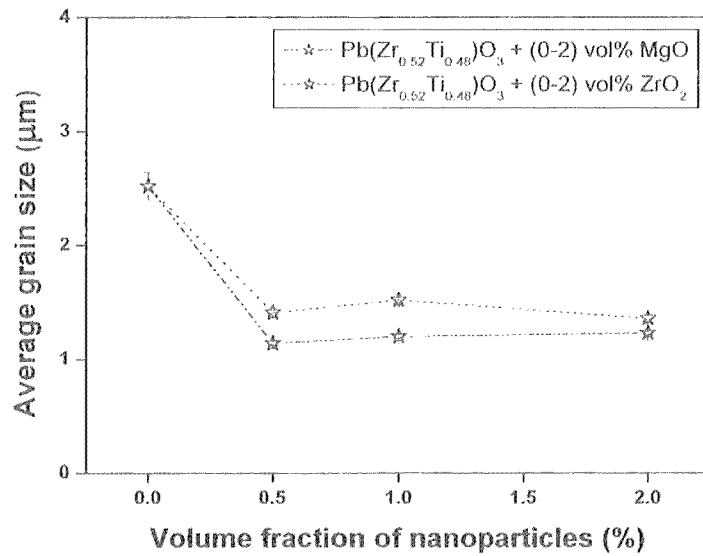


รูป 4.14 ขนาดของเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C

ตาราง 4.3 ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C

PZT + (0–2) vol% ZrO_2 nanoparticles	
ร้อยละโดยปริมาตรของ ZrO_2 (vol%)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
0	2.52 ± 0.123
0.5	1.52 ± 0.042
1	1.71 ± 0.046
2	1.36 ± 0.029

นำขนาดของเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร มาเขียนเป็นกราฟรวมได้ดังรูป 4.15

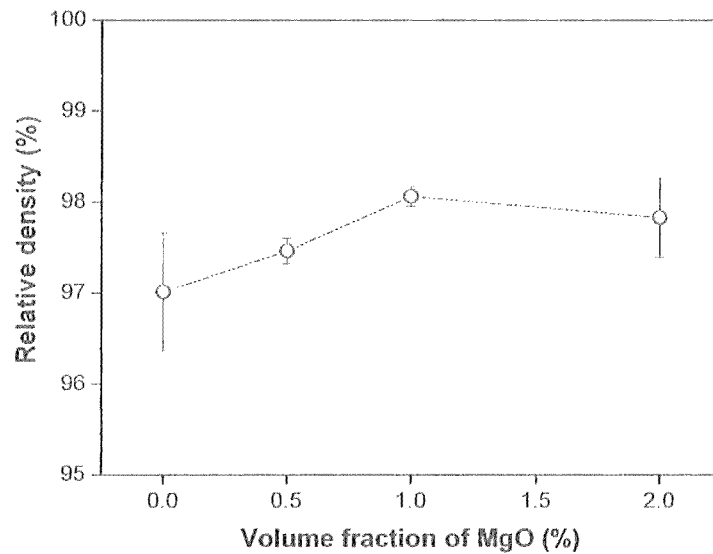


รูป 4.15 ขนาดของเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาขึ้นเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200°C

จากข้อมูลขนาดของเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร พบว่าอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ที่เติมเข้าไปในเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ทำให้ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ มีขนาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ไปยับยั้งการเติบโตของเกรนของ เซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ นั้นเอง

4.11 ผลการศึกษาความหนาแน่นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO

นำเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C มาทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่นด้วยวิธีอาร์คิมิดีส และนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ตามสมการที่ (3.7) ได้ผลดังรูป 4.16 และดังตาราง 4.4



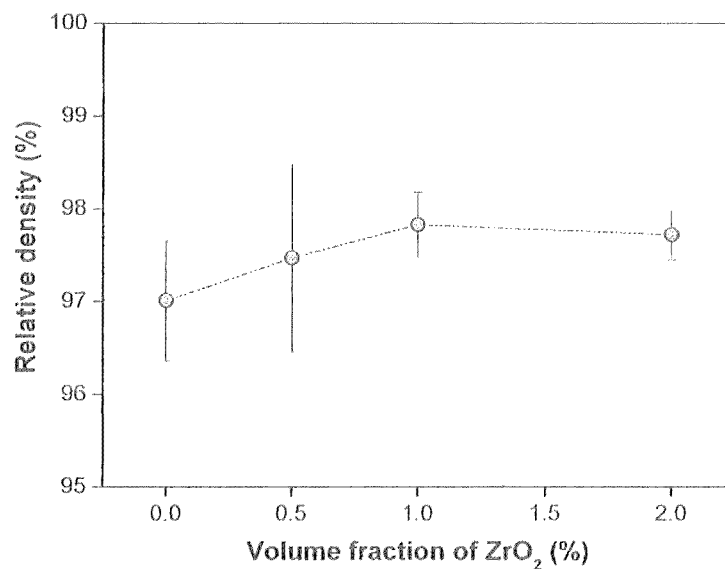
รูป 4.16 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C

ตาราง 4.4 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C

PZT + (0–2) vol% MgO nanoparticles	
ร้อยละโดยปริมาตรของ MgO (vol%)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%)
0	97.01 ± 0.65
0.5	97.46 ± 0.14
1	98.06 ± 0.11
2	97.83 ± 0.44

4.12 ผลการศึกษาความหนาแน่นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2

นำเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาขึ้นเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200°C มาทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่นด้วยวิธีอาร์คิมิดีส และนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ตามสมการที่ (3.7) ได้ผลดังรูป 4.17 และดังตาราง 4.5

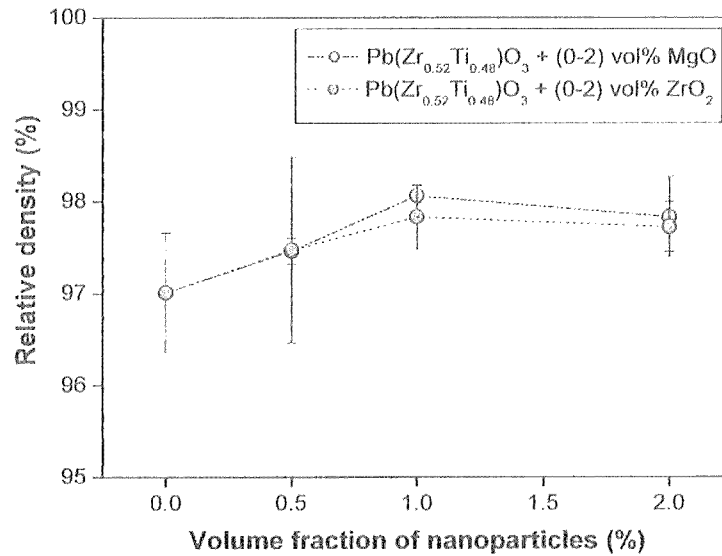


รูป 4.17 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาขึ้นเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200°C

ตาราง 4.5 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาขึ้นเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C

