ผลของตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งและสมบัติของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก

ปริญญานิพนธ์
ของ
อานนท์ ไกรป๊อก

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
กรกฎาคม 2560

ผลของตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งและสมบัติของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก

ปริญญานิพนธ์
ของ
อานนท์ ไกรป๊อก

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
กรกฎาคม 2560
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ผลของตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งและสมบัติของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก

บทคัดย่อ

ของ

อานนท์ ไกรป๊อก

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
กรกฎาคม 2560

อานนท์ ไกรป๊อก. (2560). *ผลของตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งและสมบัติของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก.* ปริญญานิพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: อาจารย์ ดร.ปัทมาศ บิณฑจิตต์.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งและสมบัติของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate, $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$, PZT) PZT เป็นวัสดุที่มีสมบัติไพอิโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น โดยเฉพาะการนำไปใช้งานเป็น เซนเซอร์ และแอคชัวเอเตอร์ งานวิจัยนี้ทำการขึ้นรูปแผ่นเลดเซอร์โคเนตไททาเนต ($Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$, PZT) โดยวิธีเทปคาสติ้งแบบมีน้ำเป็นองค์ประกอบ และใช้แฮนด์คาสในการขึ้นรูปแทนเครื่อง doctor blade หลังจากขึ้นรูปเป็นแผ่น PZT นำแผ่น PZT ไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100℃ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค และสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PZT ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าเมื่อทำการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสานส่งผลให้เกิดฟองอากาศบนแผ่น PZT มากขึ้นแต่ความหนืดของสเลอรีลดลง ทำให้การขึ้นรูปง่ายขึ้น อัตราส่วนของการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสานที่ 5-60 wt.% สามารถขึ้นรูปได้ โดยอัตราส่วนการลดปริมาณที่ 40 wt.% เหมาะสมกับการขึ้นรูปแผ่น PZT มากที่สุด โครงสร้างผลึกของแผ่น PZT เป็นแบบ polycrystalline และพบว่าเมื่อลดปริมาณตัวประสาน เฟสที่ได้ยังคงเป็นเฟส PZT โครงสร้างทางจุลภาคของ PZT พบว่าเกรนของแผ่น PZT มีขนาดค่อนข้างเท่ากัน มีการกระจายตัวของขนาดเกรนต่ำ จากการลดปริมาณระบบ organic และลดปริมาณตัวประสาน ปริมาณของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น แต่ลักษณะของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT ด้วยการนำแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกมาซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น อบไล่ความชื้นที่ 90℃ เป็นเวลา 30 นาที กดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกด้วยแรง 5,000 N เป็นเวลา 6 วินาที เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100℃ เป็นเวลา 30 นาที พบว่าการลดปริมาณระบบ organic 50 wt.% ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงสุด และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ 1 kHz เป็น 813.75 และ 3.17 % ตามลำดับ และเมื่อลดปริมาณตัวประสาน 40 wt.% ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงสุด และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 kHz เป็น 503.37 และ 4.29 % ตามลำดับ สำหรับแผ่น PZT ที่เตรียมได้มีความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 99.6-365.1 μm

EFFECT OF BINDER TO TAPE CASTING FABRICATION
AND THE PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC MATERIAL

AN ABSTRACT
BY
ARNON KRAIPOK

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Science in Physics
at Srinakharinwirot University
July 2017

Arnon Kraipok. (2017). *Effects of Binder to Tape Casting Fabrication and the Properties Piezoelectric Material.* Master thesis M.S. (Physics). Bangkok: Graduat School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Dr. Patamas Binthachitt.

The effects of the reduction of organic systems and the binder to tape casting fabrication of piezoelectric (PZT) material: lead zirconate titanate: Pb ($Zr_{0.52}Ti_{0.48}$)O_3, PZT) was studied. PZT has superior piezoelectric properties and is used as sensor and actuator. In this research, Pb($Zr_{0.52}Ti_{0.48}$)O_3 was fabricated by aqueous tape casting by hand casting instead of a seclpel blade. After fabrication, PZT was sintered at 1100°C for thirty minutes . The crystal structure, microstructure, and dielectric properties of PZT tapes were investigated. It was found that the casting became easier when decreasing the organic system and binder. In contrast, PZT tapes have more bubbles. PZT tapes can be fabricated when decreasing the organic system and binder up to sixty wt.%. The reduction of foyty wt.% was the optimum condition to fabricate PZT. The crystal structure of PZT tapes with and without a decreasing organic system and binder were polycrystalline. The grain size of PZT tapes were almost uniform with low grain size distributions. With a decreasing organic system and binder, more porosity was observed. In addition, three and five layers of PZT tapes were stacked to increase strength and thickness. They were stacked and baked at ninety degrees for thirty minutes and then the stacked PZT tapes were pressed by hydraulic pressure at 5,000 N for six secound. Then, the stacked PZT tapes were sintered at 1100°C for thirty minutes. In the organic system reduction, it is found that the dielectric constant of PZT tape with a decreasing organic system for fifty wt.% was the highest at one kHz as 813.75 with s los of 3.17% loss. In the case of the binder reduction study, the reduction of binders for forty wt.% performed highest dielectric constant at one kHz as 503.37 with 4.29% loss. The thickness of PZT tapes after sintering ranged from 99.6 to 365.1 μm.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
ผลของตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งและสมบัติของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก
ของ
อานนท์ ไกรป๊อก

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)
วันที่........เดือน................พ.ศ. 2560

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

....ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ปัทมาศ บิณฑจิตต์)

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

....ประธาน
(ดร.ภาวดี อังค์วัฒนะ)

....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ปัทมาศ บิณฑจิตต์)

....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ พงษ์หิรัญ)

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับทุนอุดหนุน
จาก
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีจาก อาจารย์ ดร.ปัทมาศ บิณฑจิตต์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ รวมถึงความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน อีกทั้งความเมตตา และน้ำใจอันประเสริฐของท่านที่มีต่อผู้วิจัยตลอดระยะเวลาของการทำการวิจัย ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำปริญญานิพนธ์ เรื่อง “ผลของตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งและสมบัติของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก” สำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้วิจัยซาบซึ้งและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ดร.ภาวดี อังค์วัฒนะ รองผู้อำนวยการศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ความกรุณาในการเป็นประธานในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ อีกทั้งให้ความรู้ ให้คำแนะนำ แก้ไขเพิ่มเติม รวมถึงเอื้อเฟื้อวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือทดสอบในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ พงษ์หิรัญ ที่ได้เป็นกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่าน ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้คำแนะนำ ตลอดระยะเวลาในการศึกษา

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ทักษ์ ทองภูเบศร์ สถาบันอาศรมศิลป์ ที่ให้การช่วยเหลือในการสร้างเครื่องบดละเอียดสำหรับทำการวิจัยรวมถึงให้คำแนะนำในการทำการวิจัย ขอขอบคุณนางสาวปัตมาภรณ์ ธิมากุล ผู้ช่วยนักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้การช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการทำวิจัย ขอขอบคุณนางสาวจารุวรรณ ธรรมประสิทธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือดำเนินการในเรื่องการใช้เครื่องมือต่างๆ ในการทำการวิจัยจนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณนายธัญนพ นิลกำจร นักวิทยาศาสตร์ ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องอัดไฮโดรริก

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เตาเผา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง LCR meter รุ่น A4980 Agilent บริษัท แมกเนคอมพ์ พรีซิชั่น เทคโนโลยี จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope(FE-SEM) รุ่น ∑IGMA HD VP และเครื่อง Q150R Rotary-Pumped Sputter Coater/Carbon Coater

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา น้องสาว และนางสาวปวีณ์สุดา คงเกตุ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

อานนท์ ไกรป๊อก

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
วัสดุไพอิโซอิเล็กทริก	5
ความเป็นมาของไพอิโซอิเล็กทริก	5
ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริก	7
เฟอร์โรอิเล็กทริก	8
อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส	10
โพลาไรเซชัน	10
โครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกท์	12
แบเรียมไททาเนต	13
เลดเซอร์โคเนตไททาเนต	15
สมบัติของไพอิโซอิเล็กทริก	20
สมบัติไดอิเล็กทริก	20
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์	20
การสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริก	23
ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก	24
ความทนทานต่อการพังทลายด้านไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก	25
สัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริก	26
แฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบ	27
แฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกล	28
สมบัติความต้านทานเชิงซ้อน	28
ค่าคงที่ความถี่	29

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ)	
การประยุกต์ใช้งานของไพอิโซอิเล็กทริก	29
อุปกรณ์ตรวจวัด	29
แอคชูเอเตอร์	30
แทรนส์ดิวเซอร์	30
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	30
การขึ้นรูปเลดเซอร์โคเนตไททาเนตด้วยวิธีเทปคาสติ้ง	30
วิธีการขึ้นรูปเซรามิก	30
การขึ้นรูปเซรามิกแบบเทปคาสติ้ง	31
การเผาผนึก	34
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
การวิเคราะห์เลดเซอร์โคเนต	40
การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	40
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	42
การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก	43
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	46
สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	46
อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	46
เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	47
ขั้นตอนการทำแผ่น PZT โดยวิธีเทปคาสติ้ง	47
การเตรียมสเลอรี	47
การขึ้นรูป	50
การเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT ด้วยการซ้อนทับ	52
การวิเคราะห์เลดเซอร์โคเนต	54
วิเคราะห์โครงสร้างผลึก	54
วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและความหนา	54
วิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก	56

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลวิจัยและอภิปรายผล	58
ผลทางกายภาพของแผ่น PZT	58
แผ่น PZT ที่ความหนา 450 μm ก่อนการเผาผนึก	58
แผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการซ้อนทับ	60
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่น PZT	65
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค และความหนา	66
แผ่น PZT ที่ความหนา 450 μm ก่อนการเผาผนึก	66
แผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการซ้อนทับ	69
การวัดความหนาของแผ่น PZT	72
ผลการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก	77
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	84
สรุปผลการวิจัย	84
ข้อเสนอแนะ	85
บรรณานุกรม	86
ประวัติย่อผู้วิจัย	91

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ชนิดของสารเจือในเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate, PZT)[5]......	18
2 สมบัติของตัวทำละลายต่างๆ [35-36]........	32
3 สารเพิ่มความเหนียว (plasticizer)[33]	33
4 สารช่วยกระจายตัว (dispersants) [37]	33
5 ส่วนผสมของสเลอรี PZT ที่ไม่มีการลดปริมาณตัวประสาน [11]........	48
6 ความหนาหลังการเผาผนึก ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อทำการลดปริมาณระบบ organic ของแผ่น PZT ที่มีการเพิ่มความแข็งแรงโดยการนำแผ่น PZT ซ้อนทับกัน 3 แผ่น........	77
7 ความหนาหลังการเผาผนึก ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อทำการลด ปริมาณระบบ organic ของแผ่น PZT ที่มีการเพิ่มความแข็งแรงโดยการนำแผ่น PZT ซ้อนทับกัน 5 แผ่น........	78
8 ความหนาหลังการเผาผนึก ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อทำการลดปริมาณตัวประสานของแผ่น PZT ที่มีการเพิ่มความแข็งแรงโดยการนำแผ่น PZT ซ้อนทับกัน 3 แผ่น........	78
9 ความหนาหลังการเผาผนึก ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อทำการลดปริมาณตัวประสานของแผ่น PZT ที่มีการเพิ่มความแข็งแรงโดยการนำแผ่น PZT ซ้อนทับกัน 5 แผ่น........	79

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ **หน้า**

1 การแบ่งผลึกด้วยการพิจารณาจากสมมาตรของผลึก[6] 6
2 ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริก (ก) แบบทางตรง (direct piezoelectric effect) (ข) แบบผันกลับ (converse piezoelectric effect)[5] 6
3 ไดโพลภายในวัสดุ (ก) ก่อนการโพลลิง (ข) ขณะทำการโพลลิงจนเกือบสมบูรณ์ (ค) หลังการโพลลิงและนำแรงดันไฟฟ้าออกแล้ว[15-16] 7
4 ไดโพลในผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกอุดมคติที่ค่าสนามไฟฟ้าแตกต่างกันในการโพลาไรเซชันของวงฮิสเทอร์รีซีส[6] 9
5 วงฮิสเทอรีซีส (hysteresis loop) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชัน (polarization) กับสนามไฟฟ้า (electric field) (ก) ผลึกเชิงเดี่ยวของ $BaTiO_3$ (ข) เซรามิก $BaTiO_3$[5] 9
6 การกระจายในโพลาไรเซชันของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่างๆ[18] 11
7 การจัดเรียงไดโพลภายในเนื้อวัสดุ (ก) ก่อนการให้สนามไฟฟ้า (ข) หลังการให้สนามไฟฟ้า[5] 12
8 โครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกท์ (perovskite crystal structure)[4]...................... 13
9 หน่วยเซลล์ของแบเรียมไททาเนต (barium titanate, $BaTiO_3$)[5] 14
10 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแบเรียมไททาเนต ณ อุณภูมิต่างๆ[5] 14
11 วงฮิสเทอรีซีส (ก) ผลึกเชิงเดี่ยวของ $BaTiO_3$ (ข) เซรามิกของ $BaTiO_3$[5].................... 15
12 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกท์ของเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate, PZT) (ก) แบบลูกบาศก์ (cubic) (ข) เตตระโกนอล (tetragonal)[16] 16
13 เฟสไดอะแกรมของ PZT (phase diagram of Lead Zirconate Titanate)[5]...... 17
14 ความบกพร่องของผลึกใน PZT ที่เจือด้วยตัวรับ (acceptor dopants)[24].............. 19
15 ความบกพร่องของผลึกใน PZT ที่เจือด้วยตัวให้ (donor dopants)[24]..................... 20
16 (ก) ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน 2 ชุดที่ต่อในวงจรไฟฟ้าเดียวกัน (ข) ตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นขนาน[24 21
17 ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจากการรวมเวคเตอร์[34].......................... 25
18 การกำหนดทิศทางในวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก[27]... 26

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ **หน้า**

19 ส่วนผสมของสเลอรีสำหรับเทปคาสติ้ง ผงเซรามิกเป็นอลูมินา (alumina) ยกเว้นของ Ushifusa และ Cima ใช้ผงเซรามิกเป็นมัลไลท์ (mullite)[10]........................... 35

20 ส่วนผสมของสารเติมในสเลอรีสำหรับเทปคาสติ้ง[10].. 36

21 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยสำหรับการบดย่อยในช่วงเวลาต่างๆ[39]... 38

22 ขนาดอนุภาคการกระตัวของ PZT สำหรับเวลาในการบดย่อยต่างๆ[36]...................... 38

23 deflocculation curve ของ 60 wt.% ทำการบดย่อย 30 ชั่วโมง[39]....................... 39

24 ฟิล์มหนา PZT ที่พร้อมใช้งาน[8] 40

25 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อตกกระทบกับหน่วยเซลล์[23]...................................... 42

26 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)[33]..................... 43

27 เครื่องวัด LCR แบบมือถือ[41] 44

28 เครื่องวัด LCR แบบตั้งโต๊ะ[41] 45

29 การเตรียมสเลอรี.. 49

30 ขั้นตอนการเผาผนึก.. 50

31 การขึ้นรูป.. 51

32 การเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT ด้วยการซ้อนทับแผ่น PZT และกดด้วยเครื่องไฮดรอลิก.. 53

33 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) PANalytical รุ่น X’ Pert PRO [42]............ 54

34 เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) รุ่น ∑IGMA HD VP [43] 55

35 เครื่อง Q150R Rotary-Pumped Sputter Coater/Carbon Coater [44].............. 55

36 ขั้วอิเล็กโทรด (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง ของแผ่น PZT... 56

37 เครื่อง LCR meter รุ่น A4980 Agilent.. 57

38 แผ่น PZT ก่อนและหลังการเผาผนึก ที่ความหนา 450 µm ก่อนการเผาผนึก (ก) ไม่มีการลดตัวประสาน (ข) ลดตัวประสาน 5 wt.% (ค) ลดตัวประสาน 10 wt.% (ง) ลดตัวประสาน 20 wt.% (จ) ลดตัวประสาน 30 wt% (ฉ) ลดตัวประสาน 40 wt.% (ช) ลดตัวประสาน 50 wt.% (ซ) ลดตัวประสาน 60 wt.%.................... 59

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

39 แผ่น PZT ก่อนและหลังการกดด้วย (ก) แรงกด 5,000 N (ข) แรงกด 10,000 N (ค) 15,000 N เป็นเวลา 12 วินาที........ 60

40 แผ่น PZT ก่อนและหลังการกด ด้วยแรงกด 5,000 N ที่ระยะเวลาการกด (ก) 3 วินาที (ข) 6 วินาที (ค) 9 วินาที และ (ง) 12 วินาที........ 61

41 แผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง ก่อนและหลังการเผาผนึก (ก) ไม่มีการลดระบบ organic (ข) ลดระบบ organic 5 wt.% (ค) ลดระบบ organic 10 wt.% (ง) ลดระบบ organic 20 wt.% (จ) ลดระบบ organic 30 wt% (ฉ) ลดระบบ organic 40 wt.% (ช) ลดระบบ organic 50 wt.%........ 63

42 แผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง ก่อนและหลังการเผาผน(ก) ไม่มีการลดตัวประสาน (ข) ลดตัวประสาน 5 wt.% (ค) ลดตัวประสาน 10 wt.% (ง) ลดตัวประสาน 20 wt.% (จ) ลดตัวประสาน 30 wt% (ฉ) ลดตัวประสาน 40 wt.% (ช) ลดตัวประสาน 50 wt.% 64

43 โครงสร้างผลึกของแผ่น PZT ที่ไม่มีการลดตัวประสาน เปรียบเทียบกับแผ่น PZT ที่มีการลดตัวประสาน 10 wt.% และลดตัวประสาน 50 wt.%........ 65

44 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT (ก) ไม่มีการลดระบบ organic (ข) ลดระบบ organic 10 wt.% (ค) ลดระบบ organic 20 wt.% (ง) ลดระบบ organic 30 wt.% (จ) ลดระบบ organic 40 wt% (ฉ) ลดระบบ organic 50 wt.% 67

45 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT (ก) ไม่มีการลดตัวประสาน (ข) ลดตัวประสาน 5 wt.% (ค) ลดตัวประสาน 10 wt.% (ง) ลดตัวประสาน 20 wt.% (จ) ลดตัวประสาน 30 wt% (ฉ) ลดตัวประสาน 40 wt.% (ช) ลดตัวประสาน 50 wt.% (ซ) ลดตัวประสาน 60 wt.% 68

46 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง (ก) ไม่มีการลดระบบ organic (ข) ลดระบบ organic 5 wt.% (ค) ลดระบบ organic 10 wt.% (ง) ลดระบบ organic 20 wt.% (จ) ลดระบบ organic 40 wt% (ฉ) ลดระบบ organic 50 wt.%........ 70

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ **หน้า**

47 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง (ก) ไม่มีการลดตัวประสาน (ข) ลดตัวประสาน 5 wt.% (ค) ลดตัวประสาน 20 wt.% (ง) ลดตัวประสาน 30 wt.% (จ) ลดตัวประสาน 40 wt% (ฉ) ลดตัวประสาน 50 wt.% 72

48 ความหนาหลังการเผาผนึกของแผ่น PZT จากภาพตัดขวางของโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง (ก) ไม่มีการลดระบบ organic (ข) ลดระบบ organic 5 wt.% (ค) ลดระบบ organic 10 wt.% (ง) ลดระบบ organic 20 wt.% (จ) ลดระบบ organic 40 wt% (ฉ) ลดระบบ organic 50 wt.% 74

49 ความหนาหลังการเผาผนึกของแผ่น PZT จากภาพตัดขวางของโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง (ก) ไม่มีการลดตัวประสาน (ข) ลดตัวประสาน 5 wt.% (ค) ลดตัวประสาน 20 wt.% (ง) ลดตัวประสาน 30 wt.% (จ) ลดตัวประสาน 40 wt% (ฉ) ลดตัวประสาน 50 wt.% 76

50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่ (Hz) ของแผ่น PZT ความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 112.3–321.3 μm โดยการปริมาณระบบ organic.................... 80

51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่ (Hz) ของแผ่น PZT ความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 214.6–365.1 μm โดยการปริมาณระบบ organic.................... 81

52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่ (Hz) ของแผ่น PZT ความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 99.6–242.6 μm ที่ทำการลดปริมาณตัวประสาน 82

53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่ (Hz) ของแผ่น PZT ความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 141.9–304.8 μm ที่ทำการลดปริมาณตัวประสาน.................... 83

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ไพอิโซอิเล็กทริก (piezoelectric) เป็นวัสดุที่มีความสำคัญและมีบทบาทมากในปัจจุบัน และถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการนำวัสดุไพอิโซอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้งานใน เซนเซอร์ (sensors) แอคชูเอเตอร์ (actuators) ทรานสดิวเซอร์ (transducers) และตัวเก็บประจุ (capacitors) เป็นต้น[1-3] เนื่องจากวัสดุไพอิโซอิเล็กทริกมีสมบัติที่โดดเด่นในการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เรียกว่า ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกทางตรง (direct piezoelectric effect) คือ เมื่อมีแรงกล (mechanical force) มากระทำต่อวัสดุจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า (voltage) และปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกแบบผันกลับ (converse piezoelectric effect) คือ เมื่อมีแรงดันไฟฟ้า (voltage) มากระทำต่อวัสดุจะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) ทั้งนี้วัสดุไพอิโซอิเล็กทริกที่มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย คือ เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate, PZT, $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$) โดย PZT ยังเป็นวัสดุเฟร์โรอิเล็กทริก (ferroelectrics) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกท์ (perovskite) เกิดจากสารละลายของแข็ง (solid solution) ระหว่างเลดเซอร์โคเนต (Lead Zirconate, $PbZrO_3$) กับเลดไททาเนต (Lead Titanate, $PbTiO_3$) อัตราส่วนของเลดเซอร์โคเนตต่อเลดไททาเนต (Zr:Ti) มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติไพอิโซอิเล็กทริก โดยอัตราส่วนที่นิยมสำหรับ PZT ซึ่งให้ค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กทริกที่ดี คือ อัตราส่วนของ Zr 52% ต่อ Ti 48% ซึ่งที่อัตราส่วนนี้อยู่ที่บริเวณรอยต่อเฟส (Morphotropic Phase Boundaty, MBP) ระหว่างเฟสเตตระโกนอล (tetragonal) และเฟสรอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และยังเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสมีความเสถียรสูง การนำ PZT ไปประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นเนื่องด้วย PZT มีสมบัติทางไพอิโซอิเล็กทริกและสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี และสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติได้ง่ายด้วยการเติมสารเจือ (dopants) เข้าไปในระบบของ PZT[4-6]

สำหรับวัสดุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนารูปแบบการใช้งานให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมีขนาดเล็กลง และยังมีการรวบรวมอุปกรณ์หลายชิ้นเข้าด้วยกัน เพื่อความสะดวกและรวดเร็วต่อการใช้งาน[7-8] ดังนั้นการขึ้นรูปวัสดุอุปกรณ์จะทำการขึ้นรูปวัสดุแบบแผ่น ในรูปของแผ่นบางและแผ่นฟิล์มบาง ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยได้สนใจขึ้นรูป PZT ในรูปแบบแผ่น และสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบแผ่น มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น เทปคาสติ้ง (tape casting) การพิมพ์ (screen printing) การรีดเทป (calendaring) โดยในแต่ละวิธีการมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการขึ้นรูป PZT โดยใช้วิธีเทปคาสติ้ง[9]

วิธีเทปคาสติ้ง เป็นวิธีการขึ้นรูปเซรามิกที่ไม่ซับซ้อน สามารถผลิตได้ครั้งละปริมาณมาก สามารถกำหนดความหนาของแผ่นเทปได้ อีกทั้งมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าวิธีการขึ้นรูปด้วยวิธีการอื่น มีความคุ้มค่าในเชิงอุตสาหกรรม โดยการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งมีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบใหญ่แบ่งตามชนิดของตัวทำละลาย (solvent) ที่ใช้ คือ แบบตัวทำละลายที่ไม่ใช่น้ำ (non-aqueous solvent) เช่น ไตรคลอโรอีเทน (trichloroethane) ไซลีน (xylene) ซึ่งระบบนี้จะทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและติดไฟได้ง่าย อีกแบบคือ แบบตัวทำละลายที่ประกอบด้วยน้ำ (aqueous solvent) ระบบนี้ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ราคาถูก ไม่ติดไฟ แต่การขึ้นรูปแบบนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของการระเหยออกก่อนของตัวทำละลาย[10-11] ค่าความหนืดที่ต่ำความยืดหยุ่นน้อย (unflexible) ทำให้มีปัญหาในเรื่องการขึ้นรูปและการจัดเก็บที่ต้องการการม้วนเก็บ

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเตรียมแผ่น PZT ด้วยวิธีการเทปคาสติ้งโดยใช้ระบบตัวทำละลายที่ประกอบด้วยน้ำ เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายแบบไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่การใช้ตัวทำละลายที่เป็นน้ำ ส่งผลในการขึ้นรูปแผ่น PZT ยากขึ้น และใช้แฮนด์คาส (hand cast) แทนเครื่อง doctor blade สำหรับการขึ้นรูป เนื่องจากสามารถเตรียมสารในปริมาณที่น้อยได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของตัวประสาน (binder) ที่มีต่อการขึ้นรูปแผ่น PZT ด้วยวิธีเทปคาสติ้ง และเพื่อทำการศึกษาผลของตัวประสานที่มีผลต่อโครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PZT ที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษา PZT และวิธีการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวประสานต่อการขึ้นรูปโดยวิธีการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งของแผ่น PZT

1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PZT ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาผลของตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง โครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PZT โดยการลดตัวประสานในอัตราส่วนร้อยละ5-60 wt%

1.3.2 ศึกษาโครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PZT ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) และเครื่อง LCR Meter ตามลำดับ

1.3.3 ผลิตแผ่น PZT โดยวิธีการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง ที่ความหนา 350-450 ไมโครเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบผลกระทบของตัวประสานที่มีผลต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งของแผ่น PZT

1.4.2 ทราบถึงผลกระทบของตัวประสานที่มีผลต่อโครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PZT ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง

1.4.3 ได้แผ่น PZT โดยวิธีการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งที่ผลิตขึ้นได้เองในระดับห้องปฏิบัติการ

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัยนี้โดยผู้จัดทำได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

2.1 วัสดุไพอิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric materials)

2.1.1 ความเป็นมาของไพอิโซอิเล็กทริก (Background of piezoelectric)

2.1.2 ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect)

2.1.3 เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric)

2.1.4 โครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกท์ (Perovskite crystal structure)

2.1.5 แบเรียมไททาเนต (Barium Titanate)

2.1.6 เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate)

2.1.7 สมบัติไพอิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric properties)

2.1.8 การประยุกต์ใช้งานของไพอิโซอิเล็กทริก (Application of piezoelectric)

2.2 การขึ้นรูปเลดเซอร์โคเนตไททาเนตด้วยวิธีเทปคาสติ้ง

2.2.1 วิธีการขึ้นรูปเซรามิก (Ceramic molding method)

2.2.2 การขึ้นรูปเซรามิกแบบเทปคาสติ้ง (Tape casting fabrication)

2.2.3 การเผาผนึก (Sintering)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4 การวิเคราะห์เลดเซอร์โคเนต (Analysis of Lead Zirconate Titanate)

2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (Crystal structure analysis)

2.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructure analysis)

2.4.3 การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties analysis)

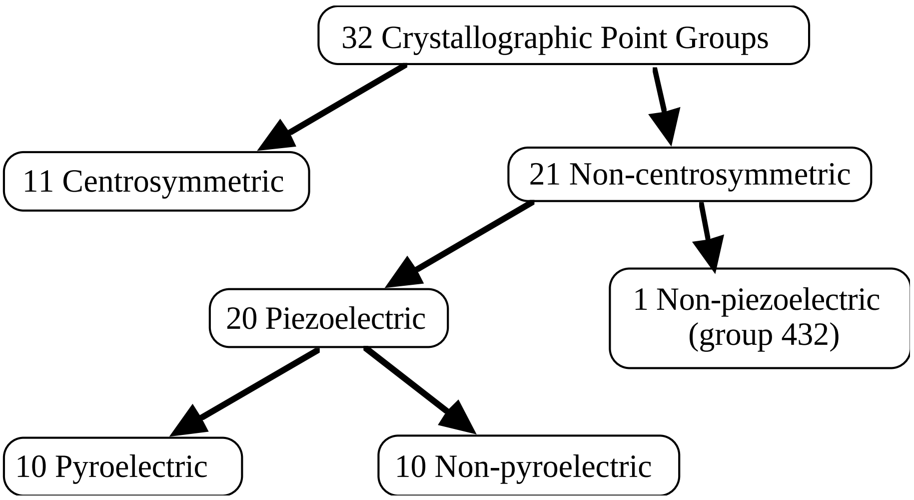
2.1 วัสดุไพอิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric materials)

2.1.1 ความเป็นมาของไพอิโซอิเล็กทริก (Background of piezoelectric)

ไพอิโซอิเล็กทริก มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก คำว่า “ไพอิโซ (piezo)” แปลว่า “กด (press)” ส่วนคำว่า “อิเล็กทริก (electric)” แปลว่า “กระแสไฟฟ้า” ดังนั้นไพอิโซอิเล็กทริกจึงมีความหมายว่า การเกิดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากแรงกด ที่ทำให้เกิดความเครียด (strain) ในผลึกส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของไดโพลไปในทิศทางเดียวกัน เรียกว่า โพลาไรเซชัน (polarization) ส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำและให้กระแสไฟฟ้าออกมา ซึ่งปริมาณและเครื่องหมายของโพลาไรเซชันแปรผันตามความเครียดที่ได้รับ และไดโพล คือ การแยกระหว่างประจุบวกและประจุลบ ซึ่งวัสดุไพอิโซอิเล็กทริกจะมีไดโพลอยู่ในวัสดุอย่างกระจัดกระจาย ในขณะที่ไม่ได้รับความเค้นหรือแรงดันไฟฟ้า

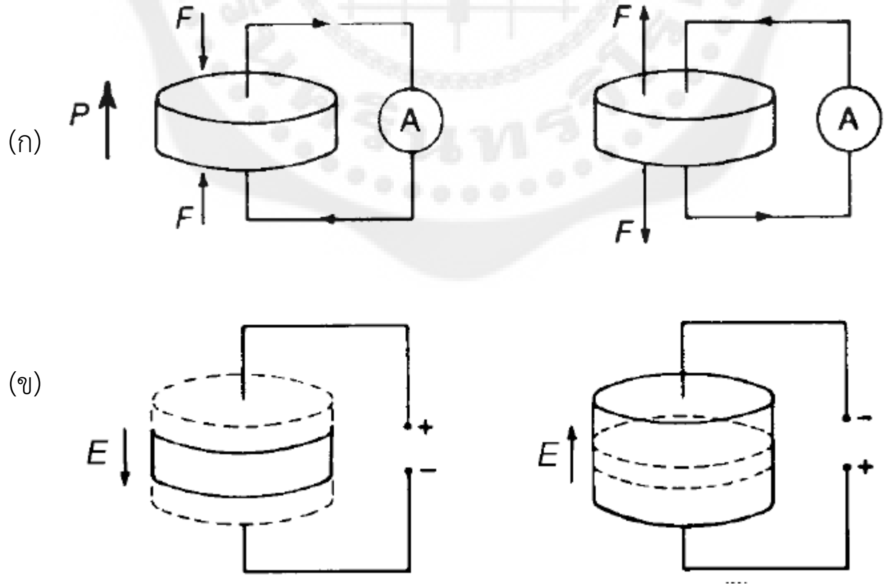
ไพอิโซอิเล็กทริกถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1880 โดยชองส์และปิแอร์ คูรี (Jacques and Pierre Curie)[6] ในระหว่างการศึกษาผลของแรงดันที่มีต่อการเกิดประจุไฟฟ้าของผลึกตัวอย่าง เช่น ควอทซ์ (quatz) ทัวร์มาลีน (tourmaline) บุษราคัม (topaz) น้ำตาลทราย (cane sugar) และดีเกลือ (Rochelle salt) เป็นต้น

การศึกษาไพอิโซอิเล็กทริกมีการพิจารณาถึงระดับโครงสร้างผลึกและการกระจายตัวของไอออนภายในโครงสร้างผลึก ซึ่งการจัดกลุ่มของไอออนมีการจำกัดด้วยตำแหน่งที่มีพลังงานสูงสุด มีองค์ประกอบทางเคมีคงที่ มีการเรียงตัวของไอออนซ้ำๆต่อเนื่องกันเป็นผลึก (lattice) มีหน่วยที่เล็กที่สุดที่มีความสมมาตรเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) การแบ่งผลึกด้วยการพิจารณาจากสมมาตรของผลึกสามารถแบ่งออกได้เป็น 32 กลุ่ม (symmetry point groups) ดังแสดงในภาพประกอบ 1 ภายใน 32 กลุ่ม ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีสมมาตรแบบจุดศูนย์กลาง (centrosymmetric or nonpiezoelectric) มี 11 กลุ่ม โดยในกลุ่มนี้จะไม่มีขั้วไฟฟ้า (nonpolar) และกลุ่มไม่มีสมมาตรแบบจุดศูนย์กลางสมมาตรของหน่วยเซลล์ (noncentrosymmetric) มี 21 กลุ่ม ใน 21 กลุ่มนี้มี 20 กลุ่มที่มีสมบัติไพอิโซอิเล็กทริก (piezoelectric properties) และอีกกลุ่มหนึ่งนั้นไม่แสดงสมบัติไพอิโซอิเล็กทริก เนื่องจากเมื่อวัสดุอยู่ในความเครียดวัสดุจะมีสมมาตรกับจุดศูนย์กลาง ทำให้โพลาไรเซชันรวมมีการหักล้างกันหมด ส่งผลให้วัสดุไม่แสดงสมบัติไพอิโซอิเล็กทริก โดยใน 20 กลุ่มมีเพียง 10 กลุ่มที่มีสมบัติไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric properties) คือ วัสดุที่มีโพลาไรเซชันขึ้นกับอุณหภูมิและวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกจะอยู่ภายใต้กลุ่มนี้ โดยวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก คือ วัสดุที่มีโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองได้ในผลึก (spontaneous polarization, P_s) และสามารถจัดเรียงตัวได้ตามสนามไฟฟ้า อาจกล่าวได้ว่า วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นทั้งวัสดุไพโรอิเล็กทริกและวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก[5]



ภาพประกอบ 1 การแบ่งผลึกด้วยการพิจารณาจากสมมาตรของผลึก[6]

ผลึกที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง จะมีการแยกกันระหว่างประจุบวกและประจุลบ ซึ่งคือการสร้างไดโพลไฟฟ้า (electric dipole) ทำให้ผลรวมของประจุบวกและประจุลบไม่เท่ากับศูนย์ กลายเป็นสารที่มีขั้ว และเมื่อมีการให้แรงดันไฟฟ้า หรือแรงกดจะเกิดการเคลื่อนที่ของไดโพล หรือ โพลาไรเซชันทำให้เกิดสภาพไพอิโซอิเล็กทริก ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้สองแบบ ดังแสดงในภาพประกอบ 2 ประกอบด้วยปรากฏการไพอิโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (direct piezoelectric effect) และปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกแบบผันกลับ (converse piezoelectric effect)

