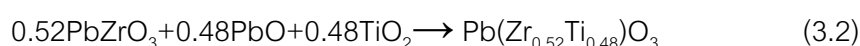


3.4 กระบวนการเตรียม เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT)

3.4.1 การเตรียมผงเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT)

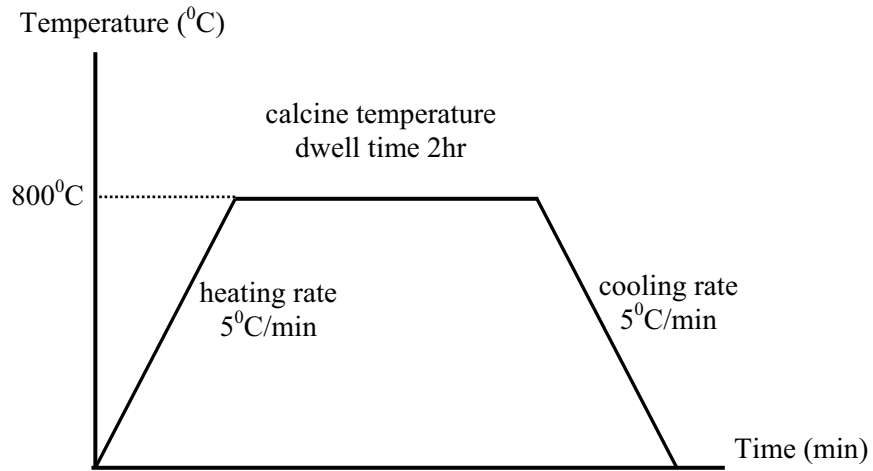
ในการทดลองนี้เลือกใช้เทคนิคการเตรียมแบบ Solid state reaction หรือ อาจเรียกว่า mixed oxide เนื่องจากสามารถทำการเตรียมได้ในปริมาณมากและทำการเตรียมผง PZT ด้วยวิธีแบบ Two Step ซึ่งมีการเตรียมสองขั้นตอนโดยเริ่มจาก การเตรียมผงเลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3 : PZ) จากสมการ 3.1 และเตรียมผงเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตจากสมการ 3.2



โดยเริ่มจากการเตรียมผง PZ ซึ่งสารด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิตอลความละเอียด 0.0001 มิลลิกรัม สามารถชั่งได้สูงสุดไม่เกิน 210 กรัม และผสมสารตั้งต้น กับตัวช่วยกระจาย (dispersing agent) โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ หรือ เอทานอล เป็นตัวทำละลายเนื่องจาก เอทานอล ไม่ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น และเป็นสารที่ระเหยง่าย หลังจากนั้น ทำการบรรจุสารละลายลงในภาชนะ ซึ่งเป็นกระป๋องพลาสติก พร้อมกับใส่ลูกบดเซอร์โคเนีย (zirconia milling ball) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8"x3/8" โดยใส่ประมาณ 1 ใน 3 ของ กระป๋องแล้วปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปวางบนโรล (roll) ของเครื่องบดผสมสารแบบ ball milling โดยมีมอเตอร์เป็นตัวหมุนแกนหลักด้วยความเร็ว 60 รอบต่อนาที ทำการ ball-mill เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้จังหวะการหมุนคือ หมุน 4 ชั่วโมง พัก 2 ชั่วโมง ทำจนครบการหมุน 24 ชั่วโมง เพื่อให้ลูกบดช่วยผสมสารตั้งต้นให้เข้ากันและกระจายตัวผสมกันอย่างสม่ำเสมอ เรียกวิธีการนี้ว่า wet ball-mill

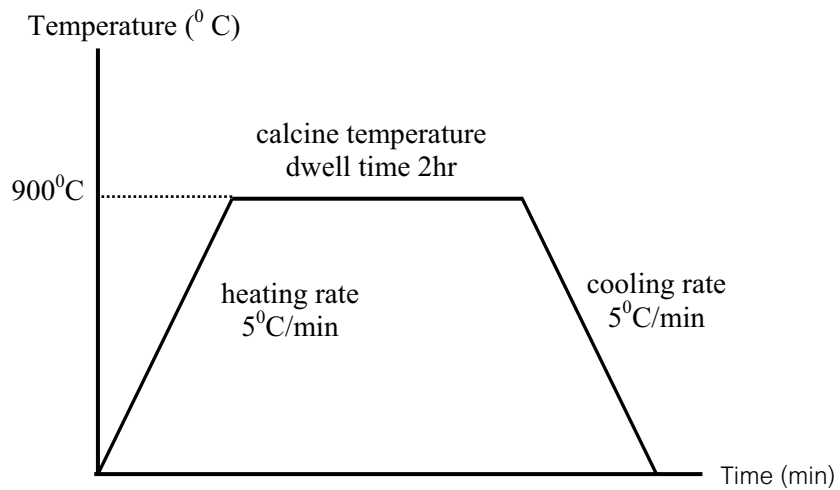
หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ออกมาตั้งบนเตาแผ่นความร้อน (hot plate) พร้อมกับคนสารด้วย magnetic stirrer ไปด้วยจนเอทานอลระเหยออกจนหมด สารที่ได้จะมีลักษณะหนืดๆ นำสารละลายที่ได้เข้าอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจได้ว่าเอทานอลได้ระเหยออกไปหมดแล้ว ซึ่งลักษณะของสารจะแห้งและจับตัวเป็นก้อน จากนั้นนำสารที่ได้มาบดด้วยครกบดสาร (agate mortar) พร้อมกับร่อนด้วยตะแกรงไนลอนเบอร์ 120 (≈ 80 ไมครอน) จากนั้นนำสารที่ได้ใส่ในถ้วยอะลูมินา (alumina crucible) พร้อมกับปิดฝา ซึ่งถ้วยอะลูมินานี้จะ

สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 1600°C จากนั้นนำถ้วยที่บรรจุสารเข้าสู่กระบวนการแคลไซน์โดยใช้เตาไฟฟ้าอุณหภูมิ 1500°C ซึ่งในการเผาแคลไซน์ ผงเลดเซอร์โคเนต ในการทดลองนี้ใช้อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเท่ากับ 5°C ต่อนาที แผนผังการเผาแคลไซน์แสดงดังรูป 3.1



รูป 3.1 แผนผังการเผาแคลไซน์ผงPZ

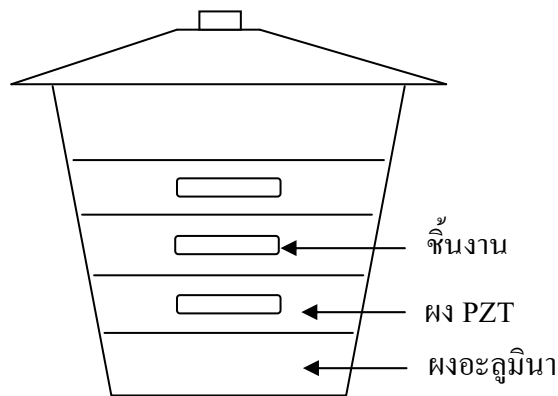
เมื่อได้ผงPZแล้ว ก็ทำการเตรียมผงPZTจากสมการ 3.2 โดยทำซ้ำทุกขั้นตอนเหมือนกับการเตรียมผงPZโดยเปลี่ยนอุณหภูมิแคลไซน์เป็น 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเท่ากับ 5°C/min ต่อมาที่ แผนผังการเผาแคลไซน์ผงPZTแสดงดังรูป 3.2



รูป 3.2 แผนผังการเผาแคลไซน์ ผง PZT

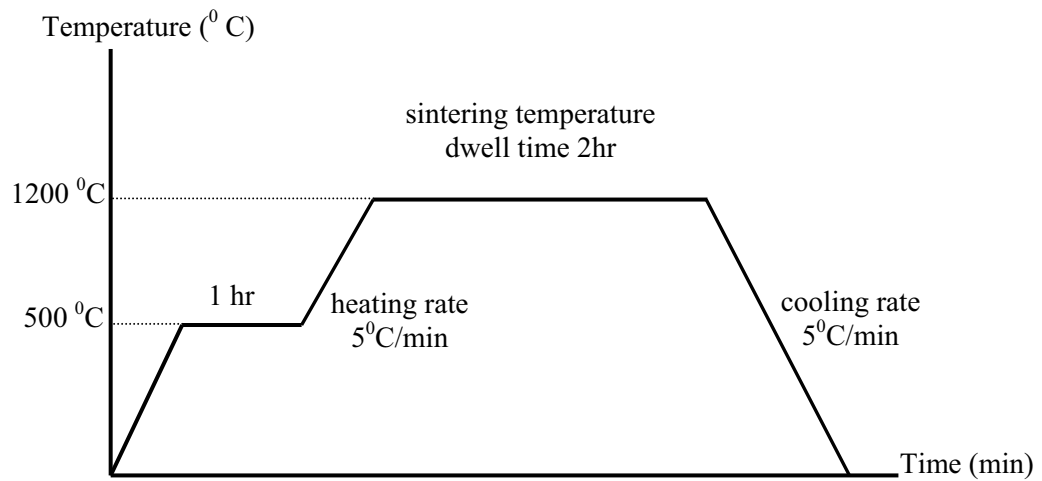
3.4.2 การเตรียมเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT)

เมื่อได้ผงPZTที่มีปริมาณผลึกเพอร์อฟสไกต์สูงสุดแล้วจะทำการทำการบดผสมผงPZT กับ สารละลาย PVAความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นตัวช่วยในการอัดขึ้นรูปในอัตรา 1 หยดต่อ ผงPZT 1.5 กรัม จากนั้นอัดขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ด้วยแรง 1 ตัน เป็นเวลา 10 วินาที ในแม่พิมพ์โลหะที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลม (disc) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว (green body) มาจัดเรียงลงในถ้วยอะลูมินา และเนื่องจาก อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์นั้นสูงกว่าจุดหลอมเหลวของตะกั่วออกไซด์ (PbO) ดังนั้นเพื่อเป็นการช่วยป้องกันไม่ให้ตะกั่วออกไซด์ระเหยออกไปหรือระเหยออกไปน้อยที่สุด คือ ต้องเพิ่ม บรรยากาศของตะกั่วออกไซด์ เข้าไป โดยใช้วิธีการกลบชิ้นงานด้วยผงPZT ก่อนที่จะทำการปิดฝา ให้สนิท ดังแสดงในรูป 3.3



รูป 3.3 ลักษณะการจัดชิ้นงานสำหรับการเผาซินเตอร์

จากนั้นนำไปเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1200⁰ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยใช้อัตราการขึ้นลง ของอุณหภูมิเท่ากับ 5⁰ซ ต่อนาที ดังแผนผังการเผาซินเตอร์ในรูป 3.4



