



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการออกแบบ การประดิษฐ์ และประสิทธิภาพ  
ของวัสดุผสมเซรามิกพิกโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-  
ปูนซีเมนต์ กับการเติมเฟสที่สามสำหรับโครงสร้างฉลาค  
ที่ทำงานได้หลากหลายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

โดย ดร.รวมพร โพธิ์ทอง

มีนาคม 2561

สัญญาเลขที่ MRG5980018

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการออกแบบ การประดิษฐ์ และประสิทธิภาพ  
ของวัสดุผสมเซรามิกพิกโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-  
ปูนซีเมนต์ กับการเติมเฟสที่สามสำหรับโครงสร้างฉลวด  
ที่ทำงานได้หลากหลายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ดร.รวมพร โพธิ์ทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา  
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย  
สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

**บทคัดย่อ**

รหัสโครงการ: MRG5980018

ชื่อโครงการ: โครงการการออกแบบ การประดิษฐ์ และประสิทธิภาพของวัสดุผสมเซรามิก พิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ กับการเติมเฟสที่สามสำหรับโครงสร้างฉลาดที่ทำงานได้หลากหลายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน: ดร.รวมพร โพธิ์ทอง (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

อีเมล: ja.ruamporn@gmail.com

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี (2 พฤษภาคม พ.ศ.2559 - 1 พฤษภาคม พ.ศ.2561)

**บทคัดย่อ:**

วัสดุผสมเซรามิกพิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ กับการเติมเฟสที่สาม คือ ท่อนาโนคาร์บอน สำหรับพัฒนาเป็นโครงสร้างฉลาดที่ทำงานได้หลากหลายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการที่จะทำซ้ำหรือการไหลวัสดุผสมแบบ 0-3 เซรามิกพิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ นั้นทำได้ยากเนื่องจากรูพรุนในปูนซีเมนต์ และรูพรุนบริเวณรอยต่อระหว่างปูนซีเมนต์กับอนุภาคผงเซรามิก การเติมเฟสที่สามจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการทำให้เกิดข้อของวัสดุผสม โดยการสร้างเครือข่ายของกระแสไฟฟ้าระหว่างอนุภาคเซรามิก ในงานวิจัยนี้จึงนำเซรามิก ปูนซีเมนต์ และเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณ 0-2 % โดยปริมาตร มาผสมกันด้วยกระบวนการอัดและปรม จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลและขีดจำกัดของการเติมท่อนาโนคาร์บอนต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า ความต้านทานเสียงเชิงซ้อน และสมบัติทางพิโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม จากผลการทดลองการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าท่อนาโนคาร์บอนไปอุดรูพรุนในส่วนผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เมื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางพิโซอิเล็กทริกพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพิโซอิเล็กทริกสูงที่สุดคือ  $30.20 \times 10^{-3}$  Vm/N ที่วัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอน 1% โดยปริมาตร และการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอน 1% โดยปริมาตรนั้น คือขีดจำกัดที่ช่วยปรับปรุงสมบัติทางพิโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม สำหรับวัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอนทุกอัตราส่วนที่ทำการทดลองมีความเข้ากันได้กับโครงสร้างหลักหรือคอนกรีต เนื่องจากมีความต้านทานเสียงเชิงซ้อนใกล้เคียงกับคอนกรีต

คำหลัก : พิโซอิเล็กทริก, วัสดุผสม, ปูนซีเมนต์, เฟสที่สาม

## Abstract

---

**Project Code :** MRG5980018

**Project Title :** Design, fabrication and performance of lead-free piezoelectric ceramic-cement composites with third phase addition for environmental friendly multifunctional smart structures

**Investigator :** Dr. Ruamporn Potong (Rajamangala University of Technology Thanyaburi)

**E-mail Address :** ja.ruamporn@gmail.com

**Project Period :** 2 years (2<sup>nd</sup> May 2016 – 1<sup>st</sup> May 2018)

### **Abstract:**

Lead-free piezoelectric ceramic-cement composites with third phase added (carbon nanotubes, CNTs)) were developed for smart structures application. However, it is difficult to fully pole 0-3 connectivity piezoelectric ceramic-cement composites due to pores in cement, and in the interface between cement and ceramic particles. The third phase can improve and create the electric network between ceramic particles resulting in improved poling. In this work, a small amount of CNTs additions at 0-2% by volume was mixed with ceramic and cement by pressing and curing method. The influence and optimum of CNTs content on the microstructure, electrical, acoustic impedance and piezoelectric properties of composites were studied. The results indicate that CNTs are filled in the pores between the hydration products of cement as observed using scanning electron microscope. The highest piezoelectric voltage coefficient of composite with CNTs content was found at 1% by volume where the value is  $30.20 \times 10^{-3}$  Vm/N. CNTs content at 1% by volume was optimum for improvement of the piezoelectric properties for composites. All composites with CNTs content in the range tested were found to have good compatibility with concrete structure with matching acoustic properties.

**Keywords :** Piezoelectric, Composites, Cement, Third phase

## 1. บทสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา-ทบทวนวรรณกรรม

#### 1.1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตเป็นหนึ่งในวัสดุที่ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในงานโครงสร้าง เพราะว่คอนกรีตมีความคงทน แข็งแรง รับน้ำหนักได้ดี และราคาไม่แพง การนำไปใช้งานโครงสร้างทางวิศวกรรมที่สำคัญต่างๆ เช่น ถนน เขื่อน บ้าน สะพาน และ อุโมงค์ ฯลฯ อย่างไรก็ตาม คอนกรีตมีโอกาสดเกิดความเสียหาย หรือเสื่อมสภาพได้ด้วยหลายปัจจัย เช่น การเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน การเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม ความผิดพลาดจากการออกแบบของช่างก่อสร้าง ภัยพิบัติทางธรรมชาติ การรับน้ำหนักเกินขีดจำกัด ฯลฯ ซึ่งเป็นผลให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ในประเทศไทยและประเทศอื่น ๆ ก็เคยประสบกับการสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สิน เนื่องจากความเสียหายของงานโครงสร้างคอนกรีตจากปัจจัยที่กล่าวข้างต้น เพื่อช่วยป้องกันปัญหาเหล่านี้ ได้มีการศึกษางานโครงสร้างฉลาด รวมถึงระบบตรวจสอบโครงสร้างตามเวลาจริง ตัวตรวจจับและตัวขับเร้า ซึ่งสามารถใช้ในการประเมินค่าความปลอดภัยเพื่อป้องกันอันตรายที่จะมีผลต่อชีวิตและทรัพย์สิน เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย และลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระหว่างการใช้งาน ดังนั้นจึงควรพัฒนาวัสดุที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างฉลาด เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาวัสดุผสมขึ้นเพื่อใช้สำหรับงานโครงสร้างฉลาดที่ทำงานได้หลากหลาย เช่น โครงสร้างที่สามารถควบคุมการสั่นสะเทือน โครงสร้างการป้องกันความปลอดภัยของสะพาน อุปกรณ์ตรวจจับและการเก็บเกี่ยวพลังงาน

วัสดุพีโซอิเล็กทริกแบบดั้งเดิม เช่น เซรามิกพีโซอิเล็กทริก พอลิเมอร์พีโซอิเล็กทริก ฯลฯ ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุฉลาดที่สำคัญ แต่กระนั้นแล้วการนำวัสดุพีโซอิเล็กทริกแบบดั้งเดิมมาใช้ในงานโครงสร้างนั้นอาจจะเกิดปัญหาเนื่องจากเข้ากันไม่ได้กับคอนกรีต ค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเสียงที่ต่างกันมากระหว่างวัสดุพีโซอิเล็กทริกแบบดั้งเดิมและคอนกรีต ในทศวรรษที่ผ่านมาวัสดุผสมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐาน-ปูนซีเมนต์ได้ถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้มีโอกาสที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้านโครงสร้างฉลาดที่ทำงานได้หลากหลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติทางด้านพีโซอิเล็กทริกที่ดี มีค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเสียงที่เข้ากันได้กับคอนกรีต อย่างไรก็ตามเซรามิกพีโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นฐานในวัสดุผสมนี้ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากตะกั่วออกไซด์ในกระบวนการผลิต ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะ เมื่อไม่นานมานี้งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาเซรามิกพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แบเรียมเซอร์โคเนตไทเทเนต (BZT) โซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต (NKN) และแบเรียมโซเดียมไทเทเนต-บิสมาทโพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)

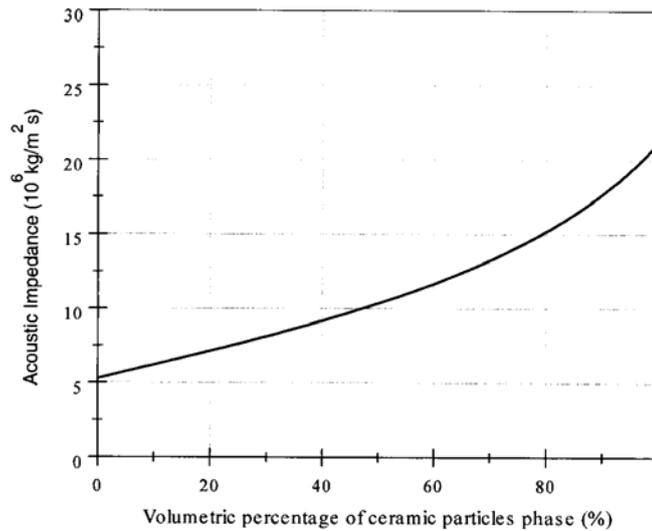
จึงมีแนวคิดเรื่องวัสดุผสมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์เกิดขึ้น โดยวัสดุผสมประเภทนี้ควรมีคุณสมบัติทางด้านพีโซอิเล็กทริกที่ดี มีค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเสียงที่เข้ากันได้กับคอนกรีต เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และง่ายต่อการประดิษฐ์เป็นรูปทรงต่างๆ ที่หลากหลายได้ เช่น การเชื่อมต่อแบบ 0-3 ของวัสดุผสมแบบไร้สารตะกั่ว อย่างไรก็ตามสมบัติ

