

ผลของเวลาในการเผาเซรามิกที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาค
ของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานเนต
ชมพูนุช พิษมาก

**The Effect of Dwell Time on Physical Properties and Microstructure
of Lead Zirconate Titanate Ceramics**
Chompoonuch Puchmark

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000

Corresponding author. E-mail: chompoonuchp@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของเวลาในการเผาเซรามิกของการเผาซินเตอร์ (sintering temperature) ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และ โครงสร้างทางจุลภาค ของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานเนต ($\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$: PZT) ที่ถูกเตรียมขึ้นโดยวิธีมิกซ์ออกไซด์แบบดั้งเดิม (conventional mixed oxide method) พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเผาเคลือบเซรามิกได้ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ด้วยการวิเคราะห์การก่อเกิดเฟสโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) แล้วนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการขึ้น-ลง ของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยแปรค่าเวลาในการเผาเซรามิกที่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าระยะเวลาในการเผาเซรามิกนี้มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และ โครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิก PZT ได้แก่ ร้อยละของการหดตัว ความหนาแน่น และขนาดของเกรน โดยระยะเวลาของการเผาเซรามิกซินเตอร์ที่สูงขึ้นทำให้ค่าเหล่านี้สูงขึ้น

คำสำคัญ: เลดเซอร์โคเนตไททานเนต โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางกายภาพ เวลาในการเผาเซรามิก

Abstract

The effect of dwell time on the physical properties and microstructure of lead zirconate titanate ceramics ($\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$: PZT) were prepared by a conventional mixed oxide method. The optimum temperature for calcinations the formation of phase pure perovskite, was found to be about 750 °C for 2 h with a heating/cooling rate of 10 °C/min. Phase formation was examined by

X-ray diffraction (XRD). The sintering procedures were carried out at 1150 and 1200 °C for 2, 4 and 6 h with a heating/cooling rate of 5 °C/min. The effect of dwell time on physical properties and microstructure was investigated. The results showed that the percent of linear shrinkage, densification and average grain size increased with dwell time.

Keywords: Lead zirconate titanate, Microstructure, Physical property, Dwell time

บทนำ

เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต ($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$; PZT) เป็นวัสดุที่รู้จักกันดีในการนำไปประยุกต์ใช้งานเชิงอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่างๆ เช่น ตัวแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล (transducers) โซนาร์ (sonars) ตัวขับเคลื่อนแบบหมุน (rotary actuators) (Matsuo and Sasaki, 1965; Chandatreyya *et al.*, 1981; Hiramath *et al.*, 1983) อุปกรณ์ที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นบวก (positive temperature coefficient devices: PCT) วาล์วปิดเปิดแสงไฟฟ้าแบบเบา (electro optic light valves) ตัวขับเคลื่อนระดับไมโคร (microactuators) และตัวตรวจวัดทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง (pyroelectric sensor) (Heartling, 1999; Buchanan, 1986) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางไดอิเล็กทริก และเพียโซอิเล็กทริกที่ดีมาก เซรามิก PZT มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และสมบัติเพียโซอิเล็กทริกสูงที่สุด ณ รอยต่อเฟสที่มีลักษณะเหมือนกัน (Morphotropic phase boundary: MPB) ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง PZ:PT เป็น 52:48 (Jaffe *et al.*, 1971; Moulson and Herbert, 2003) ทำให้เซรามิกชนิดนี้มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นตัวขับเคลื่อน (actuator) หรือ ตัวกักเก็บพลังงาน (energy storage) สมบัติเด่นต่างๆ ของเซรามิก PZT ที่เลือกนำมาใช้ประโยชน์นั้นจะมีประสิทธิภาพในการใช้งานเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิด คุณภาพของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม และกระบวนการผลิต (processing) ซึ่งสารที่ได้จากการวิธีการเตรียมที่แตกต่างกันก็จะมีสมบัติแตกต่างกันด้วย แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการพัฒนากระบวนการเตรียมสาร PZT ด้วยวิธีทางเคมีเช่น กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal processing) หรือกระบวนการตกตะกอนร่วม (coprecipitation processing) (Rao *et al.*, 1996) ก็ตาม แต่การเตรียมสาร PZT ด้วยกระบวนการทางเคมีนับว่าเป็นวิธีที่มีความซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายสูง เมื่อเทียบกับการเตรียมด้วยวิธีมิกซ์ออกไซด์แบบดั้งเดิม (conventional mixed oxides) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสมในการเตรียมในปริมาณมากๆ และมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้กันมาจนถึงปัจจุบัน (Buchanan, 1986)

