

บทที่ 5

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

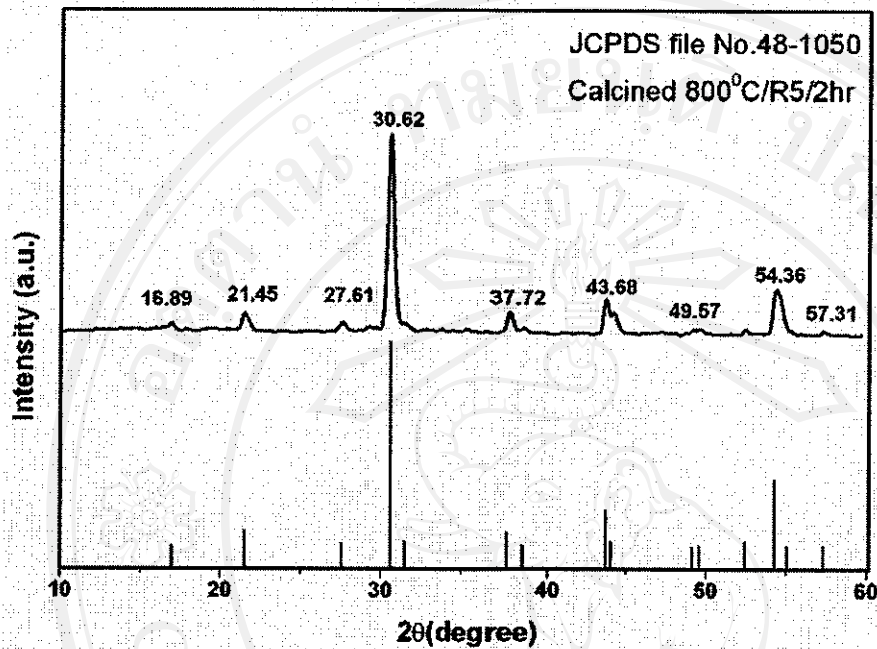
ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองในส่วนของการเตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ผลการตรวจสอบเฟส พฤติกรรมโครงสร้างผลึก สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก และ ค่าสัมประสิทธิ์คูลอมบ์ไฟฟ้าเชิงกล ท้ายสุดจะนำเสนอในส่วนของคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าลึงอัด พร้อมทั้งอภิปรายและวิเคราะห์ผลตามลำดับดังนี้

5.1 ผลการตรวจสอบเฟส ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

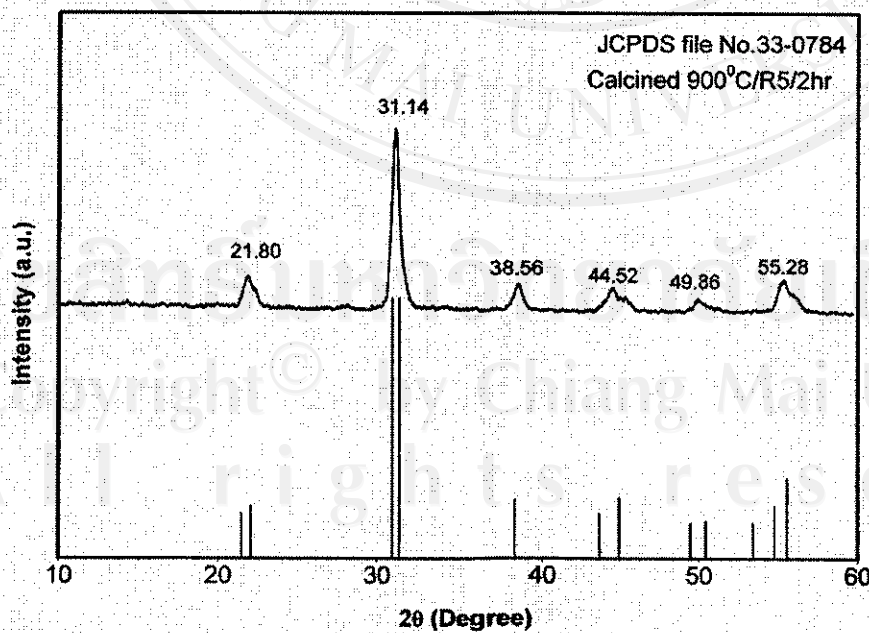
5.1.1. โครงสร้างผลึกผงเลเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT)

จากการเตรียมผง PZT แบบ two step ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมสองขั้นตอนนี้ด้วยกันโดยจะเริ่มจากการเตรียมผงเลเซอร์โคเนต (PZ) ก่อนซึ่งจะทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C ผลการตรวจสอบเฟสของผง PZ ที่ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงดังรูป 5.1 ซึ่งจะเห็นว่า ผง PZ ที่เตรียมได้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลของสาร PZ สูตร PbZrO_3 ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 48-1050 และเมื่อพิจารณาฟลักของรังสีเอกซ์ที่ได้จะพบว่ามีฟลักแปลกปลอมที่ตำแหน่งมุม 2 θ ประมาณ 29.25 ซึ่งน่าจะเป็น PbO และมีฟลักที่มีความเข้มสูงที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งค่า 2 θ เป็น 30.62 54.36 43.68 37.72 และ 21.45 ตามลำดับ เมื่อได้ทำการวิเคราะห์เฟสของ PZ แล้วขั้นตอนต่อมา คือ จะเป็นการเตรียมผง PZT โดยผสมผง PZ กับ PbO และ TiO_2 ด้วยการ ball milling จากนั้นทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C และทำการตรวจสอบผง PZT ที่ผ่านการแคลไซน์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าได้ผลดังรูป 5.2 ซึ่งจะพบว่าผงที่เตรียมได้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลของสาร PZT สูตร $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 33-0784 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นเตตระโกนอล (tetragonal) และมีฟลักที่มีความเข้มสูงที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งค่า 2 θ เป็น 31.14 21.80 55.28 38.56 และ 44.52 ตามลำดับ มี lattice parameter a เท่ากับ b เท่ากับ 4.036 และ lattice parameter c เท่ากับ 4.146 ซึ่งมีความเป็นเตตระโกนอลิตี (tetragonality : c/a) เท่ากับ 1.027 และไม่พบเฟสแปลกปลอมที่พบในผง PZ และหลังจากผ่านกระบวนการซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ

1200^oซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยใช้อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเท่ากับ 5^oซ ต่อนาทีที่ไม่พบเฟส แปลกปลอมเช่นกัน



รูป 5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PZ เทียบกับ JCPDS file No.48-1050