พีโซอิเล็กทริกของเซรามิก ผลกระทบของการโพลี รูพรันในวัสดุผสม และเทคโนโลยีในการประดิษฐ์ ปัจจัยเหล่านี้ล้วนแต่สำคัญต่อคุณสมบัติพีโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมทั้งสิ้น สำหรับการทำให้เซรามิกหรือวัสดุผสมมีคุณสมบัติพีโซอิเล็กทริกคือ การโพลีหรือการทำซ้ำให้กับชิ้นงาน โดยการให้กระแสไฟฟ้าสูงเพื่อให้ไดโพลโมเมนต์ในชิ้นงานมีการจัดเรียงตัวกันไปตามทิศทางที่ต้องการ เมื่อไม่นานมานี้มีหลายงานวิจัยศึกษาอิทธิพลและเงื่อนไขการทำซ้ำของวัสดุผสมเซรามิกพีโซอิเล็กทริก-ปูนซีเมนต์ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อสมบัติพีโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 เนื่องจากการเชื่อมต่อแบบนี้เซรามิกจะไม่เชื่อมต่อกันทั้ง 3 ทิศทาง นอกจากนี้ความพรุนและความเป็นฉนวนของเฟสซีเมนต์ในวัสดุผสมส่งผลทำให้ยากต่อการทำให้เกิดซ้ำในวัสดุผสม อีกหนึ่งวิธีที่จะช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้คือการเติมเฟสที่สามในวัสดุผสมเพื่อสร้างเครือข่ายของกระแสไฟฟ้าระหว่างอนุภาคเซรามิกและลดรูพรุนให้แก่วัสดุ เฟสที่สามอาจเป็น แกรไฟท์ ท่อนาโนคาร์บอน ฯลฯ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำให้เกิดซ้ำ เพิ่มสมบัติทางด้านพีโซอิเล็กทริกในวัสดุผสม

นอกจากนี้กระบวนการและเทคนิคการประดิษฐ์ก็มีความสำคัญต่อสมบัติของวัสดุผสม ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษากลับการออกแบบ การประดิษฐ์ และประสิทธิภาพของวัสดุผสมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสที่สาม จึงเป็นสิ่งสำคัญและน่าสนใจอย่างมาก และยังไม่มียานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาผลของการเติมเฟสที่สาม คือ คาร์บอน ในวัสดุผสมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ต่อสมบัติทางพีโซอิเล็กทริก สมบัติเชิงกล และ ค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเสียง ซึ่งสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้สามารถใช้ในการประเมินค่าเพื่อนำไปสู่การพัฒนาประยุกต์ใช้เป็นโครงสร้างฉลาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไปในอนาคต

### 1.1.2 ทบทวนวรรณกรรม

ปี ค.ศ. 2002 Li และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาวัสดุผสมแบบ 0-3 พีโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์ โดยศึกษาถึงขนาดของผงเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) ที่มีต่อค่าความต้านทานเชิงซ้อน ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก วัสดุผสมระหว่างพีโซอิเล็กทริกกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมอีกประเภทหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อน (acoustic impedance) ของวัสดุผสมที่ทำจากวัสดุพีโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์ใกล้เคียงกับค่าของวัสดุโครงสร้างทั่วไปที่ทำจากคอนกรีต ( $\approx 9 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) ดังรูปที่ 1.1 จากผลการทดลองพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก และค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกลจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคและปริมาณของเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้นักวิจัยยังพบปัญหาในขั้นตอนของการผสม คือ เมื่อเพิ่มปริมาณเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตมากขึ้นถึง 70% โดยปริมาตร จะเกิดการไม่เข้ากันของวัสดุผสม สำหรับผลการทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกและพีโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมกับปริมาณและขนาดอนุภาคของเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตที่ต่าง ๆ กัน แสดงดังตารางที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อน (acoustic impedance) ของวัสดุผสมแบบ 0-3 เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต-ปูนซีเมนต์ [1]

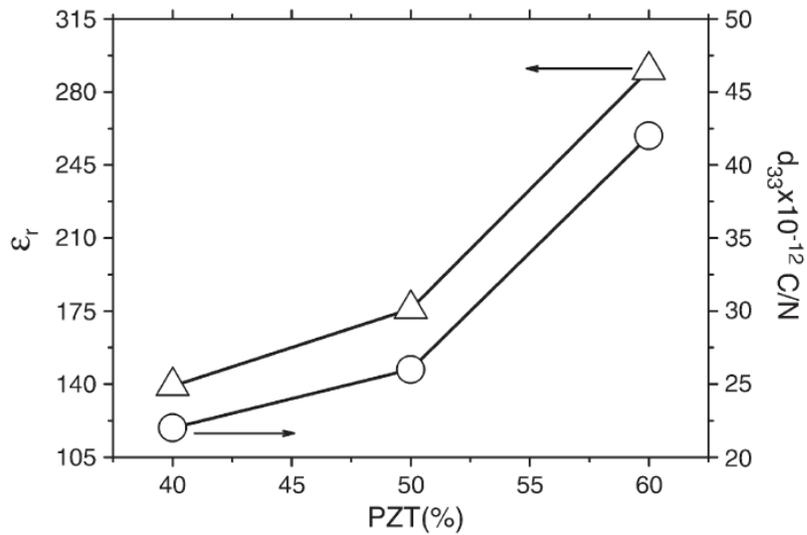
ตารางที่ 1.1 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกและพีโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต-ปูนซีเมนต์กับปริมาณและขนาดอนุภาคของเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตที่ต่าง ๆ กัน [1]

Specimen code	PZT particle type	PZT particle content (vol%)	Piezoelectric strain factor, $d_{33}$ ( $10^{-12}$ C/N)	Piezoelectric voltage factor, $g_{33}$ ( $10^{-3}$ V-m/N)	Electromechanical coupling coefficient, $K_t$	Dielectric constant, $\epsilon_r$
a	PZT I	35	7.2	18.6	11.6	43.5
b	PZT I	50	9.5	16.8	12.9	63.9
c	PZT I	65	18.0	22.1	18.6	92.1
d	PZT II	35	8.1	15.1	12.9	60.7
e	PZT II	50	12.5	15.0	13.2	94.2
f	PZT II	70	33.4	20.7	20.7	182.2
Matrix		0	0	0	0	26.2

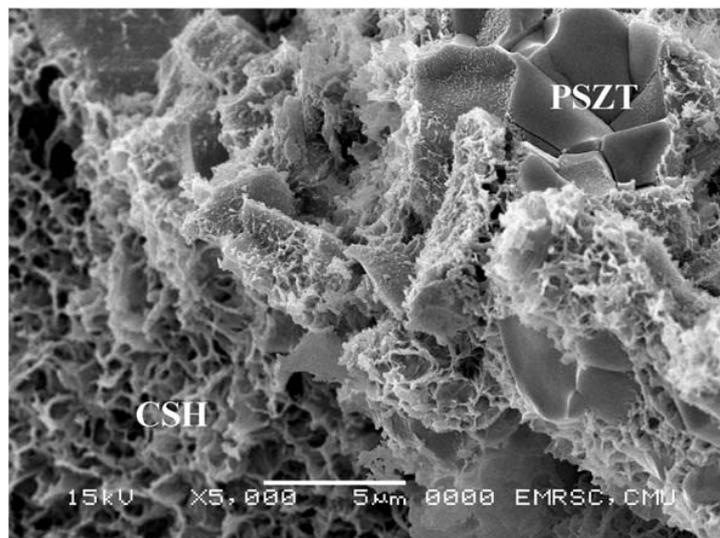
ในปี ค.ศ. 2007 Chaipanich และคณะ [2] ได้ศึกษาการประดิษฐ์และสมบัติของวัสดุผสมแบบ 0-3 เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้ปริมาณของ PZT = 40%, 50% และ 60% โดยปริมาตร จากนั้นนำเซรามิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาผสมเข้าด้วยกัน และขึ้นรูปด้วยการอัดด้วยแรง 80 MPa เพื่อผลิตเป็นวัสดุผสมแบบ 0-3 เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แล้วจึงนำวัสดุผสมนี้ไปบ่มที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นทำการทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกและพีโซอิเล็กทริก สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ ) คือ 291 ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ( $\tan\delta$ ) คือ 0.63 และค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก ( $d_{33}$ ) คือ 43 pC/N ที่ปริมาณ 70% PZT แสดงดังรูปที่ 1.2

ในปีค.ศ. 2009 Chaipanich และคณะ [3] ได้ทำการพัฒนาและศึกษาสมบัติของวัสดุผสม 0-3 เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตที่เติม Sr และ Sb (PSZT)-ปูนซีเมนต์ โดยใช้ปริมาณเซรามิก PSZT = 50% และ 70% โดยปริมาตร หลังจากทำการอัดขึ้นรูปแล้ว จึงนำวัสดุผสมนี้ไปบ่มที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 3 วัน ก่อนที่จะนำไปทดสอบสมบัติ สำหรับโครงสร้างทางจุลภาคของ

วัสดุผสม ได้ศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นอนุภาคของเซรามิกที่ถูกล้อมรอบโดยปูนซีเมนต์ และยังคงบริเวณรอยต่อที่ค่อนข้างแน่นตัวระหว่างเซรามิกและปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 1.3 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกมีแนวโน้มและค่าที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Furukawa โดยวัสดุผสมที่มีปริมาณเซรามิก PSZT = 70% โดยปริมาตร จะมีค่า  $d_{33} = 48$  pC/N



รูปที่ 1.2 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกและพีโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต-ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ [2]



รูปที่ 1.3 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสม 0-3 เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตที่เติม Sr และ Sb (PSZT)-ปูนซีเมนต์ [3]

ปี ค.ศ. 2013 Chaipanich และคณะ [4] ได้ทำการทดสอบความต้านทานต่อการอัดและศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมแบบ 0-3 เซรามิก PZT-ปูนซีเมนต์ พบว่าความต้านทานต่อการอัดเพิ่มขึ้นกับปริมาณ PZT ที่เพิ่มขึ้น โดยใช้ปริมาณเซรามิก PZT = 40% 50% และ 60% โดยปริมาตร ความต้านทานต่อการอัดที่ได้อยู่ที่ 41.5-45.0 MPa และจากโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม นอกจากจะพบเฟสเซรามิกแล้ว ยังพบผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และเอททริงไกต์

