

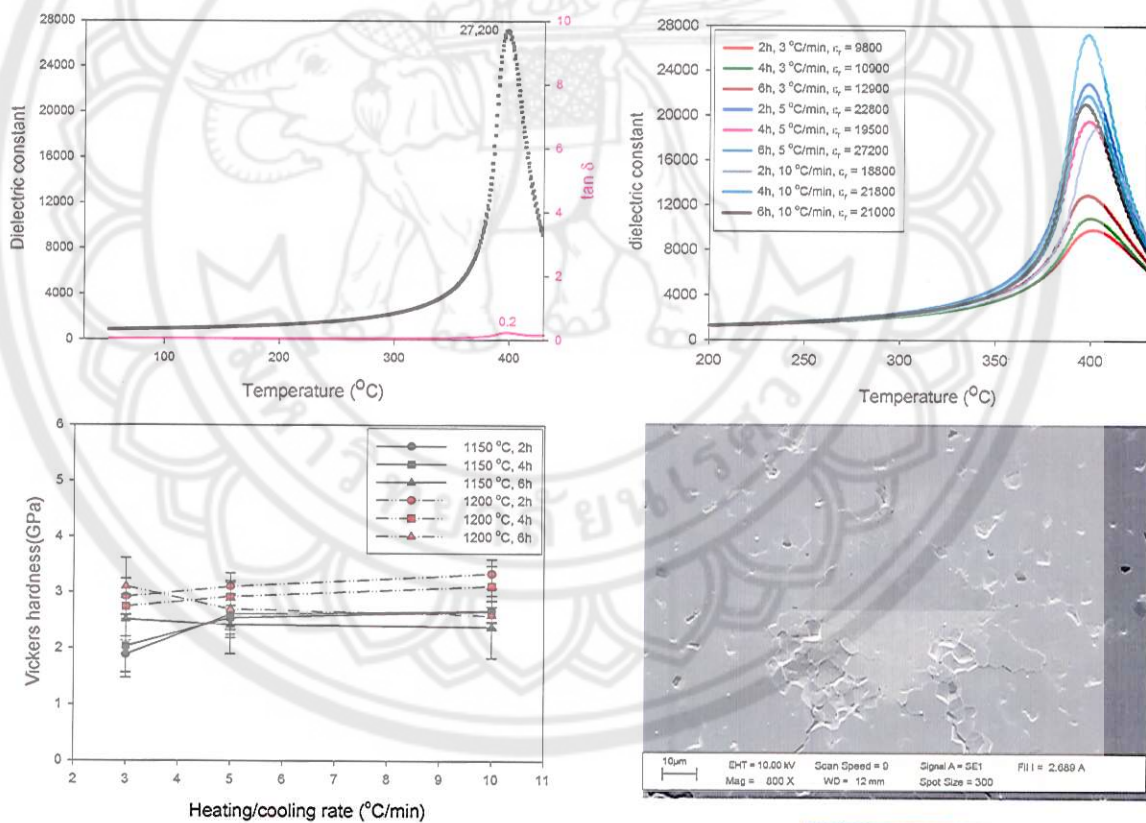
อภิวัฒน์นาการ

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์



ผลของเวลาในการเผาแห้ง และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิในกระบวนการ
เผาซินเตอร์ ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และสมบัติเชิงกล
ของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต

Effect of Dwell Time and Heating/Cooling Rate in Sintering Process on
Dielectric Constant and Mechanical Property
of $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.42})O_3$ Ceramics



หัวหน้าโครงการวิจัย

ดร. ชมพูนุช พิษมาก

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
 วันลงทะเบียน..... 8 JUL 2011
 เลขทะเบียน..... 5639505 C3
 เลขเรียกหนังสือ.....

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

งบประมาณรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ ปีงบประมาณ 2550

TP
809
๕๗๒๕
๒๕๕๐

รายละเอียดแผนปฏิบัติงานวิจัย

แผนการปฏิบัติงานวิจัยตลอดโครงการ

กิจกรรม	เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ค้นคว้าข้อมูลจากหนังสือและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	↔	↔	↔									
2. เตรียมผงเลดเซอร์โคเนตไททาเนต			↔	↔								
3. เตรียมเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต				↔	↔							
4. ศึกษาสมบัติทางกลของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนตที่เตรียมได้						↔	↔	↔	↔			
5. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนตที่เตรียมได้								↔	↔	↔	↔	
6. วิเคราะห์ผลที่ได้ สรุปและจัดทำรูปเล่มรายงาน											↔	↔

หมายเหตุ ↔ คือแผนการปฏิบัติงานที่วางไว้

✓ คือช่วงเวลาปฏิบัติงานจริง

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยในปัจจุบันนี้ ต้องอาศัยทุนอุดหนุนในการทำงานวิจัย เพื่อใช้จ่ายต่างๆ เช่นค่าวัสดุสิ้นเปลือง ค่าวิเคราะห์ ค่าสืบค้นข้อมูล ฯลฯ ต้องอาศัยเครื่องมือ ห้องปฏิบัติการ ในการทำการวิจัย อาศัยความร่วมมือ คำแนะนำจากท่านผู้มีความรู้ ความชำนาญ และอาศัยการอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยต่างๆ งานวิจัยจึงจะสำเร็จลงได้

ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้จัดสรรทุนวิจัย ให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสทำงานวิจัย และเรียนรู้ระบบการทำงานในการเบิกจ่ายหมวดเงินต่างๆ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กอบวุฒิ รุจิจินากุล อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ ทักษะในการทำงานวิจัย ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.ทวี ต้นขศิริ ที่อำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ โทเรเซรามิก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรณินทร์ ไชยเรืองศรี ที่อำนวยความสะดวก ในการใช้เครื่องมือทดสอบเชิงกล ณ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยผู้วิจัย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัย และขอรับคำแนะนำ เพื่อนำไปปรับปรุงการทำงานวิจัยต่อไป

ดร.ชมพูนุช พิษมาก

Title: Effect of Dwell Time and Heating/Cooling Rate in Sintering Process on Dielectric Constant and Mechanical Property of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.42})\text{O}_3$ Ceramics

Author: Dr. Chompoonuch Puchmark

Abstract

In this research, studied the effect of dwell time and heating/cooling rate in sintering process on dielectric constant and mechanical property of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.42})\text{O}_3$ ceramics were prepared by mixed oxides method. The sintering procedures were carried out at 1150 and 1200 °C for 2, 4 and 6 h with heating/cooling rate 3, 5 and 10 °C/min and checked for perovskite phase formation by X-ray diffraction. For dielectric constant measurement, silver electrodes were pasted on the samples and then subjected to an automated dielectric system measurement controlled by a computer. An impedance analyzer (LCZ meter) was also used to measure the dielectric constant and dissipation factors were measured at 10, 100 kHz and 1 MHz. Mechanical property of samples were measured using Vickers microhardness tester and microstructure of Vickers-prints were checked by scanning electron microscope. It was found that, the dielectric constant of samples sintered at 1200 °C with heating/cooling rate 3 °C/min were improved significant by increasing the dwell time. The Vickers microhardness of samples sintered at 1200 °C for 2 and 4 h were improved significant by increasing the heating/cooling rate.

ชื่อเรื่อง: ผลของเวลาในการเผาแห้ง และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิในกระบวนการเผา
ซินเตอร์ ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และสมบัติเชิงกล ของเซรามิกเลดเซอร์โคเนต
ไททานต

ผู้เขียน: ดร. ชมพูนุช พิษมาก

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของเวลาในการเผาแห้ง และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิในกระบวนการเผาซินเตอร์ ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และสมบัติเชิงกลของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต $[Pb(Zr_{0.52},Ti_{0.42})O_3]$ ที่เตรียมโดยวิธีมิกซ์ออกไซด์ แล้วทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการการขึ้น/ลงอุณหภูมิในกระบวนการเผาซินเตอร์ เป็น 3, 5 และ 10 °C/นาที และตรวจสอบเฟสของเซรามิกที่ได้โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก โดยการทำให้ด้วยกาวเงินและใช้เครื่อง LCZ ต่อพ่วงกับคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลอัตโนมัติ ใช้ความถี่ในการวัด 10, 100 kHz และ 1 MHz ตรวจสอบสมบัติเชิงกลด้วยการวัดค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ และตรวจรอยกดแบบวิกเกอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ผลการทดลองพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ เป็น 3 °C/นาที มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเผาแห้ง และค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT ที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิในกระบวนการเผาซินเตอร์

สารบัญ

	หน้า
	ก
	ข
	ค
	ง
	ช
	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตของการทำวิจัย	2
ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2	3
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริก	3
2.2 สมบัติเชิงกลของเซรามิก	5
2.3 เลดเซอร์โคเนตไททาเนต	12
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3	18
วิธีการทดลอง	18
3.1 สารเคมี	18
3.2 อุปกรณ์	18
3.3 กระบวนการเตรียมผงเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT)	19
3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิก PZT	23
3.5 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	25
3.6 การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก	28
3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเซรามิก	31
3.8 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยกตบนผิวเซรามิก	33
บทที่ 4	35
ผลการทดลองและการอภิปรายผล	35
4.1 ผลการตรวจสอบเฟสของผงผลึกในระบบ PZT	35
4.2 ผลการตรวจสอบเฟสเซรามิกในระบบ PZT	36

	หน้า
4.3 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก	38
4.4 ผลการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ในระดับจุลภาค ในระบบ PZ	81
4.5 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยกดแบบวิกเกอร์บนผิวเซรามิก PZT	93
บทที่ 5	
สรุปผลการทดลอง และงานที่จะทำต่อไป	113
5.1 สรุปผลการทดลอง	113
5.2 งานที่จะทำต่อไป	116
เอกสารอ้างอิง	117



สารบัญตาราง

		หน้า
ตาราง 2.1	สมบัติเชิงกลของเซรามิกบางชนิด	5
ตาราง 2.2	ข้อมูลวิธีการทดสอบความแข็งของวัสดุด้วยหัวกดแบบต่างๆ	11
ตาราง 4.1	อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ	40
ตาราง 4.2	อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ	42
ตาราง 4.3	อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ	44
ตาราง 4.4	อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ	46
ตาราง 4.5	อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ	48
ตาราง 4.6	อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ	50

ตาราง 4.14	อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ ที่ความถี่ต่างๆ	66
ตาราง 4.15	อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ ที่ความถี่ต่างๆ	68
ตาราง 4.16	อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที่ ที่ความถี่ต่างๆ	70
ตาราง 4.17	อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที่ ที่ความถี่ต่างๆ	72
ตาราง 4.18	อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที่ ที่ความถี่ต่างๆ	74
ตาราง 4.19	ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที่	82
ตาราง 4.20	ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที่	82
ตาราง 4.21	ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที่	83

ตาราง 4.32	ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เเผะซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที่	88
ตาราง 4.33	ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เเผะซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที่	89
ตาราง 4.34	ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เเผะซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที่	89
ตาราง 4.35	ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เเผะซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที่	90
ตาราง 4.36	ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เเผะซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที่	90
ตาราง 4.37	ความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์และค่าความคลาดเคลื่อนของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1150 และ 1200 °C เมื่อแปรค่าเวลาในการเผาแ่และอัตราการให้ความร้อนต่างๆ กัน	91
ตาราง 5.1	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงสุดของเซรามิก PZT ที่เเผะซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C แปรค่าเวลาในการเผาแ่และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ เมื่อวัดที่ความถี่ 10 kHz	113
ตาราง 5.2	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงสุดของเซรามิก PZT ที่เเผะซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C แปรค่าเวลาในการเผาแ่และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ เมื่อวัดที่ความถี่ 100 kHz	113
ตาราง 5.3	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงสุดของเซรามิก PZT ที่เเผะซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C แปรค่าเวลาในการเผาแ่และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ เมื่อวัดที่ความถี่ 1 MHz	114
ตาราง 5.1	ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ ของเซรามิก PZT ที่เเผะซินเตอร์ที่ อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C แปรค่าเวลาในการเผาแ่และอัตราการ ขึ้น/ลงอุณหภูมิ (ในหน่วย GPa)	114

สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูป 1.1	เฟสไดอะแกรมของสารในระบบเลดเซอร์โคเนต-เลดไททาเนต	1
รูป 2.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุประเภทต่างๆ	6
รูป 2.2	พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด	7
รูป 2.3	ลักษณะการทดสอบค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นแบบต่างๆ (a) มอดูลัสของยัง (b) มอดูลัสเฉือน และ (c) มอดูลัสเชิงปริมาตร	9
รูป 2.4	รอยกดบนผิวหน้าของชิ้นงานที่เกิดจากหัวกดแบบ (ก) วิกเกอร์ และ (ข) แบบนूप	11
รูป 2.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อรอยแยกและความแข็งแรงต่อการแตกหัก กับปริมาณของ Ag ในเซรามิก PZT	14
รูป 2.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าความแข็งแรง (ข) ค่าความต้านทานต่อรอยแยก และ (ค) ค่าความแข็งในหน่วยวิกเกอร์ ของ $Pb_{1-x}(Zr_{0.535}Ti_{0.465})O_{3+x}$ กับ x ที่เติมลงไปในเซรามิก	15
รูป 2.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าความต้านทานต่อรอยแยก และ (ข) ความแข็งวิกเกอร์ กับปริมาณของ Nd^{3+} ในเซรามิก PZT	16
รูป 2.8	การแผ่ขยายของรอยแตกที่เกิดจากการกดด้วยหัวกดวิกเกอร์ในทิศทางต่างๆ กัน ในชิ้นงานที่ผ่านการทำซ้ำแล้ว	17
รูป 3.1	เครื่องบดย่อยผสมสารแบบ ball milling	20
รูป 3.2	เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร	21
รูป 3.3	แผนผังแสดงการเผาแคลไซน์	21
รูป 3.4	ขั้นตอนการเตรียมผง PZT	22
รูป 3.5	แม่พิมพ์โลหะ	23
รูป 3.6	เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก	23
รูป 3.7	การจัดเรียงชิ้นงานในถ้วยอะลูมินาสำหรับการเผาซินเตอร์	24
รูป 3.8	แผนผังแสดงการเผาซินเตอร์	24
รูป 3.9	ขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติของเม็ดเซรามิก PZT	25
รูป 3.10	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบของอะตอม	25

รูป 3.11	หลักการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิค XRD และตัวอย่างรูปแบบการ เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	27
รูป 3.12	เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D500 ยี่ห้อ SIEMENS และ รุ่น X'Pert ผลิตโดยบริษัท Philips ประเทศเนเธอร์แลนด์	27
รูป 3.13	จานหมุนสำหรับขีดสารตัวอย่าง	29
รูป 3.14	อัตราไชนิก	29
รูป 3.15	ตู้อบ บริษัท Griffin Grundy	30
รูป 3.16	ดิจิตอลเวอร์เนียคาลิเปอร์ ยี่ห้อ Mitutoyo	30
รูป 3.17	LCZ meter ต่อพ่วงกับเตาเผาและ Multimeter เพื่อวัดค่าความจุไฟฟ้า โดยการแปรค่าอุณหภูมิ	31
รูป 3.18	ผงอะลูมินาสำหรับขีดชิ้นงาน ความละเอียดประมาณ 1 ไมโครเมตร	31
รูป 3.19	เครื่องวัดค่าความแข็งในระดับจุลภาค (microhardness tester) รุ่น Microscan2 (Vickers)	32
รูป 3.20	ลักษณะของรอยกดที่เกิดจากการใช้หัวกดแบบวิกเกอร์	33
รูป 3.21	เครื่อง Sputter Coater	33
รูป 3.22	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น LEO 1455 VP	34
รูป 4.1	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผา แคลไซต์ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน ที่ 10 °C/นาที เทียบกับ JCPDS file no. 33-0784	35
รูป 4.2	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ PZT ซินเตอร์ที่ อุณหภูมิ 1150 °C ที่บริเวณพื้นผิว โดยการแปรค่าเวลาในการเผาแ่ และ อัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ	36
รูป 4.3	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ PZT ซินเตอร์ที่ อุณหภูมิ 1200 °C ที่บริเวณพื้นผิว โดยการแปรค่าเวลาในการเผาแ่ และ อัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ	37
รูป 4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจาก ความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการ เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลง ของอุณหภูมิ 3 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz	38

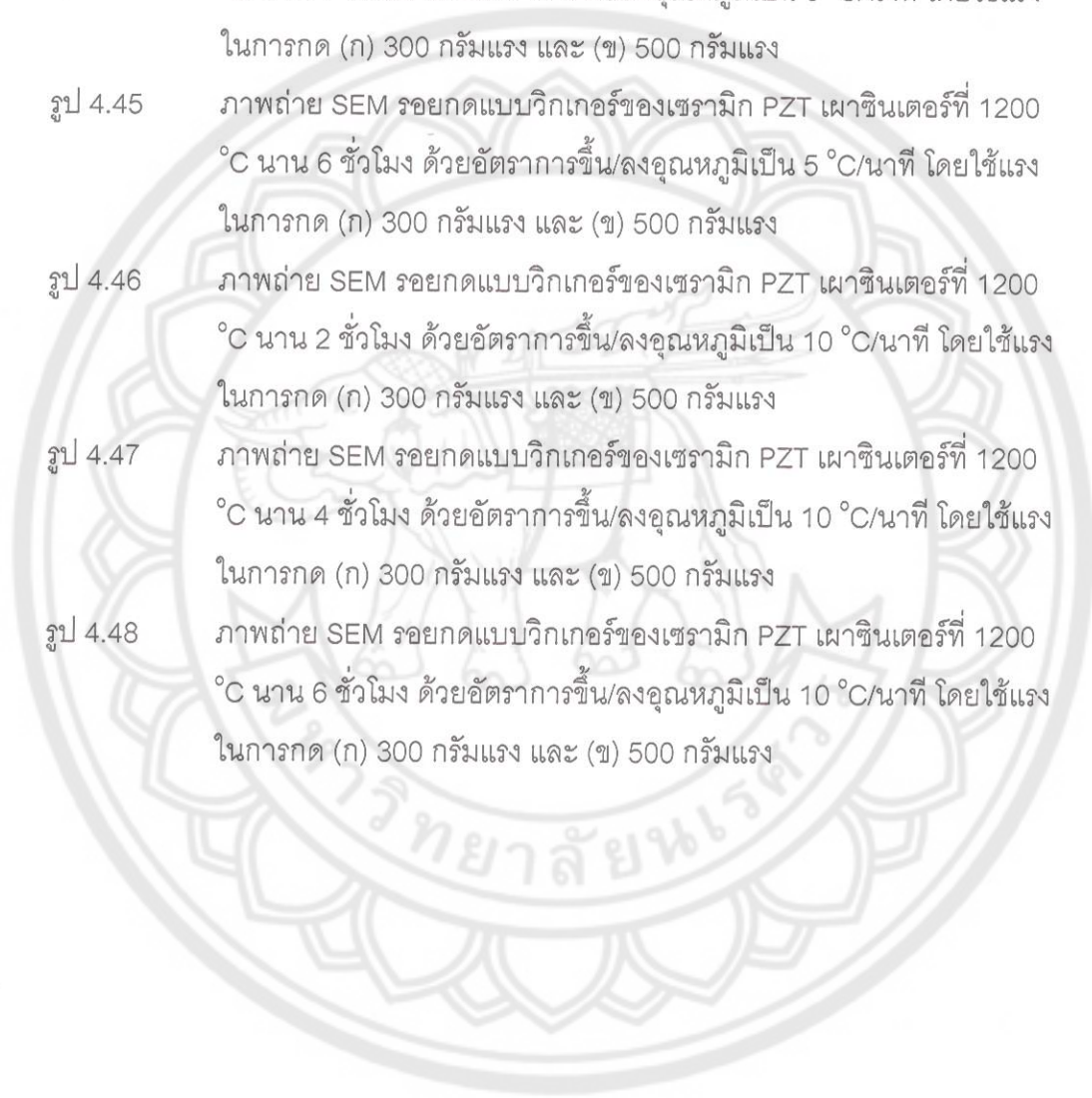
- รูป 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz 40
- รูป 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz 42
- รูป 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz 44
- รูป 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz 46
- รูป 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz 48
- รูป 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz 50

รูป 4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz	52
รูป 4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz	54
รูป 4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz	56
รูป 4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz	58
รูป 4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz	60
รูป 4.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz	62

- รูป 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz 64
- รูป 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz 66
- รูป 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz 68
- รูป 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz 70
- รูป 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz 72
- รูป 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่การเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผาแซ่ และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ วัดที่ความถี่ 10 kHz 75

รูป 4.23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่การเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผาแซ่ และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ วัดที่ความถี่ 10 kHz	76
รูป 4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่การเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผาแซ่ และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ วัดที่ความถี่ 100 kHz	77
รูป 4.25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่การเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผาแซ่ และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ วัดที่ความถี่ 100 kHz	78
รูป 4.26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่การเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผาแซ่ และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ วัดที่ความถี่ 1 MHz	79
รูป 4.27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่การเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผาแซ่ และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ วัดที่ความถี่ 1 MHz	80
รูป 4.28	รอยกดแบบวิกเกอร์ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเซรามิก	81
รูป 4.29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT กับอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ ที่เผาซินเตอร์ที่ 1150 และ 1200 °C เผาแซ่นาน 2, 4 และ 6 ชั่วโมง	92
รูป 4.30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบวิกเกอร์กับอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	93
รูป 4.31	ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง	94
รูป 4.32	ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง	94

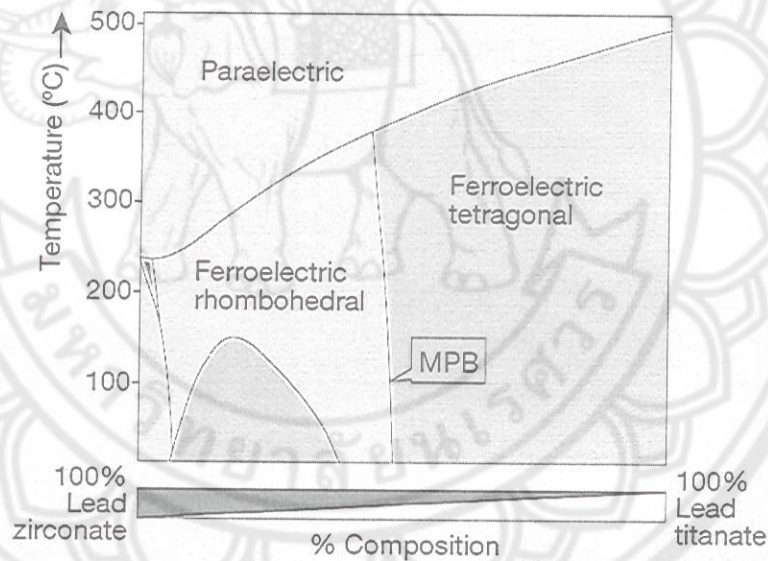
รูป 4.43	ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง	106
รูป 4.44	ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง	107
รูป 4.45	ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง	108
รูป 4.46	ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง	109
รูป 4.47	ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง	110
รูป 4.48	ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง	111



บทที่ 1

บทนำ

เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate: $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า พีแซดที (PZT) เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งที่อุณหภูมิห้องจะมีโครงสร้างเป็นแบบรอมโบฮีดรอล และเตตระโกนอล ขึ้นกับสัดส่วนจำนวนโมลของสารตั้งต้น โดยมีการเปลี่ยนเฟสจากรอมโบฮีดรอล หรือเตตระโกนอลสู่ควิบิกที่อุณหภูมิประมาณ 390°C [1] จึงสามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ มีค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coupling factor) ที่สูงมาก นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดขั้ว (pole) ได้ง่าย และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ) อยู่ในช่วงกว้าง ทำให้เซรามิกชนิดนี้มีความเหมาะสมในการประยุกต์ทำเป็นตัวขับเคลื่อน (actuator) หรือ ตัวกักเก็บพลังงาน (energy storage)



รูป 1.1 เฟสไดอะแกรมของสารในระบบเลดเซอร์โคเนต-เลดไททาเนต [2]

จากเฟสไดอะแกรมจะเห็นได้ว่าเป็นลักษณะของการผสมกันอยู่ ระหว่างเฟสเตตระโกนอลที่อยู่ในสเปซกรุปแบบ $P4mm$ และเฟสรอมโบฮีดรอล ที่อยู่ในสเปซกรุปแบบ $R3C$ ซึ่ง ณ บริเวณรอยต่อเฟสนี้เองทำให้ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีขั้วเมื่อได้รับพลังงานจากภายนอกและเป็นสัดส่วนองค์ประกอบที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ดีที่สุด

ในงานวิจัยปีงบประมาณ 2549 ที่ผ่านมา ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของการขึ้น/ลงอุณหภูมิและเวลาในการเผาเซรามิกที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต [3]

จากผลการวิจัย จะเห็นว่าอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ และเวลาในการเผาแซ่ มีผลต่อความหนาแน่นของเซรามิก และโครงสร้างทางจุลภาค ต่อเซรามิก PZT ทำให้ความหนาแน่นและโครงสร้างทางจุลภาคเปลี่ยนไป เมื่อใช้เงื่อนไขในการเผาซินเตอร์ต่างกัน จึงเป็นข้อมูลที่ชวนศึกษาต่อในเรื่องของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าความแข็งว่าขึ้นอยู่กับปัจจัยใดในเซรามิก PZT นี้ เนื่องจากถ้าสามารถหาเงื่อนไขของเซรามิกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ก็สามารถที่นำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นตัวเก็บประจุที่มีค่ามาก ๆ ได้ และค่าความแข็ง ก็ปรับปรุงสมบัติทางกลของเซรามิกได้ เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สมบัติทั้งสองค่าพอดีสำหรับการใช้งาน

ถ้าหากเราใช้เวลาในการเผาแซ่ และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิในกระบวนการเผาซินเตอร์ที่เหมาะสมในการเตรียมเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต จะทำให้เราได้เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานตที่มีสมบัติต่างๆ ตามที่เราต้องการ จึงทำให้การวิจัยนี้จึงมุ่งความสนใจไปที่ผลของเวลาในการเผาแซ่ และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิในกระบวนการซินเตอร์ ที่มีต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและสมบัติทางกลของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานตที่เตรียมโดยวิธีมิกซ์ออกไซด์

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาเวลาการเผาแซ่และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิในกระบวนการเผาซินเตอร์ ที่เหมาะสมในการเตรียมเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต ($\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.42})\text{O}_3$)
2. เพื่อศึกษาเวลาการเผาแซ่ และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ ในกระบวนการเผาซินเตอร์ที่มีต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และสมบัติทางกลของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ความเป็นมาของสมบัติทางไฟฟ้าของสารเพียโซอิเล็กทริก สมบัติเชิงกลของเซรามิกทั่วไป ข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของเลดเซอร์โคเนตไททานต (PZT) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริก

ในปี 1880 Jacques และ Pierre Curie [4] ได้ทำการศึกษารวมผลของแรงดันที่มีต่อการเกิดประจุไฟฟ้าของผลึก และได้พบว่าผลึกบางชนิดเกิดปรากฏการณ์บางอย่างขึ้น คือ ผลึกสามารถสร้างประจุไฟฟ้าขึ้นเมื่อได้รับแรงกดอัดเชิงกล (mechanical pressure) Pierre Curie จึงเรียกชื่อปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectricity) และต่อมาพบอีกว่าปรากฏการณ์ดังกล่าว สามารถเกิดกลับกันได้ และไม่ได้เกิดกับผลึกทุกชนิดแต่จะเกิดกับผลึกบางชนิดเท่านั้น

สามารถให้คำจำกัดความของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกว่า เป็นสมบัติที่สารสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับไปเป็นพลังงานกล ในทางกลับกันก็ยังสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อีกด้วย ซึ่งปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกนี้ จะเกิดกับผลึกที่มีโครงสร้างของหน่วยเซลล์ที่ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง (noncentrosymmetric class) ซึ่งสามารถแยกแยะจากระบบของสมมาตรทั้ง 32 กลุ่มจุด (point group) ในทางผลึกวิทยา [4]

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกสามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.1)

$$P_i = d_{ij} T_j \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3 \\ j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \end{matrix} \quad (2.1)$$

โดยที่ P_i คือ โพลาริเซชันทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (electrical polarization) ในทิศทาง i

T_j คือ ความเค้นที่ใส่ให้กับสารเพียโซอิเล็กทริก (apply mechanical stress)

d_{ij} คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric charge coefficient) ในทิศทาง ij มี

หน่วยเป็น Coulomb/Newton

เมื่อเริ่มให้สนามไฟฟ้าสารจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ขนาดสามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.2)

$$S_j = d_{ij} E_i \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3 \\ j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \end{matrix} \quad (2.2)$$

โดยที่ S_j คือ ความเครียดที่เกิดขึ้น (mechanical strain) ในทิศทาง j

E_i คือ สนามไฟฟ้าที่ให้กับสารเพียโซอิเล็กทริก (electrical field) ในทิศทาง i

และการอธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกนั้น ยังสามารถอธิบายด้วยสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุดังต่อไปนี้

$$D = \epsilon^T E + dT \quad (2.3)$$

$$S = s^E T + dE \quad (2.4)$$

โดยที่ D คือ ค่าการกระจัดทางไดอิเล็กทริก (dielectric displacement) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าของการแยกขั้ว (polarization) พอดี

T คือ ความเค้น (stress)

E คือ สนามไฟฟ้า (electric field)

S คือ ความเครียด (strain)

s คือ การยอมตาม (compliance) เป็นส่วนกลับของค่ายังมอดูลัส (Young's modulus)

ϵ คือ ค่าสภาพยอม (permittivity)

และสำหรับกรณีของวงจรมีเปิด (open-circuit) นั้น จะต้องมีการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรมีเปิด (voltage coefficient : g) ด้วย โดยค่า g นี้ จะบอกถึงความสามารถของวัสดุที่สร้างศักย์ไฟฟ้าต่อแรงเค้นที่กระทำหนึ่งหน่วย ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ดังสมการ (2.5) [5]

$$g = \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (2.5)$$

เมื่อ ϵ คือ ค่าสภาพยอมของวัสดุ

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศมีค่า $8.854 \times 10^{-15} \text{ F/mm}$

อีกสิ่งหนึ่งที่บ่งบอกว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ดีหรือไม่ คือค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบเพียโซอิเล็กทริก (k) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลที่ให้ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล สามารถเขียนแสดงดังสมการ (2.6) และ (2.7) [4]

ในกรณีปรากฏการณ์ตรง

$$k^2 = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ได้}}{\text{พลังงานกลที่ให้แก่สาร}} \quad (2.6)$$

ในกรณีปรากฏการณ์ย้อนกลับ

$$k^2 = \frac{\text{พลังงานกลที่ได้}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ให้แก่สาร}} \quad (2.7)$$

เนื่องจากวัสดุทุกชนิดไม่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานได้ 100% ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบเพียโซอิเล็กทริกจึงมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ ณ ปัจจุบันมีการพยายามพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกให้มีค่าเข้าใกล้ 1 ให้มากที่สุด

2.2 สมบัติเชิงกลของเซรามิก

เซรามิกจัดเป็นวัสดุประเภทหนึ่งซึ่งมีความเปราะสูงสามารถเกิดการแตกได้ง่าย มีความแข็งแรงต่อการดึง (tensile strength) อยู่ในช่วงกว้างประมาณ 0.69 – 7000 MPa และมีความแข็งแรงต่อการกดอัด (compressive strength) ที่ดีมากโดยปกติจะมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงต่อการดึงประมาณ 5 – 10 เท่า นอกจากนี้เซรามิกยังจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุที่มีค่าความต้านทานต่อรอยแตก (fracture toughness) สูงอีกด้วยดังตัวอย่างแสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 สมบัติเชิงกลของเซรามิกบางชนิด [5]

วัสดุ	ความหนาแน่น	Compressive Strength		Tensile Strength		Flexural Strength		Fracture Toughness	
	(g/cm ³)	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa.m ^{1/2}	Ksi.m ^{1/2}
Al ₂ O ₃ (99%)	3.85	2585	375	207	30	345	50	4	3.63
Si ₃ N ₄ (hot pressed)	3.19	3450	500	-	-	690	100	6.6	5.99
Si ₃ N ₄ (reaction-bonded)	2.8	770	112	-	-	255	37	3.6	3.27
SiC (sintered)	3.1	3860	560	170	25	550	80	4	3.63
ZrO ₂ , 9% MgO (Partially stabilized)	5.5	1860	270	-	-	690	100	8+	7.26+

จากตาราง 2.1 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดและความแข็งแรงต่อการดึงของเซรามิกนั้นมีค่าต่างกันมากกว่า 10 เท่า โดยมีปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เซรามิกแต่ละชนิดมีสมบัติเชิงกลที่ต่างกัน ดังนี้

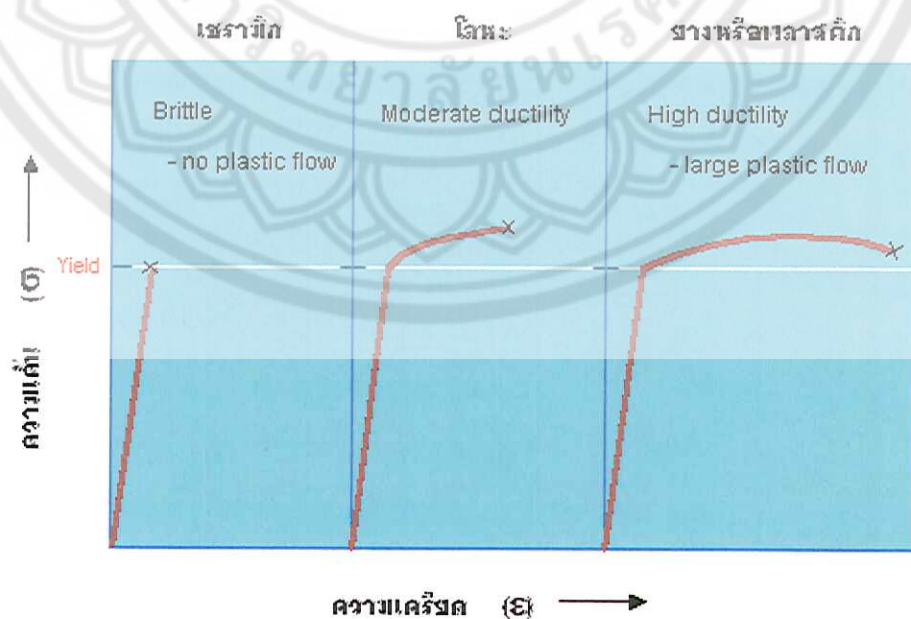
- 1) โครงสร้างจุลภาค (microstructure) ที่รวมถึงตำหนิชนิดต่างๆ เช่น รูพรุน และรอยร้าว
- 2) กระบวนการผลิต (processing) ที่เลือกใช้ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสัดส่วนของสารองค์ประกอบและค่าความหนาแน่นของเซรามิกที่ได้

ปัจจัยทั้งสองข้อที่กล่าวมานี้มีความสัมพันธ์กันอยู่ เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นภายในเซรามิกนั้นเป็นผลมาจากกระบวนการเตรียมเซรามิก ซึ่งจะต้องควบคุมสัดส่วนของสารตั้งต้นเพื่อให้มีองค์ประกอบตามที่ต้องการและมีความหนาแน่นสูงด้วยซึ่งหากมีการควบคุมกระบวนการเตรียมที่เหมาะสมก็สามารถส่งผลทำให้เซรามิกที่ได้มีโครงสร้างจุลภาคตามที่ต้องการได้อีกด้วย

สำหรับสมบัติเชิงกลที่สำคัญของเซรามิกนั้นสามารถพิจารณาได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ค่าความแข็งแรง และค่าความแข็ง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

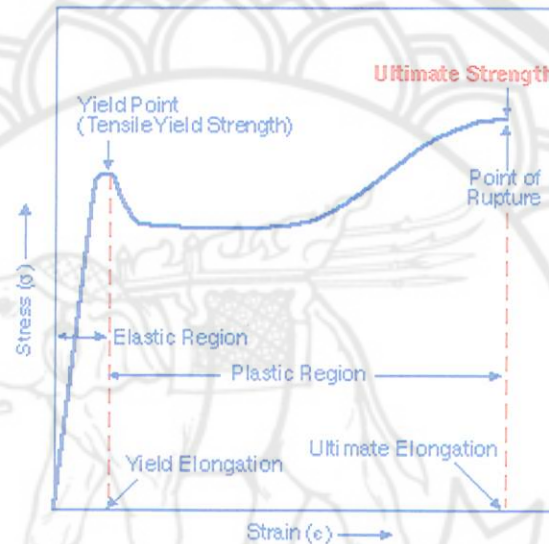
2.2.1 ความแข็งแรง (Strength)

ค่าความแข็งแรงของเซรามิกเป็นค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงพฤติกรรมของเซรามิกในการต่อต้านแรงเชิงกลที่ได้รับอย่างต่อเนื่องในรูปแบบต่างๆ เช่น แรงกด (compressive) แรงดึง (tensile) แรงเฉือน (shear) หรือ แรงกระแทก (impact) ซึ่งนิยมแสดงผลในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น (stress) กับค่าความเครียด (strain) ของวัสดุนั้นๆ ดังรูป 2.1 ซึ่งเป็นตัวอย่างของการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของวัสดุที่มีความเปราะและความยืดหยุ่นต่าง ๆ กัน



รูป 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุประเภทต่างๆ [5]

จากกราฟรูป 2.1 จะเห็นว่าวัสดุที่มีความเปราะสูง เช่น พลาสติก จะมีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) ที่น้อยมากหรือแทบจะกล่าวได้ว่าไม่มีเลยเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่นๆ ในขณะที่วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงๆ เช่น พลาสติกหรือพลาสติกนั้นจะมีช่วงการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่กว้างมากอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อทำการขยายกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดออก จะทำให้สามารถทราบถึงรายละเอียดต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูป 2.2



รูป 2.2 พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด [6]

จากการวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในรูป 2.2 นี้ ทำให้สามารถบ่งบอกถึงค่าความแข็งแรงของวัสดุในรูปของ ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ที่สามารถหาได้จากค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียดหรือจากค่าความชันของกราฟในช่วงที่มีการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) ซึ่งค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่ให้และความเครียดที่เกิดขึ้น ดังนี้

1) มอดูลัสของยัง (Young's Modulus , E)

$$E = \frac{\text{ความเค้นเชิงเส้น}}{\text{ความเครียดเชิงเส้น}}$$

$$= \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{(F/A)}{(\Delta L/L_0)} \quad (2.8)$$

โดยที่ E คือ มอดูลัสของยัง

σ คือ ความเค้นเชิงเส้น

ϵ คือ ความเครียดเชิงเส้น

F คือ แรงที่ใช้ในการดึงหรือกด

A คือ พื้นที่หน้าตัด

ΔL คือ ระยะยืดหรือระยะหดของวัสดุที่ถูกแรงกระทำ

L_0 คือ ความยาวเดิมของวัสดุ

2) มอดูลัสเฉือน (Shear Modulus , G)

$$\begin{aligned} G &= \frac{\text{ความเค้นเฉือน}}{\text{ความเครียดเฉือน}} \\ &= \frac{\tau}{\gamma} = \frac{(F/A)}{\gamma} \end{aligned} \quad (2.9)$$

โดยที่ G คือ มอดูลัสเฉือน

τ คือ ความเค้นเฉือน

γ คือ ความเครียดเฉือน

F คือ แรงที่ใช้กระทำในแนวขนาน

A คือ พื้นที่หน้าตัด

3) มอดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk Modulus , K)

$$\begin{aligned} K &= \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียดรวม}} \\ &= \frac{\sigma}{\theta} \\ &= \frac{(\Delta P)}{(\Delta V/V)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

โดยที่ K คือ มอดูลัสเชิงปริมาตร

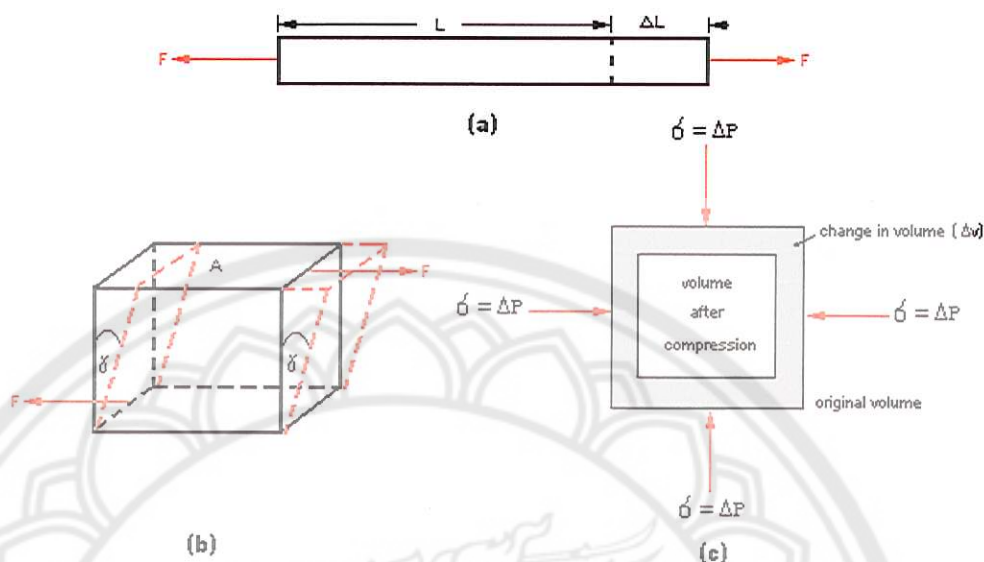
σ คือ ความเค้น

θ คือ ความเครียดรวม

ΔP คือ ความดันที่เปลี่ยนแปลงไป

ΔV คือ ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป

V คือ ปริมาตรเดิม



รูป 2.3 ลักษณะการทดสอบค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นแบบต่างๆ [7]

(a) มอดูลัสของยัง (b) มอดูลัสเฉือน และ (c) มอดูลัสเชิงปริมาตร

นอกจากนี้ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในรูป 2.2 ยังสามารถใช้ในการหาค่าสมบัติเชิงกลได้อีกค่าหนึ่งคือ ค่าความต้านทานต่อรอยแตก (fracture toughness, K_{IC}) โดยสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปจนถึงจุดแตกหัก แต่เนื่องจากเซรามิกนั้นเป็นวัสดุที่มีช่วงของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกน้อยมากทำให้พื้นที่บริเวณใต้กราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดของเซรามิกนั้นมีค่าน้อยส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อรอยแตกมีค่าน้อยตามไปด้วย ทำให้สามารถคำนวณค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิกได้จากการใช้สมการ

$$K_{IC} = Y\sigma(\pi a)^{1/2} \quad (2.11)$$

เมื่อ K_{IC} คือ ค่าความต้านทานต่อรอยแตก

Y คือ ตัวแปรที่ขึ้นกับขนาดของเซรามิก

σ คือ ค่าความเค้น

a คือ ลักษณะเฉพาะของรอยแตกที่เกิดขึ้นในเซรามิก

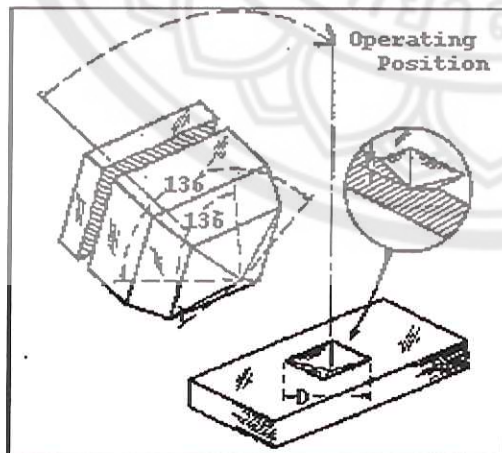
2.2.2 ความแข็ง (Hardness)