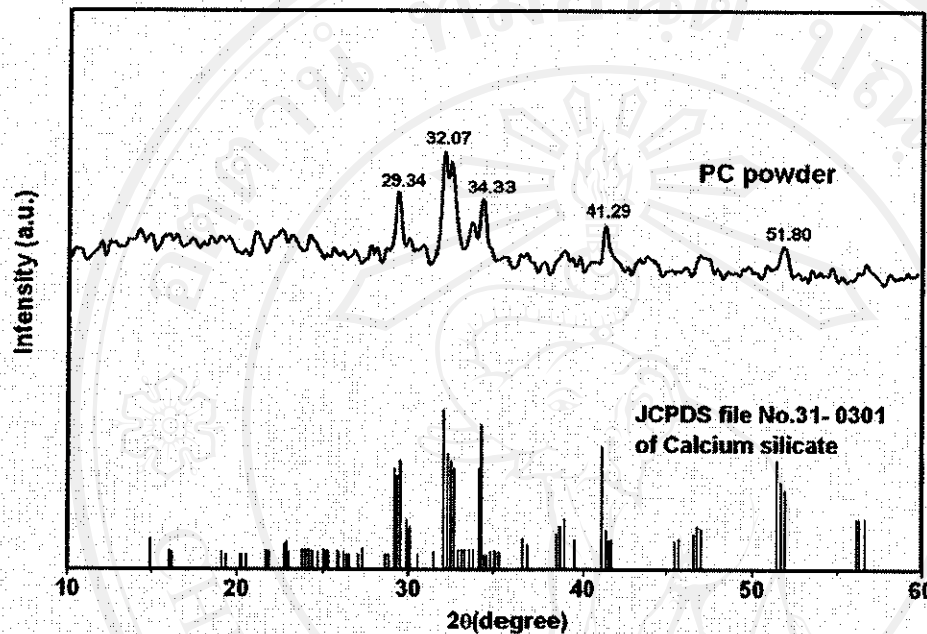


รูป 5.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PZT เทียบกับ JCPDS file No.33-0784

5.1.2. โครงสร้างผลึกของผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC)

ผลการตรวจสอบเฟสของผง PC ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงดัง

รูป 5.3



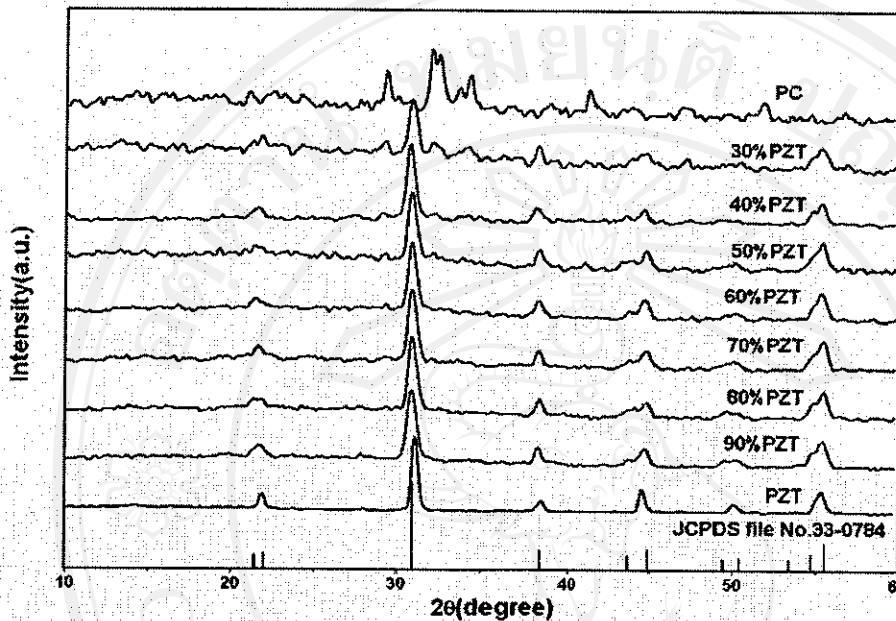
รูป 5.3 แบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ผงปูนซีเมนต์

ซึ่งจะเห็นว่าผงปูน PC ที่ได้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลของสาร แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) สูตร Ca_3SiO_5 ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 31-0301 ซึ่งมีโครงสร้างเป็น Anorthic และมีพิกที่มีความเข้มสูงที่สุดของผง PC อยู่ที่ตำแหน่งค่า 2θ เป็น 32.07 29.34 34.33 41.29 และ 51.80 ตามลำดับ มี lattice parameter a เท่ากับ 14.08 b เท่ากับ 14.21 และ lattice parameter c เท่ากับ 25.1 และพบว่ามีความเป็น amorphous สูง

5.1.3. โครงสร้างผลึกวัสดุผสมเดคเซอร์โคเนตไทเทเนต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PZT-PC)

จากการเตรียมวัสดุผสมด้วยการอัดขึ้นรูปและนำไปผ่านกระบวนการการเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์โดยการนำไปแช่ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบอ่างที่มีความชื้นเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 3 วัน เพื่อช่วยในการแข็งตัวของวัสดุผสมแล้ว จากนั้นนำวัสดุผสมในอัตราส่วนต่างๆมาอบ

เพื่อไล่ความชื้นและนำมาบดให้ละเอียดก่อนจะนำมาตรวจสอบเฟสของผงวัสดุผสมที่ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งผลการตรวจสอบที่ได้แสดงดังรูป 5.4



รูป 5.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PZT เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC)

จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากวัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่าง PZT กับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังรูป 5.4 พบว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นเป็นการรวมกันระหว่างเฟสของ PZT และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งจะสังเกตเห็น peak ของ PZT เด่นชัดกว่า peak ของ PC โดยเฉพาะที่มีอัตราส่วนผสมของ PZT สูงๆ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นผลึกของ PZT จะโดดเด่นกว่าโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ของปูน PC

5.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

5.2.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก PZT

จากการกระบวนการเตรียมผง PZT จนถึงการขึ้นรูปกลายเป็นเซรามิก PZT ได้มีการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก PZT แสดงดังตาราง 5.1

ตาราง 5.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก PZT

อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	ความ หนาแน่น	ความหนาแน่น สัมพัทธ์ (%)	ร้อยละการหดตัว เชิงเส้น	ร้อยละการหดตัว เชิงปริมาตร	ร้อยละของ น้ำหนักที่สูญเสีย
1200	7.81	97.55	15.76±0.35	29.04 ±0.60	0.66±0.06

