



การปรับปรุงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก  
ที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น  
Improvement in Piezoelectric Properties of Piezoelectric  
Composite Materials with Natural Rubber Matrix

สุกัญญา สมะดอเลาะห์  
Sukanya Samadoloh

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Science in Materials Science  
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การปรับปรุงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก  
ที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น  
Improvement in Piezoelectric Properties of Piezoelectric  
Composite Materials with Natural Rubber Matrix

สุกัญญา สมะดอเลาะห์  
Sukanya Samadoloh

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Science in Materials Science  
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติ  
เป็นเนื้อพูน

ผู้เขียน นางสาว สุกัญญา สมะดอเลื้อย

สาขาวิชา วัสดุศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมธี พรหมสวัสดิ์)

.....ประธานกรรมการ  
(ดร.ชลธิรา แสงสุบั่น)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โกวิท เลิศวิทยานนท์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เมธี พรหมสวัสดิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดำรงค์ศักดิ์ ฟ้ารุ่งสว่าง)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เมธี พรหมสวัสดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ .....

(นางสาวสุกัญญา สมะดอเล้าะ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....

(นางสาวสุกัญญา สมะดอเสีอะ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น
ผู้เขียน	นางสาวสุกัญญา สมะตอเล้าะ
สาขา	วัสดุศาสตร์
ปีการศึกษา	2562

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติ (NR) เป็นเนื้อพื้นและมีสารเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไททานเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์ (PMNT) ปริมาณ 100 phr ในรูปของผง (NR/100PMNT) และก้อนเซรามิกเป็นเฟสกระจายตัวผงซิลิกาปริมาณ 15 20 25 และ 30 phr ถูกเติมลงในวัสดุผสม จากการตรวจสอบวัสดุผสมที่มีผงเซรามิกเป็นเฟสกระจายตัวพบว่า วัสดุผสมมีปริมาณรพุนลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละการยืดตัวก่อนขาดลดลง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นเป็น 15 phr อย่างไรก็ตาม ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นเป็น 20-25 phr แม้กระนั้นก็ตาม ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อปริมาณซิลิกาเท่ากับ 30 phr ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณการเติมซิลิกา สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมแย่งเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัสดุผสมสร้างขึ้นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 28 โวลต์ต่อจูล ซึ่งพบในวัสดุที่มีซิลิกาเท่ากับ 15 phr

เซรามิก PMNT ที่เตรียมได้มีความหนาแน่นจริงเท่ากับ 7.51 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีขนาดเกรนอยู่ในช่วง 4-5 ไมครอน มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่วัด ณ อุณหภูมิห้องที่ความถี่ไฟฟ้า 200 กิโลเฮิรตซ์ เท่ากับ 2,134 และ 0.033 ตามลำดับ มีค่าโพลาไรเซชันคงค้าง สนามไฟฟ้าลบล้าง สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและสัมประสิทธิ์ความต่างเพียโซอิเล็กทริกเท่ากับ 26.38 ไมโครคูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตร 7.54 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร 383 พิโคคูลอมป์ต่อนิวตัน และ  $20.41 \times 10^{-3}$  โวลต์·เมตรต่อนิวตัน ตามลำดับ จากการตรวจสอบวัสดุผสมที่ฝังก้อนเซรามิกระหว่างแผ่นวัสดุผสม NR/100PMNT พบว่า ค่าความต่างไฟฟ้าที่วัสดุสร้างขึ้นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 35 โวลต์ต่อจูล ซึ่งพบในวัสดุผสมที่ใช้แผ่น NR/100PMNT ที่เติมผงซิลิกาปริมาณ 20 phr ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า วัสดุผสม NR/100PMNT ที่เติมผงซิลิกาปริมาณ 15 phr มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจวัดที่ยืดหยุ่นได้ (flexible sensor) ในขณะที่วัสดุผสมที่ฝังก้อนเซรามิก PMNT ระหว่างแผ่นวัสดุผสม NR/100PMNT ที่เติมผงซิลิกา 20 phr มีความเหมาะสมในการนำไปพัฒนาเป็นพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานได้ ซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางพาราได้

**Thesis Title** Improvement in piezoelectric properties of piezoelectric composite materials with natural rubber matrix  
**Author** Miss Sukanya Samadoloh  
**Major Program** Materials Science  
**Academic Year** 2019

### ABSTRACT

This work aims to study the improvement of piezoelectric properties of piezoelectric composite materials with natural rubber (NR) as a matrix phase and 100 phr lead magnesium niobate titanate doped with zinc oxide (PMNT) in the forms of ceramic powder (NR/100PMNT) and bulk as dispersed phases. Different amounts (15, 20, 25 and 30 phr) of silica powders were added into composites. From characterizing the composite with PMNT powders, a porosity decreased with increasing silica added content resulting in an increasing trend of tensile strength while a percent elongation decreased. Dielectric constant ( $\epsilon_r$ ) increased as silica concentration increased up to 15 phr. However,  $\epsilon_r$  was suppressed when the silica content was 20-25 phr. The  $\epsilon_r$  increased again when the content reached 30 phr. Dielectric loss ( $\tan\delta$ ) was not depended on silica content. Ferroelectric properties of composites were degraded when silica concentration increased. Output voltage generated reached a maximum value of 28 V/J which was found in the composite with 15 phr silica.

The prepared PMNT ceramic had the true density of 7.51 g/cm<sup>3</sup> and the grain size ranging from 4 to 5  $\mu\text{m}$ . It possessed  $\epsilon_r$  and  $\tan\delta$  values measured at 200 kHz and at room temperature of 2134 and 0.033, respectively. The values of remnant polarization, coercive field, piezoelectric coefficient, and piezoelectric voltage coefficient of 26.38  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 7.54 kV/cm, 383 pC/N and  $20.41 \times 10^{-3} \text{V}\cdot\text{m}/\text{N}$ , respectively. From characterizing composites in which bulk PMNT ceramics were embedded between NR/100PMNT composite sheets, the generated output voltage reached the maximum value of 35 V/J which was found in the composite with the sheets containing 20 phr silica. The all obtained result indicates that the NR/100PMNT composite with 15 phr silica is suitable for using as flexible sensors while the bulk ceramics embedded-composite with 20 phr silica is applicable for improving to apply in energy harvesting floors which partially helps to add value to natural rubber.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากบุคลากรหลายท่านและจากหลายหน่วยงานขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ดังนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เมธิ พรหมสวัสดิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ อย่างด้วยความเมตตาและเอาใจใส่แก่ผู้วิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์อย่างดี และได้ให้ความกรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ชลธิรา แสงสุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณีและ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โกวิท เลิศวิทยานนท์ ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ นางสาวนุสนา แหละหมั่น ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการ วท. 305 ทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายสุดนี้ ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาตลอดจนจบการศึกษา

สุกัญญา สมะต่อเถาะ



## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	5
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	6
กิตติกรรมประกาศ	7
สารบัญ	8
สารบัญตาราง	12
สารบัญรูป	13
สัญลักษณ์คำย่อแลตัวย่อ	17
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 การตรวจเอกสาร	4
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	11
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ	13
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี</b>	
2.1 สารเพียโซอิเล็กทริก	14
2.1.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	14
2.1.2 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก	18
2.1.3 คัปปลิงแฟกเตอร์	18
2.1.4 การค้นพบเฟอร์โรอิเล็กทริก	19
2.2 วัสดุไดอิเล็กทริก	20
2.2.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	20
2.2.2 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก	21
2.2.3 ความคงทนไดอิเล็กทริก	22
2.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก	22
2.3 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก	23
2.4 การประยุกต์ใช้ของวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงาน	25
2.5 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์	28
2.6 วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งแบบดั้งเดิม	31
2.7 การเผาแคลไซน์	32
2.8 การเผาผืนึก	33

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.8.1 การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น	33
2.8.2 การซินเตอร์ช่วงกลาง	33
2.8.3 การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย	33
2.9 การบดย่อย	35
2.10 กระบวนการโพลิง	36
2.11 วัสดุผสม	37
2.11.1 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค	38
2.11.2 วัสดุผสมเม็ดผง หรืออนุภาคขนาดใหญ่	39
2.11.3 เฟสเนื้อพื้น	41
2.12 ยางธรรมชาติ	42
2.12.1 โครงสร้างทางเคมีและสมบัติของยางธรรมชาติ	42
2.12.2 สารตัวเติมในยาง	43
2.12.3 สารทำให้ยางคงรูป	43
2.12.4 สารตัวเร่งปฏิกิริยา	44
2.12.5 สารกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา	44
2.12.6 สารป้องกันยางเสื่อม	45
2.12.7 สารตัวเติม	45
2.13 การผสมยางกับสารเคมี	46
2.13.1 เครื่องผสมยางระบบเปิด	46
2.13.2 เครื่องผสมยางระบบปิด	47
<b>บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย</b>	
3.1 สารเคมี	51
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	52
3.3 วิธีการทดลอง	53
3.3.1 รายละเอียดการทดลอง	53
3.3.2 การเตรียมผงแมกนีเซียมไนโอเบต	55
3.3.3 การเตรียมผงเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์	56
3.3.4 วิธีการขึ้นรูปวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก	57

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.3.4.1 การเตรียมวัสดุผสมผง NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	57
3.3.4.2 การเตรียมวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	59
3.4 การตรวจสอบชิ้นงาน	62
3.4.1 การตรวจสอบผงเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์	62
3.4.2 การตรวจสอบเซรามิก PMNT/ZnO	63
3.4.2.1 การตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิก	63
3.4.2.2 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	64
3.4.2.3 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก	65
3.4.2.4 การตรวจสอบสมบัติเฟอร์โร	66
3.4.2.5 การตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริก	66
3.4.3 การตรวจสอบวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	68
3.4.3.1 การตรวจสอบสมบัติเชิงกล	68
3.4.3.2 ตรวจสอบสมบัติไฟฟ้า	69
3.4.4 การตรวจสอบสัญญาณวิทยาและองค์ประกอบทางเคมี	70
3.4.4.1 การเตรียมเซรามิก PMNT/ZnO	70
3.4.4.2 การเตรียมวัสดุผสมผง NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	71
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง</b>	
4.1 ผลการเตรียมเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์	72
4.1.1 ผลการตรวจสอบเฟสของชิ้นงานเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์	72
4.1.2 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์	74
4.1.3 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์	75
4.1.4 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์	76
4.1.5 ผลการตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตเติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์	77
4.2 ผลการทดลองการเตรียมวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	78

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.2.1 ผลของการเติมผงซิลิกาต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	78
4.2.2 ผลของการเติม SiO <sub>2</sub> ต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	81
4.2.3 ผลของการเติมผงซิลิกาต่อสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	83
4.2.4 ผลของการเติมผงซิลิกาต่อโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	84
4.2.5 ผลของการเติมผงซิลิกาต่อโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	86
4.3 ผลการทดสอบความต่างศักย์ไฟฟ้าวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	99
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย</b>	
5.1 สรุปผลการทดลอง	101
5.2 ข้อเสนอแนะ	102
<b>บรรณานุกรม</b>	103
<b>ภาคผนวก ก</b>	106
<b>ภาคผนวก ข</b>	112
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	121

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก การสูญเสียไดอิเล็กทริก ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดปิดวงจร และการคำนวณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม NR/PMNT	8
1.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ปริมาณของวัสดุผสมที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพูน	9
1.3 แสดงอัตราส่วนผสมของผงเซรามิก PMNT/ZnO	11
1.4 แสดงอัตราส่วนของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกมิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไททานตที่แต่งเติมด้วยซิงค์ออกไซด์ผสมกับยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อพูนที่ปริมาณซิลิกา 15 20 25 และ 30 phr	11
2.1 ลำดับเหตุการณ์ที่สำคัญในการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	24
2.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องมือเก็บเกี่ยวพลังงานเฉื่อย	26
3.1 แสดงอัตราส่วนของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกมิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไททานตที่แต่งเติมด้วยซิงค์ออกไซด์ผสมกับยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อพูนที่ปริมาณซิลิกา 15 20 25 และ 30 phr	58
4.1 แสดงค่าสมบัติไดอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริก และเพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงานเซรามิก PMNT/ZnO	77
4.2 ความเค้นเชิงดึง ร้อยละการยืดตัวก่อนขาดและความทนทานต่อแรงฉีกขาดของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	78
4.3 สมบัติไดอิเล็กทริกวัดที่อุณหภูมิ 25 °C ที่ความถี่ต่าง ๆ ของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	81
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปล่อยมากับวัสดุผสม NR/100PMNT ที่ปริมาณ SiO <sub>2</sub> เท่ากับ 0 15 20 25 และ 30 phr	85
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความแข็งของวัสดุผสม NR/100PMNT ที่ปริมาณ SiO <sub>2</sub> ที่ 0 15 20 25 และ 30 phr	88
4.6 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัสดุผสมเซรามิก NR/PMNT ที่ปริมาณ SiO <sub>2</sub> ที่ 0 15 20 25 และ 30 phr	100

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพตัวอย่างวัสดุผสมแบบผงเซรามิก PMNT/ZnO/SiO <sub>2</sub> เป็นเฟสกระจายตัวในเนื้อพื้นยางธรรมชาติ	12
1.2 ชิ้นงานเซรามิก PMNT/ZnO ที่ถูกติดด้วยแผ่นโลหะทองแดง	12
1.3 วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub> ขึ้นรูปพร้อมกับแผ่นเซรามิก (PMNT/ZnO)	13
2.1 ปฏิกิริยาการ Piezoelectricity (a คือ แบบตรง, b คือ แบบย้อนกลับ)	14
2.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแรงกดเป็นพลังงานไฟฟ้า	15
2.3 ปฏิกิริยาการเพียโซอิเล็กทริกแบบตรง (ซ้าย) และแบบผกผันกลับ (ขวา)	15
2.4 โครงสร้างอะตอมของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (ABO <sub>3</sub> )	16
2.5 โครงสร้าง Cubic เมื่อได้รับแรงกระทำในแนวแกน Z จะยืดหดตัว	16
2.6 การใส่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกลงในสัณฐานแท่งเพื่อเก็บพลังงาน	17
2.7 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก d <sub>33</sub>	18
2.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก a) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก b) ขึ้นกับอุณหภูมิของเซรามิก CdCu <sub>3</sub> Ti <sub>4</sub> O <sub>12</sub> ที่ความถี่ 100 kHz	21
2.9 ผลของความถี่ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ และค่าการสูญเสียความร้อน	22
2.10 ความหนาแน่นและขนาดเกรนที่ส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก	23
2.11 เฟสไดอะแกรมของสารในระบบ PbZrO <sub>3</sub> - PbTiO <sub>3</sub>	25
2.12 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์	29
2.13 ภาพตัดขวางของหน่วยเซลล์เพอโรฟสไกต์ในอุดมคติ (ABO <sub>3</sub> ) ในระนาบ (100) และ (200)	29
2.14 การเกิดโพลาไรเซชันในหน่วยเซลล์เนื่องจากการเลื่อนตำแหน่งของไอออน Ti <sup>4+</sup> ในผลึกเพอโรฟสไกต์ของ BaTiO <sub>3</sub>	30
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของไอออน Ti <sup>4+</sup> ในผลึกเพอโรฟสไกต์ของ BaTiO <sub>3</sub> กับพลังงาน	31
2.16 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดด้วยลูกบอล	32
2.17 การเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	32
2.18 พัฒนาการของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง	34
2.19 รูปแบบการเผาซินเตอร์แบบ Conventional sintering และ Two- step sintering	32
2.20 การเคลื่อนที่ของลูกบดและสารภายในหม้อบด	36
2.21 ทิศทางของการโพลาไรเซชันในเซรามิกส์ทั้งก่อน (unpoled) (A) และหลัง (poled) (B) ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายนอก	37
2.22 ภาพวาดแสดงอนุภาคของเฟสที่กระจายในเนื้อวัสดุในรูปทรง	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 การแบ่งประเภทของวัสดุผสม	38
2.24 วัสดุผสมเม็ดผงอนุภาคขนาดใหญ่	39
2.25 มอดูลัสความยืดหยุ่นต่อปริมาณทั้งสแตนวัสดุเนื้อพื้นทองแดง เสริมแรงด้วยอนุภาคทั้งสแตนโดยมีขอบเขตบนและขอบเขตล่าง	40
2.26 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทริกตรอนแสดงอนุภาคเม็ดกลมของผงถ่านคาร์บอนใช้เสริมแรงในยางรถยนต์สังเคราะห์	41
2.27 ลักษณะโครงสร้างของยางธรรมชาติ	42
2.28 เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง	47
2.29 เครื่องผสมยางระบบปิด	47
2.30 การผสมสารเคมีเข้าไปในยาง	49
2.31 ขั้นตอนการผสมยางและสารเคมี	50
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองโดยสรุป	55
3.2 การให้ความร้อนในการเผาแคลไซน์ผงแมกนีเซียมไนโอเบต	55
3.3 แผนผังแสดงการเตรียมผงแมกนีเซียมไนโอเบต	55
3.4 แผนผังแสดงการเตรียมผงเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์-ออกไซด์	56
3.5 การให้ความร้อนในการเผาแคลไซน์	56
3.6 ภาพตัวอย่างผงเซรามิกเป็นเฟสกระจายตัว NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	58
3.7 แผนผังแสดงเตรียมวัสดุผสมแบบผงเซรามิก PMNT/ZnO/SiO <sub>2</sub> เป็นเฟสกระจายตัวในเนื้อพื้นยางธรรมชาติ	59
3.8 การให้ความร้อนในการเผาซินเตอร์เซรามิก PMNT/ZnO	60
3.9 ตัวอย่างวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/ZnO ที่ไม่เติม SiO <sub>2</sub>	60
3.10 แผนผังแสดงเตรียมวัสดุผสมพื้นที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น	61
3.11 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	62
3.12 หลักการทำงานของ Bragg's law	63
3.13 อุปกรณ์สำหรับการหาความหนาแน่นโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส	63
3.14 แผนผังแสดงการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า	64
3.15 การทากาวเงินของชิ้นงานเซรามิก PMNT/ZnO	64
3.16 เครื่อง LCR meter	65
3.17 เครื่องวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยอาศัยวงจร Sawyer-Tower	66
3.18 การโพลิงของชิ้นงานเซรามิก PMNT/ZnO	67
3.19 เครื่องวัดสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 เครื่องทดสอบแรงดึง	68
3.21 ลักษณะการทากาวเงินลงบนผิวชิ้นงาน	69
3.22 การทดสอบวัดการกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีการให้แรงกระทำ	70
3.23 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	71
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PMNT ที่แต่งเติมด้วยซิงค์ออกไซด์	73
4.2 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์	73
4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าของเซรามิก PMNT/ZnO ที่กำลังขยาย (a) 1500 (b) 3000 (c) 5000	74
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 10 100 และ 200 kHz ของเซรามิก PMNT/ZnO	75
4.5 วงวนฮิสเทอรีซิสที่วัดที่อุณหภูมิ 25 °C และที่ความถี่ 25 Hz ของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์	76
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเชิงดึงกับปริมาณ SiO <sub>2</sub> ของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	79
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยึดตัวก่อนขาดกับปริมาณ SiO <sub>2</sub> ของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	79
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณการเติม SiO <sub>2</sub> ที่ 0 15 20 25 และ 30 phr	80
4.9 แสดงภาพตัวอย่างวัสดุผสมแบบผงเซรามิก PMNT/ZnO/SiO <sub>2</sub> เป็นเฟสกระจายตัวในเนื้อพียานธรรมชาติ	80
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และการสูญเสียไดอิเล็กทริก (tanδ) กับปริมาณ SiO <sub>2</sub> ของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	82
4.11 วงวนฮิสเทอรีซิสวัดที่อุณหภูมิ 25 °C ที่ความถี่ 50 Hz ของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	83
4.12 แสดงภาพตัวอย่างวัสดุผสมผงเซรามิก NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub> ใช้ทดสอบความต่างศักย์ไฟฟ้า	84
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปล่อยมากับวัสดุผสม NR/100PMNT ที่ปริมาณการเติม SiO <sub>2</sub> ที่ 0 15 20 25 และ 30 phr	85
4.14 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของวัสดุผสมที่ปริมาณ SiO <sub>2</sub>	87



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุผสมผง NR/100PMNT ที่ปริมาณการเติม SiO <sub>2</sub> ที่ 0 15 20 25 และ 30 phr	88
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของวัสดุผสมผง NR/100PMNT ที่ปริมาณการเติม SiO <sub>2</sub> ที่ 0 15 20 25 และ 30 phr	89
4.17 การกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT	90
4.18 ปริมาณการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT	91
4.19 การกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/15SiO <sub>2</sub>	92
4.20 ปริมาณการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/15SiO <sub>2</sub>	93
4.21 การกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/20SiO <sub>2</sub>	94
4.22 ปริมาณการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/20SiO <sub>2</sub>	95
4.23 การกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/25SiO <sub>2</sub>	96
4.24 ปริมาณการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/25SiO <sub>2</sub>	97
4.25 การกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/30SiO <sub>2</sub>	98
4.26 ปริมาณการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/30SiO <sub>2</sub>	99
4.27 แสดงตัวอย่างวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/SiO <sub>2</sub>	100
4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัสดุผสมสร้างขึ้นกับเซรามิกและแผ่นยาง NR/PMNT	100

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

ZnO	zinc oxide
SiO <sub>2</sub>	silicon dioxide
PbO	lead(II) oxide
TiO <sub>2</sub>	titanium dioxide
MgO	magnesium oxide
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	niobium oxide
MN	magnesium niobate
PMNT	lead magnesium niobate titanate
$\epsilon_r$	dielectric constant
$\epsilon_0$	permittivity of free space
$E_c$	coercive field
$P_r$	remnant polarization
$d_{33}$	piezoelectric coefficient
MPB	morphotropic phase boundary
$\tan \delta$	dielectric loss
$g_{33}$	piezoelectric voltage coefficient
NR (STR 5L)	standard thai rubber 5L
MBTS	dibenzthiazyl disulphid
BHT	butylated hydroxytoluene

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานหลักทั่วโลกมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ สวนทางกับอัตราการใช้พลังงานของโลกที่มีอัตราสูงขึ้น โดยน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นพลังงานที่ใช้มากที่สุดเป็นอันดับหนึ่ง อันดับที่สองคือก๊าซธรรมชาติ และรองลงมาถ่านหิน กระทรวงพลังงานประเทศสหรัฐอเมริกาคาดการณ์ว่า ในปี พ.ศ. 2563 ทั่วโลกจะมีอัตราการใช้น้ำมันอยู่ที่ร้อยละ 37 ก๊าซธรรมชาติร้อยละ 27 ถ่านหินร้อยละ 25 พลังงานหมุนเวียนร้อยละ 8 และพลังงานนิวเคลียร์ร้อยละ 3 หากโลกยังคงมีการใช้พลังงานฟอสซิลในอัตราที่สูงเช่นในปัจจุบัน ไม่มีการค้นหาแหล่งผลิตพลังงานเพิ่มเติม เราจะมีน้ำมันใช้ได้อีกประมาณ 30 ปี ก๊าซธรรมชาติ 50 ปี ถ่านหินประมาณ 200 ปี จะส่งผลกระทบต่อคนทั้งโลก พลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและถือเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะแก้ไขวิกฤตพลังงาน [1]

การใช้ไฟฟ้าของประเทศไทยปี 2560 มีการใช้ไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 185,124 กิกะวัตต์ ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 1.2 โดยปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในเกือบทุกสาขา ยกเว้นองค์กรที่ไม่แสวงหากำไรที่มีการใช้ไฟฟ้าลดลงร้อยละ 1.7 ทั้งนี้ ภาคเกษตรกรรมมีอัตราความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงสุด โดยความต้องการใช้ไฟฟ้าสำหรับสูบน้ำเพื่อการเกษตรเพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 11.6 สอดคล้องกับการขยายตัวของดัชนีผลผลิตสินค้าเกษตรกรรมส่วนภาคอุตสาหกรรมซึ่งมีส่วนการใช้ไฟฟ้าสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 47.4 ของการใช้ทั้งหมด มีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.0 เมื่อเทียบกับปีก่อน เกิดจากความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในกลุ่มอุตสาหกรรมหลักสำคัญ อาทิ อาหาร เหล็ก และโลหะพื้นฐานอิเล็กทรอนิกส์ ยางและผลิตภัณฑ์ยาง [2]

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น สามารถแก้ไขได้โดยการหันมาใช้พลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนไหวและการสั่นสะเทือน เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นความสำคัญของพลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนไหวและการสั่นสะเทือน (vibration and motion energy) การที่จะนำพลังงานดังกล่าวมาใช้จะต้องอาศัยระบบการเก็บเกี่ยวพลังงาน (energy harvesting system) เช่น การเก็บเกี่ยวพลังงานการไหลหรือการตกของน้ำด้วยกังหันน้ำ พลังงานดังกล่าวมาขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่าง ๆ ถ้าเราไม่เก็บเกี่ยวพลังงานดังกล่าวซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติ พลังงานเหล่านี้ก็อาจจะสูญหายไปโดยเปล่าประโยชน์ การเคลื่อนไหวของมนุษย์ก็จัดว่าเป็นแหล่งพลังงานซึ่งสามารถเก็บเกี่ยวได้เช่นกัน การเดินเป็นกิจกรรมหนึ่งซึ่งใช้และให้พลังงานมากเมื่อเทียบกับกิจกรรมในการใช้อวัยวะอื่นๆ หรือแม้แต่การสัณฐานของมนุษย์ก็ยังสามารถทำให้เกิดพลังงานได้ [3]

ปัจจุบันนักวิจัยจากประเทศต่างๆ พยายามศึกษาและค้นคว้าด้านพลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือกกันอย่างมากมาย และมีทางเลือกพลังงานใหม่ๆ ออกมาให้เราได้เห็นรวมถึง ทดลองใช้กันเป็นระยะๆ ซึ่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในขณะนี้คือ การนำแรงสั่นสะเทือน หรือ ที่เรียกกันว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก” (Piezoelectric Effect) มาใช้ในการสร้างพลังงาน กำลังได้รับการพัฒนาให้สามารถสร้างพลังงานได้จริงอย่างแพร่หลาย และสามารถนำไปใช้งานได้ ในหลายรูปแบบ ทั้งนี้เพราะปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกสามารถสร้างพลังงานและปลดปล่อยพลังงาน ไฟฟ้าออกมาได้ โดยใช้กลไกสร้างพลังงานจากพลังงานจลน์ที่เกิดจากการสั่นสะเทือน ดังนั้นทุก กิจกรรมที่มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นก็สามารถสร้างพลังงานได้ [4]

วิศวกรจากสถาบันเทคโนโลยีระดับนาโน ประเทศอิสราเอล ได้นำหลักการ สั่นสะเทือนหรือปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกที่เกิดจากการวิ่งผ่านของรถไปบนท้องถนนมาผลิต พลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งจากการวิจัยพบว่าหากนำเอาวัสดุประเภทเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ได้แก่ ผลึกแก้วควอตซ์และเซรามิก มาวางเรียงกันใต้ผิวยางมะตอยให้คอยทำหน้าที่ รับแรงสั่นสะเทือนจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถยนต์ แล้วนำไปแปรเปลี่ยนให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้ เนื่องจากวัสดุประเภทเพียโซอิเล็กทริกจัดเป็นสารจำพวกผลึกกลุ่มที่ไม่สมมาตรกันมีคุณสมบัติสามารถ เปลี่ยนพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ เมื่อมีแรงหรือความดันมากระทำ แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะ ได้รับแรงดึงเครียดทางกลศาสตร์ (Mechanical Stress) และให้กระแสไฟฟ้าออกมา ซึ่งจากการ ทดลองใช้ผลึกแก้วควอตซ์ หรือ Piezoelectric Crystals มาเรียงไว้ใต้พื้นถนนให้รถวิ่งผ่าน พบว่า ถนนความยาว 1 กิโลเมตร ขนาด 4 ช่องจราจร สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึง 400 กิโลวัตต์ ที่สำคัญ การใช้ผลึกแก้วควอตซ์ติดตั้งลงไปบนถนนนี้ไม่จำเป็นต้องขุดเจาะถนนใหม่ แต่สามารถติดตั้งได้ใน ระหว่างการซ่อมแซมถนนปกติจึงเป็นการผลิตพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจและยังเป็นมิตรต่อ สิ่งแวดล้อมด้วย [4]

Yang และคณะ ได้ศึกษาการประเมินพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวของ ร่างกายที่แตกต่างกันภายใต้สมมติฐานที่แตกต่างกัน เช่น การพิมพ์นิ้ว (~ 19 มิลลิวัตต์) การหายใจ (~1 วัตต์) ยกแขน (60 วัตต์) และเดิน (67 วัตต์) แสดงพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวของ มนุษย์ที่แตกต่างกันสำหรับผู้เก็บเกี่ยวพลังงานท่ามกลางการเคลื่อนไหวร่างกายทั้งหมดเดินเป็นหนึ่งใน การเคลื่อนไหวที่พบมากที่สุดและใช้พลังงานมาก ในปี 2011 Riemer และ Shapiro วิเคราะห์การใช้ พลังงานโดยใช้กล้ามเนื้อในแต่ละข้อหรือส่วนของร่างกายในระหว่างการเดิน พวกเขาคิดว่าคน 80 กิโลกรัมเดินอยู่ที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ โดยเฉลี่ยสามารถใช้พลังงานได้มากกว่า 1 จูล สามารถเก็บเกี่ยวได้ ในแต่ละขั้นตอนซึ่งหมายความว่าพลังงานมากกว่า 1 วัตต์ใช้ในการเก็บเกี่ยว เมื่อไม่นานมานี้ Partridge และคณะ สันนิษฐานว่ามีการโง่งองเท้า 10 มิลลิเมตร ขณะเดินและประเมินว่าพลังงานที่ เก็บเกี่ยวได้จากรองเท้าคือ 6.6 จูล/ก้าว บนพื้นดิน 7.47 จูล/ก้าว ขณะลงบันไดและ 3.12 จูล/ก้าว ในขณะที่เดินทางขึ้นขั้นบันได [4]

ซง หลิน วัง (Zhong Lin Wang) นักนาโนเทคโนโลยีแห่งสถาบันเทคโนโลยีจอร์เจีย ค้นพบวิธีสร้างกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยจากการกระตุ้นสายไฟนาโนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasound) จะสามารถเปลี่ยนการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นไปเป็นพลังงานได้โดยใช้ตัวตรวจจับขนาด เล็กที่ติดตั้งไว้ในสิ่งแวดล้อมหรือแม้แต่ในตัวของผู้คนก็ได้ ทำให้เขามองไปถึงการสร้างแหล่งพลังงาน

ระดับนาโนโดยเขาได้คิดค้นสายไฟนาโนที่ทำมาจากซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก หรือปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าออกมาได้เมื่อสายไฟนาโนเกิดการโค้งงอ เขาและทีมงานได้สร้างเครือข่ายของสายไฟนาโนขึ้นในสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และวางแผ่นอิเล็กโทรดซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นลูกฟูกเหนือสารกึ่งตัวนำนั้น แล้วปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasound) เข้าไป คลื่นเสียงจะผ่านเครื่องมือไปทำให้แผ่นอิเล็กโทรดเกิดการเคลื่อนที่ไปมา ทำให้สายไฟนาโนเกิดการโค้งงอได้และเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นมา ประจุไฟฟ้าที่ได้จะถูกส่งถ่ายไปยังชั้นผิวโลหะของแผ่นอิเล็กโทรด และส่วนที่เรียกว่า *voilà* ซึ่งเป็นแถวสายไฟนาโนจำนวน 500 เส้น เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดนาโนแอมแปร์ออกมา นำอิเล็กโทรดฝังเข้าไปในแผ่นพลาสติก PVDF ที่หนาเพียง 25 ไมโครเมตรแล้วหยดน้ำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1-5 มิลลิเมตร ลงไปบนแผ่นพลาสติก เมื่อน้ำกระทบแผ่นพลาสติกจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและเกิดเป็นประจุอิเล็กโทรดขึ้น ประจุที่ได้จะนำไปใช้เป็นพลังงานต่อไป [4]

ดังที่กล่าวมาข้างต้นจึงทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่สามารถแปลงพลังงานการสั่นสะเทือนในทุกรูปแบบ อาทิเช่น การสั่นของพื้นพิภพ การเคลื่อนไหวของมนุษย์ ตลอดจนพลังงานการสั่นสะเทือนจากการสัญจรของยานพาหนะ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อนำไปป้อนให้แก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป การแปลงพลังงานการสั่นสะเทือนจำเป็นต้องอาศัยวัสดุที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ จึงสนใจวัสดุประเภทเพียโซอิเล็กทริกสารในกลุ่ม เลดเซอโคเนตไททานเนต (PMNT) ที่ปริมาณ  $x$  เท่ากับ 0.35 ดังสมการ  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.65}Ti_{0.35}O_3$  (PMNT) เนื่องจากที่ปริมาณนี้อยู่ในช่วงบริเวณรอยต่อเฟส (morphotropic phase boundary หรือ MPB) เป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนเฟสจากรอมโบฮีดรอลไปเป็นเตตระโกนอลทำให้ช่วงนี้มีสมบัติไฟฟ้าที่ดีเหมาะแก่การนำมาใช้งานเป็นวัสดุสำหรับแปลงพลังงานการสั่นสะเทือน [5] แต่อย่างไรก็ตามเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก PMNT ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน เนื่องจากเซรามิกมีความแข็งเปราะ การจะนำไปใช้งานภายใต้แรงทางกล อาจทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก ผู้วิจัยจึงแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการนำวัสดุ PMNT มาเตรียมเป็นวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น เนื่องจากเมื่อทำการเตรียมเป็นวัสดุผสมที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น จะทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทนต่อการแตกหักมากขึ้น เนื่องจากยางมีความยืดหยุ่นสูง มีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูง และสามารถรับแรงกระแทกได้ดี ช่วยลดการแตกหักของเซรามิกได้ และเพื่อช่วยแก้ปัญหาทางพาราลันตลาดซึ่งสอดคล้องกับภาคใต้ของประเทศไทยมีการปลูกยางเป็นจำนวนมาก ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ยางธรรมชาติสำหรับเป็นเนื้อพื้น [6]

งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษาระบบเซรามิก PMNT ที่แต่งเติมด้วย ZnO (PMNT/ZnO) ซึ่งเป็นเฟสกระจายตัวในเนื้อพื้นยางธรรมชาติ โดยจะทำการเติม PMNT ในปริมาณ 0 60 80 100 120 และ 150 phr ผลการทดลองพบว่า วัสดุผสมที่เติม PMNT/ZnO ในปริมาณ 100 phr สามารถสร้างความต่างศักย์ได้มากที่สุด ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นเซนเซอร์แรงทางกลและพัฒนาต่อเป็นอุปกรณ์แปลงพลังงาน [7]

ทางผู้วิจัยศึกษาการเติม  $SiO_2$  เข้าไปปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุผสมเนื่องจาก  $SiO_2$  เป็นหนึ่งในสารตัวเติม (Filler) ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงต้านทานต่อแรงดึง แรงฉีกขาดจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลของซิลิกา มีความเป็นขั้วค่อนข้างสูง และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 3.9 และยังช่วยส่งผ่านแรงไปยังเฟสเพียโซอิเล็กทริกได้ ทำให้สามารถสร้างศักย์ไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงโดยการเตรียมวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่

มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น โดยวัสดุผสม PMNT สองรูปแบบด้วยกัน คือ 1) แบบผงเซรามิก PMNT/ZnO ซึ่งเป็นเฟสกระจายตัวในเนื้อพื้นยางธรรมชาติ โดยจะทำการเติม PMNT/ZnO ในปริมาณ 100 phr ในปริมาณซิลิกาที่แตกต่างกันที่คือ 15 20 25 และ 30 phr (NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>) 2) เซรามิก PMNT/ZnO กับ วัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ปริมาณ SiO<sub>2</sub> เท่ากับ 15 20 25 และ 30 phr ทำการศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติไฟฟ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อปรับปรุงและเตรียมวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้นที่มีปริมาณเซรามิก PMNT 100 phr (NR/100PMNT) โดยมี 2 เงื่อนไข ดังนี้

1.1) วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้นที่เติมแต่งด้วย SiO<sub>2</sub> ที่ปริมาณ 15 20 25 และ 30 phr (NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>)

1.2) วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ตามเงื่อนไขที่ 1.1 ขึ้นรูปพร้อมกับแผ่นเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์ (PMNT/ZnO)

2) เพื่อตรวจสอบ เฟส โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก

3) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณ SiO<sub>2</sub> และสมบัติต่างๆ ของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก

4) เพื่อผลิตต้นแบบอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าได้

## 1.3 การตรวจเอกสาร

งานวิจัยของ Promsawat และคณะ ศึกษาการเกิดเฟส โครงสร้างจุลภาค สมบัติไดอิเล็กทริก และสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ของเซรามิก  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.65}Ti_{0.35}O_3$  (PMNT/xZnO) ที่มีการเติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 0 0.4 2.0 4.0 และ 11.0 ร้อยละโดยโมล ศึกษาการร่วมกันของเฟสรอมโบฮีดรอล และ เตตระโกนอล ที่อุณหภูมิห้อง โดยพบว่าเซรามิกมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 93–95 การเติม ZnO ในเซรามิก PMNT จะทำให้ขนาดเกรนเพิ่มขึ้นและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อ x เท่ากับ 0.4–4.0 ร้อยละโดยมวล และให้ค่าสูงสุดที่ 2.0 ร้อยละโดยมวล อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสระหว่างเฟสรอมโบฮีดรอล ไปเป็นเตตระโกนอลและอุณหภูมิคูรีจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน สำหรับสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ถูกปรับปรุงด้วยการเพิ่มขึ้นของ โพลาริเซชันคงค้าง (remanent polarization) และ สนามไฟฟ้าลบล้าง ( $E_c$ ) อย่างไรก็ตาม สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกจะลดลงที่ปริมาณ ZnO เท่ากับ 11.0 ร้อยละโดยมวล [8]

งานวิจัยของ Noheda และคณะ ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ซินโครตรอนที่ไม่มี การโพลิง ของตัวอย่างเซรามิก  $(1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3-xPbTiO_3$  (PMN-xPT) โดยฟังก์ชันของอุณหภูมิประมาณของสาร 30 ร้อยละโดยมวล น้อยกว่าเท่ากับ x น้อยกว่าเท่ากับ 39 ร้อยละโดยมวล ของระยะรอยต่อของเฟส (morphotropic phase boundary) ในขณะที่เกิดการแยกเฟสรอมโบฮีดรอลและเตตระโกนอลในเฟสไดอะแกรม การทดสอบแสดงให้เห็นลักษณะที่น่าสนใจ จะสังเกตเห็นรูปร่างที่ชัดเจนที่ระหว่างอุณหภูมิในเฟสคิวบิกและเตตระโกนอล (cubic and tetragonal phases)

ตามลำดับ ตรงกันข้ามกับลักษณะที่กว้างของเฟส จะพบที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าตรวจลักษณะเฉพาะซึ่งเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับเฟสโมโนคลินิก (monoclinic phase) ของ  $M_c$ -type การศึกษาก่อนหน้าโดย Kiat และคณะ Singh และ Pandey สามารถอธิบายโครงสร้างที่มีความหลากหลายมาอยู่ร่วมกัน โดยมีองค์ประกอบหลักของ  $M_c$  การสังเคราะห์การเลี้ยวเบนของโครงสร้างที่เหมาะสมในการตรวจสอบเฟสไดอะแกรม PMN-xPT และกำหนดบริเวณที่คงที่ของเฟสโมโนคลินิก ในขณะที่กำลังขยายออก 20 k ที่ x เท่ากับ 31 ร้อยละโดยมวล ถึง x เท่ากับ 37 ร้อยละโดยมวล ของสารประกอบ สังเกตเห็นจุดที่เฟสมีพลังงานคงเหลืออยู่ระหว่างความหลากหลายของเฟส PMN-xPT ในขณะที่ภายในโครงสร้างมีความสัมพันธ์ของระบบ อาทิเช่น  $(1-2)\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{1/3})_{3-x}\text{PbTiO}_3$  จากการศึกษาแสดงให้เห็นความสอดคล้องที่ดีของ x เท่ากับ 33 ร้อยละโดยมวล โดย Xu และคณะ สังเกตเห็นโดเมนโมโนคลินิก โดยมีทิศของขั้วที่แตกต่างกันในระหว่างโดเมนรอมโบฮีดรอล ในโครงสร้างผลึกเดี่ยว [9]

งานวิจัยของ Feng และคณะ ได้มีการศึกษาเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$  (PMN-PNN-PZT) ที่มีการเจือร่วมกันของ  $\text{Zn}^{2+}$  และ  $\text{Li}^+$  โดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ  $\text{ZnO}/\text{Li}_2\text{O}$  (Z/L) มีการศึกษาผลของการเจือ  $\text{Zn}^{2+}$  และ  $\text{Li}^+$  ต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติเพียโซอิเล็กทริกและสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก จากศึกษาพบว่า การฟอร์มของเฟสเพอโรฟสไกต์บริสุทธิ์และโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนแปลงจากเตตระโกนอลไปเป็นรอมโบฮีดรอลที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก Z/L ที่แตกต่างกัน ทำให้อุณหภูมิคูรี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon$ ) ปัจจัยคู่ควบไฟฟ้าเชิงกลแบบระนาบ ( $k_p$ ) และค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก ( $d_{33}$ ) ลดลง แต่ค่าปัจจัยคุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor;  $Q_5$ ) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Z/L เปลี่ยนจาก 1:1 เป็น 1:8 อัตราส่วนน้ำหนักที่เหมาะสมคือ 1:1 ซึ่งจะมีค่า  $k_p$  และ  $d_{33}$  เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและต่อมาจะลดลง โดย ปัจจัยคู่ควบไฟฟ้าเชิงกลแบบระนาบ เท่ากับ 0.60 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก เท่ากับ 397 pC/N อุณหภูมิคูรี เท่ากับ 251 องศาเซลเซียส ปัจจัยคุณภาพเชิงกล เท่ากับ 150 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 2,628 และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก 0.0296 เมื่อเผาที่ 960 องศาเซลเซียส [10]

งานวิจัยของ Wongmaneeung และคณะ ศึกษาส่วนประกอบเซรามิกของการร่วมกันระหว่างเลดแมกนีเซียมไนโอเบต  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  และเลดไททาเนต  $\text{PbTiO}_3$  ผสมกัน โดยใช้เทคนิคสารตั้งต้นแมกนีเซียมไนโอเบต ( $\text{Mg}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ ) สมบัติทางไฟฟ้าโดยมีความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความถี่ในการตรวจสอบ ผลของเงื่อนไขในการซินเตอร์ ในการสร้างเฟส, ความหนาแน่น, โครงสร้างจุลภาคและสมบัติไฟฟ้าของการตรวจสอบเซรามิก การเพิ่มประสิทธิภาพของเงื่อนไขการซินเตอร์ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของเลดไททาเนตและเซรามิกที่ไม่มีไพโรคลอ PMN-PT สมบัติทางกายภาพค่อยๆเพิ่มขึ้นของเซรามิก อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ส่งผลต่อความหนาแน่นของเซรามิกจะค่อยๆเพิ่มขึ้นและเป็นเนื้อเดียวกันในโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของเลดไททาเนต สังเกตได้จากพฤติกรรมรีแลกเซอร์ซึ่งเกือบจะเป็นฮิสเทอรีซิสอิสระ อย่างไรก็ตามเลดไททาเนตสูงมีผลให้เกิดพฤติกรรมแบบเฟอร์โรอิเล็กทริกธรรมดา (normal ferroelectric) [11]

งานวิจัยของ Xiong และ Wang ศึกษาการพัฒนาตัวเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกแบบใหม่ (piezoelectric energy harvester - PEH) เพื่อใช้ประโยชน์สูงสุด ปริมาณพลังงานที่เสียโดยยานพาหนะบนทางหลวงสาธารณะได้อธิบายไว้ PEH ถูกออกแบบมาเพื่อแปลงพลังงานการ

เปลี่ยนรูปที่เกิดจากการเคลื่อนสัจจรทางเข้าไปเป็นพลังงานไฟฟ้าต้นแบบเก็บเกี่ยวพลังงาน ประกอบด้วย แผ่นเซรามิก PZT ปิดผนึกในชุดป้องกัน ได้รับการพัฒนาต้นแบบของ PEHs ได้รับการประดิษฐ์และติดตั้งบนทางเท้าจริงเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในเรื่องการประยุกต์ใช้งาน การผลิตไฟฟ้าของเครื่องเก็บเกี่ยวที่ติดตั้งได้รับการประเมินโดยการวัดเอาท์พุทแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นภายใต้การจราจรจริง คำนวณกำลังไฟฟ้าได้ทันทีและเฉลี่ยรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ การวิเคราะห์ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลผลิตทางไฟฟ้าของเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานมีความสัมพันธ์กับการกำหนดค่าเพลาและขนาดของยานพาหนะที่ผ่าน [12]

งานวิจัยของ Jasim และคณะ การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนารูปแบบของตัวแปลงสัญญาณ piezoelectric ด้วยรูปทรงเรขาคณิตที่ดีที่สุดนั้นคือเป้าหมายสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานในถนนภายใต้การบรรทุกยานพาหนะ ตัวแปลงสัญญาณ Bridge มีชั้นโพลิ่ง และ ออกแบบขั้วไฟฟ้า เพื่อเพิ่มพลังงาน การวิเคราะห์องค์ประกอบถูกจำกัด ได้ดำเนินการเพื่อคาดการณ์การส่งมอบผ่านพลังงานและความเค้นในตัวแปลงสัญญาณ การจำลองแบบมัลติฟิสิกส์ได้รับการดำเนินการเพื่อประเมินผลการผลิตพลังงานโดยใช้กลุ่มสารจำพวกเซอร์โคเนตไททาเนต วัสดุที่แตกต่างกันขนาดตัวแปลงสัญญาณและพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต การกำหนดค่าที่เหมาะสมของตัวแปลงสัญญาณเรขาคณิตได้รับการประเมินโดยคำนึงถึงความสมดุลระหว่างสมรรถนะการเก็บเกี่ยวพลังงานกับกลไกความล้มเหลว เนื่องจากความเข้มข้นของความเครียด การออกแบบใหม่ของตัวแปลงสัญญาณของสะพานด้วยชั้นการโพลิ่ง และขั้วไฟฟ้า ผลิตพลังงานได้มากกว่าสะพานแบบเดิมและตัวแปลงสัญญาณ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าภายใต้ความเค้นที่ปล่อยออกมาผ่านตัวแปลงสัญญาณสะพานมีกำลังไฟฟ้า 556 วัตต์ ซึ่งอาจส่งผลให้พลังงานที่มีศักย์ไฟฟ้าได้ 0.743 มิลลิจูล (วงจรถัด) สำหรับตัวแปลงสัญญาณแบบเดี่ยวภายใต้ความเค้นภายนอก 0.7 MPa การทดสอบในห้องปฏิบัติการเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานพบว่าผลการจำลองสอดคล้องกันกับกำลังที่วัดได้ [13]

