

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



249062

การประดิษฐ์เขรามาิกที่มี PMN เป็นองค์ประกอบหลัก ด้วยวิธีการเผาไหม้

จิตรกร กรพรหม

วิทยานิพนธ์เสนอปริญญโทวิทยาศาสตร มหาวิทฑาลัษนเรศร เพื่อเป็นลัษนหนึ่งของการศึกษ

ลัษนการปริณญาวิทฑาสตรมหาวิทฑ

ศาสตราวิทฑาลัษนเรศร

พฤษภาคม 2555

ลิขสิทธ์เป็นของมหาวิทฑาลัษนเรศร



249062

การประดิษฐ์เซรามิกที่มี PMN เป็นองค์ประกอบหลัก ด้วยวิธีการเผาไหม้



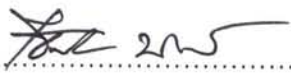
จิตรกร กรพรม

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
พฤษภาคม 2555
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ เรื่อง "การประดิษฐ์เซรามิกที่มี PMN เป็นองค์ประกอบหลัก ด้วยวิธีการเผาใหม่" ของ นายจิตรกร กรพรม เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ของมหาวิทยาลัยนเรศวร

.....คเชนทร์ แดงอุดม.....ประธาน

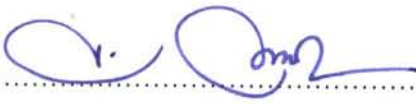
(ดร. คเชนทร์ แดงอุดม)

..........กรรมการ

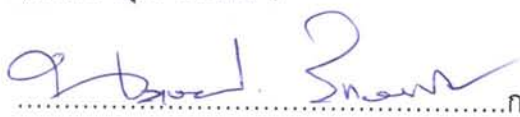
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีระชัย บงการณ)

..........กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีราณี ชำล้าเลิศ)

..........กรรมการ

(ดร. ศราวุฒิ เกื่อนต้า)

..........กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นราธิป วิทยากร)

อนุมัติ

..........

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คินนิจ ภูพัฒน์วิบูลย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

8 พฤษภาคม 2555

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระชัย บงการณัฏฐ์ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นທີ່ปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการ วิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ดร.ศราวุฒิ เกื้ออนันต์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิวาณี ขำล้ำเลิศ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นราธิป วิทยากร กรรมการ ผู้ทรงคุณวุฒิ และ ดร.คเชนทร์ แดงอุดม ประธานกรรมการ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไข ข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่าง สมบูรณ์และทรงคุณค่า

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรของคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณโครงการพัฒนากำลังคนด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) ที่ให้ทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัยไปจนตลอดหลักสูตรการศึกษา และศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะ ทางด้านส่วนประกอบ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ทุน สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและให้การ สนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่ผู้มี พระคุณทุกๆ ท่าน ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพและได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

ท้ายสุด หากมีสิ่งที่ขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขออภัยเป็นอย่างสูง ในข้อบกพร่องและผิดพลาดนั้น และข้าพเจ้าหวังว่างานวิจัยนี้คงมีประโยชน์ไม่มากนักน้อยต่อผู้ ต้องการศึกษาดำเนินไป

จิตรกร กรพรม

ชื่อเรื่อง	การประดิษฐ์เซรามิกที่มี PMN เป็นองค์ประกอบหลัก ด้วยวิธีการเผาไหม้
ผู้วิจัย	จิตรกร กรพรม
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิราช บงการณ
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิราณี ขำล้าเลิศ ดร. ศราวุฒิ เกื้อนถ้ำ
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2554
คำสำคัญ	0.67PMN-0.33PT(PMN-PT) 0.65PMN-0.35PZ (PMT-PZ) 0.3PMN-0.7PZT (PMN-PZT) 0.53PMN-0.37PT-0.1PZ เซรามิกพิโซอิเล็กทริก วิธีการเผาไหม้

