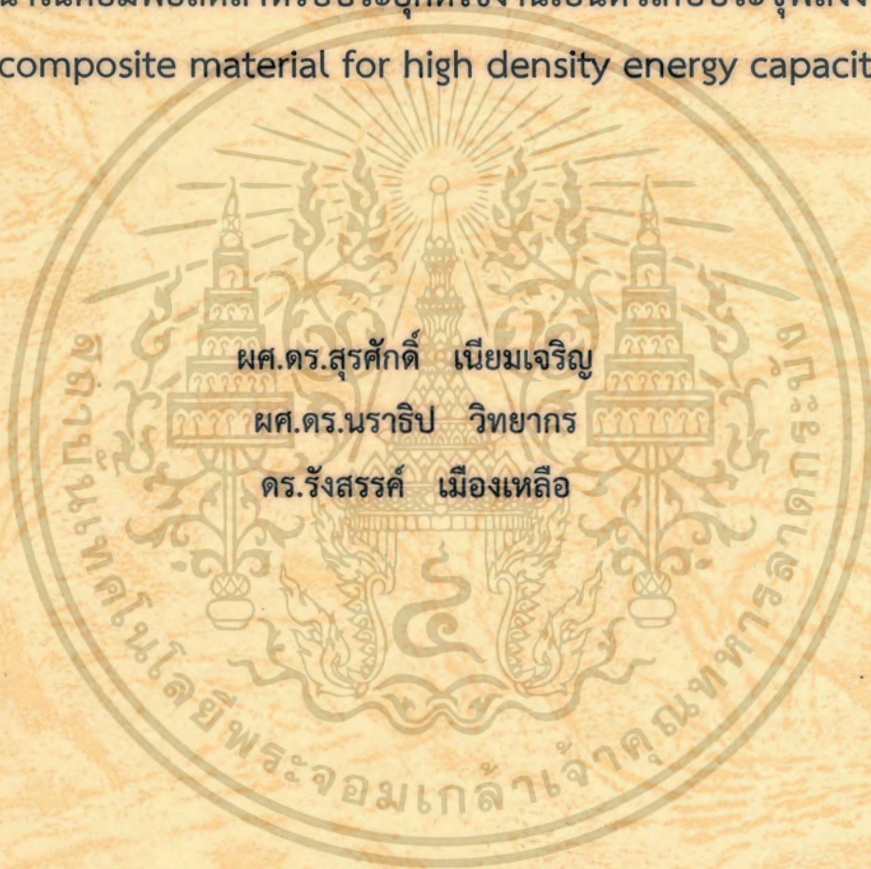




รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

วัสดุผสมนาโนคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง
Nanocomposite material for high density energy capacitor



ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
ผศ.ดร.นราธิป วิทยากร
ดร.รังสรรค์ เมืองเหล็ก

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

วัสดุผสมนาโนคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง
Nanocomposite material for high density energy capacitor



ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ผศ.ดร.นราธิป วิทยากร

ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) วัสดุผสมนาโนคอมโพสิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุ
พลังงานสูง

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557.....
 งบประจำปีงบประมาณ..... 2557..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 890,000..... บาท
 ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2556 ถึง 30 กันยายน 2557.....
 หัวหน้าโครงการวิจัย..... ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ.....
 ผู้ร่วมโครงการวิจัย..... ผศ.ดร. นราธิป วิทยาการ.....
 ผู้ร่วมโครงการวิจัย..... ดร. รังสรรค์ เมืองเหลือ.....
 ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง ในสองรูปแบบคือรูปแบบ 3-3 ของเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PZ/PVDF) โดยเตรียมเส้นใยนาโนเซรามิกเลดเซอร์โคเนตด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) และทำการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตในรูปแบบ 0-3 ของแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (BT-PDMS) และศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน จากนั้นนำคอมโพสิตที่ได้ไปตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) และการส่องผ่านรังสีอินฟราเรด (FT-IR) ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต PZ-CNT-PVDF มีค่าอยู่ในช่วง 97-49 ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต PZ/PVDF ในช่วงความถี่ที่ทำการวัดจาก 100 Hz to 2 MHz เนื่องมาจากเส้นใย PZ สามารถกระจายตัวได้ดีโดยการเกิดเป็นของผสมเชิงซ้อนกับโครงข่ายของ CNT นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต PZ-CNT-PVDF ยังมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าต่ำกว่า 0.09 ที่ความถี่ต่ำ และจากการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของ BT-PDMS พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต BT-PDMS มีค่าอยู่ในช่วง 3.7-10.6 โดยมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาตรของแบเรียมไททาเนต และจากการปรับปรุงสมบัติของนาโนคอมโพสิต BT-PDMS ด้วยแท่งนาโนคาร์บอนพบว่าทำให้แบเรียมไททาเนตเกิดการกระจายตัวในเมทริกซ์เฟสได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : เลดเซอร์โคเนต พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ แบเรียมไททาเนต พอลิไดเมทิลซิลอกเซน แท่งนาโนคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Nanocomposite material for high density energy capacitor

Researcher: Asst.Dr. Surasak Niemcharoen...

: Asst.Dr. Naratip Vittayakorn.....

: Dr. Rangson Muanghlua.....

Department: Electronics Engineering **Faculty:** Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate Nanocomposite material for high density energy capacitor. Moreover, this research also investigated the improvement of nanocomposite by adding carbon nanotube (CNT). The crystal structure and morphology were investigated by X-ray diffraction, FT-IR and SEM. Moreover, the dielectric properties of the nanocomposite were characterized. The dielectric constant of the PZ-CNT-PVDF nanocomposite measured at room temperature was found to be in the range of 97-49, within the measurement frequencies from 100 Hz to 2 MHz, and higher than the PZ/PVDF nanocomposite without CNT. This result agrees reasonably well with the percolation theory of CNT. The dielectric loss of the composite is below 0.09 at low frequencies. In another system, the dielectric constant of the BT/PDMS nanocomposites was found to be in the range of 3.7-10.6, and it increased with increasing filler content. Finally, the modification of BT/PDMS composites with CNT reveals an interesting result. The addition of CNT can improve the distribution and dispersion of the BT phase in the PDMS matrix phase. Thus, the dielectric property of BT/PDMS composites was improved as well.

Keywords : Lead zirconate, Polyvinylidene fluoride, Barium titanate, Polydimethylsiloxane, Carbon nanotube

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็น วัสดุผสมนาโนคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง นี้ ประสบความสำเร็จได้ ต้องขอกราบขอบพระคุณ จากบุคคลดังต่อไปนี้

การวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ด้วยเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ให้สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณชนิศา นวนิล ที่ช่วยเหลือแนะนำเทคนิค เกี่ยวกับการวิจัย ตอบ ข้อซักถาม และช่วยปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจนกระทั่งงานวิจัยนี้บรรลุไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ

ขอบคุณสมาชิกหน่วยวิจัยอิเล็กทรอนิกส์เซรามิกชั้นสูงทุกคน ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และคอย ช่วยเหลือให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่มีความสนใจในงานที่เกี่ยวข้อง ทางด้านนี้หรือผู้ที่ต้องการศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับงานวิจัย หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยต้องขอ อภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ผศ.ดร. นราธิป วิทยากร