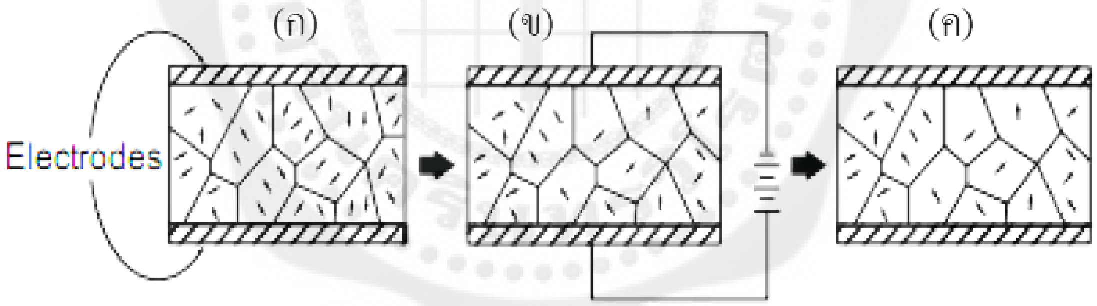


ภาพประกอบ 2 ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริก (ก) แบบทางตรง (direct piezoelectric effect) (ข) แบบผันกลับ (converse piezoelectric effect)[5]

2.1.2 ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect)

กระบวนการโพลลิง (poling) คือ การให้แรงดันไฟฟ้า หรือสนามไฟฟ้าแก่วัสดุ ทำให้มีการเคลื่อนที่ของไดโพล และเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าในระหว่างกระบวนการโพลลิงวัสดุจะเกิดการขยายตัวตามแนวแกนของสนามไฟฟ้าเล็กน้อย และเกิดการหดตัวในทิศทางที่ตั้งฉากทั้งสองทิศทางเล็กน้อย ปัจจัยที่มีผลต่อการโพลลิง คือ ระดับความแรงของสนามไฟฟ้า และอุณหภูมิที่ใช้ในการโพลลิง ซึ่งจะกำหนดการจัดทิศทางและสมบัติของวัสดุ ดังแสดงในภาพประกอบ 3 เซรามิกที่ผ่านการโพลลิงแล้วนั้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายภายใต้การใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกินอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) ของวัสดุแต่ละชนิด เนื่องจากเซรามิกจะเสียสภาพโพลาไรเซชันที่เกิดจากการโพลลิงที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี

ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกมีหลักการทำงานอยู่ด้วยกันทั้งหมดสองรูปแบบ คือ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (direct piezoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการให้แรงทางกลแล้วทำให้เกิดประจุไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น เซนเซอร์ (sensor) และปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกแบบผันกลับ (converse piezoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการทำงานทางกล ตัวอย่างเช่น แอคชัวเอเตอร์ (actuator) ดังแสดงในภาพประกอบ 2[5,12-14]



ภาพประกอบ 3 ไดโพลภายในวัสดุ (ก) ก่อนการโพลลิง (ข) ขณะทำการโพลลิงจนเกือบสมบูรณ์ (ค) หลังการโพลลิงและนำแรงดันไฟฟ้าออกแล้ว[15-16]

ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็คทริกสามารถอธิบายได้ดังสมการ 2.1-2.2[5]

$$\mathbf{D} = \mathrm{d}\mathbf{T} + \varepsilon^{\mathrm{T}}\mathbf{E} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{S} = \mathrm{s}^{\mathrm{E}}\mathbf{T} + \mathrm{d}\mathbf{E} \quad (2.2)$$

เมื่อ D = การกระจัดของไดอิเล็กทริก (dielectric displacement)

T = ความเค้น (stress)

E = สนามไฟฟ้า (electric field)

S = ความเครียด (strain)

d = สัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient)

s^E = ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (material compliance or modulus of elasticity) เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าคงที่

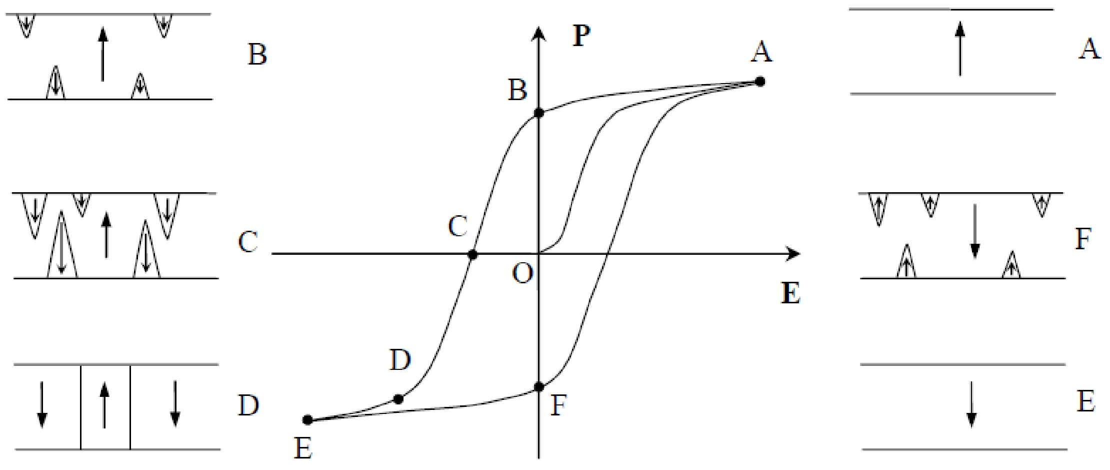
ε^T = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric permittivity or dielectric constant) เมื่อค่าความเค้นคงที่

2.1.3 เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric)

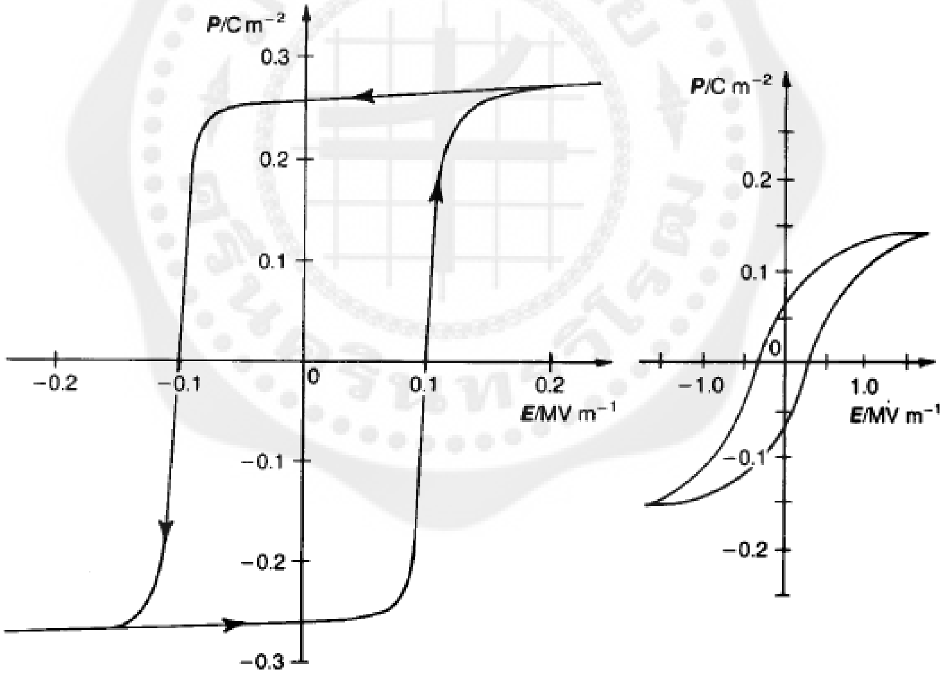
วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่อยู่ในกลุ่มวัสดุไพโรอิเล็กทริก โดยวัสดุที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นทั้งวัสดุไพอิโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริก โดยวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกนี้มีโพลาไรเซชันเกิดขึ้นเองได้ในผลึก (spontaneous polarization, P_s) และสามารถเรียงตัวได้ตามสนามไฟฟ้า (reoriented by applied electric field) ภายนอกที่ให้กับวัสดุนั้น บริเวณหรือปริมาตรในวัสดุที่มีทิศทางโพลาไรเซชันไปในทิศทางเดียวกัน เรียกว่า โดเมน (domain) และขอบเขตที่แบ่งความแตกต่างของโดเมนที่ต่างกันเรียกว่า ผนังโดเมน (domain wall) โดยโดเมนเหล่านั้นจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าภายนอกที่มีความแรงมากพอจนโพลาไรเซชันหันไปในทิศทางเดียวกันมีการใช้พลังงานในการเปลี่ยนทิศทางหรือการหมุนของโดเมน[5,12,14]

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกมีสมบัติของโมเมนต์คู่ควบ (dipole moment) โดยไม่ต้องมีสนามไฟฟ้า และเมื่อนำวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกไปวางในสนามไฟฟ้าโดยมีการลดค่าสนามไฟฟ้าจนเป็นศูนย์ พบว่าวัสดุดังกล่าวมีโมเมนต์คู่ควบถาวรอยู่แล้ว เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอจะมีการเปลี่ยนทิศทางของไดโพลตามทิศทางของสนามไฟฟ้า แต่เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ค่าโพลาไรเซชันไม่เป็นศูนย์ ซึ่งโพลาไรเซชันจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อให้สนามไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามเพื่อหักล้างโพลาไรเซชันให้มีค่าเป็นศูนย์ ส่งผลให้เกิดการเหลื่อมหลัง (lag) ระหว่างโพลาไรเซชัน P กับสนามไฟฟ้า E ในวงฮิสเทอรีซีส (hysteresis loop) ดังแสดงในภาพประกอบ 4 และภาพเปรียบเทียบวงฮิสเทอรีซีสของผลึกเดี่ยว และเซรามิกของ $BaTiO_3$ ดังแสดงในภาพประกอบ 5

ภาพประกอบ 4 แสดงลักษณะโดเมนในหลายๆจุดของ P-E วงฮิสเทอรีซีสของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยเริ่มจากจุด O วัสดุยังไม่ได้รับการโพลลิง หลังจากนั้นได้ให้สนามไฟฟ้าไปแก่วัสดุ เกิดการโพลอย่างสมบูรณ์ที่จุด A และโดเมนจะมีการกลับทิศเมื่อลดสนามไฟฟ้าจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ที่จุด B และเมื่อทำการให้ค่าสนามไฟฟ้าต่อไปในทิศทางตรงกันข้ามจากจุด B ไปยังจุด C นั้นโดเมนจะมีค่าโพลาไรเซชันที่กลับทิศมากขึ้นอีกที่ $E<-E_c$ และที่ $E>E_c$ ปริมาตรโดเมนก็จะมีโพลาไรเซชันมากขึ้นไปอีกที่จุด D จนกระทั่งเปรียบเสมือนมีเพียงโดเมนเดียวเนื่องจากทิศทางไดโพลหันไปในทิศทางเดียวกันหมดที่จุด E และต่อจากนั้นถ้าทำการเพิ่มสนามไฟฟ้าจะมีการก่อโดเมนใหม่อีกไปที่จุด F และเป็นกระบวนการที่เหมือนกันและไปยังสภาวะของโดเมนเดียวกันอีกที่จุด A



ภาพประกอบ 4 ไดโพลในผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกอุดมคติที่ค่าสนามไฟฟ้าแตกต่างกันในการโพลาไรเซชันของวงฮิสเทอร์รีซีส[6]



(ก) (ข)

ภาพประกอบ 5 วงฮิสเทอรีซีส (hysteresis loop) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชัน (polarization) กับสนามไฟฟ้า (electric field) (ก) ผลึกเชิงเดี่ยวของ $BaTiO_3$ (ข) เซรามิก $BaTiO_3$[5]

ปริมาณที่สำคัญในวงฮิสเทอรีซีส มีดังต่อไปนี้[5,12,14]

- ค่าสภาพคงค้างของโพลาไรเซชัน (remanent polarization, P_r) หรือที่จุด B และ F ในภาพประกอบ 4 คือ ค่าโพลาไรเซชันที่ยังคงเหลืออยู่ได้ในระบบเฟอร์โรอิเล็กทริกเมื่อขนาดของสนามภายนอกเป็นศูนย์ โดยทั้งสองด้านมีค่าบวกหรือลบตามทิศทางของสนามไฟฟ้า
- ค่าสนามลบล้าง (coercive field, E_c) คือ ค่าสนามไฟฟ้าภายนอกที่ใช้ในการหักล้างให้สภาพโพลาไรเซชันมีค่าเป็นศูนย์ โดยทั้งสองด้านมีค่าบวกหรือลบตามทิศทางของสภาพโพลาไรเซชัน คือที่จุด C ในภาพประกอบ 4 เมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้มากกว่า E_c โพลาไลเซชั่น จะเกิดการกลับทิศได้
- ค่าโพลาไรเซชันอิ่มตัว (saturated polarization, P_s) คือ ค่าโพลาไรชันที่เกิดจากการให้สนามไฟฟ้าภายนอกแก่วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกแล้วไดโพลมีทิศไปในทิศทางเดียวกันหมดทำให้มีค่าโพลาไรเซชันได้มากที่สุด
- พื้นที่ใต้กราฟของวงฮิสเทอรีซีส บอกถึงการสูญเสียพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโพลาไรเซชัน กล่าวคือ ยิ่งวงฮิสเทอรีซีสยิ่งกว้างยิ่งมีการสูญเสียพลังงานมากในการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโพลาไรเซชัน ในทางกลับกันหากวงฮิสเทอรีซีสยิ่งแคบจะมีการสูญเสียพลังงานน้อยในการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโพลาไรเซชัน

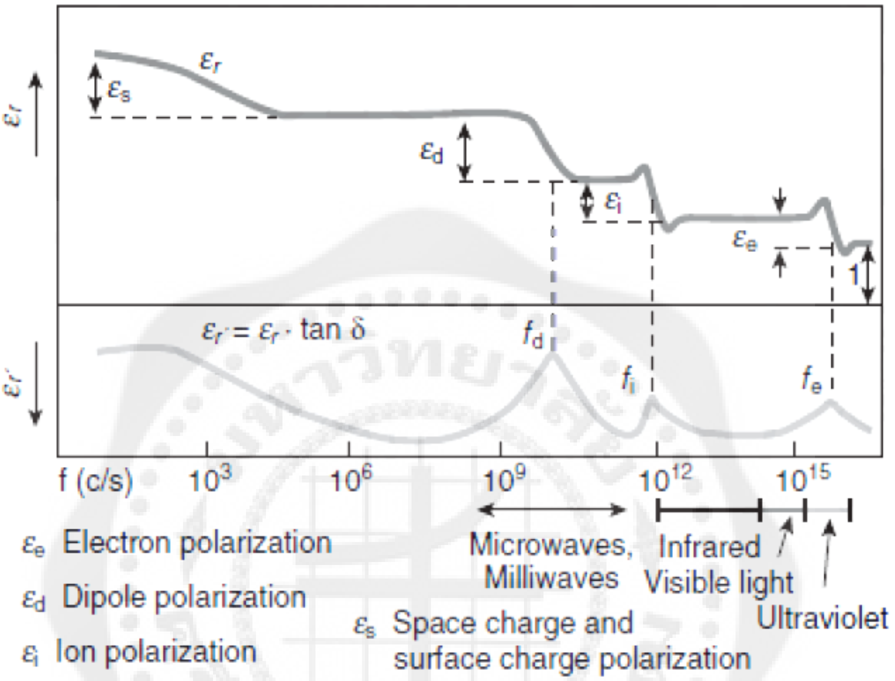
2.1.3.1 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส (Curie temperature and phase transition)

การเปลี่ยนเฟสของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก คือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เช่น วัสดุแบเรียมไททาเนต (Barium Titante, $BaTiO_3$) หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรืออัตราส่วนผสมของสาร เช่น วัสดุเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate, PZT, $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$) โดยจะมีผลต่อการโพลาไรเซชันทางไฟฟ้าของวัสดุ โดยอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฟสจากเฟสพาราอิเล็กทริก (paraelectric phase) ที่อุณหภูมิ $T>T_c$ ทำให้วัสดุไม่แสดงสมบัติการโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองได้ (spontaneous polarization) ไปยังเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric phase) ที่อุณหภูมิ $T<T_c$ วัสดุในเฟสนี้จะแสดงสมบัติโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเองได้ โดยโครงสร้างเฟอร์โรอิเล็กทริกจะเกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปร่างไปของโครงสร้างพาราอิเล็กทริก ซึ่งมีโครงสร้างเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีสมมาตรของโครงสร้างที่น้อยกว่าโครงสร้างพาราอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี ไอออนมีการเคลื่อนที่ในตำแหน่งสมดุล ซึ่งทำให้เกิดโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเองได้ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) ของวัสดุมีสูงสุดที่อุณหภูมิคูรี[17]

2.1.3.2 โพลาไรเซชัน (polarization)

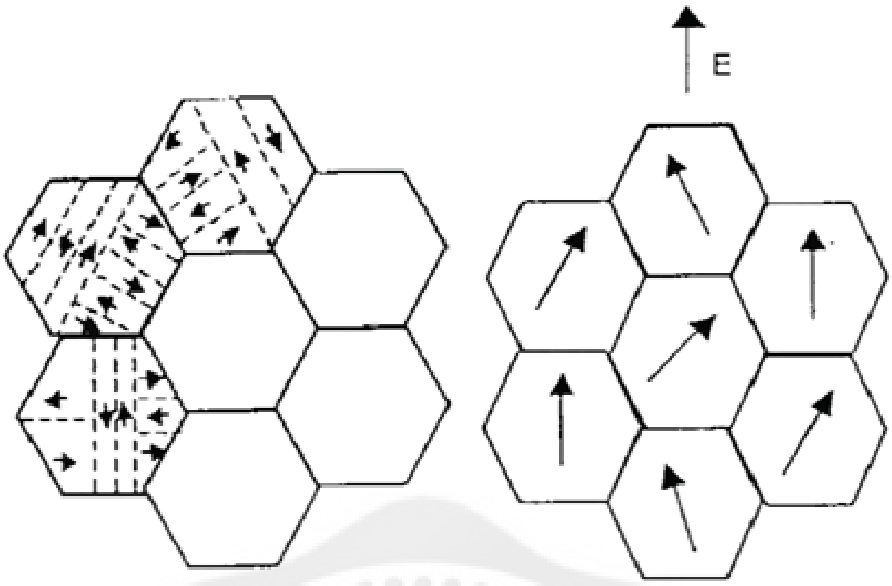
สนามไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุเซรามิก ทำให้ไดโพลไฟฟ้าภายในวัสดุเกิดการเคลื่อนตัวตามสนามไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการโพลาไรเซชันโดยจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้าอีกทั้งยังขึ้นกับขนาดของบริเวณที่ถูกกระทำนั้นด้วยโพลาไรเซชันมีทั้งหมด 4 แบบ คือ โพลาไรเซชันระดับอิเล็กตรอน (electron polarization, ε_e) โพลาไรเซชันระดับไอออน (ion polarization, ε_i) โพลาไรเซชันแบบขั้วคู่

(dipole polarization, ε_d) และโพลาไรเซชันแบบประจุพื้นผิว (space polarization, ε_s) โพลาไรเซชันของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงตามสนามไฟฟ้า ซึ่งทั้งหมดเกิดขึ้นในช่วงความถี่ที่ต่ำมาก เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น โพลาไรเซชันไม่เป็นแบบช่วงยาวตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ในทางกลับกันการกระจายค่าของสภาพยอมไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นหากความถี่เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 การกระจายในโพลาไรเซชันของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่างๆ[18]

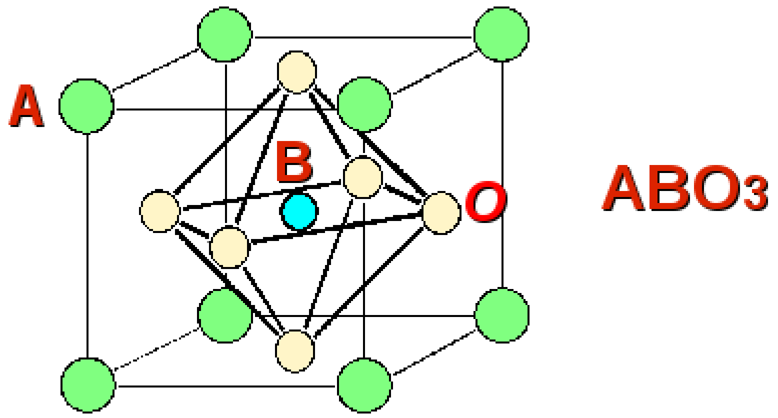
ถ้าพิจารณาวัสดุเซรามิกแบบ polycrystalline ซึ่งประกอบไปด้วยหลายเกรน (grain) ซึ่งแต่ละเกรนอาจประกอบไปด้วยโดเมนหลายโดเมน ซึ่งแต่ละโดเมนมีทิศทางโพลาไรเซชันไปในทิศทางเดียวกัน ในตอนแรกก่อนมีการให้สนามไฟฟ้าแก่ผลึก ไดโพลมีทิศทางกระจัดกระจาย ทำให้เซรามิกไม่แสดงสมบัติไพอิโซอิเล็กทริกได้ ดังภาพประกอบ 7ก หลังจากมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไป ไดโพลมีการเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดโพลาไรเซชันหรือไดโพลภายในเนื้อวัสดุให้มีทิศทางใกล้เคียงกัน หรืออาจมีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ดังแสดงในภาพประกอบ 7ข ทำให้วัสดุแสดงสมบัติการเป็นไพอิโซอิเล็กทริก[5,12,18]



ภาพประกอบ 7 การจัดเรียงไดโพลภายในเนื้อวัสดุ (ก) ก่อนการให้สนามไฟฟ้า (ข) หลังการให้สนามไฟฟ้า[5]

2.1.4 โครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกท์ (Perovskite crystal structure)

โครงสร้างแบบเพอรอฟสไกท์ (perovskite structure) เป็นโครงสร้างที่มีสูตรเคมีทั่วไปคือ ABO_3 โดยอะตอม A และอะตอม B คือ อะตอมแคทไอออน (cation) และ O คือ อะตอมแอนไอออน (anion) ถ้าพิจารณา unit cell ของโครงสร้างนี้ดังภาพประกอบ 8 อะตอม A จะอยู่ที่มุมทั้ง 8 ของ unit cell อะตอม B จะอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางของ unit cell และมีการจัดเรียงตัวแบบ ออกตะฮีดรัล (octahedral site) อะตอม B จะมีขนาดเล็กกว่าอะตอม A ส่วนอะตอม O จะอยู่ที่ตรงกลางของทั้ง 6 หน้าของ unit cell



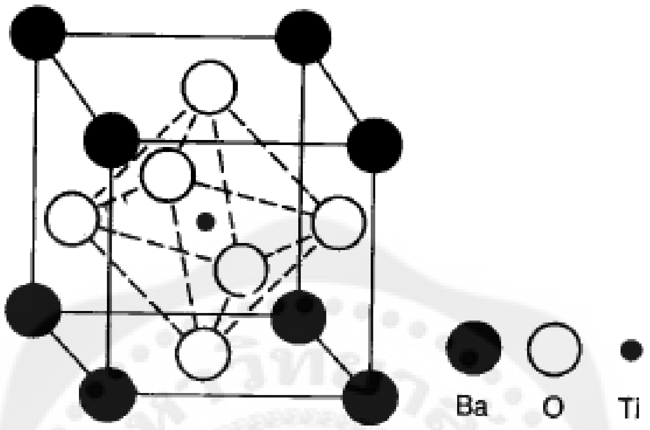
ภาพประกอบ 8 โครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกท์ (perovskite crystal structure)[4]

โครงสร้างแบบเพอรอฟสไกท์ แบ่งโครงสร้างได้ 2 แบบ ประกอบด้วย เพอรอฟสไกท์ในอุดมคติ (ideal perovskite, ABO_3) โดยตำแหน่ง A และตำแหน่ง B เป็นอะตอมของธาตุชนิดหนึ่งชนิดใด เช่น แบเรียมไททาเนต (barium titanate, $BaTiO_3$) และอีกแบบคือ เพอรอฟสไกท์แบบซับซ้อน (complex perovskite, $A'A''B'B''O_3$) สามารถแบ่งย่อยได้อีกสองแบบคือ แบบตะกั่ว (lead-based complex perovskite) ที่ตำแหน่ง A เป็นตำแหน่งของตะกั่ว (lead) และตำแหน่ง B มีการร่วมกันระหว่างธาตุอื่นอย่างน้อยสองธาตุ เช่น เลดเซอร์โนตไททาเนต (lead zirconate titanate, $Pb(Zr_xTi_{(1-x)})O_3$ และแบบไม่มีตะกั่ว (free lead based complex perovskite) ตำแหน่ง A ไม่ได้มีส่วนประกอบของตะกั่วแต่ตำแหน่ง A และ B เป็นการอยู่ร่วมกันของอะตอมธาตุอื่นทั้งสองตำแหน่ง[5]

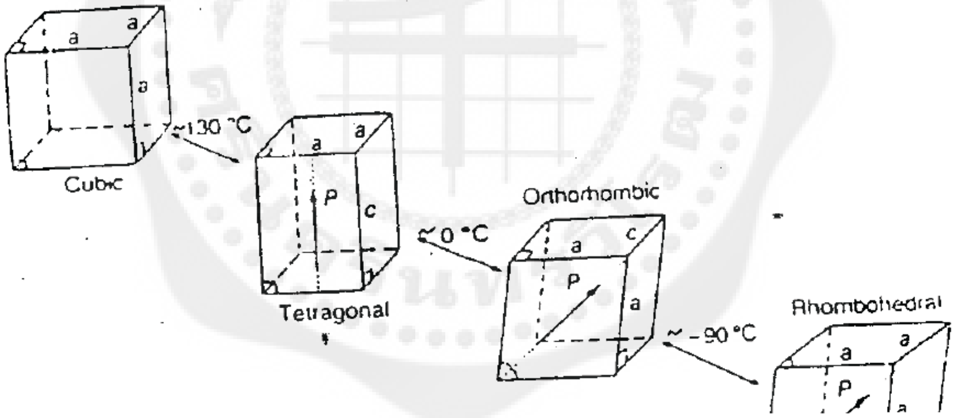
2.1.5 แบเรียมไททาเนต (Barium titanate)

วัสดุแบเรียมไททาเนต (barium titanate, $BaTiO_3$) เป็นวัสดุที่มีเฟสเปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และมีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกท์ ซึ่งมีอุณหภูมิคูรี ประมาณ 130°C มีเซลล์หน่วยเป็นแบบลูกบาศก์ (cubic) ดังแสดงในภาพประกอบ 9 หากอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างจะเกิดการบิดเบี้ยวอยู่ในรูปแบบ เตตระโกนอล (tetragonal) ส่งผลให้เกิดโมเมนต์คู่ควบ (dipole moment) ตามทิศทางในแกน c และเมื่อลดอุณหภูมิลงอีกจนถึงอุณหภูมิ 0°C จะมีโครงสร้างเป็นแบบออร์โธรอมบิค (orthorhombic) โดยมีแกนโพลาร์ขนานกับระนาบหน้าในแนวทแยงและที่ -80°C มีโครงสร้างเป็นแบบรอมโบฮีดรัล (rhombohedral) โดยมีแกนโพลาร์ทแยงตามเซลล์หน่วย ดังแสดงในภาพประกอบ 10 โดยโครงสร้างแบเรียมไททาเนตเปลี่ยนจากลูกบาศก์เป็นแบบเตตระโกนอลเกิดโพลาไรเซชันเองตามแนว <100> เรียกว่า ลูกบาศก์เทียม (pseudo cubic) หากมีการให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่มีความเข้มมากพอในทิศทาง <011>, <001> หรือในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศโพลาร์ปกติ ส่งผลให้โพลาไรเซชันเกิดการเปลี่ยนทิศทาง ที่อุณหภูมิลดต่ำกว่า 0°C ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโพลาไรเซชันในทิศทาง <011> และอุณหภูมิต่ำกว่าประมาณ -90°C จะเกิดในทิศทาง <111> ในระหว่างอุณหภูมิประมาณ 0°C และประมาณ 130°C โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองได้ในผลึกอาจมีทิศทางใดๆตามแกนทั้งสาม ดังนั้นวัสดุจะมี

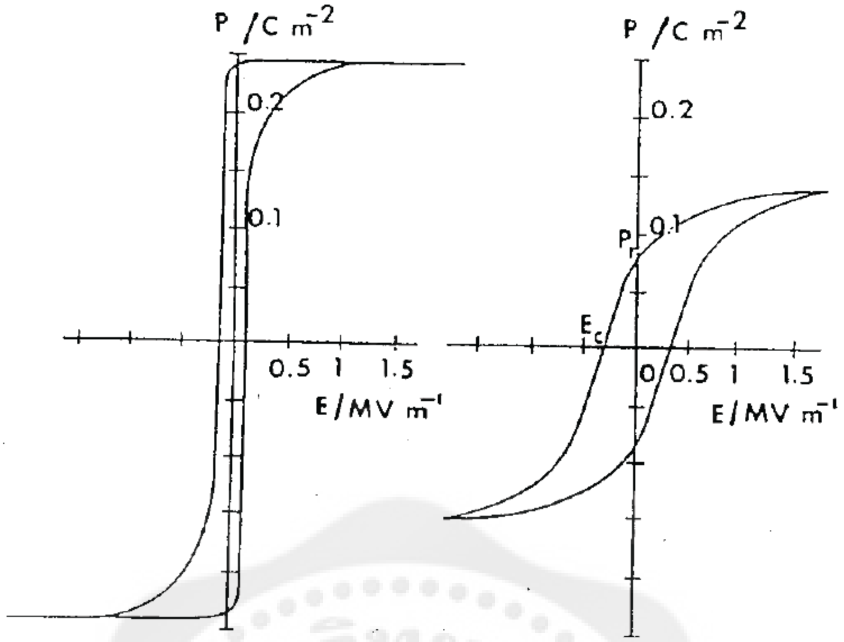
โพลาไรเซชันมีการเรียงตัวไม่เป็นรูปแบบเดียวกัน เป็นโดเมน (domain) แต่ละโดเมนมีการเรียงตัวของโพลาไรเซชันในทิศทางเดียวกัน ทำให้เกิดผนังโดเมน (domain wall) การให้สนามไฟฟ้าเข้าไปทำให้โพลาไรเซชันจะมีการเรียงตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้าโดยจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโดเมนเปลี่ยนไป และความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้า แสดงด้วยวงฮิสเทอรีซีส ในภาพประกอบ 11[5]



ภาพประกอบ 9 หน่วยเซลล์ของแบเรียมไททาเนต (barium titanate, $BaTiO_3$)[5]



ภาพประกอบ 10 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแบเรียมไททาเนต ณ อุณภูมิต่างๆ[5]

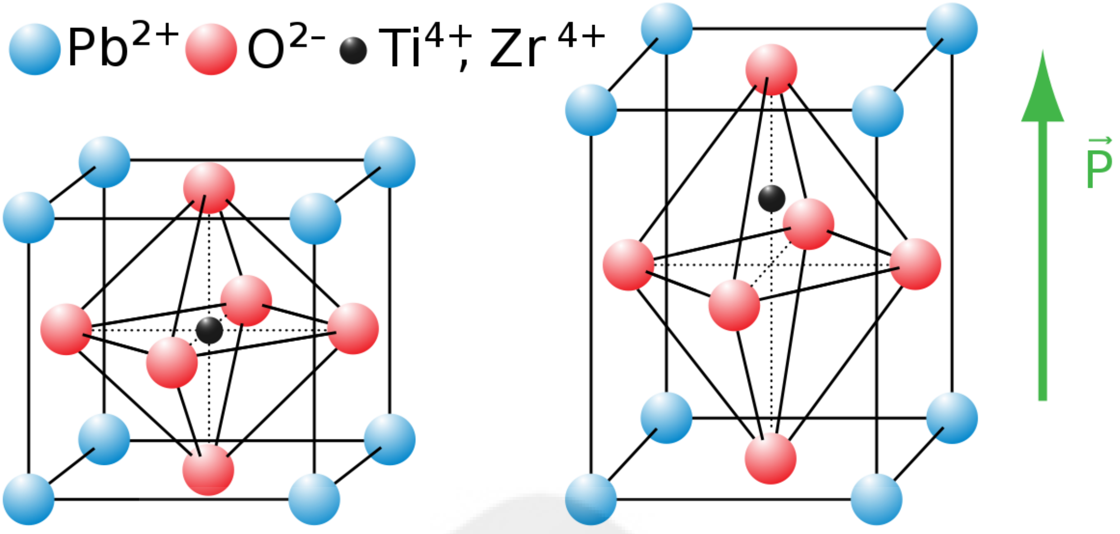


(ก) (ข)

ภาพประกอบ 11 วงฮิสเทอรีซีส (ก) ผลึกเชิงเดี่ยวของ $BaTiO_3$ (ข) เซรามิกของ $BaTiO_3$ [5]

2.1.6 เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead zirconate titanate)

เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate, PZT) เป็นวัสดุที่มีสมบัติไพอิโซอิเล็กทริก และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอรอฟสไกท์ (perovskite) โดยเฟสจะมีผลมากจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเซอร์โคเนียมและไทเทเนียมเป็นอย่างมาก สูตรทางเคมีของ PZT คือ $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ โดยมีอะตอมของตะกั่ว (Pb) อยู่ที่มุมทั้งแปดของ unit cell มีอะตอมของออกซิเจน (O) อยู่ตรงกลางของแต่ละหน้าทั้งหกของ unit cell และมีอะตอมของเซอร์โคเนียม (Zr) และอะตอมของไทเทเนียม (Ti) อยู่ตรงกลางแบบสลับสับเปลี่ยนกันไป โดยโครงสร้างจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและการเปลี่ยนอัตราส่วนของเซอร์โคเนียมและไทเทเนียม ภาพประกอบ 12 แสดงตัวอย่างหน่วยเซลล์แบบลูกบาศก์ และแบบเตตระโกนอลของ PZT

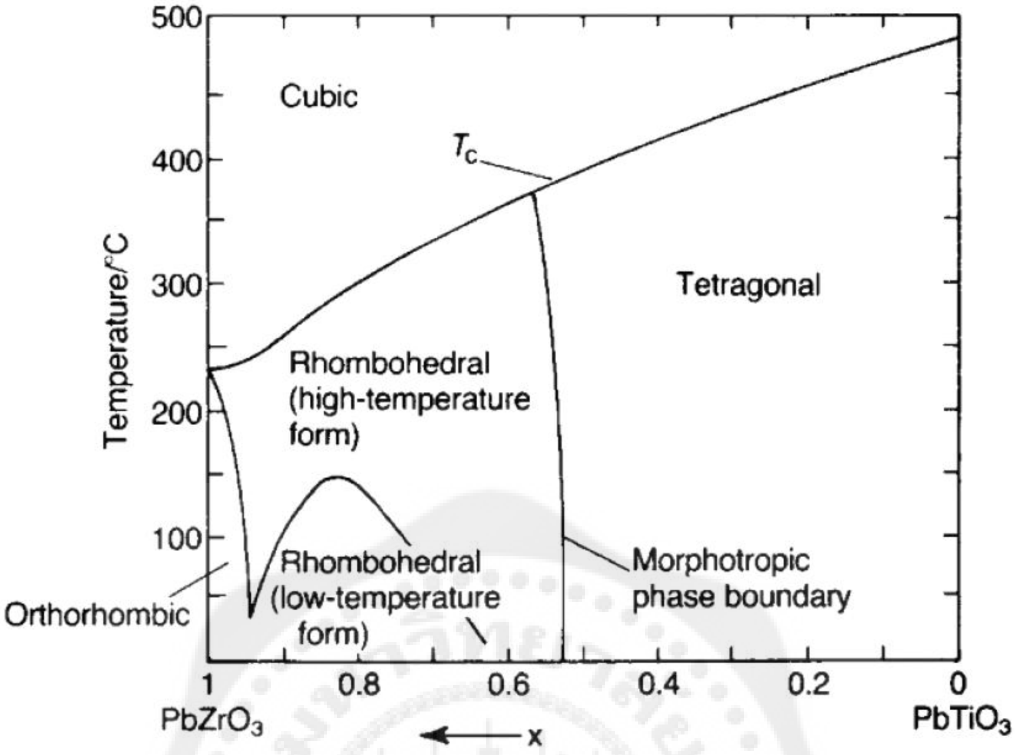


(ก) (ข)