งานวิจัยของ Wang และคณะ ศึกษาการผลิตไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก สำหรับทางเท้าเป็นเทคนิคการเก็บเกี่ยวพลังงานที่มั่นคงและมีประสิทธิภาพยังแสดงความท้าทายในหลายด้าน ในการศึกษาออกแบบและประเมินการเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์สร้างพลังงานที่มีขนาด 100 x 100 มม. สามารถใช้งานได้กำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด กำลังไฟฟ้ามี่ความสัมพันธ์เชิงบวกกับจำนวนเพียโซอิเล็กทริก ขนาดหน่วยการเก็บเกี่ยวพลังงานขนาดของโวลต์และความถี่ของการจราจร สูงสุดกำลังส่งที่กำลังรับน้ำหนัก 0.2 MPa และความถี่ในการให้โหลด 10 เฮิรตซ์ เท่ากับ 0.88 มิลลิวัตต์ และเหมาะสมที่สุดคือ 20 kΩ กำลังส่งสูงสุดที่ 0.7 MPa และ 15 เฮิรตซ์ สามารถโหลดได้สูงสุด 11.67 มิลลิวัตต์ และโหลดที่เหมาะสมที่สุดคือ 10 kΩ ต่อมาจะมีการทดสอบสมรรถนะเครื่องกลและการจำลอง (MTS) กับ 40,000 รอบต่อการให้โหลดและการเปลี่ยนรูปโดยสิ้นเชิงของอุปกรณ์สร้างพลังงานที่มีน้อยและผลิตไฟฟ้าของหน่วยการเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริก ยังคงมีเสถียรภาพ สุดท้ายพิจารณาเป็นแผนการวิจัยในอนาคต [14]

งานวิจัยของ Qian และคณะ ศึกษาเรื่องเท้าเก็บเกี่ยวพลังงานจำเป็นต้องตอบสนองทั้งฟังก์ชันทางเทคนิคและการประยุกต์ใช้งาน และไม่จำกัดการปลดปล่อยพลังงานและความทนทานใช้งานได้สะดวก รองเท้าเป็นกุญแจสำคัญที่สร้างความท้าทายในการออกแบบเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานจากรองเท้า บทความนี้นำเสนอการออกแบบการเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างแบบจำลองและการ



ทดสอบของเครื่องเพียโซอิเล็กทริกฝั่งตัวสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดินของมนุษย์ เป็นการขยายโครงสร้าง ได้รับการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งและขยายแรงจากสันเท้าตามแนวตั้งไปยังด้านในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกวางในแนวนอน ใช้แผ่นอลูมิเนียมทำเป็นรูปสันสูง 2 ชั้นรวมและถ่ายโอนแรงกลแบบไดนามิกจากการกระแทกของสันเท้าไปยังกรอบการขยายกำลังที่จัดในรูปแบบแซนวิช รูปแบบไดนามิกแรงที่ได้จากสันเท้ากระแทกจะวัดเพื่อออกแบบเพิ่มประสิทธิภาพและจำลองเครื่องเก็บเกี่ยวรองเท้าเพียโซอิเล็กทริก ค่าที่ได้จากแบบจำลองนำไปพัฒนาและตรวจสอบเพื่อให้สามารถคาดการณ์ได้อย่างแม่นยำ สองต้นแบบเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานแปดและหกจุดของการวางแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กำลังประดิษฐ์และทดสอบบนลู่วิ่งที่แตกต่างกันความเร็วในการเดินและความต้านทานภายนอก การจำลองเชิงตัวเลขสอดคล้องกับการทดลอง เครื่องเก็บเกี่ยวเพียโซอิเล็กทริก อย่างน้อยอาจผลิตพลังงานมากขึ้นที่ความเร็วในการเดินเดียวกันและความต้านทานที่สอดคล้องกับผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานจากรองเท้าที่มีแปดและหกจุด ตามลำดับมี 7 มิลลิวัตต์ / ก้าว และกำลังขับเคลื่อน 9 มิลลิวัตต์ / ก้าว ที่ความเร็วในการเดิน 3.0 ไมล์ต่อชั่วโมง (4.8 กม. / ชม.) ผลการจำลองจากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ผ่านการตรวจสอบแล้วพบว่าเครื่องเก็บเกี่ยวที่มีเพียโซอิเล็กทริกสี่จุดสามารถเก็บเกี่ยว 14 มิลลิวัตต์ / ก้าว และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 20 มิลลิวัตต์ / ก้าว ที่ 3.0 ไมล์ต่อชั่วโมง (4.8 กม. / ชม.) และ 3.5 ไมล์ต่อชั่วโมง (5.6 กม. / ชม.) ตามลำดับ [15]

งานวิจัยของ Hana และคณะ ศึกษาออกไซด์เพียโซอิเล็กทริก  $Pb_{1-x}La_x(Zr_yTi_{1-y})_{1-x/4}O_3$  (PLZT) ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และ  $Pb_{0.96}La_{0.04}(Zr_{0.54}Ti_{0.46})_{0.99}O_3$  / โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (คอมโพสิต  $0.9825O_3$ /PVDF (PL0.07ZT/PVDF) PL0.04ZT/PVDF)  $Pb_{0.92}La_{0.07}(Zr_{0.555}Ti_{0.445})$  ด้วยอนุภาคขนาดต่าง ๆ ที่บรรจุลงไปปริมาณ 50-90 vol.% ของเฟสเซรามิก เตรียมโดยกระบวนการกดร้อน พบว่า อุณหภูมิคูรี ( $T_c$ ) ของ PLZT ลดลง จาก 312 องศาเซลเซียส เป็น 98 องศาเซลเซียส เมื่อปริมาณ La เพิ่มขึ้นจาก 0.02 ถึง 0.09 การโพลาริเซชันของคอมโพสิต PLZT/PVDF เพิ่มจากร้อยละ 39.5 (PL<sub>0.04</sub>ZT/PVDF) ร้อยละ 56.7 (PL<sub>0.07</sub>ZT/PVDF) เมื่อโพลาริเซชัน ที่ 125 องศาเซลเซียส (บริเวณใกล้เคียงกับ  $T_c$  ของ PL0.07ZT) เป็นผล การปรับปรุงคุณสมบัติไฟฟ้ากับ  $d_{33}$  จาก 53 pC/N ( $T_c=159$  °C) ที่ 76 pC/N ( $T_c=222$  °C) พิสูจน์ว่า การปรับเปลี่ยน  $T_c$  ไปของเซรามิก ด้วยอุณหภูมิ poling เป็นวิธีที่ได้ผลเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของเซรามิต่อโพลีเมอร์คอมโพสิตและการตรวจสอบเพิ่มขึ้นสมบัติทางไฟฟ้าของ 0-3 PLZT/PVDF ทำให้มีขนาดอนุภาคและปริมาณสัมพันธ์ของ PLZT ที่เหมาะสม [16]

Samadloh และคณะ ศึกษาการสร้างและตรวจสอบวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก ยืดหยุ่นที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น ปริมาณที่แตกต่างของ  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.65}Ti_{0.35}O_3$  (PMNT) ที่ถูกเติมเข้าไปในยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อพื้น ส่งผลต่อรูพรุน ความทนต่อแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุผสมที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ PMNT เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุยางธรรมชาติพบว่าจะมีค่าอยู่ที่ 3.5 ทำให้ค่าเพิ่มขึ้นถึง 4.2 5.0 4.5 4.8 และ 5.1 เมื่อเติมผง PMNT ที่ 60 80 100 120 และ 150 อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเติม PMNT ในระบบวัสดุผสม NR / 100 PMNT แสดงคุณสมบัติที่ดีที่สุดของเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งแรงดันเอาท์พุท สมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ( $d_{33}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $g_{33}$ ) เท่ากับ  $1.61 V \cdot 2.1 \times 10^{-4} pC/N$  และ  $5.4 \times 10^{-6} V \cdot m/N$  ตามลำดับ วัสดุผสมนี้เป็นวัสดุที่มีแนวโน้มที่เหมาะสม

สำหรับการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเพียโซอิเล็กทริกในการใช้งานด้านการเก็บเกี่ยวพลังงาน ดังแสดงค่าในตารางที่ 1.1 [7]

**ตาราง 1.1** ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก การสูญเสียไดอิเล็กทริก ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิด ปิดวงจร และการคำนวณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสม NR/PMNT

PMNT content (phr)	$\epsilon_r^*$	$\tan\delta^*$	Output voltage (V)	$d_{33}$ (pC/N)	$g_{33}$ (V·m/N)
0	3.4	0.06	$0.24 \pm 0.02$	$0.2 \times 10^{-4}$	$8.0 \times 10^{-6}$
60	4.3	0.03	$0.89 \pm 0.07$	$1.1 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-6}$
80	5.1	0.04	$0.93 \pm 0.05$	$1.4 \times 10^{-4}$	$3.1 \times 10^{-6}$
100	4.6	0.05	$1.61 \pm 0.05$	$2.1 \times 10^{-4}$	$5.4 \times 10^{-6}$
120	4.9	0.03	$0.98 \pm 0.04$	$1.4 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-6}$
150	5.3	0.03	$0.71 \pm 0.03$	$1.1 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-6}$

\*วัดที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 200 kHz

งานวิจัยของ Salaeh และคณะ ศึกษาอิทธิพลของชนิดของยางและวัสดุเซรามิกต่อสมบัติทางกล สันฐานวิทยา และสมบัติไดอิเล็กทริกของยางธรรมชาติ (NR) โดยเติมวัสดุเพโรอิเล็กทริกสองประเภทคือ แบเรียมไททาเนต ( $BaTiO_3$ ) และเลดไททาเนต ( $PbTiO_3$ ) ที่ถูกเตรียมโดยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ด้วยการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผงเซรามิกถูกตรวจสอบเฟสโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ขนาดอนุภาคถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วัสดุผสมถูกเตรียมด้วยการหลอมผสมยางและผงด้วยเทคนิคแบบหลอมโดยใช้ยางธรรมชาติสองประเภท คือ ยางธรรมชาติพอกไซต์ (ENR) และ NR จากการศึกษพบว่า การรวมตัวกันของผงเซรามิกในเนื้อพื้ยางและการปรากฏตัวของวงแหวนอีพอกไซต์ในโมเลกุลของ ENR ก่อให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น แต่การยึดตัวเมื่อหยุด ซึ่งคือข้อเสียที่จะลดการเคลื่อนไหวของโครงสร้างในระดับโมเลกุลและการมีอันตรกิริยาที่สูงขึ้นระหว่างโมเลกุล ENR นอกจากนี้ผล SEM แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมที่ประกอบด้วย  $BaTiO_3$  แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับ  $PbTiO_3$  ทำให้สมบัติทางกลของวัสดุผสม  $BaTiO_3$  เหนือกว่า นอกจากนี้ยังมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่สูงในวัสดุผสม ENR/ $BaTiO_3$  [17]

งานวิจัยของ Tsai และคณะ ได้มีการคิดค้นและเตรียมวัสดุผสมฟิล์มเพียโซอิเล็กทริกยางและ การประยุกต์ใช้ใน heartbeat sensing ได้สำเร็จ สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากมนุษย์ โดยได้มุ่งเน้นถึง ความสามารถในการยืดหยุ่น (stretchability) และ ไฟฟ้าเชิงกล (electromechanical) ที่สูง ซึ่งช่องว่างภายในโครงสร้างของพอลิไดเมทิลซิลิโคน (polydimethylsiloxane (PDMS) ) จะถูกสอดด้วยไมโครมิเตอร์ ซึ่งจะตอบสนองและมีการส่งสัญญาณไฟฟ้าได้อย่างหลากหลาย วัสดุผสมมีความยืดหยุ่น (มีความยืดหยุ่นประมาณ 300 กิโลปาสคาล) และแสดงความเป็นเพียโซอิเล็กทริกที่ดี (ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก  $d_{33}$  สูงกว่า 1500 pC/N) ในตัวอย่าง การเต็นอย่างอิสระระบบการตรวจสอบการใช้เพียโซอิเล็กทริกโดยจะแสดงให้เห็น

เมื่อรวมกับ 12-a H ใส่กระเปาะอุปกรณ์พลังงานและเครื่องขยายเสียงเป็น 552 คิดเป็นนาโนพลังงาน พลังงานจากการเก็บเกี่ยวร่างกายมนุษย์จะถูกจัดเก็บและใช้ในการตรวจสอบการเต้นของหัวใจ มีพื้นที่ทำงาน 10 cm<sup>2</sup> และทำการให้แรง 10 กิโลกรัม คาดว่าค่าใช้จ่ายของ 0.1 C วงจรเพียโซอิเล็กทริกฟิล์ม นอกจากนี้การซ้อนกันหลายชั้นและเชื่อมต่อแบบขนานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง เช่น เพียโซอิเล็กทริกยางซึ่งฟังก์ชันทั้งยืดหยุ่นพลังงานเก็บเกี่ยวและเซ็นเซอร์ที่มีความไวสูงมีศักยภาพที่ดีที่สุดสำหรับการรับรู้ของมนุษย์และสวมใส่สามารถปลูกฝังทางสรีรวิทยาแบบได้ [18]

งานวิจัยของ George และคณะ ศึกษาวัสดุผสมยางธรรมชาติกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำ ถูกประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกมีประสิทธิภาพและวิธีการเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนซิลิกา (CS hybrid) ถูกเตรียมขึ้นเป็นครั้งแรกด้วยเทคนิคการใช้การอัลตราโซนิคส์ในการช่วยผสมสาร carboxylated (MWCNTs) และคอลลอยด์นาโนซิลิกา แสดงพันธะไฮโดรเจนที่เป็นไปได้ระหว่างกลุ่มคาร์บอกซิลบนผนังด้านข้างของท่อนาโนและกลุ่มซิลิลในการดูดซับของอนุภาคนาโนซิลิกาบนพื้นผิวของท่อนาโนและป้องกันการรวมตัวกันอีกครั้งของน้ำในหลอดวิธีการหล่อฟิล์มที่ใช้ในกรณีนี้ส่งผลให้วัสดุผสม NRCSF ประกอบกับโครงสร้างตาข่ายฟิลเลอร์กับ CS แยกออกจากกัน จากภาพ TEM และ SEM และการศึกษาวัสดุผสมพบว่าโครงสร้างตาข่ายของฟิลเลอร์ไฮบริดแยกออกจากกัน วัสดุผสมแสดงการปรับปรุงที่สำคัญในคุณสมบัติทางกลและความต้านทานตัวทำลาย การแยกกันของโครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติมช่วยให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง (417 ที่ 103 Hz) และการซึมผ่านไฟฟ้าที่ต่ำลง (0.80 vol%) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ตกแต่งท่อนาโนช่วยลดการสูญเสียไดอิเล็กทริกสำหรับวัสดุผสม การนำความร้อนสูงพร้อมกับการกระจายตัวที่ดีของไส้กรองไฮบริด CS ในโครงสร้างตาข่ายที่แยกออกจากกัน ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุผสม นาโนคอมโพสิตอีลาสโตเมอร์เหล่านี้มีค่าสัมประสิทธิ์ไฟฟ้าค่าคงที่สูงและการสูญเสียต่ำมีแนวโน้มนำมาใช้งานในด้านตัวขับเคลื่อนอีลาสโตเมอร์อิเล็กทริกดังแสดงค่าในตารางที่ 1.2 [19]

**ตาราง 1.2** ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น [19]

composites	f (vol%)	$\epsilon$	$\tan \delta$
NRCSF	5 phr (2.07vol%)	417(kHz)	1.6
	MWCNTR	8.5 (1MHz)	0.46
NR/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 phr (0.43 vol%)	133 (1kHz)	2.2
NR/MWCNT	5 phr (2.11 vol%)	4.9(1MHz)	0.28
		18.0(1kHz)	0.40
		6.5(1MHz)	0.17
NR/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60 wt%	171.6(500Hz)	-
NR/Barium ferrite	30 phr	7.0(100 kHz)	0.7
		6.0(1 MHz)	0.5
NR/conductive carbon black	10 vol%	500(1kHz)	3

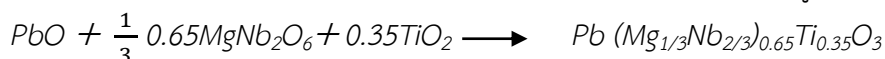
NR/Graphene	3 wt%	8.0(1kHz)	1.5
NR/Graphene	10 wt%	4.5(10 GHz)	2.5

งานวิจัยของ Tangudom และคณะ การศึกษาคุณลักษณะการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางที่เติมซิลิกาผสมระหว่างฟริซีพิเทตซิลิกาและซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยในยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์โดยสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาผสมถูกปรับปรุงผิวด้วยสารควบไซเลนชนิด Si69 ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยที่ 0 5 10 และ 15 phr ในยางที่เสริมแรงด้วยฟริซีพิเทตซิลิกาปริมาณ 20 phr โดยตรวจสอบสมบัติของสารประกอบยางทางด้านคุณลักษณะการคงรูป สมบัติเชิงกล (ความทนทานต่อแรงดึงและแรงฉีกขาด ความแข็งที่ผิว ความต้านทานต่อการขีดถู และความสามารถในการกระดอน) จากผลการทดสอบพบว่า การเติมซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยในสารประกอบยางธรรมชาติไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการคงรูป แต่กลับส่งผลต่อการลดลงของเวลาการคงรูปในสารประกอบยางที่มียางเอสปีอาร์เป็นส่วนผสม ผลต่างแรงบิดเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยในยาง ด้านความทนทานต่อแรงดึงและแรงฉีกขาด พบว่าการเติมซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยปริมาณเพิ่มขึ้นในยางธรรมชาติส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงและแรงฉีกขาดลดลง แต่ค่าความทนทานต่อแรงดึงและแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นในยางเอสปีอาร์แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเสริมแรงของซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยในยาง สำหรับค่าความแข็งที่ผิวเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยที่มากขึ้น โดยยางเอสปีอาร์ที่เติมซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยให้ค่าความแข็งมากที่สุด สำหรับความต้านทานต่อการขีดถูพบว่าเมื่อเติมซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยปริมาณมากขึ้นทำให้ปริมาณการสูญเสียเนื้อยางเพิ่มขึ้นโดยปริมาณการสูญเสียเนื้อยางธรรมชาติเกิดขึ้นน้อยสุดนอกจากนี้ความสามารถในการกระดอนของยางธรรมชาติยิ่งมากกว่ายางเอสปีอาร์ การกระดอนของยางมีแนวโน้มมากขึ้นตามปริมาณการเติมซิลิกาจากเถ้าชานอ้อย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับความหนาแน่นของพันธะข้ามในยาง [20]

#### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น โดยงานวิจัยจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กระบวนการ ดังแสดงต่อไปนี้

**1.4.1 ศึกษาการเตรียมวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้นที่เติมแต่งด้วย SiO<sub>2</sub> ที่ปริมาณ 15 20 25 และ 30 phr (วัสดุผสมผง NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>)**  
การเตรียมเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไททานเนตที่แต่งเติมด้วยซิงค์ออกไซด์ ดังสูตร



เติม ZnO 0.1 wt% โดยการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 1.3

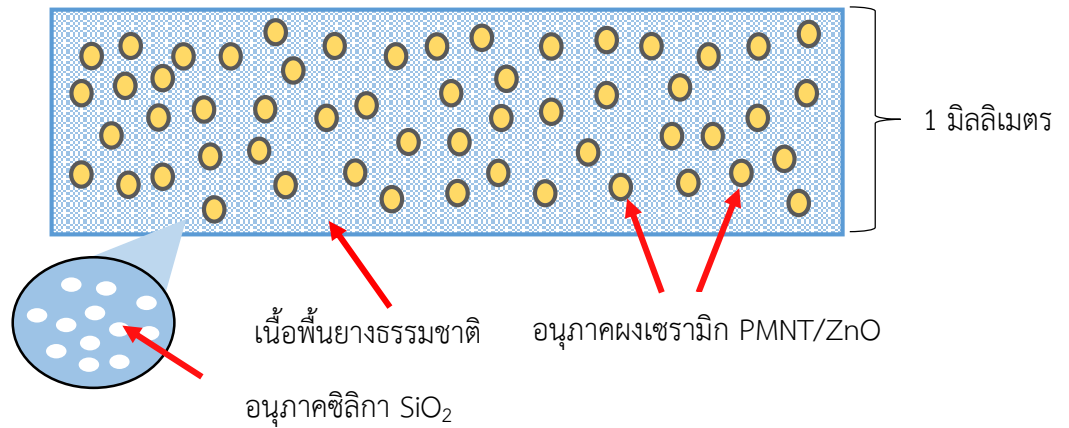
**ตาราง 1.3** แสดงอัตราส่วนผสมของผงเซรามิก PMNT/ZnO

ส่วนผสม (Ingredient)	อัตราส่วน (mole)	ปริมาณ (กรัม)
Lead(II) oxide (PbO)	1	70.2338
MgNb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	0.216	20.8703
Titanium Dioxide (TiO <sub>2</sub> )	0.35	8.7959
Zinc oxide (ZnO)	0.4	0.1

การเตรียมวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> โดยนำผงเซรามิก PMNT และ SiO<sub>2</sub> ผสมยางธรรมชาติตามอัตราส่วน ดังแสดงในตาราง 1.4 ทำการผสมด้วยเครื่องผสมยางแบบปิด เครื่องผสมยางสองลูกกลิ้งและเครื่องอัดเข้าทำการอัดยางเป็นแผ่นขนาด 20x20 cm<sup>2</sup> หนา 1 mm ดังแสดงตัวอย่างในรูป 1.1

**ตาราง 1.4** แสดงอัตราส่วนของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกแมกนีเซียมไนโอเบตไททานเนตที่แต่งเติมด้วยซิงค์ออกไซด์ผสมกับยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อพื้นที่ปริมาณซิลิกา 15 20 25 และ 30 phr

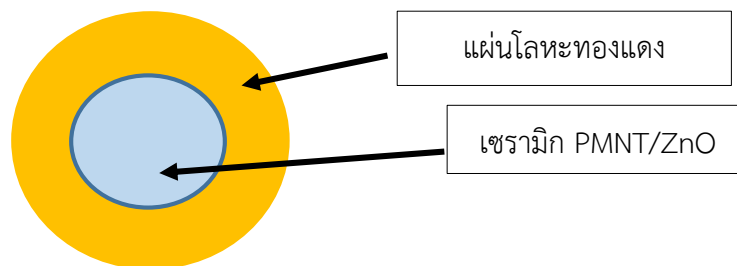
Ingredient	Quantity (phr)
NR	100
Zinc oxide	5
Stearic acid	1
PMNT	100 wt%
Silica	0, 15, 20, 25, 30
Dibenzthiazyl disulphid (MBTS)	1
Butylated hydroxytoluene (BHT)	1
Sulfur	2.5



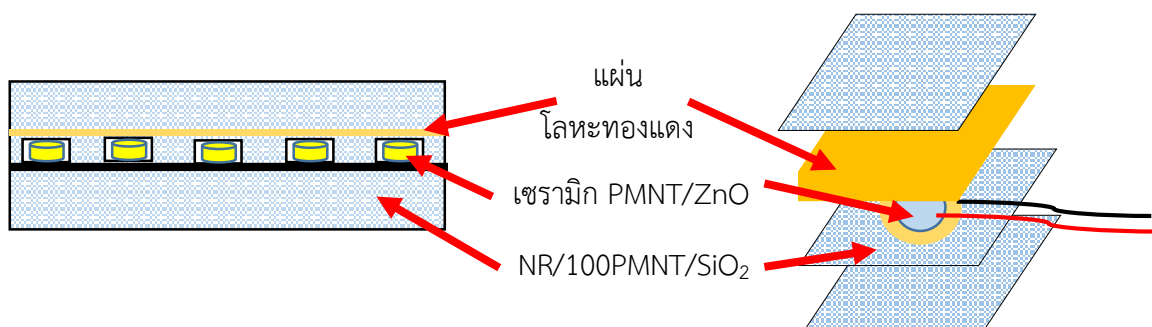
รูป 1.1 แสดงภาพตัวอย่างวัสดุผสมแบบผงเซรามิก PMNT/ZnO/SiO<sub>2</sub> เป็นเฟสกระจายตัวในเนื้อพื้นยางธรรมชาติ

1.4.2 ศึกษาการเตรียมวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ขึ้นรูปพร้อมกับเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์ (PMNT/ZnO) (วัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>)

การเตรียมวัสดุผสมในกระบวนการนี้จะนำวัสดุผสมจากเงื่อนไข 1.4.1 ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำการขึ้นรูปพร้อมกับเซรามิก PMNT/ZnO ที่ผ่านการอัดและเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,240 °C นำมาติดกับแผ่นโลหะทองแดงด้วยกาวอีพอกซี ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ประกอบวัสดุโดยการจัดเรียงเป็นชั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูป 1.2 แสดงชิ้นงานเซรามิก PMNT/ZnO ที่ถูกติดด้วยแผ่นโลหะทองแดง



รูป 1.3 วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ขึ้นรูปพร้อมกับแผ่นเซรามิก (PMNT/ZnO)

#### 1.4.3. การตรวจสอบชิ้นงาน

- 1) ตรวจสอบหนาแน่นด้วยเทคนิคอะคิมิติส
- 2) ตรวจสอบโครงสร้างผลึกและเฟสถูกตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer (XRD รุ่น X'Pert MPD)
- 3) ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM-5800 LV (SEM5800)
- 4) ตรวจสอบสมบัติทางกล โดยการทดสอบ tensile testing ด้วยเครื่อง Univesal testing machine (UTM)
- 5) ตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LCR meter รุ่น E4980A ที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ 50, 100 และ 200 KHz
- 6) ตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริกด้วยเครื่อง d<sub>33</sub> Meter รุ่น YE2730A
- 7) ตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริกด้วยวงจรวางจร Sawyer-Tower
- 8) ตรวจสอบความต่างศักย์ไฟฟ้า ทดสอบโดยการปล่อยลูกตุ้มลงบนชิ้นงาน วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาด้วยเครื่อง PicoScope (Pico technology, ประเทศอเมริกา)

#### 1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

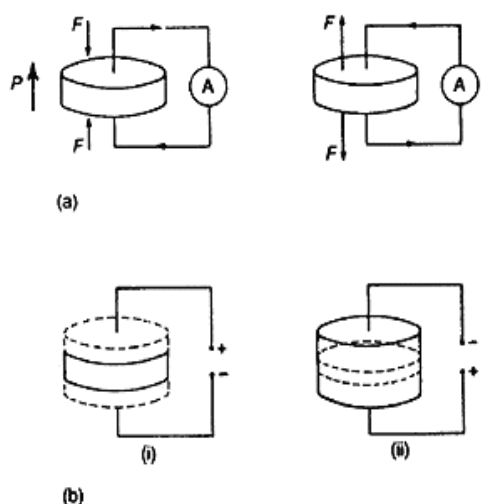
- 1) ทำให้ทราบถึงกระบวนการเตรียมวัสดุเพียโซอิเล็กทริก Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)<sub>0.65</sub>Ti<sub>0.35</sub>O<sub>3</sub> ที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์
- 2) ทำให้สามารถรู้และเข้าใจถึงหลักการและทฤษฎีของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้อย่างถูกต้องสามารถวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองได้อย่างถูกต้อง
- 3) สามารถเตรียมวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้นได้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในอนาคต
- 4) สามารถผลิตพื้นเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้นที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 สารเพียโซอิเล็กทริก

นักฟิสิกส์ศาสตร์ได้แบ่งโครงสร้างผลึกออกเป็น 7 ระบบ โดยโครงสร้างผลึกสามารถแบ่งเป็น 32 กลุ่ม ผลึกทั้ง 32 กลุ่มสามารถจัดหมวดหมู่ได้เป็นผลึกที่มีศูนย์กลางสมมาตร 11 กลุ่ม และผลึกที่ไม่มีศูนย์กลางสมมาตรจำนวน 21 กลุ่ม โดยในจำนวน 21 กลุ่มนี้มีผลึกถึง 20 กลุ่มที่สามารถแสดงปรากฏการณ์ทางเพียโซอิเล็กทริกได้ โดยปรากฏการณ์ Piezoelectricity เกิดเพราะความไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางของผลึกเซลล์ เมื่อมีแรงกดจะทำให้ไดโพลเกิดขึ้น เป็นผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น และในทางกลับกันเมื่อมีแรงดึงจะทำให้ไดโพลเกิดขึ้น เป็นผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นเช่นกัน [21] ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูป 2.1 แสดงปรากฏการณ์ Piezoelectricity (a คือ แบบตรง, b คือ แบบย้อนกลับ) [21]

##### 2.1.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

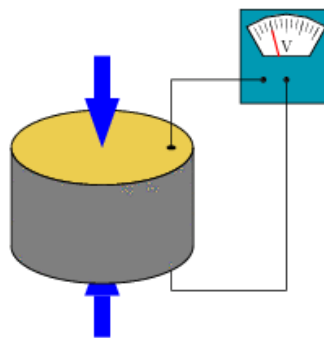
วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric material) เซรามิกประเภทหนึ่งที่มีสมบัติพิเศษ กล่าวคือ เมื่อได้รับแรงกลให้แรงดันไฟฟ้าที่เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) ทางกลับกันเมื่อวัสดุได้รับแรงดันไฟฟ้าทำให้มีการเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) เกิดแรงกล เรียกว่า ปรากฏการณ์อินเวอร์สเพียโซอิเล็กทริก (inverse piezoelectric effect) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การเปลี่ยนไปมาระหว่างพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้าสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

สมบัติเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดขึ้นได้ในวัสดุที่มีสภาพเป็นขั้วทางไฟฟ้าเท่านั้น มีทั้งในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์โดยวัสดุที่พบในธรรมชาติได้แก่ แร่ควอตซ์, แร่ทัวร์มาลีน ส่วนวัสดุ



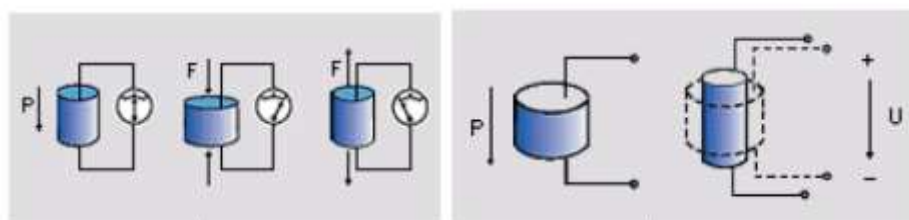
สังเคราะห์ได้แก่ เลตเซอร์โคเนียมไททาเนต (Lead zirconia titanate) ซึ่งนิยมเรียกว่า เลตไททาเนต เซอร์โคเนต (Lead titanatezirconate ; PZT) และแบเรียมไททาเนต (Barium titanate)

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ประโยชน์จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีหลายอย่างด้วยกัน ขึ้นกับปรากฏการณ์การการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างเช่น ในกรณีที่มีการป้อนแรงดันให้วัสดุทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือเกิดแรงกลสามารถนำมาใช้เป็นทรานสดิวเซอร์ในอุปกรณ์อัลตราโซนิก (Ultrasonic) ใช้ทางการแพทย์ ลำโพง แอกชูเอเตอร์ (Actuator) วาล์วไฮดรอลิก (hydraulic valve) เป็นต้น และในกรณีให้แรงแก่วัสดุทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถใช้เป็นอุปกรณ์จุดแก๊ส (gas igniter) ในเตาเครื่องทำความร้อน ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) ใช้เป็นตัวตรวจจับความดัน (pressure sensor) เป็นต้น [22]

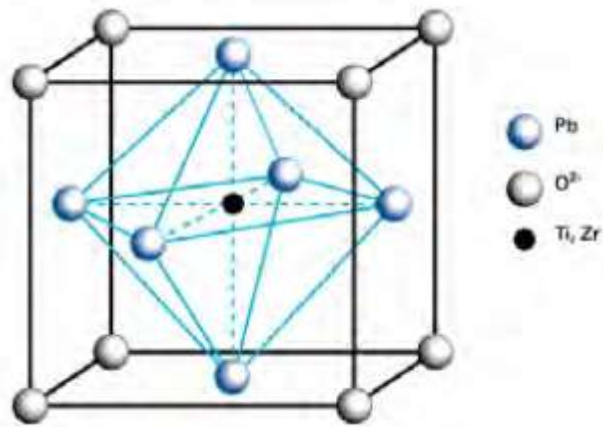


รูป 2.2 แสดงวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแรงกดเป็นพลังงานไฟฟ้า [22]

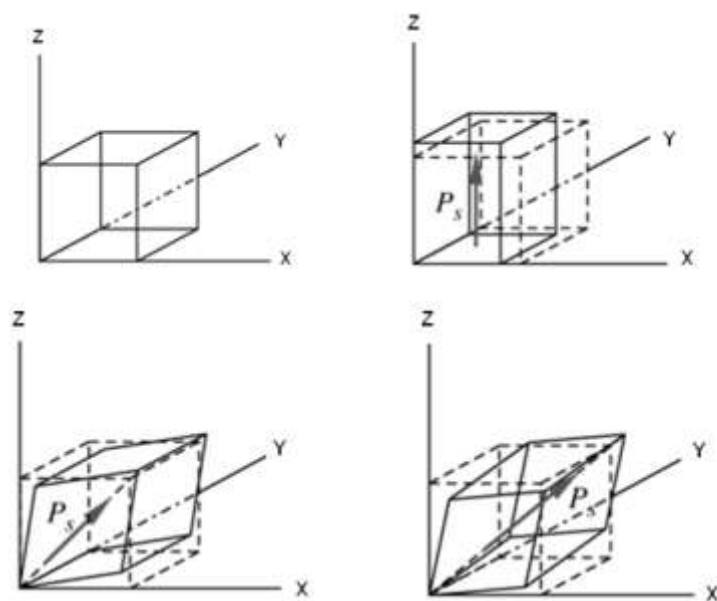
สารประกอบที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก เช่น แบเรียมไททาเนต เลตไททาเนต เลตเซอร์โคเนตไททาเนต โซเดียมหรือโพแทสเซียมไนโอเบต มีโครงสร้างอยู่ในรูปของเพอโรฟสไกต์ ( $ABO_3$ ) โดยมีอะตอมของ  $Zr^{4+}$  หรือ  $Ti^{4+}$  อยู่กึ่งกลาง (รูปที่ 2.3) เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้า โครงสร้างคิวบิก จะเกิดการบิดตัว (distort) หากได้รับกระแสไฟฟ้าในแนวแกน z สารจะเกิดการยืดหดตัวในแนวแกน z ทำให้โครงสร้างของวัสดุเปลี่ยนเป็น ออร์โธโรมบิก หรือ เตตระโกนอล หากได้รับกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x หรือ y จะเกิดการเฉือนตัว ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นรอมโบฮีดรอลหรือโมโนคลีนิก (รูปที่ 2.4)



รูป 2.3 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรง (ซ้าย) และแบบผกผัน (ขวา) [22]



รูป 2.4 โครงสร้างอะตอมของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ ( $ABO_3$ ) [22]



รูป 2.5 โครงสร้าง Cubic เมื่อได้รับแรงกระทำในแนวแกน Z จะยืดหดตัว [22]

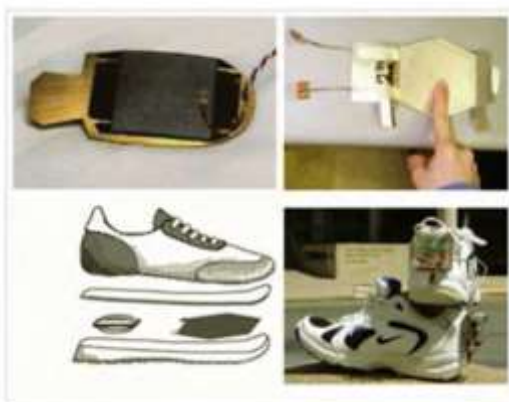
ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็น tetragonal (บนขวา) เมื่อได้รับแรงในแนวแกน X หรือ Y จะบิดตัว โครงสร้างเปลี่ยนเป็น Rhombohedral (ล่างซ้าย) หรือ Monoclinic (ล่างขวา)

เทคโนโลยีการผลิตวัสดุเพียโซอิเล็กทริกใช้หลักการเดียวกับการสังเคราะห์เซรามิกทั่วไป คือ การเตรียมวัตถุดิบหลัก เช่น  $PbO$ ,  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$  นำไปบดให้เข้ากัน แล้วนำไปเผา (calcination) จากนั้นนำไปผสมกับสารตัวยึดเหนี่ยว (binder) แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียวกัน (uni-axial press) และต่อด้วยการอัดแบบทุกทิศทาง (cold isostatic press) แล้ว

จึงนำไปเผาผนึก (sinter) เพื่อให้อนุภาคมีการผนึกตัว อุดรูพรุน เคลือบผิวด้วยโลหะ เช่น ทองเพื่อให้สามารถนำไฟฟ้าจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติความเป็นโพลาริเซชันจึงนำไปประกอบขึ้นรูปในอุปกรณ์ที่ต้องการ [22]

ปัจจุบันวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนำไปใช้อย่างกว้างขวางโดยผู้ใช้อาจไม่ทราบว่าอุปกรณ์เหล่านั้นมีวัสดุเพียโซอิเล็กทริกอยู่ เช่น หัวฉีดน้ำมันในรถยนต์ ระบบการควบคุมถุงลมนิรภัย (air bag) ระบบเบรก ระบบป้องกันขโมย หัวฉีดหมึกพิมพ์ กล้องดิจิทัล การใช้ประโยชน์จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการทำความสะดวกสบาย เช่น อุปกรณ์ล้างเครื่องมือแพทย์ ล้างผัก เครื่องล้างอัญมณีเนื่องจากเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับกระแสไฟฟ้าสลับที่ความถี่สูง เช่น 60 กิโลเฮิร์ต จะเกิดการยืดหดตัวของวัสดุตามความถี่ที่ได้รับและส่งผ่านคลื่นความถี่ไปยังน้ำ ทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกจากเครื่องมือ ผัก หรืออัญมณีโดยไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหาย หลักการเดียวกันนี้ยังถูกนำไปใช้ในเครื่องนวด ทำให้กล้ามเนื้อถูกกระตุ้นด้วยคลื่นไฟฟ้าระดับอัลตราซาวนด์ เมื่อกล้ามเนื้อถูกกระตุ้นเป็นจังหวะทำให้ระบบเลือดไหลเวียนได้ดีขึ้น [23]

ด้านพลังงาน วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังถูกนำไปวิจัยเพื่อการเก็บกักพลังงาน คล้ายการทำงานของแบตเตอรี่ นักวิจัยจากมหาวิทยาลัย Massachusetts Institute of Technology (MIT) ประเทศสหรัฐอเมริกา นำเสนอแนวคิดการใส่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกลงในรองเท้า (รูป 2.6) เนื่องจากวันหนึ่งๆ คนเราใช้เวลาทำกิจกรรมการเดินมาก ทำให้เสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ การนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกใส่ลงในรองเท้าทุกๆ ครั้งที่เราก้าวเดิน เหมือนหนึ่งเราใส่พลังงานลงในวัสดุแล้วเก็บพลังงานไว้แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ สามารถนำไปใช้กับเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์บางชนิดที่ไม่ต้องการกำลังไฟมากนัก เช่น เพจเจอร์ เครื่องวัดสัญญาณทางการแพทย์แบบติดตามตัว (Health Monitor) เครื่องเล่นเพลง (MP3) หรือแม้กระทั่งโทรศัพท์มือถือ [23]



รูป 2.6 การใส่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกลงในรองเท้าเพื่อเก็บพลังงาน [23]

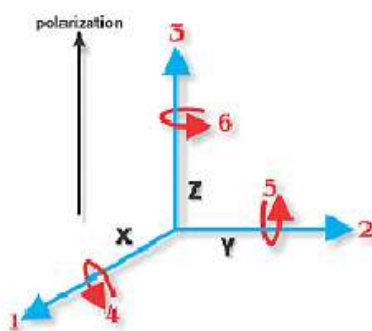
เทคโนโลยีวัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังคงพัฒนาต่อไป โดยเฉพาะการสังเคราะห์วัสดุที่ไม่มีตะกั่วเจือปนไปจนถึงการนำองค์ความรู้ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องมือต่างๆ ในทางการแพทย์และการ

อนุรักษ์พลังงาน เช่น การผ่าตัด การนำอินซูลินเข้ากระแสเลือดเพื่อรักษาผู้ป่วยเบาหวาน การเจาะไขเพื่อการผสมเทียม การวัดอัตราการไหลของเลือด การผ่าตัดสมอง การเก็บกักพลังงานในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเซรามิก สำนักเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ ดำเนินงานวิจัยเพื่อนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ได้แก่ แบรีเรียมไททานเตและเลดเซอร์โคเนตไททานเต มาประยุกต์ใช้ในเครื่องมือแพทย์ โดยคาดว่าจะนำไปเป็นอุปกรณ์วัดและบันทึกสัญญาณการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อในผู้พิการ การหดเกร็งของกล้ามเนื้อ จะส่งสัญญาณไปยังตัวรับหรือเซนเซอร์ สัญญาณจะถูกขยายและแปลงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นกลับไปกล้ามเนื้อ และอุปกรณ์อวัยวะเทียมให้มีการเคลื่อนไหว เช่น หีบของ เเดิน หรือลูกนั่งได้ [23]

### 2.1.2 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant, $d_{33}$ )

ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant,  $d_{33}$ ) คือ ค่าที่เกิดโพลาไรเซชันในสามทิศทาง เมื่อให้แรงทางกลในสามทิศทางด้วย ซึ่งจะมีเครื่องหมายแสดงสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นเลขห้อย 2 ตัว โดยเลขห้อยตัวแรกหมายถึง ทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่จ่ายเข้าไปในวัสดุ หรือวัสดุจ่ายออกมาเมื่อถูกแรงทางกลกระทำ ส่วนเลขห้อยตัวที่สองจะหมายถึงทิศทางที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยืด หรือหดเมื่อถูกสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำ หรือทิศทางที่จ่ายแรงทางกลกระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก  $d_{33}$  จะแสดงถึงค่าโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเมื่อเราจ่ายสนามไฟฟ้าในทิศทาง 3 และให้แรงกดกระทำบนทิศทาง 3 ด้วย [24] ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูป 2.7 แสดงค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก  $d_{33}$  [24]

### 2.1.3 คัปปลิงแฟกเตอร์ (coupling factor; $k_p$ )

คัปปลิงแฟกเตอร์หรือแฟกเตอร์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล (Electromechanical coupling factor;  $k_p$ ) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงความสามารถ หรือความได้เปรียบที่เกิดขึ้นกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล หรือในทางกลับกันก็จะสามารถเปลี่ยนแปลงจากพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อีกด้วย โดยอาศัยค่า  $k_p$  ซึ่งวัดจากทิศทางของการให้สนามไฟฟ้า และทิศทางของการวัดพลังงานกลที่ให้ออกมา วิธีที่นิยมใช้ในการหาค่าคัป-

ปลิงแพกเตอร์คือ วิธีการเรโซแนนซ์ (resonance methods) ซึ่งเป็นการหาตำแหน่งชนิดแบบที่หาความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency,  $f_r$ ) และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (anti-resonance-frequency,  $f_a$ ) โดยนำชิ้นงานเซรามิกที่ผ่านการโพลิงมาวัดค่าด้วยจากเครื่อง LCR meter วิธีการเรโซแนนซ์วิธีนี้ใช้สมบัติทางไฟฟ้าในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเพราะภายในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะมีลักษณะสมมูลกับวงจรทางไฟฟ้าซึ่งเรียกว่า วงจรสมมูลของเมสัน คือภายในมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำในตัวเดียวกันในการพิจารณาในการตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้า กระแสสลับความถี่ต่างๆที่ให้แก่ สารเพียโซอิเล็กทริก เมื่อป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับให้แก่เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดการสั่นภายในเนื้อสารที่มีความถี่ค่าหนึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกับผลึกของสารนั้น ทิศทางการสั่นจะขึ้นกับรูปและขนาดของสาร ค่าความถี่ที่ทำให้อนุภาคสารเกิดการสั่นขึ้นและมีการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลอย่างรวดเร็ว นั้นเรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ ถ้าเพิ่มความถี่มากขึ้นเรื่อยๆ จนไปถึงค่าหนึ่งที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่ามากที่สุดจะเรียกค่าความถี่นั้นว่า ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ ความสัมพันธ์ของความถี่ดังกล่าวใช้ในการหาค่าคัปปลิงแพกเตอร์โดยคำนวณได้จาก [25] สมการที่ 2.1

$$k_p^2 = 2.5 \left[ \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2} \right] + 0.038 \quad (2.1)$$

เมื่อ  $f_r$  คือ ความถี่อิมพีแดนซ์ต่ำสุด (minimum impedance frequency) หรือ ความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) ในหน่วย Hz  
 $f_a$  คือ ความถี่อิมพีแดนซ์สูงสุด (maximum impedance frequency) หรือ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (anti-resonance frequency) ในหน่วย Hz

#### 2.1.4 การค้นพบเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectricity)

ในปี ค.ศ. 1940 ได้มีการทำตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง (high dielectric constant capacitor) ไฟฟ้าเฟอร์โรเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้าซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของผลึก (crystal symmetry) ไฟฟ้าเฟอร์โรเกิดจากทิศทางขนานกันของโมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้า (electric dipole moment) บริเวณที่มีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (spontaneously polarized region) ที่มีโพลาริเซชันทิศทางเดียวกันเรียกว่า โดเมน (domain) การจัดเรียงตัวของโดเมนหนึ่งกับอีกโดเมนหนึ่งถูกควบคุมโดยความสัมพันธ์ของผลึก วัสดุในกลุ่ม  $BaTiO_3$  ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเรียงตัวขนานกับขอบของหน่วยเซลล์ โดเมนจะโตขึ้นเมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าแรงสูง (high electric field) หลังจากทีสารผ่านการโพลิง (poling) พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเปลี่ยนแปลง การมีโพลาริเซชันค้างในสารเนื่องจากผลของโพลิงสามารถพิจารณาได้จาก ferroelectric hysteresis loop สารกลุ่มนี้ ได้แก่

