



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: สมบัติเชิงกลและสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก และสมรรถนะของ
วัสดุผสมเซรามิกไฟอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/
PVDF สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสภาพที่ถูกฝังใน
โครงสร้างคอนกรีต

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตติยากร เรียนยอย

เดือน ปีที่เสร็จโครงการ: พฤษภาคม 2563

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : สมบัติเชิงกลและสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก และสมรรถนะของวัสดุผสม
เซรามิกไฟอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF สำหรับ
ประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสภาพที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน
ผศ.ดร. รัตติยากร เรียนยอย

สังกัด
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

นักวิจัยที่ปรึกษา
รศ.ดร. อานนท์ ชัยพานิช

สังกัด
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	2
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	3
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	5
หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)	7
ที่มาและความสำคัญของปัญหา	11
วัตถุประสงค์	13
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
วิธีการทดลอง	44
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	51
สรุปผลการทดลอง	63
ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง	65
ผลงาน (Output) ที่ได้จากโครงการ	73
ภาคผนวก	74
รายงานสรุปการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	107

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปี พ.ศ. 2561 แก่โครงการวิจัยเรื่อง “สมบัติเชิงกลและสมบัติเพโรอิเล็กทริกและสมรรถนะของวัสดุผสมเซรามิกไฟอโซอิเล็กทริก/ซีเมนต์/PVDF สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสภาพที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต (Mechanical and ferroelectric properties and performance of embedded lead-free piezoelectric ceramic/cement/PVDF composites sensor for Structural Health Monitoring in concrete structure)”

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อานนท์ ชัยพานิช ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้การสนับสนุนและคำแนะนำในทุกด้านเพื่อช่วยให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ นอกจากนี้ขอขอบคุณ ผศ.ดร. สุขุม อิสเสงี่ยม ผศ.ดร. อธิพงศ์ งามจารุโรจน์ ห้องปฏิบัติการวัสดุที่มีปูนซีเมนต์เป็นฐานชั้นสูง ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ และห้องปฏิบัติการวิจัยเลเซอร์และทัศนศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ และขอขอบคุณผู้ร่วมงานทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือผู้วิจัยให้ดำเนินงานโครงการนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดีทั้งในทางตรงและทางอ้อม แต่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้

ผศ. ดร. รัตติยากร เรียนนอย

หัวหน้าโครงการ

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG6180255

ชื่อโครงการ : สมบัติเชิงกลและสมบัติเพอร์โวลีอิกทรานซิสเตอร์ และสมรรถนะของวัสดุผสม
เซรามิกโพไลโซอิลิกทรานซิสเตอร์/ซีเมนต์/PVDF สำหรับประยุกต์ใช้
เป็นตัวตรวจจับสนามที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต

ชื่อนักวิจัย : ผศ.ดร. รัตติยากร เรียนยอย

E-mail Address : r.rianyoi@gmail.com

ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี (2 พฤษภาคม 2561 ถึง 1 พฤษภาคม 2563)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติเพอร์โวลีอิกทรานซิสเตอร์ และสมรรถนะของวัสดุผสม เซรามิกโพไลโซอิลิกทรานซิสเตอร์/ซีเมนต์/PVDF ด้วยระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสนามที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต ในขั้นตอนแรกได้ทำการประดิษฐ์เซรามิกโพไลโซอิลิกทรานซิสเตอร์/ซีเมนต์ $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-0.06\text{BaTiO}_3$ (BNT-BT) ขั้นตอนที่สองทำการขึ้นรูปวัสดุผสม BNT-BT/PC ในรูปแบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยผสมอนุภาคเซรามิก BNT-BT กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) โดยใช้ปริมาณเซรามิก 30-60% โดยปริมาตร นอกจากนี้ทำการเตรียมวัสดุผสม BNT-BT/PC/PVDF ในรูปแบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยใช้อนุภาคเซรามิก BNT-BT ในปริมาณ 50% โดยปริมาตร และใช้โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride; PVDF) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1, 3, 5 และ 7% โดยปริมาตร จากนั้นทำการศึกษาค่ากำลังอัด, สมบัติเพอร์โวลีอิกทรานซิสเตอร์ รวมไปถึงการตอบสนองต่อสัญญาณทางไฟฟ้าของวัสดุผสม จากการทดลองพบว่าค่ากำลังอัดของวัสดุผสม BNT-BT-PC มีค่าอยู่ในช่วง 28.19-35.30 MPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีต นอกจากนี้เมื่อมีการใช้โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride; PVDF) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังช่วยลดรูปพูนในรอยต่อระหว่างเฟสเซรามิกโพไลโซอิลิกทรานซิสเตอร์และเฟสซีเมนต์ จากการวัดค่ากำลังอัดยัง

พบว่าที่ปริมาณ PVDF มากกว่า 3% โดยปริมาตรค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นอย่างเป็นได้ชัด และยังพบว่าวัสดุผสม เซรามิกโพธิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF แสดงการเกิดวงวนฮีสเทอรีซิสซึ่งเป็นสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องได้ โดยมีค่า instantaneous remnant polarization (P_{ir}) เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอก เท่ากับ $22.36 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ที่ปริมาณเซรามิก BNT-BT 60% โดยปริมาตร นอกจากนี้การใช้ PVDF แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังส่งผลให้ค่า P_{ir} ของวัสดุผสมลดลง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ PVDF แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบว่าทำให้ค่าการสูญเสียของวงวนฮีสเทอรีซิสลดลง สำหรับการศึกษาดอบสนองต่อสัญญาณทางไฟฟ้าของวัสดุผสม BNT-BT/PC ได้ทำการศึกษากายใต้ความถี่ 60 Hz พบว่ามีการตอบสนองของสัญญาณเกิดขึ้นค่อนข้างดี นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาผลของปริมาณ PVDF ต่อการตอบสนองต่อสัญญาณทางไฟฟ้าของวัสดุผสม BNT-BT/PC/PVDF ในมอร์ต้าภายใต้การให้แรงกระทบ (ตุ้มน้ำหนัก 200 g ที่ความสูง 20 cm ในแนวตั้งฉาก) พบว่าเมื่อมีปริมาณ PVDF เพิ่มขึ้นทำให้การตอบสนองต่อสัญญาณทางไฟฟ้าของวัสดุผสมเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ PVDF สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

คำหลัก: เซรามิกโพธิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว, วัสดุผสมซีเมนต์, สมบัติเชิงกล, สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก, การตรวจสอบสภาพของโครงสร้าง

Abstract

Project Code : MRG6180255

Project Title : Mechanical and ferroelectric properties and performance of embedded lead-free piezoelectric ceramic/cement/PVDF composites sensor for Structural Health Monitoring in concrete structure

Investigator : Assistant Professor Dr. Rattiyakorn Rianyai

E-mail Address : r.rianyoi@gmail.com

Project Period : 2 years (May 1, 2018 to May 1, 2020)

This research project investigated mechanical, ferroelectric properties and performance of embedded lead-free piezoelectric ceramic/cement/PVDF composites sensor with 0-3 connectivity for Structural Health Monitoring in concrete structure. Firstly, lead-free piezoelectric ceramic material, $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNT-BT) was fabricated. Secondly, BNT-BT ceramic particles have been incorporated into Portland cement (PC) with ceramic particles content of 30-60 vol.% to form 0-3 connectivity pattern BNT-BT/PC composite. In addition, BNT-BT ceramic, and PC composites of 0-3 connectivity were produced using 50% BNT-BT by volume content. Portland cement was replaced by polyvinylidene fluoride (PVDF) at 1, 3, 5, and 7% by volume. The compressive strength, ferroelectric properties as well as electrical signal response of the composites were investigated. The compressive strength was found in the region of 28.19-35.30 MPa for these BNT-BT/PC composites is close to that of concrete. Moreover, Portland cement was replaced by polyvinylidene fluoride (PVDF) in composites show good connectivity by filling the pores at the interface region between

the piezoelectric ceramic phase and the cement phase. The compressive strength of these composites was found to be enhanced more clearly when the content of PVDF is more than 3 vol.%. In addition, lead-free piezoelectric ceramic/cement/PVDF composites with 0-3 connectivity show typical ferroelectric hysteresis loops at room temperature. The instantaneous remnant polarization (P_{ir}) at and applied external electrical field of 6 kV/cm, was found to increase as BNT-BT ceramic content increases, and that the highest value for P_{ir} of 22.36 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ was obtained for a BNT-BT content of 60 vol.%. Furthermore, the use of PVDF results in a lower P_{ir} value but a reduction in the lossy appearance of P-E loops is observed. For the electrical signal response of the lead-free BNT-BT/PC composites under frequency of 60 Hz were studied. The lead-free BNT-BT/PC composites exhibits good sensing response characteristics. Moreover, for the effect of PVDF on the electrical signal response of embedded BNT-BT/PC/PVDF in mortar under impact (200 g was released vertically at a height of 20 cm) increases significantly with an increase in PVDF content, however, background noise also increases with an increase in PVDF.

Keywords: Lead-free piezoelectric ceramics; Cement composites; Mechanical property; Ferroelectric property; Structural Health Monitoring

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

การพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้าง และการใช้โครงการสร้างคอนกรีตในงานโครงสร้างต่างๆ ในประเทศไทยเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตต่างๆ เหล่านี้ อาจได้รับความเสียหายระหว่างการใช้งานได้ ดังนั้นระบบตรวจสอบโครงสร้าง (structural health monitoring) ถือเป็นสิ่งจำเป็นที่จะสามารถใช้ในการประเมินค่าความปลอดภัย เพื่อป้องกันการเกิดความล้มเหลวของโครงสร้างอย่างฉับพลัน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของวัสดุผสมที่ผลิตจากวัสดุเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างตามเวลาจริง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าวัสดุผสมนี้มีสมบัติทางด้านไฟโอโซอิเล็กทริกที่ดี และค่าความต้านทางเชิงซ้อนของเสียง (acoustic impedance) มีค่าใกล้เคียงกับค่าของคอนกรีตที่เป็นวัสดุโครงสร้างหลัก ทำให้เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้เป็นโครงสร้างฉลาดที่สามารถทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์เพื่อตรวจสอบโครงสร้างนั้นอย่างทันทีทันใด แต่อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการผลิตวัสดุเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานจะมีไอระเหยของออกไซด์ของตะกั่วเกิดขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และมีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ได้ ดังนั้นการใช้เซรามิกไร้สารตะกั่วจึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาวัสดุผสมที่ผลิตจากวัสดุเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดใหม่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างตามเวลาจริง

อย่างไรก็ตามสมบัติไฟโอโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่สามารถเทียบเท่ากับสมบัติไฟโอโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งสมบัติไฟโอโซอิเล็กทริกของเฟสเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริก และความพรุนในวัสดุผสมเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติไฟโอโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม นอกจากนี้รูพรุนของเฟสเมทริกซ์ของซีเมนต์และรูพรุนระหว่างพื้นผิวรอยต่อของเฟสเซรามิกและเฟสซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในวัสดุผสมยังก่อให้เกิดการรั่วของกระแสไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทำขั้ว (poling) ของวัสดุผสมได้ ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการทำขั้วของวัสดุผสม (degree of poling) จึงได้มีนักวิจัยหลายๆ ท่านทำการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นโดยการเติมเฟสที่สามในวัสดุผสม พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) เป็นวัสดุหนึ่งที่ถูกนำมาเติมเป็นเฟสที่สามในวัสดุผสมเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และพบว่าการ

เติมพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ลงไปในวัสดุผสมสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของการทำขั้ว (poling) และลดค่าความพรุณภายในเมทริกซ์ของซีเมนต์ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มี การศึกษาสมบัติเชิงกล อาทิ ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมสามเฟสเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สาร ตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งในการพิจารณานำไป ประยุกต์ใช้งาน รวมไปถึงสมบัติเพโรอิเล็กทริก และการตอบสนอง และความไวของสัญญาณ เมื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน

ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเพโรอิเล็กทริก และสมรรถนะของวัสดุ ผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับ สภาพที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต ได้ทำการเตรียมวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สาร ตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยเริ่มจากการนำเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริก ไร้สารตะกั่ว $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNBT) คัดขนาดให้ขนาดเซรามิก BNT-BT มีค่า $\approx 300\text{-}600$ ไมครอน จากนั้นนำเม็ดเซรามิก BNT-BT (ขนาด $\approx 300\text{-}600$ ไมครอน) ใน ปริมาณ 30%, 40%, 50% และ 60% โดยปริมาตร ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงไปวัสดุ ผสม สำหรับการศึกษาผลของปริมาณ PVDF จะใช้ใช้ปริมาณของเซรามิก BNT-BT คงที่ที่ 50% โดยปริมาตร ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ PVDF 0%, 1%, 3%, 5% และ 7% โดยปริมาตร ต่อจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด ไฮดรอลิก ในแม่พิมพ์โลหะที่มี ลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 mm และอัดขึ้นรูปให้ ชิ้นงานมีความสูงประมาณ 20 mm แล้วนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 170°C แล้วนำไปทดสอบ ทดสอบค่ากำลังอัด สำหรับศึกษาสมบัติเพโรอิเล็กทริกของเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สาร ตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 จะมีวิธีการเตรียมวัสดุผสมเหมือนกับการ นำชิ้นงานไปทดสอบค่ากำลังอัด แต่ขนาดของชิ้นงานจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 mm ความสูงประมาณ 1.5 mm

สำหรับการการวัดสัญญาณการตอบสนองของวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สาร ตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ทำการเตรียมวัสดุผสมให้มีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางประมาณ 15 mm ความสูงประมาณ 1.5 mm แล้วทำการสร้างขั้วทางไฟฟ้าด้วยการ โพลด้วยสนามไฟฟ้า 1.5 kV/mm ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 45 นาที และวัดค่าสัมประสิทธิ์ ไพโอโซอิเล็กทริก (d_{33}) จากนั้นวัดสัญญาณการตอบสนองของวัสดุผสมโดยวัดสัญญาณที่ได้จาก

การติดตั้งงานวัสดุผสมบนเครื่องสั่นสะเทือนที่ความถี่ 60 Hz และทำการวัดสัญญาณการตอบสนองของวัสดุผสมเกิดขึ้นจากการนำตุ้มน้ำหนัก 200 g ปล่อยลงไปที่บนผิวชิ้นงานมอร์ตาร์ด้านที่ผิววัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ห่างจากผิว 1 cm ที่ความสูง 20 cm

ผลการทดลองค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 พบว่าค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเซรามิกลงไปวัสดุผสม การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดนี้อาจจะเนื่องมาจากเฟสเซรามิก BNT-BT มีค่ากำลังอัดสูงถึง 210 MPa และพบว่าค่ากำลังอัดของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PVDF และมีค่าสูงที่สุดเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย PVDF 5% โดยปริมาตร อาจจะเนื่องมาจากมีการกระจายตัวของเฟส PVDF ที่ช่วยในการอุดช่องว่างภายในเฟสซีเมนต์และระหว่างรอยต่อของเฟสซีเมนต์และเซรามิกได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น และค่ากำลังอัดของวัสดุผสมยังมีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างคอนกรีตพื้นฐานที่มีค่ากำลังอัดประมาณ 22.2-41.2 MPa สำหรับสมบัติเพโรอิเล็กทริกพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเซรามิก BNT-BT ในวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว BNT-BT/ซีเมนต์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ในวัสดุผสมจาก 30% โดยปริมาตร เป็น 60% โดยปริมาตร ทำให้ค่า Instantaneous remnant polarization P_r สูงขึ้นจาก $14.77 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ เป็น $22.36 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ PVDF ในวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว BNT-BT/ซีเมนต์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ทำให้วงวนฮิสเทอรีซิสเล็กลงและยังไม่พบความอิ่มตัวของวงวนฮิสเทอรีซิส อาจจะเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ให้แต่ละระบบยังไม่เพียงพอที่จะทำให้โดเมนมีสภาพการโพลาไรเซชันในทิศทางเดียวกันทั้งหมด

นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถวัดสัญญาณทางไฟฟ้าได้จากวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว BNT-BT/ซีเมนต์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 เมื่อติดบนติดบนเครื่องสั่นสะเทือนที่ความถี่ 60 Hz แต่ยังมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น เนื่องจากความไม่สมบูรณ์บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสซีเมนต์และเฟสเซรามิกในวัสดุผสม สำหรับสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการนำตุ้มน้ำหนัก 200 g ปล่อยลงไปที่บนผิวชิ้นงานมอร์ตาร์ด้านที่ผิววัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ห่างจากผิว 1 cm ที่ความสูง 20 cm พบว่ามีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นค่อนข้างมากเนื่องจากในมอร์ตาร์มีความไม่สมบูรณ์ของพื้นผิวรอยต่อระหว่างอนุภาคของทรายและเฟสซีเมนต์อยู่มาก ดังนั้นทำให้การส่งผ่านพลังงานเชิงกลไปเป็นสัญญาณเชิงไฟฟ้าไม่

Confidential/ เอกสารปกปิด ห้ามเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาต

เด่นชัด ดังนั้นจากการทดลองวัสดุผสมเซรามิกไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ชนิดใหม่นี้มีแนวโน้มที่จะสามารถพัฒนาศักยภาพต่อไปได้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเป็นตัวตรวจจับสภาพที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต

เนื้อหาทางวิจัย

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้าง และการใช้โครงการสร้างคอนกรีตในงานโครงสร้างต่างๆ เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เช่น ถนน สะพาน อาคาร สถานที่สำคัญต่างๆ ภายในประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตต่างๆ เหล่านี้อาจได้รับความเสียหายระหว่างการใช้งานได้ เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น ภัยธรรมชาติ หรือมักจะเกิดจากความผิดพลาดจากการออกแบบของช่างก่อสร้าง [1-3] ดังนั้นระบบตรวจสอบโครงสร้าง (structural health monitoring) ถือเป็นสิ่งจำเป็นที่จะสามารถใช้ในการประเมินค่าความปลอดภัย เพื่อป้องกันการเกิดความล้มเหลวของโครงสร้างอย่างฉับพลัน [1-11] ดังนั้นการพัฒนาและวิจัยเกี่ยวกับเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างตามเวลาจริงจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก [12-23]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของวัสดุผสมที่ผลิตจากวัสดุเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างตามเวลาจริง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าวัสดุผสมนี้มีสมบัติทางด้านไพโอโซอิเล็กทริกที่ดี และค่าความต้านทางเชิงซ้อนของเสียง (acoustic impedance) มีค่าใกล้เคียงกับค่าของคอนกรีตที่เป็นวัสดุโครงสร้างหลัก ทำให้เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้เป็นโครงสร้างฉลาดที่สามารถทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์เพื่อตรวจสอบโครงสร้างนั้นอย่างทันทีทันใด [12-23] แต่อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการผลิตวัสดุเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานจะมีไอระเหยของออกไซด์ของตะกั่วเกิดขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และมีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ได้ [24-26] ดังนั้นการใช้เซรามิกไร้สารตะกั่วจึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาวัสดุผสมที่ผลิตจากวัสดุเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดใหม่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างตามเวลาจริง

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของวัสดุเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [27-40] โดยใช้วัสดุเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว อาทิ แบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3) แบเรียมเซอร์โคเนตไทเทเนต ($\text{BaZr}_{0.05}\text{Ti}_{0.95}\text{O}_3$) แบเรียมแคลเซียมเซอร์โคเนตไทเทเนต ($\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_3$) และบิสมาลไทเดียมไทเทเนต ($\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$) เป็นต้น [27-34] ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเราสามารถปรับแต่งสมบัติของวัสดุ

ผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้มีสมบัติไพโอโซอิเล็กทริกที่ดีและค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนใกล้เคียงกับโครงสร้างของคอนกรีตให้เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างตามเวลาจริง แต่อย่างไรก็ตามสมบัติไพโอโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่สามารถเทียบเท่ากับสมบัติไพโอโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [13, 17, 27, 30, 35] ซึ่งสมบัติไพโอโซอิเล็กทริกของเฟสเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริก และความพรุนในวัสดุผสมเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติไพโอโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม [13, 17, 27, 30, 35] นอกจากนี้รูพรุนของเฟสเมทริกซ์ของซีเมนต์และรูพรุนระหว่างพื้นผิวรอยต่อของเฟสเซรามิกและเฟสซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในวัสดุผสมยังก่อให้เกิดการรั่วของกระแสไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทำขั้ว (poling) ของวัสดุผสมได้ ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการทำขั้วของวัสดุผสม (degree of poling) [13, 17, 27, 30, 35] เมื่อไม่นานมานี้ได้มีนักวิจัยหลายๆท่านทำการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นโดยการเติมเฟสที่สามในวัสดุผสม [36-46] พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) เป็นวัสดุหนึ่งที่ถูกนำมาเติมเป็นเฟสที่สามในวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และพบว่าการเติมพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ลงไปในวัสดุผสมสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของการทำขั้ว (poling) และลดค่าความพรุนภายในเมทริกซ์ของซีเมนต์ [36-46] แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาสมบัติเชิงกล อาทิ ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมสามเฟสเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งในการพิจารณานำไปประยุกต์ใช้งาน รวมไปถึงสมบัติเพียโรอิเล็กทริก และการตอบสนอง และความไวของสัญญาณเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเพียโรอิเล็กทริก และสมรรถนะของวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสภาพที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อพัฒนาและศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเพโรอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิก-พอลิไอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF

2.2 เพื่อศึกษาสมรรถนะเช่น การตอบสนอง และความไว ของวัสดุผสมเซรามิก-พอลิไอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสภาพที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต

2.3 เพื่อผลิตผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ซึ่งบทความทางวิชาการในวารสารที่เป็นที่ยอมรับ และมี impact factor สามารถนำไปอ้างอิงเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อนักวิจัยและผู้สนใจศึกษาต่อไปได้

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 วัสดุผสมเซรามิก-พอลิไอโซอิเล็กทริก-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

วัสดุผสมเซรามิก-พอลิไอโซอิเล็กทริก-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่มีการใช้เซรามิกที่มีตะกั่วเป็นฐานนั้นได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างกว้างขวางเพื่อใช้ในการพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสภาพที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต [1-4] เนื่องจากวัสดุผสมที่ประดิษฐ์ขึ้นมีความเข้ากันได้กับโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากมีค่าความต้านทานของเสียงเชิงซ้อน (acoustic impedance) ใกล้เคียงกับคอนกรีต ($\approx 9.0 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ [12]) อีกทั้งยังมีสมบัติไดอิเล็กทริกและพอลิไอโซอิเล็กทริกที่ดีอีกด้วย [12, 17, 47, 48]

ในปี ค.ศ. 2002 Z. Li และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาวัสดุผสมที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 พอลิไอโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์ โดยศึกษาถึงขนาดของผงเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตที่มีต่อค่าความต้านทานเชิงซ้อน ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์ความเครียด พอลิไอโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมระหว่างพอลิไอโซอิเล็กทริกกับปูนซีเมนต์ ซึ่งในการศึกษาสมบัติของวัสดุเบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 3.1 พบว่าเซรามิกพอลิไอโซอิเล็กทริก หรือซีเมนต์เฟสเดี่ยวเพียงอย่างเดียวไม่สามารถให้ค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อน (acoustic impedance) ได้ใกล้เคียง

กับค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุโครงสร้างหลักได้ แต่เมื่อพิจารณาในเชิงทฤษฎี วัสดุผสมระหว่างเซรามิกไฟอโซอิเล็กทริกกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถปรับแต่งคุณสมบัติให้มีค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนใกล้เคียงกับคอนกรีตได้ โดยพิจารณาจากสมการที่ (3.1)

$$Z_c = \rho_c V_c = (\rho_c E_c)^{1/2} \quad (3.1)$$

เมื่อ Z_c คือ ค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสม ρ_c คือค่าความหนาแน่นของวัสดุผสม V_c คือความเร็วเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสม และ E_c คือค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุผสม ซึ่งค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมสามารถหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$\rho_c = v_1 \rho_1 + v_2 \rho_2 \quad (3.2)$$

โดย v_1 และ v_2 เป็นร้อยละโดยปริมาตรของเฟสเซรามิก และเฟสซีเมนต์ ตามลำดับ และ ρ_1 และ ρ_2 เป็นค่าความหนาแน่นของเฟสเซรามิกและเฟสซีเมนต์ นอกจากนี้ค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุผสม (E_c) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.3)

$$E_c = \frac{1}{(v_1/E_1) + (v_2/E_2)} \quad (3.3)$$

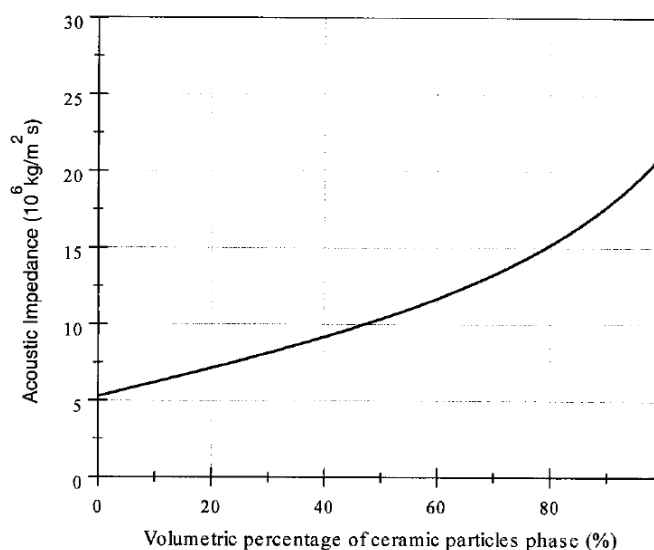
เมื่อ E_1 และ E_2 คือค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของเฟสเซรามิกและเฟสซีเมนต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ยังสามารถหาค่าความเร็วเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมได้จากสมการที่ (3.4)

$$V_c = \left(\frac{E_c}{\rho_c} \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมระหว่างเซรามิกไฟอโซอิเล็กทริกกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถปรับแต่งให้มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าในเชิงทฤษฎีวัสดุผสมระหว่างเซรามิกไฟอโซอิเล็กทริกกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีปริมาณของอนุภาคเซรามิกที่ ~40%-50% โดยปริมาตร เป็นช่วงที่มีค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนใกล้เคียงกับคอนกรีตมากที่สุด

ตารางที่ 3.1 สมบัติต่างๆของเซรามิก PZT ปูน ซีเมนต์ และคอนกรีต [12]

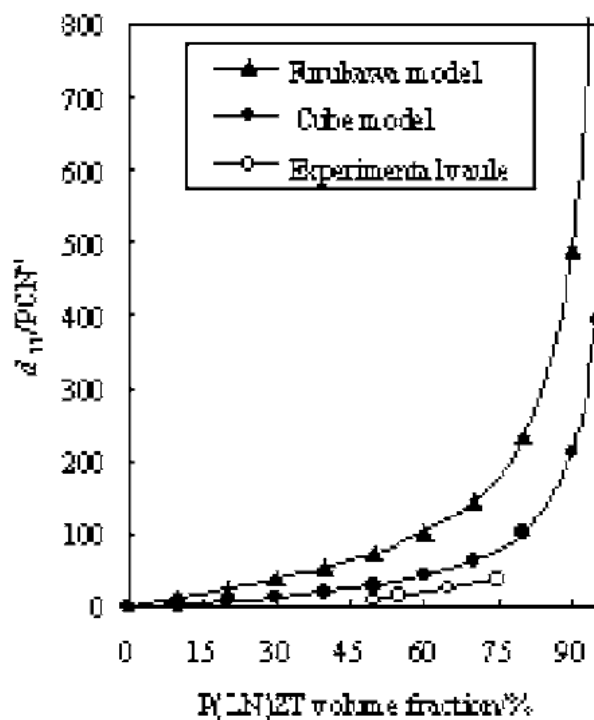
	PZT Ceramic	Cement Paste	Concrete
Piezoelectric strain factor, 10^{-12} C/N	513	-	-
Dielectric constant	3643	56	-
Electromechanical coupling Coefficient, %	67	-	-
Density, 10^3 kg/m ³	7.5	~2.0	~2.4
Acoustic velocity, 10^3 m/s	2.83	~2.64	~3.73
Acoustic impedance, 10^6 kg/m ² s	21.2	~5.3	~9.0



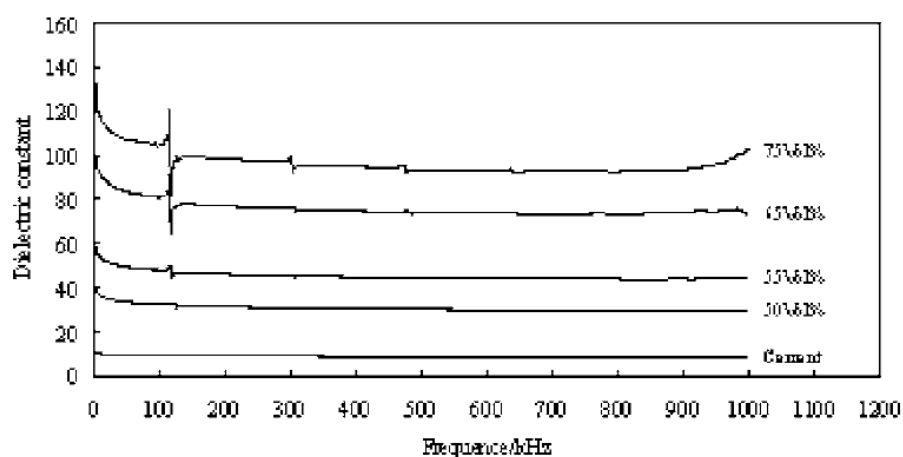
รูปที่ 3.1 ค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 เทียบกับร้อยละโดยปริมาตรของเฟสเซรามิก [12]

ปี ค.ศ. 2007 C. Xin และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาสมบัติไพโซอิเล็กทริก ไดอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิก $0.08\text{Pb}(\text{Li}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3 \cdot 0.47\text{PbTiO}_3 \cdot 0.45\text{PbZrO}_3$

(P(LN)ZT กับซัลโฟลูมิเนตซีเมนต์ที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสมบัติโพธิ์โซอิเล็กทริก และสมบัติไดอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้น เมื่อมีปริมาณเซรามิกในวัสดุผสมเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3

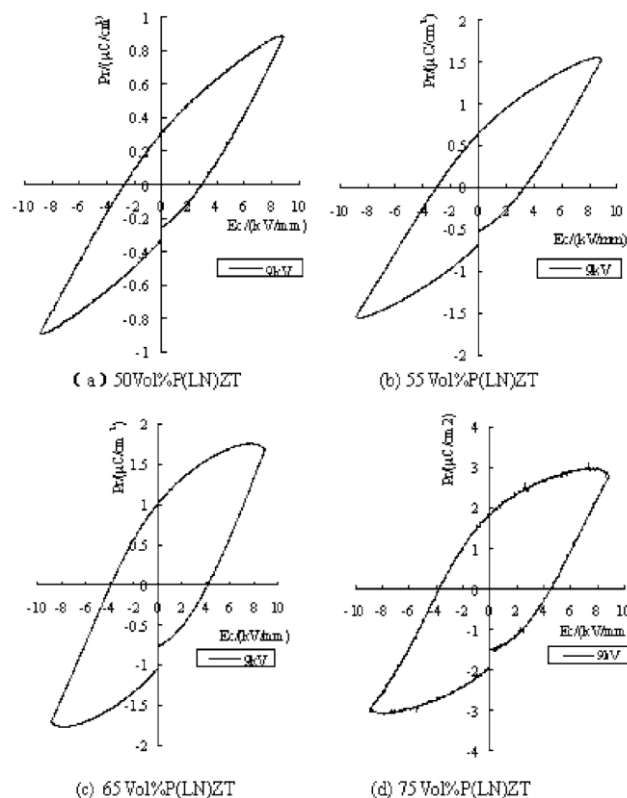


รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โพธิ์โซอิเล็กทริก และปริมาณเซรามิกในวัสดุผสม [17]



รูปที่ 3.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมและซีเมนต์ที่มีความถี่ต่างๆ [17]