บทคัดย่อ

249062

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิแคลไซน์ (700-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) และอุณหภูมิซินเตอร์ (1000-1300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง) ที่มีต่อโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของผงผลึกและเซรามิก 0.67PMN-0.33PT(PMN-PT), 0.65PMN-0.35PZ (PMT-PZ), 0.3PMN-0.7PZT (PMN-PZT) และ 0.53PMN-0.37PT-0.1PZ (PMN-PT-PZ) ที่เตรียมด้วยวิธีการเผาไหม้ ใช้โกลเซ็นเป็นเชื้อเพลิง ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการแคลไซน์ด้วยการวิเคราะห์ผลต่างทางความร้อน (DTA) และการสูญเสียน้ำหนักด้วยความร้อน (TG) แล้วศึกษาโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของผงผลึกและเซรามิก

พบว่าผงผลึกบริสุทธิ์ของ PMN-PT ได้จากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผงผลึก PMN-PT แสดงโครงสร้างเฟสเพรอฟสไกต์แบบรอมโบอีดรอล ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลต่างทางความร้อนและการสูญเสียน้ำหนักด้วยความร้อน (DTA-TG) ผงผลึก PMN-PT มีลักษณะค่อนข้างกลม เมื่ออุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.19 เป็น 1.25 ไมโครเมตร เซรามิก PMN-PT แสดงโครงสร้างแบบผสมของรอมโบอีดรอลกับเทตระโกนอล เกรนของเซรามิกมีลักษณะเป็นทรงหลายเหลี่ยมและขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่น ค่าการหดตัวเชิงเส้น และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ

คูรีของเซรามิกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 1100°C หลังจากนั้นค่าเหล่านี้มีค่าลดลง เซรามิก PMN-PT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100°C องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความหนาแน่นสูงสุด ค่าการหดตัวเชิงเส้นสูงสุด และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิคูรีสูงสุด โดยมีค่าประมาณ 7.95 g/cm^3 13.2% และ 21227 ตามลำดับ และมีค่า d_{33} เท่ากับ 244 pC/N ค่า P_r , E_c และ R_{sq} (ใช้สนามไฟฟ้าเพิ่ม 40 kV) เท่ากับ $20.5\text{ }\mu\text{C/cm}^2$ 3.88 kV/cm และ 1.09 ตามลำดับ

โครงสร้างเฟสเพอรอฟสไกต์แบบซูโดคิวบิกที่บริสุทธิ์ของผงผลึก PMN-PZ บริสุทธิ์ ได้จากตัวอย่างที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DTA-TG ผงผลึก PMN-PZ มีลักษณะค่อนข้างกลม และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงผลึก PMN-PZ มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.16 ถึง 1.62 ไมโครเมตร เมื่ออุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เพิ่มขึ้นจาก 700 ถึง 1000 องศาเซลเซียส เซรามิก PMN-PZ แสดงโครงสร้างแบบซูโดคิวบิกที่บริสุทธิ์เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1200°C และพบว่ามีเฟสแปลกปลอมของ $\text{Pb}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ และ MgO เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200°C เกรนของเซรามิก PMN-PZ มีลักษณะค่อนข้างกลม เมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.46 เป็น 2.36 ไมโครเมตร ค่าความหนาแน่น ค่าการหดตัวเชิงเส้น และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิคูรีของเซรามิกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 1200°C หลังจากนั้นค่าเหล่านี้มีค่าลดลง เซรามิก PMN-PZ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความหนาแน่นสูงสุด ค่าการหดตัวเชิงเส้นสูงสุด และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิคูรีสูงสุด โดยมีค่า 7.76 g/cm^3 11.86% และ 20052 ตามลำดับ และมีค่า d_{33} เท่ากับ 95 pC/N ค่า P_r , E_c และ R_{sq} (ใช้สนามไฟฟ้าเพิ่ม 40 kV) เท่ากับ $24.27\text{ }\mu\text{C/cm}^2$ 3.49 kV/cm และ 0.90 ตามลำดับ