ในกระบวนการเตรียมเซรามิก PZT ด้วยวิธีการต่างๆ จะมีผลโครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาผลของเวลาในการเผาซึ่งมีต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่เตรียมด้วยวิธีการมิกซ์ออกไซด์ ด้วยการเผาซินเตอร์

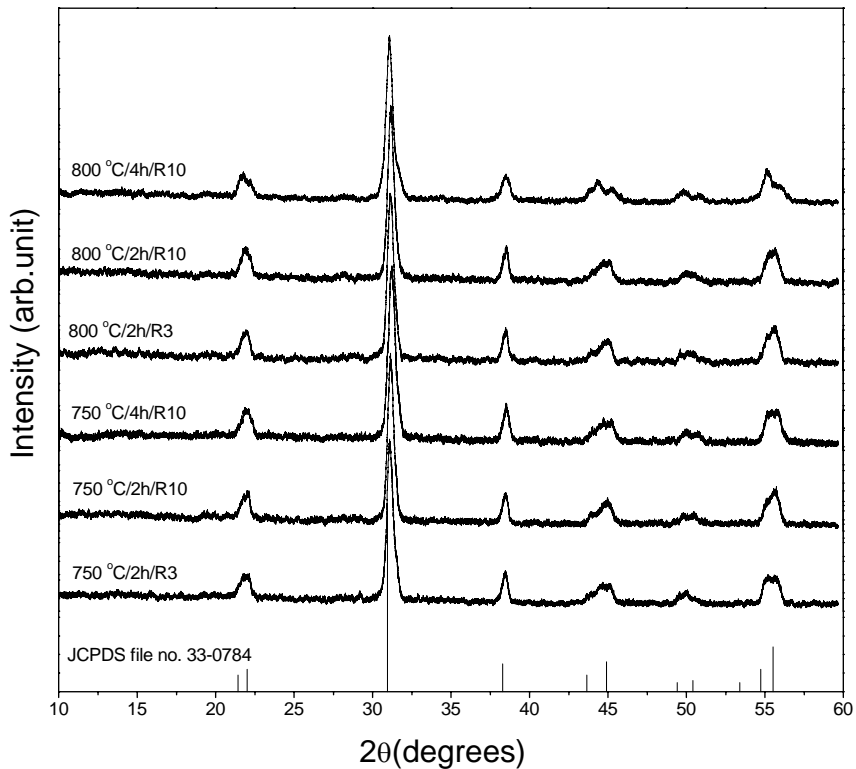
ที่ 2 อุณหภูมิ คือที่ 1150 องศาเซลเซียส และ 1200 องศาเซลเซียส และเผาแซ่ที่เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