ดร. รังสรรค์ เมืองเหลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric Material).....	4
2.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material).....	5
2.2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct Effect).....	5
2.2.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (Reverse Effect).....	6
2.3 การเกิดโพลาริเซชันตัวเอง (Spontaneous Polarization).....	7
2.4 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (Perovskite Structure).....	10
2.5 เลดเซอร์โคเนต (Lead zirconate; $PbZrO_3$ or PZ).....	12
2.6 แบเรียมไททาเนต (Barium titanate; $BaTiO_3$).....	13
2.7 พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS).....	15
2.7.1 สมบัติของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน.....	15
2.8 พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ (Polyvinylidene difluoride; PVDF).....	16
2.9 เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning Technique).....	17
2.10 กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel Process).....	18
2.11 คอมโพสิต (composite).....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11.1 การจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสในคอมโพสิต.....	20
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 สารเคมี.....	42
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโน PZ.....	42
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของ PZ-PVDF และ PZ-PVDF-CNT.....	42
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของ BT-PDMS และ BT-PDMS-CNT.....	43
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	43
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโน PZ.....	43
3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-PVDF-CNT.....	44
3.2.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิต BT-PDMS และ BT-PDMS-CNT.....	44
3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	45
3.3 การเตรียมคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-PVDF-CNT.....	45
3.3.1 การเตรียมสารละลายตั้งต้นเลดเซอร์โคเนตด้วยกระบวนการโซล-เจล.....	45
3.3.2 การเตรียมสารละลายเลดเซอร์โคเนตกับพอลิเอทิลีนออกไซด์.....	46
3.3.3 การประดิษฐ์เส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง.....	46
3.3.4 การเตรียมคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-PVDF-CNT.....	46
3.4 การเตรียมคอมโพสิต BT-PDMS และ BT-PDMS-CNT.....	47
3.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	47
3.6 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	49
3.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	50
3.8 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก.....	52
3.8.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant).....	53
3.8.2 การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss tangent).....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	58
4.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต PZ/PVDF และ PZ/PVDF/CNT	58
4.1.1 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของ PZ/PVDF.....	58
4.1.2 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของ PZ/PVDF/CNT.....	59
4.1.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	59
4.1.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	60
4.1.5 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก.....	61
4.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติไดอิเล็กทริกของ BT-PDMS และ BT-PDMS-CNT.....	63
4.2.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของ BT-PDMS ด้วย XRD.....	63
4.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของ BT-PDMS-CNT ด้วย XRD.....	64
4.2.3 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของ BT-PDMS.....	65
4.2.4 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของ BT-PDMS-CNT.....	68
4.2.5 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของ BT-PDMS ด้วย FT-IR.....	68
4.2.6 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของ BT-PDMS-CNT ด้วย FT-IR.....	69
4.2.7 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของ BT-PDMS ด้วย Raman.....	70
4.2.8 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของ BT-PDMS-CNT ด้วย Raman.....	71
4.2.9 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของ BT-PDMS.....	73
4.2.10 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของ BT-PDMS-CNT.....	76
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	81
บทที่ 6 ผลผลิต	82
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	82
6.2 ผลงานเชิงสาธารณะ.....	82
6.3 ผลงานที่ได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการ.....	82
บรรณานุกรม	83
ประวัติผู้วิจัย	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของ PVDF เทียบกับ PZT และ BaTiO ₃ ที่อุณหภูมิ 20°C.....	16
2.2 ความหนาแน่น ค่าความจุความร้อน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต BaTiO ₃ /PVDF ที่ได้จากการคำนวณ.....	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การจัดแบ่งกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก.....	4
2.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct effect).....	5
2.3 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (Reverse effect).....	6
2.4 โครงสร้างผลึกของแบเรียมไททาเนต.....	8
2.5 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อปริมาณการเกิดโพลาไรเซชันของผลึก BaTiO ₃	9
2.6 โครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์.....	10
2.7 โครงสร้างของเลดเซอร์โคเนต (Lead zirconate).....	12
2.8 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแบเรียมไททาเนต (BaTiO ₃).....	14
2.9 โครงสร้างของ PDMS.....	15
2.10 โครงสร้างของ PVDF.....	16
2.11 ส่วนประกอบและการติดตั้งเครื่องอิเล็กทรอนิกส์.....	18
2.12 รูปแบบการเชื่อมต่อเฟสแบบต่างๆ ของวัสดุผสมที่มี 2 เฟส.....	21
2.13 คอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์กับเซรามิก (ก) แบบ 0-3 คอมโพสิต (ข)-(ค) แบบ 1-3 คอมโพสิต.....	22
2.14 แบบจำลองของเฟาเออร์ 0-3 คอมโพสิต.....	23
2.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PZ ที่เวลาในการเผาแคลไซน์ 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10°C/นาที.....	24
2.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PZ จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C และอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10°C/นาที.....	25
2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก PZ ที่เตรียมได้จากกระบวนการโซลเจลภายหลังจากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	25
2.18 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของฟิล์มบาง PZ ในช่วงความถี่ 10 ⁻¹ -10 ³ kHz.....	26
2.19 ความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้สัมพันธ์กับเวลาภายใต้ความถี่คกอดที่ 2 Hz.....	27
2.20 ค่าความแข็งแรงยืดหยุ่น (Young's modulus) เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณไททาเนีย.....	28
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเพียโซอิเล็กทริกกับสนามไฟฟ้าของเส้นใยนาโน BNT.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.22 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และการสูญเสียไดอิเล็กทริก ของคอมโพสิตที่มีปริมาตรต่าง ๆ กันของวัสดุผสม ก่อนและหลังการโพลลิง.....	29
2.23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความต้านทานของนาโนคอมโพสิต PE/MWCNT.....	30
2.24 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต PZT/PVC 50/50 vo1% และ PZT/C/PVC 50/0.5/49.5 vo1% ที่อุณหภูมิห้อง.....	31
2.25 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกของคอมโพสิต PZT/C/PVC กับสัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอน.....	31
2.26 ค่าศักย์ไฟฟ้าของวัสดุ PZT เมื่อให้แรงเชิงกล.....	32
2.27 ค่ากำลังไฟฟ้าของวัสดุ PZT ที่ความต้านทานต่างๆ.....	33
2.28 แผนภาพจำลองของตัวตรวจจับ PZT NAFCs AE.....	33
2.29 เวเฟอร์ของอินเตอร์ดิจิตอลทรานซิสเตอร์กับเส้นใย PZT.....	34
2.30 สัญญาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวตรวจจับเทียบกับเวลา.....	34
2.31 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก (ข) ของคอมโพสิต BaTiO ₃ /PVDF ที่ 1 kHz.....	36
2.32 กราฟ Stress-strain ของวัสดุคอมโพสิตและฟิล์มโคพอลิเมอร์ภายใต้การดึงยึดในทิศทางเดียว.....	36
2.33 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อเทียบกับความถี่ของคอมโพสิต PP/40 wt. % BT ที่ 0-3 wt.% MWNT.....	37
2.34 ค่าการนำไฟฟ้าเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CNT.....	37
2.35 SEM ของ PMMA/BaTiO ₃ คอมโพสิตที่ BaTiO ₃ 45% ปริมาตร.....	38
2.36 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมขึ้นกับ (ก) ความถี่ (ข) ปริมาตร BT ใน PMMA เมทริกซ์.....	39
2.37 เสถียรภาพของคอมโพสิตภายใต้ความเครียดกดอัด 0.23% เป็นเวลา 30 ชั่วโมงที่ความถี่ 0.33 Hz.....	40
2.38 ภาพจากกล้องดิจิตอลแสดงแสงจากหลอด LED ที่เปิดด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโนคอมโพสิต.....	40
2.39 สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้จากอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโนคอมโพสิตขณะทำการบิดงออย่างต่อเนื่อง.....	41
3.1 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ป็นนึ่งสำหรับประดิษฐ์เส้นใยนาโนเซรามิกเลดเซอร์โคเนต (PZ).....	46
3.2 แบบจำลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	48
3.3 ส่วนประกอบของเครื่อง FTIR spectrometer.....	50
3.4 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5 กราฟแสดงโพลาริเซชันของวัสดุในช่วงความถี่ต่างๆ.....	53
3.6 (ก) ตัวเก็บประจุแผ่นโลหะขนานอย่างง่ายที่ตัวกลางระหว่างแผ่นเป็นสุญญากาศ (ข) ตัวเก็บประจุแบบเดียวกันแต่มีวัสดุไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างแผ่นโลหะ.....	55
3.7 ลักษณะเพสที่เกิดขึ้นในสารไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ.....	55
4.1 โครงสร้างจุลภาคภาพตัดขวางของคอมโพสิต PZ-PVDF ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (ก) แบบปกติ และ (ข) ที่ได้จากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน.....	58
4.2 โครงสร้างจุลภาคของ (ก) เส้นใยเลดเซอร์โคเนต และ (ข) คอมโพสิต PZ-CNT-PVDFที่ได้จากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน.....	59
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-CNT-PVDF.....	60
4.4 สเปกตรัมการส่องผ่านรังสีอินฟราเรดของคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-CNT-PVDF.....	61
4.5 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของนาโนคอมโพสิต PZ-PVDF เทียบกับ PZ-CNT-PVDF.....	62
4.6 แบบจำลองปรากฏการณ์การการเชื่อมต่อกันของอนุภาคของคอมโพสิต (ก) PZ-PVDF เทียบกับ (ข) PZ-CNT-PVDF.....	63
4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต BT-PDMS.....	63
4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต BT/PDMS/CNT.....	65
4.9 สันฐานวิทยาบริเวณรอยหักของคอมโพสิต BT-PDMS เมื่อมีการปรับปริมาตร BT.....	66
4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของคอมโพสิต BT-PDMS-CNT เมื่อมีการปรับปริมาตร CNT.....	67
4.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของคอมโพสิต BT-PDMS.....	69
4.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของคอมโพสิต BT-PDMS-CNT.....	70
4.13 รามานสเปกตรัมของคอมโพสิต BT-PDMS.....	71
4.14-รามานสเปกตรัมของคอมโพสิต BT-PDMS-CNT.....	72
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับปริมาตรของ BT-PDMS.....	73
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การสูญเสียไดอิเล็กตริกกับปริมาตรของ BT-PDMS.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.17 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต BT-PDMS ที่ขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณจากสมการต่างๆ	76
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาตรของแท่งนาโนคาร์บอนของวัสดุคอมโพสิต.....	77
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การสูญเสียไดอิเล็กทริกกับปริมาตรของแท่งนาโนคาร์บอน.....	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนพลังงานนับเป็นปัญหาที่สำคัญของโลก ด้วยเหตุนี้พลังงานกลที่จับจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบจึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจ ไม่ว่าจะเป็นแหล่งพลังงานกลขนาดใหญ่ที่พบในธรรมชาติ ได้แก่ น้ำตก ลม และคลื่น ไปจนถึงแหล่งพลังงานขนาดเล็ก เช่น พลังงานที่ได้จากการสั่นสะเทือนเชิงกลในอาคาร เครื่องยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ความดันอากาศ ตลอดจนการเคลื่อนไหวของมนุษย์ โดยอุปกรณ์ที่สามารถสร้างพลังงานได้ด้วยตัวเองจากการสั่นสะเทือนเพียงเล็กน้อยนี้ เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่น่าสนใจ ซึ่งวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้นั้นเรียกว่า วัสดุเพียโซอิเล็กทริก เมื่อมีการสั่นหรือการทำให้เกิดพลังงานกลแก่ผลึกของวัสดุจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวัสดุ หรือแม้แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไป วัสดุจะสามารถยืดหรือหดในระดับนาโนเมตรได้ ในปัจจุบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางด้านวัสดุที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกมีความเจริญก้าวหน้าเป็นอย่างมาก โดยมีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น ในอุปกรณ์ ตัวตรวจจับ (sensor) ตัวขับเคลื่อน (actuator) และทรานสดิวเซอร์ (transducer) จะมีสารเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectrics) เป็นองค์ประกอบหลัก อาทิเช่น สารในกลุ่มของเลดเซอร์โคเนต (PZ) และแบเรียมไททาเนต (BT) เนื่องจากสารกลุ่มนี้มีสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่น

อย่างไรก็ตามวัสดุเพียโซเซรามิกเหล่านี้มีข้อจำกัดในเรื่องของความยืดหยุ่นในการใช้งาน มีความเปราะ และแตกหักง่าย จากข้อจำกัดดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ที่มีความความยืดหยุ่น แต่ยังคงสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยทำการศึกษาในรูปแบบของวัสดุผสม (composite) เรียกว่าวัสดุนี้ว่า วัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต (Piezoelectric composite) ซึ่งประกอบด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ที่มีความยืดหยุ่น และแข็งแรง เนื่องจากเป็นการรวมสมบัติทางกายภาพของเซรามิกและพอลิเมอร์เมทริกซ์เข้าด้วยกัน โดยหนึ่งในปัญหาพื้นฐานสำหรับการนำไปใช้งานขนาดเล็กคือการออกแบบและการเลือกโครงสร้างวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาวัสดุคอมโพสิตเพียโซอิเล็กทริกในรูปแบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ วัสดุคอมโพสิตของเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ และวัสดุคอมโพสิตของแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลลิ ดินฟลูออไรด์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลลิ ดินฟลูออไรด์ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างอนุภาคนาโนแบเรียมไททานตกับพอลิไ ดเมทิลไซลอกเซน
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างอนุภาคนาโนแบเรียมไททานตกับพอลิไ ดเมทิลไซลอกเซนที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน
- 1.2.5 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้
- 1.2.6 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้
- 1.2.7 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนและสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เตรียมเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงร่วมกับกระบวนการโซล เจล
- 1.3.2 เตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลลิ ดินฟลูออไรด์
- 1.3.3 เตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลลิ ดินฟลูออไรด์ที่ ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน
- 1.3.4 เตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างอนุภาคนาโนแบเรียมไททานตกับพอลิไ ดเมทิลไซลอกเซน ที่อัตราส่วนของแบเรียมไททานต 10% 20% 30% 40% และ 50% ของพอลิไ ดเมทิลไซลอกเซน
- 1.3.5 เตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างอนุภาคนาโนแบเรียมไททานตกับพอลิไ ดเมทิลไซลอกเซน ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอนที่อัตราส่วนแท่งนาโนคาร์บอน 1% 2% 3% 4% และ 5% ของคอมโพสิตแบเรียมไททานตและพอลิไ ดเมทิลไซลอกเซน
- 1.3.6 ตรวจสอบเฟส สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิต
- 1.3.7 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนและสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเตรียมเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตได้ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงร่วมกับ กระบวนการโซลเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.2 สามารถเตรียมวัสดุคอมโพสิตในรูปแบบ 0-3 ของเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์และ 3-3 ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซนได้
- 1.4.3 ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิเมอร์และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ในการ เตรียมวัสดุคอมโพสิต
- 1.4.4 ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเติมแท่งนาโนคาร์บอนเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้
- 1.4.5 ทราบถึงสมบัติทางกายภาพ การกระจายตัว และสมบัติทางไฟฟ้า ของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric Material) [1, 2]

ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริก เป็นปรากฏการณ์ของผลึกที่สามารถเกิดการโพลาไรเซชันได้เอง โดยที่ไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งการโพลาไรเซชันนี้สามารถที่จะสลับขั้วไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปได้ เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่เหมาะสม



ภาพที่ 2.1 การจัดแบ่งกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก [1]

ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกนี้ ถูกค้นพบโดย J. Valasek [2] ในปี ค.ศ.1921 ซึ่งพบในผลึกเดี่ยว (Single crystal) ของเกลือโรเชลล์ (Rochelle salt) โดยทั่วไปผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 32 กลุ่มตามความสมมาตร และในจำนวนนี้สามารถแบ่งเป็นผลึกที่มีลักษณะสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

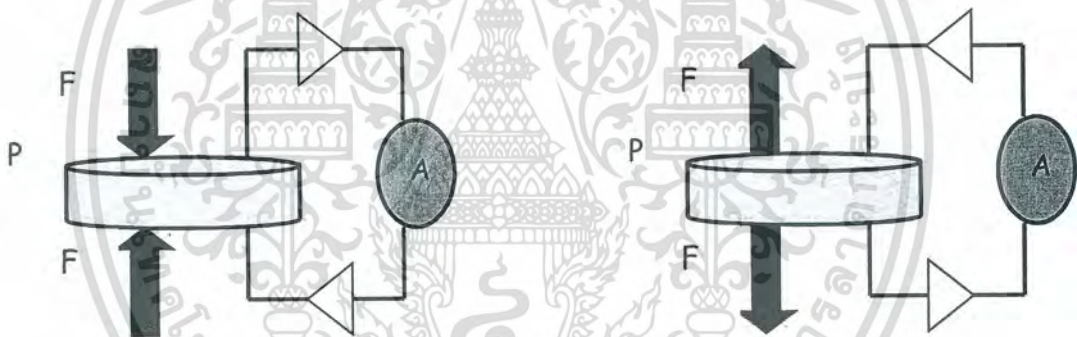
(Centrosymmetry) 11 กลุ่ม และที่มีลักษณะสมมาตรไม่ผ่านจุดศูนย์กลาง (Non-centrosymmetry) อีก 21 กลุ่ม ซึ่งในกลุ่มนี้สามารถแสดงสมบัติที่เป็นเพียโซอิเล็กทริก 20 กลุ่ม และใน 20 กลุ่มนี้มี 10 กลุ่มเท่านั้นที่สามารถแสดงสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ ดังภาพที่ 2.1

2.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) [1, 2]

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก มีทั้งที่พบในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โดยวัสดุที่พบในธรรมชาติ ได้แก่ แร่ควอartz แร่ทัวร์มาลีน ส่วนวัสดุสังเคราะห์ ได้แก่ แบเรียมไททาเนต (Barium titanate) เลดไททาเนต (Lead titanate) และเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) เป็นต้น สมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity) ของสาร สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct effect) และสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (Reverse effect)

2.2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct Effect)

คือสมบัติของสารที่สามารถสร้างประจุไฟฟ้าออกมาที่ผิวหน้า เมื่อมีแรงกด (Stress) มากระทำต่อสาร ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct effect)

โดยสัญลักษณ์ P แทนเวกเตอร์ของความเป็นขั้วไฟฟ้าในเนื้อสาร (Polarization)

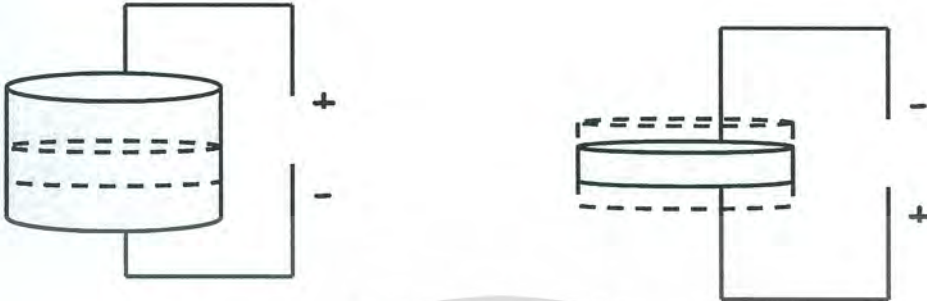
จะได้ว่า
$$D = \frac{Q}{A} = dT \quad (2.1)$$

เมื่อ	T	คือ แรงที่มากกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด (Stress) (N/m^2)
	D	คือ ความหนาแน่นประจุบนผิวไดอิเล็กทริก (Dielectric displacement)
	Q	คือ ประจุไฟฟ้า (Coulombs: C)
	d	คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) ของสาร (C/N)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของเนื้อสาร (m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (Reverse Effect)

สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม เป็นสมบัติของสารที่สามารถยืดหรือหดตัวได้เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (Reverse effect)

สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$S = dE \quad (2.2)$$

เมื่อ S คือ ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสาร (Strain) ($S = \Delta L/L_0$)

E คือ สนามไฟฟ้า (N/C)

โดยสัญลักษณ์ d สามารถใช้แทนค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกทั้งแบบทางตรงและทางอ้อมได้ เนื่องจากเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนรูปพลังงาน

จากสมการ 2.1 และ 2.2 เมื่อพิจารณาถึงสมบัติของค่าความยืดหยุ่น (Elastic) และค่าไดอิเล็กทริกของเนื้อสาร สามารถเขียนเป็นสมการเพียโซอิเล็กทริกได้ดังนี้

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2.3)$$

$$E = s^E T + dE \quad (2.4)$$

เมื่อ D คือ ค่าความหนาแน่นประจุบนผิวไดอิเล็กทริก (Dielectric displacement)

E คือ สนามไฟฟ้า (N/C)

T คือ แรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด (Stress) (N/m^2)

d คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) ของสาร (C/N)

ϵ^T คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)

โดยสัญลักษณ์ด้วย T แทนสภาวะที่แรงกดคงที่

s^E คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของสาร (Elastic coefficient)

โดยสัญลักษณ์ด้วย E แทนสภาวะที่สนามไฟฟ้าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้หลากหลาย ขึ้นกับปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลง ในกรณีที่มีการบ่อนแรงดันให้วัสดุทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือเกิดแรงกล สามารถนำมาใช้เป็นทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ในอุปกรณ์อัลตราโซนิก (Ultrasonic) ทางการแพทย์ ไมโครโฟน (Microphone) และนำมาใช้เป็นตัวขับเคลื่อน (Actuator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประกอบที่สำคัญของเครื่องพิมพ์ ชัตเตอร์ (Shutter) ในกล้องถ่ายรูป วาล์วไฮดรอลิก (Hydraulic valve) เป็นต้น และในกรณีให้แรงแกว่งตัวทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า สามารถใช้เป็นอุปกรณ์จุดแก๊ส (Gas ignitor) ในเตาเครื่องทำความร้อน ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ใช้เป็นตัวตรวจจับความดัน (Pressure sensor) เป็นต้น

2.3 การเกิดโพลาริเซชันตัวเอง (Spontaneous Polarization) [3]

จากการแบ่งกลุ่มผลึก พบว่า มีผลึก 20 กลุ่ม ที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก แต่มีกลุ่มผลึกเพียง 10 กลุ่ม ที่สามารถเกิดโพลาริเซชันตัวเอง ในบรรดาสมมาตร 20 กลุ่มที่แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก จะมี 10 กลุ่มสมมาตรที่มีเพียงหนึ่งแกนทิศทาง ได้แก่ 1 2 m $mm2$ 4 $4mm$ 3 $3m$ 6 และ $6mm$ โดยผลึกที่มีกลุ่มสมมาตรนี้จะมีแกนหมุนเดียวแต่ไม่มีระนาบสะท้อนที่ตั้งฉากกับแกนนี้ ตามแนวแกนหมุนนี้การจัดเรียงอะตอมที่ปลายหนึ่งจะต่างจากปลายอื่น (ปลายตรงข้าม) โดยจะเรียกผลึกนี้ว่าผลึกขั้ว (Polar crystal) ซึ่งแสดงการเกิดโพลาริเซชันตัวเอง (Spontaneous polarization) การเกิดโพลาริเซชันตัวเองคือค่าของโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร หรือค่าของประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนพื้นผิวที่ตั้งฉากกับแกนโพลาริเซชัน โดยส่วนใหญ่แกนของโพลาริเซชันมักอยู่ในแนวเดียวกับแกนผลึก

ถึงแม้ว่าผลึกที่มีแกนขั้วจะแสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก แต่ไม่จำเป็นต้องมีเวกเตอร์ของการเกิดโพลาริเซชันตัวเอง เนื่องจากผลของโมเมนต์ไฟฟ้าตามแกนขั้วทั้งหมดอาจเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงมีเพียงผลึกที่มีแกนขั้วเดียวที่แสดงเวกเตอร์การเกิดโพลาริเซชันตัวเอง (P_s) โดยทั่วไปการเกิดโพลาริเซชันตัวเองนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากประจุบนพื้นผิวของผลึก เนื่องจากประจุนี้ถูกชดเชยด้วยตัวนำภายในหรือภายนอกที่นำกระแสไฟฟ้าหรือโดยประจุนรอยต่อของผลึกแฝด (Twins)

ผลึกที่แสดงการเกิดโพลาริเซชันตัวเองจะประกอบด้วยไอออนบวกและลบ ในบางช่วงอุณหภูมิ ไอออนนี้จะอยู่ที่ตำแหน่งสมดุคที่มีพลังงานอิสระของผลึกต่ำสุดและศูนย์กลางของประจุบวกจะไม่ถูกจำกัดด้วยศูนย์กลางของประจุลบ ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกของผลึกเพอโรอิเล็กทริกแบบเรียมไททาเนต (Barium titanate) โดยที่เหนืออุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ที่ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ โครงสร้างผลึกต้นแบบจะเป็นคิวบิก (Cubic) ที่มี Ba^{2+} ไอออนอยู่ที่มุมของลูกบาศก์ O^{2-} ไอออนอยู่ที่กึ่งกลางของหน้าและ Ti^{4+} ไอออนอยู่ที่จุดศูนย์กลางของลูกบาศก์ ดังแสดงในภาพที่ 2.4(ก) และที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีโครงสร้างจะผิดรูปไปเล็กน้อย ด้วยการถูกแทนที่ของ Ba^{2+} และ Ti^{4+} ไอออนที่สัมพันธ์กับ O^{2-} ไอออนโดยการสร้างคู่ขั้ว ดังแสดงในภาพที่ 2.4(ข) ดังนั้นจึงอาจเห็นแต่ละคู่ของไอออนบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และลบเป็นขั้วคู่ไฟฟ้า (Electric dipole) และการเกิดโพลาริเซชันตัวเอง (โมเมนต์ขั้วคู่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) จะเกิดจากกลุ่มของขั้วคู่นี้ (ที่ชี้ในทิศทางเดียวกัน)