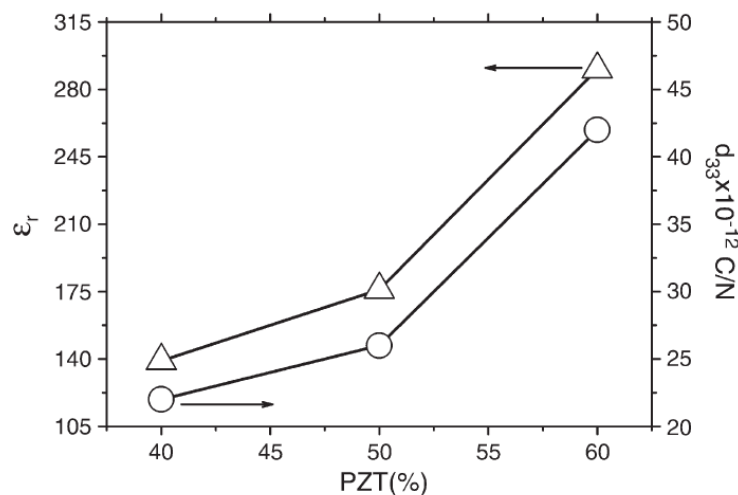
นอกจากนี้ C. Xin และคณะ [17] ยังได้ศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุผสมนี้ พบว่าวัสดุผสมแสดงสมบัติอิเล็กทริกดังรูปที่ 3.4 และพบว่าปริมาณของเซรามิก $0.08\text{Pb}(\text{Li}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3 \cdot 0.47\text{PbTiO}_3 \cdot 0.45\text{PbZrO}_3$ มีอิทธิพลต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยเมื่อมีปริมาณของเซรามิกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ (remanent polarization, P_r) และสนามไฟฟ้าคงค้าง (coercive field, E_c) เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเซรามิกจาก 50% เป็น 75% โดยปริมาตร ทำให้ค่าโพลาริเซชันคงเหลือเพิ่มขึ้นจาก 0.42 เป็น $1.85 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และค่าสนามไฟฟ้าคงค้างเพิ่มขึ้นจาก 3.31 เป็น $4.50 \text{ kV}/\text{mm}$ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผล 2 ประการคือ เนื่องจากเซรามิก $0.08\text{Pb}(\text{Li}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3 \cdot 0.47\text{PbTiO}_3 \cdot 0.45\text{PbZrO}_3$ มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเซรามิกในวัสดุผสมมากขึ้นจึงแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกชัดเจนมากขึ้น เหตุผลอีกประการหนึ่งคือ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณเซรามิกในวัสดุผสมจะทำให้สนามไฟฟ้าที่ไปกระทำต่ออนุภาคของเซรามิกโดยตรงเพิ่มมากขึ้นด้วยจึงส่งผลให้สนามไฟฟ้าคงค้างมีค่าเพิ่มสูงขึ้นสังเกตได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงวนฮีสเทอรีซิสของวัสดุผสมแบบ 0-3 เซรามิก (P(LN)ZT กับซัลโฟลูมินาตซีเมนต์

(a) 50 Vol% (P(LN)ZT (b) 55 Vol% (P(LN)ZT (c) 65 Vol% (P(LN)ZT และ (d) 75 Vol% (P(LN)ZT [17]

ปี ค.ศ. 2007 A. Chaipanich และคณะ [47] ได้ทำการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก และไพโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเลเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT)-ปูนซีเมนต์ ที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยใช้ปริมาณของ PZT ที่ 40%, 50% และ 60% โดยปริมาตร โดยศึกษาถึงอิทธิพลของ PZT ต่อสมบัติไดอิเล็กทริก และไพโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม ซึ่งพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ PZT ดังรูปที่ 3.5 หลังจากการนำชิ้นงานผ่านการทำขั้วที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที และใช้สนามไฟฟ้า 2 kV/mm หลังจากนั้นทำการวัดค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม (แสดงดังรูปที่ 3.5) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณเซรามิก PZT (d_{33} ของวัสดุผสมที่มีปริมาณ PZT 40% = 22 pC/N และ d_{33} ของวัสดุผสมที่มีปริมาณ 60% = 42 pC/N) ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการทดลองสรุปดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.5 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และ d_{33} ของวัสดุผสม PZT-OPC [47]

ตารางที่ 3.2 ตารางสรุปสมบัติไดอิเล็กทริกและไพโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม PZT-OPC [47]

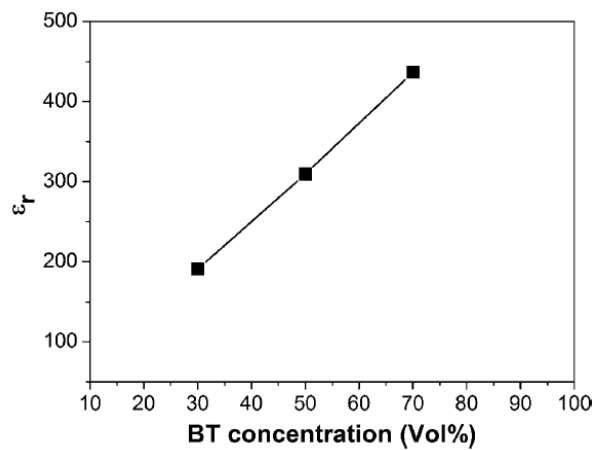
Mix	PZT, %	ϵ_r	$\tan\delta$	d_{33} , pC/N
PZT40	40	139	0.95	22
PZT50	50	176	0.79	26
PZT60	60	290	0.75	42

แต่อย่างไรก็ตามเซรามิกไพโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานมีส่วนประกอบของเลดออกไซด์ (lead oxide) ที่สามารถระเหยและเจือปนออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกระหว่างกระบวนการเผาแคลไซน์ และกระบวนการซินเตอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ [24-25] ด้วยเหตุนี้งานวิจัยเกี่ยวกับการนำเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วมาทดแทนจึงเป็นที่สนใจที่จะศึกษาในปัจจุบัน [24-25]

3.2 วัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในระบบที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยใช้เซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว อาทิ แบเรียมไทเทเนต (barium titanate; BT) แบเรียมเซอร์โคเนตไทเทเนต (barium zirconate titanate; BZT) และ $\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_3$ (BCTZO) ทดแทนเซรามิกไพโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐาน [27-31, 33, 49-51] ซึ่งการขึ้นรูปวัสดุผสมในวัสดุผสมในระบบที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 มีขั้นตอนของการขึ้นรูปที่ง่าย [52-53] และจากผลการศึกษาพบว่าวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในระบบที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 มีสมบัติไพโซอิเล็กทริกที่ดีและสามารถเข้ากันได้กับโครงสร้างคอนกรีต (การขยายตัวทางความร้อนและค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนใกล้เคียงกับโครงสร้างคอนกรีต) [27-31, 33, 49-51]

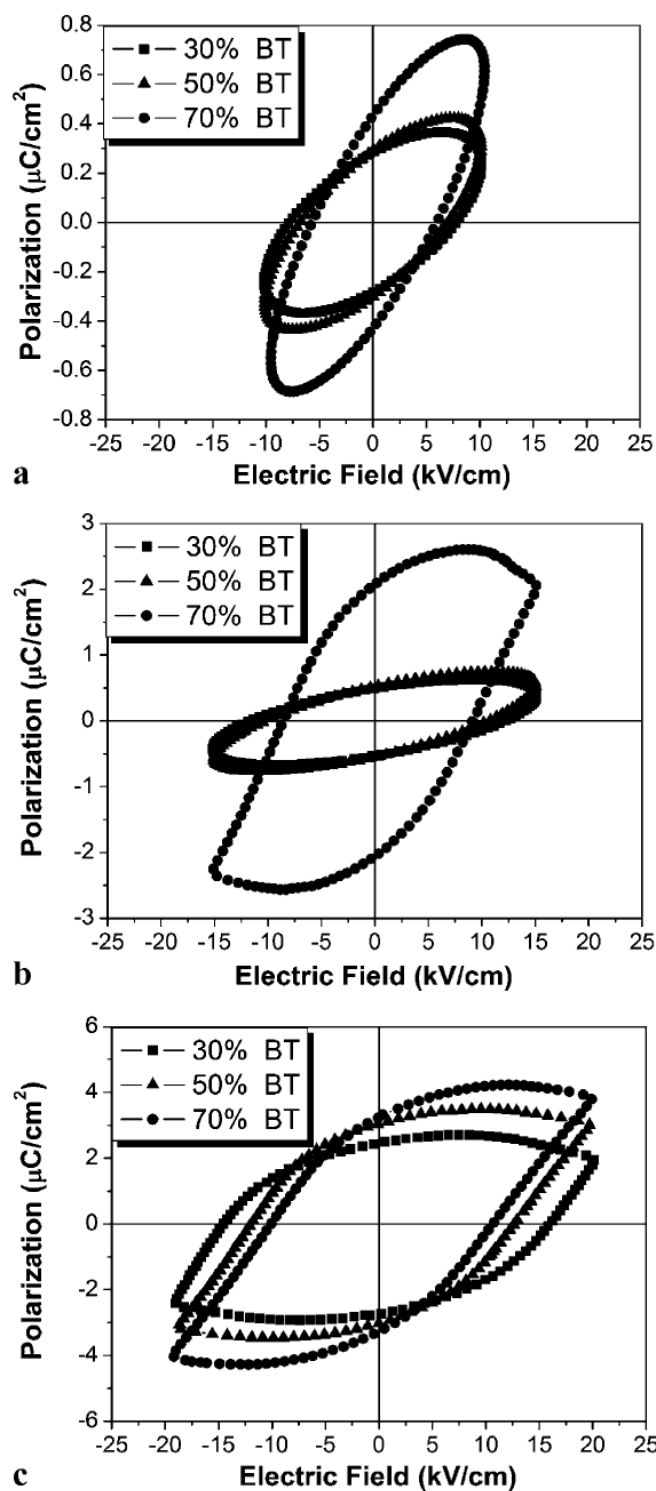
ในปี ค.ศ. 2011 และ 2016 R. Rianyo และคณะ [27, 49] ได้ทำการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริก และไพโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบเรียบไทเทเนต-ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ที่การจัดเรียงตัวแบบ 0-3 พบว่าสมบัติไดอิเล็กทริกและไพโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเซรามิกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกับวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐาน-ซีเมนต์ [12, 47, 48] ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.3 แต่วัสดุผสมแบบเรียบไทเทเนต-ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ที่การจัดเรียงตัวแบบ 0-3 มีค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐาน-ซีเมนต์ ที่ปริมาณเซรามิกเท่ากัน นอกจากนี้เมื่อมีปริมาณของเซรามิกแบบเรียบไทเทเนตในวัสดุผสมยังส่งผลให้วัสดุผสมมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ชัดเจนขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 อิทธิพลของปริมาณเซรามิกแบบเรียบไทเทเนตต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ที่ความถี่ 1 kHz ของวัสดุผสม BT-PC [27]

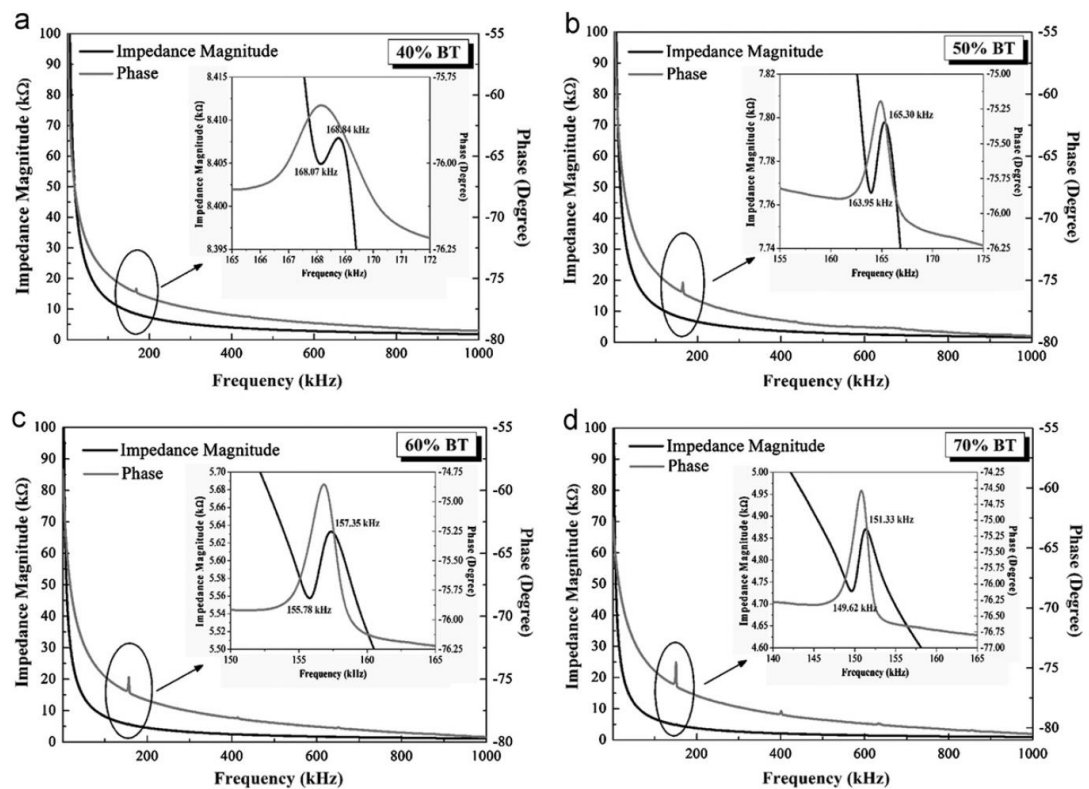
ตารางที่ 3.3 สมบัติของวัสดุผสม BT-PC [27]

BT (vol%)	ϵ_r (1 kHz)	$\tan\delta$ (1 kHz)	P_{ir} at 20 kV/cm ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	E_{ic} at 20 kV/cm (kV/cm)	d_{33} , pC/N
30 [27]	190	1.13	2.59	16.52	-
40 [49]	236	0.84	4.16	≈ 14.50	7
50 [27]	309	0.69	3.21	13.28	10
70 [27]	436	0.3	3.42	11.14	16



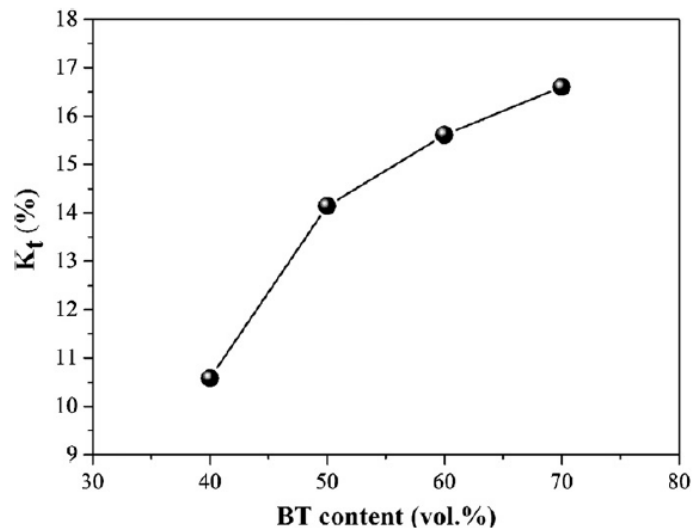
รูปที่ 3.7 อิทธิพลของปริมาณเซรามิกแบเรียมไทเทเนตต่อวงวนฮิสเทอรีซิสของวัสดุผสมแบบ 0-3 BT-PC (ความถี่ 90 Hz) ที่สนามไฟฟ้าภายนอก (a) 10 kV/cm (b) 15 kV/cm และ (c) 20 kV/cm [27]

นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 2013 R. Rianyoi และคณะ [30] ยังพบว่าปริมาณของเซรามิกแบบเรียมไทเทเนตมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์ไฟฟ้าคู่ควบเชิงกล (K_t) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 โดยค่าสัมประสิทธิ์ไฟฟ้าคู่ควบเชิงกลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเซรามิกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแสดงสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกตามเฟสของเซรามิกที่เพิ่มขึ้น และ R. Rianyoi และคณะยังพบว่าค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมระหว่างเซรามิกแบบเรียมไทเทเนตและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถปรับแต่งให้มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าวัสดุผสมระหว่างเซรามิกแบบเรียมไทเทเนตกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีปริมาณของเซรามิกที่ ~40%-60% โดยปริมาตร เป็นช่วงที่มีค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนใกล้เคียงกับคอนกรีตมากที่สุด

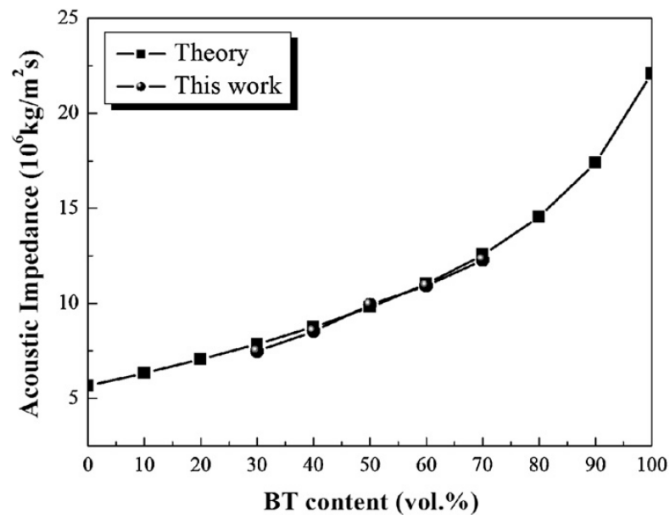


รูปที่ 3.8 ค่าอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของวัสดุผสมแบบ 0-3 BT-PC ที่ปริมาณเซรามิก BT

(a) 40 vol% (b) 50 vol% และ (c) 70 vol% [30]



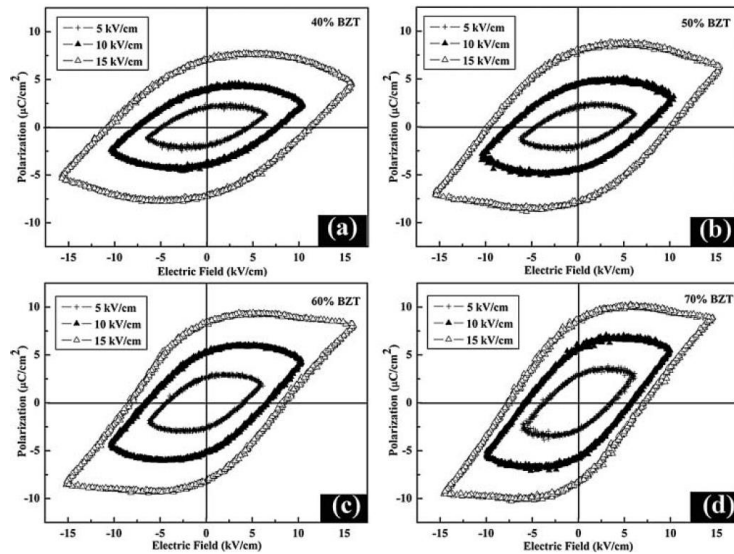
รูปที่ 3.9 ผลของเซรามิก BT ต่อค่า K_t ของวัสดุผสมแบบ 0-3 BT-PC [30]



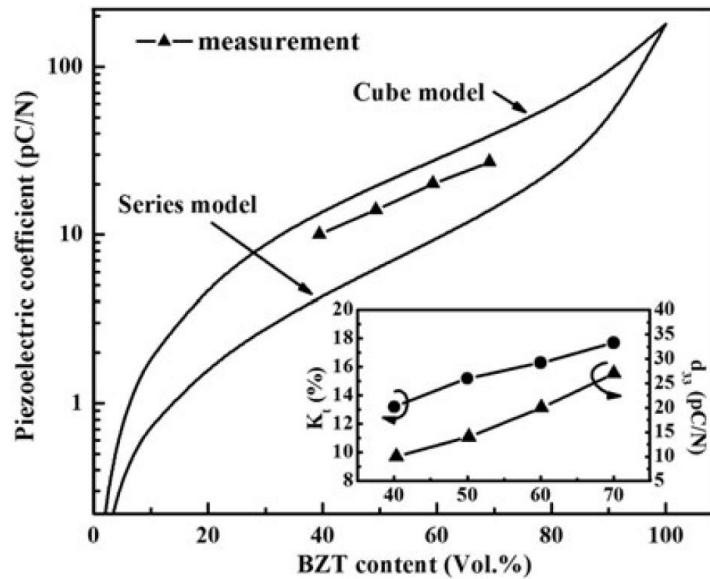
รูปที่ 3.10 ผลของเซรามิก BT ต่อค่า ค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมแบบ 0-3 BT-PC [30]

เนื่องจากเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในระบบที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยใช้เซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วเป็นแบเรียมไทเทเนต ยังมีสมบัติไพโซอิเล็กทริกที่ต่ำกว่าเซรามิกไพโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐาน-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต่อมา R. Potong และคณะ [28-29, 31] จึงได้มีการพัฒนาเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในระบบที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยใช้เซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วเป็นแบเรียมเซอร์โคเนตไทเทเนต (BZT) โดยจากการทดลองพบว่าสมบัติไพโซอิเล็กทริกและเพโรอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกแบเรียมเซอร์โคเนต

ไทเทเนต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีค่าสูงกว่าวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกแบบเรียบไทเทเนต -ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12



รูปที่ 3.11 วงวนฮิสเทอรีซิสของวัสดุผสมแบบ 0-3 BZT-PC ที่สนามไฟฟ้าภายนอกต่างๆ และที่ปริมาณ BZT (a) 40%BZT (b) 50%BZT และ (c) 60%BZT และ 70%BZT [29]



รูปที่ 3.12 ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกเทียบกับโมเดลของวัสดุผสม 0-3 BZT-PC [31]

นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 2014 S. Hunpratub และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุผสม $\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_3$ (BCTZO)-ซีเมนต์ ซึ่งการทดลองพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเซรามิกที่เพิ่มขึ้นแสดงดังตารางที่ ซึ่งผล

การทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ R. Rianyo [27, 49] และคณะ R. Potong [28, 31]

ตารางที่ 3.4 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก, $\tan\delta$ และค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม BCTZO-ซีเมนต์ ที่มีขนาดอนุภาคเซรามิกเฉลี่ย 569.8 μm และ 8.9 μm โดยทำการวัดสมบัติที่อุณหภูมิห้อง [33]

BCTZO content (vol%)	Dielectric constant at 1 kHz		$\tan\delta$ at 1 kHz		d_{33} (pC/N)	
	569.8 μm	8.9 μm	569.8 μm	8.9 μm	569.8 μm	8.9 μm
30	46.1	38.7	0.12	0.11	4	10
50	80.7	64.1	0.10	0.12	18	32
70	154.0	107.0	0.11	0.09	44	52

แต่อย่างไรก็ตามวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้เซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วในกลุ่มที่มีแบเรียมไทเทเนตเป็นฐานมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ไพโซอิเล็กทริกต่ำ (g) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ไพโซอิเล็กทริกบ่งชี้ถึงความสามารถในการตอบสนองของวัสดุที่สามารถสร้างความต่างศักย์ในการตอบสนองต่อความเค้นเชิงกลได้มากน้อยเพียงใด ดังนั้นจึงมีการศึกษาการศึกษาและพัฒนาสมบัติเซรามิก ไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว อาทิ $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ (BNT) ซึ่งมีค่าโพลาไรเซชันคงค้าง (P_r) = 38 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ และมีค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ไพโซอิเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์คู่อุปสรรคไฟฟ้าเชิงกลที่สูงซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปใช้การประยุกต์ใช้งานเป็นเซ็นเซอร์ (sensor) ได้มากกว่า [54-55]

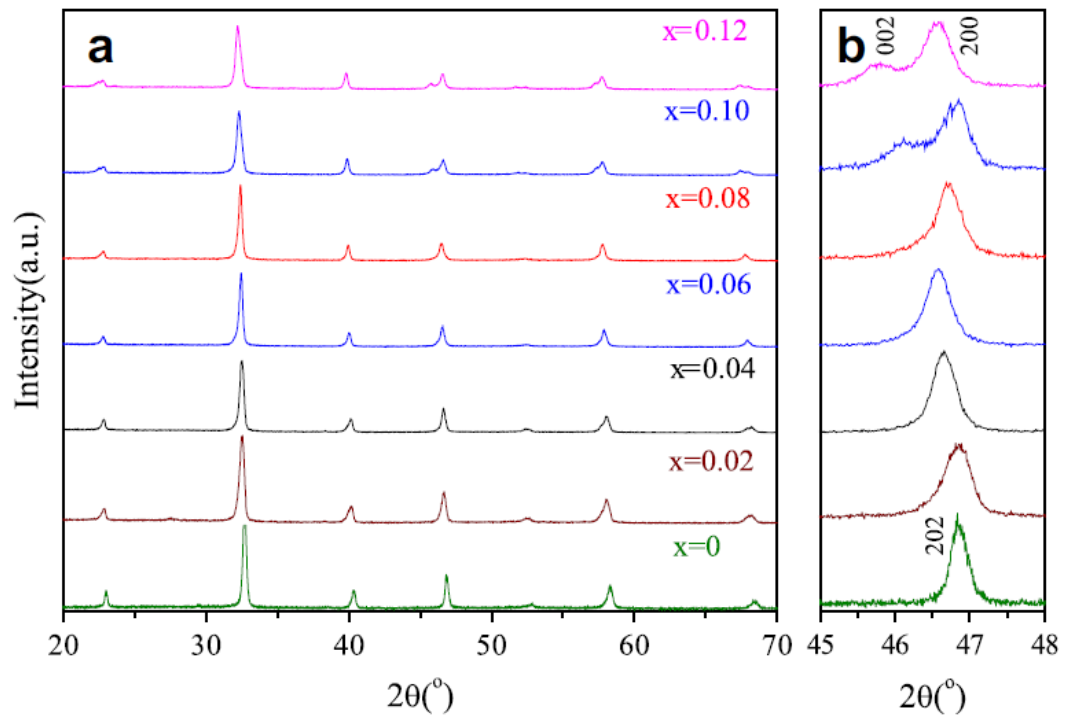
อย่างไรก็ตามเซรามิกไพโซอิเล็กทริก BNT มีการรั่วของกระแสระหว่างกระบวนการทำขั้ว (poling) ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง (coercive field) สูงถึง 7.3 MV/m และมีค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วชนิดอื่น [54-56] ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเซรามิกไพโซอิเล็กทริก $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 (BNT-BT) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านไพโซอิเล็กทริก [24-25, 57] ซึ่ง

$\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ ที่ถูกเจือด้วย BaTiO_3 มีผลทำให้ค่าสนามไฟฟ้าหักล้างลดลง ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริกสูงขึ้น และมีค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ ไพเอโซอิเล็กทริกที่สูงอีกด้วย

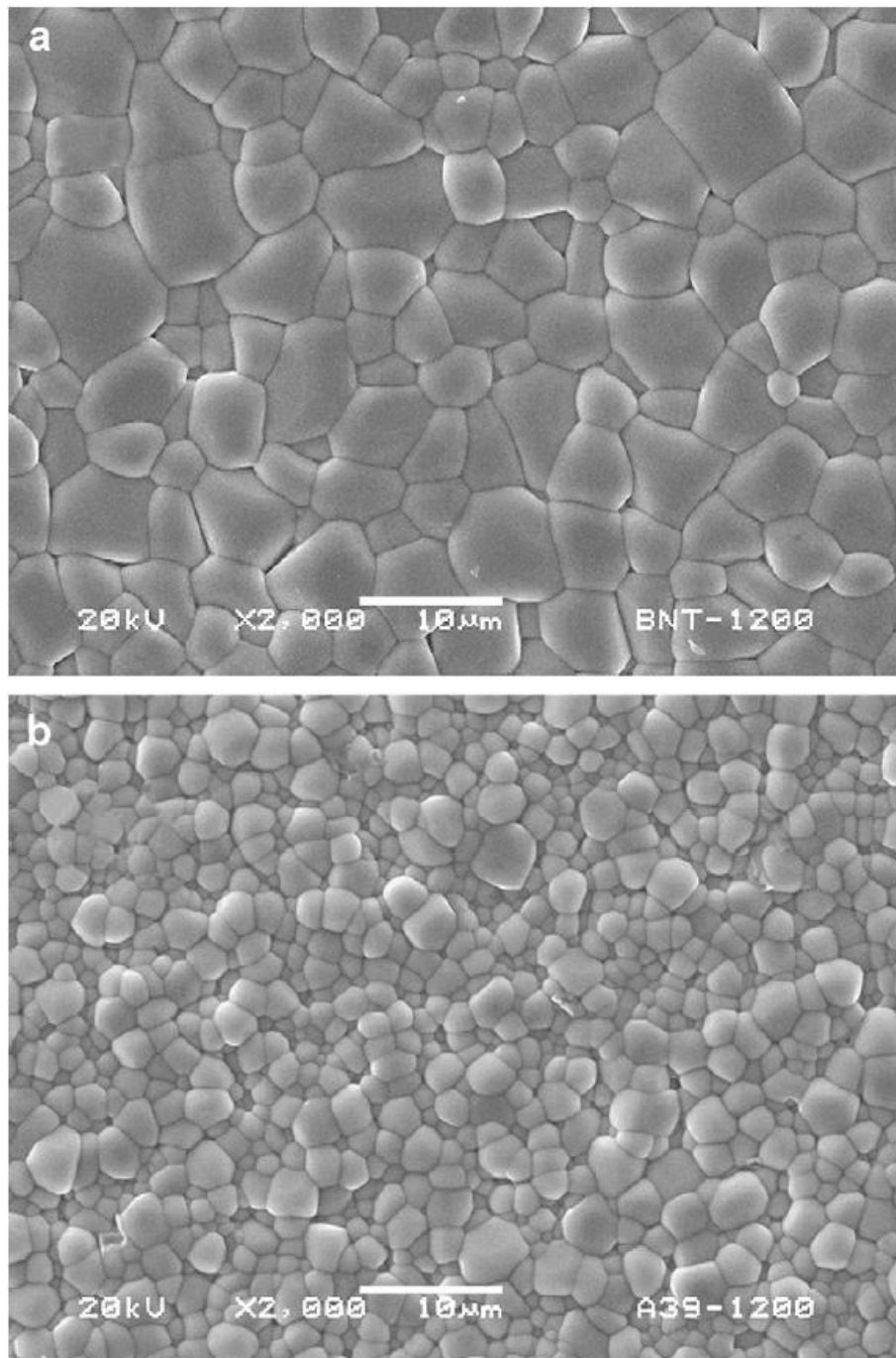
ในปี ค.ศ. 2008 C. Xu และคณะ [58] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก $(1-x)\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-x\text{BaTiO}_3$ (BNBT) โดย $0.06 < x < 0.12$ ซึ่งจากการศึกษาพฤติกรรมการเกิดเฟสซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงให้เห็นว่า $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ ที่ถูกเติมด้วย BaTiO_3 ในปริมาณที่ x น้อยกว่า 0.06 เซรามิกมีโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์แบบ rhombohedral เมื่อเพิ่มปริมาณของ BaTiO_3 มากขึ้นโครงสร้างของสารจะปรากฏโครงสร้างแบบ tetragonal และที่ $x \geq 0.10$ เซรามิกจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแบบ tetragonal ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม BaTiO_3 ในช่วง $0.06 < x < 0.10$ ทำให้เซรามิกมีโครงสร้างแบบ rhombohedral และ tetragonal ทั้งสองแบบปนอยู่ด้วยกันคือมีทั้ง ซึ่งก็คือบริเวณบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส (MPB)

นอกจากนี้ C. Xu และคณะ [58] ยังได้มีการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของ $(1-x)\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-x\text{BaTiO}_3$ (BNBT) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ $x = 0$ และ $x = 0.06$ ซึ่งทั้งคู่มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูง >97% อย่างไรก็ตามยังพบว่าเมื่อมีการเติม BaTiO_3 ร้อยละ 6 โดยโมล ทำให้ขนาดเกรนลดลงอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในรูปที่ 3.14 สำหรับสมบัติไดอิเล็กทริกและไพเอโซอิเล็กทริกของ $(1-x)\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-x\text{BaTiO}_3$ (BNBT) แสดงดังรูปที่ 3.15 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ไพเอโซอิเล็กทริก (d_{33}) และค่าสัมประสิทธิ์คู่วางเชิงไฟฟ้า (k_p) ที่ $x = 0.06$ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 120 pC/N และ 36.7 % ตามลำดับ แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant; ϵ_r) และค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss; $\tan\delta$) นั้น มีค่ามากที่สุดที่ $x = 0.08$ ($\epsilon_r = 1099$ และ $\tan\delta = 3.30\%$)