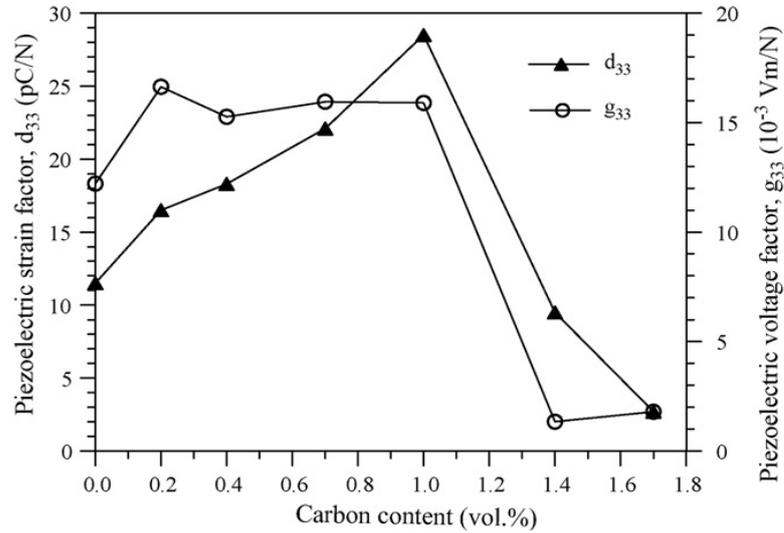
ปี ค.ศ. 2014 Chaipanich และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุผสมเซรามิก PZT-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับระยะเวลา โดยได้ทำการขึ้นรูปวัสดุผสมจากเทคนิคการอัด แล้วจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปต้มที่อุณหภูมิ 60 °C จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นกับปริมาณของเซรามิก PZT และจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดกับระยะเวลาในช่วง 10 วันแรก เมื่อผ่านไป 90 วันและ 1 ปี ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมจะไม่เปลี่ยนแปลง

อย่างไรก็ตาม การเตรียมวัสดุผสม 0-3 เซรามิกพีโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ-ปูนซีเมนต์ ให้มีสมบัติพีโซอิเล็กทริกที่ดีนั้นทำได้ยาก เนื่องจากการทำให้เกิดขั้วหรือการโพลของวัสดุผสมกลุ่มนี้ทำได้ยาก ซึ่งเป็นผลมาจากการมีรูพรุนจำนวนมากในวัสดุผสม ดังนั้นจึงมีการนำเทคนิคใหม่ ๆ มาช่วยเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำขั้วของเซรามิกพีโซอิเล็กทริกในวัสดุผสม นั่นก็คือการเติมเฟสสารกึ่งตัวนำลงไปเล็กน้อยในวัสดุผสม เพื่อให้เกิดเป็นเฟสที่สามขึ้นมา เช่น คาร์บอน เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุผสมใหม่ขึ้นมาซึ่งจะเป็นการรวมกันของเฟสเซรามิก-ซีเมนต์-เฟสที่สาม [6-8]

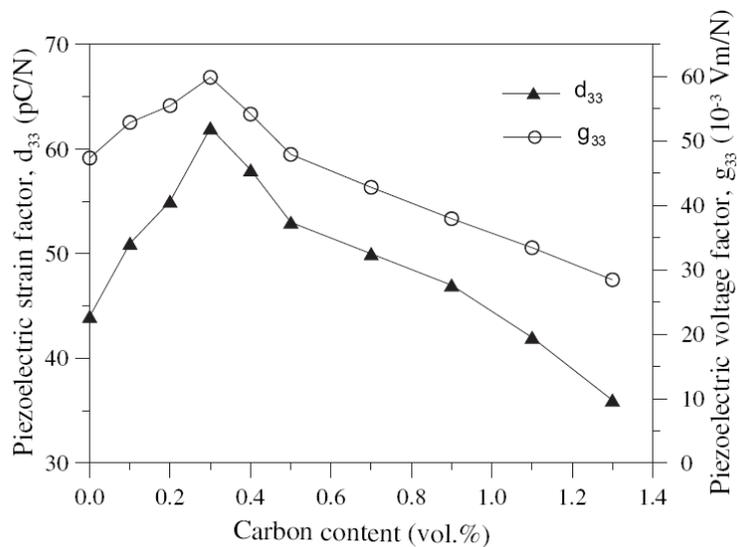
ในปี ค.ศ. 2009 Gong และคณะ [6] ได้ทำการพัฒนาระบบของวัสดุผสม 0-3 เซรามิก เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT)-ปูนซีเมนต์ โดยการเติม carbon black เข้าไปในระบบ แล้วทำการศึกษากระบวนการโพลและพบว่า อุณหภูมิที่ใช้การโพลวัสดุผสมนี้ คืออุณหภูมิห้องปกติ ต่างจากวัสดุผสม 0-3 เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT)-ปูนซีเมนต์ที่ไม่เติม carbon black จะใช้อุณหภูมิในการโพลคือ 120 °C ซึ่งส่งผลดีต่อสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เพราะผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ อาจจะเสียดสภาพหรือถูกทำลาย หากทำการโพลที่อุณหภูมิสูง จากนั้นได้นำเอาวัสดุผสมนี้ไปตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก สัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก และสัมประสิทธิ์แรงดันพีโซอิเล็กทริก พบว่าที่ 1% โดยปริมาตรของ carbon black จะให้ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกที่สูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 1.4

ในปีเดียวกันนี้เอง Shifeng และคณะ [7] ได้ทำการเตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 เซรามิกพีโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ  $(0.08\text{Pb}(\text{Li}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})\text{O}_3 \cdot 0.47\text{PbTiO}_3 \cdot 0.45\text{PbZrO}_3$ ; P(LN)ZT)-ปูนซีเมนต์ซัลโฟอะลูมิเนต และทำการเติม carbon black เข้าไปในระบบ เพื่อศึกษาอิทธิพลของคาร์บอนที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริก พีโซอิเล็กทริก และการนำไฟฟ้า ในวัสดุผสม การเติม carbon black เข้าไปจะช่วยปรับปรุงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก ( $d_{33}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพีโซอิเล็กทริก ( $g_{33}$ ) ในวัสดุผสมนี้ โดยพบว่าที่ 3% โดยน้ำหนักของ carbon black จะให้ค่า  $d_{33}$  และ  $g_{33}$  ที่สูงที่สุด

ต่อมาในปี 2011 Gong และคณะ [8] ได้ทำการพัฒนาระบบของวัสดุผสม 0-3PZT-ปูนซีเมนต์ โดยการเติมท่อคาร์บอน (CNTs) เข้าไปในระบบ โดยใช้ CNTs ในช่วง 0-1.3 % โดยปริมาตร โดยพบว่าที่ 3% โดยปริมาตรของ CNTs จะให้ค่า  $d_{33}$  และ  $g_{33}$  ที่สูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม 0-3 เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT)-ปูนซีเมนต์ กับการเติม carbon black [6]



รูปที่ 1.5 แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม 0-3 เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT)-ปูนซีเมนต์ กับการเติมท่อคาร์บอน [8]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าเฟสที่สาม เช่น เฟสคาร์บอนที่เติมลงไปในระบบวัสดุผสมแบบ 0-3 เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ-ปูนซีเมนต์ สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุผสมได้ อาทิเช่น สมบัติเพียโซอิเล็กทริก สำหรับวัสดุผสมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ-ปูนซีเมนต์ ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับงานทางด้านโครงสร้างฉลาด แต่เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบในวัสดุผสมนี้ เป็นสาเหตุของมลภาวะ และปัญหาทางสิ่งแวดล้อม งานวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นศึกษาวัสดุผสมแบบไร้สารตะกั่ว [9-15]

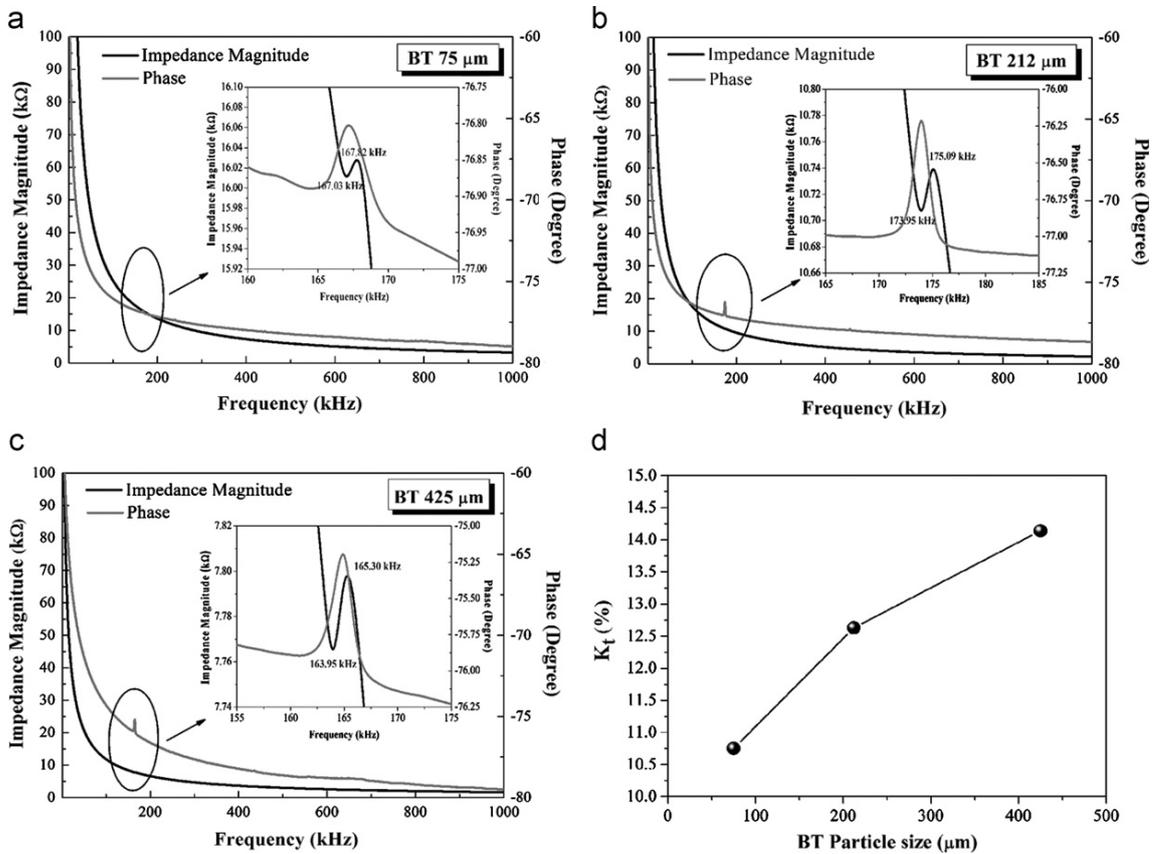
ในปี ค.ศ. 2009 Potong และคณะ [9] ได้ศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต (NKN) ต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม 0-3 เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ขนาดอนุภาค  $450 \mu\text{m}$  ( $\epsilon_r = 192$ ) สำหรับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะลดลงกับการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต

ในปี ค.ศ. 2013 Rianyo และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณและขนาดอนุภาคแบเรียมไทเทเนตที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์คูลอมบ์ไฟฟ้าเชิงกล ( $K_f$ ) ของวัสดุผสม 0-3 แบเรียมไทเทเนต (BT)-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากผลการทดลองพบว่าค่า  $K_f$  เพิ่มขึ้นกับขนาดอนุภาคที่เพิ่มขึ้น มันอาจจะเนื่องจากการพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเมทริกซ์ปูนซีเมนต์และอนุภาค BT มากขึ้นเมื่อพิจารณาที่ปริมาณ BT เดียวกัน หากขนาดอนุภาค BT มีขนาดเล็กจะไปลดประสิทธิภาพของการโพลและพันธะระหว่างสองเฟสก็จะแย่ง โดยค่า  $K_f = 10.8\%$  และ  $14.1\%$  ที่ขนาดอนุภาค  $= 75 \mu\text{m}$  และ  $425 \mu\text{m}$  ตามลำดับ โดยจะแสดงพีด Impedance และเฟสในรูปที่ 1.6 เมื่อทำการเทียบค่า  $K_f$  กับอิทธิพลของปริมาณ BT พบว่าเพิ่มขึ้นกับปริมาณ BT ที่เติมลงไปและจะมากที่สุดที่ BT 70% โดยปริมาตร มีค่า  $K_f = 16.6\%$  สำหรับค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมนี้พบว่าที่  $\approx 40\%-60\%$  โดยปริมาตรของ BT จะมีความเข้ากันได้กับโครงสร้างคอนกรีต ( $\approx 10 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ )

ในปี ค.ศ. 2017 Potong และคณะ [11] ได้ทำการตรวจสอบสมบัติการขยายตัวทางความร้อนของวัสดุผสม 0-3 แบเรียมเซอร์โคเนตไทเทเนต (BZT)-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) โดยทดสอบในช่วงอุณหภูมิ  $-100^\circ\text{C}$  ถึง  $250^\circ\text{C}$  ผลการทดลองพบพีดอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไทเทเนตในทุกวัสดุผสมที่ทำการทดสอบในช่วงที่ลดอุณหภูมิจาก  $250^\circ\text{C}$  ถึง  $100^\circ\text{C}$  สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันในปูนซีเมนต์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูง ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุผสมมีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างคอนกรีต เมื่อนำไปเทียบกับทฤษฎีพบว่าจะได้ค่าใกล้เคียงกับ Dougill's model

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าควรจะมีการพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุผสมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ อาทิเช่นการเติมเฟสที่สามลงไปในระบบ เช่น ท่อนาโนคาร์บอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาการออกแบบ การประดิษฐ์ และประสิทธิภาพของ

วัสดุผสมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ กับการเติมเฟสที่สามสำหรับโครงสร้างฉลาดที่ทำงานได้หลากหลายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 1.6 แสดงพิกัด Impedance และเฟสของวัสดุผสม 0-3 แบบเรียงไทเทเนต (BT)-ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ที่ BT 50% โดยปริมาตรกับขนาดอนุภาค BT ต่างๆ (a) 75  $\mu\text{m}$ , (b) 212  $\mu\text{m}$ , (c) 425  $\mu\text{m}$  และ (d) ค่าสัมประสิทธิ์คูกวบไฟฟ้าเชิงกล ( $K_t$ ) [11]

เอกสารอ้างอิง

[1] Li Z., Zhang D., Wu K., Cement-based 0-3 piezoelectric composites, Journal of the American Ceramic Society, 2002; 85: 305-313.  
 [2] Chaipanich A., Jaitanong N., Tunkasiri T., Fabrication and properties of PZT-ordinary Portland cement composites, Materials Letters, 2007; 61: 5206-5208.  
 [3] Chaipanich A., Rujjanagul G., Tunkasiri T., Properties of Sr- and Sb-doped PZT-Portland cement composites, Applied Physics A; Materials Science & Processing, 2009; 94: 329-337.  
 [4] Chaipanich A., Rianyoi R., Potong R., Jaitanong N., Chindaprasirt P., Compressive strength and microstructure of 0-3 lead zirconate titanate ceramic-Portland cement composites, Ferroelectrics, 2013; 457: 53-61.

- [5] Chaipanich A., Rianyo R., Potong R., Jaitanong N., Aging of 0-3 piezoelectric PZT ceramic-Portland cement composites, *Ceramics International*, 2014; 40: 13579-13584.
- [6] Gong H., Li Z., Zhang Y., Fan R., Piezoelectric and dielectric behavior of 0-3 cement-based composites mixed with carbon black, *Journal of the European Ceramic Society*, 2009; 29: 2013-2019.
- [7] Shifeng H., Xue L., Futian L., Jun C., Dongyu X., Xin C., Effect of carbon black on properties of 0-3 piezoelectric ceramic/cement composites, *Current Applied Physics*, 2009; 9: 1191-1194.
- [8] Gong H., Zhang Y., Quan J., Che S., Preparation and properties of cement based piezoelectric composites modified by CNTs, *Current Applied Physics*, 2011; 41: 653-656.
- [9] Potong R., Rianyo R., Jarupoom P., Pengpat K., Chaipanich A., Effect of particle size on the dielectric properties of sodium potassium niobate-Portland cement composites, *Ferroelectric Letters*, 2009; 3: 76-81.
- [10] Rianyo R., Potong R., Ngamjarrojana A., Chaipanich A., 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.
- [11] Potong R., Rianyo R., Ngamjarrojana A., Yimnirun R., Guo R., Bhalla A.S., Chaipanich A., Thermal expansion behaviors of 0-3 connectivity lead-free barium zirconate titanate-Portland cement composites, *Ceramics International*, 2017; 43: S129-S135.
- [12] Rianyo R., Potong R., Jaitanong N., Yimnirun R., Chaipanich A., Dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties of 0-3 barium titanate-Portland cement composites, *Applied Physics A*, 2011; 104: 661-666.
- [13] Hunpratub S., Yamwong T., Sutham S., Maensiri S., Chindaprasirt P., Effect of particle size on the dielectric and piezoelectric properties of 0-3 BCTZO/cement composites, *Ceramics International*, 2014; 40: 1209-1213.
- [14] Potong R., Rianyo R., Ngamjarrojana A., Yimnirun R., Guo R., Bhalla A.S., Chaipanich A., 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.
- [15] Potong R., Rianyo R., Ngamjarrojana A., Yimnirun R., Guo R., Bhalla A.S., Chaipanich A., 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.

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อออกแบบและประดิษฐ์วัสดุผสมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสที่สามเพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับงานโครงสร้างฉลาดที่ทำงานได้หลากหลายทางวิศวกรรมโยธา

1.2.2 เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของวัสดุผสมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสที่สามและศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ

1.2.3 เพื่อนำผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติต่อไป

## 1.3 วิธีการทดลอง

1.3.1 ศึกษาเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง จากนั้นทำการเตรียมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เซรามิกพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วบิสมัทโซเดียมไทเทเนต-บิสมัทโพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต ( $0.88\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-0.08\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3-0.04\text{BaTiO}_3$ ; BNT-BKT-BT; BNBK) ด้วยวิธีผสมผงออกไซด์ (Conventional mixed oxide method) และด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ทำให้ได้เม็ดเซรามิก BNBK

1.3.2 นำเม็ดเซรามิก BNBK มาขัดผิวหน้าเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมาด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 แล้วจึงนำมาบด เพื่อคัดขนาดให้ขนาดเซรามิก BNBK มีค่า 300-600  $\mu\text{m}$  จากนั้นนำอนุภาคผงเซรามิก BNBK (อยู่ในช่วง 300-600  $\mu\text{m}$ ) ในปริมาณ 50% โดยปริมาตร ผสมกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (PC) ที่มีการแทนที่ด้วยเฟสที่สาม ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) 0%, 0.3%, 0.5%, 1%, 1.5% และ 2% โดยปริมาตร

1.3.3 นำส่วนผสมที่ได้ไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ในแม่พิมพ์โลหะที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm แล้วจึงนำวัสดุผสมที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 ที่อัดขึ้นรูปแล้ว ไปวางในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 60 °C ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 98% เป็นเวลา 3 วัน ก่อนที่จะนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

1.3.4 สำหรับการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสม คือ หลังจากเตรียมวัสดุผสมเสร็จเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำชิ้นงานทาด้วยกาวเงินทั้งสองด้าน แล้วนำไปวัดความจุไฟฟ้า (เพื่อนำไปคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก) ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก และค่าความต้านทานไฟฟ้า (เพื่อนำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า) ด้วยเครื่อง LCZ meter

1.3.5 สำหรับการทดสอบสมบัติทางพีโซอิเล็กทริกจะต้องทำให้ชิ้นงานเกิดขั้วหรือการโพลงก่อน แล้วนำไปวัดค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก และค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพีโซอิเล็กทริก

1.3.6 สำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานเสียงเชิงซ้อน นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ความพรุน สมบัติเชิงกล เช่น กำลังอัด และวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม

1.3.7 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยนำผลการวิจัยที่ได้มาวิเคราะห์ และเชื่อมโยงความสัมพันธ์จากผลการวิจัยกับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง และสรุปผลการวิจัย

1.3.8 รวบรวมผลการวิจัยและจัดทำรายงาน

1.3.9 เขียนผลการวิจัยเชิงวิชาการเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อนักวิจัยและผู้ที่เกี่ยวข้องศึกษาต่อไป

#### 1.4 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานตลอดระยะเวลา 2 ปี (2 พฤษภาคม พ.ศ.2559 - 1 พฤษภาคม พ.ศ.2561)