แบเรียมไททาเนต เป็นวัสดุชนิดแรกที่ได้รับการพัฒนาเป็นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ขณะที่แบเรียมไททาเนตเปลี่ยนโครงสร้างพบว่า สมบัติเชิงกลและเชิงไฟฟ้าก็เปลี่ยนแปลงด้วย การแทนที่ของ PB หรือ Ca สำหรับ Ba จะลดอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างซึ่งควบคุมสมบัติเพียโซอิเล็กทริก การแทนที่ของ Zr หรือ Sn สำหรับ Ti จะเพิ่มสมบัติเพียโซอิเล็กทริก และเกิดการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) ขณะใช้งานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน (domain wall) ดังนั้นเราสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนก็จะสามารถควบคุมการสูญเสียสนามค่าสูง (high-field loss) ได้ตะกั่วเซอร์โคเนต ( $\text{PbZrO}_3$ ), ตะกั่วไททาเนต ( $\text{PbTiO}_3$ ) และตะกั่วไนโอเบต ( $\text{PbNb}_2\text{O}_6$ ) ลิเทียมไนโอเบต ( $\text{LiNbO}_3$ ) และลิเทียมแทนทาลेट ( $\text{LiTaO}_3$ ) สมบัติของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่มีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งาน มีดังนี้ สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูง การสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าต่ำ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกมีค่าสูง (high piezoelectric constant) การคู่ควบเชิงกลไฟฟ้ามีค่าสูง อุณหภูมิคูรีสูงซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงได้ สามารถโพลี้งได้ง่าย ง่ายต่อการซินเตอร์ ไม่ไวต่อความชื้น [26]

## 2.2 วัสดุไดอิเล็กทริก

สมบัติไดอิเล็กทริกคือ สมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าในวัสดุเมื่อวัสดุอยู่ในสภาวะปกติ ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกันระหว่างโปรตอนและอิเล็กตรอน โดยจะอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุล และแรงยึดเหนี่ยวของอะตอม ภายในเนื้อสารจึงไม่มีประจุไฟฟ้าอิสระแต่เมื่อสารได้รับกระแสไฟฟ้าจะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าส่วนกลุ่มประจุลบจะถูกผลักไปในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้โมเลกุลของสารเกิดไดโพลโมเมนต์ขึ้นมา [27]

### 2.2.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) หรือค่าสภาพยอมรับได้สัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity,  $\epsilon$ ) ของวัสดุกับค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ ( $\epsilon_0$ ) สามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่องวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อน (impedance analyzer) โดยทั่วไปจะทำการป้อนความถี่ในช่วงต่างๆ และความต่างศักย์ในระดับ mV เพื่อทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกโดยใช้สมการที่ 2.2

$$\epsilon_r = \frac{C_d}{A \times \epsilon_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  คือ ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นฟารัด (F)

A คือ พื้นที่ของไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นตารางเมตร ( $\text{m}^2$ )

$\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ในสุญญากาศมีค่า  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

$C_d$  คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นเมตร (m)

### 2.2.2 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อนของตัวเก็บประจุในวงจรกระแสไฟสลับ เมื่อป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่วัสดุไดอิเล็กทริก การสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริกคือ ค่า  $\tan \delta = \text{dissipation factor}$  โดยเรียกมุม  $\delta$  ว่า loss angle ถ้า  $\tan \delta$  มีค่าน้อยการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริกก็จะน้อยด้วย คำนวณหาค่าได้จากสมการที่ 2.3

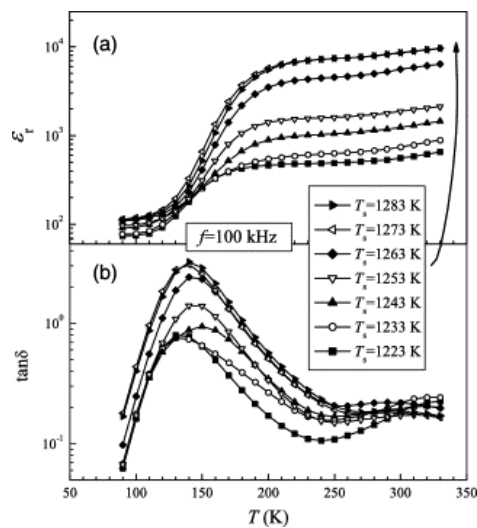
$$\tan \delta = I_L / I_C \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\delta$  คือ ค่ามุมที่นำไปลบออกจาก  $90^\circ$   
 $I_L$  คือ กระแสที่ไหลผ่าน  
 $I_C$  คือ กระแสที่เก็บประจุ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก มี 2 ปัจจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

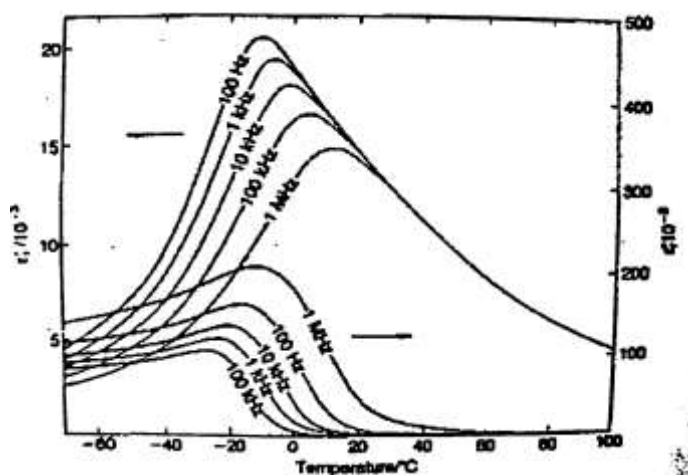
- 1) ชนิดและปริมาณสารเจือที่เติมเข้าไปจะส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแตกต่างกัน
- 2) อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ชิ้นงานจะส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแตกต่างกัน

ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูป 2.8 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก a) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก b) ขึ้นกับอุณหภูมิของเซรามิก CdCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> ที่ความถี่ 100 kHz [27]

ความถี่และความต่างศักย์ที่ให้ ถ้าความถี่ที่ให้หิมค่ามาก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูป 2.9 แสดงผลของความถี่ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ และค่าการสูญเสียความร้อน [27]

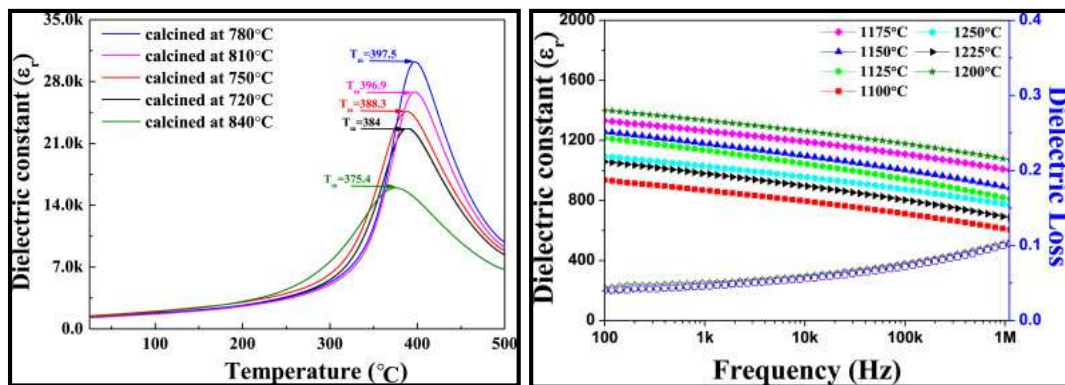
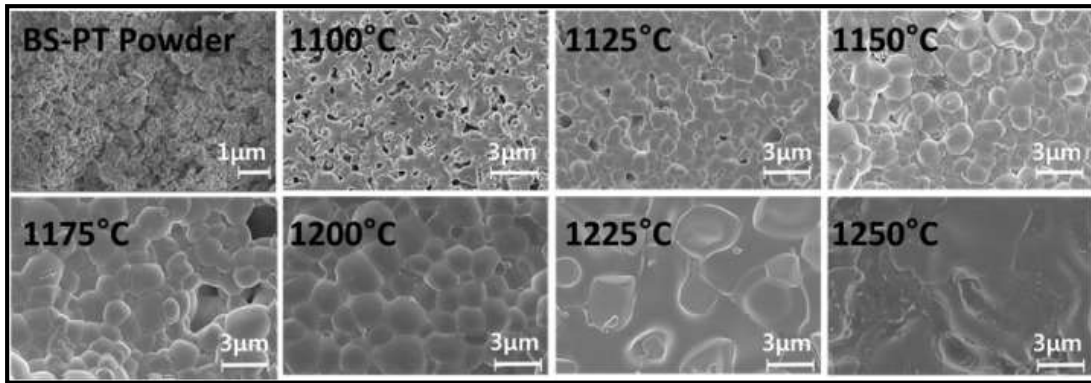
### 2.2.3 ความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength)

ความคงทนไดอิเล็กทริก เป็นสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งในการประเมินคุณภาพไดอิเล็กทริกเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความทนทานต่อความต่างศักย์ของไดอิเล็กทริก ความคงทนไดอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ไดอิเล็กทริกยังคงใช้งานได้ โดยปราศจากความเสียหายต่อความยาวหนึ่งหน่วย ถ้าวัสดุไดอิเล็กทริกถูกป้อนด้วยค่าความต่างศักย์ที่สูงมาก ๆ ทำให้ความเค้นของอิเล็กตรอนหรือไอออนพยายามไหลผ่านวัสดุไดอิเล็กทริกมีค่าเกินกว่าความคงทนไดอิเล็กทริก และถ้ามีค่าเกินกว่าความคงทนไดอิเล็กทริก วัสดุไดอิเล็กทริกจะถูกทำลายและทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น [28]

### 2.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก

1. อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ชิ้นงานจะส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแตกต่างกัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นด้วย
2. ความถี่และความต่างศักย์ที่ให้โดยถ้าความถี่ที่ให้มามีค่ามาก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะน้อยพบว่าเมื่อความถี่ที่ให้มากขึ้นส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าน้อยลง





รูป 2.10 แสดงความหนาแน่นและขนาดเกรนที่ส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริก [28]

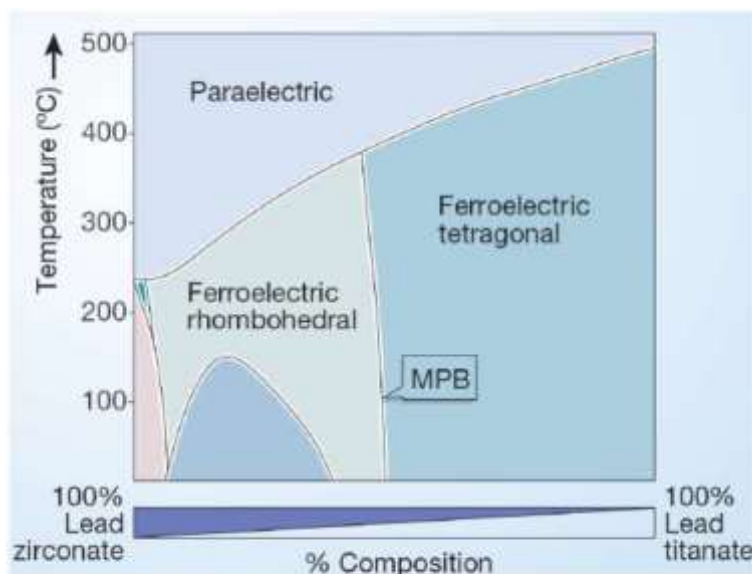
### 2.3 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก

ในอดีตที่ผ่านมาโดยเฉพาะในช่วงสงครามโลกครั้งที่สองได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกกันอย่างแพร่หลาย ดังแสดงลำดับเหตุการณ์ในตารางที่ 2.1 เพื่อจะนำไปสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ในสงครามดังกล่าว เริ่มแรกได้มีการพัฒนาสารเพื่อผลิตตัวเก็บประจุจากไมก้า (Mica) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) แมกนีเซียมไททานเนต ( $\text{MgTiO}_3$ ) และแคลเซียมไททานเนต ( $\text{CaTiO}_3$ ) ซึ่งมีค่าไดอิเล็กทริกประมาณ 100 และต่อมาในปี ค.ศ.1941 Wainer และ Solomon ได้ค้นพบแบเรียมไททานเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) ซึ่งเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่ที่ได้รับ ความสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากมีค่าไดอิเล็กทริกสูงถึง 1,100 จึงเป็นเหตุให้แบเรียมไททานเนตมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ต่อมาได้มีการค้นพบว่าสารประกอบกลุ่มของตะกั่วก็มีค่าไดอิเล็กทริกสูงเช่นเดียวกัน ยิ่งไปกว่านั้นสารประกอบกลุ่มของตะกั่วยังมีข้อดีกว่าสารประกอบกลุ่มของไททานเนตคือสามารถเผาซินเตอร์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้สามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตลงได้อย่างมาก ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้สารประกอบกลุ่มนี้ได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนากันอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน อาทิ เช่น สารในระบบเลดเซอร์โคเนตไททานเนต ( $\text{PbTiO}_3$ ) เลดเซอร์โคเนตไททานเนต ( $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$  หรือ PZT) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานเนต (PLZT) เลดนิเกิลไนโอเบต (PNN) และเลดซิงค์ไนโอเบต (PZN) เป็นต้น [29]

สำหรับ PZT นั้นถูกค้นพบโดย Jaffe และคณะ ในปี ค.ศ.1952 หลังจากนั้นก็กลายเป็นเซรามิกส์ที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมจนถึงปัจจุบัน เนื่องจาก PZT มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นมากสามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงโดยเฉพาะบริเวณรอยต่อเฟส (Morphotropic phase boundary หรือ MPB) ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างเฟสโรมาโบฮีดรอลกับเททรโกนอล โดยมีอัตราส่วนระหว่างเซอร์โคเนียมกับไททาเนียมเป็น 52 : 48 ดังรูปที่ 2.11 นอกจากนี้ PZT ยังมีอุณหภูมิคูรีที่สูงถึง 390 °C (ที่ MPB) และยังมีค่าสัมประสิทธิ์คูลัมเบ็งกลที่สูง ทา การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าได้ง่าย มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง และง่ายต่อการเผาซินเตอร์ (Sintering) เพราะใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก ยิ่งไปกว่านั้น การเตรียมเซรามิกส์ PZT ให้มีความบริสุทธิ์สูงและความหนาแน่นสูงนั้นสามารถเตรียมได้ไม่ยุ่งยากนัก [30]

ตารางที่ 2.1 ลำดับเหตุการณ์ที่สำคัญในการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริก [30]

ปี ค.ศ.	เหตุการณ์
1824	ปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกถูกค้นพบในทัวมาไลน์ (Tourmaline)
1880	ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกถูกค้นพบในเกลือโรเชลล์ (Rochelle salt)
1921	ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกถูกค้นพบในเกลือโรเชลล์
1941	BaTiO <sub>3</sub> วัสดุที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูง (>1200 °C) ถูกพัฒนาขึ้นเป็นตัวเก็บประจุ
1944	ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกถูกค้นพบในโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ (ABO <sub>3</sub> )
1945	BaTiO <sub>3</sub> ถูกพัฒนาขึ้นเป็นเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezotransducer)
1951	แนวคิดเกี่ยวกับแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ถูกบัญญัติขึ้น
1952	พบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกในสารละลายของแข็ง PZT
1954	PZT ถูกพัฒนาขึ้นเป็นเพียโซทรานสดิวเซอร์
1955	พบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกในกลุ่มของ อัลคาไลไนโอเบต
1957	BaTiO <sub>3</sub> ถูกพัฒนาขึ้นเป็นตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น (Multilayer capacitor)
1961	พบสมบัติรีแล็กเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก PMN
1969	PLZT ที่ขึ้นรูปด้วยการกดร้อน (Hot press) พบว่ามีสมบัติทางแสงที่โดดเด่น
1977	การสังเคราะห์ฟิล์มบางของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกถูกพัฒนาขึ้น
1981	เทคนิคโซลเจล ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการเตรียมฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริก
1997	ผลึกเชิงเดี่ยวของรีแล็กเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกพัฒนาขึ้นสำหรับเพียโซทรานสดิวเซอร์



รูป 2.11 แสดงเฟสไดอะแกรมของสารในระบบ  $\text{PbZrO}_3$ - $\text{PbTiO}_3$  [30]

#### 2.4 การประยุกต์ใช้ของวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงาน

การเก็บเกี่ยวพลังงานมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไร้สายและอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ได้รับความสนใจจากสถาบันการศึกษาและอุตสาหกรรม จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าการเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้นในหลายปีที่ผ่านมา นิยมนำมาใช้ในการแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสะดวกแก่การใช้งาน แต่ยังมีปัญหาที่เกิดขึ้นกับการใช้งานวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงานภายใต้การกระตุ้นตัวแปรต่าง ๆ มีการศึกษาการออกแบบวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงานให้มีการแปลงพลังงานที่สูงและในช่วงความถี่ที่กว้างขึ้น [31]

ตาราง 2.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องมือเก็บเกี่ยวพลังงานเฉื่อย: ระดับปานกลาง [31]

รายงาน อ้างอิง	ประเภท วัสดุ	แอมพลิจูด กระตุ้น $g = 9.8$ $ms^{-1}$	ความ ถี่ (Hz)	ขนาดเพียโซ ( $mm^3 \times$ ตัวเลข)	น้ำหนัก (g)	แรง RMS	ความหนา แน่นของแรง ( $mWcm^{-3}$ )	NPD ( $kgm^{-3} \times$ $10^3$ )
Dai et al. 2009	PZT-5H	1g	51	12 x 10 x 1	-	1.055 mW	8.79	0.0915
Kim et al. 2010	PZT-5A	0.255 g	109.5	53 x 31.7 x 0.275*2	-	~0.53 mW	0.57	0.091
Liang and Liao 2010	PZT-5A	1.44 g	42	49 x 24 x 0.5		2.5 mW	4.25	0.02
Gu 2011	PZT-5A	0.4g	20.1Hz	26 x 6.4 x 0.5*2	8	1.08 mW	9.01	0.59
Li et al. 2011	Piezo stack	1 g	87	3141	-	14.6 mW	4.65	0.05
Yen et al. 2011	AlN	1.0g	853	~0.4 x 0.25 x 0.002*2	0.317x $10^{-3}$	4.9 nW	12.25	0.127
Xu et al. 2012	PMN- PT	3.2g	102	25x5x1*2	4.2	1.85 mW	7.4	$7.5 \times 10^{-3}$
Zhao et al. 2012	PZT	1.48g	73	13x2.5x1*2	-	8.7 $\mu$ W	0.134	$0.64 \times 10^{-3}$
Tang and Yang 2012	MFC	0.29g	27.8	28x7x0.3	5.9	1.43 mW	24.32	3.04
Dhakar et al.	PZT-5A	0.2g	36	31.9x6.4x0.5	0.72	40 $\mu$ W	0.392	0.102
Wu et al. 2013	MFC	0.1g	18	36x16x0.3*3	21.4	~0.75 mW	1.45	1.45

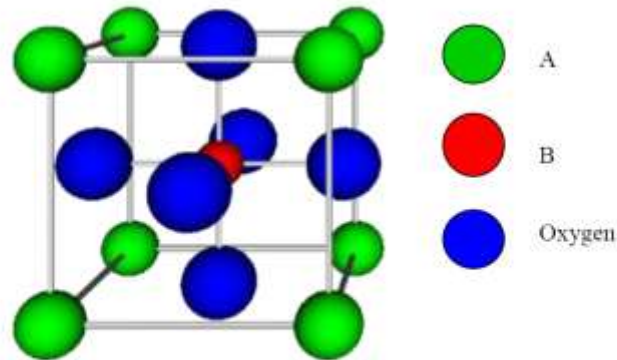
Arrieta et al. 2013	PZT	0.25g	~20	46x20.6x0.2 5*2		7.07 mW	14.9	2.49
Qiuc et al. 2014	PZT	0.6 g	38	12x6x1	-	0.39 mW	5.4	0.1567
Ma et al. 2014	PZT-5H	0.2g	93	30x3x3	5.4	3.18 $\mu$ W	0.012	$2.94 \times 10^{-3}$
Zhang et al. 2014	PZT	0.29g	2.71	50x30x0.2*2	~282.6	7.7 mW	12.83	1.59
Xiao et al. 2014	PZT	1g	225	$\Phi$ 25x0.2*4	198	10 mW	25.48	0.265
Tufekcioglu and Dogun 2014	PZT 5H	2g	153	$\Phi$ 12.7x1*2	0.34	0.14 mW	0.55	$1.44 \times 10^{-3}$
Kulkarni et al. 2014	PZT-5A	1g	620	5x5x0.5*4	106	0.57 mW	11.4	0.119
Hung et al. 2015	PZT	3.5g	75	4x3.5x1*4	7.8	0.239 $\mu$ W	$4.27 \times 10^{-3}$	$3.64 \times 10^{-6}$
Singh et al. 2015	PZT	4.6g	90	35x16.8x0.2	-	385 $\mu$ W	3.27	$1.61 \times 10^{-3}$
Sriramdas et al. 2015	PVDF	0.5g	30.8	108	0.63	8.56 $\mu$ W	0.079	$3.3 \times 10^{-3}$
Gong et al. 2015	PZT	0.7g	120.9	31x13.6x0.2 2*2	~23	6.64 mW	35.8	0.760
Yang and Zu 2016	PZN-PT	0.3g	37.5	10x7.2x0.4	2.61	0.43 mW	14.93	1.727

Wu et al. 2016	แผ่น Piezo	0.5g	56	5918.9	100	4.76 $\mu$ W	$0.804 \times 10^{-3}$	$0.033 \times 10^{-3}$
Yi et al. 2017	PZT	3.5g	77.2	16x3x0.053 16x3x0.076	0.433	0.979 mW	1580.134	
Zou et al. 2017	PZT-5H	0.4g	9.9	40x10x1	~14.8	194 $\mu$ W	0.485	0.032
He and Jiang 2017	PZT-5H	0.3g	44	241	6.34	1.27 mW	5.27	0.610
Yang et al. 2017	PZT-5H	0.3g	22.7	40x15x0.5	100	15 mW	50	5.78
Yang et al. 2017	PZT-5H	0.3g	22.7	40x15x0.5	100	15 mW	50	5.78

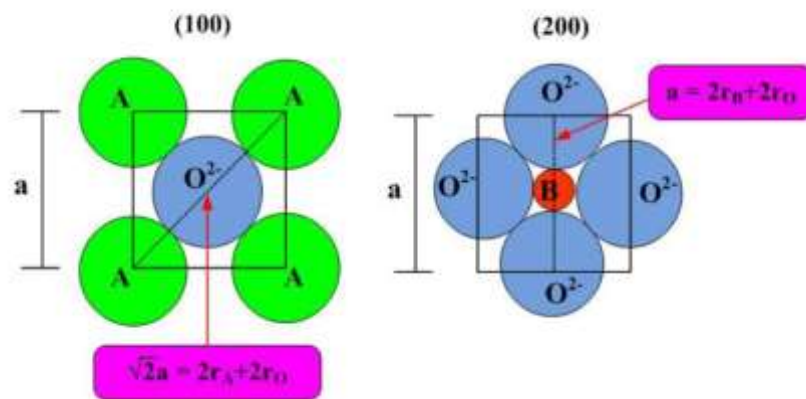
## 2.5 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์

โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ เป็นชื่อที่เรียกกันตามชื่อของแร่แคลเซียมไททานेट ( $\text{CaTiO}_3$ ) มีสูตรโครงสร้างทั่วไปเป็น  $\text{ABO}_3$  เมื่อ A และ B เป็นไอออนบวก ซึ่งมีขนาดไอออนใหญ่และเล็กตามลำดับ ดังรูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์นี้มีพื้นฐานมาจากหน่วยเซลล์แบบ Face-center cubic closed packing (FCC) โดยไอออนบวก A และออกซิเจนซึ่งเป็นไอออนลบ จะจัดเรียงโครงสร้างแบบ FCC ไอออนบวก A จะอยู่ที่มุมของหน่วยเซลล์ ออกซิเจนจะอยู่ที่หน้าของหน่วยเซลล์ และไอออนบวก B จะแทรกอยู่ในช่องว่างกลางทรงแปดหน้า (octahedral site) สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์จะรวมไปถึงพวกสารประกอบในกลุ่มไททานेट (Titanate) หลายๆชนิด ที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เซรามิกอย่างเช่น  $\text{BaTiO}_3$   $\text{SrTiO}_3$  และ  $\text{PbTiO}_3$  สารประกอบในกลุ่มเซอร์โคเนต (Zirconate) อย่างเช่น  $\text{PbZrO}_3$  และ  $\text{BaZrO}_3$  และสารประกอบในกลุ่มอื่น ๆ เช่น  $\text{LaGaO}_3$   $\text{LaAlO}_3$  และ  $\text{KNbO}_3$  เป็นต้น นอกจากนี้โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ก็ยังจัดเป็นส่วนประกอบย่อยของหน่วยโครงสร้างที่อยู่ภายในโครงสร้างที่มีความสลับซับซ้อนมาก ๆ บางประเภท อย่างเช่นสารตัวนำยิ่งยวด (superconductors) อีกด้วย

ในปี 1926 Goldschmidt ได้ทำการศึกษาความเสถียรของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ โดยใช้ค่าทอรานซ์แฟกเตอร์ (Tolerance factor;  $t$ ) โดยการอ้างอิงถึงโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ในอุดมคติ ซึ่งไอออนบวก B จะต้องมีความพอดีกับช่องว่างทรงแปดหน้าของออกซิเจนและไอออนบวก A จะต้องมีความพอดีกับช่องว่างระหว่างทรงแปดหน้าของออกซิเจน แสดงดังรูปที่ 2.12



รูป 2.12 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ [32]

รูป 2.13 ภาพตัดขวางของหน่วยเซลล์เพอโรฟสไกต์ในอุดมคติ ( $ABO_3$ ) ในระนาบ (100) และ (200) [32]

ดังนั้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีไอออนได้ดังนี้

$$\text{จากระนาบ (100) จะได้} \quad \sqrt{a} = 2r_A + 2r_O \quad (2.4)$$

$$\text{จากระนาบ (200) จะได้} \quad a = 2r_B + 2r_O \quad (2.5)$$

$$\text{จากสมการ 2.4 และ 2.5} \quad r_A + r_B = \sqrt{r_A + r_O} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $r_A$ ,  $r_B$  และ  $r_O$  คือ รัศมีไอออนของไอออน A, B และออกซิเจน ตามลำดับ และ  $a$  คือ แลททิซพารามิเตอร์ (Lattice parameter)

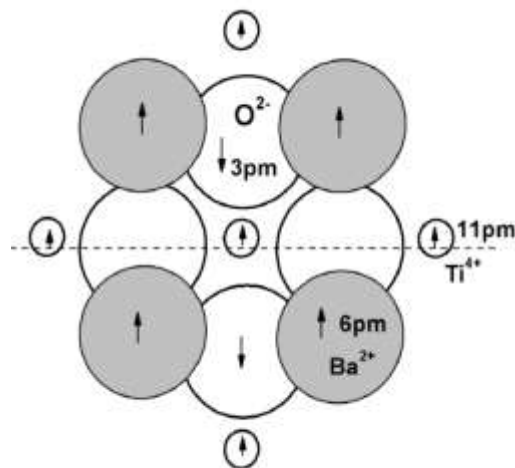
จากสมการที่ 2.6 เรายังสามารถอธิบายถึงความเสถียรของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์อื่นๆ ได้ด้วยค่าทอลาแรนซ์แฟคเตอร์ ( $t$ ) จากสมการ

$$t = \frac{r_A + r_O}{\sqrt{2}(r_B + r_O)} \quad (2.7)$$

ค่าทอลาแรนซ์แฟคเตอร์ เป็นตัวบ่งชี้การบิดเบือนของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ในอุดมคติได้โดยโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่เสถียรจะมีค่าทอลาแรนซ์แฟคเตอร์อยู่ในช่วง  $0.95 < t < 1.06$  โดยถ้าค่า

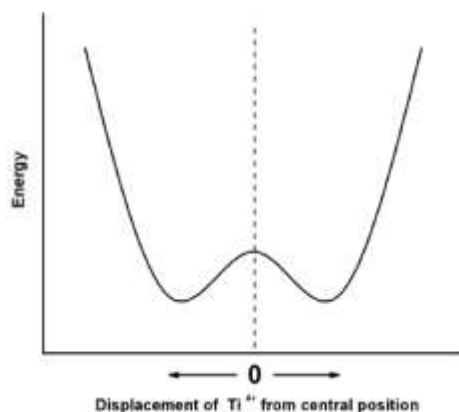
$t = 1$  แสดงว่ามีโครงสร้างเหมือนกับโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ในอุดมคติ ซึ่งจะเรียกว่าเพอโรฟสไกต์สมบูรณ์ (Perfect perovskite) ยกตัวอย่างเช่น สทรอนเทียมไททาเนต ( $\text{SrTiO}_3$ ) เมื่อ  $t > 1$  แสดงว่าขนาดไอออนบวก B มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างทรงแปดหน้าทีเข้าไปอยู่ ทำให้โครงสร้างที่ได้เกิดการมีขั้วขึ้น ยกตัวอย่าง เช่น แบเรียมไททาเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) เป็นต้น และเมื่อ  $t < 1$  แสดงว่า ไอออนบวก A มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับช่องว่างระหว่างทรงแปดหน้า ยกตัวอย่างเช่นแคลเซียมไททาเนต ( $\text{CaTiO}_3$ ) เป็นต้น โดยโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีเฟสแบบเตตระโกนอล จะมีค่า  $t > 0.98$  และ  $t < 0.98$  จะมีเฟสแบบรอมโบฮีดรอล

ตัวอย่างโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ในผลึก  $\text{BaTiO}_3$  โดยประจุของ Ba เท่ากับ +2 และ +4 สำหรับ Ti ซึ่งจะดุลพอดีกับประจุลบของออกซิเจน มีค่าพลาแวนซ์แฟคเตอร์เท่ากับ 1.047 แสดงว่าขนาดของ  $\text{Ti}^{4+}$  มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างทรงแปดหน้าในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์และช่องว่างดังกล่าวนี้ก็ยังคงถูก  $\text{Ba}^{2+}$  (ซึ่งมีไอออนขนาดใหญ่) ช่วยดึงให้ขยายออกไปจากปกติอีก ทำให้  $\text{Ti}^{4+}$  สามารถเกิดการเคลื่อนที่ภายในช่องว่าง และเกิดการเลื่อนตำแหน่งของอะตอมกลางได้ทำให้โครงสร้างเกิดความไม่สมมาตรขึ้นที่อุณหภูมิห้อง ผลึก  $\text{BaTiO}_3$  จะมีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอลโดย  $\text{Ti}^{4+}$  จะเลื่อนออกตำแหน่งจุดศูนย์กลางประมาณ 11 พิโคเมตร ไปทางด้านใดด้านหนึ่งของหน่วยเซลล์ แสดงดังรูปที่ 2.14 และ 2.15 ลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ขึ้นในหน่วยเซลล์และเหนี่ยวนาหน่วยเซลล์ข้างเคียงให้เกิดการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันทำให้เกิดโพลาริเซชันขึ้น [32]



รูป 2.14 การเกิดโพลาริเซชันในหน่วยเซลล์เนื่องจากการเลื่อนตำแหน่งของไอออน  $\text{Ti}^{4+}$  ในผลึกเพอโรฟสไกต์ของ  $\text{BaTiO}_3$  [32]

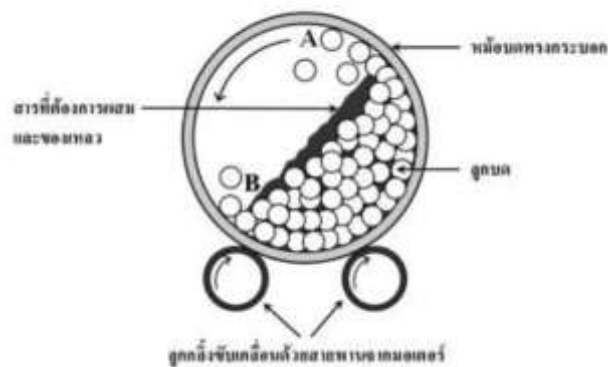




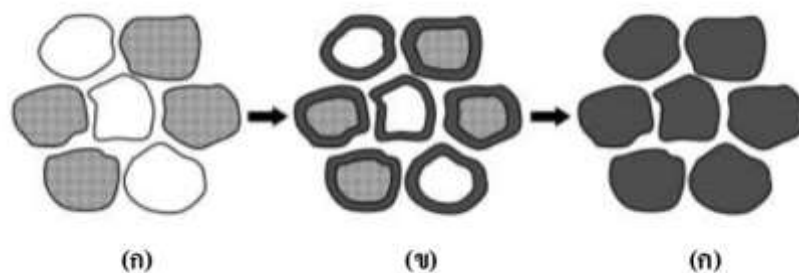
รูป 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของไอออน  $Ti^{4+}$  ในผลึกเพอโรฟสไกต์ของ  $BaTiO_3$  กับพลังงาน [32]

## 2.6 วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งแบบดั้งเดิม (Solid state reaction method)

ปฏิกิริยาสถานะของแข็งในการเตรียมผงของสารประกอบออกไซด์อย่างง่ายต่าง ๆ นิยมใช้วิธีนี้ ซึ่งจะให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็ง เพื่อทำให้เกิดการสลายตัว หรือเกิดการทำ ปฏิกิริยากันระหว่างสารตั้งต้นต่างชนิดกัน แล้วเกิดเป็นของแข็งชนิดใหม่ขึ้นมา โดยเรียกกระบวนการดังกล่าวว่าการแคลไซน์ (Calcination) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้สารตั้งต้นเกิดอันตรปฏิกิริยาต่อกัน โดยอาศัยการแพร่ระหว่างกันของไอออน ซึ่งช่วยลดขอบเขตของการแพร่ในขั้นตอนการซินเตอร์ได้โดยการสลายตัวนั้นจะถูกควบคุมด้วยปัจจัยทางจลนพลศาสตร์ต่างๆ ซึ่งปัจจัยทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวนั้น อาจถูกควบคุมจากหนึ่งในสามของกระบวนการต่อไปนี้คือ (ก) ปฏิกิริยาพื้นผิว (ข) การถ่ายเทความร้อนไปยังพื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยา และ (ค) การแพร่ของแก๊ส หรือการซึมผ่านจากพื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยาเข้าไปตามช่องรูพรุนในชั้นต่างๆ ของผงแสดงในรูป 2.17 นอกจากนี้ยังขึ้นกับลักษณะธรรมชาติทางเคมีของตัวทำปฏิกิริยาด้วย ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาการเกิดของแข็งระหว่างอนุภาคผงของตัวทำปฏิกิริยานั้นมีหลายอย่าง เช่นธรรมชาติทางเคมีของตัวทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่เกิดขึ้นใหม่ ขนาดของอนุภาค ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ความแตกต่างของขนาดอนุภาคในผงผสม ความเป็นเนื้อเดียวกันของผงผสม สภาวะของบรรยากาศ อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา [34]



รูป 2.16 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball milling) [34]



รูป 2.17 แสดงการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) เมื่อ (ก) ผงผสมกันอยู่ก่อน การเกิดปฏิกิริยา (ข) มีการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นบางส่วนและ (ค) เมื่อปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ [34]

## 2.7 การเผาแคลไซน์

การเผาแคลไซน์ หมายถึงการเผาเพื่อให้ น้ำ สารอินทรีย์และก๊าซต่าง ๆ ที่อยู่ในเนื้อชิ้นงานระเหยออกต่างจากการซินเตอร์จะเป็นการเผาควบแน่น คือมีการยึดติดกันของอนุภาคจนทำให้รูพรุนลดลงหรือแทบหมดไปในกรณีการแคลไซน์เป็นเซรามิกแบบดั้งเดิม เช่น การเผาปสิทิกสำหรับเซรามิกใหม่ ก่อนจะเผาซินเตอร์ต้องมีการแคลไซน์ก่อน เช่น การเผาซินเตอร์  $Al_2O_3$  กับ  $CaO$  สามารถเผาซินเตอร์ เพราะสารตั้งต้นที่ใส่แทบไม่มีก๊าซหรือสารอินทรีย์ (Binder) ซึ่งมีอยู่ในปริมาณไม่มากนัก แต่ถ้าต้องการซินเตอร์อลูมินา โดยใช้ตัวช่วยในการหลอม คือ  $CaO$  แต่หาไม่ได้หรือกลัวว่าจะดูความชื้นจนเปลี่ยนเป็น  $Ca(OH)_2$  อาจจะใช้หินปูน ( $CaCO_3$ ) แทนได้ แต่  $CaCO_3$  นั้นจะสลายตัวเป็น  $CaO+CO_2$  ซึ่ง  $CO_2$  จะออกไปจากชิ้นงานมากจึงต้องแคลไซน์ก่อน เพื่อให้การหดตัวลดลงก่อนจะเข้าสู่เฟสของการซินเตอร์ [34]

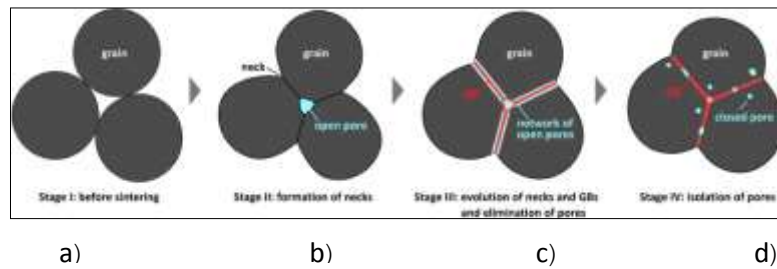
## 2.8 การเผาผนึก (sintering)

การซินเตอร์ (sintering) คือ กระบวนการทางความร้อนทำให้อนุภาคเกิดการสร้างพันธะกันอย่างสมดุล โดยมีโครงสร้างหลักเป็นของแข็งที่พัฒนาจากการเคลื่อนย้ายมวลลักษณะต่าง ๆ จะเกิดขึ้นในระดับอะตอม การเกิดพันธะเชื่อมต่อกันทำให้ระบบมีความแข็งแรงสูงขึ้นและมีพลังงานลดลง กล่าวได้ว่าการซินเตอร์ หมายถึงการกำจัดรูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาคผงเริ่มต้น โดยอาศัยการหดตัวขององค์ประกอบที่เชื่อมติดกันทุกขั้นตอนที่อยู่ระหว่างการเปลี่ยนสภาพชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปไปเป็นโครงสร้างทางจุลภาคที่ประกอบด้วยกรยึดกันด้วยเกรนต่าง ๆ ล้วนแต่เป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการซินเตอร์ทั้งสิ้น พฤติกรรมของการซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง (solid state reaction) (รูปที่ 2.18) ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ

**2.8.1 การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น (initial sintering)** เกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคผงภายในชิ้นงานและการเกิดพันธะที่แข็งแรง คือคอ (neck) บริเวณจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคผง ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานอาจจะเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ไปถึง 0.6 จากการแพ็คตัวกันมากยิ่งขึ้น

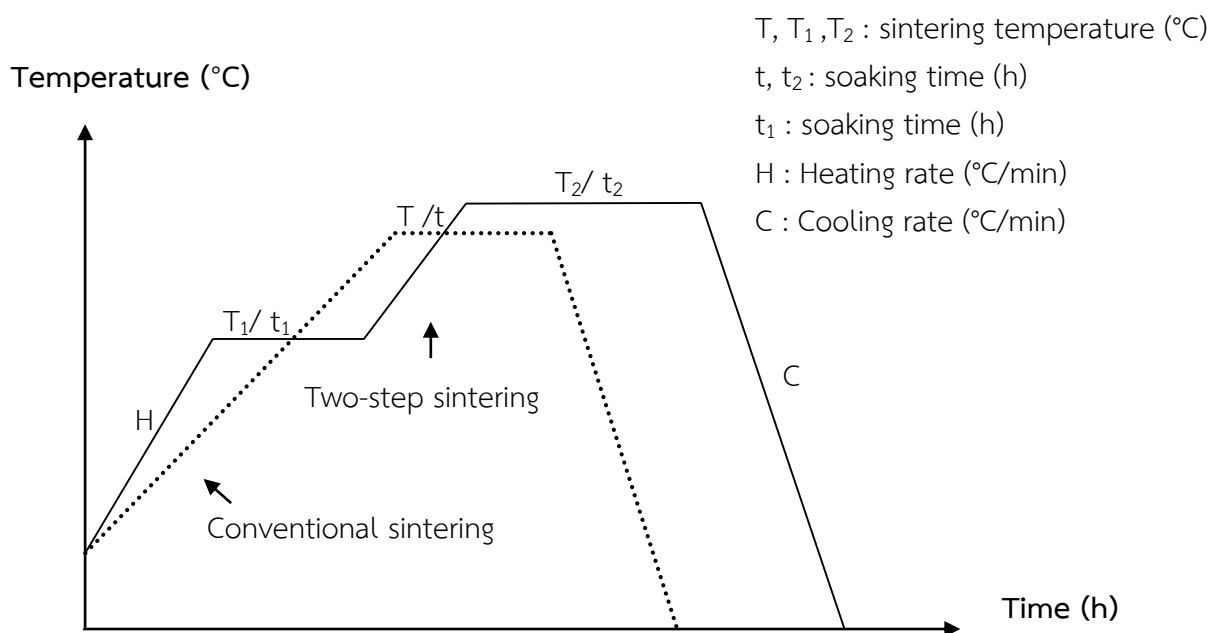
**2.8.2 การซินเตอร์ช่วงกลาง (intermediate sintering)** ช่วงขนาดของคอเริ่มเกิดขึ้นและปริมาณรูพรุนในชิ้นงานจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว อนุภาคเริ่มเข้ามาชิดติดมากยิ่งขึ้น ทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวอย่างชัดเจน เริ่มมีเกรนและขอบเกรนเกิดขึ้นพร้อมมีการเคลื่อนที่ของสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ ทำให้เกิดการโตของเกรนบางเกรนขึ้นขั้นตอนนี้จะดำเนินไปเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่องในขณะที่ช่องว่างของรูพรุนจะเริ่มเกิดการเชื่อมต่อกัน (พวงรูพรุนเปิด) การหดตัวของชิ้นงานจะเกิดขึ้นมากที่สุดในการซินเตอร์ช่วงกลางนี้ และอาจจะทำให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่มีค่าสูงถึงประมาณ 0.9 ได้

**2.8.3 การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย (final state sintering)** ช่วงที่รูพรุนภายในชิ้นงานเริ่มปิดตัวเองลงและค่อย ๆ ถูกกำจัดให้หมดไปจากชิ้นงานอย่างช้า ๆ โดยอาศัยกลไกการแพร่ของอากาศจากรูพรุนออกมาตามแนวขอบเกรน หลุดออกไปจากผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานเกิดการแน่นตัวเพิ่มขึ้นจะเดิมเพียงเล็กน้อย ขนาดเกรนเพิ่มขึ้นในการซินเตอร์ช่วงสุดท้ายนี้



รูป 2.18 พัฒนาการของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง (a) อนุภาคผงยึดกันอย่างหลวม ๆ หลังการอัดขึ้นรูป (b) การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น (c) การซินเตอร์ช่วงกลาง (d) การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย [35]

งานวิจัยนี้สนใจกระบวนการเผาอบผนึกแบบสองขั้นตอน เนื่องจากสามารถควบคุมขนาดเกรนและเพิ่มความแน่นตัวของเซรามิกให้ดีขึ้นซึ่งส่งผลที่ดีต่อสมบัติทางไฟฟ้า โดยกระบวนการเผาอบผนึกแบบสองขั้นตอน (Two-Step Sintering) ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูป 2.19 แสดงรูปแบบการผาซินเตอร์แบบ Conventional sintering และ Two- step sintering

กระบวนการเผาอบผนึกแบบสองขั้นตอน หรือการซินเตอร์แบบสองขั้นตอน (TSS) เป็นการซินเตอร์โดยใช้เงื่อนไข  $T_1/t_1/T_2/t_2$  ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเผาที่อุณหภูมิสูงหรือ  $T_2$  ตามด้วยการทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการลดอุณหภูมิลง และทำการแช่ไว้ เมื่อ

$T_1$  คือ อุณหภูมิที่ทำการเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส จะเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวใหม่อีกครั้งของอนุภาคผงภายในชิ้นงาน และการเกิดพันธะที่แข็งแรง คือคอ (neck) ขึ้นมาบริเวณจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคผง ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงาน

ในช่วงนี้อาจจะเพิ่มขึ้น ช่วงที่รูพรุนภายในชิ้นงานเริ่มปิดตัวเองลงและค่อย ๆ ถูกกำจัดให้หมดไปจากชิ้นงานอย่างช้า ๆ โดยอาศัยกลไกการแพร่ของอากาศจากรูพรุนออกมาตามแนวขอบเกรน

$t_1$  คือ เวลาในการแช่เป็นช่วงเวลาสั้นๆ

$T_2$  คือ การให้ความร้อนโดยการใช้อุณหภูมิสูงเป็นการซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูง แต่เป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิลอมเหลว โดยใช้อุณหภูมิสูงเพื่อให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ เพื่อให้เกิดการแพร่เกิดขึ้น ในช่วงอุณหภูมินี้อนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าหากันจนอนุภาคเชื่อมติดกับอนุภาคอื่นที่อยู่ติดกัน มีการจัดเรียงตัวกันใหม่ของอนุภาคผง รูปร่างของรูพรุนจะเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ปริมาณความพรุนในชิ้นงานลดลง เริ่มมีเกรนและขอบเกรนเกิดขึ้น

$t_2$  คือ เวลาในการแช่ซึ่งจะเป็นระยะเวลาที่นานกว่า  $t_1$  เปรียบเสมือนการเพิ่มเวลาให้เกิดการแพร่ของอนุภาคเข้าหากันมากขึ้น ซึ่งที่  $t_2$  จะไม่มีการโตของเกรนแล้ว และภายหลังการแพร่อย่างสมบูรณ์จะได้ชิ้นงานที่มีความแน่นตัวสูง และได้ชิ้นงานที่มีความเสถียรคือไม่ทำปฏิกิริยากับสารได้อีก