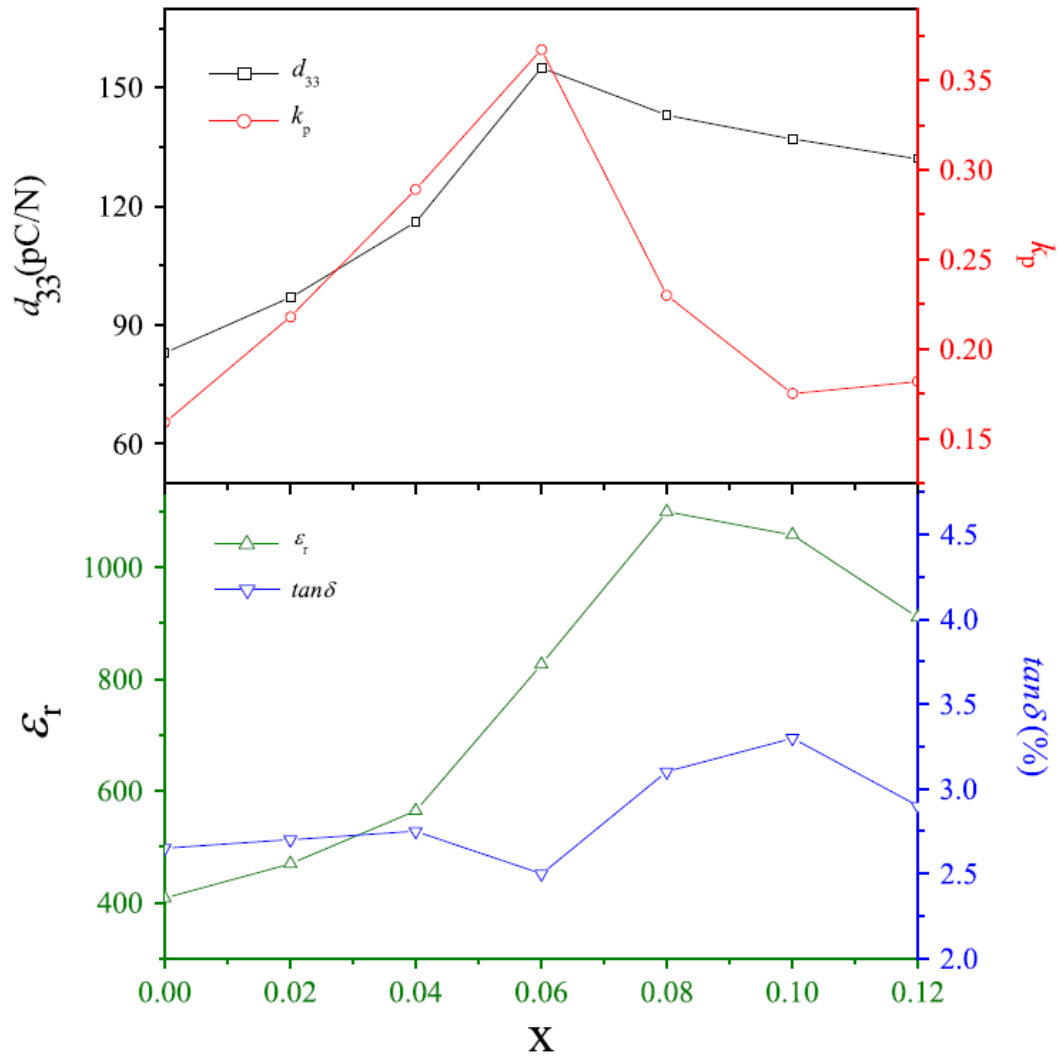
อีกทั้งเซรามิกไพเอโซอิเล็กทริก BNT-BT ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดี (ค่ากำลังอัด = 210 MPa [59]) [24-25, 57, 59]



รูปที่ 3.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก $(1-x)\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-x\text{BaTiO}_3$ (BNBT) [58]



รูปที่ 3.14 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของ $(1-x)\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-x\text{BaTiO}_3$ (BNBT) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ (a) $x = 0$ และ (b) $x = 0.06$ [58]



รูปที่ 3.15 สมบัติไดอิเล็กทริกและไพโซอิเล็กทริกของ $(1-x)\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-x\text{BaTiO}_3$ (BNBT)

(a) ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (d_{33}) และค่าสัมประสิทธิ์คู่ความแข็งไฟฟ้า (k_p)

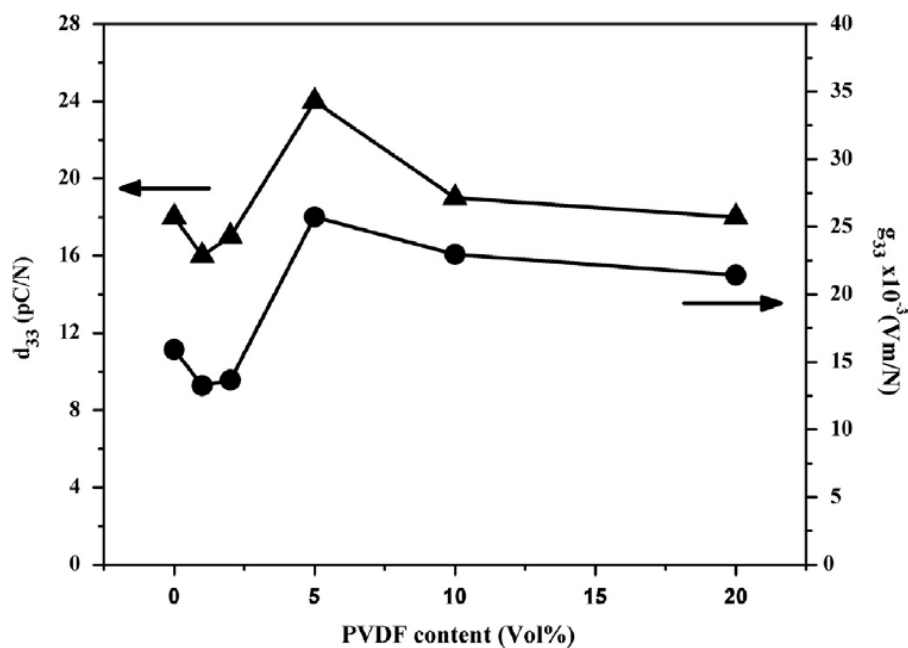
และ (b) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant; ϵ_r) และค่าตัวประกอบการสูญเสีย

ไดอิเล็กทริก (dielectric loss; $\tan\delta$) [58]

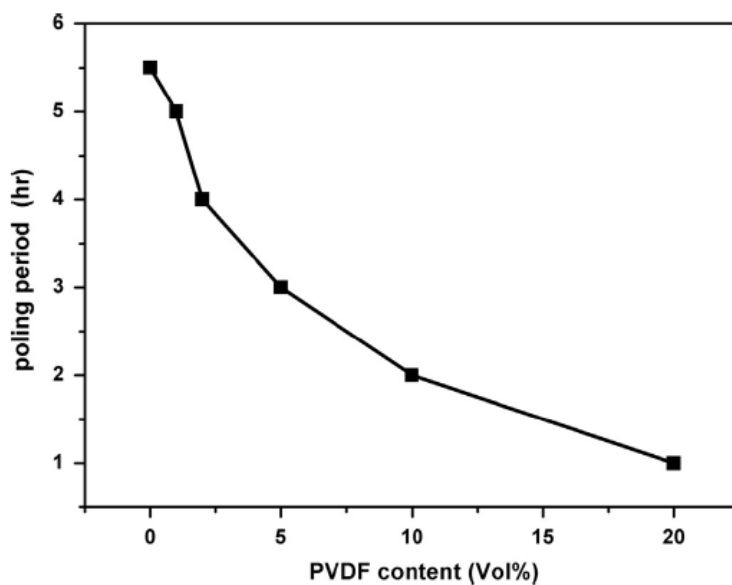
3.3 วัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริก-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์

นอกจากนี้รูปทรงของเฟสเมทริกซ์ของซีเมนต์และรูปทรงระหว่างพื้นผิวรอยต่อของเฟสเซรามิกและเฟสซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในวัสดุผสมยังก่อให้เกิดการรั่วของกระแสไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทำขั้ว (poling) ของวัสดุผสมได้ ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการทำขั้วของวัสดุผสม (degree of poling) [27, 30] เมื่อไม่นานมานี้ได้มีนักวิจัยหลายๆ ท่านทำการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นโดยการเติมเฟสที่สามในวัสดุผสม [60-61] โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) เป็นวัสดุหนึ่งที่ถูกนำมาเติมเป็นเฟสที่สามในวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และพบว่าการเติมโพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ลงไปในวัสดุผสมสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของการทำขั้ว (poling) และลดค่าความพรุนภายในเมทริกซ์ของซีเมนต์ [60-61]

ในปี ค.ศ. 2014 Jaitanong N. และคณะ [35] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของโพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ต่อสมบัติไพโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 เซรามิก PZT-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-PVDF ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเติม PVDF เป็นเฟสที่ 3 ในวัสดุผสมสามารถปรับปรุงสมบัติไพโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม โดยวัสดุผสมที่มีปริมาณเซรามิก PZT ร้อยละ 50 โดยปริมาตร และที่การเติม PVDF ร้อยละ 5 โดยปริมาตรมีค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก และสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ไพโซอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเป็น 24 pC/N และ 25.7×10^{-3} Vm/N ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีปริมาณของ PVDF ในวัสดุผสมมากขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาของกระบวนการทำขั้วน้อยลงเมื่อสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทำขั้วเท่ากับ 1 kV/mm เนื่องจากเมื่อมีการเติม PVDF ในวัสดุผสมช่วยให้รูปทรงระหว่างผิวปูนซีเมนต์และเซรามิกรวมไปถึงน้ำภายในเฟสปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของการทำขั้วของวัสดุผสมแบบ 0-3 เซรามิก PZT-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-PVDF ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 ค่าสัมประสิทธิ์ไพเอโซอิเล็กทริก และสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ไพเอโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 เซรามิก PZT-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-PVDF เทียบกับปริมาณของเซรามิก PVDF ในวัสดุผสม [35]

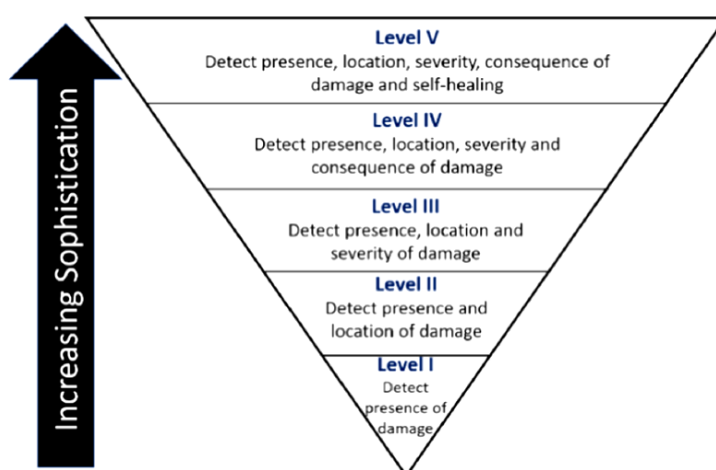


รูปที่ 3.17 ระยะเวลาที่ใช้ในการทำขั้ว (poling period) ของวัสดุผสมแบบ 0-3 เซรามิก PZT-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-PVDF [35]

3.4 เซนเซอร์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสภาพในโครงสร้างคอนกรีต

การตรวจสอบสภาพของโครงสร้างคอนกรีต (Structural health monitoring, SHM) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการแยกแยะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของคอนกรีต [62] ซึ่งปัจจุบันกระบวนการวิธีในการตรวจสอบสามารถทำได้โดยการตรวจสอบหรือประเมินสภาพตามช่วงเวลาที่ได้กำหนดไว้โดยการว่าจ้างผู้เชี่ยวชาญเข้ามาตรวจสอบ ซึ่งค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบแต่ละครั้งค่อนข้างสูง ด้วยเหตุนี้การพัฒนาเซนเซอร์สำหรับใช้ในการตรวจสอบสภาพโครงสร้างคอนกรีตโดยให้มีการประมวลผลตามเวลาจริงและอาศัยเทคโนโลยีการสื่อสารประกอบการส่งสัญญาณจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นอย่างมาก [63-66]

เทคโนโลยีสำหรับการประเมินหรือการตรวจสอบสภาพของโครงสร้างคอนกรีต (Structural health monitoring, SHM) สามารถแบ่งออกเป็น 5 ระดับขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและระดับความซับซ้อนดังแสดงในรูปที่ 3.18 [67, 68] การประเมินสภาพโดยการทดสอบแบบไม่ทำลายมีหลากหลายวิธี ประกอบไปด้วย ultrasonic inspection [69] ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจสอบความเสียหาย เช่น รอยแตก และสามารถจำแนกได้เป็นระดับ I หรือ II [67, 70] สำหรับเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบความเสียหายอื่นๆ สามารถจำแนกได้ไปจนถึงระดับ II ถึงระดับ V ขึ้นอยู่กับหลักการการทำงาน สำหรับประเมินหรือการตรวจสอบสภาพของโครงสร้างคอนกรีต (Structural health monitoring, SHM) โดยใช้วัสดุผสมที่เป็นวัสดุฉลาดสามารถจำแนกให้อยู่ในระดับ IV และ V



รูปที่ 3.18 ตัวตรวจสอบสภาพของโครงสร้างคอนกรีต (Structural health monitoring, SHM)

ต่อสมรรถภาพของตัวตรวจสอบ และระดับความซับซ้อน [71]

ระบบ SHM สามารถจำแนกตามความซับซ้อนได้หลายระดับ สำหรับระบบ SHM ที่ออกแบบมาใช้สำหรับสะพานสามารถออกแบบมีความซับซ้อนน้อยที่สุดได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.5 [72] ตัวอย่างระบบ SHM ที่ออกแบบมาใช้สำหรับสะพานเช่น I-35 W St. Anthony Falls Bridge ที่ใช้ระบบ SHM ที่ประกอบด้วยเซนเซอร์ 500 ตัวเพื่อใช้ในระยะเวลา ชนิดของเซนเซอร์ที่ใช้เป็นเกจวัดความเสียหายได้แก่ vibrating wire strain gages (VWSGs), thermistors, fiber optic (SOFO) sensors, resistance strain gauges, accelerometers, linear potentiometers (LPs) และ corrosion monitoring sensor [73, 74]

ระดับความซับซ้อนของ SHM ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพ และต้นทุนของระบบ ระบบ SHM ที่ซับซ้อนมีประโยชน์อย่างมากเนื่องจากในสถานะที่มีความเสี่ยงระบบจะสามารถจัดการได้ หรือในโครงสร้างที่เฉพาะเจาะจงและยากแก่การเข้าถึง ในทางอุดมคติระบบควรที่จะสามารถปฏิบัติงานได้ถึงแม้ว่ามีจำนวนเซนเซอร์น้อย อย่างไรก็ตามระบบต้องใช้เซนเซอร์หลายฟังก์ชันรวมถึงกระบวนการส่งข้อมูลและระบบที่ค่อนข้างซับซ้อน ในด้านต้นทุนของระบบสามารถปรับได้ตามชนิดของเซนเซอร์ที่เลือกใช้ และการออกแบบระบบ SHM โดยเทคโนโลยีที่ใช้ในการออกแบบเซนเซอร์ SHM ได้แก่

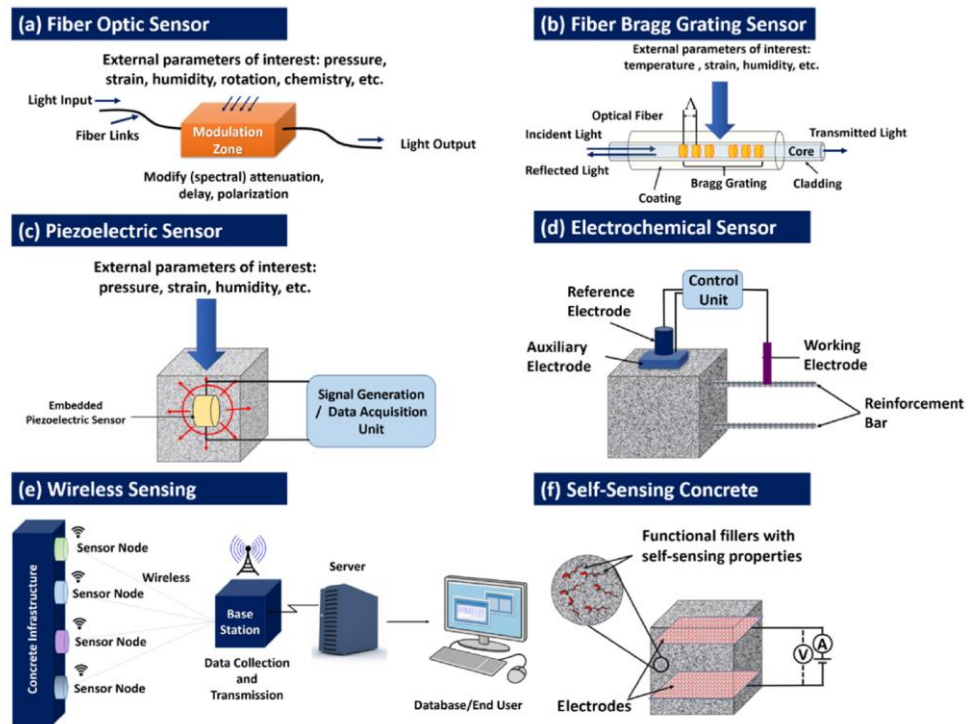
- Fiber Optic และ Bragg Grating Sensors
- Piezoelectric Sensors
- Electrochemical Sensors
- Wireless Sensors
- Self-sensing Concrete

ซึ่งแผนภาพของเทคโนโลยีเซนเซอร์แต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 3.19

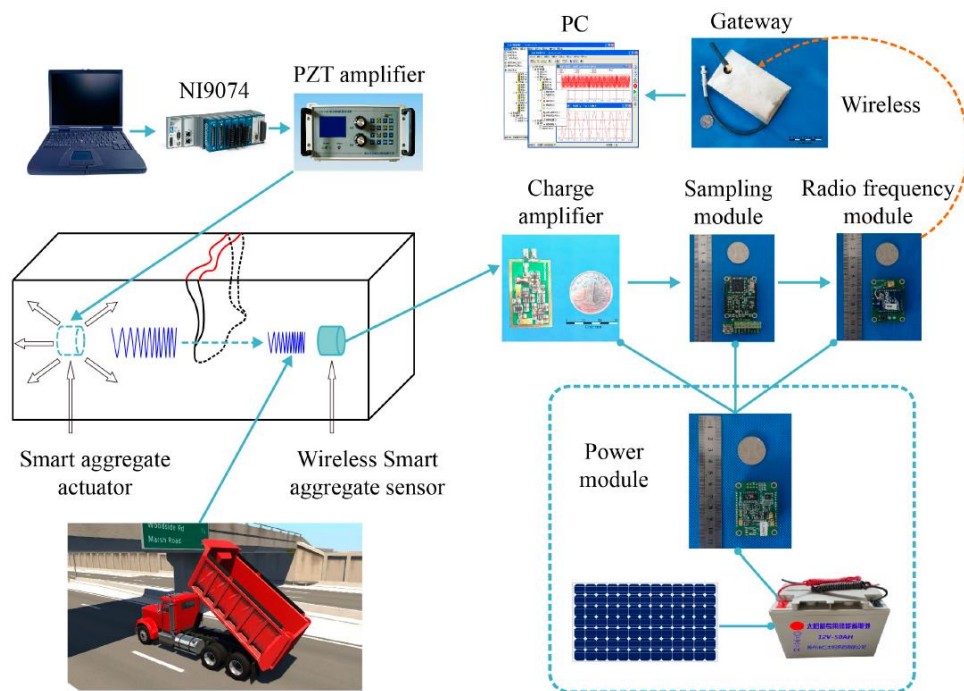
ตารางที่ 3.5 ชนิดของเซนเซอร์ที่ใช้สำหรับ SHM ของสะพานต่อความซับซ้อนของ SHM ที่ต้องการ [71]

Minimal General Complex	Minimal General Complex	Minimal General Complex
Weather station	Same as in minimal +	Same as in general +
Temperature sensor	following:	following:
Fiber Optic Sensor, strain	Laser displacement	Road wear sensor
Inclinometer	sensor	Microwave interferometric
Corrosion cell	Global Positioning	radar
Biaxial accelerometer	System (GPS)	Acoustic emission sensor
	Weigh-In Motion (WIM)	Pyradometer
	station	Photogrammetry
	Triaxial accelerometer	Hydraulic pressure sensor
	Anemometer	Ground penetrating radar
	Humidity sensor	Bridge WIM station
	Ground water pressure	Thermography
	Seismic accelerometer	

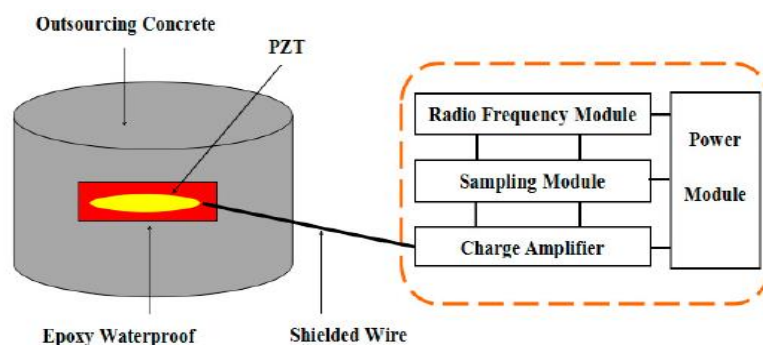
ในปี ค.ศ. 2017 S. Yan และคณะ [75] ได้พัฒนาระบบตรวจสอบสภาพของโครงสร้างคอนกรีต (Structural health monitoring, SHM) ในรูปแบบของมวลรวมฉลาดไร้สาย (Wireless Smart Aggregates) โดย S. Yan และคณะ ได้ออกแบบระบบดังรูปที่ 3.20 และได้ออกแบบมวลรวมฉลาดไร้สายดังรูปที่ 3.21 และในการทดลองได้ทำการทดสอบสัญญาณโดยชิ้นงานที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพแสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.19 แผนภาพของชิ้นงาน (a) optical fiber sensor, (b) fiber Bragg grating sensor, (c) piezoelectric sensor, (d) electromechanical sensor, (e) wireless sensor system และ (f) self-sensing concrete [71]



รูปที่ 3.20 การติดตั้งระบบและทิศทางของสัญญาณของระบบการตรวจสอบโครงสร้าง [75]

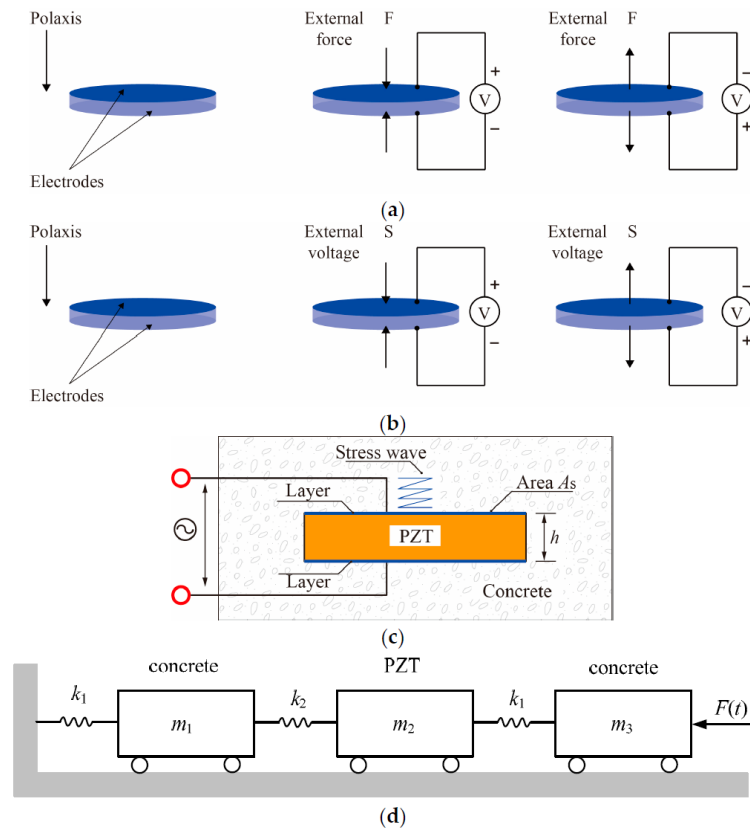


รูปที่ 3.21 การตรวจสอบสภาพด้วยระบบมวลรวมฉลวดไร้สาย (WSAs) [75]

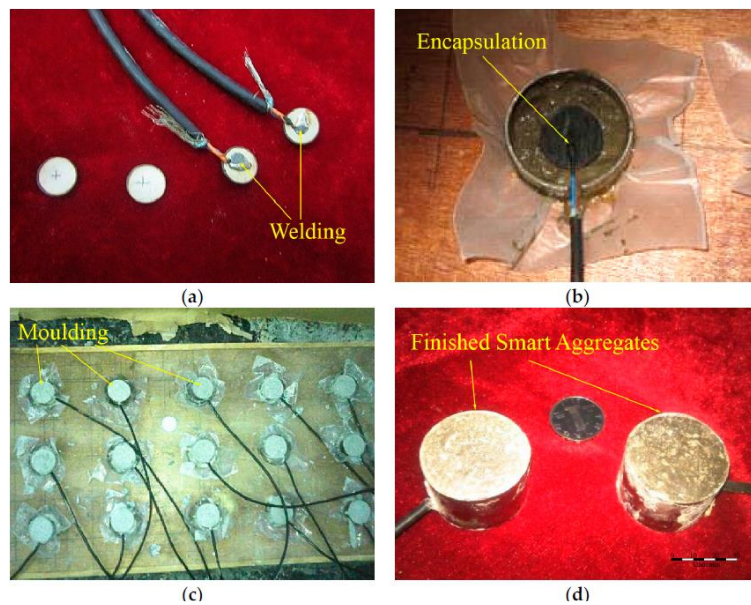


รูปที่ 3.22 ตัวตรวจสอบสภาพที่ใช้ในการทดลอง [75]

มวลรวมฉลวดจะมีการฝังเซรามิก PZT ลงไปดังรูปที่ 3.23 ซึ่งเมื่อแผ่นเซรามิกภายในมวลรวมฉลวดได้รับแรงกดหรือแรงดึง พลังงานเชิงกลจะถูกเปลี่ยนเป็นประจุไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์ Piezoelectric effect แบบ Direct piezoelectric effect ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ได้ดังรูปที่ 3.23a ในทางกลับกันภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเซรามิกไพโซอิเล็กทริกสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นการสั่นเชิงกลได้ (Inverse piezoelectric effect) ซึ่งสามารถใช้มวลรวมฉลวดลักษณะนี้ในการประยุกต์ใช้งานเป็น actuator แสดงดังรูปที่ 3.23b ฟังก์ชันเชิงกลของมวลรวมฉลวดแสดงดังรูปที่ 3.23c ซึ่งจะเห็นว่า ชิพ PZT จะถูกเคลือบผิวด้วยชั้นบางๆ ทั้ง 2 ด้าน และถูกฝังในคอนกรีต เมื่อมีคลื่นความเค้นจากคอนกรีตส่งผ่านไปยังชั้นผิวของ ชิพ PZT จะทำให้เกิดเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าขึ้น ถ้าหากมีสนามไฟฟ้ามากระทำกับชิพ PZT ก็จะทำให้เกิดคลื่นความเค้นขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตด้วยเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 3.23d ทั้งนี้ S. Yan และคณะ ได้ทำการประดิษฐ์มวลรวมฉลวดโดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.24

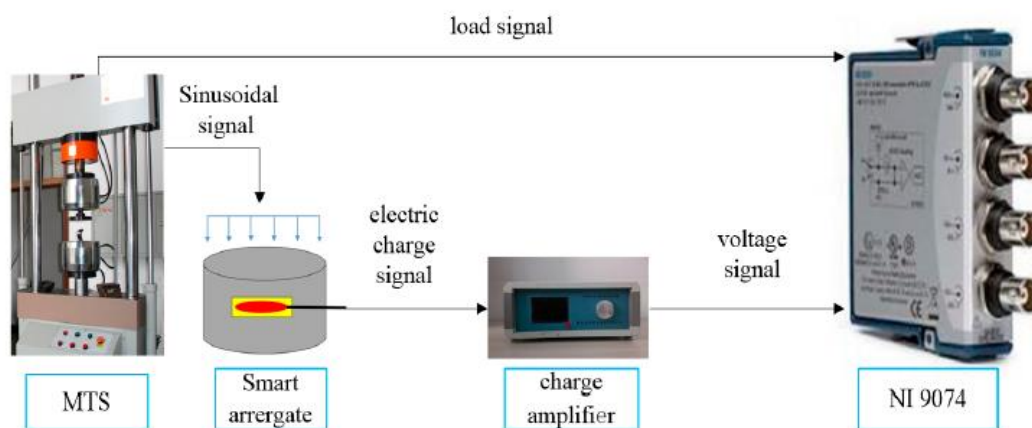


รูปที่ 3.23 Piezoelectric effect และฟังก์ชันมวลรวมฉลาด (a) Direct piezoelectric effect (sensing), (b) Inverse piezoelectric effect (actuating), (c) แบบจำลองมวลรวมฉลาด และ (d) แบบจำลองเชิงกลของเซนเซอร์ PZT ที่ถูกฝัง [75]



รูปที่ 3.24 กระบวนการผลิตมวลรวมฉลาด (a) การเชื่อม (b) การห่อหุ้ม (c) การหล่อลงแม่พิมพ์ และ (d) แบบจำลองเชิงกลของเซนเซอร์ PZT ที่ถูกฝัง [75]

สำหรับการทดสอบมวลรวมฉลาคเพื่อใช้เทียบสัญญาณจะทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง electro-hydraulic servo testing machine MTS (CSS-280I-250) และใช้เครื่องขยายสัญญาณ Hengke (HK9038) และสัญญาณจะถูกบันทึกโดยใช้ National instrument data acquisition system (NI9234) ดังแสดงในรูปที่ 3.25

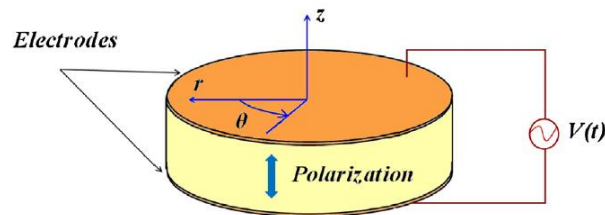


รูปที่ 3.25 การเทียบสัญญาณสำหรับการทดสอบมวลรวมฉลาด [75]

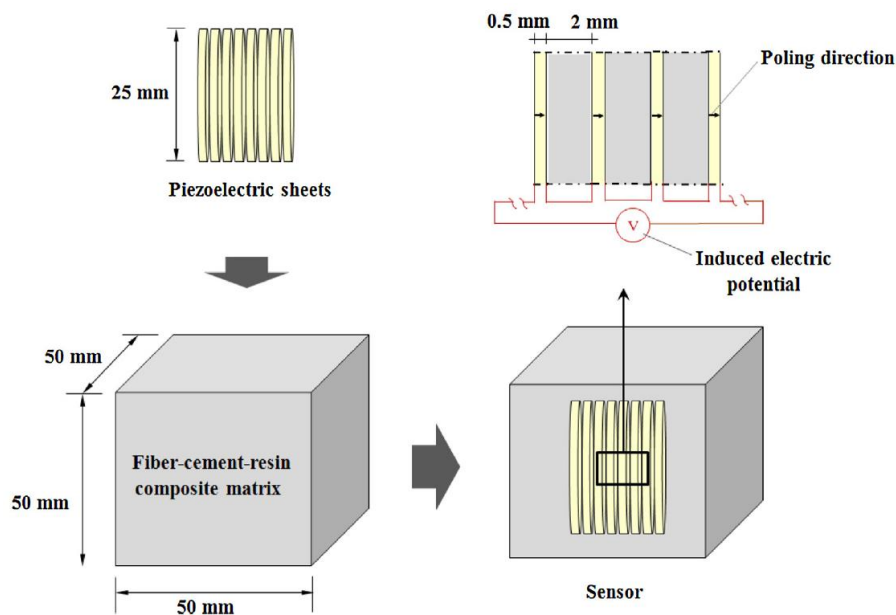
ซึ่งหลังจาก S. Yan และคณะได้ทำการทดสอบกับชิ้นงานคอนกรีตพบว่ามวลรวมฉลาดไร้สายมีประสิทธิภาพสามารถระบุความเสียหายภายในคอนกรีตได้ และสามารถมีแนวโน้มพัฒนาต่อเพื่อให้เป็นระบบไร้สายและประหยัดพลังงาน

ปี ค.ศ. 2019 M. Lezgy-Nazargah และคณะ [76] ได้ทำการออกแบบ และประดิษฐ์ เซนเซอร์วัสดุผสมไฟเบอร์-ซีเมนต์-ไฟอโซอิเล็กทริกสำหรับวัดค่าความเค้นภายในโครงสร้างคอนกรีต โดยได้ทำการทดลองฝังเซนเซอร์ไฟอโซอิเล็กทริกที่ผ่านการทำขั้วแล้วดังรูปที่ 3.26 ลงไปในชิ้นงานซีเมนต์ขนาด $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ ดังรูปที่ 3.27-3.28 โดยเฟสเมทริกซ์ประกอบไปด้วยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เรซิน น้ำ ซิลิกาละเอียด และเส้นใยพอลิเมอร์ หลังจากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง servo-hydraulic test machine โดยใช้แรงกดต่างกันดังรูปที่ 3.29-3.30 ในการทดลอง M. Lezgy-Nazargah และคณะ ได้ใช้แรงกดขนาด 700 N ที่ความถี่ 0.5 Hz และบันทึกค่าความต่างศักย์ที่เซนเซอร์ตอบสนองแสดงดังรูปที่ 3.30 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.31 หลังจากนั้นทำการทดลองโดยให้แรงขนาด 500 N ที่ความถี่ต่างกัน 2, 5, 10 และ 20 Hz ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.32 ซึ่งพบว่าไม่มีการเลื่อนของเฟสระหว่างรอบของแรงที่ให้และสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ที่ความถี่สูง ในกรณีที่ใช้ความถี่ต่ำจะสังเกตเห็นเฟสของรอบ