PZT + (0–2) vol% ZrO_2 nanoparticles	
ร้อยละโดยปริมาตรของ ZrO_2 (vol%)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%)
0	97.01 ± 0.65
0.5	97.47 ± 1.01
1	97.83 ± 0.35
2	97.72 ± 0.27

นำค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร มาเขียนเป็นกราฟรวมได้ดังรูป 4.18

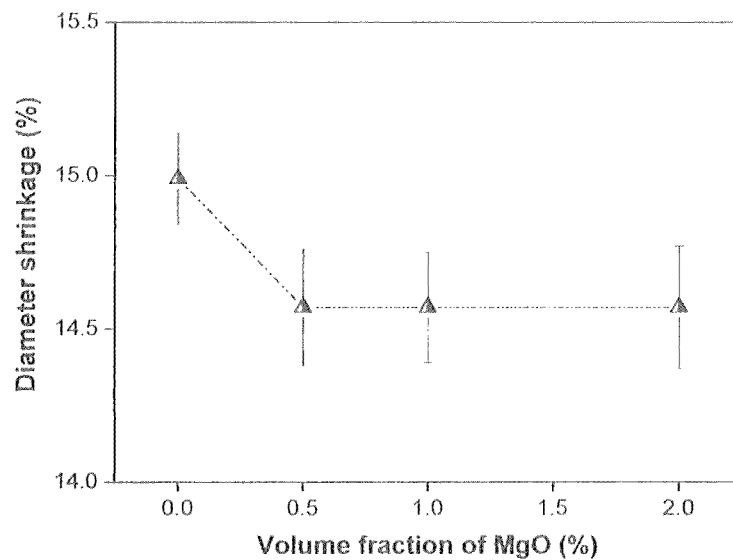


รูป 4.18 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เตาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C

จากข้อมูลความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร พบว่าอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ที่เติมเข้าไปในเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ทำให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ มีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดเมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 1 โดยปริมาตรทั้งคู่ ซึ่งความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + 1 \text{ vol\% MgO}$ มีค่า 98.06% และความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + 1 \text{ vol\% ZrO}_2$ มีค่า 97.83%

4.13 ผลการศึกษาค่าร้อยละของการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO

นำผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร ที่อัดขึ้นรูปแล้ว วัดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนและหลังเผาซินเตอร์ คำนวณหาค่าร้อยละของการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังสมการ (3.8) ค่าร้อยละของการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + (0-2)\text{ vol\% MgO}$ ที่คำนวณได้ และค่าความคลาดเคลื่อน แสดงได้ดังกราฟในรูป 4.19 และตาราง 4.6



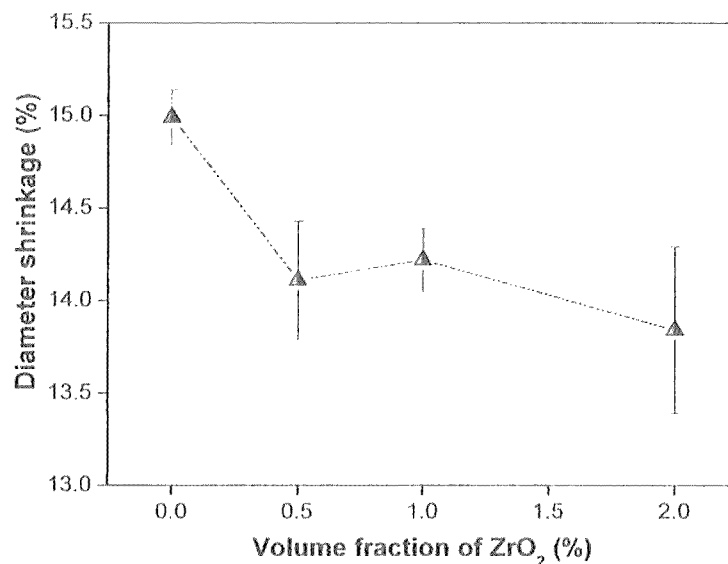
รูป 4.19 ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

ตาราง 4.6 ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

PZT + (0-2) vol% MgO nanoparticles	
ร้อยละโดยปริมาตรของ $\text{MgO}(\text{vol}\%)$	ร้อยละการหดตัวเชิงเส้น (%)
0	14.99 ± 0.15
0.5	14.57 ± 0.19
1	14.57 ± 0.18
2	14.57 ± 0.20

4.14 ผลการศึกษาค่าร้อยละของการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2

นำผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร ที่อัดขึ้นรูปแล้ว วัดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนและหลังเผาซินเตอร์ คำนวณหาค่าร้อยละของการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C ดังสมการ (3.8) ค่าร้อยละของการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + (0-2) \text{ vol\% } \text{ZrO}_2$ ที่คำนวณได้ และค่าความคลาดเคลื่อน แสดงได้ดังกราฟในรูป 4.20 และดังตาราง 4.7

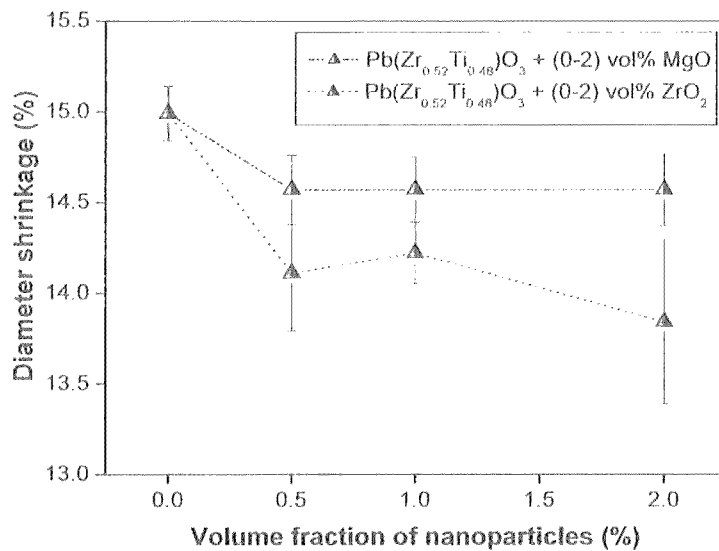


รูป 4.20 ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200°C

ตาราง 4.7 ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C

PZT + (0-2) vol% ZrO_2 nanoparticles	
ร้อยละโดยปริมาตรของ ZrO_2 (vol%)	ร้อยละการหดตัวเชิงเส้น (%)
0	14.99 ± 0.15
0.5	14.11 ± 0.32
1	14.22 ± 0.17
2	13.84 ± 0.45

นำค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร มาเขียนเป็นกราฟรวมได้ดังรูป 4.21