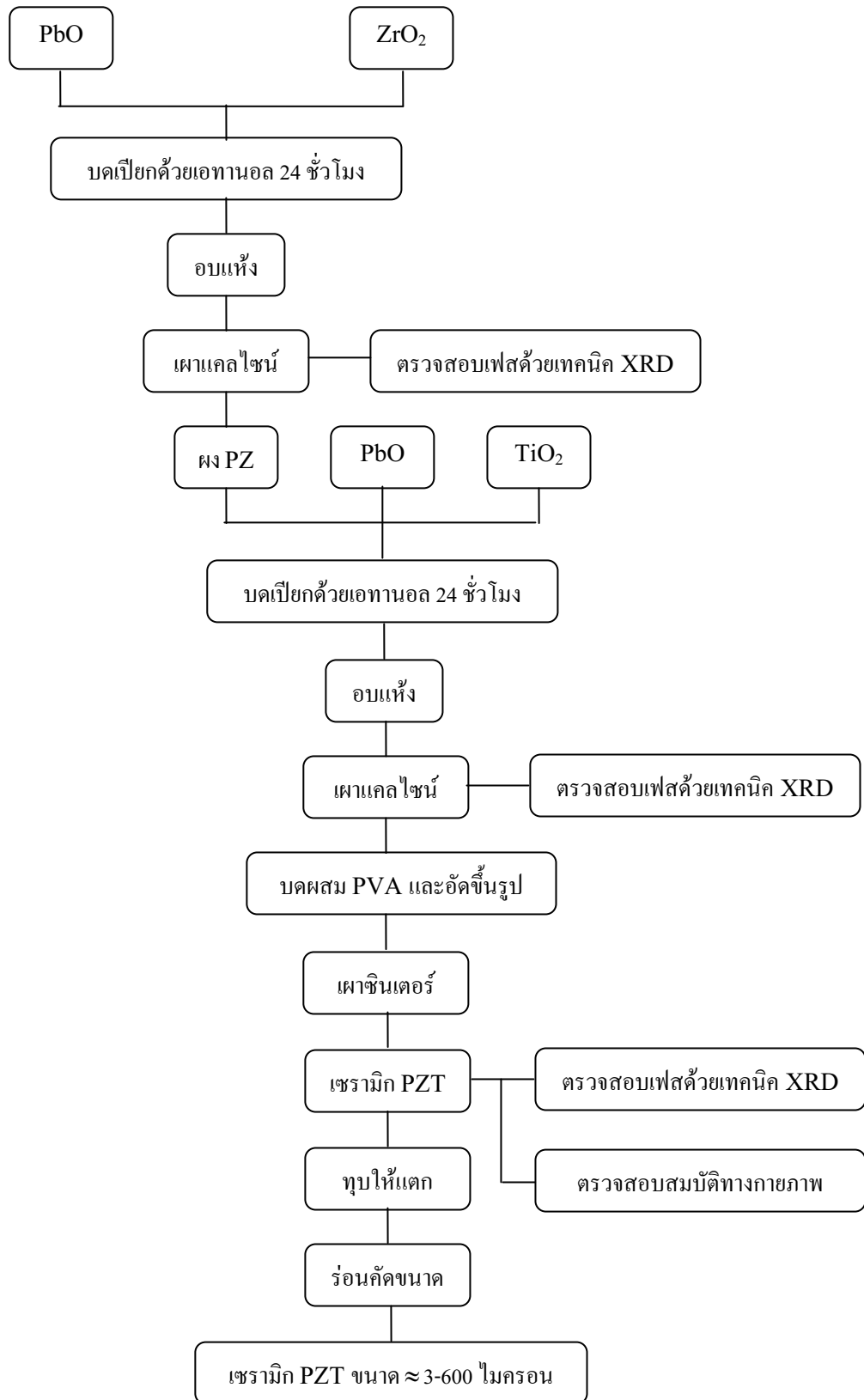
รูป 3.4 แผนผังการเผาซินเตอร์เซรามิกPZT

โดยจะต้องทำการเผาแซ่ที่อุณหภูมิ 500⁰ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเพื่อทำการไล่ PVA ที่ใช้ผสมผง PZT ในตอนต้น ซึ่งในการเผาซินเตอร์จะทำให้อะตอมของสารเกิดการแพร่เข้าหากันและเชื่อม ติดกันแต่มีใช้การหลอมรวมกัน เกิดเป็นลักษณะของคอคอดที่เรียกว่า “เนค (neck)” และที่อุณหภูมิสูงและเวลานานพอจะทำให้เนค เกิดการโตขึ้น ส่งผลให้ช่องว่างภายในระหว่างเกรนนั้นลดลงส่งผลให้สารมีความหนาแน่นสูงขึ้น

3.4.3 การคัดขนาดผงเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตโดยวิธีการ บด-ร่อน

เมื่อผง PZT ได้ผ่านกระบวนการซินเตอร์เป็นเม็ดเซรามิก PZT แล้ว จากนั้นทำการนำ เม็ดเซรามิก PZT มาขัดผิวหน้าเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมา ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 แล้วจึงนำมาบดด้วยครกบด สแตนเลส (stainless mortar) นำผงที่ผ่านการบดมาร่อนผ่าน ตะแกรง (sieve size) เพื่อคัดขนาด ให้ขนาดเซรามิก PZT มีค่ามัธยฐาน $\sim$ 3-600 ไมครอน

แผนผังการเตรียมเซรามิกPZTและการคัดขนาดแสดงดังรูป 3.5



3.5 แผนผังขั้นตอนการเตรียมเซรามิก PZT และการคัดขนาด

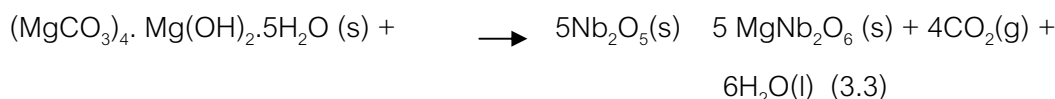
3.5 กระบวนการเตรียมเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN)

3.5.1 การเตรียมสารเลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN)

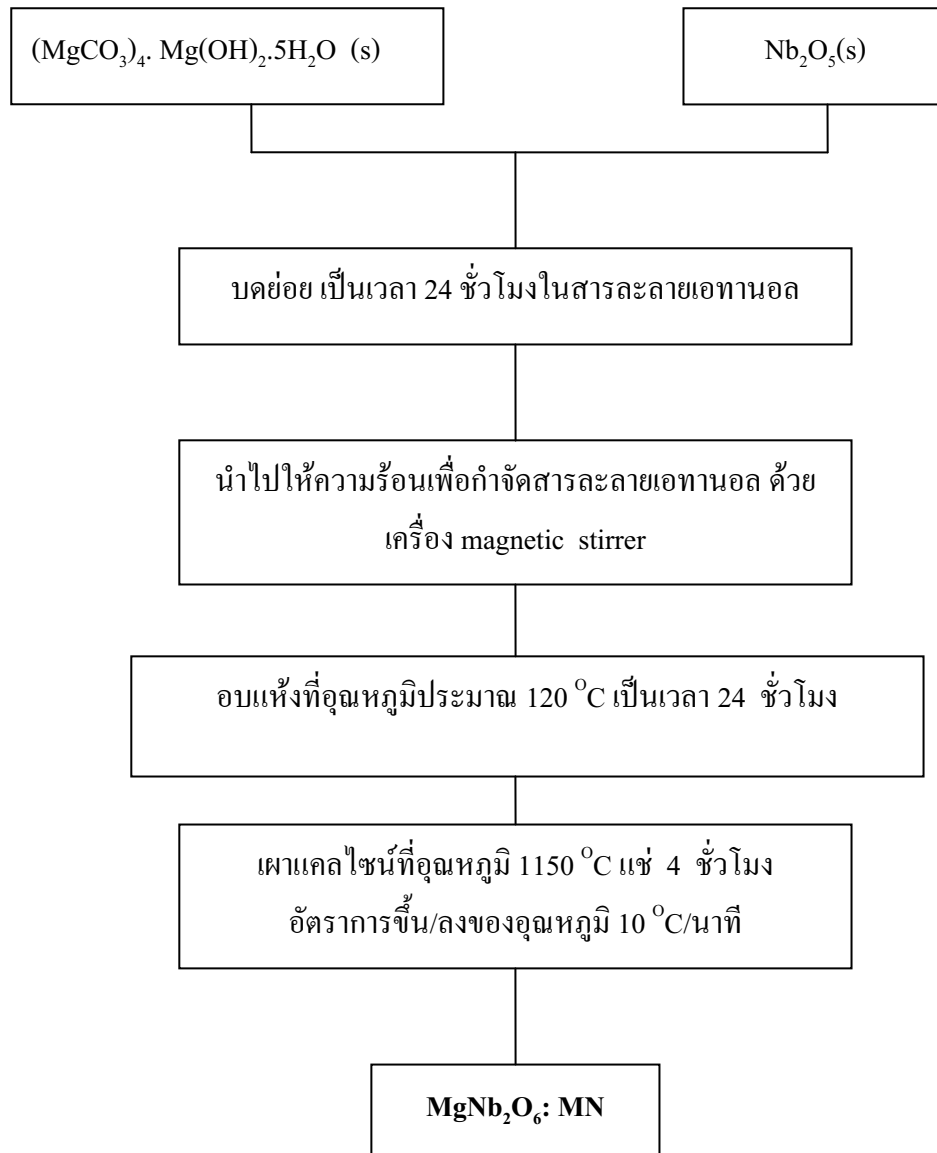
ในขั้นตอนนี้ต้องการเตรียมผงสารเลดแมกนีเซียมไนโอเบตโดยใช้วิธีการเตรียมแบบมีกซ์ออกไซด์แบบสองขั้นตอน (two-stage Mixed oxide) [x] โดยจะเตรียมสารแมกนีเซียมไนโอเบต (MgNb_2O_6 : MN) ก่อนแล้วนำไปผสมกับ เลดออกไซด์ (PbO) ด้วยการบด แล้วนำไปเผาแคลไซน์ให้ความร้อนเพื่อให้มีการทำปฏิกิริยากันกลายเป็นเลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN) รายละเอียดดังต่อไปนี้

การเตรียม MN

สามารถเตรียมสาร MNMC โดยใช้สารตั้งต้น คือ $(\text{MgCO}_3)_4 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ และ Nb_2O_5 ทำปฏิกิริยากันในสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสม ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการ 3.3 ดังนี้



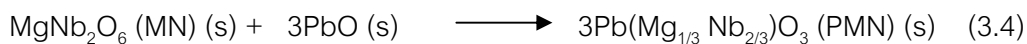
โดยการชั่งสารทั้งสองสำหรับทำปฏิกิริยากันตามปริมาณสารสัมพันธ์ แล้วนำมาผสมให้เข้ากันพร้อมกับลดขนาดด้วยวิธีการบดย่อยแบบ ball milling โดยใช้เอทานอลเป็นตัวหล่อลื่นในกระบวนการบดย่อย ทำการบดเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้น จึงนำของเหลวที่ได้จากการบดย่อยมาปั่นด้วยเครื่องผสมสารแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer) พร้อมกับให้ความร้อนเพื่อกำจัดตัวทำละลาย จนกระทั่งของเหลวที่ได้มีความหนืดมากจนไม่สามารถปั่นอีกต่อไปได้ จึงนำสารที่ได้เข้าตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 120°C เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้มั่นใจว่าสารที่เตรียมได้นั้นแห้งสนิท แล้วนำมาบดร้อนผ่านตะแกรง แล้วจึงนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10°C ต่อนาที [11] โดยสามารถเขียนขั้นตอนการเตรียมได้ดังแสดงในรูป 3.6



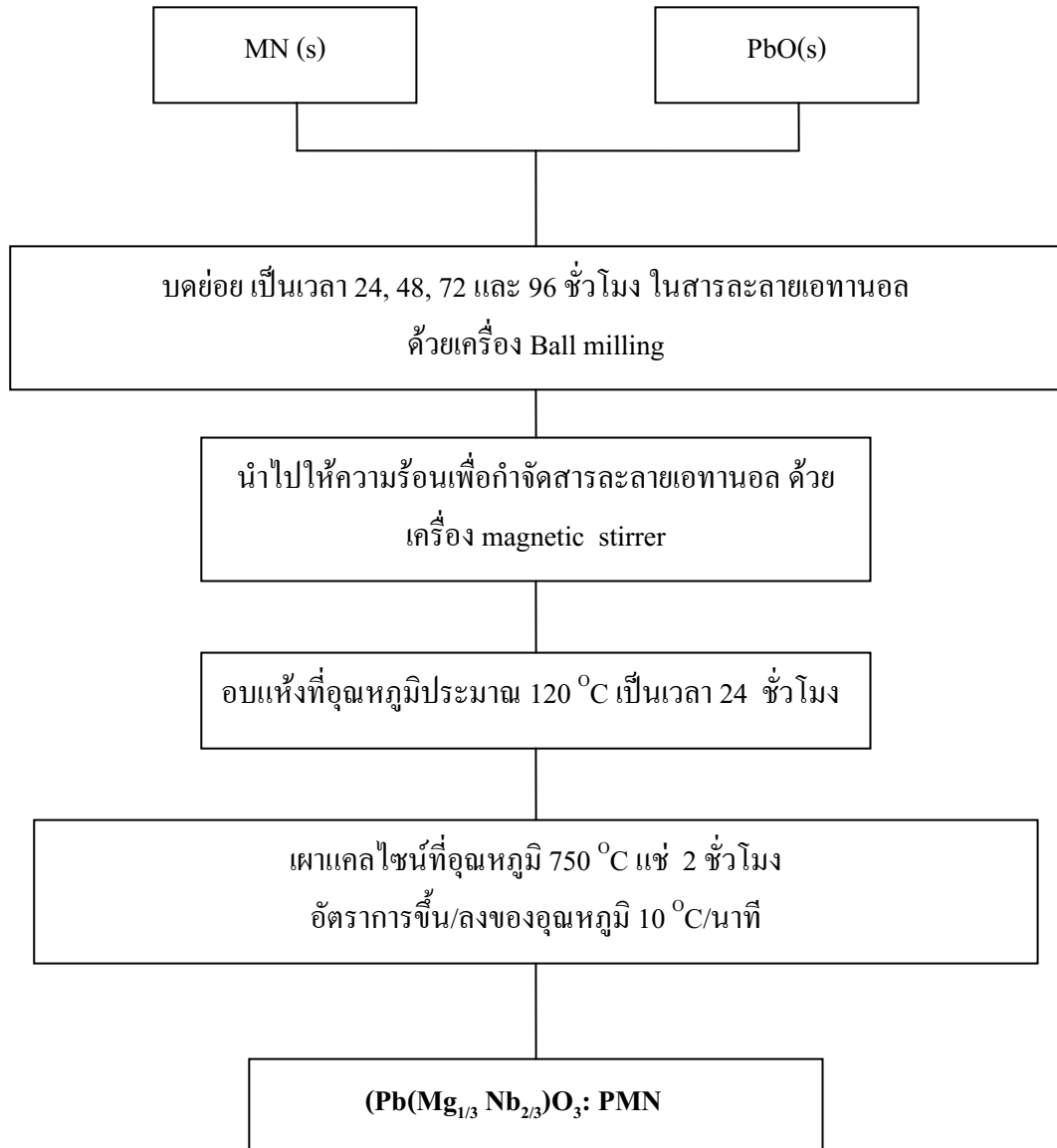
รูป 3.6 แสดงแผนผังการเตรียม MN

การเตรียมผง PMN

สามารถเตรียมสาร PMN โดยใช้สารตั้งต้น MN และ PbO ทำปฏิกิริยากันในสถานะของแข็งที่เหมาะสม ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปตาม สมการ 3.4 ดังนี้