จากตาราง 4.1 พิจารณาความหนาแน่นของเซรามิก PZT ที่หาได้มีค่าเท่ากับ 7.81 และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีซึ่งหาได้จากสมการ 4.1

$$\rho_{theory} = \frac{Mn}{V_{abc}N_a} \quad (5.1)$$

M	คือ	มวลโมเลกุลของสารที่เป็นผลึก
n	คือ	จำนวนโมเลกุลในหน่วยเซลล์
V _{abc}	คือ	ปริมาตรหน่วยเซลล์ประกอบด้วยด้าน a, b และ c
N _a	คือ	เลขอโวกาโด (Avogadro constant) มีค่าเท่ากับ 6.022 x10 ²³ mol ⁻¹

เมื่อแทนค่ามวลโมเลกุลของ PZT ซึ่งมีค่าเท่ากับ 325.6 กรัม และโครงสร้างผลึกของ PZT ซึ่งเป็นเตตระโกนอลิตีมีปริมาตร 6.749x10⁻²³ ลูกบาศก์เซนติเมตรและมีโมเลกุลเดียวในหน่วยเซลล์ เมื่อแทนค่าในสมการ 5.1 จะทำให้ได้ความหนาแน่นตามทฤษฎีของ PZT คือ 8.011 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จะเห็นว่าความหนาแน่นของ PZT ที่เตรียมได้มีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นตามทฤษฎี ซึ่งก็ควรจะเป็นเช่นนั้น เพราะในความเป็นจริงแล้วภายในสารตัวอย่างมีความบกพร่องต่างๆภายใน เช่น สิ่งเจือปนต่างๆ (impurity) หรือรูพรุน (porosity) ซึ่งจะมีทั้งรูพรุนปิด (close pore) และ รูพรุนเปิด (open pore) ซึ่งเป็นความบกพร่องที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ สามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของสาร หรือ SEM ในหัวข้อ 4.3

All rights reserved

5.2.2 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสม PZT-PC

ในการเตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 ปริมาณและการกระจายตัวของเมทริกซ์เฟสในคิสเพออสเฟสจะส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆของวัสดุผสมไม่ว่าจะแต่ว่าความหนาแน่น ดังนั้นจึงทำการวัดความหนาแน่นของวัสดุผสม PZT-PC แสดงดังตาราง 5.2

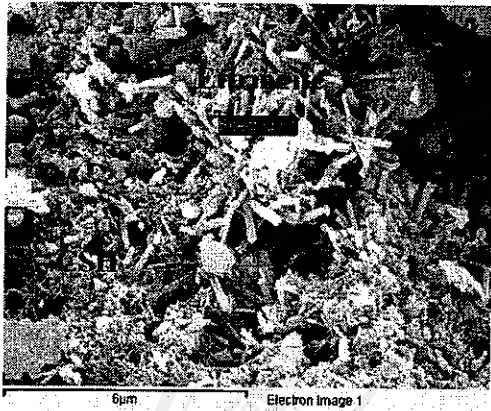
ตาราง 5.2 ค่าความหนาแน่นของวัสดุผสม PZT-PC

สารตัวอย่าง	ความหนาแน่นที่วัดจริง (g/cm ³)
PC	2.71±0.11
30%PZT	4.20±0.45
40%PZT	4.47±0.47
50%PZT	5.12±0.09
60%PZT	5.59±0.18
70%PZT	6.06±0.08
0%PZT	6.21±0.27
90%PZT	7.14±0.54
PZT	7.81±0.01

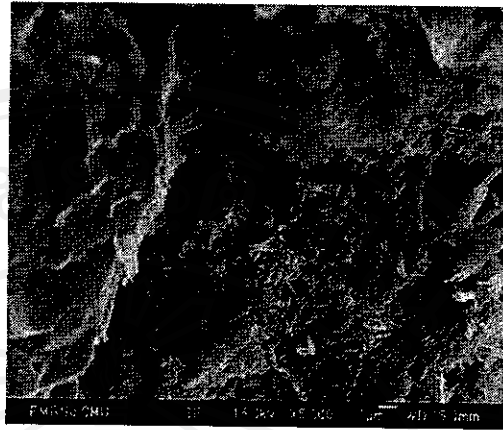
สำหรับการศึกษาความหนาแน่นของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในอัตราส่วนต่างๆกันของ PZT คิสเพออสเฟส ใน PC เมทริกซ์เฟสจะพบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PZT ในระบบเพิ่มขึ้น

5.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

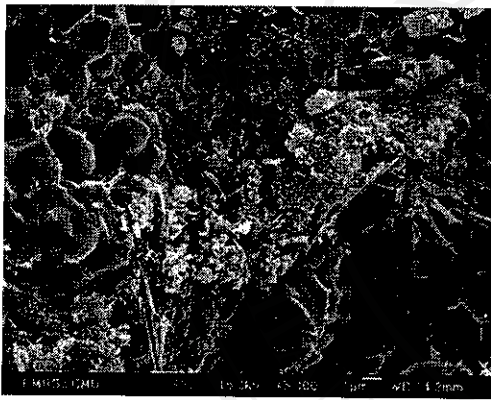
ในส่วนของการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC แสดงดังรูป 5.5



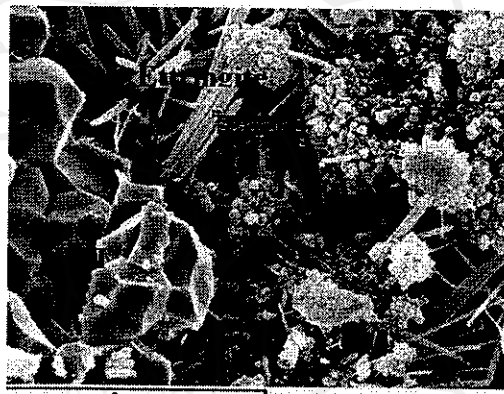
(ก)



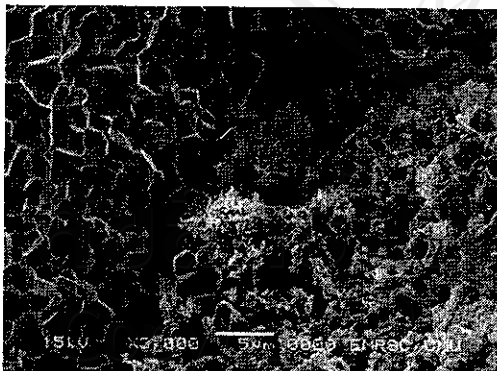
(ข)