เฟสเดี่ยวของผงผลึก PMN-PZT ได้จากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผงผลึก PMN-PZT แสดงโครงสร้างผลึกแบบซูโดคิวบิก ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DTA-TG ผงผลึก PMN-PZT มีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เพิ่มขึ้น เซรามิก PMN-PZT แสดงแบบโครงสร้างผลึกแบบซูโดคิวบิกที่บริสุทธิ์ในทุกตัวอย่าง เกรนของเซรามิก PMN-PZT มีลักษณะค่อนข้างกลม เมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ขนาดเกรนเฉลี่ยของเซรามิก PMN-PZT มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.07 เป็น 4.40 ไมโครเมตร ค่าความหนาแน่น ค่าการหดตัวเชิงเส้น และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิคูรีของเซรามิกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 1200°C หลังจากนั้นค่าเหล่านี้มีค่าลดลง เซรามิก PMN-PZT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความหนาแน่นสูงสุด ค่าการหดตัวเชิงเส้น สูงสุดและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิคูรีสูงสุดมีค่า 7.88 g/cm^3 14.66% และ

25301 ตามลำดับ มีค่า d_{33} เท่ากับ 310 pC/N ค่า P_r , E_c และ R_{sq} (ใช้สนามไฟฟ้าเพิ่ม 40 kV) เท่ากับ 26.13 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 4.84 kV/cm และ 0.90 ตามลำดับ

โครงสร้างเฟสเทอร์โกนอนลเพอโรฟสไกต์แบบเฟสเดียวของผงผลึก PMN-PT-PZ ได้จากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DTA-TG ผงผลึกมีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าเพิ่มจาก 0.16 เป็น 1.62 ไมโครเมตร เมื่ออุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เพิ่มขึ้นจาก 700 ถึง 1000 องศาเซลเซียส เซรามิก PMN-PT-PZ แสดงโครงสร้างแบบเทอร์โกนอนลบริสุทธิ์เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1200°C พบเฟสแปลกปลอมของ $\text{Pb}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ เมื่อซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200°C เกรนของเซรามิกมีลักษณะค่อนข้างกลมและเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.77 เป็น 6.02 ไมโครเมตร ค่าความหนาแน่น ค่าการหดตัวเชิงเส้น และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิคูรีของเซรามิกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 1100°C หลังจากนั้นค่าเหล่านี้มีค่าลดลง เซรามิก PMN-PT-PZ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความหนาแน่นสูงสุด ค่าการหดตัวเชิงเส้นสูงสุด และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิคูรีมีค่า 7.72 g/cm^3 , 16.13% และ 18337 ตามลำดับ และมีค่า d_{33} เท่ากับ 266 pC/N ค่า P_r , E_c และ R_{sq} (ใช้สนามไฟฟ้าเพิ่ม 40 kV) เท่ากับ 28.14 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 4.72 kV/cm และ 1.13 ตามลำดับ

Title	FABRICATION OF PMN-BASED CERAMICS VIA COMBUSTION TECHNIQUE
Author	Chittakron Kronphom
Advisor	Assistant Professor Theerachai Bongkarn, Ph.D.
Co - Advisor	Assistant Professor Thiranee Khumlumert, Ph.D. Sarawut Thountom, Ph.D.
Academic Paper	Thesis M.S. in Applied Physics, Naresuan University, 2011
Keywords	0.67PMN-0.33PT(PMN-PT), 0.65PMN-0.35PZ (PMT-PZ), 0.3PMN- 0.7PZT (PMN-PZT), 0.53PMN-0.37PT-0.1PZ , combustion technique, piezoelectric ceramic

ABSTRACT

249062

In this study, the effects of calcinations temperature (700-1000°C for 2 h) and sintering temperature (1000-1300°C for 2h) on the phase formation, microstructure and electrical properties of the 0.67PMN-0.33PT (PMN-PT), 0.65PMN-0.35PZ (PMT-PZ), 0.3PMN-0.7PZT (PMN-PZT) and 0.53PMN-0.37PT-0.1PZ (PMN-PT-PZ) ceramics were investigated. These ceramics were prepared by combustion technique. Glycine was used as fuel to reduce the reaction temperature. The differential thermal analysis (DTA) and the thermo gravimetric analysis (TG) were used to evaluate the optimum condition for calcination. The crystal structure, microstructure, density and electrical properties of the powders and ceramics were studied.