ภาพประกอบ 12 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกท์ของเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate, PZT) (ก) แบบลูกบาศก์ (cubic) (ข) เตตระโกนอล (tetragonal)[16]

PZT เป็นสารละลายของแข็ง (solid solution) ที่เกิดจากสารละลายของแข็งเลดเซอร์โคเนต ($PbZrO_3$) ที่มีสมบัติเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (antiferroelectric) มีโครงสร้างเป็นแบบออร์โธรอมบิค (orthorhombic) และสารละลายของแข็งเลดไททาเนต ($PbTiO_3$) ที่มีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric) มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล (tetragonal)

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (350°C) PZT จะมีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ (cubic perovskite structure) ทำให้แสดงสมบัติเป็นแบบพาราอิเล็กทริก (paraelectric) และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีโครงสร้างแบบลูกบาศก์จะเปลี่ยนเป็นแบบเฟสเตตระโกนอล (tetragonal phase) หรือเป็นเฟสรอมโบฮีดรัล (rhombohedral phase) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของเซอร์โคเนียมต่อไทเทเนียม (Zr:Ti) ส่งผลให้ PZT มีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยเมื่อพิจารณาที่เฟสเตตระโกนอลจะมีโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเองได้ในทิศทาง <100> และสำหรับเฟสรอมโบฮีดรัลจะมีโพลาไรเซชันในทิศทาง <111> จากเฟสไดอะแกรมของ PZT (phase diagram of lead zirconate titanate) ดังแสดงในภาพประกอบ 13 ที่อัตราส่วนระหว่างเลดเซอร์โคเนตต่อเลดไททาเนต (Zr/Ti) เท่ากับ 52/48 เป็นอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณรอยต่อเฟส (morphotropic phase boundary, MBP) ซึ่งเป็นบริเวณที่วัสดุจะแสดงสมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เด่นชัดที่สุด โดยมีการผสมกันของเฟสเตตระโกนอลและเฟสรอมโบฮีดรัลที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ขั้วเมื่อได้รับพลังงานจากภายนอกและเป็นสัดส่วนองค์ประกอบที่แสดงสมบัติไพอิโซอิเล็กทริกดีที่สุด[12]



ภาพประกอบ 13 เฟสไดอะแกรมของ PZT (phase diagram of Lead Zirconate Titanate)[5]

อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริกสามารถทำได้ด้วยการเติมสารเจือ โดยสารเจือที่เติม คือ ไอออนที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดแตกต่างกับไอออนของแลตทิซ PZT ที่มีส่วนผสมในบริเวณ MBP การเตรียม PZT เพื่อนำประยุกต์ใช้งานจะต้องมีการเตรียมร่วมกับสารเจือ (dopants) ตัวเปลี่ยนแปลงสมบัติ (modifiers) หรือสารเคมีพวกตัวรับ (acceptors) เพื่อประกอบเป็น PZT ชนิดแข็ง (hard PZT) และ PZT ชนิดอ่อน (soft PZT) โดย PZT แข็งเป็นการเจือไอออนตัวรับ (acceptor ions) เช่น K^{+}, Na^{+} ในตำแหน่ง A และ Fe^{3+}, Al^{3+}, Mn^{3+} ในตำแหน่ง B โดย PZT แข็งมีค่าสภาพยอม (permittivity) การสูญเสียทางไฟฟ้า (electrical losses) และค่าสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient) ที่ต่ำ รวมถึงการทำการโพลลิงได้ยาก สำหรับ PZT อ่อน เป็นการเจือไอออนตัวให้ (donor ions) เช่น La^{3+} ในตำแหน่ง A และ Nb^{5+}, Sb^{5+} ในตำแหน่ง B โดยมีค่าสภาพยอม ค่าการสูญเสียทางไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริกที่สูง สามารถทำการโพลลิงได้ง่าย

ผลของสารเจือที่มีผลต่อสภาพเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งปริมาณของสารเจือ (dopant) จะส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก สมบัติไฟฟ้าเชิงกล และสมบัติเชิงแสง โดยพิจารณาความบกพร่องของผลึก (crystallographic deficiencies) ผลของสารเจือที่มีผลต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก แสดงดังตาราง 1

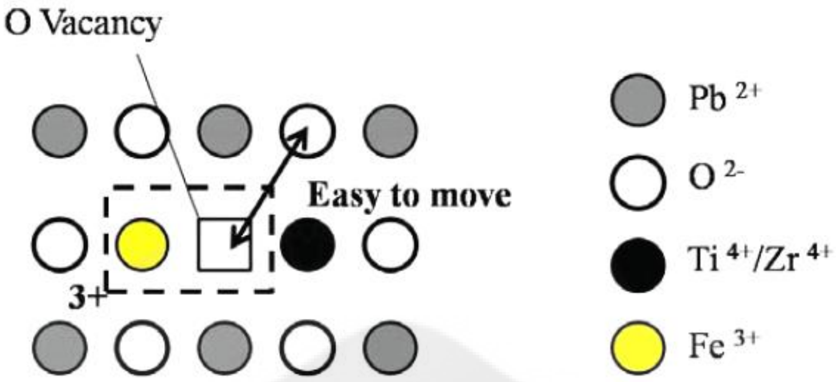
ตาราง 1 ชนิดของสารเจือในเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate, PZT)[5]

สารเจือ				ผลการปรับปรุง
สารเจือ	ตำแหน่งแทนที่	ไอออน	รัศมีไอออน	
สารเจือแบบอ่อน (soft-dopants or off-valent donors)	Pb^{2+}	La^{3+}	0.122	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง
		Nd^{3+}	0.155	ค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กทริกสูง
		Sb^{3+}	0.090	ค่าแฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกลต่ำ
		Bi^{3+}	0.114	ค่าตัวประกอบคู่ควบระนาบสูง
		Th^{4+}	0.110	ค่าสภาพความต้านทานสูง (ประมาณ 10^3)
	Ti^{4+} หรือ Zr^{4+}	Nb^{5+}	0.069	ลดช่องว่างของออกซิเจน
		Ta^{5+}	0.068	สภาพการเคลื่อนที่บริเวณผนังโดเมนเพิ่มขึ้น
		Sb^{5+}	0.063	ทำให้เกิดขั้วได้ง่าย
		W^{5+}	0.065	
วาเลนต์เท่ากัน (isovalent)	Pb^{2+}	Ba^{2+}	0.134	อุณหภูมิคูรีต่ำ
		Sr^{2+}	0.012	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง
	Ti^{4+} หรือ Zr^{4+}	Sn^{4+}	0.071	
สารเจือแบบแข็ง (hard-dopants or off-valent acceptors)	Pb^{2+}	K^{+}	0.133	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ
		Na^{+}	0.094	ค่าแฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกลสูง
	Ti^{4+} หรือ Zr^{4+}	F^{3+}	0.067	ค่าตัวประกอบคู่
		Al^{3+}	0.057	ควบระนาบต่ำ
		Sc^{3+}	0.083	ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกส์ต่ำ
		In^{3+}	0.092	การทำให้เกิดขั้วและการทำลายขั้วทำได้ยาก
		Cr^{3+}	0.064	ค่าสนามหักล้างสูง

กลุ่มไอออนที่ใช้เป็นสารเจือในการเตรียม PZT ประกอบด้วย[20-24]

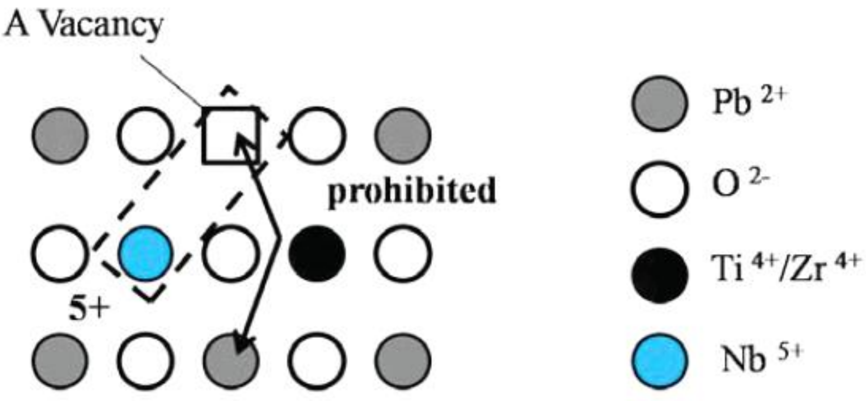
- การเจือด้วยตัวรับ (acceptor doping) การเจือด้วย K^{+}, Na^{+} ในตำแหน่ง A และ Fe^{3+}, Al^{3+}, Mn^{3+} ในตำแหน่ง B การเจือแบบตัวรับจะเหนี่ยวนำให้เกิดการขาดหายไปของออกซิเจน (oxygen defeciencies) ในแลตทิซของ PZT ตำแหน่ง A และ B จะถูกครอบครองด้วยไอออนของสารเจือการครอบครองนี้ขึ้นอยู่กับรัศมีไอออนของไอออนของสารเจือ โดยตัวที่มีรัศมีไอออนน้อยกว่าจะถูกแทนที่ในแลตทิซ และไอออนของสารเจือที่มีประจุบวกต่ำกว่าจะไปแทนที่ไอออนของโลหะที่มีประจุบวกที่สูงกว่าจึงเกิดช่องว่าในแลตทิซ ดังแสดงในภาพประกอบ 14 ดังนั้นการเจือด้วยตัวรับทำให้เกิดการเรียงตัวใหม่ได้ง่ายของขั้วคู่ไอออนโดยสัมพันธ์กับส่วนที่ขาดหายไปและส่งผลให้การพัฒนาวงฮิสเทอรีซีสที่ค่อนข้างยาก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ การสูญเสียทางไดอิเล็กทริกต่ำ อัตราการบ่มตัวที่สูง และมีส่วนสำคัญในการสร้างไพอิโซอิเล็กทริกเซรามิกแบบถาวร ซึ่งเหมาะต่อการใช้งานในอุปกรณ์กลุ่มอัลตราโซนิก



ภาพประกอบ 14 ความบกพร่องของผลึกใน PZT ที่เจือด้วยตัวรับ (acceptor dopants)(24)

● การเจือด้วยตัวให้ (donor doping) การเจือในตำแหน่ง A และB ด้วยวาเลนต์อิเล็กตรอน +4 ถึง +6 ตัวอย่างเช่น La^{3+}, Sb^{3+} ในตำแหน่ง A Ta^{5+}, Nb^{5+}, W^{6+} ในตำแหน่ง B ลักษณะนี้ส่งผลให้เกิดช่องว่างของ Pb ในโครงสร้างเพอรอฟสไกท์ เนื่องจากไอออนของ Pb ไปครอบครองที่ตำแหน่ง A ของแลตทิซ โดยไอออนที่มีรัศมีใหญ่กว่าจะเข้าไปอยู่ในตำแหน่ง A ไปแทนที่ไอออนของ Pb^{2+} ซึ่งตำแหน่ง A สองตำแหน่งถูกครอบครองโดยไอออนบวก 2 ไอออนด้วยวาเลนต์ +3 ทำให้ช่องว่างของ Pb เกิดขึ้น เมื่อไอออนที่มีรัศมีขนาดเล็กกว่าเข้าไปในโครงสร้างเพอรอฟสไกท์ ไอออนนี้จะไปยึดครองตำแหน่ง B โดยเข้าไปแทนที่ไอออน Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} สาเหตุเนื่องมาจากไอออนของสารเจือที่มีวาเลนต์ที่มากกว่า +4 ส่งผลให้มีประจุบวกที่สูงเข้าไปในแลตทิซ และทำให้เกิดช่องว่างของการเจือแบบการเจือด้วยตัวให้ไม่ค่อยมีผลต่อการเกิดขั้วคู่ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ สาเหตุเพราะว่าไอออนของตะกั่วไม่สามารถกระโดดไปในช่องว่างที่ตำแหน่ง A ข้างเคียงได้ เนื่องจากออกซิเจนจะปิดโดยรอบๆ ตะกั่วโดยการขาดหายไปของประจุที่มีการเจือด้วยตัวให้แสดงในภาพประกอบ 15 การเจือดังกล่าวจะชดเชยช่องว่างของตำแหน่ง A และเป็น PZT อ่อน ซึ่งตัวเจือจะเข้าไปปรับปรุงการจัดเรียงของผนังโดเมน ทำให้ค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กทริกมีค่าสูง



ภาพประกอบ 15 ความบกพร่องของผลึกใน PZT ที่เจือด้วยตัวให้ (donor dopants)[24]

2.1.7 สมบัติไพอิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric properties)

2.1.7.1 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)

วัสดุโดยทั่วไปนั้นมีสมบัติแตกต่างกันออกไป บางชนิดนำไฟฟ้าได้ดี เรียกว่า ตัวนำไฟฟ้า (conductor) บางชนิดไม่นำไฟฟ้า เรียกว่า ฉนวนไฟฟ้า (insulator) โดยวัสดุประเภทฉนวนไฟฟ้า อิเล็กตรอนถูกแรงดึงดูดระหว่างอะตอมไม่ให้เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นสำหรับวัสดุไดอิเล็กทริกจะถือเป็นวัสดุในกลุ่มของฉนวนไฟฟ้า แต่มีความแตกต่างจากฉนวนไฟฟ้า คือ มีไดโพลไฟฟ้าเรียงตัวกระจัดกระจาย และเมื่อทำการให้สนามไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กทริก ส่งผลให้วัสดุไดอิเล็กทริกเกิดการโพลาไรเซชัน วัสดุไดอิเล็กทริกมีความสามารถในการกักเก็บประจุไฟฟ้าได้ดี ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) มีค่าเท่ากับผลรวมของโพลาไรเซชันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (net polarization/unit volume) โดยค่าโพลาไรเซชันจะแปรผันตรงกับค่าความจุไฟฟ้า[5,12,14]

2.1.7.2 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity, ε_r)

เมื่อทำการให้สนามไฟฟ้า $\mathbf{E}$ ทำให้ตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนานจะเกิดประจุ Q_p และที่ผิวของวัสดุไดอิเล็กทริกจะเกิดประจุ Q_d โดยจะเกิดประจุขึ้นที่ผิวในลักษณะขั้วคู่[5,13] ซึ่งได้ความสัมพันธ์แสดงดังสมการ 2.3

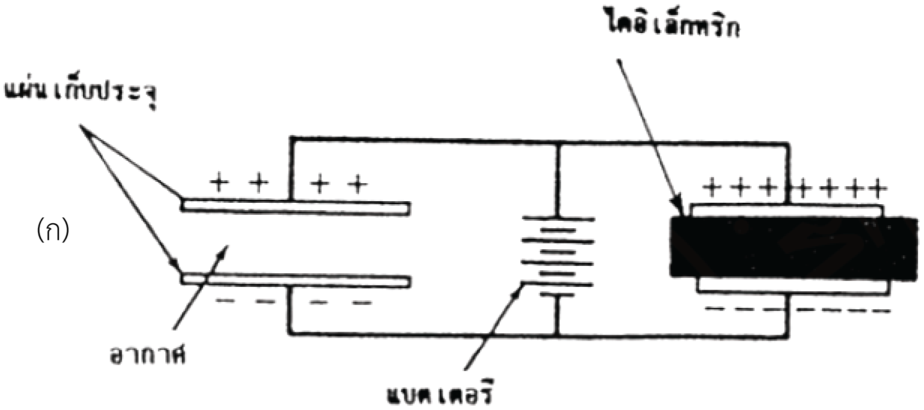
$$\mathbf{p} = q\mathbf{d} \tag{2.3}$$

เมื่อ p = ไดโพลโมเมนต์

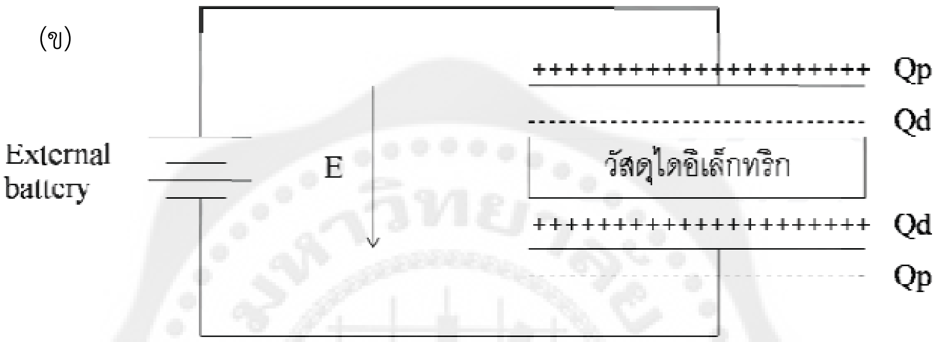
q = ประจุ

d = การกระจัดระหว่างประจุลบและประจุบวก

(ก)



(ข)



ภาพประกอบ 16 (ก) ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน 2 ชุดที่ต่อในวงจรไฟฟ้าเดียวกัน (ข) ตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นขนาน[24]

พิจารณาตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.16 ซึ่งเป็นไปตามกฎของเกาส์ (Gauss's law)

$$\varepsilon_0 \int_A \mathbf{E} \cdot \mathbf{dA} = Q_p + Q_d$$

$$Q_d = -\int_A \mathbf{P} \cdot \mathbf{dA}$$

$$\varepsilon_0 \int_A \mathbf{E} \cdot \mathbf{dA} = -\int_A \mathbf{P} \cdot \mathbf{dA} + Q_p$$

$$\int_A (\varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) \cdot \mathbf{dA} = Q_p \tag{2.4}$$

จากพฤติกรรมของวัสดุไดอิเล็กทริก D บอกถึงการกระจัดของไดอิเล็กทริก (dielectric displacement) แสดงดังสมการ 2.5

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \tag{2.5}$$

แทนค่าสมการ 2.5 ในสมการ 2.4 จะได้

$$\int_A \mathbf{D} \cdot \mathbf{dA} = Q_p \tag{2.6}$$

โพลาไรเซชันในวัสดุไดอิเล็กทริก ดังแสดงในสมการ 2.7

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E} \tag{2.7}$$

เมื่อ χ คือ ค่าสภาพซาบซึมของไดอิเล็กทริก (dielectric susceptibility) และแทนค่า 2.7 ในสมการ 2.5

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \varepsilon_0 \chi \mathbf{E}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \mathbf{E} \tag{2.8}$$

เมื่อ ε_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) มีความสัมพันธ์กับสภาพซาบซึม ดังแสดงในสมการ 2.9

$$\varepsilon_r = (1 + \chi) \tag{2.9}$$

แทนค่าสมการ 2.9 ในสมการ 2.8 จะได้

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \tag{2.10}$$

เมื่อ ε = ค่าสภาพยอมของวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material permittivity)

แทนค่า 2.10 .ในสมการ 2.6 จะได้

$$\int_A \varepsilon \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = Q_p$$

$$\varepsilon EA = Q_p \tag{2.11}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (electrical, E) กับความต่างศักย์ (potential difference, V) และระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนาน (distance, d) แสดงดังสมการ 2.12

$$E = \frac{V}{d} \tag{2.12}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า (capacitance, C) กับประจุไฟฟ้า (charge, Q) และความต่างศักย์ (potential, V) แสดงดังสมการ 2.13

$$C = \frac{Q}{V} \tag{2.13}$$

แทนค่าสมการ 2.12 ในสมการ 2.11 จะได้

$$\varepsilon VA = dQ_p \tag{2.14}$$

แทนค่าสมการ 2.13 ในสมการ 2.14 จะได้

$$\varepsilon \frac{A}{d} = \frac{Q_p}{V}$$

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \tag{2.15}$$

สำหรับตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ε_r จะมีค่าความจุไฟฟ้า แสดงดังสมการ 2.16

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \tag{2.16}$$

ดังนั้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก แสดงดังสมการ 2.17

$$\varepsilon_r = \frac{Cd}{\varepsilon_0 A} \tag{2.17}$$

เมื่อ C = ความจุไฟฟ้า (capacitance) มีหน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อโวลต์ (C/V) หรือ ฟารัด (F)

ε_0 = ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m

A = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

d = ความหนาของสารไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ เป็นค่าที่บ่งบอกประสิทธิภาพรวมถึงความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก โดยมีค่าเป็นจำนวนเท่าของสภาพยอมของสุญญากาศ ซึ่งความสามารถในการเก็บประจุแปรผันตรงกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และรูปทรงของตัวเก็บประจุ ดังนั้นการเก็บประจุไฟฟ้าที่สมบูรณ์ที่สุดจะต้องไม่นำไฟฟ้าและเมื่อได้รับไฟฟ้ากระแสตรงจะต้องไม่มีสภาพนำไฟฟ้าหรือมีความต้านทานสูงเป็นอนันต์ ในทางปฏิบัติวัสดุไดอิเล็กทริกมีค่าความต้านทานไม่เป็นอนันต์ โดยจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านปริมาณเล็กน้อย เรียกว่า กระแสรั่ว (leakage current) สำหรับพฤติกรรมของวัสดุไดอิเล็กทริกเมื่อได้รับไฟฟ้ากระแสสลับไดโพลภายในวัสดุไดอิเล็กทริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาตามความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าความถี่สูงไดโพลเกิดการกลับทิศไม่ทันกับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับทำให้เกิด relaxtion กล่าวคือ วัสดุไดอิเล็กทริกจะต้องใช้พลังงานในการกลับทิศไดโพล และเมื่อความถี่สูงไดโพลมีการกลับทิศไม่ทัน เมื่อกลับตัวยังไม่ทันก็จะยังทำการรับพลังงานจากกระแสไฟฟ้าเข้าไป ทำให้วัสดุไดอิเล็กทริกเกิดการสะสมพลังงานเป็นความร้อนเกิดขึ้น เป็นการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริก[24]

2.1.7.3 การสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริก (Loss factor)

การสูญหายไปของพลังงานบางส่วนเกิดจากความร้อนเมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกมีการโพลาไรเซชันเกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสัดส่วนของพลังงานที่หายไปในการสลับขั้วของไดโพล คือ การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss) พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจาก การรั่วไหลของกระแสและการเสียดสี (friction) ของไดโพล โดยการรั่วไหลของกระแสเกิดจากความต้านทานทางไฟฟ้า การรั่วไหลของกระแสจะเกิดขึ้นได้น้อยเมื่อความต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูง สำหรับการเสียดสีเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของไดโพลซึ่งเป็นไปได้ยากในโมเลกุลของสารอินทรีย์แบบเชิงซ้อน จะมีการสูญเสีย ที่สูงเกิดขึ้นที่ความถี่ของการเกิดขึ้นของไดโพลแต่ไม่เกิดขึ้นโดยทั้งหมด แต่สามารถเกิดขึ้นซ้ำได้ที่ความถี่ต่ำ โดยการสูญเสียจะเกิดขึ้นได้

น้อยเนื่องมาจากไดโพลเคลื่อนที่ได้ดี และที่ความถี่สูงการสูญเสียมีค่าสูงมากเนื่องจากไดโพลไม่สามารถเคลื่อนที่ได้[25-26]

2.1.7.4 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss, $\tan\delta$)

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มักจะมีค่ามาก ซึ่งหมายถึง ค่าโพลาไรเซชัน (P) มีค่ามากกว่า $\varepsilon_0 E$ มากๆ และค่าการกระจัดของไดอิเล็กทริก (dielectric displacement, D) ประมาณ P ในกรณีที่ให้สนามไฟฟ้าจากกระแสสลับให้แก่วัสดุไดอิเล็กทริก ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานอธิบายได้ด้วยค่าสภาพยอมเชิงซ้อน (complex permittivity, χ_c) โดยค่า ε' เป็นส่วนจริง (real part) ซึ่งได้มาจากค่าโพลาไรเซชัน และ ε'' เป็นส่วนจินตภาพ (imaginary part) ซึ่งเรียกว่า ค่าการสูญเสีย (loss factor) โดยค่า ε' และ ε'' เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสนามไฟฟ้า อุณหภูมิ และความแรงของสนามไฟฟ้า[26]

พิจารณาตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนานที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลาง ε^* และให้สนามไฟฟ้า $\mathbf{E}$ ซึ่งส่งผลให้ที่ขั้วของโลหะทั้งสองขั้วเกิดประจุ $+\sigma$ และ$-\sigma$ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และเนื่องจาก $D = \sigma$ จะได้

$$I(t) = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{dD}{dt} \tag{2.18}$$

จาก $\quad \mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}$ จะได้

$$D(t) = \mathrm{Re}\left[\varepsilon^* E_0 e^{i\omega t}\right] \tag{2.19}$$

แทนค่าสมการ 2.19 ในสมการ 2.18 จะได้

$$I(t) = \mathrm{Re}\left[(\varepsilon' - i\varepsilon'')E_0 i\omega e^{i\omega t}\right]$$

$$= \omega E_0 (\varepsilon'' \cos\omega t - \varepsilon' \sin\omega t) \tag{2.20}$$

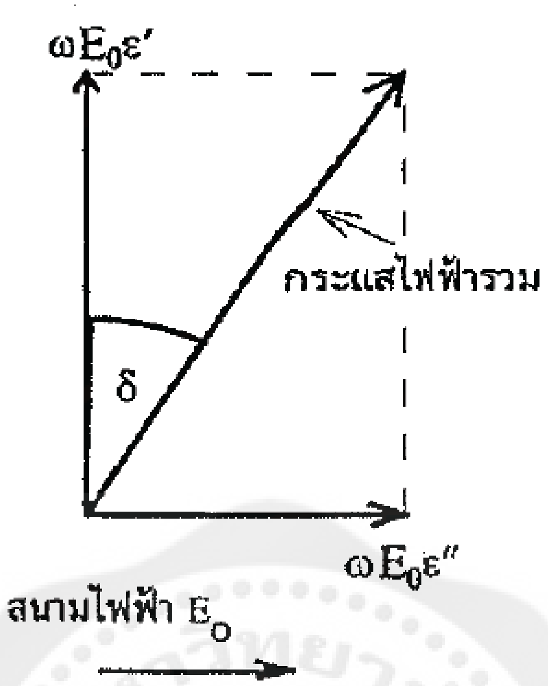
จากสมการ 2.20 พบว่าค่า ε'' ในเทอมแรกมีเฟสตรงกับสนามไฟฟ้า และค่า ε' ในเทอมหลังมีเฟสต่างจากสนามไฟฟ้าอยู่ 90° ส่งผลให้งาน (work, W) ที่สนามไฟฟ้ากระทำสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการ 2.21

$$W = \frac{\int_0^{2\pi/\omega} I(t)E(t)dt}{\int_0^{2\pi/\omega} dt} \tag{2.21}$$

$$= \frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega} \omega E_0^2 \varepsilon'' \cos^2\omega t\, dt - \frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega} \omega E_0^2 \varepsilon' \sin\omega t \cos\omega t\, dt$$

$$= \frac{\omega}{2\pi} E_0^2 \varepsilon'' \tag{2.22}$$

จากสมการ 2.20 แสดงถึงพลังงานที่สูญเสีย หาค่าได้จากผลรวมของเวคเตอร์ $\omega E_0 \varepsilon''$ และ $\omega E_0 \varepsilon'$แสดงดังภาพประกอบ 2.17



ภาพประกอบ 17 ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจากการรวมเวคเตอร์[34]

จากภาพประกอบ 17 ถ้ามุม δ เป็นมุมขนาดเล็ก ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าน้อย โดยพิจารณาค่า ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss, $\tan\delta$) ได้จาก

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.23)$$

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อค่าตัวประกอบของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก โดยทั่วไปค่านี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหล เกิดการลดลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก และมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อค่าของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไม่ถึงอนันต์ การสูญเสียเนื่องจาก dipole relaxation การสูญเสียเนื่องจากโพลาไรเซชันของอิเล็กตรอน การสูญเสียเนื่องจากการสั่นของไอออน

2.1.7.5 ความทนทานต่อการพังทลายด้านไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก (Dielectric breakdown strength)

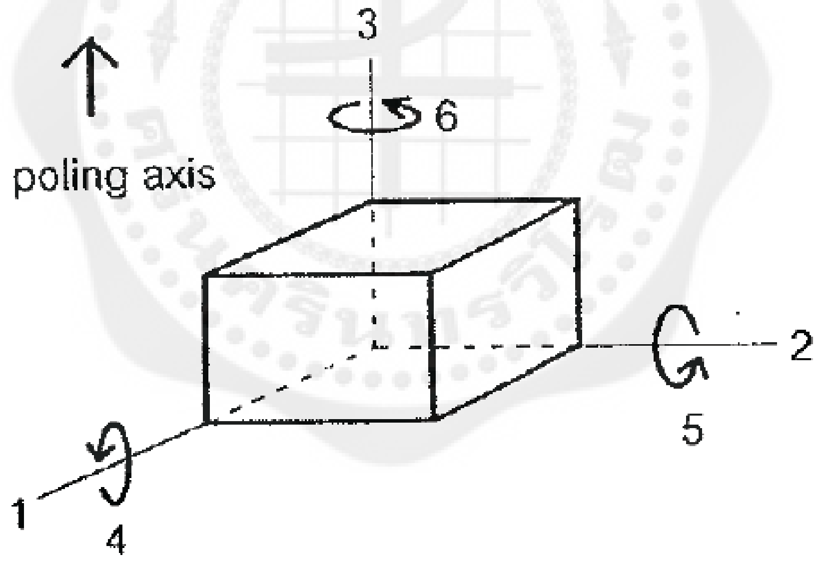
ความทนทานของวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric strength) คือ ปริมาณพลังงานที่วัสดุไดอิเล็กทริกสามารถกักเก็บไว้ได้ที่ความต่างศักย์สูง หรือค่าของปริมาณสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วัสดุยังคงรักษาสภาพความเป็นฉนวนไว้ได้ ค่าความทนทานของวัสดุไดอิเล็กทริกมีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร (kV/mm) วัสดุไดอิเล็กทริกได้รับความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงเกินกว่าค่าความทนทานของวัสดุไดอิเล็กทริก วัสดุจะถูกทำลายและมีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยการพังทลายของวัสดุไดอิเล็กทริกเกิดขึ้นได้สองแบบดังนี้[18]

● การพังทลายจากภายใน (intrinsic breakdown) เกิดจากอิเล็กตรอนในแถบการนำ (conduction band) ทำให้เกิดไอออน ส่งผลให้จำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้นจนทำให้วัสดุเสียหายซึ่งมีค่ามากถึง 100 MV/m

● การพังทลายด้วยความร้อน (themal breakdown) เกิดจากการสูญเสียความร้อนและการถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมไม่ทัน ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้สมบัติทางไฟฟ้าพังทลายไป การเกิดการพังทลายด้วยความร้อน นำไปสู่การพังทลายด้วยไฟฟ้า (electrical breakdown) ซึ่งนอกจากการรั่วไหลของประจุที่เกิดขึ้นในรูพรุนของวัสดุ การพังทลายของวัสดุจะขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุน โดยรูพรุนขนาดใหญ่จะเกิดการพังทลายได้ง่าย

2.1.7.6 สัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient, d_{ij})

ทิศทางเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนั้นจึงมีการกำหนดเป็นทิศทางสามแกนตัวเลข 1, 2 และ 3 :ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางในแนวแกน x, y และ z อีกทั้งมีการกำหนดทิศทางเพิ่มเติมคือ 4, 5 และ 6 เพื่อลดรูปของ tensor ของแกน 1, 2 และ 3 ดังแสดงในภาพประกอบ 2.18 โดยการระบุค่าต่างๆจะมีการระบุด้วยตัวอักษรห้อย (subscript)



ภาพประกอบ 18 การกำหนดทิศทางในวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก[27]

ค่าสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient, d_{ij}) เป็นค่าของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก เมื่อได้รับแรงกลต่อหนึ่งหน่วยนิวตัน ทั้งแบบตรงและแบบผันกลับมีหน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อนิวตัน (C/N) โดย d_{ij} (i = 1, 2, 3 และ k = 4, 5, 6) มีการลดรูปมากจาก d_{jkl} และ d_{ijk} ของปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกแบบทางตรงและแบบผันกลับตามลำดับ โดยสมการปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกแบบทางตรงคือ $P_j = d_{jkl}X_{kl}$ (โดย j, k, l = 1, 2, 3 แทนทิศ x, y, z ตามลำดับ) และ

สมการปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกแบบผันกลับคือ $x_{ij} = d_{ijk}E_k$ (โดย I, j, k = 1, 2, 3 แทนทิศ x, y, z ตามลำดับ) ตัวอย่างเช่น d_{33} มาจากการลดรูปจาก d_{333} คือ การให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกในทิศทางตามแนวแกน z และมีวัสดุมีการเปลียนแปลงรูปร่างตามแนวแกน z ส่วนอีกตัวอย่างหนึ่งคือ d_{31} คือ มีการให้สนามไฟฟ้าตามแนวแกน x เกิดการเปลียนแปลงรูปร่างตามแนวแกน x และแกน y [27]

ค่าสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริกมีความสัมพันธ์กับการกระจัด ความเค้นหรือความเครียดและสนามไฟฟ้า ดังแสดงในสมการ 2.24 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริก โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-12} C/N สำหรับปรากฏการณ์แบบตรง และ 10^{-12} m/V สำหรับปรากฏการณ์แบบผันกลับ ค่าสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริกนำไปใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการการสั่น เช่น เครื่องโซนาร์ เป็นต้น

$$d = \frac{D}{T} = \frac{S}{E} \tag{2.24}$$

เมื่อ d = สัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient)

D = การกระจัดของไดอิเล็กทริก (dielectric displacement)

T = ความเค้น (stress)

E = สนามไฟฟ้า (electric field)

S = ความเครียด (strain)

ค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ (voltage coefficient, g_{ij}) เป็นค่าปริมาณของความต่างศักย์ที่วัสดุไพอิโซอิเล็กทริกสร้างขึ้นเมื่อได้รับความเค้นทั้งแบบตรงและแบบผันกลับ มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเมตร (V/m) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริก และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ε_r) ดังแสดงในสมการ 2.25

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{\varepsilon_r \varepsilon_0} = \frac{S}{D} = \frac{E}{T} \tag{2.25}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ (g) นิยมนำมาใช้ในด้านของวัสดุที่ต้องการสร้างความต่างศักย์ในการตอบสนองต่อความเค้นเชิงกล เช่น เครื่องบันทึกเสียง หัวจุดแก๊ส เป็นต้น

2.1.7.7 แฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบ (Electromechanical coupling factor, k_p)

แฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบ (Electromechanical coupling factor, k_p) เป็นค่าที่แสดงความสามารถ หรือความได้เปรียบที่เกิดขึ้นกับวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก และเป็นตัวบอกประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานในวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ซึ่งวัดจากทิศทางของการให้สนามไฟฟ้า และทิศทางของการวัดพลังงานกลที่ให้ออกมา ซึ่งผลึกของไพอิโซอิเล็กทริกจะมีค่า k น้อยกว่า 0.1 อย่างไรก็ตามค่า k จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอเนื่องจากเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานแบบไม่สมบูรณ์ ค่า k สามารถหาได้โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับของผลึกของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก ทำการวัดค่ารีแอกแทนซ์ (reactance) หรือค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) เปรียบเทียบกับความถี่ โดย F_r เป็นความถี่อิมพีแดนซ์ต่ำสุด และ F_a เป็นความถี่อิมพีแดนซ์สูงสุด[28-30] ดังแสดงในสมการ 2.26

$$k = \sqrt{\frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ได้}}{\text{พลังงานกลที่ให้เข้าไป}}} = \sqrt{\frac{\text{พลังงานกลที่ได้}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ให้เข้าไป}}} \quad (2.26)$$

$$k_p = \sqrt{2.51}\sqrt{\left(\frac{F_a - F_r}{F_r}\right)} \quad (2.27)$$

2.1.7.8 แฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกล (Mechanical quality factor, Q_M)