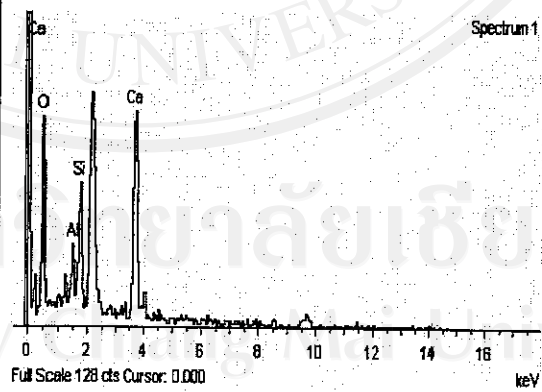
(ค)



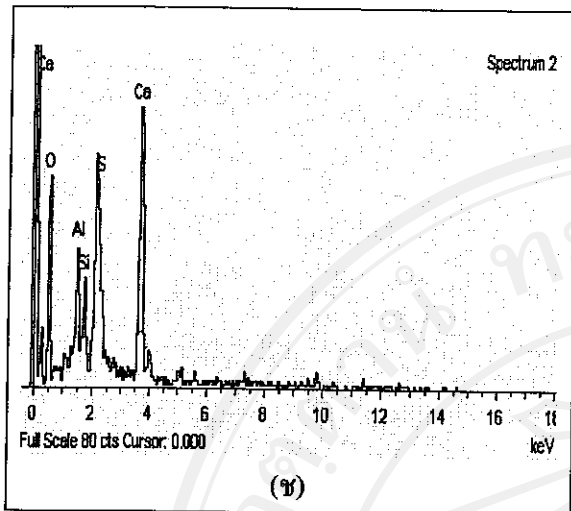
(ง)



(จ)



(ฉ)



รูป 5.5 การวางโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC โดยที่

- | | |
|------------------------------------|---------------------------------|
| (ก) คือ PC | (ข) คือ 30%PZT |
| (ค) คือ 50%PZT | (ง) คือ 70%PZT |
| (จ) คือ 90%PZT | (ฉ) การวิเคราะห์ด้วย EDS ของ PC |
| (ช)การวิเคราะห์ด้วย EDS ของ 70%PZT | |

จากรูป 5.5 (ก) จะพบว่ามีปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขึ้น ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวระหว่างของแข็งโดยตรง และเรียกปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid State Reaction” จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จึงทำให้ได้ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) ที่มีลักษณะคล้ายเส้นใยเล็กๆพันกันไปมา ซึ่ง CSH เกิดจาก สารประกอบหลักคัลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำ นอกจากนี้ยังพบชั้นของเอทาไนท์ (Ettringite) ที่มีลักษณะคล้ายแท่งเข็มเล็กๆซึ่งเกิดจากไทรคัลเซียมอลูมิเนตทำปฏิกิริยากับยิปซัม ซึ่งเป็นสารประกอบหลักเช่นกัน สังเกตได้จากการวิเคราะห์สารประกอบด้วยสเปกตรัม 1 ของ EDX ดังรูป 5.5 (ฉ)

จากรูป 5.5 (ข) และ(ค) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสม PZT-PC ที่มีปริมาณ PZT 30 และ 50 % โดยปริมาตรในระบบ ซึ่งจะเห็นเฟสของ PZT ถูกล้อมรอบด้วยเฟสของปูน PC

และ จากรูป 5.5 (ง) ซึ่งเป็นโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสม PZT-PC ที่มีปริมาณ PZT 70 % โดยปริมาตรในระบบ ซึ่งจะเห็นรอยต่อระหว่างเซรามิก PZT และปูน PC นอกจากนี้ในเฟส

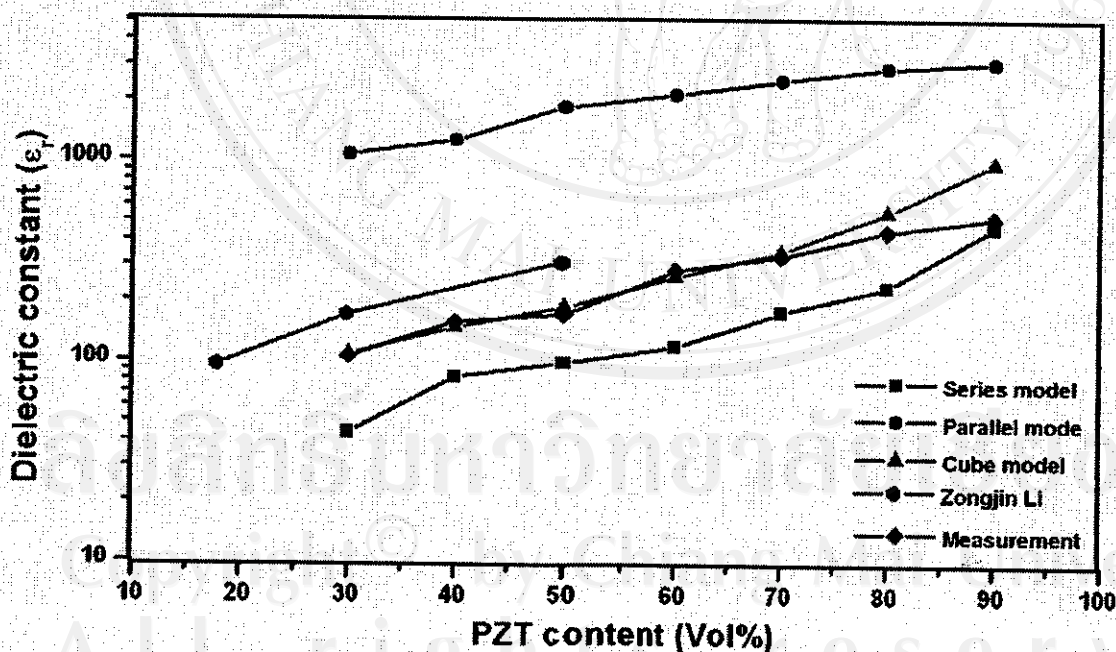
ของปูน PC ยังพบชั้นของเอทาน์ที่มีลักษณะเหมือนเข็มที่แตกตัวแยกออกมา ซึ่งสังเกตได้จากการวิเคราะห์สารประกอบด้วยสเปกตรัม 2 ของ EDX ดังรูป 5.5 (ข)