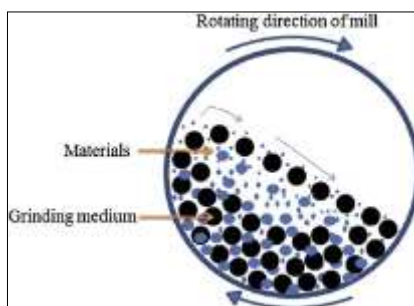
## 2.9 การบดย่อย

วัตถุประสงค์ของการบดย่อยให้มีความละเอียดของอนุภาคเล็กลงจนถึงขั้นละเอียดมาก (pulverization) โดยใช้การกระทบ กระทบ และการเสียดสีกันระหว่างวัตถุดิบ ตัวลูกบด (grinding media) และตัวบุผนังของหม้อบด

Ball Mill คือ เครื่องมือประเภทของเครื่องบด ใช้ในการบดวัสดุ โดยหลักการหมุนของหม้อบด โดยมีลูกบดอยู่ภายในดังรูปที่ 2.20 สามารถแบ่งเป็นการบดแบบเป็นครั้งคราว (Batch Mill) และการบดแบบต่อเนื่อง (Continuous Mill) โดยการบดทั้งสองแบบนี้ สามารถบดวัตถุได้ทั้งแบบเปียก (Wet Milling) และแบบแห้ง (Dry Milling) [36]

การบดเพื่อได้ประสิทธิภาพที่ดีนั้น มีปัจจัยที่จะควบคุมดังต่อไปนี้

1. ปริมาณของลูกบด
2. ขนาดของลูกบดและสัดส่วนที่เติมลงในหม้อบด
3. ชนิดของลูกบด (Type of Grinding Media)
4. ชนิดของตัวกรูหม้อบด (Liner)
5. ความเร็วในการหมุนของหม้อบด (Critical Speed)
6. ปริมาณของวัตถุดิบที่เติมและปริมาณของตัวทำละลายที่เติม
7. ความสม่ำเสมอและความแข็ง (Hardness) ของวัตถุดิบ
8. ความละเอียดของวัตถุดิบ
9. ปริมาณการเติม Deflocculant และชนิดของ Deflocculant
10. วิธีการเติมวัตถุดิบ และตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพ (Additive)



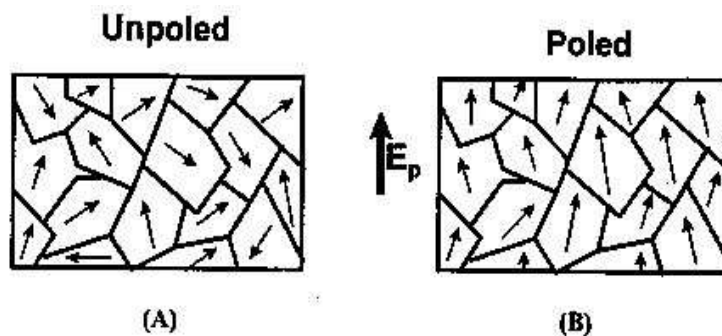
รูป 2.20 แสดงการเคลื่อนที่ของลูกบดและสารภายในหม้อบด [36]

เครื่องบดอนุภาคพลังงานสูง Planetary Ball mill เป็นเครื่องที่สามารถบดได้ทั้งสารที่มีลักษณะแข็งและเปื่อย เครื่องนี้มีประสิทธิภาพสูงสามารถบดวัสดุดังนี้ได้ เช่น ดิน แร่ เซรามิก สารเคมี ยา ลูกบดขึ้นอยู่กับสารที่ใช้ในการบด สามารถใช้กับหม้อที่มีขนาด  $37 \times 53 \times 50$  cm ความเร็วรอบที่สามารถใช้ในการบดอยู่ในช่วง 100 - 650 rpm ขนาดของสารที่สามารถใช้บดประมาณ 10 mm ปริมาณที่บดได้ใน 1 ครั้งคือ 225 ml เครื่องนี้สามารถบดสารให้เล็กลงถึง 1 ไมครอน ในการบดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบดที่ดีนั้น มีปัจจัยที่จะควบคุมดังต่อไปนี้

1. ปริมาณของลูกบดและสัดส่วนสารที่บด
2. ชนิดของลูกบด
3. ชนิดและความแข็งแรงของหม้อบด
4. ความเร็วในการหมุนของหม้อ
5. ค่าการถ่วงน้ำหนักต้องสมดุลกับปริมาณสาร หม้อบด และลูกบด
6. การถ่ายเทความร้อนภายในหม้อบด

## 2.10 กระบวนการโพลิง (Poling process)

สารเซรามิกมีโดเมนต่าง ๆ เป็นแบบสุ่ม (random) ทำให้ค่าโพลาริเซชันสุทธิเท่ากับศูนย์ และไม่แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก สารเซรามิกจะมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกก็ต่อเมื่อได้รับสนามไฟฟ้ากระแสตรงความเข้มสูงเพื่อทำให้ทิศทางโพลาริเซชันแต่ละโดเมนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ไปในทิศทางเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้า กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการโพลิง โดยค่าสนามไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ทำให้โพลาริเซชันหมดไป เรียกว่า สนามไฟฟ้าบังคับ (coercive field) กระบวนการโพลิงจึงจะป้อนสนามไฟฟ้าที่มากกว่าสนามไฟฟ้าบังคับ หรือในอีกความหมายหนึ่ง กระบวนการโพลลิ่งคือ กรรมวิธีในการจัดเรียงไดโพลไฟฟ้าให้ไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าภายนอก โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่ชิ้นงาน โดยภายหลังการโพลลิ่งแล้วไดโพลโมเมนต์ในแต่ละโดเมนจะจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 2.21



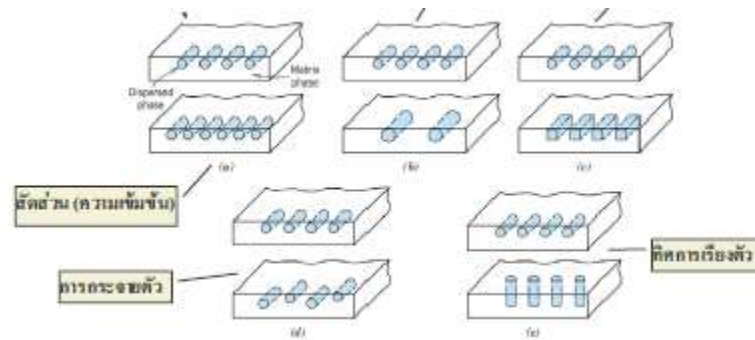
รูป 2.21 แสดงทิศทางการโพลาไรเซชันในเซรามิกส์ทั้งก่อน (unpoled) (A) และหลัง (poled) (B) ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายนอก [37]

### 2.11 วัสดุผสม (Composites)

การพัฒนาวัสดุผสมทำให้เกิดความหลากหลายในการรวมสมบัติวัสดุเข้าด้วยกันมากขึ้น อาจอธิบายอย่างง่ายได้ว่า วัสดุผสมเป็นวัสดุที่มีหลายเฟส โดยแต่ละเฟสที่นำมาประกอบจะแสดงสมบัติที่สำคัญของมันเองเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีมากขึ้นกว่าเดิม ดังนั้น จากหลักการผสมเหล่านี้ ทำให้สามารถรวมสมบัติต่างๆ ที่เข้าด้วยกันโดยการนำวัสดุที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นมารวมกัน และส่งผลให้วัสดุผสมมีคุณสมบัติหลากหลายมาก

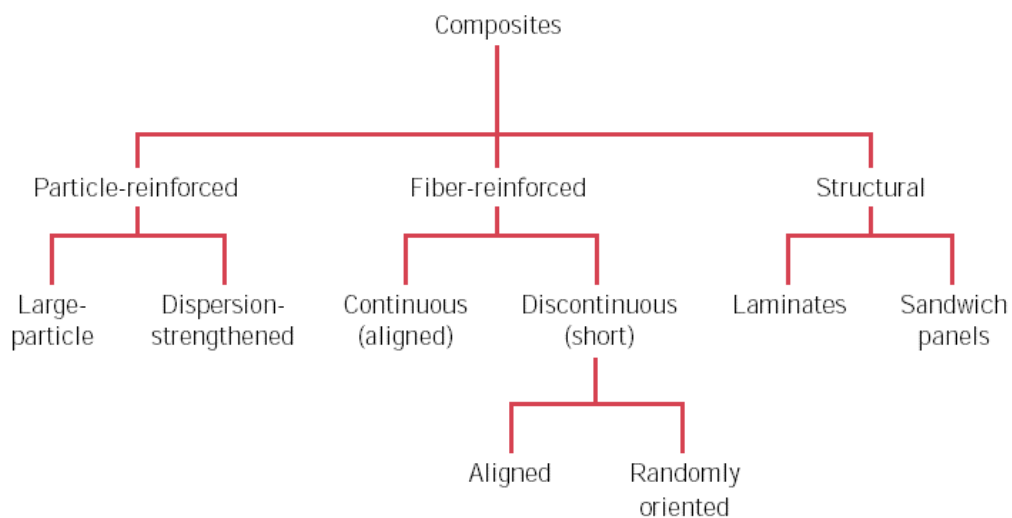
ถ้าจำแนกว่าวัสดุใดเป็นวัสดุผสม จะเห็นว่าวัสดุหลายชนิดจัดเป็นวัสดุผสมได้ปนเปกันยากจำแนกออกได้ชัดเจน ซึ่งรวมถึงโลหะผสม เซรามิก และพอลิเมอร์ที่มีหลายเฟสด้วย ตัวอย่างเหล็กกล้าเพอร์ติก มีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยแถบเฟอร์ไรต์สลับกับซีเมนไรต์ เฟสเฟอร์ไรต์มีสมบัตินิ่มและเหนียวขณะที่ซีเมนไรต์แข็งและเปราะมาก คุณสมบัติทางกลของเพิร์ลไลท์ที่เกิดจากผสมกันนี้ทำให้มีความเหนียวและความแข็งแรงสูง เหนือกว่าคุณสมบัติที่ได้จากเฟสประกอบแต่ละเฟสอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังมีวัสดุผสมที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลสที่แข็งแรงและยืดหยุ่นที่อยู่ล้อมรอบด้วยลิกนินที่มีความแกร่งสูง กระดุกก็เป็นวัสดุผสมตามธรรมชาติที่มีความแข็งแรงแต่อ่อนตัวซึ่งเกิดจากโปรตีนโคลาเจน (collagen) ผสมกับอะพาไทต์ (apatite)

วัสดุผสมประกอบขึ้นจากเฟส 2 ชนิด เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น (matrix) ซึ่งอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบอีกเฟสที่สองไว้ เฟสที่สองจะถูกเรียกว่า เฟสที่กระจาย (dispersed phase) หรือตัวเสริมแรง (reinforcement) คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะเป็นฟังก์ชันหรือขึ้นกับสมบัติของสารตั้งต้น ปริมาณของสารตั้งต้นเหล่านี้และรูปร่างเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัวในเนื้อหานี้คำว่า “รูปร่างทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว” หมายถึงรูปร่างและขนาดของอนุภาค (shape and size) การกระจายตัว (distribution) และการเรียงตัว (orientation) แสดงในรูป 2.22



รูป 2.22 ภาพวาดแสดงอนุภาคของเฟสที่กระจายในเนื้อวัสดุในรูปทรงและการวางเรียงแตกต่างกัน (a) ความเข้มข้น (b) ขนาด (c) รูปร่าง (e) ทิศทางการวางเรียงตัว ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของวัสดุผสม [38]

ประเภทของวัสดุผสมแสดงไว้ในรูปที่ 2.23 ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มหลัก 3 กลุ่ม คือ วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย และวัสดุผสมโครงสร้าง ในแต่ละกลุ่มของสามกลุ่มนี้ยังแบ่งออกเป็น กลุ่มย่อย 2 กลุ่ม ในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคนั้นเฟสที่กระจายตัวจะมีรูปทรงแบบอิกวิแอก (มิติของอนุภาคจะมีขนาดเท่ากันทุกทิศทาง) แต่ในวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยเฟสที่กระจายตัวหรือเฟสเสริมแรงจะมีรูปทรงของเส้นใยนั่นเอง เส้นใยจะมีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูง วัสดุผสมโครงสร้างจะเป็นการผสมรวมกันของวัสดุผสมกันเองและวัสดุเนื้อเดียวเข้าด้วยกัน



รูป 2.23 การแบ่งประเภทของวัสดุผสม [38]

2.11.1 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค (particle-reinforced composites)

จากรูปที่ 2.23 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคจะแบ่งเป็นกลุ่มย่อย 2 กลุ่ม คือ วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่หรือเม็ดผง และวัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็กละเอียด



การจำแนกความแตกต่างระหว่าง 2 กลุ่มนี้ต้องอาศัยกลไกการเพิ่มความแข็งแรง (strengthening mechanism) หรือกลไกการเสริมแรง (reinforcement mechanism)

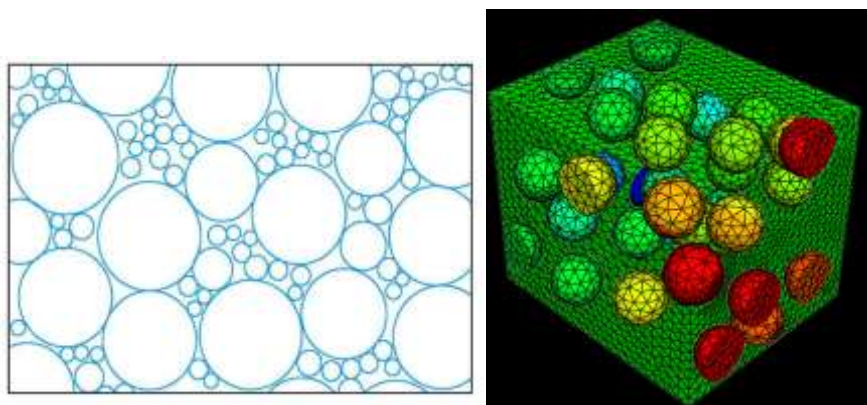
คำว่า “ขนาดใหญ่” เป็นคำที่บ่งชี้ว่าปฏิกริยาระหว่างเนื้อพื้กับอนุภาคไม่กล่าวถึงในระดับโมเลกุลหรือระดับอะตอม ซึ่งการอธิบายกลไกหรือการเพิ่มความแข็งแรงก็ใช้เพียงเรื่องของกลศาสตร์เท่านั้น ในวัสดุผสมประเภทนี้เฟสอนุภาคจะมีความแข็งและมอดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าเนื้อพื้ อนุภาคเสริมแรงเหล่านี้มักจะเหนียวรั้งหรือยับยั้งการเคลื่อนที่ของเนื้อพื้ในบริเวณที่อยู่ใกล้อนุภาคนั้น เนื้อพื้จะส่งผ่านความเค้นเข้าไปสู่อนุภาคที่รับแรงได้สูง ระดับความสามารถในการเสริมแรงหรือการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลขึ้นอยู่กับกลไกการยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อพื้กับอนุภาค

ในกรณีของวัสดุผสมเพิ่มความแข็งแรงด้วยอนุภาคละเอียด อนุภาคเหล่านี้จะมีขนาดเล็กมาก โดยปกติมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.01-0.1 ไมครอน หรือ 10-100 นาโนเมตรเท่านั้น ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนั้นมาจากปฏิกริยาระหว่างเนื้อพื้กับอนุภาคในระดับอะตอมหรือโมเลกุล กลไกความแข็งแรงคล้ายกับการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอน ในขณะที่เนื้อพื้รับแรงกระทำส่วนใหญ่ที่อนุภาคขนาดเล็กที่อยู่กระจายตัวกันก็ยับยั้งการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ดังนั้น จึงเกิดการเปลี่ยนรูปยากขึ้นซึ่งต้องใช้แรงกระทำสูงขึ้นและส่งผลให้ความต้านทานแรงดึง ความแข็งแรงที่จุดคราก และความแข็งสูงขึ้น

### 2.11.2 วัสดุผสมเม็ดผง หรืออนุภาคขนาดใหญ่ (large-particle composites)

วัสดุพอลิเมอร์บางชนิดที่เติมขี้เลื่อย (filler) หรือเศษผงเข้าไปตาม จะจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุผสมผงหรืออนุภาคใหญ่ วัตถุประสงค์การเติมก็เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ หรือเพื่อนำไปใช้ทดแทนเนื้อพอลิเมอร์ที่มีราคาแพงกว่าวัสดุ

วัสดุผสมเม็ดผงอนุภาคขนาดใหญ่ที่รู้จักกันดีอีกชนิดหนึ่งคือคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยซีเมนต์เป็นเนื้อพื้ (matrix) กับเม็ดทรายและก้อนหินกรวดเป็นตัวเสริมแรงชนิดเม็ดผง (particulates) ในคอนกรีต



รูป 2.24 แสดงวัสดุผสมเม็ดผงอนุภาคขนาดใหญ่ [38]

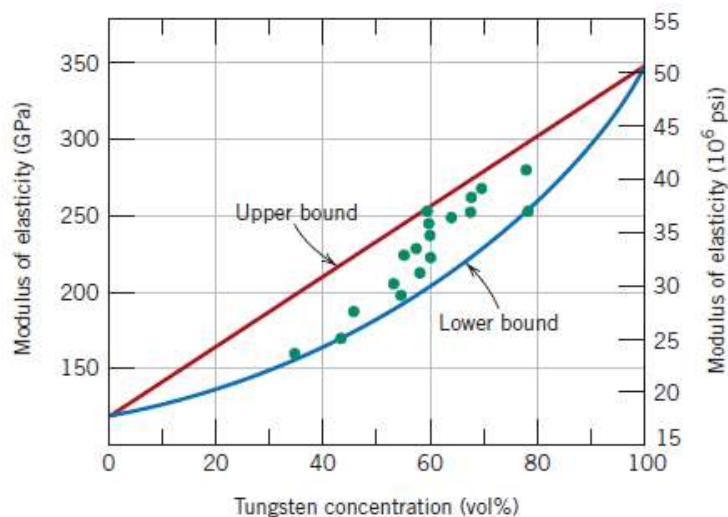
โดยปกติอนุภาคมีรูปร่างแตกต่างกันแต่ประมาณว่ามีขนาดเท่ากันในทุกทิศทาง (อิกวิแอค) ตัวเสริมแรงให้ประสิทธิภาพที่ดีต้องมีขนาดเม็ดผงเล็กและต้องกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วเนื้อพื้น ยิ่งไปกว่านั้นสัดส่วนปริมาตรของเฟสทั้งสองก็จะส่งผลต่อพฤติกรรม เป็นต้นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเสริมแรงชนิดผงมากขึ้น คุณสมบัติทางกลของวัสดุผสมก็สูงขึ้น สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสความยืดหยุ่นกับสัดส่วนปริมาตรของเฟสมีอยู่ 2 สมการ สมการกฎการผสม (rule of mixtures) ใช้ทำนายว่ามอดูลัสความยืดหยุ่นจะมีค่าอยู่ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่าง โดยที่ขอบเขตบน (upper bound) สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \quad (2.8)$$

และขอบเขตล่าง (lower bound) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad (2.9)$$

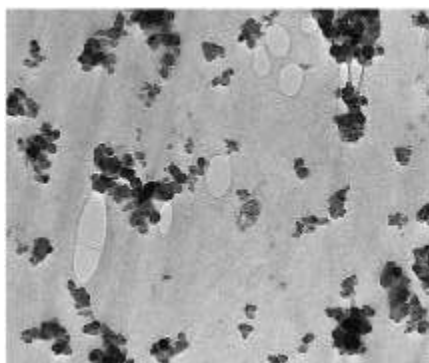
ในสมการนี้  $E$  และ  $v$  แทนมอดูลัสความยืดหยุ่นและสัดส่วนปริมาตรตามลำดับ โดยที่ตัวห้อย  $c$   $m$  และ  $p$  แทนวัสดุผสม เนื้อพื้นและอนุภาค ในรูปที่ 24 แสดงเส้นกราฟทั้งขอบเขตบนและขอบเขตล่างระหว่างค่า  $E_c$  กับ  $V_p$  ในวัสดุผสมทองแดง-ทังสเทนโดยที่ทังสเทนเป็นเฟสอนุภาค ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะอยู่ระหว่างเส้นกราฟทั้งสอง



รูป 2.25 แสดงมอดูลัสความยืดหยุ่นต่อปริมาณทังสเทนวัสดุเนื้อพื้นทองแดง เสริมแรงด้วยอนุภาค ทังสเทนโดยมีขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามสมการ 2.8 และ 2.9 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแสดงเป็นจุดไว้ในรูปด้วย [38]

บ่อยครั้งทั้งอีลาสโตเมอร์และพลาสติกก็สามารถนำมาเสริมแรงได้โดยใช้วัสดุผงอนุภาค ในการใช้งานบางสมัยใหม่จะเกิดปัญหาข้อจำกัดมากทีเดียวถ้าไม่เสริมแรงด้วยอนุภาค เช่น ผง

ถ่านดำ (carbon black) ผงถ่านดำประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมเล็กๆ ของคาร์บอนซึ่งผลิตขึ้นโดยการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันในบรรยากาศที่จำกัดปริมาณอากาศ เมื่อเติมผงถ่านเข้าไปในยาง วัสดุที่มีราคาถูกลงมากตัวนี้จะเพิ่มความต้านทานแรงดึง ความแกร่งและความต้านทานการฉีกขาด และการเสียดสีให้กับยาง ยางรถยนต์จะมีปริมาณผงถ่านดำอยู่ที่ 15-30 vol% ผงถ่านดำนี้จะให้การเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพสูง จำเป็นต้องมีอนุภาคเล็กมากโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 20-50 nm นอกจากนี้ยังต้องกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วเนื้อยางและต้องมีการยึดเหนี่ยวกับเนื้อยางอย่างแข็งแรง ตัวเสริมแรงชนิดอื่น เช่น ซิลิกา จะมีประสิทธิผลน้อยกว่าเพราะไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของยางกับผิวของอนุภาคขึ้น รูปที่ 2.26 เป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยางที่เสริมแรงด้วยผงถ่านคาร์บอนดำ



รูป 2.26 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงอนุภาคเม็ดกลมของผงถ่านคาร์บอนใช้เสริมแรงในยางรถยนต์สังเคราะห์ พื้นที่ที่คล้ายคลึงน้ำเป็นฟองอากาศขนาดเล็กในยาง กำลังขยาย 80,000x [38]

### 2.11.3 เฟสเนื้อพื้น (the matrix phase)

เฟสเนื้อพื้นของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยอาจจะเป็นโลหะ พอลิเมอร์หรือเซรามิก โดยทั่วไปแล้วโลหะและพอลิเมอร์จะถูกนำมาใช้เป็นเนื้อพื้นเพราะมีความเหนียวตามต้องการ ส่วนวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิก เราเสริมแรงเพื่อวัตถุประสงค์ปรับปรุงความต้านทานต่อการแตกหัก ในหัวข้อนี้จะเน้นถึงเนื้อพื้นประเภทพอลิเมอร์และโลหะ

ในวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย เนื้อพื้นจะมีหน้าที่หลายประการ แรกสุดคือมันต้องประสานกับเส้นใยอย่างดีและทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนแรงหรือความเค้นจากภายนอกและกระจายไปสู่เส้นใย ตัวเนื้อพื้นเองจะรับแรงกระทำเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ยิ่งไปกว่านั้นเนื้อพื้นจะต้องเหนียวผนวกกับมอดุลัสของเส้นใยควรจะสูงกว่ามอดุลัสของเนื้อพื้นมาก หน้าที่ประการที่สองของเนื้อพื้นคือ การป้องกันเส้นใยไม่ให้เกิดความเสียหายที่ผิวซึ่งอาจจะมาจากสาเหตุการเสียดสีทางกลหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสภาพแวดล้อม ปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดตำหนิที่ผิว ซึ่งต่อมากลายเป็นรอยแตกขึ้นและนำไปสู่การแตกหักเสียหายที่ระดับความเค้นต่ำได้ หน้าที่ประการสุดท้ายคือเนื้อพื้นต้องแยกเส้นใยออกจากกันและด้วยความนิ่มและความเป็นพลาสติกของเนื้อพื้น จะทำหน้าที่ป้องกันการขยายตัวของรอยแตกจากเส้นใยหนึ่งไปสู่เส้นใยหนึ่งซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเสียหายอย่างทันทีใด เราอาจจะกล่าวได้อีกอย่างว่าเนื้อพื้นต้องมีหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการขยายตัวของรอยแตก แม้ว่าจะมี

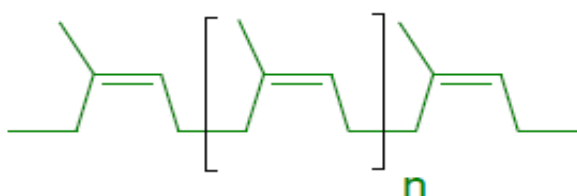
เส้นใยบางเส้นที่เกิดการแตกหักแต่การแตกหักของวัสดุผสมยังไม่เกิดขึ้นจนกว่าเส้นใยส่วนใหญ่จะเกิดการแตกหักและมีขนาดเท่าวิกฤต

สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือ พันธะการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเนื้อพื้นต้องมามีค่าสูงเพียงพอเพื่อลดการหลุดออกของเส้นใย (fiber pull-out) ให้น้อยที่สุด แท้จริงแล้วความแข็งแรงของพันธะเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกเนื้อพื้น-เส้นใยคู่ใดมาผสมกัน ความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุผสมก็ขึ้นอย่างมากขนาดของการยึดเหนี่ยวนี้ พันธะยึดเหนี่ยวที่ดีเพียงพอต้องสามารถให้การถ่ายเทความเค้นจากเนื้อพื้นให้อ่อนแอไปสู่เส้นใยที่แข็งแรงได้มากที่สุด [38]

## 2.12 ยางธรรมชาติ (natural rubber; NR)

### 2.12.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ และสมบัติของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติส่วนมากได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* มีชื่อทางเคมี คือ *cis*-1,4-polyisoprene โครงสร้างยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 2.27 กล่าวคือ มี isoprene ( $C_5H_8$ ) โดยที่  $n$  มีค่าตั้งแต่ 15,000 - 20,000 ส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว จึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ประมาณ  $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$  ใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก สำหรับความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุล ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงอยู่ในช่วง 200,000 - 400,000 กระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ทำให้แข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องมีการบดก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิต โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่บางสภาวะโมเลกุลจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำ หรือเมื่อถูกยึดเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) ทำให้แข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำขึ้นก็จะอ่อนลงกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่เกิดผลึกจากการยึดตัว (strain induced crystallization) มีสมบัติเชิงกลดี ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง



รูป 2.27 ลักษณะโครงสร้างของยางธรรมชาติ [39]

ลักษณะเด่นของยางธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (elasticity) มีความยืดหยุ่นสูง แรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางก็จะกลับคืนรูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว มีสมบัติดีเยี่ยมด้านการเหนียวติดกัน (tack) ยางดิบจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางจะอ่อนนุ่มและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์

จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น

### สมบัติของยางดิบ

ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก นั่นคือ สามารถไหลได้เมื่อได้รับแรงกด ซึ่งเป็นสมบัติของพลาสติก เมื่อเอาแรงออกยางสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้แสดงสมบัติอีลาสติก ทำให้ยางแบนหรือยืดเมื่อได้รับแรงกดหรือแรงดึง แต่เมื่อคลายแรงยางจะกลับคืนรูป แต่ไม่เท่าเดิม

ยางเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) อยู่ในสถานะที่อุณหภูมิต่ำ จะแข็งกระด้าง ถ้าอยู่ในสถานะที่อุณหภูมิสูงยางจะนิ่ม ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด

ยางมีความแข็งแรงต่ำ ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ (Tensile strength) และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ (Abrasion resistance) [40]

### 2.12.2 สารตัวเติมในยาง

สารตัวเติมในยาง มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กเติมลงไปในการเพื่อวัตถุประสงค์หลายอย่าง เช่น สารเสริมแรง สารช่วยในกระบวนการผลิตและขึ้นรูป รวมทั้งเป็นสารลดต้นทุนด้านวัตถุดิบ ทั้งนี้เพราะสารตัวเติมส่วนใหญ่มีราคาถูกกว่ายางธรรมชาติ โดยทั่วไปสารตัวเติมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่เสริมแรง (ได้แก่ เขม่าดำ ซิลิกา และเส้นใยแก้ว) ซึ่งมีอนุภาคเล็กและเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ได้ดี ส่วนกลุ่มที่ไม่เสริมแรง (ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต เคลย์ และทัลคัม) เป็นสารตัวเติมที่มีอนุภาคค่อนข้างใหญ่และมีอันตรกิริยากับยางต่ำ ซึ่งการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง สารตัวเติมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญทั้งที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรงและไม่เสริมแรง โดยทั่วไปปริมาณสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยางมีตั้งแต่ 20-150 ส่วนต่อยางหนึ่งร้อยส่วน (Part per hundred rubber, phr) ซึ่งปริมาณที่ใช้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวเติม จุดประสงค์ของการใช้สารตัวเติม สมบัติและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ [40]

### 2.12.3 สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agent or curing agent)

จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยึดหยุ่นได้สูง “คงรูป” มักเรียกกันว่า “ยางสุก” สารทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulphur) นิยมใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีพันธะคู่ในโมเลกุล และระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) นิยมใช้ในยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ นอกจาก 2 ระบบดังกล่าว สารคงรูปพวกโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ (MgO/ZnO) ในยางสังเคราะห์บางชนิด

**กำมะถัน (sulfur)** กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมาก เพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้ มีสมบัติเชิงกลที่ดี นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ เช่น SBR, IR, BR, NBR

#### 2.12.4 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators)

สารเคมีที่เติมไปในยางปริมาณเล็กน้อยเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้ยางวัลคาไนซ์ให้เร็วขึ้น ส่งผลให้ลดเวลาการวัลคาไนซ์ลง ยางวัลคาไนซ์มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น สารตัวเร่งปฏิกิริยานี้เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน แบ่งกลุ่มของสารตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้เป็นหลายกลุ่ม ดังนี้

**เมอร์แคปโต (mercapto)** ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอชสั้นและมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ปานกลาง ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานต่อความร้อนสูง ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มเมอร์แคปโตนี้ ได้แก่ เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (2-mercaptobenzothiazole; MBT) และไดเบนโซไทอะซิลไดซัลไฟด์ (dibenzothiazyl disulfide; MBTS)

**เบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (benzothiazole sulfenamide)** สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอชที่ยาวขึ้น ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูง และให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ดังนั้น ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นดี และมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง

ตัวอย่างที่สำคัญของสารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide; CBS) บิวทิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-tert.butyl-2-benzothiazole sulfonamide; TBBS) ไดไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N,N'-dicyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide; DCBS) และ มอโฟลิโนไรโอเบนโซไทอะโซล (2-(4-morpholinthio) benzothiazole; MBS) เป็นต้น

#### 2.12.5 สารกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (activators and retarders)

**สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activators)** สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดียิ่งขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก โดยทั่วไป นิยมใช้ซิงก์ออกไซด์ในปริมาณ 2-5 phr ร่วมกับกรดสเตียริกในปริมาณ 1-2 phr

**สารหน่วงปฏิกิริยา (retarders)** สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อยืดระยะเวลาสกรอช ทำให้ลดโอกาสของการเกิดยางตายทั้งในระหว่างการเก็บรักษาอย่างคอมพาวด์และในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ตัวอย่างที่สำคัญของสารหน่วงปฏิกิริยา ได้แก่

1) สารหน่วงปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด เช่น พะทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) กรดซาลิไซลิก (salicylic acid) กรดเบนโซอิก (benzoic acid) และกรดมาลิก (maleic acid)

2) ไซโคลเฮกซิลไทโอพทาไลไมด์ (cyclohexyl-N-thiophthalimide; CTP) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า PVI (pre-vulcanization inhibitor) สารหน่วงชนิดนี้เป็นสารหน่วงที่เพิ่มระยะเวลาสกร้อของยางคอมพาวด์โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ซึ่งต่างจากสารหน่วงปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด [40]

### 2.12.6 สารป้องกันยางเสื่อม (antidegradants)

สารป้องกันการเสื่อมสภาพเป็นสารเคมีที่เติมลงไปในสูตรเคมีเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ส่วนใหญ่นิยมเติมลงไปปริมาณ 1-3 phr สารป้องกันการเสื่อมสภาพมีหลายชนิดทั้งที่เปลี่ยนสียาง เช่น กลุ่มอนุพันธ์ของเอมีน (amine derivatives) และไม่เปลี่ยนสียาง เช่น กลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอล (phenol derivatives) โดยทั่วไป สารป้องกันการเสื่อมสภาพที่เปลี่ยนสียางอย่างรุนแรงจะมีประสิทธิภาพในการปกป้องอย่างสูงกว่าสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ไม่เปลี่ยนสียาง ตัวอย่างที่สำคัญของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ได้แก่ ไอโซโพรพิลฟีนิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylenediamine; IPPD) ไดมethylbutyl-N'-phenyl-p-phenylenediamine; 6PPD) พอลิเมอร์ของไตรเมทิลไดไฮโดรควิโนลีน (2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline; TMQ) ไดบิวทิลครีโซล (2,6-Di-tert-butyl-p-cresol; BHT) และ สไตรีนตฟีนอล (Styrenated phenol; SPH) เป็นต้น [40]

### 2.12.7 สารตัวเติม (Filler)

สารตัวเติม คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อทำให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต หรือเพื่อลดต้นทุน ฯลฯ สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรงได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- 1) สารตัวเติมเสริมแรง ได้แก่ เขม่าดำ และซิลิกา
- 2) สารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง ได้แก่ ดินขาว ทัลคัม แคลเซียมคาร์บอเนต ฯลฯ

**เขม่าดำ (carbon black)** เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง มีหลายเกรด โดยแต่ละเกรดจะมีสมบัติพื้นฐานโดยเฉพาะขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ พื้นที่ผิว และโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้น เขม่าดำแต่ละเกรดจึงมีความสามารถในการเสริมแรงในยางได้ไม่เท่ากัน การเลือกใช้เกรดของเขม่าดำให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์จึงเป็นเรื่องที่สำคัญ

**ซิลิกา (silica)** นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง โดยเฉพาะในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งแสงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (หมู่ -OH) หรือหมู่ซิลานอลอยู่ในปริมาณมาก ทำให้มีความเป็นขี้สูง ซิลิกาจึงแตกตัวและเข้ากับยางที่ไม่มีขี้ได้ยาก นอกจากนี้ หมู่ซิลานอลดังกล่าวยังสามารถดูดซับสารกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ได้ช้าลงและมีระดับของการวัลคาไนซ์ต่ำลง ดังนั้นจึงต้องแก้ปัญหาด้วยการเติมสารเคมีที่สามารถทาปฏิกิริยาได้ง่ายกับหมู่

ไซลานอล เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) ไทรเอ-ทานอลามีน (triethanolamine) หรือเฮกซะเมทิลีนเททระมีน (hexamethylene tetramine, HEXA) รวมถึงการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น DPG หรือ DOTG ลงไปในสูตรเคมียางด้วย

นอกจากนั้น ยังต้องมีการเติมสารเคมีที่เรียกว่า สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) ลงไปเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างยิ่งยั้ง และยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลและพลวัตดีขึ้น

ตัวอย่างของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้กันมาก ได้แก่ ไทรเอทอกซีซิลิลโพรพิลเททระ-ซัลไฟด์ (bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide; Si-69) เมอร์แคปโตโพรพิลไทรเมทอกซีไซเลน (mercaptopropyl - trimethoxysilane; A-189) ไทโอไซยาเนโตโพรพิลไทรเอทอกซีไซเลน (3-thiocyanato-propyl-triethoxysilane; Si-264) เป็นต้น

สารตัวเติมอื่นๆ นอกเหนือจากเขม่าดำ และ ซิลิกา ได้แก่ ดินขาวหรือเคลล์ (clay) แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ทัลคัม (talcum) ซึ่งสารเหล่านี้ไม่เสริมแรงจนถึงเสริมแรงได้ปานกลาง ขึ้นกับขนาดของอนุภาค แต่จะช่วยลดต้นทุน และทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างง่ายดาย [40]

## 2.13 การผสมยางกับสารเคมี (Rubber and Chemical Mixing)

ในการผสมยางนั้น เครื่องจักรที่จำเป็นต้องใช้ในการผสมยางก็คือ เครื่องผสมยางซึ่งเครื่องผสมยางที่ใช้กันทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามรูปแบบการใช้งานดังนี้

### 2.13.1 เครื่องผสมยางระบบเปิด

เครื่องผสมยาง 2 ลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) เป็นเครื่องที่นิยมใช้กันมาตั้งแต่อดีต ซึ่งมีลักษณะเป็นลูกกลิ้ง 2 ลูกกลิ้ง ซึ่งการทำงานลูกกลิ้ง 2 ลูกจะหมุนเข้าหากัน แต่อัตราของการหมุนของลูกกลิ้งแต่ละลูกจะแตกต่างกัน แล้วแต่ว่าจะออกแบบอย่างไร ส่วนใหญ่แล้ว ลูกกลิ้งลูกที่หมุนช้าจะอยู่ด้านหน้าผู้ใช้ และลูกกลิ้งตัวหลังจะหมุนเร็ว แต่บางครั้งเพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่าย ก็มีการออกแบบให้ลูกกลิ้งตัวหน้าหมุนเร็วกว่าเพราะยางบางชนิดโดยเฉพาะยางสังเคราะห์จะชอบพันลูกกลิ้งที่มีความเร็วสูง ดังนั้นหากออกแบบให้ลูกกลิ้งตัวหน้าหมุนเร็วก็จะทำให้สามารถผสมได้ง่ายขึ้น

ข้อเสียของเครื่องผสมยาง 2 ลูกกลิ้ง

- ใช้ระยะเวลาในการผสมค่อนข้างนาน
- ประสิทธิภาพการผสมขึ้นอยู่กับทักษะของผู้ปฏิบัติการ
- มีฝุ่นละอองและความสกปรกสูง
- ควบคุมความสม่ำเสมอของคุณภาพยางในแต่ละครั้งได้ยาก





รูป 2.28 เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) [41]

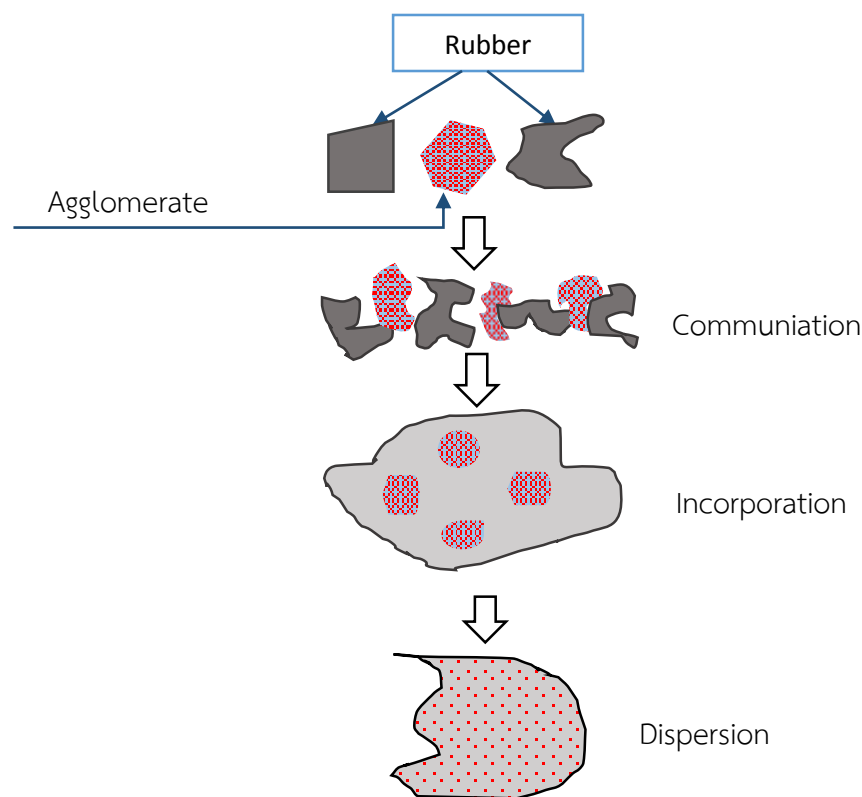
### 2.13.2 เครื่องผสมยางระบบปิด

เป็นเครื่องผสมยางขนาดใหญ่ มีความสามารถบดยางและผสมยางกับสารเคมีได้ในปริมาณมากกว่าเครื่องผสมสารระบบเปิด สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วเครื่องบดผสมแบบปิด การบดผสมจะเกิดในห้องผสม โดยมีกระบอก (Ram) ที่มีน้ำหนักกดลงมาภายในห้องผสมมีโรเตอร์ 2 ชุดขนานกัน ที่ผิวของโรเตอร์มีลักษณะเป็นใบมีด ดันยางและสารเคมีเข้าผสมกับเครื่องผสมระบบปิดมีความเหมาะสมและมีความจำเป็นอย่างยิ่งกับการบดผสมในปริมาณมาก และโดยเฉพาะกับการบดผสมที่มีส่วนประกอบของสารพวกเขม่าดำ เพราะจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการฟุ้งกระจายของเขม่าดำ



รูป 2.29 เครื่องผสมยางระบบปิด (Internal Mixer) [41]

การบดย่อยยาง (Mastication) สำหรับการบดย่อยยางนี้มีชื่อเรียกทางเทคนิคว่า มาสติเคชัน (Mastication) การบดย่อยยางเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการผสมยางโดยเฉพาะยางที่มีความหนืดสูงๆ เช่น ยางธรรมชาติ เพราะเป็นยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง การบดย่อยยางทำให้ความหนืดของยางต่ำลง หรือ ทำให้อย่างนิ่มลงและสามารถผสมสารเคมีเข้าไปได้ง่ายและการกระจายตัวของสารต่างๆ ที่ใส่ลงไปก็ง่ายและเป็นเนื้อเดียวกันด้วย แต่สำหรับยางสังเคราะห์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำการบดย่อยยางไม่ค่อยมีผล และการเลือกใช้ยางสังเคราะห์ก็สามารถเลือกใช้ยางที่มีความหนืดหรือน้ำหนักโมเลกุลที่ต้องการได้ในระหว่างการบดย่อยยาง โมเลกุลของยางจะถูกตัดให้ขาดด้วยแรงเชิงกล (แรงเฉือน) ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลง ประสิทธิภาพของกระบวนการบดย่อยยางจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ รวมไปถึงชนิดและปริมาณของสารเปปไทเซอร์ (Peptizer) ที่อุณหภูมิต่ำ ความหนืดของยางจะค่อนข้างสูง ดังนั้น แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเครื่องผสมก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย ส่งผลทำให้การตัดขาดของโมเลกุลยางส่วนใหญ่เกิดจากแรงเชิงกล (ผลของแรงเฉือน) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดของยางก็จะลดลง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นก็จะลดลงไปด้วย ประสิทธิภาพของกระบวนการบดย่อยยางอันเนื่องมาจากแรงเชิงกลก็จะลดลง อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีการเติมสารเปปไทเซอร์ลงไป ประสิทธิภาพของการบดย่อยยางก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิเพราะสารเปปไทเซอร์จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง ความหนืดของยางที่ลดลงจากแรงเชิงกลและสารเปปไทเซอร์จะเกิดขึ้นอย่างถาวรแต่การลดลงเนื่องจากความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจเกิดแบบถาวรหรือชั่วคราวนั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของยางด้วย การบดผสมสารเคมีเข้าไปในยาง เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในกระบวนการแปรรูปยางทำให้ยางดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทั้งทางฟิสิกส์และทางเคมี เริ่มต้นจากการบดยางให้นิ่มลง แล้วเติมสารเคมีต่างๆ ลงไป โดยสารเคมีเหล่านี้จะช่วยให้ยางแปรรูปได้ง่ายหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติตามต้องการ โดยยางที่ผสมสารเคมี เราเรียกว่ายางผสมสารเคมี (Rubber Compound) และยางที่ผสมสารเคมีเพียงหนึ่งชนิดเรียกว่า Master batch เช่น 50% กำมะถัน Master batch หมายถึง ยางดิบกำมะถัน 50 ส่วน ใน Compound 100 ส่วน ขั้นตอนการผสมสารเคมีเข้าไปในยางมี 3 ขั้นตอนดังนี้ การบดย่อยให้ยางเป็นชิ้นเล็กๆ (Communiation) การอัดสารเคมีให้เข้าไปในยาง (Incorporation) การทำให้สารเคมีเข้าไปในยางนั้นแผ่กระจาย (Dispersion) [41]



รูป 2.30 การผสมสารเคมีเข้าไปในยาง [41]