วิธีการอธิบายสมบัติเรโซแนนซ์ (resonance) ของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก ประกอบด้วยการวัดอิมพีแดนซ์ (impedance) ของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริกผ่านจุดต่ำสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ (F_r) และจุดแอนติเรโซแนนซ์ (F_a) ซึ่งแฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกล (Q_M) บ่งบอกถึงอัตราส่วนของความต้านทานต่อกระแสไฟฟ้าต่อความต้านทานในวงจรรวม ค่า Q_M ใช้นำไปอธิบายความแหลม (sharpness) ของพีคเรโซแนนซ์ โดยค่า Q_M มากพีคเรโซแนนซ์จะมีความแหลมมาก[30] ซึ่งสามารถหาค่า Q_M ได้จากสามการ 2.28

$$Q_M = \frac{1}{2\pi F_r Z_m C_0}\left(\frac{F_a^2}{F_a^2 - F_r^2}\right) \quad (2.28)$$

เมื่อ F_r = ความถี่เรโซแนนซ์ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

F_a = ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

Z_m = อิมพีแดนซ์ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω) วัดที่ F_r

C_0 = ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น ฟารัด (F) วัดที่ 1 kHz

2.1.7.9 สมบัติความต้านทานเชิงซ้อน (Acoustic impedance properties)

ความต้านเชิงซ้อนแสดงถึงค่าการตอบสนองของวัสดุที่ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นฮามอนิกที่มีค่าความถี่เฉพาะ พิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างความดันเสียงและความเร็วเสียงของอนุภาคขณะทำการวัดค่าที่วัดได้มีหน่วยเป็น เรย์ (rayls) การวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนจะพิจารณาในระนาบคลื่นที่ผ่านชิ้นงานที่ทำการวัดเทียบกับตัวเทียบความถี่อ้างอิง[31-32] แสดงความสัมพันธ์ดังสมการ 2.29

$$Z = \frac{P}{U} \quad (2.29)$$

เมื่อ Z = ความต้านทานเชิงซ้อน (acoustical impedance)

P = ความดันเสียงที่ระนาบตัดขวาง (pressure cross-section)

U = ปริมาตรความเร็วเสียง (volume velocity)

ลักษณะเฉพาะของความต้านทานเชิงซ้อน (characteristic impedance) ความต้านทานเชิงซ้อนของเสียงสามารถแสดงถึงลักษณะเฉพาะของตัวกลางได้ แสดงดังสมการ 2.30

$$Z_0 = \rho c \tag{2.30}$$

เมื่อ Z_0 = ลักษณะเฉพาะของความต้านทานเชิงซ้อน มีหน่วยเป็น N (s/m^3) หรือ Pa (s/m)

ρ = ความหนาแน่นของตัวกลาง (kg/m^3)

c = ความเร็วของคลื่นตามยาว หรือความเร็วแสง (m/s)

2.1.7.10 ค่าคงที่ความถี่ (Frequency constant, N)

เมื่อให้สนามไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกับวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก วัสดุไพอิโซอิเล็กทริกจะเกิดการสลับขั้วของสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นส่งผลให้มีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ แสดงถึงปรากฏการณ์การเกิดความถี่เรโซแนนซ์ในแนวระนาบและแนวรัศมี มีความสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ (f_s) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของความถี่เรโซแนนซ์ในแนวรัศมี (N_p) และเส้นผ่านศูนย์กลางของเซรามิก (d)[27] แสดงความสัมพันธ์ดังสมการ 2.31

$$N_p = f_s d \tag{2.31}$$

ในกรณีความถี่เรโซแนนซ์สูง วัสดุไพอิโซอิเล็กทริกจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ไม่สามารถนำทิศทางของความถี่เรโซแนนซ์มาคำนวณได้ โดยมีความสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ (f_s) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของความถี่เรโซแนนซ์ในแนวระนาบ (N_p) และความหนาของเซรามิก (h) แสดงความสัมพันธ์ดังสมการ 2.32

$$N_t = f_s h \tag{2.32}$$

2.1.8 การประยุกต์ใช้งานของไพอิโซอิเล็กทริก (Application of piezoelectric)

จากคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงพลังงานของวัสดุไพอิโซอิเล็กทริก จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง[5,7-8,22-23] อาทิเช่น

2.1.8.1 อุปกรณ์ตรวจวัด (sensors)

เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ หรือปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น แสง เสียง อุณหภูมิ แรงทางกล ความเร็ว ความดัน เป็นต้น สัญญาณที่ตรวจวัดได้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณผ่านทรานดิวเซอร์โดยสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์มีหลายรูปแบบ โดยการนำสัญญาณไปใช้งานตามความเหมาะสมของงานที่ต้องการวัด การนำไพอิโซอิเล็กทริกมาใช้งานในเซนเซอร์ทำได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริกมาใช้ซึ่งมีทรานดิวเซอร์เป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณทางกลเป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือเป็นปรากฏการณ์แบบตรง เช่น เซนเซอร์ตรวจจับคลื่นเสียง (surface acoustic wave sensor) เซนเซอร์วัดอุณภูมิ (temperature sensor) เซนเซอร์วัดความเร็ว (velocity sensor) เซนเซอร์วัดแรง (force sensor) เซนเซอร์วัดความดัน (pressure sensor) น็อคกิ้งเซนเซอร์ (knocking sensor) อัลตราโซนิคเซนเซอร์ (ultrasonic sensor) เป็นต้น การใช้งานไพอิโซอิเล็กทริกจะมีการออกแบบการใช้งานให้มีรูปร่างตามการใช้งานไม่ว่าจะเป็นแบบ

วงกลม แบบแท่ง แบบแผ่นบาง ตามความเหมาะสมของการใช้งาน และเพื่อให้ได้สมบัติของตัวเซนเซอร์ที่ดี เช่น มีความแม่นยำ (accuracy) ฮีสเทอรีซีส (hysteresis) ผลของการตอบสนอง (response) ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ (sensitivity) รวมไปถึงอายุการใช้งาน (reliability) เป็นต้น

2.1.8.2 แอคชูเอเตอร์ (actuators)

ใช้คุณสมบัติในเรื่องการเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดของไพอิโซอิเล็กทริก หรือใช้ในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงทิศทาง สามารถใช้ในอุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางแสง เลนส์ การลดขนาดของมอเตอร์ และอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนไหว เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน

2.1.8.3 แทรนส์ดิวเซอร์ (transducer)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นพลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานเสียง พลังงานกล เป็นต้น ปัจจุบันมีการนำไปใช้เป็นเครื่องกำเนิดการสั่นแบบเหนือเสียง (ultrasonic vibration) เพื่อใช้ในการทำความสะอาด ตัวทำละอองจากของเหลว ตัวเจาะและบดเซรามิก หรือวัสดุที่มีความแข็ง การเชื่อมพลาสติก อุปกรณ์วินิจฉัยโรค เป็นต้น โดยใช้วัสดุไพอิโซอิเล็กทริกที่สามารถเกิดปรากฏการณ์แบบผันกลับที่ได้ทั้งการสร้างสัญญาณเหนือเสียง และรับสัญญาณการสะท้อนได้นั้นจึงเกิดการนำปรากฏการณ์ทั้งสองมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในเรื่องการวัดระยะทาง อัตราการไหล รวมไปถึงการวัดระดับของของเหลว โดยอาศัยสมบัติของความแตกต่างของการเคลื่อนที่ของเสียงในของเหลวและในอากาศ

2.1.8.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generators)

ไพอิโซอิเล็กทริกสามารถทำให้เกิดความต่างศักย์สูง ซึ่งทำให้เกิดประกายไฟระหว่างช่องว่างของตัวนำได้ โดยสามารถนำไปใช้เป็นตัวจุดประกายไฟ อุปกรณ์การเชื่อม ที่มีขนาดเล็กและไม่ซับซ้อนได้

2.2 การขึ้นรูปเลดเซอร์โคเนตไททาเนตด้วยวิธีเทปคาสติ้ง

2.2.1 การขึ้นรูปเซรามิก (ceramic molding method)

การขึ้นรูปเซรามิกมีหลากหลายวิธีด้วยกันได้แก่ dry pressing, spray drying, isostatic pressing, extrusion, slip casting, tape casting, injection molding เป็นต้น แต่ละวิธีที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์เซรามิกที่เราต้องการ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีขึ้นรูปเลดเซอร์โคเนทไททาเนตแบบ tape casting เนื่องจากต้องการ เลดเซอร์โคนเนตไททาเนตแบบแผ่น และการขึ้นรูปแบบนี้ สามารถนำแผ่นเทป ไปประกอบเป็นชั้นๆ (multilayer) หรือทำเป็นวัสดุผสม (composite) โดยต้องทำการการควบคุมความหนา ความเรียบได้อย่างแม่นยำ และมีพื้นที่ผิวมาก[33]

2.2.2 การขึ้นรูปเซรามิกแบบเทปคาสติ้ง (tape casting fabrication)

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้การขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง (tape casting) โดยมีการเตรียมวัตถุดิบที่ต้องนำมาขึ้นรูปให้อยู่ในสภาพของสารแขวนลอยที่มีอนุภาคผง แขวนลอยอยู่ในของเหลวหรือที่เรียกว่า สเลอรี (slurry) ที่มีความหนืดพอที่จะยังสามารถเทตัวสเลอรีเพื่อขึ้นรูปได้[33-34]

สำหรับการเตรียมแผ่นเทปมีตัวแปรต่างๆที่สำคัญคือ การเตรียมสเลอรี ที่ประกอบด้วยผงเซรามิก (ceramic powder) ตัวทำละลาย (solvent) ตัวประสาน (binder) สารเพิ่มความเหนียว (plasticizer) สารช่วยกระจายตัว (dispersant) และสารลดฟอง (antifoamer หรือ deflocculator)

- ผงเซรามิก (ceramic powder) การเตรียมสเลอรี ผงเซรามิกมีความสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อให้หลังการเผาผนึกมีคุณภาพจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- พื้นที่ผิว (surface area) พื้นที่ผิวของอนุภาคผงเซรามิก มีความสำคัญเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงเซรามิกกับสารเติมแต่ง เช่น สารลดแรงตึงผิว (surfactants) และตัวประสาน โดยพื้นที่ผิวของผงควรอยู่ในช่วง 5-15 ตารางเมตรต่อกรัม ทำให้เซรามิกหลังการเผาผนึกมีความหนาแน่นสูงและจะต้องมีการเลือกใช้สารช่วยกระจายตัวกับตัวทำละลายที่เหมาะสมกัน

- ขนาดของผงเซรามิก (particle size) และการกระจายตัว (distribution) การควบคุมขนาดและการกระจายตัวของผงเซรามิก จะต้องมีพื้นที่ผิวของผง 5-15 ตารางเมตรต่อกรัม หรือสูงกว่านี้ และมีการกระจายตัวในช่วงแคบ จะช่วยลดการจับตัวของผงในขณะทำการบดย่อย ขนาดของผงเซรามิกมีขนาดอนุภาคใหญ่ต่อขนาดอนุภาคเล็กเท่ากับ 6:1 ของอนุภาคใหญ่สุดไปจนถึงเล็กสุด และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคทรงกลมประมาณ 25:1

- ตัวทำละลาย (solvent) เป็นสารที่ใช้ในการละลายสารที่มีสถานะเป็นของแข็ง เพื่อให้อยู่ในรูปของเหลว จะทำให้สเลอรีมีการไหลตัวดี โดยสารที่เป็นตัวทำละลายจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาหรือละลายผงเซรามิก และสารละลายจะต้องระเหยออกได้ง่ายภายหลังจากการขึ้นรูปโดยไม่มีการตกค้างหรือเกิดการเจือปน โดยสมบัติต่างๆ ของสารละลายที่นิยมใช้ในการเตรียมสเลอรีสำหรับการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งดังแสดงในตาราง 2.2 ตัวทำละลายสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม ประกอบด้วย

- ตัวทำละลายที่ประกอบด้วยน้ำ (aqueous solution) เป็นตัวทำละลายที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ มีจุดเด่นคือ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีราคาถูก ไม่ติดไฟ แต่ยังมีข้อจำกัดได้แก่ มีความงอตัวน้อย (unflexible) การละเหยของน้ำออกจากแผ่นเทปเป็นไปได้ยาก

- แบบตัวทำละลายที่ไม่ใช่น้ำ (non-aqueous solution) เช่น ไตรคลอโรอีเทน (trichloroethane) ไซลีน (xylene) ตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอล กับ MEK หรือเอทานอลกับโทลูอีน เป็นต้น สารเหล่านี้เป็นสารที่มีการระเหยได้ง่าย และทำให้สเลอรีมีค่าความหนืดที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเทป แต่อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และบางชนิดเกิดสารตกค้างในสิ่งแวดล้อม ปัจจุบัน มีความพยายามที่จะลดการใช้สารกลุ่มนี้

ตาราง 2 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของสารละลายที่นิยมใช้ในการเตรียมสเลอรีสำหรับการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง(35-36)

ตาราง 2 สมบัติของตัวทำละลายต่างๆ (35-36)

Solvent	Boiling point (°C)	Evaporation rate	Heat of evaporization	Viscosity at 25 °C (mPa s)	Polarity (kJ/mol)	Relative permitivity	Surface tension (mN/m)
Water	100	0.16	2260	1	264	80	73
Ethanol	78	2.65	860	1.2	217	24	23
Ethylene glycol	198	0.01	800	20	236	37	48
Methyl ethyl ketone	80	4.59	444	0.4	173	18	25
Acetone	56	7.70	524	0.3	177	21	25

● ตัวประสาน (binder) เป็นสารที่ทำให้อนุภาคเซรามิกเชื่อมต่อกัน เกิดการเกาะตัวของอนุภาคที่ดีขึ้น ทำให้เนื้องานที่ผ่านการขึ้นรูปมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทำการเคลื่อนย้ายได้ แต่หากเมื่อมีตัวประสานมากทำให้เกิดการเสียรูปได้ โดยต้องกำจัดออกให้หมดในขั้นตอนการเผาไล่ตัวประสาน (binder burn-out) ส่วนใหญ่ตัวประสานจะเป็นสารอินทรีย์ มีทั้งแบบละลายน้ำได้ และไม่ละลายน้ำ ดังนั้นในการนำมาใช้งานต้องพิจารณาความสามารถในการละลายของตัวประสานในตัวทำละลายที่เลือกใช้ โดยตัวประสานที่ละลายน้ำได้มักจะเป็นโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ต่อกันเป็นสายโซ่ยาว ประกอบด้วย อะตอมของออกซิเจน คาร์บอนและไนโตรเจน โดยตัวประสานที่นิยมใช้ เช่น Polyvinyl alcohol (PVA), Polyvinyl butylral (PVB), Cellulose acetate และ Methacrylate emulsion เป็นต้น เนื่องจากการหล่อเทปเป็นของเหลวที่จะต้องมีความหนืดต่ำเพื่อจะได้ทำการเทลงบนแผ่นรองได้

● สารเพิ่มความเหนียว (plasticizer) ใช้ในการเพิ่มความเหนียวและความยืดหยุ่นของชิ้นงานที่หล่อก่อนการเผา โดยจะนำหน้าที่ในการปรับปรุงสมบัติของตัวประสานที่แห้งหรือเกือบแห้งให้มีความอ่อนตัว ทำให้แผ่นเทปมีความเหนียว แข็งแรง เพื่อสามารถม้วนพับได้ โมเลกุลของสารเพิ่มความเหนียวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างของพอลิเมอร์ที่เป็นตัวประสาน และขัดขวางการเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ในแนวเดียวกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวสายโซ่ที่เป็นแรงแวนเดอร์วาลล์ลดลง ทำให้เกิดการอ่อนตัว การเลือกใช้สารเพิ่มความเหนียวอยู่ในรูปของสารละลาย โดยมักจะเป็นสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าตัวประสาน ตัวอย่างของสารเพิ่มความเหนียวดังแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 สารเพิ่มความเหนียว (plasticizer)[33]

Phthalates	Glycols	Other
N-butyl (dibutyl)	(poly) Ethylene	Ethyltoluene sulfonamides
Dioctyl	Polyalkylene	Glycerine (Glyceral)
Butyl benzyl	(poly) Propylene	Tri-n-butyl phosphate
Mixed esters	Triethylene	Butyl striate
Dimetyl	Dipropylglycol dibenzoate	Methyl abietate
		Tricresyl phosphate
		Propylene carbonate

● สารช่วยกระจายตัว (dispersants) ช่วยให้ผงเซรามิกกระจายตัวในสารละลายได้ดีซึ่งจะช่วยเพิ่มแรงผลักระหว่างอนุภาคของเหลว ทำให้เกิดเสถียรภาพในการแขวนลอยของผงสารทำให้ไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน หรือตกตะกอน โดยสารช่วยกระจายตัวนี้มีผลโดยตรงกับค่าความหนืดของสเลอรี ซึ่งสมบัติของสารช่วยกระจายตัวต้องมีสมบัติดังนี้ มีค่าความหนืดต่ำ ทำให้เทปเซรามิกที่แห้งแล้วมีความหนาแน่นสูง ตัวประสานที่นิยมใช้ประกอบด้วย สารช่วยกระจายตัวที่เป็นสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ โดยแสดงในตาราง 4 สารช่วยกระจายตัวที่เป็นสารอินทรีย์ทำให้อนุภาคในของเหลวเกิดเสถียรภาพ เนื่องจากกลไกการผลักกันแบบสเตอร์ริก (steric repulsion) การใช้สารช่วยกระจายตัวที่เป็นสารอินทรีย์มีข้อควรระวังการตกค้างของไอออนบวก ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นเฟสของเหลวได้ในขณะทำการเผา

ตาราง 4 สารช่วยกระจายตัว (dispersants) [37]

สารอินทรีย์	**สารอนินทรีย์**
Sodium silicate	Polyacrylate
Sodium carbonate	Sodium succinate
Menhaden fish oil	Sodium citrate
Phosphate ester	Ammonium citrate

● สารลดฟอง (antifoamer หรือ deflocculator) เป็นสารที่ช่วยในการลดปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นในกระบวนการบดย่อย ซึ่งฟองอากาศจะมีผลต่อสมบัติของแผ่นเทป การใช้สารลดฟองจะใช้ในขณะทำการเตรียมสเลอรี เพื่อกำจัดฟองอากาศก่อนที่จะทำการเทเทป สารลดฟอง เช่น Glyceral trioleate (GTO) และ acetone เป็นต้น

2.2.3 การเผาผนึก (Sintering)

การเผาผนึก (sintering) คือ กระบวนการทางความร้อนที่ทำให้อนุภาคเกิดการสร้างพันธะกันอย่างสมดุล ซึ่งโครงสร้างหลักที่เป็นของแข็งที่พัฒนามาจากการเคลื่อนย้ายมวลลักษณะต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นในระดับอะตอม โดยการเกิดพันธะที่เชื่อมต่อกันจะทำให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น รวมทั้งมีพลังงานลดลง และยังเป็นการกำจัดรูพรุนที่ระหว่างอนุภาคผงเริ่มต้นที่ใช้การหดตัว และการเติบโตขององค์ประกอบที่อยู่เชื่อมติดกัน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินผนึกของ PZT อยู่ที่ประมาณ 1000–1200°C ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของเทป PZT ทีได้ ซึ่งในการเผาจำเป็นต้องเผาในบรรยากาศที่มีตะกั่ว (Pb) เพื่อป้องกันการระเหยของตะกั่วในรูปของ PbO ออกไปจากชิ้นงาน จึงต้องควบคุมให้สัดส่วนของตะกั่วภายในองค์ประกอบให้ได้ตามที่ต้องการ โดยขั้นตอนในการเผาผนึกมีดังนี้[26]

- การเกิดปฏิกิริยาก่อนการเผาผนึก ขั้นตอนนี้รวมถึงการเผาไล่ตัวประสาน และการกำจัดพวกแก๊สที่เกิดขึ้นมาจากการแยกสลายองค์ประกอบ และการเกิดออกซิเดชัน
- การเผาผนึกเพื่อให้อนุภาคเกิดการหลอมตัวรวมกันซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิในผลิตภัณฑ์สูงถึง 2 ใน 3 เท่าของค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์
- การลดอุณหภูมิเพื่อให้เกิดการเย็นตัว

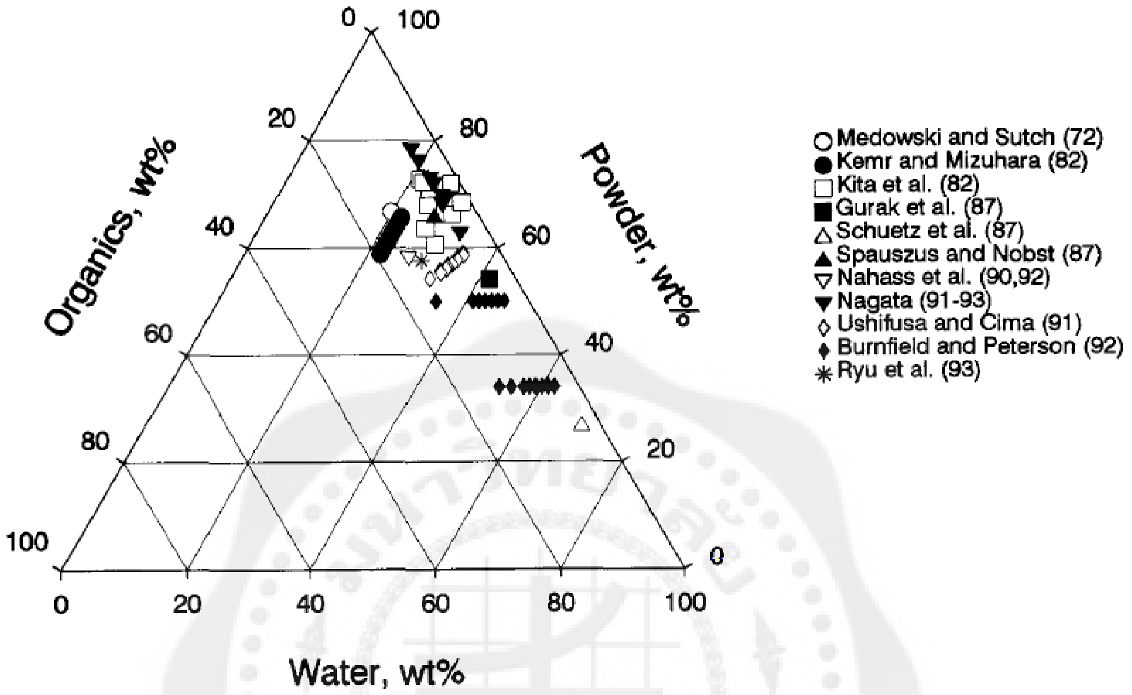
การเผาผนึกประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

- การเผาผนึกช่วงต้น (initial sintering) เกิดการเรียงตัวใหม่ของอนุภาคภายในชิ้นงานและเกิดพันธะที่แข็งแรง หรือคอ (neck) ที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคผงภายในชิ้นงาน
- การเผาผนึกช่วงกลาง (intermediate sintering) เป็นช่วงที่คอมีขนาดโตขึ้นและมีรูพรุนในชิ้นงานลดลง เนื่องจากอนุภาคเข้ามาชิดกันมากยิ่งขึ้น ทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว
- การผนึกช่วงสุดท้าย (final state sintering) เป็นช่วงที่รูพรุนในชิ้นงานถูกกำจัดออกไปจากชิ้นงาน โดยใช้กลไกการแพร่ของอากาศ ทำให้ชิ้นงานมีความแน่นตัวเพิ่มขึ้น

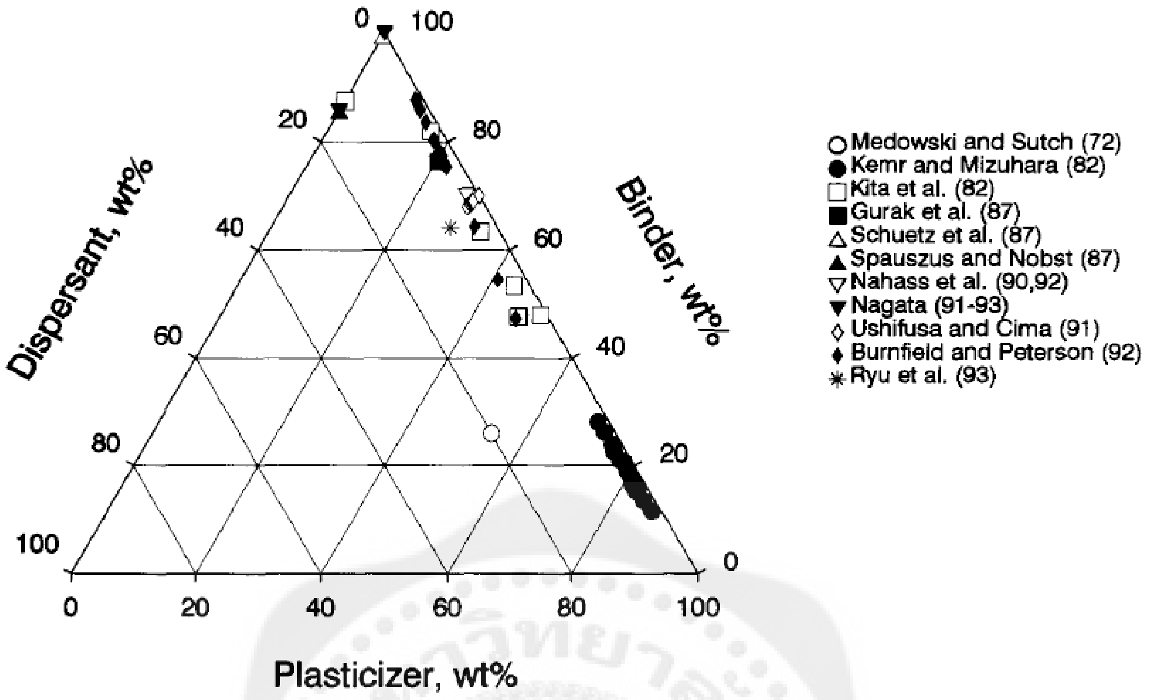
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D. Hotza และ P. Greil[10] ได้ทำการขึ้นรูปผงเซรามิกแบบเทปคาสติ้ง ซึ่งประกอบด้วย ส่วนผสมของสเลอรี กระบวนการเตรียม และปัจจัยต่างๆของการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งโดยใช้ตัวทำละลายที่ประกอบด้วยน้ำ (aqueous solution) ซึ่งมีข้อดีคือ ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ แต่ยังมีข้อจำกัดคือ การระเหยออกก่อนของตัวทำละลาย ค่าความหนืดที่ต่ำ ความงอตัวน้อย (unflexible) ทำให้มีปัญหาในเรื่องการจัดเก็บที่ต้องการการม้วนเก็บ โดยส่วนผสมของสเลอรีประกอบด้วยผงเซรามิก 25-80 wt.% สารแต่งเติม 18 wt.% น้ำน้อยกว่า 20 wt.% ถึง 70 wt.% แสดงดังแสดงในภาพประกอบ 2.19 และภาพประกอบ 2.20 สำหรับขั้นตอนในการบดย่อย (ball miling) ใช้ความเร็วรอบ 60-120 rpm นาน 5-24 ชั่วโมง ขั้นตอนการเทปคาสติ้ง (tape casting) จะใช้เครื่อง doctor blade อัตราการขึ้นรูปในช่วง 30-120 cm/min โดยใบมีดของเครื่อง doctor blade สามรถปรับได้สูงสุด 1 mm สำหรับขั้นตอนการทำให้แห้ง

(drying) อยู่ในระบบปิดมี ที่อุณหภูมิห้องถึง 85°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50-70 % ทิ้งไว้เป็นเวลา 26 นาที ถึง 24 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 19 ส่วนผสมของสเลอรีสำหรับเทปคาสติ้ง ผงเซรามิกเป็นอลูมินา (alumina) ยกเว้นของ Ushifusa และ Cima ใช้ผงเซรามิกเป็นมัลไลท์ (mullite)[10]



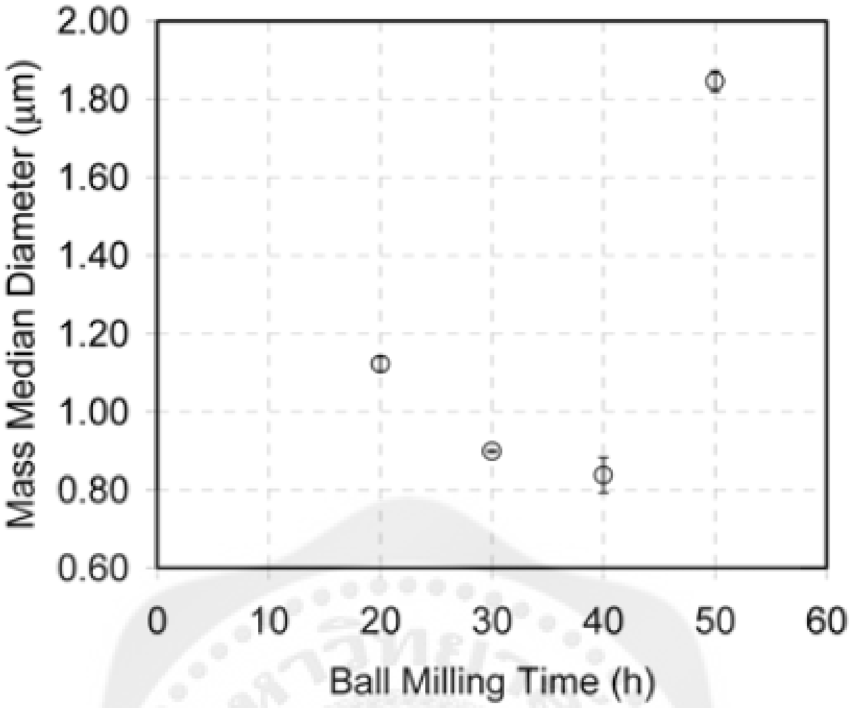
ภาพประกอบ 20 ส่วนผสมของสารเติมในสเลอรีสำหรับเทปคาสติ้ง[10]

James E. Smay และ Jennifer A. Lewis[38] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและสมบัติของแผ่น PZT ด้วยวิธีการเทปคาสติ้งที่มีตัวทำละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (aqueous-based tape casting) ทำการวัดการไหล (rheological) ที่เหมาะสมจะต้องมีสัดส่วนของอนุภาคของแข็งสูง (high solids volume fraction, $\emptyset_{solids}$) อยู่ระหว่าง 0.45-0.53 เมื่อใช้แผ่นซิลิกอนเป็นแผ่นรอง ในการทดลองได้ใช้ผง PZT ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) 1.86 m^2/g ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (average particle size) 0.62 µm ความหนาแน่น 7.59 g/mL ใช้ตัวประสาน (binder) เป็นอะคริลิคเลเทคซ์ (acrylic latex emulsion) ที่มีโหลดของแข็ง (solids loading, $\emptyset_{latex}$) 0.55 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.32 µm เปลี่ยนเป็นแก้วที่อุณภูมิ -6°C ใช้ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (hydroxypropyl methylcellulose) ที่มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) 3500 ใช้ doctor blade ในการเทปคาสติ้งที่มีความหนาในช่วง 300 µm ถึง 100 mm ทำให้แห้งโดยใช้อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั้นเคลือบของแผ่นที่เตรียมได้ใช้เวลา 60 วินาที ใช้ความดัน 35 MPa ทำการเผาผนึก (sintering) ด้วยความร้อนของตัวอย่างที่ 10 °C/min ถึง 250°C และ 1°C/min ถึง 300°C ทิ้งไว้ที่ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และสุดท้ายที่ 1°C/min ถึง 600°C และทิ้งไว้ที่ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ตัวประสานเป็นอะคริลิคเลเทคซ์ การตรวจสอบการไหลของสารละลายเลเทคซ์เป็นฟังก์ชันของการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนปริมาตร PZT โดยไม่คิดอัตรากิริยาของคอนลอยด์ ในขณะเริ่มต้นของขั้นตอนการทำให้แห้ง ความเค้นส่งผลโดยตรงต่อแผ่นชิ้นงาน

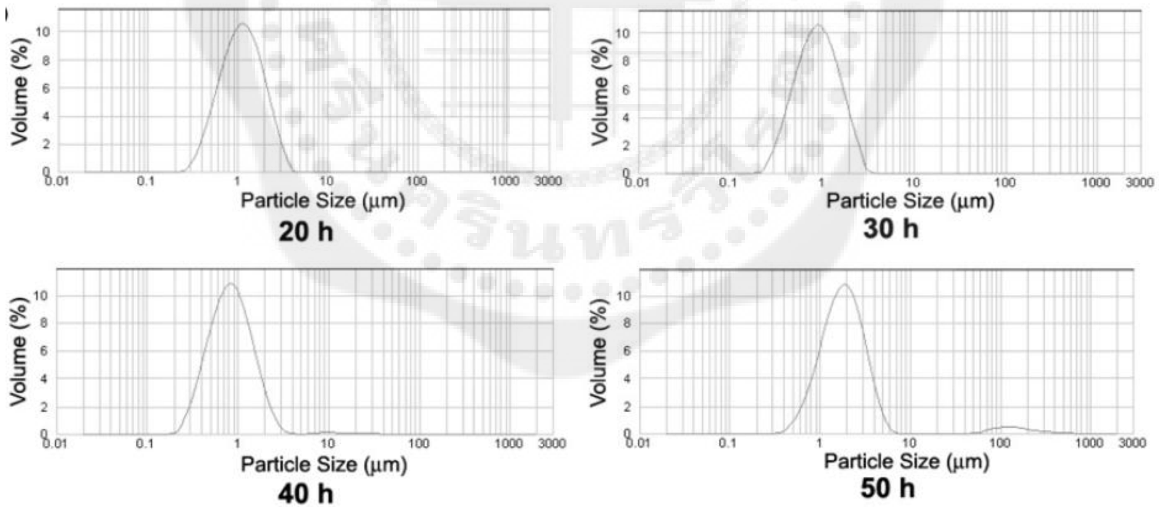
ที่เตรียมได้ โดยเมื่อความเค้นเพิ่มมากขึ้นเปอร์เซ็นการหายไปของตัวทำละลายจะเพิ่มมากขึ้น ความเค้นสูงสุดมีผลกับแรงตึงผิวของเฟสของเหลว

Trolier-Mckinstry, S. และ Muralt, P[1] ได้ทำการรวบรวมข้อมูลในช่วง 15 ปี ที่เกี่ยวข้องกับไพอิโซอิเล็กทริกฟิล์มบางสำหรับ MEMS (microelectromechanical systems) โดยมีข้อดีคือ มี high available energy density สูง ใช้พลังงานต่ำ มี hysteresis ต่ำ และเป็นเซนเซอร์ที่มีความไวสูง ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนองไพอิโซอิเล็กทริก (piezoelectric response) ของไพอิโซอิเล็กทริกที่ไม่ใช่เฟอร์โรอิเล็กทริก (non-ferroelectric piezoelectric) เช่น ZnO และ AlN โดย AlN มีค่าความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) ที่สูงและใช้งานได้ดีกับ CMOS processing โดยที่ค่าการตอบสนองไพอิโซอิเล็กทริกที่สูงจะทำให้ใช้ความต่างศักย์ค่อนข้างต่ำในการทำงานของแอคชูเอเตอร์ อีกทั้งกล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient) ได้แก่ การจัดเรียง (orientation) ส่วนประกอบ (composition) ขนาดเกรน (grain size) ความผิดปกติทางเคมี (defect chemistry) และขอบเขตการเคลื่อนที่ (mechanical boundary) โดยมีโครงสร้างที่ดีที่สุด ที่ให้ค่าการตอบสนองไพอิโซอิเล็กทริกมีค่าสูง คือใน {001} rhombohedrally distorted perovskite โดยมีค่า $e_{31,f}$ -12 ถึง -27 C/m^2