ค่าความแข็งของวัสดุเป็นค่าดัชนีที่สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อการขีดข่วนที่บริเวณผิวของวัสดุ โดยปกติแล้วเซรามิกถูกจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุที่มีค่าความแข็งสูงมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าเซรามิกเป็นวัสดุที่สามารถทนทานต่อการขีดข่วนได้ดี โดยที่วิธีการวัดค่าความแข็งนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ตามลักษณะของการวัด ดังนี้

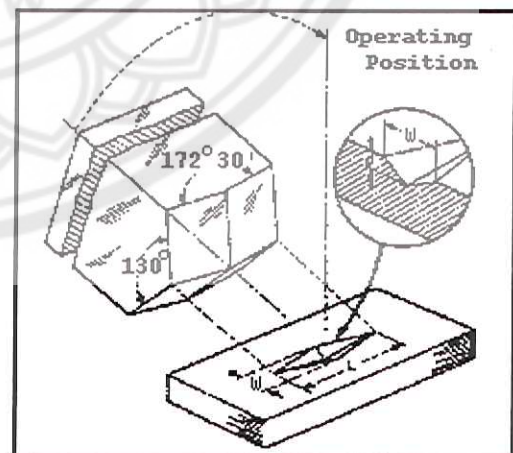
- 1) ค่าความแข็งเชิงเปรียบเทียบ เป็นวิธีการบ่งบอกถึงค่าความแข็งแรงของวัสดุโดยอาศัยการเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของวัสดุมาตรฐานซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 10 ระดับ ในสเกลของ Mohs โดยวัสดุมาตรฐานที่มีความแข็งในระดับต่ำสุดคือ talc ซึ่งมีค่าระดับความแข็งเป็น 1 ส่วนวัสดุที่มีความแข็งในระดับสูงสุดคือ เพชร ซึ่งมีค่าระดับความแข็งเป็น 10 จากนั้นจึงนำวัสดุที่ต้องการทราบค่าความแข็งมาขีดกับวัสดุมาตรฐานแล้วเปรียบเทียบดูว่าอยู่ในระดับใด ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าที่เปรียบเทียบกับคร่าวๆ เท่านั้นจึงไม่มีความแน่นอนและไม่มีหน่วย
- 2) ค่าความแข็งที่ได้จากการกด (indentation) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการหาค่าความแข็งของวัสดุมากที่สุดเนื่องจากให้ค่าเป็นตัวเลขที่แน่นอน โดยอาศัยหลักการกดวัสดุที่มีปลายขนาดเล็กลงไปบนผิวหน้าของวัสดุด้วยแรงขนาดหนึ่งที่ทราบค่า จากนั้นจึงทำการตรวจสอบลักษณะของรอยกดที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานซึ่งค่าความแข็งที่ได้จะเป็นการคำนวณจากแรงที่ให้เทียบกับพื้นที่ของรอยกดที่เกิดขึ้น และอาจพิจารณาคร่าวๆ โดยเปรียบเทียบจากลักษณะของรอยกดได้ว่าถ้าหากรอยกดมีขนาดใหญ่และลึกกว่าก็แสดงว่าชิ้นงานนั้นมีค่าความแข็งต่ำกว่า สำหรับลักษณะของหัวกดนั้นก็มียุหลายแบบด้วยกันแต่แบบที่นิยมใช้ในการตรวจสอบค่าความแข็งของเซรามิกก็คือ
 - 2.1) แบบวิกเกอร์ (Vickers indentation) ซึ่งเป็นหัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังแสดงในตาราง 2.2 และรูป 2.4 (ก)
 - 2.2) แบบนู๊ป (Knoop indentation) ซึ่งเป็นหัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนดังแสดงในตาราง 2.2 และรูป 2.4 (ข)

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลวิธีการทดสอบความแข็งของวัสดุด้วยหัวกดแบบต่างๆ [5]

Test	Indenter	Shape of indentation		Load	Formular for hardness number		
		Side view	Top view				
Brinell	1mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D [D - (D^2 - d^2)^{1/2}]}$		
Vickers	Diamond pyramid			P	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$		
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$KHN = \frac{14.2P}{l^2}$		
Rockwell							
A } C } D }	Diamond cone			60 kg	$R_A =$ $R_C =$ $R_D =$	100-500t	
B } F } G }				150 kg			$R_B =$ $R_F =$ $R_G =$
E				100 kg			
	100 kg	$R_{\epsilon} =$					
	60 kg						
	150 kg		130-500t				
	1/16-in-diameter steel sphere						
	1/8-in-diameter steel sphere						



(ก)



(ข)

รูป 2.4 รอยกดบนผิวหน้าของชิ้นงานที่เกิดจากหัวกดแบบ (ก) วิกเกอร์ และ (ข) แบบนूप [8]

เนื่องจากเซรามิกเป็นวัสดุที่ค่อนข้างเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นจึงอาจทำการอนุมานในที่นี่ได้ว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณผิวของเซรามิกนั้นน่าจะมีลักษณะเชิงกลใกล้เคียงกันกับโครงสร้างจุลภาคที่อยู่ภายในเนื้อเซรามิก และการทดสอบเชิงกลที่ผิวของชิ้นงานก็น่าจะนำมาหาค่าสมบัติเชิงกลอื่นๆ ของเซรามิกได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหาค่าความแข็งในหน่วยของวิกเกอร์และนูนนั้นยังสามารถนำค่าความแข็งที่วัดได้มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่ามอดูลัสของยังและค่าความต้านทานต่อรอยแตกได้อีกด้วย

2.3 เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead zirconate titanate)

เลดเซอร์โคเนตไททาเนต เป็นสารเพียโซอิเล็กทริกที่มีการนิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้ดี [4] มีค่าสัมประสิทธิ์คู่อุปทานไฟฟ้าเชิงกลสูง มีอุณหภูมิคูรีที่สูงส่งผลให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดได้ดี ที่สำคัญสามารถเตรียมได้ง่ายและหลากหลายองค์ประกอบ อุณหภูมิที่ใช้ก็ไม่สูงมากนัก จึงทำให้เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนตเป็นที่นิยม

เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) มีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ประมาณ 390°C [1] ซึ่งอุณหภูมิคูรีนี้จะเปลี่ยนแปลงเมื่อองค์ประกอบของสารเปลี่ยนแปลงไปโดย ณ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี เลดเซอร์โคเนตไททาเนตจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอรอบสไกต์ ที่มีหน่วยเซลล์แบบคิวบิกซึ่งส่งผลให้แสดงสมบัติเป็นพาราอิเล็กทริก เมื่อทำการลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี ลักษณะของหน่วยเซลล์จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) หรือรอมโบฮีดรอล (Rhombohedral) ซึ่งผลให้สมบัติของเซรามิกเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยในกรณีของเฟสเตตระโกนอลนั้นจะเกิดกระบวนการโพลาไรเซชันขึ้นได้เองในทิศทาง (100) ส่วนในกรณีของเฟสรอมโบฮีดรอล กระบวนการโพลาไรเซชันจะเกิดขึ้นเองในทิศทาง (111) และยังพบอีกว่า สมบัติทางด้านไฟฟ้าของเลดเซอร์โคเนตไททาเนตนั้น แสดงสมบัติที่โดดเด่นมากในสัดส่วนของ Zr:Ti อยู่ที่ 52:48 หรือ 53:47 ซึ่งอยู่ ณ บริเวณที่เรียกว่า รอยต่อเฟสที่มีลักษณะเหมือนกัน (Morphotropic Phase Boundary : MPB) [9] ดังเฟสไดอะแกรม (รูปที่ 1.1)

นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีการศึกษาและพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกขึ้นมาจากรวมถึงการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเลดเซอร์โคเนตไททาเนต ก็ได้ถูกพยายามค้นคว้าวิธีการเตรียมสาร PZT ที่มีคุณภาพสูง และให้สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก ที่ดี โดยมีการเตรียม PZT ในหลายวิธี เช่น วิธีมิกซ์ออกไซด์ (Mixed oxides) เป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสมในการเตรียมในปริมาณที่มาก ๆ และสารตั้งต้นมีราคาถูก อีกวิธีหนึ่งคือวิธีทางเคมีซึ่งวิธีนี้สารที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไม่สูงมาก ได้ขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอและเล็ก แต่มีความยุ่งยากในการเตรียมและไม่เหมาะสมในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากสารตั้งต้นราคาแพง การเตรียมผงเลดเซอร์โคเนตไททาเนต

(PZT) หากพิจารณาสารตั้งต้นที่นิยมใช้ในการเตรียมแบบมิกซ์ออกไซด์ นั่นคือเลดออกไซด์ (PbO) เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) ไททานเนียมออกไซด์ (TiO_2) ทำการผสมกันตามอัตราส่วนที่ต้องการ แล้วทำการเผาแคลไซน์ (calcination) ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1981 Hankey และ Biggers [10] ทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดเฟสของ PZT ด้วยการเตรียมแบบมิกซ์ออกไซด์ (Mixed oxides) พบว่า PZT เกิดเฟสที่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ $775\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีการระเหยของตะกั่ว และในปีนี้เอง Chandratreya [11] ได้ทำการศึกษา PZT ที่เตรียมจาก PZ และ PT เป็นสารตั้งต้น พบว่าเกิดการขยายตัวเชิงปริมาตร (volume expansion) ในช่วงอุณหภูมิ $450 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $700 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับ PZ และ PT ตามลำดับ และยังพบการเกิด PZT ที่อุณหภูมิสูงกว่า $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป

ในปี ค.ศ. 1982 Hankey และ Biggers [12] ได้ค้นพบอีกว่าค่าอัตราการคงตัว (Rate Constant) ในการก่อเกิดเฟสของสาร PT มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อให้แรงอัดในการอัดเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการคงตัวของ PZ เพิ่มขึ้น เมื่อขนาดผลึก PZ มีขนาดลดลง

ในปี ค.ศ. 1983 Cho และ Biggers [13] ทำการเตรียม PZT ด้วยวิธีการเตรียม 2 แบบ คือ การมิกซ์ออกไซด์ และวิธีการโมลท์เทนซอลท์ (Molten SoH) ซึ่งอาศัยหลักการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์-โปแตสเซียมคลอไรด์ ($NaCl-KCl$) ลงไปคอยช่วยในการทำปฏิกิริยาให้ผง PZT ที่มีความบริสุทธิ์สูงที่อุณหภูมิต่ำได้ และยังพบอีกว่าขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค PZT ที่เตรียมได้จากวิธีมิกซ์ออกไซด์จะสูงกว่าที่เตรียมได้จากโมลท์เทนซอลท์

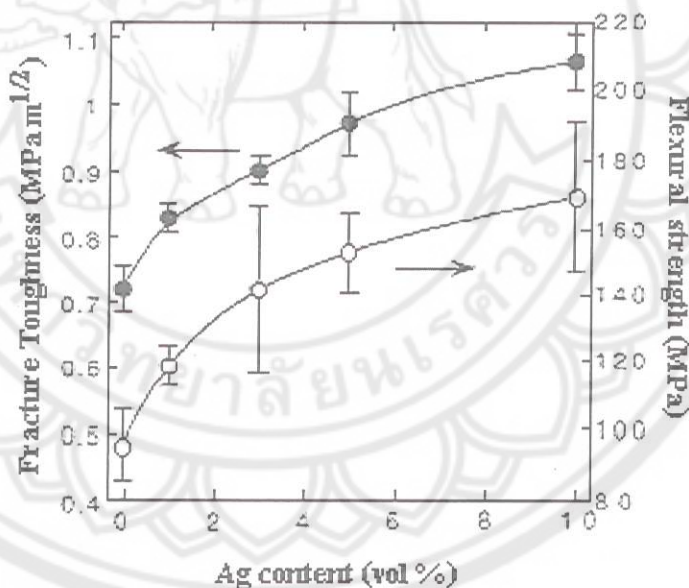
ในปี 1999 Xue และคณะวิจัย [14] ได้ทำการเตรียม PZT ด้วยกระบวนการทางเคมีเชิงกล (mechanochemical) โดยมีหลักการคือ ให้แรงกลแก่สารตั้งต้นมากพอจนก่อให้เกิดการทำปฏิกิริยากัน จนกลายเป็นสาร PZT พบว่า เวลาที่ใช้ในการก่อให้เกิด PZT สมบูรณ์ เท่ากับ 20 ชั่วโมงและยังสามารถเตรียมเซรามิกที่มีความหนาแน่นสูงกว่า 99% จากการเผาซินเตอร์ $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อมาบริษัท ecertec ได้ทำการผลิตผล PZT โดยใช้หม้อบดพลังงานสูง (high energy bead milling) ซึ่งใช้หลักการทางเคมีเชิงกลเช่นกัน ข้อดีของเคมีเชิงกลคือจะไม่มีการระเหยของตะกั่วเนื่องจากไม่ได้ให้พลังความร้อนในการก่อให้เกิดปฏิกิริยา พบว่าผง PZT ที่เตรียมด้วยวิธีดังกล่าวมีความบริสุทธิ์สูงมาก

ในปี 1999 Ajai Garg [15] ได้ทำการศึกษาผลของเลดออกไซด์ที่มีผลต่อการเตรียมเลดเซอร์โคเนตไททานเนต การเติมเลดออกไซด์เพิ่มส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น อีกทั้งคุณสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางกลเพิ่มขึ้นด้วย

ในปี ค.ศ. 2001 Jung-ho Ryu และคณะ [16] ทำการศึกษาผลของอัตราขึ้นของอุณหภูมิซินเตอร์ ที่มีต่อทางเพียโซอิเล็กทริกของเลดเซอร์โคเนตไททาเนตพบว่า ขนาดเกรนของเซรามิก PZT มีขนาดเล็กเมื่อใช้อัตราการขึ้นเร็ว และยังพบอีกว่าสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกนั้น มีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการขึ้นเร็ว ($100^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$)

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลของเลดเซอร์โคเนตไททาเนต หรือ PZT

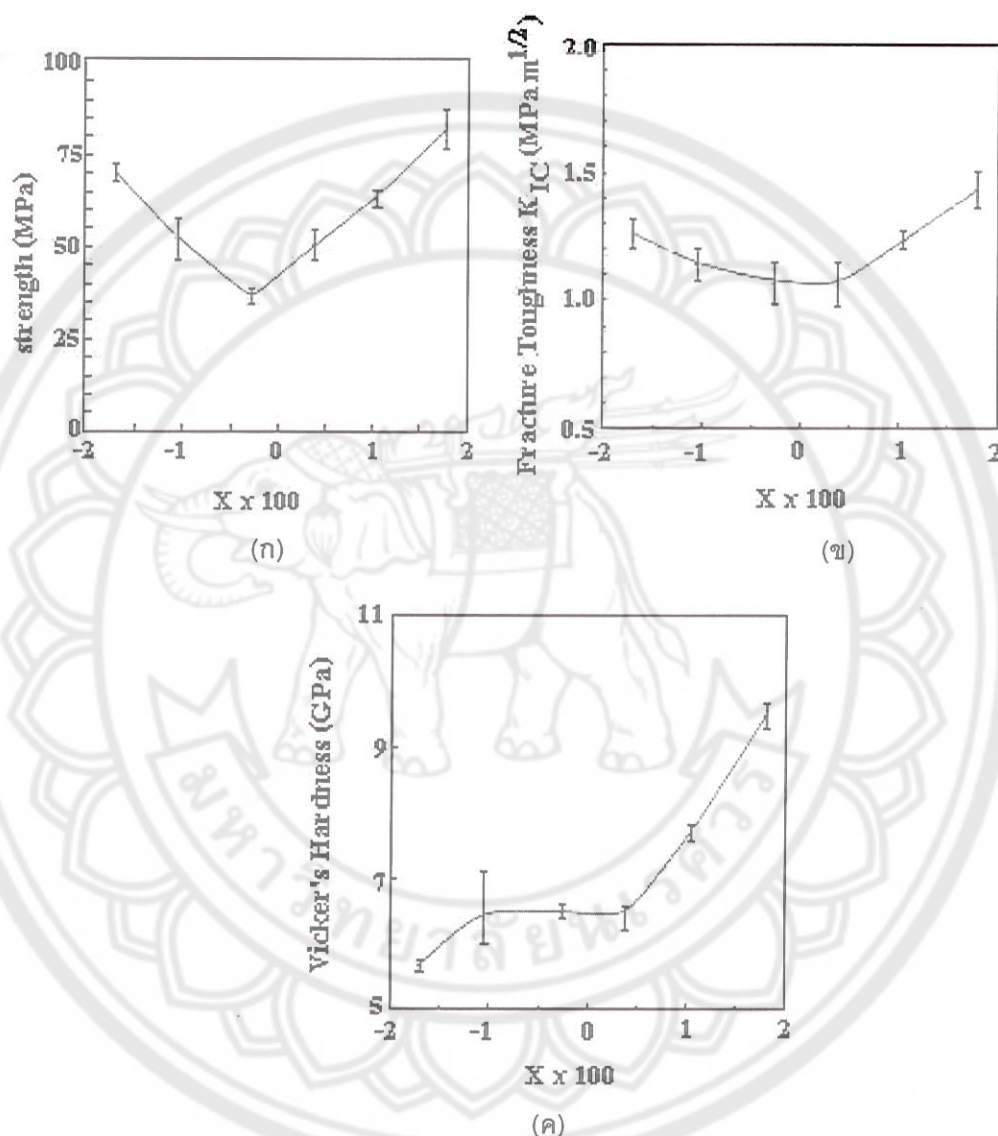
Hwang และคณะ [17] ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเฟสปนเปื้อนที่มีผลต่อสมบัติพิโซอิเล็กทริกและสมบัติเชิงกลของเซรามิกในระบบที่มี PZT เป็นองค์ประกอบหลัก โดยได้ทำการทดลองเติมออกไซด์ของเงิน (Ag_2O) ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตรลงไป ใน PZT แล้วนำไปทำการตรวจสอบสมบัติเชิงกลโดยใช้เทคนิคการกดด้วยหัวกดแบบวิกเกอร์และใช้เทคนิค 3-point bending เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงของเซรามิก PZT และพบว่าเซรามิกที่เตรียมได้จะมีค่าความต้านทานต่อรอยแยกและความแข็งแรงต่อการแตกหักที่สูงขึ้นเมื่อมีปริมาณของ Ag เพิ่มขึ้น ดังกราฟแสดงในรูป 2.5



รูป 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อรอยแยกและความแข็งแรงต่อการแตกหักกับปริมาณของ Ag ในเซรามิก PZT [15]

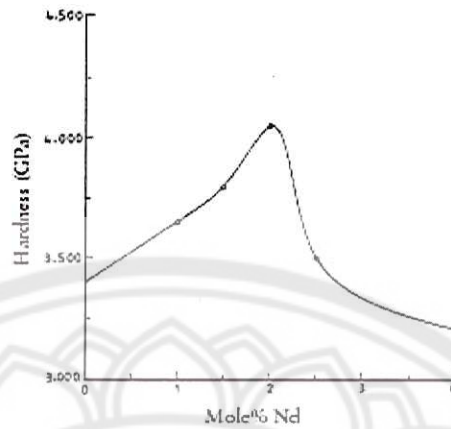
Garg และ Agrawal [18] ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของเลดออกไซด์ (PbO) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกลไฟฟ้า (electromechanical property) ของเซรามิก PZT โดยทำการเติม PbO ลงไปในปริมาณที่แตกต่างกัน แล้วจึงทำการทดสอบพฤติกรรมกรรมการแตกหักของเซรามิกโดยใช้เทคนิค SENB (Single edge notch bending) ซึ่งพบว่าการแตกหักมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้น

ภายในเนื้อเกรนมากกว่าที่บริเวณรอยต่อระหว่างเกรน และความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของเซรามิก ความแข็งในหน่วยวิกเกอร์ และค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก กับปริมาณของ PbO นั้นได้แสดงไว้ในรูป 2.6

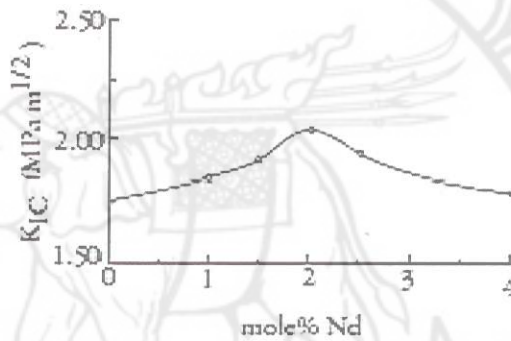


รูป 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าความแข็งแรง (ข) ค่าความต้านทานต่อรอยแตก และ (ค) ค่าความแข็งในหน่วยวิกเกอร์ ของ $Pb_{1-x}(Zr_{0.535}Ti_{0.465})O_{3+x}$ กับ x ที่เติมลงไปนเซรามิก [16]

Garg และ Goel [19] ได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซรามิก PZT ที่มีการเติม Nd^{3+} ลงไป โดยได้ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยเทคนิคการกดด้วยหัวกดแบบวิกเกอร์ จากนั้นจึงทำการศึกษารอยกดเพื่อหาค่าความแข็งและค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิกต่อไป ซึ่งพบว่าเมื่อเติม Nd^{3+} ลงไปใน PZT ด้วยปริมาณที่พอเหมาะแล้ว จะช่วยให้ค่าความแข็งและค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก PZT ดีขึ้น ดังแสดงในกราฟรูป 2.7



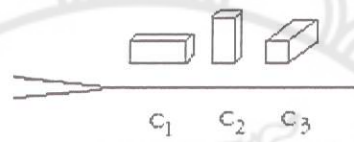
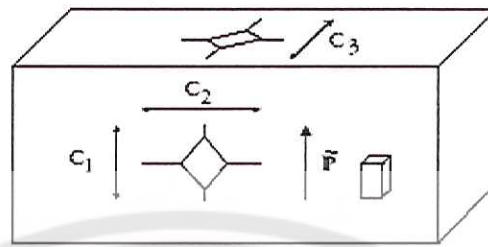
(ก)



(ข)

รูป 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าความต้านทานต่อรอยแยก และ (ข) ความแข็งแรงวิกเกอร์ กับปริมาณของ Nd^{3+} ในเซรามิก PZT [19]

Calderon-Mereno และคณะ [20] ที่ได้ทำการศึกษาค่าความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิก PZT ที่มีการทำซั้วและที่ไม่ได้ทำซั้วทั้งในแนวขนานและแนวตั้งฉากกับทิศของการทำซั้ว (รูป 2.8) โดยใช้เทคนิคการกดเปรียบเทียบกับเทคนิค SENB ซึ่งพบว่าค่าความต้านทานต่อรอยแยกของชิ้นงาน PZT ที่ผ่านการทำซั้วแล้วนั้นจะให้ค่าที่แตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับทิศทาง (anisotropy) เป็นสำคัญ กล่าวคือแนวของรอยแตกในทิศที่ขนานกับทิศทางของการทำซั้วจะยาวที่สุดและแนวของรอยแตกในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางของการทำซั้วจะสั้นที่สุด ซึ่งก็หมายความว่าค่าความแข็งแรงของเซรามิก PZT ที่ผ่านการทำซั้วจะไม่เท่ากันในแต่ละทิศทาง ส่วนชิ้นงาน PZT ที่ไม่ได้ผ่านการทำซั้วและชิ้นงาน PZT ที่ทดสอบด้วยเทคนิค SENB นั้นจะมีค่าความแข็งแรงเท่าๆกันในทุกทิศทาง



รูป 2.8 การแผ่ขยายของรอยแตกที่เกิดจากการกดด้วยหัวกดวิกเกอร์ในทิศทางต่างๆ กัน ในชิ้นงานที่ผ่านการทำ
 ชั่วแล้ว [20]

มหาวิทยาลัยพระศวร

บทที่ 3 วิธีทดลอง

3.1 สารเคมี

- 3.1.1 เลดออกไซด์ (PbO) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0 ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศสวีตเซอร์แลนด์
- 3.1.2 เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO₂) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0 ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศ สวีตเซอร์แลนด์
- 3.1.3 ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0 ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศ สวีตเซอร์แลนด์
- 3.1.4 เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 ผลิตโดยบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
- 3.1.5 ผงอะลูมินา (Al₂O₃) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0 ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศ สวิสเซอร์แลนด์
- 3.1.6 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol : PVA) ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
- 3.1.7 กาวเงิน

3.2 อุปกรณ์

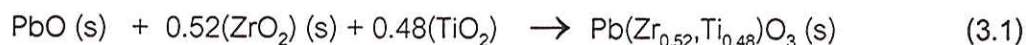
- 3.2.1 เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท AND รุ่น HM-300
- 3.2.2 กระจกพลาสติกพร้อมฝาปิด
- 3.2.3 ลูกบดเซอร์โคเนีย (ZrO₂)
- 3.2.4 เครื่องบดย่อยผสมสารแบบ Ball-milling
- 3.2.5 บีกเกอร์ขนาด 250, 600 และ 1,000 มิลลิลิตร
- 3.2.6 กระดาษฟอยล์ (foil)
- 3.2.7 เตาแผ่นให้ความร้อน (hot plate)
- 3.2.8 ครกบดสาร (agate)
- 3.2.9 ช้อนตักสาร
- 3.2.10 ตู้อบสารอุณหภูมิประมาณ 200 °C ผลิตโดยบริษัท Griffin Grundy
- 3.2.11 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร ผลิตโดยบริษัท Lenton Furnances รุ่น 4279
- 3.2.12 ถ้วยอะลูมินา (alumina crucible)
- 3.2.13 แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร

- 3.2.14 เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก
- 3.2.15 ดิจิตอลเวอร์เนียคาลิเปอร์ ยี่ห้อ Mitutoyo
- 3.2.16 กระดาษทรายเบอร์ 400 600 800 1000 และ 1200
- 3.2.17 ผงขัดอะลูมินาขนาดอนุภาค 1 ไมโครเมตร
- 3.2.18 เครื่องอัตราไซนิก
- 3.2.19 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) รุ่น D500 ยี่ห้อ SIEMENS
- 3.2.20 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) รุ่น X'Pert ผลิตโดยบริษัท Philips ประเทศเนเธอร์แลนด์
- 3.2.21 เครื่อง Sputter Coater รุ่น SC7620 บริษัท The Polaron ประเทศอังกฤษ
- 3.2.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ผลิตโดยบริษัท JOEL รุ่น LEO 1455VP ประเทศอังกฤษ
- 3.2.23 จานหมุนสำหรับขัดสาร บริษัท Struers รุ่น LaboPol-5 ประเทศเดนมาร์ก
- 3.2.24 เครื่อง 4276 LCZ meter ผลิตโดยบริษัท Hewlett Packard ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.25 เครื่องวัดค่าความแข็งจุลภาค (microhardness tester) ผลิตโดยบริษัท Galileo รุ่น Microscan2 โดยทำการทดสอบด้วยหัวกดแบบวิกเกอร์ (Vickers) และมีโหลดสูงสุด 3 กิโลกรัมแรง
- 3.2.26 กล้องจุลทรรศน์ OPTIPHOT-2 ผลิตโดยบริษัท Nikon ประเทศญี่ปุ่น

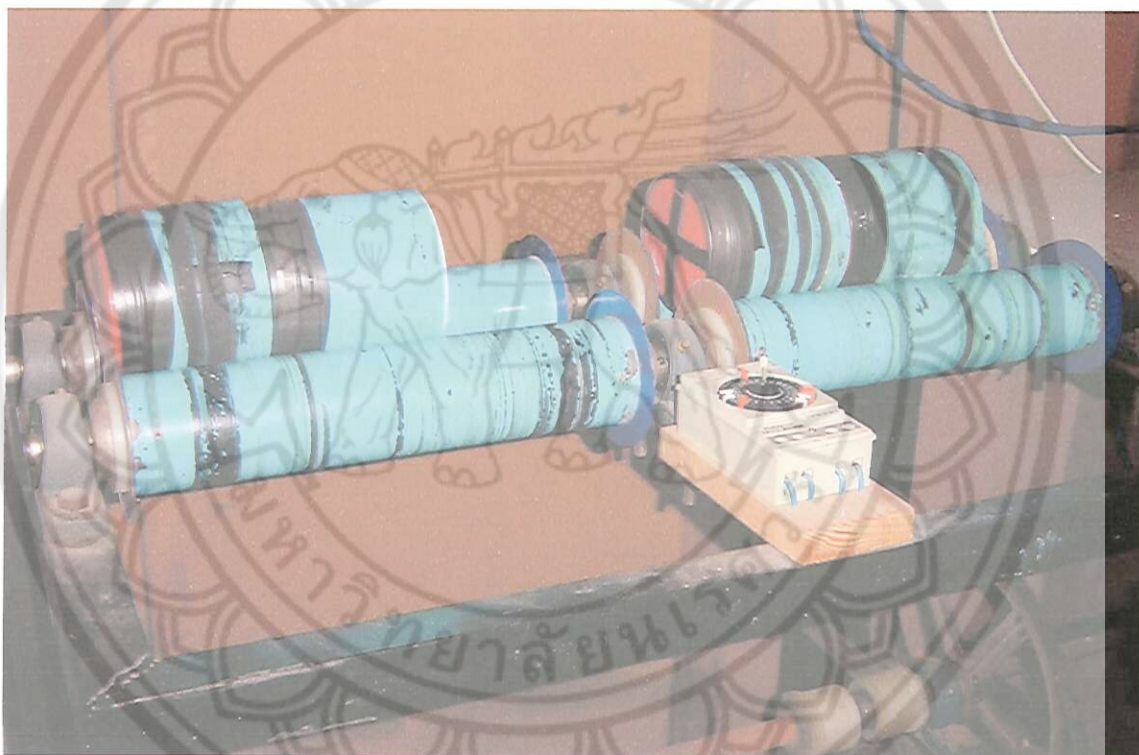
ในปีงบประมาณ 2550 นี้ ได้ทำการวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยในปีงบประมาณ 2549 โดยนำเงื่อนไขในการเตรียมผงเซรามิก และเม็ดเซรามิก ในกระบวนการเดิม มาทำการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และสมบัติเชิงกล อย่างไรก็ตาม ยังมีการเตรียมผงเซรามิก และเม็ดเซรามิกของ PZT เพิ่มเติมเช่นกัน จึงขอเสนอขั้นตอนการเตรียมผง และเม็ดเซรามิก PZT ในงานวิจัยในปีงบประมาณ 2550 ด้วย

3.3 กระบวนการเตรียมผงเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT)

ทำการเตรียมผงเลดเซอร์โคเนตสูตร $Pb(Zr_{0.52},Ti_{0.48})O_3$ ด้วยวิธีมิกซ์ออกไซด์ เริ่มจากการสังเคราะห์ตั้งต้นซึ่งก็คือ PbO , TiO_2 และ ZrO_2 ตามสัดส่วนที่เหมาะสมโดยอาศัยสมการเคมี (3.1) ดังนี้



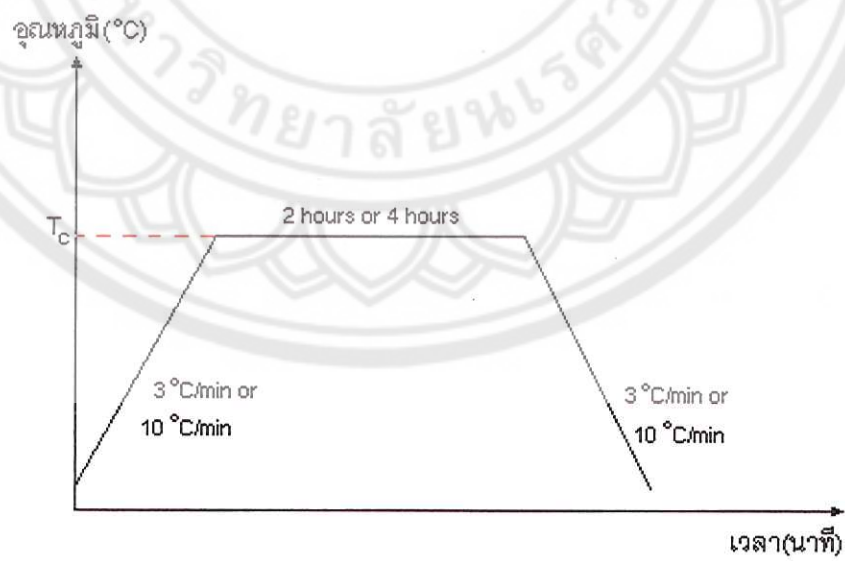
จากนั้นนำมาใส่ในกระป๋องพลาสติกที่บรรจุลูกบดเซอร์โคเนียแล้วเติมเอทานอลลงไปด้วย เพื่อเป็นตัวช่วยในการหล่อลื่นปิดฝาให้สนิทแล้วนำไปทำการบดย่อยผสมสารด้วยเครื่อง ball-milling (รูป 3.1) เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปอบให้แห้ง จากนั้นนำผงผสมที่ได้นี้ใส่ใน ถ้วยอะลูมินาปิดฝาให้สนิทแล้วนำไปเผาแคลไซน์ด้วยเตาไฟฟ้า (รูป 3.2) ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมงด้วยอัตราการขึ้นและลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที โดยอาศัยแผนผังในการแคลไซน์ดังแสดงในรูป 3.3 จากนั้นนำสารที่ได้ไปตรวจสอบหาปริมาณเฟสของ PZT ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ขั้นตอนการเตรียมและตรวจสอบผงเซรามิก PZT แสดงดังแผนภาพในรูปที่ 3.4



รูป 3.1 เครื่องบดย่อยผสมสารแบบ ball milling

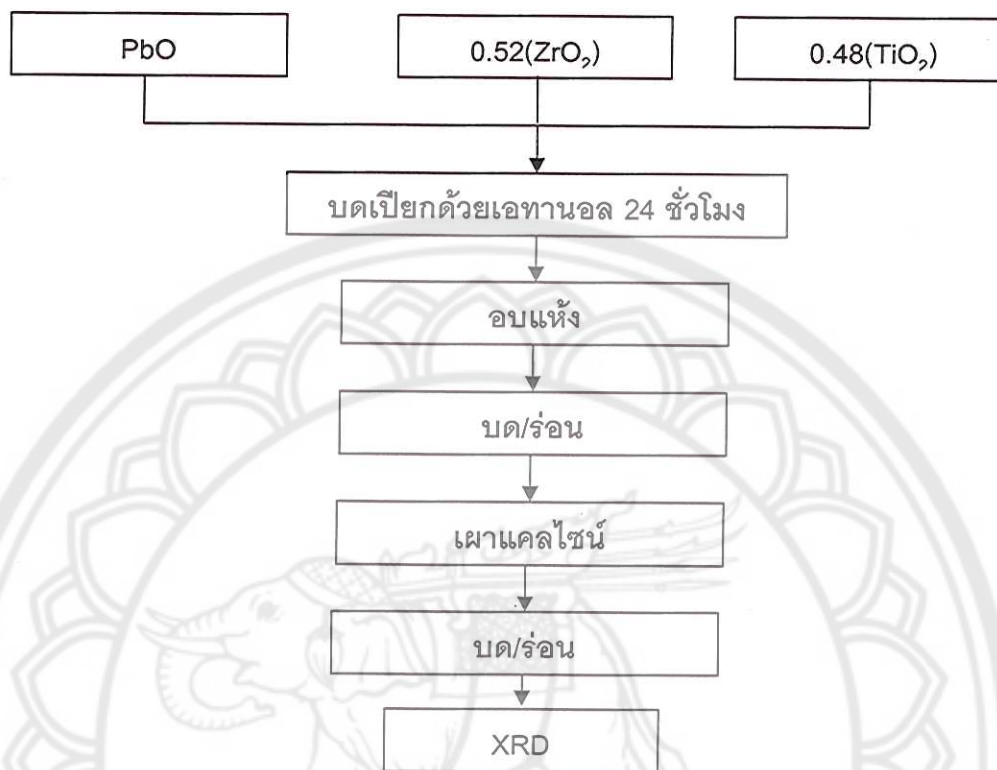


รูป 3.2 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร



รูป 3.3 แผนผังแสดงการเผาแคลไซน์ (โดย T_c คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์)

ขั้นตอนการเตรียมผงเซรามิก PZT



รูป 3.4 ขั้นตอนการเตรียมผง PZT

3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิก

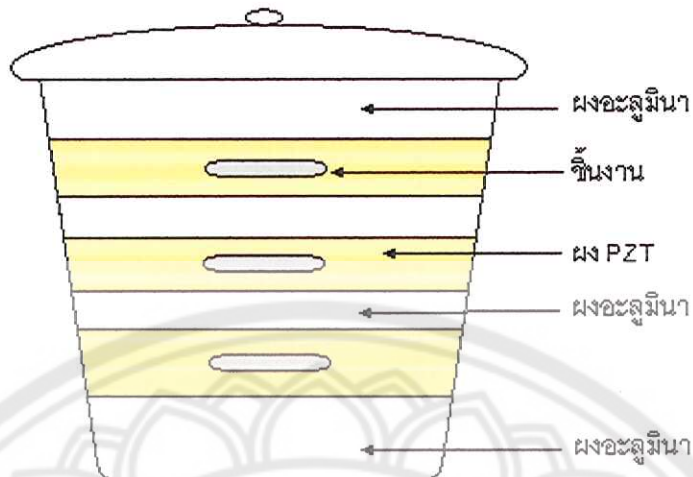
นำผงที่เตรียมได้มาอัดขึ้นรูปแบบ uniaxial pressing ครั้งละประมาณ 1.5 กรัม โดยผสม PVA ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ลงไปด้วยประมาณ 1-2 หยด เพื่อเป็นตัวช่วยประสานให้ผงเกาะกันดีขึ้น โดยขึ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นกลม (disk) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 มิลลิเมตร โดยทำการอัดในแม่พิมพ์โลหะ (รูป 3.5) ด้วยเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก (รูป 3.6) ด้วยความดัน 2 ตัน เป็นเวลานาน 25-30 วินาที เมื่อได้ชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูป (green body) แล้วจึงนำมาจัดเรียงลงในถ้ำยอะลูมินา (รูป 3.7) จากนั้นทำการกลับชิ้นงานด้วยผงเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) เพื่อควบคุมบรรยากาศในการเผาและป้องกันการระเหยของตะกั่วในรูปของ PbO ออกจากชิ้นงานในระหว่างที่ทำการเผา แล้วจึงกลับด้วยผงอะลูมินาทับอีกชั้นหนึ่ง เพื่อช่วยให้มีการไหลเวียนของความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเท่าๆ กันในทุกทิศทาง จากนั้นปิดฝาให้สนิทแล้วนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C เป็นเวลานาน 2, 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้นและลงอุณหภูมิเป็น 3, 5 และ 10 °C/นาที



รูป 3.5 แม่พิมพ์โลหะ

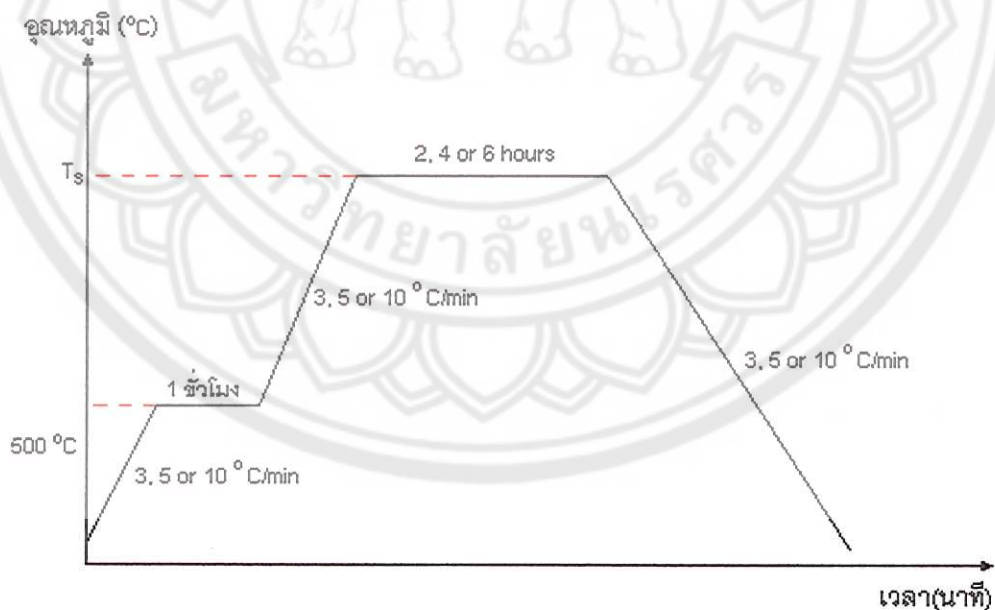


รูป 3.6 เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก



รูป 3.7 การจัดเรียงชิ้นงานในถ้าวอะลูมินาลำหรับการเผาซินเตอร์

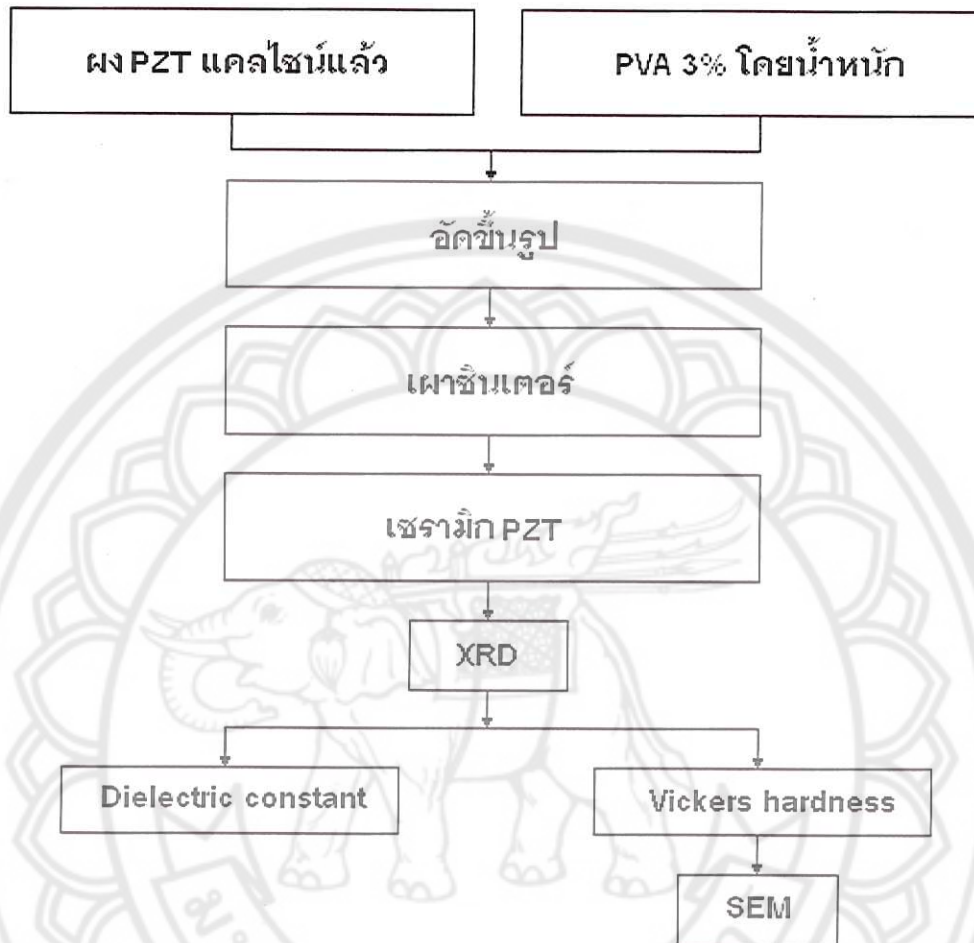
ในกระบวนการเผาซินเตอร์ของเซรามิกนั้นจะต้องทำการเผาแซ่ที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมงก่อนเพื่อกำจัด PVA ออกไป จากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นต่อไปจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการเผาซินเตอร์ ดังแผนภาพแสดงการเผาซินเตอร์ในรูป 3.8 ขั้นตอนการเตรียมและตรวจสอบเม็ดเซรามิก PZT แสดงดังรูป 3.9