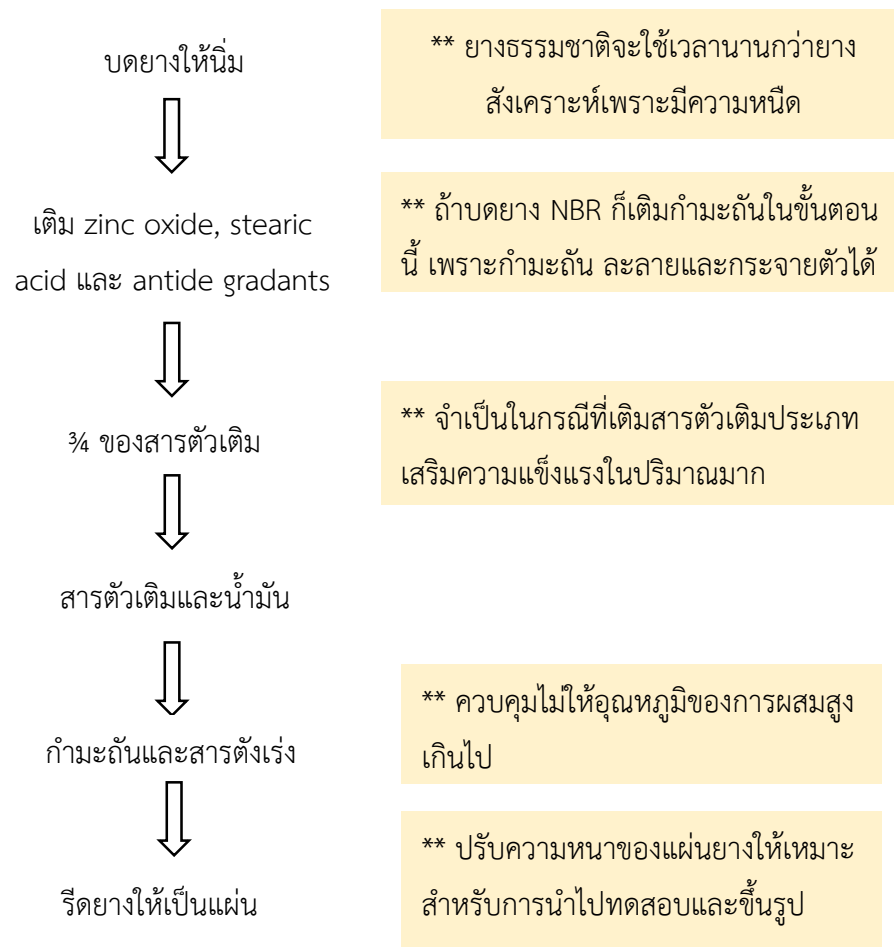
ขั้นตอนที่ 1 เป็นกระบวนการก่อนการผสมสารเคมี จะย่อยยางแท่งให้ฉีกขาดและอ่อนตัวลง เป็นการย่อยให้โมเลกุลเล็กลง โดยอาศัยพลังงานกลจากเครื่อง Two Roll Mill จนกระทั่งยางอ่อนตัวอยู่ในสถานะความเป็นพลาสติกที่มีความหนืดและเลื่อนไหลได้

ขั้นตอนที่ 2 เป็นกระบวนการการที่เกิดขึ้นในขณะที่ใส่สารเคมี จะเกิดการผสมระหว่างยางกับสารเคมี (Incorporation) โดยผงสารเคมีจะถูกอัดติดกับยางจนกระทั่งสารเคมีเข้าไปในยางจนหมด และขนาดของ Batch size จะลดลงเพราะอากาศในสารเคมีถูกไล่ออกไป ทำให้ยางผสมสารเคมีความหนาแน่นสูงขึ้น ดังนั้นการเพิ่มความหนาแน่นเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการผสมได้อีกด้วย

ขั้นตอนที่ 3 เป็นกระบวนการที่สารเคมีแผ่กระจายในเนื้อยาง ในขณะเดียวกันสารเคมีที่มีการรวมตัวกันอย่างหลวม ๆ Agglomerate จะแตกออกจากกันจนกระทั่งขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.1 ไมครอน การกระจายตัวของสารเคมีในยางจะเกิดขึ้นมากในบริเวณที่เกิดความเครียดเฉือนสูง ๆ

ขั้นตอนการบดผสม (Mixing Step) อย่างมีประสิทธิภาพและบดให้มีความสม่ำเสมอ ลำดับขั้นตอนการเติมสารเคมีต่างๆ ต้องเป็นไปตามขั้นตอนอย่างถูกต้อง หลักการคือ หลังจากการบดยางให้ نرم ก็เติมสารที่บดให้กระจายในเนื้อยางได้ยากก่อน เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก

(Stearic Acid) ผงเขม่าดำ เพราะช่วงนี้อุณหภูมิในการบดยังต่ำ มีความหนืดสูง แรงกระทำเชิงกลจึงมีมาก เต็มสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง สารอื่นๆ น้ำมัน สารที่แนะนำให้เติมลำดับสุดท้าย คือ สารตัวเร่ง กำมะถัน สารป้องกันยางตาย (Scorch) ยางที่ได้หลังจากที่ผสมสารเคมีต่างๆ เรียกร้อยแล้วจะเรียกว่า ยางคอมพอนด์ (Rubber Compound)



รูป 2.31 ขั้นตอนการผสมยางและสารเคมี [41]

### บทที่ 3

## วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

3.1.1 เลดออกไซด์ (PbO) ความบริสุทธิ์  $\geq 99\%$  (บริษัท TOPLUS, China) เป็นสารในกลุ่มเพียโซอิเล็กทริกมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีเป็นสารประกอบของ  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.65}Ti_{0.35}O_3$  (PMNT)

3.1.2 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ความบริสุทธิ์  $\geq 99\%$  (บริษัท TOPLUS, China) ทำการเตรียมด้วยวิธีการโคลัมไบท์ พรีเคอร์เซอร์ (Columbite precursor) เพื่อให้ได้เป็นองค์ประกอบ PMNT

3.1.3 ไนโอเบียม ( $Nb_2O_5$ ) ความบริสุทธิ์ 99.9% (บริษัท TOPLUS, China) เพื่อไม่ให้เกิดเฟสไพโรคลอจากสาร  $Nb_2O_5$  กับ PbO จึงต้องทำการเตรียมสารด้วยวิธีการโคลัมไบท์ พรีเคอร์เซอร์ (Columbite precursor) เทคนิคนี้เริ่มจากการให้ MgO และ  $Nb_2O_3$  ทำปฏิกิริยากันเพื่อเกิดโครงสร้างแบบโคลัมไบท์  $MgNb_2O_6$  (MN)

3.1.4 ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ความบริสุทธิ์ 99.9% (บริษัท TOPLUS, China) เป็นหนึ่งในสารประกอบในเซรามิก PMNT เป็นสารในกลุ่มเพียโซอิเล็กทริก

3.1.5 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ทำหน้าที่เป็นสารยึดเกาะระหว่างอนุภาคของสาร PMNT ในกระบวนการอัด

3.1.6 ผงอลูมินา (บริษัท TOPLUS, China)

3.1.7 เอทานอล ความบริสุทธิ์ 99% ทำหน้าที่เป็นทำละลายในการบดผสมแบบเปียกให้สารสามารถผสมเข้ากันได้ดี

3.1.8 ไดเบนโซโทอะซิลไดซัลไฟด์ (dibenzothiazyl disulfide; MBTS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งหลัก สุกเร็วปานกลางสำหรับยาง

3.1.9 ไดบิวทิลครีโซล (2,6-Di-tert.butyl-p-cresol; BHT) สารป้องกันการเสื่อมสภาพเป็นสารเคมีที่เติมลงไปในสูตรเคมีเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์

3.1.10 กำมะถัน (sulfur) ทำหน้าที่ เป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้เร็ว และยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ระบบนี้นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่

3.1.11 กรดสเตียริก (stearic acid;  $C_{18}H_{36}O_2$ ) ทำหน้าที่กระตุ้นให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดียิ่งขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันที่นิยมใช้กันมากที่สุด

3.1.12 ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide;  $SiO_2$ ) สารตัวเติม คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี

3.1.13 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO) ทำหน้าที่ สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูงมากในการเร่งอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอซันและเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อได้รับการวัลคาไนซ์นานเกินไป ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก และไม่ทำให้สีของยางเปลี่ยนแปลงไป

3.1.14 ยางธรรมชาติ (ยางแท่ง STR 5L) ทำหน้าที่เป็นเนื้อพื้นให้แก่วัสดุผสมเมื่อได้รับแรงกระทำจะส่งผ่านแรงไปยังเฟสเฟียโซอีเล็กทริก

## 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เตอบไฟฟ้า

3.2.2 เตอบไฟฟ้า Carbolite RHF 1600 °C

3.2.3 ถ้วยครุชเชิลทำจากอลูมินา

3.2.4 หม้ออบโพลีเอทีลีน

3.2.5 ลูกบดอิตเทรียมสเทบิลไอเซอะเซอร์โค (Yttria stabilized zirconia)

3.2.6 เครื่องวัดค่าคงที่เฟียโซอีเล็กทริก เครื่อง d33 Meter รุ่น YE2730A

3.2.7 เครื่องวัดค่าแรงดึงของวัสดุ (Univesal testing machine ; UTM)

3.2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM และ EDX) รุ่น JSM-5800 LV (SEM5800)

3.2.9 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นโตมิเตอร์ (X-ray diffraction meter : XRD) รุ่น X'Pert MPD ยี่ห้อ Philips

3.2.10 เครื่อง LCR meter รุ่น E4980A ยี่ห้อ GW INSTEX ทำหน้าที่ ตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMNT/ZnO และวัสดุผสมเฟียโซอีเล็กทริก

3.2.11 เครื่องซึ่งสารระบบดิจิตอล ทศนิยม 2, 4 ตำแหน่ง

3.2.12 เครื่องผสมยางระบบปิด (Internal Mixer) ทำหน้าที่ ผสมยางและสารเคมีจะถูกบีบขนาดผสมคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิของห้องผสมและโรเตอร์ได้ดีกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบบุรี จึงมีประสิทธิภาพการผสมที่สูงมาก สารตัวเติมสามารถแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ดี

3.2.13 เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ทำหน้าที่ ทำให้เกิดแรงเฉือนที่จำเป็นต่อการบดผสมยางกับสารเคมียาง ในการผสมยางกับสารเคมียางจะใส่ยางลงช่องระหว่างลูกกลิ้ง ยางจะถูกรีดออกมาเป็นแผ่นรอบลูกกลิ้งด้านหน้า จากนั้นจึงเติมสารเคมียาง

3.2.14 เครื่องอัดไฮโดรลิกและแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป ทำหน้าที่ขึ้นรูปชิ้นงานให้เป็นแผ่นเซรามิก และแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร

3.2.15 เครื่อง PicoScope (Pico technology, ประเทศอเมริกา) ทำหน้าที่เป็นวงจรที่ตรวจสอบ ค่าความต่างไฟฟ้าของวัสดุผสมเฟียโซอีเล็กทริก

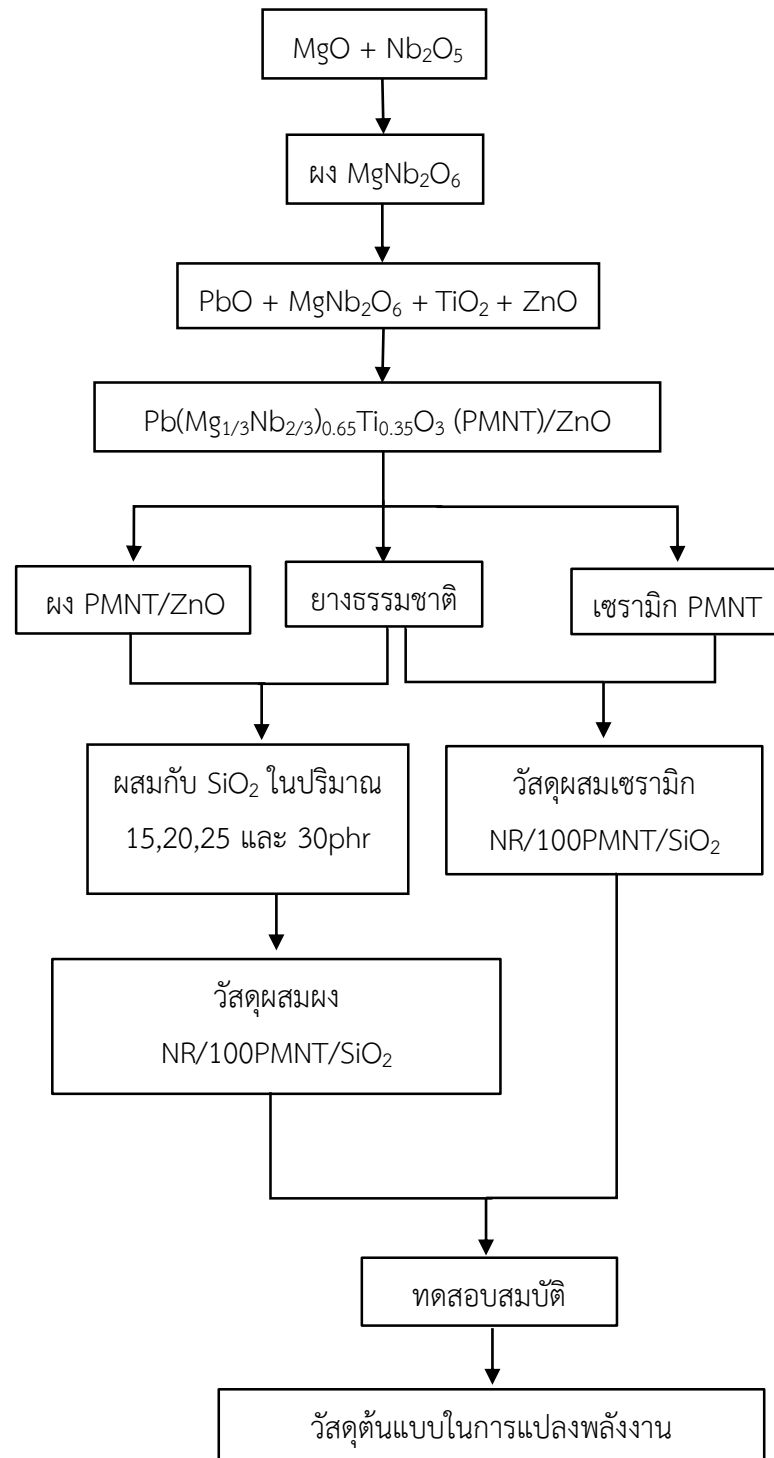
3.2.16 เครื่องวัดความแข็ง (hardness tester) ใช้แบบ shore durometer รุ่น PTC 408 ความแข็งที่ทดสอบได้มีหน่วยเป็น shore A

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 รายละเอียดการทดลอง

การเตรียมวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้นแบ่งการเตรียมออกเป็น 3 กระบวนการ 1. การเตรียมเซรามิก  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.65}Ti_{0.35}O_3$  (PMNT) ที่แต่งเติมด้วยซิงค์ออกไซด์ (PMNT/ZnO) 2. การเตรียมวัสดุผสมผง NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ที่การเติม SiO<sub>2</sub> 15 20 25 และ 30 phr และ 3. การเตรียมวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ที่การเติม SiO<sub>2</sub> 15 20 25 และ 30 phr ดังแสดงในรูปที่ 3.1

การเตรียมเซรามิก PMNT/ZnO เริ่มจากการเตรียมผง  $MgNb_2O_6$  โดยวิธีการโคลัมไบท์ ปริเคอร์เซอร์ (Columbite precursor) เทคนิคนี้เริ่มจากการให้ MgO และ Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ทำปฏิกิริยากันเพื่อเกิดโครงสร้างแบบโคลัมไบท์  $MgNb_2O_6$  นำสารที่ได้ไปผสมต่อกับสาร PbO TiO<sub>2</sub> และ ZnO จะได้เป็นผงเซรามิก  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.65}Ti_{0.35}O_3$  ที่แต่งเติมด้วยซิงค์ออกไซด์ (PMNT/ZnO) จากนั้นนำไปผสมกับยางธรรมชาติและ SiO<sub>2</sub> ในกระบวนการที่ 2 และ 3 ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



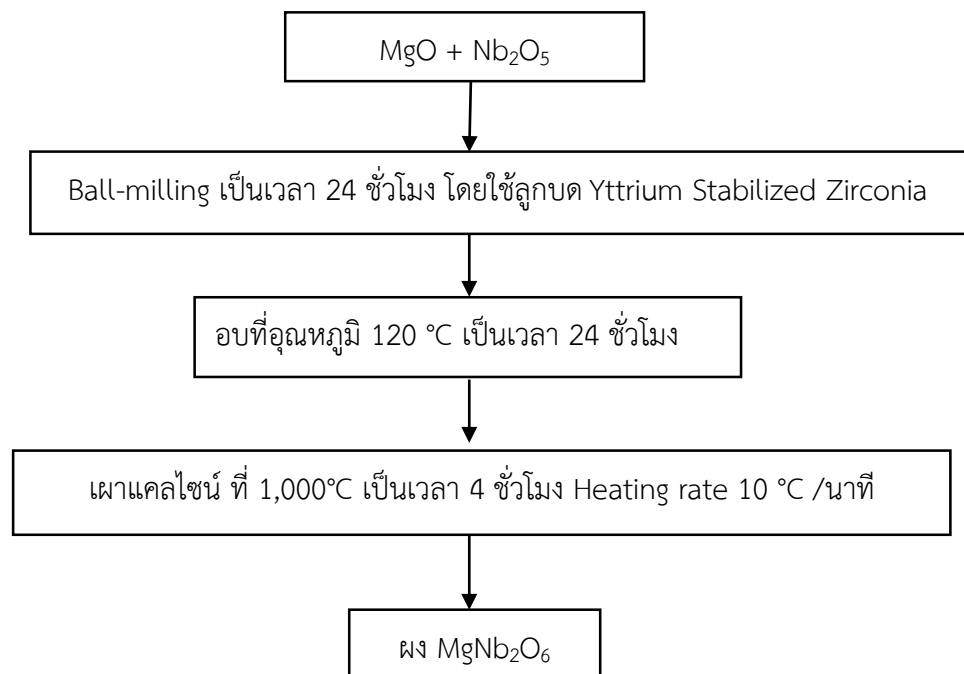
รูป 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองโดยสรุป



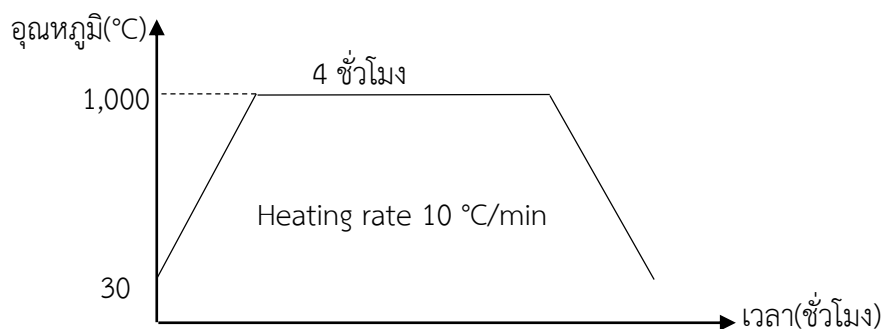
### 3.3.2 การเตรียมผงแมกนีเซียมไนโอเบต

กระบวนการเตรียมผงแมกนีเซียมไนโอเบต (MN) แสดงในรูป 3.2 โดยวิธีการโคลัมไบต์ พรีเคอร์เซอร์ (Columbite precursor) นำแมกนีเซียมออกไซด์ผสมไนโอเบียมออกไซด์ บดผสมในหม้อบดโพลีเอทิลีน (PE) โดยใช้ลูกบดอิตเทรียมสเตบิลIZED เซอร์โคเนียโคเน็ยเดียมเอทานอลเป็นตัวกลางในการบดย่อย บดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำให้แห้งด้วยการอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปเผาแคลไซน์ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ เท่ากับ 10 °C/นาที ดังแสดงในรูป 3.3

ซึ่งการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นทั้งสอง เป็นไปดังสมการ



รูป 3.2 แผนผังแสดงการเตรียมผงแมกนีเซียมไนโอเบต

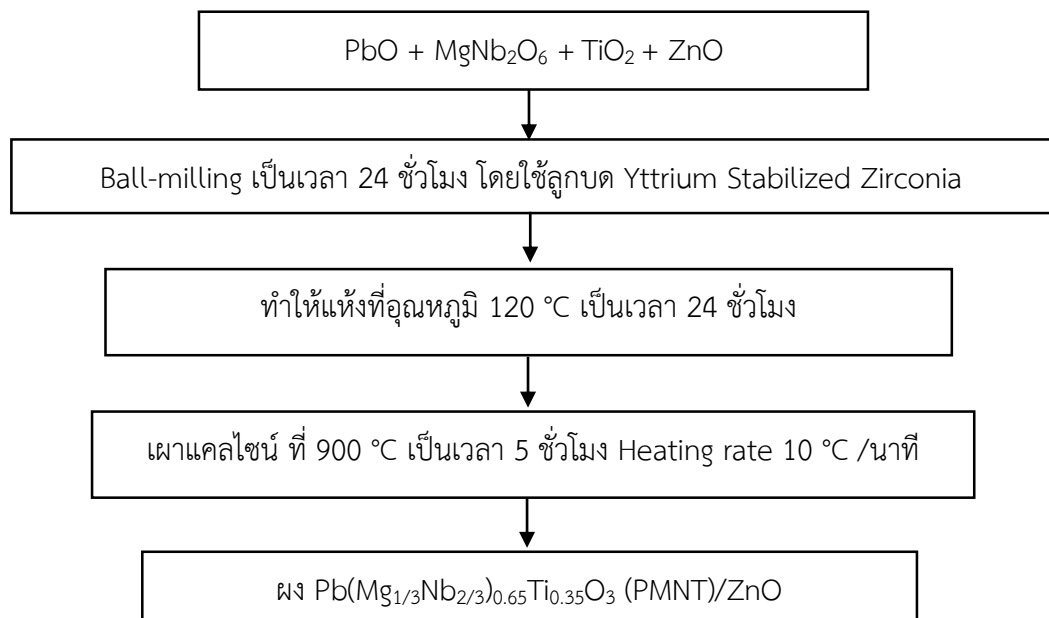
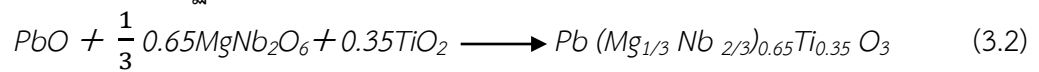


รูป 3.3 แสดงการให้ความร้อนในการเผาแคลไซน์ผงแมกนีเซียมไนโอเบต

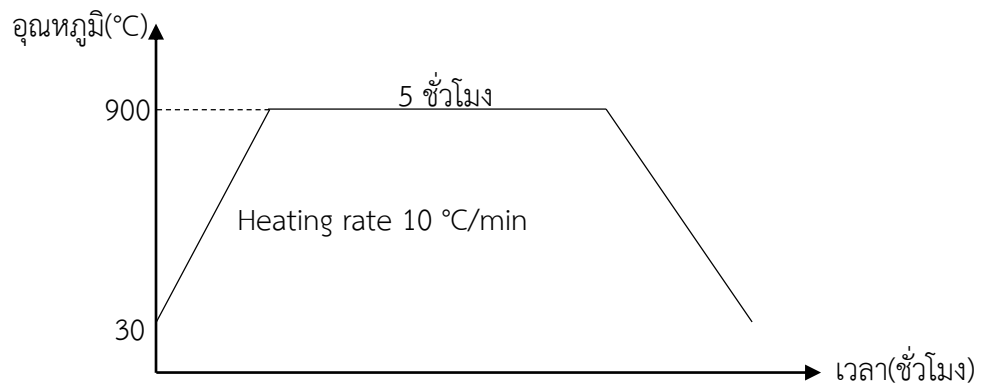
### 3.3.3 การเตรียมผงเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์

กระบวนการเตรียมผงเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์ แสดงในรูป 3.4 นำสารตั้งต้น ได้แก่ เลดออกไซด์ แมกนีเซียมไนโอเบต (จากกระบวนการที่ 3.3.2) ไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ 0.1 wt% บดผสมเข้าด้วยกัน โดยใช้ลูกบดอิตเทรียมสเตบิลไลเซอเซอร์โคเนียและเติมเอทานอลลงในหม้อบดเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการบดย่อย โดยบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปเผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ เท่ากับ 10 °C/ นาที ดังแสดงในรูป 3.5

โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการ



รูป 3.4 แผนผังแสดงการเตรียมผงเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์



รูป 3.5 แสดงการให้ความร้อนในการเผาแคลไซน์

### 3.3.4 วิธีการขึ้นรูปวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก

ขั้นตอนการขึ้นรูปวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น ในงานวิจัยนี้ทำการขึ้นรูป 2 แบบ ดังนี้คือ 1) การเตรียมวัสดุโดยใช้ผงเซรามิกเป็นเฟสกระจายตัว NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> และ 2) การเตรียมวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดดังหัวต่อไปนี้

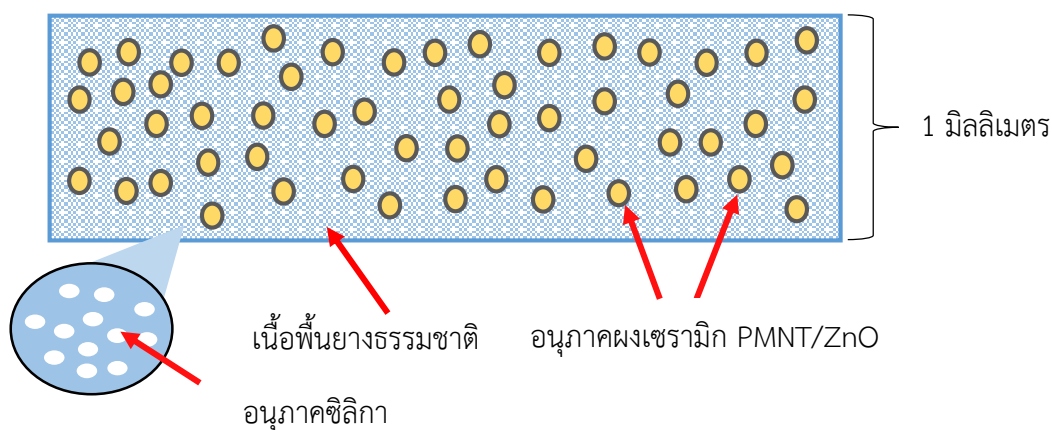
#### 3.3.4.1 การเตรียมวัสดุผสมโดยใช้ผงเซรามิกเป็นเฟสกระจายตัว NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

กระบวนการเตรียมวัสดุผสมโดยใช้ผงเซรามิก PMNT ที่แต่งเติมด้วย ZnO เป็นเฟสกระจายตัวในเนื้อพื้นยางธรรมชาติโดยเติมในปริมาณ 100 phr และเติม SiO<sub>2</sub> ปริมาณ 0 15 20 25 และ 30 phr ดังแสดงอัตราส่วนสารเคมีในตารางที่ 3.1

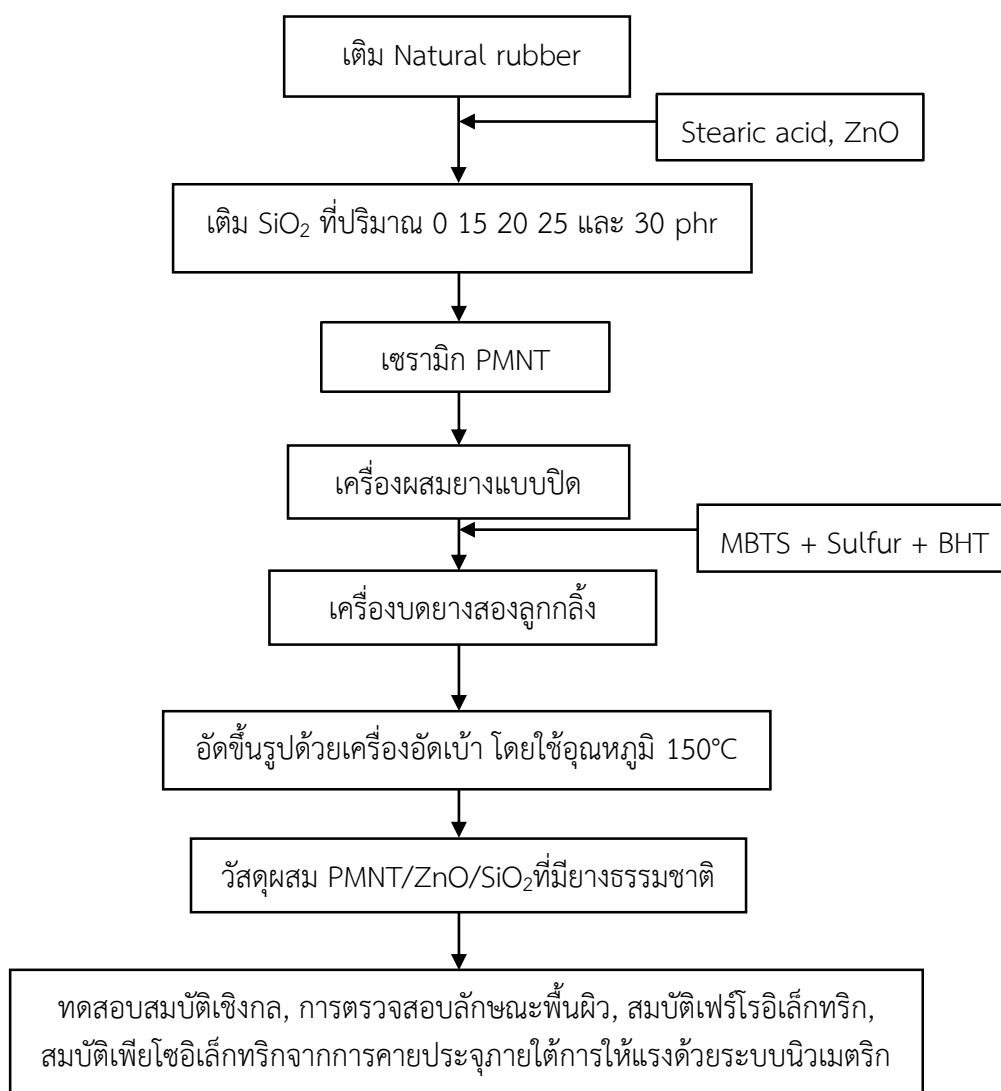
เริ่มจากการนำยางธรรมชาติผสมเข้าไปในเครื่องผสมยางแบบปิด เป็นเวลา 3 นาที นำสาร Stearic acid ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นเข้าไประยะเวลา 1 นาที เติม ZnO เข้าไปบดเป็นเวลา 1 นาที เติม SiO<sub>2</sub> ที่ 0 15 20 25 และ 30 phr เข้าไปบดเป็นเวลา 2 นาที และเติมผงเซรามิก PMNT/ZnO 100 phr เข้าไปบดเป็นเวลา 15 นาที โดยมีความเร็วโรเตอร์ 60 rpm อุณหภูมิไม่เกิน 70 °C เนื่องจากสารข้างต้นผสมเข้ากับยางได้ยากจึงจำเป็นต้องทำการผสมในเครื่องผสมยางแบบปิดก่อน จากนั้นนำยางที่ได้ไปผสมต่อในเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งเพื่อเติม MBTS ทำหน้าที่สารตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อย่างมีระยะเวลาสกรอชที่ยาวขึ้นอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงช่วยต้านการเสื่อมของยาง เติม Sulfur เพื่อทำหน้าที่ เป็นสารวัลคาไนซ์ ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้เร็ว และเติม BHT เพื่อช่วยเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันในยาง ทำการขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้าที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 200 psi จะได้เป็นวัสดุผสม PMNT ที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้นมีความหนา 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป 3.6 ทำการตรวจสอบสมบัติทางกล โดยการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ด้วยเครื่อง Univesal testing machine (UTM), การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM), วิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS,EDX) สมบัติเพียโซอิเล็กทริกโดยเครื่องวัดประจุภายใต้การให้แรงด้วยระบบนิวเมตริก ดังแสดงกระบวนการทั้งหมดในรูป 3.7

ตาราง 3.1 แสดงอัตราส่วนของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกมิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไททานเนตที่แต่งเติมด้วยซิงค์ออกไซด์ผสมกับยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อพื้นที่ปริมาณซิลิกา 15 20 25 และ 30 phr

Ingredients	Quantity (phr)
NR(STR 5L)	100
Zinc oxide	5
Stearic acid	1
PMNT	100
Silica	0,15, 20, 25, 30
Dibenzthiazyl disulphid (MBTS)	1
Butylated hydroxytoluene (BHT)	1
Sulfur	2.5



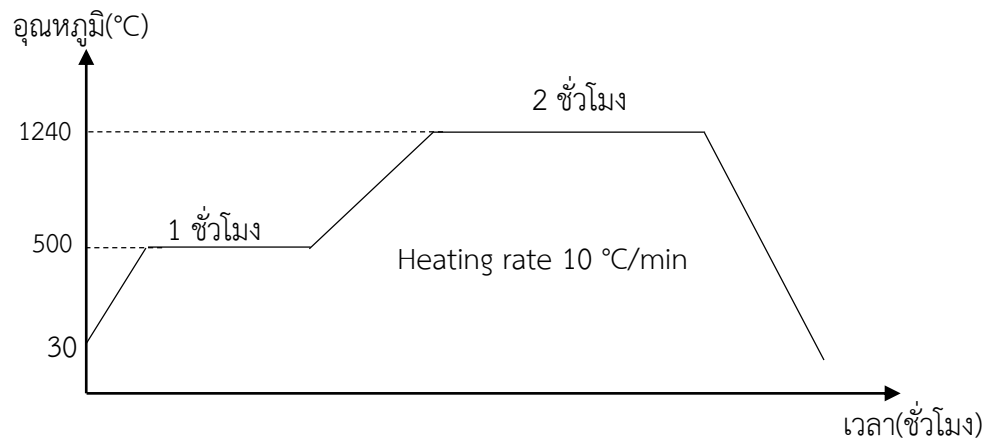
รูป 3.6 แสดงภาพตัวอย่างผงเซรามิกเป็นเฟสกระจายตัว NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>



รูป 3.7 แผนผังแสดงเตรียมวัสดุผสมแบบผงเซรามิก PMNT/ZnO/SiO<sub>2</sub> เป็นเฟสกระจายตัวในเนื้อพื้นยางธรรมชาติ

### 3.3.4.2 การเตรียมวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

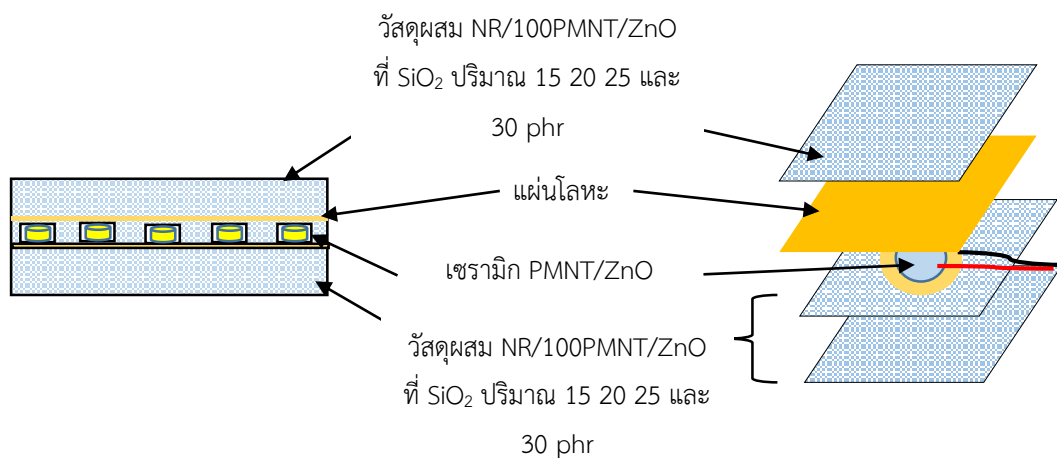
เริ่มจากการอัดขึ้นรูปผงเซรามิก PMNT/ZnO โดยการหยด PVA (polyvinyl alcohol) ความเข้มข้น 0.1 wt% 1 หยดเพื่อเป็นสารช่วยยึดเหนี่ยว ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกภายใต้แรงดัน 1 ตัน ค้างไว้เป็นเวลา 10 วินาที นำชิ้นงานไปทำการเผาอบผนังแบบ 2 ชั้นตอน ชั้นที่ 1 ให้อุณหภูมิ 500°C แช่วีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้สารอินทรีย์ระเหยออกจากชิ้นงาน ชั้นที่ 2 อุณหภูมิ 1,240 °C แช่วีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกรนเกิดการโตขึ้นและรูพรุนลดน้อยลง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที ดังรูป 3.8



รูป 3.8 แสดงการให้ความร้อนในการเผาซินเตอร์เซรามิก PMNT/ZnO

จะได้ชิ้นงานเซรามิกที่มีลักษณะแท่งตันทรงกระบอก ทำการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงานโดยการทดสอบในขั้นแรกจะทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานโดยใช้หลักการอาคิมิตีส เมื่อได้ค่าความหนาแน่นที่เหมาะสมตามทฤษฎี จากนั้นจะทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าจะต้องทำการเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบโดยทำการขัดให้ชิ้นงานมีความหนา 1 มิลลิเมตร เพื่อง่ายต่อการตอบสนองของสนามไฟฟ้าทำการทากาวเงินเพื่อทำขั้วไฟฟ้าให้กับชิ้นงาน วัดสมบัติไดอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริก และโพลีลิ่ง จากนั้นทำการทดสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริก

เมื่อได้ชิ้นงานที่มีค่าสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีทำการขึ้นรูปพร้อมกับวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกจากกระบวนการที่ 3.3.4.1 นำเซรามิก PMNT/ZnO ที่เตรียมไว้ข้างต้น มาประกบลงบนแผ่นโลหะเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า ประกอบลงไปในแผ่นยางที่เตรียมไว้ดังรูป 3.9 จากนั้นวัดสมบัติเพียโซอิเล็กทริกโดยเครื่องวัดประจุภายใต้การให้แรงด้วยระบบนิวเมตริก กระบวนการทดลองดังแสดงในรูป 3.10



รูป 3.9 แสดงตัวอย่างวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>



รูป 3.10 แผนผังแสดงเตรียมวัสดุผสมพื้นที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น

### 3.4 การตรวจสอบชิ้นงาน

#### 3.4.1 การตรวจสอบผง PMNT/ZnO

ผงเล็ดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์ทำการตรวจสอบเฟส โดยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์ (X-ray) มาใช้ วิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) แสดงในรูป 3.11



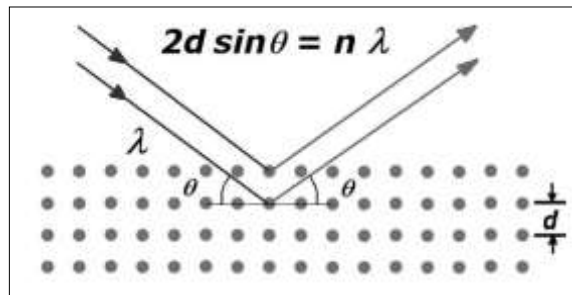
รูป 3.11 แสดงเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer : XRD)[42]

หลักการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนที่มุมต่างๆ กัน โดยหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูลองค์ประกอบและโครงสร้างจะมีองศาในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกแสดงในรูป 3.12 ผลที่ได้จึงบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ สามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก ความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกจะถูกบันทึกค่า แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้น ๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg ดังแสดงในสมการ 3.3

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (3.3)$$

- เมื่อ
- n คือ ตัวเลขใดๆ ที่เป็นจำนวนเต็ม 1, 2, 3
  - $\theta$  คือ มุมที่ลำรังสีเอ็กซ์กวาดตามแนวระนาบ
  - d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก
  - $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์





รูป 3.12 แสดงหลักการทำงานของ Bragg's law [43]

### 3.4.2 การตรวจสอบเซรามิก PMNT/ZnO

#### 3.4.2.1 การตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิก

นำชิ้นงานที่ผ่านการซินเตอร์แล้วมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นโดยวิธีแทนที่ของน้ำ ตามหลักอาร์คิมิดีส โดยใช้อุปกรณ์ดังแสดงในรูป 3.13 โดยเริ่มจากชั่งน้ำหนักแห้งของชิ้นงาน ( $W_1$ ) ด้วยเครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง หลังจากนั้นนำชิ้นงานเซรามิกมาต้มในน้ำกลั่นเดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วแช่ชิ้นงานทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ชิ้นงานอิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นนำเซรามิกมาชั่งน้ำหนักแทนที่น้ำ (ชั่งในน้ำ,  $W_2$ ) และจดบันทึกค่า และชั่งน้ำที่เป็นส่วนเกินออกจากชิ้นงานเซรามิกให้พอหมด จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักอิมมersion (ชั่งในอากาศ,  $W_3$ ) แล้วบันทึกค่า นำค่าที่บันทึกได้มาคำนวณหาค่าความหนาแน่นดังสมการที่ 3.4

$$\rho_{ceramic} = \frac{W_1}{W_3 - W_2} \times \rho_{H_2O} \quad (3.4)$$

เมื่อ	$\rho_{ceramic}$	คือ ความหนาแน่นของเซรามิก
	$W_1$	คือ น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน (g)
	$W_2$	คือ น้ำหนักแทนที่น้ำของชิ้นงาน (ชั่งในน้ำ) (g)
	$W_3$	คือ น้ำหนักอิมมersion ของชิ้นงานเซรามิก (g)

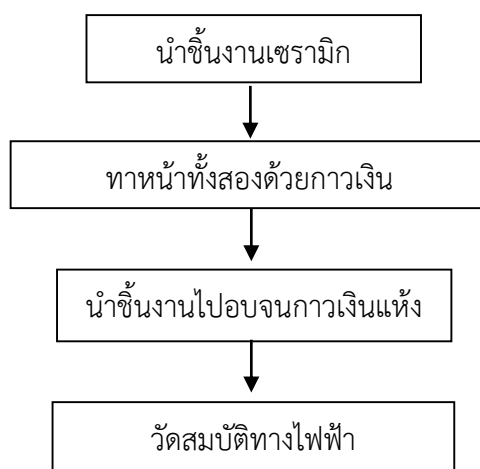


รูป 3.13 อุปกรณ์สำหรับการหาความหนาแน่นโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส

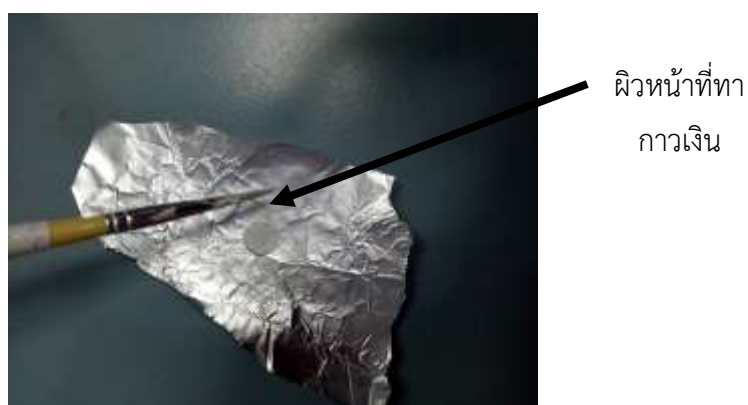
### 3.4.2.2 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าแสดงดังรูป 3.14 โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้

การทำขั้วไฟฟ้าโดยการนำชิ้นงานไปทากาวเงิน ดังแสดงในรูป 3.15 นำชิ้นงานที่ผ่านการทากาวเงินไปเผาที่  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  แช่ 10 นาที โดยใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ เท่ากับ  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ นาที}$  เพื่อให้กาวเงินสามารถยึดติดชิ้นงานได้ดี



รูป 3.14 แผนผังแสดงการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า



รูป 3.15 แสดงการทากาวเงินของชิ้นงานเซรามิก PMNT/ZnO

### 3.4.2.3 ตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก

นำชิ้นงานที่ผ่านการทำขั้วมาวัดค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LCR meter ดังแสดงในรูป 3.16 โดยวัดเทียบความถี่ที่ 1, 10, 100 และ 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง โดยวางชิ้นงานตัวอย่างระหว่างโพรบ ก่อนวัดค่าทุกครั้งต้องผ่านการทำ open correction และ short correction เพื่อกำจัดความจุตกค้างแล้วนำค่าที่วัดได้มาคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ ) ตามสมการที่ (3.5)

$$\epsilon_r = \frac{Cd}{A\epsilon_0} \quad (3.5)$$

เมื่อ	C	คือ ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นฟารัด (F)
	d	คือ ความหนาของชิ้นงานมีหน่วยเป็นเมตร (m)
	A	คือ พื้นที่ของไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m <sup>2</sup> )
	$\epsilon_r$	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก
	$\epsilon_0$	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-12}$ F/m



รูป 3.16 เครื่อง LCR meter

### 3.4.2.4 การตรวจสอบสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก

เมื่อชิ้นงานผ่านการทากาวเงินแล้วนำไปเผาในกระบวน 3.4.2.2 นำมาวัดสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก โดยจะถูกวัดออกมาในรูปของวงวนฮีสเทอรีซิส (P-E hysteresis loops) ด้วยเครื่องวัดเพอร์โรอิเล็กทริกโดยอาศัยวงจร Sawyer-Tower ดังแสดงในรูป 3.17 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เปิดเครื่องวัดเพอร์โรอิเล็กทริก
- 2) นำชิ้นงานยึดติดกับ Sample holder แล้วจุ่มลงในน้ำมันซิลิโคน
- 3) ปรับความถี่ในการวัดไปที่ 25 Hz
- 4) ค่อยๆ เพิ่มสนามไฟฟ้าจนกว่าจะถึงค่าที่กำหนดไว้
- 5) บันทึกผลแล้วนำไปพล็อตเป็นวงวนฮีสเทอรีซิส



รูป 3.17 เครื่องวัดสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกโดยอาศัยวงจร Sawyer-Tower

### 3.4.2.5 การตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริก

การเตรียมชิ้นงานสำหรับวัดสมบัติเพียโซอิเล็กทริกมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- นำตัวอย่างที่ผ่านการทำขั้วทำการโพลิงโดยการป้อนสนามไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (0.5 - 2 kV) ที่อุณหภูมิ 60 °C เข้าไปเพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์ ดังแสดงรูป 3.18 และทำความสะอาดพื้นผิวที่ต่อกับขั้ว จุ่มลงในน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) ที่เป็นฉนวนเป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้ไดโพลโมเมนต์ที่อยู่ภายในเนื้อสารจัดเรียงตัวไปตามทิศของสนามไฟฟ้า

- หลังจากที่ชิ้นงานเซรามิกผ่านการโพลิงแล้ว จะนำชิ้นงานไปวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ดังแสดงในรูป 3.19 ซึ่งในที่นี้จะใช้เครื่อง piezo d<sub>33</sub> meter เพื่อวัดประจุไฟฟ้าที่ได้จากชิ้นงานเซรามิก โดยจะนำชิ้นงานวางบนฐานชิ้นตัวอย่างแล้วให้แรงกดโดยการหมุนปรับตัวยึดชิ้นตัวอย่างให้แน่นเพื่อไม่ให้เกิดการสั่น จากนั้นอ่านค่า d<sub>33</sub> ที่หน้าจอแสดงผล และบันทึกค่า