แรงที่ให้กับเฟสของสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์มีการเลื่อนเล็กน้อย สัญญาณจากเซนเซอร์โพธิโซอิเล็กทริกที่เกิดการเลื่อนที่ความถี่ต่ำในทุกชิ้นงานอาจจะมีสาเหตุมาจาก piezoelectric effect เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ที่รอยต่อระหว่างเฟสซีเมนต์และเซรามิก PZT ทำให้การส่งผ่านพลังงานเชิงกลจากเฟสซีเมนต์ไปยังเซรามิกโพธิโซอิเล็กทริกไม่สมบูรณ์ เมื่อความถี่ของแรงที่ให้เพิ่มขึ้นพลังงานเชิงกลที่จะส่งผ่านไปยังเซรามิก PZT ลดลง และส่งผลให้แอมพลิจูดของความต่างศักย์ขาออกลดลง ซึ่งเมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเซนเซอร์กับแรงที่ให้ในช่วงความถี่ต่าง ๆ จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.26 ทิศทางของการทำขั้ว [76]



รูปที่ 3.27 ขั้นตอนของการประดิษฐ์เซนเซอร์ [76]



(a)

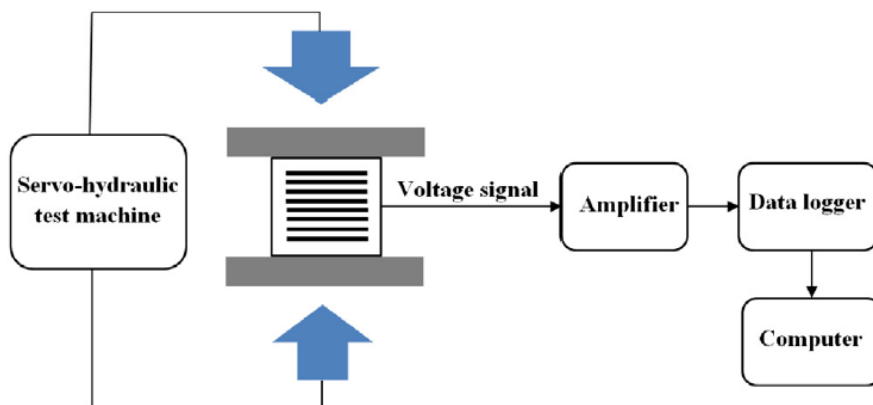


(b)

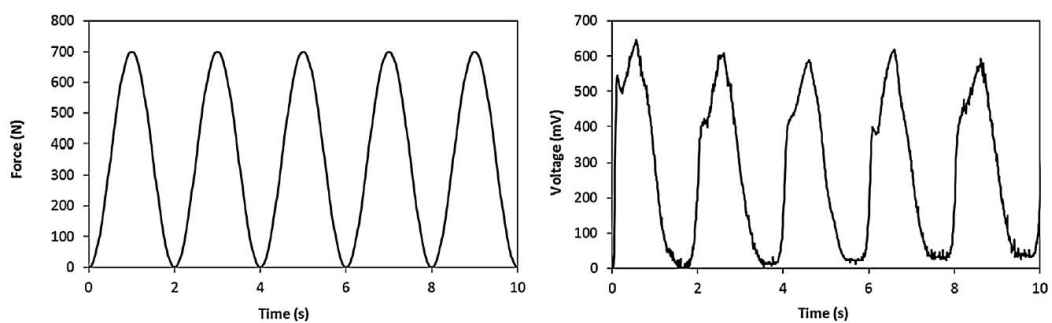
รูปที่ 3.28 แม่พิมพ์โลหะและชิ้นงานเซนเซอร์ (a) ก่อนเทเฟสเมทริกซ์ และ (b) หลังเทเมทริกซ์ [76]



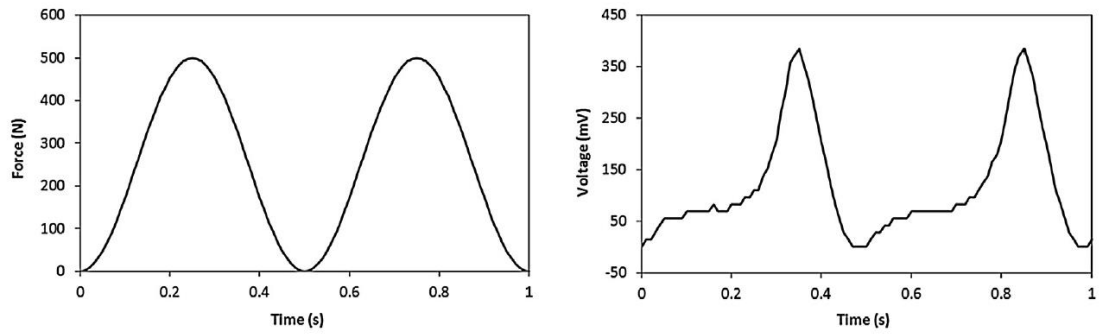
รูปที่ 3.29 เครื่อง Servo-hydraulic test [76]



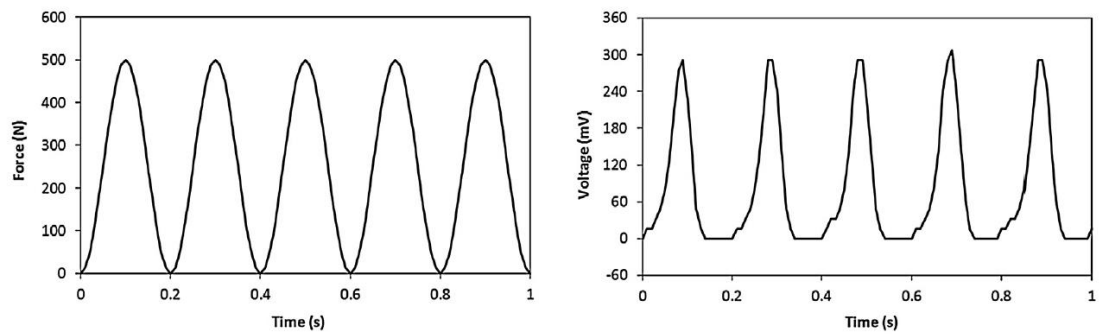
รูปที่ 3.30 แผนภาพแสดงระบบการทดสอบเซนเซอร์ [76]



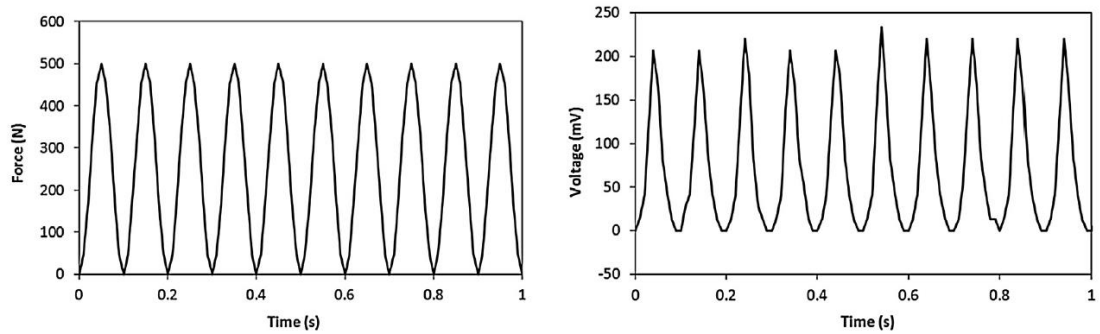
รูปที่ 3.31 การตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแรง 700 N ที่ความถี่ 0.5 Hz [76]



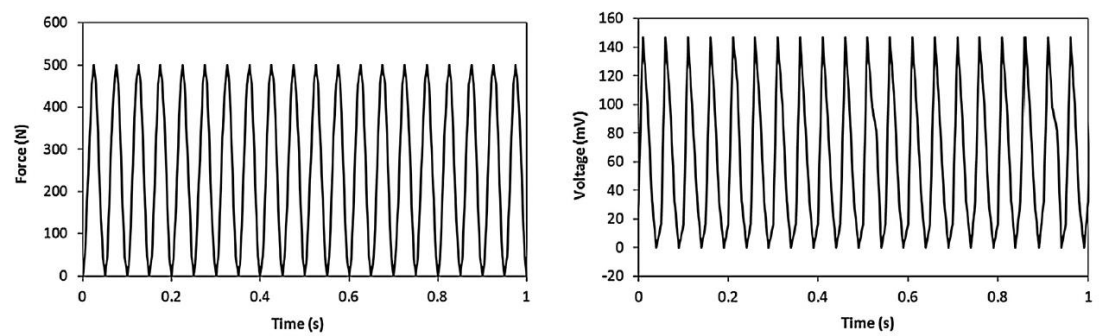
(a)



(b)

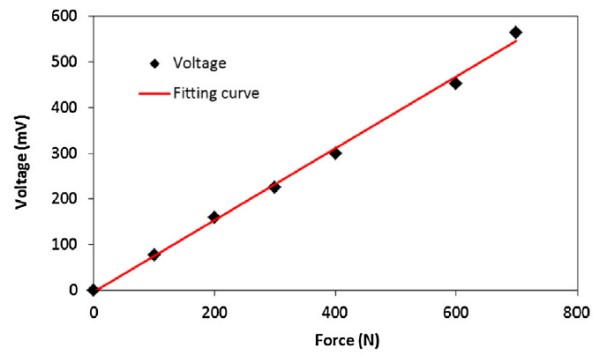


(c)

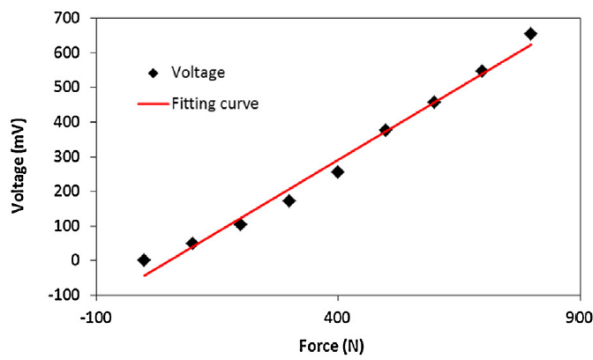


(d)

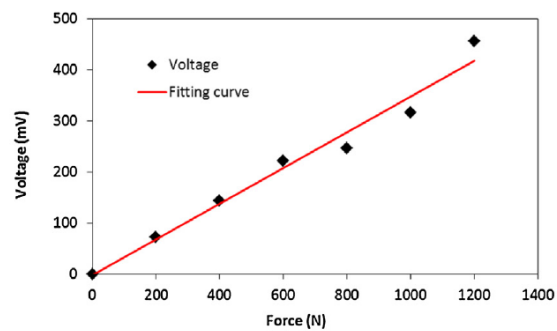
รูปที่ 3.32 การตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแรง 500 N ที่ความถี่ (a) 2 Hz, (b) 5 Hz, (c) 10 Hz และ (d) 20 Hz [76]



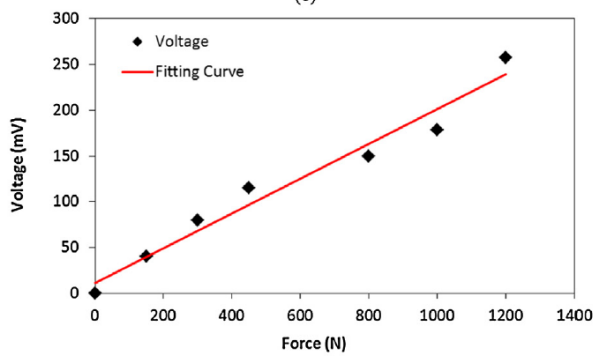
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 3.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแรงที่ให้กับแอมพลิจูดของสัญญาณจาก เซนเซอร์ขาออกที่ความถี่ (a) 0.5 Hz, (b) 5 Hz, (c) 20 Hz และ (d) 40 Hz [76]

4. วิธีการทดลอง

4.1 การเตรียมและการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNBT)

ได้ทำการทดลองเตรียมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNT-BT) ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) โดยใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ที่ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทำการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเท่ากับ $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

4.2 การเตรียมวัสดุผสมและการทดสอบค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3

นำเม็ดเซรามิก $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNT-BT) ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) มาขัดผิวหน้าเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมาด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 แล้วจึงนำมาบด เพื่อคัดขนาดให้ขนาดเซรามิก BNT-BT มีค่า $\approx 300\text{-}600$ ไมครอน จากนั้นนำเม็ดเซรามิก BNT-BT (ขนาด $\approx 300\text{-}600$ ไมครอน) ในปริมาณ 30%, 40%, 50% และ 60% โดยปริมาตร ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงไปในวัสดุผสม สำหรับการศึกษาลักษณะของปริมาณ PVDF ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม เนื่องจากจากงานวิจัยที่ผ่านมาของข้าพเจ้า [61] ได้ทำการวัดค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว BNT-BT/ซีเมนต์/PVDF แล้วพบว่าที่ปริมาณ เซรามิก BNT-BT 50% โดยปริมาตรจะมีค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนใกล้เคียงกับคอนกรีต ดังนั้นจึงใช้ปริมาณของเซรามิก BNT-BT คงที่ที่ 50% โดยปริมาตร ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ PVDF 0%, 1%, 3%, 5% และ 7% โดยปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ต่อจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด ไฮดรอลิก ในแม่พิมพ์โลหะที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.1) และอัดขึ้นรูปให้ชิ้นงานมีความสูงประมาณ 20 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แล้วนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.3 ต่อจากนั้นนำวัสดุผสมไปวางในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 98% เป็นเวลา 3 วัน (รูปที่ 4.4) หลังจากนั้นทำการทดสอบค่ากำลังอัดด้วยเครื่อง HOUNSFIELD รุ่น H10KS (รูปที่ 4.5)

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมเซรามิกไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-พอลิเมอร์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3

วัสดุ	ร้อยละโดยปริมาตร				
เซรามิก BNBT	50	50	50	50	50
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	50	49	47	45	43
PVDF	0	1	3	5	7



รูปที่ 4.1 แสดงการอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกสำหรับการทดสอบค่ากำลังอัด



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกสำหรับการทดสอบค่ากำลังอัด



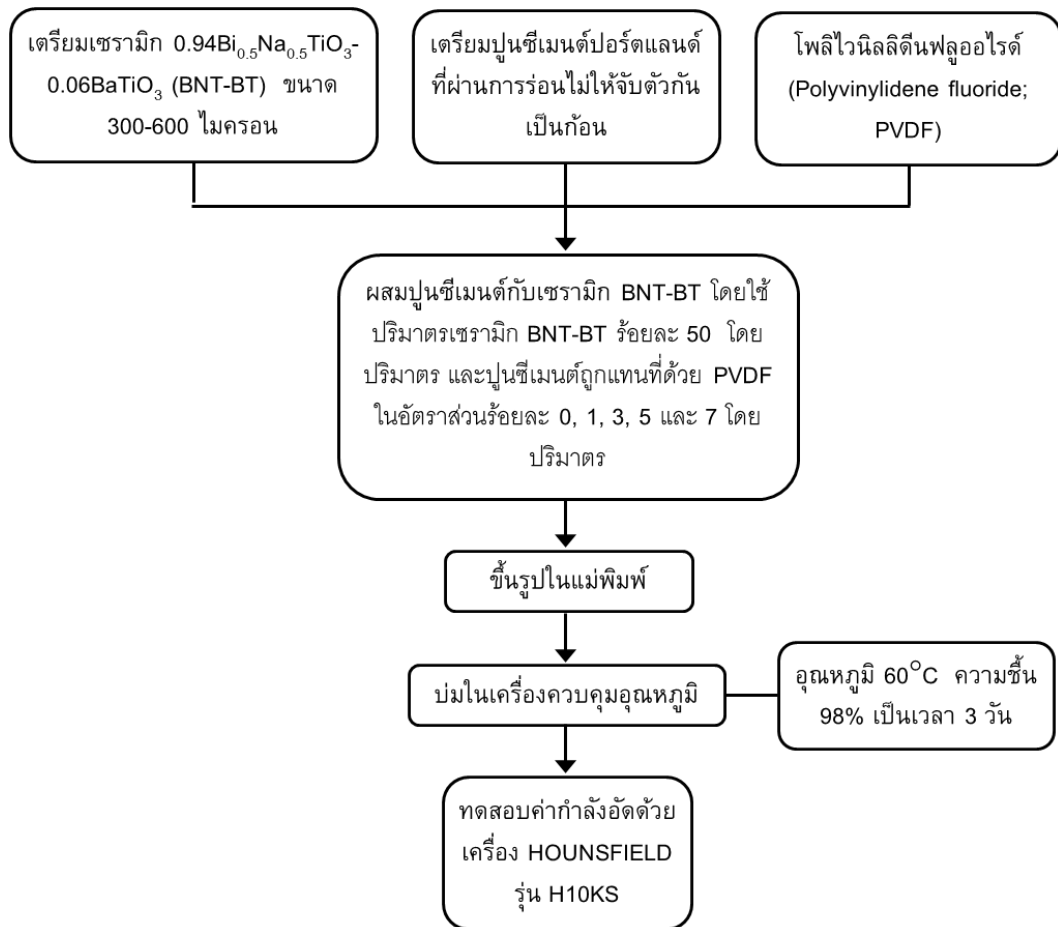
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างชิ้นงานในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 98%



รูปที่ 4.5 แสดงการทดสอบหาค่ากำลังอัดของวัสดุผสม



รูป 4.3 แสดงแผนผังวิธีวิจัย ขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติของวัสดุผสมเซรามิกไฟอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-พอลิเมอร์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3

4.3 การเตรียมวัสดุผสมและศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกไฟอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3

นำเม็ดเซรามิก $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNT-BT) ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) มาขัดผิวหน้าเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมาด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 แล้วจึงนำมาบด เพื่อคัดขนาดให้ขนาดเซรามิก BNT-BT มีค่า $\approx 300\text{-}600$ ไมครอน จากนั้นนำเม็ดเซรามิก BNT-BT (ขนาด $\approx 300\text{-}600$ ไมครอน) ในปริมาณ 30%, 40%, 50% และ 60% โดยปริมาตร ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) สำหรับการศึกษาผลของปริมาณ PVDF ต่อเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุผสม จะใช้ปริมาณของเซรามิก BNT-BT คงที่ที่ 50% โดยปริมาตรผสมกับปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ PVDF 0%, 1%, 3%, 5% และ 7% โดยปริมาตร ต่อจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ในแม่พิมพ์โลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15

มิลลิเมตร และอัดขึ้นรูปให้ชิ้นงานมีความสูงประมาณ 1.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.6 แล้วนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ต่อจากนั้นนำวัสดุผสมไปวางในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 98% เป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นทำการทดสอบสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกโดยใช้ระบบ modified Michelson interferometer (helium–neon laser; monochromatic source $\lambda = 632.8$ nm) ร่วมกับ Sawyer–Tower circuit ที่ความถี่ 0.2 Hz

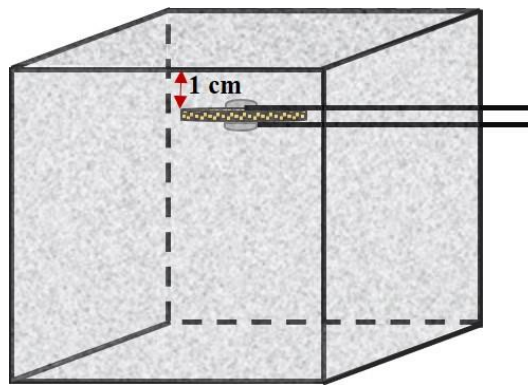


รูปที่ 4.6 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกสำหรับศึกษาสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก

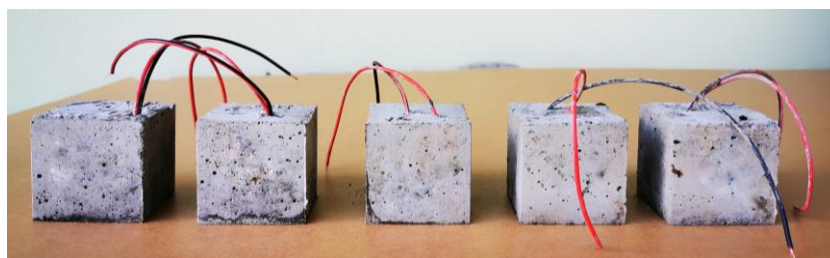
4.4 ทำการประดิษฐ์วัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 และทำการฝังในชิ้นงานมอร์ตาร์

ทำการเตรียมวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยนำเม็ดเซรามิก $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNT-BT) มาขัดผิวหน้าเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมาด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 แล้วจึงนำมาบดเพื่อคัดขนาดให้ขนาดเซรามิก BNT-BT มีค่า $\approx 300\text{-}600$ ไมครอน จากนั้นนำเม็ดเซรามิก BNT-BT (ขนาด $\approx 300\text{-}600$ ไมครอน) ในปริมาณ 30%, 40%, 50% และ 60% โดยปริมาตร ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงไปในวัสดุผสม ต่อจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด ไฮดรอลิก ในแม่พิมพ์โลหะที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 มิลลิเมตร และอัดขึ้นรูปให้ชิ้นงานมีความสูงประมาณ 1.5 มิลลิเมตร นำวัสดุผสมไปวางในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 98% เป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นทำการสร้างขั้วทางไฟฟ้าด้วยการโพลด้วยสนามไฟฟ้า 1.5 kV/mm ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 45 นาที แล้ววัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (d_{33}) ด้วยเครื่อง d_{33} meter (piezometer System Model PM25)

จากนั้นทำการต่อสายไฟกับชิ้นงาน เพื่อทำการทดสอบแบบไม่ฝังศึกษาสัญญาณการตอบสนองเบื้องต้น สำหรับการทดสอบโดยการฝังชิ้นงานในมอร์ตาร์นั้นจะนำเม็ดเซรามิก BNT-BT (ขนาด $\approx 300-600$ ไมครอน) ในปริมาณ 50% โดยปริมาตรผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ PVDF 0%, 1%, 3%, และ 7% โดยปริมาตร แล้วนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำวัสดุผสมไปวางในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 98% เป็นเวลา 3 วัน แล้วทำการสร้างขั้วทางไฟฟ้าด้วยการโพลด้วยสนามไฟฟ้า 1.5 kV/mm ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 45 นาที และวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (d_{33}) ด้วยเครื่อง d_{33} meter (piezometer System Model PM25) จากนั้นทำการต่อสายไฟกับชิ้นงาน และฝังชิ้นงานลงในมอร์ตาร์ ให้ชิ้นงานห่างจากผิวทดสอบ 1.00 cm ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.7 และ 4.8



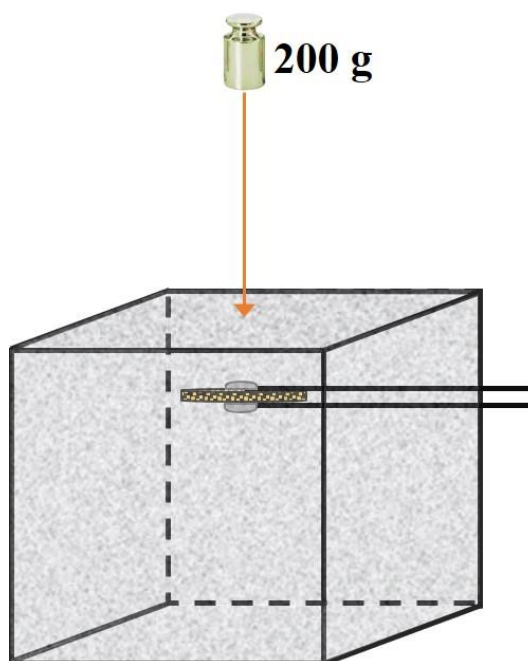
รูปที่ 4.7 แผนภาพตัวอย่างการวางวัสดุผสมวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ฝังลงในมอร์ตาร์



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการฝังวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ลงในมอร์ตาร์

4.5 การวัดสัญญาณการตอบสนองของวัสดุผสมเซรามิกไพเอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3

สำหรับการทดสอบสัญญาณของชิ้นงานที่ไม่ได้ฝังในมอร์ตาร์ ชิ้นงานวัสดุผสมเซรามิกไพเอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ที่ผ่านการทำขั้วแล้วจะถูกติดบนเครื่องสั่นสะเทือนที่มีความถี่ 60 Hz (SHINKO ELECTRIC CO. LTD.) แล้วต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป (Rigol DS1074Z oscilloscope) เพื่อทำการวัดสัญญาณ และข้อมูลจะถูกบันทึกเข้าคอมพิวเตอร์ สำหรับการทดสอบสัญญาณของชิ้นงานวัสดุผสมเซรามิกไพเอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ที่ถูกฝังในมอร์ตาร์ จะวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการนำตุ้มน้ำหนัก 200 g ปล่อยลงไปในผิวชิ้นงานมอร์ตาร์ด้านที่ฝังวัสดุผสมเซรามิกไพเอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ห่างจากผิว 1 cm ที่ความสูง 20 cm ดังรูปที่ 4.9 แล้วต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป (Rigol DS1074Z oscilloscope) เพื่อทำการวัดสัญญาณ และข้อมูลจะถูกบันทึกเข้าคอมพิวเตอร์

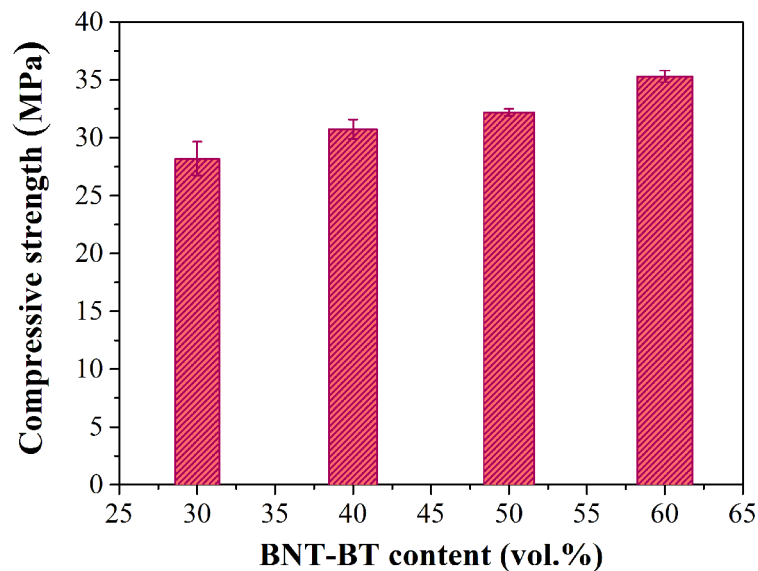


รูปที่ 4.9 แผนภาพการปล่อยตุ้มน้ำหนัก 200 g ลงไปในผิวชิ้นงานมอร์ตาร์ด้านที่ฝังวัสดุผสมเซรามิกไพเอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ห่างจากผิว 1 cm

5. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

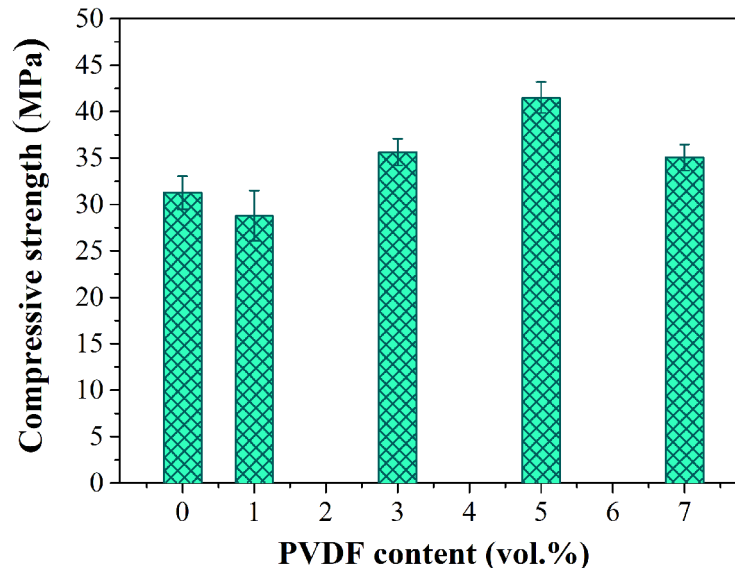
5.1 ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3

รูปที่ 5.1 แสดงค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วที่ใช้คือ $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNT-BT) ซึ่งพบว่าค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเซรามิกลงไปในวัสดุผสม การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดนี้อาจจะเนื่องมาจากเฟสเซรามิก BNT-BT มีค่ากำลังอัดสูงถึง 210 MPa [59] ส่งผลทำให้ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดของวัสดุผสมที่มีซีเมนต์เป็นฐานนี้คล้ายกับงานวิจัยของ Chaipanich และคณะ [60] ที่ได้ทำการทดสอบค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 นี้ยังมีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างคอนกรีตพื้นฐานที่มีค่ากำลังอัดประมาณ 22.2-41.2 MPa [77] ดังนั้นวัสดุผสมนี้สามารถต้านแรงอัดได้เทียบเท่ากับโครงสร้างคอนกรีต

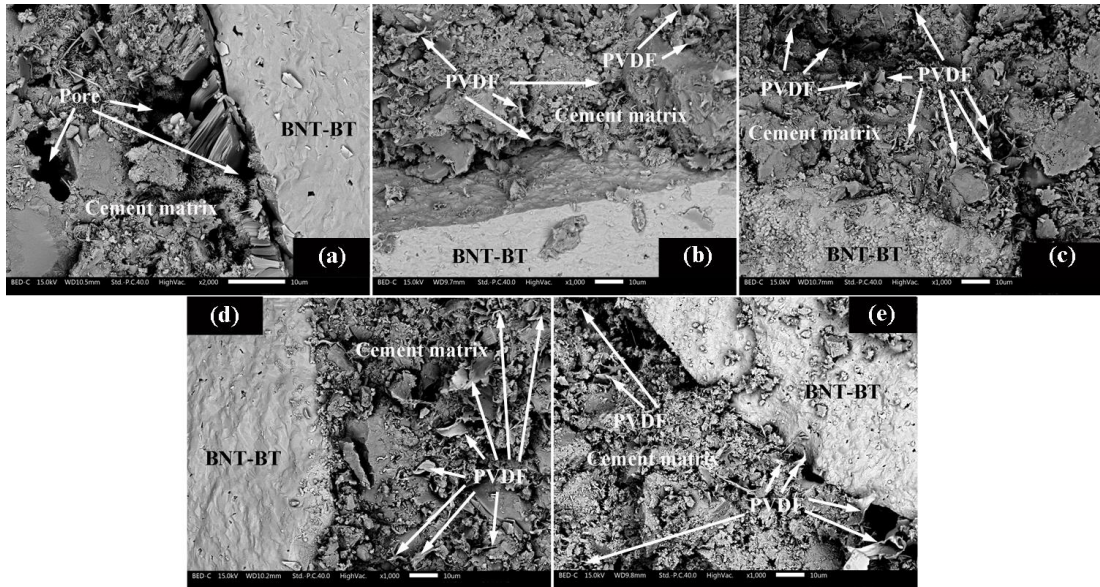


รูปที่ 5.1 ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3

รูปที่ 5.2 แสดงค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเซรามิกไฟอ็อกไซด์เล็ทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยใช้เซรามิกไฟอ็อกไซด์เล็ทริกไร้สารตะกั่วที่ใช้คือ $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNT-BT) ปริมาณ 50% โดยปริมาตรผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ PVDF 0%, 1%, 3%, 5% และ 7% โดยปริมาตร ซึ่งพบว่าค่ากำลังอัดของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PVDF และมีค่าสูงที่สุดเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย PVDF 5% โดยปริมาตร อาจจะเนื่องมาจากการกระจายตัวของเฟส PVDF ที่ช่วยในการอุดช่องว่างภายในเฟสซีเมนต์ และระหว่างรอยต่อของเฟสซีเมนต์และเซรามิกได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ทำให้วัสดุผสม เซรามิกไฟอ็อกไซด์เล็ทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF มีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการแทนที่ PC ด้วย PVDF ที่ 7% ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมลดลง อาจจะเนื่องมาจาก PVDF ที่มีปริมาณมากเกินไป ไปเคลือบที่ผิวของอนุภาคผงซีเมนต์ทำให้เกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชันได้อย่างไม่สมบูรณ์ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันน้อยลงทำให้มีรูพรุนระหว่างรอยต่อของเฟสซีเมนต์มาก ดังปรากฏในรูปที่ 5.3(e) อีกทั้งการมีปริมาณ PVDF มากเกินไป อนุภาคผง PVDF จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) ทำให้มีการกระจายตัวของเฟส PVDF ในวัสดุผสมได้ไม่ดี จึงส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดต่ำลง