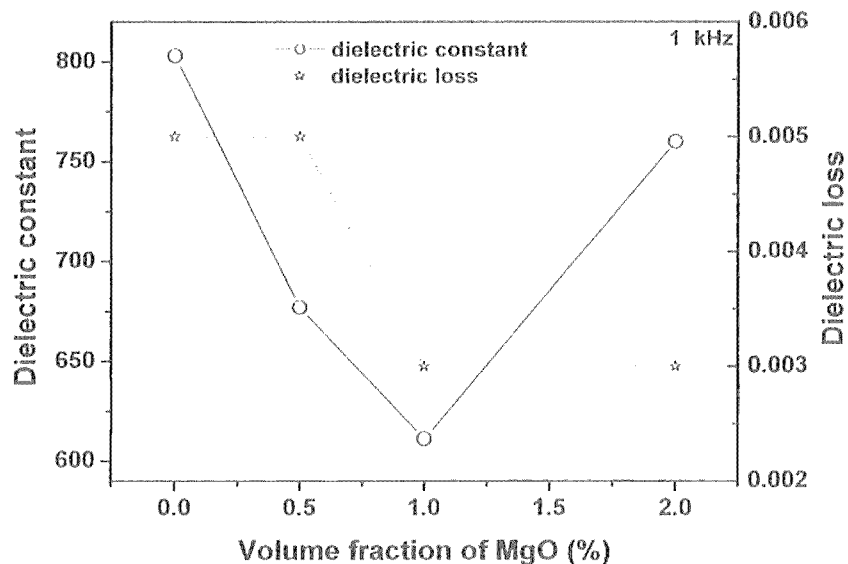
รูป 4.21 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C

จากข้อมูลร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร พบว่าอนุภาคระดับนาโนของ MgO และ ZrO_2 ที่เติมเข้าไปในเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ทำให้ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ มีค่าลดลง โดยค่าร้อยละของการหดตัวเชิงเส้นอยู่ในช่วง 13 – 15 % ซึ่งเป็นปกติของการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิกทั่วไป

4.15 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO

นำเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C มาขัดผิวหน้าของเซรามิกทั้งสองข้างให้ได้ระนาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200, 400, 600, 800 และ 1000 ตามลำดับ ล้างและอบให้แห้ง วัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของเซรามิกที่ขัดแล้ว จากนั้นทำขั้วด้วยกาวเงิน นำไปวัดค่าความจุไฟฟ้า และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 kHz และ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง แล้วทำการคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกตามสมการ (3.9)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังกราฟในรูป 4.22 และตาราง 4.8



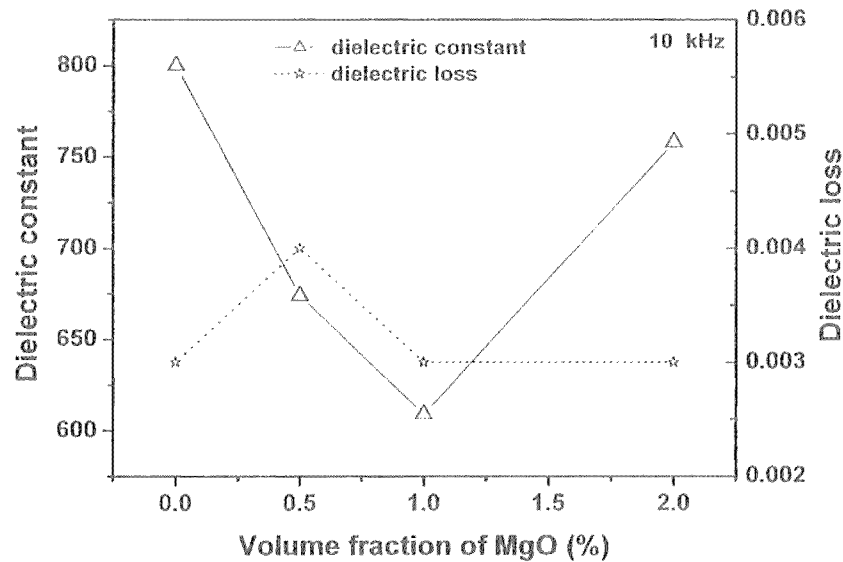
รูป 4.22 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

ตาราง 4.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

PZT + (0–2) vol% MgO nanoparticles		
vol% MgO	ϵ_r	$\tan \delta$
0	803	0.005
0.5	677	0.005
1	611	0.003
2	760	0.003

จะเห็นว่าเมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง จะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO มีค่าลดลง แต่เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 2 โดยปริมาตร ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ส่วนค่าการสูญเสียทางความร้อนเนื่องจากไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO นั้นมีค่าลดลงจาก 0.005 เป็น 0.003

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 10 kHz ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังกราฟในรูป 4.23 และดังตาราง 4.9

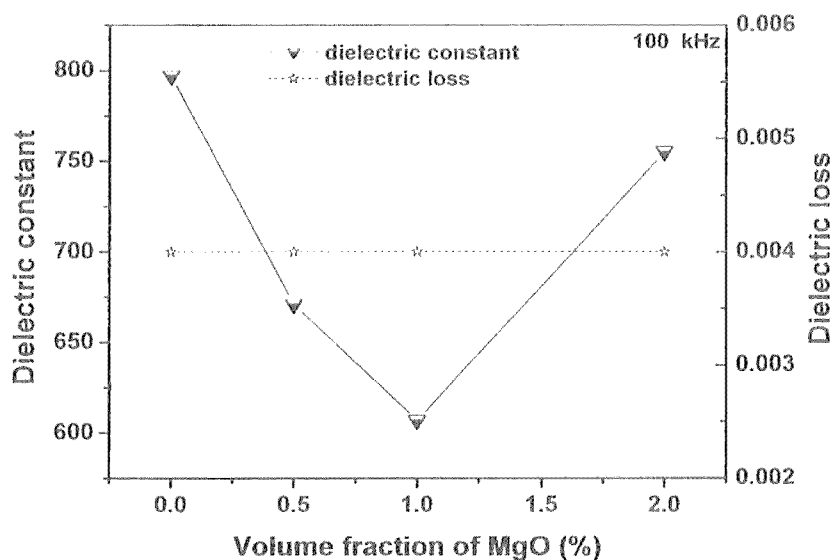


รูป 4.23 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 10 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

ตาราง 4.9 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 10 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

PZT + (0–2) vol% MgO nanoparticles		
vol% MgO	ϵ_r	$\tan \delta$
0	800	0.003
0.5	674	0.004
1	609	0.003
2	758	0.003

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังกราฟในรูป 4.24 และตาราง 4.10

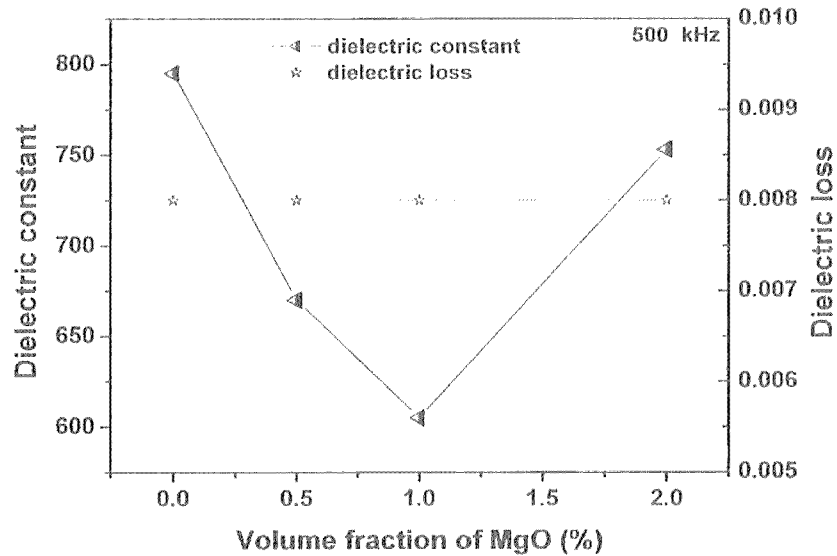


รูป 4.24 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

ตาราง 4.10 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

PZT + (0-2) vol% MgO nanoparticles		
vol% MgO	ϵ_r	$\tan \delta$
0	797	0.004
0.5	671	0.004
1	607	0.004
2	755	0.004