รูป 3.18 แสดงการโพลิ่งของชิ้นงานเซรามิก PMNT/ZnO



รูป 3.19 เครื่องวัดสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

### 3.4.3 การตรวจสอบวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

#### 3.4.3.1 การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) สามารถวัดได้โดยการดึงขึ้นทดสอบมาตรฐานจนขาดด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ Universal Testing Machine ดังแสดงในรูป 3.20 สำหรับรูปแบบของชิ้นงานทดสอบในรูปแบบคัมเบลล์ นำวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ตัดด้วย Die เมื่อได้ชิ้นทดสอบคัมเบลล์แล้วก็นำมาวัดความหนา 3 จุด ตามมาตรฐาน ASTM D 412 คือ บริเวณทั้ง 2 ด้านของคอดัมเบลล์และตรงกลาง จากนั้นก็นำค่ากลางไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด เมื่อได้ชิ้นงานทดสอบก็นำไปทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงอ่านค่าที่ได้



รูป 3.20 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) [43]

### 3.4.3.2 ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

นำวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ทำการตัดชิ้นงานให้มีขนาด 1.8x2.8 cm จากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดไปตากาวเงินทั้งสองด้านเพื่อทำขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 3.21



ผิวหน้าชิ้นงาน  
ที่ตากาวเงิน

รูป 3.21 แสดงลักษณะการตากาวเงินลงบนผิวชิ้นงาน

#### - ตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก

วัดเทียบความถี่ที่ 1, 10, 100 และ 200 kHz ที่อุณหภูมิห้องด้วยเครื่อง LCR meter

#### - ตรวจสอบสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก

วัดเทียบความถี่ที่ 50 Hz ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยจะถูกวัดออกมาในรูปของวงวนฮีสเทอรีซิส (P-E hysteresis loops) ด้วยเครื่องวัดเพอร์โรอิเล็กทริกโดยอาศัยวงจร Sawyer-Tower

#### - ตรวจสอบความต่างศักย์ไฟฟ้าของวัสดุผสมกับเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

นำชิ้นงานที่ได้ทำการประกอบไว้ทดสอบโดยการให้แรงกระทำจากลูกตุ้มเหล็กทรงกลม โดยการวัดระยะห่างของลูกตุ้มกับชิ้นงานประมาณ 5.5 cm ทำการปล่อยลูกตุ้มลงมาอย่างอิสระดังแสดงในรูป 3.22 เพื่อตกกระทบกับชิ้นงาน โดยคำนวณหาความต่างศักย์ไฟฟ้าจากสมการพลังค์กึ่งดังสมการ 3.6

$$\begin{aligned} E_p &= mgh & (3.6) \\ &= 0.5351 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s} \times 0.055 \text{ m} \\ &= 0.2884 \text{ J} \end{aligned}$$

เมื่อ  $E_p$  แทน พลังงานศักย์โน้มถ่วง หน่วยจูล (J)  
 $m$  แทน มวลของวัตถุ มีค่า 0.5351 kg  
 $g$  แทน ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.8 เมตร/วินาที  
 $h$  แทน ระยะหรือความสูงจากระดับอ้างอิง มีค่า 0.055 m

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการอ่านค่าในหน้าจอ รูปที่ 3.22 มาหารค่าพลังงานศักย์โน้มถ่วงก็จะได้ออกมาเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า



รูป 3.22 แสดงการทดสอบวัดการกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีการให้แรงกระแทก

#### 3.4.4 การตรวจสอบสัญญาณวิทยาและองค์ประกอบทางเคมี

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การสร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่สำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ นำมาใช้ในการศึกษาสัญญาณและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ ตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุโดย Energy Dispersive Spectrometry (EDS) เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ ใน SEM ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้เพิ่มเติมดังแสดงในรูป 3.23

##### 3.4.4.1 การเตรียมเซรามิก PMNT/ZnO

วิธีการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเซรามิก PMNT/ZnO ก่อนการตรวจสอบทำความเข้าใจโดยนำชิ้นงานวางลงในบีกเกอร์ 25 ml เติมน้ำลงไปประมาณ 10 ml จากนั้นไปผ่านเครื่องอัลตราโซนิก 15 นาที นำมาอบที่ 80 °C จนแห้ง ทำการเคลือบชิ้นงานด้วยวิธีการ Sputtering ด้วยทองคำ 99 % เพื่อเกิดการเหนียวนำอิเล็กตรอน ทำให้ภาพถ่ายชัดขึ้นจากนั้นนำไปตรวจสอบสัญญาณวิทยา



### 3.4.4.2 การเตรียมวัสดุผสมแบบผง NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

วิธีการเตรียมตัวอย่างชิ้นจะใช้ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ tensile testing ภาควัตถวของวัสดุมาตรวจสอบสัญญาณวิทยา ด้วยวิธีการ Sputtering ด้วยทองคำ 99 % เพื่อเกิดการเหนียวนำอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทดสอบองค์ประกอบเคมี



รูป 3.23 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)[44]

## บทที่ 4

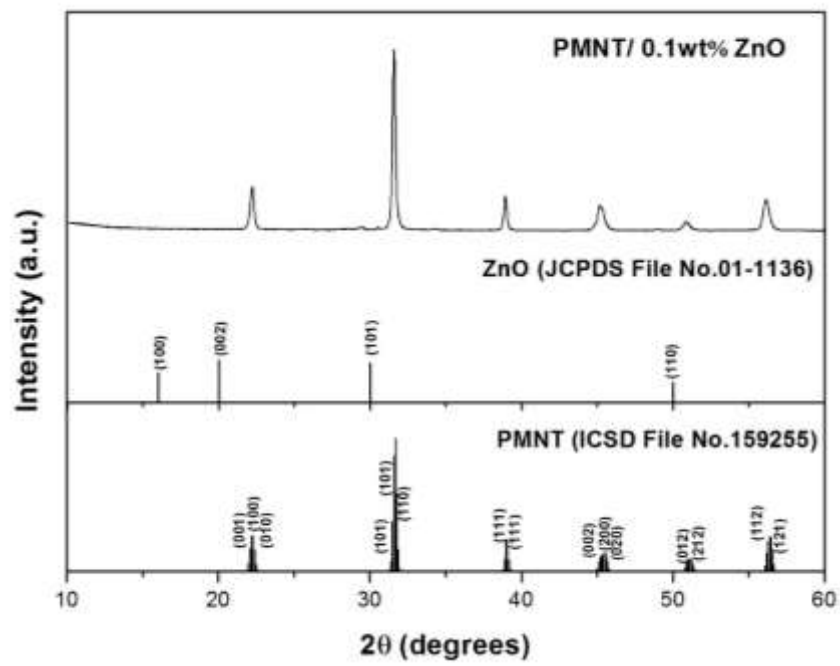
### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองซึ่งแบบออกเป็น 3 ส่วน คือ 1. ผลการเตรียมเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์ (PMNT/ZnO) 2. ผลการเตรียมและทดสอบวัสดุผสมผง NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> และ 3. ผลการเตรียมและทดสอบความต่างศักย์ไฟฟ้าวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

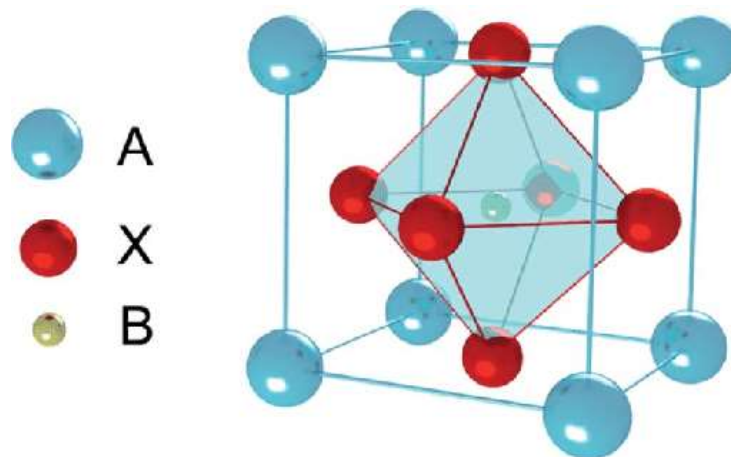
#### 4.1 ผลการเตรียมเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์

##### 4.1.1 ผลการตรวจสอบเฟสของชิ้นงานเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์

รูป 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วย ZnO (PMNT/ZnO) ซึ่งเปรียบเทียบกับรูปแบบมาตรฐาน ICSD หมายเลข 159255 ซึ่งเป็นของสารประกอบ  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.65}Ti_{0.35}O_3$  เป็นเฟสบริสุทธิ์ที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite structure) มีสูตร  $ABO_3$  โดยที่ตำแหน่ง A จะเป็นสาร  $Pb^{2+}$  อยู่ที่มุมทั้งแปดของโครงสร้าง ตำแหน่ง B เป็น  $Mg^{2+}$   $Nb^{2+}$  และ  $Ti^{2+}$  อยู่กึ่งกลางและอะตอมของออกซิเจนจะอยู่ที่ผิวหน้าทั้งหกของโครงสร้างดังแสดงในรูป 4.2 อัตราส่วนของสารที่เลือกทดลองเป็นช่วงรอยต่อระหว่างเฟส จะมีเฟสอยู่ร่วมกันสองเฟสระหว่างรอมโบอีดรอลและเตตระโกนอลส่งผลให้เซรามิกมีสถานะโดเมน (domain states) จำนวนมากทำให้สามารถสร้างประจุไฟฟ้าได้ดี ซิงค์ออกไซด์ที่เติมแต่งเข้าไปในปริมาณ 0.1 wt% เปรียบเทียบกับรูปแบบมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 01-1136 ของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ ซึ่งไม่ปรากฏในรูปแบบ XRD อาจเป็นไปได้ว่า  $Zn^{2+}$  จะเข้าไปแทนที่ไอออน  $Mg^{2+}$  ในตำแหน่ง B-site ในโครงสร้าง PMNT จึงทำให้ไม่ปรากฏฟีก อีกทั้งยังเชื่อว่าเฟสตะกั่วจะเป็นเฟสของเหลวทำให้เกิดตำหนิช่องว่างในโครงสร้าง ซึ่งมีผลสอดคล้องกับผลการทดลองของ Promsawat และคณะ [8]



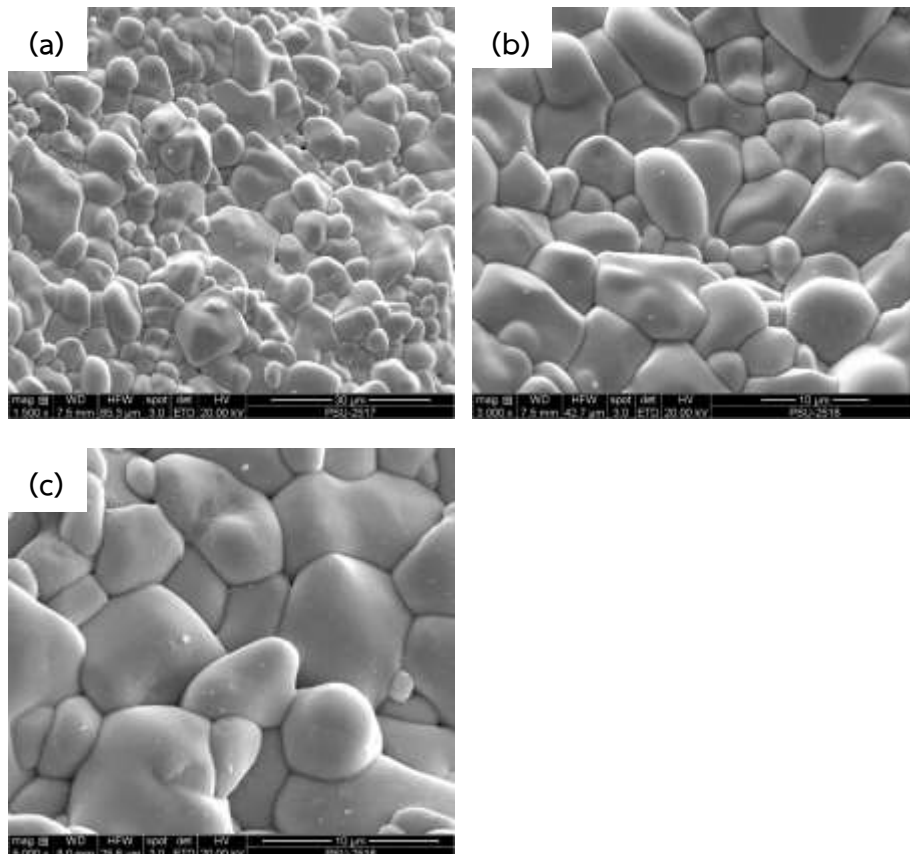
รูป 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PMNT ที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์



รูป 4.2 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ ( $ABO_3$ ) [3]

#### 4.1.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์

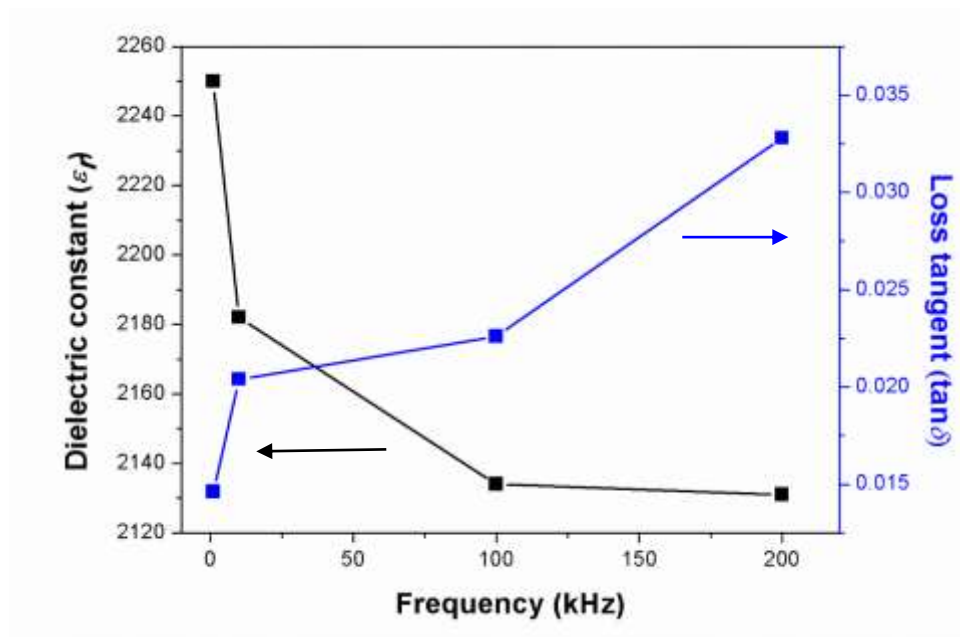
จากรูปที่ 4.3 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าของเซรามิก PMNT ที่เติมแต่งด้วย ZnO ซึ่งมีความหนาแน่นเฉลี่ยของชั้นงานจริงมีค่าเท่ากับ  $7.51 \text{ g/cm}^3$  มีขนาดเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ 4-5 ไมครอน ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับผลของ Promsawat และคณะ [9] ซึ่งได้ทำการทดลองเติม ZnO เช่นเดียวกัน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า เกรนมีขนาดใหญ่อาจเกิดจากการที่เฟสของเหลวตะกั่วเกิดการเคลื่อนย้ายมวล (mass transport) ได้ง่ายทำให้เพิ่มการโตของเกรนระหว่างกระบวนการซินเตอร์ ขนาดเกรนมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมออาจเกิดจากขนาดผง PMNT เริ่มต้นมีขนาดไม่เท่ากัน ทำให้เกรนเกิดการโตไม่พร้อมกันทำให้เกรนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามเกรนมีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นไม่มีรูพรุนปรากฏ



รูป 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าของเซรามิก PMNT/ZnO ที่กำลังขยาย (a) 1500 (b) 3000 (c) 5000 เท่า

#### 4.1.3 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์

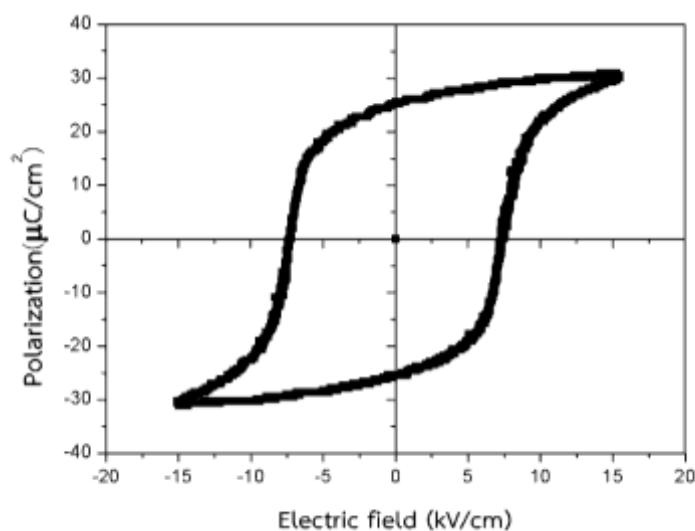
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริกวัดที่อุณหภูมิ 25 °C ที่ความถี่ 1 10 100 และ 200 kHz ของเซรามิก PMNT/ZnO แสดงดังรูป 4.4 จากกราฟพบว่า ความถี่ที่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง เนื่องจากความถี่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการตอบสนองของโพลาริเซชัน (polarization) ในช่วง space charge ที่เกิดจากตำหนิที่มีประจุ (charge defect) เกิดจากการสูญเสียของตะกั่ว เนื่องจากตะกั่วกลายเป็นเฟสของเหลวในกระบวนการเผาซินเตอร์ ทำให้เกิดช่องว่างออกซิเจนส่งผลให้เกิดตำหนิของช่องว่างออกซิเจนภายในโครงสร้างเกิดการแพร่ไปยังขอบเกรนและช่วงความถี่ที่ให้เข้าไปในวัสดุเซรามิกเป็นช่วงความถี่ต่ำ ๆ จะทำให้การตอบสนองของไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ลดลง ทำให้ค่าไดอิเล็กทริกลดลงและปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น



รูป 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 10 100 และ 200 kHz ของเซรามิก PMNT/ZnO

#### 4.1.4 ผลการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์

กราฟแสดงวงวนฮิสเทอรีซิสที่ทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 °C และความถี่ 25 Hz ของเซรามิก PMNT/ZnO แสดงดังรูปที่ 4.5 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า จากวงวนฮิสเทอรีซิสสามารถหาค่าโพลาริเซชันคงค้าง ( $P_r$ ) ได้เท่ากับ  $26 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  และสนามไฟฟ้าลบล้าง ( $E_c$ ) มีค่า  $7.54 \text{ kV}/\text{cm}$  ดังแสดงผลในตารางที่ 4.1 เนื่องจากผลึกมีความเป็นรอมโบฮีดรอลและเตตระโกนอล จึงทำให้มีสถานะโดเมนจำนวนมาก ตอบสนองต่อไดโพลโมเมนต์ได้ดี เกิดการสลับขั้วได้ง่าย ทำให้การจัดเรียงตัวของโพลาริเซชันตามทิศทางของสนามไฟฟ้าได้ง่ายขึ้นและค่าสนามไฟฟ้าลบล้างมีค่าเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุแปลงพลังงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Samadoloh และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาเซรามิกในระบบ PMNT ที่ปริมาณ x เท่ากับ 0.30-0.40 ที่ปริมาณ x เท่ากับ 0.34-0.36 ให้ค่าโพลาริเซชันคงค้างเท่ากับ  $27 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  และสนามไฟฟ้าลบล้างมีค่า  $7 \text{ kV}/\text{cm}$



รูป 4.5 แสดงวงวนฮิสเทอรีซิสที่วัดที่อุณหภูมิ 25 °C และที่ความถี่ 25 Hz ของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์

#### 4.1.5 ผลการตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตไทเทเนตเติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์

ตาราง 4.1 แสดงค่าสมบัติไดอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริก และเพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงานเซรามิก PMNT/ZnO

ค่าเฉลี่ย	$\epsilon^*$	$\tan \delta^*$	$P_r$ ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	$E_c$ (kV/cm)	$d_{33}$ (pC/N)	$g_{33}$ ( $\times 10^{-3}$ V·m/N)
	2250	0.03	26.38	7.54	$383 \pm 5$	20.41

\* วัดที่อุณหภูมิ 25 °C ที่ความถี่ 200 kHz

จากตารางแสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ และค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ( $d_{33}$ ) มีค่า  $383 \pm 5$  pC/N กับค่าความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริกเฉลี่ย ( $g_{33}$ ) มีค่า  $20.41 \times 10^{-3}$  V·m/N ของชิ้นงาน มีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกมีค่าที่สูงสามารถที่เปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นไฟฟ้าได้สูง โดยมีบริเวณรอยต่อเฟส (Morphotropic phase boundary หรือ MPB) ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างเฟสรวมฮีตรอลกับเตตระโกนอล เหมาะในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุแปลงพลังงาน ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่โดเมนเกิดการสลับขั้วโดเมนได้ง่ายโพลาริเซชันมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้าได้ง่าย จะเห็นได้ในผลการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งจำนวนของโพลาริเซชันที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันนี้จะเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก กล่าวคือ ถ้าเซรามิกมีปริมาณของโพลาริเซชันที่มีทิศทางเดียวกันมาก เซรามิกดังกล่าวก็จะแสดงสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่มาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกนี้จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $g_{33}$  คือ สัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก

$d_{33}$  คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

$\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

โดยนำค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่ได้จากผลการทดลองดังที่กล่าวก่อนหน้ามาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริกของเซรามิก

PMNT/ZnO กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก แสดงตารางที่ 4.1

#### 4.2 ผลการทดลองการเตรียมวัสดุผสมผง NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

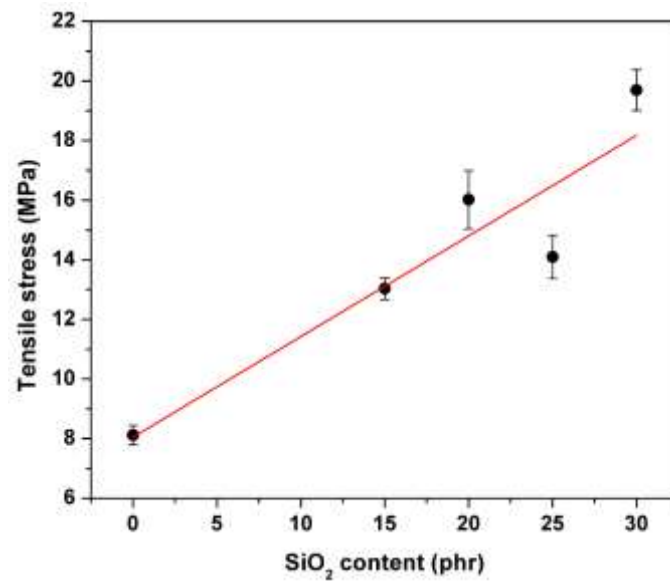
##### 4.2.1 ผลของการเติมผงซิลิกาต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

วัสดุผสม NR/100PMNT มีความเค้นเชิงดึงที่ต่ำและร้อยละการยืดตัวก่อนขาดมีค่าสูงกว่าการศึกษาก่อนหน้านี้ที่มีค่าความเค้นเชิงดึง 15.5 MPa และร้อยละการยืดตัวก่อนขาด 650 Sukanya และคณะ [7] ทางผู้วิจัยได้ศึกษาการเติม SiO<sub>2</sub> ปริมาณ 0 15 20 25 และ 30 นำไปตรวจสอบความเค้นเชิงดึง (Tensile stress) ร้อยละการยืดตัวก่อนขาด (%Elongation at break) และความทนทานต่อแรงฉีกขาด ค่าสมบัติแสดงในตารางที่ 4.2 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเชิงดึง ระหว่างร้อยละการยืดตัวก่อนขาด และความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณ SiO<sub>2</sub> แสดงในรูป 4.6 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการเติม SiO<sub>2</sub> ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> อย่างชัดเจน โดยที่ค่าความเค้นเชิงดึงและความทนทานต่อแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละการยืดตัวก่อนขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการเติม SiO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า อนุภาค SiO<sub>2</sub> ที่เติมลงไปช่วยให้การยึดเกาะระหว่างเฟสในวัสดุแน่นขึ้น ทำให้ทนความเค้น (ก่อนการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก) ได้มากขึ้น ซึ่งเชื่อว่าการเพิ่มขึ้นของความเค้นเชิงดึงนี้สามารถช่วยให้การส่งผ่านแรงกลที่กระทำต่อวัสดุไปยังเฟสเพียโซอิเล็กทริกได้มากขึ้น ทำให้วัสดุสร้าง ความต่างศักย์ไฟฟ้าได้มากขึ้นด้วย ในทางกลับกันการเติม SiO<sub>2</sub> ทำให้ร้อยละการยืดตัวก่อนขาดของวัสดุผสมลดลง แต่เชื่อว่าไม่ส่งผลต่อการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าของวัสดุผสม แสดงตัวอย่างภาพตัดขวางชิ้นงานในรูป 4.9

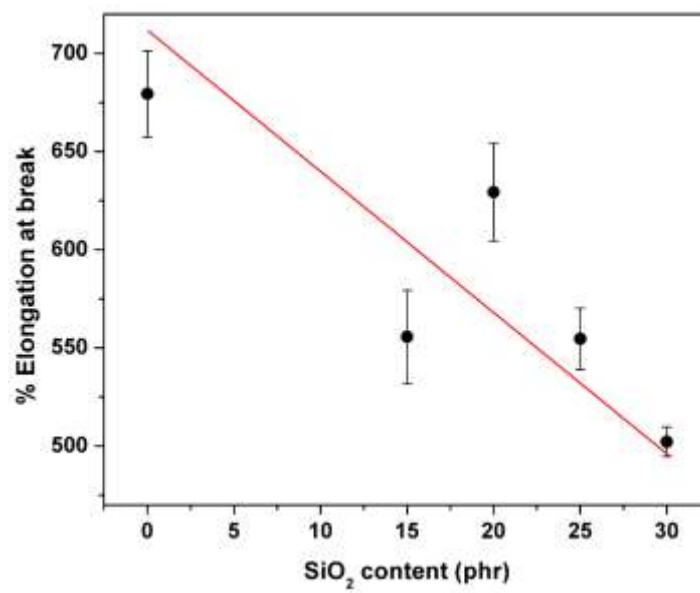
ตาราง 4.2 ความเค้นเชิงดึง ร้อยละการยืดตัวก่อนขาดและความทนทานต่อแรงฉีกขาดของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

ปริมาณ SiO <sub>2</sub> (phr)	ความเค้นเชิงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดตัวก่อนขาด (%)	ความทนทานต่อแรง ฉีกขาด (N/mm)
0	8.1 ± 0.3	679 ± 22	27.52 ± 2.9
15	13.0 ± 0.4	556 ± 24	35.76 ± 2.8
20	16.0 ± 1.0	629 ± 25	54.52 ± 3.5
25	14.1 ± 0.7	555 ± 16	46.27 ± 3.7
30	19.7 ± 0.7	502 ± 8	54.98 ± 3.7

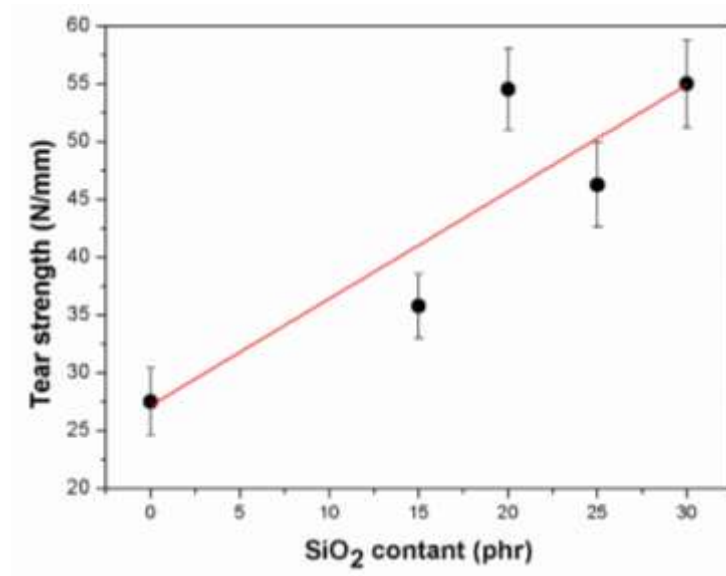




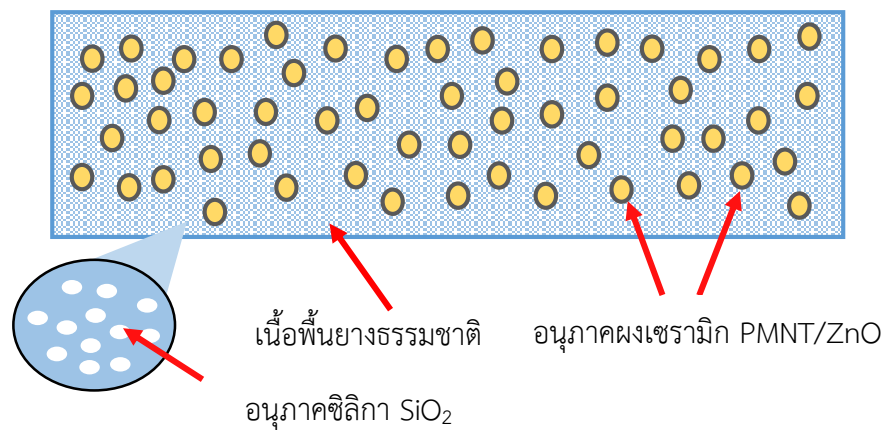
รูป 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเชิงดึงกับปริมาณ SiO<sub>2</sub> ของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>



รูป 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืดตัวก่อนขาดกับปริมาณ SiO<sub>2</sub> ของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>



รูป 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณการเติม SiO<sub>2</sub> ที่ 0 15 20 25 และ 30 phr



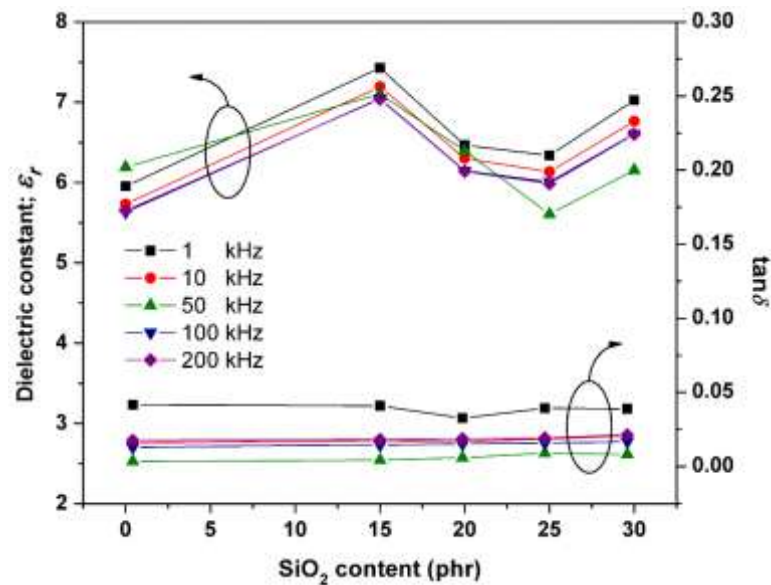
รูป 4.9 แสดงภาพตัวอย่างวัสดุผสมแบบผงเซรามิก PMNT/ZnO/SiO<sub>2</sub> เป็นเฟสกระจายตัวในเนื้อพียูอย่างธรรมชาติ

#### 4.2.2 ผลของการเติม SiO<sub>2</sub> ต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

วัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ถูกนำไปตัดให้มีขนาด 1.8x2.8 cm<sup>2</sup> เพื่อความสะดวกในการทดสอบ ผิวหน้าทั้งสองด้านของวัสดุถูกเคลือบด้วยกาวเงินเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า แล้วนำไปวัดสมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 25 °C ที่ความถี่ 1 10 50 100 และ 200 kHz ด้วยเครื่อง LCR meter ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงในตาราง 4.3

ตาราง 4.3 สมบัติไดอิเล็กทริกวัดที่อุณหภูมิ 25 °C ที่ความถี่ต่าง ๆ ของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

ปริมาณ SiO <sub>2</sub> (phr)	ความถี่ (kHz)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
0	1	6.0	0.04
	10	5.7	0.02
	50	6.2	0.01
	100	5.6	0.01
	200	5.7	0.02
15	1	7.4	0.04
	10	7.2	0.02
	50	7.1	0.01
	100	7.0	0.01
	200	7.0	0.02
20	1	6.5	0.03
	10	6.3	0.02
	50	6.4	0.01
	100	6.1	0.02
	200	6.1	0.02
25	1	6.3	0.04
	10	6.1	0.02
	50	5.6	0.01
	100	6.0	0.02
	200	6.0	0.02
30	1	7.0	0.04
	10	6.8	0.02
	50	6.2	0.01
	100	6.6	0.02
	200	6.6	0.02

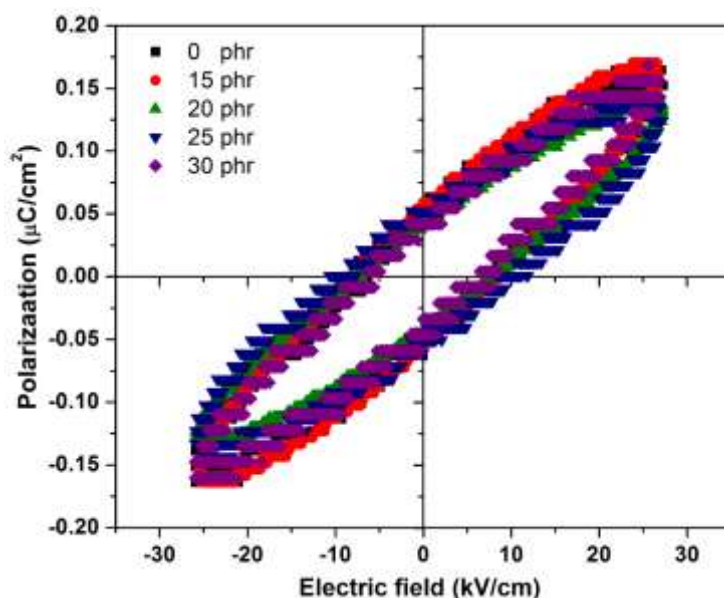


รูป 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และการสูญเสียไดอิเล็กทริก ( $\tan \delta$ ) กับปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ของวัสดุผสม NR/100PMNT/ $\text{SiO}_2$

จากรูป 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และการสูญเสียไดอิเล็กทริก ( $\tan \delta$ ) ของวัสดุผสมที่ความถี่ 1 10 50 100 และ 200 kHz ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อเติม  $\text{SiO}_2$  ในปริมาณ 15 phr และลดลงที่ปริมาณ 20-25 phr อย่างไรก็ตาม ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เมื่อปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เพิ่มขึ้นเป็น 30 phr การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเชื่อว่าเกิดจาก 2 ปัจจัย คือ 1) การมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่ำของ  $\text{SiO}_2$  (มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 3.9) และ 2) ความหนาแน่นของวัสดุ (ดังจะแสดงในหัวข้อต่อไป) การเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เท่ากับ 15 และ 30 phr เกิดจากการแน่นตัวที่เพิ่มขึ้น (ปริมาณรูพรุนลดลง) ของวัสดุ ในขณะที่การลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เท่ากับ 20-25 phr เกิดจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่ำของวัสดุ  $\text{SiO}_2$  ประกอบกับปริมาณรูพรุนที่มากขึ้น (โดยเฉพาะในปริมาณเท่ากับ 25 phr)

#### 4.2.3 ผลของการเติมผงซิลิกาต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุผสมNR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุที่อุณหภูมิ 25 °C วัดโดยวงจรวง Sawyer-Tower ที่ความถี่ 50 Hz ผลที่ได้แสดงในรูป 4.11 จะเห็นได้ว่า วัสดุผสมที่สร้างขึ้นแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ต่ำ โดยมีโพลาริเซชันคงค้างและสนามไฟฟ้าลบล้างเท่ากับ 0.05  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  และ 10 kV/cm ตามลำดับ โดยธรรมชาติ ยางธรรมชาติมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ต่ำ ทำให้สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุผสมต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งปริมาณการเติม SiO<sub>2</sub> สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวัสดุ SiO<sub>2</sub> มีความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณ SiO<sub>2</sub> ที่ 20 25 และ 30 phr จึงทำให้สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



รูป 4.11 วงวนฮิสเทอรีซิสวัดที่อุณหภูมิ 25 °C ที่ความถี่ 50 Hz ของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

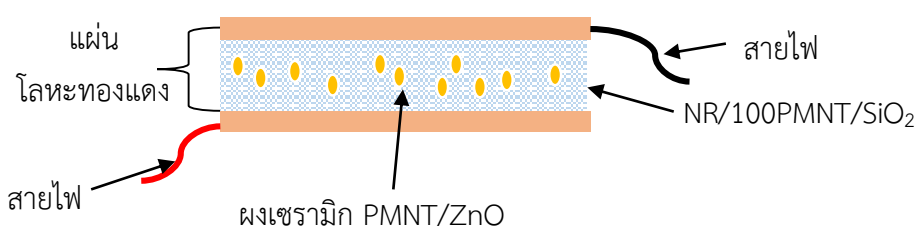
#### 4.2.4 ผลการทดสอบความต่างศักย์ไฟฟ้าของวัสดุผสมผง NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

การตรวจสอบการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าของวัสดุผสมผงเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> รูปชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแสดงในรูป 4.12 ทำการทดลองโดยปล่อยลูกตุ้มที่ทราบน้ำหนักทำการคำนวณพลังงานศักย์โน้มถ่วงมีค่าเท่ากับ 0.2884 จูล จากการคำนวณดังสมการ 4.2

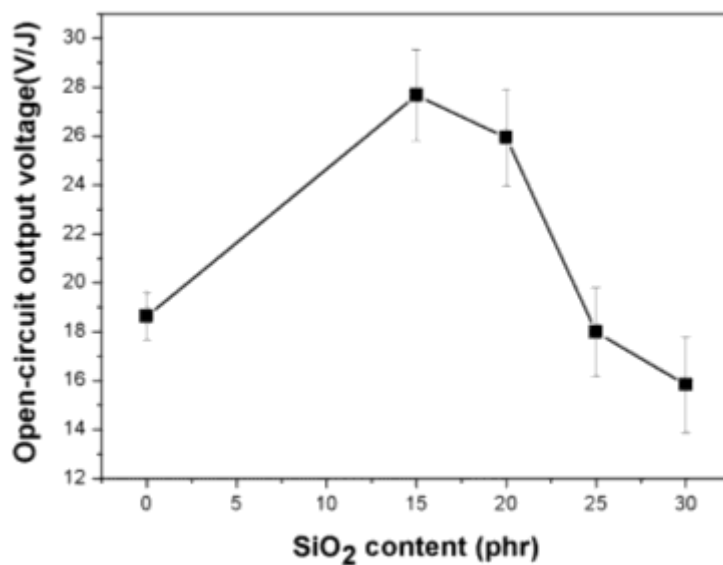
$$E_p = mgh \quad (4.2)$$

เมื่อ	$E_p$	แทน	พลังงานศักย์โน้มถ่วง หน่วยจูล (J)
	$m$	แทน	มวลของวัตถุ มีค่า 0.5351 กิโลกรัม
	$g$	แทน	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.8 เมตร/วินาที
	$h$	แทน	ระยะหรือความสูงจากระดับอ้างอิง มีค่า 0.055 เมตร

นำค่าพลังงานศักย์มาคำนวณหาความต่างศักย์ไฟฟ้าแสดงค่าในตาราง 4.4 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ SiO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้นถึง 15 phr จากนั้นลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ SiO<sub>2</sub> แสดงในรูป 4.13 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ (ดังจะแสดงในหัวข้อต่อไป) เกิดจากการแน่นตัวที่เพิ่มขึ้น (ปริมาณรูพรุนลดลง) ของวัสดุ ในขณะที่การลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปริมาณ SiO<sub>2</sub> เท่ากับ 20-25 phr ปริมาณรูพรุนที่มากขึ้น (โดยเฉพาะในปริมาณเท่ากับ 25 phr) ทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำเกิดการสร้างประจุและส่งผ่านประจุไฟฟ้าได้ไม่ดี จึงทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟาลดลง



รูป 4.12 แสดงภาพตัวอย่างวัสดุผสมผงเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ใช้ทดสอบความต่างศักย์ไฟฟ้า



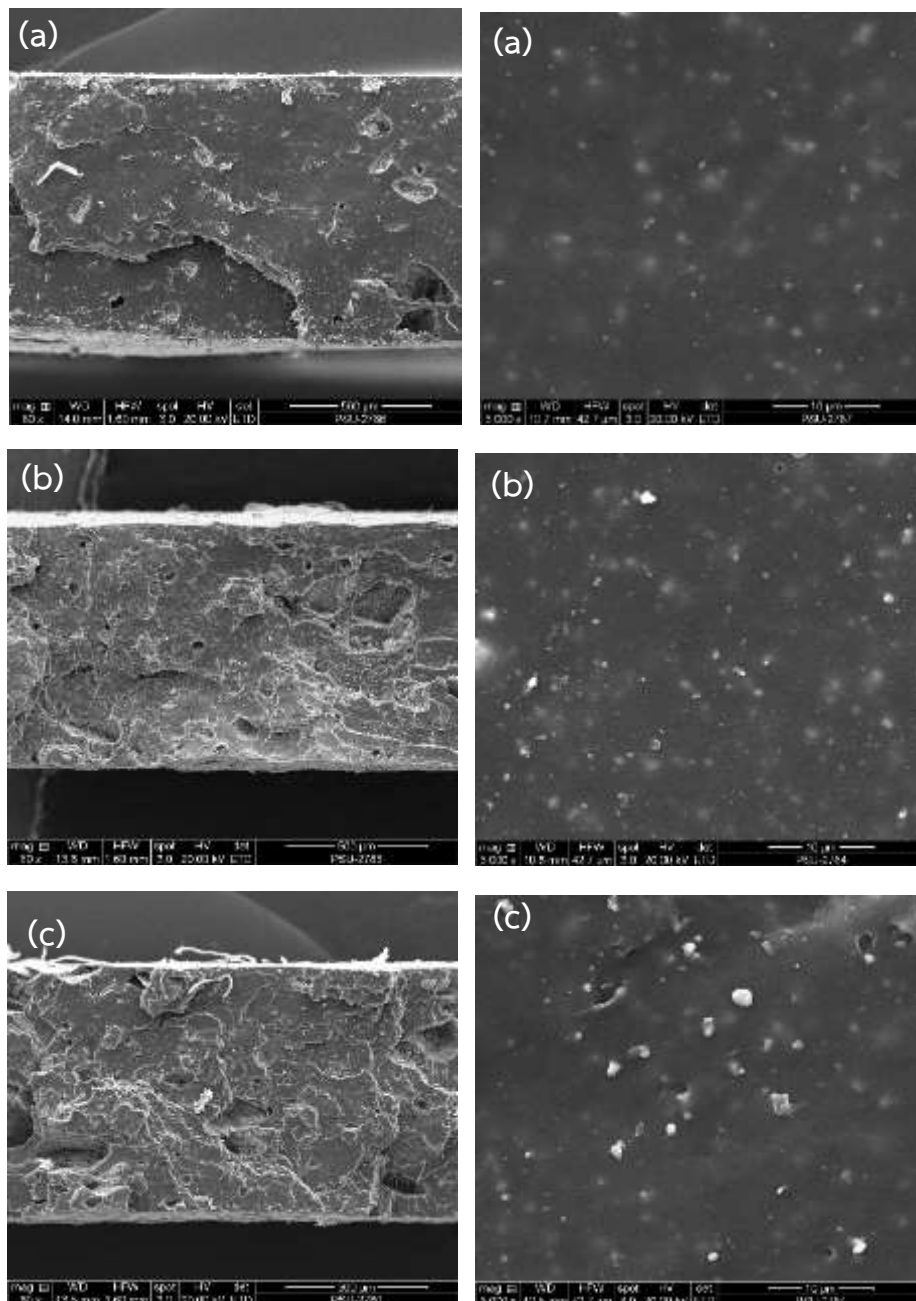
รูป 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับวัสดุผสม NR/100PMNT ที่ปริมาณ SiO<sub>2</sub> เท่ากับ 0 15 20 25 และ 30 phr

ตาราง 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปล่อยมากับวัสดุผสม NR/100PMNT ที่ปริมาณ SiO<sub>2</sub> เท่ากับ 0 15 20 25 และ 30 phr

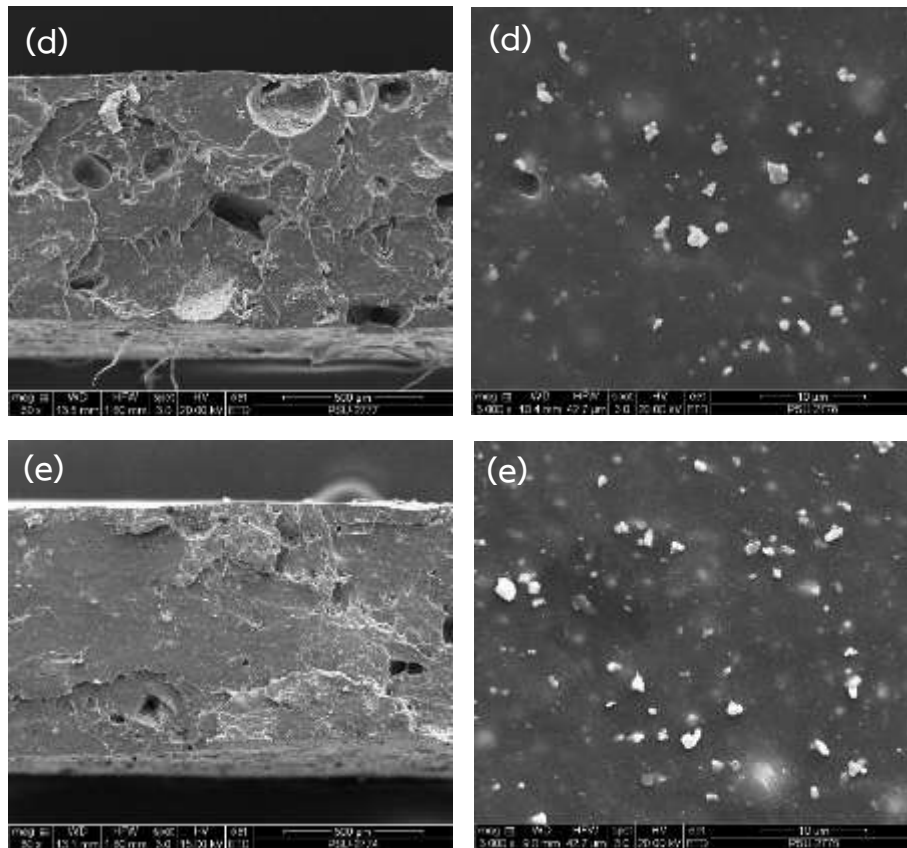
ปริมาณ SiO <sub>2</sub> (phr)	ค่าความต่างศักย์ (V/J)
0	18.6 ± 0.9
15	27.7 ± 1.8
20	25.9 ± 1.9
25	18.0 ± 1.8
30	15.8 ± 1.9