รูป 3.8 แผนผังแสดงการเผาซินเตอร์ (โดย T_s คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์)

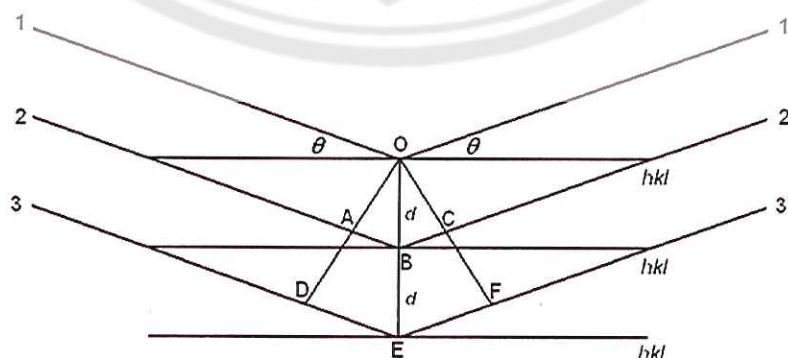


ขั้นตอนการเตรียมและตรวจสอบสมบัติของเม็ดเซรามิก PZT



รูป 3.9 ขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติของเม็ดเซรามิก PZT

3.5 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)



รูป 3.10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบของอะตอม [21]

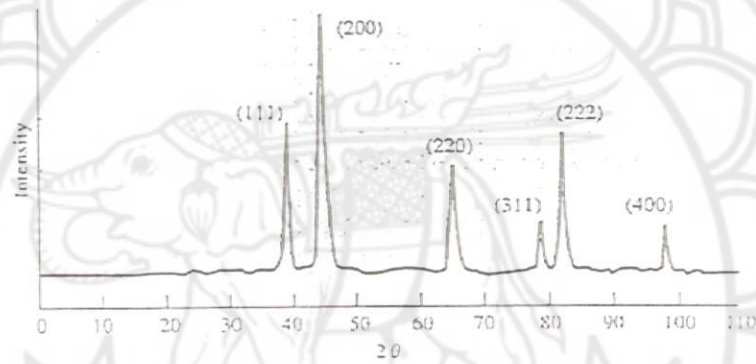
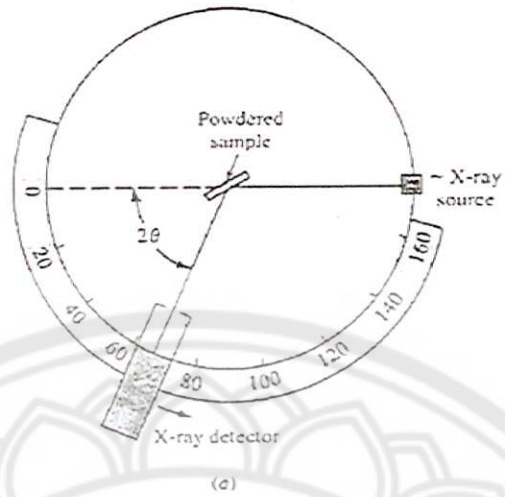
ผลึกที่มีการวางเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบเป็นชั้นๆ บนชุดระนาบ (hkl) ดังรูป 3.10 เมื่อเกิดการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์จากชั้นอะตอมเหล่านี้ ณ มุม θ ถ้าคลื่นที่เลี้ยวเบนออกมานี้ มีเฟสเดียวกัน (in phase) จะเกิดการรวมกันแบบเสริมกันได้นั้นจะต้องมีระยะทางเดินของคลื่นต่างกันอยู่เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.2) โดยเรียกสมการนี้ว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law)

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.2)$$

- เมื่อ d เป็นระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (h k l)
 θ เป็นมุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก
 n เป็นเลขจำนวนเต็มใดๆ = 1,2,3,...
 λ เป็นความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

ผลึกแต่ละชนิดจะมีขนาดและการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาตรวจสอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนที่แตกต่างกัน โดยที่รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุแต่ละชนิดนั้นก็มีความเฉพาะเจาะจงสำหรับวัสดุนั้นๆ ดังนั้นเมื่อนำเครื่องมือสำหรับตรวจวัด (detector) มารองรับรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่างๆ ก็จะสามารถตรวจสอบได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุหรือสารชนิดใด โดยพิจารณาจากข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมของแบรกก์ (Bragg's angle) และความเข้มของพีครังสีเอ็กซ์ของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏ (รูป 3.11) ซึ่งดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่เป็นลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไป จึงสามารถนำรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตรวจสอบได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลของสารชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS files) [22] เพื่อตรวจสอบชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นได้ โดยเริ่มจากการนำผงและชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมได้มาแปะใส่ใน holder จากนั้นนำไปวางที่บริเวณช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่อง X-ray diffractometer (รูป 3.12) แล้วจึงเดินเครื่องโดยใช้เป้าทองแดง ($\text{CuK}\alpha$) ที่ให้รังสีเอ็กซ์ค่าความยาวคลื่นประมาณ 1.540562 Å ออกมาด้วย step ประมาณ 0.01 องศาต่อวินาที จากค่ามุม 2θ ที่ 10 องศา ไปจนถึงที่ค่ามุม 2θ ที่ 60 องศา

ในงานวิจัยนี้ เมื่อเตรียมผง และเม็ดเซรามิก PZT แต่ละครั้งก็ต้องทำการตรวจสอบว่าสารตัวอย่างที่ได้มีความบริสุทธิ์ หรือเป็นสารที่ต้องการ สอดคล้องกับฐานข้อมูลมาตรฐานหรือไม่



รูป 3.11 หลักการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิค XRD และตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



รูป 3.12 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D5000 ยี่ห้อ SIEMENS และ รุ่น X'Pert ผลิตโดยบริษัท Philips ประเทศเนเธอร์แลนด์

3.6 การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก

เริ่มต้นจากการเตรียมชิ้นงานเซรามิก PZT สำหรับการทดสอบโดยการขัดผิวหน้าของชิ้นงานเซรามิกด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ โดยใช้จานหมุนสำหรับขัดสาร (รูป 3.13) แล้วทำการขัดด้วยผงอะลูมินาที่มีความละเอียดประมาณ 0.1 ไมโครเมตรอีกครั้ง เพื่อให้ผิวทั้งสองด้านของเซรามิกอยู่ในแนวระนาบและเรียบสม่ำเสมอ นำชิ้นงานไปทำความสะอาดผิวด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (รูป 3.14) เป็นเวลาประมาณ 15 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก จากนั้นนำไปอบให้แห้งด้วยตู้อบ (รูป 3.15) ที่อุณหภูมิประมาณ 120 °C วัดขนาดความหนาของชิ้นงานก่อนการทำขั้วด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิตอล (รูป 3.16) จากนั้นทำการทากาวเงินเพื่อทำขั้ว โดยเผาให้กาวเงินที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 25 นาที ใช้อัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที ทั้งสองด้านของชิ้นงาน ตรวจสอบขั้วที่ทำได้ว่าติดกันตลอดทั้งหน้าของชิ้นงานหรือไม่ด้วยโอห์มมิเตอร์ ระวังอย่าให้ทั้งสองด้านของผิวหน้าขั้วติดถึงกัน นำชิ้นงานที่ได้มาทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง LCZ meter (รูป 3.17) โดยทำการวัดเทียบกับอุณหภูมิจากประมาณ 35 – 425 °C ใช้ความถี่ 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz และ 1 MHz โดยใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง พร้อมกับเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 3 °C/นาที ซึ่งค่าความจุที่วัดได้นั้นสามารถนำมาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์) ได้จากสมการ (3.1)

$$\epsilon_r = \frac{tC}{\epsilon_0 A} \quad (3.1)$$

- เมื่อ
- ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก หรือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของชิ้นงาน
 - ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศมีค่าประมาณ 8.854×10^{-15} F/mm
 - C คือ ค่าความจุไฟฟ้า
 - t คือ ความหนาของชิ้นงาน
 - A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน



รูป 3.13 งานหมุนสำหรับขีดสารตัวอย่าง



รูป 3.14 อัตราไซนิก



รูป 3.15 ตู้อบ บริษัท Griffin Grundy



รูป 3.16 ดิจิตอลเวอร์เนียคาลิเปอร์ ยี่ห้อ Mitutoyo



รูป 3.17 เครื่อง LCZ meter ต่อพ่วงกับเตาเผาและ Multimeter เพื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยการแปรค่าอุณหภูมิ

3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเซรามิก

เริ่มต้นจากการเตรียมชิ้นงานเซรามิก PbZrO_3 สำหรับการทดสอบโดยการขัดผิวหน้าของชิ้นงานเซรามิกโดยใช้จานหมุนสำหรับขัดสาร ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วทำการขัดด้วยผงอะลูมินา (รูป 3.18) ที่มีความละเอียดประมาณ 1 ไมโครเมตรอีกครั้ง เพื่อให้ผิวทั้งสองด้านของเซรามิกอยู่ในแนวระนาบและเรียบสม่ำเสมอ นำชิ้นงานไปทำความสะอาดผิวด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลาประมาณ 15 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก จากนั้นนำไปอบให้แห้งแล้วจึงนำชิ้นงานที่ได้มาทำการทดสอบค่าความแข็งในระดับจุลภาค



รูป 3.18 ผงอะลูมินาสำหรับขัดชิ้นงาน ความละเอียดประมาณ 1 ไมโครเมตร

การหาค่าความแข็งของเซรามิก (hardness)

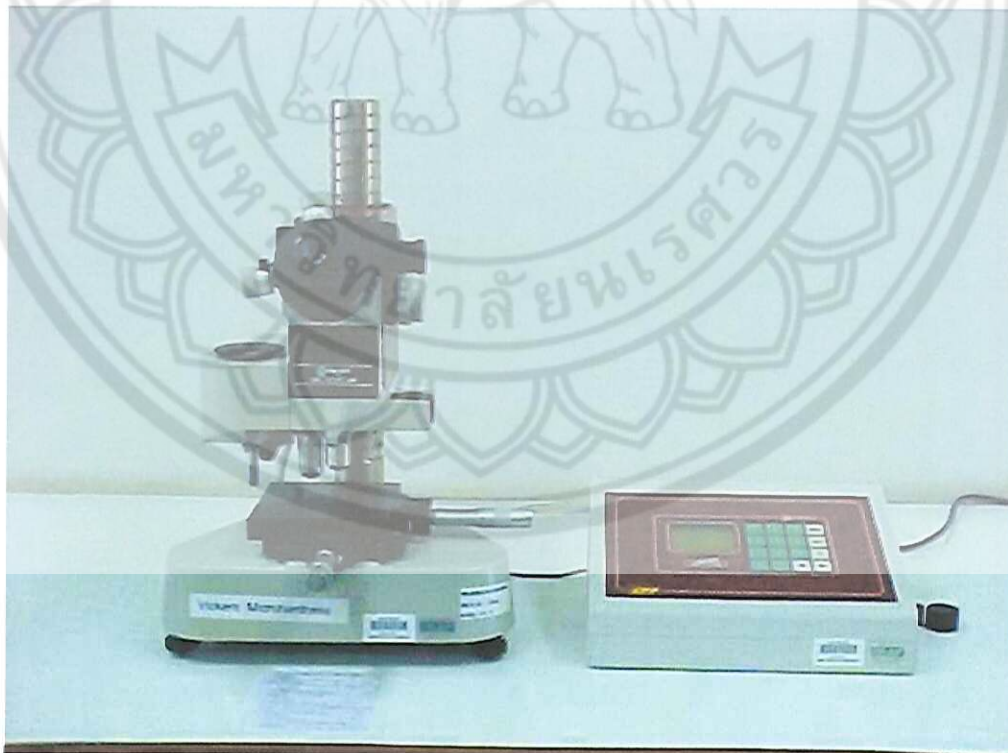
ทำการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานเซรามิก PbZrO_3 ที่มีอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ต่างๆ กัน ด้วยเทคนิคการกด (Indentation technique) ความแข็งในแบบวิกเกอร์ (Vickers) โดยใช้เครื่องวัดค่าความแข็งในระดับจุลภาค (microhardness tester) ดังแสดงในรูป 3.19 ในการทดสอบวัดค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์แต่ละชิ้นงานนั้น จะใช้แรงในการกด 2 ค่า คือ 300 กรัมแรง และ 500 กรัมแรง แต่ละแรงจะกดลงบนผิวหน้าของเซรามิกแต่ละชิ้น 5 จุด ดังนั้นเซรามิกแต่ละชิ้นงานจะมีการทดสอบ 10 จุด กระจายบนผิวของชิ้นงาน แล้วจึงนำมาคำนวณหาค่าความแข็งแต่ละจุดที่กด และเฉลี่ยค่าออกมาเป็นค่าความแข็งของแต่ละชิ้นงาน ซึ่งการหาค่าความแข็งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 [23] ดังนี้

$$H_V = 0.1891 \left(\frac{P}{d^2} \right) \quad (3.2)$$

เมื่อ H_V คือค่าความแข็งในหน่วยของวิกเกอร์ (kg/mm^2)

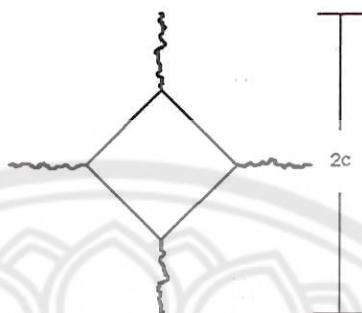
P คือโหลดที่ให้แก่หัวกด (N)

d คือค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมของรอยกด (mm)



รูป 3.19 เครื่องวัดค่าความแข็งในระดับจุลภาค (microhardness tester) รุ่น Microscan2 (Vickers)

ภาพแสดงรอยกดแบบวิกเกอร์ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเซรามิก แสดงดังรูป 3.20



รูป 3.20 ลักษณะของรอยกดที่เกิดจากการใช้หัวกดแบบวิกเกอร์
(c คือ ค่าความยาวของรอยแตกที่วัดจากจุดศูนย์กลางของรอยกด)

3.8 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยกดบนผิวเซรามิก

นำเซรามิกที่ทำการวัดค่าความแข็งแล้ว มาทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคอีกครั้งเพื่อศึกษาถึงรอยกดที่ได้จากการวัดค่าความแข็ง โดยนำชิ้นงานนี้มาทำการเคลือบทองด้วยเครื่อง Sputter coater (รูป 3.21) ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ดังรูป 3.22 ส่องดูรอยกดแบบวิกเกอร์และลักษณะของรอยแตกที่ออกจากมุมของรอยกด ที่กดจากเครื่องวัดค่าความแข็งในระดับจุลภาค



รูป 3.21 เครื่อง Sputter Coater



รูป 3.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น LEO 1455 VP

มหาวิทยาลัยพระนคร

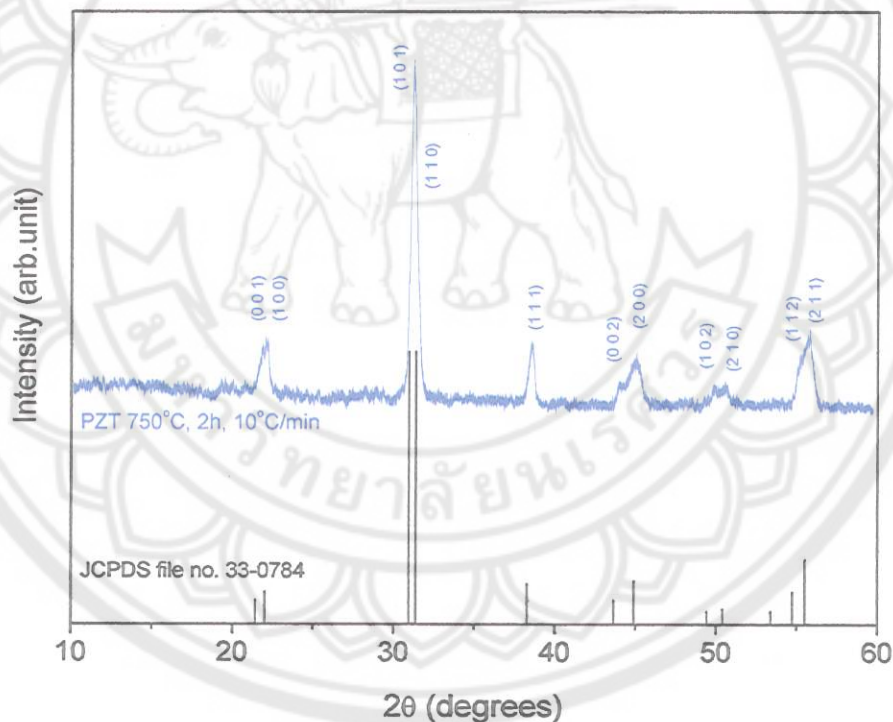
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมผงและเม็ดเซรามิก ผลการตรวจสอบเฟส ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าความแข็งระดับจุลภาค ตัวอย่างภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ของรอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT ที่เตรียมได้ พร้อมทั้งอภิปรายผลการทดลองที่ได้ ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการตรวจสอบเฟสของผงผลึกในระบบ PZT

จากการเตรียมผงผลึก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมงด้วยอัตราการขึ้นและลงอุณหภูมิเป็น $10^\circ\text{C}/\text{นาที}$ นำมาตรวจสอบชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ได้ที่แสดงดังรูป 4.1

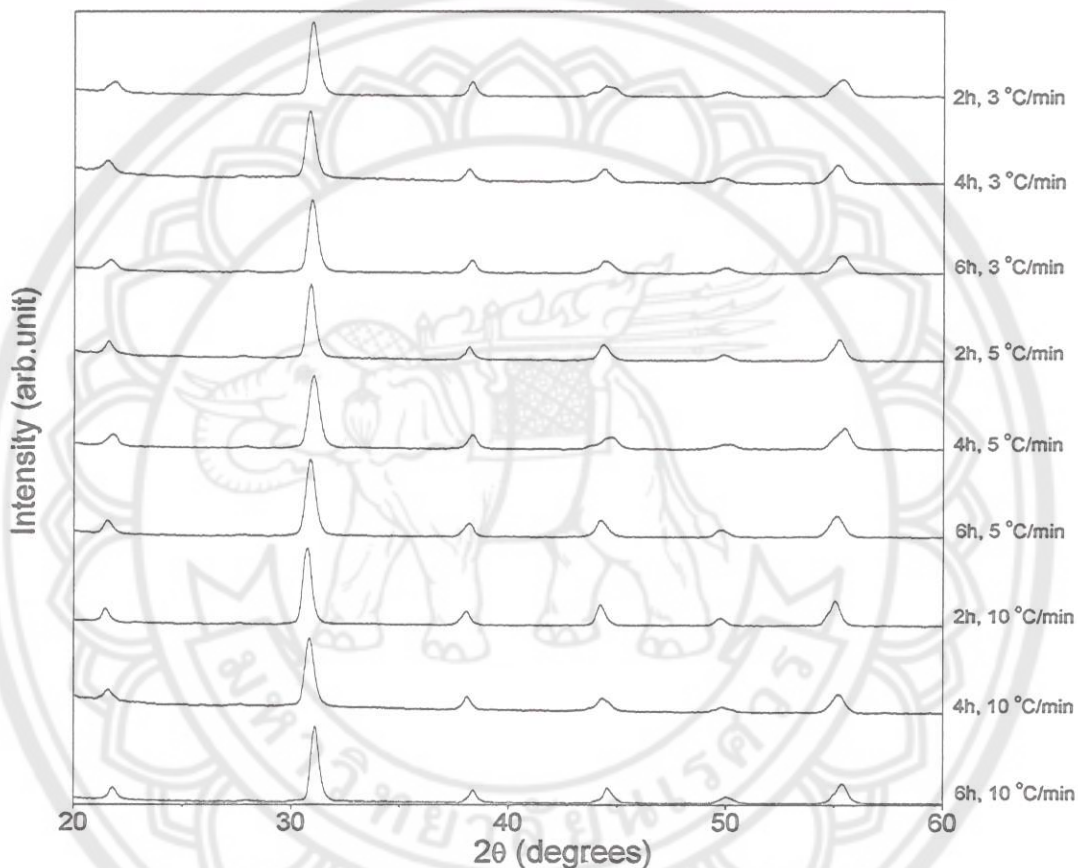


รูป 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ $10^\circ\text{C}/\text{นาที}$ เทียบกับ JCPDS file no. 33-0784

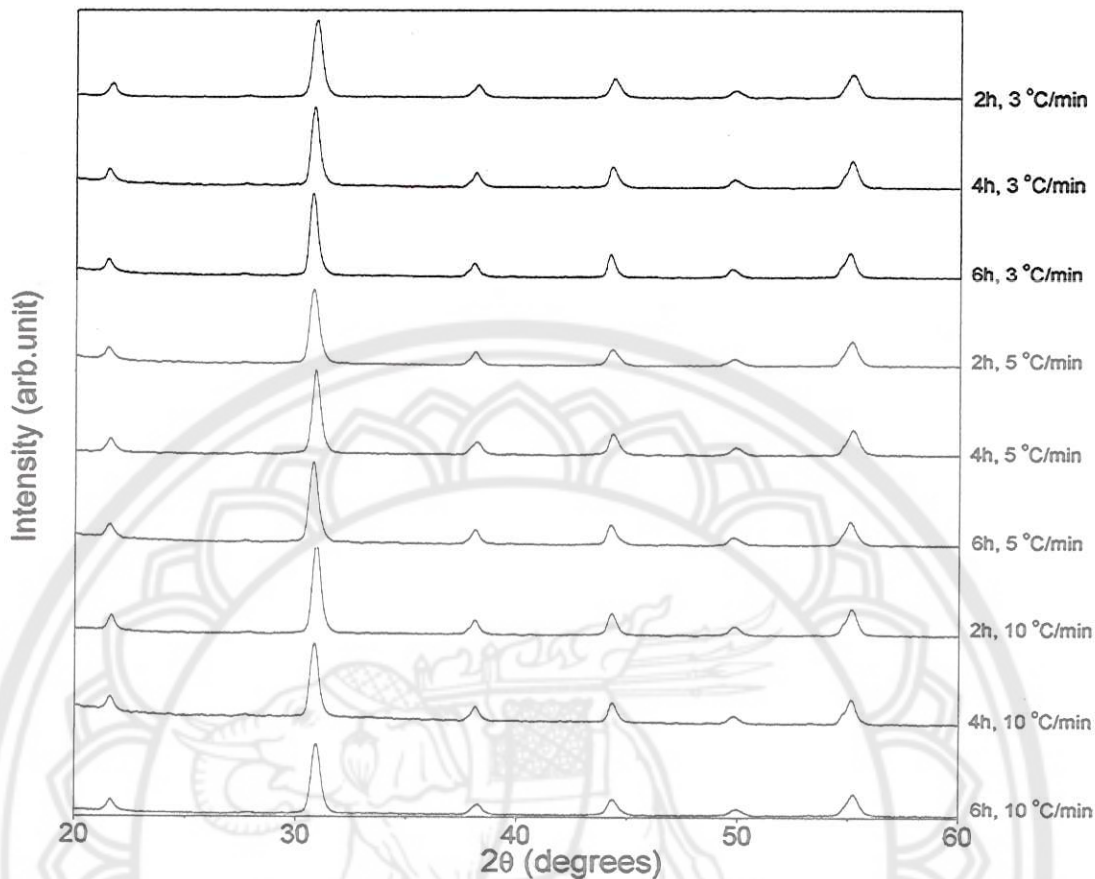
จากรูป 4.1 พบว่าผงผลึก PZT ที่ได้นี้สอดคล้องกับข้อมูลของสาร PZT สูตร $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ในแฟ้มข้อมูลของ JCPDS หมายเลข 33-0784 [24] ซึ่งมีโครงสร้างอยู่ในระบบเตตระโกนอล มีแลคทิกซพารามิเตอร์ $a = 4.036$ และ $c = 4.146$ และมีพีคที่มีความเข้มสูงที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งค่า 2θ เป็น 30.9, 55.5 และ 44.9 ตามลำดับ

4.2 ผลการตรวจสอบเฟสเซรามิกในระบบ PZT

นำเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผาเป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และแปรค่าอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาเป็น 3, 5 และ 10 °C/นาที เมื่อนำเซรามิกดังกล่าวมาตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ได้ผลดังแสดงในรูป 4.2 และ 4.3 ดังนี้



รูป 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ PZT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C ที่บริเวณพื้นผิว โดยการแปรค่าเวลาในการเผา และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ



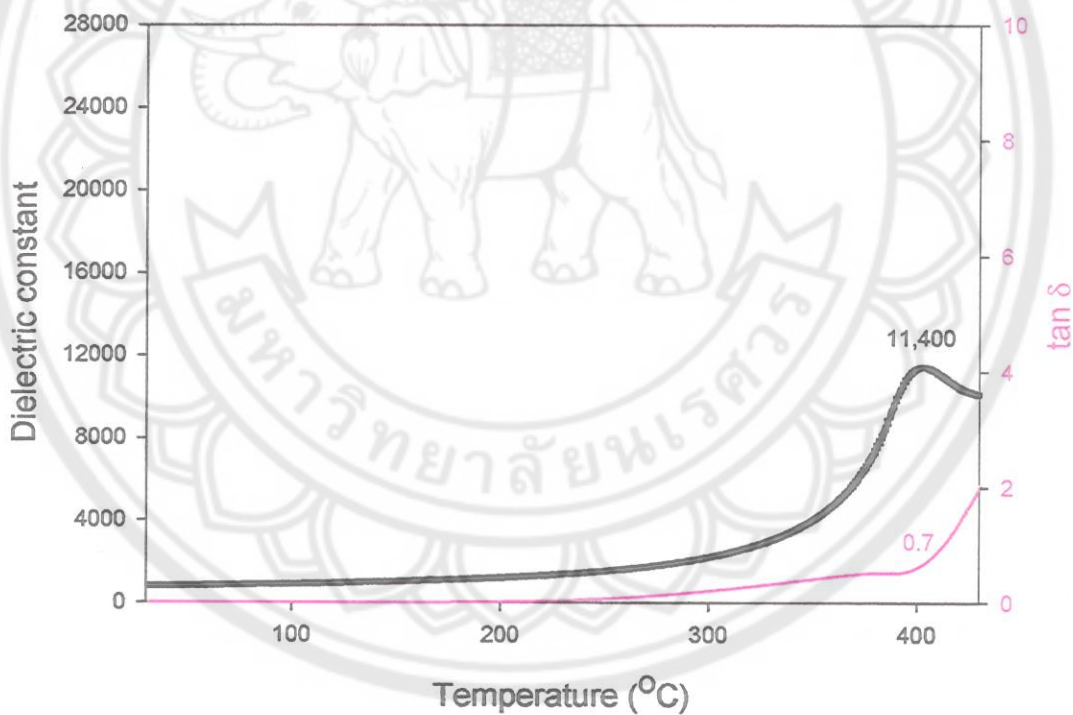
รูป 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ PZT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C ที่บริเวณพื้นผิว โดยการแปรค่าเวลาในการเผา และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ

จากรูป 4.2 และ 4.3 จะเห็นได้ว่ารูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกทั้งหมดที่ได้จะมีลักษณะโดยทั่วไปที่คล้ายคลึงกับรูปแบบของการเลี้ยวเบนของผงในระบบ PZT ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 นั่นคือเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ทั้งสองอุณหภูมิ ทุกเงื่อนไขนั้น จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สอดคล้องกับข้อมูลของสาร PZT สูตร $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 33-0784 [24] เช่นกัน

4.3 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก

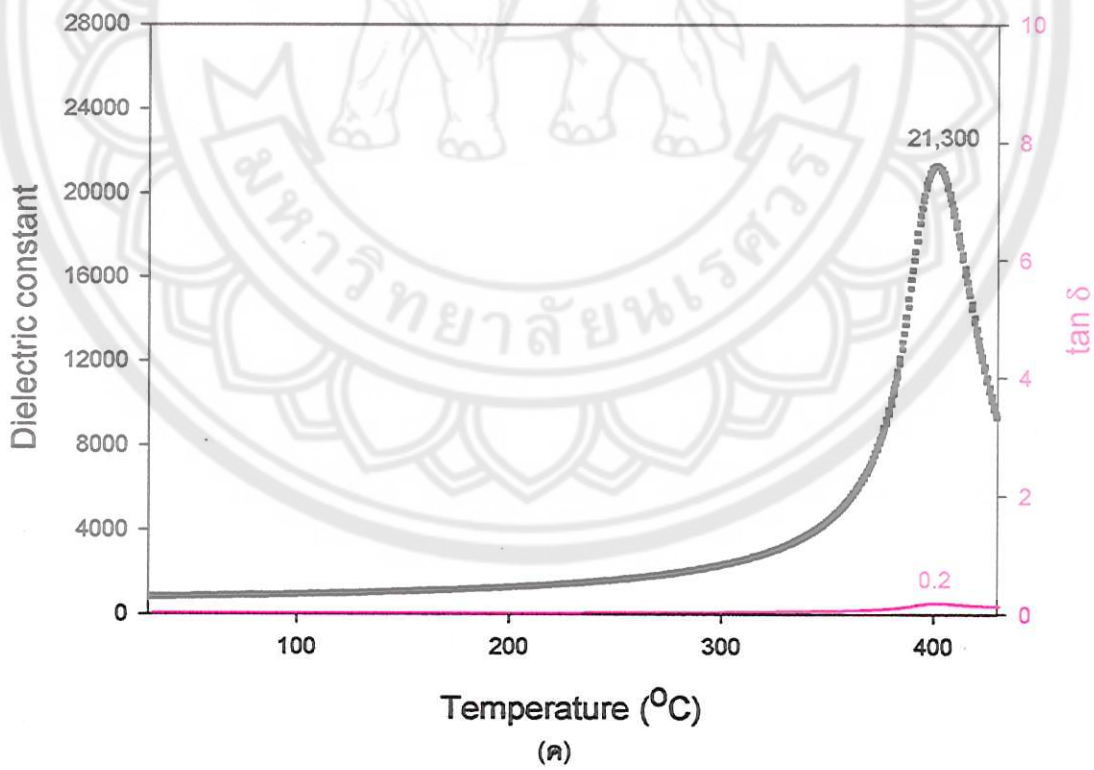
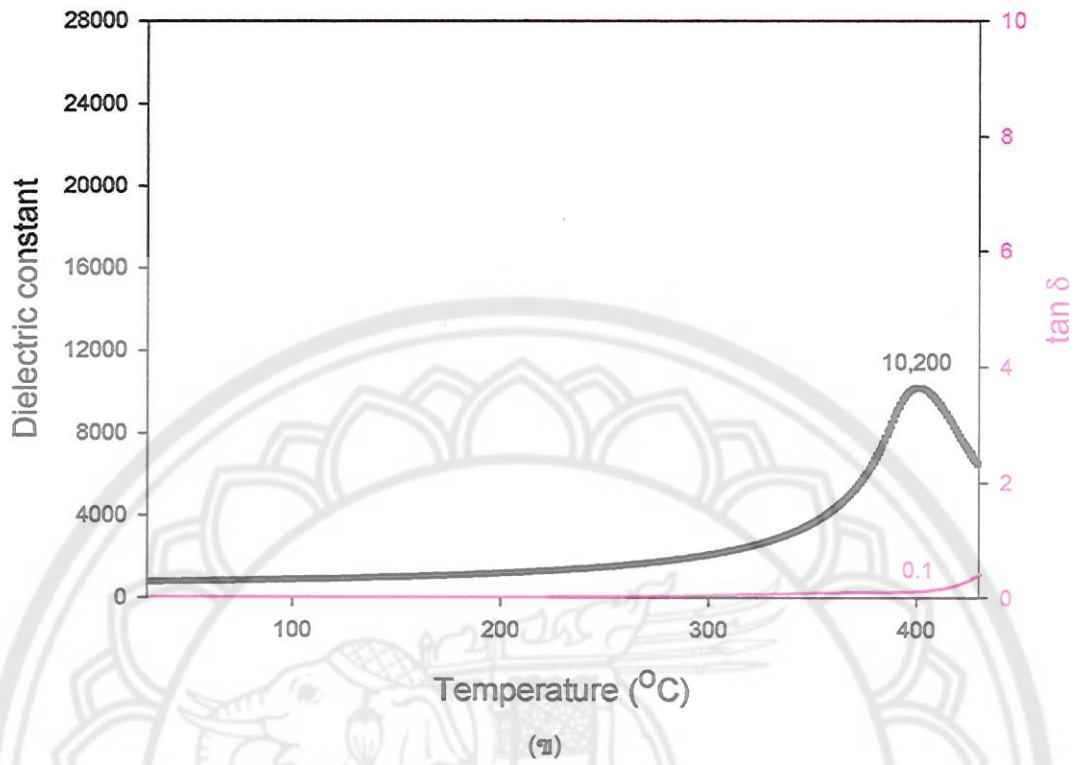
นำเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผาเป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมง และแปรค่าอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาเป็น 3, 5 และ 10 °C/นาที มาทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 10, 100 kHz และ 1 MHz เทียบกับอุณหภูมิ โดยแปรค่าอุณหภูมิในขณะที่ทำการวัดตั้งแต่ 35 ถึง 425 °C

ข้อมูลของอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C ที่วัดที่ความถี่ 10, 100 kHz และ 1 MHz โดยการแปรค่าเวลาในการเผา และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาต่างๆ กันนั้น แสดงดังกราฟในรูป 4.4 - 4.21 และดังในตาราง 4.1 - 4.18 ตามลำดับ



(ก)

รูป 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก เทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz

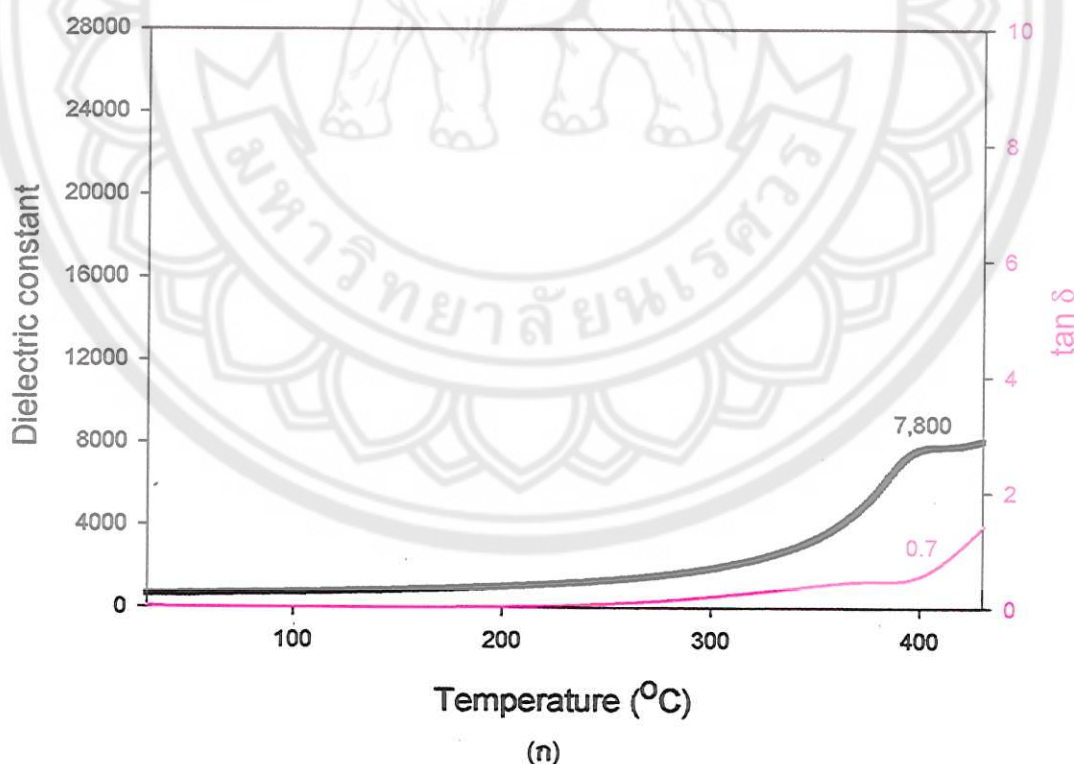


รูป 4.4 (ต่อ)

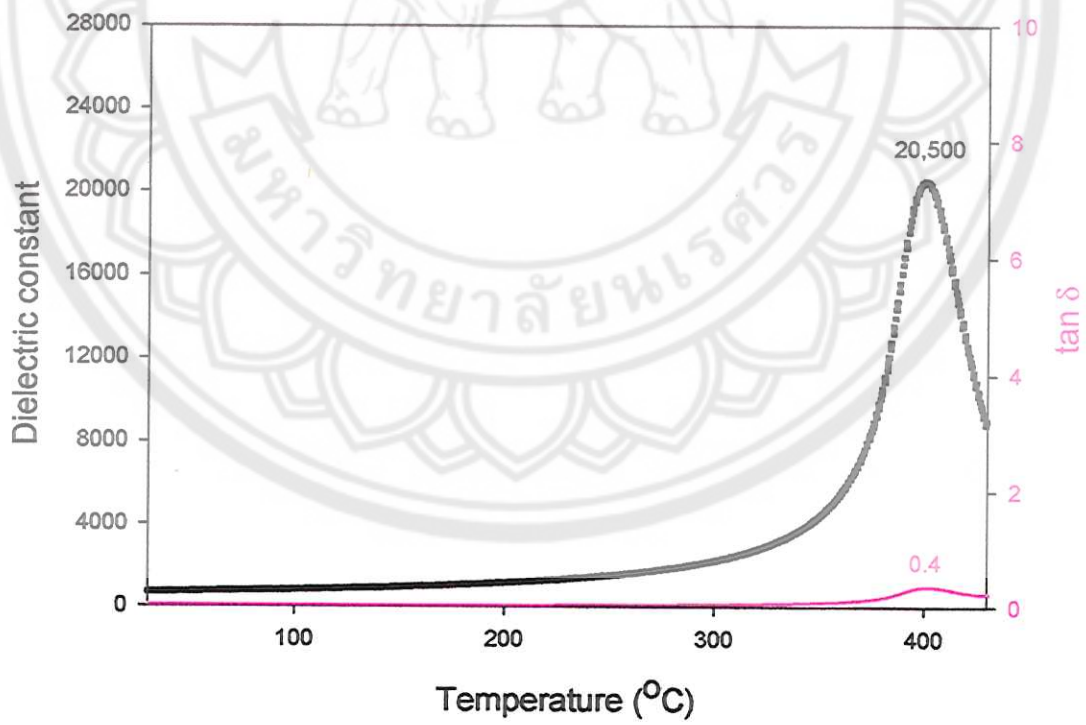
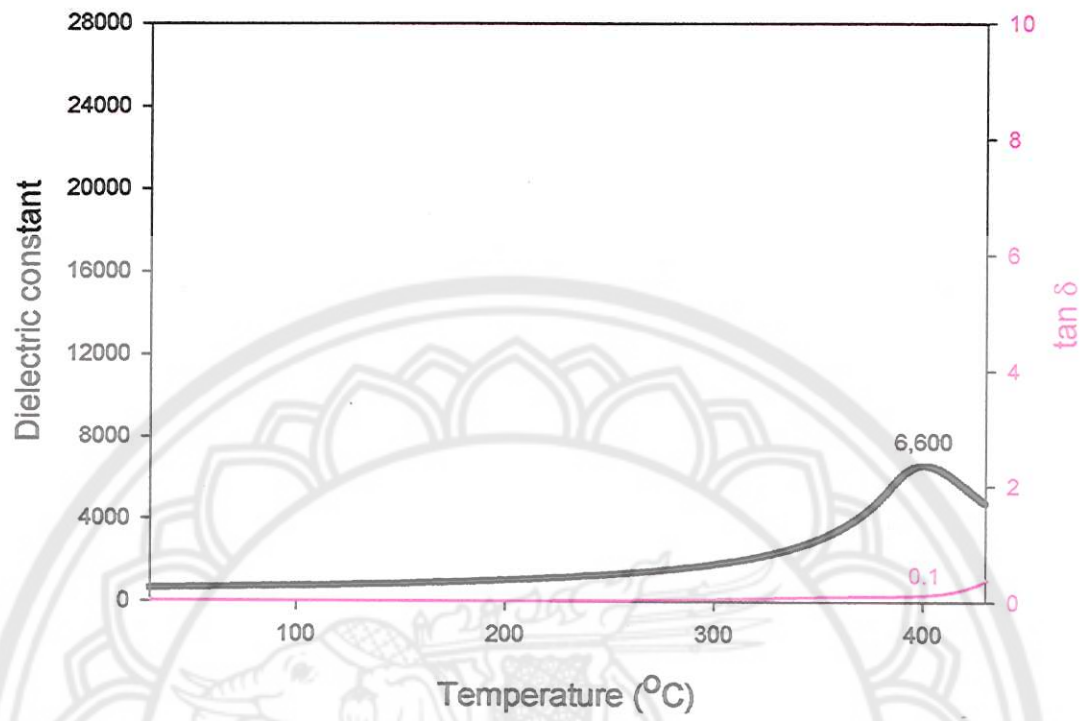
ตาราง 4.1 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	403	11400	0.7
100 kHz	401	10200	0.1
1 MHz	401	21300	0.2

จากกราฟในรูป 4.4 และตาราง 4.1 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี มีการเลื่อนลงเล็กน้อยจาก 403 เป็น 401 °C ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 21300 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.2 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย



รูป 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



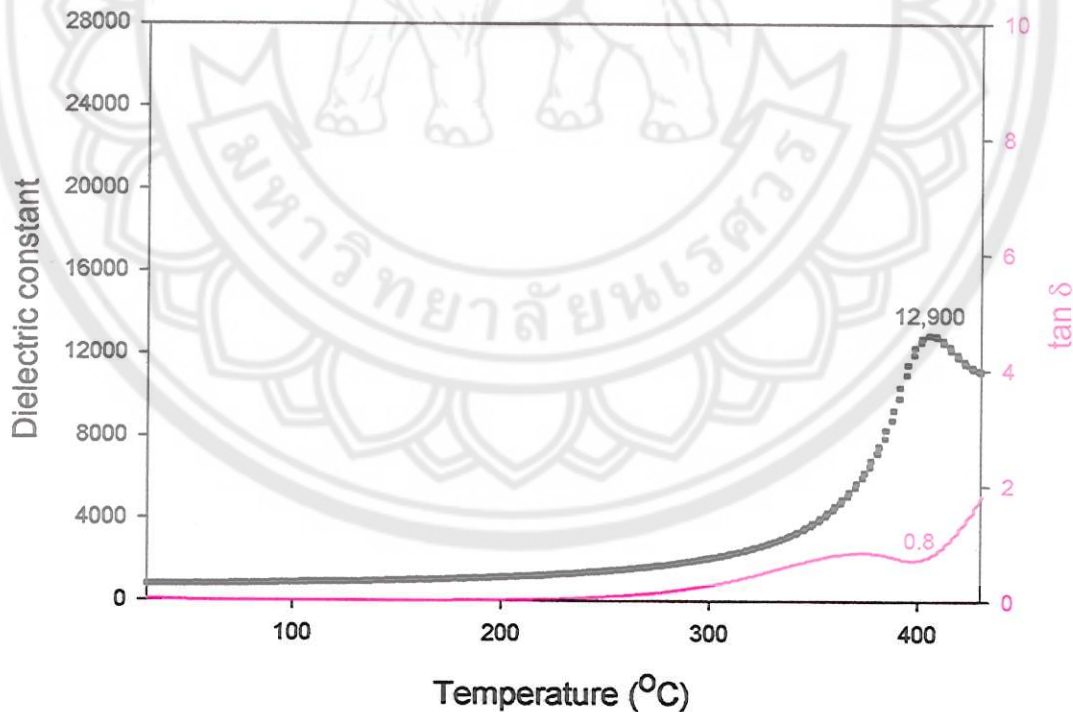
(ค)