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 500 kHz ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังกราฟในรูป 4.25 และตาราง 4.11

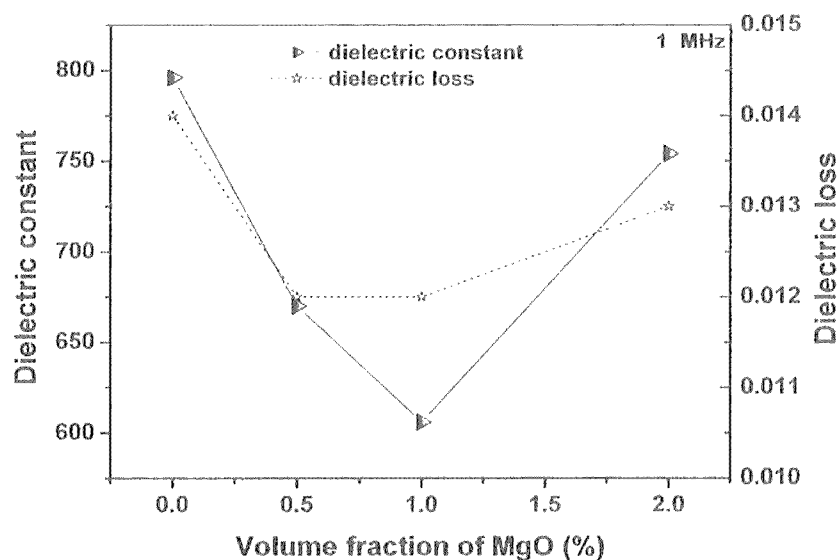


รูป 4.25 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 500 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

ตาราง 4.11 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 500 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

PZT + (0–2) vol% MgO nanoparticles		
vol% MgO	ϵ_r	$\tan \delta$
0	795	0.008
0.5	670	0.008
1	605	0.008
2	753	0.008

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังกราฟในรูป 4.26 และตาราง 4.12

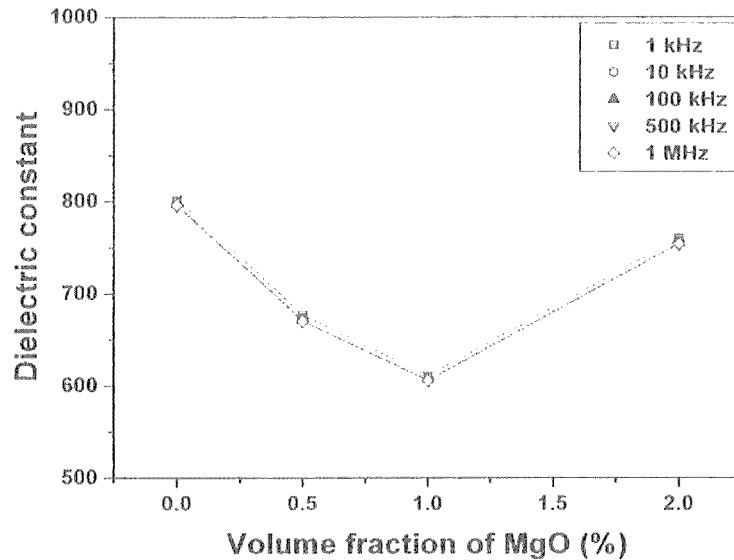


รูป 4.26 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง

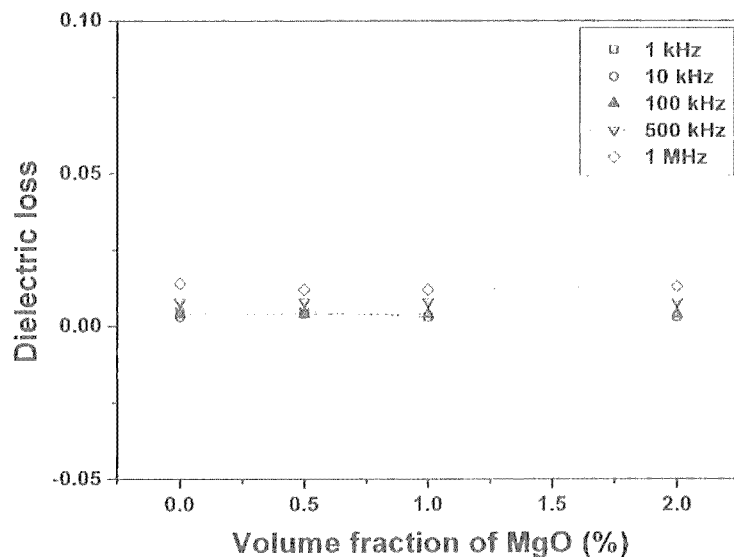
ตาราง 4.12 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง

PZT + (0–2) vol% MgO nanoparticles		
vol% MgO	ϵ_r	$\tan \delta$
0	796	0.014
0.5	670	0.012
1	606	0.012
2	754	0.013

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 kHz และ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังกราฟในรูป 4.27–4.28 และดังตาราง 4.13



รูป 4.27 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C



รูป 4.28 ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C

ตาราง 4.13 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิห้อง

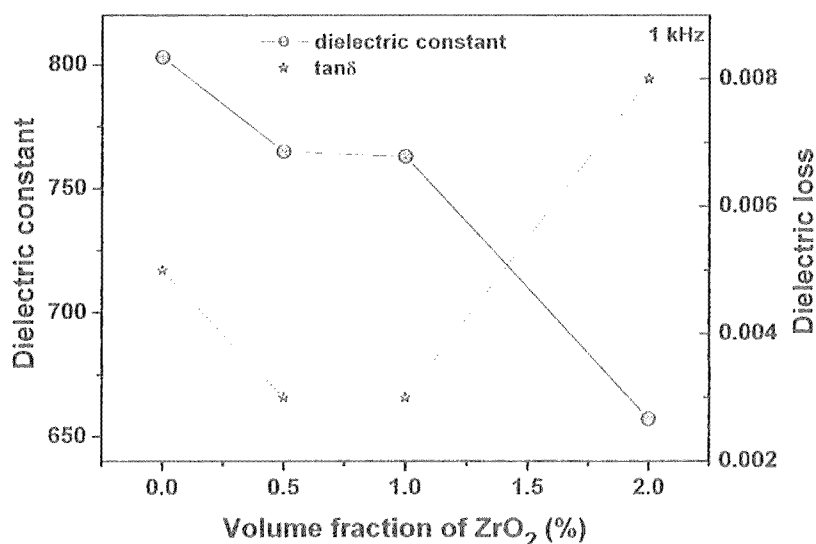
PZT + (0–2) vol% MgO nanoparticles								
ความถี่	0 vol%		0.5 vol%		1 vol%		2 vol%	
	ϵ_r	$\tan \delta$	ϵ_r	$\tan \delta$	ϵ_r	$\tan \delta$	ϵ_r	$\tan \delta$
1 kHz	803	0.005	677	0.005	611	0.003	760	0.003
10 kHz	800	0.003	674	0.004	609	0.003	758	0.003
100 kHz	797	0.004	671	0.004	607	0.004	755	0.004
500 kHz	795	0.008	670	0.008	605	0.008	753	0.008
1 MHz	796	0.014	670	0.012	606	0.012	754	0.013