#### 4.2.5 ผลของการเติมผงซิลิกาต่อโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสม NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

ภาคตัดขวางของวัสดุผสมผงเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูป 4.14





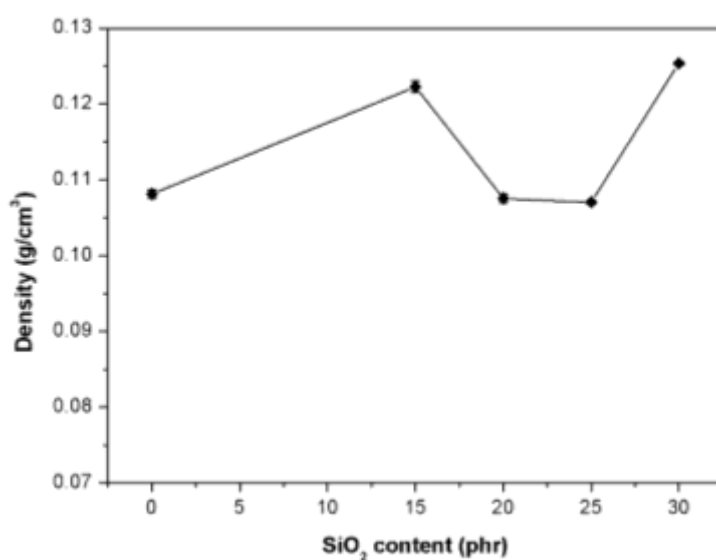


รูป 4.14 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของวัสดุผสมที่ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เท่ากับ (a) 0 (b) 15 (c) 20 (d) 25 และ (e) 30 phr ที่กำลังขยาย 80 (ซ้าย) และ 3000 เท่า (ขวา)

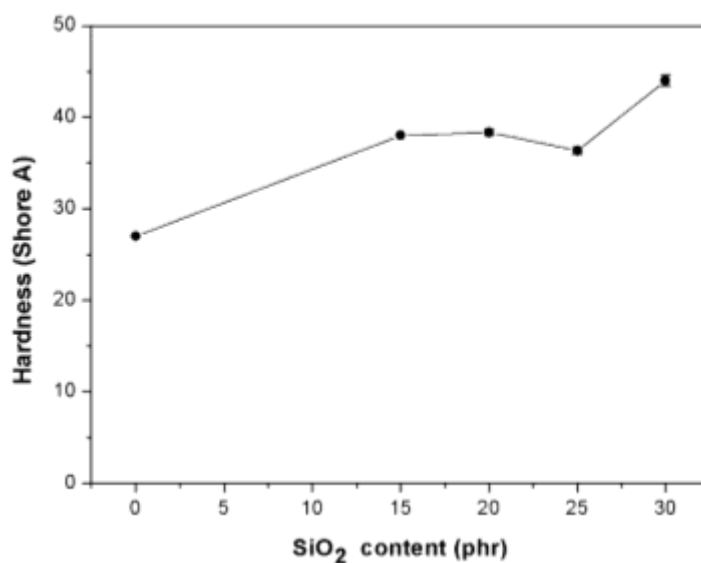
จากการพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมพบว่า การเติม  $\text{SiO}_2$  ส่งผลต่อการแน่นตัวและความแข็งของวัสดุอย่างชัดเจนแสดงค่าในตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าการเติม  $\text{SiO}_2$  ปริมาณ 15 และ 20 phr ทำให้โครงสร้างจุลภาคของวัสดุมีความแน่นและความแข็งของวัสดุมากขึ้น โดยมีจำนวนรูพรุนน้อยที่สุด ในขณะที่การเติม  $\text{SiO}_2$  ในปริมาณ 25 phr ทำให้จำนวนรูพรุนมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การแน่นตัวของโครงสร้างเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อปริมาณการเติม  $\text{SiO}_2$  เพิ่มขึ้นเป็น 30 phr อาจเกิดจากที่ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่ 30 phr มีการกระจายตัวของเฟส  $\text{SiO}_2$  ในเนื้อพื้นที่เป็นยางธรรมชาติได้ดี ทำให้รูพรุนลดลงความแน่นตัวและความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นแสดงในรูป 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ

ตาราง 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความแข็งของวัสดุผสมยาง NR/100PMNT ที่ปริมาณ SiO<sub>2</sub> ที่ 0 15 20 25 และ 30 phr

ปริมาณ SiO <sub>2</sub> (phr)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความแข็งของวัสดุ (Shore A)
0	0.10 ± 0.01	27 ± 0.1
15	0.12 ± 0.01	38 ± 0.1
20	0.11 ± 0.01	38 ± 0.3
25	0.11 ± 0.01	36 ± 0.3
30	0.13 ± 0.01	44 ± 0.6

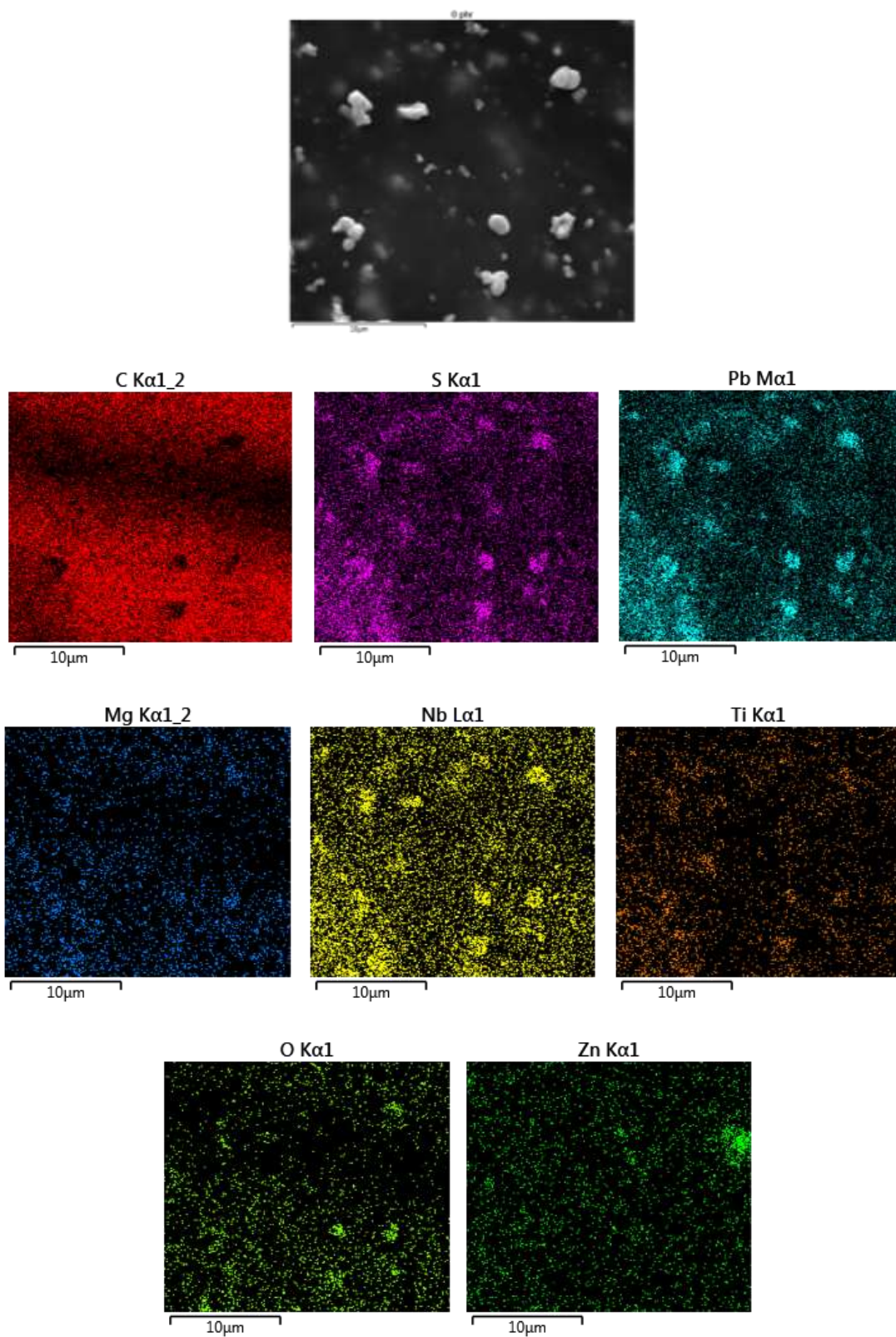


รูป 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุผสมยาง NR/100PMNT ที่ปริมาณ SiO<sub>2</sub> ที่ 0 15 20 25 และ 30 phr

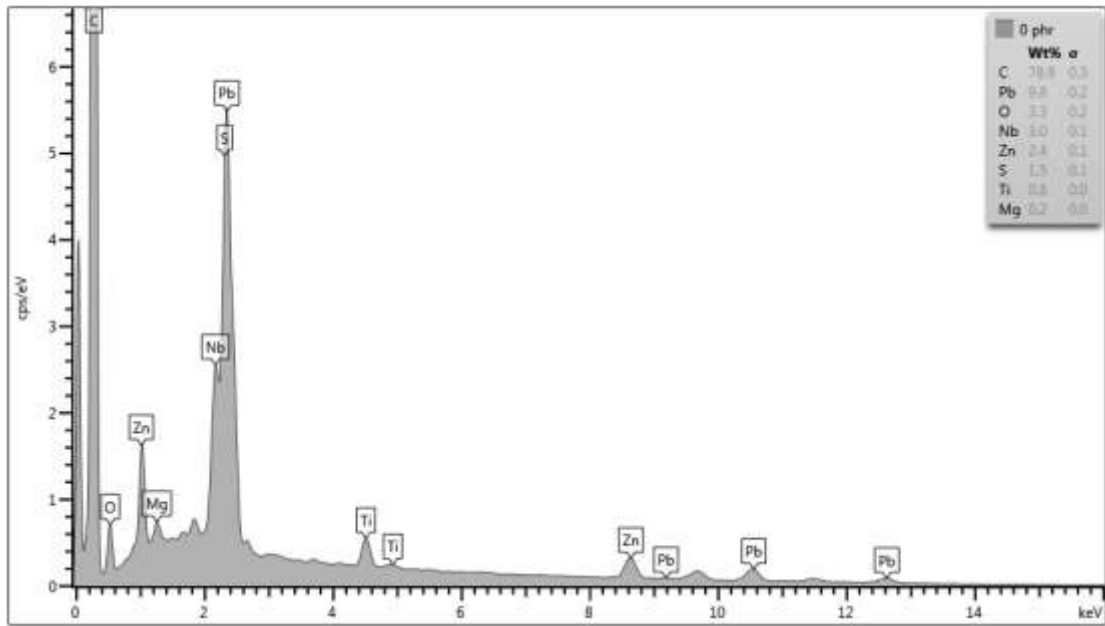


รูป 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของวัสดุผสมยาง NR/100PMNT ที่ปริมาณ SiO<sub>2</sub> ที่ 0 15 20 25 และ 30 phr

นอกจากนี้ การกระจายตัวของธาตุบนพื้นที่หน้าตัดของวัสดุยังถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDX) ดังแสดงผลในรูป 4.17 ถึงรูป 4.26 จากผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX จะเห็นได้ว่า เฟสสีขาวที่เห็นในภาพ SEM เป็นเฟสของวัสดุ PMNT ซึ่งจะเห็นว่าการกระจายตัวได้เป็นอย่างดีในวัสดุผสม ในขณะที่อนุภาคผง SiO<sub>2</sub> กระจายตัวทั่วเนื้อของวัสดุผสม ซึ่งทำหน้าที่ช่วยเพิ่มการยึดเกาะภายในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ทำให้วัสดุมีความแน่นตัวมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความเค้นเชิงดึงและสมบัติไดอิเล็กทริกที่มากขึ้น

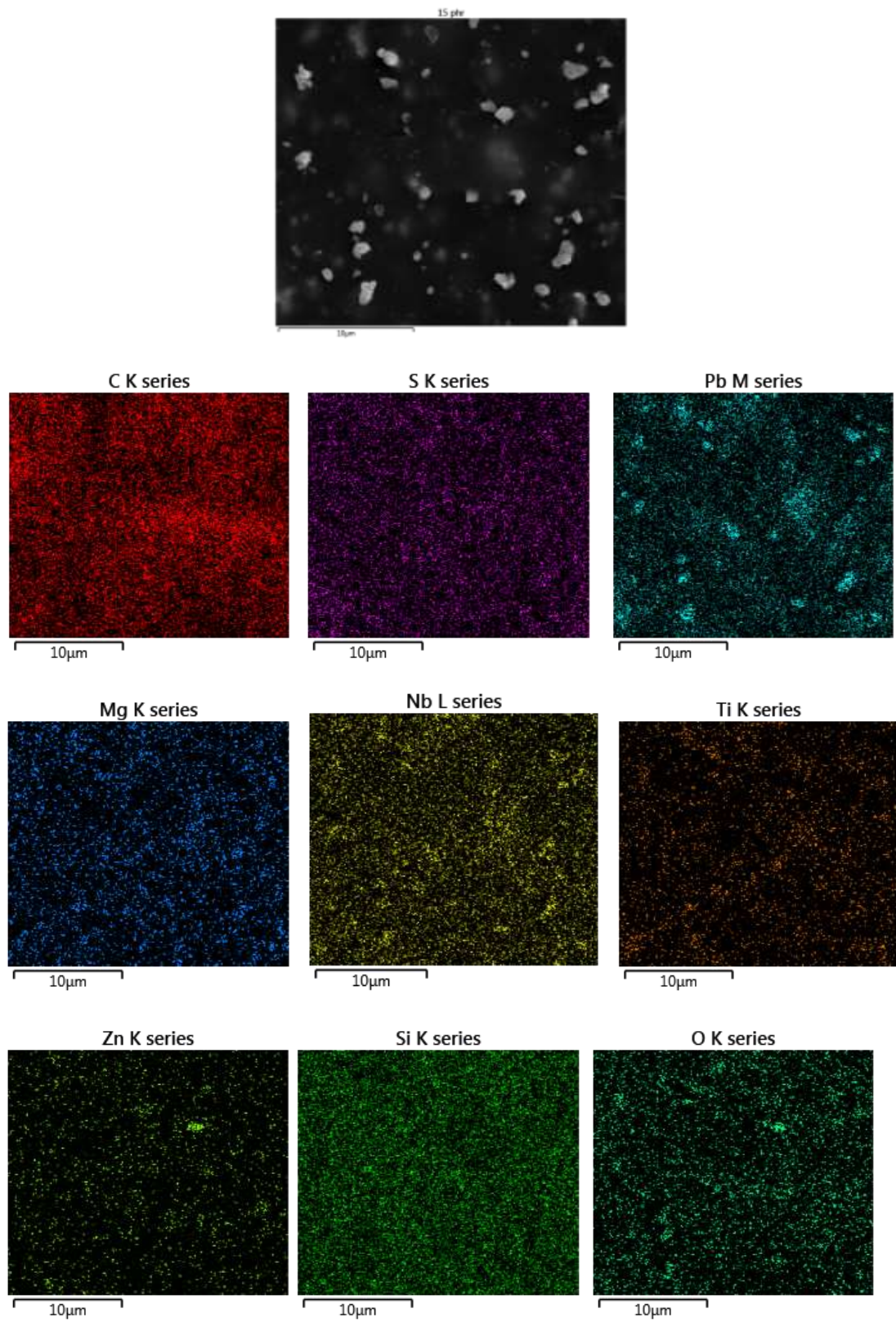


รูป 4.17 การกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT

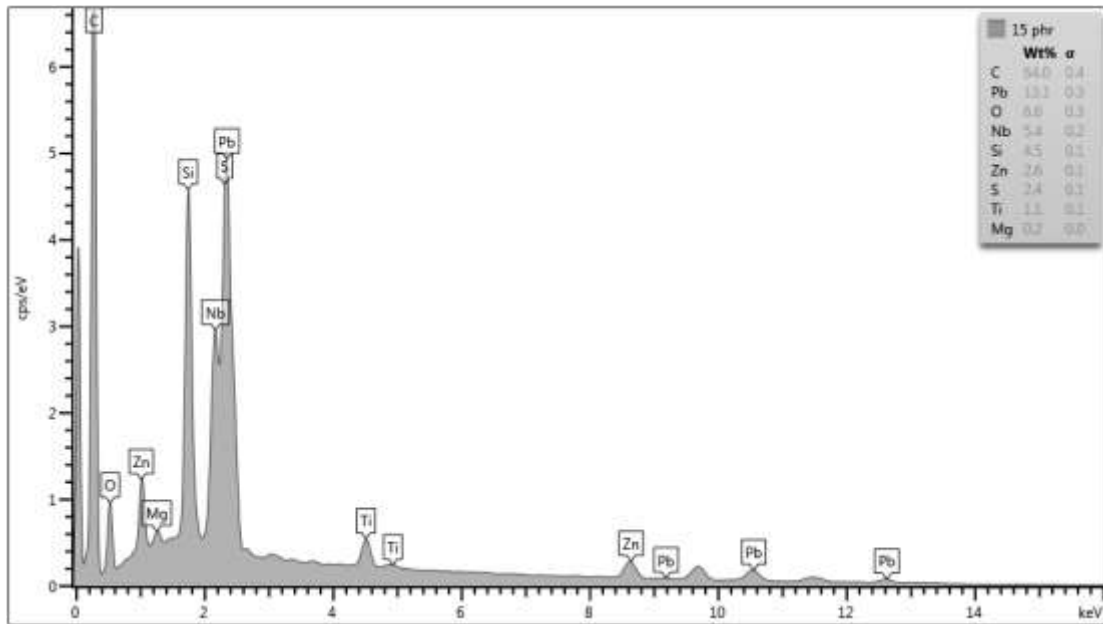


รูป 4.18 กราฟแสดงปริมาณการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT

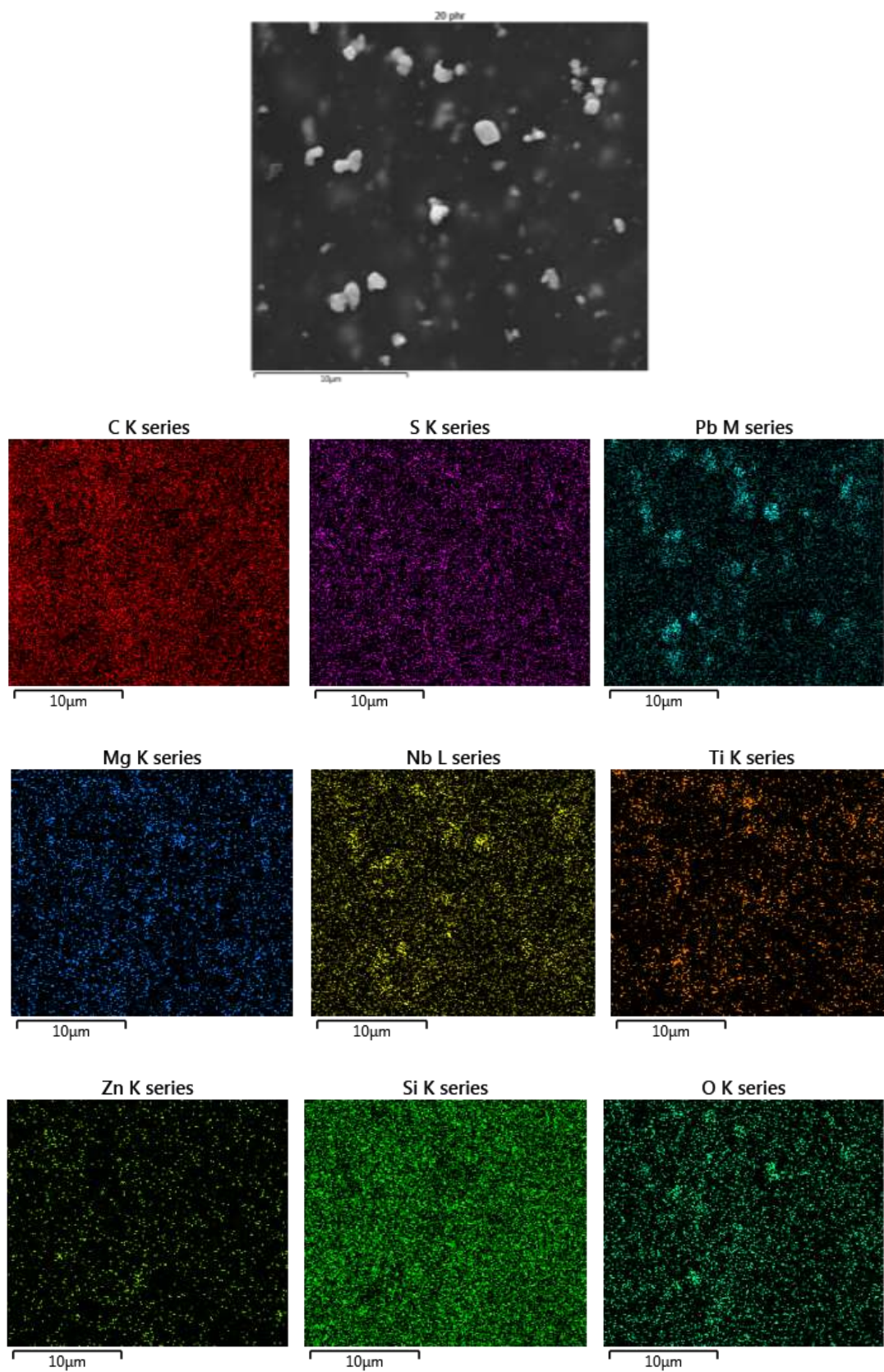




รูป 4.19 การกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/15SiO<sub>2</sub>

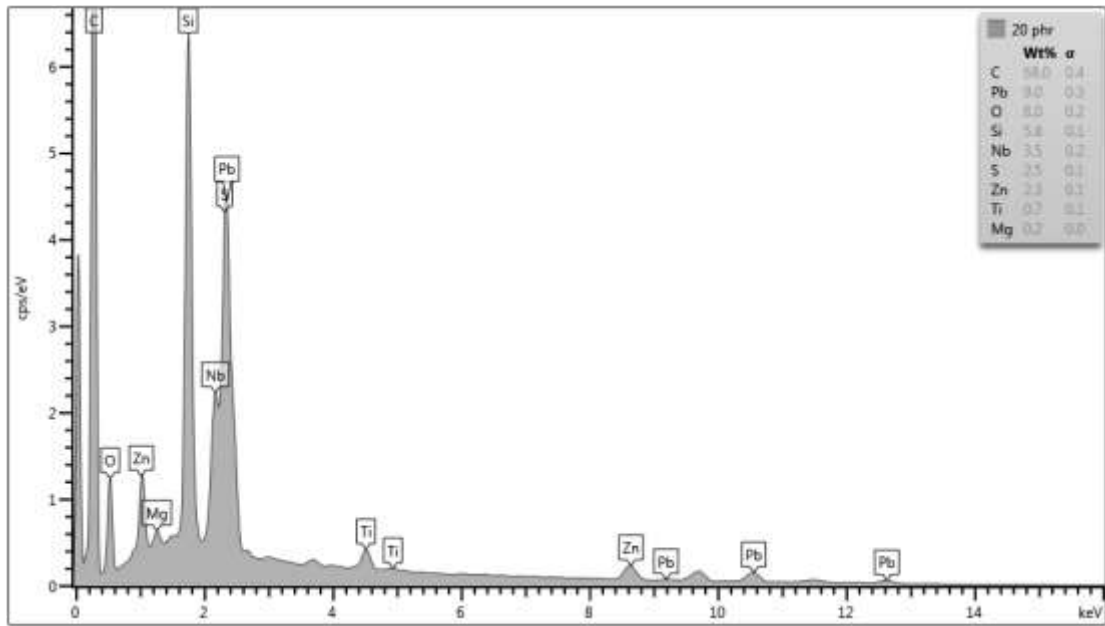


รูป 4.20 กราฟแสดงปริมาณการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/15SiO<sub>2</sub>

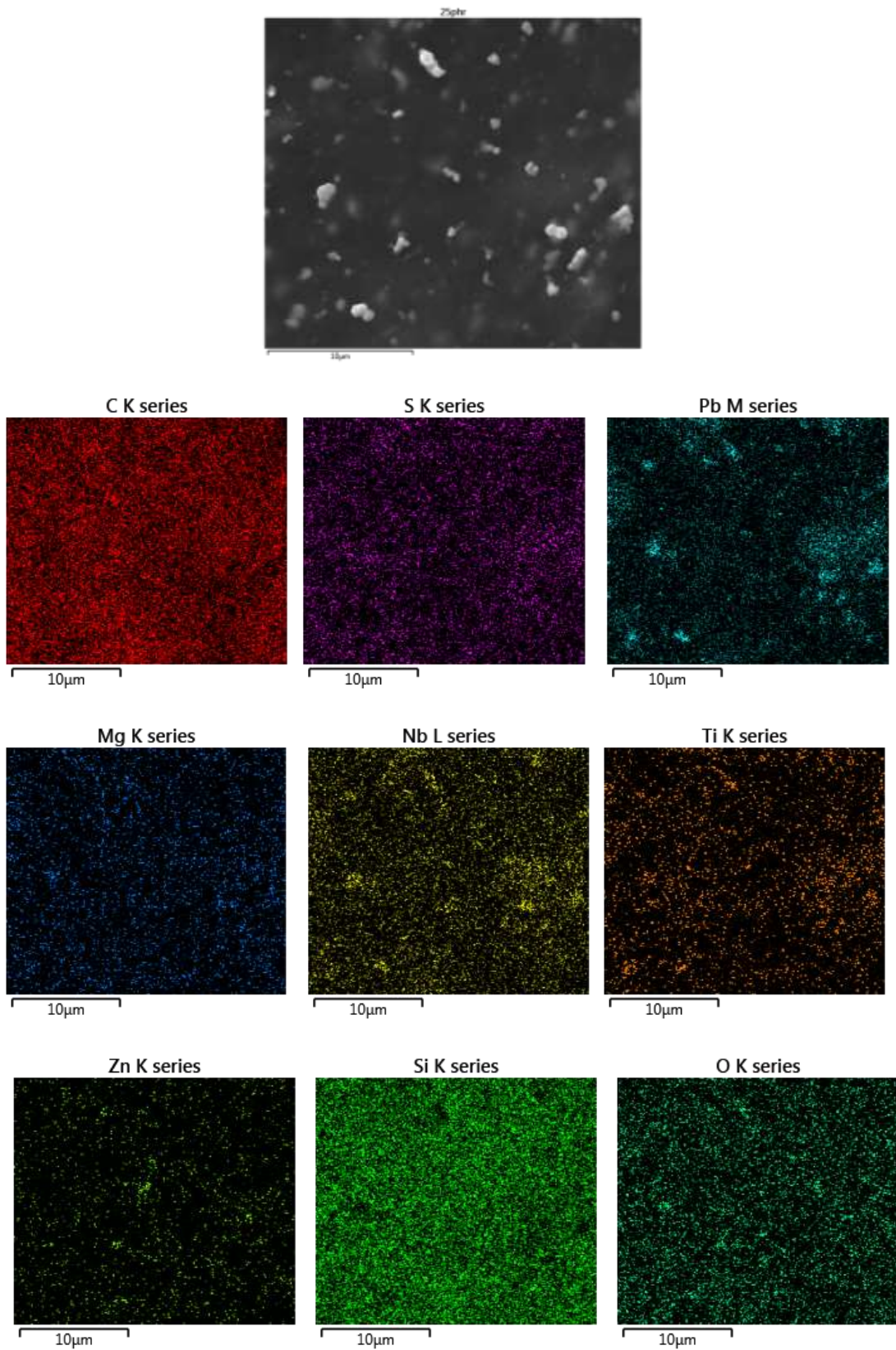


รูป 4.21 การกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/20SiO<sub>2</sub>

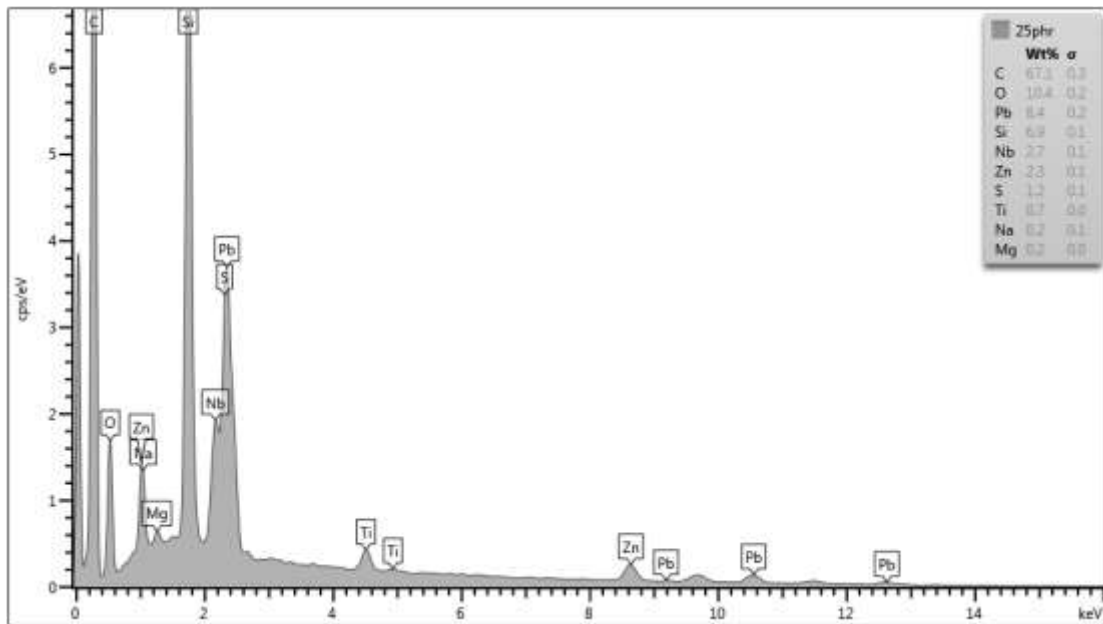




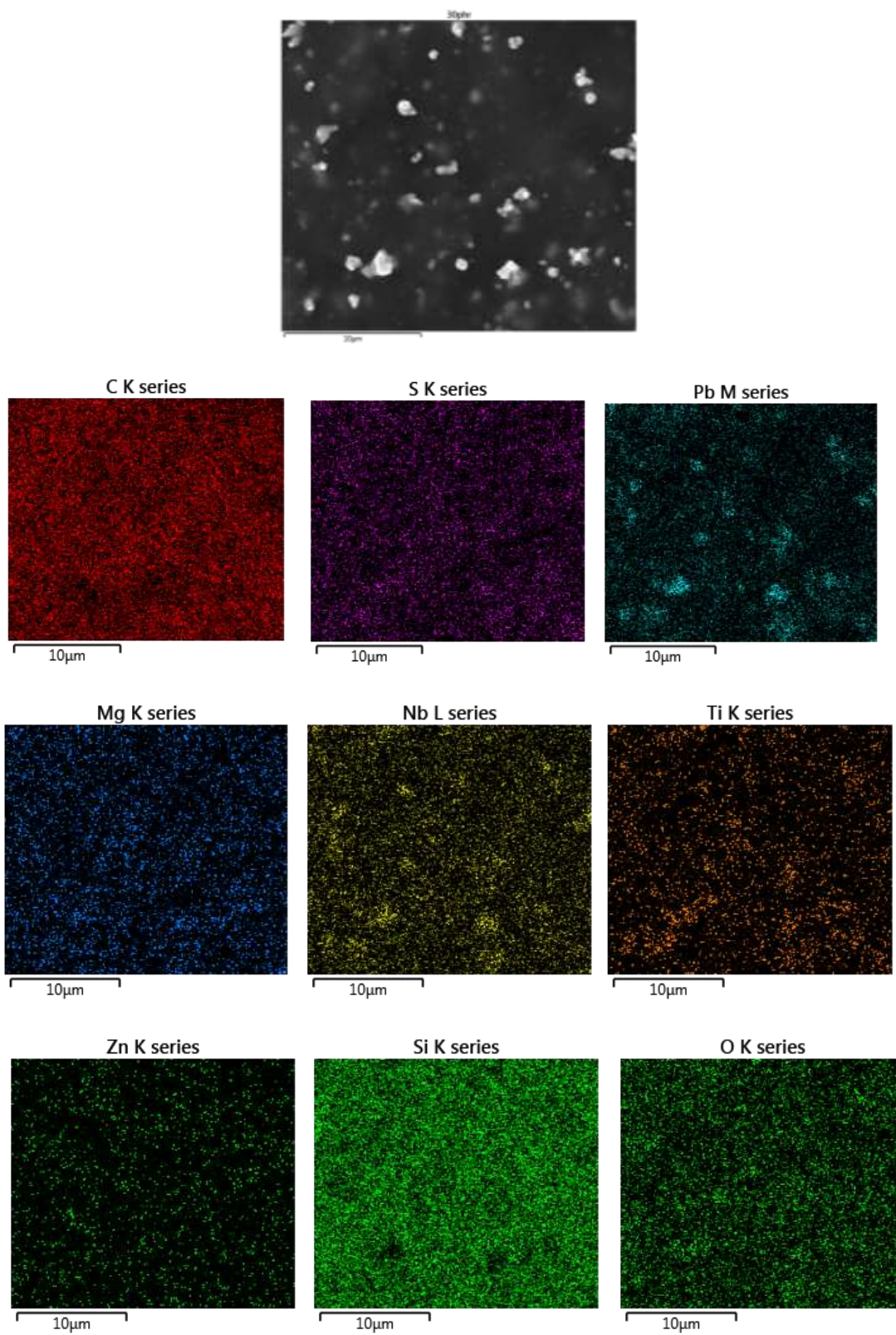
รูป 4.22 กราฟแสดงปริมาณการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/20SiO<sub>2</sub>



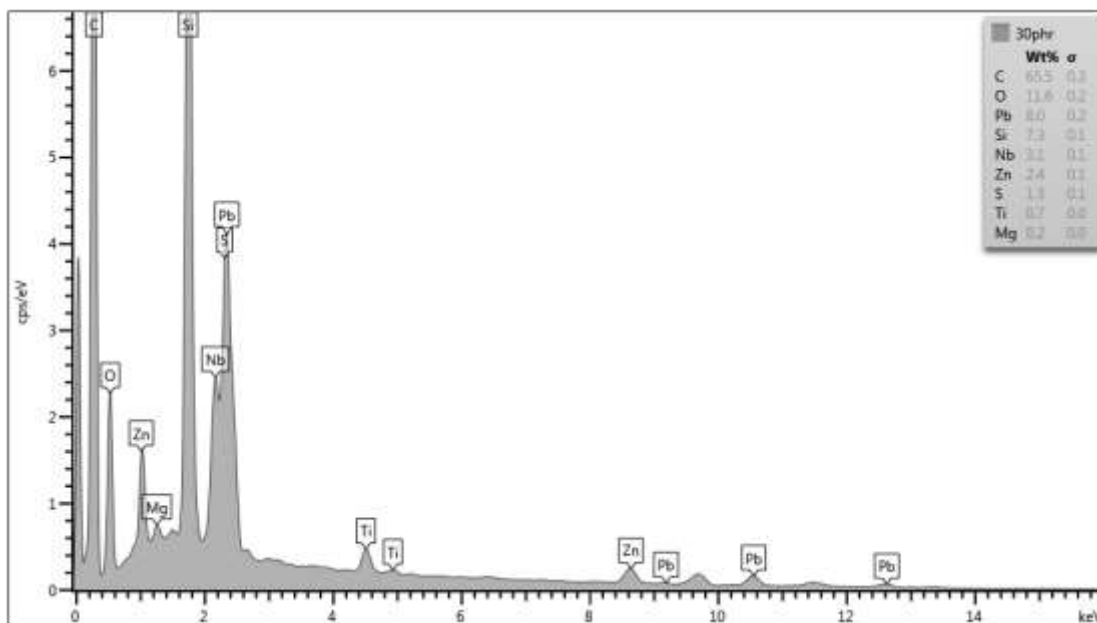
รูป 4.23 การกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/25SiO<sub>2</sub>



รูป 4.24 กราฟแสดงปริมาณการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/25SiO<sub>2</sub>



รูป 4.25 การกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/30SiO<sub>2</sub>

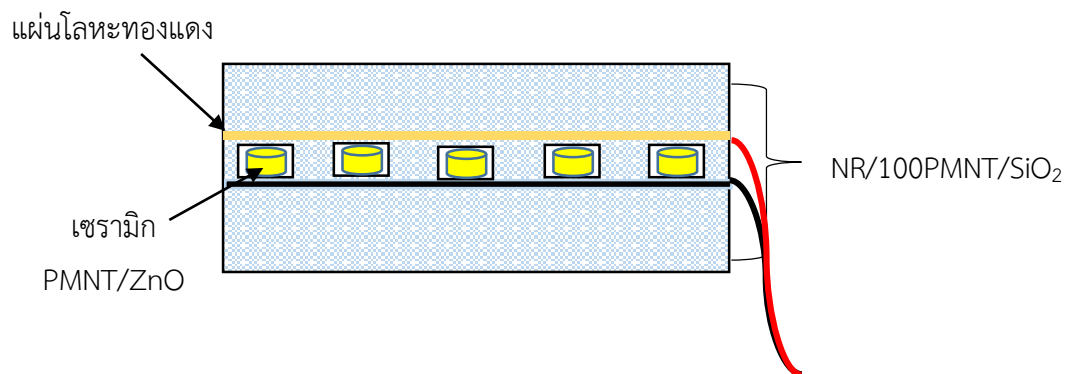


รูป 4.26 กราฟแสดงปริมาณการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของวัสดุผสม NR/100PMNT/30SiO<sub>2</sub>

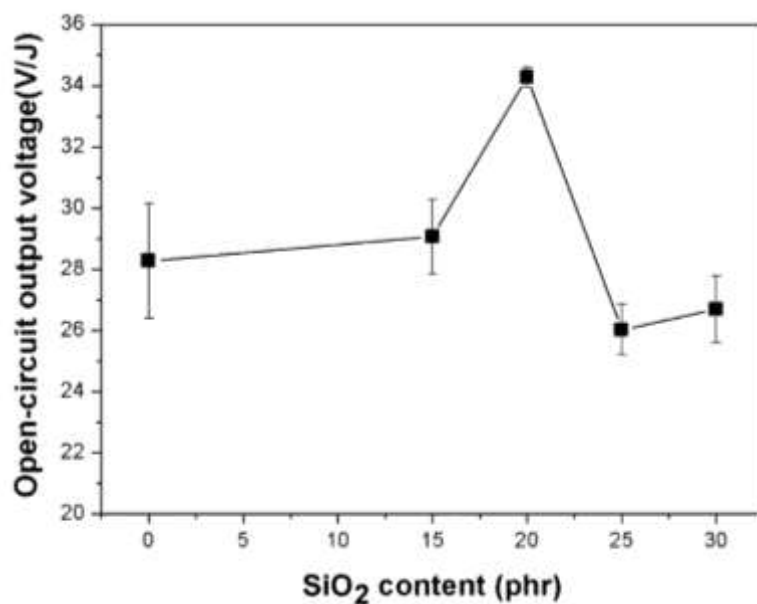
#### 4.3 ผลการทดสอบความต่างศักย์ไฟฟ้าวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>

จากรูปที่ 4.27 แสดงชิ้นงานตัวอย่างวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub> ที่ใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้า การวัดความต่างศักย์ที่วัสดุผสมสร้างขึ้นเมื่อได้รับแรงกระทำจากลูกตุ้มสามารถคำนวณเป็นพลังงานศักย์โน้มถ่วงจากสมการที่ 4.2 มีค่าเท่ากับ 0.2884 จูล จากนั้นนำมาคำนวณกับค่าที่ได้จากเครื่อง Picoscope จะได้ออกมาเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของวัสดุผสมเซรามิก NR/PMNT/SiO<sub>2</sub> แสดงดังรูป 4.28 และตารางที่ 4.6 ผลการทดลองจะเห็นได้ว่าวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT ที่มีปริมาณ SiO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้นถึง 20 phr ให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากขึ้น เมื่อปริมาณ SiO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลง อาจเนื่องมาจากโครงสร้างจุลภาคของวัสดุมีความแน่นตัวลดน้อยลง เกิดรูพรุนในชิ้นงานเพิ่มขึ้นทำให้การถ่ายโอนประจุไฟฟ้าได้ไม่ดีส่งผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ลดน้อยลง และอีกปัจจัยที่อาจจะส่งผลต่อการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ลูกตุ้มเหล็กที่มีลักษณะทรงกลมให้แรงกระทำกับวัสดุ ซึ่งวัสดุเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม อาจทำให้แรงที่ได้รับกระจายไม่ทั่วแผ่นของวัสดุทำให้วัสดุสร้างศักย์ไฟฟ้าได้น้อย จึงได้ทำการนำแผ่นอะคริลิกหนา 1 cm มาวางไว้บนชิ้นงานก่อนปล่อยลูกตุ้มเพื่อช่วยกระจายแรง อย่างไรก็ตามวัสดุมีการรับแรงกระทำได้ดีไม่ส่งผลให้เซรามิก PMNT/ZnO ที่อยู่ภายในแผ่นยางไม่แตกหัก





รูป 4.27 แสดงตัวอย่างวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/SiO<sub>2</sub>



รูป 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT ที่ปริมาณ SiO<sub>2</sub> เท่ากับ 0 15 20 25 และ 30 phr

ตาราง 4.6 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT ที่ปริมาณ SiO<sub>2</sub> เท่ากับ 0 15 20 25 และ 30 phr

ปริมาณ SiO <sub>2</sub> (phr)	ค่าความต่างศักย์ (V/J)
0	28.3 ± 1.9
15	29.1 ± 1.2
20	34.7 ± 0.3
25	28.1 ± 0.8
30	21.1 ± 1.1

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. งานวิจัยปรับปรุงสมบัติวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพูน ที่ปริมาณเซรามิก PMNT 100 phr (NR/100PMNT) โดยมี 2 เงื่อนไข ดังนี้ 1) การเติม  $\text{SiO}_2$  ในวัสดุผสมผงเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพูน (วัสดุผสมผงเซรามิก NR/100PMNT/ $\text{SiO}_2$ ) ที่ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เท่ากับ 15 20 25 และ 30 phr 2) วัสดุผสมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เท่ากับ 15 20 25 และ 30 phr กับเซรามิก PMNT/ZnO (วัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/ $\text{SiO}_2$ ) ทำการเตรียมได้สำเร็จ

2. เซรามิกเลดแมกนีเซียมไททานเนตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์ (PMNT/ZnO) ที่เตรียมได้มีค่าความหนาแน่น โดยใช้หลักการอาร์คิมิดีส มีความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานทั้งหมดมีค่าเท่ากับ  $7.51 \text{ g/cm}^3$  มีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 4-5 ไมครอน ค่าคงไดอิเล็กทริก 2250 วัดที่ความถี่ 200 kHz อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.0328 ค่าโพลาไรเซชันคงค้างเท่ากับ  $26.38 \text{ } \mu\text{C/cm}^2$  ค่าสนามไฟฟ้าลบล้างเท่ากับ  $7.54 \text{ kV/cm}$  วัดที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  ที่ความถี่ 25 Hz ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกเท่ากับ  $383.3 \pm 5.05 \text{ pC/N}$  และ ค่าความต่างเพียโซอิเล็กทริกเท่ากับ  $20.41 \times 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{m/N}$  มีสมบัติที่ดีเหมาะแก่การนำไปผสมกับยางธรรมชาติเป็นวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มียางธรรมเป็นเนื้อพูนต่อไป

3. ผลการศึกษาการเตรียมวัสดุผสมผงเซรามิก NR/100PMNT/ $\text{SiO}_2$  สมบัติเชิงกล ตรวจสอบความเค้นเชิงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่ 15-25 phr มีค่าเท่ากับ  $13.0 \pm 0.4$  และ  $16.0 \pm 1.0 \text{ MPa}$  ร้อยละการยืดตัวก่อนขาดมีค่าเท่ากับ  $556 \pm 24$  และ  $629 \pm 25$  ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่ 25 phr ความเค้นเชิงดึงมีค่าลดลงเท่ากับ  $14.1 \pm 0.7 \text{ PMa}$  ร้อยละการยืดตัวก่อนขาดมีค่าเท่ากับ  $555 \pm 16$  อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่ 30 phr ค่าความเค้นเชิงดึงเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ  $19.7 \pm 0.7 \text{ PMa}$  ร้อยละการยืดตัวก่อนขาดมีค่าเท่ากับ  $502 \pm 8$  สมบัติทางไฟฟ้า ตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก วัดที่ความถี่ 1 10 100 และ 200 kHz อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  เพิ่มขึ้นเมื่อเติม  $\text{SiO}_2$  ในปริมาณ 15 phr และลดลงที่ปริมาณ 20-25 phr อย่างไรก็ตาม ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เมื่อปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เพิ่มขึ้นเป็น 30 phr เนื่องจากความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (ปริมาณรูพรุนลดลง) สมบัติเพียโซอิเล็กทริกวัสดุผสมที่สร้างขึ้นแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ต่ำวัดที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  ที่ความถี่ 50 Hz โดยมีโพลาไรเซชันคงค้างและสนามไฟฟ้าลบล้างเท่ากับ  $0.05 \text{ } \mu\text{C/cm}^2$  และ  $10 \text{ kV/cm}$  ตามลำดับ และสมบัติความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่ 15-20 phr มีค่าเท่ากับ  $27.66 \pm 1.8$  และ  $25.93 \pm 1.9 \text{ V/J}$  ตามลำดับ มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่ 25-30 phr มีค่าเท่ากับ  $18.0 \pm 1.8$  และ  $15.83 \pm 1.9 \text{ V/J}$

4. ผลการศึกษาการเตรียมวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/ $\text{SiO}_2$  สมบัติไฟฟ้า ตรวจสอบความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่ 15-20 phr มีค่าเท่ากับ  $29.1 \pm 1.2$

และ  $34.7 \pm 0.3$  V/J ตามลำดับ มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่ 25-30 phr มีค่าเท่ากับ  $28.1 \pm 0.8$  และ  $21.1 \pm 1.1$  V/J