และจากรูป 5.5 (จ) ซึ่งมีปริมาณ PZT 90 % โดยปริมาตรในระบบของวัสดุผสม PZT-PC จะพบเฟสของ PZT ชัดเจนขึ้น

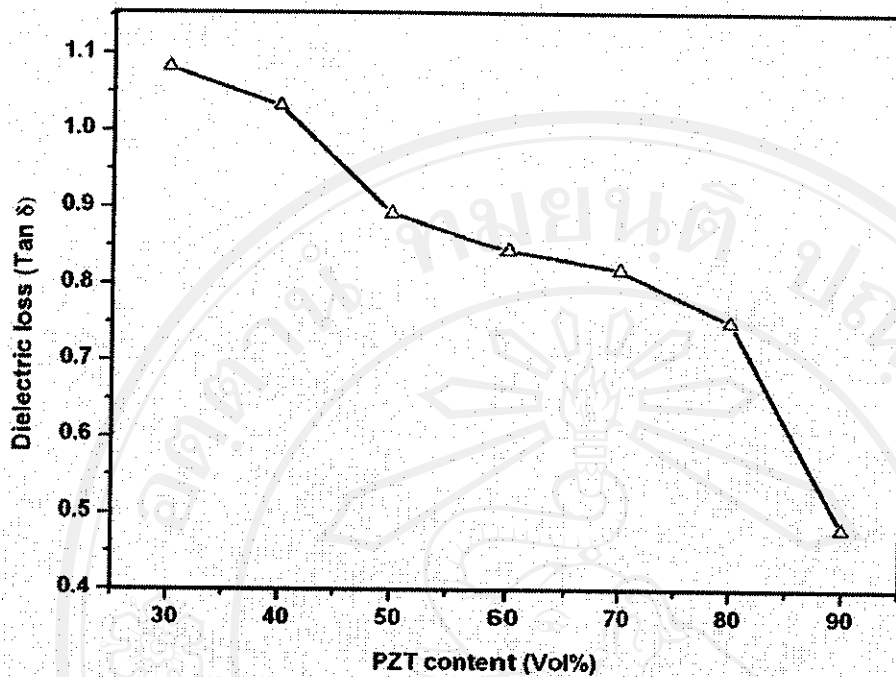
5.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

5.4.1 การวิเคราะห์ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

จากการตรวจสอบค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ที่ปริมาณเซรามิก PZT 0, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 % โดยปริมาตร แสดงผลดังรูป 5.6 และค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกแสดงผลดังรูป 5.7 ตามลำดับ



รูป 5.6 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ต่อปริมาณ PZT ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC



รูป 5.7 ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ต่อปริมาณ PZT ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC จากการวัดจริง

จากการวิเคราะห์ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุผสม PZT-PC ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณเซรามิก PZT ในระบบเพิ่มขึ้น [10,11,15] แต่จะมีค่าอยู่ระหว่างค่า สภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PZT ซึ่งมีค่าประมาณ 1000 และปูน PC จะมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ประมาณ 98 ซึ่งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุผสม จะเป็นผลรวมของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ในแต่ละเฟสรวมกันเรียกว่า “sum property” [14]

และจากการทดลองมาก่อนหน้านี้ Banno H. และคณะ [21] ได้นำเสนอกราฟทางทฤษฎีออกมาใน 3 รูปแบบ คือ แบบ Parallel model, Cube model และ Series model ซึ่งผลการทดลองที่ได้ในงานวิจัยนี้จากกราฟรูป 5.6 จะเห็นว่าสอดคล้องกับกราฟแบบ Series model และ Cube model ซึ่งตรงกับผลการทดลองของ Zongjin Li และคณะ [9, 11]

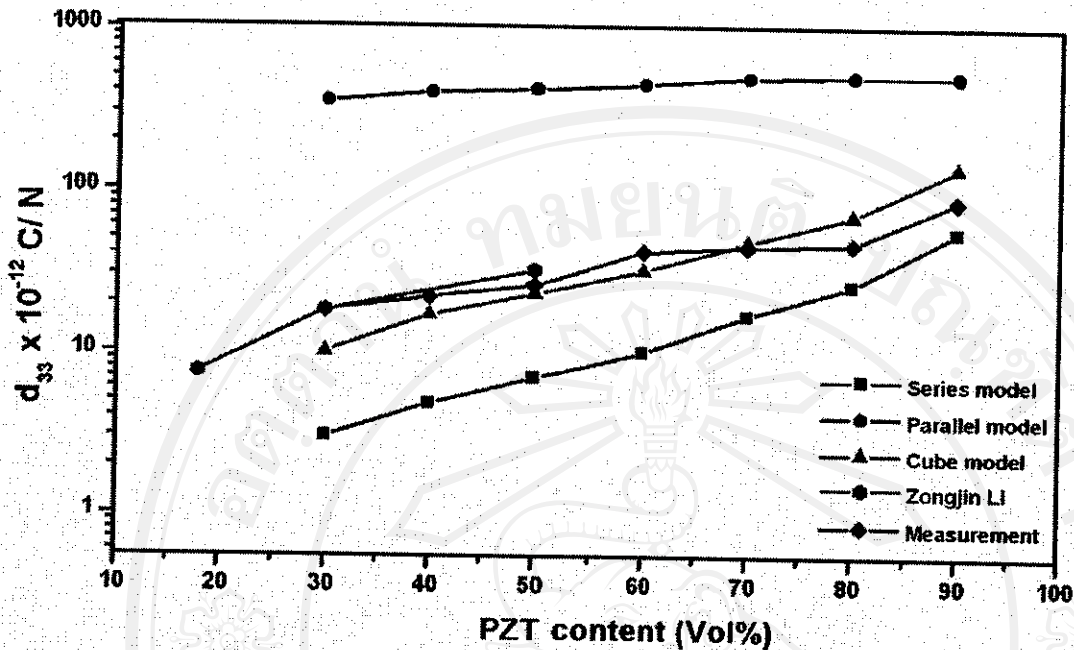
เมื่อพิจารณาผลของขนาดของอนุภาคเซรามิก PZT ที่กระจายตัวอยู่ในปูน PC พบว่า ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีขนาดอนุภาค PZT ใหญ่ขึ้นซึ่งตรงกับผลการทดลองของ Zongjin Li [9] และ A.Chaipanich [16] ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ขนาดอนุภาค PZT คือ