จากข้อมูลในตาราง 4.13 และกราฟค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียความร้อนเนื่องจากไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิห้อง พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 605 – 803 และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.003 – 0.13 ซึ่งเมื่อความถี่ของการวัดสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร นี้ยิ่งมีค่าลดลง ส่วนค่าการสูญเสียความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร นี้ยิ่งมีค่าสูงขึ้น และเมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0.5 และ 1 โดยปริมาตร ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็ลดลง แต่เมื่อปริมาณอนุภาคระดับนาโนของ MgO เพิ่มเป็นร้อยละ 2 โดยปริมาตร ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็สูงขึ้นอีก

4.16 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2

นำเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C มาขัดผิวหน้าของเซรามิกทั้งสองข้างให้ได้ระนาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200, 400, 600, 800 และ 1000 ตามลำดับ ล้างและอบให้แห้ง วัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของเซรามิกที่ขัดแล้ว จากนั้นทำขั้วด้วยกาวเงิน นำไปวัดค่าความจุไฟฟ้า และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 kHz และ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง แล้วทำการคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกตามสมการ (3.9)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังกราฟในรูป 4.29 และตาราง 4.14



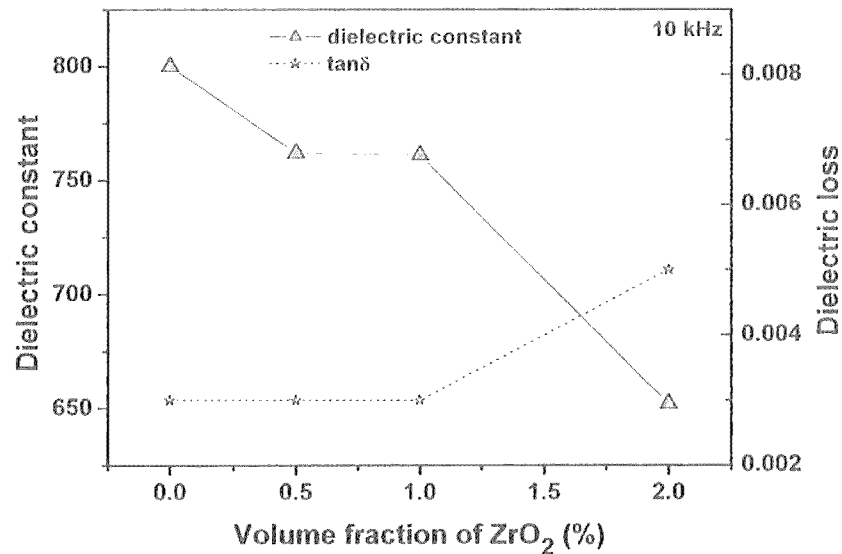
รูป 4.29 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

ตาราง 4.14 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

PZT + (0–2) vol% ZrO_2 nanoparticles		
vol% ZrO_2	ϵ_r	$\tan \delta$
0	803	0.005
0.5	765	0.003
1	763	0.003
2	657	0.008

จะเห็นว่าเมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง จะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 มีค่าลดลง จาก 803 เป็น 657 และค่าการสูญเสียทางความร้อนเนื่องจากไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 นั้นมีค่าลดลงจาก 0.05 เป็น 0.03 เมื่อปริมาณอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 เป็นร้อยละ 0.5 และ 1 โดยปริมาตร แต่เมื่อปริมาณอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 เป็นร้อยละ 2 โดยปริมาตร ค่าการสูญเสียทางความร้อนเนื่องจากไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ มีค่าสูงขึ้นเป็น 0.008

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 10 kHz ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังกราฟในรูป 4.30 และตาราง 4.15

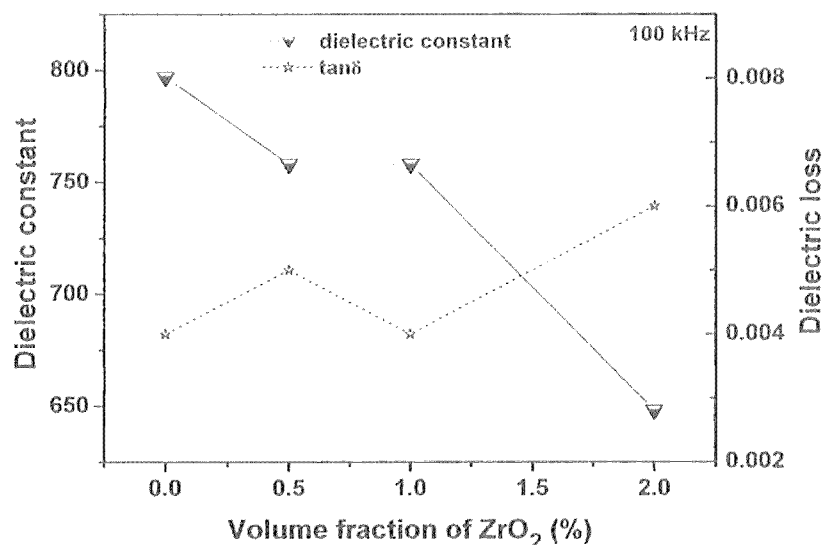


รูป 4.30 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 10 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

ตาราง 4.15 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 10 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

PZT + (0–2) vol% ZrO_2 nanoparticles		
vol% ZrO_2	ϵ_r	$\tan \delta$
0	800	0.003
0.5	762	0.003
1	761	0.003
2	652	0.005

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังกราฟในรูป 4.31 และตาราง 4.16