รายละเอียดของ แผนงาน	ปีที่ 1												ปีที่ 2												
	เดือนที่ 1-6						เดือนที่ 7-12						เดือนที่ 1-6						เดือนที่ 7-12						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ศึกษาเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง	←→																	←→							
2. เตรียมวัสดุผสมที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 0-3 กับการเติมเฟสที่สาม (เฟสที่สาม เช่น ท่อนาโนคาร์บอน เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น)				←→																					
3. ทำการโพลและหาเงื่อนไขในการโพลที่เหมาะสมกับวัสดุผสม										←→															
4. ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสม										←→															
5. วิเคราะห์ผลการทดลองและตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย													←→									←→			



## 2. ผลการทดลอง

### 2.1 สมบัติไดอิเล็กทริก สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติพิโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม

เมื่อนำวัสดุผสมที่ได้ไปวัดความจุไฟฟ้า แล้วนำไปคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากสมการที่ 2.1 จากการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ ) และค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ( $\tan\delta$ ) ของวัสดุผสมเซรามิกพิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอน ในอัตราส่วนของ BNBK:PC:CNTs เท่ากับ 50:50:0, 50:49.7:0.3, 50:49.5:0.5, 50:49:1, 50:48.5:1.5 และ 50:48:2 โดยทำการทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความถี่ต่างๆ ในช่วง 1,000 Hz – 1,500,000 Hz แสดงผลดังรูป 2.1

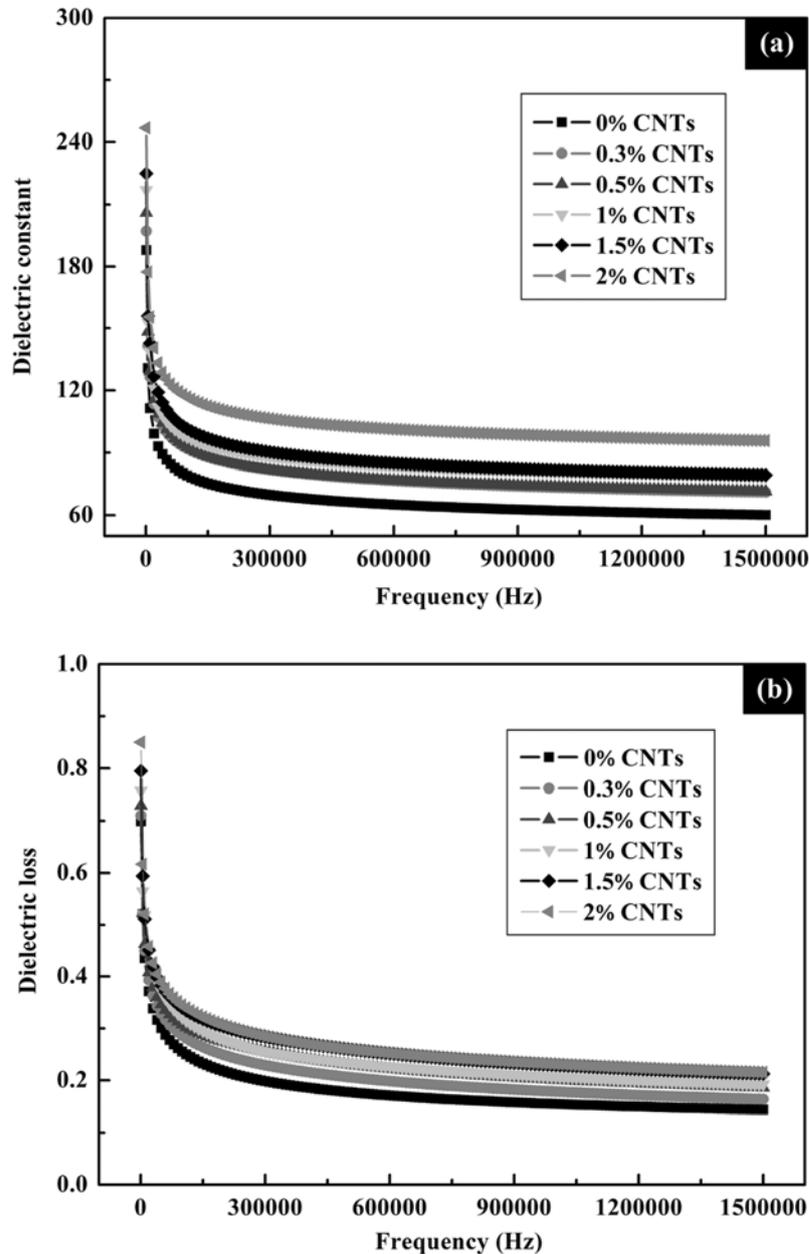
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสามารถคำนวณได้จากการนำค่าความจุไฟฟ้าที่วัดจากเครื่อง LCZ meter มาแทนในสมการที่ 2.1

$$\epsilon_r = \frac{Ct}{\epsilon_0 A} \quad (2.1)$$

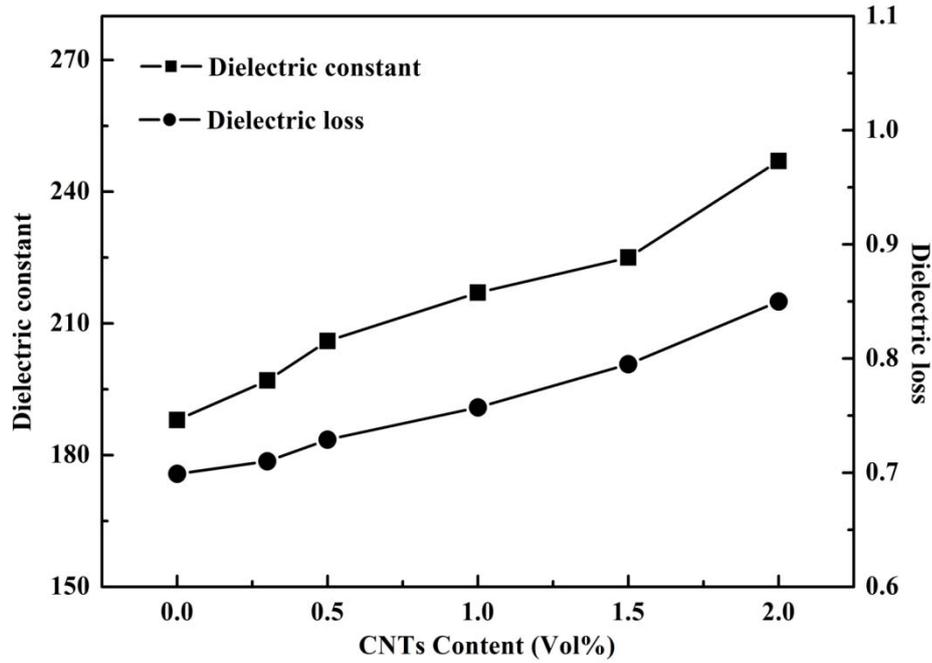
เมื่อ	$\epsilon_r$	=	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
	C	=	ค่าความจุไฟฟ้า (F)
	$\epsilon_0$	=	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่า $8.85 \times 10^{-12}$ (F/m)
	A	=	พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าบนสารไดอิเล็กทริก ( $m^2$ )
	t	=	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (m)

จากรูปที่ 2.1 พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงกับการเพิ่มขึ้นของความถี่ โดยที่ความถี่ 1000 Hz ของวัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอนที่ 1 % โดยปริมาตร มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 217 เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 1,500,000 Hz วัสดุผสมจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง ซึ่งมีค่าประมาณ 78 เนื่องจากที่ความถี่สูงไดโพลในชิ้นงานกลับตัวไม่ทัน ส่วนค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกนั้น จะมีแนวโน้มเดียวกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ซึ่งจะลดลงกับการเพิ่มขึ้นของความถี่ โดยที่ความถี่ 1000 Hz ของวัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอนที่ 1 % โดยปริมาตร มีค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.75 เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 1,500,000 Hz วัสดุผสมจะมีค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกลดลง ซึ่งมีค่าประมาณ 0.19 เมื่อวิเคราะห์อิทธิพลของท่อนาโนคาร์บอนต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1000 Hz แสดงผลดังรูป 2.2 พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นกับปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น โดยจะได้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดประมาณ 247 ของวัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอนที่ 2 % โดยปริมาตร เนื่องจากว่าท่อนาโนคาร์บอนเป็นเฟสตัวนำ ส่งผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นกับปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากอิทธิพลของท่อนาโนคาร์บอนต่อสภาพการนำไฟฟ้า

(๘) ของวัสดุผสมเซรามิกฟิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วบิสมัทโซเดียมไทเทเนต-บิสมัทโพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอน แสดงผลดังรูป 2.3 พบว่าสภาพการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นในวัสดุผสม



รูปที่ 2.1 อิทธิพลของความถี่ต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกฟิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วบิสมัทโซเดียมไทเทเนต-บิสมัทโพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอน (a) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ (b) ค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

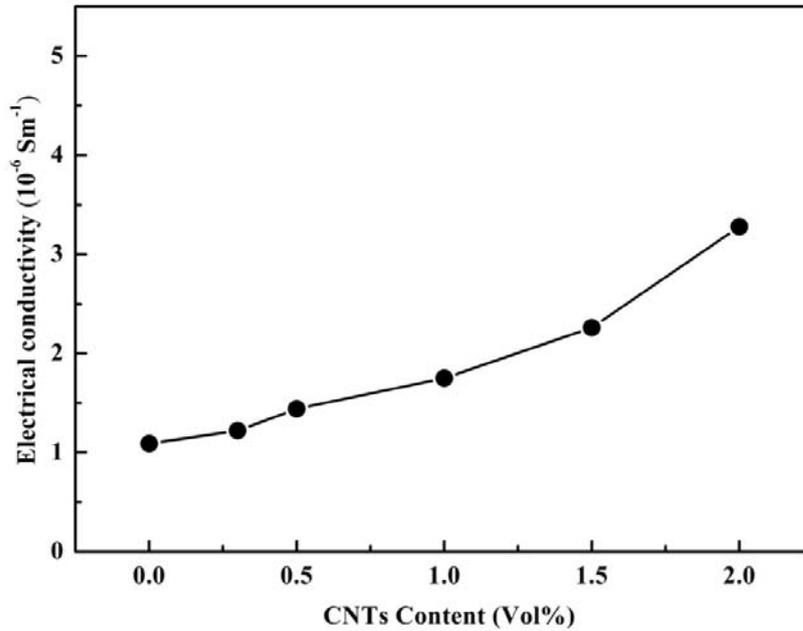


รูปที่ 2.2 อิทธิพลของท่อนาโนคาร์บอนต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกพีซีไดอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วบิสมาต์โซเดียมไทเทเนต-บิสมาต์โพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอน

สภาพการนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากการนำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดจากเครื่อง LCZ meter มาแทนในสมการที่ 2.2

$$\sigma = \frac{t}{RA} \quad (2.2)$$

เมื่อ	$\sigma$	=	สภาพการนำไฟฟ้า (S/m)
	R	=	ความต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega$ )
	A	=	พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าบนสารไดอิเล็กทริก ( $m^2$ )
	t	=	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (m)



รูปที่ 2.3 อิทธิพลของท่อนาโนคาร์บอนต่อสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุผสมเซรามิกพีซีอีเล็กทริก ไร้สารตะกั่วบิสมาต์โซเดียมไทเทเนต-บิสมาต์โพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)-ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอน

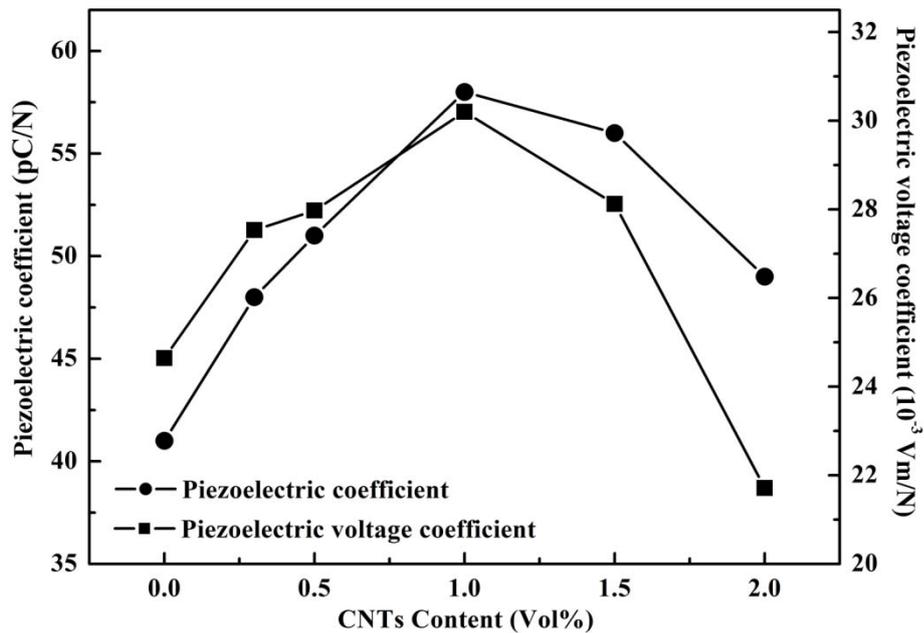
จากรูปที่ 2.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์พีซีอีเล็กทริก ( $d_{33}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพีซีอีเล็กทริก ( $g_{33}$ ) ของวัสดุผสมเซรามิกพีซีอีเล็กทริกไร้สารตะกั่วบิสมาต์โซเดียมไทเทเนต-บิสมาต์โพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต-ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพีซีอีเล็กทริกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์พีซีอีเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพีซีอีเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของท่อนาโนคาร์บอน สำหรับวัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอนที่ 0% 0.3% 0.5% และ 1 % โดยปริมาตร ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการเชื่อมต่อของวัสดุผสมแบบ 0-3 นี้ เซรามิกจะไม่เชื่อมต่อกันทั้ง 3 ทิศทาง นอกจากนี้ความพรุนและความเป็นฉนวนของเฟสซีเมนต์ในวัสดุผสม ส่งผลทำให้ยากต่อการทำให้เกิดขั้วหรือการโพลในวัสดุผสม การเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณเล็กน้อย อาจจะช่วยสร้างเครือข่ายของกระแสไฟฟ้าระหว่างอนุภาคเซรามิกและลดรูปพรุนให้แก่วัสดุ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำให้เกิดขั้ว และปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านพีซีอีเล็กทริกในวัสดุผสม อย่างไรก็ตามหากเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้เกิดการนำไฟฟ้าและค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในวัสดุผสมที่มากเกินไป จนอาจทำให้เกิดการลัดวงจรได้ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์พีซีอีเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพีซีอีเล็กทริกสูงสุดเท่ากับ  $58 \text{ pC/N}$  และ  $30 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$  ตามลำดับ ที่วัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอนที่ 1 % โดยปริมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเซรามิกเท่ากันและชนิดเดียวกัน พบว่าวัสดุผสมแบบ 0-3 กับการเติมเฟสท่อนาโน

คาร์บอนที่ 1 % โดยปริมาตร มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพิโซอิเล็กทริกที่สูงกว่าวัสดุผสมแบบ 1-3 ที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน ( $\approx 24 \times 10^{-3}$  Vm/N) แต่เมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนในวัสดุผสมมากกว่า 1% โดยปริมาตร (วัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอนที่ 1.5% และ 2 % โดยปริมาตร) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพิโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมลดลงกับปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพิโซอิเล็กทริกสามารถคำนวณได้สมการที่ 2.3

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (2.3)$$

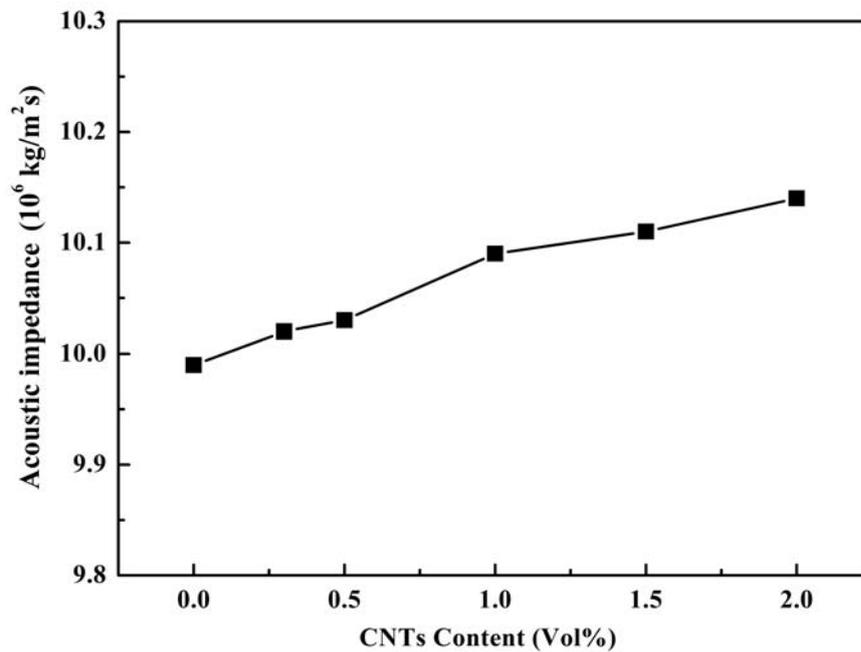
- เมื่อ  $g_{33}$  = สัมประสิทธิ์แรงดันพิโซอิเล็กทริก (Vm/N)  
 $d_{33}$  = สัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริก (C/N)  
 $\epsilon_0$  = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่า  $8.85 \times 10^{-12}$  (F/m)  
 $\epsilon_r$  = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของท่อนาโนคาร์บอนต่อค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพิโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกพิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วบิสมาต์โซเดียมไทเทเนต-บิสมาต์โพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอน

## 2.2 สมบัติความต้านทานเสียงเชิงซ้อน สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลของวัสดุผสม

อิทธิพลของท่อนานาโนคาร์บอนต่อความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมเซรามิกพีซี อีเล็กทริกไร้สารตะกั่วบิสมัทโซเดียมไทเทเนต-บิสมัทโพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อนานาโนคาร์บอน ในอัตราส่วนเซรามิกพีซี อีเล็กทริกไร้สารตะกั่ว:ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์:ท่อนานาโนคาร์บอน (BNBK:PC:CNTs) มีค่าเท่ากับ 50:50:0, 50:49.7:0.3, 50:49.5:0.5, 50:49:1, 50:48.5:1.5 และ 50:48:2 โดยทำการทดสอบความต้านทานเสียงเชิงซ้อนที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 อิทธิพลของท่อนานาโนคาร์บอนต่อความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมเซรามิกพีซี อีเล็กทริกไร้สารตะกั่วบิสมัทโซเดียมไทเทเนต-บิสมัทโพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อนานาโนคาร์บอน

โดยค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนสามารถคำนวณได้จากการนำค่าความเร็วเสียงที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนาแบบอัลตราโซนิกส์ มาแทนในสมการที่ 2.4