≈ 600 ไมครอน เป็นไปได้ว่าขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นทำให้พื้นที่ผิวลดลงส่งผลทำให้มีโอกาสนในการเชื่อมต่อกันของอนุภาคเซรามิก PZT ในปูน PC สูงขึ้นและในกรณีที่เมื่อมีปริมาณเซรามิก ในวัสดุผสมสูงส่งผลทำให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงตามไปด้วยนั้น Bernd Ploss และคณะ[22] ได้แสดงแนวคิดว่าการใช้สัดส่วนปริมาณเซรามิกโดยปริมาตร (volume fraction) ที่สูงนั้นก็เหมือน กับมีตัวเก็บประจุมาเชื่อมต่อกันมากขึ้นกว่าการใช้สัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกน้อยกว่า จึงทำให้ค่าความจุที่ได้เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลทำให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แสดงว่ามีการกระจายตัวที่ดีของเซรามิก PZT ในปูน PC

และเมื่อพิจารณารูป 5.7 ซึ่งแสดงค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) พบว่า จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเซรามิก PZT เพิ่มขึ้น หรือ ในทางกลับกันก็จะมีค่าสูงที่ปริมาณปูน PC สูงขึ้นนั่นเอง อาจเป็นไปได้ว่าในโครงสร้างของปูนมีน้ำปูนอยู่ซึ่งปูนเป็นสารที่มีรูพรุนสูงดังนั้น ความชื้นจากบรรยากาศภายนอกสามารถถูกดูดซึมเข้าไปในโครงสร้างของปูนได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งน้ำจัดได้ว่าเป็นเฟสตัวนำ (ion conductor) ที่ปนอยู่ในเฟสของปูนซีเมนต์น่าจะเป็นสาเหตุที่ส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น

5.4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ที่ปริมาณเซรามิก PZT 0, 30 ,40 ,50 ,60 ,70 ,80 ,90 และ 100 % โดยปริมาตร หลังจากผ่านกระบวนการโพลที่อุณหภูมิ 130 °ซ ด้วยสนามไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ต่อ 1 มิลลิเมตร เป็นเวลา 45 นาที แสดงดังกราฟรูป 5.8



รูป 5.8 ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกต่อปริมาณ PZT ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

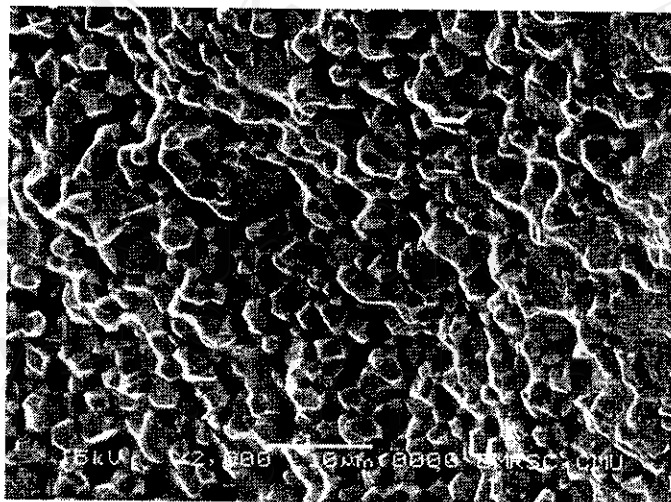
ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก ของวัสดุผสมแบบ 0-3 พบว่า ค่าที่ได้มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ PZT ที่เพิ่มขึ้นซึ่งตรงกับผลการทดลองของ Zongjin Li และคณะ [9, 11] ซึ่งผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเห็นว่าสอดคล้องกับกราฟแบบ Cube model ของ Zongjin Li และคณะเช่นกัน

ซึ่งตรงกับกลุ่มของ Shifeng Huang และคณะ [10] ที่ได้มีการทำการทดลองโดยมีการใช้ปริมาณ เซรามิก PZT สูงถึง 85% โดยน้ำหนัก ในการผสมเป็นวัสดุผสม และผลการทดลองค่าที่ได้มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ PZT (กราฟ 3.7 (a)) เช่นกัน

ในแต่ละงานวิจัยที่ผ่านมาล้วนมีผลสอดคล้องกันที่สนับสนุนผลการทดลองที่ว่าค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC พบว่า ค่าที่ได้มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ PZT ที่เพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่าวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-Polymer [11] ซึ่งอาจมีหลายเหตุปัจจัยสนับสนุนผลการทดลองที่ได้ ขนาดอนุภาค ก็มีส่วนสำคัญในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกจากการทดลองพบว่าเซรามิก PZT ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวลดลงทำให้มีการเชื่อมต่อกันสูงในอัตราส่วนที่มีปริมาณ PZT สูงๆ ก่อให้เกิดเส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้า (electric flux path) ระหว่างอนุภาคเซรามิก ในระหว่างการโพลาให้มีค่า

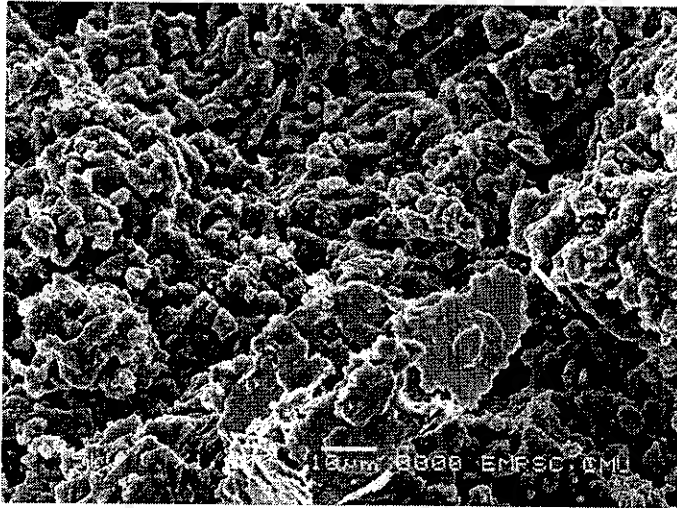
สัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกสูงขึ้นและก็อาจเป็นไปได้ที่วัสดุผสมเกิดการผสมกันระหว่างการผสมแบบ 0-3 และ 1-3 ในอัตราส่วนของระบบที่มีปริมาณ PZT สูงๆ เนื่องจากการผสมแบบ 1-3 จะมีสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกสูงกว่าการผสมแบบ 0-3 ซึ่ง N.Jayasundere และคณะ[18] ได้ทำการศึกษารูปแบบของการผสมระหว่างแบบ 0-3 และ 1-3 เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกเมื่อขนาดของอนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกับความหนาของชั้นงานและมีสัดส่วนโดยปริมาตรสูงๆอยู่ระหว่าง 50-70% ค่าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ขนาดอนุภาคเซรามิก PZT ที่มีขนาด ≈ 600 ไมครอนและทำการเตรียมชั้นงานที่มีความหนาไม่น้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร เพื่อหลีกเลี่ยงผลของการเกิดวัสดุผสมแบบ 1-3