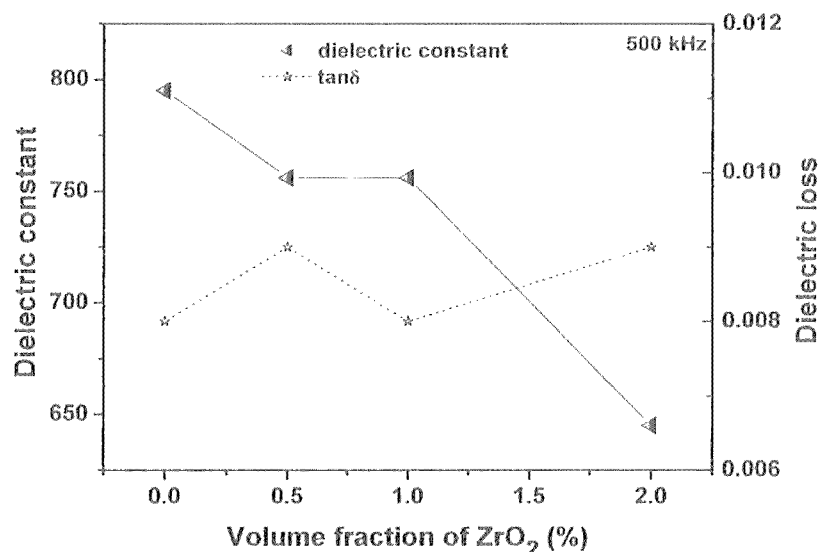


รูป 4.31 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

ตาราง 4.16 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 100 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

PZT + (0–2) vol% ZrO_2 nanoparticles		
vol% ZrO_2	ϵ_r	$\tan \delta$
0	797	0.004
0.5	758	0.005
1	758	0.004
2	648	0.006

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 500 kHz ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังกราฟในรูป 4.32 และตาราง 4.17

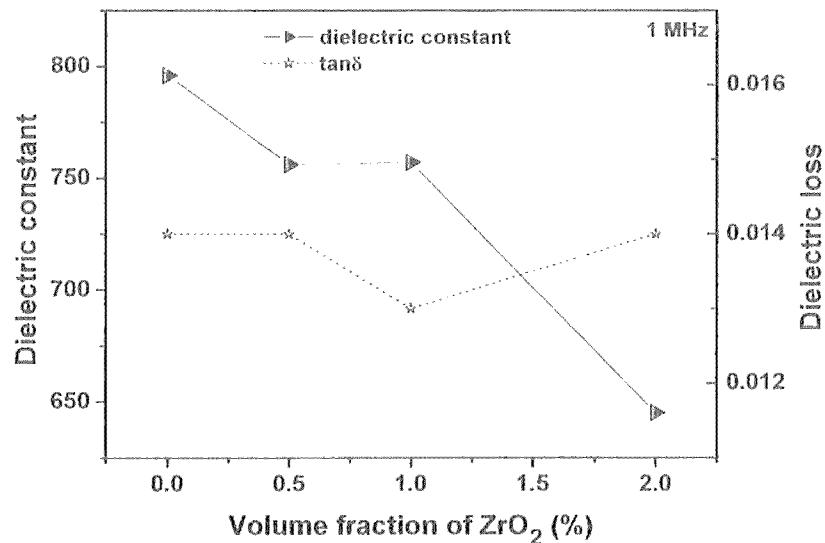


รูป 4.32 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 500 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

ตาราง 4.17 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 500 kHz ณ อุณหภูมิห้อง

PZT + (0–2) vol% ZrO_2 nanoparticles		
vol% ZrO_2	ϵ_r	$\tan \delta$
0	795	0.008
0.5	756	0.009
1	756	0.008
2	645	0.009

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังกราฟในรูป 4.33 และตาราง 4.18

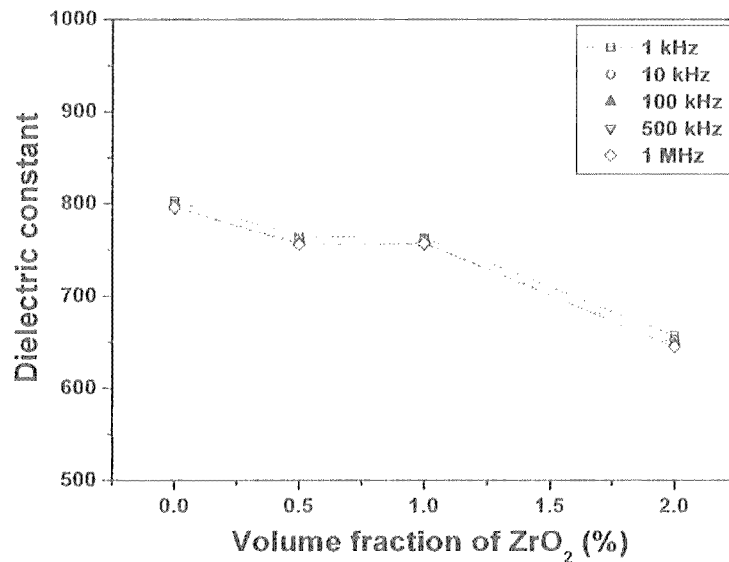


รูป 4.33 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง

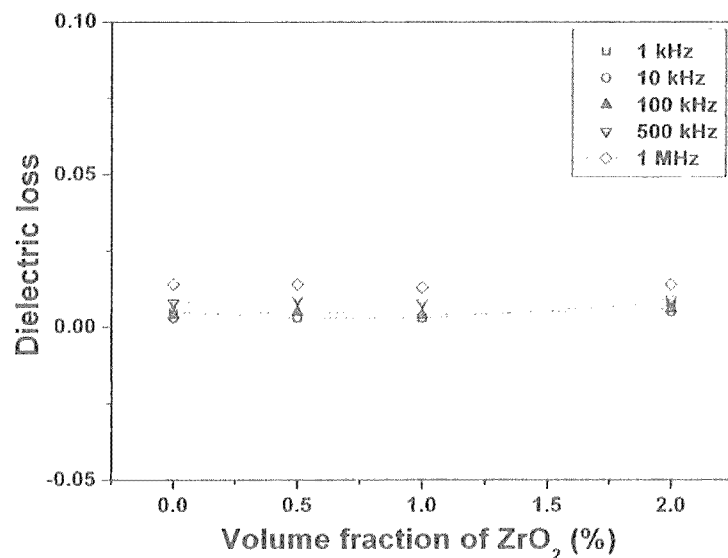
ตาราง 4.18 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง

PZT + (0–2) vol% ZrO_2 nanoparticles		
vol% ZrO_2	ϵ_r	$\tan \delta$
0	796	0.014
0.5	756	0.014
1	757	0.013
2	645	0.014

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เฟอร์ริต ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ 1, 10, 100, 500 kHz และ 1 MHz ณ อุณหภูมิห้อง แสดงดังกราฟในรูป 4.34–4.35 และตาราง 4.19



รูป 4.34 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เฟอร์ริต ณ อุณหภูมิ 1200 °C



รูป 4.35 ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เฟอร์ริต ณ อุณหภูมิ 1200 °C