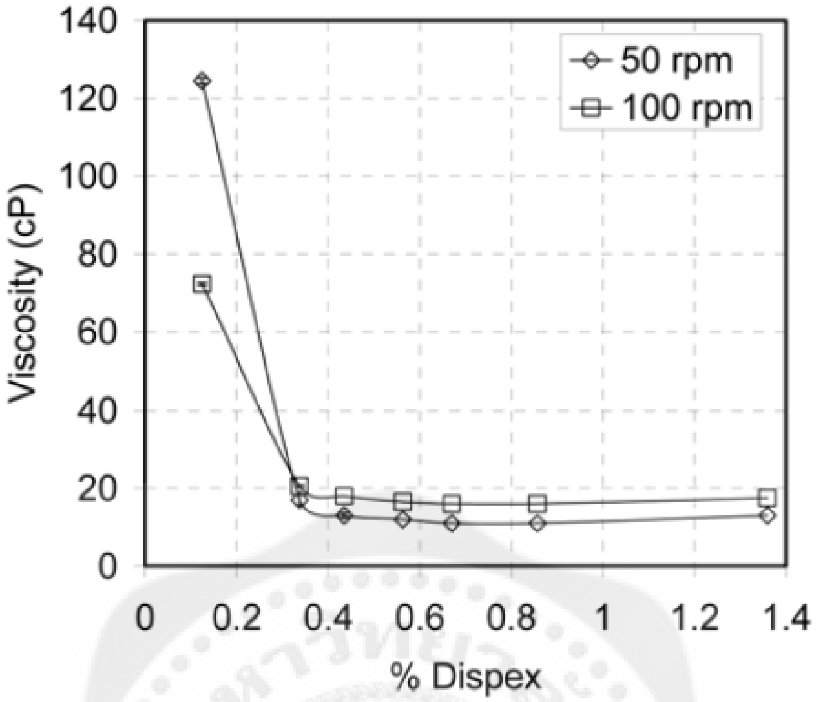
Traiphol, Nissanart[39] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบดย่อย (ball milling) และความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว (dispersant) ที่มีผลต่อสมบัติของ PZT ที่เตรียม โดยวิธีการเทปคาสติ้งด้วยตัวทำละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ ทำการตรวจสอบขนาดอนุภาคการกระจายตัว ความเสถียร โดยใช้การเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ เพื่อวิเคราะห์ขนาดอนุภาค ในการบดย่อยใช้ระยะเวลา 30-40 ชั่วโมง เป็นช่วงที่ทำให้ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 1 μm ดังแสดงในภาพประกอบ 21 และภาพประกอบ 22 สำหรับความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวคำนวณจาก deflocculation curve ดังแสดงในภาพประกอบ 23 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว โดยความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว 0.6 wt.% มีความเหมาะสมต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง



ภาพประกอบ 21 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยสำหรับการบดย่อยในช่วงเวลาต่างๆ[39]



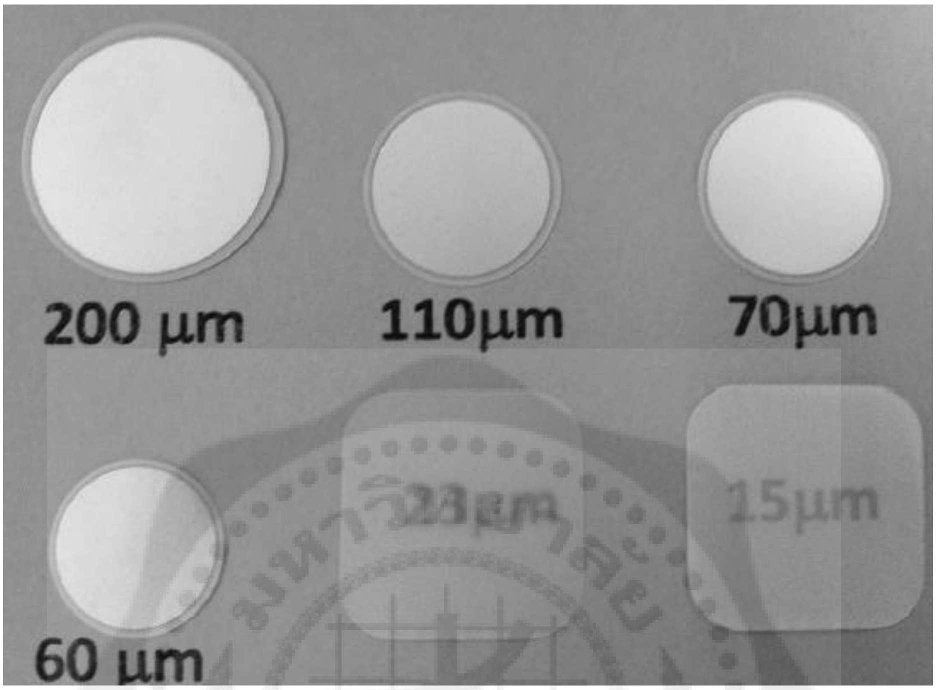
ภาพประกอบ 22 ขนาดอนุภาคการกระตัวของ PZT สำหรับเวลาในการบดย่อยต่างๆ[36]



ภาพประกอบ 23 deflocculation curve ของ 60 wt.% ทำการบดย่อย 30 ชั่วโมง[39]

Qin, Lifeng และคณะ[8] ได้ทำการศึกษาการประดิษฐ์และวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มหนา PZT ด้วยวิธีการเทปคาสติ้ง โดยใช้ส่วนผสมของ $PbZrO_3$-$PbTiO_3$ บริเวณรอยต่อเฟส (morphotropic phase boundaty , MBP) ระหว่างเฟสเตตระโกนอล (tetragonal) และเฟสรอมโบฮีดรัล (rhombohedral) ซึ่งอัตราส่วนของ Zr 52% ต่อ Ti 48% สำหรับการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งที่ใช้ตัวทำละลายที่ประกอบด้วยน้ำ (aqueous solution) มีส่วนผสมของสเลอรี ดังนี้ ผง PZT 75-86 wt% น้ำปราศจากไอออน (deionized water) 13-24 wt% สารช่วยกระจายตัว (dispersant) 1-2 wt% ทำการผสมด้วยการบดอัดย่อย (ball milling) จะทำให้สเลอรีมีส่วนผสมรวมกันเหลือ 85 wt% ทำการเพิ่มแอมโมเนีย 5320 แอมโมเนีย 5320 และอะครีลิกเรซิน (acrylic resin) อย่างละ 7.5 wt% ตามลำดับ สำหรับการขึ้นรูปแบบตัวทำละลายที่ไม่ใช่น้ำ (non-aqueous solution) ใช้อะครีลิกเรซินเป็นตัวประสาน 43 wt% สารเพิ่มความเหนียว (plasticizer) 3 wt% ตัวทำละลาย (solvent) 54 wt% โดยทั้งสองแบบเตรียมที่ความหนา 10-100 μm โดยเตรียมตัวอย่างเป็นสี่เหลี่ยม หรือวงกลม ทำการเผาไล่ที่อุณหภูมิ 500 °C และทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1250-1300 °C หลังจากนั้นทำการเคลือบด้วยวิธีการการพิมพ์ (screen-print) เพื่อทำการเคลือบขั้วเงิน หรือทำการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง (sputtering) เพื่อทำการเคลือบขั้วทอง ความหนา 80-120 nm หลังจากนั้นทำการโพลลิงด้วยสนามไฟฟ้า 3-5 kV/mm ลักษณะของฟิล์มหนา PZT ที่พร้อมใช้งาน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.24 จากการทดลงทำให้ได้ค่าแฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบ (electromechanical

coupling factor, k_p) ประมาณ 0.5 และค่าแฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor, Q_M) ประมาณ 100 แสดงว่าการเตรียมโดยวิธีนี้มีประสิทธิภาพสูง



ภาพประกอบ 24 ฟิล์มหนา PZT ที่พร้อมใช้งาน[8]

2.4 การวิเคราะห์เลดเซอร์โคเนต

2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (Crystal structure analysis)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction (XRD) ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) ของชิ้นงาน เทคนิคนี้สามารถใช้วิเคราะห์ชนิดของเฟสที่ปรากฏในวัสดุเบื้องต้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ประกอบด้วยชุดข้อมูล ของค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) และความเข้มของรังสีที่ตรวจได้ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameter) ของตัวอย่างที่วิเคราะห์ ชนิดของเฟสที่ปรากฏ โครงสร้างผลึกอย่างคร่าวๆ[24, 33]

ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 nm ซึ่งเมื่อรังสีเอกซ์เกิดอันตรกิริยากับสารจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การดูดกลืน การกระเจิง การเปล่งแสง การเลี้ยวเบนของรังสี ปรากฏการณ์เหล่านี้มีลักษณะเฉพาะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง เนื่องจากของแข็งเป็นผลึกมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ และมีหลายชุดระนาบ ซึ่งรังสีเอกซ์มาตกกระทบบนผิวของชุดระนาบต่างๆ ด้วยมุมที่เหมาะสมทำให้เกิดพฤติกรรมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นได้

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของแข็งในระดับอะตอม แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ประกอบด้วย

- การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ชนิดผง (powder X-ray diffraction) ใช้วิเคราะห์ชนิดของวัสดุได้ เนื่องจากการเกิดรังสีเอกซ์ การเลี้ยวเบนทำให้เกิดสเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิด และสามารถบอกวัฏภาคเชิงผลึกของวัสดุได้ว่ามีความเป็นผลึก หรือเป็นอสัณฐาน รวมถึงใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ เนื่องจากสามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งวัฏภาคของวัสดุได้

- การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ชนิดผลึกเดี่ยว (sigle-crystal X-ray diffraction or X-ray crystallography) ใช้หาโครงสร้างของโมเลกุลได้ สามารถบอกการจัดเรียงตัวของอะตอม ความยาวพันธะ มุมระหว่างอะตอมในโมเลกุลได้ เนื่องจากวัสดุต้องเป็นผลึกเดี่ยว ดังนั้นการตกผลึกจึงมีความสำคัญในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์นั้น เมื่อลำแสงตกกระทบผิวหน้าของผลึกโดยทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอกซ์เกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า อีกส่วนหนึ่งของลำรังสีเอกซ์ผ่านไปยังชั้นที่ 2 ของอะตอมซึ่งบางส่วนก็จะเกิดการกระเจิง และส่วนที่เหลือก็จะผ่านเข้าไปยังชั้นที่ 3 ของอะตอม ดังแสดงในภาพประกอบ 25 ถ้าอะตอมในผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่าๆกัน ลำรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้ามาไปในแต่ละชั้นของอะตอมเกิดการเลี้ยวเบนเป็นลำขนานกันการเลี้ยวเบนนี้คล้ายกับการเลี้ยวเบนด้วยเกรตติงแบบสะท้อน (reflection grating) สิ่งสำคัญในการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นอยู่กับภาวะ 2 อย่างประกอบด้วย

  - รังสีที่ตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบน และเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน
  - ระยะห่างระหว่างชิ้นงานของอะตอมควรมีค่าใกล้เคียงกับค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

ในปี ค.ศ. 1912 แบรกก์ (W.L Bragg) ทำการยิงรังสีเอกซ์กระทบผิวหน้าลึกเป็นมุม θ ให้เกิดการเลี้ยวเบนและการกระเจิงเมื่อเกิดอัตรกิริยากับอะตอม O, P และ R ดังแสดงในภาพประกอบ 2.25

$$AP + PC = n\lambda \qquad (2.33)$$

เมื่อ n = 1, 2, 3, ...

รังสีที่กระเจิงในเฟสที่เส้น OCD ผลึกจะสะท้อนรังสีเอกซ์ จากภาพประกอบ 2.25 จะได้

$$AP = PC = d\sin\theta \qquad (2.34)$$

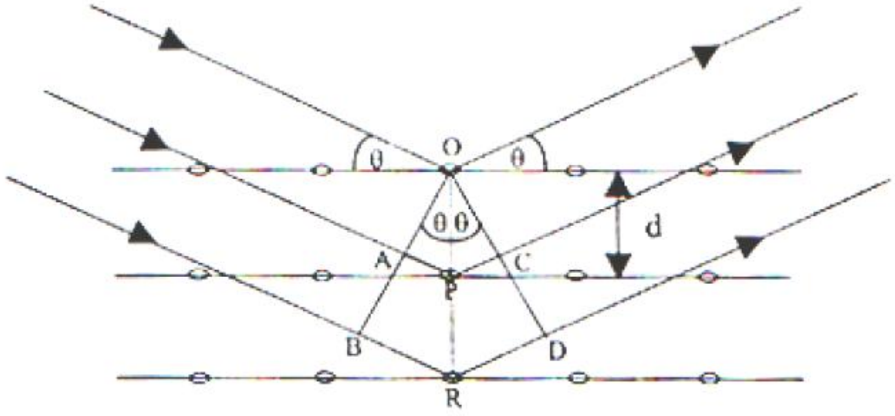
เมื่อ d = ระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก

ถ้ารังสีเอกซ์เกิดการเลี้ยวเบนจากชุดระนาบเดียวกันมีเฟสตรงกัน (in phase) จะเป็นไปตามกฎของแบรกก์ ดังแสดงในสมการ 2.35

$$2d\sin\theta = n\lambda \qquad (2.35)$$

เมื่อ θ = มุมตกกระทบ

λ = ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์



ภาพประกอบ 25 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อตกกระทบกับหน่วยเซลล์[23]

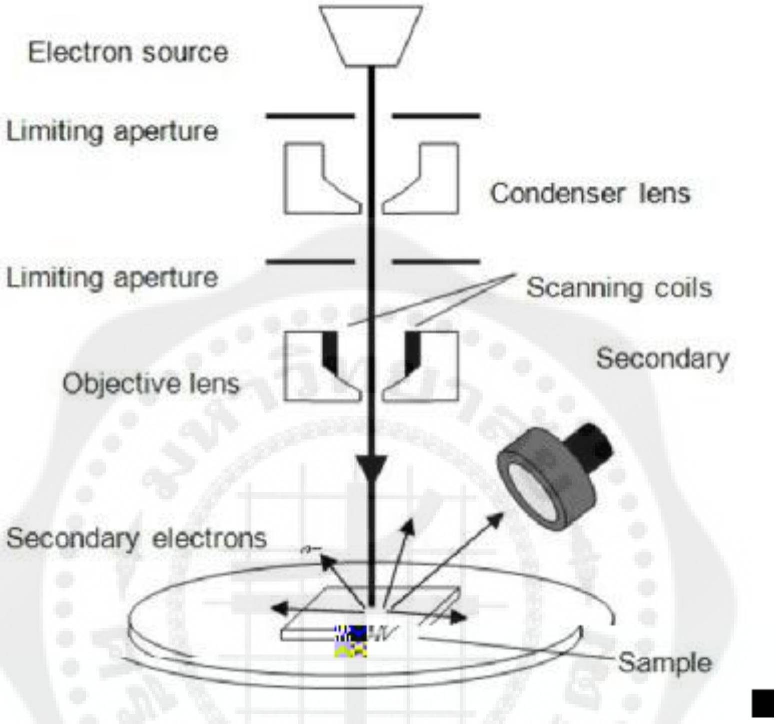
ในการวิเคราะห์ผลึกจะใช้ X-ray diffractometer ที่มีหัววัด (detector) รังสีเอกซ์เพื่อหามุมการเลี้ยวเบนและความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาและมีตัวบันทึกทำหน้าที่ plot ความเข้มของรังสีเอกซ์เทียบกับค่ามุมที่เลี้ยวเบน 2θ โดยผลึกแต่ละชนิดจะมีความเข้มและค่ามุม 2θ ต่างกันซึ่งการวิเคราะห์การเกิดเฟสของผลึกที่เตรียมได้ทำได้โดยการนำข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาเปรียบเทียบการข้อมูลการเลี้ยวเบนในฐานข้อมูล JCPDS หรือรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้รับการตรวจสอบแล้ว

ในการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคนี้มีสำหรับตัวอย่างที่เป็นผง พีคในสเปกตรัมคมชัดเมื่อวัสดุนั้นมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในช่วงกว้าง (long range order) ไม่เช่นนั้นพีคจะกว้างออก (broadening) และยังสามารถประมาณขนาดอนุภาคได้ ถ้าขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 100 nm เนื่องจากการกว้างของพีคเกิดจากการแทรกสอดแบบหักล้างที่เกิดไม่สมบูรณ์ในระหว่างการเลี้ยวเบนซึ่งสามารถนำมาหาค่าขนาดของผลึกสารตัวอย่างได้

2.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructure analysis)

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งเป็นกล้องที่มีกำลังขยายสูงสุดในการดูวัสดุไปได้ถึงประมาณ 50 nm การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการตรวจวัดโดยภาพที่ได้จาก SEM เป็นภาพ 3 มิติ ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งการทำงานของ SEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้ระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า และกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้อิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน โดยสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนให้ใหญ่หรือเล็กตามที่ต้องการ ถ้าต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens)

ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานทำให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น สัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ แล้วถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้ ดังภาพประกอบ 26[33]



ภาพประกอบ 26 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)[33]

2.4.3 การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties analysis)

การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก จะทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของแผ่น PZT ที่ผ่านการทำขั้วอิเล็กโทรด เพื่อให้มีโครงสร้างเป็นตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนานที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างกลางของแผ่นคู่ขนาน จากนั้นทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องวัด LCR ค่าความจุไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity, ε_r) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงในสมการ 2.17 โดยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ เป็นค่าที่บ่งบอกประสิทธิภาพ และความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก โดยมีค่าเป็นจำนวนเท่าของสภาพยอมของสุญญากาศ ซึ่งความสามารถในการเก็บประจุแปรผันตรงกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และรูปทรงของตัวเก็บประจุ

เครื่องวัด LCR เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดค่าพารามิเตอร์ของวงจรไฟฟ้า โดยใช้หลักการวัดอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่ต้องการตรวจวัด ซึ่งจะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (V) กระแสไฟฟ้า (I) ที่ไหลผ่านและมุมเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่ตกคร่อม จากการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของทั้ง 3 ค่านี้ทำให้เครื่องวัด LCR สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ของวงจรไฟฟ้าได้หลายค่า เช่น ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance), ค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistance), ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance), ค่าแฟกเตอร์ความสูญเสีย (dissipation factor), ค่าแฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor), ค่ากระแสไฟฟ้า (current), ค่าแรงดันไฟฟ้า (voltage), ค่าความต่างเฟสของกระแสและแรงดัน (phase angle between the current and voltage), ค่าความนำไฟฟ้า (conductance) และค่าจินตภาพของค่าผกผันอิมพีแดนซ์ (susceptance) เป็นต้น เครื่องวัด LCR มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด[41] ประกอบด้วย

- เครื่องวัด LCR แบบมือถือ ดังแสดงในภาพประกอบ 27 เครื่องชนิดนี้จะมีขนาดเล็กน้ำหนักเบา พกพาได้สะดวก สามารถเลือกความถี่ในการวัดได้หลายค่า ตั้งแต่ 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz และ 100 kHz มีความแม่นยำ 0.2% ถึง 0.1% เก็บและส่งข้อมูลผ่านพอร์ต USB ไปยังคอมพิวเตอร์ได้ เหมาะสำหรับการใช้งานในภาคสนาม

ภาพประกอบ 27 เครื่องวัด LCR แบบมือถือ[41]

- เครื่องวัด LCR แบบตั้งโต๊ะ ดังแสดงในภาพประกอบ 28 เครื่องชนิดมีขนาดใหญ่สามารถทำงานได้โดยการโปรแกรมความถี่ที่มากกว่า 100 kHz มีความแม่นยำ 0.01% ความคุมการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์ได้

ภาพประกอบ 28 เครื่องวัด LCR แบบตั้งโต๊ะ[41]

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ ขั้นตอนการทำแผ่น PZT โดยวิธีเทปคาสติ้ง การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และการวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ผงเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate, $PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O_3$) ซึ่งเตรียมขึ้นจากเลดออกไซด์ (lead oxide, Sigma Aldrich) เซอร์โคเนียมออกไซด์ (zirconium oxide, Sigma Aldrich) และไททาเนียมออกไซด์ (Titanium Oxide, Sigma Aldrich)

3.1.2 ตัวทำละลาย (solvent) ใช้น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

3.1.3 ตัวประสาน (binder)

3.1.4 สารช่วยกระจายตัว (dispersant)

3.1.5 สารเพิ่มความเหนียว (plasticizer)

3.1.6 สารลดฟอง (defoamer)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 50 และ 150 mL

3.2.2 หลอดหยด (dropper)

3.2.3 ช้อนตักสาร (spatula)

3.2.4 แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (magnetic bar)

3.2.5 เม็ดบด YSZ (yttrium-stabilized zirconia)

3.2.6 ตะแกรงลวด (wire mesh)

3.2.7 ขวดพลาสติก (plastic bottle) ขนาด 250 mL

3.2.8 หม้อบด (pot mill) สำหรับการบดย่อยแบบหมุนวน

3.2.9 เทปกาว (sticky tape)

3.2.10 แผ่นรอง (pad)

3.2.11 แฮนด์คาส (hand cast)

3.2.12 คีมคีบ (forcep)

3.2.13 ถุงมือยาง (rubber gloves)

3.2.14 หน้ากากอนามัย (protective mask)

3.2.15 ถุงซิปล็อก (zip lock bag) ขนาดต่างๆ

3.2.16 กล่องใส่ชิ้นงาน (box)

3.2.17 อุปกรณ์สำหรับตัดชิ้นงาน (cutting equipment)

3.2.18 อุปกรณ์สำหรับการอัด (dry pellet pressing)

3.2.19 เบ้าหลอมเซรามิก (crucible)

3.2.20 แผ่นเซรามิกสี่เหลี่ยม (square ceramic plate)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 เครื่องชั่งดิจิตอล (analytical balance)

3.3.2 เครื่องบดย่อยแบบหมุนวน (ball milling)

3.3.3 เครื่องบดผสมสารแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer)

3.3.4 เครื่องอัดไฮโดรริก (hydraulic compressor)

3.3.5 เตาเผา (oven)

3.3.6 เครื่อง Q150R Rotary-Pumped Sputter Coater/Carbon Coater

3.3.7 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) PANalytical รุ่น X’ Pert PRO

3.3.8 เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope(FE-SEM) รุ่น ∑IGMA HD VP

3.3.9 เครื่อง LCR meter รุ่น A4980 Agilent

3.4 ขั้นตอนการทำแผ่น PZT โดยวิธีเทปคาสติ้ง

3.4.1 การเตรียมสเลอรี (Slurry preparation)

3.4.1.1 ชั่งส่วนผสมของสเลอรีแล้วเทลงในขวดพลาสติก ในการชั่งส่วนผสมจะต้องทำการชั่งในขวดเดียวกัน เพื่อป้องกันความผิดพลาดในเรื่องของอัตราส่วนผสมของส่วนผสม โดยเทส่วนผสมตามลำดับดังนี้ ผง PZT น้ำปราศจากไอออน ตัวประสาน สารช่วยกระจายตัว และเม็ดบด โดยในการทดลองจะทำการลดปริมาณระบบ organic (ตัวประสาน สารช่วยกระจายตัว สารเพิ่มความเหนียว และสารลดฟอง) และลดปริมาณตัวประสาน เป็นจำนวน 5, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 wt.% ตามลำดับ โดยส่วนผสมสเลอรีของ PZT แสดงในตาราง 3.1

3.4.1.2 ปิดฝาขวดแล้วนำไปบรรจุในหม้อบดเพื่อทำการบดย่อยด้วยเครื่องบดย่อยแบบหมุนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.4.1.3 นำขวดบรรจุสเลอรีที่อยู่ในหม้อบดที่ผ่านการบดย่อย มาเทสเลอรีออกผ่านตะแกรงลวดให้สเลอรีไหลลงในบีกเกอร์เพื่อทำการแยกเม็ดบดออกจากสเลอรี

3.4.1.4 ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารลงในบีกเกอร์ของสเลอรี แล้วนำไปวางบนเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก เพื่อทำการกวนส่วนผสมให้เข้ากัน เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมตัวประสาน สารเพิ่มความเหนียว และสารลดฟอง โดยการเติมสารนั้นต้องมีระยะเวลาสำหรับการกวนสาร 5 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันและป้องกันการตกตะกอนหรือรวมตัวกันก่อนการขึ้นรูป

ตาราง 5 ส่วนผสมของสเลอรี PZT ที่ไม่มีการลดปริมาณตัวประสาน [11]

ชื่อสาร	ปริมาณ (wt.%)
1. ผง PZT	56.80
2. น้ำปราศจากไอออน	17.40
3. ตัวประสาน	23.40
4. สารช่วยกระจายตัว	2.00
5. สารเพิ่มความเหนียว	0.20
6. สารลดฟอง	0.20

ภาพประกอบ 29 แสดงขั้นตอนการเตรียมสเลอรี การชั่งส่วนผสมของสเลอรี การบดย่อย การแยกเม็ดบดออกจากสเลอรี ตามด้วยการเติมส่วนผสมเพิ่มเติม

ผง PZT, น้ำปราศจากไอออน, ตัวประสาน, สารช่วยกระจายตัว, เม็ดบด

↓

↓ 4 ชั่วโมง

↓

เติมตัวประสาน สารเพิ่มความเหนียว และสารลดฟอง

↓

ภาพประกอบ 29 การเตรียมสเลอรี

3.4.2 การขึ้นรูป

3.4.2.1 นำแผ่นรองมาติดด้วยเทปกาวพลาสติกเพื่อยึดแผ่นรองไม่ให้มีการเคลื่อนที่ระหว่างการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง

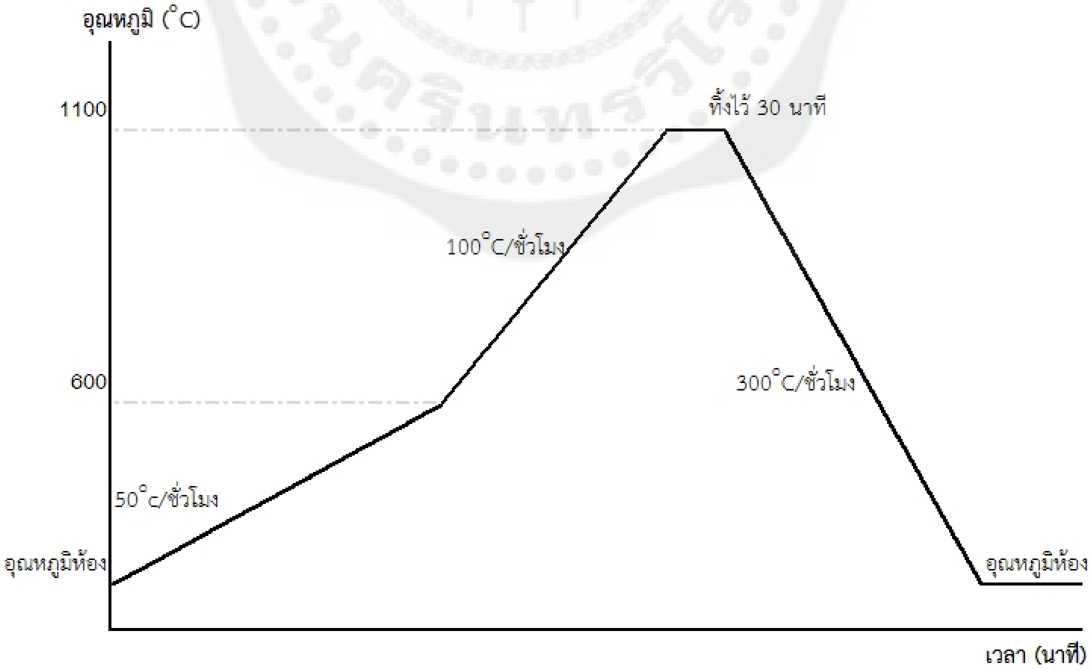
3.4.2.2 นำสเลอรีที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมสเลอรีเทลงในแฮนด์คาส โดยใช้แฮนด์คาสที่ความหนา 450 μm ที่วางบนแผ่นรอง แล้วทำการเลื่อนแฮนด์คาสไปบนแผ่นรอง จะได้แผ่น PZT ที่ยังไม่แห้ง

3.4.2.3 วางแผ่น PZT ที่ได้ ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องเพื่อทำให้แห้ง

3.4.2.4 ตัดแผ่น PZT ด้วยอุปกรณ์สำหรับตัดชิ้นงานเป็นรูปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm และลอกออกจากแผ่นรอง

3.4.2.5 นำแผ่น PZT ที่ผ่านการตัด วางในเบ้าหลอมเซรามิก (crucible) ที่ใส่ผง PZT ปรับพื้นผิวให้มีความเรียบ และวางแผ่นเซรามิกทับบนแผ่น PZT

3.4.2.6 นำเบ้าหลอมเซรามิกที่มีแผ่น PZT ไปใส่เตาเผา เพื่อทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100℃ เป็นเวลา 30 นาที ในขั้นตอนการเผาผนึกช่วงแรกจะทำการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ 600℃ ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 50℃/ชั่วโมง จากนั้นจะเพิ่มอุณหภูมิจาก 600℃ ไปจนถึง 1100℃ ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 100℃/ชั่วโมง คงที่ไว้ที่อุณหภูมิ 1100℃ นาน 30 นาที จากนั้นทำการลดอุณหภูมิจาก 1100℃ ไปจนถึงอุณหภูมิห้อง ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 300℃/ชั่วโมง ดังแสดงในภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 ขั้นตอนการเผาผนึก

ภาพประกอบ 31 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูป การนำสเลอรีเทใส่แฮนด์คาส ทำการขึ้นรูปได้แผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึก การเตรียมตัวอย่างก่อนการเผาผนึก ตามด้วยการเผาผนึก

ภาพประกอบ 31 การขึ้นรูป

3.4.3 การเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT ด้วยการซ้อนทับ

3.4.3.1 นำแผ่น PZT ที่ผ่านการตัด วางซ้อนกันตามจำนวนความหนาที่ต้องการในอุปกรณ์สำหรับการอัด แล้วนำเข้าเตาเผา ที่อุณหภูมิ 90°C นาน 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นออกจากแผ่น PZT

3.4.3.2 นำอุปกรณ์สำหรับการอัด ออกจากเตาเผาและนำไปกดด้วยเครื่องไฮดรอลิก โดยได้ทำการทดลองหาขนาดของแรงกดที่เหมาะสมโดยทำการทดลองแปรผันแรงที่ 5,000, 10,000 และ 15,000 N และทดลองใช้เวลาในการกดที่ 3, 6, 9 และ 12 วินาที แรงที่เหมาะสมคือ แรงกด 5,000 N และเวลาที่เหมาะสมในการกด คือ 6 วินาที จากนั้นนำแผ่น PZT ออกจากอุปกรณ์สำหรับการอัด

3.4.3.3 นำแผ่น PZT วางในเบ้าหลอมเซรามิก (crucible) ที่ใส่ผง PZT ปรับพื้นผิวให้มีความเรียบ และวางแผ่นเซรามิกทับบนแผ่น PZT

3.4.3.4 นำเบ้าหลอมเซรามิกที่มีแผ่น PZT ไปใส่เตาเผา เพื่อทำการเผาผนึกภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับการเผาผนึกของแผ่น PZT ที่ไม่มีการซ้อนทับ

ภาพประกอบ 32 แสดงขั้นตอนการทดลองการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT ไปจนถึงการเตรียมตัวอย่างก่อนการเผาผนึก ตามด้วยการเผาผนึก

5000N 6 วินาที

90°C 30 นาที

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

1100°C 30 นาที

ภาพประกอบ 32 การเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT ด้วยการซ้อนทับแผ่น PZT และกดด้วยเครื่องไฮดรอลิก

3.5 การวิเคราะห์เลดเซอร์โคเนต

3.5.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึก

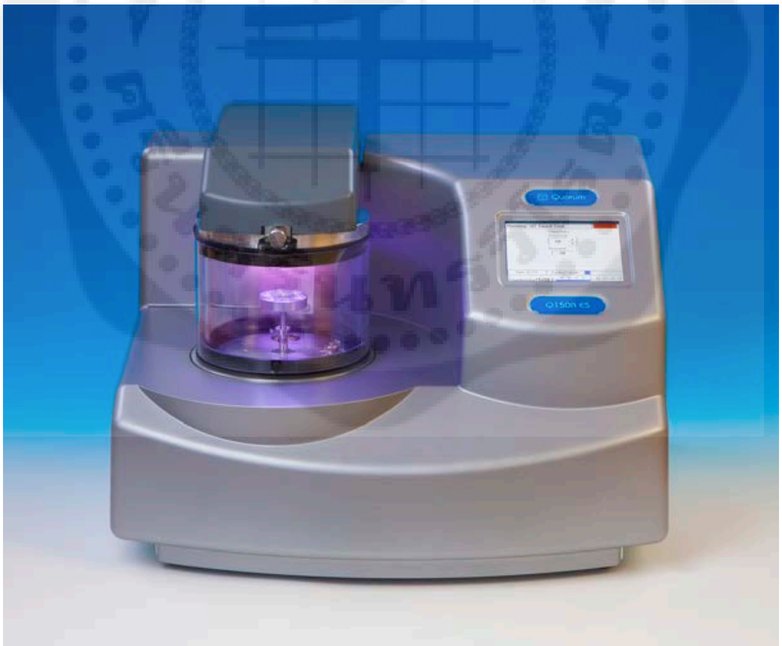
วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่น PZT ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) PANalytical รุ่น X' Pert PRO ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ดังแสดงในภาพประกอบ 33 ทำการทดสอบโดยให้มุมเริ่มต้นที่ 2θ เท่ากับ 20° และมุมสุดท้าย 2θ เท่ากับ 60° โดยทำการวัดค่ามุมครั้งละ 0.02° ใช้เวลา 0.5 วินาที/ครั้ง ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 45 kV กระแสไฟฟ้า 45 mA ผลที่แสดงออกมาจะอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับมุม 2θ จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานจากแฟ้ม JCPDS

ภาพประกอบ 33 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) PANalytical รุ่น X' Pert PRO [42]

3.5.2 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและความหนา

วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและความหนาของแผ่น PZT ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) รุ่น ∑IGMA HD VP ที่บริษัท แมกเนคอมพ์ พรีซิชั่น เทคโนโลยี จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในภาพประกอบ 34 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและความหนา ได้ใช้หัววัด secondary electron และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 kV ก่อนทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM แผ่น PZT ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของ แพลเลเดียม (palladium, pd) ด้วยเครื่อง Q150R Rotary-Pumped Sputter Coater/Carbon Coater ที่บริษัท แมกเนคอมพ์ พรีซิชั่น เทคโนโลยี จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในภาพประกอบ 35

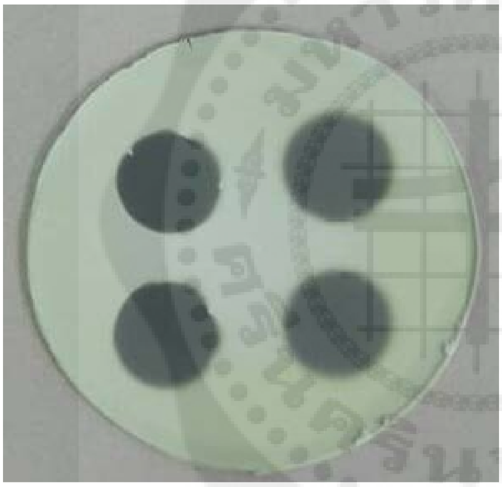
ภาพประกอบ 34 เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) รุ่น ∑IGMA HD VP [43]



ภาพประกอบ 35 เครื่อง Q150R Rotary-Pumped Sputter Coater/Carbon Coater [44]