ในการทดลองครั้งนี้ใช้สารตั้งต้นเลดออกไซด์ (PbO) เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO₂) และไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ทำการบดผสมเปียกโดยใช้ลูกบดเซอร์โคเนียเป็นตัวบด และใช้เอธิลแอลกอฮอล์เป็นตัวช่วยกระจายตัวของอนุภาค เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมที่บดละเอียดแล้วมาทำให้แห้งแล้วนำมาบดให้เล็กลงด้วยครกบดสารที่ทำจากหิน โมรา (agate mortar) นำผงที่บดมาทำการแยกขนาดของอนุภาคเพื่อให้ได้อนุภาคที่มีขนาดสม่ำเสมอ ด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (sieving) นำผงที่ได้ทำการเผาแคลไซน์ด้วยเตาไฟฟ้า ผลิตโดยบริษัท Lenton Furnances รุ่น 4279 ที่อุณหภูมิ 750 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิ 3 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที วิเคราะห์การก่อเกิดเฟสโดยใช้เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction) รุ่น D-500 ผลิตโดยบริษัท SIEMENS ประเทศเยอรมัน แล้วทำการเลือกอุณหภูมิแคลไซน์ที่เหมาะสม นำผงเซรามิก PZT ที่เผาแคลไซน์แล้วมาร้อนคัดขนาดอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นนำผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA) ซึ่งเป็นสารยึดเหนี่ยว ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักนำไปอัดขึ้นรูปให้เป็นแผ่นกลม (disk) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 มิลลิเมตร และหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก (SPACAC) ด้วยความดันขนาด 40 เมกกะปาสคาล เป็นเวลานาน 25 - 30 วินาที จากนั้นนำสารที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วไปทำการเผาซินเตอร์ด้วยเตาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในการทดลองนี้จะทำการแปรค่าเวลาในการเผาแซ่เป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ในระหว่างการเผาซินเตอร์นี้ ได้ทำการกำจัด PVA โดยการเผาแซ่ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในการเผาซินเตอร์นี้ทำการกลบด้วยผงเซรามิก PZT ป้องกันการสูญเสียของตะกั่ว เมื่อได้เซรามิกแล้วจึงทำการตรวจวิเคราะห์เซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ โดยหาค่าร้อยละของการหดตัว หาค่าความหนาแน่นด้วยวิธีอาร์คิมิดีส (Archimedes method) ตรวจสอบเฟสของเซรามิกโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ศึกษาลักษณะ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น LEO-1455VP จากประเทศอังกฤษ ซึ่งสามารถบอกถึงลักษณะ รูปร่าง และขนาดของเกรนของสารเซรามิกที่เตรียมได้ และทำการหาขนาดของเกรนโดยวิธีจุดตัดบนเส้นตรง (liner interception)

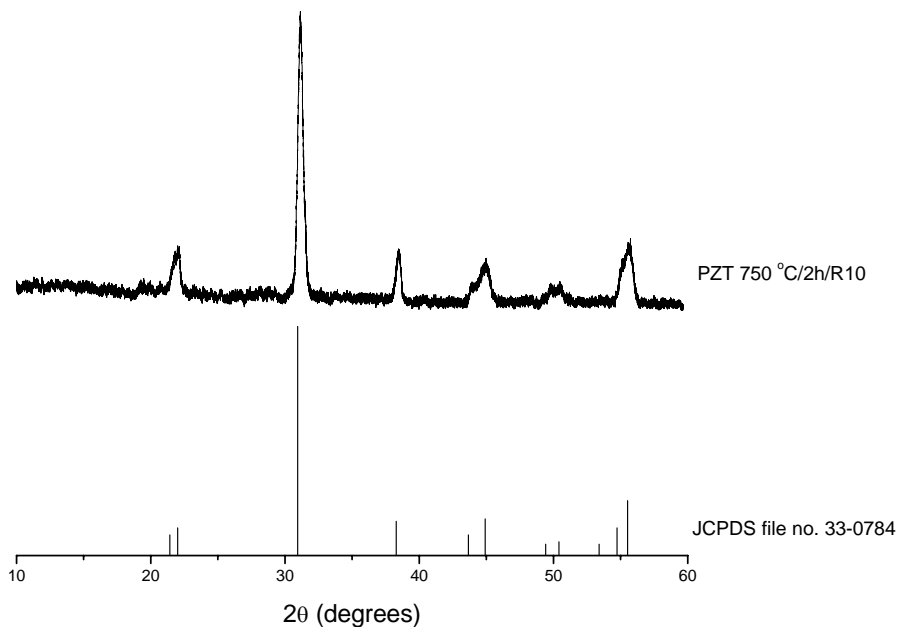
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

รูป 1 เป็นผลการวิเคราะห์สารด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750 และ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเผา 2 และ 4 ชั่วโมง และอัตราการให้ความร้อน 3 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าพีคที่เกิดขึ้นทั้งหมดสอดคล้องกับเฟส $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ (Powder Diffraction File, 2000) และไม่พบพีคที่บ่งบอกถึงสารเจือปนใดๆ สรุปได้ว่าผงที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิทั้งสองนี้ ทุกเงื่อนไข มีความบริสุทธิ์สูงเนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยาแบบสารละลายของแข็ง (solid state reaction) ได้สมบูรณ์ จึงเลือกที่จะใช้อุณหภูมิในการแคลไซน์เป็น 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ทั้งนี้เพื่อให้ความร้อนและเวลาน้อยที่สุด