นอกจากนี้ อุณหภูมิ เวลา และ สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการโพลลั่นแล้วแต่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกทั้งสิ้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้อุณหภูมิในการโพลที่ 130°C ซึ่ง Shifeng Huang และคณะ[10] ได้ทำการทดลองผลของอุณหภูมิเวลาและ สนามไฟฟ้าต่อค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกพบว่าที่อุณหภูมิ 130°C ให้ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกที่สูงที่สุด (กราฟ 3.15) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการโพล คือที่ 45 นาที ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกจะมีค่าคงที่ ส่วนสนามไฟฟ้าที่ใช้ Shifeng Huang และคณะ[10] พบว่าที่สนามไฟฟ้า 4 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตรค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกที่ได้มีค่าสูงที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกเวลาในการโพลที่ 45 นาที เนื่องจากถ้าใช้เวลาในการโพลนานเกินไปจะทำให้ปูน PC เกิดการหลอมละลายเคลือบเซรามิก PZT ไว้ ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกตกลง ยืนยันได้ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุผสมด้วยกล้อง SEM ดังรูป 5.9



รูป 5.9 รูปการหลอมภายในโครงสร้างของวัสดุผสมเนื่องจากใช้เวลาในการโพล มากกว่า 45 นาที

และสนามไฟฟ้าที่ใช้โพลในงานวิจัยนี้ คือ 2 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตรเนื่องจากโพลยิ่งใช้สนามไฟฟ้าในการโพลสูงยิ่งโพลยากและเป็นการเสี่ยงในการเกิดการพังทลายของสนามไฟฟ้า (breakdown) ซึ่งลักษณะ โครงสร้างของวัสดุผสมที่เกิดการพังทลายของสนามไฟฟ้า แสดงดังรูป 5.10



รูป 5.10 รูปโครงสร้างภายในของวัสดุผสมที่เกิดการพังทลายของสนามไฟฟ้า

ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกที่ได้จากการโพลด้วยสนามไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร มีค่าสูงเช่นกัน สามารถอธิบายได้ว่า ferroelectric domain สามารถกลับทิศทางได้ง่ายในช่วงแรกของการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปซึ่ง ferroelectric domain ส่วนใหญ่จะกลับตัวในทิศ 180° ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดความเค้นเกิดขึ้นและใช้เวลาน้อยในการกลับตัว อย่างไรก็ตามในเฟสอื่นๆจะมีการกลับตัวของ ferroelectric domain ในทิศ 90° ซึ่งมีความสำคัญเช่นกันซึ่งอาจก่อให้เกิดความเค้นและความเครียดเกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ทำให้ ferroelectric domain กลับตัวได้ยากในทิศ 90° ซึ่งต้องใช้เวลานานในการกลับตัวจึงต้องอาศัยเวลาในการโพลที่นานขึ้น จนเกิดการอึดตัวในการกลับทิศของ ferroelectric domain [10] ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ให้น่าจะมีอิทธิพลมากกว่าในการกลับตัวของ ferroelectric domain ส่วนเวลาในการโพลน่าจะมีอิทธิพลรองลงมาและอุณหภูมิน่าจะมีอิทธิพลน้อยที่สุดในการกลับตัวของ ferroelectric domain

ซึ่งสนามไฟฟ้าที่ให้ในการโพลจะมีเพียงส่วนน้อย (small fraction) เท่านั้นที่ผ่านไปยังอนุภาคเซรามิก PZT ที่ถูกล้อมรอบไปด้วยปูน PC เพื่อทำให้เกิดโพลไรเซชันไปในทิศทาง

เดียวกับกับสนามไฟฟ้าโดยสนามไฟฟ้าที่กระทำกับอนุภาคเซรามิก PZT มีความสัมพันธ์กับ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ดังสมการ[25]

$$E_c = \frac{3E_0\epsilon_p}{3\epsilon_p + \epsilon_c} \quad (5.2)$$

เมื่อ E_0 คือ สนามไฟฟ้าที่ให้

E_c	คือ	สนามไฟฟ้าที่กระทำกับอนุภาคเซรามิก
ϵ_p	คือ	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของปูน PC
ϵ_c	คือ	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก

จากสมการ 5.2 จะเห็นว่ามีสนามไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่กระทำกับอนุภาคเซรามิก PZT เนื่องจากเซรามิก PZT มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงกว่าปูน PC มาก และในโครงสร้างของปูน ยังมีเฟสตัวนำ(conductor) ซึ่งก็คือ น้ำ ปนอยู่ ระหว่างอนุภาคของเซรามิก PZT และปูน PC ซึ่งทำให้เกิดเส้นทางเดินของสนามไฟฟ้า (electric flux path) ไปยังอนุภาคของเซรามิก PZT ซึ่งสามารถอธิบายด้วยแนวคิด “Polychromatic percolation” [Newnham] คือ ในวัสดุผสมที่ประกอบด้วยเฟสตัวนำตั้งแต่ 2 เฟสขึ้นไป จะมีทางเดินของกระแส(transport path) ได้หลายทาง ทั้งผ่านทางเฟสเดียวและผ่านทั้งสองเฟสรวมกันขึ้นอยู่กับ percolation limit และสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีเฟสตัวนำซึ่งก็คือน้ำปนเข้าไปอยู่ในวัสดุผสมอยู่แล้ว ดังนั้น Polychromatic percolation น่าจะก่อให้เกิดความต่อเนื่องของฟลักซ์ (flux continuity) ผ่านเกรนของเซรามิก PZT แล้วทำให้สามารถไหลได้ง่าย แต่ ในความเป็นจริงยิ่งทำให้ไหลได้ยากไปกว่าเดิมเนื่องจากปูน PC มีความพรุนสูงส่งผลทำให้น้ำที่อยู่ในรูพรุนมีลักษณะเป็นเจลและเป็นแบบ capillary ทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสภาพต้านทาน(resistivity)มีค่าลดลง แต่แทนที่กระแสจะไหลผ่านเซรามิก PZT กลับไหลผ่านรูพรุนที่มีน้ำอยู่ก่อให้เกิดการรั่วไหลของกระแส Shifeng Huang และคณะ[13] ซึ่งทำให้เสี่ยงต่อการเกิดการพังทลายของสนามไฟฟ้า(breakdown)ของวัสดุผสมสูงมากจึงต้องใช้เวลาในการไหล คือ ค่อยๆให้สนามไฟฟ้าเข้าไป ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวจึงส่งผลทำให้เกิดปัญหาในการไหลโดยใช้สนามไฟฟ้าสูงๆตามมา