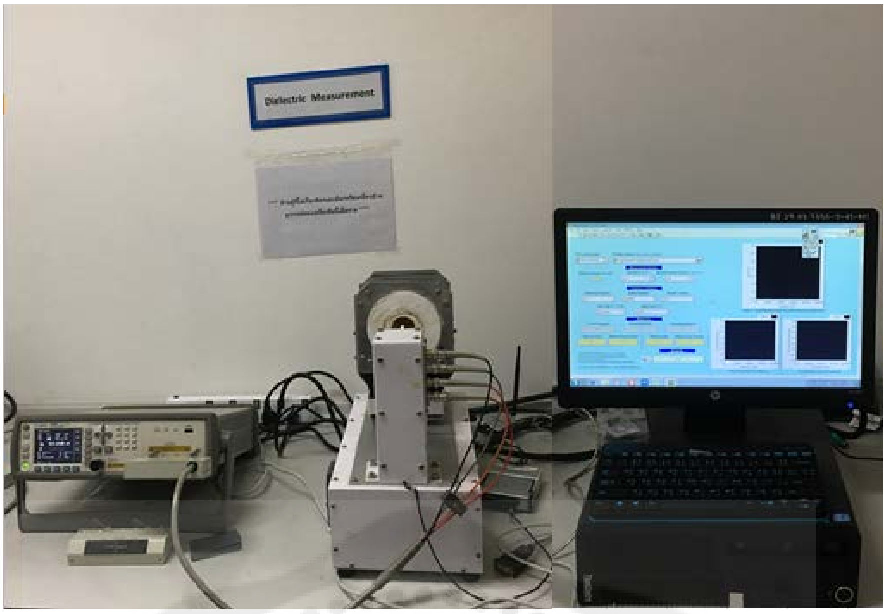
3.5.3 วิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก

วิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าของแผ่น PZT ก่อนทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของแผ่น PZT ต้องทำขั้วอิเล็กโทรดให้แก่แผ่น PZT เพื่อให้เป็นโครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนานที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลาง โดยการเคลือบแผ่น PZT ด้วยชั้น Pd ทั้งด้านบนและด้านล่าง โดยอิเล็กโทรดทางด้านบนของแผ่น PZT จะเป็นรูปวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm ส่วนอิเล็กโทรดด้านล่างเป็นรูปทรงกลมที่มีเส้นผ่านศุนย์กลาง 11 mm ดังแสดงในภาพประกอบ 36 ด้วยเครื่อง Q150R Rotary-Pumped Sputter Coater/Carbon Coater ที่บริษัท แมกเนคอมพ์ พรีซิชั่น เทคโนโลยี จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในภาพประกอบ 36 จากนั้นนำแผ่น PZT ที่มีขั้วอิเล็กโทรดไปวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter รุ่น A4980 Agilent ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ดังแสดงในภาพประกอบ 37 ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าจะวัดในช่วงของความถี่ตั้งแต่ 20 Hz จนถึง 100 kHz ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 mV



(ก) (ข)

ภาพประกอบ 36 ขั้วอิเล็กโทรด (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง ของแผ่น PZT



ภาพประกอบ 37 เครื่อง LCR meter รุ่น A4980 Agilent

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

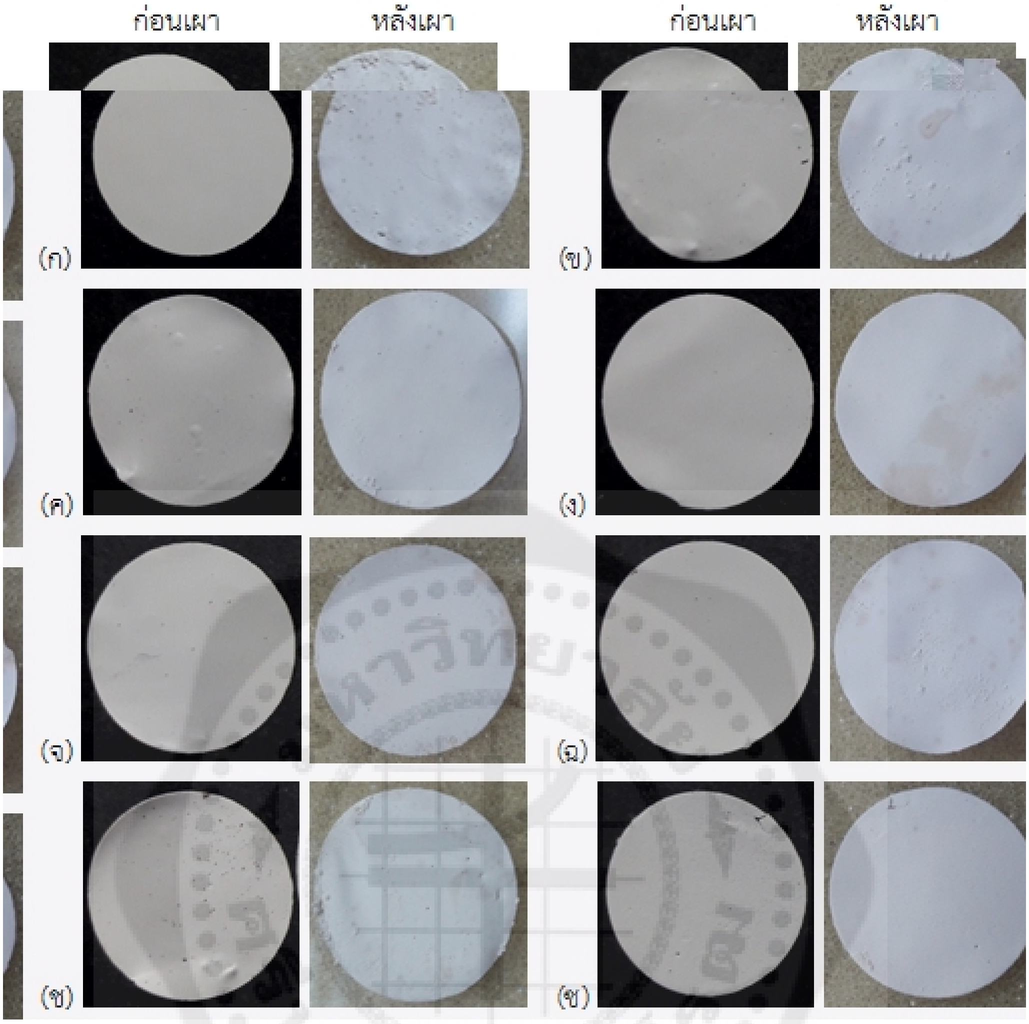
ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการวิจัยและอภิปรายผล โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของระบบ organic และผลของตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง โครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค ความหนา และสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PZT ที่เตรียมได้โดยวิธีเทปคาสติ้ง โดยมีรายละเอียดผลการวิจัยดังนี้

4.1 ผลทางกายภาพของแผ่น PZT

4.1.1 แผ่น PZT ที่ความหนา 450 µm ก่อนการเผาผนึก

จากการศึกษาผลของการลดระบบ organic และศึกษาผลของการลดตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งของแผ่น PZT โดยได้ทำการลดปริมาณระบบ organic และลดปริมาณตัวประสาน เป็นจำนวน 5, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 wt.% พบว่าเมื่อปริมาณระบบ organic (ตัวประสาน สารช่วยกระจายตัว สารเพิ่มความเหนียว และสารลดฟอง) และปริมาณตัวประสานลดลงความหนืดของสเลอรีลดลง ทำให้การขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น แต่เมื่อทำการขึ้นรูปแล้วเกิดฟองอากาศในแผ่น PZT เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตัวประสานทำหน้าที่ให้อนุภาคของส่วนผสมในแผ่น PZT เชื่อมต่อกันเกิดการเกาะตัวของอนุภาคได้ดีขึ้น และเพิ่มความแข็งแรง เมื่อลดปริมาณตัวประสานลงทำให้การเกาะตัวกันของอนุภาค และความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้มีอากาศเข้าไปแทนที่ได้ง่ายขึ้น และทำให้ความหนืดของสเลอรีลดลงตามไปด้วย[10] ซึ่งการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสาน 5-60 wt.% ยังสามารถขึ้นรูปได้ แต่การลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสาน 60 wt.% แผ่น PZT มีปริมาณฟองอากาศมากเปราะแตกหักง่ายไม่สามารถตัดและลอกออกจากแผ่นรองได้ และเงื่อนไข การลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสานที่ดีที่สุดของแผ่น PZT ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูป คือ การลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสานที่ 40 wt.% โดยพิจารณาจากปริมาณฟองอากาศ การลอกออกจากแผ่นรอง และความแข็งแรงของแผ่น PZT

ภาพประกอบ 38 แสดงแผ่น PZT ที่ทำการลดปริมาณตัวประสาน ที่เตรียมได้และลอกออกจากแผ่นรอง ก่อนเผาและหลังเผาผนึกที่ 1100°C เป็นเวลา 30 นาที แผ่น PZT มีความหนาก่อนการเผา 450 µm

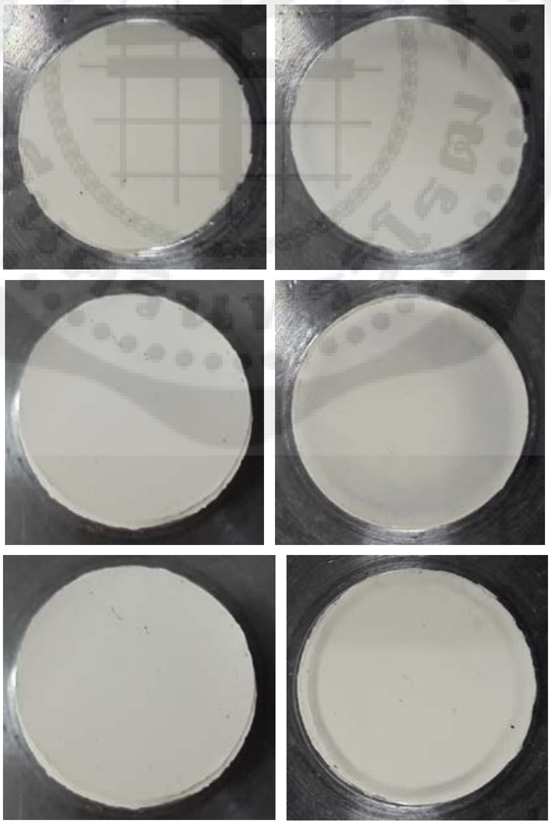


ภาพประกอบ 38 แผ่น PZT ก่อนและหลังการเผาผนึก ที่ความหนา 450 μm ก่อนการเผาผนึก (ก) ไม่มีการลดตัวประสาน (ข) ลดตัวประสาน 5 wt.% (ค) ลดตัวประสาน 10 wt.% (ง) ลดตัวประสาน 20 wt.% (จ) ลดตัวประสาน 30 wt% (ฉ) ลดตัวประสาน 40 wt.% (ช) ลดตัวประสาน 50 wt.% (ซ) ลดตัวประสาน 60 wt.%

4.1.2 แผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการซ้อนทับ

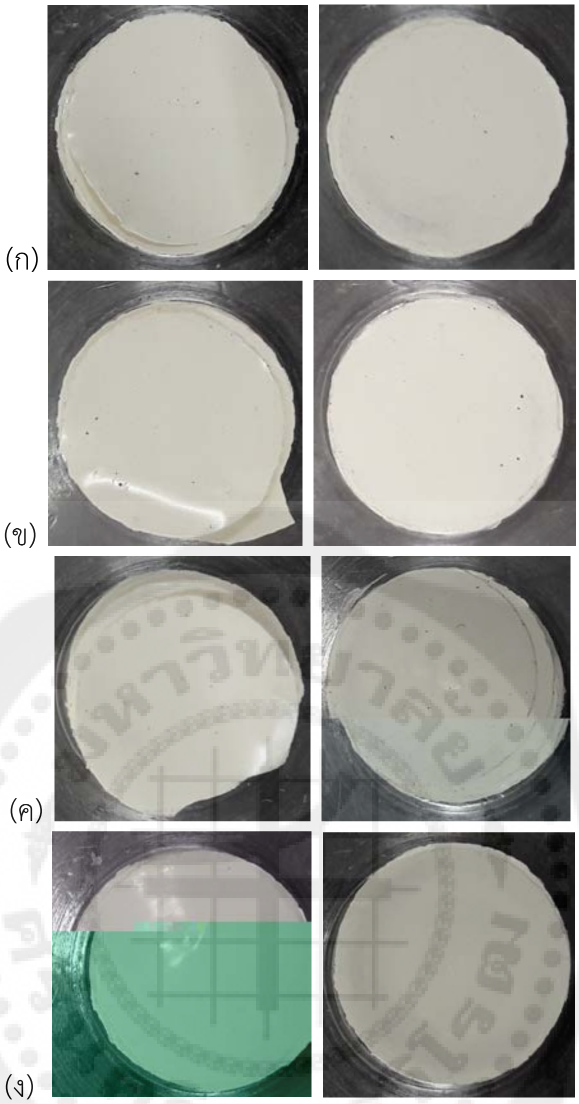
จากการศึกษาผลของระบบ organic และศึกษาผลของตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งของแผ่น PZT เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริกโดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter ของแผ่น PZT ที่มีความหนา 450 μm (ก่อนการเผาผนึก) พบว่าแผ่น PZT มีการเสียหาย แตกหัก เมื่อนำไปสัมผัสกับขั้ววัดขณะที่ทำการวัด เพราะไม่สามารถทนแรงกดของขั้ววัดได้ จึงต้องมีการแก้ไขปัญหาด้วยการเพิ่มความแข็งแรงให้กับแผ่น PZT โดยการนำแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกมาซ้อนทับกันแล้วกดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก เพื่อทำให้มีความหนามากขึ้นและเกิดความแข็งแรงมากพอที่จะให้วัดค่าความจุไฟฟ้าได้ โดยเริ่มจากการนำแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกซ้อนกัน 3 แผ่น (1 แผ่น มีความหนาก่อนการเผาประมาณ 450 μm) นำไปอบที่ 90℃ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการศึกษาแรงและเวลาในการกดที่เหมาะสม โดยเริ่มจากการทดลองที่แรงกด 5,000, 10,000 และ 15,000 N เป็นเวลา 12 วินาที พบว่าแรงกดที่เหมาะสม คือ 5,000 N เนื่องจากหลังการซ้อนทับแผ่น PZT มีคราบรอยดำปนเปื้อนน้อยที่สุด ถึงแม้ว่าการซ้อนทับของแผ่น PZT ซ้อนทับกันได้สนิทเมื่อเพิ่มแรงมากขึ้นแต่พบคราบรอยดำปนเปื้อนเพิ่มขึ้นมากตามไปด้วย ดังแสดงในภาพประกอบ 4.2 จากนั้นทำการทดสอบระยะเวลาในการกดที่เหมาะสม โดยใช้แรงกด 5000 N และกดเป็นระยะเวลา 3, 6, 9 และ 12 วินาที พบว่าระยะเวลาในการกดที่เหมาะสมสำหรับสำหรับการกดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก คือ 6 วินาที เนื่องจากคราบรอยดำน้อยและแผ่น PZT แนบสนิทกันมากที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบ 40

ก่อนกด หลังกด



(ก) (ข) (ค)

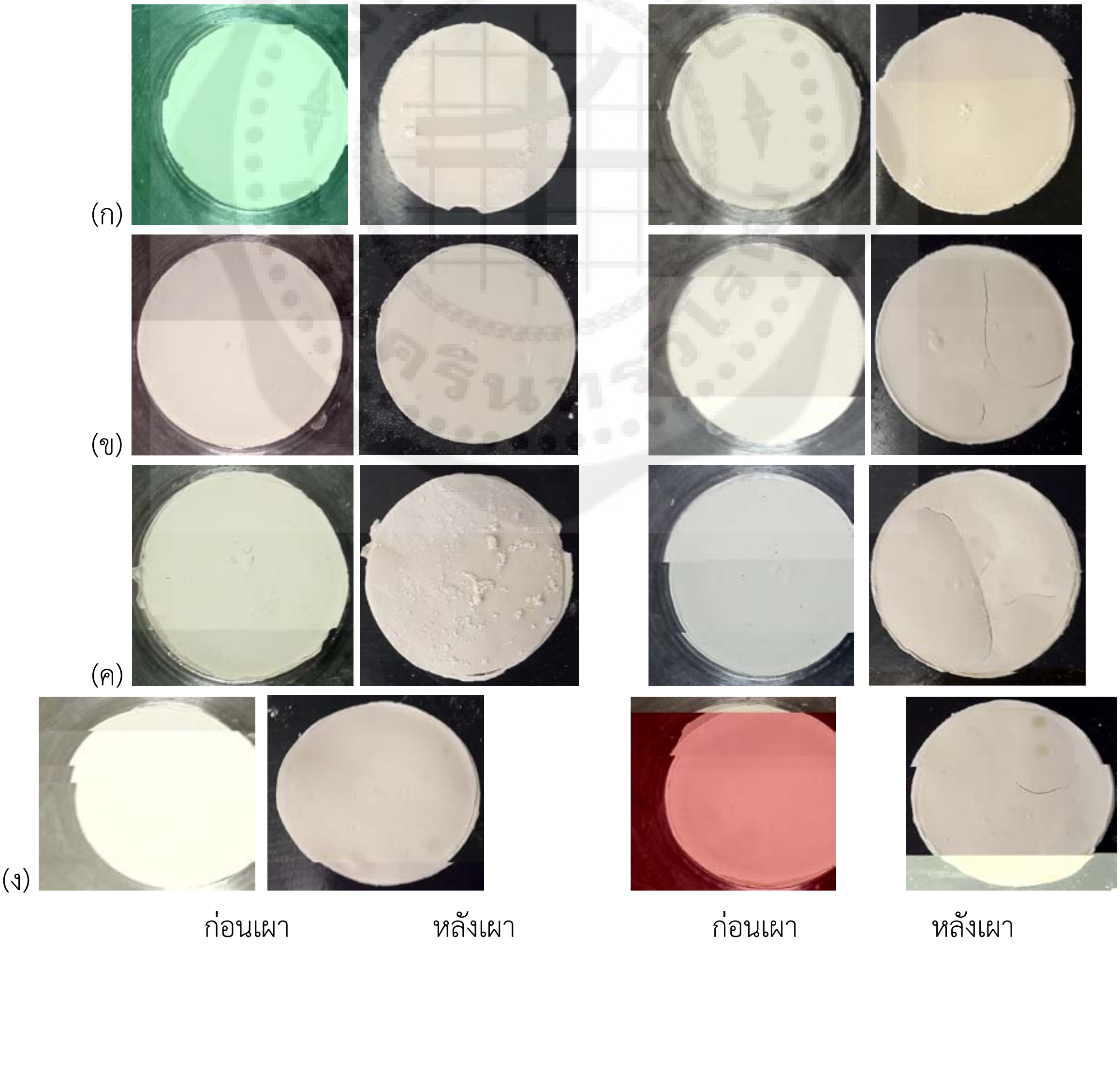
ภาพประกอบ 39 แผ่น PZT ก่อนและหลังการกดด้วย (ก) แรงกด 5,000 N (ข) แรงกด 10,000 N (ค) 15,000 N เป็นเวลา 12 วินาที



ภาพประกอบ 40 แผ่น PZT ก่อนและหลังการกด ด้วยแรงกด 5,000 N ที่ระยะเวลาการกด (ก) 3 วินาที (ข) 6 วินาที (ค) 9 วินาที และ (ง) 12 วินาที

ภาพประกอบ 41 และภาพประกอบ 42 แสดงแผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง ก่อนและหลังการเผาผนึก โดยการนำแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึก มาซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น ใช้อุณหภูมิในการอบไล่ความชื้นที่ 90°C เป็นเวลา 30 นาที กดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกด้วยแรง 5,000 N ระยะเวลาในการกด 6 วินาที เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 30 นาที โดยทำการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสาน พบว่าก่อนการเผาผนึกเมื่อปริมาณระบบ organic และปริมาณตัวประสานลดลง ปริมาณฟองอากาศและรูพรุนในแผ่น PZT เพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณฟองอากาศและรูพรุนในแผ่น PZT น้อยกว่าแผ่น PZT ที่ไม่มีการเพิ่มความแข็งแรงโดยการซ้อนทับ เนื่องจากการซ้อนทับกันของแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกแล้วกดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกนั้น แผ่น PZT แต่ละแผ่นจะมีรูพรุนและฟองอากาศ เมื่อทำมาซ้อนทับกันทำให้รูพรุนและฟองอากาศภายในแผ่นแต่ละแผ่นเกิดการวางตัวปิดรูพรุนและฟองอากาศของกันและกัน ทำให้ปริมาณรูพรุนและฟองอากาศโดยรวมลดลง และแรงเนื่องจากการกดทำให้รูพรุนและฟองอากาศในแผ่น PZT มีขนาดเล็กลง สำหรับแผ่น PZT ที่ซ้อนทับกัน 5 แผ่น มีการแตกหักได้ง่ายกว่า แผ่น PZT ที่ซ้อนทับกัน 3 แผ่น หลังการเผาผนึกเมื่อปริมาณของระบบ organic และปริมาณตัวประสานลดลง เนื่องจากความหนาที่มากขึ้นทำให้แผ่น PZT แต่ละแผ่นยึดเกาะกันได้ไม่ดีพอส่งผลให้เมื่อผ่านการเผาผนึกทำให้เกิดการแตกหักได้ง่ายกว่า

ก่อนเผา หลังเผา ก่อนเผา หลังเผา

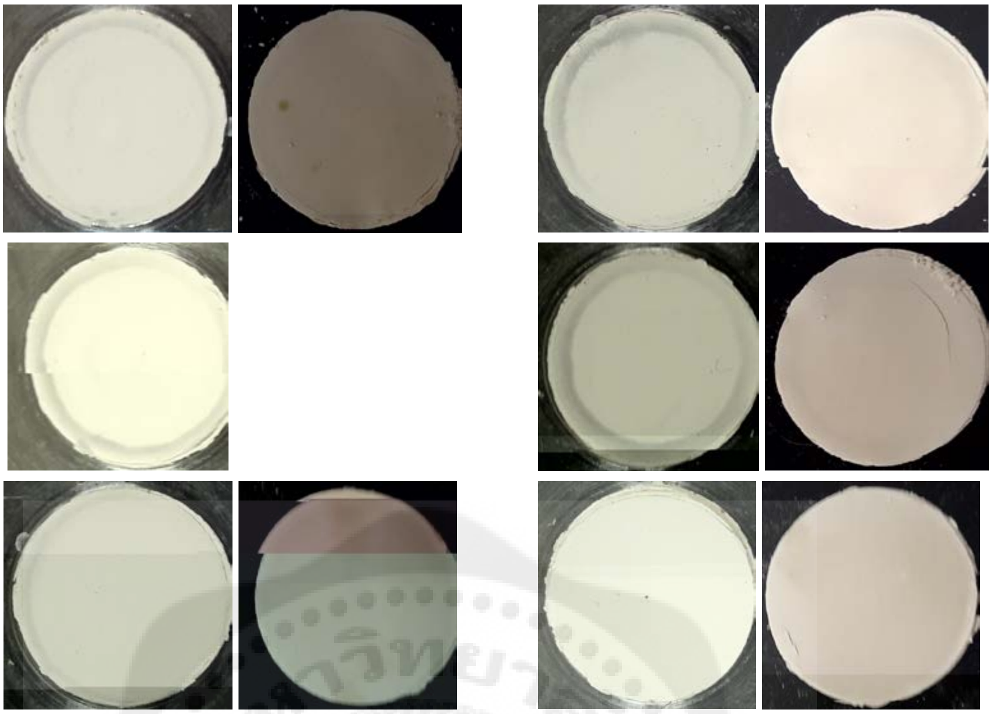


ก่อนเผา หลังเผา ก่อนเผา หลังเผา

(จ)

(ฉ)

(ช)



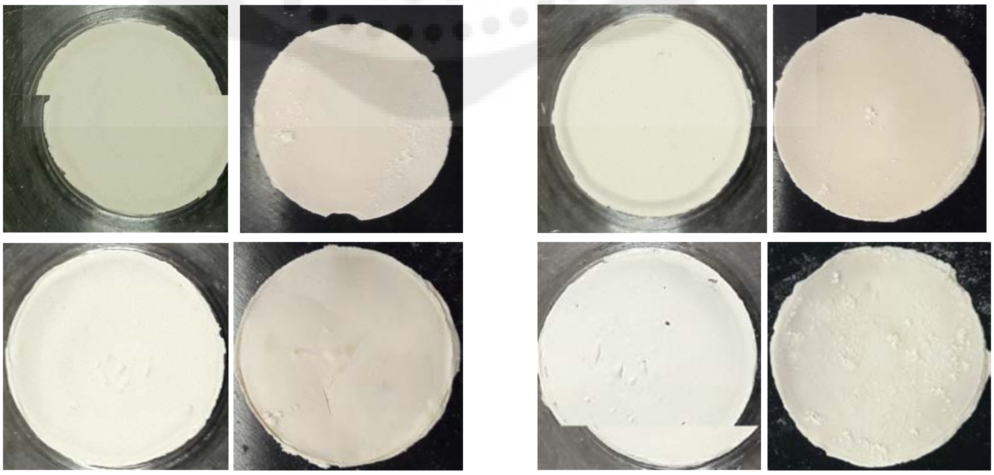
3 แผ่น 5 แผ่น

ภาพประกอบ 41 แผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง ก่อนและหลังการเผาผนึก
(ก) ไม่มีการลดระบบ organic (ข) ลดระบบ organic 5 wt.% (ค) ลดระบบ organic 10 wt.% (ง) ลดระบบ organic 20 wt.% (จ) ลดระบบ organic 30 wt% (ฉ) ลดระบบ organic 40 wt.% (ช) ลดระบบ organic 50 wt.%

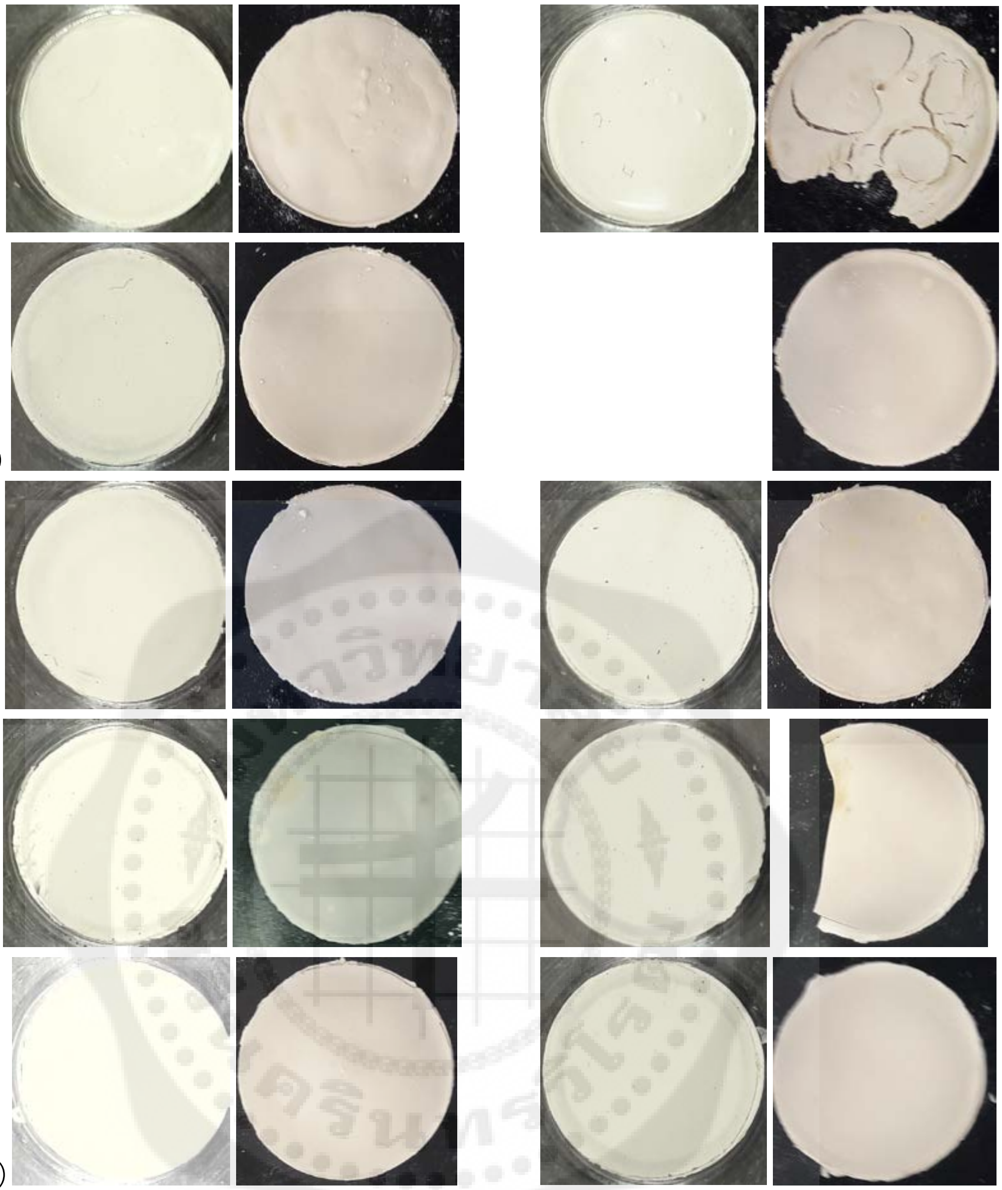
ก่อนเผา หลังเผา ก่อนเผา หลังเผา

(ก)

(ข)



ก่อนเผา หลังเผา ก่อนเผา หลังเผา



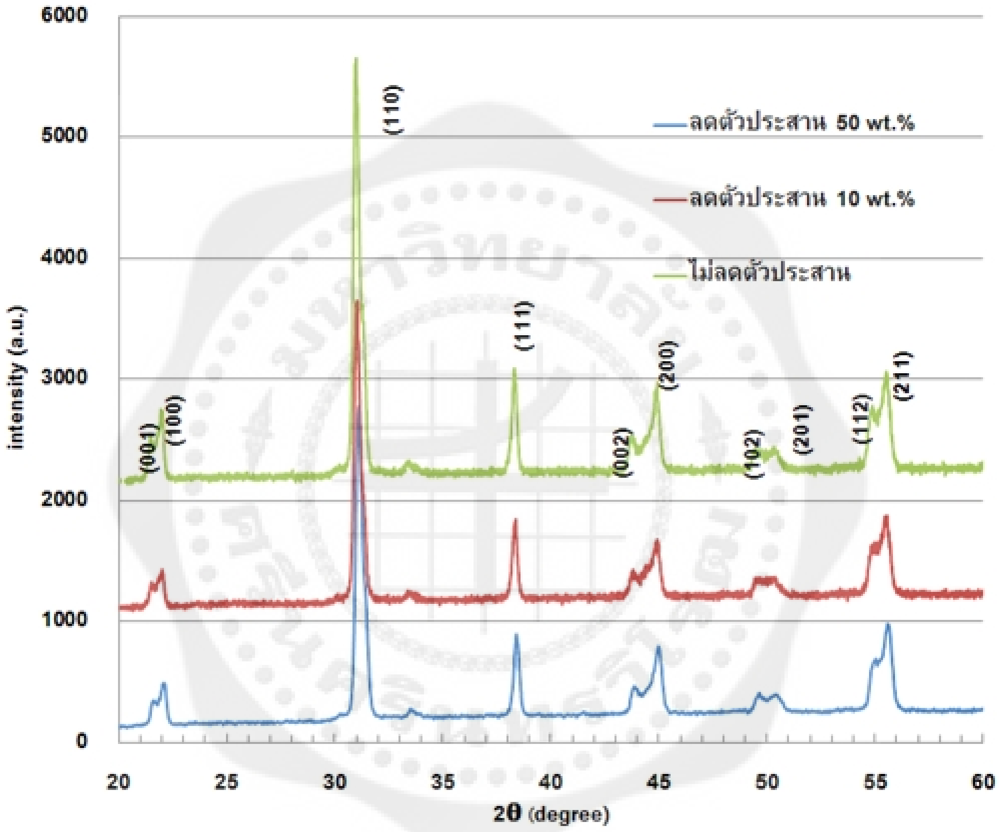
(ค)
(ง)
(จ)
(ฉ)
(ช)

3 แผ่น 5 แผ่น

ภาพประกอบ 42 แผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง ก่อนและหลังการเผาผนึก
(ก) ไม่มีการลดตัวประสาน (ข) ลดตัวประสาน 5 wt.% (ค) ลดตัวประสาน 10 wt.%
(ง) ลดตัวประสาน 20 wt.% (จ) ลดตัวประสาน 30 wt% (ฉ) ลดตัวประสาน 40 wt.%
(ช) ลดตัวประสาน 50 wt.%

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่น PZT

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่น PZT ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100℃ เป็นเวลา 30 นาที ที่ไม่มีการลดตัวประสาน เปรียบเทียบกับมีการลดตัวประสาน 10 wt.% และลดตัวประสาน 50 wt.% ตามลำดับ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกพบว่าแผ่น PZT ที่เตรียมได้เป็นเฟสของเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ($Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ แบบ polycrystalline และเมื่อลดปริมาณตัวประสานพบว่าเฟสที่ได้เหมือนกับแผ่น PZT ที่ไม่มีการลดปริมาณตัวประสาน ดังนั้นการลดปริมาณตัวประสานไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนเฟสของเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตแบบ polycrystalline ดังแสดงในภาพประกอบ 43



ภาพประกอบ 43 โครงสร้างผลึกของแผ่น PZT ที่ไม่มีการลดตัวประสาน เปรียบเทียบกับแผ่น PZT ที่มีการลดตัวประสาน 10 wt.% และลดตัวประสาน 50 wt.%

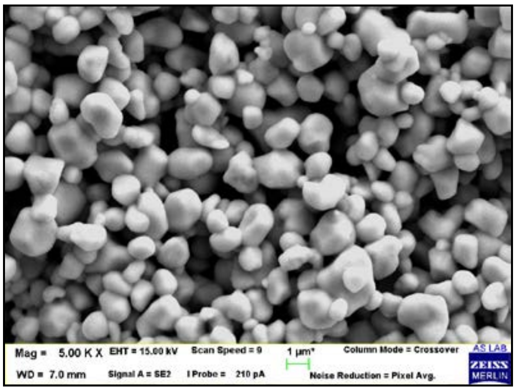
4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค และความหนา

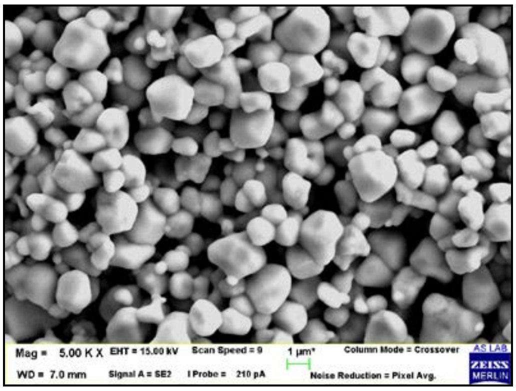
4.3.1 แผ่น PZT ที่ความหนา 450 μm ก่อนการเผาผนึก

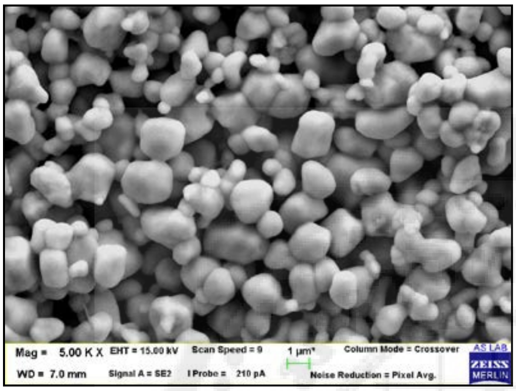
การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 30 นาที โดยการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสาน เป็นจำนวน 5, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 wt.% ตามลำดับ ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) พบว่าเกรนของแผ่น PZT ที่ได้มีขนาดค่อนข้างเท่ากัน มีการกระจายตัวขนาดเกรนต่ำ เกรนมีการประสานต่อเนื่องกัน จากผลเมื่อลดปริมาณระบบ organic และลดปริมาณตัวประสานปริมาณของรูพรุนเพิ่มมากขึ้นแต่ลักษณะของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง

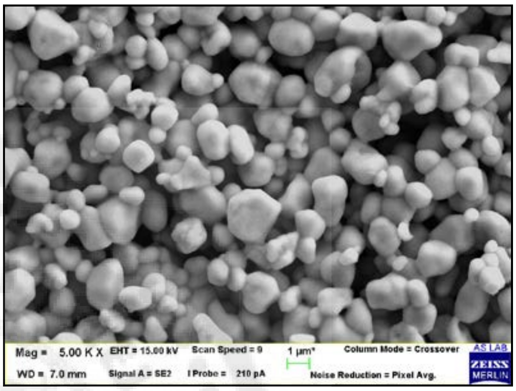
ภาพประกอบ 44 และภาพประกอบ 45 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT ที่ทำการลดปริมาณระบบ organic และลดปริมาณตัวประสาน ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 30 นาที

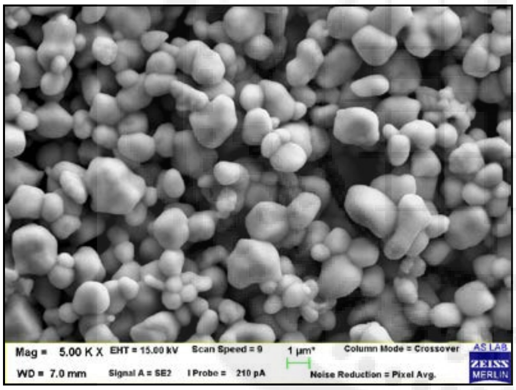
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

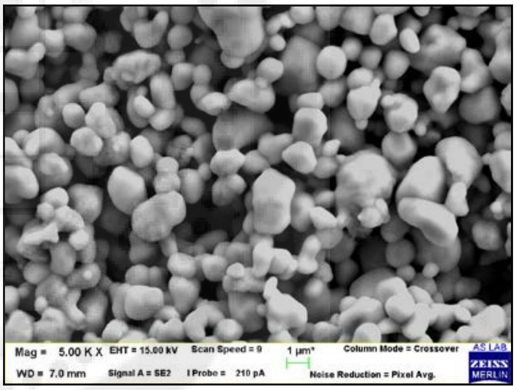

(ก)


(ข)

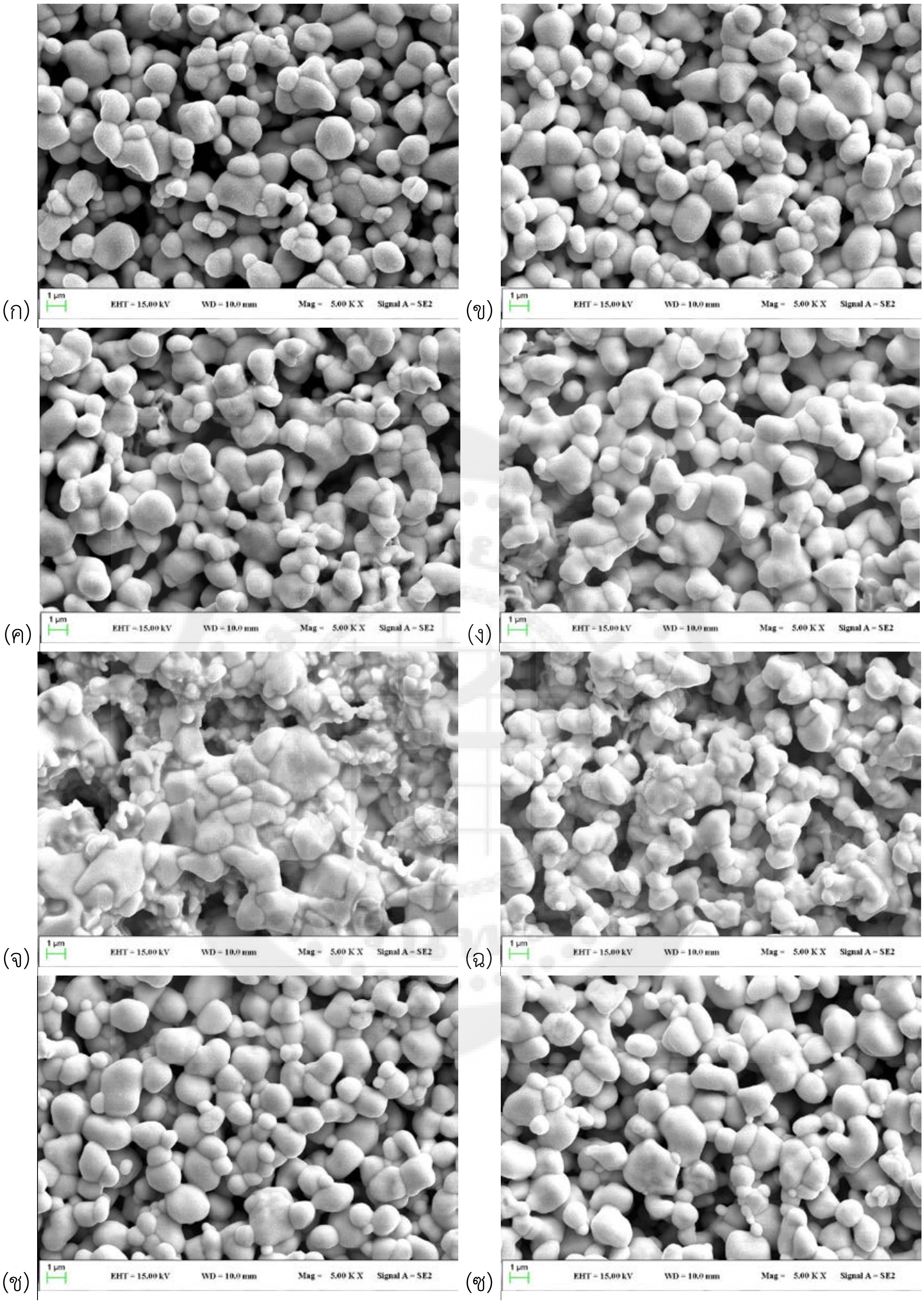

(ค)


(ง)


(จ)


(ฉ)

ภาพประกอบ 44 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT (ก) ไม่มีการลดระบบ organic
(ข) ลดระบบ organic 10 wt.% (ค) ลดระบบ organic 20 wt.%
(ง) ลดระบบ organic 30 wt.% (จ) ลดระบบ organic 40 wt%
(ฉ) ลดระบบ organic 50 wt.%



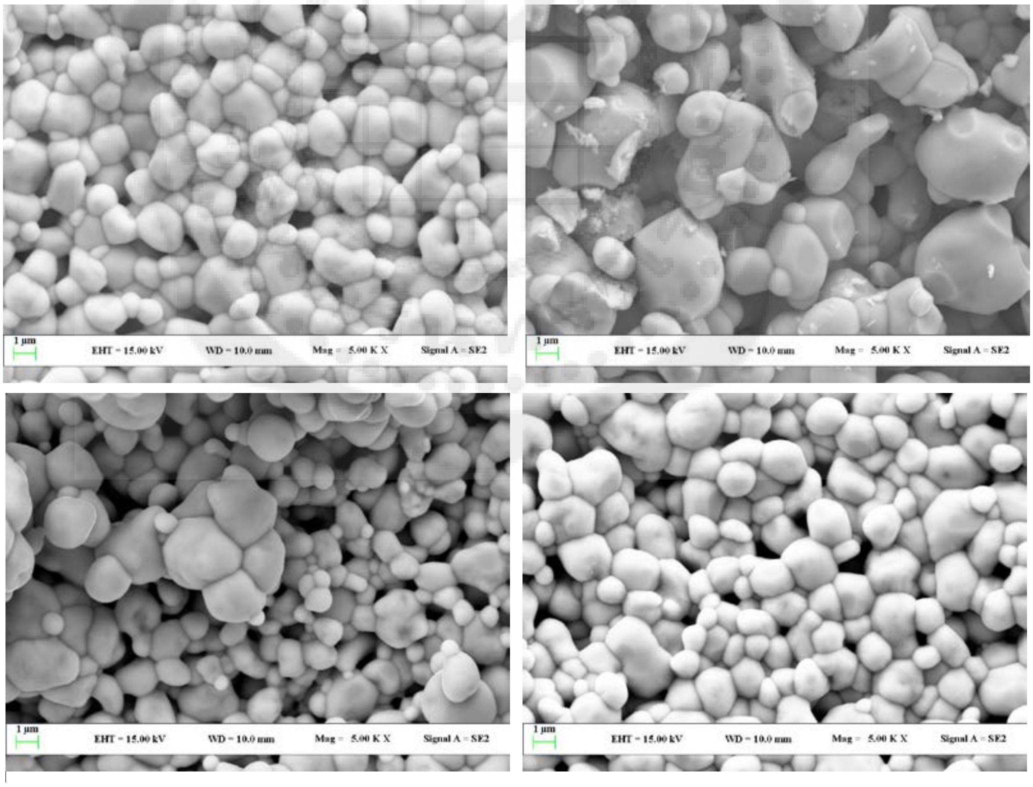
ภาพประกอบ 45 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT (ก) ไม่มีการลดตัวประสาน
(ข) ลดตัวประสาน 5 wt.% (ค) ลดตัวประสาน 10 wt.% (ง) ลดตัวประสาน 20 wt.%
(จ) ลดตัวประสาน 30 wt% (ฉ) ลดตัวประสาน 40 wt.% (ช) ลดตัวประสาน 50 wt.%
(ซ) ลดตัวประสาน 60 wt.%

4.3.2 แผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการซ้อนทับ

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ของแผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรงโดยการนำแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกมาซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น ใช้อุณหภูมิในการอบไล่ความชื้นที่ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที กดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกด้วยแรง 5,000 N ระยะเวลาในการกด 6 วินาที เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 30 นาที โดยการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสานเป็นจำนวน 5, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 wt.% ตามลำดับ พบว่าเกรนมีการเกาะตัวกันดีขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่น PZT ที่ไม่มีการเพิ่มความแข็งแรงจากการกดทับ และผลจากการลดปริมาณระบบ organic และลดปริมาณตัวประสานพบว่า ปริมาณของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น แต่น้อยกว่ารูพรุนในแผ่น PZT ที่ไม่มีการเพิ่มความแข็งแรง และลักษณะของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 46 และภาพประกอบ 47 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT ที่มีการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสาน และเพิ่มความแข็งแรงที่เพิ่มความแข็งแรงโดยการนำแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกมาซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น ใช้อุณหภูมิ ในการอบไล่ความชื้นที่ 90°C เป็นเวลา 30 นาที กดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกด้วยแรง 5,000 N ระยะเวลาในการกด 6 วินาที เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 30 นาที

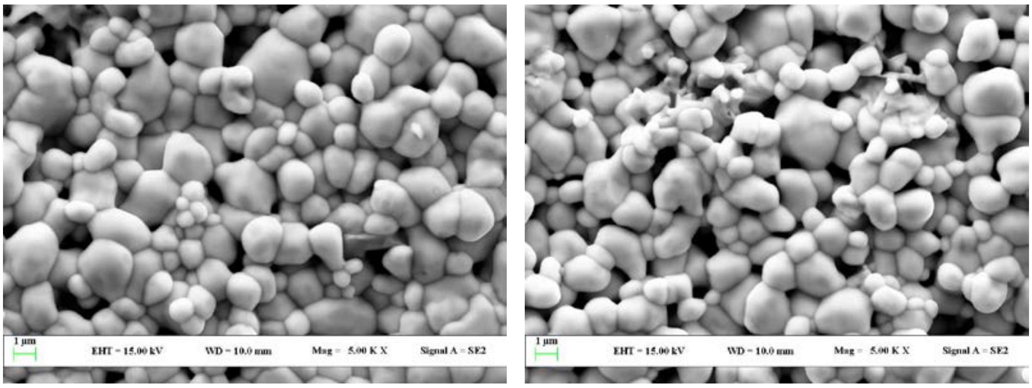
3 แผ่น 5 แผ่น



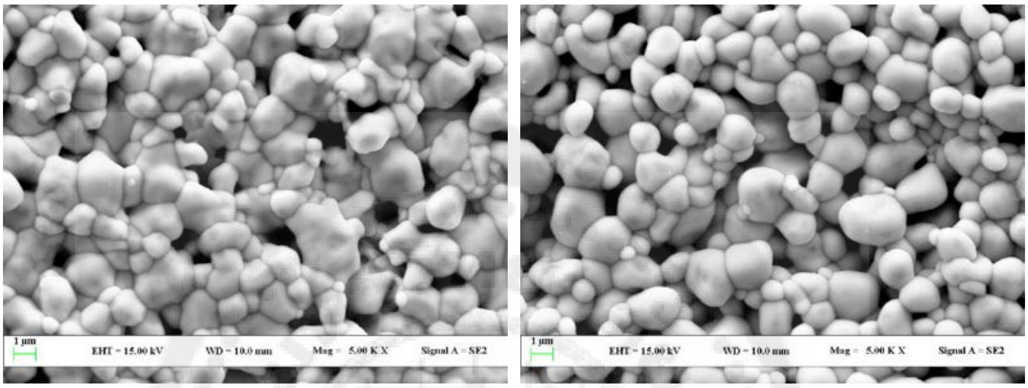
(ก)

(ข)

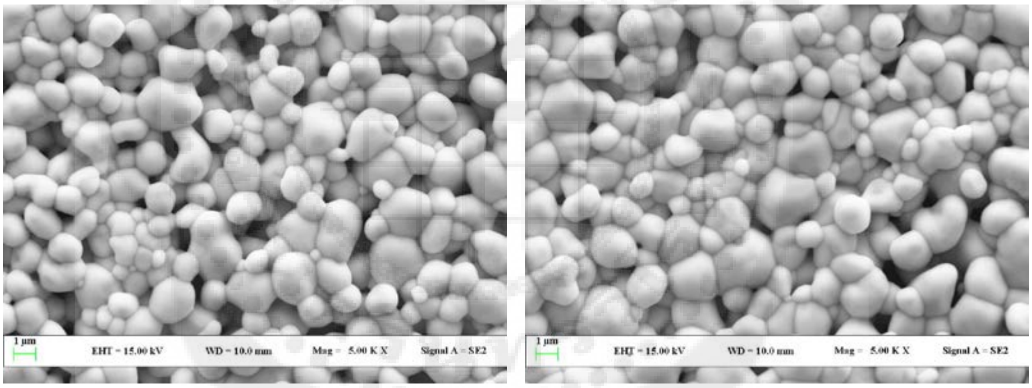
3 แผ่น 5 แผ่น



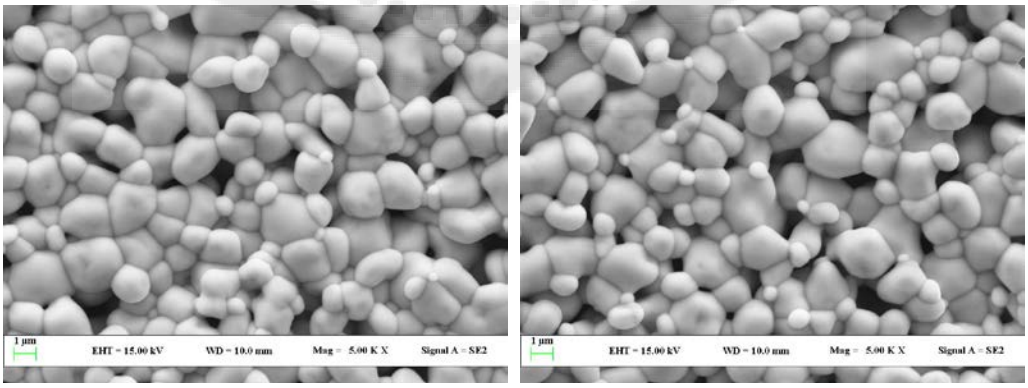
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

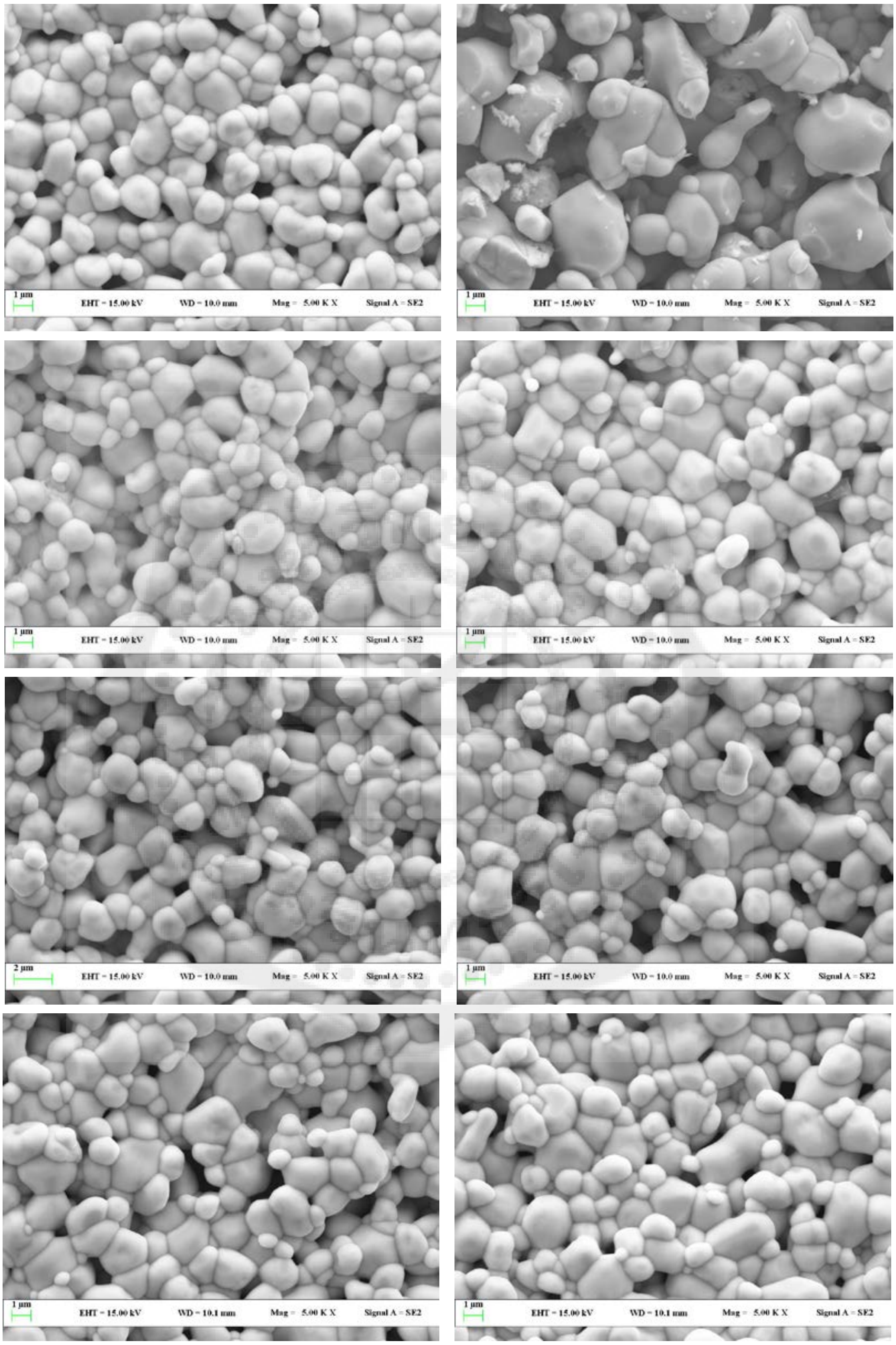
ภาพประกอบ 46 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง

(ก) ไม่มีการลดระบบ organic (ข) ลดระบบ organic 5 wt.%

(ค) ลดระบบ organic 10 wt.% (ง) ลดระบบ organic 20 wt.%

(จ) ลดระบบ organic 40 wt% (ฉ) ลดระบบ organic 50 wt.%

3 แผ่น | 5 แผ่น

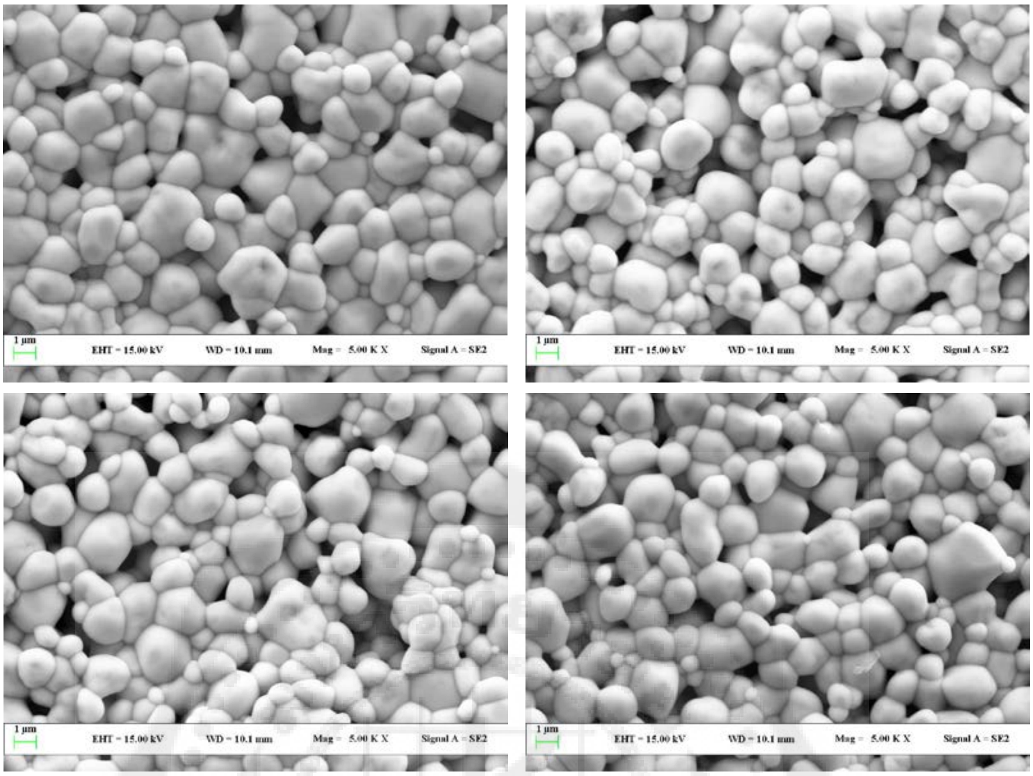


(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

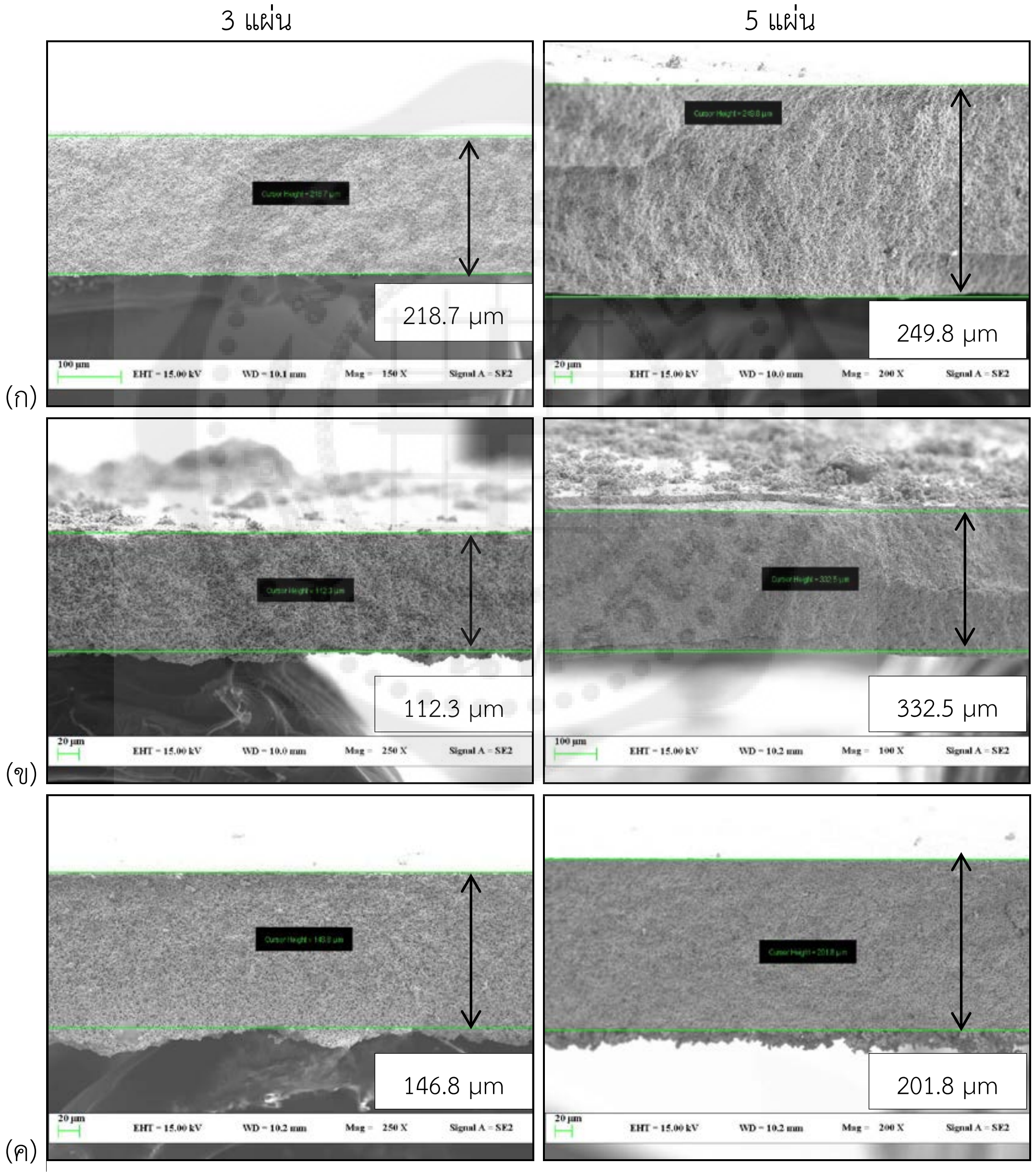


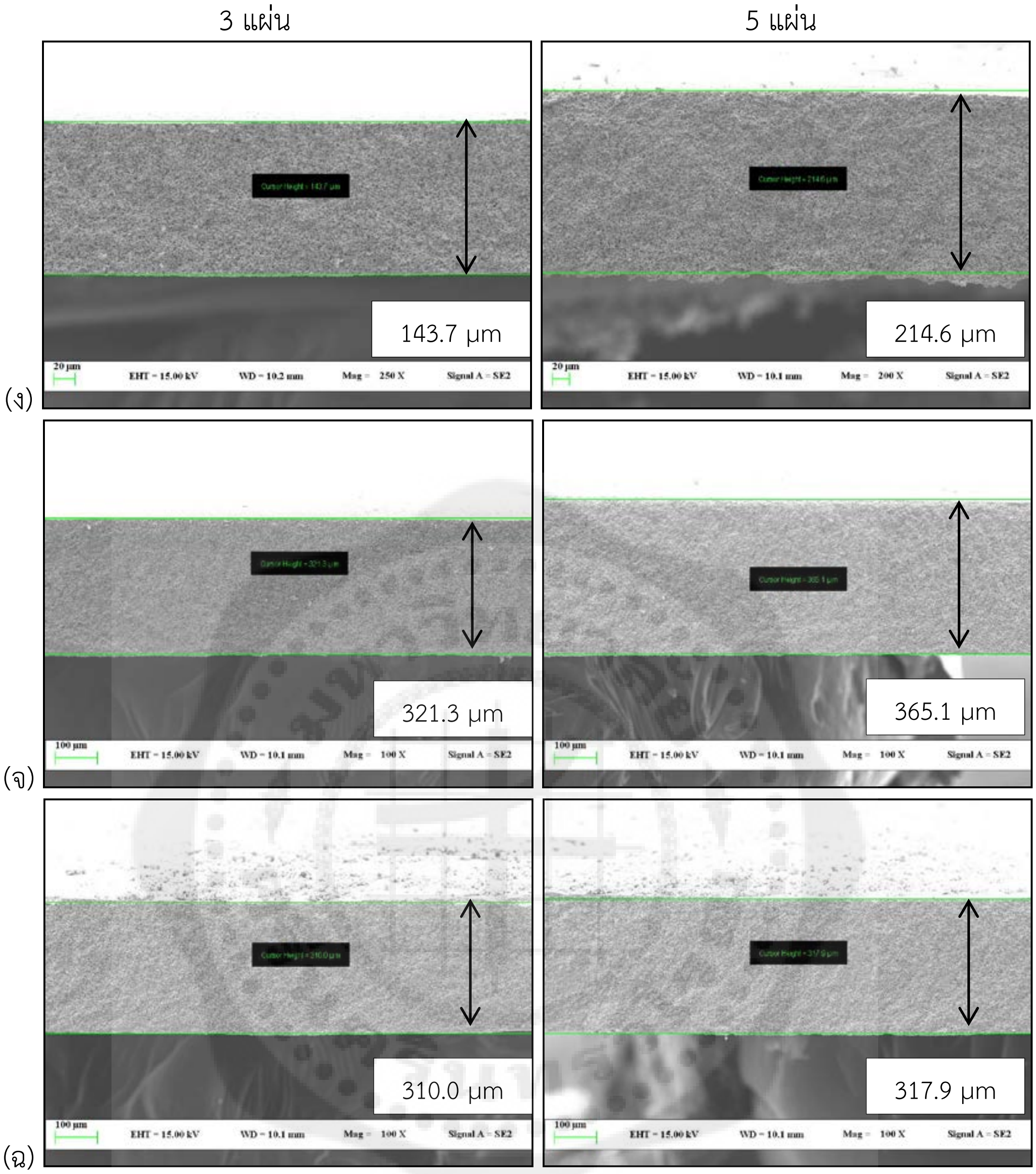
ภาพประกอบ 47 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง
(ก) ไม่มีการลดตัวประสาน (ข) ลดตัวประสาน 5 wt.% (ค) ลดตัวประสาน 20 wt.%
(ง) ลดตัวประสาน 30 wt.% (จ) ลดตัวประสาน 40 wt% (ฉ) ลดตัวประสาน 50 wt.%

4.3.3 การวัดความหนาของแผ่น PZT

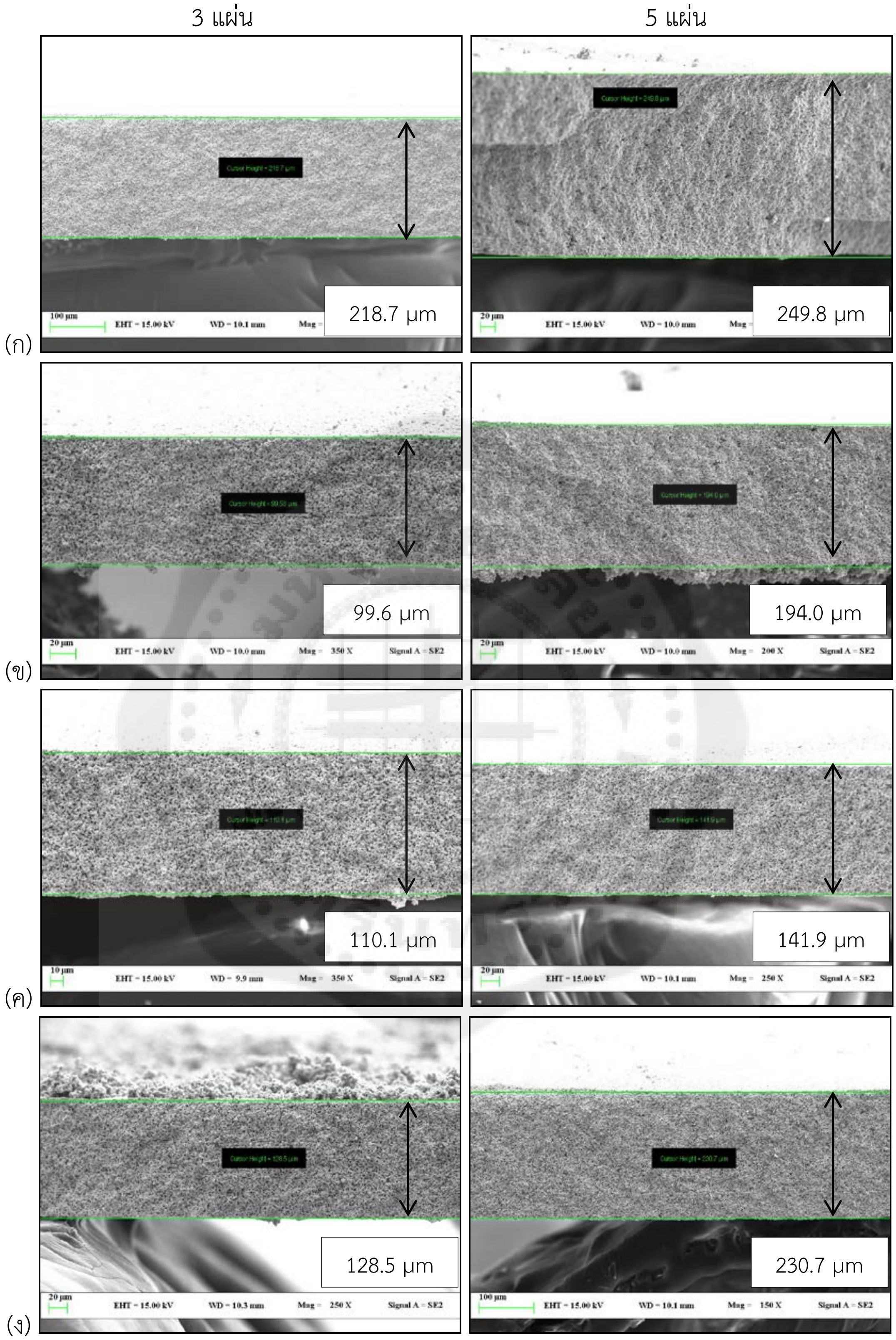
ความหนาหลังการเผาผนึกของแผ่น PZT หาได้จากภาพตัดขวางของโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT โดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ความหนาของแผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรงโดยการนำแผ่น PZT มาซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น โดยทำการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสาน พบว่าการลดปริมาณระบบ organic และลดปริมาณตัวประสาน และเพิ่มความแข็งแรงด้วยการนำแผ่น PZT มาซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น มีความหนาหลังการเผาผนึกเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณระบบ organic และปริมาณตัวประสานลดลง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของ PZT มีขนาดน้อยลงทำให้เกิดรูพรุนและระยะห่างระหว่างอนุภาคเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความหนาของแผ่น PZT เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ภาพประกอบ 48 และภาพประกอบ 49 แสดงความหนาหลังการเผาผนึกของแผ่น PZT จากภาพตัดขวางของโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT ที่มีการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสาน เพิ่มความแข็งแรงโดยการนำแผ่น PZT มาซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) พบว่าการลดปริมาณระบบ organic และเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT โดยการนำแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกมาซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น มีความหนาหลังการเผาผนึก 112.3–321.3 μm และ 214.6–365.1 μm ตามลำดับ สำหรับการลดปริมาณตัวประสาน และเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT โดยการนำแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกมาซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น มีความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 99.6–242.6 μm และ 141.9–304.8 μm ตามลำดับ