รูปที่ 5.2 ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเซรามิกไฟอ็อกไซด์เล็ทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3

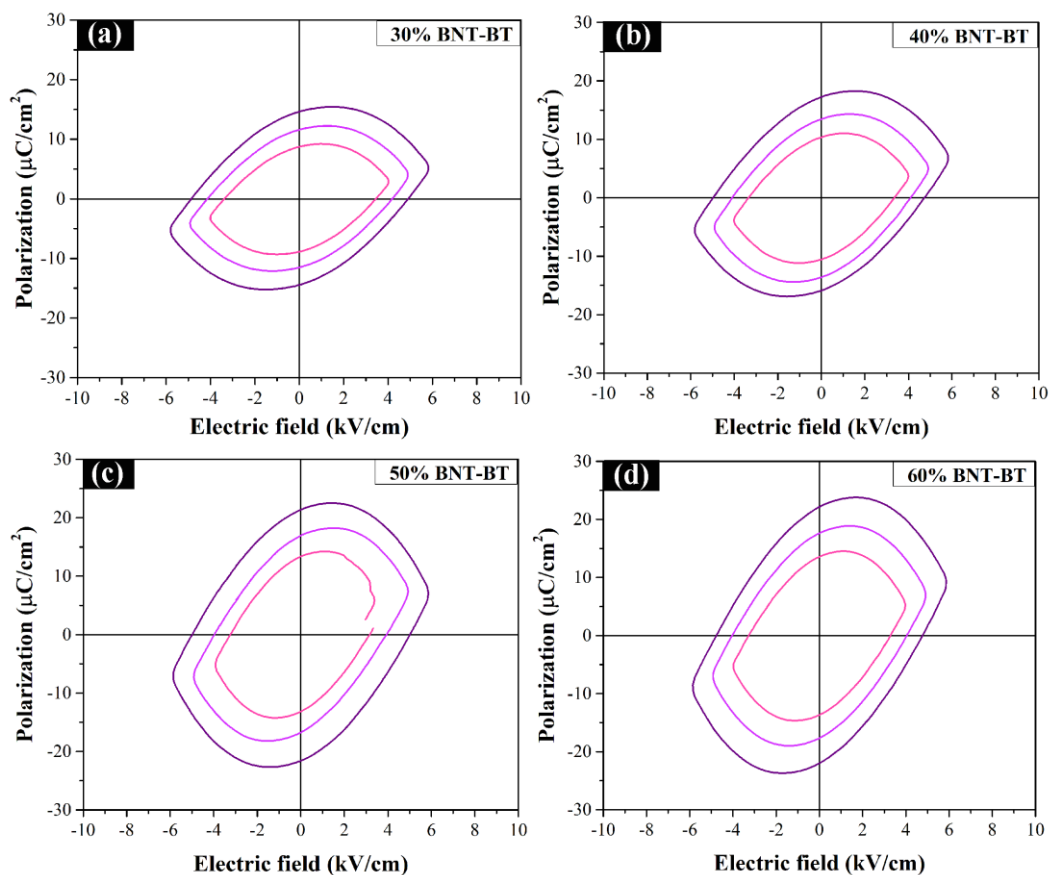


รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโหมด backscatter แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ที่ (a) 0% PVDF, (b) 1% PVDF, (c) 3% PVDF, (d) 5% PVDF และ (e) 7% PVDF

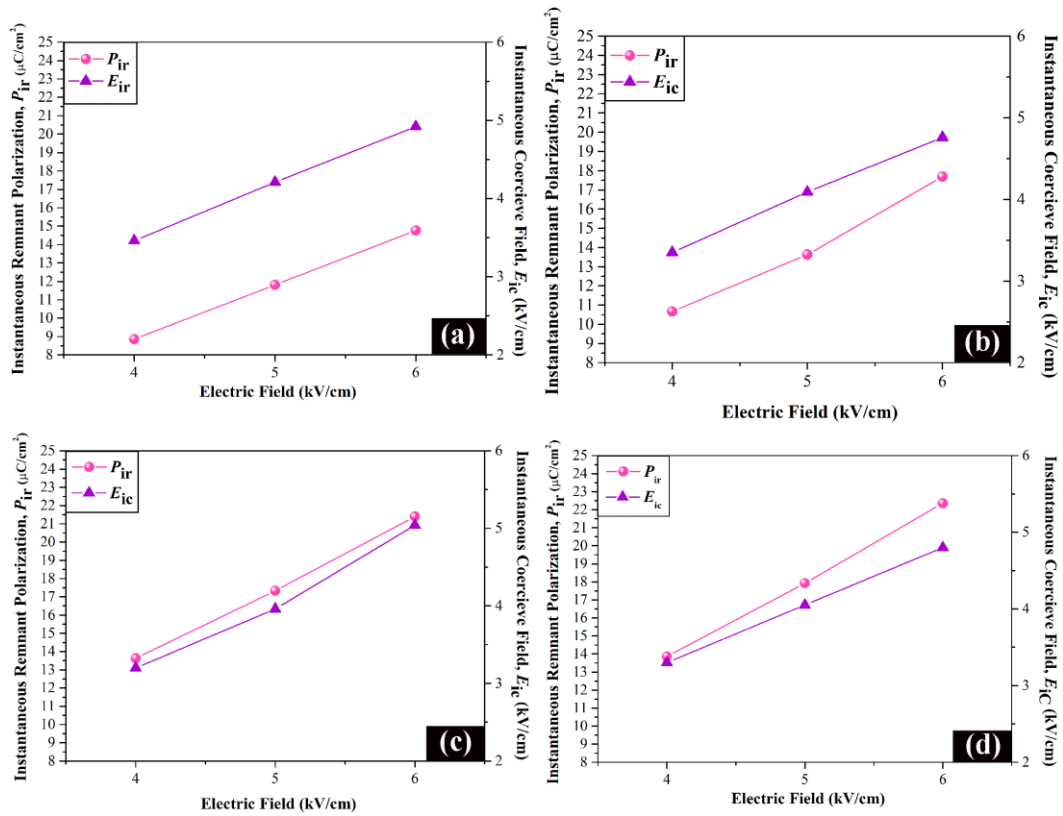
5.2 สมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3

จากการตรวจสอบสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วที่ใช้คือ $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNT-BT) โดยใช้ปริมาณของเซรามิก BNT-BT 30% - 60% โดยปริมาตร ที่ความถี่ 0.2 Hz ภายใต้สนามไฟฟ้า 4 kV/cm – 6 kV/cm ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าวงวนฮิสเทอรีซิสมีลักษณะไม่อ้อมตัวเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ให้แก่งานไม่เพียงพอที่จะทำให้โดเมนมีสภาพการโพลาไรเซชันในทิศทางเดียวกันได้หมด แต่อย่างไรก็ตามหากมีการเพิ่มสนามไฟฟ้าให้แก่งานสูงกว่านี้ ไอออนตัวนำ เช่น OH^- , Ca^{2+} และ Al^{3+} ในเฟสปูนซีเมนต์จะเกิดการสะสมระหว่างรอยต่อของเฟสเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วกับซีเมนต์ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้นอย่างมากและทำให้เกิดไดอิเล็กทริกเบรกดาวน์ [78] และไอออนตัวนำเหล่านี้ยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้วงวนฮิสเทอรีซิสไม่อ้อมตัวและเกิดค่าการสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) ดังนั้นจึงขอยกนิยามค่าโพลาไรเซชันคงค้างในวัสดุผสมที่มีลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสนี้เป็น Instantaneous remnant polarization (P_{ir}) และสนามไฟฟ้าหักล้างเป็น

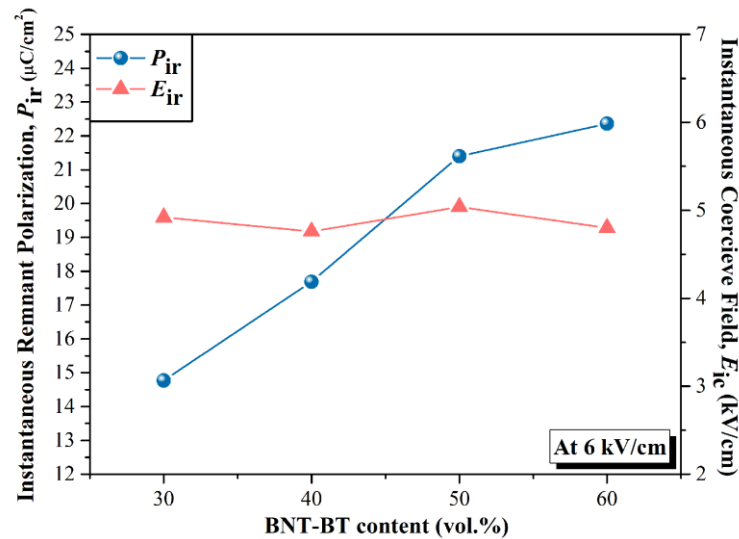
Instantaneous coercive field (E_{ic}) นอกจากนี้เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้ากับระบบสูงขึ้นจะทำให้วงวนฮิสเทอรีซิสของวัสดุผสมมีขนาดขยายใหญ่ขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่า P_{ir} ดังรูปที่ 5.4 เนื่องจากภายใต้สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นโดเมนมีสภาพการโพลาไรเซชันในทิศทางเดียวกันมากขึ้นจึงส่งผลให้มีค่า P_{ir} สูงขึ้น [79] โดยค่า P_{ir} และ E_{ic} ของทุกอัตราส่วนผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าที่ให้กับระบบดังแสดงในรูปที่ 5.5 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเซรามิก BNT-BT ในวัสดุผสม จาก 30% โดยปริมาตร เป็น 60% โดยปริมาตร ทำให้ค่า P_{ir} สูงขึ้นจาก $14.77 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ เป็น $22.36 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ (ภายใต้สนามไฟฟ้า $6 \text{ kV}/\text{cm}$) เนื่องจากเซรามิก BNT-BT ซึ่งมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเซรามิกที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกมากขึ้นส่งผลให้วัสดุผสมแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ชัดเจนขึ้น (ค่า P_{ir} สูงขึ้น) [17] แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเซรามิก BNT-BT ในวัสดุผสมพบว่าค่า E_{ic} แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.4 ผลของสนามไฟฟ้าต่อวงวนฮิสเทอรีซิสของวัสดุผสมเซรามิกโพซิโวลีอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์ ที่ (a) 30% BNT-BT, (b) 40% BNT-BT, (c) 50% BNT-BT และ (d) 60% BNT-BT



รูปที่ 5.5 ผลของสนามไฟฟ้าต่อค่าโพลาริเซชันคงค้าง และสนามไฟฟ้าหักล้างของวัสดุผสม เซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์ ที่ (a) 30% BNT-BT, (b) 40% BNT-BT, (c) 50% BNT-BT และ (d) 60% BNT-BT

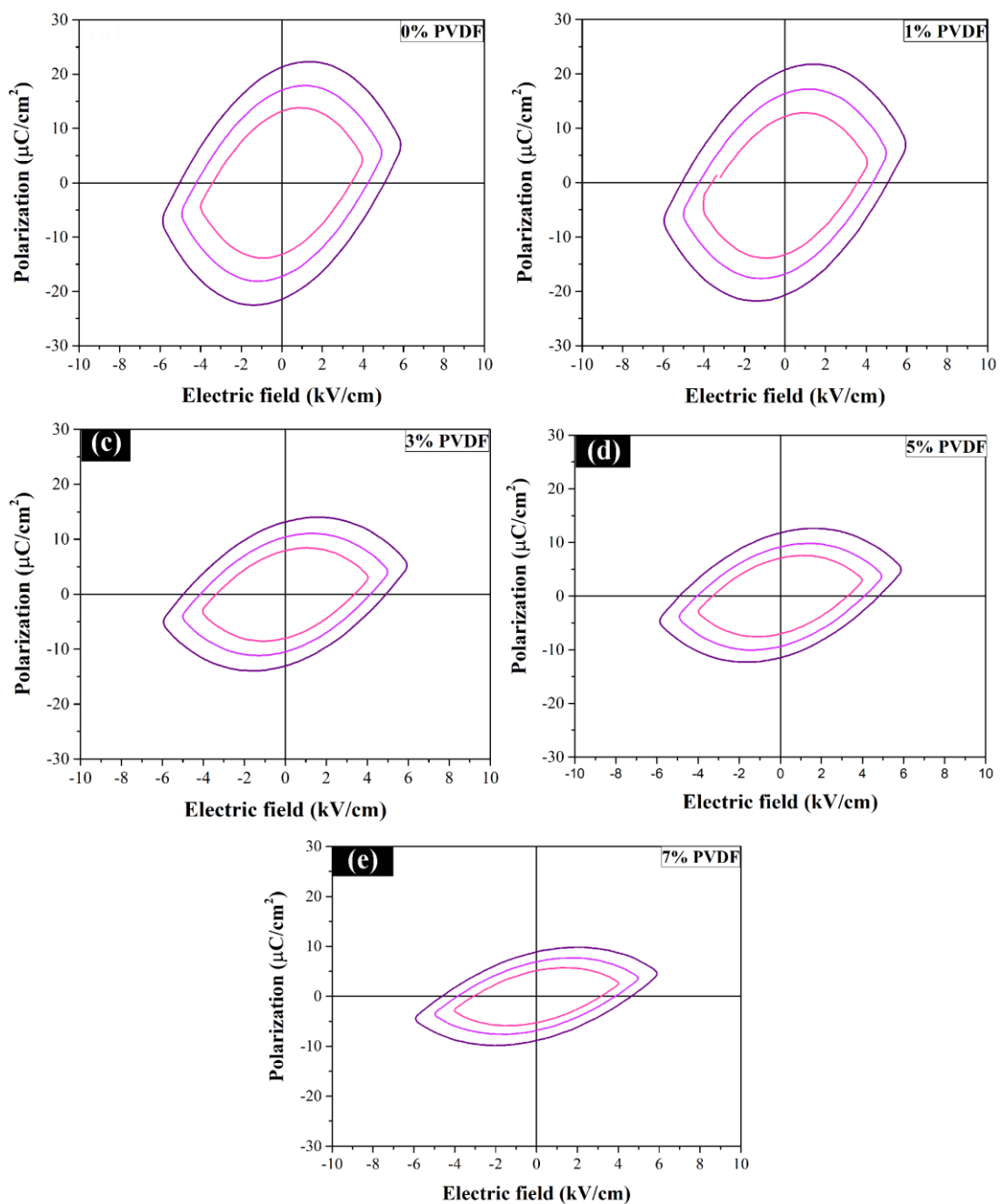


รูปที่ 5.6 ผลของปริมาณเซรามิก BNT-BT ต่อค่าโพลาริเซชันคงค้าง และสนามไฟฟ้าหักล้างของวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์ ภายใต้สนามไฟฟ้า 6 kV/cm

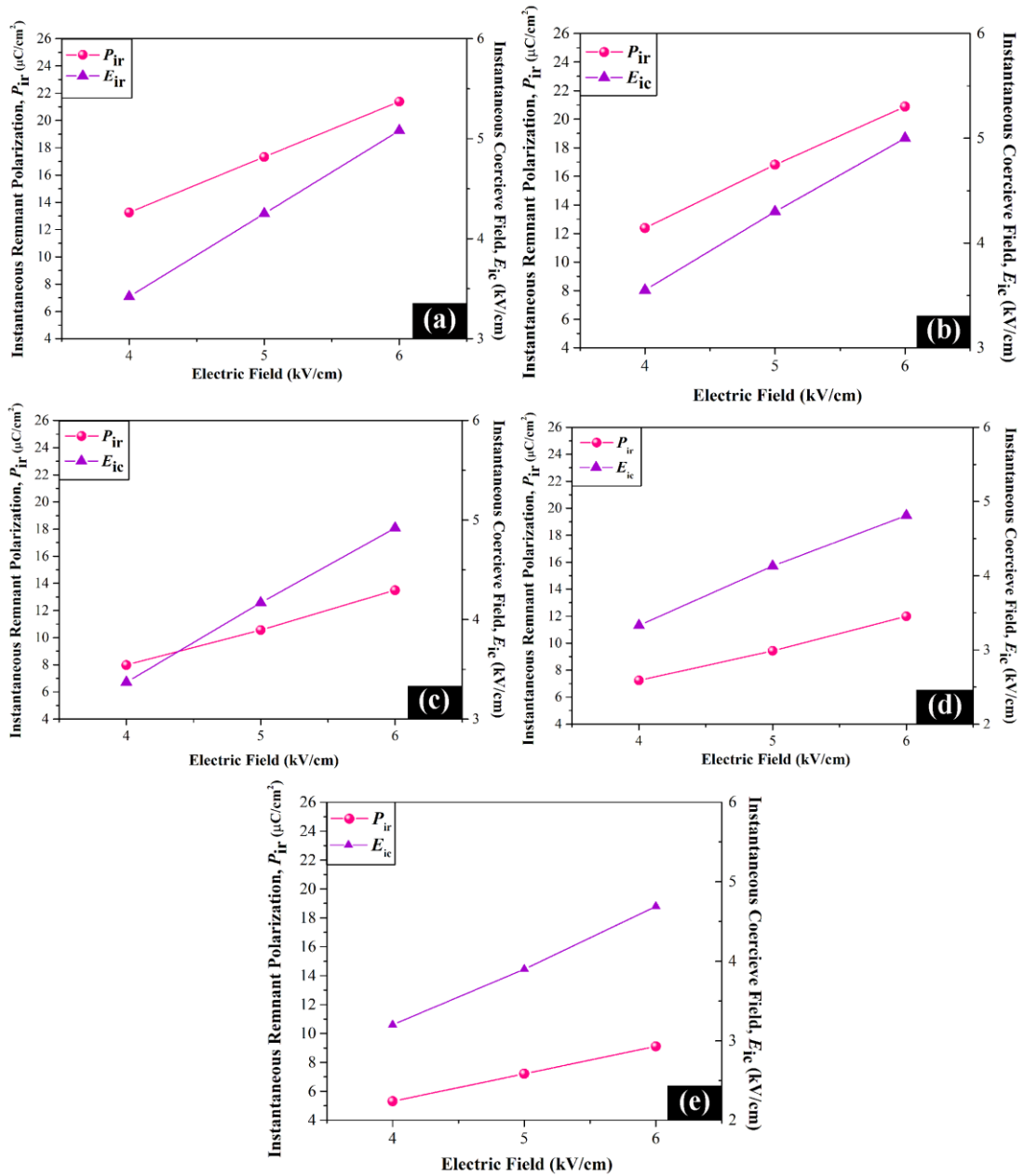
สำหรับจากการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริก ไร์สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยใช้เซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริก ไร์สารตะกั่วที่ใช้คือ $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-0.06\text{BaTiO}_3$ (BNT-BT) ปริมาณ 50% โดยปริมาตรผสม กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ PVDF 0%, 1%, 3%, 5% และ 7% โดยปริมาตร ที่ความถี่ 0.2 Hz ภายใต้สนามไฟฟ้า 4 kV/cm – 6 kV/cm ที่อุณหภูมิห้องแสดงดังรูปที่ 5.7 พบว่าวงวนฮิสเทอรีซิสมีลักษณะไม่อ้อมตัวเช่นเดียวกับที่ไม่มีการผสม PVDF ดังนั้นจึงขอยืนยันค่าโพลาริเซชันคงค้างในวัสดุผสมที่มีลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสนี้เป็น Instantaneous remnant polarization (P_{ir}) และสนามไฟฟ้าหักล้างเป็น Instantaneous coercive field (E_{ic})

นอกจากนี้เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้ากับระบบสูงขึ้นจะทำให้วงวนฮิสเทอรีซิสของวัสดุผสม มีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามการแทนที่ PVDF 0%, 1%, 3%, 5% และ 7% โดยปริมาตรในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้วงวนฮิสเทอรีซิสเล็กลงและยังไม่พบความอ้อมตัวของวงวนฮิสเทอรีซิส อาจจะเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ให้แต่ละระบบยังไม่เพียงพอที่จะทำให้โดเมนมีสภาพการโพลาริเซชันในทิศทางเดียวกันทั้งหมด และการที่จะทำให้เฟสของ PVDF มีสภาพการโพลาริเซชันในทิศทางเดียวกันหมดจะต้องอาศัยสนามไฟฟ้าสูงถึง 2 MV/cm [80] โดยรูปที่ 5.8 แสดงค่า P_{ir} และ E_{ic} ของทุกอัตราส่วนผสมพบว่าค่า P_{ir} และ E_{ic} มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าที่ให้กับระบบเช่นกัน

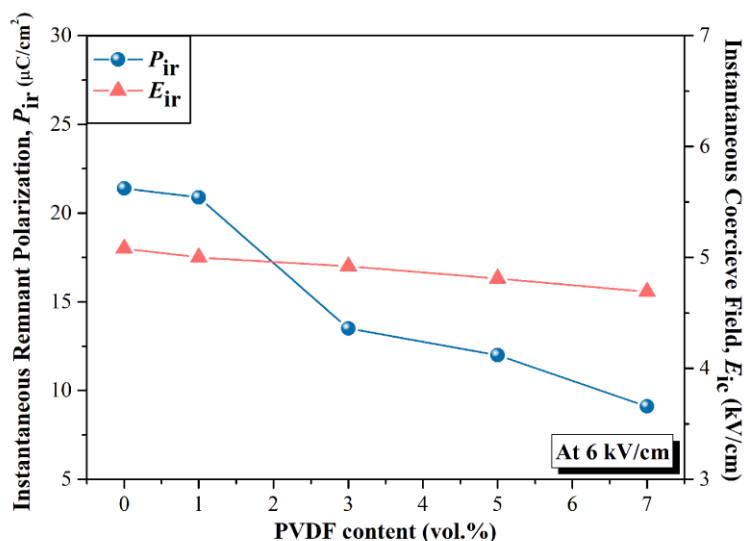
เมื่อพิจารณาผลของปริมาณ PVDF ต่อค่าโพลาริเซชันคงค้าง และสนามไฟฟ้าหักล้างของวัสดุผสมเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกไร์สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ภายใต้สนามไฟฟ้า 6 kV/cm (รูปที่ 5.9) พบว่าการแทนที่ PVDF ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้นจาก 1% โดยปริมาตร เป็น 7% โดยปริมาตร ทำให้ค่า P_{ir} ต่ำลงจาก $21.39 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ เป็น $9.11 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ (ภายใต้สนามไฟฟ้า 6 kV/cm) เนื่องจาก PVDF มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่น้อยมาก โดยมีค่าโพลาริเซชันคงค้างที่ $0.13 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ภายใต้การให้สนามไฟฟ้า 35 kV/cm [80] นอกจากนี้เมื่อมีการแทนที่ PVDF ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในระบบที่ใช้ลดลง ดังนั้นปริมาณไอออนตัวนำที่ทำให้เกิดค่าการสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) น้อยลงด้วย ดังนั้นเมื่อมีการแทนที่ PVDF ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้นจึงส่งผลให้วัสดุผสมมีค่า P_{ir} ต่ำลง นอกจากนี้การแทนที่ PVDF ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากพบค่า E_{ic} ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 5.7 ผลของสนามไฟฟ้าต่อวงวนฮีสเทอรีซิสของวัสดุผสมเซรามิกไฟอโรอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ที่ (a) 0% PVDF, (b) 1% PVDF, (c) 3% PVDF, (d) 5% PVDF และ (e) 7% PVDF



รูปที่ 5.8 ผลของสนามไฟฟ้าต่อค่าโพลาริเซชันคงค้าง และสนามไฟฟ้าหักล้างของวัสดุผสม เซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ที่ (a) 0% PVDF, (b) 1% PVDF, (c) 3% PVDF, (d) 5% PVDF และ (e) 7% PVDF



รูปที่ 5.9 ผลของปริมาณ PVDF ต่อค่าโพลาริเซชันคงค้าง และสนามไฟฟ้าหักล้างของวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ภายใต้สนามไฟฟ้า 6 kV/cm

5.3 ผลการวัดสัญญาณการตอบสนองของวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3

สำหรับการทดสอบสัญญาณของชิ้นงานที่ไม่ได้ฝังในมอร์ตาร์ ชิ้นงานวัสดุผสมเซรามิกไพโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ที่ผ่านการทำขั้ว (poling) จะมีค่า d_{33} แสดงดังตารางที่ 5.1 และถูกติดบนเครื่องสั่นสะเทือนที่ความถี่ 60 Hz (SHINKO ELECTRIC CO. LTD.) แล้ววัดสัญญาณด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Rigol DS1074Z oscilloscope) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.10

ตารางที่ 5.1 แสดงค่า d_{33} ของชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบชิ้นงานแบบไม่ได้ฝังในมอร์ตาร์

	30BNT-BT/70PC	40BNT-BT/60PC	50BNT-BT/50PC	60BNT-BT/40PC
d_{33} (pC/N)	23	31	42	49

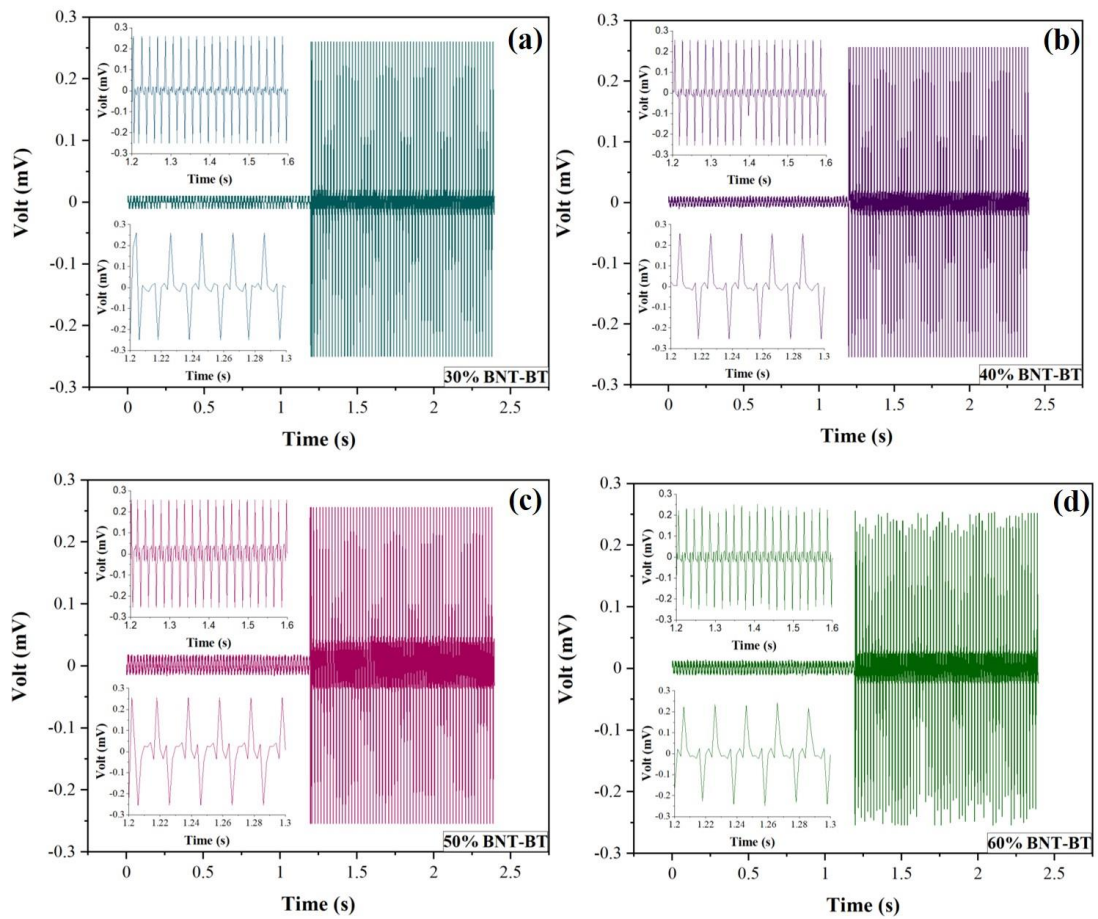
จากรูปที่ 5.10 เมื่อทำการเชื่อมต่อชิ้นงานกับเครื่องวัดสัญญาณออสซิลโลสโคปแล้วเครื่องออสซิลโลสโคปสามารถวัดสัญญาณในช่วงแรก (ช่วงเวลา 0-1.2 วินาที) จากชิ้นงานโดยที่ยัง

ไม่ได้ทำการเปิดเครื่องสั่นสะเทือน แต่สัญญาณที่วัดได้มีค่าไม่สูงมากนัก อาจเกิดจากสัญญาณรบกวน เมื่อทำการเปิดเครื่องสั่นสะเทือนที่ความถี่ 60 Hz (SHINKO ELECTRIC CO. LTD.) จะพบว่าสัญญาณที่วัดได้จากวัสดุผสมมีค่าสูงขึ้นและชัดเจนมากยิ่งขึ้น แต่ยังมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น เนื่องจากความไม่สมบูรณ์บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสซีเมนต์และเฟสเซรามิกในวัสดุผสมทำให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานเชิงกลต่ำลง [76] และพบว่าปริมาณเซรามิกที่สูงขึ้นไม่มีผลต่อค่าความต่างศักย์ของสัญญาณที่วัดได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเซรามิกสูงขึ้นจนถึง 60%BNT-BT จะสังเกตเห็นว่าลักษณะของสัญญาณไม่สม่ำเสมอ อาจเนื่องมาจากที่ปริมาณเซรามิกยิ่งมากขึ้นพื้นผิวรอยต่อระหว่างเฟสซีเมนต์และเฟสเซรามิกมีมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานเชิงกลยิ่งต่ำลงและไม่สม่ำเสมอ

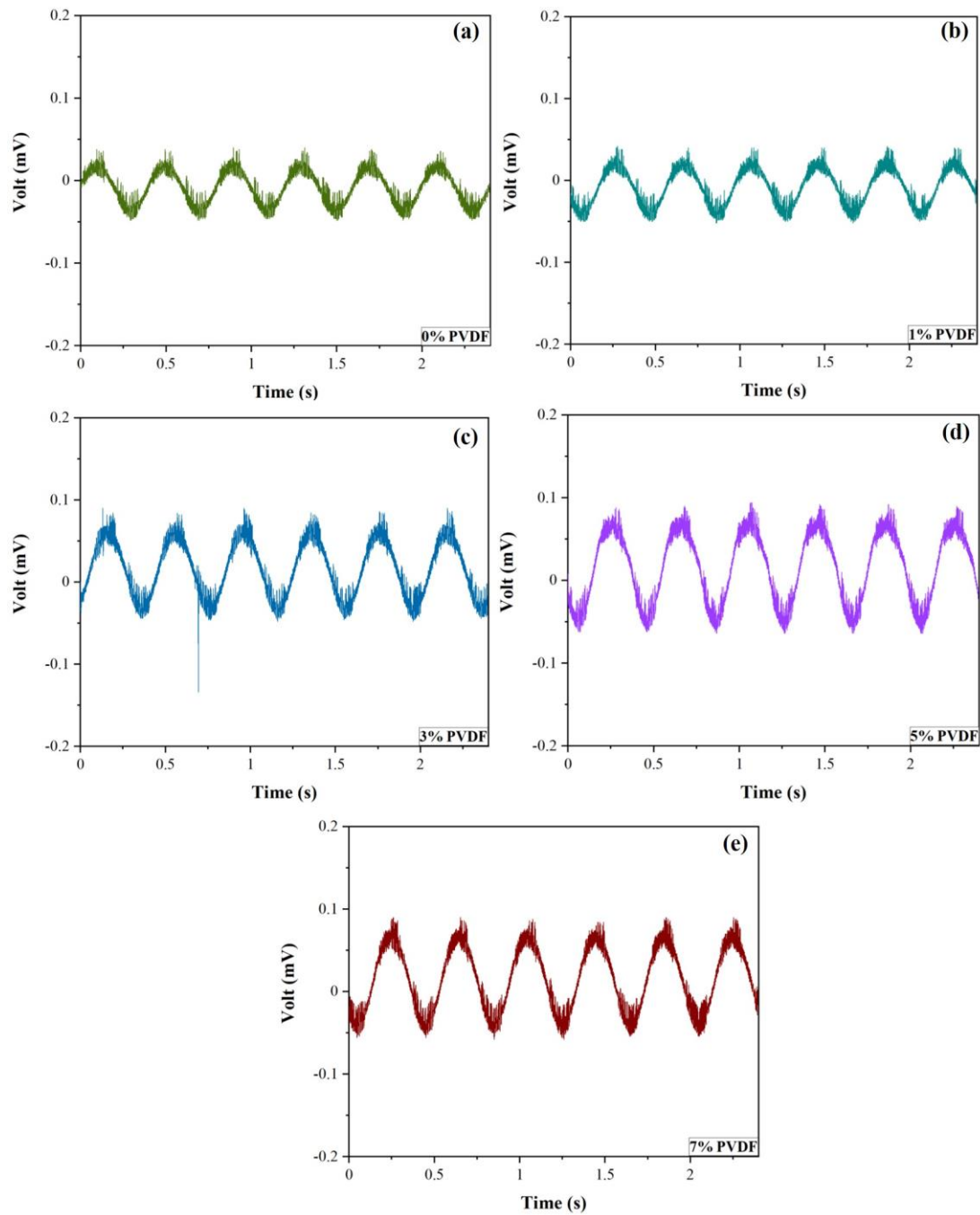
สำหรับการทดสอบสัญญาณของชิ้นงานวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ที่ผ่านการทำขั้ว (poling) จะมีค่า d_{33} แสดงดังตารางที่ 5.2 แล้วถูกฝังในมอร์ตาร์ วัดสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการนำตุ้มน้ำหนัก 200 g ปล่อยลงไปในผิวชิ้นงานมอร์ตาร์ด้านที่ฝังวัสดุผสมเซรามิกไพโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ห่างจากผิว 1 cm ที่ความสูง 20 cm ซึ่งพบว่าสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นค่อนข้างมากเนื่องจากในมอร์ตาร์มีความไม่สมบูรณ์ของพื้นผิวรอยต่อระหว่างอนุภาคของทรายและเฟสซีเมนต์อยู่มาก ดังนั้นทำให้การส่งผ่านพลังงานเชิงกลไปเป็นสัญญาณเชิงไฟฟ้าไม่เด่นชัด จึงไม่มีพิกของสัญญาณทางไฟฟ้าระหว่างการปล่อยลูกตุ้มออกมาได้อย่างชัดเจนและไม่สามารถแยกได้ทั้งวัสดุผสมที่มีและไม่มีเฟสของ PVDF และเมื่อสังเกตสัญญาณที่เกิดจากวัสดุผสมที่เฟส PVDF สัญญาณที่ได้รับรวมถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมาค่าสูงขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากพื้นผิวรอยต่อระหว่างเฟสต่างๆเพิ่มมากขึ้น ความไม่สมบูรณ์ของผิวรอยต่อที่เกิดขึ้น ส่งผลให้สัญญาณรบกวนมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.11