It was found that the pure PMN-PT powder was observed in the sample calcined at 900°C for 2 h. The PMN-PT powders belonged to rhombohedral perovskite phase. The XRD result corresponded with DTA-TG results investigations. The microstructure of the PMN-PT powders exhibited an irregular shape and an agglomerated form. When calcinations temperature increased, the average particle size increased from 0.19 to 1.25 μm . The crystal structure of the PMN-PT ceramics showed coexist phase of rhombohedral and tetragonal. The grain morphology of ceramics exhibited the polygonal morphology and the average grain size increased with increasing sintering temperature.

The density, linear shrinkage and maximum dielectric constant at Curie temperature (T_c) increased with increasing sintering temperatures up to 1100°C and thereafter they decreased. The PMN-PT ceramics sintered at 1100°C for 2 h exhibited the highest density, the highest linear shrinkage and the highest dielectric constant at T_c of 7.95 g/cm³, 13.2% and 21227, respectively. The d_{33} was 244 pC/N and the P_r , E_c , and R_{sq} (using electric field at 40 kV) were 20.5 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 3.88 kV/cm and 1.09, respectively.

The pure pseudo-cubic perovskite phase of PMN-PZ powders was obtained by the sample calcined at 850°C for 2 h. The XRD results corresponded with DTA-TG results investigation. The morphology of the PMN-PZ powders showed an almost-spherical shape and the average particle size increased from 0.16 to 1.62 μm when increased calcinations temperature from 700 to 1000°C. The PMN-PZ ceramics exhibited the pure pseudo-cubic perovskite phase in the sample sintered at the temperature lower than 1200°C. The second phases of $\text{Pb}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ and MgO were found in the samples sintered at the temperatures higher than 1200°C. The grain morphology of PMN-PZ ceramics exhibited an almost spherical morphology. When sintering increased, the average grain size increased from 0.46 to 2.36 μm . The density, linear shrinkage and maximum dielectric constant of PMN-PZ ceramics increased with increasing sintering temperatures up to 1200°C and then decreased. The sample sintered at 1200°C for 2 h obtained the highest density, highest linear shrinkage and highest dielectric constant at T_c of 7.76 g/cm³, 11.86% and 20052, respectively. The d_{33} was 95 pC/N and the P_r , E_c , and R_{sq} (using electric field at 40 kV) were 24.27 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 3.49 kV/cm and 0.90, respectively.

The pure phase of PMN-PZT powder was obtained by the sample calcined at 850°C for 2 h. The crystal structure of PMN-PZT powders exhibited pseudo-cubic phase. The XRD result corresponded with DTA-TG results investigations. The microstructure of the PMN-PZT powders exhibited an irregular shape and an agglomerated form. The average particle size increased with increasing calcinations temperature. The crystal structure of PMN-PZT ceramics exhibited pure pseudo-cubic perovskite phase in all samples. The grain morphology of PMN-PZT ceramics exhibited the polygonal morphology and the average grain size increased from 1.07 to 4.40 μm when sintering

temperature increased. The density, linear shrinkage and maximum dielectric constant of PMN-PZT ceramics increased with increasing sintering temperatures up to 1200°C and then drop to values. The PMN-PZT ceramics sintered at 1200°C for 2 h showed the highest density, highest linear shrinkage and highest dielectric constant at T_c of 7.88 g/cm³, 14.66% and 25301, respectively. The d_{33} was 310 pC/N and the P_r , E_c , and R_{sq} (using electric field at 40 kV) were 26.13 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 4.84 kV/cm and 0.90, respectively.