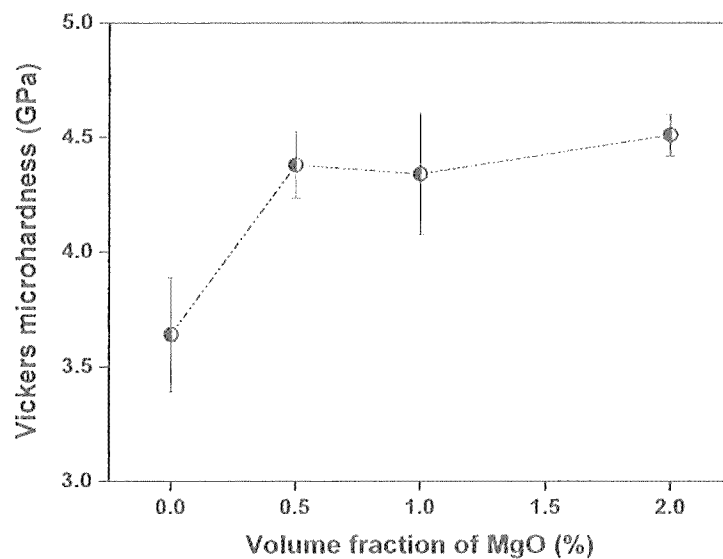
ตาราง 4.19 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิห้อง

PZT + (0–2) vol% ZrO_2 nanoparticles								
ความถี่	0 vol%		0.5 vol%		1 vol%		2 vol%	
	ϵ_r	$\tan \delta$	ϵ_r	$\tan \delta$	ϵ_r	$\tan \delta$	ϵ_r	$\tan \delta$
1 kHz	803	0.005	765	0.003	763	0.003	657	0.008
10 kHz	800	0.003	762	0.003	761	0.003	652	0.005
100 kHz	797	0.004	758	0.005	758	0.004	648	0.006
500 kHz	795	0.008	756	0.009	756	0.008	645	0.009
1 MHz	796	0.014	756	0.014	757	0.013	645	0.014

จากข้อมูลในตาราง 4.19 และกราฟค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และกราฟการสูญเสียความร้อนเนื่องจากไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C วัดที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิห้อง พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 645 – 803 และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.003 – 0.14 ซึ่งเมื่อความถี่ของการวัดสูงขึ้นทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร นี้ยังมีค่าลดลง ส่วนค่าการสูญเสียความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตรนี้จะมีค่าน้อยที่สุดที่ความถี่ของการวัดเป็น 10 kHz

4.17 ผลการศึกษาค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO

นำเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้ว มาทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150, 240, 360, 600, 800 และ 1000 เพื่อให้มีผิวหน้าเรียบได้ระนาบ และขัดเงาด้วยสเปรย์ผง ขัดเพชรที่มีอนุภาค $6\text{ }\mu\text{m}$, $3\text{ }\mu\text{m}$ และ $1\text{ }\mu\text{m}$ จนผิวหน้าของชิ้นงานมีความเงาเป็นกระจก จึงนำชิ้นงานนี้ล้าง อบ และทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ด้วยเครื่องทดสอบค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ นำรอยกดที่ได้ไปวัดค่ารอยกดและคำนวณค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ตามสมการ (3.10) ค่าที่ได้จากการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นดังกราฟในรูป 4.36 และดังตาราง 4.20

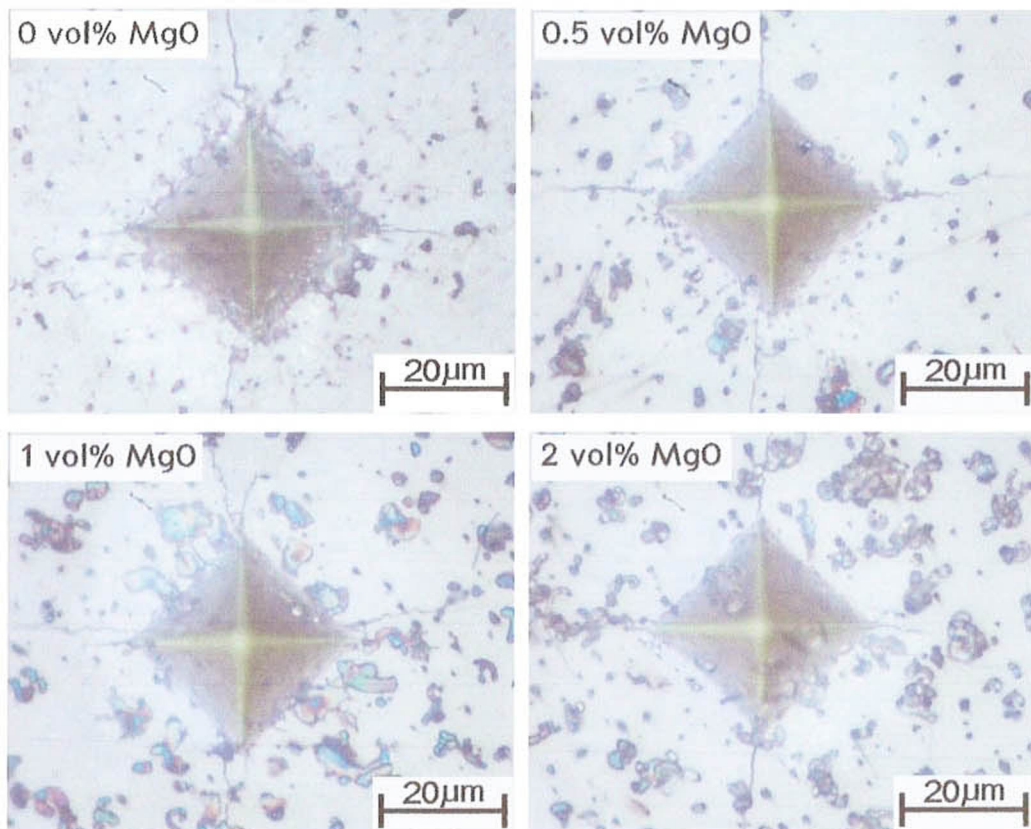


รูป 4.36 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากรูป 4.36 และตาราง 4.20 พบว่าค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ นั้น มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคระดับนาโนของ MgO มีค่าสูงขึ้น ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ในช่วง $3.64 - 4.51\text{ GPa}$ ร้อยกตระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร แสดงดังรูป 4.37

ตาราง 4.20 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C

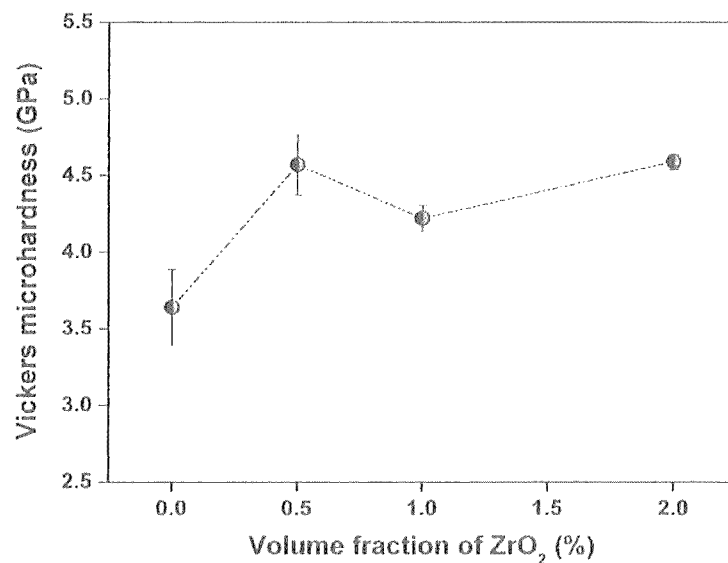
PZT + (0–2) vol% MgO nanoparticles	
vol% MgO	Vickers hardness (GPa)
0	3.64 ± 0.25
0.5	4.38 ± 0.15
1	4.34 ± 0.27
2	4.51 ± 0.09