โดยการชั่งสารทั้งสองสำหรับทำปฏิกิริยากันตามปริมาณสารสัมพันธ์ แล้วนำมาผสมให้เข้ากันพร้อมกับลดขนาดด้วยวิธีการบดย่อยแบบ ball milling โดยใช้เอทานอล เป็นสารละลายในกระบวนการบดย่อย เป็นเวลา 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของการแตกตัวของขนาดอนุภาคต่อการเกิดเฟสเพอโรฟสไกต์ หลังจากนั้นจึงนำสารผสมของเหลวกับของแข็งที่ได้จากการบดย่อยมาปั่นด้วยเครื่องผสมสารแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer) พร้อมให้ความร้อนเพื่อกำจัดเอทานอล จนกระทั่งเอทานอลระเหยไปเกือบหมด จึงนำสารที่ได้เข้าตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 120 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้มั่นใจว่าสารที่เตรียมได้นั้นแห้งสนิท แล้วนำมาบดร้อนผ่านตะแกรง แล้วจึงนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 750 °C เผาแช่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 10 °C ต่อนาที โดยสามารถเขียนขั้นตอนการเตรียมได้ดังแสดงในรูป 3.7



รูป 3.7 แสดงแผนผังการเตรียม PMN

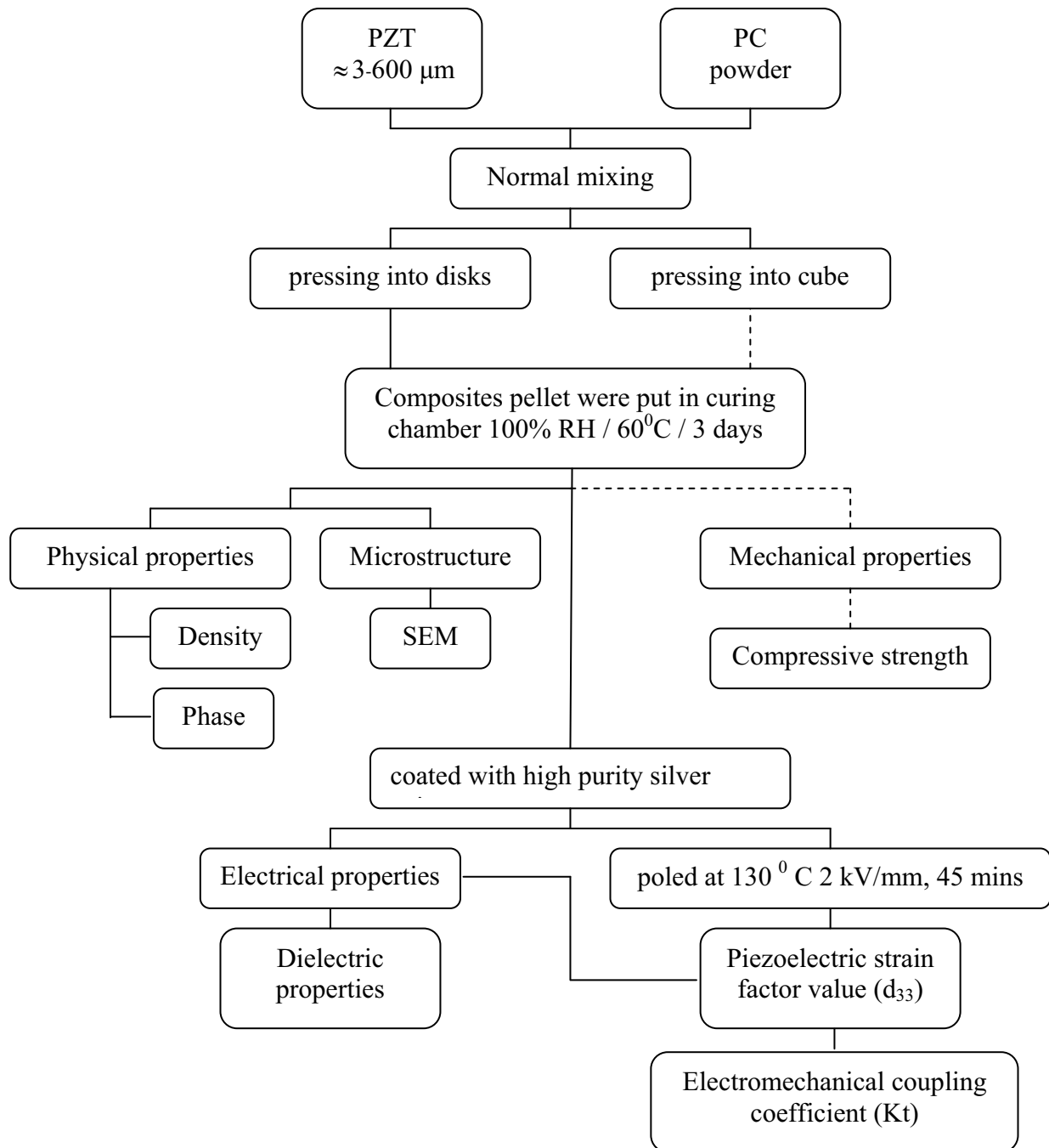
3.6 การเตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3

วัสดุผสมแบบ 0-3 ที่เลือกใช้ในการทดลองนี้ คือ PZT-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยให้ PZT เป็นดิสเพิร์สเฟส และให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นเมทริกซ์เฟส

โดยเริ่มจากการร่อนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่ให้จับตัวกันเป็นก้อน จากนั้นจึงนำไปผสมกับผง PZT หรือเม็ดเซรามิก PZT ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 3-600 ไมครอน โดยวิธีการผสมแบบธรรมดา (normal mixing) ด้วยอัตราส่วน 0 30 40 50 60 70 80 และ 90 ร้อยละโดยปริมาตรของ PZT จากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ด้วยแรง 1-1.5 ตัน เป็นเวลา 10 วินาที ในแม่พิมพ์โลหะที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลม (disc) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมาจัดเรียงในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 60⁰ซ และในสภาวะที่มีความชื้นเป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นเมทริกซ์เฟส เกิดการแข็งตัว เชื่อมประสานเซรามิก PZT ซึ่งเป็นดิสเพิร์สเฟส และ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชัน ที่สมบูรณ์ จากนั้นจึงนำไปตรวจสอบสมบัติต่างๆ

แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมทั้งหมดของวัสดุผสม PZT-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงดังรูป 3.8 และในงานวิจัยนี้ได้เตรียมวัสดุผสมในอัตราส่วนต่างๆ และการทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติเชิงกล

ในส่วน of วัสดุผสมเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซิลิกาฟูม (SFC) และวัสดุผสมเลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) นั้นได้ทำการศึกษาในขั้นเบื้องต้นก่อนทำการศึกษาสมบัติต่างๆ วัสดุของผสมเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดได้ให้ไว้ในภาคผนวกเพื่อความสะดวกและความชัดเจนในการอ่าน



รูป 3.8 แผนผังขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสม PZT-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.7 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสม

3.7.1 การหาค่าความหนาแน่น

หาค่าความหนาแน่นของเม็ดเซรามิกPZT

การหาค่าความหนาแน่นของเม็ดเซรามิกPZTจะยึดหลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes' principal) ซึ่งกล่าวว่า “เมื่อวัสดุจมในของเหลววัตถุนั้นจะถูกพยุงขึ้นด้วยแรงที่มีขนาดเท่ากับน้ำหนักของเหลวที่ถูกแทนที่” ขั้นตอนการหา คือ ชั่งเม็ดเซรามิกPZTในอากาศแล้ว บันทึกค่า จากนั้นทำการชั่งเม็ดเซรามิกPZTในน้ำ หาค่าตัวแปรต่างๆที่ต้องใช้ดังสมการ

จากความสัมพันธ์

$$\rho = \left(\frac{W_0}{W_1 - W_2} \right) \rho_0 \quad (3.5)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง

ρ_0 คือ ความหนาแน่นของของเหลวในการทดลองนี้ คือ น้ำ ที่อุณหภูมิขณะชั่ง

W_0 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ชั่งในอากาศหลังจากอบแห้ง 24

ชั่วโมง

W_1 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ชั่งในอากาศหลังต้มที่ 100°C เป็นเวลา 4-6 ชั่วโมง

W_2 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ชั่งในของเหลวหลังต้มที่ 100°C เป็นเวลา 4-6 ชั่วโมง

หาค่าความหนาแน่นของเม็ดวัสดุผสมและปูนซีเมนต์

การหาค่าความหนาแน่น จะยึดหลักการของอาร์คิมิดีสเช่นกัน ขั้นตอนการหาจะต่างจากการหาความหนาแน่นของเม็ดเซรามิกPZTตรงที่จะไม่ต้มเม็ดวัสดุผสมแต่จะทำการแช่ในน้ำ 30 นาทีแทนซึ่งค่าตัวแปรต่างๆที่ต้องใช้มีดังสมการ

$$\rho = \left(\frac{W_1}{W_1 - W_2} \right) \rho_0 \quad (3.6)$$

โดย W_1 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ
 W_2 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ชั่งในน้ำหลังแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 45 นาที

และจากกฎทรงมวลของสารดังสมการ 3.7 สามารถคำนวณความหนาแน่นเชิงทฤษฎีเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของวัสดุผสมจากการวัดจริงได้

$$M = M_{PZT} + M_{PC} \quad (3.7)$$

โดยที่ M คือ มวลของวัสดุผสม
 M_{PZT} คือ มวลของ PZT ในวัสดุผสม
 M_{PC} คือ มวลของ PC ในวัสดุผสม

จากนิยามความหนาแน่น $\rho = \frac{M}{V} \quad (3.8)$

$$M = \rho V \quad (3.9)$$

แทนค่า 3.9 ใน 3.7 จะได้ $\rho V = \rho_{PZT} V_{PZT} + \rho_{PC} V_{PC} \quad (3.10)$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของวัสดุผสม
 V_{PZT} คือ ปริมาตรของ PZT ในวัสดุผสม
 V_{PC} คือ ปริมาตรของ PC ในวัสดุผสม

ρ_{PZT} คือ ความหนาแน่นของ PZT ในวัสดุผสม

ρ_{PC} คือ ความหนาแน่นของ PC ในวัสดุผสม

3.8 การตรวจโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

เทคนิคนี้จะอาศัยการตรวจสอบโดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) คือ เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบบนผิววัสดุ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นผลึก จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบที่มีลักษณะเป็นระนาบ (hkl) ซึ่งจะทำให้เกิดการกระเจิง (scattering) ของรังสีเอกซ์เกิดขึ้น หลังจากนั้นรังสีเอกซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน โดยที่มุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ออกจากผลึกจะเป็นลักษณะเฉพาะตามชุดระนาบนั้นๆ และสามารถที่จะเกิดการแทรกสอดเสริมกันได้เมื่อรังสีที่เลี้ยวเบนมาจากชุดระนาบเดียวกัน เมื่อนำเครื่องตรวจจับ (detector) มาวางที่ตำแหน่งมุมที่เกิดการเลี้ยวเบน ก็จะสามารถตรวจสอบได้ว่ารังสีที่ตรวจจับได้นั้นมาจากระนาบใดและมีปริมาณเท่าใด โดยดูจากค่ามุมและความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏ ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดก็จะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่เป็นลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไปตามลักษณะของโครงสร้าง

เมื่อนำวัสดุผสมที่ได้ มาตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD ผลที่ได้จะเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ตามกฎของแบร็ก (Bragg's law) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่า d-spacing ได้จากสมการ 3.11

$$2d \sin \theta = \lambda \quad (3.11)$$

เมื่อ d = ค่า d-spacing

λ = ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากเป้าทองแดง
ซึ่งมีค่าประมาณ $1.54 \text{ \AA}$

θ = มุมของแบร็ก

เมื่อได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แล้วจะนำไปเทียบกับข้อมูลใน JCPDS file ซึ่งเป็นฐานข้อมูลของ XRD

3.9 การตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (morphology) หรือโครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของสารตัวอย่างซึ่งมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่าจนถึงมากกว่า 100,000 เท่า โดยการแจกแจงรายละเอียดของภาพมีความเป็นไปได้ประมาณ 3 นาโนเมตร ในการทดลองนี้จะเป็นการนำชิ้นงานวัสดุผสม PZT-PC ที่มีอัตราส่วนในการผสมต่างๆมาส่องด้วยกล้อง SEM ข้อมูลที่ได้สามารถบอกลักษณะ รูปร่าง และการจัดเรียงตัวของวัสดุผสมได้ นอกจากนี้ยังสามารถเห็นถึงบริเวณรอยต่อของเฟสที่ต่างกันและรูพรุนภายในของวัสดุผสมได้