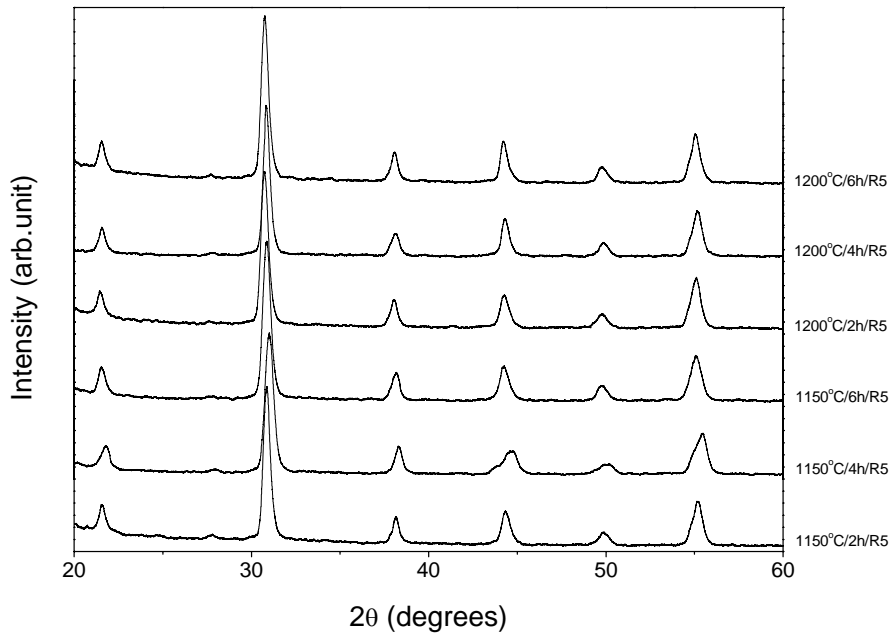
รูป 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเลดเซอร์โคเนตไททานเนต $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 3 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

รูป 2 เป็นผลของการเอ็กซ์เรย์ผงเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งจะเห็นว่าผงเซรามิก PZT นี้ ให้พีคตรงกันกับฐานข้อมูลใน JCPDS file no. 33-0784 ของ $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ (Powder Diffraction File, 2000) ทุกพีค จึงเชื่อได้ว่า ผงเซรามิก PZT ที่ได้นี้เป็นเฟสบริสุทธิ์



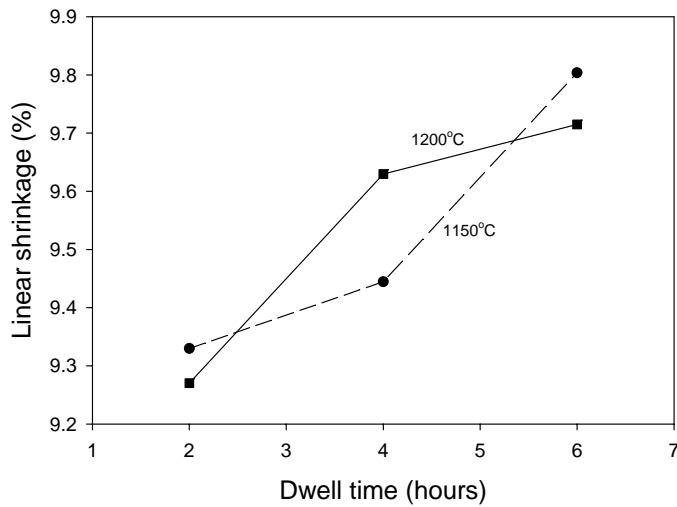
รูป 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเลดเซอร์โคเนตไททานเนต $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เทียบกับ JCPDS file no. 33-0784