The single tetragonal perovskite phase of PMN-PT-PZ powders was obtained by the sample calcined at 900°C for 2 h. The morphology of the PMN-PT-PZ powders showed an almost-spherical shape and the average particle size increased from 0.12 to 2.51 μm when increased calcinations temperature from 700 to 1000°C. The PMN-PT-PZ ceramics exhibited the pure tetragonal perovskite phase in the samples sintered at the temperature lower than 1200°C. The second phase of $\text{Pb}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ was found in the samples sintered at the temperatures higher than 1200°C. The grain morphology of PMN-PT-PZ ceramics exhibited an almost spherical morphology and the average grain size increased from 1.77 to 6.02 μm . The PMN-PT-PZ ceramics sintered at 1100°C for 2 h exhibited the highest density, highest linear shrinkage and highest dielectric constant at T_c of 7.72 g/cm³, 16.13% and 18337, respectively. The d_{33} was 266 pC/N and the P_r , E_c , and R_{sq} (using electric field at 40 kV) were 28.14 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 4.72 kV/cm and 1.13, respectively.

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตการวิจัย	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
สมบัติพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric property).....	3
แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก(Anti ferroelectric).....	5
เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric).....	6
พาราอิเล็กทริก (Paraelectric).....	8
เพอโรฟสไกต์เฟอร์โรอิเล็กทริก (Perovskite ferroelectric).....	9
โพลาไรเซชัน (Polarization)	10
สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)	11
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity: ϵ_r).....	12
การซินเตอร์ (Sintering).....	14
การบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball milling).....	17
การเตรียมเซรามิกด้วยวิธีการเผาไหม้.....	18
การวิเคราะห์เชิงความร้อน.....	19
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer).....	24
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope).....	27
การหาความหนาแน่น	30
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3	44
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	44
อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร.....	44
การเตรียมผงผลึก.67PMN-0.33PT, 0.65PMN-0.35PZ, 0.53PMN-0.37PT -0.1PZ และ 0.3PMN-0.7PZT.....	45
การเตรียมเซรามิก PMN-PT, PMN-PZ, PMN-PZT และ PMN-PT-PZ.....	46
4	53
ผลการวิจัย.....	53
ผลการเตรียมเซรามิก PMN-PT ด้วยวิธีการเผาไหม้.....	53
การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารผสม PMN-PT กับ ไทลีนด้วยเทคนิค DTA-TG.....	53
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผง PMN-PT ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD).....	55
ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผงผลึก PMN-PT ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM).....	57
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซรามิก PMN-PT ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD).....	58
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PMN-PT (Scanning electron microscope:SEM).....	61
สมบัติทางกายภาพของเซรามิก PMN-PT.....	63
ค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PT.....	65
ค่าสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติพิโซอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PT	67

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

ผลการเตรียมเซรามิก PMN-PZ ด้วยวิธีการเผาไหม้.....	70
การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารผสม PMN-PZ กับ ไกลซีนด้วยเทคนิค DTA-TG.....	70
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผง PMN-PZ ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD).....	71
ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผงผลึก PMN-PZ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)...	73
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซรามิก PMN-PZ ด้วยเทคนิค เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD).....	75
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PMN-PZ (Scanning electron microscope:SEM).....	76
สมบัติทางกายภาพของเซรามิก PMN-PZ.....	79
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PZ.....	81
ค่าสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติพิโซอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PZ	83
ผลการเตรียมเซรามิก PMN-PZT ด้วยวิธีการเผาไหม้.....	85
การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารผสม PMN-PZT กับ ไกลซีนด้วยเทคนิค DTA-TG.....	85
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผง PMN-PZT ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD).....	87
ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผงผลึก PMN-PZT ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)...	89
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซรามิก PMN-PZT ด้วยเทคนิค เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD).....	91