5. วัสดุผสมผงเซรามิก NR/100PMNT/ $\text{SiO}_2$  และวัสดุผสมเซรามิก NR/100PMNT/ $\text{SiO}_2$ ที่มีการเติม  $\text{SiO}_2$  ที่ปริมาณ 20 phr มีคุณสมบัติทางกล สมบัติไฟฟ้าที่ดีมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุแปลงพลังงาน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรมีการทดสอบสมบัติความต่างศักย์ไฟฟ้าในรูปแบบอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น การตรวจสอบในสภาวะจริง



### บรรณานุกรม

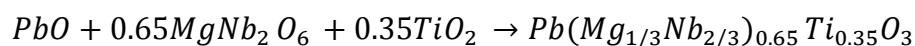
- [1] <http://www2.eppo.go.th/doc/doc-AlterFuel.html> (สืบค้นเมื่อ 15/11/2561).
- [2] <http://www.eppo.go.th> (สืบค้นเมื่อ 16/11/2561 )
- [3] <http://www.science.buu.ac.th> (สืบค้นเมื่อ 15/11/2561)
- [4] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน (สนพ.). Piezoelectric เก็บเกี่ยวแรงสั่นสะเทือนก่อเกิดพลังงาน. 2561. <http://www.eppo.go.th> (สืบค้นเมื่อ 16/11/2561)
- [5] Samadoloh S, Promsawat N, Kalkornsurapranee E, Lertwittayanon K, Pojprapai S and Promsawat M: Preparation and characterization of  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{1-x}Ti_xO_3$  ceramics to fabricate flexible piezoelectric composites. Proceedings of the Pure and Applied Chemistry International Conference 2018 (PACCON 2018): MN 169-172.
- [6] Promsawat M, Promsawat N, Wong JW, Luo Z, Pojprapai S and Jiansirisomboon S: Effects of frequency on electrical fatigue behavior of ZnO-modified  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.65}Ti_{0.35}O_3$  ceramics. Ceram Int. 2017;43: 13475-13482.
- [7] Samadoloh S, Promsawat N, Kalkornsurapranee E, Pojprapai S and Promsawat M: Fabrication and characterization of flexible piezoelectric composites with natural rubber matrix. Integr Ferroelectr. 2019;195: 30-38.
- [8] Promsawat M, Watcharapasorn A, Ye ZG and Jiansirisomboon S: Enhanced dielectric and ferroelectric properties of  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.65}Ti_{0.35}O_3$  ceramics by ZnO modification. Am J Ceram Soc. 2015;98: 848-854.
- [9] Noheda B, Cox DE, and Shirane G: Phase diagram of the ferroelectric relaxor  $(1-x)PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3-xPbTiO_3$ , Phys Rev B. 2002;66: 54-104.
- [10] Feng G, Rongzi H, Jiaji L, Zhen Li and Chang-sheng T: Effects of ZnO/Li<sub>2</sub>O codoping on microstructure and piezoelectric properties of low-temperature sintered PMN–PNN–PZT ceramics, Ceram Int. 2009;35: 1863–1869.
- [11] Wongmaneerung R, Yimnirun R, and Ananta S: Synthesis and electrical properties of  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ – $PbTiO_3$  ceramics, Curr Appl Phys. 2009;9: 268–273.
- [12] Haocheng X and Linbing W: Piezoelectric energy harvester for public roadway: On site installation and evaluation, Appl Energy. 2016;174: 101–107.
- [13] Jasim A, Wang H, Yesner G, Safari A and Maher A: Optimized design of layered bridge transducer for piezoelectric energy harvesting from roadway, Energy. 2017;141: 1133-1145.
- [14] Wang C, Wang S, Joshua Q, Wang X, Gao Z and Zhang L: Fabrication and performance of a power generation device based on stacked

- piezoelectric energy-harvesting units for pavements, *Energ Convers Manag.* 2018;163: 196–207.
- [15] Qian F, Xu TB and Zuo L: Design, optimization, modeling and testing of a piezoelectric footwear energy harvester, *Energ Convers Manag.* 171. 2018: 1352–1364.
- [16] Hana P, Panga S, Fanb J, Shena X and Panb T: Highly enhanced piezoelectric properties of PLZT/PVDF composite by tailoring the ceramic Curie temperature, particle size and volume fraction, *Sensor Actuator.* 2013;204: 74– 78.
- [17] Salaeh S, Muensit N, Bomlai P and Nakason C: Ceramic/natural rubber composites: influence types of rubber and ceramic materials on curing, mechanical, morphological, and dielectric properties. *J Mater Sci.* 2011;46: 1723-1731.
- [18] Tsai J-W, Wang J-J, and Su Y-S: Piezoelectric rubber films for autonomous physiological monitoring systems. *Sensor Actuators A.* 2014;215: 176–183.
- [19] George N, Venugopol B, John H, Mathiazhagan A and Joseph R: Nanosilica decorated multiwalled carbon nanotubes (CS hybrids) in natural rubber latex. *Polymer.* 2019;161: 170-180.
- [20] Tangudom P, Sombatsompop N, and Thongsang S: Cure characteristics and mechanical properties of rubbers filled with silica hybrid filler, *Proceeding The 4<sup>th</sup> Science Reseach Conference:* PH44-49.
- [21] <http://www.sci.kmutnb.ac.th> (สืบค้นเมื่อ 01/08/2562)
- [22] <http://www.biomed.in.thf> (สืบค้นเมื่อ 15/08/2562)
- [23] <http://www.dss.go.th> (สืบค้นเมื่อ 10/05/2561)
- [24] <http://archive.constantcontact.com> (สืบค้น 11/05/2561)
- [25] <http://www.doitpoms.ac.uk> (สืบค้นเมื่อ 10/05/2561)
- [26] <http://archive.constantcontact.com> (สืบค้นเมื่อ 10/08/61)
- [27] <http://www.sciencedirect.com> (สืบค้นเมื่อ 10/08/61)
- [28] <http://www.doitpoms.ac.uk> (สืบค้นเมื่อ 10/08/61)
- [29] <http://www.rmutphysics.com> (สืบค้นเมื่อ 15/08/61)

- [30] Churea M, Wua L, Kungwub K, Cheng C, Tungb S, Linb and Mab W: Power generation characteristics of PZT piezoelectric ceramic susing drop weigh timpact techniques : Effect ofdimensional size, Ceram Int. 2014;40: 341–345.
- [31] Yang Z, Zhou S, Zu J and Inman D: High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications, Joule. 2018;2: 642-697.
- [32] [www.doi.nrct.go.th](http://www.doi.nrct.go.th) (สืบค้นเมื่อ 30/09/2562)
- [32] <https://www.americanpiezo.com> (สืบค้นเมื่อ 30/09/2562)
- [33] Bokov A-A and Ye Z-G: Ferroelectric Properties of Monoclinic  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3$  Crystals , Phys Rev B. 2002;66: 094-112.
- [34] Arif D, Sheikh H, Kumar H and Mathe V-L, Dielectric properties of chemically co-precipitated tetragonal  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.65}\text{Ti}_{0.35}\text{O}_3$ . Solid State Sci. 2010;12: 1534-1539.
- [35] <http://www.thaiceramicsociety.com> (สืบค้นเมื่อ 30/09/2562)
- [36] <http://www.mne.eng.psu.ac.th> (สืบค้นเมื่อ 30/09/2562)
- [37] <http://www.agstech.net> (สืบค้นเมื่อ 30/09/2562)
- [38] สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา, กอบบุญ หล่อทองคำ, ธาชาย เหลืองวรานันท์, และ ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล. 2548. วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน.กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด
- [39] นิธินาถ แซ่ตั้ง. 2557. ยางธรรมชาติ:การประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นทดแทนวัตถุดิบจากปิโตรเคมี. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 19(2): 109-209.
- [40] ภัญชिता ภูมิมระเปียบ.2556. สารเคมีสำหรับยาง (Additives for Rubber). โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรมกรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- [41] <http://rubber.oie.go.th> (สืบค้นเมื่อ 30/05/2562)
- [42] <http://www.rmutphysics.com> (สืบค้นเมื่อ 29/09/2562)
- [43] <http://www.slri.or.th> (สืบค้นเมื่อ 29/09/2562)
- [44] <http://www.sec.psu.ac.th> (สืบค้นเมื่อ 30/09/2562)

**ภาคผนวก ก**  
**การคำนวณสาร**

การคำนวณปริมาณสารเลดแมกนีเซียมไนโอเบตเลดไททานิตที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์  
วิธีการคำนวณการเตรียมผง  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.65}Ti_{0.35}O_3$  ที่เติมแต่งด้วยซิงค์ออกไซด์



$$\begin{aligned} Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.65}Ti_{0.35}O_3 &= 207.20 + [(24.30 \times 0.65/3) + (92.91 \times 2 \times 0.65/3)] + (47.87 \times 0.35) \\ &\quad + (16.00 \times 3) \\ &= 317.48 \text{ g/mole} \end{aligned}$$

$$PbO = 207.20 + 16.00$$

$$= 223.20 \text{ g/mole}$$

$$MgNb_2O_6 = 24.31 + (92.91 \times 2) + (16.00 \times 6)$$

$$= 306.11 \text{ g/mole}$$

$$TiO_2 = 47.87 + (16.00 \times 2)$$

$$= 79.87 \text{ g/mole}$$

การคำนวณสาร PMNT 100 g คิดเป็น 0.32 mole

PbO	1 mole	= 1 × 0.32
		= 0.32 mole
ต้องซัง PbO		= 0.32 × 223.20
		= <b>70.31 g</b>
MgNb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	0.22 mole	= 0.22 × 0.32
		= 0.07 mole
ต้องซัง MgNb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>		= 0.07 × 306.12
		= <b>20.89 g</b>
TiO <sub>2</sub>	0.35 mole	= 0.35 × 0.32
		= 0.01 mole
ต้องซัง TiO <sub>2</sub>		= 0.01 × 79.87
		= <b>8.81 g</b>
ZnO		= <b>0.1 g</b>

การคำนวณปริมาณ SiO<sub>2</sub> ที่ 0 phr

Ingredient	S.G. (ถ.พ.)	Quantity (phr)	ปริมาตร (V <sub>R</sub> )	น้ำหนัก (กรัม)
NR(STR 5L)	0.92	100	108.69	33.30
Zinc oxide	5.50	5	0.90	1.67
Stearic acid	0.9	1	1.11	0.33
PMNT	1.95	100	51.36	33.3
dibenzthiazyl disulphid (MBTS)	1	1	1	0.33
Butylated hydroxytoluene (BHT)	1	1	1	0.33
Sulfur	2.10	2.50	1.19	0.83

$$\text{สูตรที่ 1} \quad \text{volume} = \frac{\text{phr}}{\text{S.G.}}$$

$$\text{M.F.} = \frac{\text{Batch size}}{\text{phr}}$$

$$\text{น้ำหนัก} = \text{phr} \times \text{M.F.}$$

การคำนวณปริมาณ SiO<sub>2</sub> ที่ 15 phr

Ingredient	S.G. (ถ.พ.)	Quantity (phr)	ปริมาตร (V <sub>R</sub> )	น้ำหนัก (กรัม)
NR(STR 5L)	0.92	100	108.69	31.10
Zinc oxide	5.50	5	0.90	1.56
Stearic acid	0.90	1	1.11	0.31
PMNT	1.95	100	51.36	31.10
Silica	2.65	15	5.66	4.67
dibenzthiazyl disulphid (MBTS)	1	1	1	0.31
Butylated hydroxytoluene (BHT)	1	1	1	0.31
Sulfur	2.10	2.50	1.19	0.78

$$\begin{aligned} \text{สูตรที่ 2} \quad \text{volume} &= \frac{\text{phr}}{\text{S.G.}} \\ &= \frac{15}{2.65} \\ &= 5.66 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{M.F.} &= \frac{\text{Batch size}}{\text{phr}} \\ &= \frac{70.0234}{225.5} \\ &= 0.311 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนัก} &= \text{phr} \times \text{M.F.} \\ &= 15 \times 0.311 \\ &= 4.665 \end{aligned}$$

การคำนวณปริมาณ SiO<sub>2</sub> ที่ 20 phr

Ingredient	S.G. (ถ.พ.)	Quantity (phr)	ปริมาตร (V <sub>R</sub> )	น้ำหนัก (กรัม)
NR(STR 5L)	0.92	100	108.69	30.40
Zinc oxide	5.50	5	0.90	1.52
Stearic acid	0.90	1	1.11	0.30
PMNT	1.95	100	51.36	30.40
Silica	2.65	20	7.55	6.07
dibenzthiazyl disulphid (MBTS)	1	1	1	0.30
Butylated hydroxytoluene (BHT)	1	1	1	0.30
Sulfur	2.10	2.50	1.190	0.76

$$\begin{aligned}
 \text{สูตรที่ 3} \quad \text{volume} &= \frac{\text{phr}}{\text{S.G.}} \\
 &= \frac{20}{2.65} \\
 &= 7.55
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{M.F.} &= \frac{\text{Batch size}}{\text{phr}} \\
 &= \frac{70.0234}{230.5} \\
 &= 0.30
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนัก} &= \text{phr} \times \text{M.F.} \\
 &= 20 \times 0.304 \\
 &= 6.08
 \end{aligned}$$

การคำนวณปริมาณ SiO<sub>2</sub> 25 phr

Ingredient	S.G. ( ถ.พ.)	Quantity (phr)	ปริมาตร (V <sub>R</sub> )	น้ำหนัก ( กรัม )
NR(STR 5L)	0.92	100	108.69	29.7
Zinc oxide	5.50	5	0.90	1.49
Stearic acid	0.90	1	1.11	0.30
PMNT	1.95	100	51.36	29.70
Silica	2.65	25	9.43	7.43
dibenzthiazyl disulphid (MBTS)	1	1	1	0.30
Butylated hydroxytoluene (BHT)	1	1	1	0.30
Sulfur	2.1	2.5	1.19	0.74

$$\begin{aligned}
 \text{สูตรที่ 4} \quad \text{volume} &= \frac{\text{phr}}{\text{S.G.}} \\
 &= \frac{25}{2.65} \\
 &= 9.43
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{M.F.} &= \frac{\text{Batch size}}{\text{phr}} \\
 &= \frac{70.0234}{235.5} \\
 &= 0.30
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนัก} &= \text{phr} \times \text{M.F.} \\
 &= 25 \times 0.297 \\
 &= 7.43
 \end{aligned}$$



การคำนวณปริมาณ SiO<sub>2</sub> ที่ 30 phr

Ingredient	S.G. ( ถ.พ.)	Quantity (phr)	ปริมาตร (V <sub>R</sub> )	น้ำหนัก ( กรัม )
NR(STR 5L)	0.92	100	108.69	29.20
Zinc oxide	5.50	5	0.90	1.46
Stearic acid	0.90	1	1.11	0.29
PMNT	1.95	100	51.36	29.20
Silica	2.65	30	11.32	8.76
dibenzthiazyl disulphid (MBTS)	1	1	1	0.29
Butylated hydroxytoluene (BHT)	1	1	1	0.29
Sulfur	2.1	2.5	1.19	0.73

$$\begin{aligned}
 \text{สูตรที่ 5} \quad \text{volume} &= \frac{\text{phr}}{\text{S.G.}} \\
 &= \frac{30}{2.65} \\
 &= 11.32
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{M.F.} &= \frac{\text{Batch size}}{\text{phr}} \\
 &= \frac{70.0234}{240.5} \\
 &= 0.29
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนัก} &= \text{phr} \times \text{M.F.} \\
 &= 30 \times 0.292 \\
 &= 8.76
 \end{aligned}$$

## ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

INTEGRATED FERROELECTRICS  
2019, VOL. 195, 30–38  
<https://doi.org/10.1080/10584587.2019.1570041>



### Fabrication and characterization of flexible piezoelectric composites with natural rubber matrix

Sukanya Samadoloh<sup>a</sup>, Napatporn Promsawat<sup>b</sup>, Ekwipoo Kalkornsurapranee<sup>a</sup>, Soodkhet Pojprapai<sup>c</sup>, and Methee Promsawat<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand; <sup>b</sup>Synchrotron Light Research Institute, Nakhon Ratchasima, Thailand; <sup>c</sup>School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

#### ABSTRACT

This work aims to fabricate and characterize flexible piezoelectric composites with natural rubber (NR) matrix. Different amounts of  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.65}\text{Ti}_{0.35}\text{O}_3$  (PMNT) powders were added in NR matrices. Porosity, tensile strength and percent elongation at break of composites tended to decrease with increasing PMNT content. The dielectric constant of the NR materials was found to be 3.5. It was raised up to 4.2, 5.0, 4.5, 4.8 and 5.1 when 60, 80, 100, 120 and 150 phr PMNT powders were added. However, dielectric loss of NR materials did not change with PMNT additions. Among this composite system, the NR/100PMNT composite showed the best piezoelectric properties, which its output voltage, piezoelectric coefficient ( $d_{33}$ ) and piezoelectric voltage coefficient ( $g_{33}$ ) values were equal to 1.61 V,  $2.1 \times 10^{-4}$  pC/N and  $5.4 \times 10^{-6}$  V·m/N, respectively. This composition composite is a promising material suitable for further improvement to be used as piezoelectric generators in energy harvesting applications.

#### ARTICLE HISTORY

Received 31 October 2017  
Accepted 22 June 2018

#### KEYWORDS

Composite; PMNT; natural rubber; energy harvesting; piezoelectric

### 1. Introduction

Piezoelectric materials play a significance role in the field of renewable energy for using as generators in energy harvesting devices [1–4]. With the direct piezoelectric effect, piezoelectric materials can be used to harvest mechanical vibrations produced during human activities in daily such as walking, running as well as vehicle passages. Piezoelectric composite with polymer matrix is a form of piezoelectric generators that is widely studied and selected to develop energy harvesting materials [5–7]. Combination of high piezoelectric materials with high elastic materials could produce piezoelectric generators with high mechanical damage resistance. In recent years, many researchers have synthesized flexible piezoelectric composites with polymer matrices. Piezoelectric materials that have been used as piezoelectric dispersed phases were  $\text{BaTiO}_3$  [5,7],  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-SrTiO}_3$  [8],  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  [9–11],  $\text{PbTiO}_3$  [12,13],  $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  [14] and  $\text{LiTaO}_3$  [6]. Polyurethane [11,15], polyimide

CONTACT Methee Promsawat [methee.p@psu.ac.th](mailto:methee.p@psu.ac.th) Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, 15 Karnjanavanich Road, Hat Yai, Songkhla, 90112, Thailand  
Color versions of one or more figures in the article can be found online at [www.tandfonline.com/ginf](http://www.tandfonline.com/ginf).

© 2019 Taylor & Francis Group, LLC

[16,17], polystyrene [18], epoxy [14,19], polydimethylsiloxane (PDMS) [10] and polyvinylidene fluoride (PVDF) [8,20] were commonly used as matrices. From our previous works, ZnO-modified  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.65}\text{Ti}_{0.35}\text{O}_3$  (PMNT) ceramics have been fabricated. Among ZnO-modified PMNT ceramics, the PMNT/0.4mol%ZnO ceramics showed the best piezoelectric performance which was comparable to that of commercial PZT piezoelectric ceramics [21,22]. Natural rubber is an agriculture product that has been extensively used in many industries. For examples, shoe, appliance, automotive industries as well as medical equipment and electronic devices [23]. Recently, Salaeh *et al.* have fabricated flexible dielectric composites with natural rubber matrix which  $\text{BaTiO}_3$  and  $\text{PbTiO}_3$  dielectric particles were used as the dispersed phase [13]. It has been observed that dielectric properties of natural rubber were significantly improved with additions of each dielectric phase. However, from our knowledge, there were very few works that have studied about fabrication processes and properties of dielectric-/piezoelectric composites with natural rubber matrix.

Therefore, in the present work, we aim to fabricate flexible piezoelectric composites with natural rubber matrix. Different amounts of ZnO-modified  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.65}\text{Ti}_{0.35}\text{O}_3$  (PMNT) particles as the dispersed phase were added into natural rubber matrices. The effects of PMNT particles additions and their contents on phase, microstructure, mechanical and electrical properties, i.e. dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties, of NR/PMNT composites were investigated and discussed in details. This work provide an optimum content of PMNT phase that make the composite suitable for further improvement for high performance piezoelectric generators in energy harvesting applications.

## 2. Experimental details

ZnO-modified  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.65}\text{Ti}_{0.35}\text{O}_3$  (PMNT) powders were prepared by a columbite route method.  $\text{PbO}$  (99.5%, TOPLUS, China),  $\text{MgO}$  (99%, TOPLUS, China),  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (99.99%, TOPLUS, China),  $\text{TiO}_2$  (99%, TOPLUS, China) and  $\text{ZnO}$  (99.7%, TOPLUS, China) were used as starting materials.  $\text{MgNb}_2\text{O}_6$  (columbite) powders were firstly prepared and then mixed with the predetermined amounts of  $\text{PbO}$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{ZnO}$  powders in ethanol medium with Yt-stabilized zirconia grinding balls for 24 hr. The mixture was calcined at  $900^\circ\text{C}$  for 5 hr. Different amounts (0, 60, 80, 100, 120 and 150 phr) of PMNT powders were added in natural rubber (NR) matrices by using an internal mixer (Rheomix OS, Thermo Scientific, USA). NR/PMNT composites were formed by using a compression molding under a 2500 psi pressure at  $150^\circ\text{C}$  and composite sheets with a 1 mm thickness were then obtained. The compounding formulation used to prepare composites is given in Table 1. Phase, microstructure and chemical composition of

**Table 1.** Compounding formulation used to prepare NR/PMNT composites.

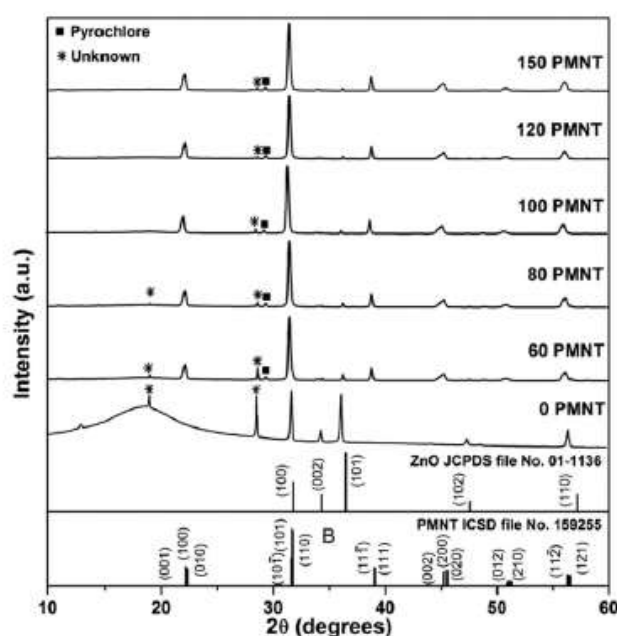
Ingredient	Quantity (phr)
NR	100
Zinc oxide	5
Stearic acid	1
PMNT	0, 60, 80, 100, 120 and 150 (0, 38, 44, 50, 55 and 60 wt%)
N-tert-butyl-benzothiazole sulfonamide (TBBS)	1
Sulfur	2.5



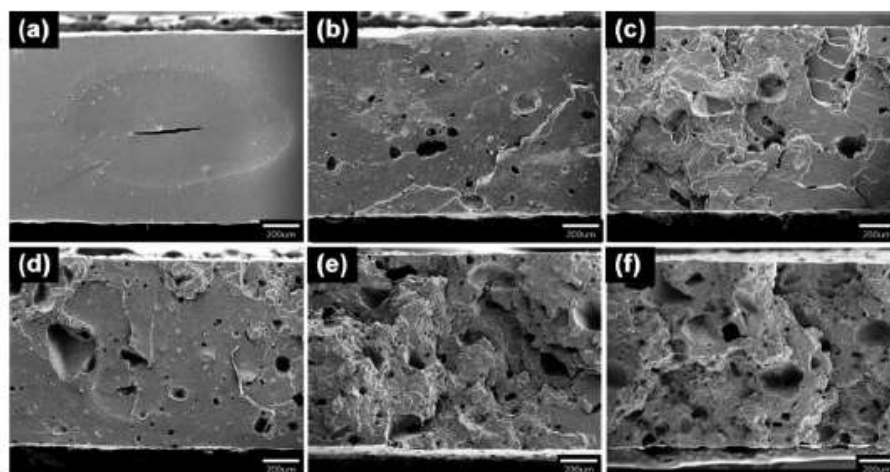
composites were characterized by an X-ray diffraction technique (XRD, Rigaku SmartLab, Japan), a scanning electron microscope (SEM, JSM-IT300LV, JEOL, Japan) and energy dispersive X-ray spectrometer (EDX, JSM-IT300LV, JEOL, Japan), respectively. Tensile strength was measured by using a universal tensile testing machine (Instron, 3365, USA). Dielectric and ferroelectric properties were characterized by a LCR meter (GW Instek, LCR-821, Taiwan) and a Sawyer-Tower circuit, respectively. Output voltages generated during applying compressive stress by a pneumatic system of unpoled samples were monitored and recorded by an oscilloscope (Rigol, DS1052E, USA).

### 3. Results and discussion

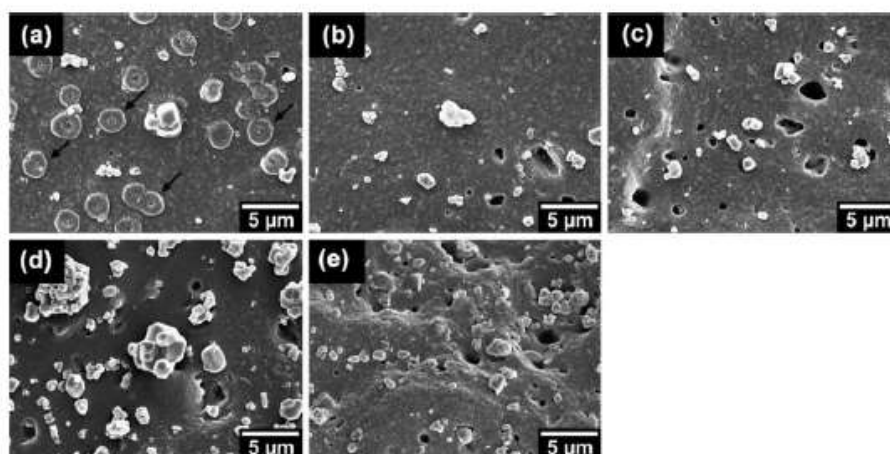
XRD patterns of composites are shown in Figure 1. A set of reflection peaks belonging to ZnO phase was observed in the XRD pattern of NR material (0PMNT). Moreover, diffraction peaks of unknown phases (indicated by the asterisks) were also found in the pattern. Such unknown phases were possible to be formed from the chemical reaction between ingredients consisted in the NR material. A hump, which was a characteristic of non-crystalline materials, was observed at  $2\theta \approx 18^\circ$ . This was consistent with a previous result observed by Lagashetty *et al.* [24]. However, it was disappeared when PMNT powders were added. The XRD patterns of the NR/PMNT composites showed reflection peaks of PMNT phase with a monoclinic symmetry of a perovskite structure, corresponding to ICSD file no. 159255. Small amount of a pyrochlore phase subsisted in the NR/PMNT composites. The ratio of the intensity of (101) peak of the PMNT phase to



**Figure 1.** XRD patterns of NR/PMNT composites with different PMNT contents. The squares and the asterisks indicated the peaks of pyrochlore and unknown phases, respectively.



**Figure 2.** SEM images of fractured surfaces after tensile tests of (a) NR and the composites incorporated with PMNT contents of (b) 60, (c) 80, (d) 100, (e) 120 and (f) 150 phr at 80× magnification.

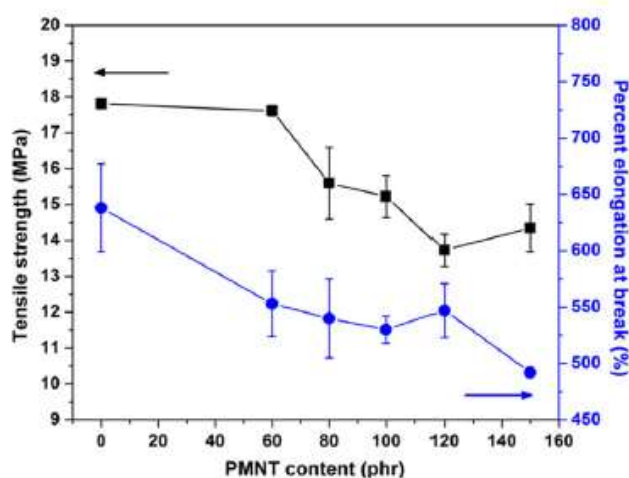


**Figure 3.** SEM images of fractured surfaces after tensile tests of the composites incorporated with PMNT contents of (a) 60, (b) 80, (c) 100, (d) 120 and (e) 150 phr at 5000× magnification.

the intensity of (101) peak of ZnO phase tended to decrease with increasing PMNT content. This corresponded with the relative amount of PMNT and NR phases existing in the composites.

SEM images of fractured surfaces of the composites are demonstrated in Figure 2. It can be seen that fractured surfaces' roughness and sample's porosities increased with increasing PMNT content. It was believed that excess PMNT powders could obstruct an attachment of NR molecules, resulting in a poor densification. Enlarged views of fractured surfaces of the composites are depicted in Figure 3. Round-shaped nodes were observed in the NR/60PMNT composite, as indicated by the arrows in Figure 3a. A node could be formed from surrounding a small PMNT particle by NR matrix. However, no node was found while agglomerated PMNT particles and micro-pores



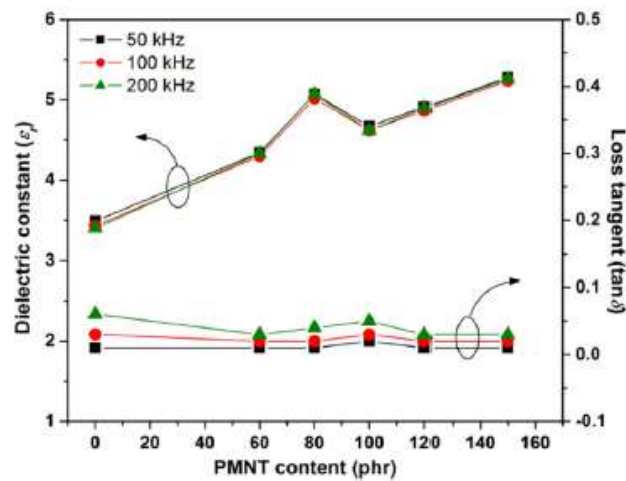


**Figure 4.** The plot of tensile strength and percent elongation at break as a function of PMNT content of NR/PMNT composites.

were observed instead when 60-150 phr PMNT powders were added, as shown in Figure 3b–e. For NR/PMNT composites, most the particles were well-dispersed. Some agglomerated PMNT powders and micro-pores were observed. It was believed that PMNT particles blocked NR molecules to attach and those PMNT particles then pulled out from NR matrix, creating micro-pores. EDX results confirmed that bright-particles embedded in NR matrix were ZnO-doped PMNT materials (the results were not shown here).

Mechanical properties, i.e. a tensile strength and a percent elongation at break, of composites were measured. The obtained values were plotted as a function of PMNT content as shown in Figure 4. The values of tensile strength and elongation at break of the NR material were about 18 MPa and 640%, respectively. The tensile strength obtained from NR materials in this work was similar to that reported in Ref. [13] while the percent elongation was slightly lower. It can be seen from the result that the tensile strength did not change with 60 phr PMNT addition. However, the tensile strength tended to decrease downwards to the minimum value of about 14 MPa with further increasing PMNT content up to 120 phr. The tensile strength did not deteriorate further as PMNT content reached to 150 phr. For 60-150 phr PMNT composites, percent elongation at break tended to decrease with increasing PMNT content. The degradation of the tensile strength and the percent elongation at break could be caused by the increase in the porosity of the composites.

Dielectric constant ( $\epsilon_r$ ) and loss tangent ( $\tan\delta$ ) values measured at room temperature at frequencies of 50, 100 and 200 kHz of NR/PMNT composites were plotted as a function of PMNT content as shown in Figure 5. It can be seen that the increasing tendency of the  $\epsilon_r$  with PMNT content was observed in this composite system. The increment of the  $\epsilon_r$  was mainly due to the relative high dielectric constant of PMNT particles in the NR matrix. However, the  $\epsilon_r$  dropped with 100 phr PMNT addition. This could be mainly caused by the increment of porosity of the composite. Nevertheless, the



**Figure 5.** The plot of dielectric constant and dielectric loss measured at a room temperature at different frequencies as a function of PMNT content of NR/PMNT composites.

**Table 2.** Dielectric constant, dielectric loss, open-circuit output voltage and calculated piezoelectric properties of NR/PMNT composites.

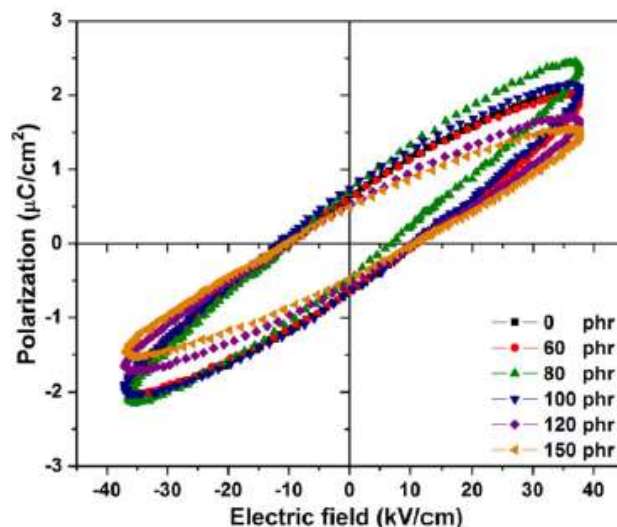
PMNT content (phr)	$\epsilon_r^*$	$\tan\delta^*$	Output voltage (V)	$d_{33}$ (pC/N)	$g_{33}$ (V-m/N)
0	3.4	0.06	$0.24 \pm 0.02$	$0.2 \times 10^{-4}$	$8.0 \times 10^{-7}$
60	4.3	0.03	$0.89 \pm 0.07$	$1.1 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-6}$
80	5.1	0.04	$0.93 \pm 0.05$	$1.4 \times 10^{-4}$	$3.1 \times 10^{-6}$
100	4.6	0.05	$1.61 \pm 0.05$	$2.1 \times 10^{-4}$	$5.4 \times 10^{-6}$
120	4.9	0.03	$0.98 \pm 0.04$	$1.4 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-6}$
150	5.3	0.03	$0.71 \pm 0.03$	$1.1 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-6}$

\*The values measured at room temperature and at a frequency of 200 kHz.

increasing tendency of  $\epsilon_r$  with PMNT content was shown again when PMNT content was above 100 phr. For these composites, although they possessed high porosities, however, the relative high dielectric constant of PMNT particles had dominant effect on dielectric properties of the composites. At a given frequency, the  $\tan\delta$  did not vary with PMNT content as the result shown in Table 2. A very weak frequency dispersion of  $\epsilon_r$  was observed for the monolithic NR material. This was due to the fact that less dipoles, which were created from polar functional groups in polymer chains, could follow the switching field as frequency increased [16,25,26]. As a result, a decreasing trend of  $\epsilon_r$  with frequency was observed. However, the other samples showed frequency independent- $\epsilon_r$ . For all the samples, increasing of  $\tan\delta$  with frequency was observed. Frequency dispersion of  $\tan\delta$  seemed to be weaker when PMNT particles were added.  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.65}\text{Ti}_{0.35}\text{O}_3$  materials was known as normal ferroelectric materials with no frequency dispersions of dielectric properties [21]. The frequency dispersion of dielectric properties of NR materials was therefore suppressed by PMNT additions.

Polarization-electric field ( $P$ - $E$ ) hysteresis loops measured at room temperature at 50 Hz of composites are demonstrated in Figure 6. A weak ferroelectric response was observed in all the samples. Remanent polarization ( $P_r$ ) and coercive field ( $E_c$ ) values of  $0.7 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  and  $10 \text{ kV}/\text{cm}$ , respectively, were found for NR materials. The weak





**Figure 6.** The plot of polarization versus electric field measured at a room temperature at 50 Hz of NR/PMNT composites.

ferroelectric response observed in NR samples could be caused from orientations of polar NR molecules. A slight improvement in ferroelectric properties, i.e. an increase in  $P_r$  and a decrease in  $E_c$ , was found when 80 phr PMNT was added. This was mainly due to the relative high  $P_r$  and low  $E_c$  of PMNT phase [21]. The properties degraded when higher amounts (100–150 phr) of PMNT particles were added. This was attributed to the higher porosities of the composites.

Average values of open-circuit output voltage generated under a 300 N compressive load of unpoled composites are also given in Table 2. A small signal of electrical output voltage observed in NR materials was believed to be due to displacements of dipoles through deformations of NR molecules under mechanical loading. Output voltage abruptly increased and reached a maximum value with increasing PMNT content up to 100 phr. This implied that additions of PMNT particles could improve piezoelectric properties of NR materials. However, tendency of output voltage with PMNT content became decreasingly as PMNT content was above 100 phr. This was attributed to the increasing of samples' porosities. Based on generated output voltages under a mechanical load, piezoelectric coefficients ( $d_{33}$ ) and piezoelectric voltage coefficients ( $g_{33}$ ) were calculated by using the equations proposed in Ref. [27]. The results were given in Table 2. In addition, the output power of the NR/100PMNT composite at various load resistances was also determined (the result was not shown here). The generated output power was found to be maximized, which was equal to 3  $\mu$ W, at a 600  $k\Omega$  load. It can be clearly seen that dielectric and piezoelectric properties of NR materials were significantly improved by additions of PMNT particles. Among NR/PMNT composites, the NR/100PMNT composite showed relative high piezoelectric properties with comparable mechanical properties to the others. However, further improvements in its electrical properties were still required to make this composite material suitable for energy harvesting applications.



#### 4. Conclusion

In this work, flexible piezoelectric NR/PMNT composites were successfully fabricated. The XRD pattern of NR material showed diffraction peaks of ingredients consisted in the material while the reflection of PMNT material with a perovskite structure was mainly shown in the XRD patterns of the NR/PMNT composites. SEM images demonstrated that fractured surfaces' roughness and porosities of the samples increased with increasing PMNT content. Most the particles were well-dispersed in the matrices. Some agglomerated particles together with micro-pores were also observed. Tensile strength and percent elongation at break tended to decrease with increasing PMNT concentration. An increasing tendency of dielectric constant with PMNT content was observed while loss tangent seemed to be PMNT content independent. For all the composites, loss tangent increased with increasing measurement frequency. The ferroelectric properties of NR materials slightly improved with 80 phr PMNT addition while the properties were deteriorated with the further more PMNT additions. Piezoelectric properties, i.e. output voltage, piezoelectric coefficient and piezoelectric voltage coefficient, were maximized when 100 phr PMNT was added. We hope that the NR/100PMNT composite is a promising material that is suitable for further improvement to be used as piezoelectric generators in energy harvesters.

#### Acknowledgements

MP also would like to thank Miss. Kan-ubon Boonsri for dielectric data collections.

#### Funding

This research was supported by Natural Rubber Innovation Research Institute, Prince of Songkla University (Grant No. SCI601093S).

#### References

1. X. D. Xie, Q. Wang, and S. J. Wang, Energy harvesting from high-rise buildings by a piezoelectric harvester device. *Energy*. **93**, 1345 (2015). DOI: 10.1016/j.energy.2015.09.131.
2. X. D. Xie, and Q. Wang, Energy harvesting from a vehicle suspension system. *Energy*. **86**, 385 (2015). DOI: 10.1016/j.energy.2015.04.009.
3. M. A. Ilyas, and J. Swingler, Piezoelectric energy harvesting from raindrop impacts. *Energy*. **90**, 796 (2015). DOI: 10.1016/j.energy.2015.07.114.
4. H. Roshani, S. Dessouky, A. Montoya, and A. T. Papagiannakis, Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses: a feasibility study. *Appl Energy*. **182**, 210 (2016). DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.116.
5. J. Li *et al.*, Electrical energy storage in ferroelectric polymer nanocomposites containing surface-functionalized BaTiO<sub>3</sub> nanoparticles. *Chem. Mater.* **20** (20), 6304 (2008). DOI: 10.1021/cm8021648.
6. P. Guggilla, A. K. Batra, and M. E. Edwards, Electrical characterization of LiTaO<sub>3</sub>:P(VDF-TrFE) composites. *J. Mater. Sci.* **44** (20), 5469 (2009). DOI: 10.1007/s10853-009-3753-8.
7. X. Huang *et al.*, Electrical, thermophysical and micromechanical properties of ethylene-vinyl acetate elastomer composites with surface modified BaTiO<sub>3</sub> nanoparticles. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** (24), 245407 (2009). DOI: 10.1088/0022-3727/42/24/245407.



8. S. H. Ji *et al.*, Flexible lead-free piezoelectric nanofiber composites based on BNT-ST and PVDF for frequency sensor applications. *Sens Actuators A*, **247**, 316–322. DOI: 10.1016/j.sna.2016.06.011.
9. A. Almusallam *et al.*, Flexible piezoelectric nano-composite films for kinetic energy harvesting from textiles. *Nano Energy*, **33**, 146–156. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.01.037.
10. I. Babu, and G. de With, Highly flexible piezoelectric 0-3 PZT-PDMS composites with high filler content. *Compos Sci Technol*, **91**, 91–97. DOI: 10.1016/j.compscitech.2013.11.027.
11. H. Khanbareh, S. van der Zwaag, and P. Groen, Large area and flexible micro-porous piezoelectric materials for soft robotic skin. *Sens Actuators A*, **263**, 554–562. DOI: 10.1016/j.sna.2017.07.001.
12. B. Ploss *et al.*, Pyroelectric activity of ferroelectric PT/PVDF-TRFE. *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.* **7** (4), 517 (2000). DOI: 10.1109/94.868071.
13. S. Salaeh, N. Muensit, P. Bomlai, and C. Nakason, Ceramic/natural rubber composites: influence types of rubber and ceramic materials on curing, mechanical, morphological, and dielectric properties. *J. Mater. Sci.* **46** (6), 1723 (2011). DOI: 10.1007/s10853-010-4990-6.
14. Z. Zeng *et al.*, A flexible, sandwich structure piezoelectric energy harvester using PIN-PMN-PT/epoxy 2-2 composite flake for wearable application. *Sens Actuators A*, **265**, 62–69. DOI: 10.1016/j.sna.2017.07.059.
15. W. K. Sakamoto, P. Marin-Franch, and D. F. Das-Gupta, Characterization and application of PZT/PU and graphite doped PZT/PU composite. *Sens Actuators A*, **100** (2–3), 165 (2002). DOI: 10.1016/S0924-4247(02)00042-0.
16. S. F. Wang, Y. R. Wang, K. C. Cheng, and Y. P. Hsiao, Characteristics of polyimide/barium titanate composite films. *Ceram Int*, **35** (1), 265 (2009). DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.10.004.
17. A. Choudhury, Dielectric and piezoelectric properties of polyetherimide/BaTiO<sub>3</sub> nanocomposites. *Mater Chem Phys*, **121** (1–2), 280 (2010). DOI: 10.1016/j.matchemphys.2010.01.035.
18. R. Abraham *et al.*, Mechanical properties of ceramic-polymer nanocomposites. *eXPRESS Polym. Lett.* **3** (3), 177 (2009). DOI: 10.3144/expresspolymlett.2009.23.
19. S. A. Wilson, G. M. Maistros, and R. W. Whatmore, Structure modification of 0–3 piezoelectric ceramic/polymer composites through dielectrophoresis. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** (2), 175 (2005). DOI: 10.1088/0022-3727/38/2/001.
20. I. Jung *et al.*, Flexible piezoelectric polymer-based energy harvesting system for roadway applications. *Appl Energy*, **197**, 222 (2017). DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.020.
21. M. Promsawat *et al.*, Enhanced dielectric and ferroelectric properties of Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)<sub>0.65</sub>Ti<sub>0.35</sub>O<sub>3</sub> ceramics by ZnO modification. *J. Am. Ceram. Soc.* **98** (3), 848 (2015). DOI: 10.1111/jace.13372.
22. M. Promsawat, Z. G. Ye, and A. Watcharapasorn, Enhancement of piezoelectric properties of Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)<sub>0.65</sub>Ti<sub>0.35</sub>O<sub>3</sub> ceramics by ZnO modification. *Mater Lett*, **205**, 126 (2017). DOI: 10.1016/j.matlet.2017.06.070.
23. S. Kohjiya, and Y. Ikeda, *Chemistry, manufacture and applications of natural rubber* (Woodhead Publishing Limited, UK 2014).
24. A. Lagashetty, and A. Venkataraman, Polymer nanocomposites. *Reson.* **10** (7), 49 (2005). DOI: 10.1007/BF02867106.
25. R. Popielarz *et al.*, Dielectric properties of polymer/ferroelectric ceramic composites from 100 Hz to 10 GHz. *Macromolecules*, **34** (17), 5910 (2001). DOI: 10.1021/ma001576b.
26. A. S. A. Reffae *et al.*, Electrical and mechanical properties of acrylonitrile rubber and linear low density polyethylene composites in the vicinity of the percolation threshold. *Mater Des.* **30** (9), 3760 (2009). DOI: 10.1016/j.matdes.2009.02.001.
27. G. H. Haertling, Ferroelectric ceramics: history and technology. *J. Am. Ceram. Soc.* **82** (4), 797 (1999). DOI: 10.1111/j.1151-2916.1999.tb01840.x.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวสุกัญญา สมะดอเล้าะ  
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 6010220110  
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ) (วัสดุศาสตร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2559

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

2561 ทุนอุดหนุนวิจัย  
 2560-2561 ทุนผู้ช่วยวิจัยเพื่อสร้างองค์ความรู้ขั้นสูง ระดับปริญญาโท สถาบันวิจัยและพัฒนา  
 นวัตกรรมยางพารา

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน (ถ้ามี)

Samadoloh S., Promsawat N., Kalkornsurapranee E., Pojprapai S. and Promsawat M.:  
 Fabrication and characterization of flexible piezoelectric composites with  
 natural rubber matrix. Integr Ferroelectr. 2019;195: 30-38.

Samadoloh S., Promsawat N., Kalkornsurapranee E., Lertwittayanon K., Pojprapai S.  
 and Promsawat M.: Preparation and characterization of  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{1-x}Ti_xO_3$   
 ceramics to fabricate flexible piezoelectric composites. Oral : Pure and Applied  
 Chemistry International Conference 2018 (PACCON2018), Songkla, Thailand.  
 February 2018: MN 169-172.