การเตรียมชิ้นงานก่อนนำไปถ่าย SEM มีวิธีการเตรียมดังนี้

- ทำความสะอาดชิ้นงานเพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่เกาะบริเวณผิววัสดุผสมออกให้หมด
- นำวัสดุผสมที่ได้เข้าเตาอบอุณหภูมิ 105°C ประมาณ 45 นาทีเพื่อไล่ความชื้น
- นำชิ้นวัสดุผสมที่ผ่านการชุบให้แตกติดลงบนแท่นวางชิ้นงานทองเหลืองที่ติดเทปคาร์บอนไว้
- เคลือบผิวชิ้นงานด้วยวิธี gold sputtering เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าแบบครบวงจรต่อชิ้นงาน
- ทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM เพื่อดูลักษณะสัณฐานวิทยาของรอยหักของวัสดุผสม

3.10 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

3.10.1 การสร้างขั้วและการโพล

เริ่มจากการขัดชิ้นงานให้มีขนาดตามต้องการ จากนั้นนำไปอบให้แห้งประมาณ 45 นาที ก่อนนำมาทาการเงิน (silver paint) แบบไม่เผาเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าแบบครบวงจร จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนของการโพล ซึ่งการโพลนั้น เป็นการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปเบี่ยงเบน โพลาริเซชันในเนื้อสารให้เปลี่ยนไปตามสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป โดยจะนำชิ้นงานไปวางในน้ำมันซิลิโคนที่อุณหภูมิ 130°C โดยให้สนามไฟฟ้าแก่ชิ้นงานขนาด 2 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร เป็นเวลา 45 นาที โดยจะสร้างขั้วในทิศตามแนวความยาวของวัสดุผสม

3.10.2 การตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหรือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) และ การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล (electromechanical coupling coefficient, K)

หลังจากเตรียมชิ้นงานให้มีขนาดตามต้องการแล้ว จากนั้นนำชิ้นงานทาด้วยการเงินทั้งสองด้านเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าแบบครบวงจร จากนั้น นำมาวัดความจุและค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในทิศตามแนวความยาวของวัสดุผสมด้วยเครื่อง LCZ meter ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณหาสภาพยอมสัมพัทธ์จากสมการ 3.12 จะได้เป็น ϵ_{33} โดยจะทำการวัดที่อุณหภูมิห้องด้วยความถี่ 1 กิโลเฮิรท์

$$\text{จาก} \quad \epsilon_r = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \quad (3.12)$$

เมื่อ	C	=	ค่าความสามารถในการกักเก็บประจุของสาร (F)
	ϵ_0	=	ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} (F/m)
	ϵ_r	=	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กทริกนั้น
	A	=	พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าบนสารไดอิเล็กทริก (m^2)
	d	=	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (m)

ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล electromechanical coupling coefficient (K_t) เครื่อง LCZ impedance meter (Hewlett Packard 4194A) และสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$K_t^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_m}{f_n} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_n - f_m}{f_n}\right) \quad (3.13)$$

โดยค่า f_m และ f_n คือค่าความถี่ ณ ความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุด ตามลำดับ

3.10.3 การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

นำวัสดุสมที่เตรียมแล้วไปทำการโพลซึ่งเป็นขั้นตอนที่ยากและใช้เวลานานมากเนื่องจากเป็นการโพลในรูปแบบ 0-3 ที่มีปูนเพสต์เป็น matrix หลังจากทำการโพลเสร็จ 24 ชั่วโมง จึงนำตัวชิ้นงานไปทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกในทิศทางตามแนวความยาวหรือในแนวขนานกับทิศทางการให้สนามไฟฟ้า โดยจะวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกในแนวขนานกับทิศทางการโพล เช่นกัน ด้วยเครื่อง piezoelectric meter

3.11 การตรวจสอบสมบัติเชิงกล

3.11.1 การทดสอบกำลังอัด

ทำการเตรียมชิ้นงานวัสดุผสมที่ต้องการทดสอบกำลังอัดด้วยการอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์โลหะ ด้วยแรง 1 ตัน เป็นเวลา 10 วินาที โดยเครื่องอัดไฮดรอลิก ในแม่พิมพ์โลหะที่มีลักษณะเป็น ลูกบาศก์ ขนาด 10x10x10 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมาจัดเรียงในเครื่อง ควบคุมอุณหภูมิแบบอ่าง (temperature bath) ที่สามารถควบคุมความชื้นได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ที่ อุณหภูมิ 60⁰ซ เป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นเมทริกซ์เฟสเกิดการแข็งตัวเชื่อมประสาน เซรามิก PZT ซึ่งเป็นดิสเพิร์สเฟสและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ จากนั้นจึงนำไปทดสอบ กำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด

โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

- 1) นำก้อนตัวอย่างวางกึ่งกลางของแท่นทดสอบโดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่นทดสอบ
- 2) เปิดเครื่องทดสอบ
- 3) กดก้อนชิ้นงานจนแตกหัก แล้วทำการบันทึกค่าที่ได้
- 4) นำค่าน้ำหนักและพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่ากำลังอัด ดังสมการ 3.14

$$\text{กำลังอัดของคอนกรีต} = \frac{\text{น้ำหนักกด}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน}} \quad (3.14)$$

หน่วยที่ใช้ทั่วไป คือ

1. กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Kg/cm²)
2. นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm²)

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

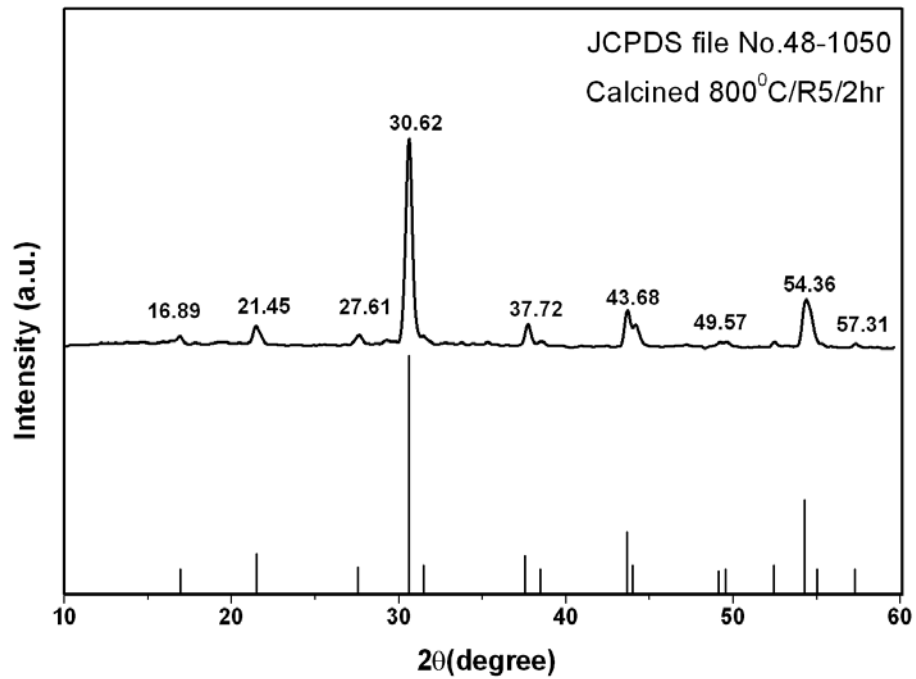
ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์แบบ 0-3ผลิตจากเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PZT-PC) ผลการตรวจสอบเฟส พฤติกรรมโครงสร้างผลึก สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก และ ค่าสัมประสิทธิ์คูลอมบ์ไฟฟ้าเชิงกล ท้ายสุดจะนำเสนอในส่วนของคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ กำลังอัด พร้อมทั้งอภิปรายและวิเคราะห์ผลตามลำดับดังนี้

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

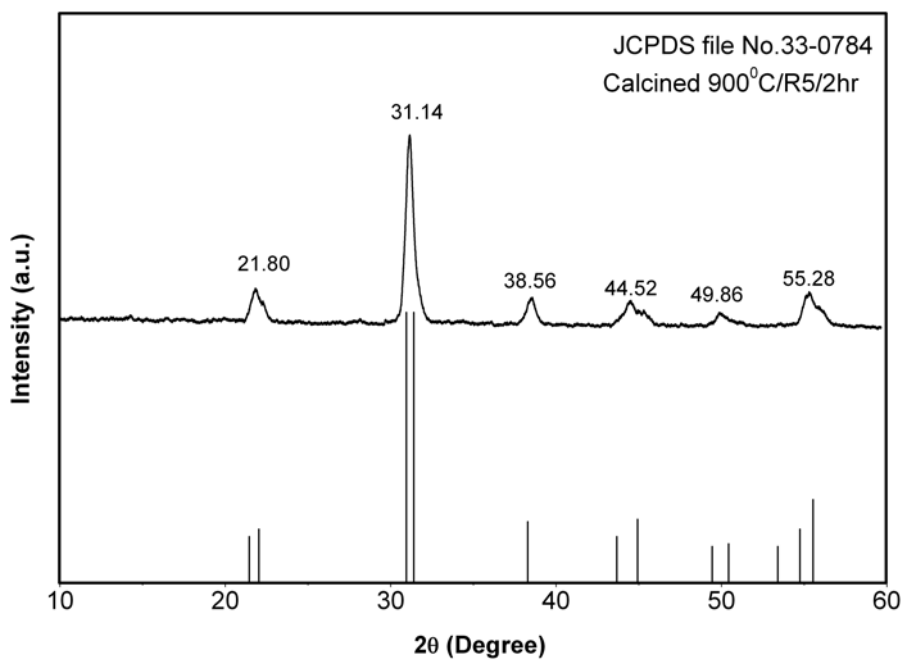
4.1.1. โครงสร้างผลึกของเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT)

จากการเตรียมผง PZT แบบ two step ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมสองขั้นตอนด้วยกันโดยจะเริ่มจากการเตรียมผงเลดเซอร์โคเนต (PZ) ก่อนซึ่งจะทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C ผลการตรวจสอบเฟสของผง PZ ที่ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงดังรูป 4.1 ซึ่งจะเห็นว่า ผง PZ ที่เตรียมได้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลของสาร PZ สูตร PbZrO_3 ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 48-1050 และเมื่อพิจารณาพีคของรังสีเอกซ์ที่ได้จะพบว่ามีพีคแปลกปลอมที่ตำแหน่งมุม 2θ ประมาณ 29.25 ซึ่งน่าจะเป็น PbO และมีพีคที่มีความเข้มสูงที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งค่า 2θ 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 4.2 ซึ่งจะพบว่าผงที่เตรียมได้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลของสาร PZT สูตร $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 33-0784 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นเตตระโกนอล (tetragonal) และมีพีคที่มีความเข้มสูงที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งค่า 2θ 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 ซึ่งมีความเป็นเตตระโกนอลดี (tetragonality : c/a) เท่ากับ 1.027 และไม่พบเฟสแปลกปลอมที่พบในผง PZ และหลังจากผ่านกระบวนการซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ

1200⁰ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยใช้อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเท่ากับ 5⁰ซ ต่อนาทีที่ไม่พบเฟสแปลกปลอมเช่นกัน



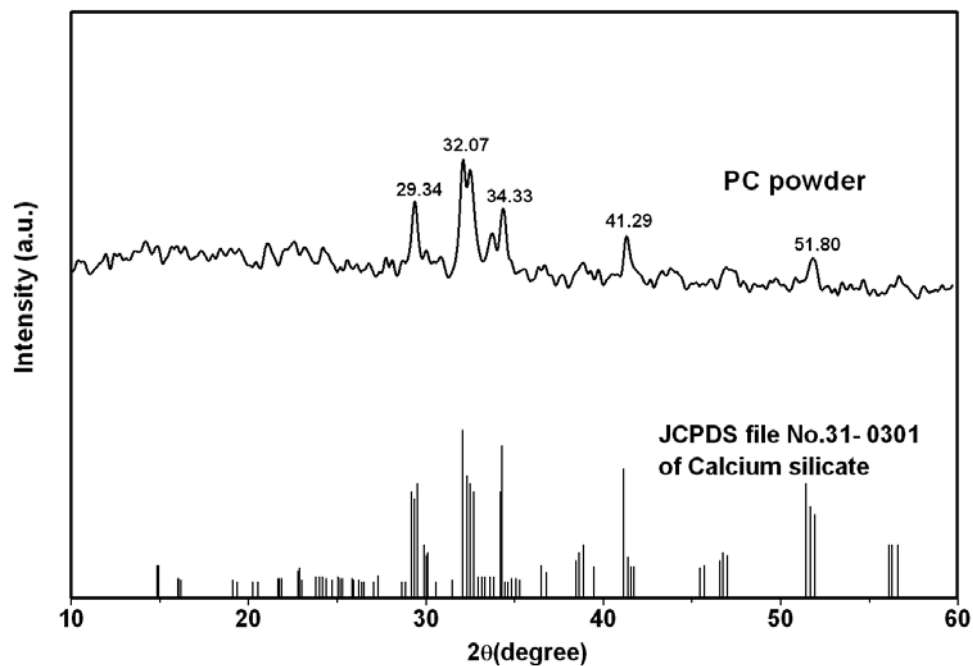
รูป 4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PZ เทียบกับ JCPDS file No.48-1050