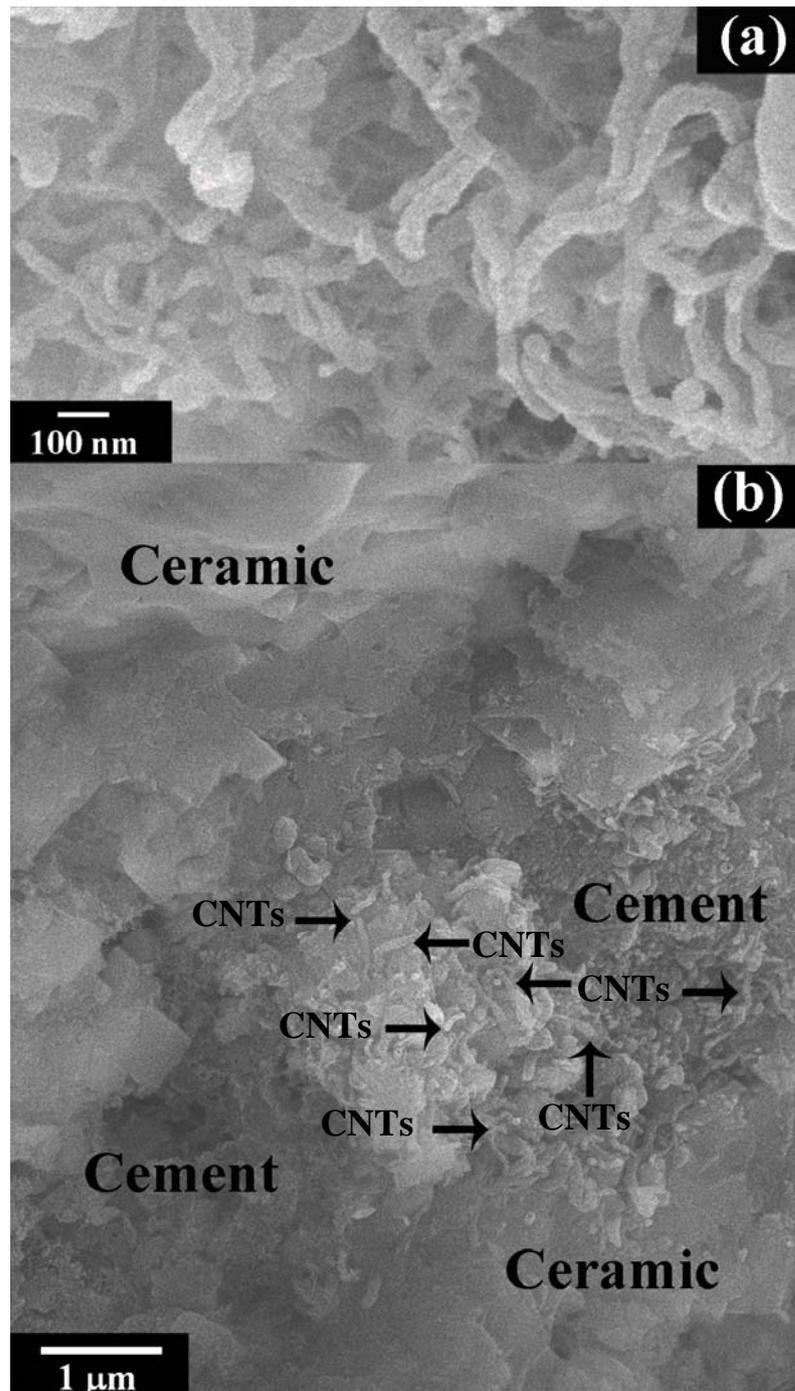
$$Z = \rho v \quad (2.4)$$

เมื่อ  $Z$  = ความต้านทานเสียงเชิงซ้อน ( $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ )  
 $\rho$  = ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $v$  = ความเร็วเสียง ( $\text{m/s}$ )

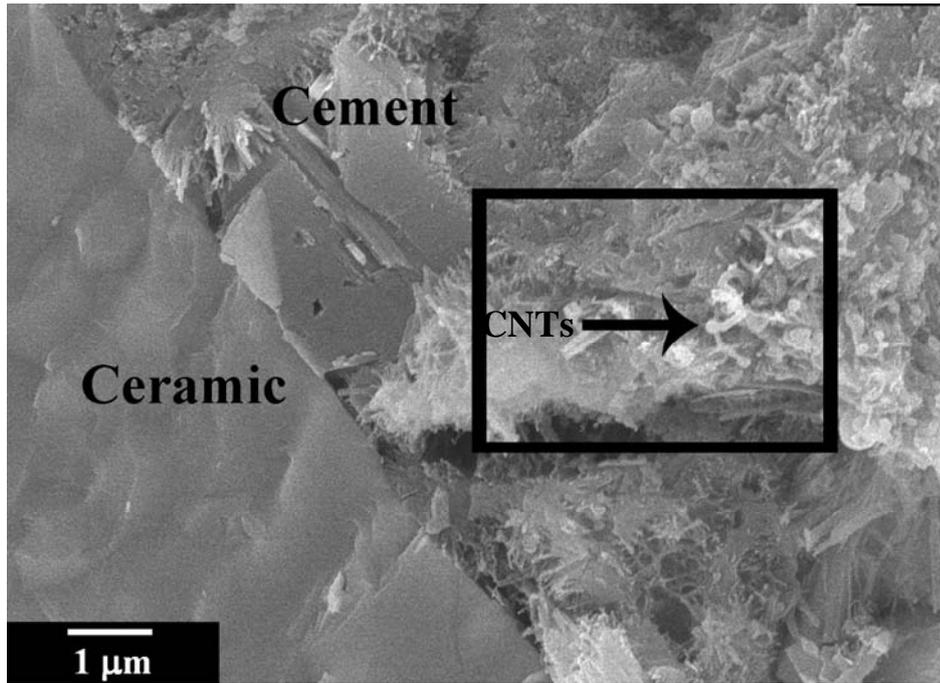
พบว่าค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของท่อ นาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมเซรามิกพีไอโออิเล็กทรอนิกส์ ไร้สารตะกั่วบิสมัทโซเดียมไทเทเนต-บิสมัทโพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อ นาโนคาร์บอน มาเปรียบเทียบค่าความต้านทานเสียง เชิงซ้อนของคอนกรีต ซึ่งมีค่าประมาณ  $10 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$  พบว่า วัสดุผสมมีความเข้ากันได้กับ โครงสร้างหลักหรือคอนกรีต เนื่องจากมีค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนใกล้เคียงกับคอนกรีต นอกจากนี้เมื่อทำการวัดความพรุนของวัสดุผสมพบว่าความพรุนของวัสดุผสมลดลงกับการ เพิ่มขึ้นของท่อ นาโนคาร์บอน มีค่าความพรุน คือ 10.12%, 10.02%, 9.91%, 9.74%, 9.66% และ 9.51% สำหรับวัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อ นาโนคาร์บอนที่ 0%, 0.3%, 0.5%, 1%, 1.5% และ 2% ตามลำดับ สำหรับผลการทดสอบกำลังอัดของวัสดุผสมที่ได้ขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก พบว่า วัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อ นาโนคาร์บอนที่ 1% ได้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 38.14 MPa ซึ่งมี ค่ากำลังอัดมากกว่าวัสดุผสมที่ไม่ได้เติมท่อ นาโนคาร์บอน (33.38 MPa)

### 2.3 สมบัติลักษณะเฉพาะของวัสดุผสม

ในส่วนของการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของท่อ นาโนคาร์บอนด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 2.6(a) พบว่าท่อ นาโนคาร์บอนมีลักษณะโค้งงอ และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 100 nm สำหรับรูปที่ 2.6(b) แสดงวัสดุผสมเซรามิกพีไอโอ อิเล็กทรอนิกส์ ไร้สารตะกั่วบิสมัทโซเดียมไทเทเนต-บิสมัทโพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อ นาโนคาร์บอน บริเวณที่ลูกศรชี้ คือ ท่อ นาโน คาร์บอน ซึ่งอยู่ในส่วนของปูนซีเมนต์ ท่อ นาโนคาร์บอนนี้จะช่วยเชื่อมต่อระหว่างปูนซีเมนต์และ อนุภาคผงเซรามิก BNBK จากรูปที่ 2.7 แสดงรอยต่อของวัสดุผสมระหว่างอนุภาคผงเซรามิก BNBK ปูนซีเมนต์ และท่อ นาโนคาร์บอน จากรูปพบผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และเอททริงไกต์ ที่บริเวณของปูนซีเมนต์และรอยต่อของวัสดุ ผสม และยังพบท่อ นาโนคาร์บอนซึ่งมีลักษณะโค้งงอที่ไปอุดรูพรุนในส่วนผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ของปูนซีเมนต์ (บริเวณที่ลูกศรชี้ คือ ท่อ นาโนคาร์บอน) จากรูปยังสามารถยืนยันได้ว่าชั้นงานที่ เตรียมได้เป็นวัสดุผสม เนื่องจากวัสดุผสมเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นโดยการผสมกันของวัสดุต่างชนิดกัน ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยการยึดติดกันนี้ยังคงสามารถแบ่งแยกวัสดุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบ ได้อย่างชัดเจนโดยไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน

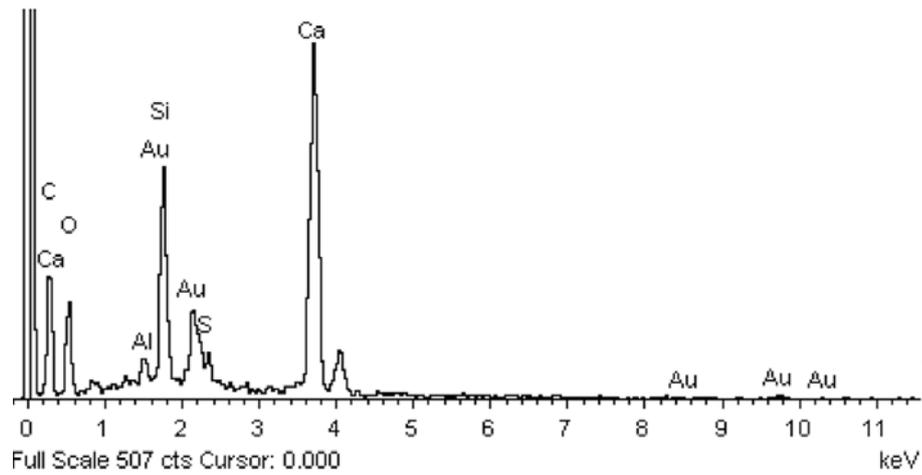


รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของ (a) ท่อนาโนคาร์บอน ที่กำลังขยาย x 30,000 และ (b) วัสดุผสม เซรามิกฟิโซอีเล็กทริกไร้สารตะกั่วบิสมัทโซเดียมไทเทเนต-บิสมัทโพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอน ที่กำลังขยาย x 8,000