รูป 4.5 (ต่อ)

ตาราง 4.2 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

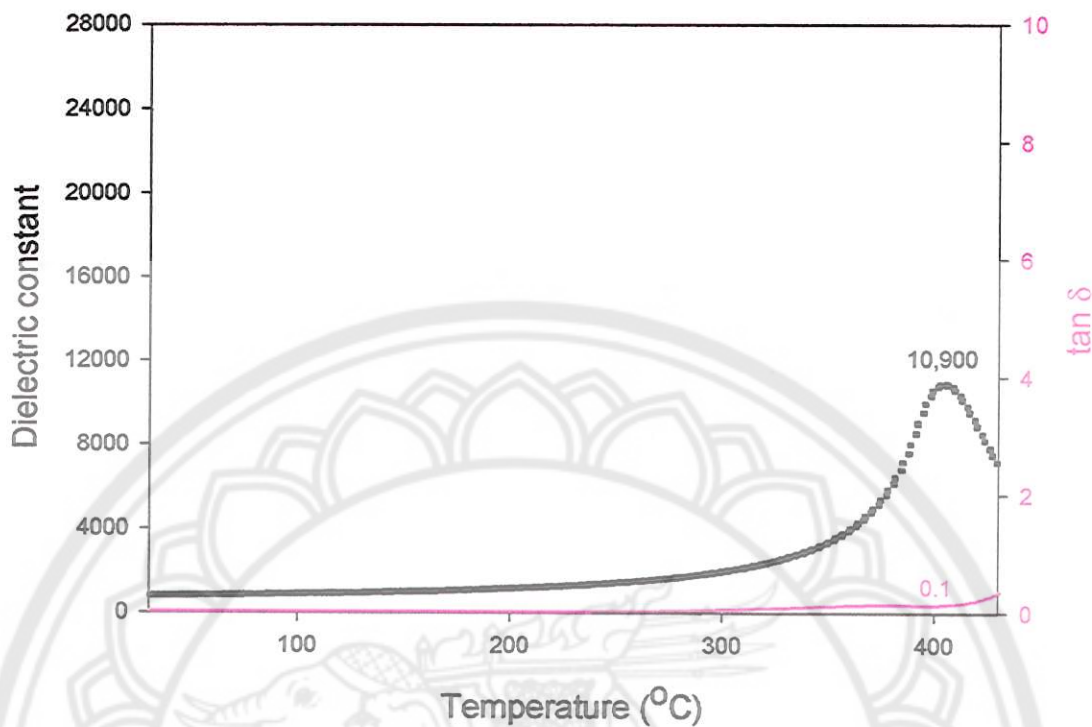
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	406	7800	0.7
100 kHz	401	6600	0.1
1 MHz	400	20500	0.4

จากกราฟในรูป 4.5 และตาราง 4.2 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) เปลี่ยนจาก 406 เป็น 400 °C เมื่อความถี่ที่ใช้วัดจาก 10 kHz เป็น 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 20500 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.4 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

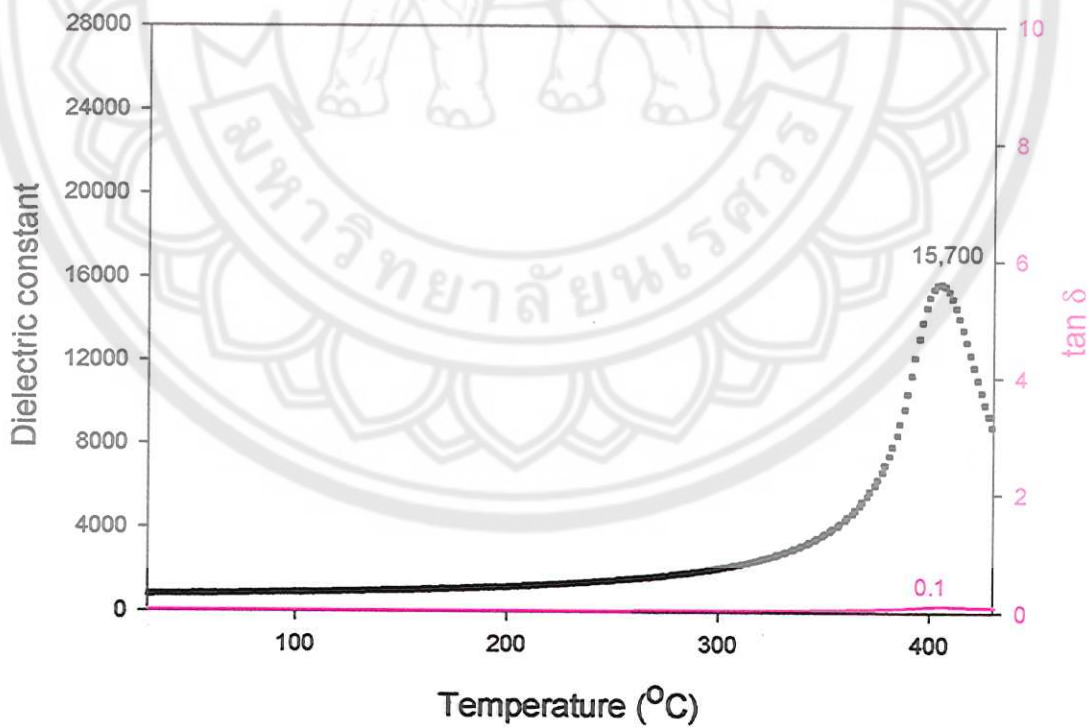


(ก)

รูป 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



(ก)



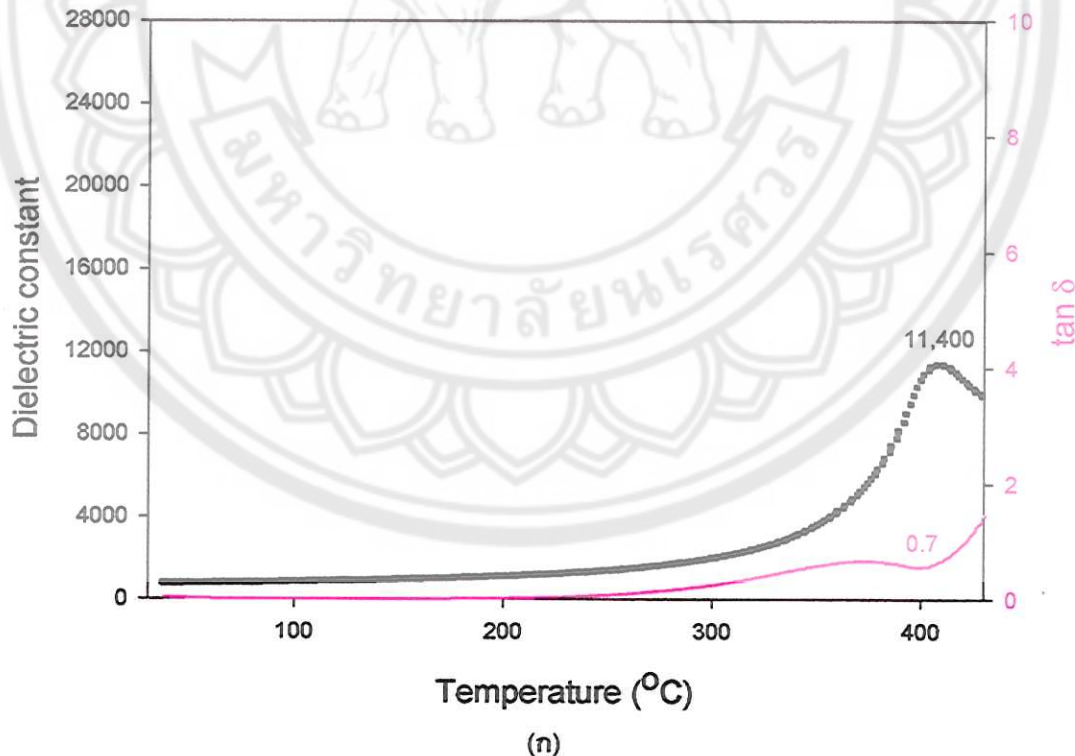
(ค)

รูป 4.6 (ต่อ)

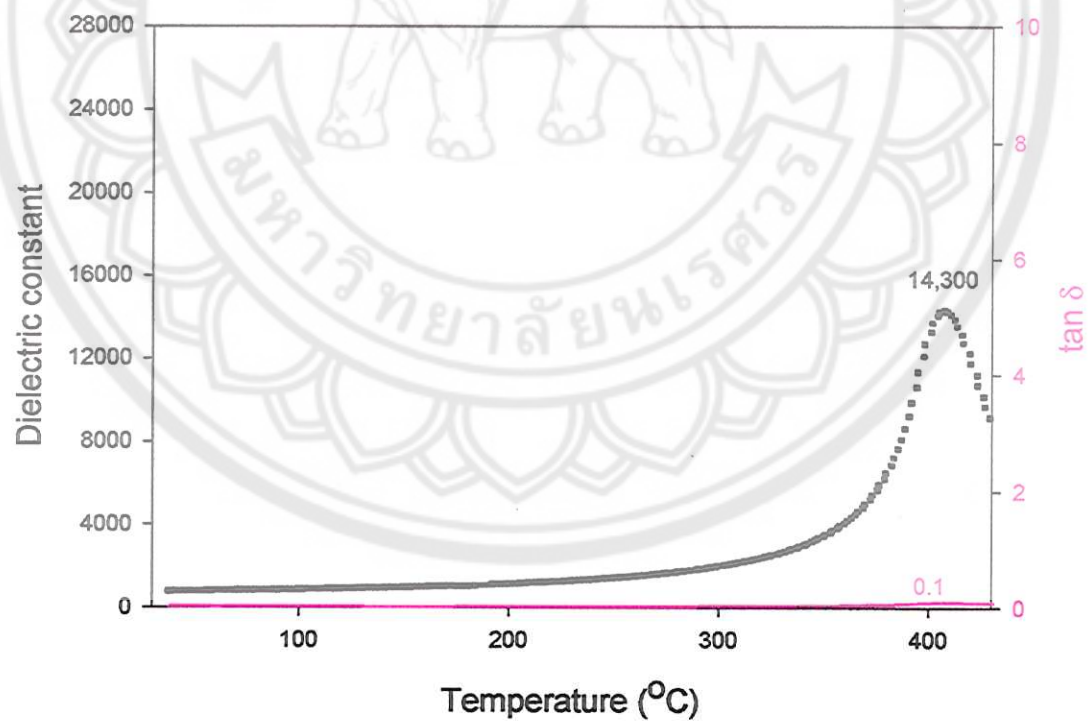
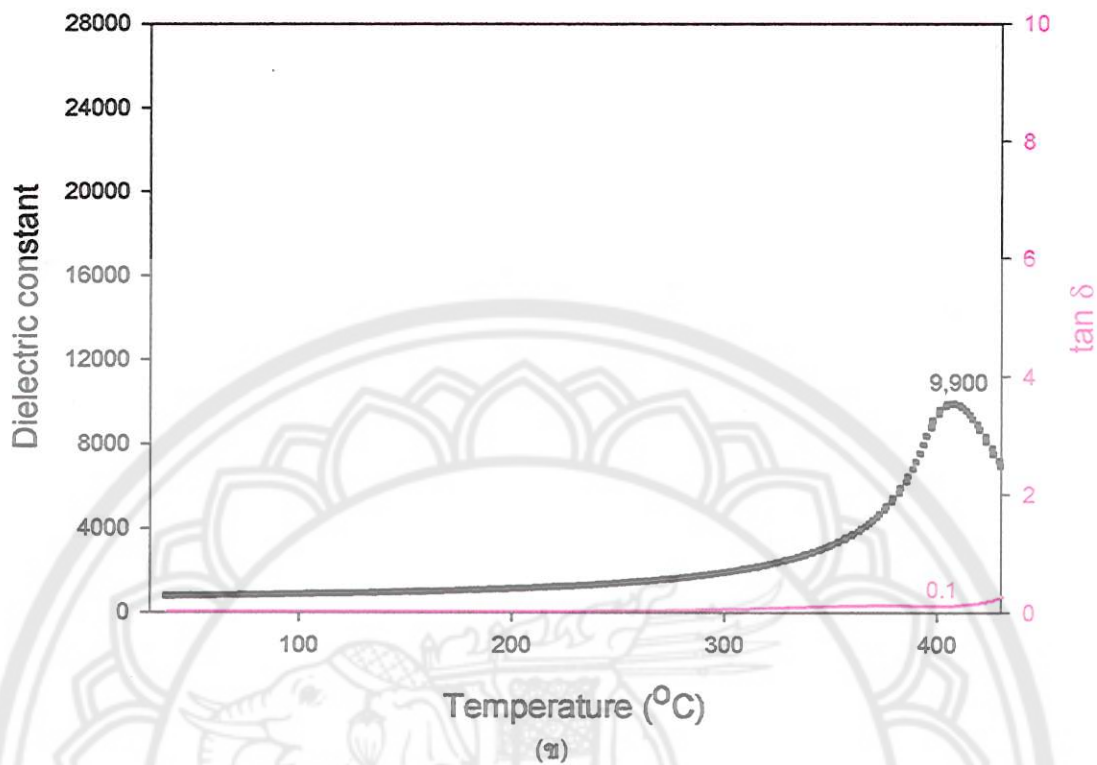
ตาราง 4.3 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	405	12900	0.8
100 kHz	405	10900	0.1
1 MHz	405	15700	0.1

จากกราฟในรูป 4.6 และตาราง 4.3 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) เท่ากับ 405 °C ในทุกความถี่ที่ใช้วัด ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 15700 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.1 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย



รูป 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



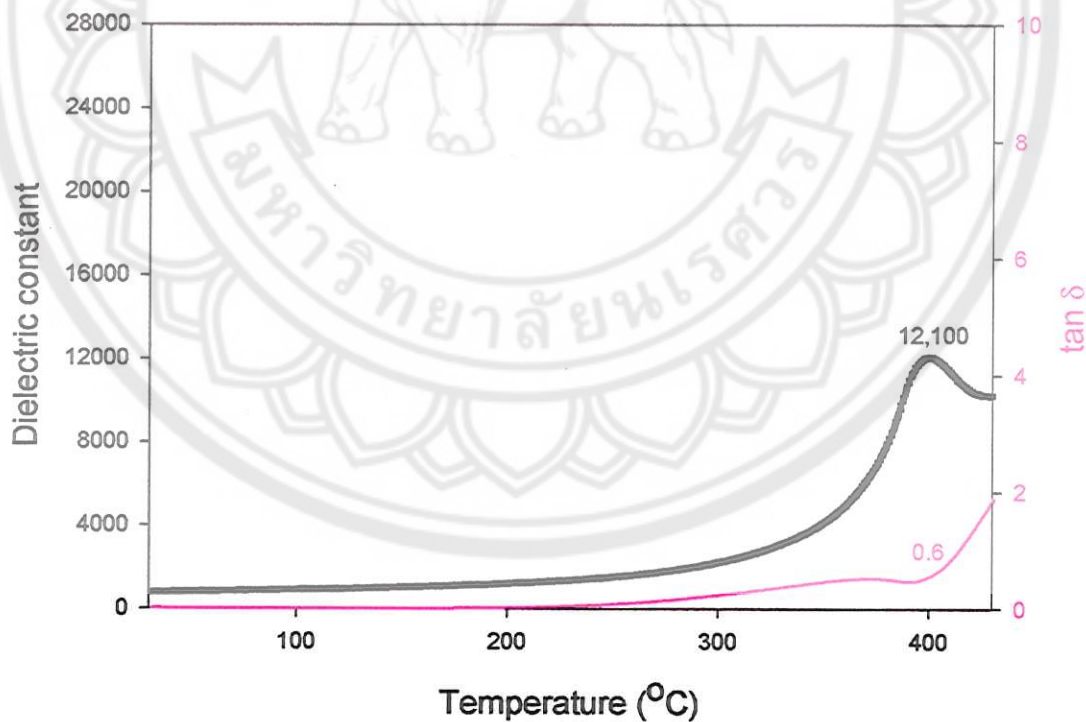
(ค)

รูป 4.7 (ต่อ)

ตาราง 4.4 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

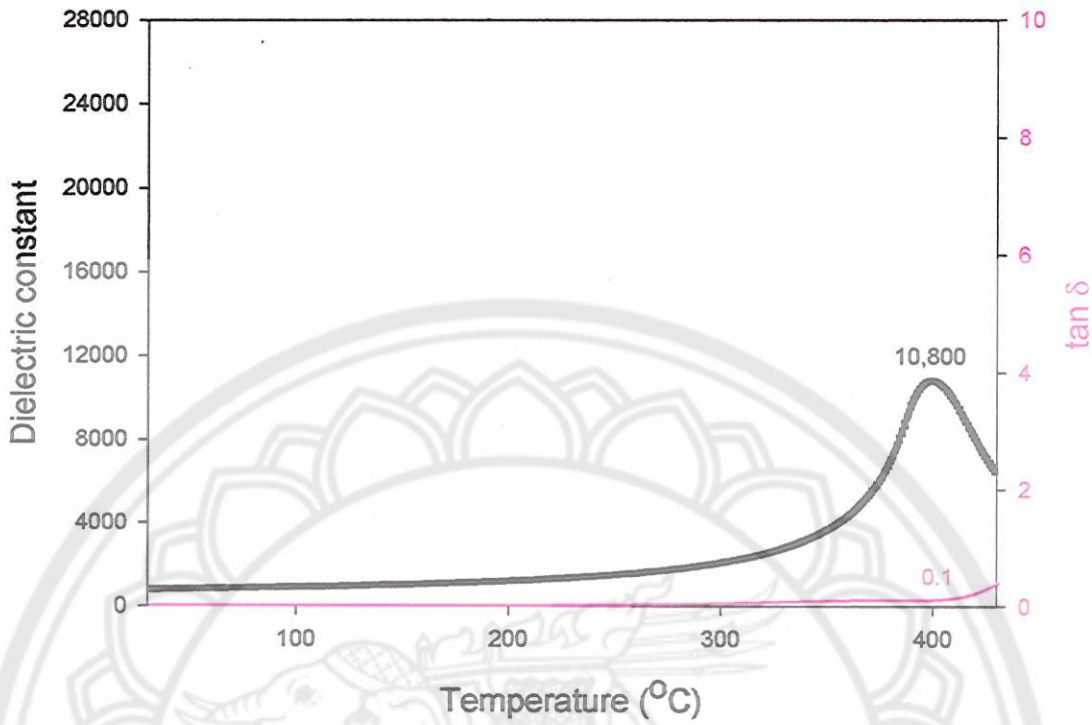
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	407	11400	0.7
100 kHz	407	9900	0.1
1 MHz	407	14300	0.1

จากกราฟในรูป 4.7 และตาราง 4.4 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) เท่ากับ 407 °C ในทุกความถี่ที่ใช้วัด ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 14300 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.1 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

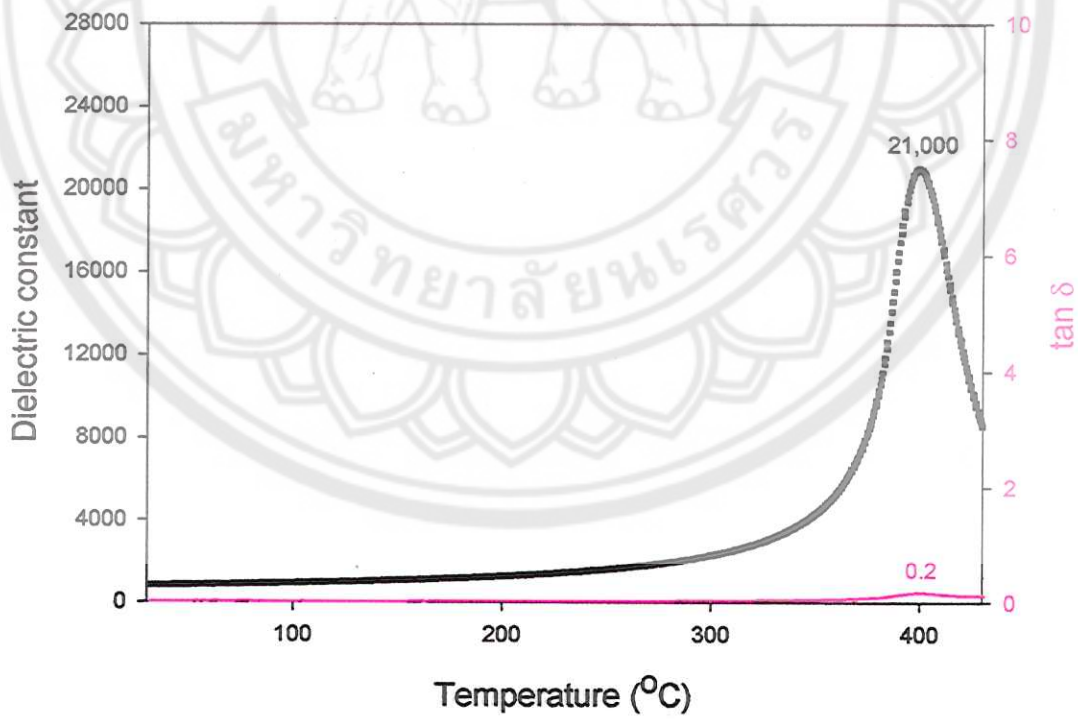


(ก)

รูป 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



(ก)



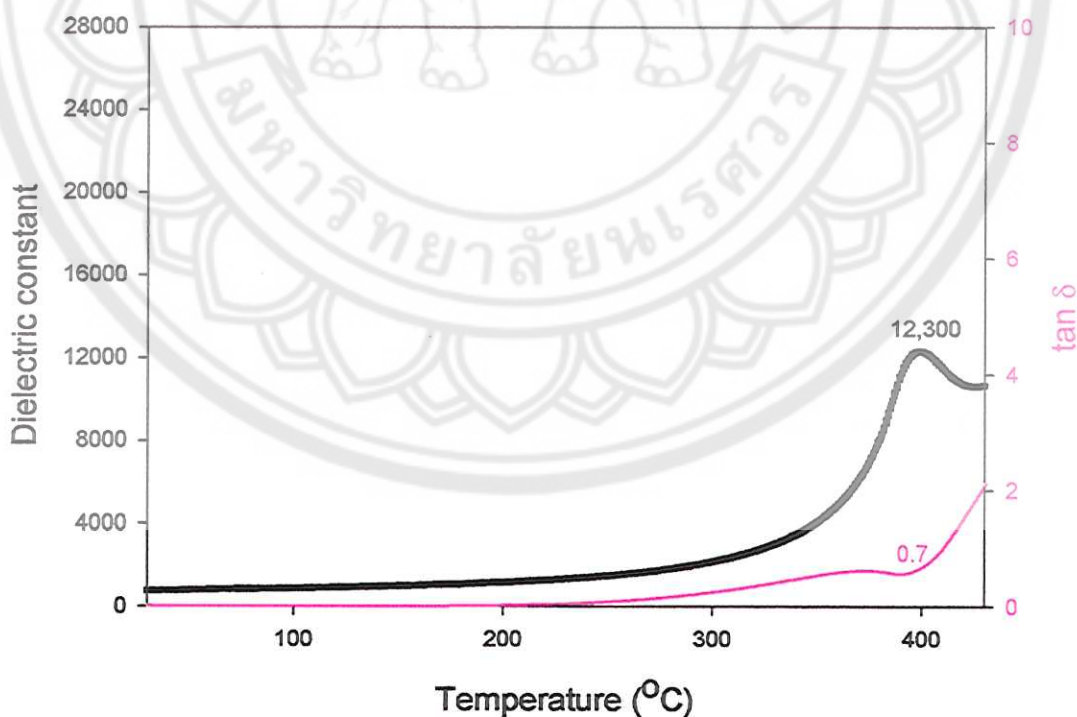
(ค)

รูป 4.8 (ต่อ)

ตาราง 4.5 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ ที่ความถี่ต่างๆ

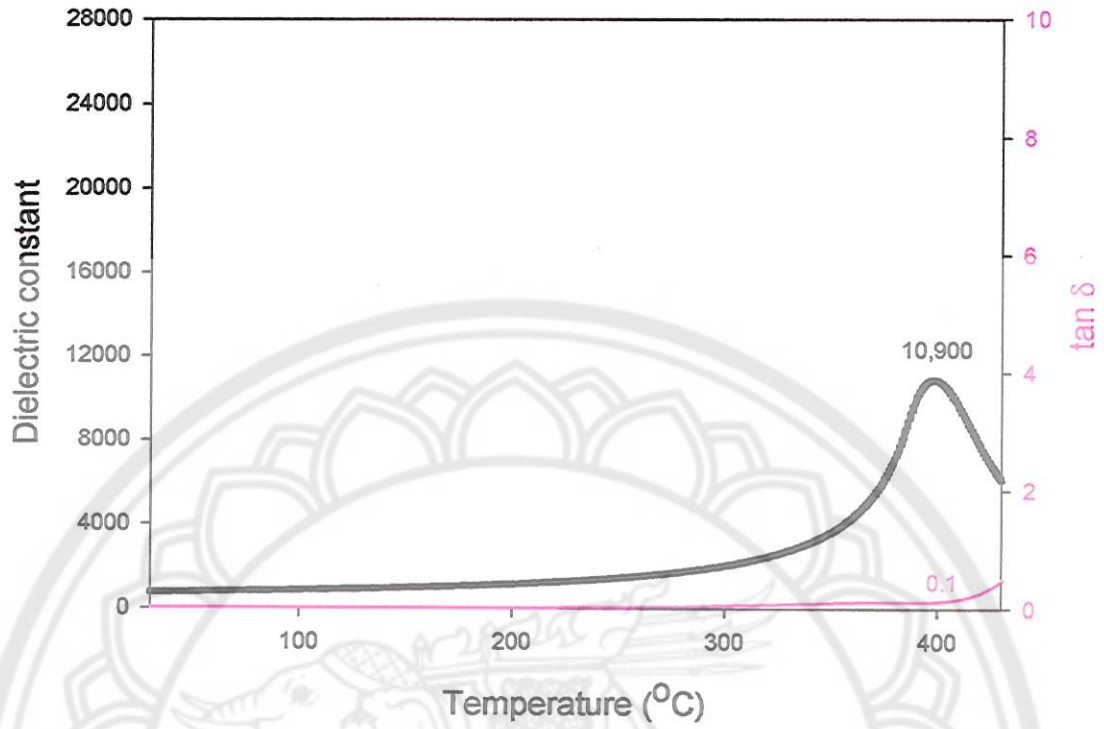
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	400	12100	0.6
100 kHz	399	10800	0.1
1 MHz	399	21000	0.2

จากกราฟในรูป 4.8 และตาราง 4.5 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) เลื่อนลงเล็กน้อยจาก 400 เป็น 399 °C เมื่อความถี่ที่ใช้วัดเปลี่ยนจาก 10 kHz เป็น 100 kHz และ 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 21000 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.2 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

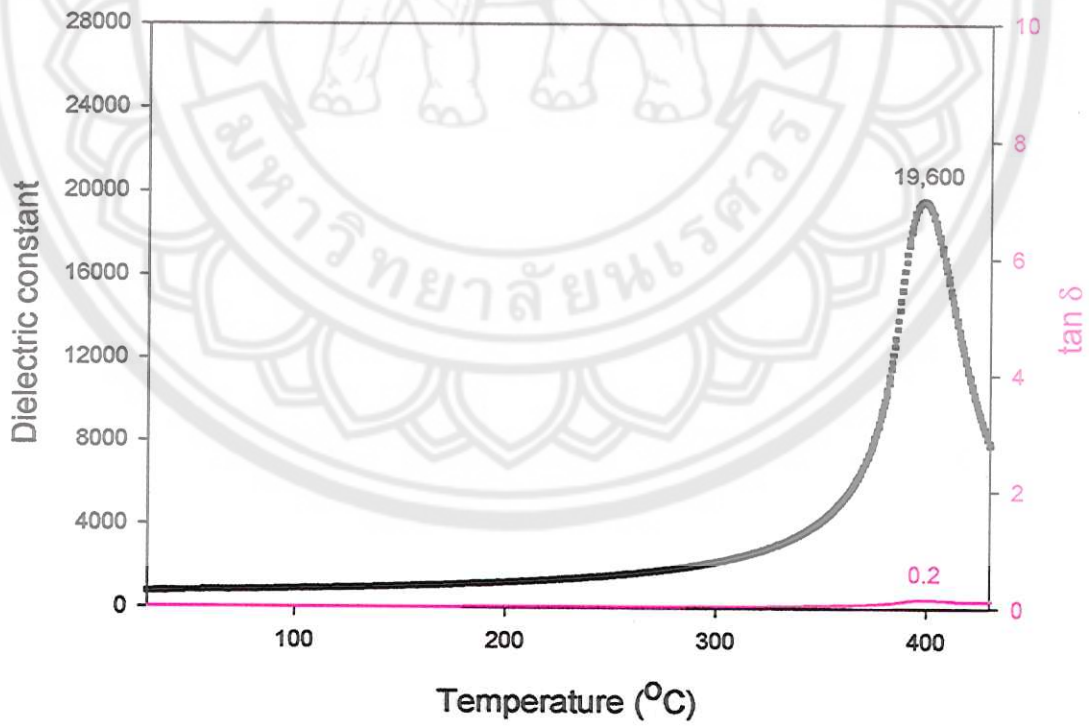


(ก)

รูป 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



(ข)



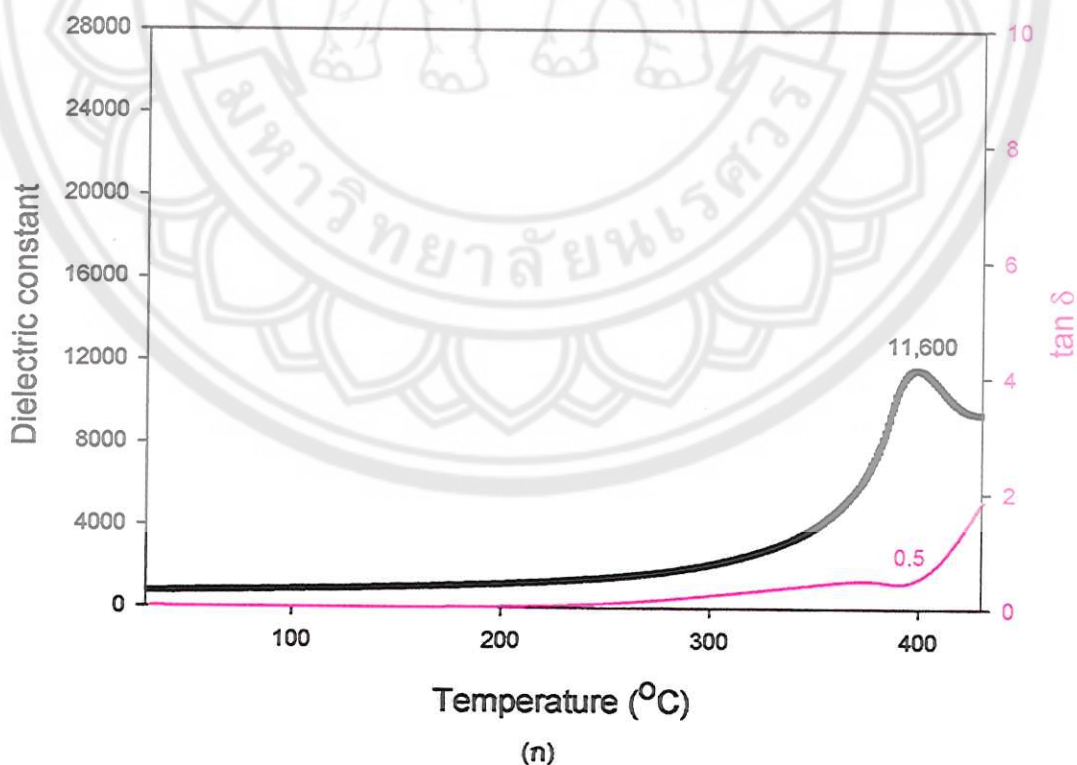
(ค)

รูป 4.9 (ต่อ)

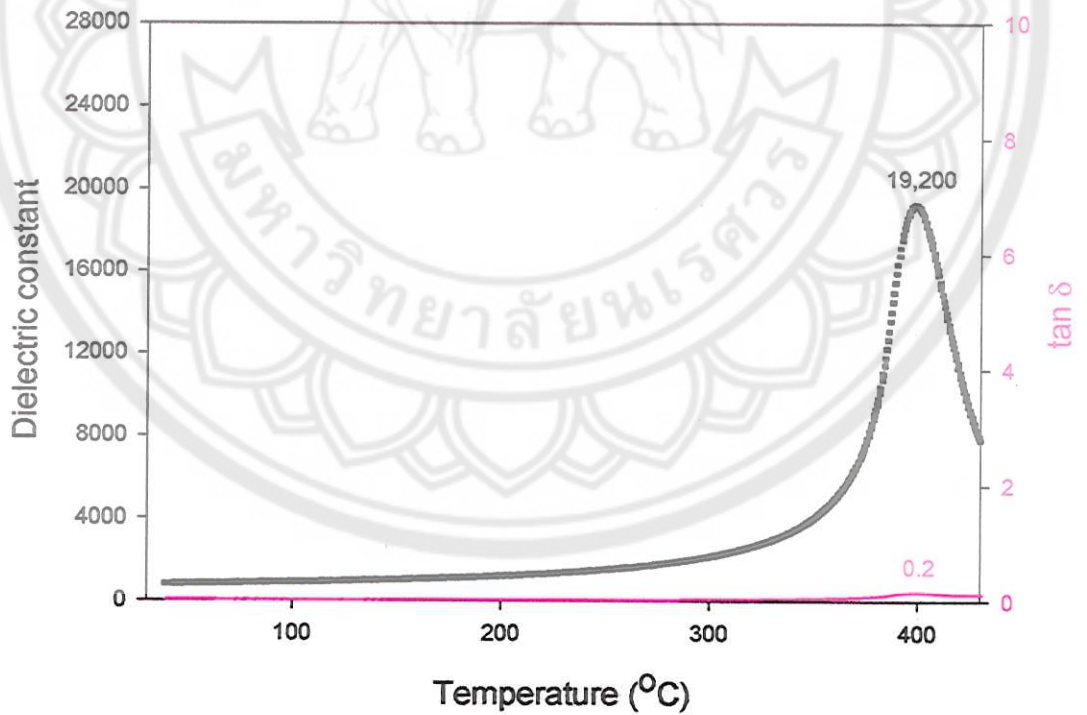
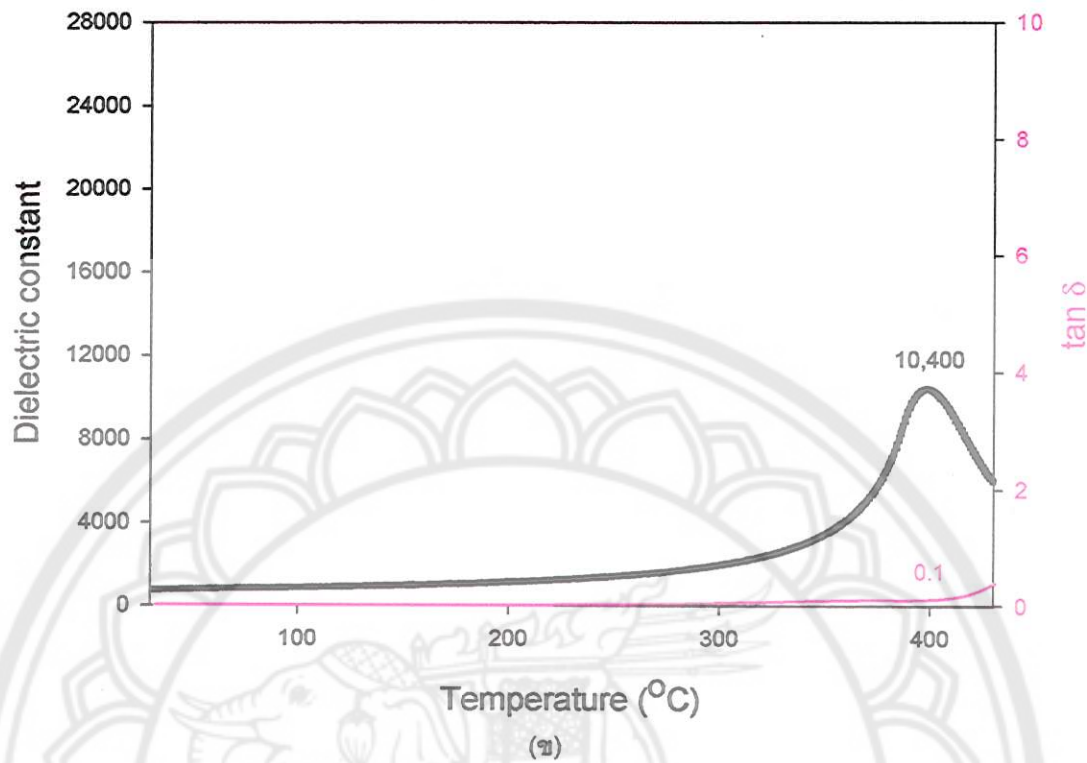
ตาราง 4.6 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	399	12300	0.7
100 kHz	398	10900	0.1
1 MHz	398	19600	0.2

จากกราฟในรูป 4.9 และตาราง 4.6 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) เลื่อนลงเล็กน้อยจาก 399 เป็น 398 °C เมื่อความถี่ที่ใช้วัดเปลี่ยนจาก 10 kHz เป็น 100 kHz และ 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 19600 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.2 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย



รูป 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



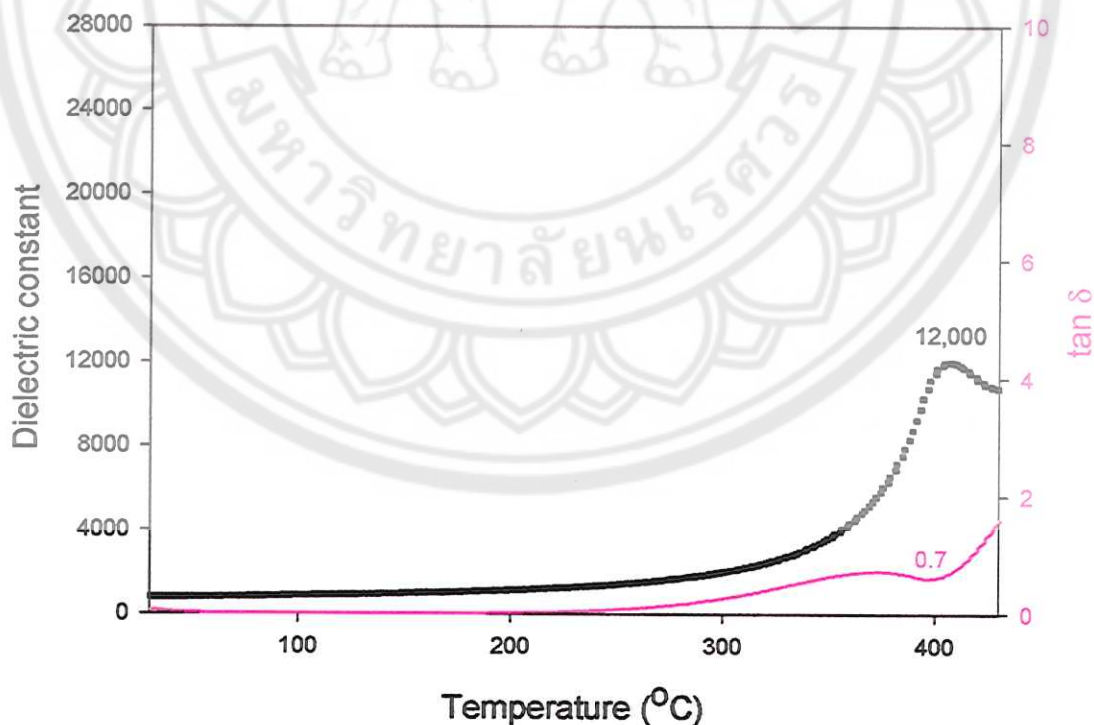
(ค)

รูป 4.10 (ต่อ)

ตาราง 4.7 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

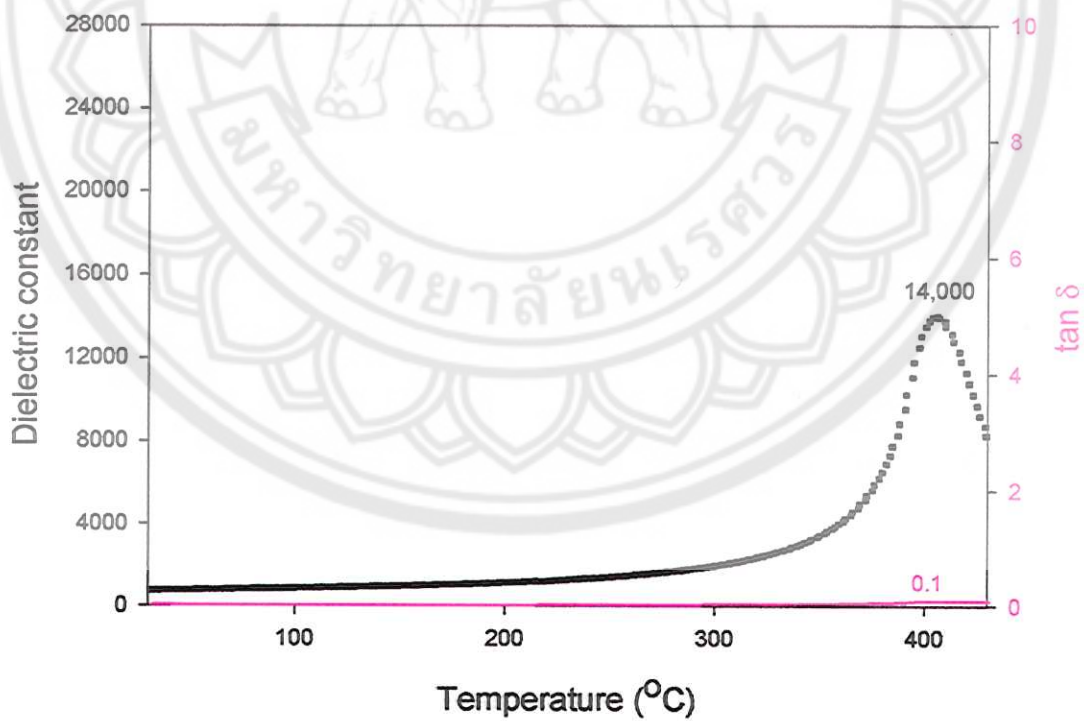
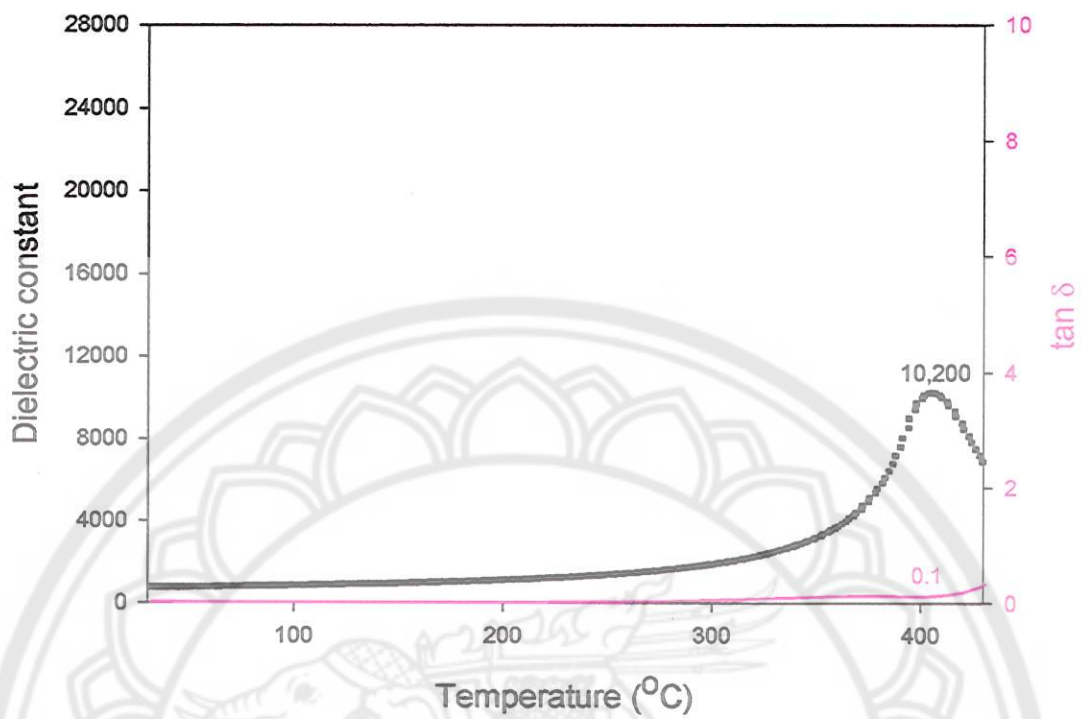
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	399	11600	0.5
100 kHz	398	10400	0.1
1 MHz	398	19200	0.2