รูป 4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PZT เทียบกับ JCPDS file No.33-0784

4.1.2. โครงสร้างผลึกของผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC)

ผลการตรวจสอบเฟสของผง PC ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงดัง
รูป 4.3

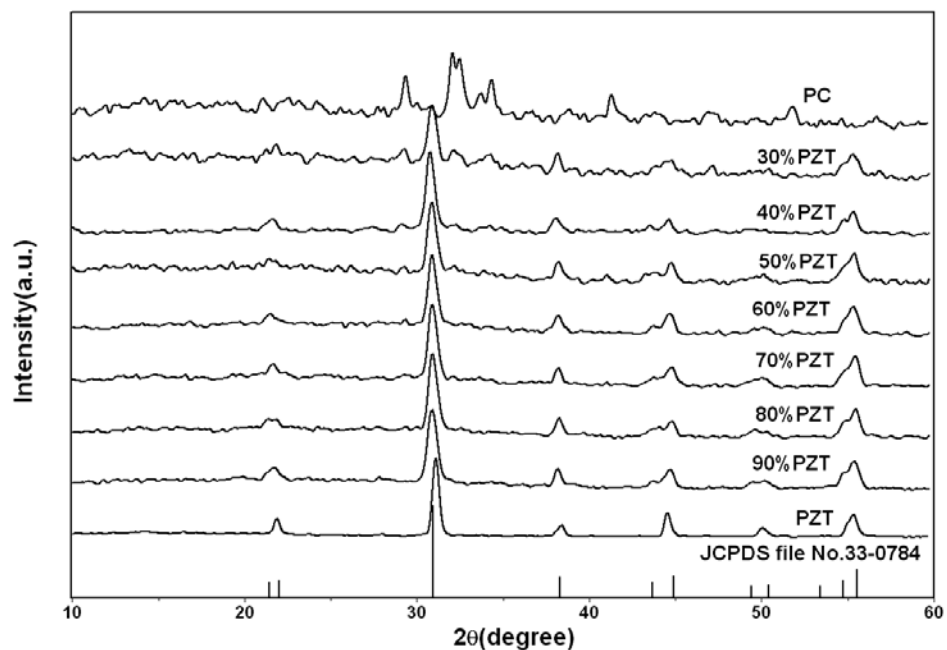


รูป 4.3 แบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ผงปูนซีเมนต์

ซึ่งจะเห็นว่าผงปูน PC ที่ได้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลของสาร แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) สูตร Ca_3SiO_5 ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 31-0301 มีพีคที่มีความเข้มสูงที่สุดของผง 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

4.1.3. โครงสร้างผลึกวัสดุผสมเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PZT-PC)

จากการเตรียมวัสดุผสมด้วยการอัดขึ้นรูปและนำไปผ่านกระบวนการการเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์โดยการนำไปแช่ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบอ่างที่มีความชื้นเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 3 วัน เพื่อช่วยในการแข็งตัวของวัสดุผสมแล้ว จากนั้นนำวัสดุผสมในอัตราส่วนต่างๆ มาอบเพื่อไล่ความชื้นและนำมาบดให้ละเอียดก่อนจะนำมาตรวจสอบเฟสของผงวัสดุผสมที่ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งผลการตรวจสอบที่ได้แสดงดังรูป 4.4



รูป 4.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PZT เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC)

จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากวัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่าง PZT กับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังรูป 4.4 พบว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นเป็นการรวมกันระหว่างเฟสของ PZT และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งจะสังเกตเห็น peak ของ PZT เด่นชัดกว่า peak ของ PC โดยเฉพาะที่มีอัตราส่วนผสมของ PZT สูงๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นผลึกของ PZT จะโดดเด่นกว่าโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ของปูน PC

4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

4.2.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก PZT

จากการกระบวนการเตรียมผง PZT จนถึงการขึ้นรูปกลายเป็นเซรามิก PZT ได้มีการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก PZT แสดงดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก PZT

อุณหภูมิซินเตอร์ ($^{\circ}\text{C}$)	ความหนาแน่น	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%)	ร้อยละการหดตัวเชิงเส้น	ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร	ร้อยละของน้ำหนักรั่วซึม
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

$$\rho_{theory} = \frac{Mn}{V_{abc}N_a} \quad (4.1)$$

M	คือ	มวลโมเลกุลของสารที่เป็นผลึก
n	คือ	จำนวนโมเลกุลในหน่วยเซลล์
V_{abc}	คือ	ปริมาตรหน่วยเซลล์ประกอบด้วยด้าน a, b และ c
N_a	คือ	เลขอวกาโด (Avogadro constant) มีค่าเท่ากับ $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

เมื่อแทนค่ามวลโมเลกุลของ PZT ซึ่งมีค่าเท่ากับ 325.6 กรัม และโครงสร้างผลึกของ PZT ซึ่งเป็นเตตระโกนอลิติมีปริมาตร 6.749×10^{-23} ลูกบาศก์เซนติเมตรและมีโมเลกุลเดียวในหน่วยเซลล์ เมื่อแทนค่าในสมการ 4.1 จะทำให้ได้ความหนาแน่นตามทฤษฎีของ PZT คือ 8.011 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จะเห็นว่าความหนาแน่นของ PZT ที่เตรียมได้มีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นตามทฤษฎี ซึ่งก็ควรจะเป็นเช่นนั้น เพราะในความเป็นจริงแล้วภายในสารตัวอย่างมีความบกพร่องต่างๆภายใน เช่น สิ่งเจือปนต่างๆ (impurity) หรือรูพรุน (porosity) ซึ่งจะมีทั้งรูพรุนปิด (close pore) และ รูพรุนเปิด (open pore) ซึ่งเป็นความบกพร่องที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้

4.2.2 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสม PZT-PC

ในการเตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 ปริมาตรและการกระจายตัวของเมทริกซ์เฟสในดิสเพอร์สเฟสจะส่งผลต่อสมบัติต่างๆของวัสดุผสมไม่เว้นแม้แต่ความหนาแน่น ดังนั้นจึงทำการวัดความหนาแน่นของวัสดุผสม PZT-PC แสดงดังตาราง 4.2

ตาราง 4.2 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 ดิสเพอร์สเฟส ใน PC เมทริกซ์เฟสจะพบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PZT ในระบบเพิ่มขึ้น

4.3 ผลการตรวจสอบภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงโครงสร้างของวัสดุผสมแบบ 0-3

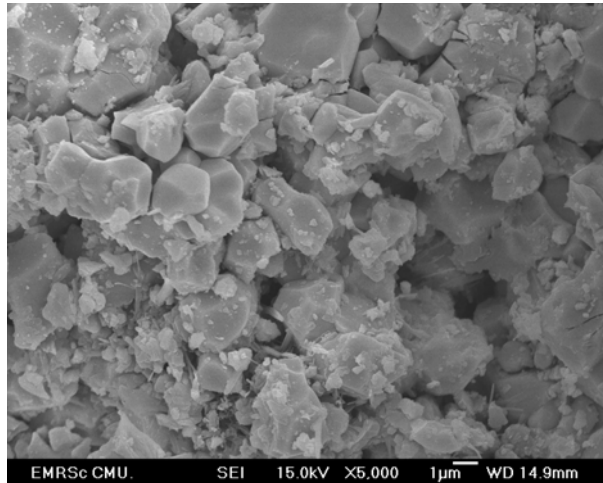
ในส่วนของการศึกษาโครงสร้างของวัสดุผสมแบบ 0-3 โดยใช้จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในระบบ PZT-PC ที่ใช้ขนาดอนุภาคของ PZT ต่างกันนั้นสามารถเห็นถึงความแตกต่างทางขนาดของอนุภาคได้ดังแสดงในรูป 4.5

จากรูป 4.6 แสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะกันและการผสมผสานที่ดีระหว่าง PZT กับ cement matrix ในส่วนของ cement matrix นั้นพบว่ามีเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขึ้น (4.6 (ก)) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จึงทำให้ได้ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) ที่มีลักษณะคล้ายเส้นใยเล็กๆพันกันไปมา ซึ่ง CSH เกิดจากสารประกอบหลักแคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำ นอกจากนี้ยังพบชั้นของเอทาไนท์ (Ettringite) ที่มีลักษณะคล้ายแท่งเข็มเล็กๆซึ่งเกิดจากไตรแคลเซียมอลูมิเนตทำปฏิกิริยากับยิปซัมซึ่งเป็นสารประกอบหลักเช่นกัน สังเกตได้จากการวิเคราะห์สารประกอบด้วยสเปกตรัม 1 ของ EDX ดังรูป 4.7

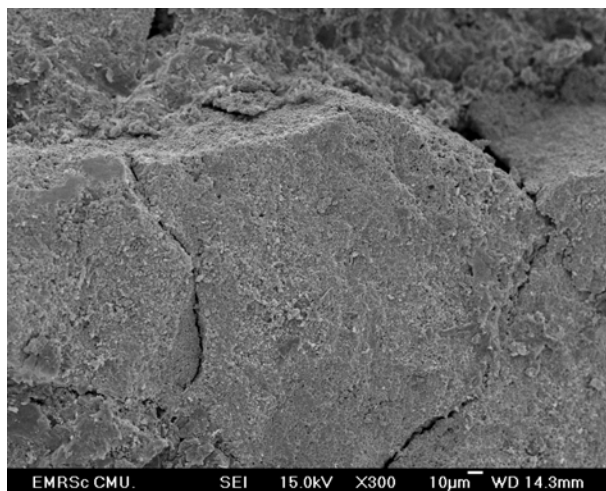
จากรูป 4.6 (ข) และ(ค) เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสม PZT-PC ที่มีปริมาตร PZT 30 และ 50 % โดยปริมาตรในระบบ ซึ่งจะเห็นเฟสของ PZT ถูกล้อมรอบด้วยเฟสของ cement matrix

และ จากรูป 4.6 (ง) ซึ่งเป็นโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสม PZT-PC ที่มีปริมาตร PZT 70 % โดยปริมาตรในระบบ ซึ่งจะเห็นรอยต่อระหว่างเซรามิก PZT และปูน PC นอกจากนี้ในเฟสของ cement matrix ยังพบชั้นของเอทาไนท์ ที่มีลักษณะเหมือนเข็มที่แตกตัวแยกออกมา ซึ่งสังเกตได้จากการวิเคราะห์สารประกอบด้วยสเปกตรัม 2 ของ EDX ดังรูป 4.7 (ข)

และจากรูป 4.6 (จ) ซึ่งมีปริมาตร PZT 90 % โดยปริมาตรในระบบของวัสดุผสม PZT-PC จะพบเฟสของ PZT ชัดเจนขึ้น