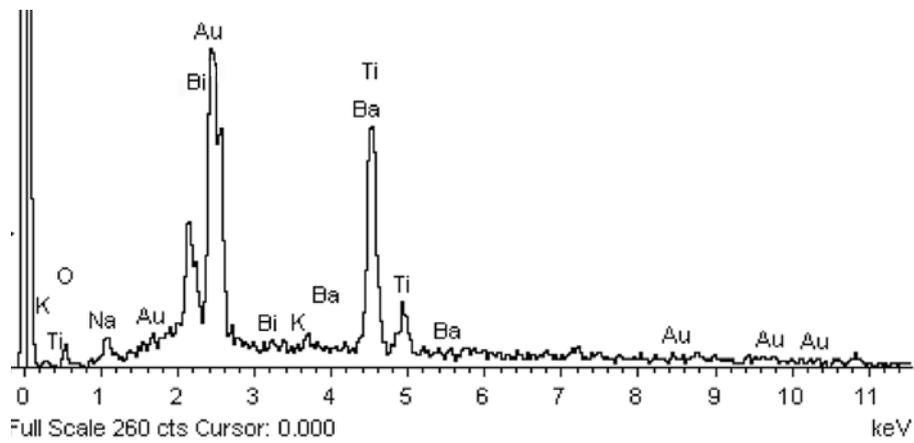


รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของวัสดุผสมเซรามิกฟิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วบิสมาต์ โซเดียมไทเทเนต-บิสมาต์โพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)-ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์กับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอน ที่กำลังขยาย  $\times 10,000$

จากรูปที่ 2.8 และ 2.9 เป็นการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงธาตุองค์ประกอบวัสดุผสม รูปที่ 2.8 เป็นการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของปูนซีเมนต์และท่อนาโนคาร์บอนในบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (EDS) แสดงให้เห็นธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของท่อนาโนคาร์บอน ส่วนธาตุแคลเซียม (Ca) ออกซิเจน (O) และ ซิลิกอน (Si) เป็นธาตุองค์ประกอบหลักของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและเป็นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันหลักของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังพบซัลเฟอร์หรือกำมะถัน (S) อะลูมิเนียม (Al) แคลเซียม (Ca) และ ออกซิเจน (O) เป็นธาตุองค์ประกอบหลักของเอททริงไกต์ ส่วนไฮโดรเจน (H) เครื่องมือไม่สามารถตรวจพบได้ และ ทอง (Au) เอาไว้ใช้เคลือบผิวของชิ้นงานก่อนการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากรูปที่ 2.9 เป็นการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของเซรามิกบิสมาต์โซเดียมไทเทเนต-บิสมาต์โพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ แสดงให้เห็นธาตุบิสมาต์ (Bi) โซเดียม (Na) ไทเทเนียม (Ti) โพแทสเซียม (K) แบเรียม (Ba) และ ออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของเซรามิก BNBK ส่วนทอง (Au) เอาไว้ใช้เคลือบผิวของชิ้นงานก่อนการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 2.8 ชาติองค์ประกอบของของปูนซีเมนต์และท่อนาโนคาร์บอน



รูปที่ 2.9 ชาติองค์ประกอบของเซรามิกบิสมัทโซเดียมไทเทเนต-บิสมัทโพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK)

### 3. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

#### 3.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

##### สรุปผลการทดลองสมบัติไดอิเล็กทริก สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติพีซีไอเล็กทริกของวัสดุผสม

จากการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะลดลงกับการเพิ่มขึ้นของความถี่ แต่เมื่อวิเคราะห์เทียบกับปริมาณท่อนาโนคาร์บอน พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกและสภาพการนำไฟฟ้า จะเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เติมลงไปในวัสดุผสม เมื่อวิเคราะห์สมบัติพีซีไอเล็กทริกของวัสดุผสม พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์พีซีไอเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพีซีไอเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของท่อนาโนคาร์บอน สำหรับวัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอนที่ 0% 0.3% 0.5% และ 1 % โดยปริมาตร นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์พีซีไอเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพีซีไอเล็กทริกสูงสุดเท่ากับ 58 pC/N และ  $30 \times 10^{-3}$  Vm/N ตามลำดับ ที่วัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอนที่ 1 % โดยปริมาตร แต่เมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนในวัสดุผสมมากกว่า 1% โดยปริมาตร (วัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอนที่ 1.5% และ 2% โดยปริมาตร) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์พีซีไอเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพีซีไอเล็กทริกของวัสดุผสมลดลงกับปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้เกิดการนำไฟฟ้าและค่าประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในวัสดุผสมที่มากเกินไป จนอาจทำให้เกิดการลัดวงจรได้

##### สรุปผลการทดลองสมบัติความต้านทานเสียงเชิงซ้อน สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลของวัสดุผสม

ค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมมาเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของคอนกรีต พบว่า วัสดุผสมมีความเข้ากันได้กับโครงสร้างหลักหรือคอนกรีต เนื่องจากมีค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนใกล้เคียงกับคอนกรีต นอกจากนี้เมื่อทำการวัดความพรุนของวัสดุผสมพบว่าความพรุนของวัสดุผสมลดลงกับการเพิ่มขึ้นของท่อนาโนคาร์บอน สำหรับผลการทดสอบกำลังอัดของวัสดุผสม พบว่าวัสดุผสมกับการเติมเฟสท่อนาโนคาร์บอนที่ 1% ได้ค่ากำลังอัดมากกว่าวัสดุผสมที่ไม่ได้เติมท่อนาโนคาร์บอน

##### สรุปผลการทดลองสมบัติลักษณะเฉพาะของวัสดุผสม

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า เซรามิก ปูนซีเมนต์ และท่อนาโนคาร์บอน มีการยึดติดกัน แต่ยังสามารถแบ่งแยกวัสดุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบได้อย่างชัดเจนโดยไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นการยืนยันได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมได้ คือ วัสดุผสม และพบผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และเอททริงไกต์ ที่บริเวณของปูนซีเมนต์และรอยต่อของวัสดุผสม

และยังพบท่อนานคาร์บอนซึ่งมีลักษณะโค้งงอที่ไปอุดรูพรุนในส่วนผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เมื่อนำไปทำการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (EDS) ยังสามารถยืนยันธาตุองค์ประกอบหลักของเซรามิกบิสมีตโซเดียมไทเทเนต-บิสมีตโพแทสเซียมไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต (BNBK) เมื่อนำวัสดุผสมไปทำการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในส่วน ofปูนซีเมนต์และท่อนานคาร์บอน โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ สามารถยืนยันธาตุคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของท่อนานคาร์บอน และธาตุองค์ประกอบหลักของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและธาตุองค์ประกอบหลักของเอททริงไกต์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

### 3.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากผลการวิจัยที่ได้พบว่ายังมีประเด็นปัญหาและข้อสงสัยที่น่าสนใจอีกมากมายที่ควรศึกษาเพิ่มเติมอย่างละเอียด เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปสู่การพัฒนาวัสดุผสมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์-เฟสที่สาม ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ดังนี้

3.2.1 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของอายุการใช้งานของวัสดุผสมชนิดนี้ เช่น เพิ่มจำนวนวันในการเก็บข้อมูลของค่าต่าง ๆ หลังจากผ่านการทำซ้ำหรือการโพลแล้ว

3.2.2 ควรมีการเติมเฟสที่สี่ลงในวัสดุผสม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุผสมและพัฒนาวัสดุใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

#### 4. Output จากโครงการวิจัย

##### 4.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ

4.1.1 Ruamporn Potong, Rattiyakorn Rianyoi, Athipong Ngamjarurojana, Arnon Chaipanich, Acoustic and dielectric properties of 0-3 bismuth sodium titanate-bismuth potassium titanate-barium titanate/cement composites, Ferroelectrics Letters Section (2016) 77-81. Impact Factor: 0.267, Q4 (ตั้งเอกสารแนบ)

4.1.2 Ruamporn Potong, Rattiyakorn Rianyoi, Athipong Ngamjarurojana, Arnon Chaipanich, Microstructure and performance of 1–3 connectivity environmental friendly lead-free BNBK-Portland cement composites, Materials Research Bulletin (2017) 59-65. Impact Factor: 2.446, Q1 (ตั้งเอกสารแนบ)

4.1.3 Ruamporn Potong, Rattiyakorn Rianyoi, Athipong Ngamjarurojana, Arnon Chaipanich, Influence of carbon nanotubes on the performance of bismuth sodium titanate-bismuth potassium titanate-barium titanate ceramic/cement composites, Ceramics International 43 (2017) S75–S78. Impact Factor: 2.986, Q1 (ตั้งเอกสารแนบ)

##### 4.2 การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)

จากผลการดำเนินงานโครงการ “การออกแบบ การประดิษฐ์ และประสิทธิภาพของวัสดุผสมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ ด้วยการเติมเฟสที่สามสำหรับโครงสร้างฉนวนที่ทำงานได้หลากหลายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม” โดยสามารถประดิษฐ์และพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุผสมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ ด้วยการเติมเฟสที่สาม ซึ่งโครงการนี้สามารถสร้างองค์ความรู้ใหม่, เผยแพร่และการตีพิมพ์ผลงานในวารสารระดับนานาชาติได้ นอกจากนี้ยังสามารถผลิตบุคลากรทางด้านวัสดุผสมพีโซอิเล็กทริกที่มีซีเมนต์เป็นฐานขั้นสูงเพื่อจะได้นำองค์ความรู้ที่ได้ไปพัฒนาให้เกิดประโยชน์ต่อไป รวมถึงสามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการเรียนการสอนในรายวิชาต่าง ๆ ได้ เช่น วัสดุศาสตร์และการวิเคราะห์วัสดุ ปฏิบัติการวัสดุศาสตร์และการวิเคราะห์วัสดุ ปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูง และโครงการด้านฟิสิกส์ประยุกต์ เป็นต้น

##### 4.3 การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ

Ruamporn Potong, Rattiyakorn Rianyoi, Athipong Ngamjarurojana, Arnon Chaipanich, Influence of carbon nanotubes on the performance of bismuth sodium titanate-bismuth potassium titanate-barium titanate ceramic/cement composites, the 10th Asian Meeting on Electroceramics (AMEC10, 2016) 4-7 December 2016, Taipei, Taiwan (ตั้งเอกสารแนบ)

นอกจากนี้ยังได้เข้าร่วมงานการประชุมนักวิจัยรุ่นใหม่พบเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 16 ระหว่างวันที่ 11 - 13 มกราคม 2560 ณ โรงแรมเดอะรีเจนท์ชะอำ บีช รีสอร์ท จังหวัดเพชรบุรี (ตั้งเอกสารแนบ) และได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานในการประชุมนักวิจัยรุ่นใหม่พบเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 17 ระหว่างวันที่ 10 - 12 มกราคม 2561 ณ โรงแรมเดอะรีเจนท์ชะอำ บีช รีสอร์ท จังหวัดเพชรบุรี (ตั้งเอกสารแนบ)