ตารางที่ 5.2 แสดงค่า d_{33} ของชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบชิ้นงานแบบฝังในมอร์ตาร์

	0% PVDF	1% PVDF	3% PVDF	5% PVDF	7% PVDF
d_{33} (pC/N)	41	44	48	60	56



รูปที่ 5.10 สัญญาณการตอบสนองของวัสดุผสมเซรามิกโพซิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/
PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ที่ถูกติดบนเครื่องสั่นสะเทือนที่ความถี่ 60 Hz



รูปที่ 5.11 สัญญาณการตอบสนองของวัสดุผสมเซรามิกไฟอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์
ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ที่ถูกฝังในมอร์ตาร์

6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเพียโรอิเล็กทริก และสมรรถนะของวัสดุผสมเซรามิกโพไลโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสภาพที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1 ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเซรามิกโพไลโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ในทุกอัตราส่วนผสมที่ทดลองมีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างคอนกรีตพื้นฐานที่มีค่ากำลังอัดประมาณ 22.2-41.2 MPa ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงจะสามารถรับแรงได้เทียบเท่ากับโครงสร้างคอนกรีตพื้นฐาน

6.2 เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเซรามิก BNT-BT ในวัสดุผสมเซรามิกโพไลโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว BNT-BT/ซีเมนต์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ในวัสดุผสม จาก 30% โดยปริมาตร เป็น 60% โดยปริมาตร ทำให้ค่า Instantaneous remnant polarization P_r สูงขึ้นจาก $14.77 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ เป็น $22.36 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ

6.3 เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ PVDF ในวัสดุผสมเซรามิกโพไลโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว BNT-BT/ซีเมนต์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ทำให้วงวนฮีสเทอรีซิสเล็กลง และยังไม่พบความอึดตัวของวงวนฮีสเทอรีซิส อาจจะเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ให้แต่ระบบยังไม่เพียงพอที่จะทำให้โดเมนมีสภาพการโพลาไรเซชันในทิศทางเดียวกันทั้งหมด

6.4 สามารถวัดสัญญาณทางไฟฟ้าได้จากวัสดุผสมเซรามิกโพไลโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว BNT-BT/ซีเมนต์ ในระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 เมื่อติดบนติดบนเครื่องสั่นสะเทือนที่ความถี่ 60 Hz แต่ยังมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น เนื่องจากความไม่สมบูรณ์บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสซีเมนต์และเฟสเซรามิกในวัสดุผสม

6.5 สัญญาณที่เกิดขึ้นจากการนำตุ้มน้ำหนัก 200 g ปล่อยลงไปในผิวชั้นงานมอร์ตาร์ด้านที่ฝังวัสดุผสมเซรามิกโพไลโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ห่างจากผิว 1 cm ที่ความสูง 20 cm พบว่ามีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นค่อนข้างมากเนื่องจากในมอร์ตาร์

ตัวมีความไม่สมบูรณ์ของพื้นผิวรอยต่อระหว่างอนุภาคของทรายและเฟสซีเมนต์อยู่มาก ดังนั้นทำให้การส่งผ่านพลังงานเชิงกลไปเป็นสัญญาณเชิงไฟฟ้าไม่เด่นชัด

7. ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองที่ได้วิจัยพบว่ายังมีปัญหาและข้อสงสัยที่น่าสนใจที่ต้องการศึกษาเพิ่มเติม เช่น

- 7.1 ควรออกแบบและศึกษาการสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการนำตัมน้ำหนักปล่อยลงไปบนผิวชั้นงานมอร์ตาร์ด้านที่ฝังวัสดุผสมเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ในรูปแบบต่างๆ และอาจจะเพิ่มจำนวนวัสดุผสมที่ฝังลงไปมอร์ตาร์เนื่องจากผลการทดลองที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่จะพัฒนาให้ดีขึ้นต่อไปได้
- 7.2 ควรศึกษาการเติมเฟสที่สามอื่นๆ ในวัสดุผสมเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อพัฒนาสมบัติให้ดีขึ้น

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] K.L. Rens, T.J. Wipf, F.W. Klaiber, Review of nondestructive evaluation techniques of concrete structure, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1997; 11 (4): 152-160.
- [2] K.K. Tseng, L. Wang, Structural health monitoring using smart piezoelectric material. *Proceedings of 2004 International ANSYS Conference Held in Pittsburgh Hilton and Towers, Pittsburgh, PA, United States on 24-26 May 2004*.
- [3] K.K. Tseng, L. Wang, Smart piezoelectric transducers for in situ health monitoring of concrete, *Smart Materials and Structures*, 2004; 13 (5): 1017-1024.
- [4] S.C. Mukhopadhyay, I. Ihara, *Sensors and technologies for Structural Health Monitoring: A Review, New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring, Lecture Notes in Electrical Engineering Volume 96*, India: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [5] A. Ghobarah, M. Saatcioglu, I. Nistor, The impact of the 26 December 2004 earthquake and tsunami on structures and infrastructure, *Engineering Structures*, 2006; 28: 312-326.
- [6] S. Phantuwongraj, M. Choowong, F. Nanayama, K.I. Hisada, P. Charusiri, V. Chutakositkanon, S. Pailoplee, A. Chabangbon, Coastal geomorphic conditions and styles of storm surge washover deposits from Southern Thailand, *Geomorphology*, 2013; 192: 43–58.
- [7] N. Kulprapha, P. Warnitchai, Structural health monitoring of continuous prestressed concrete bridges using ambient thermal responses, *Engineering Structures*, 2012; 40: 20-38.
- [8] S.F. Huang, M.M. Li, D.Y. Xu, M.J. Zhou, S.H. Xie, X. Cheng, Investigation on a kind of embedded AE sensor for concrete health monitoring, *Research in Nondestructive Evaluation*, 2013; 24: 202-210.
- [9] A. Behnia, H.K. Chai, T. Shiotani, Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 2014; 65: 282-302.
- [10] S.F. Huang, M. Li, Y. Xu, D. Xu, X. Xie, X. Cheng, Research on embedded sensors for concrete health monitoring based on ultrasonic testing, *Proceedings of 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures, Purdue University, West Lafayette, USA on 24-26 July 2014*.

- [11] A. Patjawit, W. Kanok-Nukulchai, Health monitoring of highway bridges based on a Global Flexibility Index, *Engineering Structures*, 2005; 27: 1385–1391.
- [12] Z. Li, D. Zhang, K. Wu, Cement-based 0–3 piezoelectric composites, *Journal of the American Ceramic Society*, 2002; 85: 305-313.
- [13] Z. Li, B. Dong, D. Zhang, Influence of polarization on properties of 0–3 cement-based PZT composites, *Cement and Concrete Composites*, 2005; 27: 27-32.
- [14] B. Dong, Z. Li, Cement-based piezoelectric ceramic smart composites, *Composites Science and Technology*, 2005; 65: 1363-1371.
- [15] S.F. Huang, J. Chang, F.T. Liu, L.C. Lu, Z.M. Ye, X. Cheng, Poling process and piezoelectric properties of lead zirconate titanate/sulphoaluminate cement composites. *Journal of Materials Science*, 2004; 39: 6975-6979.
- [16] S.F. Huang, J. Chang, L.C. Lu, F.T. Liu, Z.M. Ye, X. Cheng, Preparation and polarization of 0-3 cement based piezoelectric composites, *Materials Research Bulletin*, 2006; 41: 291-297.
- [17] C. Xin, S.F. Huang, J. Chang, Piezoelectric, dielectric, and ferroelectric properties of 0-3 ceramic/cement composites, *Journal of Applied Physics*, 2007; 101: 094110.
- [18] A. Chaipanich, Dielectric and piezoelectric properties of PZT–cement composites. *Current Applied Physics*, 2007; 7: 537-539.
- [19] S.F. Huang, L. Lingchao, C. Jun, X. Dongyu, L. Futian, C. Xin, Influence of ceramic particle size on piezoelectric properties of cement-based piezoelectric composites, *Ferroelectric*,. 2006; 332: 187-194.
- [20] N. Jaitanong, H.R. Zeng, G.R. Li, Q.R. Yin, R. Yimnirun, A. Chaipanich, Investigations on morphology and domain configurations in 0-3 lead magnesium niobate titanate-portland cement composites by SEM and PFM, *Ferroelectrics*, 2013; 455: 111-116.
- [21] N. Jaitanong, R. Rianyoi, R. Potong, R. Yimnirun, A. Chaipanich, Effects of PZT content and particle size on ferroelectric hysteresis behavior of 0–3 lead zirconate titanate—Portland cement composites, *Integrated Ferroelectrics*, 2009; 107: 43-52.
- [22] S. Song, Y. Hou, M. Guo, L. Wang, X. Tong, J. Wu, An investigation on the aggregate-shape embedded piezoelectric sensor for concrete structure health monitoring, *Construction and Building Materials*, 2017; 131: 57–65.
- [23] C. Pang, H. Pei, Z. Li, Performance investigation of cement-based laminated multifunctional magnetoelectric composites, *Construction and Building Materials*, 2017; 134: 585-593.

- [24] T. Takenaka, H. Nagata, Current status and prospects of lead-free piezoelectric ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, 2005; 25: 2693-2700.
- [25] E. Aksel, J.L. Jones, Advances in lead-free piezoelectric materials for sensors and actuators, *Sensors*, 2010; 10: 1935-1954.
- [26] P.K. Panda, Review: environmental friendly lead-free piezoelectric materials, *Journal of Materials Science*, 2009; 44: 5049-5062.
- [27] R. Rianyai, R. Potong, N. Jaitanong, R. Yimnirun, A. Chaipanich, Dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties of 0-3 barium titanate-Portland cement composites, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2011; 104: 661-666.
- [28] R. Potong, R. Rianyai, A. Chaipanich, Dielectric Properties of Lead-Free Composites from 0-3 Barium Zirconate Titanate-Portland Cement Composites, *Ferroelectrics Letters* 2011; 38: 18-23.
- [29] R. Potong, R. Rianyai, A. Ngamjarurojana, A. Chaipanich, Ferroelectric hysteresis properties of 0-3 lead-free barium zirconate-Portland cement composites, *Ferroelectrics Letters*, 2012; 39: 15-19.
- [30] R. Rianyai, R. Potong, A. Ngamjarurojana, A. Chaipanich, Influence of barium titanate content and particle size on electromechanical coupling coefficient of lead-free piezoelectric ceramic-Portland cement composites, *Ceramics International*, 2013; 39: S47-S51.
- [31] R. Potong, R. Rianyai, A. Ngamjarurojana, R. Yimnirun, R. Guo, A.S. Bhalla, A. Chaipanich, Acoustic and piezoelectric properties of 0-3 barium zirconate titanate-Portland cement composites-effects of BZT content and particle size, *Ferroelectrics*, 2013; 455: 69-76.
- [32] R. Potong, R. Rianyai, A. Ngamjarurojana, R. Yimnirun, R. Guo, A.S. Bhalla, A. Chaipanich, Effect of particle size on dielectric properties and hysteresis behavior of 0-3 barium zirconate titanate-Portland cement composites, *Integrated Ferroelectrics*, 2013; 148: 131-137.
- [33] S. Hunpratub, T. Yamwong, S. Sutham, S. Maensiri, P. Chindaprasirt, Effect of particle size on the dielectric and piezoelectric properties of 0-3 BCTZO/cement composites, *Ceramics International*. 2014; 40 (1): 1209-1213.
- [34] R. Rianyai, R. Potong, R. Yimnirun, A. Chaipanich, Effect of barium titanate particle size on electrical properties of 0-3 barium titanate-Portland cement composites, *Integrated Ferroelectrics*, 2014; 150: 147-154.

- [35] N. Jaitanong, R. Yimnirun, H.R. Zeng, G.R. Li, Q.R. Yin, A. Chaipanich, Piezoelectric properties of cement based/PVDF/PZT composites, *Materials Letters*, 2014; 130: 146–149.
- [36] R.J. Gregorio, M.J. Cestari, Effect of crystallization temperature on the crystalline phase content and morphology of poly(vinylidene fluoride), *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 1994; 32:859-70.
- [37] H. Kawai, The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride), *Japanese Journal of Applied Physics*, 1969; 8:975-976.
- [38] R.G. Kepler, Piezoelectricity, pyroelectricity and ferroelectricity in organic materials, *Annual Review of Physical Chemistry*, 1978; 29:497-518.
- [39] G.M. Sessler, Piezoelectricity in polyvinylidenefluoride, *Journal of the Acoustical Society of America*, 1981; 70(6):1596-1608.
- [40] A. Chiolerio, M. Lombardi, A. Guerriero, G. Canavese, S. Stassi, R. Gazia, C. Valentina, D. Manfredi, A. Chiodoni, A. Verna, M. Cocuzza, L. Montanaro, C.F. Pirri, Effect of the fabrication method on the functional properties of BaTiO₃: PVDF nanocomposites, *Journal of Materials Science*, 2013; 48:6943–6951.
- [41] J.C. Dias, D.C. Correia, A.C. Lopes, S. Ribeiro, C. Ribeiro, V. Sencadas, G. Botelho, J.M.S.S. Esperança, J.M. Laza, J.L. Vilas, L.M. León, S. Lanceros-Méndez, Development of poly(vinylidene fluoride)/ionic liquid electrospun fibers for tissue engineering applications, *Journal of Materials Science* 2016; 51:4442–4450.
- [42] C.M. Wu, M.H. Chou, Polymorphism, piezoelectricity and sound absorption of electrospun PVDF membranes with and without carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, 2016; 127:127-133.
- [43] A.J.J. Silva, C.R. Nascimento, M.F. da Costa, Thermomechanical properties and long-term behavior evaluation of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) exposed to bioethanol fuel under heating, *Journal of Materials Science*, 2016; 51:9074–9094.
- [44] B. Ma, J. Yang, Q. Sun, W. Jakpa, X. Hou, Y. Yang, Influence of cellulose/[Bmim]Cl solution on the properties of fabricated NIPS PVDF membranes, *Journal of Materials Science*, (2017) doi: 10.1007/s10853-017-1150-2.
- [45] S.B. Lang, S. Muensit, Review of some lesser-known applications of piezoelectric and pyroelectric polymers, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2006; 85:125-134.

- [46] P. Mishra, P. Kumar, Dielectric properties of 0.25(BZT–BCT)–0.75[(1-x)PVDF–xCCTO] (x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 and 0.1) composites for embedded capacitor applications, *Composites Science and Technology*, 2013; 88:26-32.
- [47] A. Chaipanich, N. Jaitanong, T. Tunkasiri, Fabrication and properties of PZT–ordinary Portland cement composites, *Materials Letters*, 2007; 61:5206-5208.
- [48] F. Wang, H. Wang, Y. Song, H. Sun, High piezoelectricity 0–3 cement-based piezoelectric composites, *Materials Letters*, 2012; 76:208–210.
- [49] R. Rianyai, R. Potong, A. Ngamjarurojana, A. Chaipanich, Microstructure and electrical properties of 0-3 connectivity barium titanate-Portland cement composite with 40% barium titanate content, *Ferroelectrics Letters Section*, 2016;43(1-3):59-64.
- [50] R. Potong, R. Rianyai, A. Ngamjarurojana, R. Yimnirun, R. Guo, A.S. Bhalla, A. Chaipanich, Thermal expansion behaviors of 0–3 connectivity lead-free barium zirconate titanate-Portland cement composites, *Ceramics International*, 2017; 43(1):S129-S135.
- [51] P. Chomyen, R. Potong, R. Rianyai, A. Ngamjarurojana, P. Chindaprasirt, A. Chaipanich, Microstructure, dielectric and piezoelectric properties of 0–3 lead free barium zirconate titanate ceramic-Portland fly ash cement composites, *Ceramics International*, 2018; 44:76-82.
- [52] A. Safari, Development of piezoelectric composites for transducers. *Journal de Physique III*, 1994;4:1129–1149.
- [53] M.H. Lee; A. Halliyal; R.E. Newnham, Poling studies of piezoelectric composites prepared by coprecipitated PbTiO_3 powder, *Ferroelectrics*, 1988; 87:71–80.
- [54] J. Suchanicz, K. Roleder, A. Kania, and J. Handerek, Electrostrictive strain and pyroeffect in the region of phase co-existence in $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$, *Ferroelectrics*, 1988; 7:107 -110.
- [55] M.S. Hagiye, I.H. Ismaizade, A.K. Abiyev, Pyroelectric properties of $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})\text{TiO}_3$ ceramics, *Ferroelectrics*, 1984; 56:215-217.
- [56] K.H. Lam, D.M. Lin, and H.L.W. Chan, Lead-free acoustic emission sensors, *Review of Scientific Instruments*, 2007; 78:115109.

- [57] T. Takenaka, K. Maruyama, K. Sakata, $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})\text{TiO}_3\text{-BaTiO}_3$ system for lead-free piezoelectric ceramics, Japanese Journal of Applied Physics, 1991; 30 (Part 1, No. 9B):2236-2239.
- [58] C. Xu, D. Lin, K.W. Kwok, Structure, electrical properties and depolarization temperature of $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3\text{-BaTiO}_3$ lead-free piezoelectric ceramics, Solid State Sciences, 2008; 10:934-940.
- [59] P. Yusong, S. Qianqian, C. Yan, Fabrication and mechanical properties of $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-BaTiO}_3$ lead-free piezoelectric ceramics, Ceramics – Silikáty, 2014; 58 (1):50-55.
- [60] A. Chaipanich, R. Rianyoi a , R. Potong , N. Jaitanong, P. Chindaprasirt, Compressive strength and microstructure of 0–3 lead zirconate titanate ceramic-Portland cement composites, Ferroelectrics, 2013; 457:53–61.
- [61] R. Rianyoi, R. Potong, A. Ngamjarrojana, A. Chaipanich, Poling effects and piezoelectric properties of PVDF-modified 0–3 connectivity cement-based/lead-free $0.94(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ piezoelectric ceramic composites, Journal of Materials Science, 2018; 53(1):345-355.
- [62] H. Sohn, C. Farrar, F. Hemez, J.J. Czarnecki, A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996–2001, Los Alamos National Laboratory, USA, 2003.
- [63] D.W. Hobbs, Concrete deterioration: causes, diagnosis, and minimising risk, International Materials Reviews, 2001; 46 (3):117–144.
- [64] H. Abdel-Jaber, B. Glisic, Structural health monitoring methods for the evaluation of prestressing forces and prerelease cracks, Frontiers in Built Environment, 2016; 2:20.
- [65] J.M. Brownjohn, Structural health monitoring of civil infrastructure, Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2007; 365 (1851):589–622.
- [66] M. Sun, W.J. Staszewski, R.N. Swamy, Smart sensing technologies for structural health monitoring of civil engineering structures, Advances in Civil Engineering, 2010; 2010:13.

- [67] J.M. López-Higuera, L. Rodriguez Cobo, A. Quintela Incera, A. Cobo, Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring, *Journal of Lightwave Technology*, 2011; 29 (4):587–608.
- [68] T. Antonella, *Photonics for Safety And Security*, World Scientific Publishing, USA, 2013.
- [69] ASTM C597-16, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [70] J.P. Lynch, K.J. Loh, A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring, *Shock and Vibration Digest*, 2006; 38 (2):91–130.
- [71] S. Taheri, A review on five key sensors for monitoring of concrete structures, *Construction and Building Materials*, 2019; 204:492–509.
- [72] M. Enckell, Lessons Learned in Structural Health Monitoring of Bridges Using Advanced Sensor Technology, Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2011.
- [73] C. E. French, C. K. Shield, H. K. Stolarski, B. D. Hedegaard, B. J. Jilk, Instrumentation, Monitoring, and Modeling of the I-35W Bridge, Report MN/RC 2014–39, Monitoring Instrumentation of I35W Bridge, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, 2012.
- [74] B. D. Hedegaard, Modeling and Monitoring the Long-term Behavior of Posttensioned Concrete Bridges, University Of Minnesota, 2014.
- [75] S. Yan, H. Ma, P. Li, G. Song, J. Wu, Development and Application of a Structural Health Monitoring System Based on Wireless Smart Aggregates, *Sensors*, 2017; 17:1641.
- [76] M. Lezgy-Nazargah, S. Saeidi-Aminabadi, M.A. Yousefzadeh, Design and fabrication of a new fiber-cement/piezoelectric composite sensor for measurement of inner stress in concrete structures, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2019; 19:405 – 416.
- [77] K. Janković, D. Nikolić, D. Bojović, L. Lončar, Z. Romakov, The estimation of compressive strength of normal and recycled aggregate concrete, *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Architecture and Civil Engineering*, 2011; 9(3):419 – 431.
- [78] S. Huang, Z. Ye, Y. Hu, J. Chang, L. Lu, X. Cheng, Effect of forming pressures on electric properties of piezoelectric ceramic/sulphoaluminate cement composites, *Composites Science and Technology*, 2007; 67:135-139.

- [79] C.J. Huang, K. Li, S.Y. Wu, X.L. Zhu, X.M. Chen, Variation of ferroelectric hysteresis loop with temperature in $(\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x})\text{Nb}_2\text{O}_6$ unfilled tungsten bronze ceramics, Journal of Materiomics, 2015; 1:146-152.
- [80] Y. Xu, Ferroelectric Materials and Their Applications (North-Holland, 1991) 330–339.

ผลงาน (Output) ที่ได้จากโครงการ

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

1. R. Rianyoj, R. Potong, A. Ngamjarurojana, A. Chaipanich, "Acoustic impedance, mechanical, and piezoelectric properties of 0-3 connectivity lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 /Portland cement composites", Journal of Materials Science: Materials in Electronics (อยู่ระหว่างการดำเนินการส่ง)

2. R. Rianyoj, R. Potong, A. Ngamjarurojana, A. Chaipanich, "Enhanced ferroelectric and induced strain behavior of PVDF modified 0-3 lead-free $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 piezoelectric ceramic/cement composites", Journal of Materials Science (อยู่ระหว่างการดำเนินการส่ง)

การนำเสนอผลงานวิชาการในงานประชุม

- ชื่อเรื่อง Mechanical, Dielectric and Piezoelectric Properties of 0 -3 Connectivity Lead-Free Piezoelectric Ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 /Portland Cement Composites

งานประชุม ISAF-FMA-AMF-AMEC-PFM Joint Conference (IFAAP 2018)

วันที่ 27 เดือน พฤษภาคม - 1 เดือน มิถุนายน 2561

สถานที่ International Conference Center at Hiroshima, Hiroshima, Japan
- ชื่อเรื่อง Ferroelectric and induced strain behavior of PVDF modified 0-3 connectivity cement-based/lead-free $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 piezoelectric ceramic composites

งานประชุม The 2nd Materials Research Society of Thailand International Conference (MRS-Thailand 2019)

วันที่ 10-12 เดือน กรกฎาคม 2562

สถานที่ The Zign Hotel, Pattaya, Thailand

ภาคผนวก

งานวิจัยที่อยู่ระหว่างการดำเนินการส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

- 1 -

Acoustic impedance, mechanical, and piezoelectric properties of 0-3 connectivity lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 /Portland cement composites

R. Rianyai,^{1,*} R. Potong,² A. Ngamjarujana,¹ and A. Chaipanich¹

¹Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University,
Chiang Mai 50200, Thailand

²Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

Abstract

In this research, lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 (BNBT)/Portland cement (PC) composites have been fabricated for use as sensor in structural health monitoring applications. BNBT ceramic particles have been incorporated into Portland cement with ceramic particles content of 30-60 vol.% to form 0-3 connectivity pattern (BNBT/PC) composite. The compressive strength, acoustic impedance, dielectric and piezoelectric properties of the composites were investigated as a function of ceramic content. The results indicated that the compressive strength was found in the region of 29.22-35.65 MPa for these BNBT-PC composites. The BNBT ceramic content of $\approx$ 40-60 vol.% are the optimal BNBT contents for acoustic impedance matching between composites and concrete structure. The dielectric constant value of composites increased as BNBT ceramic content increased while the dielectric

loss value reduced with higher BNBT ceramic content. Moreover, composite with BNBT ceramic content of 60% vol.% exhibited highest piezoelectric coefficient (d_{33}) value of 42 pC/N. The piezoelectric voltage coefficient of composites was found to be in the range of 13.96 mV-m/N to 17.00 mV-m/N. Furthermore, the dielectric constant of composites was close to the cube model. According to the results, it is noted that these composites have good compatibility with concrete structure and has potential for use as sensor in structural health monitoring applications.

Keywords: B. Composites; C. Mechanical properties; C. Dielectric properties; C. Piezoelectric properties; Portland cement.

* Corresponding author's e-mail: r.rianyoi@gmail.com;
rattiyakorn.rianyoi@cmu.ac.th

1. Introduction

Two phases of piezoelectric ceramic/cement based composites incorporating lead-based piezoelectric ceramic as active phase have been extensively developed and studied for use as real-time structural health monitoring in concrete structure due to its compatibility with concrete structure, good dielectric and piezoelectric properties [1-4]. However, lead-based piezoelectric ceramic which contain lead oxide can be vaporized and contaminated during calcination and sintering processes and cause environmental pollution [5-6]. For this reason, the research topics of lead-free piezoelectric ceramic is now very active [5-6].

The newly developed lead-free piezoelectric ceramic/cement-based composites such as lead-free piezoelectric ceramic (such as barium titanate (BT), Barium zirconate titanate (BZT) and $\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_3$ (BCTZO) as active phase and Portland cement as matrix phase with 0-3 connectivity pattern have been developed [7-15]. The 0-3 connectivity pattern of composites is easy to fabricate and amenable to mass production [16-17]. These works, [7-15] concluded that 0-3 connectivity lead free piezoelectric ceramic/cement-based composites possessed good piezoelectric properties and are compatible with concrete structure (thermal expansion matching and acoustic impedance value close to concrete structure of $\approx 9 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ [1]). Nevertheless, with high dielectric constant of barium titanate based piezoelectric ceramic in composites, these composite have low piezoelectric voltage coefficient (g_{33}). $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ (BNT) is one of the good alternative lead-free piezoelectric ceramic with large remnant polarization (P_r) of $38 \text{ } \mu\text{C}/\text{cm}^2$ and high piezoelectric voltage coefficient (g_{33}) which is a key parameter requirement for being an appropriate sensing of materials as sensor applications. It also has high electromechanical coupling coefficient [18-19].

However, BNT piezoelectric ceramic has a high leakage current during poling due to its exhibit high coercive field (E_c) = 7.3 MV/m and lower piezoelectric coefficient (d_{33}) compared with lead-based piezoelectric ceramic [18-20] which caused incomplete switching of polarization in poling process. Therefore, $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 (BNBT) piezoelectric ceramic have been developed in order to improve the piezoelectric properties of this ceramic [5-6, 21]. $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ doped with BaTiO_3 effectively decreases the coercive field (E_c) and increases the piezoelectric coefficient (d_{33}), while the piezoelectric voltage coefficient (g_{33}) is still maintained high value,

BNBT also has good mechanical properties (compressive strength = 210 MPa [22]) [5-6, 21-22].

In this research, lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 (BNBT)/Portland cement (PC) composites have been fabricated for use as sensor in real-time structural health monitoring applications. BNBT ceramic particles have been incorporated into Portland cement with ceramic particles content of 30-60 vol.% to form 0-3 connectivity pattern (BNBT-PC) composite. The effect of BNBT ceramic content on acoustic impedance, compressive strength, dielectric and piezoelectric properties were investigated. Moreover, the cube model was used to calculate dielectric constant of the composites and compared with the experimental results.

2. Experimental

2.1 Fabrication of 0-3 connectivity lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 (BNBT)/Portland cement (PC) composites

The 0-3 connectivity lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 (BNBT)/Portland cement (PC) composites were fabricated using BNBT piezoelectric ceramic of median particle size $\approx 425\mu\text{m}$ at 30%, 40%, 50% and 60% by volume. The BNBT piezoelectric ceramic and normal ASTM type I Portland cement (PC) were mixed together and axially pressed into mould of ≈ 10 mm in diameter and ≈ 20 mm in thickness to form composites for the compressive strength investigation. In order to investigate the dielectric and piezoelectric properties, BNBT piezoelectric ceramic and PC were mixed together and axially pressed into disk samples of ≈ 15 mm in diameter and ≈ 1.5 mm in thickness to form composites. Afterwards, all composites were kept in a curing chamber with 98% RH at 60 °C for 3 days.

2.2 Testing Methods

The microstructure of 0-3 connectivity lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNBT)/Portland cement (PC) composites was investigated using scanning electron microscopy (LV-Scanning Electron Microscope: JSM -IT300LV). The density of the composites was measured using the Archimedes method and the experimental values of the acoustic impedance (Z_c) were obtained by multiplying the densities (ρ_c) with the velocities (V_c). V_c were measured by TM-8812 ultrasonic thickness meter. The acoustic impedance (Z_c) equation can be written as;

$$Z_c = \rho_c \cdot V_c \quad (1)$$

For compressive strength tests (S-series; Hounsfield Test Equipment, Surrey, UK) were carried out after the samples were subjected to curing for 3 days. Moreover, for dielectric constant, dielectric loss and piezoelectric coefficient (d_{33}) measurement, the composites were electrode with high purity silver paint on both sides of the samples. An impedance meter (Hewlett Packard, model 4276A) was used to obtain the capacitance and the dielectric tangent loss ($\tan\delta$) of the composites at room temperature with frequency of 1 kHz. The dielectric constant (ϵ_r) was then calculated from the equation;

$$\epsilon_r = \frac{Ct}{\epsilon_0 A} \quad (2)$$

where C is the sample capacitance, t is the thickness, ϵ_0 is the permittivity of free space constant (8.854×10^{-12} F/m), and A is the electrode area. In order to investigate the influence of BNBT ceramic content on piezoelectric coefficient of composites, the composites were poled in a stirred silicone oil bath at a poling time of 45 min under electrical poling field of 1.5 kV/mm and the poling temperature was 80°C. Piezoelectric

coefficient (d_{33}) was measured using a d_{33} meter (piezometer System Model PM25). Moreover, the piezoelectric coefficient (g_{33}) of composites was calculated using the following equation:

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (3)$$

3. Results and discussion

3.1 Microstructure characterization

The schematic of the 0-3 connectivity and of lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 (BNBT)/Portland cement (PC) composites are shown in Fig. 1 (a). In two phases composite with 0-3 connectivity, the BNBT ceramic particles are not in contact with each other while the cement matrix phase is self-connect. Moreover, the scanning electron microscopy (SEM) image of fracture surfaces and the Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) spectrums of BNBT/ PC composites are shown in Fig. 1(b). It can be seen that the BNBT piezoelectric ceramic particle surrounded by dense hydration products of Portland cement phase such as calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium hydroxide (CH) phases. The EDX spectrums of the composite shows main elements of BNBT piezoelectric ceramic (spectrum 1) are bismuth; Bi, sodium; Na, barium; Ba, titanium; Ti and oxygen; O. Moreover, calcium; Ca, silicon; Si and Oxygen; O were detected as the main elements of cement hydration product such as calcium silicate hydrates (CSH) and calcium hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (spectrum 2).