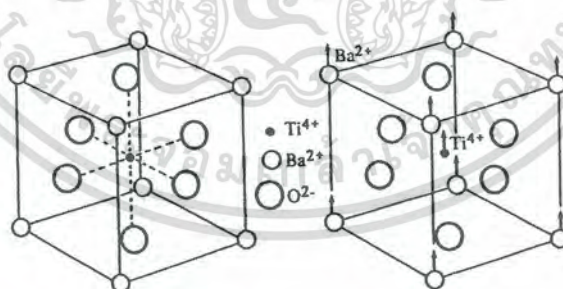
การเปลี่ยนแปลงปริมาณโพลาริเซชันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เรียกว่าปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric effect) ซึ่งปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric effect) ถูกค้นพบในทัวร์มาลีน (Tourmaline) โดย Teophrast (314 ปีก่อนคริสต์ศักราช) และถูกตั้งชื่อโดย Brewster ในปี ค.ศ. 1824 ทฤษฎีเทอร์โมไดนามิก (Thermodynamic theory) แรกถูกแสดงโดย Thompson (ต่อมาคือ Lord Kelvin) ในปี ค.ศ. 1878 และได้รับการพัฒนาโดย Voigt ในปี ค.ศ. 1897 และทฤษฎีควอนตัม (Quantum theory) ในส่วนของไดนามิกแลตทิซของผลึก (Crystal lattice dynamics) และกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum mechanics) ได้รับการพัฒนาโดย Born ในปี ค.ศ. 1945

ปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric effect) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.5

$$\Delta P_S = \pi \Delta T \quad (2.5)$$

เมื่อ ΔP_S คือ ปริมาณการเกิดโพลาริเซชันที่เปลี่ยนแปลงไป ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)
 π คือ ค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric coefficient)
 ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ($^{\circ}\text{C}$)

ภาพที่ 2.5 แสดงการเกิดเกิดปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกในผลึกเพอโรอิเล็กทริก BaTiO_3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจะพบการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นประจุบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ตั้งฉากกับแกน z ในผลึก โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณการเกิดโพลาริเซชันลดลง และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์เมื่อให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี

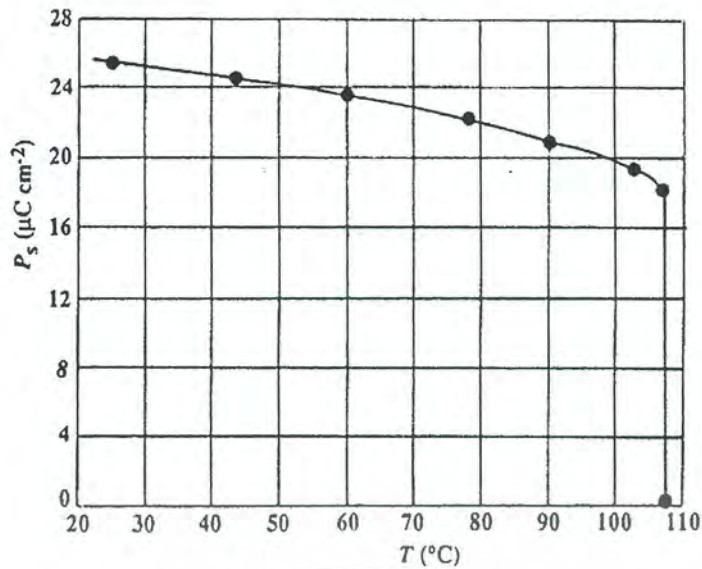


(ก)

(ข)

ภาพที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของแบเรียมไททาเนต (โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์) (ก) เหนืออุณหภูมิคูรี มีโครงสร้างเป็นคิวบิก (ข) ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีมีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอลที่มีไอออนของ Ba^{2+} และ Ti^{4+} เคลื่อนที่สัมพันธ์กับไอออนของ O^{2-} [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



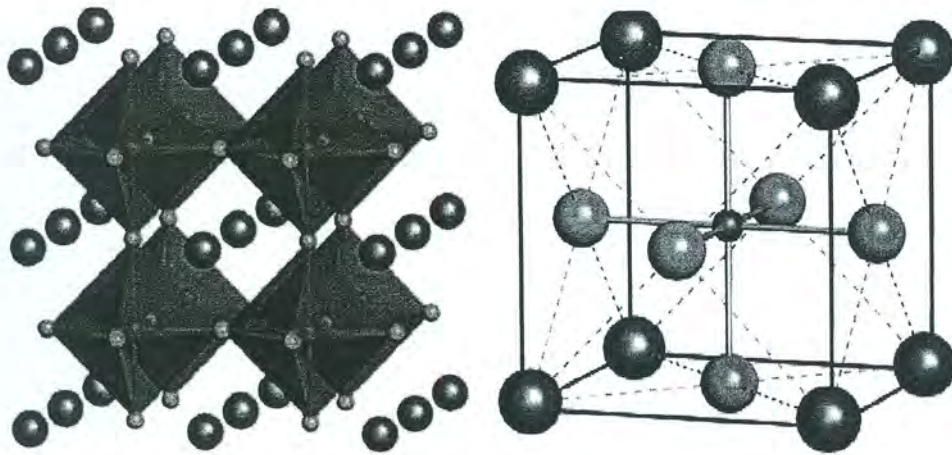
ภาพที่ 2.5 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อปริมาณการเกิดโพลาไรเซชันของผลึก BaTiO_3 [3]

ซึ่งมีวัสดุไพโรอิเล็กทริกไม่มากที่มีสมบัติในการสลับขั้วหรือเปลี่ยนทิศทางของโพลาไรเซชันด้วยการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปหรือให้แรงเค้นเชิงกล เมื่อเกิดการเปลี่ยนทิศทางของโพลาไรเซชันเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะเรียกว่าวัสดุนี้ว่า เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) แต่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงเค้น จะเรียกว่าเฟอร์โรอีลาสติก (Ferroelastic) ซึ่งลักษณะดังกล่าวของวัสดุไพโรอิเล็กทริกไม่สามารถคาดเดาได้จากโครงสร้างผลึก จะต้องทำการทดลอง

2.4 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (Perovskite Structure) [1, 4, 7]

โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ เป็นชื่อที่เรียกกันตามชื่อของแร่แคลเซียมไททานेट (CaTiO_3) มีสูตรโครงสร้างทั่วไปเป็น ABO_3 เมื่อ O คือ ออกซิเจน A คือไอออนบวกที่มีรัศมีไอออนขนาดใหญ่ และ B คือไอออนบวกที่มีรัศมีไอออนขนาดเล็ก แสดงดังภาพที่ 2.6 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์นี้มีพื้นฐานมาจากการเชื่อมต่อกันในสามมิติของทรงแปดหน้า (Octahedral) ที่เกิดจาก BO_6 ซึ่งไอออนบวก A และไอออนลบของออกซิเจนจะจัดเรียงตัวแบบบรรจุชิดรูปลูกบาศก์ (Cubic closed packed) โดยไอออนบวก A จะอยู่ที่มุมของหน่วยเซลล์ ออกซิเจนจะอยู่ที่หน้าของหน่วยเซลล์ และไอออนบวก B จะแทรกอยู่ในช่องว่างกลางทรงแปดหน้า (Octahedral side)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ [7]

เพอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบที่มีสูตรเคมีเป็น $A^{2+}B^{4+}O^{2-}_3$ หรือ $A^{1+}B^{5+}O^{2-}_3$ ส่วนสารประกอบเพอโรฟสไกต์ที่มีสูตรเคมีเป็น $A^{3+}B^{3+}O^{2-}_3$ นั้นมีอยู่หลายชนิด แต่ไม่พบที่แสดงสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก นอกจากนี้ยังพบว่าในสารประกอบเพอโรฟสไกต์ชนิดต่างๆ ค่ารัศมีไอออนิกของไอออน A และ B มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่กว้าง

สถานะภาพของการบรรจุอะตอมของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์จะถูกวิเคราะห์ด้วยค่าทอลาแรนซ์แฟคเตอร์ (Tolerance factor หรือ t) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.6 หรือ 2.7

$$R_A + R_O = t(2)^{1/2} (R_B + R_O) \quad (2.6)$$

หรือ

$$t = (R_A + R_O) / (2)^{1/2} (R_B + R_O) \quad (2.7)$$

เมื่อ R_A , R_B , R_O คือ รัศมีไอออนของไอออน A B และ ออกซิเจนตามลำดับ

เมื่อ t มีค่าเท่ากับ 1 การบรรจุไอออนของโครงสร้างจะเป็นแบบในอุดมคติ ถ้าค่า t มีค่ามากกว่า 1 ที่ว่างจะมีขนาดใหญ่เกินไปสำหรับไอออน B ดังนั้นไอออน B จึงสามารถเคลื่อนที่ได้ภายในช่องว่างทรงแปดหน้า โดยทั่วไปการเกิดโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่เสถียรจะมีค่า t อยู่ในช่วง $0.95 < t < 1.06$ การบรรจุอะตอมของโครงสร้างนอกจากขนาดของไอออนแล้วยังมีปัจจัยอื่นที่ต้องพิจารณาร่วมด้วย เช่น ความสามารถในการเกิดขั้ว (Polarizability) และลักษณะของพันธะ

โดยเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ ตัวอย่างเช่น แบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) เลดไททาเนต ($PbTiO_3$) เลดเซอร์โคเนต ($PbZrO_3$) เลดเซอร์โคเนตไททาเนต ($PbZr_{1-x}Ti_xO_3$) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต (PLZT) โพแทสเซียมไนโอเบต (KNO_3) โพแทสเซียมไซเดียมไนโอเบต ($K_xNa_{1-x}NbO_3$) โพแทสเซียมแทนทาลเลตไนโอเบต ($KTa_xNb_{1-x}O_3$) เป็นต้น นอกจากนี้โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ก็ยังจัดเป็นส่วนประกอบย่อยของหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างที่อยู่ภายในโครงสร้างที่มีความสลับซับซ้อนมาก ๆ บางประเภท อย่างเช่นสารตัวนำยวดยิ่ง (Superconductors) อีกด้วย

เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกตัวแรกที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ คือแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) สมบัติไดอิเล็กทริกที่โดดเด่นของแบเรียมไททาเนตถูกค้นพบในปี 1943 โดย Wainer และ Salomon ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา Ogawa ในประเทศญี่ปุ่น และ Wul และ Goldman ในประเทศรัสเซียซึ่ง การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกทำได้โดยใช้ตัวอย่างเป็นเซรามิกแบเรียมไททาเนต ต่อมาในปี 1945-1946 มีการรายงานสมบัติความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกของแบเรียมไททาเนต โดย Hippel และคณะ และ Wul และ Glodman ปี 1947 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในแบเรียมไททาเนตได้ถูกค้นพบ โดย Roberts และหลังจากนั้นไม่นานเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่เป็นสารละลายของแข็งในกลุ่ม $(\text{Pb}_x\text{Ba}_{1-x})\text{TiO}_3$ และ $(\text{Ca}_x\text{Ba}_{1-x})\text{TiO}_3$ ได้ถูกศึกษาอย่างกว้างขวางและประสบความสำเร็จเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้