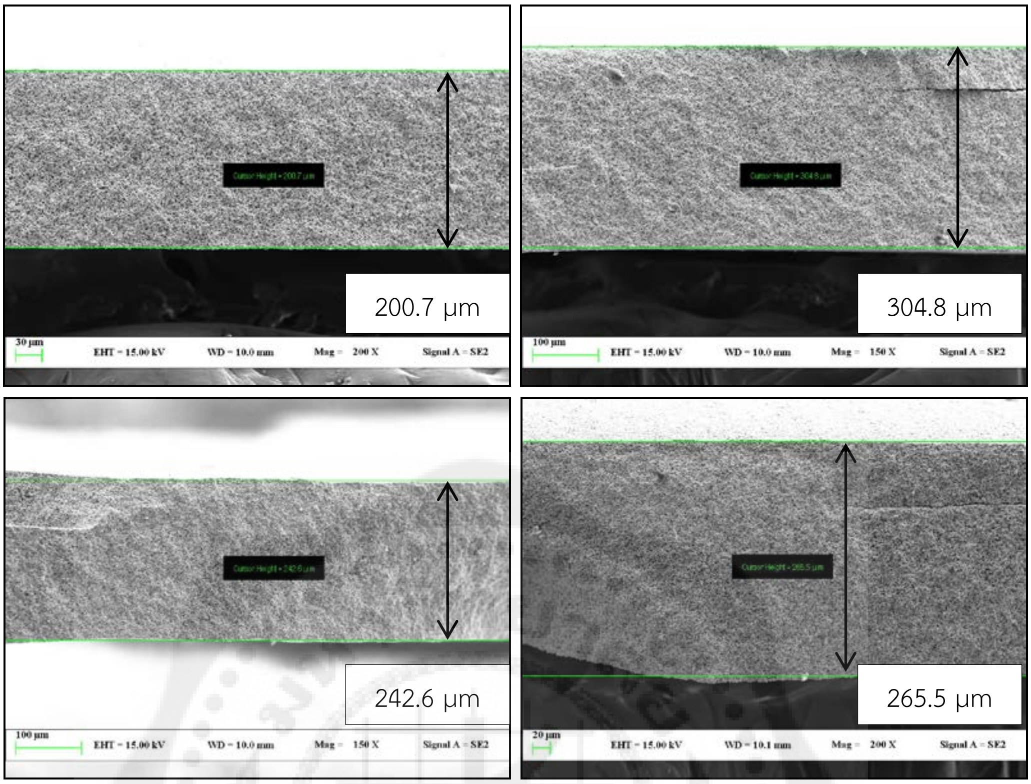


ภาพประกอบ 48 ความหนาหลังการเผาผนึกของแผ่น PZT จากภาพตัดขวางของโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง (ก) ไม่มีการลดระบบ organic (ข) ลดระบบ organic 5 wt.% (ค) ลดระบบ organic 10 wt.% (ง) ลดระบบ organic 20 wt.% (จ) ลดระบบ organic 40 wt% (ฉ) ลดระบบ organic 50 wt.%



3 แผ่น
5 แผ่น
218.7 µm
249.8 µm
(ก)
99.6 µm
194.0 µm
(ข)
110.1 µm
141.9 µm
(ค)
128.5 µm
230.7 µm
(ง)

3 แผ่น 5 แผ่น



(จ)

(ฉ)

ภาพประกอบ 49 ความหนาหลังการเผาผนึกของแผ่น PZT จากภาพตัดขวางของโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT ที่เพิ่มความแข็งแรง (ก) ไม่มีการลดตัวประสาน (ข) ลดตัวประสาน 5 wt.% (ค) ลดตัวประสาน 20 wt.% (ง) ลดตัวประสาน 30 wt.% (จ) ลดตัวประสาน 40 wt% (ฉ) ลดตัวประสาน 50 wt.%

4.4 ผลการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก

จากการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PZT ที่ขึ้นรูปได้ โดยการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสาน เป็นจำนวน 5, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 wt.% ตามลำดับ และเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT โดยการนำแผ่น PZT ซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น จากการวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ด้วยเครื่อง LCR meter โดยใช้ความต่างศักย์ 30 mV ที่ความถี่ในช่วง 20 ถึง 100 kHz ซึ่งค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกแสดงในตาราง 5 ถึงตาราง 8

ตาราง 6 และตาราง 7 แสดงความหนาหลังการเผาผนึก ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อทำการลดปริมาณระบบ organic ของแผ่น PZT ที่มีการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT โดยการนำแผ่น PZT ซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น สำหรับค่าความจุไฟฟ้าของแผ่น PZT ที่ซ้อนทับกัน 3 แผ่น มีค่าสูงสุดเมื่อทำการลดปริมาณระบบ organic ลง 50 wt.% ที่ความถี่ 1 kHz มีค่าสูงสุด 164.31 pF มีค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก 3.17 % มีความหนาหลังการเผาผนึก 310.0 μm และสำหรับค่าความจุไฟฟ้าของแผ่น PZT ที่ซ้อนทับกัน 5 แผ่น มีค่าสูงสุดเมื่อทำการลดปริมาณระบบ organic ลง 50 wt.% ที่ความถี่ 1 kHz มีค่าสูงสุด 137.32 pF มีค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก 3.50 % มีความหนาหลังการเผาผนึก 317.9 μm

ตาราง 6 ความหนาหลังการเผาผนึก ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อทำการลดปริมาณระบบ organic ของแผ่น PZT ที่มีการเพิ่มความแข็งแรงโดยการนำแผ่น PZT ซ้อนทับกัน 3 แผ่น

การลดปริมาณระบบ organic (wt.%)	**ความหนา (μm)**	**ความจุไฟฟ้า (pF) ที่ความถี่ 1 kHz**	**ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (%)**
0	218.7	69.31	9.27
5	112.3	15.92	6.79
10	146.8	4.29	5.94
20	143.7	4.19	6.27
40	321.3	13.39	5.23
50	310.0	164.31	3.17

ตาราง 7 ความหนาหลังการเผาผนึก ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อทำการลดปริมาณระบบ organic ของแผ่น PZT ที่มีการเพิ่มความแข็งแรงโดยการนำแผ่น PZT ซ้อนทับกัน 5 แผ่น

การลดปริมาณระบบ organic (wt.%)	**ความหนา (μm)**	**ความจุไฟฟ้า (pF) ที่ความถี่ 1 kHz**	**ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (%)**
0	249.8	14.52	7.83
5	332.5	4.11	7.01
10	201.8	2.08	6.01
20	214.6	5.23	7.11
40	365.1	18.39	7.07
50	317.9	137.32	3.50

ตาราง 8 และตาราง 9 แสดงความหนาหลังการเผาผนึก ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อทำการลดปริมาณตัวประสานของแผ่น PZT ที่มีการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT โดยการนำแผ่น PZT ซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น สำหรับค่าความจุไฟฟ้าของแผ่น PZT ที่ซ้อนทับกัน 3 แผ่น มีค่าสูงสุดเมื่อทำการลดปริมาณตัวประสานลง 40 wt.% ที่ความถี่ 1 kHz มีค่าสูงสุด 156.99 pF มีค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก 4.29 % มีความหนาหลังการเผาผนึก 200.7 μm และสำหรับค่าความจุไฟฟ้าของแผ่น PZT ที่ซ้อนทับกัน 5 แผ่น มีค่าสูงสุดเมื่อทำการลดปริมาณตัวประสานลง 30 wt.% ที่ความถี่ 1 kHz มีค่าสูงสุด 98.24 pF มีค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก 2.74 % มีความหนาหลังการเผาผนึก 230.7 μm

ตาราง 8 ความหนาหลังการเผาผนึก ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อทำการลดปริมาณตัวประสานของแผ่น PZT ที่มีการเพิ่มความแข็งแรงโดยการนำแผ่น PZT ซ้อนทับกัน 3 แผ่น

การลดปริมาณตัวประสาน (wt.%)	ความหนา (μm)	ความจุไฟฟ้า (pF) ที่ความถี่ 1 kHz	ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (%)
0	218.7	69.31	9.27
5	99.6	61.60	4.76
20	110.1	35.64	5.70
30	128.5	62.62	2.78
40	200.7	156.99	4.29
50	242.6	13.86	7.40

ตาราง 9 ความหนาหลังการเผาผนึก ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อทำการลดปริมาณตัวประสานของแผ่น PZT ที่มีการเพิ่มความแข็งแรงโดยการนำแผ่น PZT ซ้อนทับกัน 5 แผ่น

การลดปริมาณตัวประสาน (wt.%)	ความหนา (μm)	ความจุไฟฟ้า (pF) ที่ความถี่ 1 kHz	ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (%)
0	249.8	14.52	7.83
5	194.0	7.60	4.88
20	141.9	10.68	5.83
30	230.7	98.24	2.74
40	304.8	7.78	5.16
50	265.5	14.86	5.53

4.4.2 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity, ε_r) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เป็นค่าที่บ่งบอกประสิทธิภาพรวมถึงความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก โดยมีค่าเป็นจำนวนเท่าของสภาพยอมของสุญญากาศ ซึ่งความสามารถในการเก็บประจุแปรผันตรงกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และรูปทรงของตัวเก็บประจุ มีความสัมพันธ์แสดงดังสมการ 2.17

$$\varepsilon_r = \frac{Cd}{\varepsilon_0 A} \qquad (2.17)$$

เมื่อ C = ความจุไฟฟ้า (capacitance) มีหน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อโวลต์ (C/V) หรือ ฟารัด (F)

ε_0 = ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m

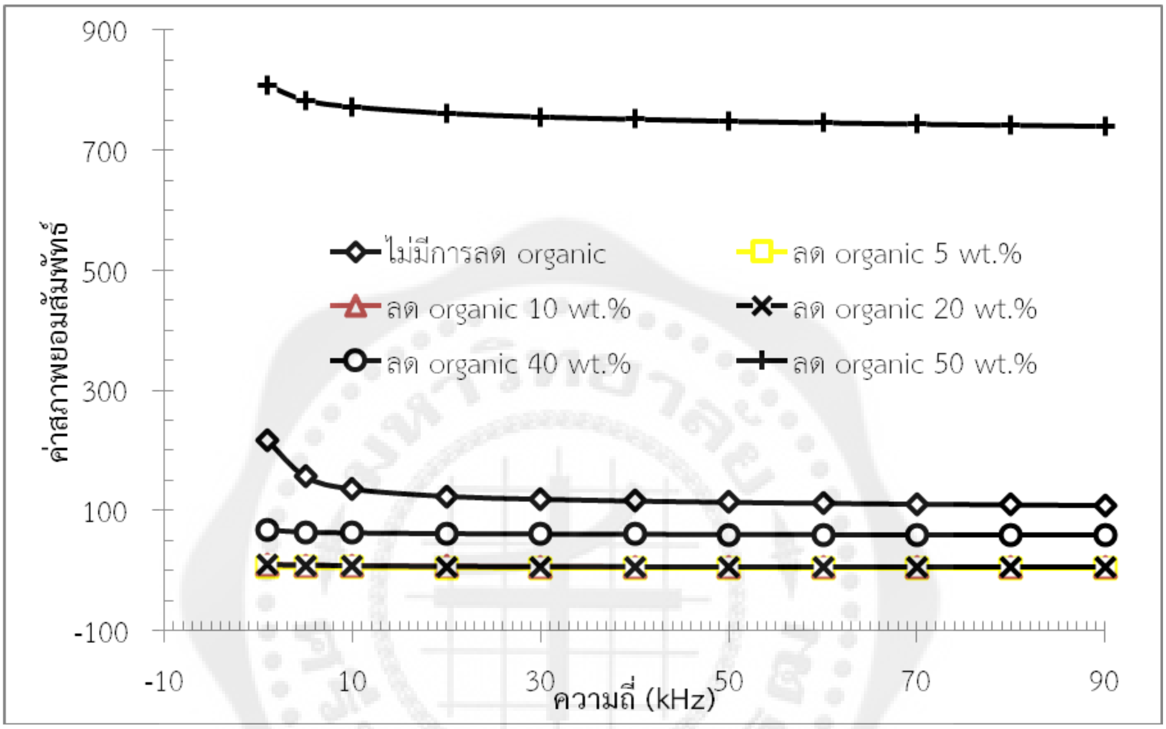
A = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

$= \pi r^2 = \pi (1.5 \times 10^{-6})^2 = 7.07 \times 10^{-6}\ m^2$

d = ความหนาของสารไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นเมตร (m)

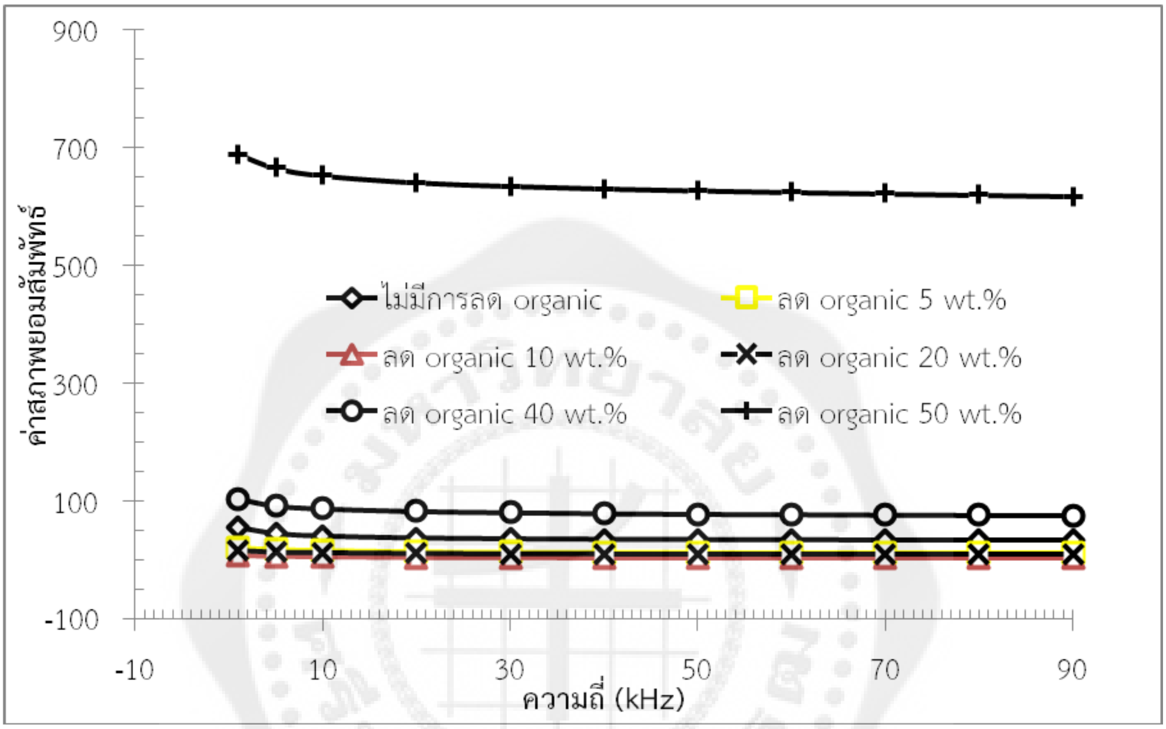
จากการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PZT โดยการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสาน เป็นจำนวน 5, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 wt.% ตามลำดับ และเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT โดยการนำแผ่น PZT มาซ้อนทับกัน 3 และ 5 แผ่น โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ด้วยเครื่อง LCR meter และนำค่าความจุไฟฟ้า และความหนาหลังการเผาของแผ่น PZT ในตาราง 5 ถึงตาราง 8 มาคำนวณค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ตามความสัมพันธ์ดังสมการ 2.17 โดยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะแสดงในภาพประกอบ 50 ถึงภาพประกอบ 53

ภาพประกอบ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่ของแผ่น PZT ที่ทำการลดปริมาณระบบ organic และเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT โดยการนำแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกมาซ้อนทับกัน 3 แผ่น ความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 112.3–321.3 μm พบว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าสูงสุด เมื่อทำการลดปริมาณระบบ organic ลง 50 wt.% ที่ความถี่ 1 kHz โดยมีค่าสูงสุด คือ 813.75



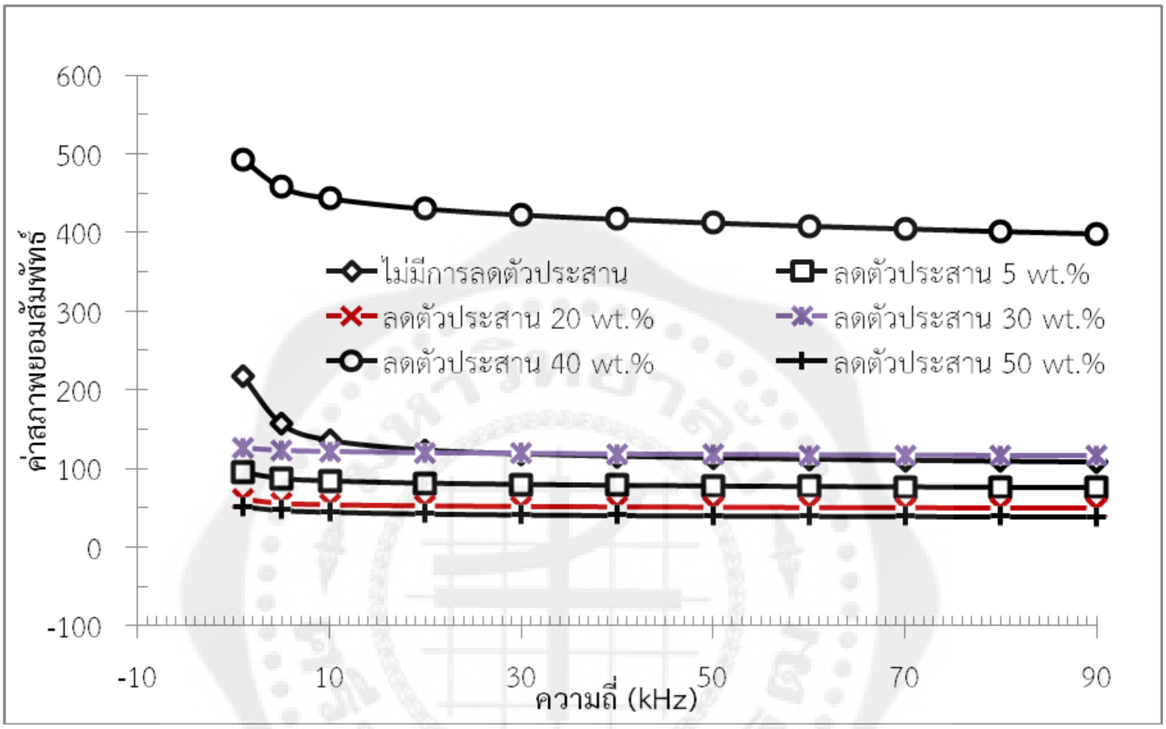
ภาพประกอบ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่ (Hz) ของแผ่น PZT ความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 112.3–321.3 μm โดยการปริมาณระบบ organic

ภาพประกอบ 51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่ของแผ่น PZT ที่ทำการลดปริมาณระบบ organic และเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT โดยการนำแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกมาซ้อนทับกัน 5 แผ่น ความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 214.6–365.1 μm พบว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าสูงสุด เมื่อทำการลดปริมาณระบบ organic ลง 50 wt.% ที่ความถี่ 1 kHz โดยมีค่าสูงสุด คือ 697.43



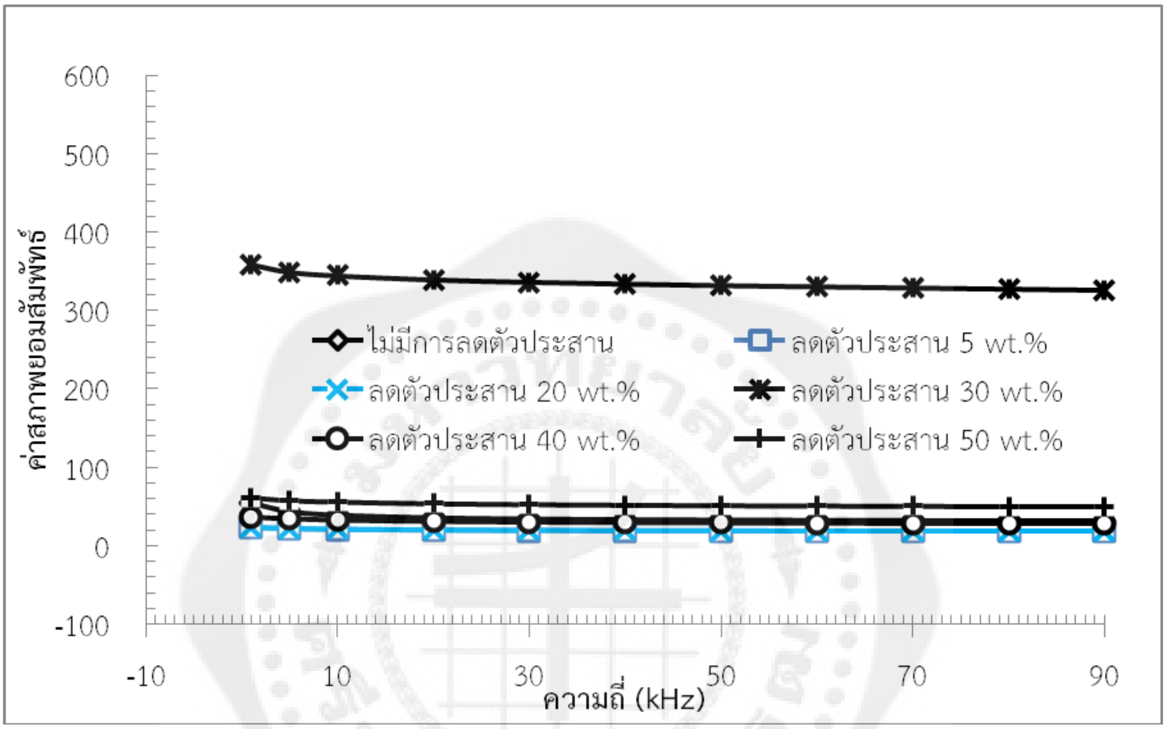
ภาพประกอบ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่ (Hz) ของแผ่น PZT ความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 214.6–365.1 μm โดยการปริมาณระบบ organic

ภาพประกอบ 52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่ของแผ่น PZT ที่ทำการลดปริมาณตัวประสาน และเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT โดยการนำแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกมาซ้อนทับกัน 3 แผ่น ความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 99.6–242.6 μm พบว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าสูงสุด เมื่อทำการลดปริมาณตัวประสานลง 40 wt.% ที่ความถี่ 1 kHz โดยมีค่าสูงสุด คือ 503.37



ภาพประกอบ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่ (Hz) ของแผ่น PZT ความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 99.6–242.6 μm ที่ทำการลดปริมาณตัวประสาน

ภาพประกอบ 53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่ของแผ่น PZT ที่ทำการลดปริมาณตัวประสาน และเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT โดยการนำแผ่น PZT ที่ยังไม่ผ่านการเผาผนึกมาซ้อนทับกัน 5 แผ่น ความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 141.9–304.8 μm พบว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าสูงสุด เมื่อทำการลดปริมาณตัวประสานลง 30 wt.% ที่ความถี่ 1 kHz โดยมีค่าสูงสุด คือ 362.09



ภาพประกอบ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่ (Hz) ของแผ่น PZT ความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 141.9–304.8 μm ที่ทำการลดปริมาณตัวประสาน

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของระบบ organic และศึกษาผลของตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง โครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PZT โดยการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสาน พบว่าเมื่อลดปริมาณระบบ organic และปริมาณตัวประสานลดลงความหนืดของสเลอรีลดลง ทำให้การขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น แต่เมื่อทำการขึ้นรูปแล้วเกิดฟองอากาศในแผ่น PZT เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตัวประสานทำหน้าที่ให้อนุภาคของส่วนผสมในแผ่น PZT เชื่อมต่อกันเกิดการเกาะตัวของอนุภาคได้ดีขึ้น และเพิ่มความแข็งแรง เมื่อลดปริมาณตัวประสานลงทำให้การเกาะตัวกันของอนุภาคและความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้มีอากาศเข้าไปแทนที่ได้ง่ายมากขึ้น และทำให้ความหนืดของสเลอรีลดลงตามไปด้วย ซึ่งการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสาน 5-60 wt.% ยังสามารถขึ้นรูปได้ แต่การลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสาน 60 wt.% แผ่น PZT มีปริมาณฟองอากาศมาก เปราะแตกหักง่ายไม่สามารถตัดและลอกออกจากแผ่นรองได้ และเงื่อนไขการลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสานที่ดีที่สุดของแผ่น PZT ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูป คือ การลดปริมาณระบบ organic และการลดปริมาณตัวประสานที่ 40 wt.% โดยพิจารณาจากปริมาณฟองอากาศ การลอกออกจากแผ่นรอง และความแข็งแรงของแผ่น PZT สำหรับแผ่น PZT ที่เตรียมได้มีความหนาหลังการเผาผนึกอยู่ในช่วง 99.6-365.1 μm ที่มีการเพิ่มความแข็งแรงเพื่อทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กทริก พบว่าเมื่อปริมาณระบบ organic และปริมาณตัวประสานลดลงปริมาณฟองอากาศและรูพรุนในแผ่น PZT เพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณฟองอากาศและรูพรุนในแผ่น PZT น้อยกว่าแผ่น PZT ที่ไม่มีการเพิ่มความแข็งแรง เนื่องจากแผ่น PZT แต่ละแผ่นจะมีรูพรุนและฟองอากาศเมื่อนำมาซ้อนทับกันทำให้รูพรุนและฟองอากาศภายในแผ่น PZT แต่ละแผ่นเกิดการวางตัวปิดรูพรุนและฟองอากาศของกันและกัน ทำให้ปริมาณรูพรุนและฟองอากาศโดยรวมลดลง และแรงเนื่องจากการกดทำให้รูพรุนและฟองอากาศในแผ่น PZT มีขนาดเล็กลง การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่น PZT พบว่าแผ่น PZT ที่เตรียมได้เป็นเฟสของเลดเซอร์โคเนตไททาเนต $(Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3)$ แบบ polycrystalline และเมื่อลดปริมาณตัวประสานไม่ทำให้เฟสของเลดเซอร์โคเนตไททาเนตเนตเปลี่ยนแปลง สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PZT เกรนของแผ่น PZT มีขนาดค่อนข้างเท่ากัน การกระจายตัวของขนาดเกรนต่ำ และจากลดปริมาณระบบ organic และปริมาณตัวประสาน ปริมาณของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น แต่ลักษณะของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง จากผลการวิจัยดังกล่าวแสดงว่าตัวประสานส่งผลโดยตรงกับปริมาณฟองอากาศ และรูพรุนในแผ่น PZT แต่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนเฟส และลักษณะของอนุภาคของ PZT ที่ได้โดยการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PZT พบว่าการลดปริมาณระบบ organic 50 wt.% ที่ความถี่ 1 kHz ให้ค่าความจุไฟฟ้า ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงสุด และค่าความสูญเสีย

ไดอิเล็กทริกเป็น 164.31 pF, 813.75 และ 3.17 % ตามลำดับ และเมื่อลดปริมาณตัวประสาน 40 wt.% ที่ความถี่ 1 kHz ให้ค่าความจุไฟฟ้า ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงสุด และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกเป็น 156.99 pF, 503.37 และ 4.29 % ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาผลของระบบ organic และศึกษาผลของตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง โครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางไดเล็กทริกของแผ่น PZT จากผลของงานวิจัยนี้ยังมีประเด็นและรายละเอียดที่เกิดขึ้นในกระบวนการวิจัย ซึ่งสิ่งเหล่ามีความน่าสนใจที่จะนำไปสู่การพัฒนาแผ่น PZT ที่เตรียมได้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อาทิเช่น

5.2.1 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวัดความหนาของแผ่น PZT ก่อนทำการเผาผนึกเพื่อทำการเปรียบเทียบความหนาก่อนและหลังการเผาผนึก เพื่อทราบถึงการลดลงของความหนาหลังการเผาผนึก ทำให้ควบคุมและผลิตแผ่น PZT ตามความหนาที่ต้องการได้ ส่งผลถึงสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PZT

5.2.2 ศึกษาการลดรูพรุนของแผ่น PZT โดยการลดฟองอากาศในสเลอรี อาจมีการทำ deair

5.2.3 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PZT เพื่อให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

5.2.4 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับทำขั้วไฟฟ้าของแผ่น PZT เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไพอิโซอิเล็กทริก

5.2.5 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น การหดตัว ความหนืด ความแข็ง และการดัดโค้ง เป็นต้น สมบัติทางไพอิโซอิเล็กทริก เช่น สัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กทริก แฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบ แฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกล สมบัติความต้านทานเชิงซ้อน เป็นต้น เพื่อตรวจสอบถึงความเป็นไปได้ในการนำแผ่น PZT ไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

1. Trolier-Mckinstry S, Muralt P. Thin film piezoelectrics for MEMS. J Electroceram 2004;12:7-17.
2. Kimura T. Application of texture engineering to piezoelectric ceramics a review. J Ceram Soc Jpn 2006;114(1):15-25.
3. Kim HS, Kim JH, Kim J. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. Int J Precis Eng Man 2011;12(6):1129-41.
4. Callister WD Jr, Rethwisch DG. Materials science and engineering an introduction. 8th ed. New York: John Wiley & Sons; 2003.
5. Moulson AJ, Herbert JM. Electroceramics. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 2003.
6. Bintachitt P. Local origin of macroscopic properties and patterning in $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ [Dissertation Ph.D. Material Science and Engineering]. USA: Graduate school The University of Pennsylvania.; 2009.
7. Suaprasert P, Aungkavattana P, Bintachitt P. Study of the factors affecting the mechanical, electrical, and piezoelectric properties of PZT micro-actuator. Ferroelectrics 2014;(459):32-7.
8. Bintachitt P, Suaprasert P, Aungkavattana P. Effect of temperature, humidity, and crack initiation on properties of PZT micro-actuator. Integr Ferroelectr 2016;(175):44-50.
9. Qin L, Sun Y, Wang QM, Zhong Y, Ou M, Jiang Z, et al. Fabrication and characterization of thick-film piezoelectric lead zirconate titanate ceramic resonators be tape-casting. IEE T Ultrason Ferr 2012;59(12):2803-12.
10. Hotza D, Greil P. Review: aqueous tape casting of ceramic powders. Mater Sci Eng 1995;(202):206-17.
11. Timakul P, Jinawath S, Aungkavattana P. Fabrication of electrolyte for solid oxide fuel cells by tape-casting. Ceram Int 2008;34(4):867-71.
12. Haertling GH. Ferroelectric ceramic : history and technology. J Am Ceram 1999;(82):797-818.
13. ภัทราวรรณ คหะวงศ์. เซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กตริก. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 2543:55-60.
14. Smolenskii G. New ferroelectric of complex composition. Sov Phys Solid state 1961;(2):2651.

บรรณานุกรม (ต่อ)

15. Buchanan RC. Ceramic material for eletroceramics; processing properties and application. USA: Marcel Dekker; 1986.

16. Murata Innovator in Electronic. Piezoelectric ceramic sensor. Murata: Manufacturing; n.d.

17. Jullian C. Investigation of porlarization switching over broad time and field domain in various ferroelectrics [Dissertation Ms.D. Material Science]. France: University of Compiegne; 2003.

18. Heimann RB. Classic and advanced ceramics: from fandamental to application. WILEYVCH Verlag Gmb 2010:259-70.

19. Lead-free Piezoelectric. Retrieved April 25, 2016, from URL: htpp://www.ytca.com/lead_free_piezoelectric_ceramics.

20. Moulson AJ, Herbert JM. Electroceramic;. materials, properties, application. New York: John Wiley & Sons; 1996.

21. Thomann H. Piezoelectric mechanismen in bleizkonat-titanate. Z Angew Phys 1996;(20):554-9.

22. Uchino K. Ferroelectric devices. New York: Marcel Dekker; 2000.

23. Yuhuan X. Ferroelectric materials and their application. Tokyo: North Honlland; 1991.

24. ผิวพรรณ ประจันทร์ศรี. การประดิษฐ์ตัวตรวจจับชนิดเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจากระบบที่มีเลดเซอร์โคเนตไททาเนตเป็นสารหลัก [ปริญญานิพนธ์ วท.ม. สาขาวัสดุศาสตร์]. เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2554.

25. Sangsubun C. Fabrication of lead zirconate titanate and niobium-doped lead zirconate titanate ceramic synthesized by a triol sol gel [Dissertation Ph.D. Materials Science]. Thailand: Graduate school The University of Chiang Mail.; 2010.

26. เชิดศักดิ์ แซ่ลี่. สมบัติไดอิเล็กตริกและเพียโซอิเล็กตริกในของผสมแบบ 0-3 พีแซดทีกับเทอร์มัลพลาสติก [ปริญญานิพนธ์ วท.บ. สาขาฟิสิกส์]. เชียงใหม่: คณะวิทยาศาสตร์ มหาหาวิทยาลัย เชียงใหม่; 2538.

27. Cross LE. Review ferroelectric materials for electromechanical transducer application. Mater Chem Phys Soc 1996;(74):1699-702.

28. Henderson IR. Piezoelectric ceramics: principle and application. USA: APC international; 2002.

29. กอบวุฒิ รุจิจนากุล. การวิเคราะห์ของแข็งเชิงฟิสิกส์. เชียงใหม่: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2553.

30. Mostaghaci H. Advance ceramic materials. Canada: Department of Industy Advanced Materials and Plastics Branch Ottawa; 1996.

31. Telford WM. Applied Geophisics. New York: Cambridge University Press; 1978.

32. Dalmont JP. Acoustic impedance measurement part 1: a review. J Sound and Vib 2001;243(3):427-39.

33. ชัญญาพันธ์ ขำเกษม. การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการขึ้นรูปวัสดุไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยใช้เทคนิคการหล่อขึ้นรูปแบบเทป [ปริญญานิพนธ์ วศ.ม. สาขาอุตสาหการ]. เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2556.

34. วันทนีย์ เชียรธานรักษ์. การเตรียมแผ่นเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตเจือเลนทานัมโดยวิธีการหล่อขึ้นรูป [ปริญญานิพนธ์ วท.ม. สาขาวัสดุศาสตร์]. เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2547.

35. Nualpralaksana S. Characterization of lead zirconate titanate powder [Dissertation Ph.D. Chemisty]. Thailand: Graduate school The University of Chiang Mail.; 2002.

36. ขจิตรัตน์ โสภณมณี. การเตรียม slip สำหรับการขึ้นรูปโดยวิธี Tape casting. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ; 2543.

37. สุพล อนันตา. การประดิษฐ์สำหรับเซรามิกชั้นสูง. เชียงใหม่: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2540.

38. Smay JE, Lewis JA. Structural and property evolution of aqueous-based lead zirconate titanate tape-cast layers. J Am Ceram 2001;(84):2495-500.

39. Traiphol N. Effects of ball milling time and dispersant concentration on properties of a lead zirconate titanate aqueous suspension for tape casting. J Ceram Proce Res 2007;(8):137-41.

40. Serway RA, Jewtt JW Jr. Capacitance and dielectric. In: Hall C, editor. Physics for scientist and engineers with modern physics. 7th ed. Singapore: Brook/Cole; 2008. pp. 722-51.

41. บริษัท เมเชอร์โทรทิกซ์ จำกัด. LCR Elite1 เครื่องวัด LCR แบบคีบอุปกรณ์ SWD. เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์พลัส 2558;(421):1-10.

42. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. ขั้นตอนการขอใช้บริการงานวิเคราะห์ทดสอบตัวอย่างและสอบเทียบเครื่องมือ (สำหรับหน่วยงานภายนอก). สืบค้นเมื่อ 14 ธันวาคม 2559, จาก URL: http://web2.mfu.ac.th/center/stic/stic-information-2/stic-instruction-2/item/146-ขั้นตอนการขอใช้บริการงานวิเคราะห์ทดสอบตัวอย่างและสอบเทียบเครื่องมือ.html

43. ZEISS. ZEISS SIGMA FE-SEMs for high quality iImaging and advanced analytical microscopy. Retrieved December 2, 2016, from URL: https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/scanning-electron-microscopes/sigma.html
44. Quorum Technologies. Q150R Rotary-pumped sputter coater/carbon coater. Retrieved December 2, 2016, from URL: https://www.quorumtech.com/quorum-product/q150r-rotary-pumped-sputter-coatercarbon-coater

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายอานนท์ ไกรป๊อก
วันเดือนปีเกิด	22 กรกฎาคม 2535
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	19/6 หมู่ 3 ตำบลตาลเตี้ย อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย 64220
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2552	มัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนบ้านสวนวิทยาคม
พ.ศ.2556	วท.บ. (สาขาวิชาฟิสิกส์) เกียรตินิยมอันดับ 2 จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ.2560	วท.ม. (สาขาวิชาฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