- 7 -

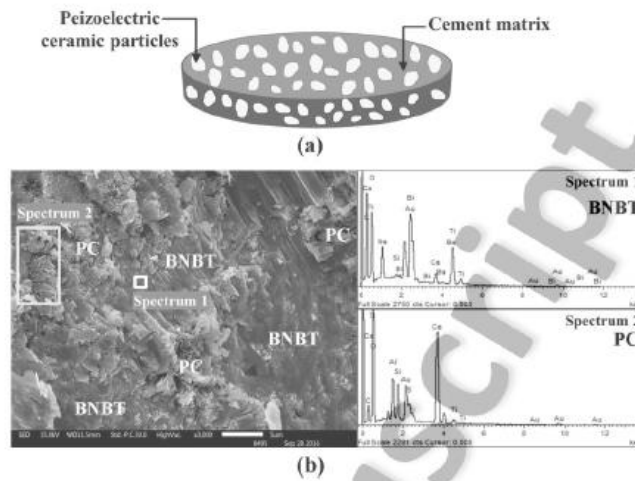


Fig. 1 (a) Schematic representation of 0-3 connectivity pattern and (b) SEM image (Left) and EDX spectrums (Right) of 0-3 connectivity BNBT/PC composites.

3.2 Density and acoustic impedance

The density (ρ_c) and acoustic impedance (Z_c) of lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNBT)/Portland cement (PC) composites are shown in Fig. 2. As the BNBT piezoelectric ceramic content of composites increases, density (ρ_c) and acoustic impedance (Z_c) increase as shown in Fig.2. The ρ_c of the composites increases linearly with the increase of BNBT piezoelectric ceramic content because of the denser of BNBT ceramic phase when compared to the pure Portland cement phase. Moreover, the acoustic impedance is obtained by multiplying the density and the velocity of composites; therefore, the net result is an increase in Z_c of composites. In addition, it is observed that at BNBT ceramic content of 30% – 50% by volume, the

composite matched acoustic impedance with concrete structure ($Z_c \approx 9 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ [1]).

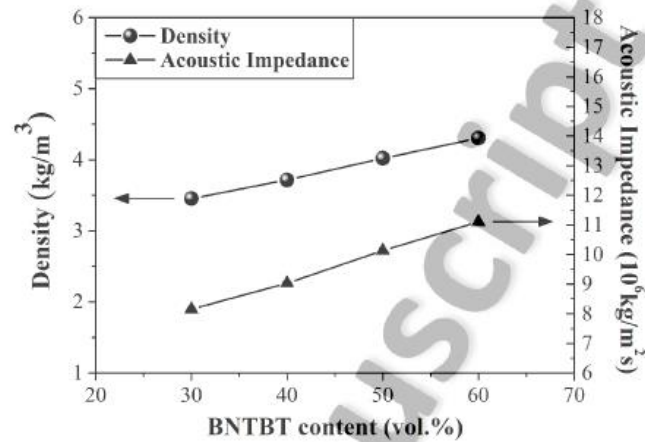


Fig. 2 Density (ρ_c) and acoustic impedance (Z_c) of 0-3 connectivity BNTBT/PC composites.

3.3 Mechanical properties

Fig. 3(a) shows the schematic diagram of compressive strength testing and compressive strength results of lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 (BNTBT)/Portland cement (PC) composites. From Fig. 3(b), it is observed that, compressive strength of lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 (BNTBT)/Portland cement (PC) composites increases with increasing content of BNTBT ceramic. The increase in compressive strength of 0-3 connectivity BNTBT/PC composite with increase of BNTBT ceramic content may be attributed to high compressive strength of BNTBT ceramic phase (210 MPa) [22]. The increase is similar to the results can be observed by Jaitanong *et al.* [23] for composite made of PZT particles

and cement matrix phase. Moreover, these mechanical strengths of 0-3 connectivity BNBT/PC composite are similar to those used in normal concrete structure ($\approx 22.2\text{--}41.2$ MPa for 3 days curing [24]), and therefore these composites will be able to resist the same mechanical loading as normal concrete structure.

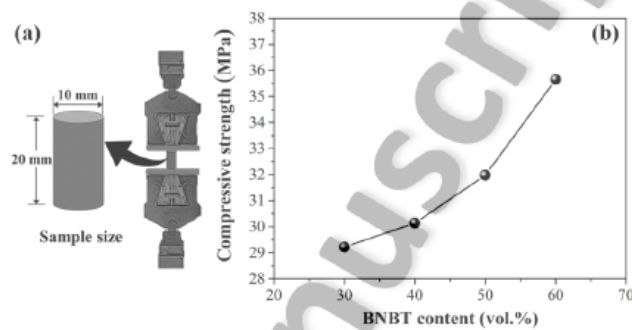


Fig. 3 (a) Schematic diagram of compressive strength testing and (b) effect of BNBT ceramic content on compressive strength of 0-3 connectivity BNBT/PC composites.

3.4 Dielectric properties

The dielectric constant (ϵ_r) and dielectric tangent loss ($\tan\delta$) as a function of the BNBT piezoelectric ceramic content 0-3 connectivity BNBT/PC composites is shown in Fig. 4(a). From Fig. 4(a), it is clear that the dielectric constant increases with increasing BNBT ceramic content due to the ϵ_r value of BNBT ($\epsilon_r = 2210$ at 1 kHz) ceramic pure is higher than the ϵ_r value of Portland cement ($\epsilon_r = 58$ at 1kHz), this may be attributed to the effect of sum properties of two-phases [25]. In addition, the decrease in the dielectric tangent loss ($\tan\delta$) is related to decrease of the content of Portland cement phase, The

reason due to the conductive effect from conduction ion such as Ca^{2+} , OH^- and Al^{3+} in Portland cement phase would contribute the dielectric loss [2].

Moreover, the cube model for dielectric constant [26] was also calculated and plotted with dielectric constant results in Fig 4(b). The dielectric constant of 0-3 connectivity is seen closely fit to cube model prediction, which mean that the BNBT ceramic particles are well packed and dispersed in a continuous cement matrix.

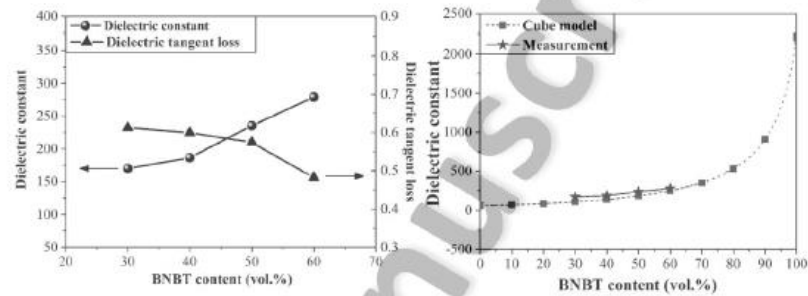


Fig. 4 (a) Effect of BNBT ceramic content on dielectric constant (ϵ_r) and dielectric tangent loss ($\tan\delta$) and (b) Comparison between experimental and cube model values for dielectric constants with different BNBT ceramic content of 0-3 connectivity BNBT/PC composites

3.5 Piezoelectric properties

The effect of BNBT ceramic content on the piezoelectric coefficient (d_{33}) of 0-3 connectivity BNBT/PC composites is plotted in Fig. 5. It can be seen that the d_{33} values increases from 21 pC/N for 30 vol.% of BNBT to 42 pC/N for 60 vol.%. Moreover, the d_{33} values of 0-3 connectivity BNBT/PC composites are higher than that of 0-3 connectivity other lead-free such as barium titanate (BT) –cement composites, Barium

zirconate titanate (BZT)-cement composites and $\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_3$ (BCTZO)-cement composites at the same ceramic volume content [7, 11, 13].

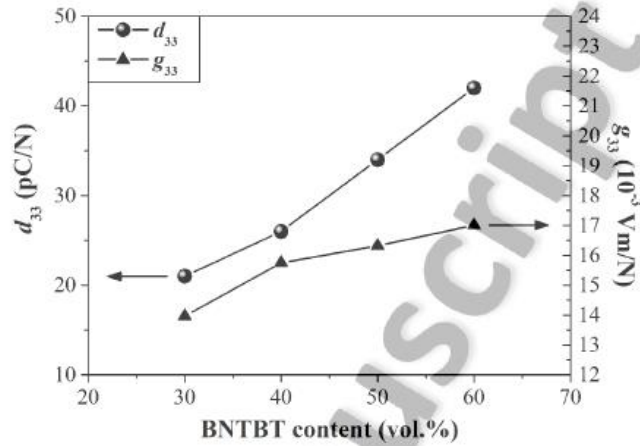


Fig. 5 Effect of BNBT ceramic content on piezoelectric coefficient (d_{33}) and piezoelectric voltage coefficient (g_{33}) of 0-3 connectivity BNBT/PC composites.

The piezoelectric voltage coefficient (g_{33}) of composites as a function of the BNBT ceramic content is also plotted in Fig. 5. The g_{33} values were calculated using the measured value of piezoelectric coefficient and dielectric constant of composites. The g_{33} value increased as $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ ceramic content increased. This is a consequence of the greater increase rate of d_{33} than that of ϵ_r . The highest value obtained of 17.00 mV·m/N was found for the composite with 60 vol.% BNBT. Comparing the g_{33} value of previously reported [1] lead zirconate titanate (PZT)-cement composites is ≈ 15.00 mV·m/N at similar ceramic content in composites, that of 0-3 connectivity BNBT/PC composites is higher (16.32 vol.% mV·m/N with BNBT content of 50 vol.%). The high g_{33} value makes the composite a very sensitive for sensor applications.

4. Conclusions

0-3 connectivity pattern lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 (BNBT)/Portland cement (PC) composites with low volume content of BNBT ceramic (30%-50%) are the most compatible with concrete structure. The compressive strength, dielectric constant (ϵ_r) and piezoelectric coefficient (d_{33}) of composites increased with the increase of BNBT ceramic content. For the composite with 40 vol.% BNBT ceramic, the values of compressive strength, ϵ_r and d_{33} are obtained to be 35.65 MPa, 278, 42 pC/N and 17.00 mV·m/N respectively. Moreover, the dielectric constant behavior is well described by cube model for 0-3 connectivity pattern BNBT-PC composites. Therefore, consideration should be made for both Z_c and g_{33} for optimal performance of sensor in real-time structural health monitoring applications.

Acknowledgements

Financial support from the Thailand Research Fund through the Thailand Research Fund (TRF) (MRG6180225) to Dr. Rattiyakorn Rianyo is gratefully acknowledged. The authors also wish to thank Center of Excellence in Materials Science and Technology, Chiang Mai University for financial support under the administration of Materials Science Research Center, Faculty of Science, Chiang Mai University. The authors are grateful to the members of staff at the Electroceramics Research Laboratory for the research facilities made possible for this research work. Chiang Mai University is also acknowledged.

References

- [1] Z. Li, D. Zhang, K. Wu, Cement-based 0–3 piezoelectric composite, *J. Amer. Ceram. Soc.* 85 (2002) 305–313.
- [2] C. Xin, S.F. Huang, J. Chang, Piezoelectric, dielectric, and ferroelectric properties of 0-3 ceramic/cement composites, *J. Appl. Phys.* 101 (2007) 094110.
- [3] A. Chaipanich, N. Jaitanong, T. Tunkasiri, Fabrication and properties of PZT–ordinary Portland cement composites, *Mater. Lett.* 61 (2007) 5206–5208.
- [4] F. Wang, H. Wang, Y. Song, H. Sun, High piezoelectricity 0–3 cement-based piezoelectric composites, *Mater. Lett.* 76 (2012) 208–210.
- [5] T. Takenaka, and H. Nagata, Current Status and Prospects of Lead-Free Piezoelectric Ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.* 25 (2005) 2693–2700.
- [6] E. Aksel, and J. L. Jones, Advances in Lead-Free Piezoelectric Materials for Sensors and Actuators, *Sensors*. 10 (2010) 1935–1954.
- [7] R. Rianyai, R. Potong, N. Jaitanong, R. Yimnirun and A. Chaipanich, Dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties of 0-3 barium titanate–Portland cement composites, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 104 (2011) 661–666.
- [8] R. Potong, R. Rianyai and A. Chaipanich, Dielectric Properties of Lead-Free Composites from 0-3 Barium Zirconate Titanate-Portland Cement Composites, *Ferr. Lett.* 38 (2011) 18–23.
- [9] R. Potong, R. Rianyai, A. Ngamjarurojana and A. Chaipanich, Ferroelectric hysteresis properties of 0-3 lead-free barium zirconate-Portland cement composites, *Ferr. Lett.* 39 (2012) 15–19.
- [10] R. Rianyai, R. Potong, A. Ngamjarurojana and A. Chaipanich, Influence of barium titanate content and particle size on electromechanical coupling coefficient

- of lead-free piezoelectric ceramic-Portland cement composites, *Ceram. Inter.* 39 (2013) S47-S51.
- [11] R. Potong, R. Rianyai, A. Ngamjarujana, R. Yimnirun, R. Guo, A.S. Bhalla and A. Chaipanich, Acoustic and piezoelectric properties of 0-3 barium zirconate titanate-Portland cement composites-effects of BZT content and particle size, *Ferroelectrics*. 455 (2013) 69-76.
- [12] R. Rianyai, R. Potong, A. Ngamjarujana, A. Chaipanich, Microstructure and electrical properties of 0-3 connectivity barium titanate-Portland cement composite with 40% barium titanate content, *Ferr. Lett.* 43(1-3) (2016) 59-64.
- [13] Sitchai Hunpratub, Teeraporn Yamwong, Sutham Srilomsak, Santi Maensiri, Prinya Chindaprasirt, Effect of particle size on the dielectric and piezoelectric properties of 0-3 BCTZO/cement composites, *Ceramics International* 40(1):1209-1213 January 2014
- [14] Ruamporn Potong, Rattiyakorn Rianyai, Athipong Ngamjarujana, Rattikorn Yimnirun, Ruyan Guo, Amar S. Bhalla, Arnon Chaipanich, Thermal expansion behaviors of 0-3 connectivity lead-free barium zirconate titanate-Portland cement composites, *Ceramics International*, Volume 43, Supplement 1, August 2017, Pages S129-S135.
- [15] P. Chomyen, R. Potong, R. Rianyai, A. Ngamjarujana, P. Chindaprasirt, A. Chaipanich, Microstructure, dielectric and piezoelectric properties of 0-3 lead free barium zirconate titanate ceramic-Portland fly ash cement composites, *Ceram. Int.* 44 (2018) 76-82.

- [16] A. Safari Development of piezoelectric composites for transducers. *Journal de Physique III*, 4, 1129–1149 (1994).
- [17] M. H. Lee; A. Halliyal; R. E. Newnham Poling studies of piezoelectric composites prepared by coprecipitated PbTiO_3 powder. *Ferroelectrics*, 87, 71–80 (1988).
- [18] J. Suchanicz, K. Roleder, A. Kania, and J. Handerek, *Ferroelectrics* 77, 107, 1988.
- [19] M. S. Hagiyeve, I. H. Ismaizade, and A. K. Abiyev, *Ferroelectrics* 56, 215, 1984.
- [20] K.H. Lam, D.M. Lin, and H.L.W. Chan, Lead-free acoustic emission sensors, *REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS* 78, 115109, 2007.
- [21] T. Takenaka, K. Maruyama, K. Sakata, $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})\text{TiO}_3$ - BaTiO_3 System for Lead-Free Piezoelectric Ceramics, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 30 (Part 1, No. 9B) (1991), pp. 2236-2239.
- [22] P. Yusong, S. Qianqian, C. Yan, Fabrication and mechanical properties of $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ - BaTiO_3 lead-free piezoelectric ceramics, *Ceramics – Silikáty* 58 (1) 50-55 (2014)
- [23] A. Chaipanich , R. Rianyo i a , R. Potong , N. Jaitanong, P. Chindaprasirt, Compressive strength and microstructure of 0–3 lead zirconate titanate ceramic-Portland cement composites, *Ferroelectrics*, 457:53–61, 2013.
- [24] K. Janković, D. Nikolić, D. Bojović, L. Lončar, Z. Romakov, The estimation of compressive strength of normal and recycled aggregate concrete, *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Architecture and Civil Engineering* Vol. 9, No 3, 2011, pp. 419 – 431.
- [25] R.E. Newnham, *Am. Rev. Mater. Sci.* 16, 47 (1986)

- [26] F. Xing, B. Dong, Z. Li, Dielectric, piezoelectric, and elastic properties of cement-based piezoelectric ceramic composites, J. Am. Ceram. Soc. 91 (2008) 2886-2891.

Draft manuscript

**Enhanced ferroelectric and induced strain behavior of PVDF
modified 0–3 lead-free 0.94Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃-0.06BaTiO₃ piezoelectric
ceramic/cement composites**

Rattiyakorn Rianyai^{a,*}, Ruamporn Potong^b, Athipong Ngamjarurojana^a,
Arnon Chaipanich^a

*^aDepartment of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai
University, Chiang Mai 50200, Thailand*

*^bDivision of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of
Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand*

*Corresponding Author's E-mail: r.rianyoi@gmail.com

Abstract

Polyvinylidene fluoride (PVDF) modified 0–3 lead-free 0.94Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃-0.06BaTiO₃ piezoelectric ceramic (BNT-BT)/cement composites were fabricated using the mixing and pressing method. The structure, ferroelectric properties as well as induced strain behavior were investigated. The ferroelectric hysteresis loops showing reduction loss area when PVDF content was increased from 0 to 10 vol.%. The strain-electric field curve became more apparent in composites modified with PVDF where the composite with 5 vol.% PVDF content achieved the highest peak-to-peak strain. Therefore, PVDF proved useful as the third phase in these composites, which enhanced the structural and ferroelectric properties of 0–3 BNT-BT/cement composites.

Keywords: Composites; Lead-free piezoelectric ceramic; cement; Polyvinylidene fluoride; Ferroelectric properties.

1. Introduction

Smart materials of 0-3 lead zirconate titanate-based piezoelectric ceramic (PZT-based)/cement composites have been extensively investigated and developed as smart composites for concrete structural health monitoring due to this composite has good dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties as well as acoustic impedance matching with concrete [1-3]. However, lead content in PZT-based ceramic cause serious environmental problems because high evaporation of lead oxide during calcination and sintering processes [4-6]. Therefore, 0-3 lead-free piezoelectric ceramic/cement composites have been attracting attention to develop as friendly environmental composites in place of 0-3 PZT-based/cement composites and achieve the desired properties.

Recently, BaTiO_3 [7] and $\text{BaZr}_{0.05}\text{Ti}_{0.95}\text{O}_3$ [8] have been developed as promising candidates lead-free piezoelectric ceramics for fabricating 0-3 lead-free piezoelectric ceramic/cement composites owing to several advantages including easy to fabricate, good dielectric properties as well as acoustic impedance can be adjusted for match with concrete structure. However, these composites are difficult to obtain good piezoelectric properties and not quite as high as 0-3 PZT-based/cement composites. This is due to with the leakage current of composites is mainly caused by the interface pore between ceramic particles and cement phase, the pore in cement phase and their inner water, which makes it difficult to pole the ceramic phase in the composites, thus may not be able to obtain complete polarization [2].

To improve the piezoelectric properties of 0-3 piezoelectric ceramic/cement composites, the cement phase in composites modified with different polyvinylidene fluoride (PVDF) content additive have been developed [9-10]. It was found that the PVDF content played an important role in the total period of poling process and piezoelectric

properties of PVDF modified 0-3 piezoelectric ceramic/cement composites. Nevertheless, no research works have been reported on ferroelectric and induced strain behavior of PVDF modified 0-3 lead-free piezoelectric ceramic/cement composites. Therefore, new and novel results on this type of composite are reported for the first time. In this experiment, the effect of PVDF content on the structure, microstructure and ferroelectric properties as well as induced strain behavior of PVDF modified 0-3 lead-free piezoelectric ceramic/cement composites were measured and studied.

2. Experimental procedure

PVDF modified 0-3 BNT-BT/cement composites were fabricated using 50 vol.% BNT-BT and different PVDF volume content of 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% and 10%. The BNT-BT, Portland cement (PC) powder and PVDF were mixed together and pressed into disks of 15 mm in diameter and 1.5 mm in thickness to form 0-3 composites. Then, all samples were heat treatment at 170°C for 2 h and then kept in curing chamber at 60°C and 98% RH for 3 days.

The phase formation of all composites was analyzed by the X-ray diffraction technique (XRD; Philips PW 1729 diffractometer). Scanning electron microscopy (SEM; JSM-IT300LV) in backscattered electron imaging mode was used to investigate their surface morphologies. The polarization-electric field loops and strain-electric field butterfly curve were determined using modified Michelson interferometer (helium-neon laser, monochromatic source $\lambda = 632.8$ nm) combined with Sawyer–Tower circuit at room temperature and under an electric field of 6 kV/cm (frequency of 0.2 Hz).

3. Results and discussion

The XRD patterns of BNT-BT ceramic, PC after 3 days of hydration, PVDF after heat treatment and PVDF modified 0-3 BNT-BT/cement composites are shown in Fig. 1. It can be seen that XRD patterns of BNT-BT ceramic displays a pure perovskite structure phase and this result is in agreement with previous research works on $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 [11]. The XRD patterns of PC indicated the main peaks of calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), and calcium silicate hydrate (C-S-H) phases which are the main hydration products. The unhydrated peaks of Alite (C_3S) and Belite (C_2S) phases and calcite (CaCO_3) are also detected. Moreover, the XRD peaks at 2θ of PVDF corresponding to 18.5° and 26.5° present in the XRD pattern indicates the presence of α -phase [12-13]. Moreover, the high intense peak of PVDF at 20.2° confirms the presence of β -phase [14]. The XRD patterns of PVDF modified 0-3 BNT-BT/cement composites were studied as also shown in Fig. 1. With the increase in PVDF content of 1 to 5 vol.%, no diffraction peaks are visible from PVDF in composites which may be due to XRD technique limitation in detecting with low levels of PVDF content and the intense diffraction peaks of BNT-BT ceramic overshadowing PVDF peaks. At high PVDF content of 10 vol.% in composite can be observed diffraction peaks from PVDF phase.

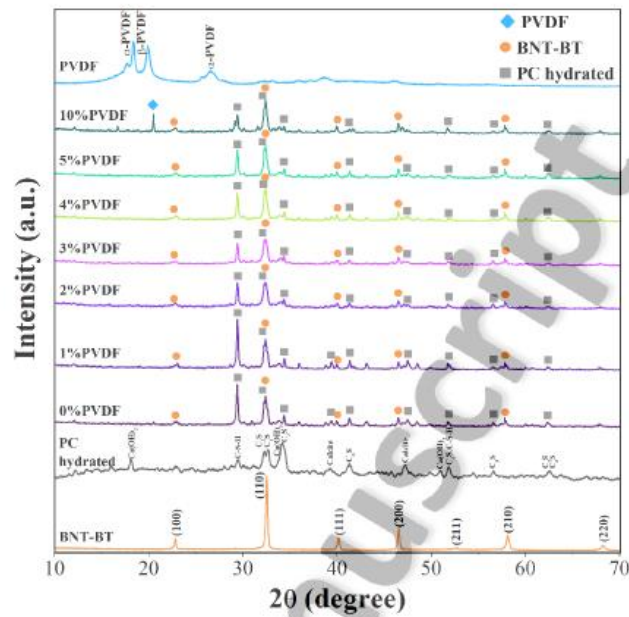


Fig. 1. The XRD patterns of BNT-BT ceramic, PC, PVDF and PVDF modified 0-3 BNT-BT/cement composites.

Fig. 2(a) shows SEM image at the fracture surface of 0-3 BNT-BT/cement composite. It can be seen that BNT-BT phase were found to bind with cement phase, however, many pores can be found in the interface between BNT-BT phase and cement phase as well as in cement phase. The elemental mapping analysis for fluorine (which is the main element of PVDF) and SEM images of 0-3 BNT-BT/cement composites modified with 5 and 10 vol.% PVDF are shown in Fig. 2(b) and Fig. 2(e), respectively. It can be observed that PVDF phase shows good compatibility and binding by filling the pores in the interface between BNT-BT ceramic particle and cement phase along with hydration product clusters of cement phase. However, at high PVDF content of 10 vol.%, it can be observed that some cement particles are wrapped by PVDF and contains more residual unhydrate cement particles, which can cause more porosity at the interface.

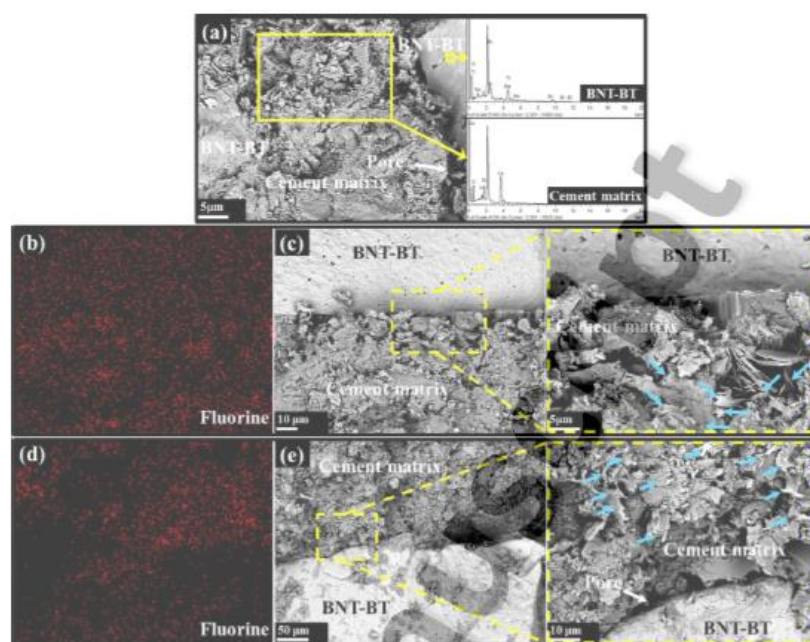


Fig. 2. (a) SEM image and EDX analysis of 0-3 BNT-BT/cement composites, (b, d) elemental mapping analysis and (c, e) SEM images of PVDF modified 0-3 BNT-BT/cement composites at 5 and 10 vol.% PVDF, respectively.

The polarization-electric field (P-E) loops of PVDF modified 0-3 BNT-BT/cement composites are presented in Fig. 3(a). It can be seen that P-E loops of composites show a lossy feature with round characteristic due to many weak conducting ions in cement phase such as Ca^{2+} , OH^- and Al^{3+} [15], hence fully saturated P-E loops cannot be achieved for these composites. For comparison, we define the y-axis intercept as the “apparent” remnant polarization (P_r) and x-axis intercept as the “apparent” coercive field (E_c). With an increase of PVDF content in composites, the P-E loops showing reduction area in loss and it becomes slimmer. It should also be noted that when increasing PVDF content in composites, the P_r and E_c values tended to decrease as shown

in Fig. 3(b). The lower P_r value at higher PVDF content in composites can be attributed to the low remanent polarization of pure PVDF phase [16].

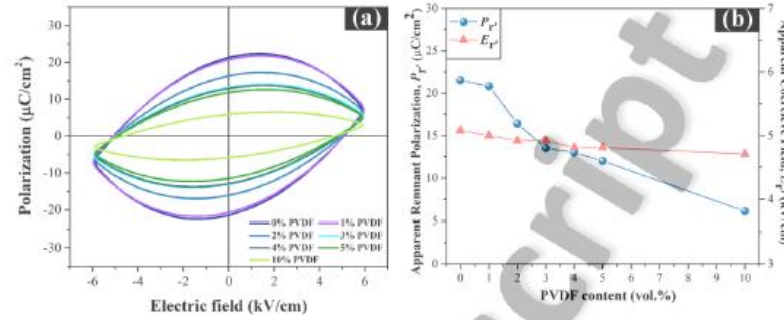


Fig. 3. (a) The P - E loops and (b) the P_r and E_r values of PVDF modified 0-3 BNT-BT/cement composites.

Fig. 4 shows the stain-electric field (S-E) curve of PVDF modified 0-3 BNT-BT/cement composites. In composites with 0 to 3 vol.%, non-180° polarization rotation results in large hysteresis with significant remanent strain. Moreover, the highest strain under the electric field of 6 kV/cm of these composite was improved in composite with 5 vol.% PVDF modification: the strain value reaches a maximum value of 0.0023% at an electric field of 4.9 kV/cm . Also, the strain response dropped when the higher PVDF content of 10 vol.% was added.

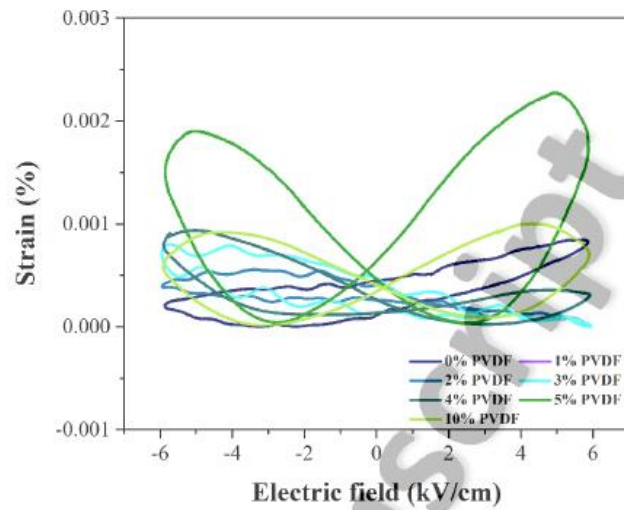


Fig. 4. The S-E curve of PVDF modified 0-3 BNT-BT/cement composites.

4. Conclusions

All PVDF modified 0-3 BNT-BT/cement composites were successfully fabricated. The PVDF content in these composites has a beneficial effect on the ferroelectric and induced strain behavior. The polarization-electric field loops results showing a reduction of loss area characteristics in PVDF modified 0-3 BNT-BT/cement composites. The electric field-induced strain of these composites was enhanced with 4-10 vol.% PVDF modification. The highest strain value of 0.0023% at an electric field of 4.9 kV/cm was found in composite with 5 vol.%.

Acknowledgements

Financial support from the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education (CHE) to Dr. Rattiyakorn Rianyoi (MRG6180225) is gratefully

acknowledged. The authors also wish to thank the Center of Excellence in Materials Science and Technology, Faculty of Science, Chiang Mai University for financial support under the administration of Materials Science Research Center. The authors are grateful to the members of staff at the Electroceramics Research Laboratory for the research facilities made possible for this research work. Chiang Mai University is also acknowledged.

References

- [1] Z. Li, D. Zhang, K. Wu, J. Am. Ceram. Soc. 85 (2002) 305–313.
- [2] S. Huang, J. Chang, L. Lu, F. Liu, Z. Ye, X. Mater. Res. Bull. 41 (2006) 291–297.
- [3] A. Chaipanich; N. Jaitanong; T. Tunkasiri, Mater. Lett., 61 (2007) 5206–5208.
- [4] T. Takenaka, H. Nagata, J. Eur. Ceram. Soc. 25 (2005) 2693–2700.
- [5] Z. Rashad, A. Feteira, Temperature stable electric field-induced strain in Er-doped BNT-BT-BKT ceramics, Mater. Lett. 222 (2018) 180–182.
- [6] F. Akram, R.A. Malik, A. Hussain, T.K. Song, W.J. Kim, M.H. Kim, Mater. Lett. 217 (2018) 16–19.
- [7] R. Rianyai, R. Potong, N. Jaitanong, R. Yimnirun, A. Chaipanich, Appl. Phys. A 104 (2011) 661–666.
- [8] R. Potong, R. Rianyai, A. Ngamjarurojana, R. Yimnirun, R. Guo, A.S. Bhalla, A. Chaipanich, Ferroelectrics 455 (2013) 69–76.
- [9] N. Jaitanong, R. Yimnirun, H.R. Zeng, G.R. Li, Q.R. Yin, A. Chaipanich, Mater. Lett. 130 (2014) 146–149.
- [10] R. Rianyai, R. Potong, A. Ngamjarurojana, A. Chaipanich, J. Mater. Sci. 53 (2018) 345–355.
- [11] S.T. Zhang, A.B. Kounga, E. Aulbach, Y. Deng, J. Am. Ceram. Soc., 91(1) (2008) 3950–3954.

- [12] B.A. Newman, C.H. Yoon, K.D. Pae, J.I. Scheinbeim, J. Appl. Phys. 50 (1979) 6095.
- [13] S. Wang, Y. Liang, Mater. Lett. 247 (2019) 71–74.
- [14] P. Singh, H. Borkar, B.P. Singh, V.N. Singh, A. Kumar, AIP Adv. 4 (2014) 087117.
- [15] N. Jaitanong, R. Rianyai, R. Potong, R. Yimnirun, and A. Chaipanich, Integ. Ferro. 107 (2009) 43–52.
- [16] P. Thongsanitgarn, A. Watcharapasorn, S. Jiansirisomboon, Surf. Rev. Lett., 17 (2010) 1–7.