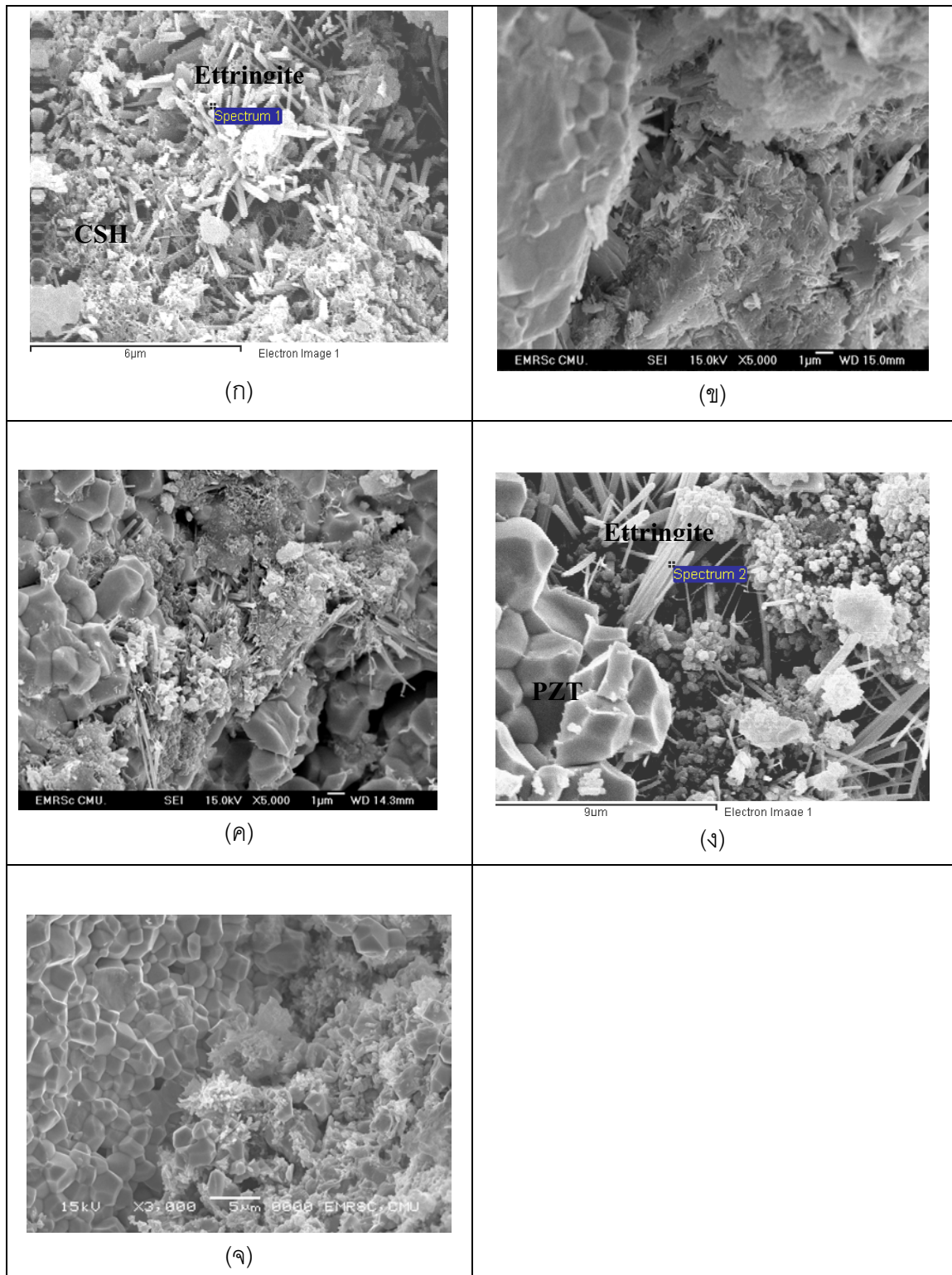


(ก)

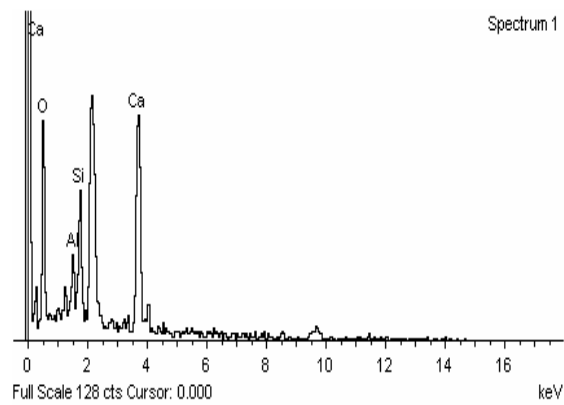


(ข)

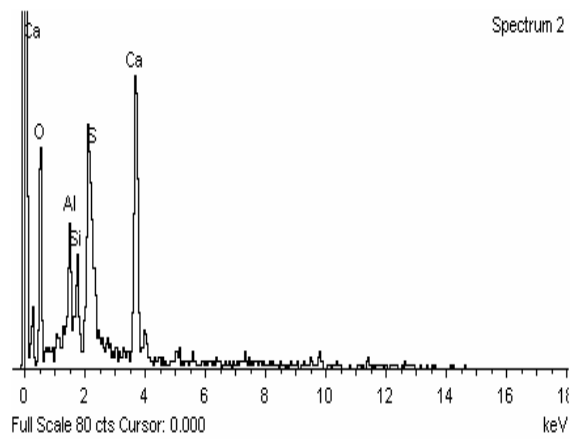
รูป 4.5 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงโครงสร้างของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ที่ 50%PZT (ก) 3 μ m และ (ข) 620 μ m



รูป 4.6 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงโครงสร้างของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC โดยที่ (ก) คือ PC (ข) คือ 30%PZT (ค) คือ 50%PZT (ง) คือ 70%PZT และ (จ) คือ 90%PZT



(ก)



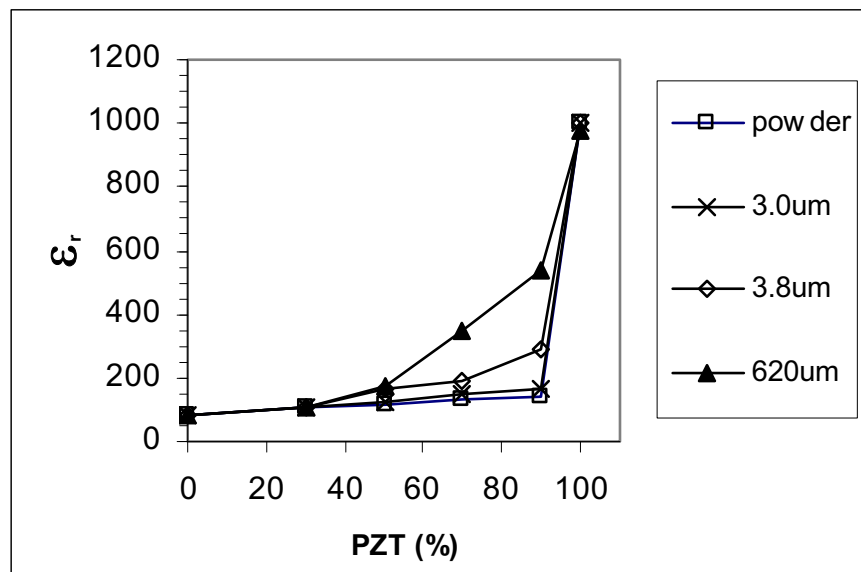
(ข)

รูป 4.7 การวิเคราะห์ด้วย EDS ของ (ก) PC และ (ข) 70%PZT

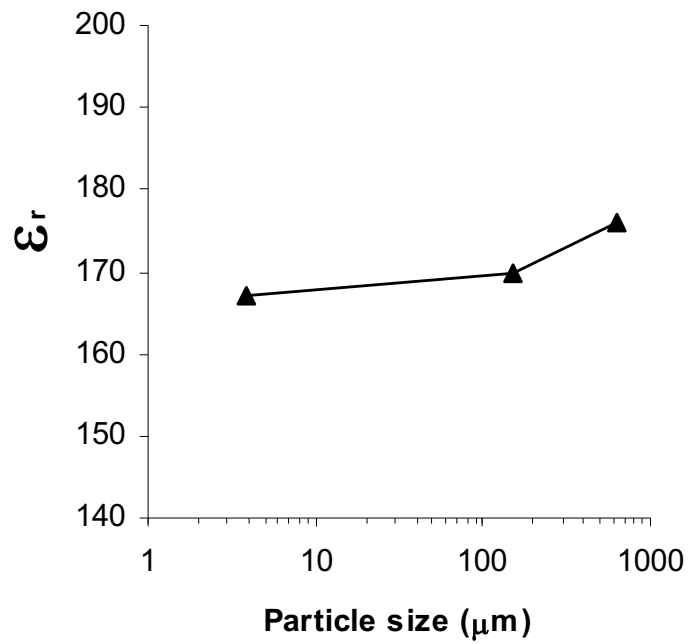
4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

4.4.1 การวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

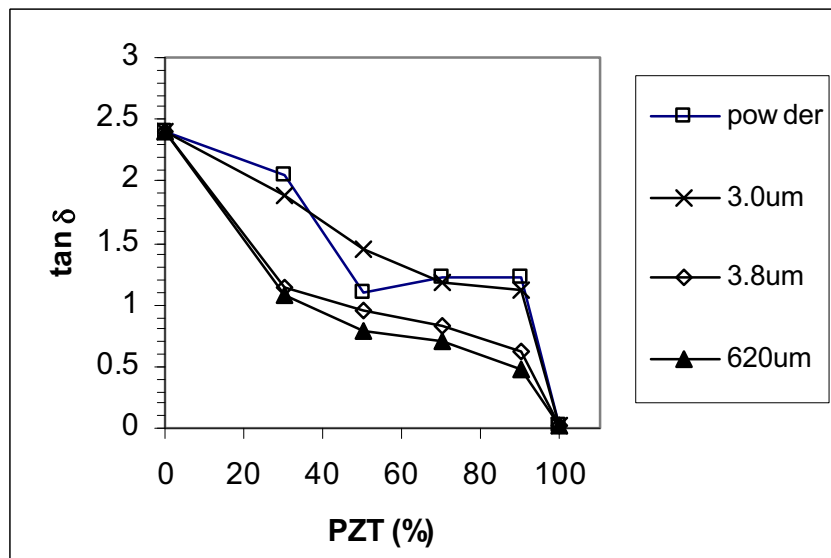
จากการตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ที่ปริมาตรเซรามิก PZT 0, 30, 50, 70, 90 และ 100 % โดยปริมาตร แสดงผลดังรูป 4.8 และผลกระทบของขนาดอนุภาคต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนั้นในวัสดุผสมแบบ 0-3 ที่มีปริมาตรเซรามิก PZT ที่ 50% นั้นสามารถเห็นได้ชัดจากรูป 4.9 ส่วนค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกนั้นผลกระทบของปริมาตรเซรามิก PZT และขนาดอนุภาคของเซรามิก PZT นั้น แสดงผลดังรูป 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



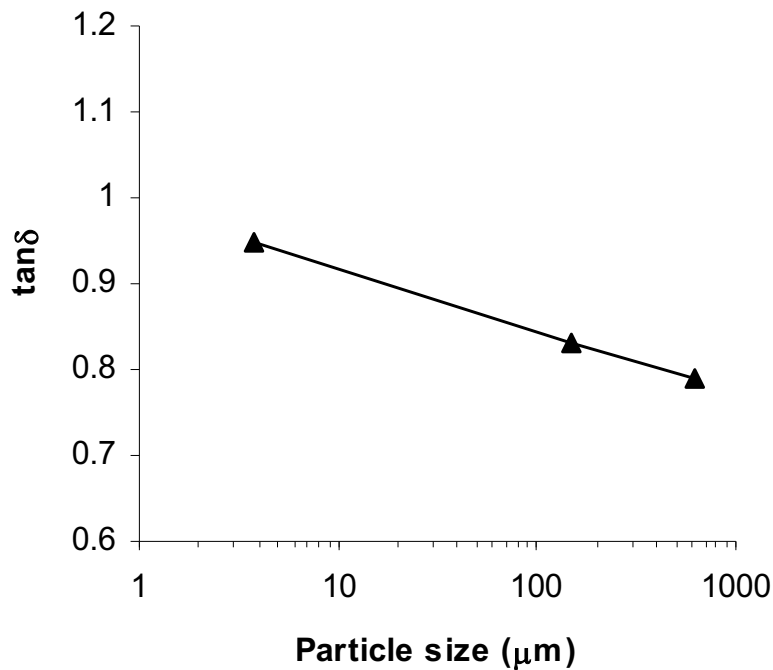
รูป 4.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่อปริมาตร PZT ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC



รูป 4.9 ค่าคงที่ได้ลดลงเล็กน้อยกับขนาดอนุภาคของเซรามิก PZT ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ที่มีปริมาตรเซรามิก PZT ที่ 50%



รูป 4.10 ค่าตัวประกอบ การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ต่อปริมาตร PZT



รูป 4.11 ค่าตัวประกอบกาสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับขนาดอนุภาคของเซรามิก PZT ที่ 50%

จากการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม PZT-PC ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อมีปริมาตรเซรามิก PZT ในระบบเพิ่มขึ้น[10,11,15] แต่จะมีค่าอยู่ระหว่างค่า สภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PZT ซึ่งมีค่าประมาณ 1000 และพูน PC จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประมาณ 98 ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม จะเป็นผลรวมของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในแต่ละเฟสรวมกันเรียกว่า “sum property” [14] และพบว่ามีค่าสูงสุดเมื่อขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น (600 ไมครอน) เมื่อเทียบกับค่าของวัสดุผสมที่มีขนาดอนุภาค ที่ 3 ไมครอน ในสัดส่วนของ PZT ที่เท่ากัน การใช้สัดส่วนปริมาตรเซรามิกโดยปริมาตร (volume fraction) ที่สูงนั้นก็เหมือนกับมีตัวเก็บประจุมาเชื่อมต่อกันมากขึ้นกว่าการใช้สัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกน้อยๆ จึงทำให้ค่าความจุที่ได้เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แสดงว่ามีการกระจายตัวที่ดีของเซรามิก PZT ในพูน PC