จากกราฟในรูป 4.10 และตาราง 4.7 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) เลื่อนลงเล็กน้อยจาก 399 เป็น 398 °C เมื่อความถี่ที่ใช้วัดเปลี่ยนจาก 10 kHz เป็น 100 kHz และ 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 19200 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.2 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย



(ก)

รูป 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



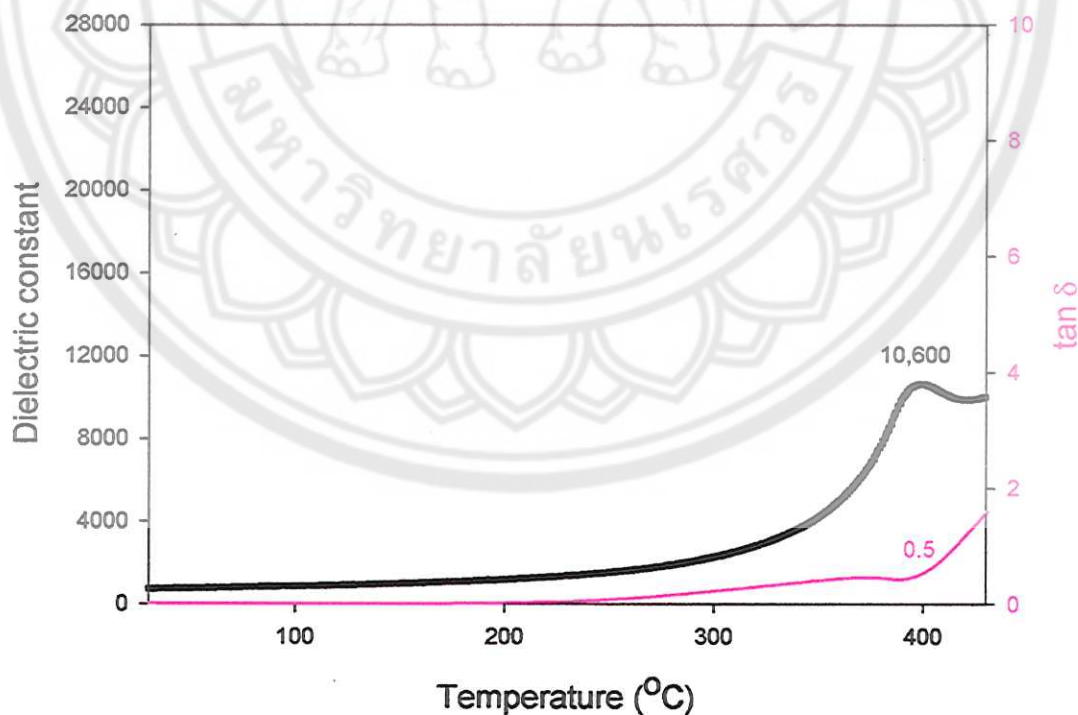
(ค)

รูป 4.11 (ต่อ)

ตาราง 4.8 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

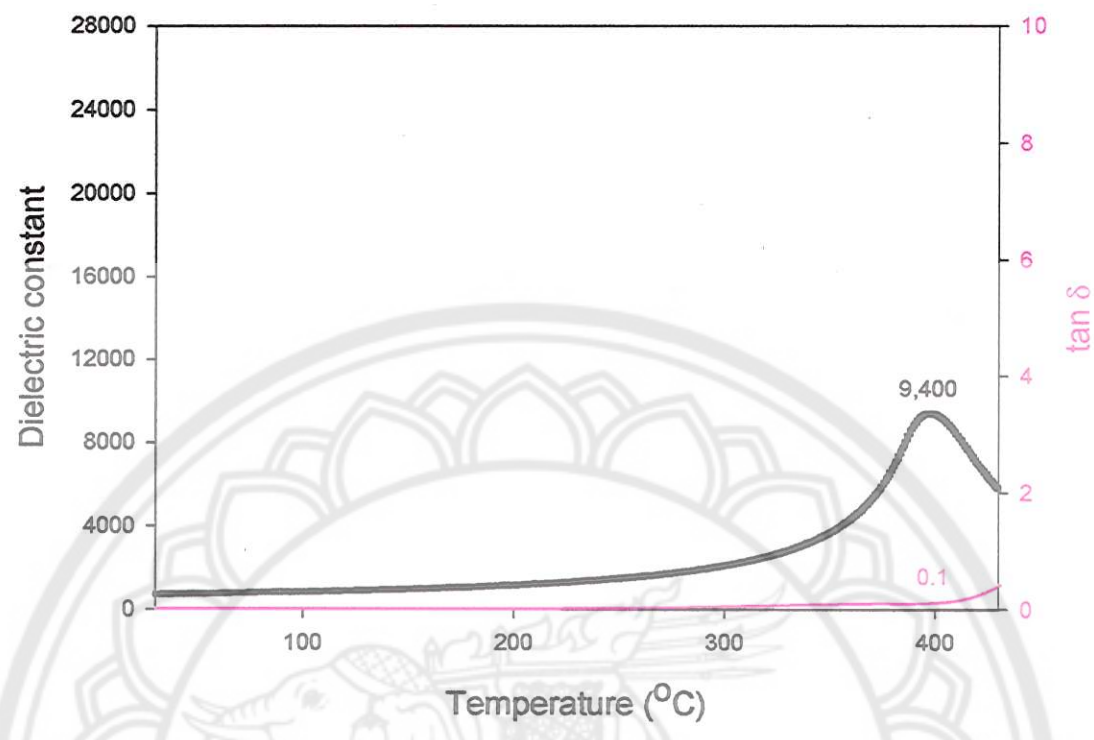
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	407	12000	0.7
100 kHz	405	10200	0.1
1 MHz	406	14000	0.1

จากกราฟในรูป 4.11 และตาราง 4.8 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) เลื่อนลงเล็กน้อยจาก 407 เป็น 405 และ 406 °C เมื่อความถี่ที่ใช้วัดเปลี่ยนจาก 10 kHz เป็น 100 kHz และ 1 MHz ตามลำดับ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 14000 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.1 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

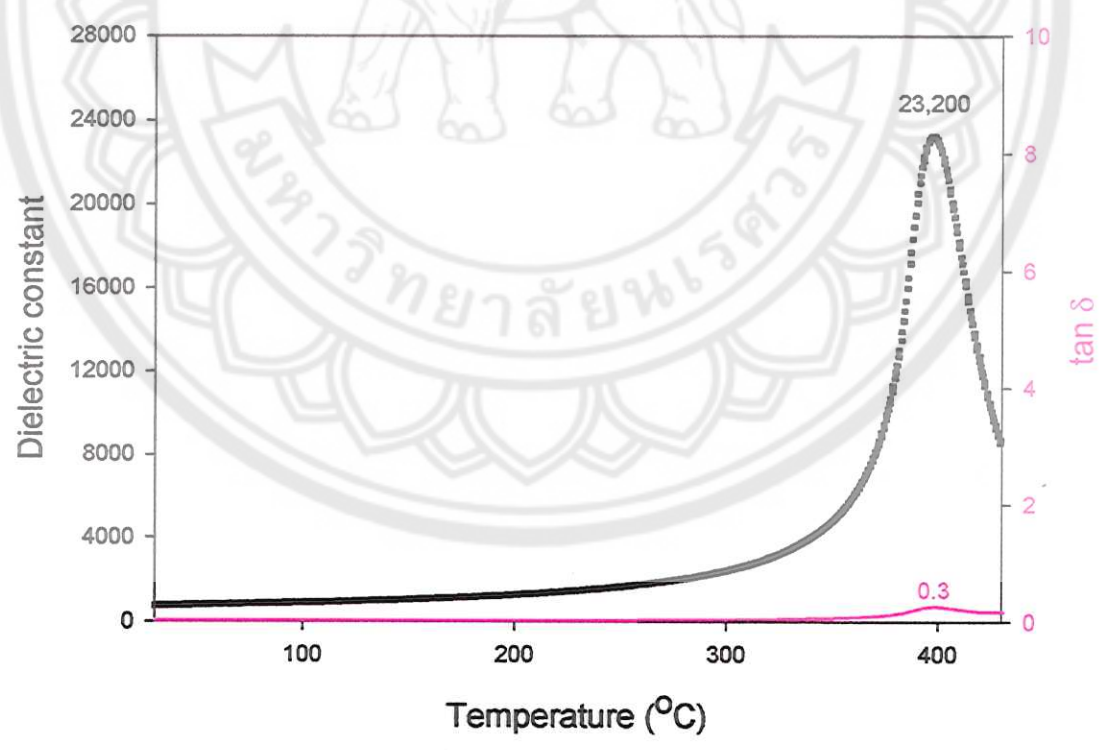


(ก)

รูป 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



(ข)



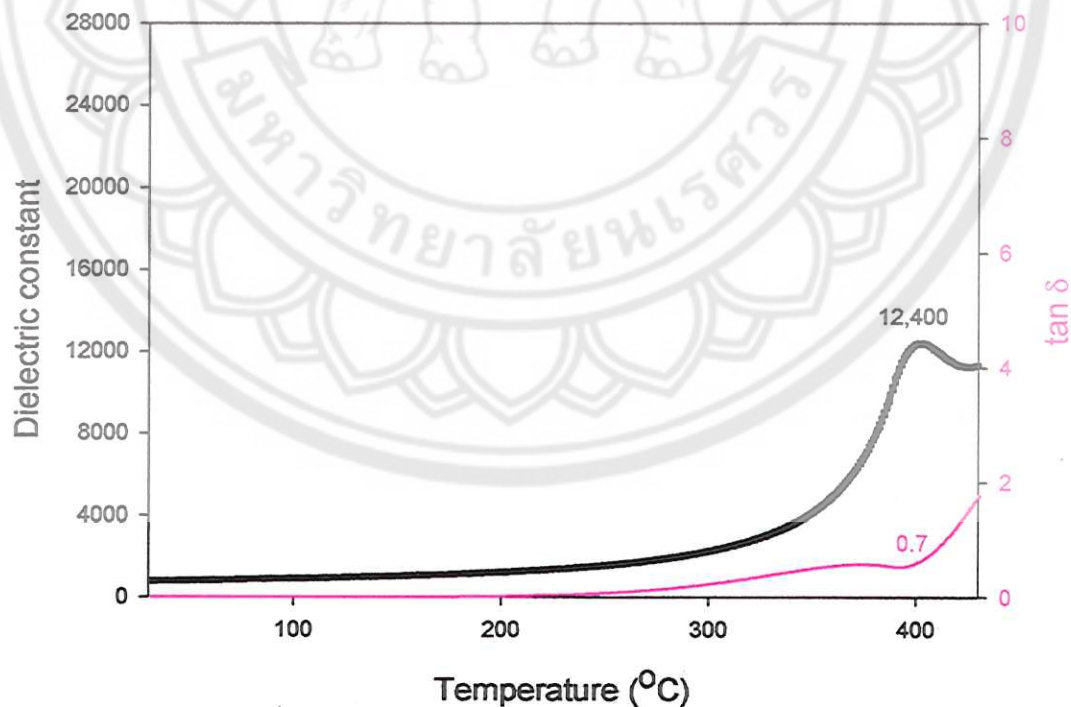
(ค)

รูป 4.12 (ต่อ)

ตาราง 4.9 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

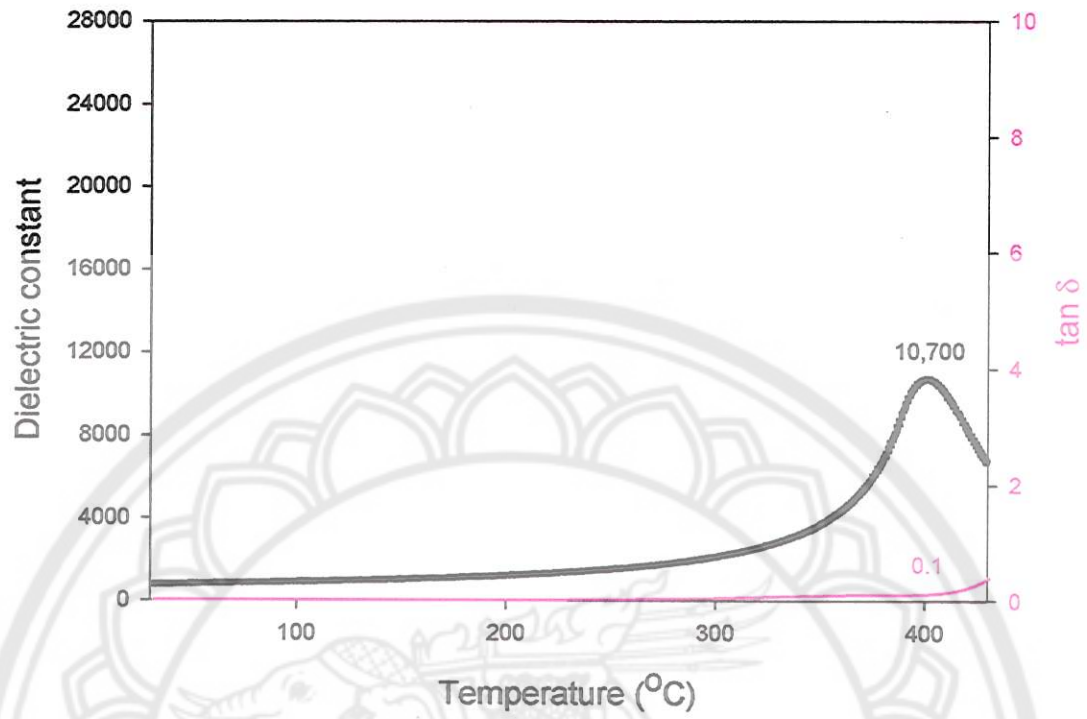
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	399	10600	0.5
100 kHz	397	9400	0.1
1 MHz	397	23200	0.3

จากกราฟในรูป 4.12 และตาราง 4.9 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) เลื่อนลงเล็กน้อยจาก 399 เป็น 397 °C เมื่อความถี่ที่ใช้วัดเปลี่ยนจาก 10 kHz เป็น 100 kHz และ 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 23200 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.3 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

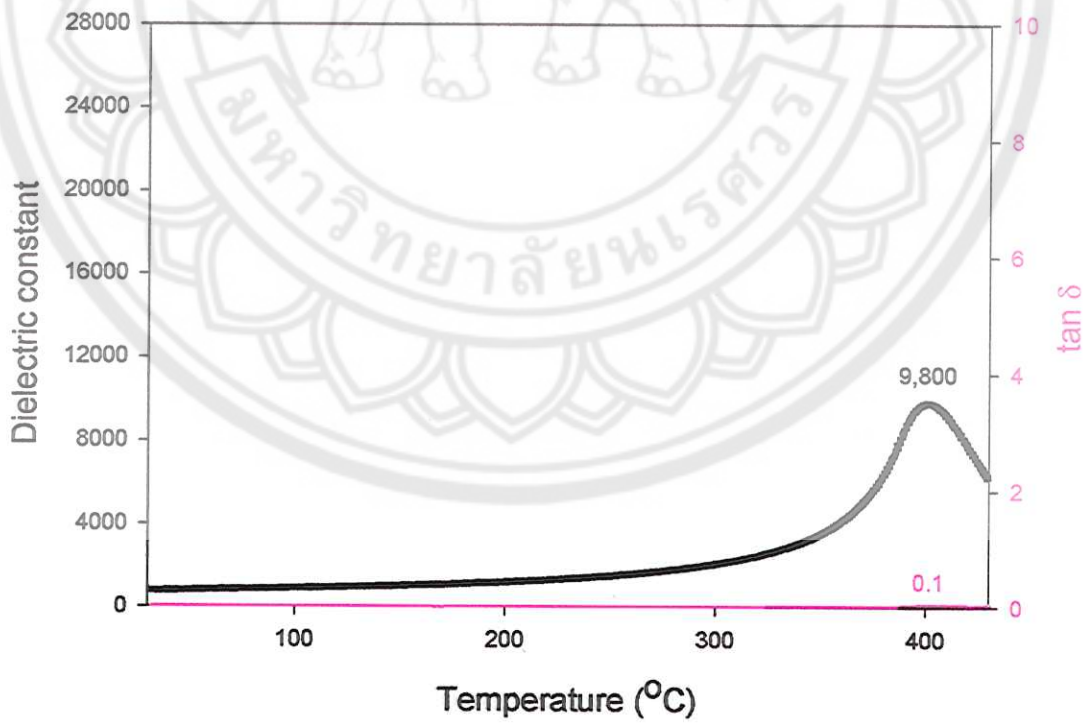


(ก)

รูป 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



(ก)



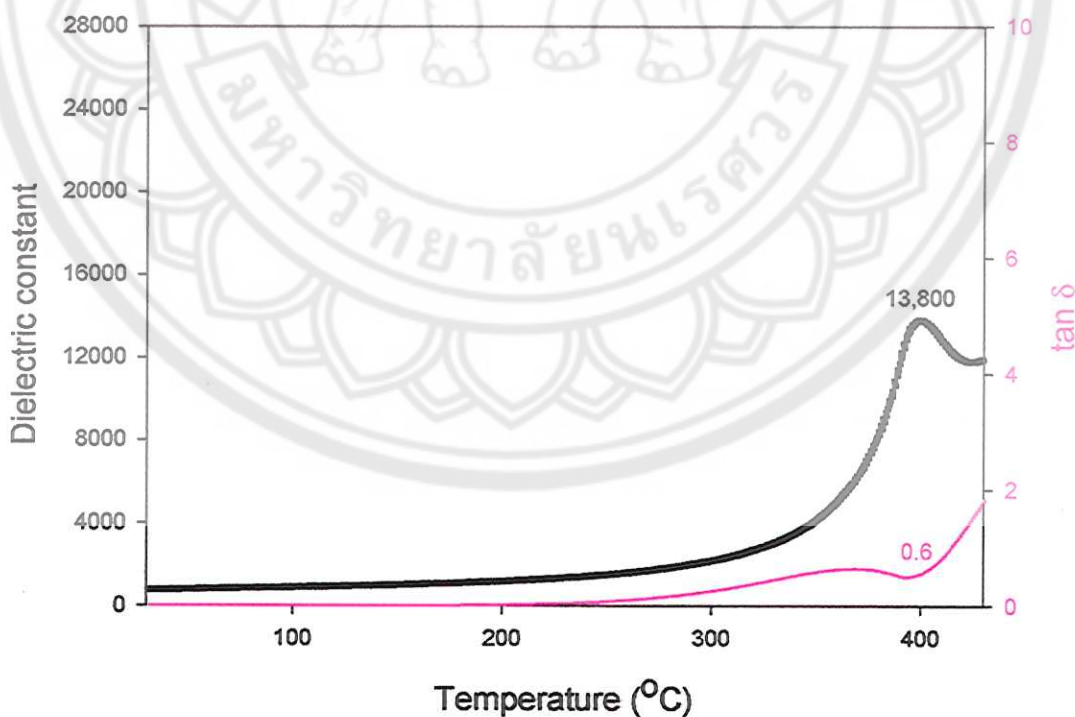
(ค)

รูป 4.13 (ต่อ)

ตาราง 4.10 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

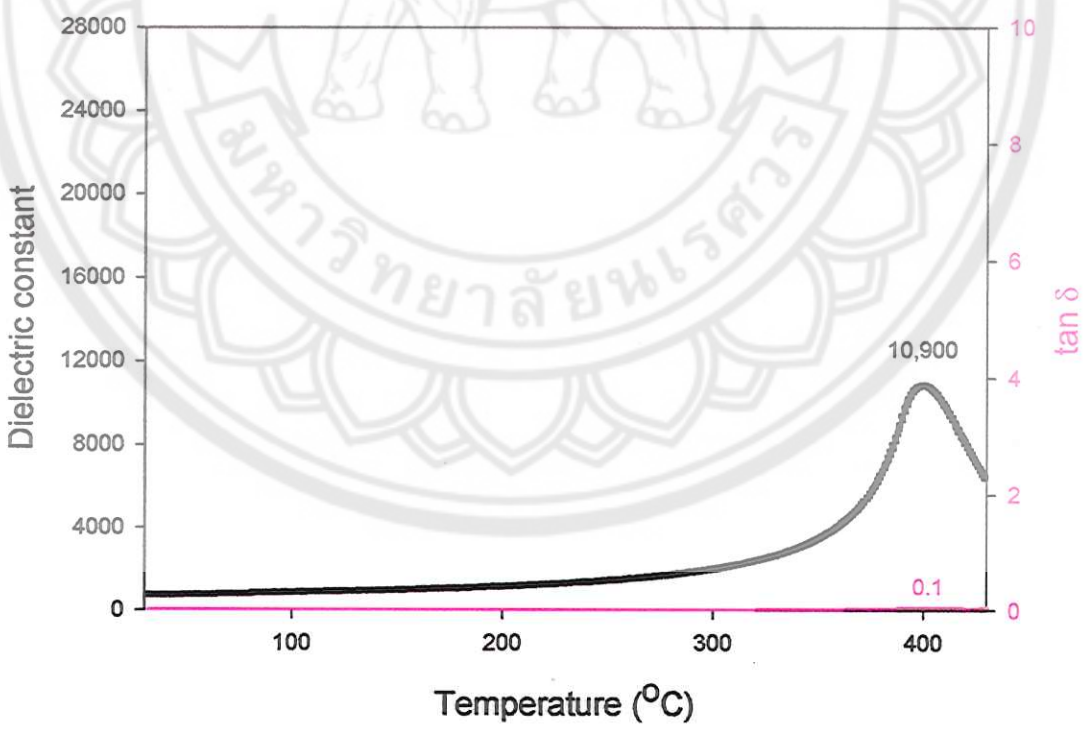
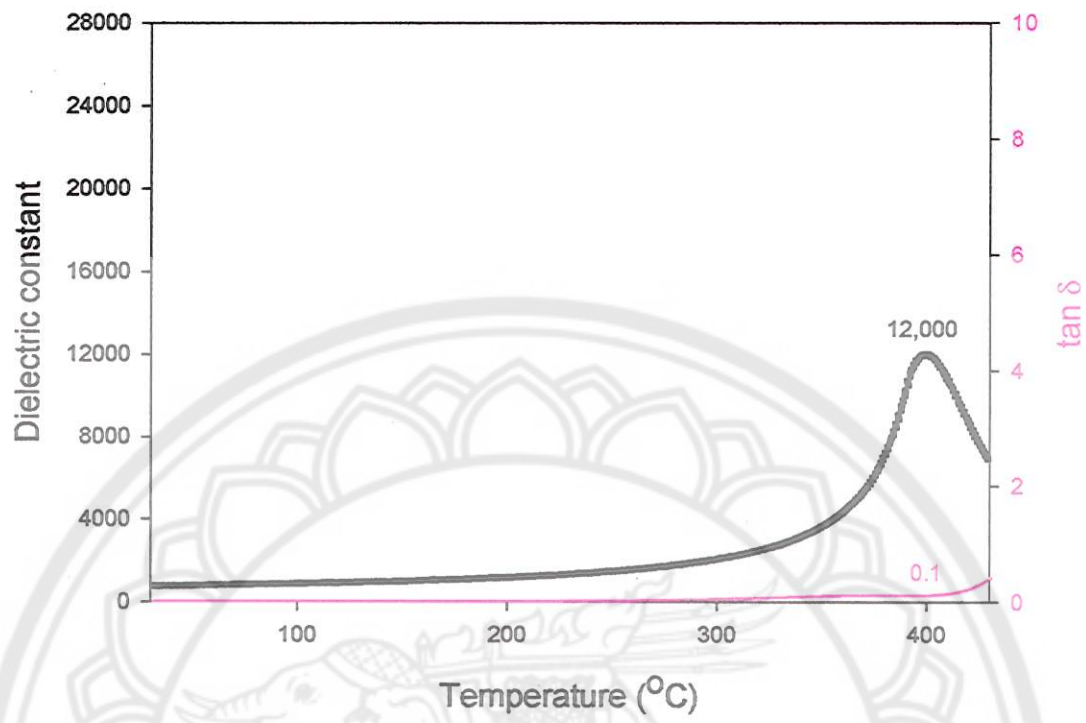
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	402	12400	0.7
100 kHz	400	10700	0.1
1 MHz	400	9800	0.1

จากกราฟในรูป 4.13 และตาราง 4.10 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) เลื่อนลงเล็กน้อยจาก 402 เป็น 400 °C เมื่อความถี่ที่ใช้วัดเปลี่ยนจาก 10 kHz เป็น 100 kHz และ 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 12400 ที่ความถี่เป็น 10 kHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.7 และยังคงพบว่ามีค่าความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย



(ก)

รูป 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



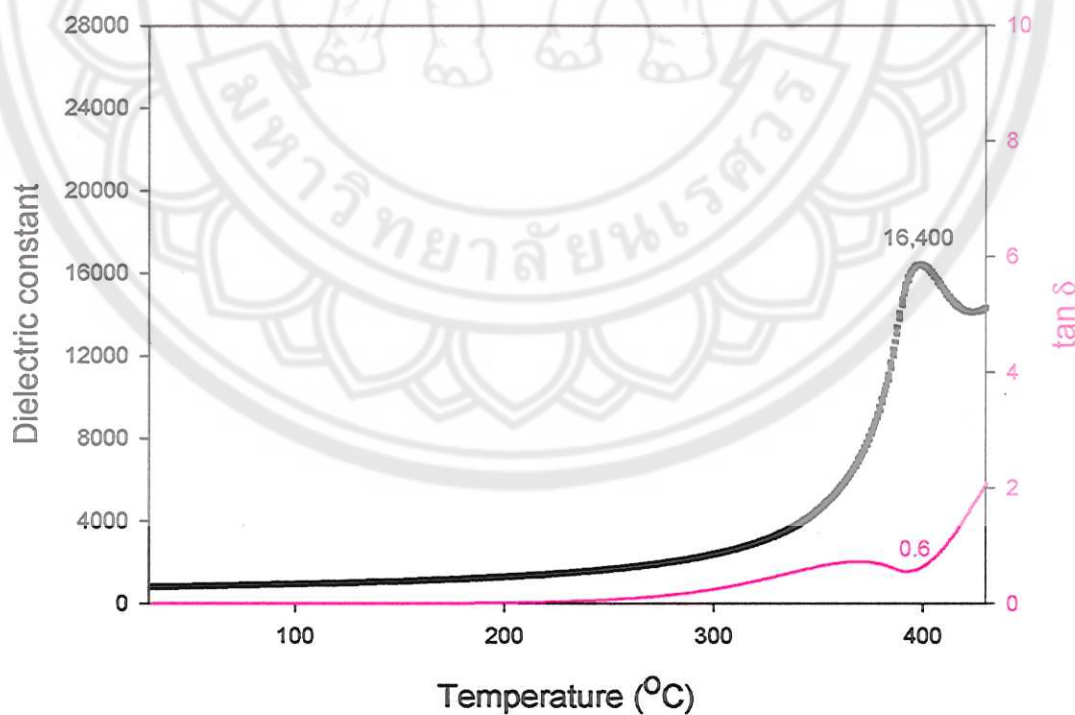
(ค)

รูป 4.14 (ต่อ)

ตาราง 4.11 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

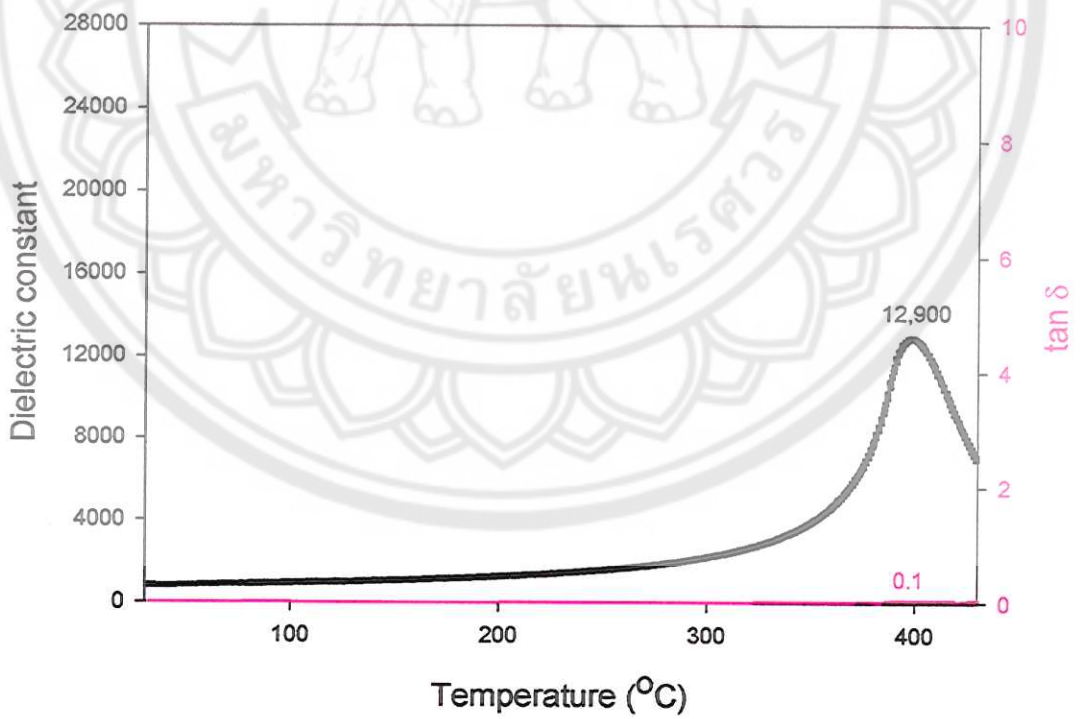
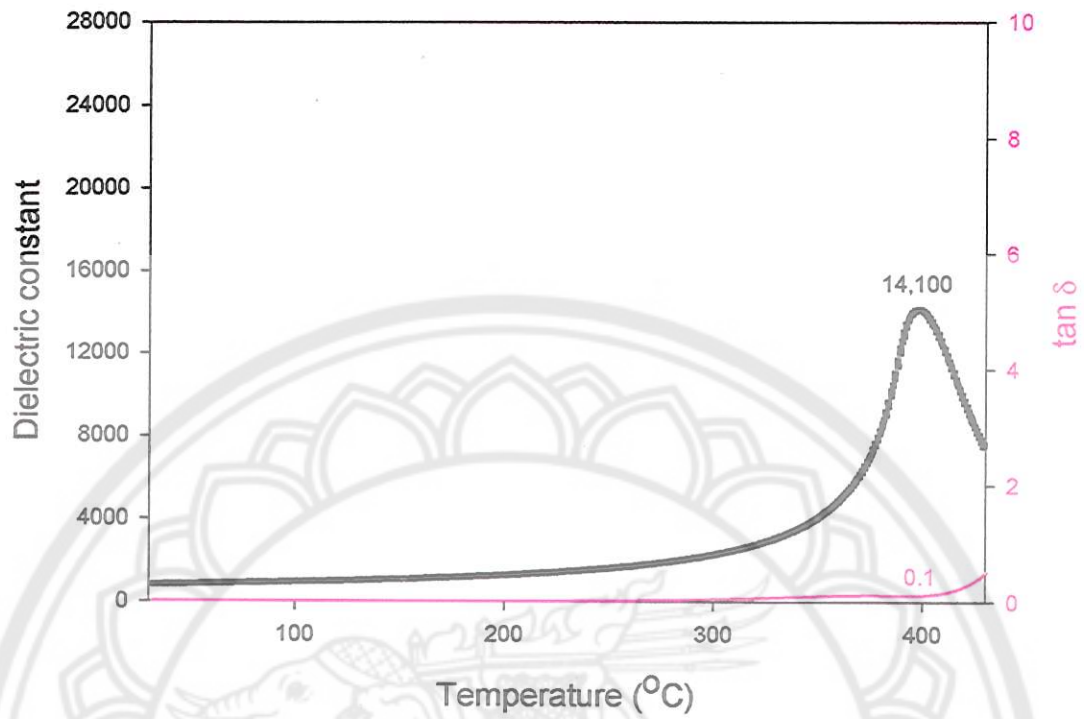
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	400	13800	0.6
100 kHz	399	12000	0.1
1 MHz	399	10900	0.1

จากกราฟในรูป 4.14 และตาราง 4.11 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) เลื่อนลงเล็กน้อยจาก 400 เป็น 399 °C เมื่อความถี่ที่ใช้วัดเปลี่ยนจาก 10 kHz เป็น 100 kHz และ 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 13800 ที่ความถี่เป็น 10 kHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.6 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย



(ก)

รูป 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



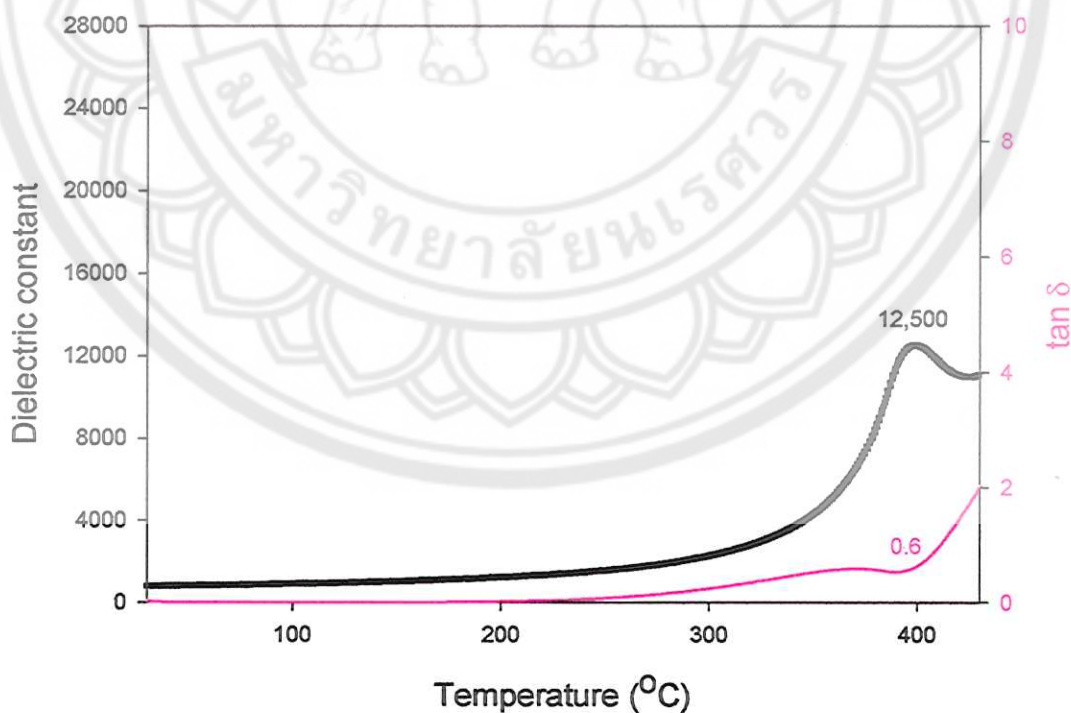
(ค)

รูป 4.15 (ต่อ)

ตาราง 4.12 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

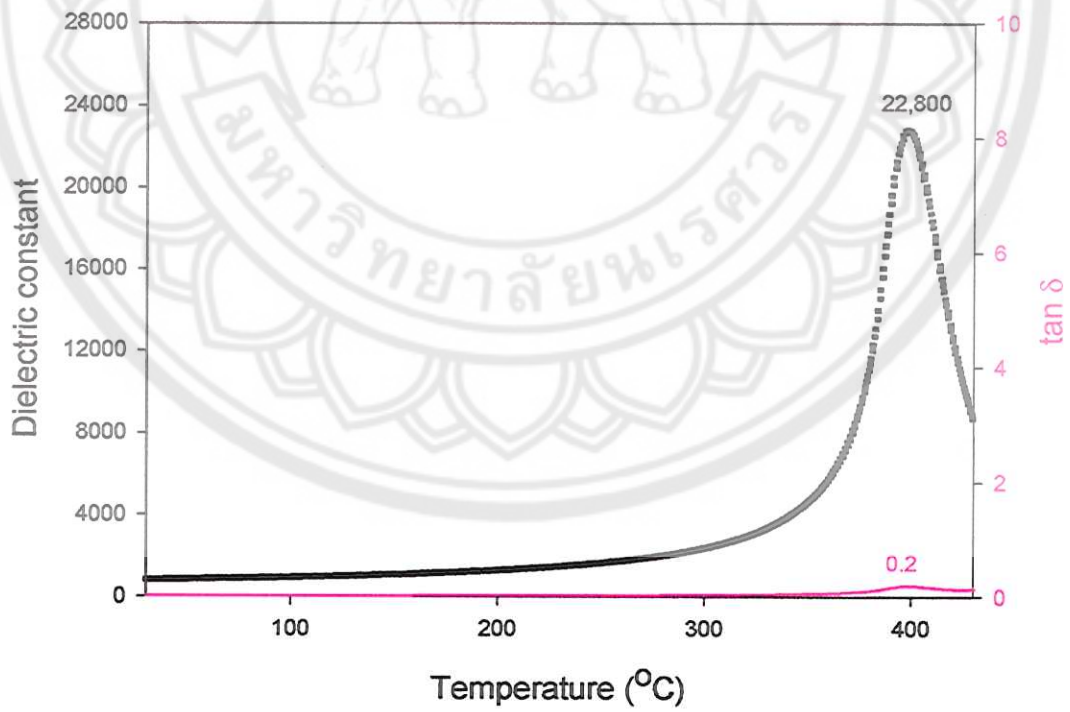
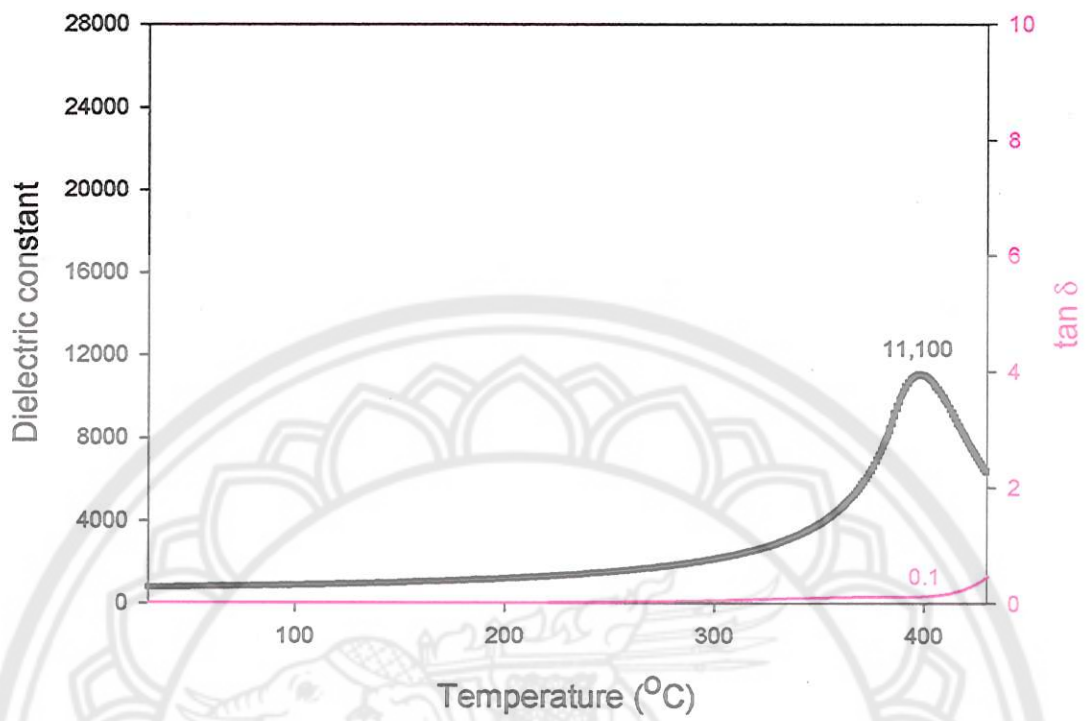
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	399	16400	0.6
100 kHz	398	14100	0.1
1 MHz	398	12900	0.1

จากกราฟในรูป 4.15 และตาราง 4.12 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) เลื่อนลงเล็กน้อยจาก 399 เป็น 398 °C เมื่อความถี่ที่ใช้วัดเปลี่ยนจาก 10 kHz เป็น 100 kHz และ 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 16400 ที่ความถี่เป็น 10 kHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.6 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย



(ก)