ขณะที่ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสารละลายของแข็งของสารในกลุ่มแบเรียมไททาเนตกำลังถูก พัฒนาขึ้นมานั้น ก็ได้มีการค้นพบสารเฟอร์โรอิเล็กทริกและแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบ ABO_3 ที่มีโครงสร้างแบบทรงแปดหน้าของออกซิเจนมากมายหลายชนิดเช่น PbTiO_3 KNbO_3 KTaO_3 NaNbO_3 NaTaO_3 PbZrO_3 PbHfO_3 LiNbO_3 และ LiTaO_3 ซึ่งในจำนวนสารที่ค้นพบทั้งหมดนี้ PbZrO_3 (เลดเซอร์โคเนต) และ PbTiO_3 (เลดไททาเนต) เป็นเซรามิกที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีความสำคัญ ซึ่งในปี 1950 มีการรายงานสมบัติไดอิเล็กทริกที่โดดเด่นของเลดเซอร์โคเนต และมีการ ยืนยันสมบัติความเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Antiferroelectric) และมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวัสดุ เฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ที่ซับซ้อนขึ้น (Complex perovskite) ซึ่งงานวิจัยนี้ มีผลต่อการพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นอย่างมาก

2.5 เลดเซอร์โคเนต (Lead zirconate; PbZrO_3 or PZ) [5, 6]

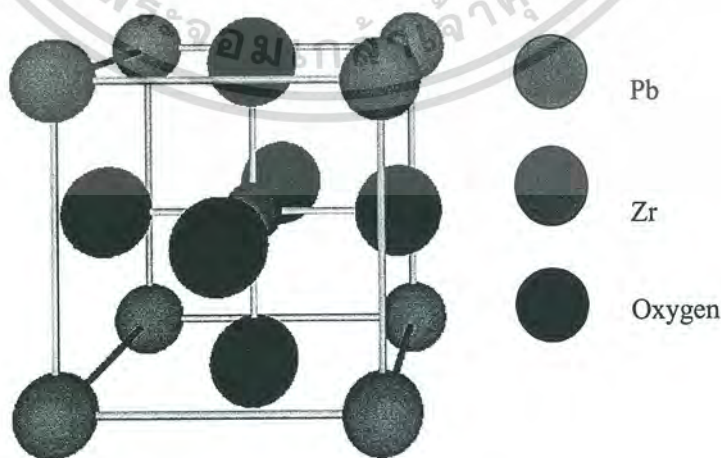
เลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3 or PZ) ค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1951 โดย Sawaguchi และคณะ ซึ่งเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ โดยมีไอออนของเลด (Pb^{2+}) อยู่ใน ตำแหน่ง A (A-site) ไอออนของเซอร์โคเนียม (Zr^{4+}) อยู่ในตำแหน่ง B (B-site) และอยู่ในออกตะฮีดรอล (Octahedral) ของออกซิเจนที่อยู่ตรงกลางของแต่ละหน้าของหน่วยเซลล์ ภาพที่ 2.7 ที่ อุณหภูมิห้องเลดเซอร์โคเนต (PZ) แสดงสมบัติแบบแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Antiferroelectric) มี โครงสร้างแบบออโรธอมบิก (Orthorhombic; $a = 5.89 \text{ \AA}$ $b = 11.76 \text{ \AA}$ และ $c = 8.22 \text{ \AA}$) [5] ซึ่ง มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟสจากออโรธอมบิกไปเป็นคิวบิกที่อุณหภูมิประมาณ $230 \text{ }^\circ\text{C}$ โดย โครงสร้างของเลดเซอร์โคเนตหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบไปด้วยเพสเพอโรฟสไกต์ 8 หน่วย และในปี ค.ศ.1952 Jaffe และคณะ ได้พบว่าเลดเซอร์โคเนตเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนแปลง เฟสแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ (ภายใต้การให้สนามไฟฟ้าแก่สารที่มีเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก) ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานขึ้น ดังนั้นเซรามิกเลดเซอร์โคเนตจึงเป็นวัสดุที่สามารถนำมาประยุกต์เป็นตัวกักเก็บพลังงาน (Energy storage) ได้

เลดเซอร์โคเนต (PZ) เป็นสารที่มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นมาก สามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูง และยังมีค่าสัมประสิทธิ์คู่วบไฟฟ้าเชิงกลที่สูง ทำการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าได้ง่าย มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง และง่ายต่อการเผาซินเตอร์ (Sintering) เพราะใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก จึงทำให้สามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตลงได้อย่างมาก ยิ่งไปกว่านั้น การเตรียมเซรามิก PZ ให้มีความบริสุทธิ์สูงและความหนาแน่นสูงนั้นสามารถเตรียมได้ไม่ยุ่งยาก ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้สารประกอบกลุ่มนี้ได้มีการศึกษาค้นคว้า และพัฒนากันอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน อาทิ เช่น สารในระบบเลดไททาเนต (PbTiO_3) เลดเซอร์โคเนต ไททาเนต (PZT) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต (PLZT) เลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN) เลดนิเกิลไนโอเบต (PNN) และเลดซิงค์ไนโอเบต (PZN) เป็นต้น

การประยุกต์ใช้สารเซรามิกที่มีโครงสร้างเพอรอฟไกต์ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญต่างๆ นั้น ล้วนแล้วแต่อาศัยกลไกการเกิดขั้วขึ้นเองตามธรรมชาติ (Spontaneous polarization) หรือจากการเหนี่ยวนำด้วยการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในผลึกตามความสมมาตร ซึ่งการเกิดขั้วคู่วบไฟฟ้าแบบถาวรนั้นจะทำให้เกิดการคู่วบกัน (Coupling) ระหว่างสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปกับ สมบัติไดอิเล็กทริก สมบัติเชิงกล หรือสมบัติเชิงแสงของผลึกในระหว่างที่ผลึกนั้นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (เฟส) โดยพบว่ามีการวิจัยส่วนใหญ่นิยมนำเลดเซอร์โคเนตมาทำวัสดุอิเล็กทรอนิกส์จำพวกไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Microelectronics) การนำไปใช้เป็นหน่วยเก็บพลังงานสำหรับไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเก็บประจุ และแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า รวมทั้งยังทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นในระบบไมโครอิเล็กทรอนิกส์เชิงกล (Microelectromechanical systems; MEMs) ได้เป็นอย่างดี



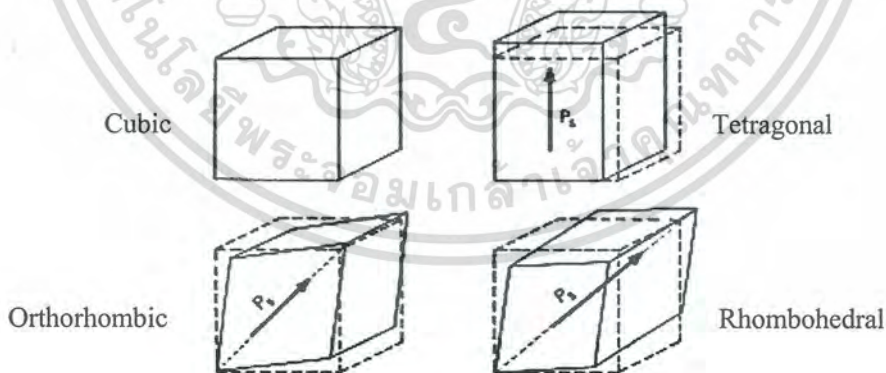
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของเลดเซอร์โคเนต (Lead zirconate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 แบเรียมไททาเนต (Barium titanate; BaTiO₃) [7, 8]

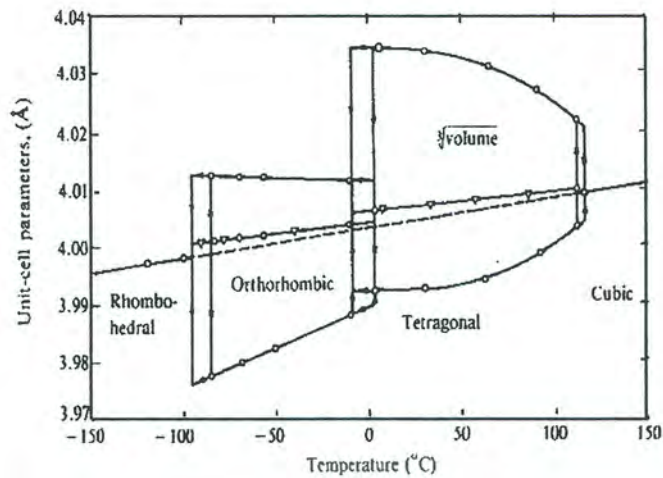
แบเรียมไททาเนต (Barium titanate) เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในนามวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) มีการค้นพบมาแล้วมากกว่า 60 ปีที่ผ่านมา โดยแบเรียมไททาเนตนั้นเป็นวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก สามารถใช้ในตัวเก็บประจุ ทั้งในรูปแบบการเก็บประจุแบบแผ่นกลมและมัลติเลเยอร์เซรามิก หรือ MLCC เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) สำหรับไมโครโฟน อุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณ (Transducer) เป็นต้น

แบเรียมไททาเนต มีโครงสร้างผลึกพื้นฐานอยู่ 2 รูปแบบ คือ 1. โครงสร้างผลึกแบบเพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) ซึ่งมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) จะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยโครงสร้างของสาร BaTiO₃ ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดอุณหภูมิคูรี 120°C (T_c) ลงมานั้น จะเกิดการบิดเบี้ยว ไปเป็นเฟสเตตระโกนอล โดยมีโมเมนต์ขั้วคู่เกิดขึ้นมาในทิศทางตามแนวแกน c จนกระทั่งอุณหภูมิตกลงมาถึงที่อุณหภูมิประมาณ 5 °C จึงเปลี่ยนจากเฟสเตตระโกนอล ไปเป็นเฟสออร์ทอโรมบิก และที่อุณหภูมิต่ำกว่า -90 °C ก็จะเปลี่ยนจากเฟสออร์ทอโรมบิก ไปเป็นเฟสโรมโบฮีดรอล ตามลำดับ ดังแผนภาพแสดงในรูป 2.10(ก) ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของสาร BaTiO₃ ตามอุณหภูมิ ดังที่กล่าวมานี้จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าที่มีขั้วในตัวเอง (Spontaneous polarization) และค่าความยินยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ดังแสดงในรูป 2.10(ข) และ (ค) ตามลำดับ 2. โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ซึ่งไม่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Non-Ferroelectric Hexagonal) ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเสถียรที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 1460 °C และยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิห้องได้อีกด้วย