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PMN-PZT (Scanning electron microscope:SEM).....	92
สมบัติทางกายภาพของเซรามิก PMN-PZT.....	94
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PZT.....	96
ค่าสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติพิโซอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PZT	99
ผลการเตรียมเซรามิก PMN-PT-PZ ด้วยวิธีการเผาไหม้.....	101
การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารผสม PMN-PT-PZ กับ ไกลซีนด้วยเทคนิค DTA-TG.....	101
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผง PMN-PT-PZ ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD).....	102
ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผงผลึก PMN-PT-PZ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM).....	104
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซรามิก PMN-PT-PZ ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD).....	106
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PMN-PT-PZ (Scanning electron microscope:SEM)	108
สมบัติทางกายภาพของเซรามิก PMN-PT-PZ	111
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PT-PZ	113
ค่าสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติพิโซอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PT-PZ	116

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
5	บทสรุป.....	118
	สรุปผลการทดลองการเตรียมเซรามิก PMN-PT.....	118
	สรุปผลการทดลองการเตรียมเซรามิก PMN-PZ.....	119
	สรุปผลการทดลองการเตรียมเซรามิก PMN-PZT.....	119
	สรุปผลการทดลองการเตรียมเซรามิก PMN-PT-PZ.....	120
		
	บรรณานุกรม.....	121
	ประวัติผู้วิจัย.....	128

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกในวัสดุ.....	3
2 แผนภาพแสดงการแบ่งกลุ่มพิโซอิเล็กทริกและกลุ่มย่อย.....	4
3 วงรอบฮิสเทอรีซิสระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้าในของสารแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	5
4 ความต่างเฟสระหว่างกระแสลับ (I) และศักย์ไฟฟ้า (V) ของวัสดุไดอิเล็กทริก (a) กรณีไม่มีการสูญเสียพลังงาน (b) กรณีมีการสูญเสียพลังงาน.....	7
5 วงรอบฮิสเทอรีซิสระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้าในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	8
6 วงรอบฮิสเทอรีซิสระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้าในของสารพาราอิเล็กทริก.....	9
7 หน่วยเซลล์แบบเพอโรฟสไกต์ (ABO_3) ของแบเรียมไททานเต.....	10
8 ไดโพลภายในเนื้อสาร (a) ก่อนทำการ poling และ (b) หลังทำการ poling.....	11
9 ตัวเก็บประจุแผ่นขนาน.....	12
10 พฤติกรรมการซินเตอร์แบบสถานะของแข็งทั่วๆ ไปในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา.....	15
11 พัฒนาการของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง (a) อนุภาคฝังยัดกันอยู่แบบหลวมๆ หลังการอัดขึ้นรูป (b) การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น (c) การซินเตอร์ช่วงกลาง และ (d) การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย.....	15
12 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอล (ball-milling) และแสดงลักษณะพฤติกรรมการบดย่อยแบบเลื่อนหล่นกันไป (cascading).....	18
13 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการการเผาไหม้.....	19
14 วงจรของเครื่อง DTA.....	20
15 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อกราฟ.....	21
16 ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของตัวอย่างต่อกราฟ.....	21
17 ผลวิเคราะห์แสดงค่าเป็นกราฟ DTA, TG, DTG ของดิน Kaolin.....	22
18 ผลวิเคราะห์แสดงค่าเป็นกราฟ DTA, TG, DTG ของดิน Bentonite.....	23