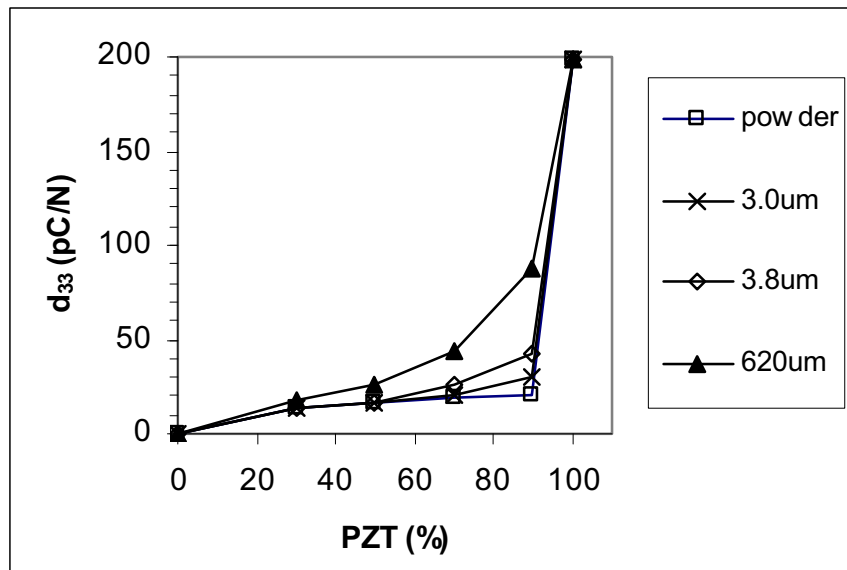
ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ดังแสดงในรูป 4.11 ซึ่งแสดงค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) พบว่าจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาตรเซรามิก PZT เพิ่มขึ้นในทุกขนาดของอนุภาคที่ใช้ หรือ ในทางกลับกันคือจะมีค่าสูงที่ปริมาตรปูน PC สูงขึ้นนั่นเอง อาจเป็นไปได้ว่าในโครงสร้างของปูนมีน้ำปนอยู่ซึ่งปูนเป็นสารที่มีรطوبةสูงดังนั้นความชื้นจากบรรยากาศภายนอกสามารถถูกดูดซึมเข้าไปในโครงสร้างของปูนได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งน่าจะจัดได้ว่าเป็นเฟสตัวนำ (ion conductor) ที่ปนอยู่ในเฟสของปูนซีเมนต์น่าจะเป็นสาเหตุที่ส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น

4.4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT- PC

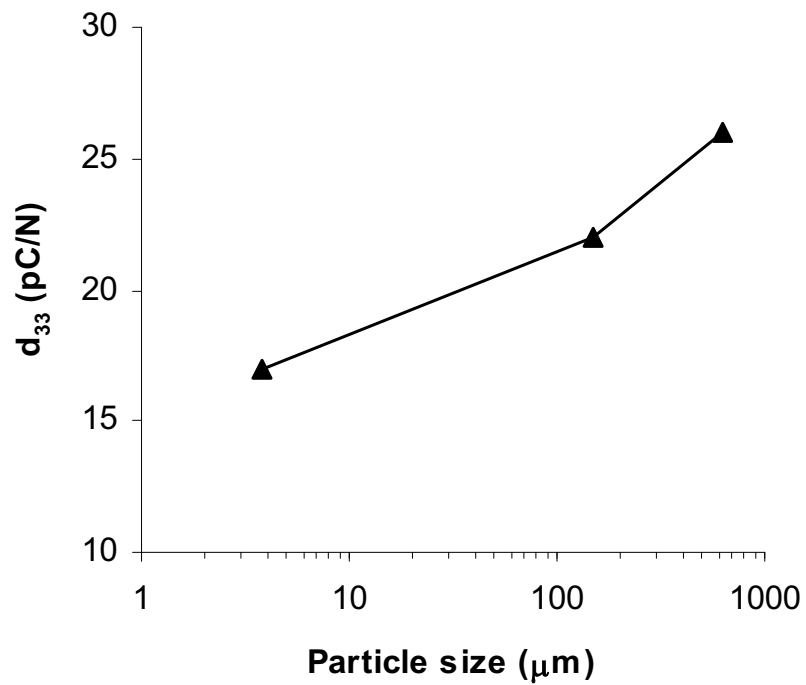
ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ที่ปริมาตรเซรามิก PZT 0, 30, 50, 70, 90 และ 100 % โดยปริมาตร หลังจากผ่านกระบวนการโพลที่อุณหภูมิ 130°C ด้วยสนามไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ต่อ 1 มิลลิเมตร เป็นเวลา 45 นาที แสดงดังกราฟรูป 4.12

ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ของวัสดุผสมแบบ 0-3 พบว่า ค่าที่ได้มีค่าสูงขึ้นตามปริมาตร PZT ที่เพิ่มขึ้นในทุกขนาดของอนุภาคและพบว่ามีค่าสูงสุดเมื่อขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น (620 ไมครอน) ซึ่งมีค่า d_{33} ของวัสดุผสมที่ 50% PZT อยู่ที่ 26 pC/N เมื่อเทียบกับค่าของวัสดุผสมที่มีขนาดอนุภาค ที่ 3.8 ไมครอน ในสัดส่วนของ PZT ที่เท่ากัน ($d_{33} = 14 \text{ pC/N}$) ดังแสดงในรูป 4.13 นอกจากนี้ความแตกต่างยังชัดเจนอีกด้วยเมื่อปริมาตร PZT สูงขึ้น (รูป 4.12)

ในแต่ละงานวิจัยที่ผ่านมาล้วนมีผลสอดคล้องกันที่สนับสนุนผลการทดลองที่ว่าค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC พบว่า ค่าที่ได้มีค่าสูงขึ้นตามปริมาตร PZT ที่เพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่าวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-Polymer [11] ซึ่งอาจมีหลายเหตุปัจจัยสนับสนุนผลการทดลองที่ได้ ขนาดอนุภาค ก็มีผลสำคัญในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกจากการทดลองพบว่าเซรามิก PZT ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวลดลงทำให้มีการเชื่อมต่อกันสูงในอัตราส่วนที่มีปริมาตร PZT สูงๆ ก่อให้เกิดเส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้า (electric flux path) ระหว่างอนุภาคเซรามิก ในระหว่างการโพลทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกสูงขึ้นและก็อาจเป็นไปได้ที่วัสดุผสมเกิดการผสมกันระหว่างการผสมแบบ 0-3 และ 1-3 ในอัตราส่วนของระบบที่มีปริมาตร PZT สูงๆ เนื่องจากการผสมแบบ 1-3 จะมีสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกสูงกว่าการผสมแบบ 0-3 ซึ่ง N.Jayasundere และคณะ [18] ได้ทำการศึกษารูปแบบของการผสมระหว่างแบบ 0-3 และ 1-3 เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกเมื่อขนาดของอนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกับความหนาของชิ้นงานและมีสัดส่วนโดยปริมาตรสูงๆ อยู่ระหว่าง 50-70% ค่าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ขนาดอนุภาคเซรามิก PZT ที่มีขนาด ≈ 600 ไมครอน (d_{33} ของวัสดุผสมที่ 50% PZT = 26 pC/N) และทำการเตรียมชิ้นงานที่มีความหนาไม่น้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร



รูป 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกต่อปริมาณ PZT ของวัสดุผสม PZT-PC



รูป 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกกับขนาดอนุภาคของวัสดุผสมที่มีเซรามิก PZT ที่ 50%

4.4.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

รูป 4.14 และ 4.15 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้ากับความถี่และค่าเฟสกับความถี่ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล electromechanical coupling coefficient (K_t) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$K_t^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_m}{f_n} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_n - f_m}{f_n}\right) \quad (3.13)$$

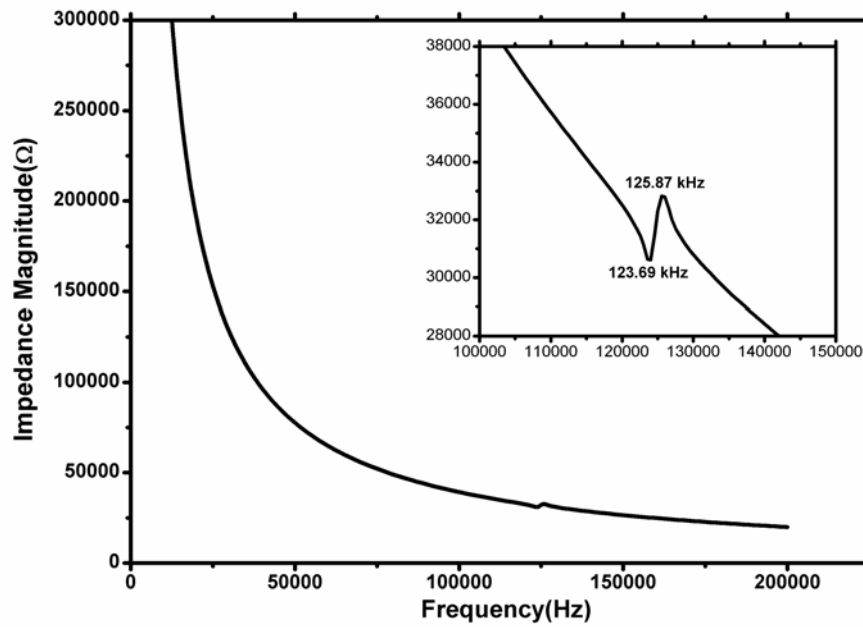
โดยค่า f_m และ f_n คือค่าความถี่ ณ ความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุด ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ที่ปริมาตรเซรามิก 50 % โดยปริมาตร หลังจากผ่านกระบวนการโพลที่อุณหภูมิ 130 °ซ ด้วยสนามไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ต่อ 1 มิลลิเมตร เป็นเวลา 45 นาที แสดงดังตาราง 4.3

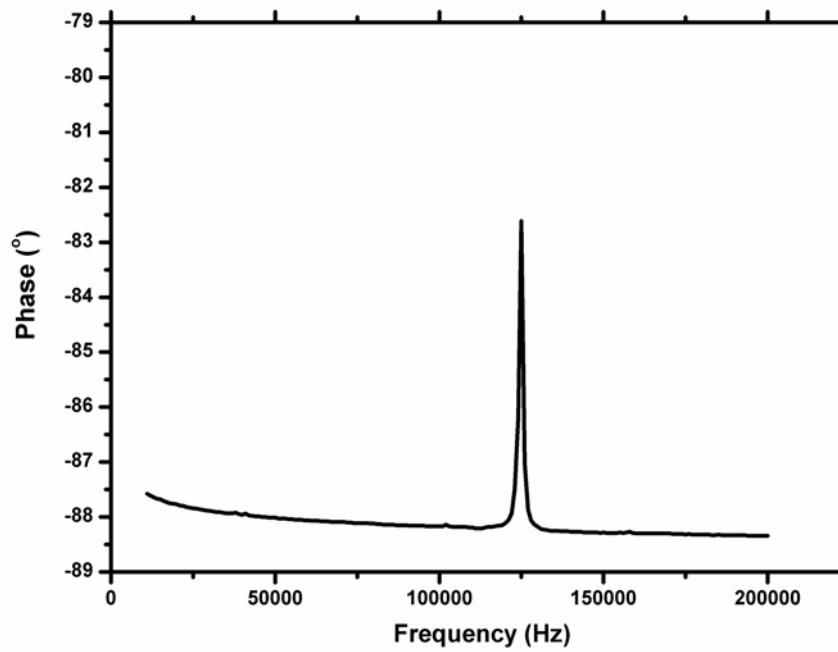
ตาราง 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

สารตัวอย่าง	อัตราส่วน PZT-PC	ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้า เชิงกล , K_t (%)
50%PZT	50:50	20.51

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล (K_t) ของวัสดุผสม PZT-PC มีค่า 20.51 % ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกลสูงกว่าของวัสดุผสม PZT-PC อื่นๆที่ผ่านมาในอดีตสำหรับ PZT ที่ปริมาตรเท่ากัน (ร้อยละ 50) นอกจากนี้ ค่า K_t นี้มีค่ามากกว่า 15% ซึ่งหมายความว่ามีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลและเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ดีและสามารถที่จะนำไปใช้งานได้จริง



รูป 4.14 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้ากับความถี่ของวัสดุผสมที่มีเซรามิก PZT ที่ 50%



รูป 4.15 แสดงค่าเฟสกับความถี่ของวัสดุผสมที่มีเซรามิก PZT ที่ 50%

4.5 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกล ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

จากการเตรียมชิ้นงานโดยการอัดขึ้นรูป วัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ด้วยแรง 1 ตันในแบบทรงลูกบาศก์เพื่อให้มีขนาด 10x10x10 มิลลิเมตร และหลังจากนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการการเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์โดยการนำไปแช่ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบอ่างที่มีความชื้นเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 3 วัน เพื่อช่วยในการแข็งตัวของวัสดุผสมแล้ว จากนั้นจึงนำไปทดสอบกำลังอัดซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงผลดังตาราง 4.4

ตาราง 4.4 ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

สารตัวอย่าง	อัตราส่วน PZT-PC	ค่ากำลังอัด (MPa)
50%PZT	50:50	58.0

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่ากำลังอัดของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ที่ 50%PZT มีค่าเท่ากับ 58.0 MPa ซึ่งโดยปกติแล้วถือว่าเป็นค่าสูงและอยู่ในช่วงการใช้งานของคอนกรีตเนื่องจากมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ในตึกสูง ดังนั้นจึงสามารถที่จะทนแรงกดในกรณีที่น่าไปใช้งานจริงในโครงสร้างคอนกรีตของตึกสูง