นำผงเซรามิก PZT ที่เตรียมได้นี้มาอัดขึ้นรูปแล้วนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส และ 1200 องศาเซลเซียส และเผาแซ่ที่เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที นำไปเช็คเฟสของสารอีกครั้งโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ผลดังรูป 3 ซึ่งทุกเงื่อนไขของการเผาซินเตอร์ได้เป็นเซรามิก PZT ที่มีความบริสุทธิ์เช่นกัน

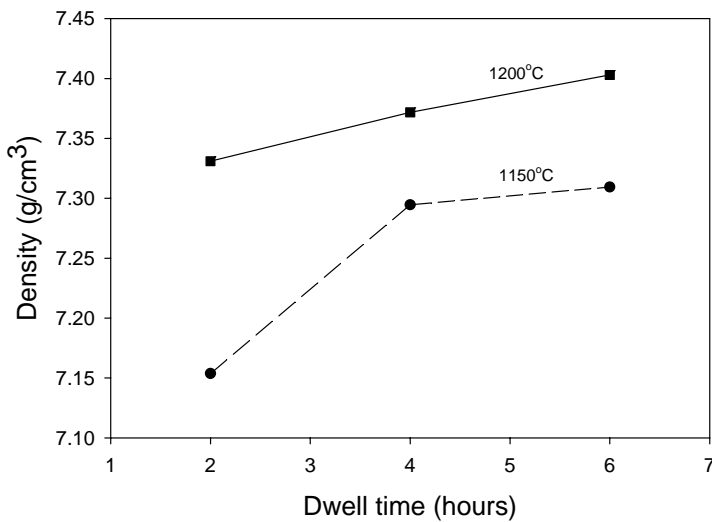


รูป 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่ 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