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
19 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย TGA.....	24
20 แบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์.....	26
21 องค์ประกอบและหลักการเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	29
22 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก (1-x)PMN-xPT ที่ปริมาณ x = (a) 0.28, (b) 0.32 และ (c) 0.32.....	32
23 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก 0.65PMN-0.35PT.....	33
24 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก PMN-PT.....	33
25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PMN-PT และ PMN-PZT ที่เคล ไชนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	34
26 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงผลึก PMN-PT และ PMN-PZT ที่เคลไชนที่อุณหภูมิ 800 และ 700 องศาเซลเซียส.....	34
27 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก 0.67PMN- 0.33PT เผาเคลไชนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	35
28 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก 0.67PMN-0.33PT ซินเตอร์ที่ อุณหภูมิ 1100-1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	36
29 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1175 องศา เซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	36
30 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก (1-x)PMN-xPZT.....	38
31 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก (1-x)PMN-xPZT ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	38
32 วงรอบฮีสเทรีซิสระหว่างค่าโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้าของเซรามิก (1-x)PMN-xPZT.....	39
33 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก (1-x) PMN-xPZT ซินเตอร์ที่ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส โดยที่ (a) x=0.3 (b) x=0.5 และ (c) x=0.7..	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
34 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก 0.3PMN-0.7PZT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	40
35 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก $(0.90 - x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3 - 0.10\text{PbZrO}_3$ ที่ปริมาณ S1(0.28), S2(0.31), S3(0.34), S4(0.37), S5(0.40) และ S6(0.43).....	41
36 ค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริกของเซรามิก $(0.90 - x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3 - 0.10\text{PbZrO}_3$ ที่ปริมาณ S1(0.28), S2(0.31), S3(0.34), S4(0.37), S5(0.40) และ S6(0.43).....	42
37 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก $0.65\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.35\text{PbZrO}_3$ ที่ความถี่ 0.1, 1.1, 12.7, 54.5 และ 143.8 kHz.....	43
38 วงรอบฮีสเทรีซิสระหว่างค่าโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้าของเซรามิก $0.65\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.35\text{PbZrO}_3$	43
39 ขั้นตอนการซินเตอร์เซรามิก PMN-PT, PMN-PZ, PMN-PZT และ PMN-PZ-PT..	47
40 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึก 0.67PMN-0.33PT.....	48
41 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึก 0.65PMN-0.35PZ.....	49
42 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึก 0.3PMN-0.7PZT.....	50
43 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึก 0.53PMN-0.37PT-0.1PZ.....	51
44 แผนผังขั้นตอนการเตรียมเซรามิก 0.67PMN-0.33PT, 0.65PMN-0.35PZ, 0.53PMN-0.37PT-0.1PZ และ 0.3PMN-0.7PZT.....	52
45 กราฟ DTA ของสารผสม PMN-PT ที่ใช้อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 10°ซ/นาที่..	54
46 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PMN-PT เคาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของ อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
47 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของผงผลึก PMN-PT ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 700 (ข) 750 (ค) 850 (ง) 900 (จ) 950 และ (ฉ) 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	57
48 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PMN-PT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 1000-1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของ อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	59
49 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุม 44-46 องศา ของเซรามิก PMN-PT ที่เผา ซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1000-1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	60
50 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก PMN-PT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 1000 (ข) 1050 (ค) 1100 (ง) 1150 และ (จ) 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	62
51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่าการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก PMN-PT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	64
52 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PT ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	66
53 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก PMN-PT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100°C โดย ใช้ความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าที่ (ก) 10 (ข) 20 (ค) 30 และ (ง) 40 kV/cm	68
54 กราฟ DTA ของสารผสม PMN-PZ ที่ใช้อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 10°ซ/นาที่..	71
55 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PMN-PZ เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของ อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	72
56 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของผงผลึก PMN-PZ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 700 (ข) 750 (ค) 850 (ง) 900 (จ) 950 และ (ฉ) 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
57 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PMN-PZ ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1000-1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	76
58 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก PMN-PZ ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก)1000 (ข) 1050 (ค) 1100 (ง) 1150 (จ) 1200 (ฉ) 1250 และ (ช) 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	78
59 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่าการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก PMN-PZ ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	80
60 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PZ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	82
61 ค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PZ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	82
62 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก PMN-PZ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C โดยใช้ความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าที่ (ก) 10 (ข) 20 (ค) 30 และ (ง) 40 kV/cm.....	84
63 กราฟ DTA ของสารผสม PMN-PZT ที่ใช้อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 10°ซ/นาที	85
64 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PMN-PZT เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	88
65 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของผงผลึก PMN-PZT ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 700 (ข) 750 (ค) 850 (ง) 900 (จ) 950 และ (ฉ) 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
66 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PMN-PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1000-1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของ อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	91
67 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก PMN-PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก)1000 (ข) 1050 (ค) 1100 (ง) 1150 (จ) 1200 (ฉ) 1250 และ (ช) 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	93
68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่าการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก PMN-PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	95
69 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PZT ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	97
70 ค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PZ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	98
71 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก PMN-PZT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C โดยใช้ความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าที่ (ก) 10 (ข) 20 (ค) 30 และ (ง) 40 kV/cm.....	100
72 กราฟ DTA ของสารผสม PMN-PT-PZ ที่ใช้อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 10°ซ/นาที่.....	101
73 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PMN-PZ-PT เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	103
74 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของผงผลึก PMN-PT-PZ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 700 (ข) 750 (ค) 850 (ง) 900 (จ) 950 และ (ฉ) 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	105