4.6 ผลการตรวจสอบสมบัติความต้านทานเชิงซ้อนของเสียง (acoustic impedance) ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

ตาราง 4.5 ค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเสียงของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC

สารตัวอย่าง	อัตราส่วน PZT-PC	ค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเสียง (Mrayl)
50%PZT	50:50	10.03

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเสียงของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ที่ 50%PZT (ตาราง 4.5) มีค่าเท่ากับ 10.03 Mrayl ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเสียงของคอนกรีตที่ใช้ทั่วไป (10 Mrayl) ดังนั้นจึงสามารถที่จะนำไปใช้จับสัญญาณได้ดี

บทที่ 5

สรุปผลทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

- ค่าความหนาแน่น ของวัสดุผสม PZT-PC จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PZT ในระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมต่ำสุดและสูงสุดที่ปริมาณ PZT คือ 30 และ 90 % โดยปริมาตร เท่ากับ 2.71 และ 7.14 g/cm³
- เฟสของเซรามิก PZT กับ เฟสของ ปูน PC (cement matrix) แสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะกันและการผสมผสานที่ดี จากรูปถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่มีลักษณะคล้ายเส้นใยเล็กๆพันกันไปมา และ เอทาไนท์ (Ettringite) ที่มีลักษณะคล้ายแท่งเข็มล้อมรอบ PZT
- ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก(ϵ_r) ที่อุณหภูมิห้อง และความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์พบว่า มีค่าสูงขึ้นเมื่อมีปริมาตรเซรามิก PZT ในระบบเพิ่มขึ้น คือ ที่ปริมาณ PZT ในระบบเท่ากับ 30-90% โดยปริมาตร จะได้ค่า ϵ_r อยู่ในช่วง 108.09-536.28 ส่วนค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) พบว่ามีค่าลดลงเมื่อปริมาตรเซรามิก PZT เพิ่มขึ้น
- ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC หลังจากผ่านกระบวนการโพลาไรซ์ที่อุณหภูมิ 130 °ซ ด้วยสนามไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ต่อ 1 มิลลิเมตร เป็นเวลา 45 นาที พบว่า ค่าที่ได้มีค่าสูงขึ้นตามปริมาตรเซรามิก PZT ที่เพิ่มขึ้นคือ ที่ปริมาตรเซรามิก PZT ในระบบเท่ากับ 30-90% ได้ค่า d_{33} อยู่ในช่วง 18-87 pC/N ตามลำดับ
- ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์คูลอมบ์ไฟฟ้าเชิงกล ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ที่ปริมาตรเซรามิก 50 % โดยปริมาตร หลังจากผ่านกระบวนการโพลาไรซ์ที่อุณหภูมิ 130 °ซ ด้วยสนามไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ต่อ 1 มิลลิเมตร เป็นเวลา 45 นาที พบว่าค่าสัมประสิทธิ์คูลอมบ์ไฟฟ้าเชิงกล (K_p) ของวัสดุผสม PZT-PC มีค่า 20.51 % ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์คูลอมบ์ไฟฟ้าเชิงกลสูงกว่าของวัสดุผสม PZT-PC อื่นๆที่ผ่านมาในอดีตสำหรับ PZT ที่ปริมาตรเท่ากัน (ร้อยละ 50) นอกจากนี้ ค่า K_p นี้มีค่ามากกว่า 15% ซึ่งหมายความว่ามีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลและเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ดีและสามารถที่จะนำไปใช้งานได้จริง

- ค่ากำลังอัดของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ที่ 50%PZT มีค่าเท่ากับ 58.0 MPa ซึ่งโดยปกติแล้วถือว่าเป็นค่าสูงและอยู่ในช่วงการใช้งานของคอนกรีตเนื่องจากมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ในตึกสูง ดังนั้นจึงสามารถที่จะทนแรงกดในกรณีที่น่าไปใช้งานจริงในโครงสร้างคอนกรีตของตึกสูง
- จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเสียงของวัสดุผสมแบบ 0-3 ในระบบ PZT-PC ที่ 50%PZT มีค่าเท่ากับ 10.03 Mrayl ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเสียงของคอนกรีตที่ใช้ทั่วไป (10 Mrayl) ดังนั้นจึงสามารถที่จะนำไปใช้จับสัญญาณได้ดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยที่ได้พบว่ายังมีประเด็นปัญหาและข้อสงสัยที่น่าสนใจอีกมากมายที่ต้องการการศึกษาเพิ่มเติมอย่างละเอียด โดยเฉพาะความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆที่เป็นแนวทางในการนำไปสู่การพัฒนาวัสดุผสมพีโซอิเล็กทริกให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เช่น

1. การศึกษาถึงแบบการผสมอื่นๆนอกเหนือจากการผสมแบบ 0-3 เช่น 1-3 2-2 หรือ 3-3 เป็นต้น ว่ามีผลต่อสมบัติต่างหรือไม่อย่างไร
2. ควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของระยะเวลาต่อค่าของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก หลังจากผ่านการโพลแล้วในเชิงลึกหลังจากการโพลแล้ว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Li, Z., Zhang, D and Wu, K. Cement-Based 0-3 piezoelectric composites. *J. Am. Ceram. Soc.*2002; 85 : 305-13
- [2] Huang, S., Chang, J., Xu, R., Liu, F., Lu, L., Ye, Z and Cheng, X. Piezoelectric properties of 0-3 PZT/sulfoaluminate cement composites. *Smart Mater. Struct.* 2004;13 : 270-274.
- [3] Li, Z., Dong, B., Zhang, D. Influence of polarization on properties of 0–3 cement-based PZT composites. *Cement & Concrete Compo.* 2005; 27 : 27-32.
- [4] Dong, B., Li, Z. Cement-based piezoelectric ceramic smart composites. *Compo Sci and Tech*,2005; 65 :1363-1371.
- [5] Huang, S., Chang, J., Lu, L., Liu, F., Ye, F and Cheng, X. Preparation and polarization of 0-3 cement based Piezoelectric composites. *Mat Res Bull.* 2006; 41: 291-297.
- [6] Haertling, G.H. Ferroelectric Ceramics : History and Technology. *J. Am. Ceram. Soc.*1999; 82 : 797-818.
- [7] Moulson, A. J. and Herbert. J. M. "*Electroceramics: Materials –Properties-Application*" 2nd ed. Chapman and Hall., London, pp.135-402, 1990.
- [8] Safari A., Panda R.K. and Janas V.F., Ferroelectric ceramics: Processing, properties and application, *Appl. Ferro. Ceram. Mater.*, 2000, 1-47.

- [9] <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~psuvanch/101-49-2-Celect.pdf>
(10 March 2007).
- [10] Xu, Y. *Ferroelectric Material and Their Applications*. Los Angeles : NORTH-HOLLAND., 1991.
- [11] Bhalla, A.S., Guo, R and Roy, R. The perovskite structure-a review of its role in ceramic science and technology. *Mat Res Innovat.* 2000; 4 : 3-26.
- [12] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตฺร, Concrete Technology, CPAC, พิมพ์ครั้งที่ 4, พ.ศ. 2540.
- [13] Mindess S. and Young J.F., Concrete, 1981.
- [14] Lea's, Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edition, Butterworth, 1998.
- [15] ปริญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปูนซีเมนต์, ปอชโซลาน และ คอนกรีต, , สมาคมคอนกรีตไทย, พ.ศ. 2547
- [16] Neville A.M., Properties of concrete, Fourth edition, Longman Publishing, 1995.
- [17] Sa-Gong, G., Safari, A., Jang, S.J. and Newnham, R.E. Poling Flexible Piezoelectric composites. *Ferro Let.* 1986; 5 :131-142.

OUTPUTS (ผลงานตีพิมพ์)

สัญญาเลขที่ MRG4880031

โครงการ การพัฒนาวัสดุผสมใหม่มาใช้งานโครงสร้าง

ชื่อหัวหน้าโครงการ อ.ดร.อานนท์ ชัยพานิช

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

- 1 **Chaipanich A.**, Jaitanong N. and Tunkasiri T., Fabrication and properties of PZT-ordinary Portland cement composites, Mater. Lett., In press (Impact factor=1.299). *ภาคผนวก 1*
- 2 **Chaipanich A.**, Effect of PZT particle size on dielectric and piezoelectric properties of PZT-cement composites, Curr. Appl. Phys., 2007, 7 (5), 574-577 (Impact factor=1.00).
ภาคผนวก 2
- 3 **Chaipanich A.**, Dielectric and Piezoelectric Properties of PZT-Cement Composites, Curr. Appl. Phys., 2007, 7 (5), 532-536 (Impact factor=1.00). *ภาคผนวก 3*
- 4 **Chaipanich A.**, Dielectric and Piezoelectric Properties of PZT-Silica Fume Cement Composites, Curr. Appl. Phys., 2007, 7 (5), 537-539 (Impact factor=1.00). *ภาคผนวก 4*
- 5 **Chaipanich A.** and Tunkasiri T., Microstructure and Properties of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ -Portland Cement Composites, Curr. Appl. Phys., 2007, 7, 285-288 (Impact factor=1.00). *ภาคผนวก 5*
- 6 **Chaipanich A.** and Tunkasiri T., Effect of milling time on the properties of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ceramics using the starting precursors PbO and MgNb_2O_6 , Curr. Appl. Phys., 2007, 7, 281-284 (Impact factor=1.00) *ภาคผนวก 6*
- 7 **Chaipanich A.** and Jaitanong N., Effect of age on the piezoelectric coefficient of 0.6PZT-0.4Cement Composite, Curr. Appl. Phys., Submitted (Impact factor=1.00). *ภาคผนวก 7*
- 8 Jaitanong N., **Chaipanich A.** and Tunkasiri T., Properties of 0-3 PZT-Portland Cement Composites, Ceram. Int., Submitted (Impact factor=0.702). *ภาคผนวก 8*
- 9 **Chaipanich A.**, Jaitanong N. and Tunkasiri T., Effect of curing time on the dielectric properties of PZT-Portland Cement Composites, Ceram. Int., Submitted (Impact factor=0.702). *ภาคผนวก 9*

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ

1. Jaitanong N., **Chaipanich A.** and Tunkasiri T., Dielectric Properties of PMN-BNT ceramics, KMITL Science Journal, 2006, Vol. 6, No.1, pp. 25-29. *ภาคผนวก 10*
2. Nochaiya T., **Chaipanich A.**, Singjai P. and Tunkasiri T., Effect of 3 M HNO₃ on Carbon Nanotubes as detected by XRD, KMITL Science Journal, 2006, Vol. 6, No.1, pp. 25-29.
ภาคผนวก 11
3. **Chaipanich A.** Utilization of Industrial By-products as Cement Replacement Materials in Thailand, Chiang Mai University Journal, Special issue on nanotechnology, November 2005, Vol.4, pp.125-128. *ภาคผนวก 12*
4. **Chaipanich A.** Silica Fume: Its Role in Cement and Concrete Technology, Chiang Mai University Journal, Special issue on nanotechnology, November 2005, Vol.4, pp.121-124.
ภาคผนวก 13
5. **Chaipanich A.** and Tunkasiri T., Effect of Particle Size of Starting Powders on the Properties of Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ Ceramics, Chiang Mai Journal of Science, September 2005, Vol. 32 No.3, pp.315-321. *ภาคผนวก 14*

ผลงานที่เสนอในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. **Chaipanich A.** and Jaitanong N., Effect of age on the piezoelectric coefficient of 0.6PZT-0.4Cement Composite after polarization, AMN3 3rd International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology, 11-16 February 2007, Wellington, New Zealand.

ภาคผนวก 15

2. Jaitanong N., **Chaipanich A.** and Tunkasiri T., Properties of 0-3 PZT-Portland Cement Composites, Asian Meeting on Electroceramics (AMEC5), 10-14 December, 2006, Central Plaza Hotel, Bangkok *ภาคผนวก 16*

3. **Chaipanich A.**, Jaitanong N. and Tunkasiri T., Effect of curing time on the dielectric properties of PZT-Portland Cement Composites, Asian Meeting on Electroceramics (AMEC5), 10-14 December, 2006, Central Plaza Hotel, Bangkok *ภาคผนวก 17*

4. **Chaipanich A.** and Tunkasiri T., Ferroelectric $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$: effects of $(\text{MgCO}_3)_4\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$ and milling time, Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology, Marina Mandarin Hotel, Singapore, 25-28 June 2006, Singapore.

ภาคผนวก 18

5. Jaitanong N., **Chaipanich A.** and Tunkasiri T., Dielectric Properties of PMN-BNT ceramics, KMITL International Conference on Science and Applied Science, 8-10 March 2006, Swissotel Le Concorde, Bangkok. *ภาคผนวก 19*

Expert Commentary (Invitation)

1. Chaipanich A., Cementing the Future: A review of past, present and future use of cement and its combination with piezoelectric PZT ceramic, Nova Science Publisher, In preparation to be published. *ภาคผนวก 20*