รูป 4.37 รูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของรอยกดระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C

4.18 ผลการศึกษาค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2

นำเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้ว มาทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150, 240, 360, 600, 800 และ 1000 เพื่อให้ผิวหน้าเรียบได้ระนาบ และขัดเงาด้วยสเปรย์ผง ขัดเพชรที่มีอนุภาค $6\text{ }\mu\text{m}$, $3\text{ }\mu\text{m}$ และ $1\text{ }\mu\text{m}$ จนผิวหน้าของชิ้นงานมีความเงาเป็นกระจก จึงนำชิ้นงานนี้ล้าง อบ และทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ด้วยเครื่องทดสอบค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ นำรอยกดที่ได้ไปวัดค่ารอยกดและคำนวณค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ตามสมการ (3.10) ค่าที่ได้จากการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นดังกราฟในรูป 4.38 และดังตาราง 4.21

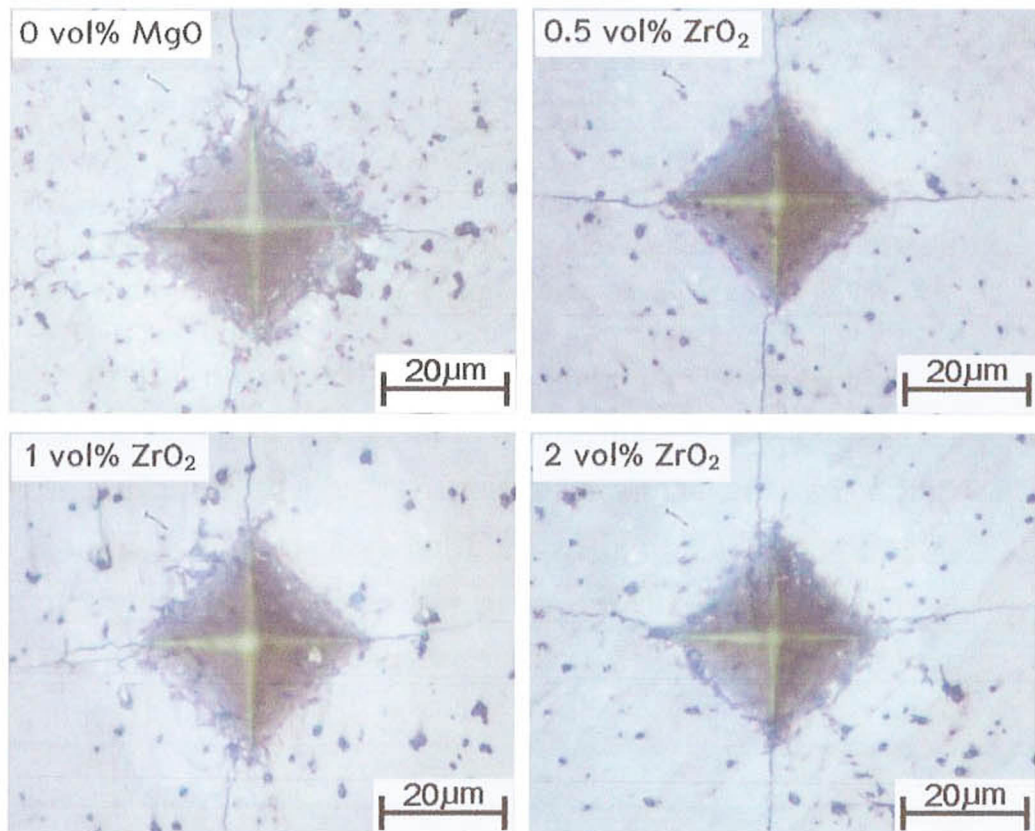


รูป 4.38 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากรูป 4.38 และตาราง 4.21 พบว่าค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ นั้น มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 มีค่าสูงขึ้น ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ในช่วง $3.64 - 4.59\text{ GPa}$ รุปรอยกดระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร แสดงดังรูป 4.39

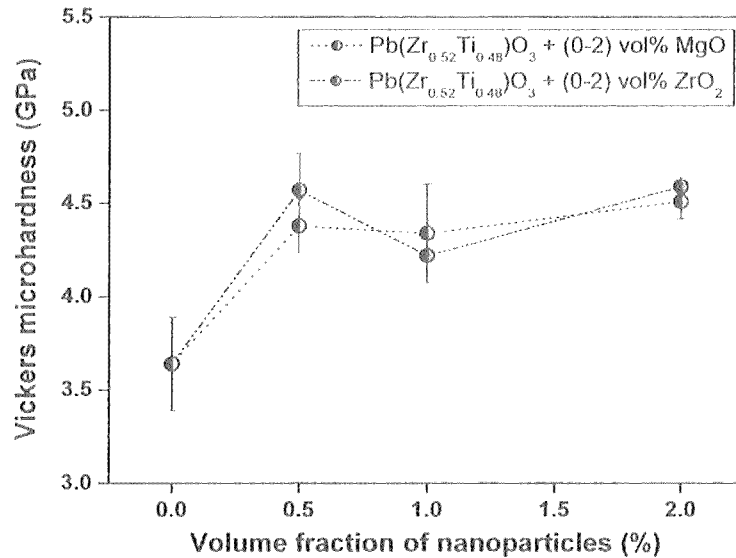
ตาราง 4.21 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200°C

PZT + (0–2) vol% ZrO_2 nanoparticles	
vol% ZrO_2	Vickers hardness (GPa)
0	3.64 ± 0.25
0.5	4.57 ± 0.20
1	4.22 ± 0.09
2	4.59 ± 0.05



รูป 4.39 รูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของรอยกดระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200°C

นำค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO หรือ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร มาเขียนเป็นกราฟรวมได้ดังรูป 4.40



รูป 4.40 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO หรือ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1200 °C

จากรูป 4.40 พบว่าเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO หรือ ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 0 – 2 โดยปริมาตร เพาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C จะมีค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์สูงขึ้นเมื่อเติมปริมาณอนุภาคระดับนาโนของ MgO หรือ ZrO_2 เนื่องจาก MgO และ ZrO_2 มีค่าความแข็งสูง จึงช่วยในการทำให้เซรามิกมีค่าความแข็งสูงขึ้นได้ โดยไม่ว่าจะเติมในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 หรือ 2 โดยปริมาตร ก็ทำให้ค่าความแข็งระดับจุลภาคของวิกเกอร์สูงขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 4.5 GPa นั่นคือทำให้มีค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์สูงขึ้นประมาณร้อยละ 25