รูป 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



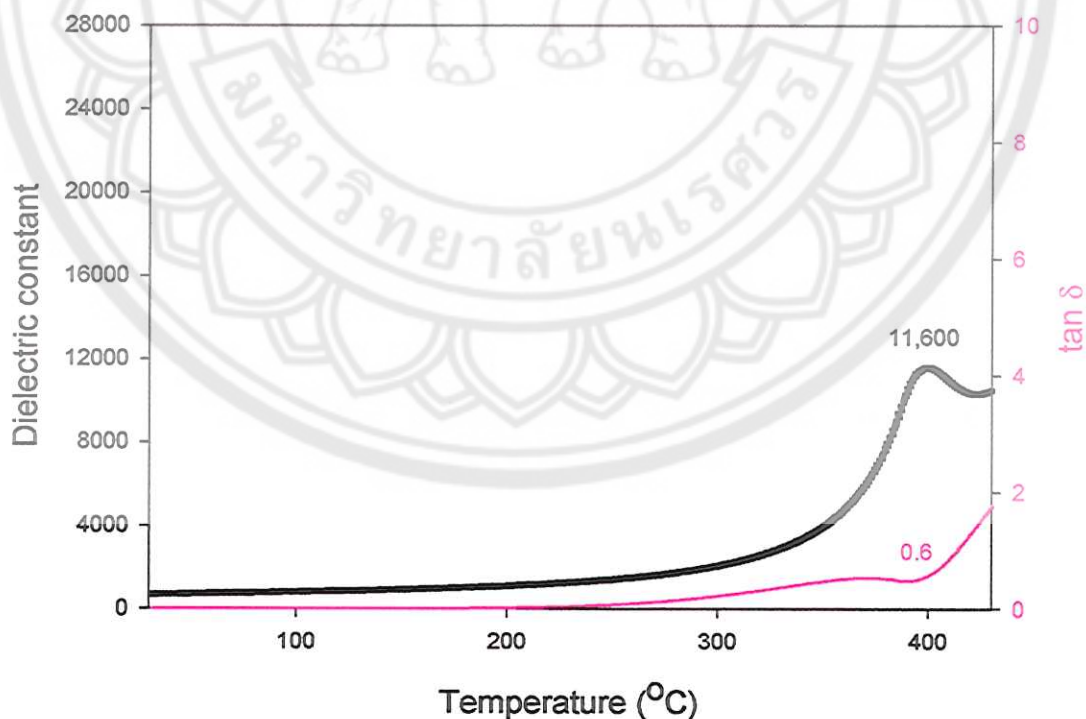
(ค)

รูป 4.16 (ต่อ)

ตาราง 4.13 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

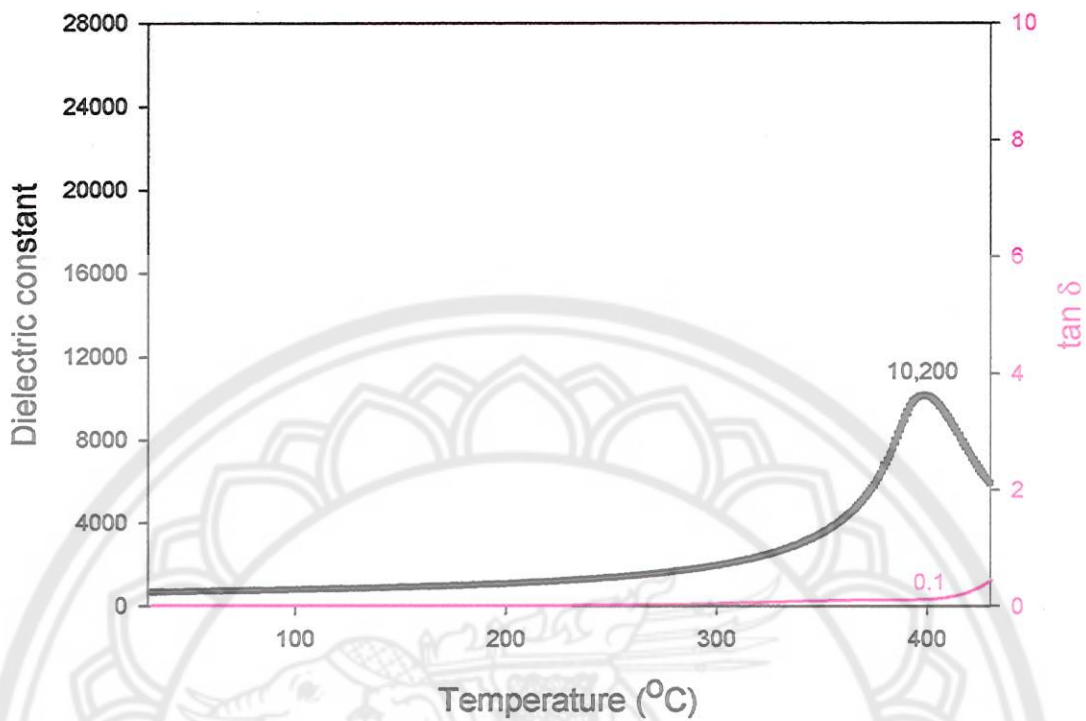
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	399	12500	0.6
100 kHz	398	11100	0.1
1 MHz	398	22800	0.2

จากกราฟในรูป 4.16 และตาราง 4.13 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) เลื่อนลงเล็กน้อยจาก 399 เป็น 398 °C เมื่อความถี่ที่ใช้วัดเปลี่ยนจาก 10 kHz เป็น 100 kHz และ 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 22800 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.2 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

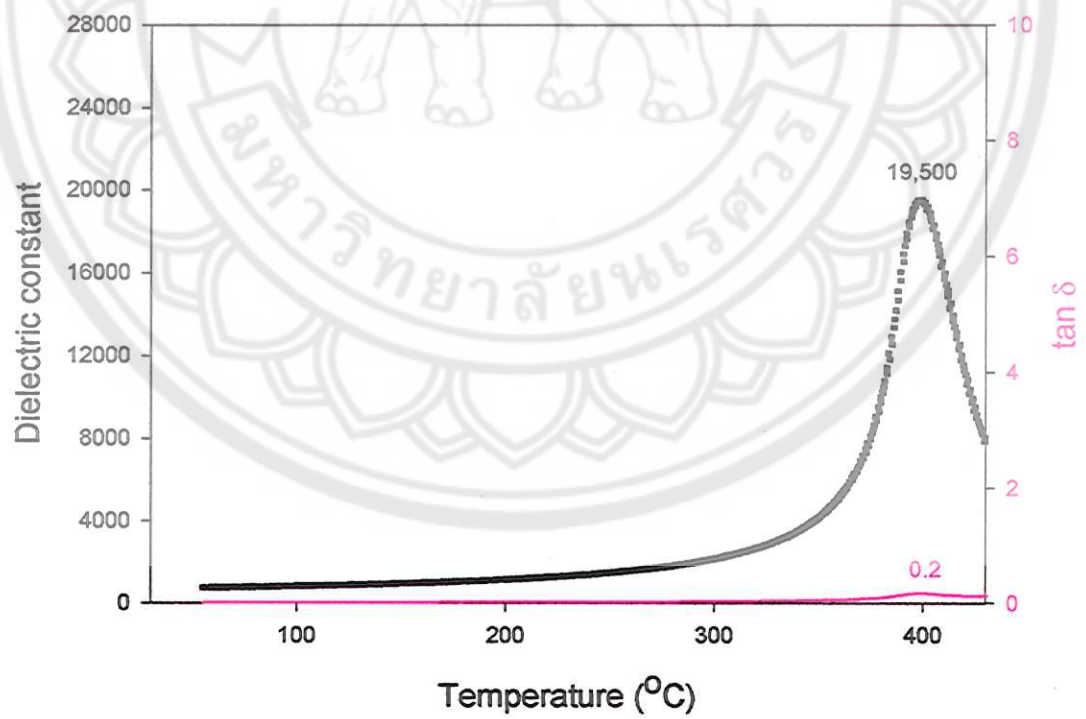


(ก)

รูป 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



(ข)



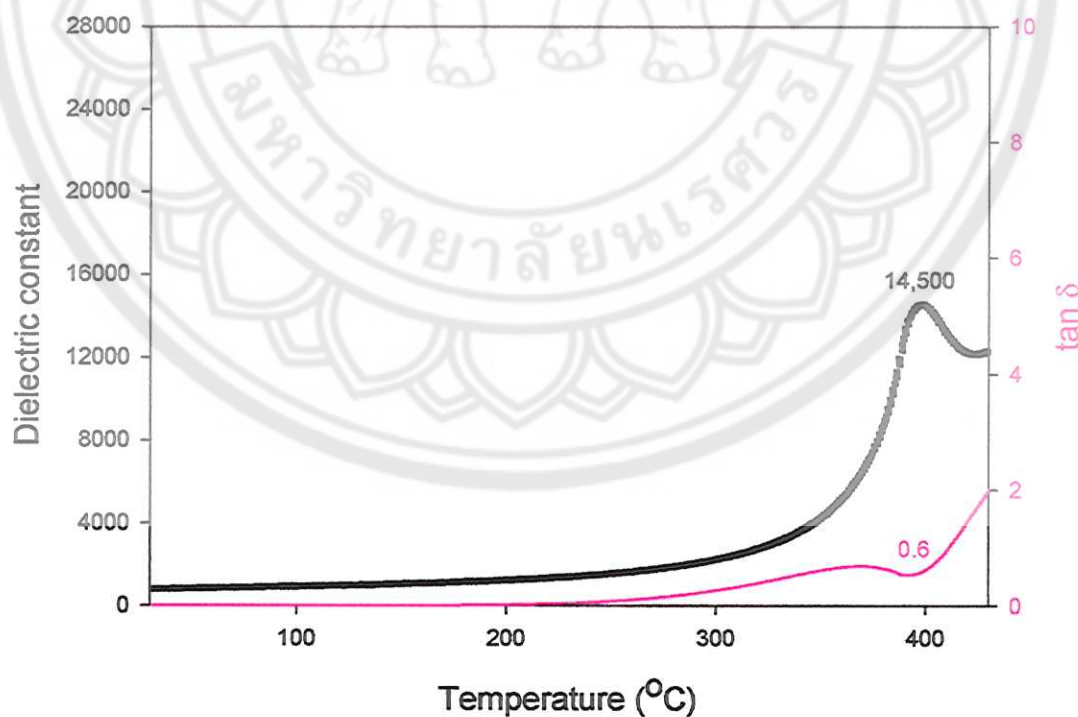
(ค)

รูป 4.17 (ต่อ)

ตาราง 4.14 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

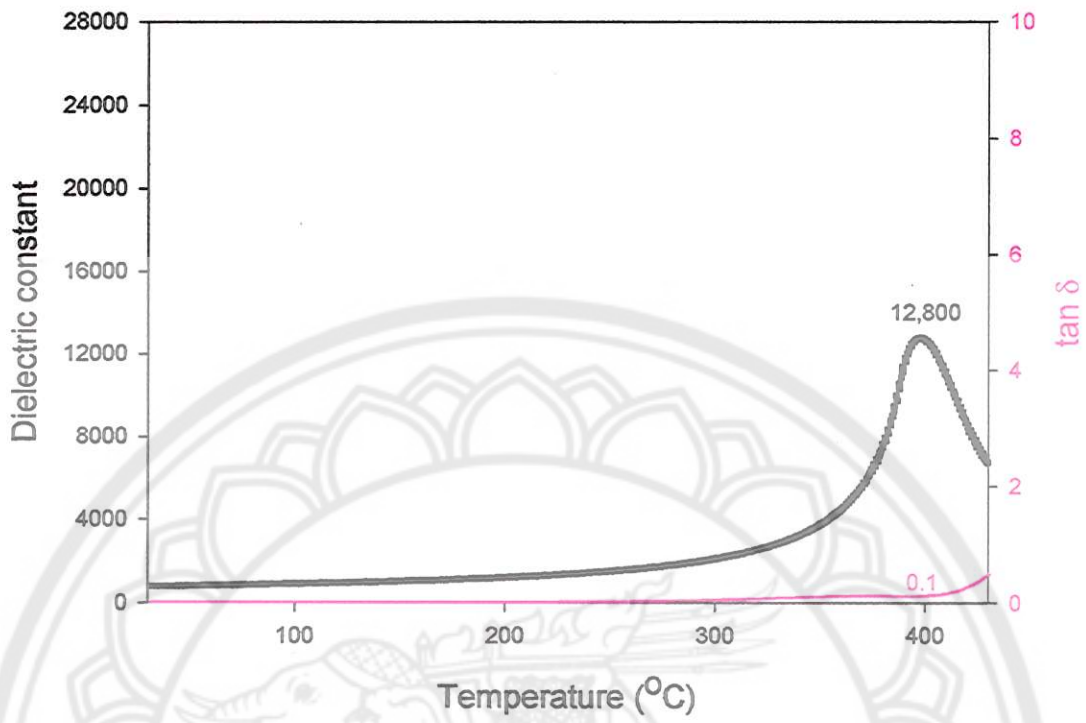
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	400	11600	0.6
100 kHz	399	10200	0.1
1 MHz	399	19500	0.2

จากกราฟในรูป 4.17 และตาราง 4.14 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) ลดลงเล็กน้อยจาก 400 เป็น 399 °C เมื่อความถี่ที่ใช้วัดเปลี่ยนจาก 10 kHz เป็น 100 kHz และ 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 19500 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.2 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

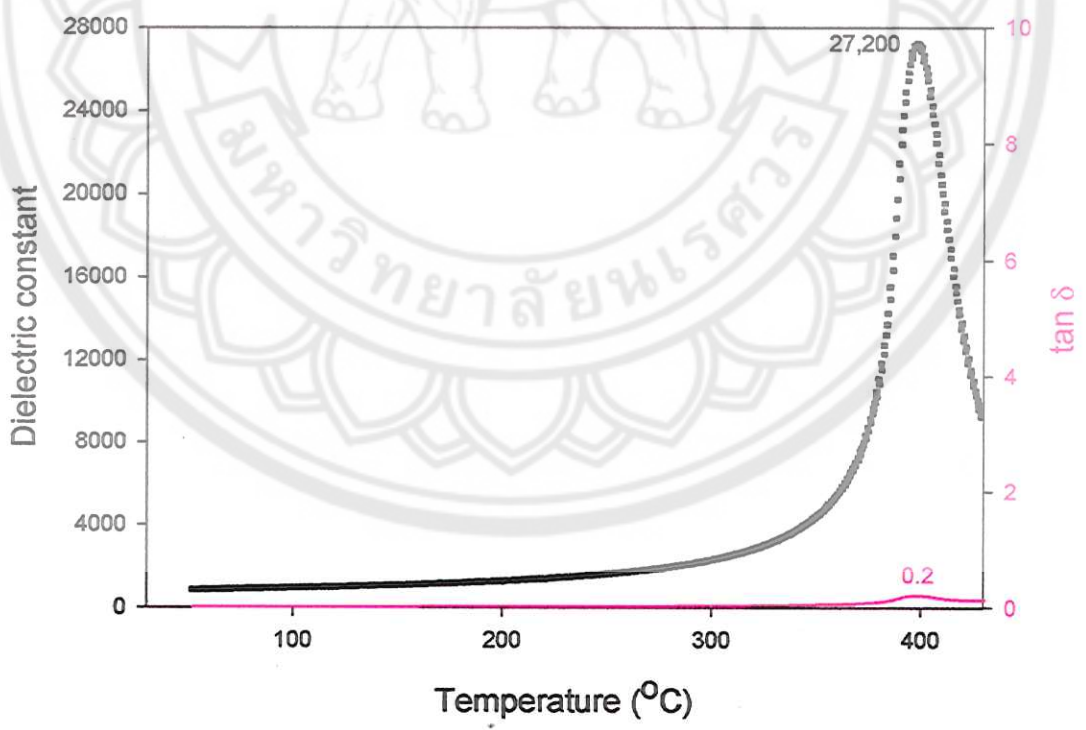


(ก)

รูป 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



(ข)



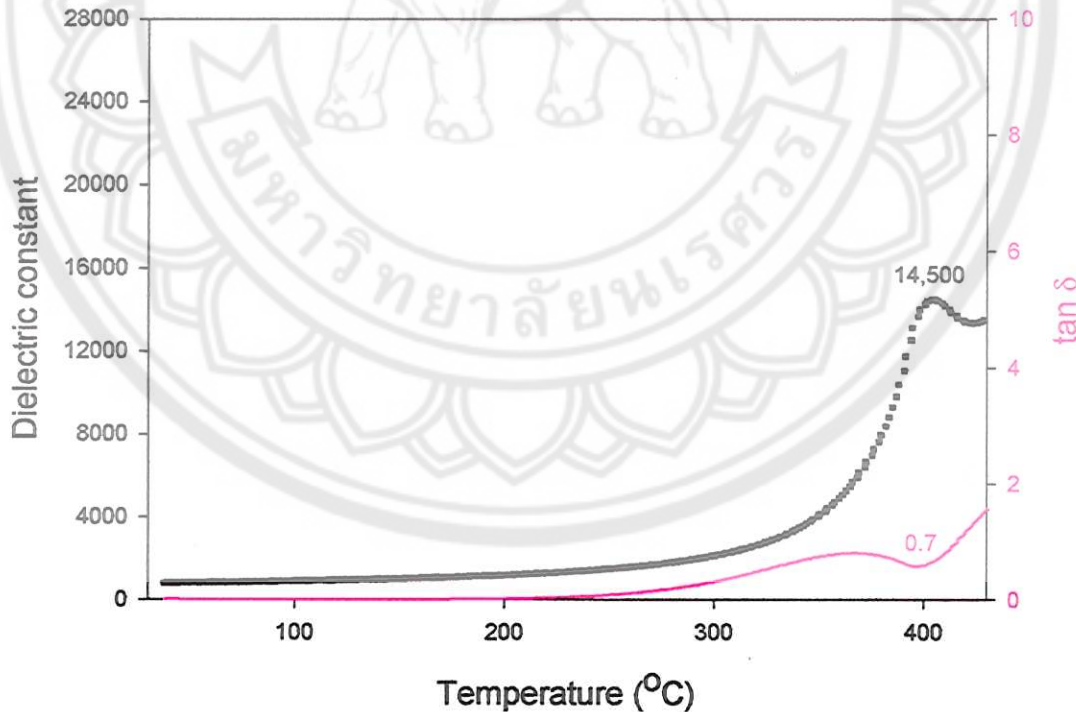
(ค)

รูป 4.18 (ต่อ)

ตาราง 4.15 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

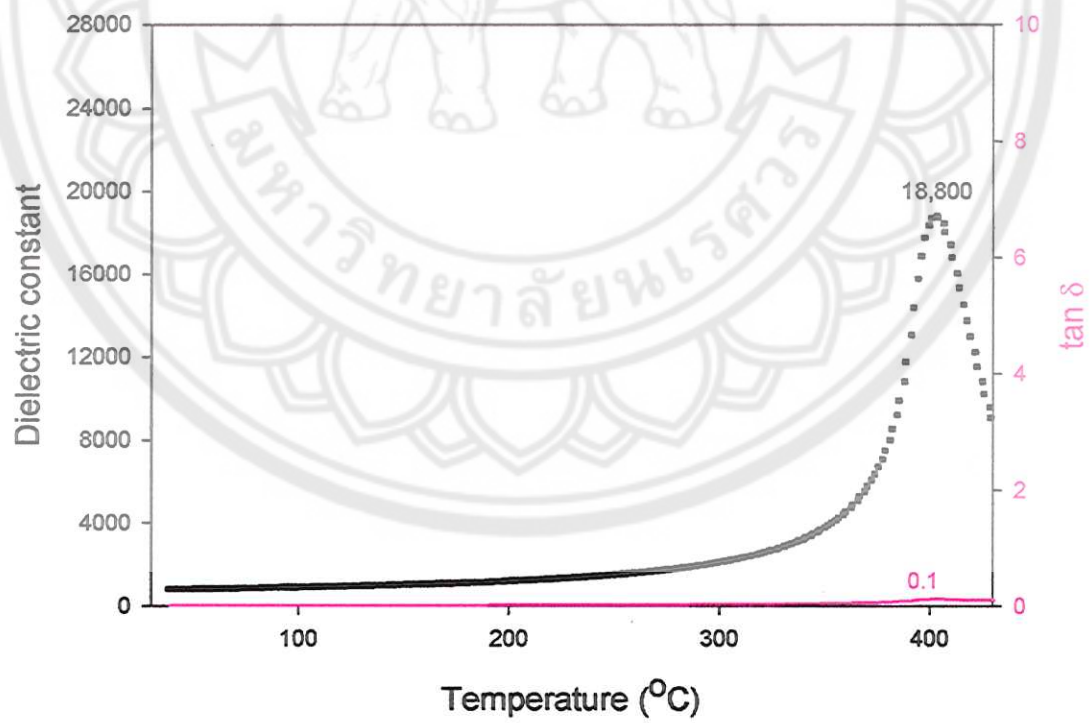
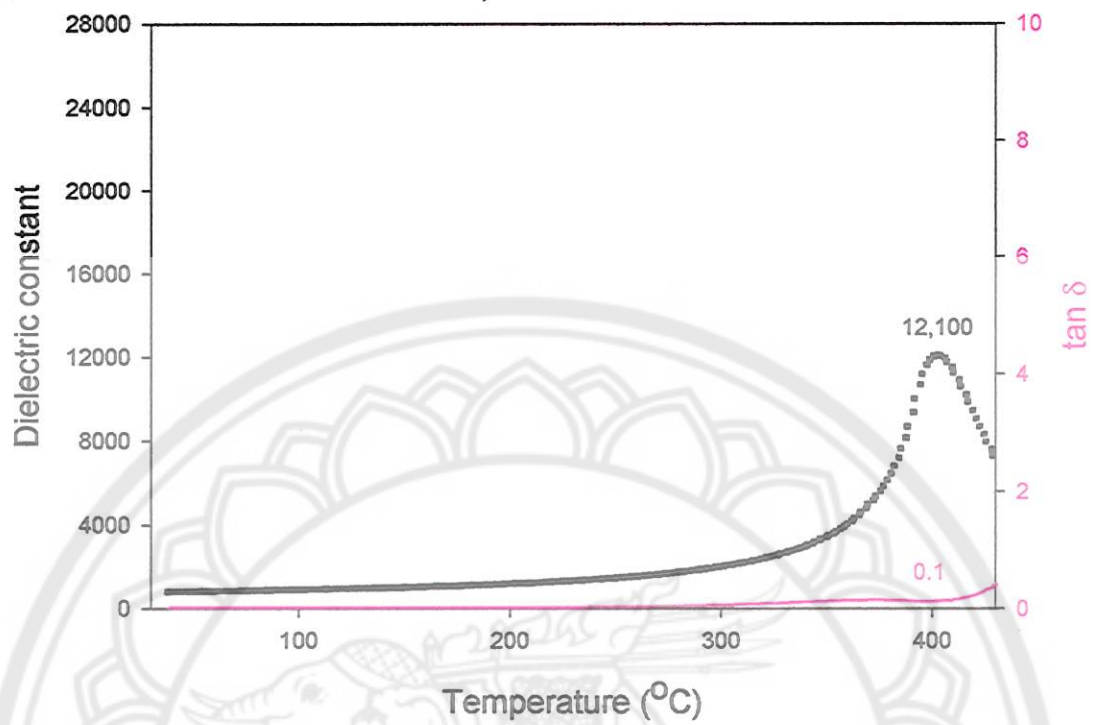
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	398	14500	0.6
100 kHz	398	12800	0.1
1 MHz	398	27200	0.2

จากกราฟในรูป 4.18 และตาราง 4.15 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) คงที่เป็น 399 °C ในทุกความถี่ที่ใช้วัด ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 27200 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.2 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย



(ก)

รูป 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



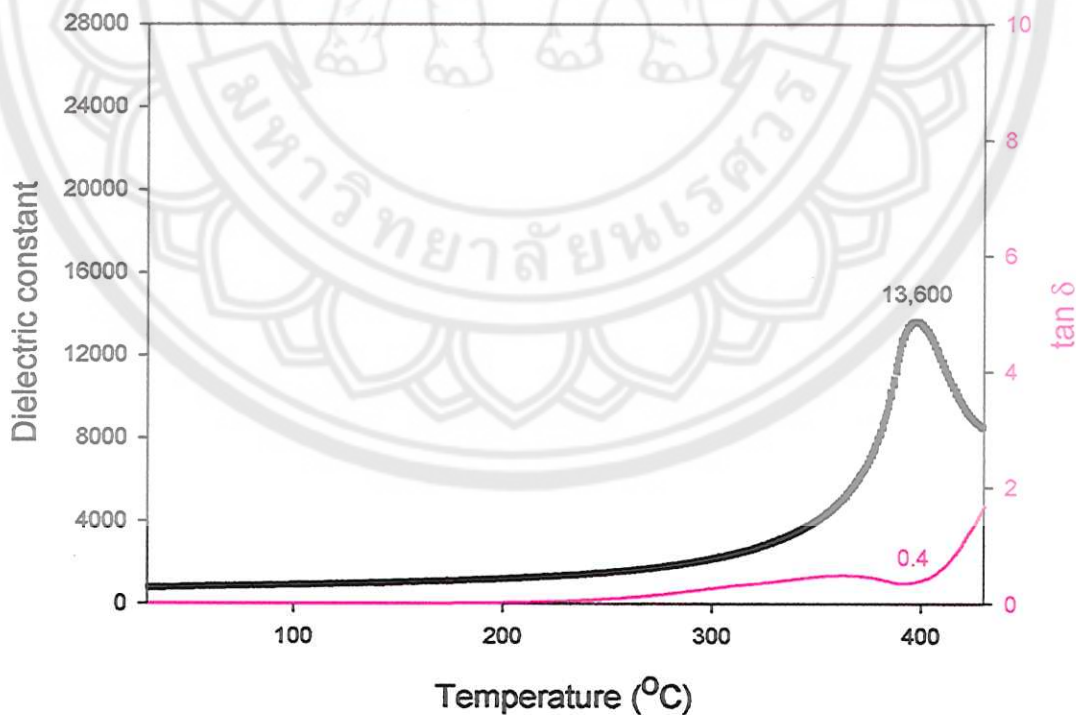
(ค)

รูป 4.19 (ต่อ)

ตาราง 4.16 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

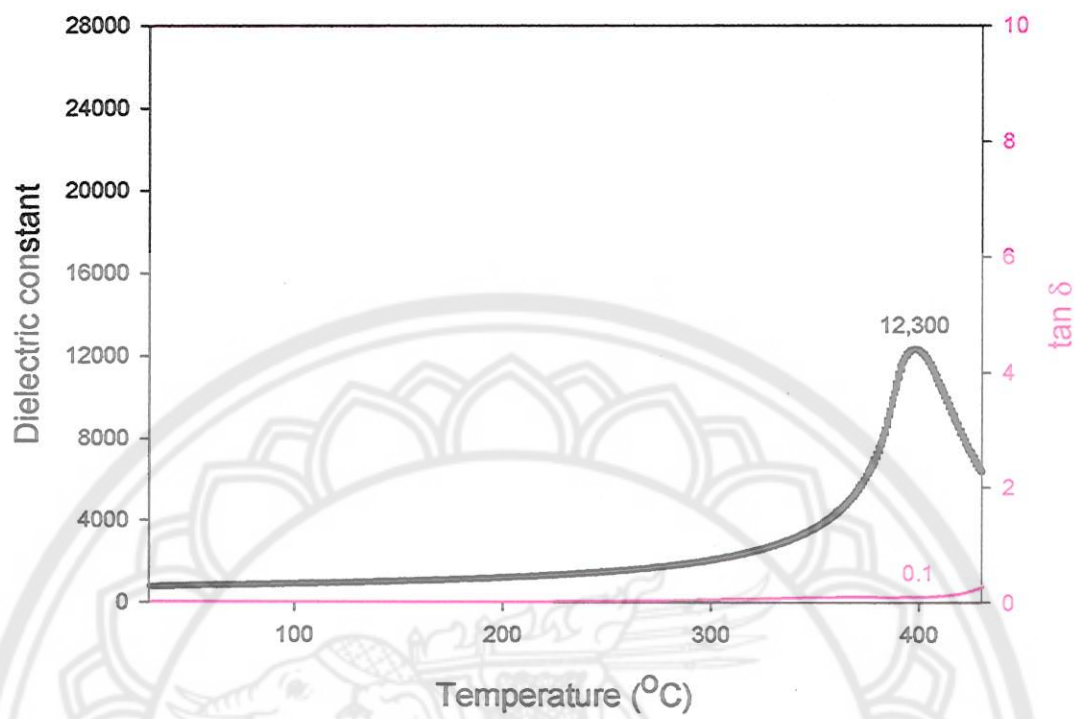
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	404	14500	0.7
100 kHz	403	12100	0.1
1 MHz	403	18800	0.1

จากกราฟในรูป 4.19 และตาราง 4.16 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) ลดลงเล็กน้อยจาก 404 เป็น 403 °C เมื่อความถี่ที่ใช้วัดเปลี่ยนจาก 10 kHz เป็น 100 kHz และ 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 18800 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.1 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

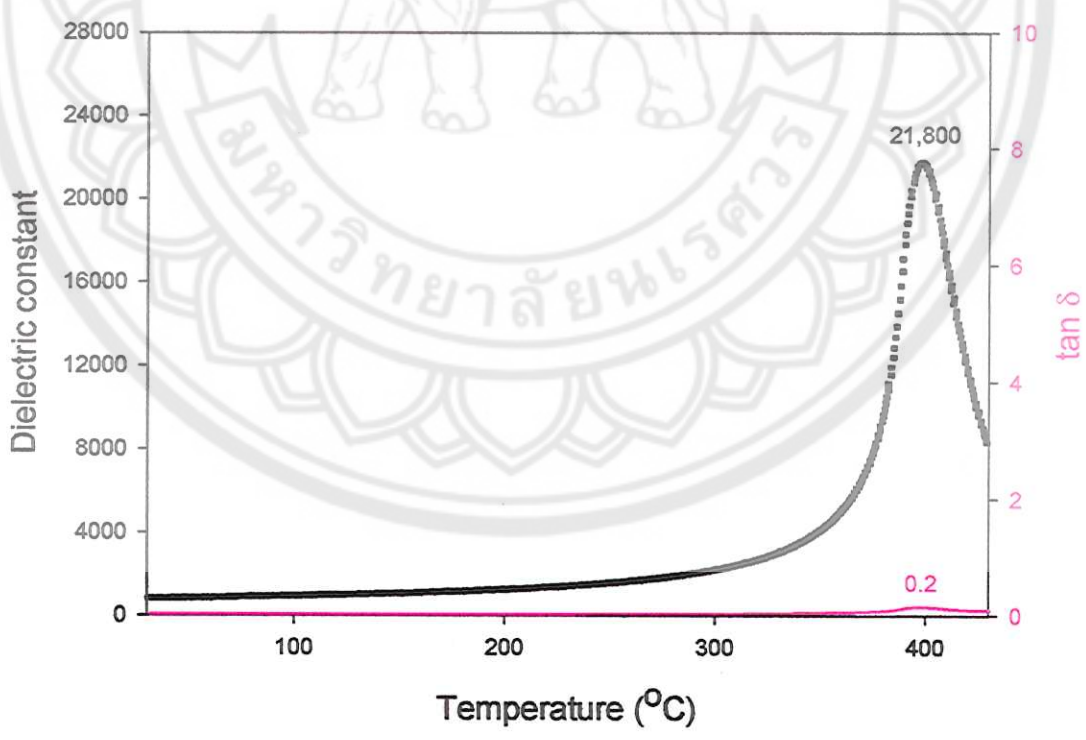


(ก)

รูป 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



(ก)



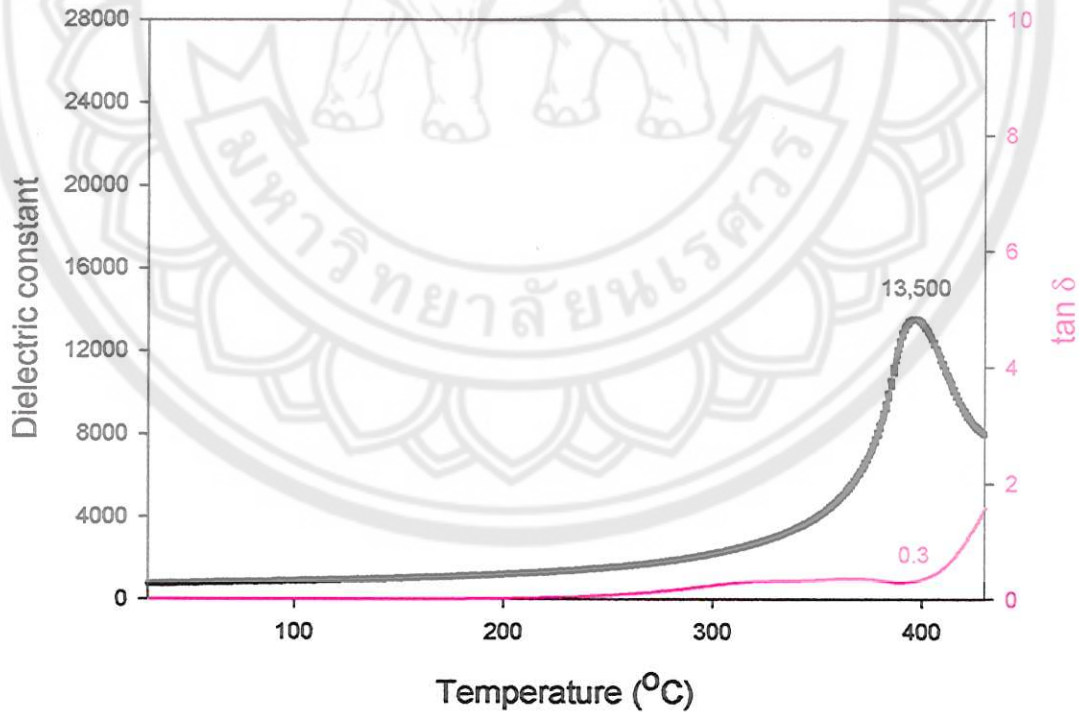
(ค)

รูป 4.20 (ต่อ)

ตาราง 4.17 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

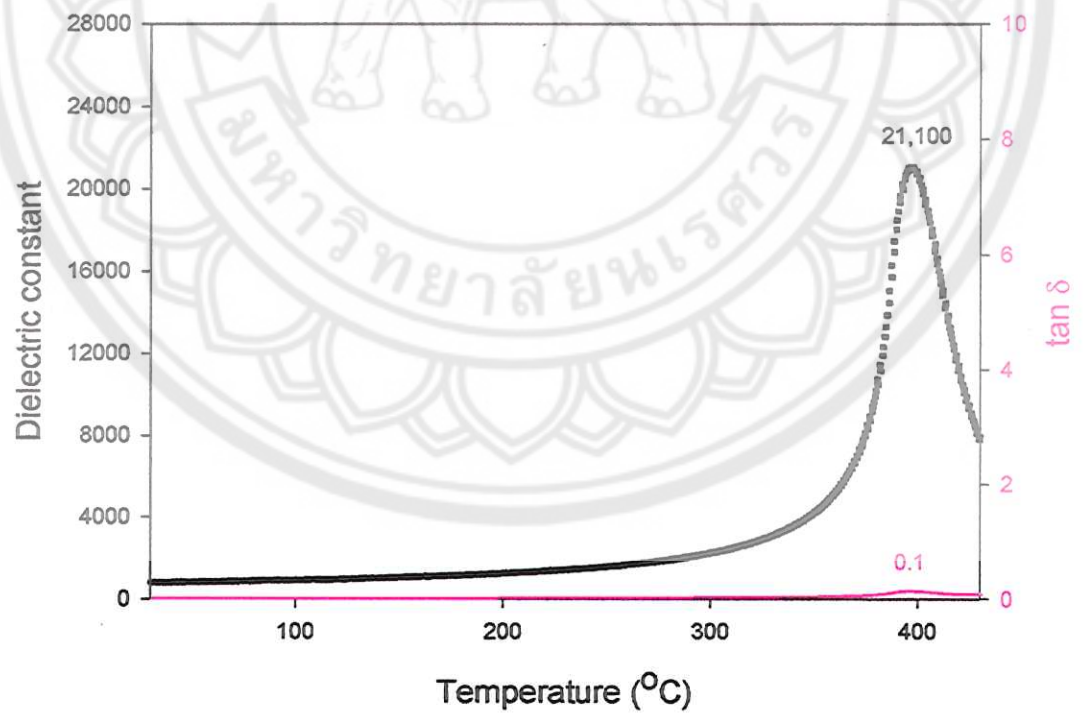
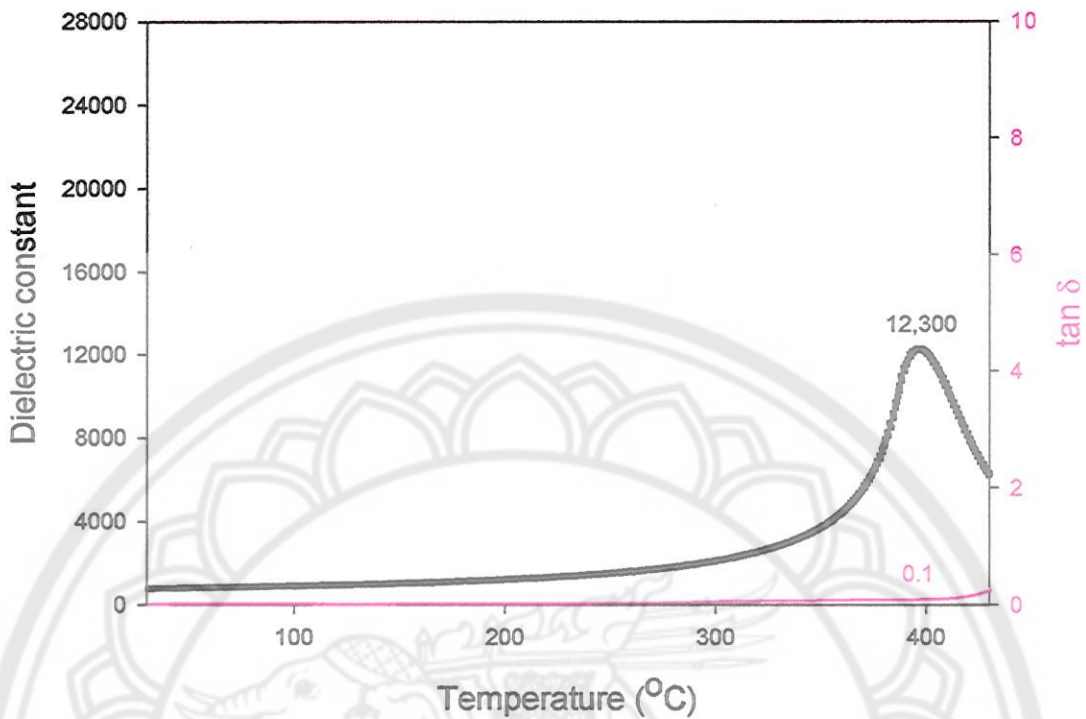
ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	398	13600	0.4
100 kHz	398	12300	0.1
1 MHz	398	21800	0.2

จากกราฟในรูป 4.20 และตาราง 4.17 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) คงที่เป็น 398 °C ในทุกความถี่ที่ใช้วัด ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 21800 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.2 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย



(ก)

รูป 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที วัดที่ความถี่ (ก) 10 kHz, (ข) 100 kHz และ (ค) 1 MHz



(ค)

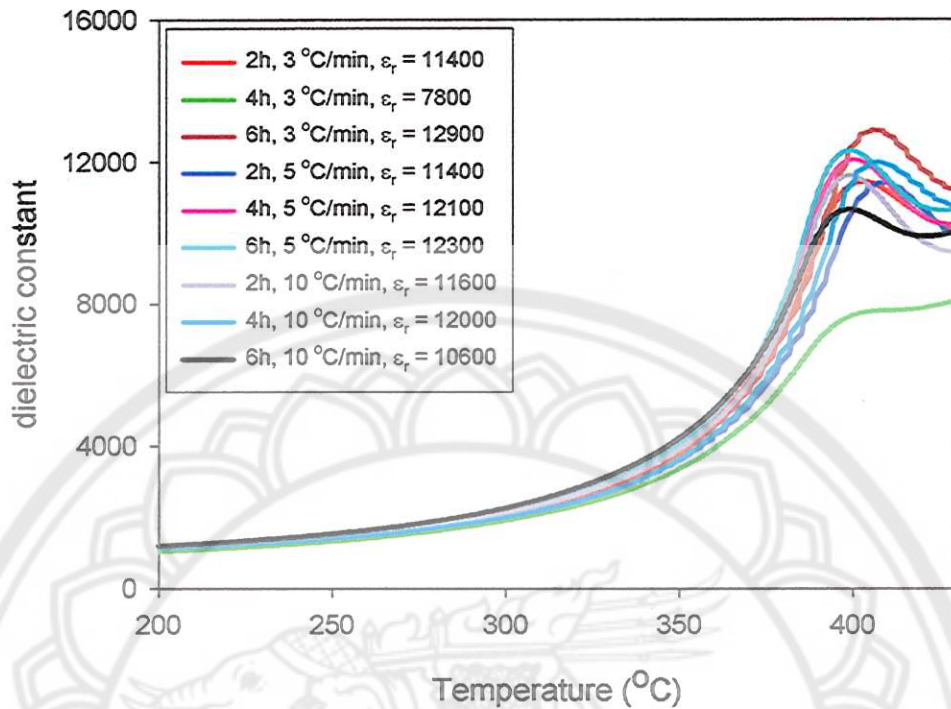
รูป 4.21 (ต่อ)

ตาราง 4.18 อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที ที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่	T_c (°C)	ϵ_r (max)	$\tan \delta$
10 kHz	396	13500	0.3
100 kHz	396	12300	0.1
1 MHz	396	21000	0.1

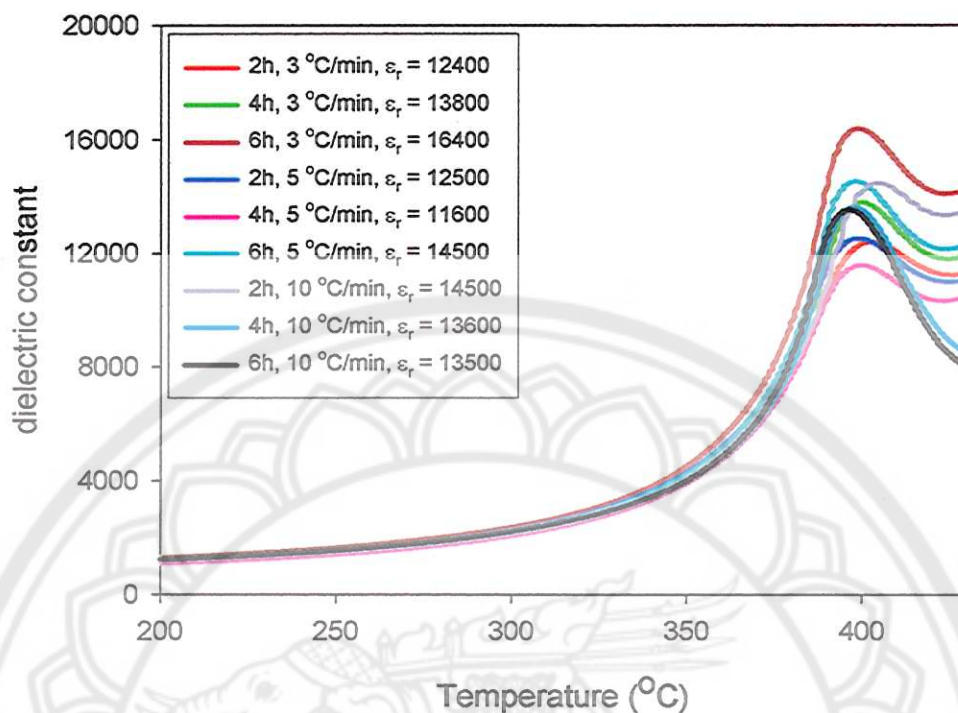
จากกราฟในรูป 4.21 และตาราง 4.18 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที มีอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟส) คงที่เป็น 396 °C ในทุกความถี่ที่ใช้วัด ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) มีค่ามากที่สุดเป็น 21000 ที่ความถี่เป็น 1 MHz และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็น 0.1 และยังพบว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

จากกราฟในรูป 4.3-4.21 และตาราง 4.1-4.18 จะเห็นว่าเซรามิก PZT ที่ถูกซินเตอร์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ กันนั้น ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดต่างกัน และเมื่อวัดด้วยความถี่ที่ต่างกันก็ยังคงให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่างกันอีกเช่นกัน เพื่อเปรียบเทียบค่าคงที่สูงสุดของเซรามิกที่วัดที่ความถี่เดียวกันให้เห็นชัดเจนขึ้น จึงจะเขียนกราฟรวมเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดเมื่อวัดเทียบกับอุณหภูมิที่วัดที่ความถี่เดียวกัน ดังรูป 4.22-4.27