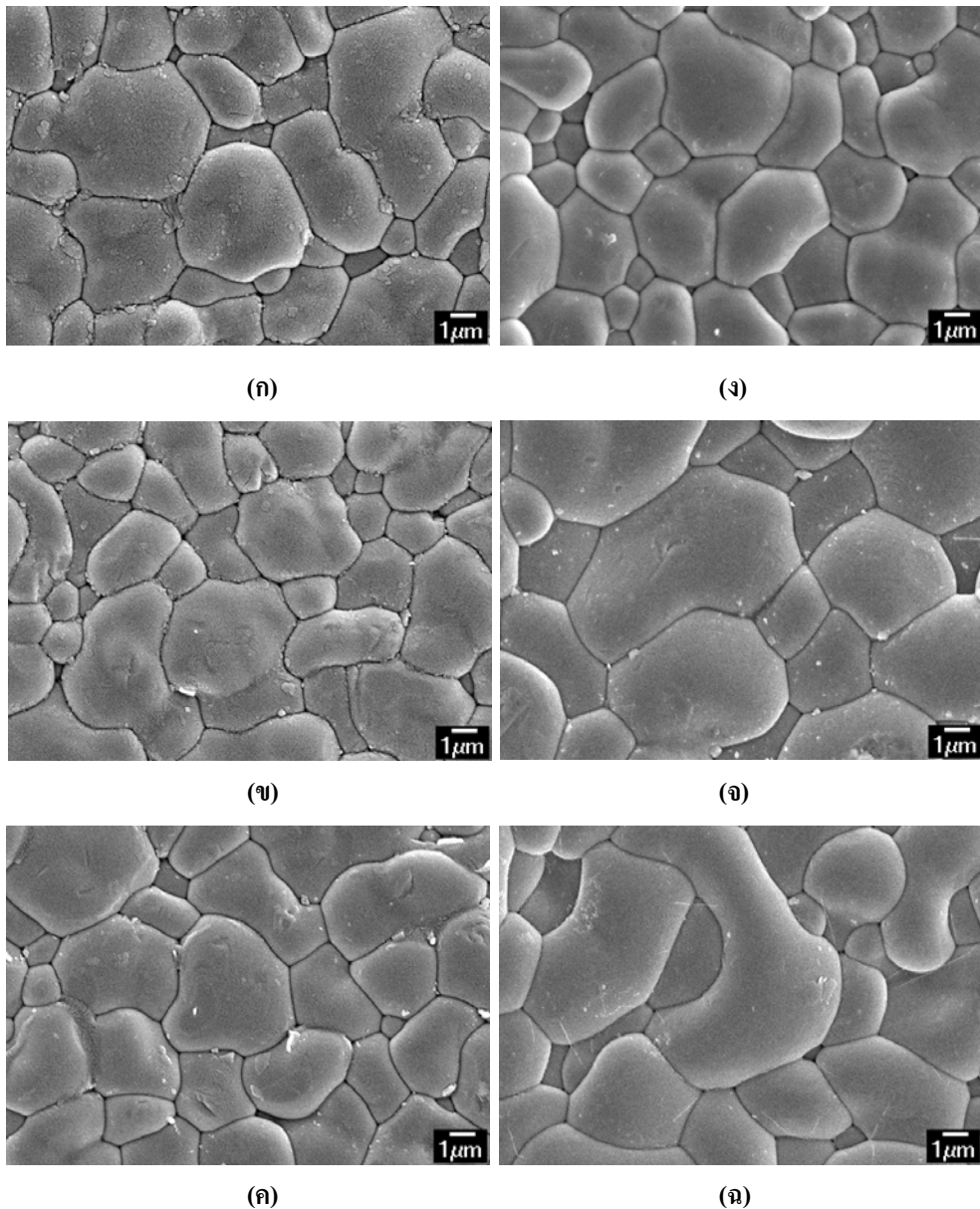
นำเซรามิกที่ได้จากการเผาซินเตอร์มาหาค่าร้อยละการหดตัว และหาค่าความหนาแน่น จะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาในการเผาแซ่นานขึ้นร้อยละการหดตัวเชิงเส้นจะเพิ่มมากขึ้นทั้งที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ส่วนความหนาแน่นของเซรามิก PZT ที่ได้นั้นได้ว่าที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1200 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นมากกว่าเซรามิกที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส และเวลาการเผาแซ่มีผลต่อความหนาแน่นของเซรามิก PZT อย่างมีนัยสำคัญดังรูปที่ 5 และเซรามิก PZT นี้มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เท่ากับ 7.40 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คิดเป็นร้อยละ 92.47 เมื่อเทียบกับความหนาแน่นเชิงทฤษฎี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่สารได้รับความร้อนเป็นเวลานานๆ จะเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการเผาซินเตอร์ ซึ่งทำให้สารมีการหดตัวเกิดขึ้น และมีการเชื่อมติดกันของอนุภาคมากขึ้น ซึ่งเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state solution)



รูป 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวเชิงเส้นเทียบกับเวลาในการเผาแซงของการเผาซินเตอร์ของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส อัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