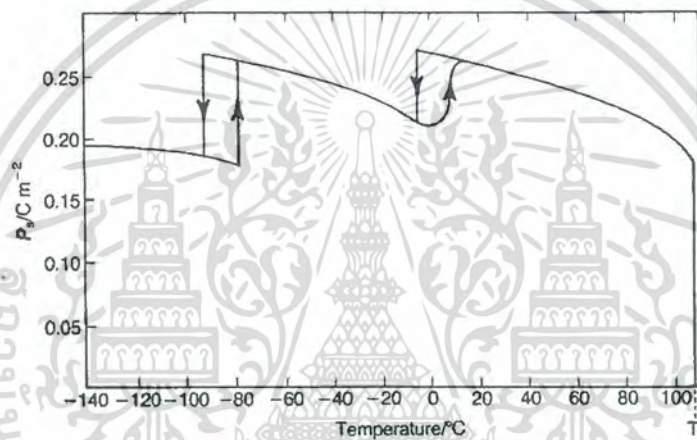


(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงผลึกของแบเรียมไททาเนต (BaTiO₃) [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) แลตทิซพารามิเตอร์ของแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) ในแต่ละอุณหภูมิ [7]



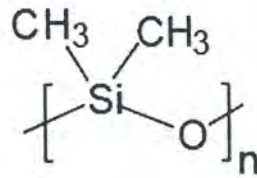
(ค) ค่าความยินยอมสัมพัทธ์ที่วัดตามแนวแกน a และ c ของสาร BaTiO_3 ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ [8]

ภาพที่ 2.8 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3)

2.7 พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) [9, 10]

พอลิไดเมทิลไซลอกเซน เป็นพอลิเมอร์ที่ถูกใช้ในยางซิลิกอน สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับเป็นฉนวนกันไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่ใช้งานกลางแจ้ง โดยพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ประกอบด้วยสารอนินทรีย์เป็นแถบกลางที่มี ซิลิกอน (Silicon) และออกซิเจน (Oxygen) สลับกัน มีหมู่เมทิล (Methyl) เกาะที่ตำแหน่งอะตอมซิลิกอนซึ่งเป็นโครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิเมอร์ (รูป 2.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของ PDMS [9]

2.7.1 สมบัติของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

(1) พอลิไดเมทิลไซลอกเซน เมื่อทำการเชื่อมโยงแล้ว (Cross-linked) จะมีลักษณะเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้ ในสภาวะนี้พอลิเมอร์จะไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรเมื่ออยู่ภายใต้ความเค้น (stress) หรือ ความเครียด (strain) พอลิเมอร์จะกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่อทำการปล่อยแรง

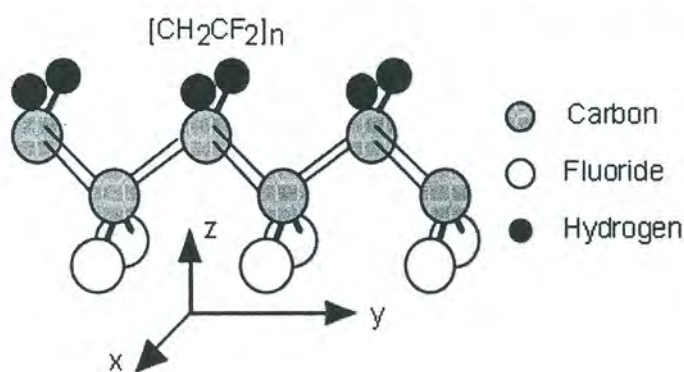
(2) พอลิไดเมทิลไซลอกเซน โดยทั่วไปแล้วจัดเป็นสารเคมีประเภทเฉื่อย มีจุดเด่นคือไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถซึมผ่านพื้นผิวได้ จากสมบัตินี้พอลิไดเมทิลไซลอกเซน จึงถูกนำไปใช้อย่างมากในระบบของไหลจุลภาค (microfluidic) แต่อย่างไรก็ตามตัวทำละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่ยังคงสามารถซึมผ่านพื้นผิวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนได้ จึงต้องเลือกใช้งานให้เหมาะสม

(3) พอลิไดเมทิลไซลอกเซน เป็นวัสดุใส มีสมบัติที่แสงทะลุผ่านได้ นอกจากนี้ เวลาที่โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงและอุณหภูมิที่ใช้ระหว่างการเชื่อมโยงสามารถกำหนดค่าดัชนีการหักเหแสง (refractive index) ของชิ้นงาน

(4) พันธะของ Si-O ภายใน PDMS จะมีขั้วที่แข็งแรงมาก เนื่องจากมีหมู่เมทิลที่เป็นกิ่งที่ป้องกันไม่ให้ขั้วของ Si-O อยู่ใกล้กันมากเกินไป ทำให้มีแรงระหว่างโมเลกุลต่ำ โดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยแรงลอนดอน-แวนเดอร์วาลส์ (London-van der Waals Interactions) แรงนี้จะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น โดยความมีขั้วของโมเลกุล (polarizability) ทำให้ซิลิโคนมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ที่สูงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene)

ในพอลิเมอร์อินทรีย์ส่วนใหญ่ พบว่าแรงดึงดูดที่แข็งแรงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก สำหรับซิลิโคนแรงระหว่างโมเลกุล (intermolecular forces) มีค่าต่ำและไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ ดังนั้น ความหนืด (viscosity) สมบัติเชิงกล (mechanical properties) สมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) และสมบัติทางกายภาพ (physical properties) อื่นๆ จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง โดยวัสดุพอลิไดเมทิลไซลอกเซน มีการใช้งานทั่วไปในการผ่าตัดศัลยกรรม และคอนแทคเลนส์

2.8 พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ (Polyvinylidene difluoride; PVDF) [11-13]



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างของ PVDF [13]

ตารางที่ 2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของ PVDF เทียบกับ PZT และ BaTiO₃ ที่อุณหภูมิ 20°C [11]

Property	Unit	PVDF	BaTiO ₃	PZT
Dielectric Constant	-	12	600-1200	<1000-4000
Piezoelectric Constant	Charge pC/N	d ₃₁ =20 d ₃₃ =-30	-30 - -60	-100 ->-600
Electromechanic Factor	Coupling %	11	21	30-75
	10 ¹⁰ N/m ²	0.3	11-12	6-9
	10 ⁶	2.3	25	30
Young's Modulus	kg/(m ² s)*	1780	5300-5700	7500-7700
Acoustic Impedance	kg/m ²			
Density				

หมายเหตุ : * MRa (megarayleigh) (1Ra = 1 kg/(m² s))

พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสูตรทางเคมีว่า (CH₂-CF₂)_n มีโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก โดย PVDF มีค่า k_p และ d₃₃ ที่ต่ำกว่า PZT มาก ดังตารางที่ 2.1 แต่อย่างไรก็ตาม PVDF มีข้อดีหลายประการ คือ มีค่า piezoelectric voltage constant (g) สูง ยืดได้มากกว่า PZT ทนต่อการไหล มี dielectric strength สูงกว่า PZT และ มีค่า acoustic impedance ที่เข้าได้กับน้ำและร่างกายมนุษย์

PVDF อาจนำไปใช้ในรูปของคอมโพสิตกับเซรามิก การนำไปทำคอมโพสิตจะทำให้วัสดุผสมมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเนื่องจากการรวมข้อดีของวัสดุสองชนิดเข้าด้วยกัน

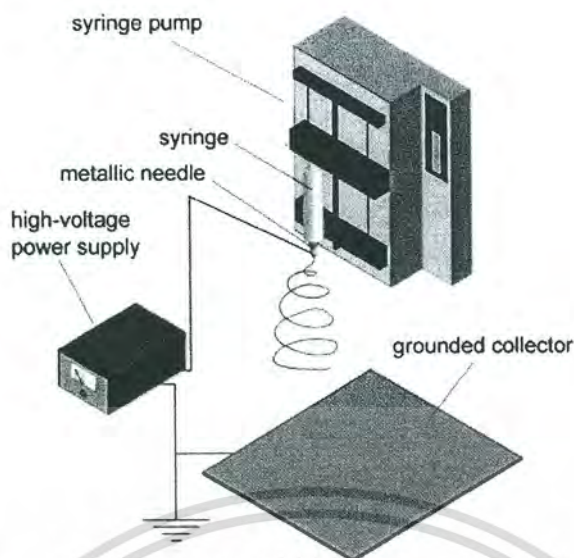
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning Technique) [14-17]

อิเล็กโตรสปินนิงเป็นเทคนิคในการเตรียมวัสดุที่มีโครงสร้างนาโนแบบ 1 มิติ โดยการฉีดลำของสารละลายหนืดหรือหลอมเหลวจากท่อออกมาเป็นเส้นใยบาง ซึ่งต่างจากกระบวนการฉีดเส้นใยแบบดั้งเดิมตรงที่ใช้อันตรกิริยาทางไฟฟ้าสถิตเป็นแรงขับเคลื่อนแทนการดึงยืดเชิงกล โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงจะใช้ในการฉีดเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตร

การติดตั้งเครื่องอิเล็กโตรสปินนิงประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากำลังสูง หัวฉีด และวัสดุรองรับที่นำไฟฟ้า โดยเข็มโลหะจะทำหน้าที่เป็นหัวฉีด และอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil) ทำหน้าที่เป็นวัสดุรองรับ ดังภาพที่ 2.11 ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มี ความซับซ้อน ค่าใช้จ่ายน้อยและใช้งานได้สะดวก ทั้งนี้ในระบบที่มีการพัฒนาอาจจะเพิ่มอุปกรณ์สำหรับควบคุมการไหลของสารละลาย ซึ่งจะให้อัตราการป้อนสารละลายคงที่ ทำให้การสังเคราะห์เส้นใยมีประสิทธิภาพโดยสามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากขึ้น โดยมีวิธีการคือจะบรรจุสารละลายที่ต้องการฉีดลงในหลอดฉีดยาพลาสติกที่ต่อกับเข็มโลหะ สำหรับการทดลอง โดยเฉพาะการฉีดเส้นใยนาโนเซรามิกนั้นการติดตั้งเครื่องมือจะต้องทำในระบบปิด เนื่องจากอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและบรรยากาศได้ ส่วนวัสดุรองรับที่ใช้นั้นสามารถใช้วัสดุและรูปร่างได้หลากหลาย โดยเส้นใยอาจจะถูกรองรับด้วยแผ่นโลหะหรือถูกม้วนเก็บอย่างเป็นระเบียบ หรืออาจจะถูกรองรับด้วยน้ำหรือของเหลวอื่น แต่โดยทั่วไปจะนิยมใช้วัสดุที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า