รูป 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผาแซ่ และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ วัดที่ความถี่ 10 kHz

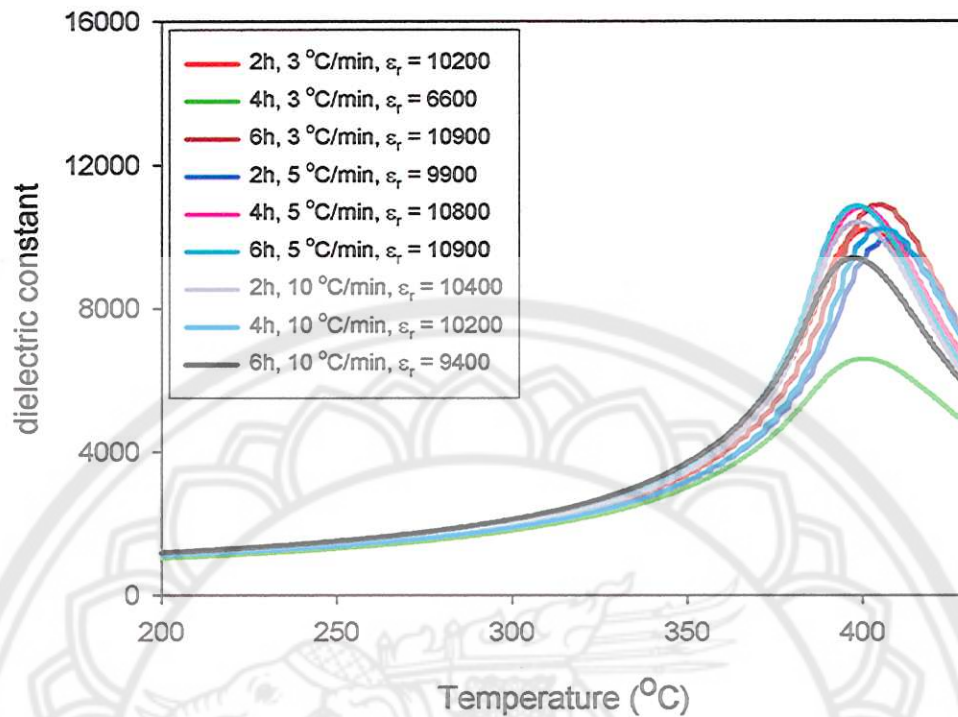
จากกราฟในรูป 4.22 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาเป็น 3, 5 และ 10 °C/นาที ได้ 9 เส้นไขว้ด้วยกัน วัดเทียบกับอุณหภูมิ โดยใช้ความถี่ 10 kHz จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขในการเผาที่ 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที นั้น ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดเท่ากับ 12900 รองลงมาที่เงื่อนไขการเผานาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 12300



รูป 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผา และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ วัดที่ความถี่ 10 kHz

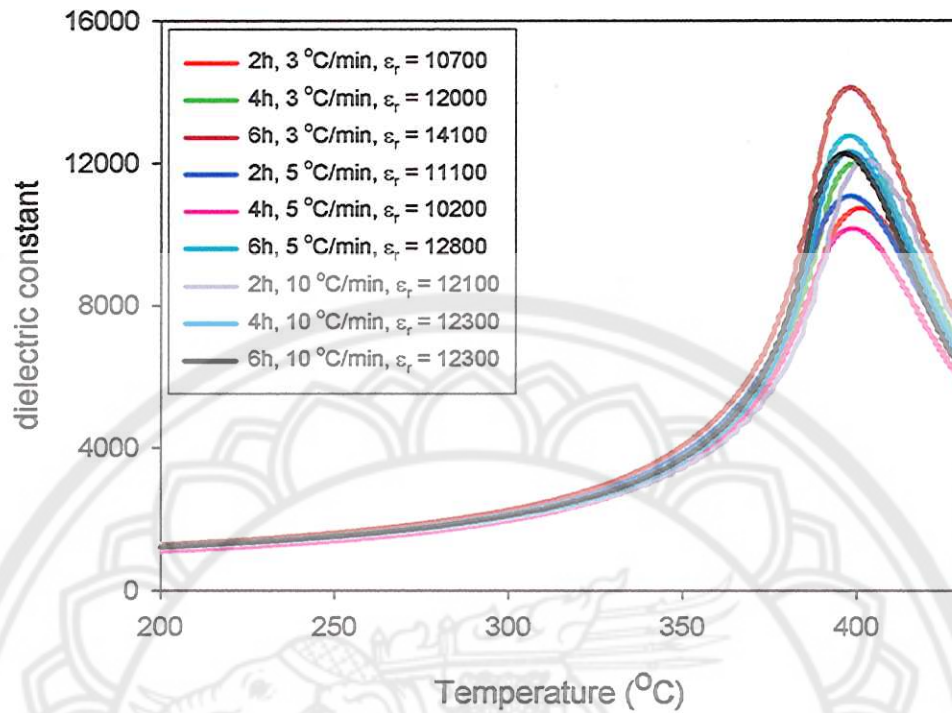
จากกราฟในรูป 4.23 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาเป็น 3, 5 และ 10 °C/นาที ได้ 9 เงื่อนไขด้วยกัน วัดเทียบกับอุณหภูมิ โดยใช้ความถี่ 10 kHz จะเห็นว่าเงื่อนไขในการเผาที่ 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที นั้น ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดเท่ากับ 16400 รองลงมาที่เงื่อนไขการเผานาน 6 และ 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 14500

สำหรับที่ความถี่ในการวัด 10 kHz นั้น จะเห็นว่าเงื่อนไขการเผาซินเตอร์เซรามิก PZT แล้วให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดทั้งที่ 1150 และ 1200 °C นั้น เป็นเวลาในการเผาแซ่นาน 6 ชั่วโมง และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที ทั้งสองอุณหภูมิ แต่ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1200 °C จะให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่า



รูป 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่การเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผา และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ วัดที่ความถี่ 100 kHz

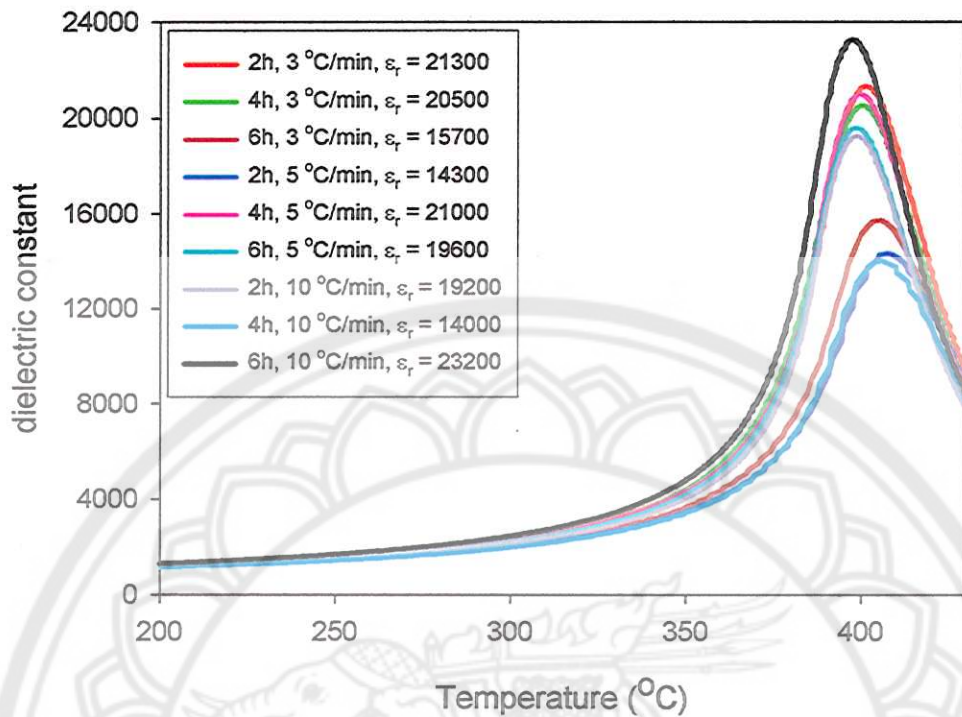
จากกราฟในรูป 4.24 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาเป็น 3, 5 และ 10 °C/นาที ได้ 9 เส้นไขดด้วยกัน วัดเทียบกับอุณหภูมิ โดยใช้ความถี่ 100 kHz จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขในการเผาที่ 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 และ 5 °C/นาที นั้น ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดเท่ากับ 10900 รองลงมาที่เงื่อนไขการเผานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 10800



รูป 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผา และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ วัดที่ความถี่ 100 kHz

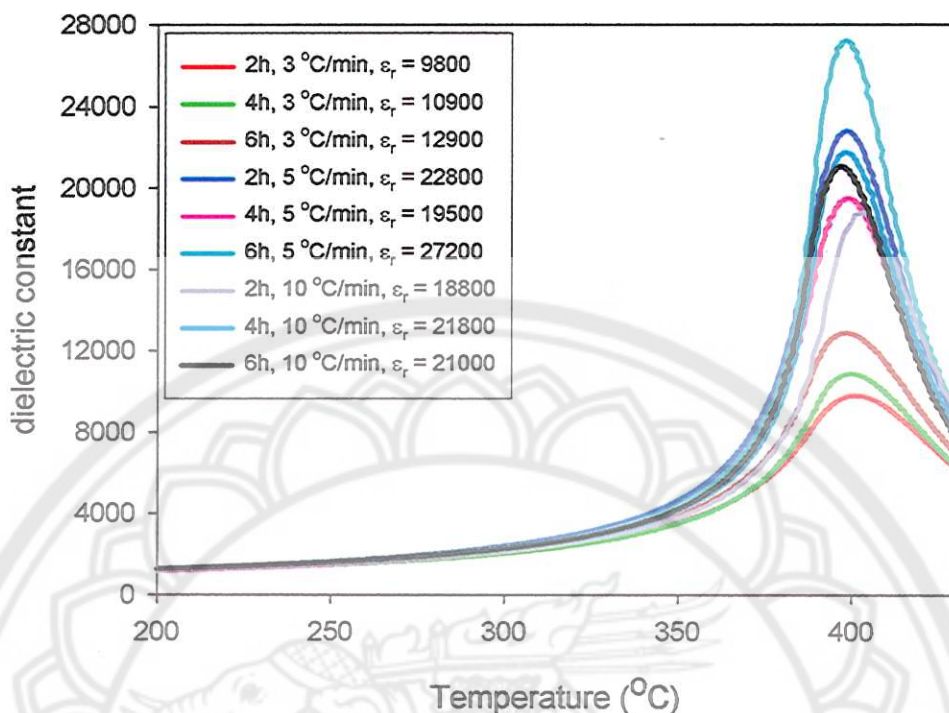
จากกราฟในรูป 4.25 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาเป็น 3, 5 และ 10 °C/นาที่ ได้ 9 เงื่อนไขด้วยกัน วัดเทียบกับอุณหภูมิ โดยใช้ความถี่ 100 kHz จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขในการเผาที่ 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที่ นั้น ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดเท่ากับ 14100 รองลงมาที่เงื่อนไขการเผานาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 12800

สำหรับที่ความถี่ในการวัด 100 kHz นั้น จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขการเผาซินเตอร์เซรามิก PZT แล้วให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดทั้งที่ 1150 และ 1200 °C นั้น เป็นเวลาในการเผาแซ่นาน 6 ชั่วโมง และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที่ ทั้งสองอุณหภูมิ แต่ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1200 °C จะให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่า



รูป 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่การเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผา และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ วัดที่ความถี่ 1 MHz

จากกราฟในรูป 4.26 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาเป็น 3, 5 และ 10 °C/นาที ได้ 9 เส้นไขว่ด้วยกัน วัดเทียบกับอุณหภูมิ โดยใช้ความถี่ 1 MHz จะเห็นได้ว่าเส้นไขว่ในการเผาที่ 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที นั้น ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดเท่ากับ 23200 รองลงมาที่เส้นไขว่การเผานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 3 °C/นาที ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 21300



รูป 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C โดยการแปรค่าเวลาในการเผา และอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ วัดที่ความถี่ 1 MHz

จากกราฟในรูป 4.27 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิในการเผาเป็น 3, 5 และ 10 °C/นาทึ ได้ 9 เส้นไขดด้วยกัน วัดเทียบกับอุณหภูมิ โดยใช้ความถี่ 1 MHz จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขในการเผาที่ 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาทึ นั้น ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดเท่ากับ 27200 รองลงมาที่เงื่อนไขการเผานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 °C/นาทึ ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น 22800

เมื่อเปลี่ยนความถี่ในการวัดเป็น 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดของเซรามิก PZT ที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C ไปอยู่ที่เงื่อนไขในการซินเตอร์นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาทึ และ 5 °C/นาทึ ตามลำดับ

ในทุกความถี่ที่ใช้ในการวัดค่าไดอิเล็กทริก พบว่าค่าสูงสุดของไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT นี้ อยู่ที่การเผาเผานาน 6 ชั่วโมง สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่ได้ โดยเมื่อเผาเผานาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิต่างๆ 3 °C/นาทึ จะให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดของทั้งสองอุณหภูมิซินเตอร์ [3] และในการเผาซินเตอร์นี้จะทำการเผาในบรรยากาศของตะกั่วออกไซด์ เพื่อป้องกันการระเหยของตะกั่ว และมีการเพิ่มปริมาณตะกั่วออกไซด์ร้อยละ 3 โดยโมลตั้งแต่การผสมสารตั้งต้น ทำให้เกิดเฟสของเหลว (liquid phase) ในระหว่างการเผาซินเตอร์ช่วยให้เกิดการ

แน่นตัวและลดการสูญเสียตะกั่วออกไซด์ ผลของการแน่นตัวนั้นมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคภายใต้อิทธิพลของแรงดึงตามรูเล็ก (capillary forces) และอุดรูพรุนด้วยเฟสของเหลว [25] การให้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิอย่างช้าๆ ทำให้เฟสของเหลวคงอยู่นานขึ้น จึงเสริมให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคและการอุดรูพรุน ทำให้เซรามิกมีความแน่นตัวเพิ่มขึ้น

4.4 ผลการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ในระดับจุลภาค ในระบบ PZT

นำเซรามิกในระบบ PZT ที่เผาขึ้นเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C ที่แปรค่าเวลาในการเผาและอัตราการขึ้น/ลง อุณหภูมิในกระบวนการเผาขึ้นเตอร์ต่างๆ กัน มาหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ โดยใช้เครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาค ในการทดสอบแต่ละชิ้นงานจะใช้แรงในการกดเป็น 300 กรัมแรง และ 500 กรัมแรง อย่างละ 5 จุด วัดเส้นทแยงมุมของรอยกดแต่ละจุดทั้งสองเส้น ดังรูป 4.28 แล้วเฉลี่ยค่าของเส้นทแยงมุม นำมาหาค่าความแข็งแต่ละจุดที่กดลงบนผิวของเซรามิก แล้วจึงนำมาหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์เฉลี่ย และค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวัดพบว่าเซรามิก PZT มีค่าความแข็งในการกดแต่ละจุดแต่ละเงื่อนไขของการขึ้นเตอร์เป็นดังตาราง 4.19-4.36 นี้



รูป 4.28 รอยกดแบบวิกเกอร์ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเซรามิก

ตาราง 4.19 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เเผาขึ้นเตอร์ที่ 1150 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	60.94	61.35	61.15	1.46
2	300	57.22	57.69	57.46	1.65
3	300	58.65	58.10	58.38	1.60
4	300	54.59	51.36	52.98	1.94
5	300	59.87	56.67	58.27	1.61
6	500	66.63	67.29	66.96	2.03
7	500	67.69	72.43	70.06	1.85
8	500	67.48	66.86	67.17	2.02
9	500	60.61	60.88	60.75	2.46
10	500	61.17	65.71	63.44	2.26
เฉลี่ย					1.89

ตาราง 4.20 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เเผาขึ้นเตอร์ที่ 1150 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	45.22	46.40	45.81	2.60
2	300	44.65	43.18	43.92	2.83
3	300	74.63	62.58	68.61	1.16
4	300	50.84	50.22	50.53	2.14
5	300	62.48	56.18	59.33	1.55
6	500	58.72	63.43	61.08	2.44
7	500	76.23	70.32	73.28	1.69
8	500	58.40	62.20	60.30	2.50
9	500	68.59	67.69	68.14	1.96
10	500	85.16	72.57	78.87	1.46
เฉลี่ย					2.03

ตาราง 4.21 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	42.01	39.51	40.76	3.28
2	300	44.18	44.42	44.30	2.78
3	300	45.32	56.61	50.97	2.10
4	300	49.88	46.05	47.97	2.37
5	300	43.30	43.49	43.40	2.90
6	500	60.72	60.37	60.55	2.48
7	500	64.22	66.56	65.39	2.13
8	500	60.14	60.97	60.56	2.48
9	500	60.68	59.98	60.33	2.50
10	500	67.50	62.63	65.07	2.15
เฉลี่ย					2.52

ตาราง 4.22 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	48.84	43.33	46.09	2.57
2	300	57.04	48.19	52.62	1.97
3	300	43.72	38.25	40.99	3.25
4	300	43.65	45.26	44.46	2.76
5	300	48.03	49.24	48.64	2.31
6	500	55.81	55.15	55.48	2.95
7	500	61.62	61.86	61.74	2.39
8	500	62.03	61.43	61.73	2.39
9	500	57.60	59.30	58.45	2.66
10	500	55.05	58.82	56.94	2.81
เฉลี่ย					2.60

ตาราง 4.23 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เฝ้าซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	45.81	46.25	46.03	2.58
2	300	51.25	45.74	48.50	2.32
3	300	46.58	45.60	46.09	2.57
4	300	48.96	47.76	48.36	2.33
5	300	51.18	50.04	50.61	2.13
6	500	58.07	56.96	57.52	2.75
7	500	57.64	59.11	58.38	2.67
8	500	58.99	58.26	58.63	2.65
9	500	57.07	57.54	57.31	2.77
10	500	58.09	58.40	58.25	2.68
เฉลี่ย					2.54

ตาราง 4.24 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เฝ้าซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	40.80	40.96	40.88	3.26
2	300	45.81	44.01	44.91	2.71
3	300	49.44	52.77	51.11	2.09
4	300	44.97	41.20	43.09	2.94
5	300	47.26	49.17	48.22	2.35
6	500	54.09	58.15	56.12	2.89
7	500	62.22	64.42	63.32	2.27
8	500	65.40	69.97	67.69	1.98
9	500	74.67	76.54	75.61	1.59
10	500	62.71	68.81	65.76	2.10
เฉลี่ย					2.42

ตาราง 4.25 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เฝ้าซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	46.06	46.89	46.48	2.53
2	300	45.60	43.97	44.79	2.72
3	300	43.81	42.59	43.20	2.92
4	300	47.45	42.83	45.14	2.68
5	300	45.45	40.73	43.09	2.94
6	500	56.10	59.51	57.81	2.72
7	500	58.61	57.95	58.28	2.68
8	500	60.65	63.54	62.10	2.36
9	500	53.66	63.18	58.42	2.66
10	500	58.41	62.83	60.62	2.47
เฉลี่ย					2.67

ตาราง 4.26 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เฝ้าซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	43.44	45.22	44.33	2.78
2	300	45.00	45.48	45.24	2.67
3	300	46.06	47.19	46.63	2.51
4	300	43.81	47.25	45.53	2.63
5	300	46.5	40.59	43.55	2.88
6	500	59.89	55.17	57.53	2.75
7	500	57.21	55.77	56.49	2.85
8	500	54.70	60.86	57.78	2.72
9	500	66.58	62.13	64.36	2.20
10	500	58.29	59.65	58.97	2.61
เฉลี่ย					2.66

ตาราง 4.27 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เมาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	38.91	44.22	41.57	3.16
2	300	48.13	50.14	49.14	2.26
3	300	40.20	40.15	40.18	3.38
4	300	56.19	59.46	57.83	1.63
5	300	45.15	46.98	46.07	2.57
6	500	66.49	51.13	58.81	2.63
7	500	64.99	68.39	66.69	2.04
8	500	60.44	65.25	62.85	2.30
9	500	64.37	72.08	68.23	1.95
10	500	75.69	61.55	68.62	1.93
เฉลี่ย					2.39

ตาราง 4.28 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เมาซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	44.64	47.57	46.11	2.57
2	300	42.25	42.07	42.16	3.07
3	300	40.23	43.98	42.11	3.08
4	300	43.64	43.79	43.72	2.85
5	300	43.29	38.68	40.99	3.25
6	500	54.08	58.04	56.06	2.89
7	500	52.02	52.94	52.48	3.30
8	500	52.27	54.24	53.26	3.21
9	500	61.21	60.10	60.66	2.47
10	500	62.19	59.22	60.71	2.47
เฉลี่ย					2.92

ตาราง 4.29 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เผาขึ้นเตอรที่ 1200 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	47.07	44.88	45.98	2.58
2	300	42.01	42.99	42.50	3.02
3	300	44.14	45.43	44.79	2.72
4	300	45.61	51.77	48.69	2.30
5	300	47.37	43.44	45.41	2.65
6	500	56.58	56.67	56.63	2.84
7	500	56.70	54.53	55.62	2.94
8	500	59.97	56.46	58.22	2.68
9	500	56.27	55.60	55.94	2.91
10	500	56.53	57.87	57.20	2.78
เฉลี่ย					2.74

ตาราง 4.30 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เผาขึ้นเตอรที่ 1200 °C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	36.75	35.02	35.89	4.24
2	300	38.19	41.35	39.77	3.45
3	300	42.49	39.57	41.03	3.24
4	300	40.39	41.19	40.79	3.28
5	300	42.4	42.79	42.60	3.01
6	500	61.17	55.92	58.55	2.65
7	500	57.55	55.03	56.29	2.87
8	500	55.4	56.75	56.08	2.89
9	500	57.23	52.69	54.96	3.01
10	500	61.08	62.92	62.00	2.37
เฉลี่ย					3.10

ตาราง 4.31 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	44.08	42.20	43.14	2.93
2	300	44.91	45.13	45.02	2.69
3	300	41.33	40.15	40.74	3.29
4	300	39.16	40.32	39.74	3.45
5	300	41.76	42.58	42.17	3.07
6	500	52.93	52.03	52.48	3.30
7	500	52.52	54.24	53.38	3.19
8	500	55.48	55.55	55.52	2.95
9	500	51.75	53.66	52.71	3.27
10	500	57.92	55.42	56.67	2.83
เฉลี่ย					3.10

ตาราง 4.32 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	43.67	41.41	42.54	3.01
2	300	43.99	42.06	43.03	2.95
3	300	43.04	40.30	41.67	3.14
4	300	44.99	43.51	44.25	2.79
5	300	45.76	40.36	43.06	2.94
6	500	54.62	56.12	55.37	2.97
7	500	58.74	62.82	60.78	2.46
8	500	59.37	59.86	59.62	2.56
9	500	54.07	54.78	54.43	3.07
10	500	53.76	51.58	52.67	3.28
เฉลี่ย					2.92

ตาราง 4.33 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เเผาขึ้นเตอร์ที่ 1200 °C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	43.29	44.59	43.94	2.83
2	300	51.67	46.11	48.89	2.28
3	300	47.21	49.24	48.23	2.35
4	300	37.62	39.77	38.70	3.64
5	300	45.58	45.59	45.59	2.63
6	500	51.59	50.52	51.06	3.49
7	500	63.39	64.18	63.79	2.23
8	500	64.36	64.80	64.58	2.18
9	500	59.14	57.53	58.34	2.67
10	500	57.33	60.25	58.79	2.63
เฉลี่ย					2.69

ตาราง 4.34 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เเผาขึ้นเตอร์ที่ 1200 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	36.14	39.83	37.99	3.78
2	300	41.12	41.92	41.52	3.16
3	300	38.00	42.9	40.45	3.33
4	300	37.55	41.07	39.31	3.53
5	300	37.97	41.71	39.84	3.44
6	500	54.2	54.19	54.20	3.10
7	500	50.33	49.77	50.05	3.63
8	500	54.79	53.21	54.00	3.12
9	500	51.54	54.36	52.95	3.24
10	500	54.67	55.78	55.23	2.98
เฉลี่ย					3.33

ตาราง 4.35 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เฝ้าซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	39.61	40.84	40.23	3.37
2	300	39.65	40.44	40.05	3.40
3	300	38.45	36.38	37.42	3.90
4	300	42.13	41.32	41.73	3.13
5	300	42.74	41.98	42.36	3.04
6	500	55.09	57.80	56.45	2.85
7	500	59.64	53.35	56.50	2.85
8	500	57.98	57.85	57.92	2.71
9	500	55.68	58.61	57.15	2.78
10	500	54.03	55.04	54.54	3.06
เฉลี่ย					3.11

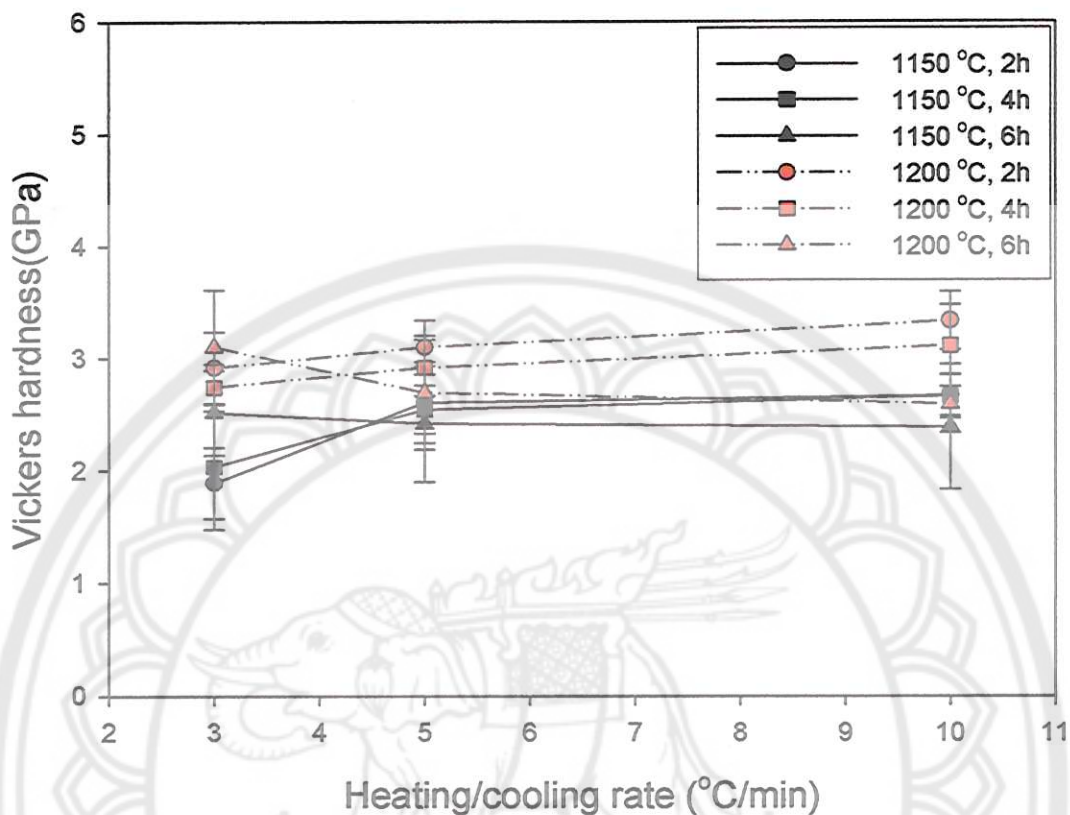
ตาราง 4.36 ความแข็งแบบวิกเกอร์ของการกดแต่ละจุดบนผิวหน้าของเซรามิก PZT เฝ้าซินเตอร์ที่ 1200 °C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที

ที่	แรงที่กด (กรัมแรง)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 1 (μm)	ความยาวเส้น ทแยงมุม เส้นที่ 2 (μm)	ความยาวเส้นทแยง มุมเฉลี่ย (μm)	ความแข็งแบบ วิกเกอร์ (GPa)
1	300	43.76	42.48	43.12	2.93
2	300	47.33	45.44	46.39	2.54
3	300	45.41	46.14	45.78	2.60
4	300	47.75	47.60	47.68	2.40
5	300	43.13	40.46	41.80	3.12
6	500	61.82	61.93	61.88	2.38
7	500	60.69	62.33	61.51	2.40
8	500	61.18	62.46	61.82	2.38
9	500	60.74	60.52	60.63	2.47
10	500	58.42	57.78	58.10	2.69
เฉลี่ย					2.59

จากตาราง 4.19-4.36 เมื่อนำค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแบบวิกเกอร์แต่ละชิ้นงาน และค่าความคลาดเคลื่อนมาเขียนเป็นตารางรวมทุกเงื่อนไขของการเผาซินเตอร์จะแสดงได้ดังตาราง 4.37 และเมื่อนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูป 4.29

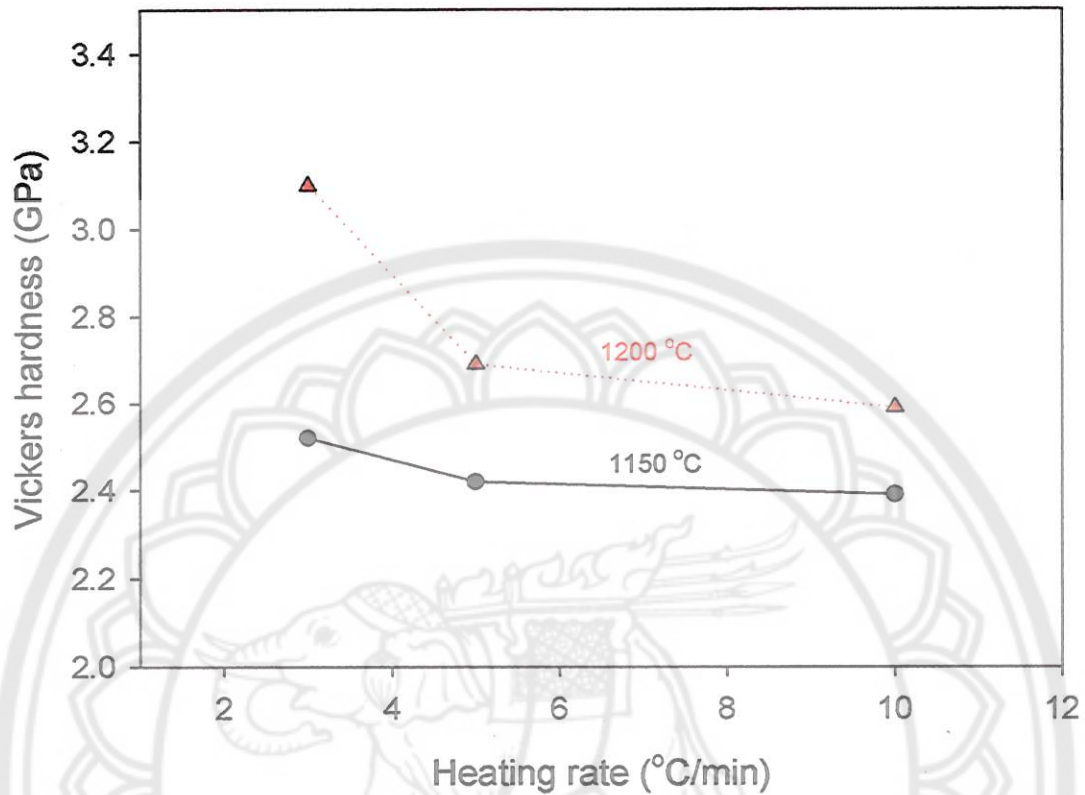
ตาราง 4.37 ความแข็งเฉลี่ยแบบวิกเกอร์และค่าความคลาดเคลื่อนของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1150 และ 1200 °C เมื่อแปรค่าเวลาในการเผาแซ่ และอัตราการให้ความร้อนต่างๆ กัน

ที่	เงื่อนไขการเผา	ความแข็งเฉลี่ยแบบ วิกเกอร์ (GPa)	ความคลาดเคลื่อน
1	1150 °C, 2 ชั่วโมง, 3 °C/นาที	1.89	0.32
2	1150 °C, 4 ชั่วโมง, 3 °C/นาที	2.03	0.56
3	1150 °C, 6 ชั่วโมง, 3 °C/นาที	2.52	0.38
4	1150 °C, 2 ชั่วโมง, 5 °C/นาที	2.60	0.36
5	1150 °C, 4 ชั่วโมง, 5 °C/นาที	2.54	0.21
6	1150 °C, 6 ชั่วโมง, 5 °C/นาที	2.42	0.52
7	1150 °C, 2 ชั่วโมง, 10 °C/นาที	2.67	0.18
8	1150 °C, 4 ชั่วโมง, 10 °C/นาที	2.66	0.20
9	1150 °C, 6 ชั่วโมง, 10 °C/นาที	2.39	0.56
10	1200 °C, 2 ชั่วโมง, 3 °C/นาที	2.92	0.32
11	1200 °C, 4 ชั่วโมง, 3 °C/นาที	2.74	0.21
12	1200 °C, 6 ชั่วโมง, 3 °C/นาที	3.10	0.51
13	1200 °C, 2 ชั่วโมง, 5 °C/นาที	3.10	0.24
14	1200 °C, 4 ชั่วโมง, 5 °C/นาที	2.92	0.25
15	1200 °C, 6 ชั่วโมง, 5 °C/นาที	2.69	0.51
16	1200 °C, 2 ชั่วโมง, 10 °C/นาที	3.33	0.26
17	1200 °C, 4 ชั่วโมง, 10 °C/นาที	3.11	0.36
18	1200 °C, 6 ชั่วโมง, 10 °C/นาที	2.59	0.26



รูป 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT กับอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิที่เผาขึ้นเตอร์ที่ 1150 และ 1200 °C เผาเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

จากตาราง 4.37 และรูป 4.29 จะเห็นว่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT ที่เผาขึ้นเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C จะมีค่ามากกว่าที่เผาขึ้นเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C แทบทุกเงื่อนไข แต่ยังไม่มีความโน้มถ่วงที่ชี้ให้เห็นชัดเจนว่าอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิทำให้ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์เปลี่ยนไปในแนวเดียวกัน จะชี้ได้เฉพาะบางกรณีเท่านั้น เช่น ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT ที่เผาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ทั้งอุณหภูมิขึ้นเตอร์ 1150 และ 1200 °C นั้น ยิ่งอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเร็วขึ้น ค่าความแข็งก็จะยิ่งลดลง ดังรูป 4.30 และค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ในเงื่อนไขนี้มีความโน้มถ่วงเดียวกันกับความหนาแน่น [26]

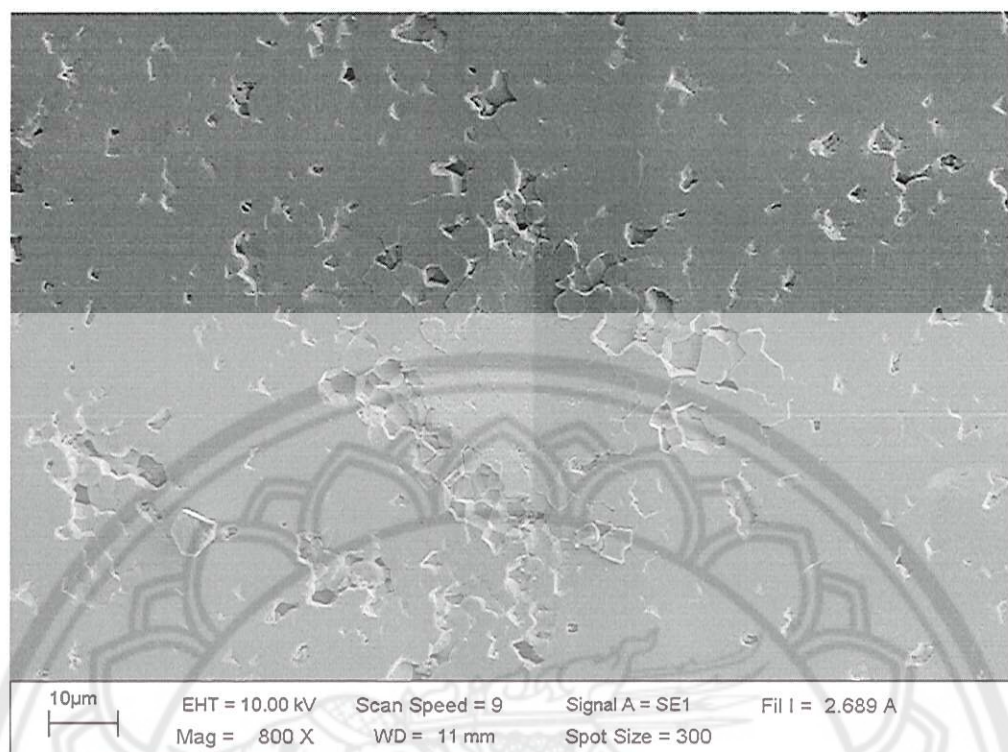


รูป 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบวิกเกอร์กับอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

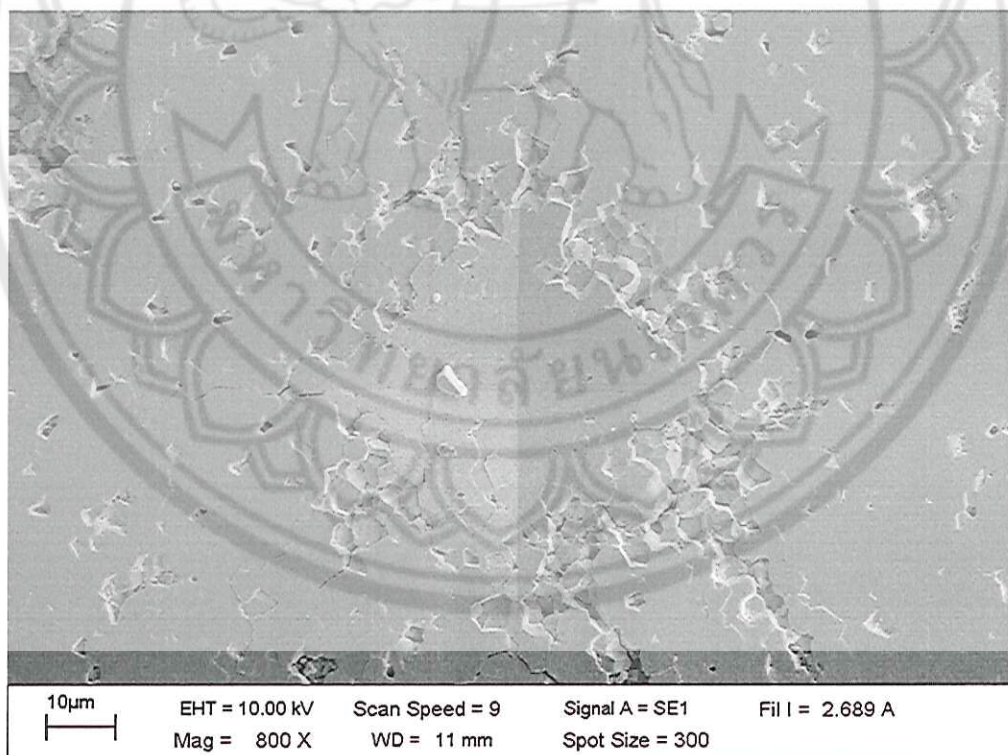
4.5 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยกดแบบวิกเกอร์บนผิวเซรามิก PZT

จากการนำเซรามิกที่ทำการทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์แล้ว มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคอีกครั้งเพื่อศึกษาถึงรอยกดที่ได้จากการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ จะได้ภาพดังรูป 4.31-

4.48

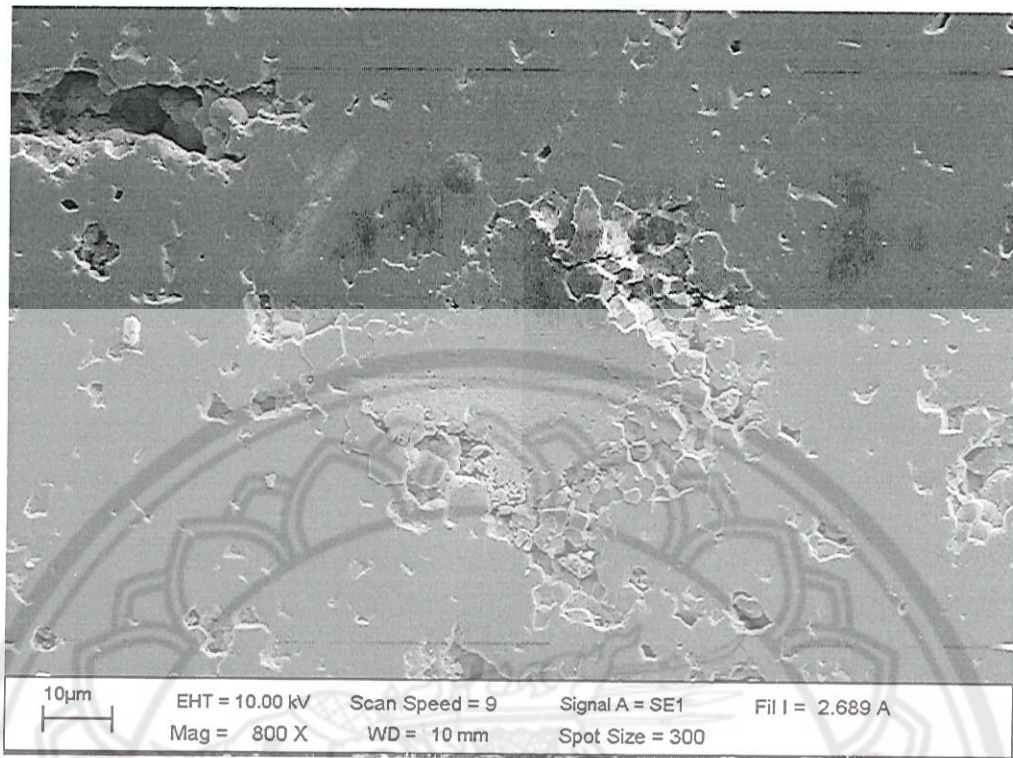


(ก)

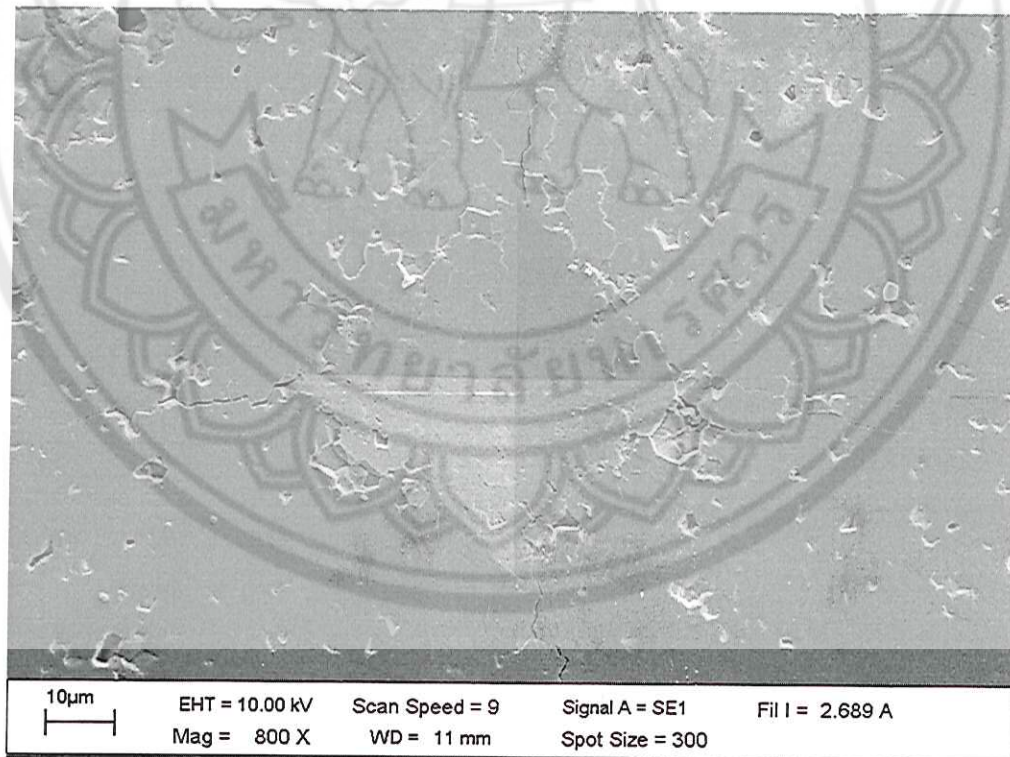


(ข)