การไปนำเสนอผลงานวิชาการในงานประชุม

ISAF-FMA-AMF-AMEC-PFM Joint Conference (IFAAP 2018)

International Conference Center at Hiroshima, Hiroshima, Japan

2018 ISAF-FMA-AMF-AMEC-PFM Joint Conference

May 27th – June 1st 2018
International Conference Center Hiroshima,
Hiroshima, Japan

IFAAP 2018
Hiroshima

International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF)
Meeting on Ferroelectric Materials and Their Applications (FMA)
Asian Meeting on Ferroelectricity (AMF)
Asian Meeting on Electroceramics (AMEC)
Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (PFM)



Program Book

30pm-P035 **Chittakorn Kornphom** **AMEC**
Composition Design, Phase Structural and Electrical Properties of (1-x)BNT-xBCTS Piezo Ceramics
 C. Kornphom¹, P. Bhupajit^{2,3}, P. Kidkhunthod⁴ and T. Bongkarn^{2,3*}
¹Department of Physics and General Science, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Thailand
²Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Thailand
³Research Center for Academic Excellence in Applied Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Thailand
⁴Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Thailand

30pm-P036 **Nuttapon Pisitpipathsin** **AMEC**
Relationship in Dielectric, Ferroelectric Behaviors and Large Strain Response of (1-x)(Bi_{0.4871}Na_{0.4871})La_{0.0172}TiO₃-xBaTiO₃ Ceramics
 P. Jantani¹, P. Kantha², K. Pengpat³, S. Polprapart⁴, W. Wongkeo⁵, T. Tunkasiri¹ and N. Pisitpipathsin^{6,*}
¹Faculty of Science, Energy and Environment, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand
²Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
³Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Thailand
⁴School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand
⁵Physics and General Science Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Thailand
⁶Department of Applied Physics, Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Thailand

30pm-P037 **Wilaiwan Leenakul** **AMF**
Dielectric and ferroelectric of Niobium and Lithium Co-Doped Bismuth Sodium Potassium Titanate Ceramics
 C. Kruea-In¹, S. Sawekwiharee² and W. Leenakul^{2*}
¹Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Thailand
²Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand

30pm-P038 **Arnon Chaipanich** **AMEC**
Dielectric and Piezoelectric Properties of 2-2 Connectivity Lead-Free Piezoelectric Ceramic Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃/Portland Cement Composites
 R. Rianyo¹, R. Potong², A. Ngamjarujana¹ and A. Chaipanich^{1*}
¹Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Thailand
²Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology, Thailand

30pm-P039 **Rattiyakorn Rianyo** **AMEC**
Mechanical, Dielectric and Piezoelectric Properties of 0-3 Connectivity Lead-Free Piezoelectric Ceramic 0.94Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃-0.06BaTiO₃/Portland Cement Composites
 R. Rianyo^{1*}, R. Potong², A. Ngamjarujana¹ and A. Chaipanich¹
¹Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Thailand
²Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology, Thailand

30pm-P040 **Surapong Panyata** **AMEC**
Crystallization Kinetic of Er³⁺-Dope BiO_{1.5}-GeO₂-BO_{1.5} Glass-Ceramics
 S. Panyata^{1,2}, S. Eitssayeam¹, T. Tunkasiri¹, A. Munpakdee³ and K. Pengpat^{1*}
¹Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Thailand
²Graduate School, Chiang Mai University, Thailand
³Department of Materials Science, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Thailand

30pm-P041 **Kwangeun Kim** **AMF**
Controlling Topological Defects in BiFeO₃ Nanoplates
 K.-E. Kim¹, S. Jeong¹, K. Chu¹, J. H. Lee¹, G.-Y. Kim^{2,3}, F. Xue⁴, T. Y. Koo⁵, L.-Q. Chen¹, S.-Y. Choi^{2,6}, R. Ramesh^{7,8,9} and C.-H. Yang^{1,10,*}
¹Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Republic of Korea
²Department of Materials Modelling and Characterization, Republic of Korea
³Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Republic of Korea
⁴Department of Materials Science and Engineering, The Pennsylvania State University, USA
⁵Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH, Republic of Korea
⁶Department of Materials Science and Engineering, POSTECH, Republic of Korea
⁷Department of Materials Science and Engineering, University of California, USA

Mechanical, Dielectric and Piezoelectric Properties of 0-3 Connectivity Lead-Free Piezoelectric Ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 /Portland Cement Composites

R. Rianyai,^{1,*} R. Potong,² A. Ngamjarurojana,¹ and A. Chaipanich¹

¹Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

²Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology, Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

*Corresponding Author: r.rianyoi@gmail.com

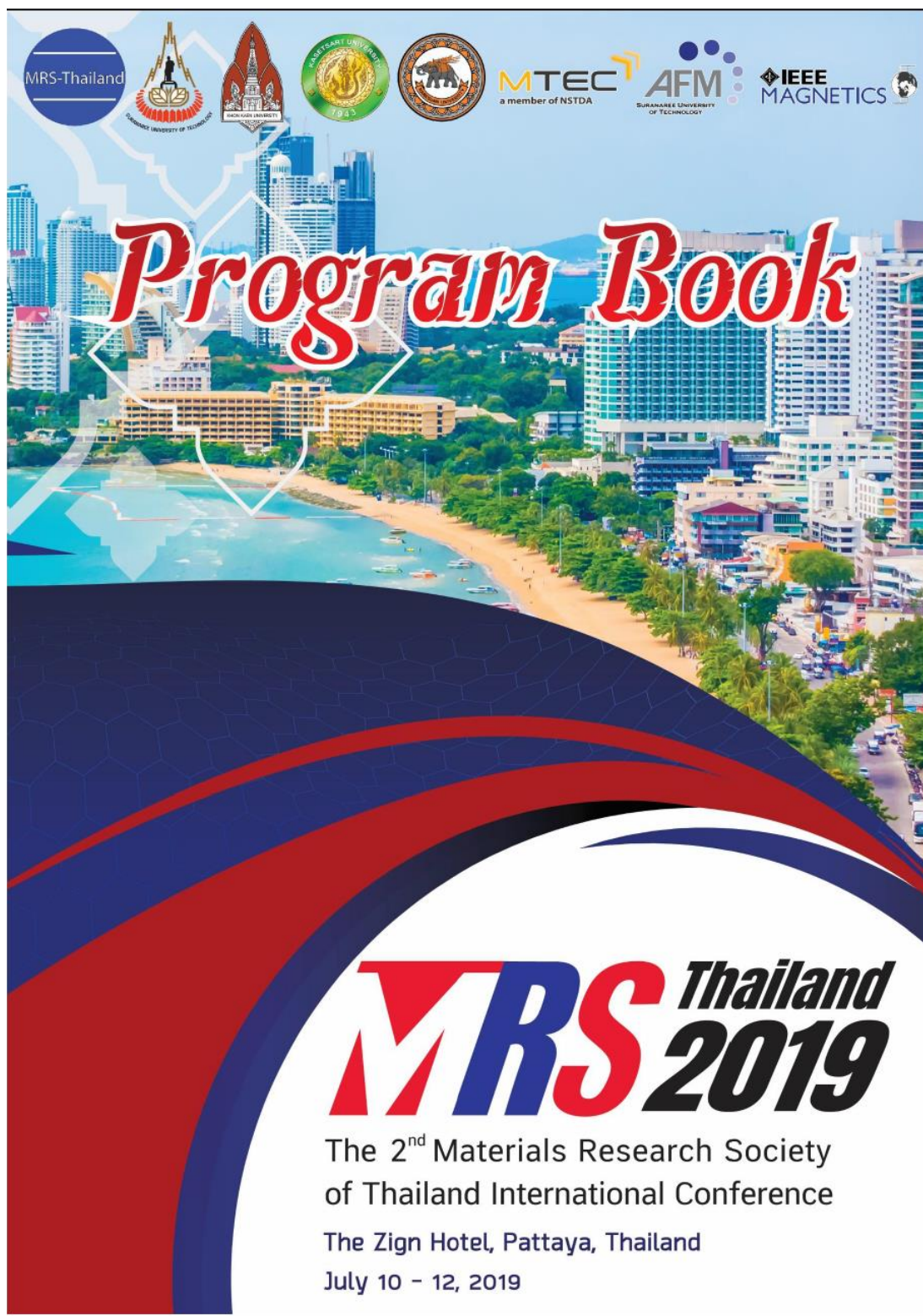
In this research, lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 (BNBT)/Portland cement (PC) composites have been fabricated for use as sensor in structural health monitoring applications. BNBT ceramic particles have been incorporated into Portland cement with ceramic particles content of 30-60 vol.% to form 0-3 connectivity pattern (BNBT-PC) composite. The compressive strength, acoustic impedance, dielectric and piezoelectric properties of the composites were investigated as a function of ceramic content. The results indicated that the compressive strength was found in the region of 29.22-35.65 MPa for these BNBT-PC composites. The BNBT ceramic content of $\approx$ 40-60 vol.% are the optimal BNBT content for an acoustic impedance match between composites and concrete structure. The dielectric constant value of composites increased as BNBT ceramic content increased while the dielectric loss value reduced at higher BNBT ceramic content. Moreover, composite with BNBT ceramic content of 60% vol.% exhibited highest piezoelectric coefficient (d_{33}) value of 42 pC/N. The piezoelectric voltage coefficient of composites was found to be in the range of 13.96 mV·m/N to 17.00 mV·m/N. Furthermore, the piezoelectric coefficient and piezoelectric voltage coefficient of composites were close to the cube model. According to the results, it is noted that these composites have good compatibility with concrete structure and has potential for use as sensor in structural health monitoring applications.

Confidential/ เอกสารปกปิด ห้ามเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาต

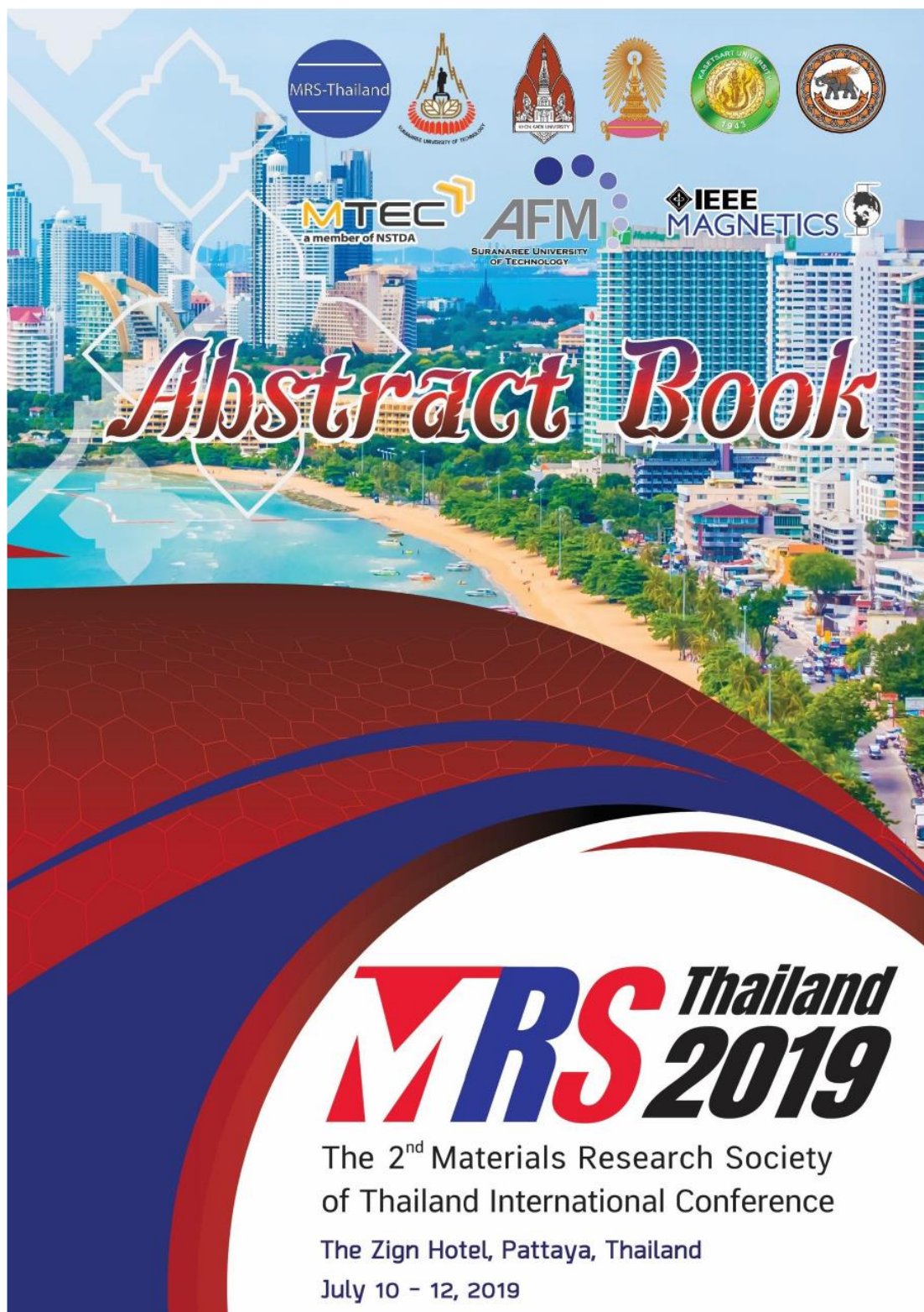
The 2nd Materials Research Society of Thailand International Conference

(MRS-Thailand 2019)

The Zign Hotel, Pattaya, Thailand



Asst. Prof. Dr. panupong jaiban	Effects of Mg and La co-doping on dielectric, and piezoelectric properties of barium calcium zirconate titanate ceramics	SYM3_P3
Assoc.Prof.Dr. Anucha Watcharapasorn	Investigation of $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.80}\text{K}_{0.20})_{0.5}\text{TiO}_3\text{-LiNbO}_3\text{-Ba}(\text{Ti}_{0.90}\text{Sn}_{0.10})\text{O}_3$ Lead-Free Piezoelectric Ceramics	SYM3_P5
Assoc. Prof. Dr. Theerachai Bongkarn	The effect of CuO substitution on phase formation, morphology and electrical properties of BNKLT ceramics prepared by the solid state combustion technique	SYM3_P16
Miss PARICHAT POMYAI	Studying the fatigue behavior under electrical field of BCZT ceramics	SYM3_P10
Dr Piewpan Parjansri	Improvement the Electrical Properties of $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3$ (BNT) Ceramics using the Seed-Induced Method	SYM3_P11
Dr. Wilaiwan Leenakul	Dielectric and ferroelectric of Niobium and Lithium Co-Doped Bismuth Sodium Potassium Titanate Ceramics	SYM3_P18
Dr Pasinee Siriprapa	Effect of Grain Size and Grain Orientation on Dielectric, Electrical and Ferroelectric Properties of W doped $\text{Bi}_{3.25}\text{La}_{0.25}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ Ceramics	SYM3_P24
Dr Nuttapon Pisitpipathsin	Microstructure and electrical properties of 0.96BNLT-0.04BT ceramic with various sintering temperatures	SYM3_P27
Miss Naruepon Kongthong	Enhancement in Electrical Properties of $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{1-x}\text{K}_x)_{0.5}\text{TiO}_3$ lead-free Relaxor Ferroelectric Ceramics	SYM3_P29
Ms. Surirat Yotthuan	Effect of NiO Doping on Phase Structure, Microstructure, Electric and Magnetic Properties of $0.99(\text{K}_{0.45}\text{Na}_{0.52}\text{Li}_{0.03})(\text{Nb}_{0.94}\text{Sb}_{0.06})\text{O}_{3-0.01}\text{BiScO}_3$ Ceramics	SYM3_P15
Mr. Narongdetch Boothrawong	Electrical and Mechanical Properties of Modified Barium Titanate by Doping an M-type Hexagonal Ferrites	SYM3_P2
Ms. Pichittra Thawong	Effect of BFCO content on phase structure, microstructure, electric and magnetic properties of BNKLT ceramics prepared by combustion method	SYM3_P14
Asst Prof Dr. Tawat Suriwong	Effect of Sr substitution on structural, ferroelectric and magnetic properties of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$ perovskite oxides	SYM3_P32
Dr. Narit Triamnak	Dielectric and photoluminescent properties of Eu-doped $0.85\text{BaTiO}_{3-0.15}\text{Bi}(\text{Zn}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ synthesized via solid state reaction with NaCl as a reactive agent	SYM3_P34
Asst.Prof.Dr. Rattiyakorn Rianyo	Ferroelectric and induced strain behavior of PVDF modified 0–3 connectivity cement-based/lead-free $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_{3-0.06}\text{BaTiO}_3$ piezoelectric ceramic composites	SYM3_P8
Dr. Chang Won Ahn	Stress driven high electrostrain at low field in incipient piezoelectrics	SYM3_P19
Dr. Jaru Jutimoosik	Influence of calcination temperature on phase formation and local structure of $\text{Co}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{1.6}\text{Cr}_{0.4}\text{O}_4$ nanoparticles	SYM3_P20
Assoc.Prof.Dr. Sukanda Jiansirisomboon	Fabrication and characterization of $\text{Hf}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_2$ thin films by sol-gel method	SYM3_P22
Mr. Chonnarong Kaewsai	Photo-Capacitance Effect in BiFeO_3 Thin Film	SYM3_P30
Mr Suppanut Sangphet	Effect of UV-light on the enhanced superconductivity in monolayer FeSe/SrTiO_3 superconductor	SYM3_P36
Ms. Wipichaya Thongsamrit	A simple solution process of NiO_x film fabrication as a hole transport layer for perovskite solar cells	SYM3_P35



The Second Materials Research Society of Thailand International Conference
(2nd MRS Thailand International Conference)
10-12 July 2019
The Zign Hotel, Pattaya, Thailand

SYM3_P8

Ferroelectric and induced strain behavior of PVDF modified 0–3 connectivity cement-based/lead-free $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 piezoelectric ceramic composites

Rattiyakorn Rianyai^{a,*}, Ruampom Potong^b, Athipong Ngamjarurojana^a, Amon Chaipanich^a

^aDepartment of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

^b Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

*Corresponding Author's E-mail: r.rianyoi@gmail.com

Abstract

Polyvinylidene fluoride (PVDF) modified 0–3 connectivity cement-based/lead-free $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 (BNT-BT) piezoelectric ceramic composites were fabricated using the mixing and pressing method. The composites were fabricated with different PVDF volume content of 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% and 10% (BNT-BT ceramic content was kept constant of 50 vol.%). The structure, microstructure, ferroelectric as well as induced strain behavior were investigated and their ferroelectric and induced strain behavior were measured by a Sawyer-Tower circuit in conjunction with Michelson interferometer at frequency of 0.2 Hz. The X-Ray diffraction (XRD) patterns of composites was mainly attributed to BNT-BT piezoelectric ceramic, Portland cement and PVDF phases and the intensities of the PVDF phase peaks increased with increasing PVDF content in composites. Moreover, polarization-electric field hysteresis loops at room temperature showed that the apparent remnant polarization of all composites increases with increasing electric field. Under the same electric field for evaluating polarization-electric field hysteresis loops, the ferroelectric hysteresis loops showing reduction area in loss when the PVDF content was increased from 0 vol.% to 10 vol.%. The strain-electric field hysteresis loops become more apparent in composites modified with PVDF which the composite at 5 vol.% PVDF content achieved the highest peak-to-peak strain. Therefore, PVDF was useful as the third phase in composites, which improved the microstructure and electric field induced strain of 0–3 connectivity cement-based/lead-free $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 piezoelectric ceramic composites.

Keywords: Composites; Lead-free piezoelectric ceramic; Portland cement; Ferroelectric properties; Hysteresis loop; Induced strain behaviour

Poster
Presentation

Symposium

01

02

03

04

05

06

07

08

09

10

11

12

13

14

15

16

17

รายงานสรุปการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

สัญญาเลขที่ MRG6180255

ชื่อโครงการ สมบัติเชิงกลและสมบัติเพียโรอิเล็กทริก และสมรรถนะของวัสดุผสม เซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสภาพที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร. รัตติยากร เรียนยอย

หน่วยงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

โทรศัพท์ 080-120-9836 โทรสาร 053-943445 อีเมล r.rianyoi@gmail.com

สถานะผลงาน ☒ ปกปิด ☐ ไม่ปกปิด

ความสำคัญ / ความเป็นมา

ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้าง และการใช้โครงสร้างคอนกรีตในงานโครงสร้างต่างๆ เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เช่น ถนน สะพาน อาคาร สถานที่สำคัญต่างๆ ภายในประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตาม โครงสร้างคอนกรีตต่างๆ เหล่านี้อาจได้รับความเสียหายระหว่างการใช้งานได้ เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น ภัยธรรมชาติ หรือมักจะเกิดจากความผิดพลาดจากการออกแบบของช่างก่อสร้าง ดังนั้นระบบตรวจสอบโครงสร้าง (structural health monitoring) ถือเป็นสิ่งจำเป็นที่จะสามารถใช้ในการประเมินค่าความปลอดภัย เพื่อป้องกันการเกิดความล้มเหลวของโครงสร้างอย่างฉับพลัน ดังนั้นการพัฒนาและวิจัยเกี่ยวกับเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างตามเวลาจริงจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของวัสดุผสมที่ผลิตจากวัสดุเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างตามเวลาจริง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าวัสดุผสมนี้มีสมบัติทางด้านไฟโอโซอิเล็กทริกที่ดี และค่าความต้านทางเชิงซ้อนของเสียง (acoustic impedance) มีค่าใกล้เคียงกับค่าของคอนกรีตที่เป็นวัสดุโครงสร้างหลัก ทำให้เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้เป็นโครงสร้างฉลาดที่สามารถทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์เพื่อตรวจสอบโครงสร้างนั้นอย่างทันทีทันใด แต่อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการผลิตวัสดุเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานจะมีไอระเหยของออกไซด์ของตะกั่วเกิดขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และมีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ได้ ดังนั้นการใช้เซรามิกไร้สารตะกั่วจึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาวัสดุผสมที่ผลิตจากวัสดุเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดใหม่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างตามเวลาจริง

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของวัสดุเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้วัสดุเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว อาทิ แบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3) แบเรียมเซอร์โคเนตไทเทเนต ($\text{BaZr}_{0.05}\text{Ti}_{0.95}\text{O}_3$) แบเรียมแคลเซียมเซอร์โคเนตไทเทเนต ($\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_3$) และบิสมาทไซด์เทียมไทเทเนต ($\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$) เป็นต้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเราสามารถปรับแต่งสมบัติของวัสดุผสมเซรามิกไฟโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้มี

สมบัติโพธิ์โซอิเล็กทริกที่ดีและค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนใกล้เคียงกับโครงสร้างของคอนกรีตให้เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างตามเวลาจริง แต่อย่างไรก็ตามสมบัติโพธิ์โซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกโพธิ์โซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่สามารถเทียบเท่ากับสมบัติโพธิ์โซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกโพธิ์โซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งสมบัติโพธิ์โซอิเล็กทริกของเฟสเซรามิกโพธิ์โซอิเล็กทริก และความพรุนในวัสดุผสมเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติโพธิ์โซอิเล็กทริกของวัสดุผสม นอกจากนี้รูพรุนของเฟสเมทริกซ์ของซีเมนต์และรูพรุนระหว่างพื้นผิวรอยต่อของเฟสเซรามิกและเฟสซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในวัสดุผสมยังก่อให้เกิดการรั่วของกระแสไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทำขั้ว (poling) ของวัสดุผสมได้ ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการทำขั้วของวัสดุผสม (degree of poling) เมื่อไม่นานมานี้ได้มีนักวิจัยหลายๆ ท่านทำการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นโดยการเติมเฟสที่สามในวัสดุผสมพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) เป็นวัสดุหนึ่งที่ถูกนำมาเติมเป็นเฟสที่สามในวัสดุผสมเซรามิกโพธิ์โซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และพบว่า การเติมพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ลงไปในวัสดุผสมสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของการทำขั้ว (poling) และลดค่าความพรุนภายในเมทริกซ์ของซีเมนต์ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาสมบัติเชิงกล อาทิ ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมสามเฟสเซรามิกโพธิ์โซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งในการพิจารณานำไปประยุกต์ใช้งาน รวมไปถึงสมบัติเพโรอิเล็กทริก และการตอบสนอง และความไวของสัญญาณเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเพโรอิเล็กทริก และสมรรถนะของวัสดุผสมเซรามิกโพธิ์โซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสนามที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อพัฒนาและศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเพโรอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกโพธิ์โซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF
2. เพื่อศึกษาสมรรถนะเช่น การตอบสนอง และความไว ของวัสดุผสมเซรามิกโพธิ์โซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสนามที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต
3. เพื่อผลิตผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ซึ่งบทความทางวิชาการในวารสารที่เป็นที่ยอมรับ และมี impact factor สามารถนำไปอ้างอิงเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อนักวิจัยและผู้สนใจศึกษาต่อไปได้

ผลการวิจัย (สั้น ๆ ที่บ่งชี้ประเด็นข้อค้นพบ กระบวนการ ผลผลิต และการเรียนรู้)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติเพโรอิเล็กทริก และสมรรถนะของวัสดุผสม เซรามิกโพธิ์โซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF ด้วยระบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสนามที่ถูกฝังในโครงสร้างคอนกรีต ในขั้นตอนแรกได้ทำการประดิษฐ์เซรามิกโพธิ์โซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-}0.06\text{BaTiO}_3$ (BNT-BT) ขั้นตอนที่สองทำการขึ้นรูปวัสดุผสม BNT-BT/PC ในรูปแบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยผสมอนุภาคเซรามิก BNT-BT กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) โดยใช้ปริมาตรเซรา

มิก 30-60% โดยปริมาตร นอกจากนี้ทำการเตรียมวัสดุผสม BNT-BT/PC/PVDF ในรูปแบบการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 โดยใช้อนุภาคเซรามิก BNT-BT ในปริมาณ 50% โดยปริมาตร และใช้โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride; PVDF) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1, 3, 5 และ 7% โดยปริมาตร จากนั้นทำการศึกษาค่ากำลังอัด, สมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก รวมไปถึงการตอบสนองต่อสัญญาณทางไฟฟ้าของวัสดุผสมจากการทดลองพบว่าค่ากำลังอัดของวัสดุผสม BNT-BT-PC มีค่าอยู่ในช่วง 28.19-35.30 MPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีต นอกจากนี้เมื่อมีการใช้โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride; PVDF) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังช่วยลดรูปพูนในรอยต่อระหว่างเฟสเซรามิก-โพลีไวนิลลิทริกและเฟสซีเมนต์ จากการวัดค่ากำลังอัดยังพบว่าที่ปริมาณ PVDF มากกว่า 3% โดยปริมาตรค่ากำลังอัดของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นอย่างเป็นได้ชัด และยังพบว่าวัสดุผสม เซรามิกโพลีไวนิลลิทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF แสดงการเกิดวงวนฮีสเทอรีซิส ซึ่งเป็นสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องได้ โดยมีค่า instantaneous remnant polarization (P_{ir}) เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอก เท่ากับ $22.36 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ที่ปริมาณเซรามิก BNT-BT 60% โดยปริมาตร นอกจากนี้การใช้ PVDF แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังส่งผลให้ค่า P_{ir} ของวัสดุผสมลดลง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ PVDF แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบว่าทำให้ค่าการสูญเสียของวงวนฮีสเทอรีซิสลดลง สำหรับการศึกษาดูการตอบสนองต่อสัญญาณทางไฟฟ้าของวัสดุผสม BNT-BT/PC ได้ทำการศึกษาภายใต้ความถี่ 60 Hz พบว่าการตอบสนองของสัญญาณเกิดขึ้นค่อนข้างดี นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาลดของปริมาณ PVDF ต่อการตอบสนองต่อสัญญาณทางไฟฟ้าของวัสดุผสม BNT-BT/PC/PVDF ในมอร์ต้าภายใต้การให้แรงกระทบ (ตุ้มน้ำหนัก 200 g ที่ความสูง 20 cm ในแนวตั้งฉาก) พบว่าเมื่อมีปริมาณ PVDF เพิ่มขึ้นทำให้การตอบสนองต่อสัญญาณทางไฟฟ้าของวัสดุผสมเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ PVDF สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

คำสืบค้น (Keywords)

เซรามิกโพลีไวนิลลิทริกไร้สารตะกั่ว, วัสดุผสมซีเมนต์, สมบัติเชิงกล, สมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก, การตรวจสอบสภาพของโครงสร้าง

Lead-free piezoelectric ceramics; Cement composites; Mechanical property; Ferroelectric property; Structural Health Monitoring

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ (ดูคำจำกัดความ และตัวอย่างด้านหลังแบบฟอร์ม)

☐ ด้านนโยบาย โดยใคร (กรุณาให้ข้อมูลเจาะจง).....

มีการนำไปใช้อย่างไร

.....

☐ ด้านสาธารณะ โดยใคร (กรุณาให้ข้อมูลเจาะจง)

มีการนำไปใช้อย่างไร

.....
.....
☐ ด้านชุมชนและพื้นที่ โดยใคร (กรุณาให้ข้อมูลเจาะจง)
มีการนำไปใช้อย่างไร

.....
.....
☐ ด้านพาณิชย์ โดยใคร (กรุณาให้ข้อมูลเจาะจง)
มีการนำไปใช้อย่างไร

.....
.....
☒ ด้านวิชาการ โดยใคร สถาบันการศึกษาต่าง ๆ และนักวิจัยจากสถาบันอื่น
มีการนำไปใช้อย่างไร

จากผลการดำเนินงานโครงการ “สมบัติเชิงกลและสมบัติเพอร์โวลีเลกทริก และสมรรถนะของวัสดุผสม เซรามิก
ไฟโอโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว/ซีเมนต์/PVDF สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสภาพที่ถูกฝังในโครงสร้าง
คอนกรีต” ซึ่งโครงการนี้สามารถสร้างองค์ความรู้ใหม่ให้กับนักวิชาการ นักวิจัยสถาบันต่างๆ และผู้ที่สนใจ ใน
งานสัมมนาวิชาการระดับนานาชาติ (International Conference) เพื่อให้เกิดการต่อยอดเสริมสร้างนวัตกรรม
และเทคโนโลยีต่อไป

☐ ยังไม่มีการนำไปใช้ (โปรดกรอกในกรอบถัดไป)

(กรณีที่ยังไม่มีการใช้ประโยชน์) ผลงานวิจัยมีศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์

☐ ด้านนโยบาย ☐ ด้านสาธารณะ ☐ ด้านชุมชนและพื้นที่ ☐ ด้านพาณิชย์ ☐ ด้านวิชาการ
ข้อเสนอแนะเพื่อให้ผลงานถูกนำไปใช้ประโยชน์

การเผยแพร่/ประชาสัมพันธ์ (กรุณาให้รายละเอียด พร้อมแนบหลักฐาน)

1. สิ่งพิมพ์ หรือสื่อทั่วไป

☐ หนังสือพิมพ์ ☐ วารสาร ☐ โทรทัศน์ ☐ วิทยุ ☐ เว็บไซต์ ☐ คู่มือ/แผ่นพับ ☐ จัด
ประชุม/อบรม ☐ อื่น ๆ

2. สิ่งพิมพ์ทางวิชาการ (วารสาร, การประชุม ให้ระบุรายละเอียดแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง เพื่อการค้นหาคitations ซึ่งควรประกอบด้วยชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง แหล่งพิมพ์ ปี พ.ศ. (ค.ศ.) ฉบับที่ หน้า)
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

- R. Rianyo, R. Potong, A. Ngamjarrojana, A. Chaipanich, "Acoustic impedance, mechanical, and piezoelectric properties of 0-3 connectivity lead-free piezoelectric ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 /Portland cement composites", Journal of Materials Science: Materials in Electronics (อยู่ระหว่างการดำเนินการส่ง)
- R. Rianyo, R. Potong, A. Ngamjarrojana, A. Chaipanich, "Enhanced ferroelectric and induced strain behavior of PVDF modified 0–3 lead-free $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 piezoelectric ceramic/cement composites", Journal of Materials Science (อยู่ระหว่างการดำเนินการส่ง)

การนำเสนอผลงานวิชาการในงานประชุม

- R. Rianyo, R. Potong, A. Ngamjarrojana, A. Chaipanich, "Mechanical, Dielectric and Piezoelectric Properties of 0-3 Connectivity Lead-Free Piezoelectric Ceramic $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 /Portland Cement Composites", ISAF-FMA-AMF-AMEC-PFM Joint Conference (IFAAP 2018), May 27- June 1, 2018, International Conference Center at Hiroshima, Hiroshima, Japan
- R. Rianyo, R. Potong, A. Ngamjarrojana, A. Chaipanich, "Ferroelectric and induced strain behavior of PVDF modified 0–3 connectivity cement-based/lead-free $0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ - 0.06BaTiO_3 piezoelectric ceramic composites", The 2nd Materials Research Society of Thailand International Conference (MRS-Thailand 2019), July 10-12, 2019, The Zign Hotel, Pattaya, Thailand