อิเล็กโตรสปินนิงเป็นเทคนิคที่ใช้พื้นฐานทางไฟฟ้าสถิต เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นไปลายเข็ม และเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าจนถึงค่าหนึ่ง แรงทางไฟฟ้าสถิตจะมากกว่าแรงตึงผิวและเกิดแรงขับลำสารละลายออกจากเข็ม โดยลำของสารละลายจะพุ่งและเกิดการบิดโค้งอย่างรวดเร็วออกมาเป็นลำยาวอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดเป็นเส้นใยบาง และสม่ำเสมอ เมื่อสารละลายเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วขณะกระบวนการฉีด เส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดลดลง ทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็ก สุดท้ายเส้นใยจะไปเกาะบนวัสดุรองรับ ซึ่งเป็นผลของแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงของนาโนเมตรถึงไมโครเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของสารละลายและปัจจัยในการฉีดอื่นๆ โดยการฉีดเส้นใยสามารถทำได้ทั้งแนวราบและแนวตั้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนืดของสารตัวอย่างที่ใช้



ภาพที่ 2.11 ส่วนประกอบและการติดตั้งเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ [14]

2.10 กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel Process) [14, 18]

กระบวนการเตรียมโซล - เจล (Sol-gel) เป็นกระบวนการเตรียมทางเคมีแบบเปียก (Wet process) ชนิดหนึ่งที่มีความนิยมอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงในการเตรียมเซรามิกที่มีคุณภาพ ความสนใจในเทคนิคโซล - เจล เริ่มศึกษาตั้งแต่กลางคริสต์ศตวรรษที่ 19 เมื่อมีการเตรียมซิลิกาเจล (Silica gel) จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ภายใต้อิทธิพลของสารเตตระเอธิลอโรซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate; $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$); TEOS) วิธีการนี้ได้รับความสนใจจากนักเคมีเป็นอย่างมาก แม้วนักเคมียังไม่ค่อยเข้าใจปรากฏการณ์ดังกล่าวมากนัก ในช่วงทศวรรษ 1980's ได้มีการประยุกต์ใช้การเตรียมแบบ โซล-เจล กับเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก เช่น แบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3) เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$) เป็นต้น

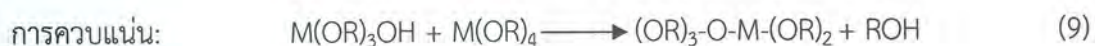
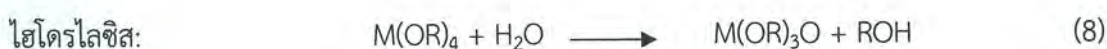
โดยการผลิตรวดสุนาโนจากวิธีโซล-เจล ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตเซรามิกทั่วไป และได้ถูกพัฒนาสำหรับการเตรียมเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำในรูปของการเคลือบผิว (Coating) ฟิล์มบาง (Thin film) และเส้นใย (Fiber) ในการนำไปใช้งานต่างๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) แบตเตอรี่ (Battery) ตัวตรวจจับ (Sensor) อุปกรณ์ไฟฟ้า (Electronics) และอุปกรณ์ทางแสง (Optic) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคโซล-เจลได้ถูกนำมาใช้ควบคู่กับเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์ในการผลิตเส้นใยนาโนเซรามิกและท่อนาโนที่มีการควบคุมสัดส่วน ขนาด และรูปร่างได้

ในการเลือกใช้สารละลายนั้น ส่วนใหญ่มักจะใช้สารละลายของสารประกอบโลหะอินทรีย์ เช่น โลหะอัลคอกไซด์ ที่อยู่ในแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม โดยโลหะอัลคอกไซด์เหล่านี้มีสูตรทั่วไปว่า $\text{M}(\text{OR})_x$ ซึ่งอาจจะได้มาจากไฮดรอกไซด์ของโลหะ $\text{M}(\text{OH})_x$ หรือจากแอลกอฮอล์ (ROH) ที่มี R เป็นสารในกลุ่มแอลคิลและมีโลหะ M เข้าไปอยู่แทนที่ไฮดรอกซิลโปรตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอาศัยการกวนให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อย (ปกติจะใช้อุณหภูมิประมาณ 50-90°C) ซึ่งจะต้องมีความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา และค่า พีเอชของ สารละลายที่เหมาะสม จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และการควบแน่น (Condensation) แล้วได้สายโซ่พอลิเมอร์ออกมา

ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ใช้โลหะที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับสี่ (M^{4+}) อาจเกิดปฏิกิริยาดังนี้



การเกิดเป็นพอลิเมอร์โดยอาศัยกลไกการแยกสลายด้วยน้ำและการควบแน่น แล้วเกิดมีการเชื่อมต่อน้ำเชื่อมสายจนเกิดการพันกันเป็นโครงข่ายสามมิติ จะทำให้สารผสมมีความหนืดสูงมากขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าสู่สภาพที่เรียกว่า เจล กระบวนการต่อมา คือ ทำการระเหยของเหลวที่อยู่ในตัวเจลออกไป (Dehydration) ความแข็งแรงของเจลจะช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมย้ายตำแหน่ง หรือหลุดออกไปจากกันในระหว่างที่มีการทำให้เจลแห้ง ช่วยให้ควบคุมความสม่ำเสมอและความเป็นเนื้อเดียวกัน ในระดับโมเลกุลให้คงอยู่ได้

ในกระบวนการเตรียมโซล-เจลนั้น การเตรียมสารให้เป็นเนื้อเดียวกันและเกิดเป็นโซลหรือเจลที่เสถียรนั้นทำได้ยาก เนื่องจากผลของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และการควบแน่น (Condensation) ของโลหะหรือเกลืออัลคอกไซด์ (Alkoxide salt) ถ้าสารตั้งต้นตั้งแต่ 2 ชนิด มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ต่างกันจะทำให้การควบคุมความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ของโซลทำได้ยาก โดยจะเกิดการแยกเฟส (Phase) ในระบบขึ้น ซึ่งปัญหานี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ในกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงนั้น ปฏิกิริยาของโซล-เจลได้แก่ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การควบแน่น (Condensation) และการเกิดเจล (Gelation) จะถูกจำกัดในบริเวณเล็กๆ (บนลำของสารและเส้นใยนาโน) อีกทั้งเนื่องจากการโค้งงออย่างรวดเร็วและการดึงยึดของ ลำสารละลาย ทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายในลำสารละลายระเหยอย่างรวดเร็ว และองค์ประกอบอื่นๆ จะแข็งตัวแล้วคงอยู่ในเส้นใย ซึ่งสามารถป้องกันหรือลดการแยกเฟสขององค์ประกอบต่างๆ ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ ตัวอย่างเช่น

การทำงานพื้นฐานในการเตรียมอิเล็กโตรสปินนิงของสารละลายตั้งต้นเซรามิกและสารละลายพอลิเมอร์นั้นมีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาบางชนิด เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) ปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) และการเกิดเจล (Gelation) ของสารตั้งต้นเซรามิกมักมีผลต่อกระบวนการฉีด จึงต้องมีการควบคุมเป็นพิเศษเพื่อให้กระบวนการเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ปัญหาหนึ่งที่พบในการฉีดเส้นใย ได้แก่ การอุดตันของหัวฉีดและเส้นใยที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งปัญหานี้มักเกิดจากการควบคุมปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และอัตราในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดเจลของสารตั้งต้น เซรามิกได้ไม่ดี ถ้าการเกิดเจลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่สารละลายจะทำให้ค่าของสารละลายสามารถดึงยึดได้น้อย ทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่หนาหรือเกิดการอุดตันของหัวฉีดขึ้นได้ ซึ่งมี 2 วิธีที่จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ วิธีแรกคือการเปลี่ยนสารตั้งต้นหรือการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในสารละลาย เพื่อควบคุมปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และอัตราในการเกิดเจล อีกวิธีคือการควบคุมสภาพแวดล้อมรอบๆลำสารละลาย โดยบรรยากาศที่มีความชื้นน้อยหรืออ้อมด้วยไอของตัวทำละลายจะสามารถลดอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และอัตราเร็วในการเกิดเจลได้ และยังทำให้การฉีดสารละลายทำได้ต่อเนื่องง่ายขึ้น

2.11 คอมโพสิต (composite) [11, 19, 34]

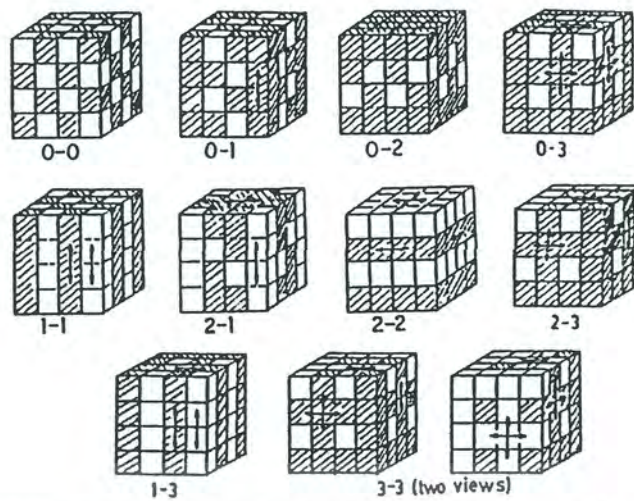
คอมโพสิต เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยการรวมวัสดุตั้งแต่ 2 ประเภทเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปคอมโพสิตจะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (Matrix) และวัสดุเสริมแรง (Reinforcement materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลักจะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้นก่อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (Base materials) อย่างโลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์ ผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกันทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงโดยรวมมากกว่าเมื่อเทียบกับความแข็งแรงของวัสดุแต่ละประเภทโดยลำพัง

2.11.1 การจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสในคอมโพสิต

ในการเลือกเฟสของวัสดุคอมโพสิตแต่ละเฟส เพื่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน หรือสมบัติทางไฟฟ้า สัมพันธ์กับปริมาณ และรูปแบบการเรียงติดกันของแต่ละเฟส แนวความคิดของการเรียงติดกันถูกนำมาใช้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตโดย Newnham การเรียงติดกันอธิบายรูปแบบของแต่ละเฟสในวัสดุคอมโพสิต หากพิจารณาการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสที่มีการเรียงตัวติดกันใน 3 มิติ สำหรับวัสดุคอมโพสิตที่มี 2 เฟสนั้น สามารถจัดเรียงติดกันได้ 10 แบบ คือ 0-0, 0-1, 0-2, 0-3, 1-1, 1-2, 2-2, 1-3, 2-3 และ 3-3 ดังรูป 2.12 โดยตัวเลขตัวแรกจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริก ส่วนเลขตัวหลังจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่เป็นเมทริก

การเตรียมคอมโพสิตที่นิยมจะมี 2 แบบ คือแบบ 0-3 และแบบ 1-3 คอมโพสิต สำหรับแบบ 0-3 คอมโพสิตคือคอมโพสิตที่มีเซรามิกเป็น active phase มี connectivity 0 ทิศทางและพอลิเมอร์เป็น passive phase มี connectivity 3 ทิศทาง ส่วนแบบ 1-3 คอมโพสิตเป็นคอมโพสิตที่เซรามิกเป็น active phase มี connectivity 1 ทิศทางและพอลิเมอร์ที่เป็น passive phase มี connectivity 3 ทิศทางดังแสดงในภาพที่ 2.13