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
75	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PMN-PT-PZ ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1000-1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของ อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	107
76	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ระหว่างมุม 43-46.5 องศา ของเซรามิก PMN-PT-PZ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงอัตราขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	108
77	ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของเซรามิก PMN-PT-PZ ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก)1000 (ข) 1050 (ค) 1100 (ง) 1150 (จ) 1200 (ฉ) 1250 และ (ช) 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	110
78	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่าการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก PMN-PT-PZ ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	112
79	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PT-PZ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	114
80	ค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PT-PZ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆ.....	115
81	ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก PMN-PT-PZ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°C โดยใช้ความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าที่ (ก) 10 (ข) 20 (ค) 30 และ (ง) 40 kV/cm.....	117

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์พีซีไดอิเล็กตริกของเซรามิก PMN-PT.....	38
2 ค่าปริมาณร้อยละของเฟสเทอร์โกนอลและค่าแลตทิซพารามิตเตอร์.....	42
3 ค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก PMN-PT ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	56
4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึก PMN-PT ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิระหว่าง 700- 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	58
5 ขนาดเกรนเฉลี่ยของผงผลึก PMN-PT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 1000- 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	63
6 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก PMN-PT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	64
7 สมบัติไดอิเล็กตริกของเซรามิก PMN-PT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	66
8 สมบัติไดอิเล็กตริกของเซรามิก PMN-PT ที่เตรียมด้วยวิธีอื่นๆ.....	69
9 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริกของเซรามิก PMN-PT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศา เซลเซียส ตรวจสอบด้วยความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าต่างๆ.....	69
10 ค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก PMN-PZ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	73
11 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึก PMN-PZ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 700- 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	75
12 ขนาดเกรนเฉลี่ยและร้อยละความบริสุทธิ์ของเซรามิก PMN-PZ ที่เผาซินเตอร์ที่ อุณหภูมิ ระหว่าง 1000-1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	79
13 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก PMN-PZ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	80
14 สมบัติไดอิเล็กตริกของเซรามิก PMN-PZ ที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	83
15 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริกของเซรามิก PMN-PZ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศา เซลเซียส ตรวจสอบด้วยความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าต่างๆ.....	85
16 ค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก PMN-PZT ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
17	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึก PMN-PZT ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	90
18	ขนาดเกรนเฉลี่ยของผงผลึก PMN-PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 1000-1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	94
19	สมบัติทางกายภาพของเซรามิก PMN-PZT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	95
20	สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PZT ที่ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	98
21	สมบัติต่างๆ ของเซรามิก PMN-PZT ที่เตรียมด้วยวิธีอื่นๆ.....	99
22	สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PZT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100° ตรวจสอบด้วยความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าต่างๆ.....	101
23	ค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของผงผลึก PMN-PT-PZ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	104
24	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึก PMN-PT-PZ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	106
25	ขนาดเกรนเฉลี่ยและร้อยละความบริสุทธิ์ของเซรามิก PMN-PT-PZ ที่เผาซินเตอร์ ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 1000-1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	111
26	สมบัติทางกายภาพของเซรามิก PMN-PT-PZ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	112
27	สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PT-PZ ซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	115
28	สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PZT ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 องศา เซลเซียสตรวจสอบด้วยความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าต่างๆ.....	117