รูป 4.31 ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง

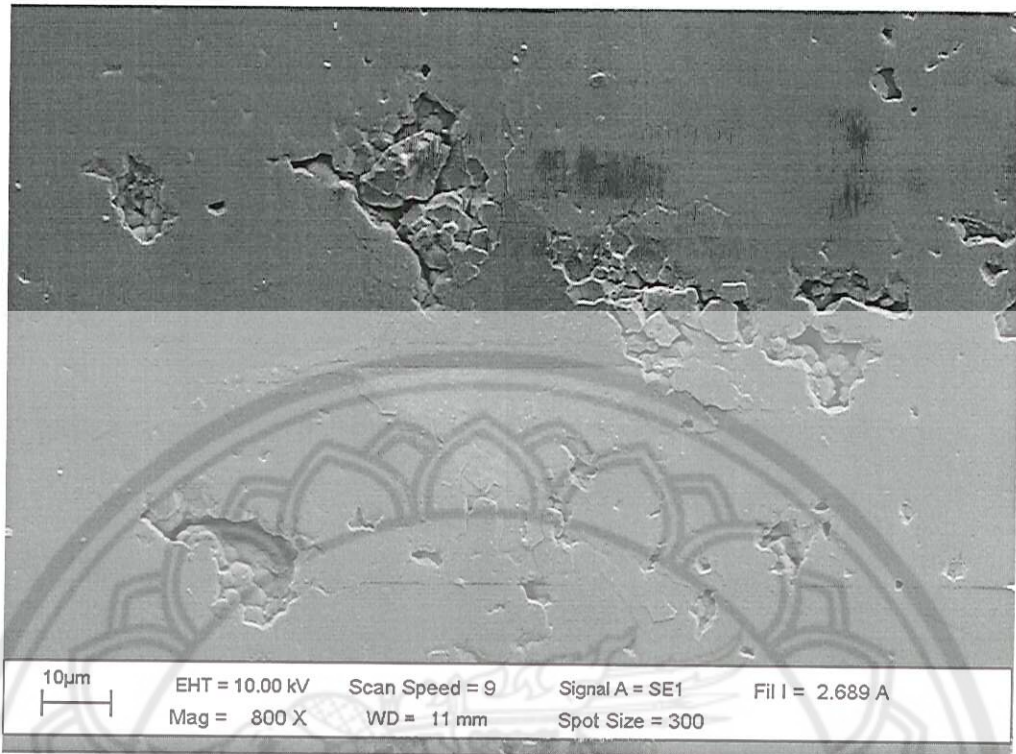


(ก)

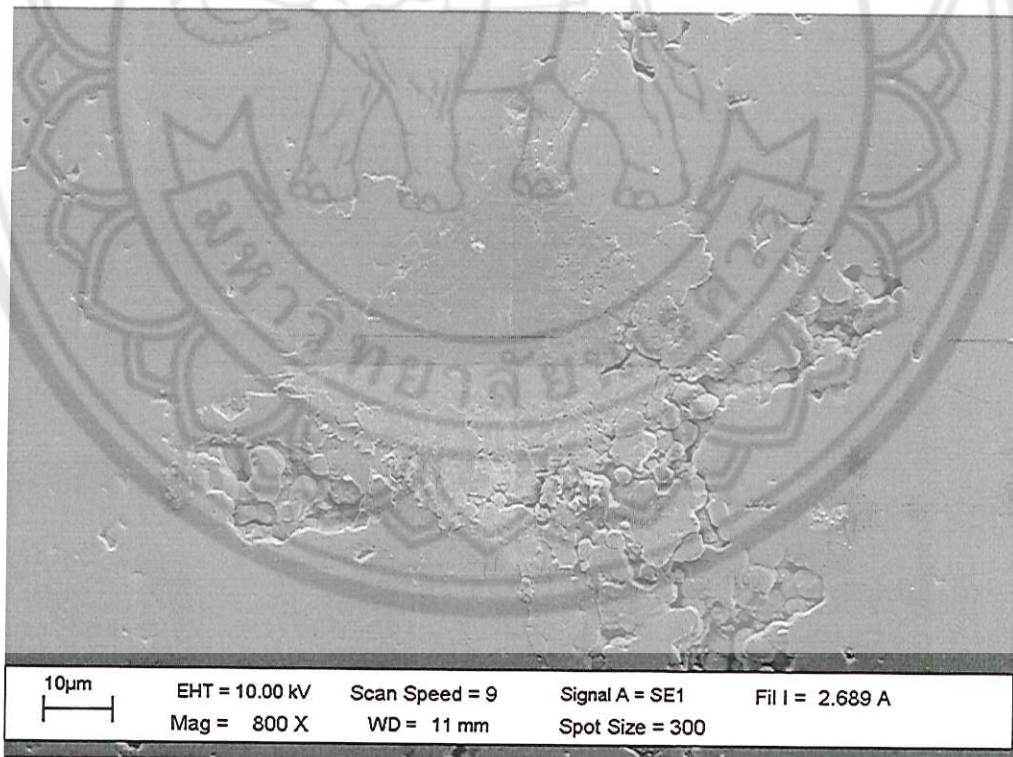


(ข)

รูป 4.32 ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง

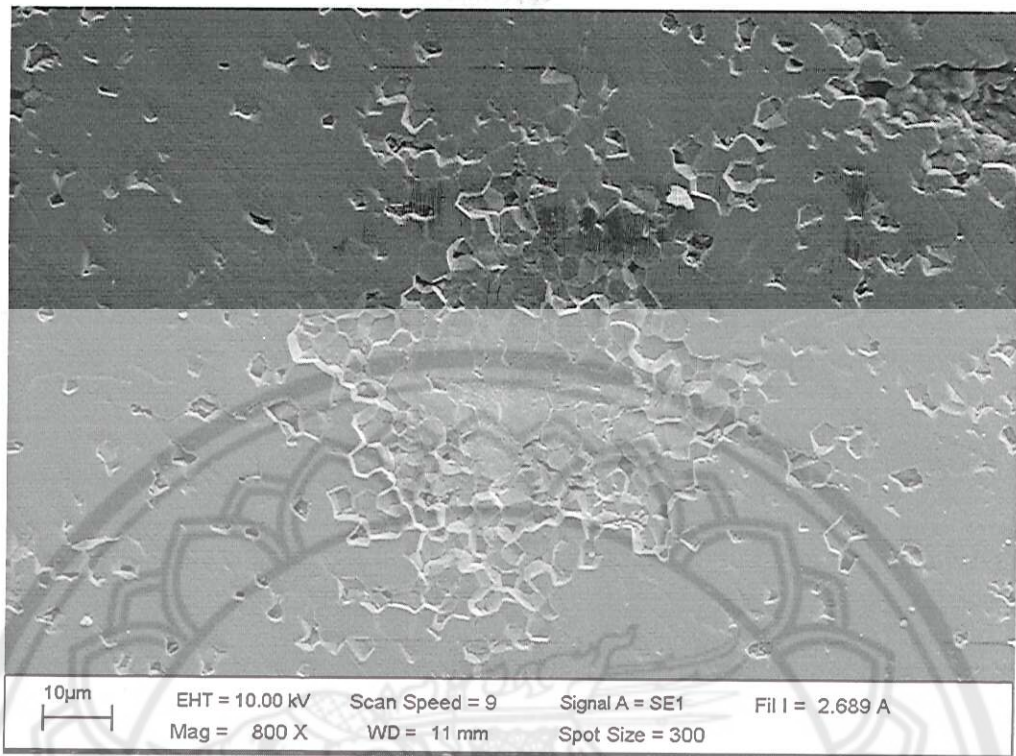


(ก)

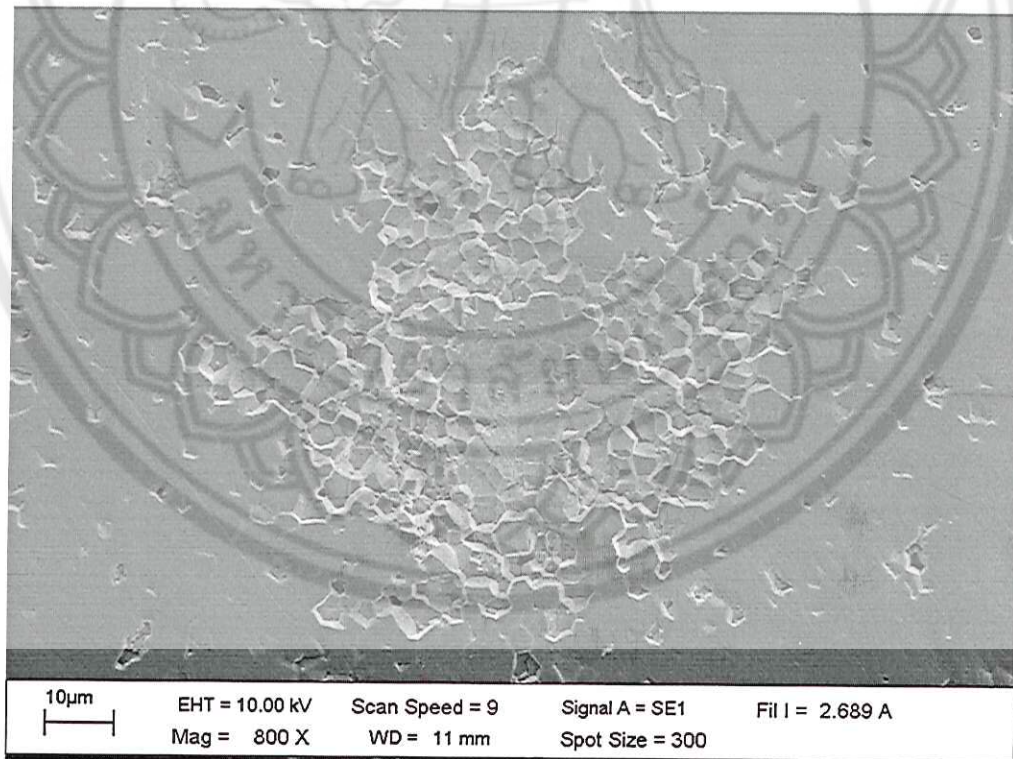


(ข)

รูป 4.33 ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 3 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง

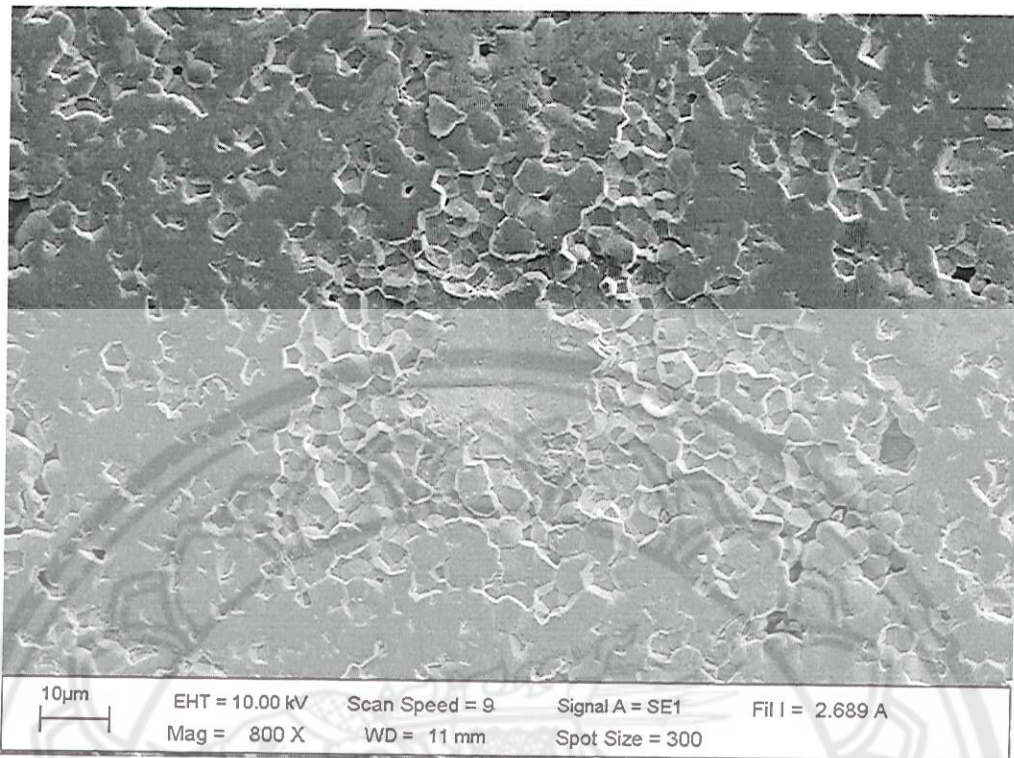


(ก)

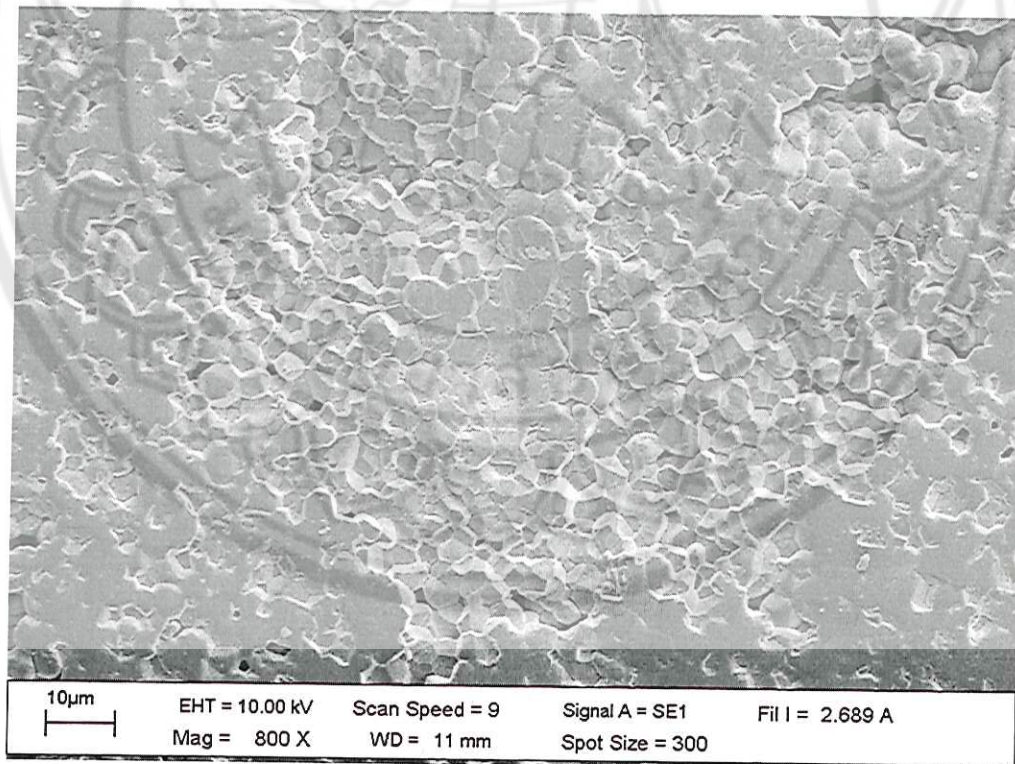


(ข)

รูป 4.34 ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง

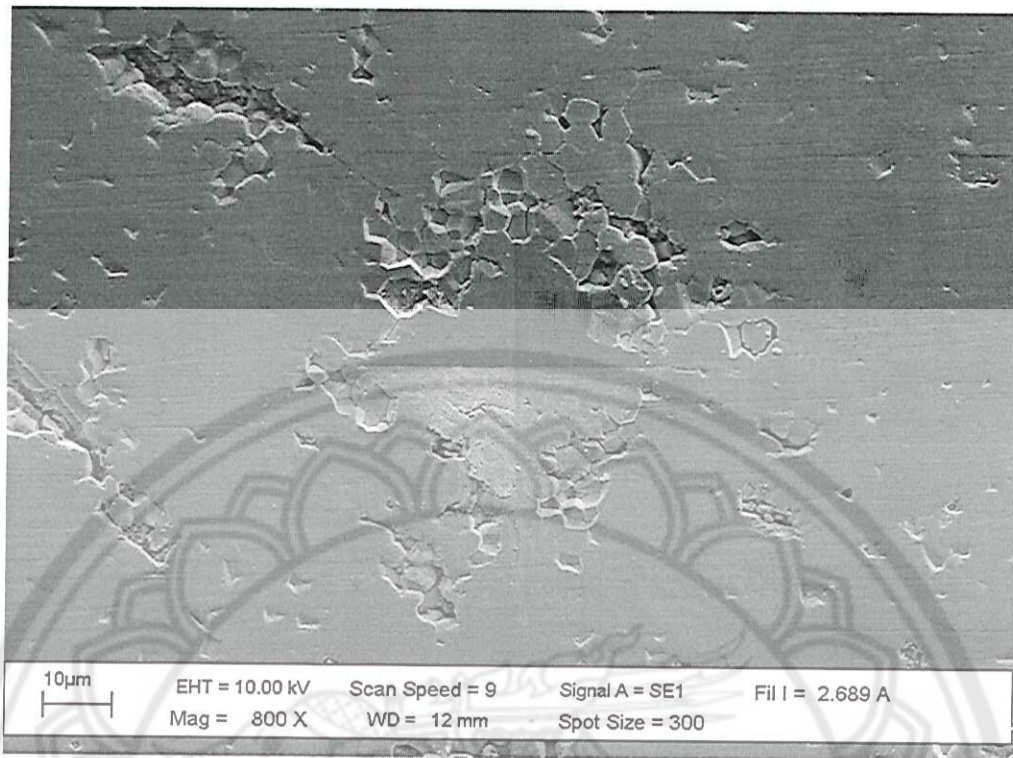


(ก)

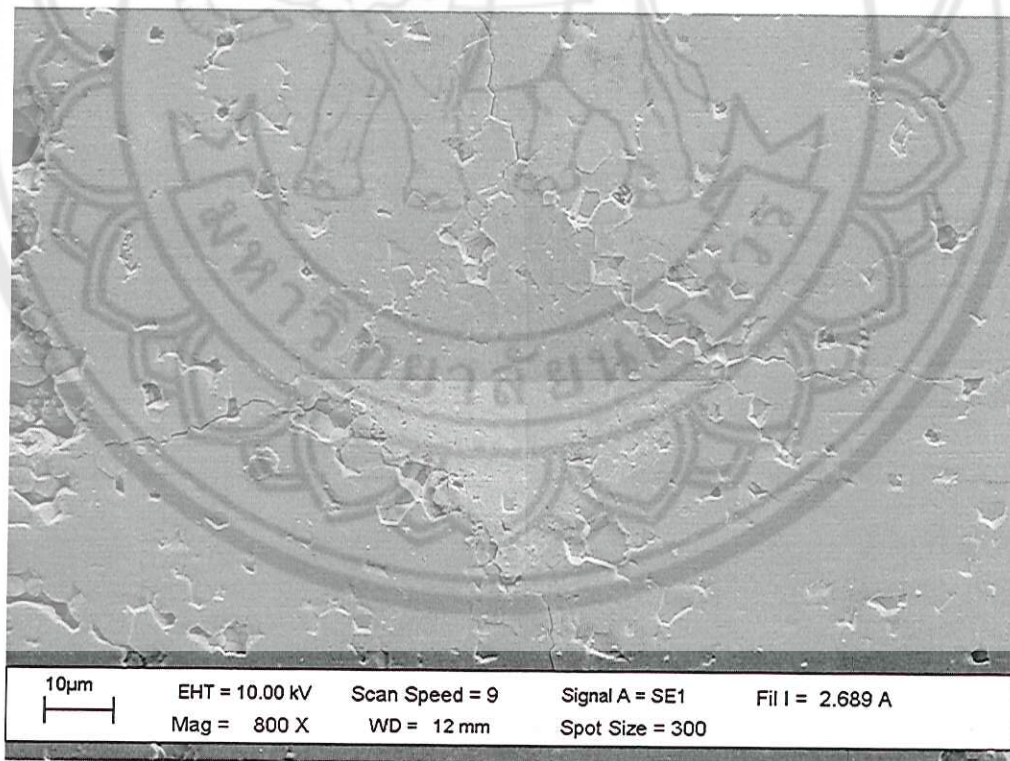


(ข)

รูป 4.35 ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตรา
การขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 5 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง

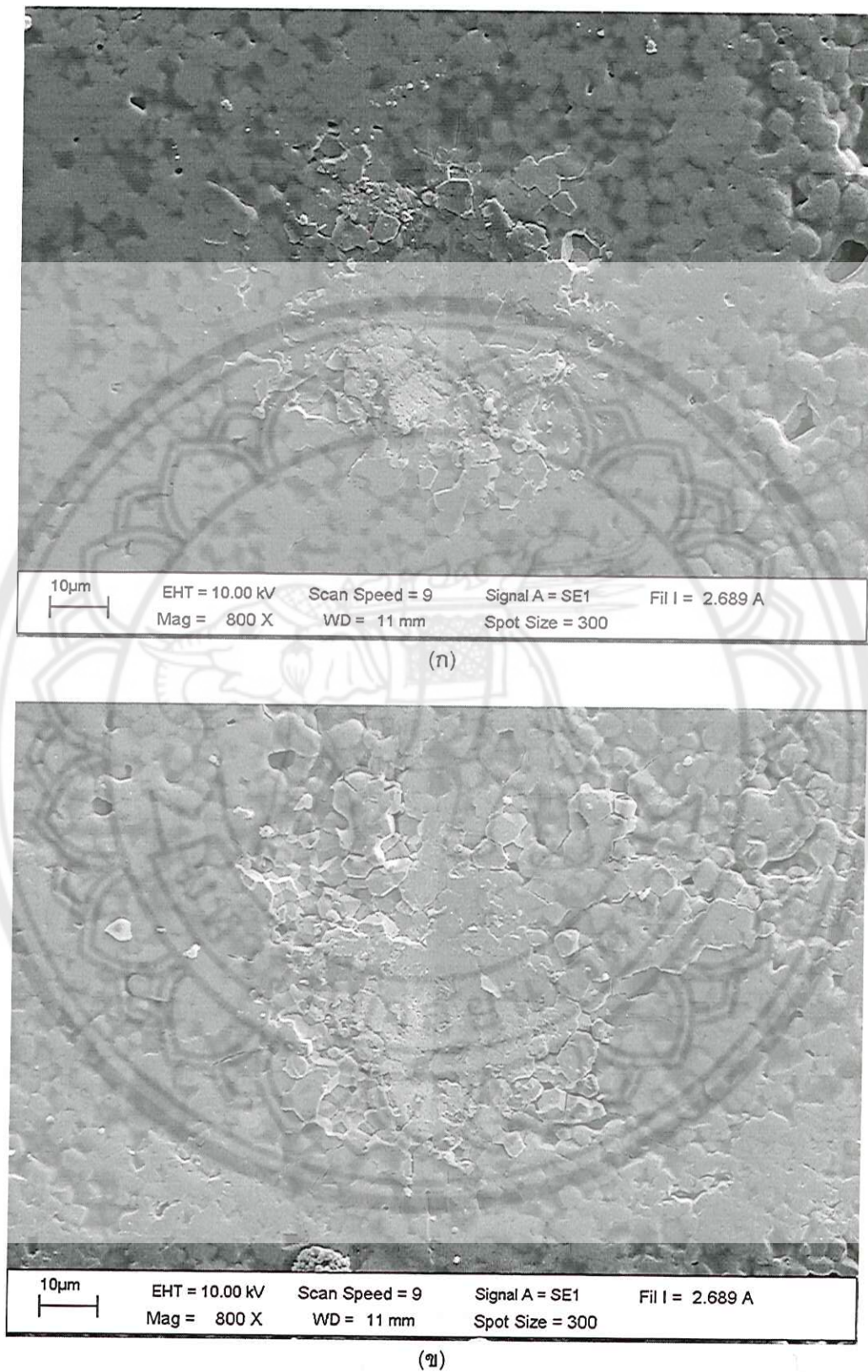


(ก)

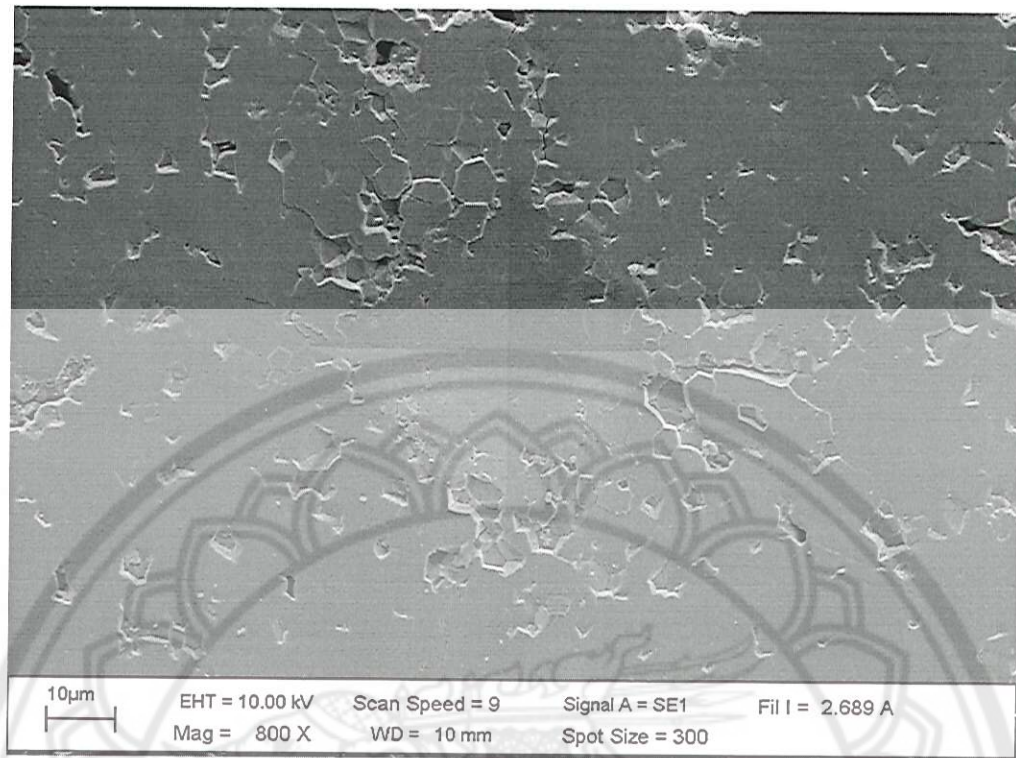


(ข)

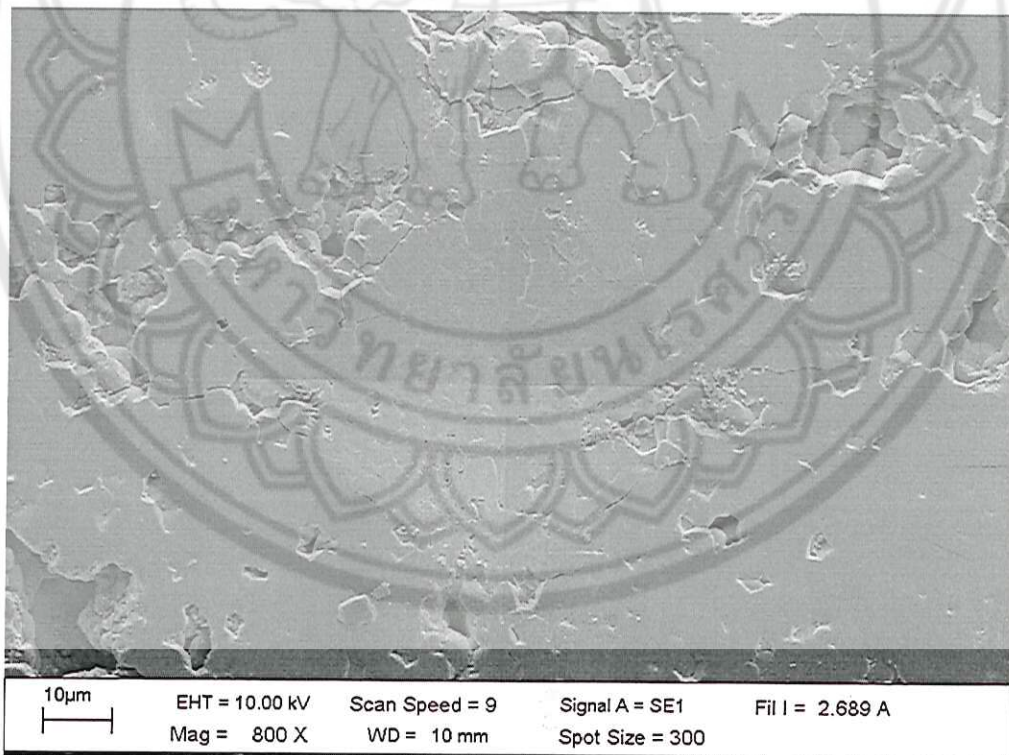
รูป 4.36 ภาพถ่าย SEM รอยกุดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150°C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น $5^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง



รูป 4.37 ภาพถ่าย SEM รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1150 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตรา
การขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °C/นาที โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง



(ก)



(ข)

รูป 4.48 ภาพถ่าย SEM รอยกุดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT เผาซินเตอร์ที่ 1200°C นาน 6 ชั่วโมง ด้วยอัตรา
การขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ โดยใช้แรงในการกด (ก) 300 กรัมแรง และ (ข) 500 กรัมแรง

จากภาพถ่าย SEM ในรูป 4.31-4.48 จะเห็นเป็นรอยบุ๋มของหัวกดมีขนาดต่างกันตามแรงที่ใช้กด และตามความแข็งของเซรามิกในเงื่อนไขนั้นๆ และที่สังเกตเห็นได้ชัดว่า ถ้าเซรามิกมีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์น้อย รอยกดที่ได้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ และรอยแตกจะเกิดขึ้นรอบๆ ขอบของรอยกด แต่ถ้าเซรามิกมีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สูง รอยกดที่ได้จากแรงกดที่เท่ากันจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และรอยแตกจะเกิดขึ้นบริเวณปลายของเส้นทแยงมุมมากกว่าที่จะเกิดรอบๆ รอยกด ที่เป็นเช่นนี้เพราะ เมื่อเซรามิกมีความแข็งไม่มาก โดนการกดหรือกระแทก รอยแตกที่เกิดขึ้นจึงมีการแตกออกทุกทิศทาง แต่ถ้าเซรามิกมีความแข็งมากขึ้น รอยแตกที่เกิดขึ้นจะเกิดบริเวณมุมของรอยกดเป็นส่วนใหญ่ เพราะเป็นบริเวณที่มีการพบกันของแนวกดทั้งสองแนว ทำให้เกิดความเครียดบริเวณมุมมากกว่าบริเวณอื่น



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และงานที่จะทำต่อไป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเซรามิก และค่าความแข็งซึ่งเป็นสมบัติเชิงกล ของเซรามิกในเลดเซอร์โคเนตไททานต ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการ/ลงอุณหภูมิเป็น 3, 5 และ 10 °C/นาที่ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตาราง 5.1-5.4 ต่อไปนี้

ตาราง 5.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C แปรค่าเวลาในการเผาแซ่และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ เมื่อวัดที่ความถี่ 10 kHz

อัตราการขึ้น/ลง อุณหภูมิ	ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C			ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C		
	3 °C/นาที่	5 °C/นาที่	10 °C/นาที่	3 °C/นาที่	5 °C/นาที่	10 °C/นาที่
เวลาเผ้าแซ่						
2 ชั่วโมง	11400	11400	11600	12400	12500	14500
4 ชั่วโมง	7800	12100	12000	13800	11600	13600
6 ชั่วโมง	12900	12300	10600	16400	14500	13500

ตาราง 5.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C แปรค่าเวลาในการเผาแซ่และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ เมื่อวัดที่ความถี่ 100 kHz

อัตราการขึ้น/ลง อุณหภูมิ	ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C			ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C		
	3 °C/นาที่	5 °C/นาที่	10 °C/นาที่	3 °C/นาที่	5 °C/นาที่	10 °C/นาที่
เวลาเผ้าแซ่						
2 ชั่วโมง	10200	9900	10400	10700	11100	12100
4 ชั่วโมง	6600	10800	10200	12000	10200	12300
6 ชั่วโมง	10900	10900	9400	14100	12800	12300

ตาราง 5.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C แปรค่าเวลาในการเผาแซ่และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ เมื่อวัดที่ความถี่ 1 MHz

อัตราการใช้/ลง อุณหภูมิ เวลาเผ่าแซ่	ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C			ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C		
	3 °C/นาทึ	5 °C/นาทึ	10 °C/นาทึ	3 °C/นาทึ	5 °C/นาทึ	10 °C/นาทึ
2 ชั่วโมง	21300	14300	19200	9800	22800	18800
4 ชั่วโมง	20500	21000	14000	10900	19500	21800
6 ชั่วโมง	15700	19600	23200	12900	27200	21000

ตาราง 5.4 ค่าความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ ของเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C แปรค่าเวลาในการเผาแซ่และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ (ในหน่วย GPa)

อัตราการใช้/ลง อุณหภูมิ เวลาเผ่าแซ่	ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C			ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C		
	3 °C/นาทึ	5 °C/นาทึ	10 °C/นาทึ	3 °C/นาทึ	5 °C/นาทึ	10 °C/นาทึ
2 ชั่วโมง	1.89	2.60	2.67	2.92	3.10	3.33
4 ชั่วโมง	2.03	2.54	2.66	2.74	2.92	3.11
6 ชั่วโมง	2.52	2.42	2.39	3.10	2.69	2.59

จากตาราง 5.1-5.3 แสดงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดของเซรามิก PZT ที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C ที่แปรค่าเวลาในการเผาแซ่ และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ เมื่อวัดด้วยความถี่ 10, 100 kHz และ 1 MHz นั้น ไม่พบความสัมพันธ์ หรือแนวโน้มในการแปรค่าเวลาในการเผาแซ่ และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ แต่ถ้าพิจารณาแยกโดยแปรค่าเวลาในการเผาแซ่อย่างเดียว หรือแปรค่าอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิในการเผาอย่างเดียว โดยให้อีกตัวแปรหนึ่งคงที่ ก็ จะพบความสัมพันธ์ดังนี้

1. เซรามิกที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 3 °C/นาทึ นั้น จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการเผาแซ่สูงขึ้น ในทุกความถี่ที่ทำการวัด
2. เซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด (ϵ_r , max) สูงกว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C ที่ใช้เวลาในการเผาแซ่เท่ากัน และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อใช้ความถี่ในการวัด 10 และ 100 kHz

3. เซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 3 °C/นาที จะได้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด เป็น 16400 และ 14100 เมื่อวัดด้วยความถี่ 10 kHz และ 100 kHz ตามลำดับ แต่เมื่อวัดด้วยความถี่ 1 MHz นั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด เป็น 27200 พบในเงื่อนไขที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °C/นาที
4. ในทุกความถี่ที่ใช้ในการวัดเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด มีค่ามากที่สุด เมื่อเผาซินเตอร์นาน 6 ชั่วโมง ซึ่งกล่าวได้ว่าเวลาในการเผาเซรามิกจึงมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

จากตาราง 5.4 แสดงถึงความแข็งแรงระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ของเซรามิก PZT ที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C ที่แปรค่าเวลาในการเผาเซรามิกและอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ ก็ไม่พบความสัมพันธ์ หรือแนวโน้มในการแปรค่าเวลาในการเผาเซรามิกและอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ แต่ถ้าพิจารณาแยกโดยแปรค่าเวลาในการเผาเซรามิกอย่างเดียว หรือแปรค่าอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิในการเผาอย่างเดียว โดยให้อีกตัวแปรหนึ่งคงที่ ก็จะไม่พบความสัมพันธ์ดังนี้

5. เซรามิกที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C มีค่าความแข็งแรงระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์มากกว่าเซรามิก PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1150 °C ที่ใช้เวลาในการเผาเซรามิกเท่ากัน และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเดียวกัน
6. เซรามิกที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C นาน 2 และ 4 ชั่วโมง จะมีค่าความแข็งแรงระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่อเผาเซรามิกนาน 6 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์จะลดลงเมื่ออัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิสูงขึ้น
7. ค่าความแข็งแรงระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลองมีค่า 3.33 GPa เมื่อเผาซินเตอร์เซรามิก PZT ที่อุณหภูมิ 1200 °C นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/นาที
8. โครงสร้างจุลภาคของรอยกดแบบวิกเกอร์ ถ้าเซรามิกมีค่าความแข็งแรงระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์น้อย จะพบว่ารอยกดมีขนาดใหญ่ และมีรอยแตกรอบๆ บริเวณรอยกด แต่ถ้าเซรามิกมีค่าความแข็งแรงระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์สูงขึ้น ขนาดของรอยกดจะเล็กลงเมื่อใช้โหลดในการกดเท่ากัน และรอยแตกจะพบบริเวณปลายของเส้นทแยงมุมมากกว่าที่จะเกิดขึ้นรอบๆ รอยกด

5.2 งานที่จะทำต่อไป

1. ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของเซรามิกในระบบ PZT ที่ได้จากกระบวนการเตรียมแบบมิกซ์ออกไซด์ดั้งเดิม (conventional mixed oxide) กับการเตรียมแบบมิกซ์ออกไซด์ 2 ขั้นตอน (two state mixed oxide)
2. ศึกษาผลของการเติมสารเจือในระบบอื่นลงในเซรามิก PZT เพื่อปรับสมบัติต่างๆ ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน



เอกสารอ้างอิง

- [1] A.J. Moulson and J.M. Herbert, Electroceramics: Material, Properties and Applications, Chapman & Hall, London, 1993.
- [2] B. Jaffe, W.R. Cook and H. Jaffe, Piezoelectric Ceramics, Academic Press, London, 1971.
- [3] ชมพูนุช พีชมาก, "อิทธิพลของการขึ้น/ลงอุณหภูมิ และเวลาในการเผาเซรามิกที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต", เอกสารรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์, ปี 2549.
- [4] G.H. Haertling, "Ferroelectric Ceramics: History and Technology," *J. Am. Ceram. Soc.*, 82: 797-818, 1999.
- [5] W.F. Smith, วัสดุวิศวกรรม, กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล, 2544.
- [6] <http://www.plasticszone.com/moldflow/impawelcome.nsf/Documents/a2200002!OpenDocument> (25/08/2002)
- [7] เอกรัฐ มีชูวาศ, ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบและสมบัติเชิงกลในเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต/เลดแมกนีเซียมไนโอเบต, การค้นคว้าเชิงอิสระวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์), คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2545.
- [8] <http://www.metallography.com/amp/micro.htm> (25/08/2002)
- [9] K.R. Han, H.J. Koo, M.J. Hong and C.S. Lim, "Simple Synthesis of Submicrometer Lead Titanate Powder by Precipitation of TiO_2 Precursor on PbO Particulates", *J. Am. Ceram. Soc.*, 83: 971-973, 2000.
- [10] D.L. Hankey and J.V. Biggers, "Solid-State Reaction in the System $\text{PbO-TiO}_2\text{-ZrO}_2$ ", *J. Am. Ceram. Soc.*, 64: c172-c173, 1981
- [11] S.S. Chandratreya, R.M. Fulrath and J.A. Pasle, "Reaction Mechanisms in the Formation of PZT Solid Solution", *J. Am. Ceram. Soc.*, 64: 422-425, 1981.
- [12] D.L. Hankey and J.V. Biggers, "Effect of Packing Pressure and Particle Size Variations on the Reaction Kinetics for PbTiO_3 and PbZrO_3 Formation", *J. Am. Ceram. Soc.*, 65: c74-c75, 1982.
- [13] S.H. Cho, J.B. Biggers, "Characterization and Sintering of Lead Zirconate Titanate Powders", *J. Am. Ceram. Soc.*, 66: 743-746, 1983.

- [14] J. Xue and W. John, "Lead Zirconate Titanate Via Reaction Sintering of Hydroxide Precursors", *J. Mat. Res.*, 14[4]: 1503-1509, 1999.
- [15] A. Garg and D.C. Aquawal, "Effect of Net PbO content on Mechanical and Electromechanical Properties of PZT Ceramics", *Mat. Sci. Eng. B*, 60: 46-50, 1999.
- [16] J. Ryu, J-J. Choi and H-E. Kim, "Effect of Heating Rate on Sintering Behavior and Piezoelectric Property of PZT Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, 84[4]: 902-904, 2001.
- [17] H.J. Hwang and K. Niihara, "Subcritical Crack Growth Phenomenon and Fractography of Barium Titanate and Barium Titanate-Based Composite", *Scripta Mater.*, 36: 183-187, 1996.
- [18] A. Garg and D.C. Agrawal, "Effect of Net PbO Content on Mechanical and Electromechanical Properties of Lead Zirconate Titanate Ceramics", *Mat. Sci. Eng. B*, 60: 46-50, 1999.
- [19] A. Garg and T.C. Goel, "Mechanical and Electrical Properties of PZT Ceramics (Zr:Ti = 0.40:0.60) Related to Nd^{3+} Addition", *Mat. Sci. Eng. B*, 60: 128-132, 1999.
- [20] J.M. Calderon-Mereno, F. Guiu, M. Meredith and M.J. Reece, "Fracture Toughness Anisotropy of PZT", *Mat. Sci. Eng. A*, 234-236: 1062-1066, 1997.
- [21] E.J. Kramer, P. Haasen and R. Cahn, *Materials Science and Technology*. New York: VCH, 1992.
- [22] Joint Committee for Powder Diffraction Standards (JCPDS) PDF-4. International Centre for Diffraction Data (ICDD), 2000.
- [23] Instructure Manual, Microhardness Tester MXT- α 3, MXT- α 7, MXT- α 3e, MXT- α 7e, Matsuzawa Seiki Co.,LTD.
- [24] Powder Diffraction File, Card No. 33-0784. (2000). Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) PDF-4, International Centre for Diffraction Data (ICDD).
- [25] S. Rhim, H. Bak, S. Hong and O. Kim, "Effects of Heating Rate on the Sintering Behavior and the Dielectric Properties of $Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO_3$ Ceramics Prepared by Boron-Containing Liquid-Phase Sintering". *J. Am. Ceram. Soc.*, 83[12]: 3009-3013, 2000.

- [26] ชมพูนุช พีชมาก, "อิทธิพลของอัตราการใช้ความร้อนต่อความแน่นตัว และค่าความแข็งแบบ
วิกเกอร์ของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต". วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.,
ปีที่ 4 ฉบับที่ 1: 105-114, พ.ศ. 2550.