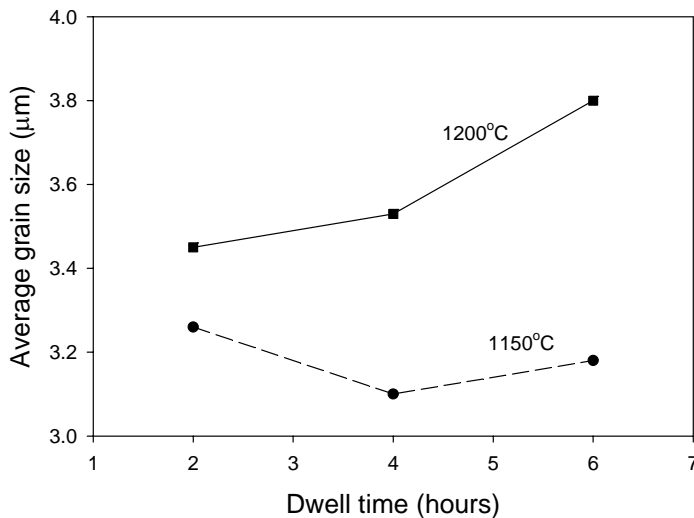


รูป 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเทียบกับเวลาในการเผาแซงของการเผาซินเตอร์ของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส อัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูป 6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 3500 เท่า ที่บริเวณผิวหน้าของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส โดยอัตราการขึ้นลง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และแปรค่าเวลาในการเผาแซ่ (ก) 1150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) 1150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ค) 1150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ง) 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (จ) 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ (ฉ) 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคที่บริเวณผิวของสารเซรามิก PZT ที่เตรียมได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดคังรูป 6 พบว่ารูปร่างของเกรนที่ได้ทุกเงื่อนไขของการซินเตอร์มีความคล้ายคลึงกันคือมีลักษณะค่อนข้างกลม และที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1200 องศาเซลเซียส เมื่อให้เวลาของการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 2 ชั่วโมงเป็น 4 และ 6 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นที่ผิวหน้าของสารเซรามิก PZT มีการเชื่อมต่อกันระหว่างเกรนขึ้น จึงทำให้ขนาดของเกรนที่ผิวหน้ามีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อทำการหาขนาดของเกรนโดยวิธีจุดตัดบนเส้นตรง พบว่าขนาดของเกรนเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วง 3.4 ถึง 3.8 ไมโครเมตร โดยที่ขนาดของเกรนใหญ่สุดที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งขนาดของเกรนนี้จะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน และส่งผลต่อค่าที่ไดอิเล็กทริก (Moulson and Herbert, 2003; Ye *et al.*, 2000) ซึ่งเป็นงานที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยต่อไป สำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับระยะเวลาในการเผาแช่ นั้นแสดงดังรูป 7 ซึ่งจะพบว่าระยะเวลาในการเผาแช่นั้นมีผลต่อขนาดของเกรนไม่มากนัก เพราะเกรนที่ได้อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน



รูป 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนเทียบกับเวลาในการเผาแช่ของการเผาซินเตอร์ของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส อัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยครั้งนี้พบว่าระยะเวลาในการเผาแซ่ของการเผาซินเตอร์เซรามิก PZT มีผลต่อสมบัติต่างๆ ได้แก่ ร้อยละของการหดตัว ความหนาแน่น และขนาดของเกรน ของสารเซรามิก PZT นี้ โดยระยะเวลาของการเผาแซ่ของอุณหภูมิซินเตอร์ที่สูงขึ้นทำให้ค่าเหล่านี้สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการทางความร้อน และการเพิ่มเวลาในการเผาซินเตอร์ทำให้สารละลายของแข็งนี้มีความสม่ำเสมอและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.ทวี ตันฉศิริ ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์โทเซรามิก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และรองศาสตราจารย์ ดร. กอบวุฒิ รุจินากุล ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้สนับสนุนเงินทุนวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- Buchanan, R.C. (1986). *Ceramic Materials for Electronics: Processing, Properties and Applications*, (1st ed.), New York: Marcel Dekker, Inc.
- Chandatreya, S.S., Fulath, R.M. and Pask, J.A. (1981). Reaction mechanisms in the formation of PZT solid solution. *Journal of the American Ceramic Society*, 64, 422-425.
- Haertling, G.H. (1999). Ferroelectric ceramics: history and technology. *Journal of the American Ceramic Society*, 82, 797-818.
- Hiramath, B.V., Kingon, A.I. and Biggers, J.V. (1983). Reaction sequence in the formation of lead zirconate-lead titanate solid solutions: role of raw materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 66, 790-793.
- Jaffe, B., Cook, W.R. and Jaffe, H. (1971). *Piezoelectric ceramics*. R.A.N. Publishers.
- Matsuo, Y. and Sasaki, H. (1965). Formation of lead zirconate-lead titanate solid solutions. *Journal of the American Ceramic Society*, 48, 289-291.
- Moulson, A.J. and Herbert, J.M. (2003). *Electroceramics: Material, Properties and Applications*, (2nd ed.), Chapman & Hall, London.

Powder Diffraction File, Card No. 33-0784. (2000). Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) PDF-4, International Centre for Diffraction Data (ICDD).

Rao, K.R.M, Rao, A.V.P. and Komarneni, S. (1996). Reactive PZT precursor powder by coprecipitation. *Materials Letters*, 28, 463-467.

Ye, H., Sun, C.Q. and Hing, P. (2000). Control of grain size and size effect on the dielectric constant of diamond films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 33, L148-L152.