5.4.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ที่ปริมาณเซรามิก PZT 30, 50, 70 และ 90 % โดยปริมาตร หลังจากผ่านกระบวนการโพลที่อุณหภูมิ 130 °ซ ด้วยสนามไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ต่อ 1 มิลลิเมตร เป็นเวลา 45 นาที แสดงดังตาราง 5.3

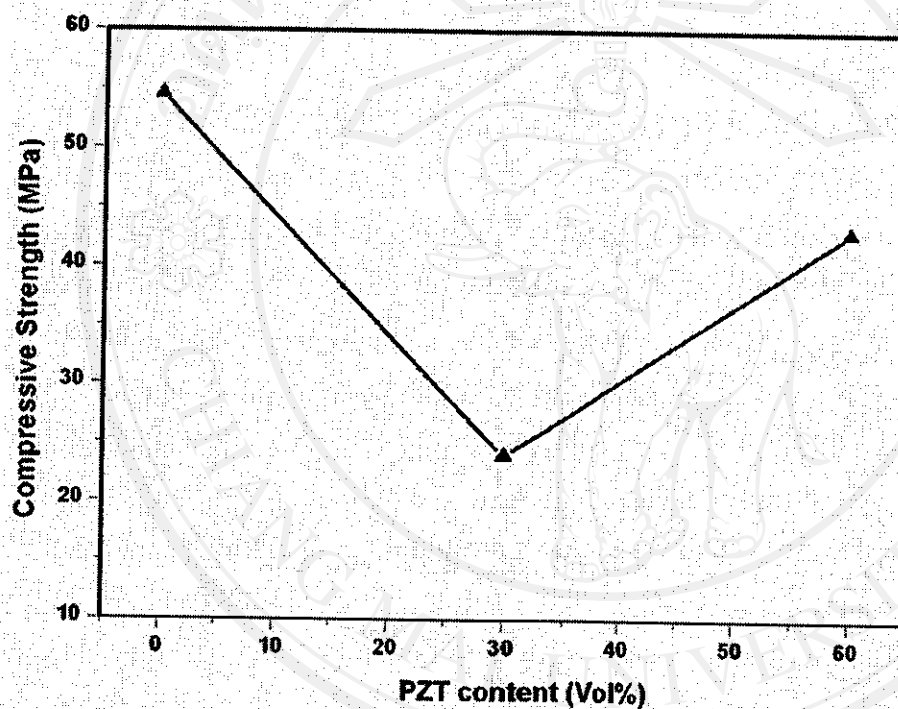
ตาราง 5.3 ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

สารตัวอย่าง	อัตราส่วน PZT-PC	ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล, K_t (%)
30%PZT	30:70	16.25
50%PZT	50:50	18.24
70%PZT	70:30	23.74
90%PZT	90:10	28.17

จากผลการทดลองข้างต้นจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PZT ที่เพิ่มขึ้นในระบบของวัสดุผสม PZT-PC ซึ่งตรงกับผลการทดลองของ Zongjin Li และคณะ[9](ตาราง 3.1) ซึ่ง Zongjin Li และคณะได้ทำการศึกษาปริมาณ PZT ในระบบของวัสดุผสม PZT-PC สูงเพียง 70% โดยปริมาตรและพบว่าที่ปริมาณ PZT 70% โดยปริมาตร ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกลจะมีค่าสูงกว่า 20% ซึ่งตรงกับผลการทดลองที่ได้ในงานวิจัยนี้ คือ ที่ปริมาณ PZT 90% โดยปริมาตรค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกลจะมีค่าสูงถึง 28.17 % ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าวัสดุผสมที่เป็นพอลิเมอร์ในปริมาณ PZT ร้อยละโดยปริมาตรที่เท่ากัน[9] แสดงว่าวัสดุผสม PZT-PC มีสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลและเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ดี

5.5 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกล ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

จากการเตรียมชิ้นงานโดยการอัดขึ้นรูป วัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ด้วยแรง 1 ตัน ในแบบทรงลูกบาศก์เพื่อให้มีขนาด 10x10x10 มิลลิเมตร และหลังจากนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการการเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์โดยการนำไปแช่ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบอ่างที่มีความชื้นเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 3 วัน เพื่อช่วยในการแข็งตัวของวัสดุผสมแล้ว จากนั้นจึงนำไปทดสอบกำลังอัดซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงผลดังรูป



รูป 5.11 ค่ากำลังอัด ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

จากกราฟจะพบว่าผลการทดลองที่ได้แสดงค่ากำลังอัดใน 3 อัตราส่วนผสมของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC เท่านั้น คือ 0%PZT, 30%PZT และ 60%PZT ซึ่งมีค่าเท่ากับ 54.55, 23.95 และ 42.95 MPa ตามลำดับ ซึ่งโดยปกติแล้วถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดของมอร์ต้าและคอนกรีตทั่วไป

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าค่ากำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเซรามิก PZT ในวัสดุผสมที่ 30%PZT โดยปริมาตร และจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณเซรามิก PZT ในวัสดุผสมเป็น 60%PZT โดย

ปริมาตร ซึ่งผลการทดลองที่ได้ อาจจะมีการคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจาก กลไกการยึดเหนี่ยวและการแข็งตัวของวัสดุผสม ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าอาจเกิด crack ภายในโครงสร้างขึ้นได้ เนื่องจากมีมวลที่ต่างกัน นอกจากนี้ยังมี อัตราส่วนผสม การผสม และการบ่ม ล้วนแล้วแต่มีผลต่อกำลังอัดทั้งสิ้น ทั้งนี้ ชัชวาล เศรษฐบุตร[7] ได้อธิบายความผันแปรของกำลังอัดว่า ขึ้นอยู่กับ การควบคุมวัตถุดิบ ขบวนการผลิต และขบวนการทดสอบ และสาเหตุของการผันแปรของกำลังอัดเนื่องจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการ คือ การผันแปรเนื่องจากขบวนการผลิต และ การผันแปรเนื่องจาก การทดสอบ