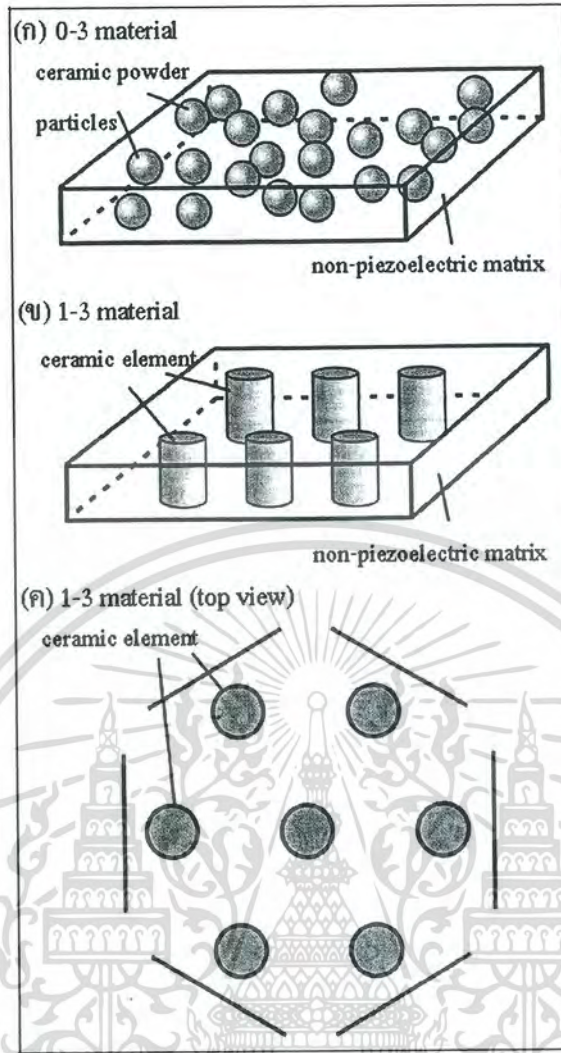
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 รูปแบบการเชื่อมต่อเฟสแบบต่างๆ ของวัสดุผสมที่มี 2 เฟส [19]

วัสดุคอมโพสิตที่มีรูปแบบง่ายที่สุดคือ 0-3 ซึ่งประกอบด้วยผงเซรามิกกระจายอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ (polymer matrix) การเรียงติดกันแบบ 0-3 คือ เซรามิกเชื่อมต่อกันใน 3 มิติ และมีพอลิเมอร์บรรจุในรูพรุนในเนื้อเซรามิก อย่างไรก็ตาม เป็นการยากที่จะมีการเรียงติดกันแบบใดแบบหนึ่งล้วนๆ ทั้งนี้ขึ้นกับขั้นตอนวิธีการเตรียม

พอลิเมอร์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (amorphous structure) ส่วนเซรามิกมีโครงสร้างผลึก ทำให้วัสดุคอมโพสิตแบบ 0-3 มีเฟสที่ผลึก กระจายอยู่ในเมทริกซ์อสัณฐาน ข้อเด่นที่สำคัญมากของวัสดุคอมโพสิตนี้คือ การขึ้นรูปเป็นรูปร่างแบบต่างๆ ได้ง่าย เช่น การทำเป็นแผ่นบาง การทำเป็นแบบเส้นใย เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นโซนาร์และไฮโดรโฟน



ภาพที่ 2.13 คอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์กับเซรามิก (ก) แบบ 0-3 คอมโพสิต (ข)-(ค) แบบ 1-3 คอมโพสิต [11]

วัสดุคอมโพสิตที่มีลักษณะการเรียงติดกันแบบ 0-3 เป็นวัสดุที่สามารถเตรียมได้ง่ายและสะดวกที่สุดใน 10 รูปแบบ โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเซรามิก (Volume fraction of ceramic, ϕ) กับพอลิเมอร์ แสดงดังสมการที่ (2.8)

$$m_c = m_p \times \frac{\rho_c}{\rho_p} \times \frac{\phi}{1-\phi} \quad (2.8)$$

- โดยที่ m_c คือ มวลของเซรามิก
 m_p คือ มวลของพอลิเมอร์
 ρ_c คือ ความหนาแน่นของเซรามิก (BaTiO_3 6.08 g/cm^3)
 ρ_p คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ (PVDF 1.78 g/cm^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϕ คือ สัดส่วนของเซรามิก

ความหนาแน่นของคอมโพสิตมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของเซรามิกและความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ดังสมการ

$$\rho = \phi \rho_c + (1-\phi) \rho_p \quad (2.9)$$

เมื่อ ρ_c คือ ความหนาแน่นของคอมโพสิต

ทำนองเดียวกันกับสมการที่ (2.4) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความจุความร้อนของคอมโพสิตกับความจุความร้อนของเซรามิกและพอลิเมอร์ดังสมการ

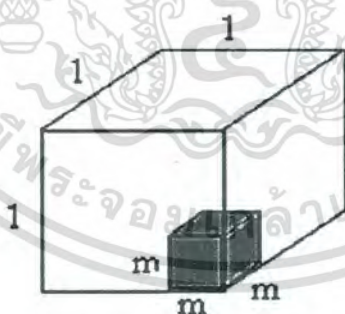
$$C = \phi C_c + (1-\phi) C_p \quad (2.10)$$

เมื่อ C , C_c และ C_p คือ ความจุความร้อนของคอมโพสิต, เซรามิกและพอลิเมอร์ ตามลำดับ

แบบจำลองของเพาเออร์ (Pauer model) เป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายลักษณะของ 0-3 คอมโพสิตที่มีสัดส่วนเซรามิกน้อยๆ แสดงดังภาพที่ 2.14

ในแบบจำลองนี้ หนึ่งหน่วยลูกบาศก์ของคอมโพสิตจะถูกบรรจุด้วยหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เล็กๆ ของเซรามิกที่มีความยาวด้านละ m ซึ่งมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับหนึ่งหน่วยลูกบาศก์ของคอมโพสิต สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.11)

$$\phi = m^3 \quad (2.11)$$



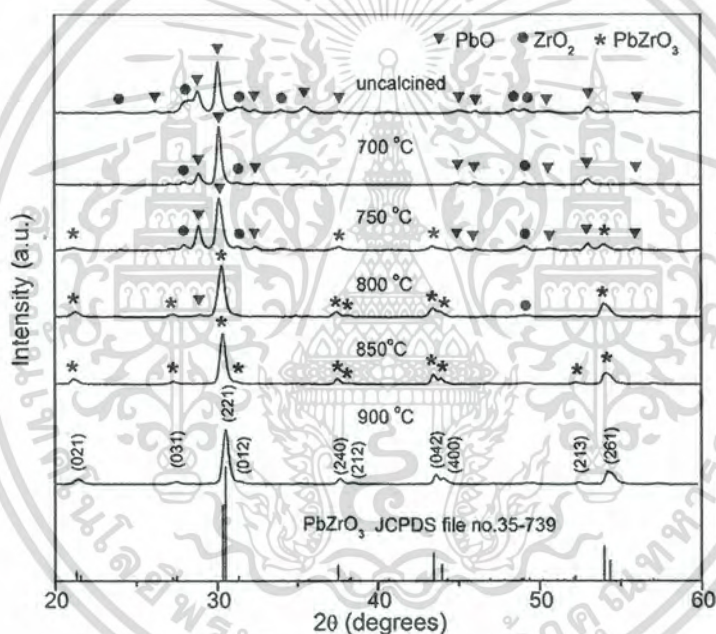
ภาพที่ 2.14 แบบจำลองของเพาเออร์ 0-3 คอมโพสิต [34]

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการที่เลดเซอร์โคเนต (Lead zirconate; PZ) เป็นสารที่มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นและแสดงสมบัติแบบแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก ทำให้มีการนำเลดเซอร์โคเนตไปประยุกต์ใช้งานหลายด้าน นักวิทยาศาสตร์หลายท่านจึงให้ความสนใจที่จะทำการศึกษาหลักการและวิธีการเตรียมเลดเซอร์โคเนต (PZ) จากสารตั้งต้นและวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน

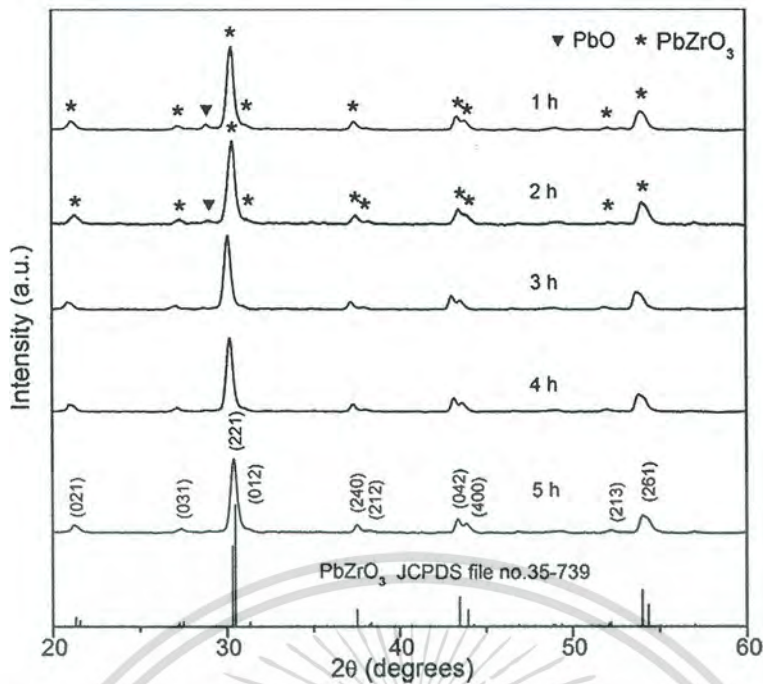
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Supon Ananta และคณะ [18] ได้ศึกษาเงื่อนไขในการเผาแคลไซน์ (Calcination) ที่มีผลต่อขนาดอนุภาคของผลึก PZ ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-State reaction) จากสารตั้งต้นเลดออกไซด์ (PbO) และเซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2) โดยการบดย่อยผสมด้วยลูกบด (Ball milling) ในตัวทำละลายเอทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700-900°C เป็นเวลา 1-5 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 1-20°C/นาที ภายใต้บรรยากาศของ $PbZrO_3$ ในถ้วยอะลูมินา (Alumina crucible) เมื่อได้ผงผลึกจากการเผาแคลไซน์แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างที่ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) โดยเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS ข้อมูลหมายเลข 35-739 จากภาพที่ 2.15 พบว่าที่อุณหภูมิ 750°C เริ่มเกิดผลึกของ PZ ขึ้น แต่ยังคงมีสารตั้งต้นเหลืออยู่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น พบว่าปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์มากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 800°C ขึ้นไปได้ผลึกของ PZ ที่มีความบริสุทธิ์ และใช้เวลาในการเผาแคลไซน์นาน 3 ชั่วโมง ที่อัตราเพิ่ม/ลดอุณหภูมิ 10°C/นาที ดังภาพที่ 2.16

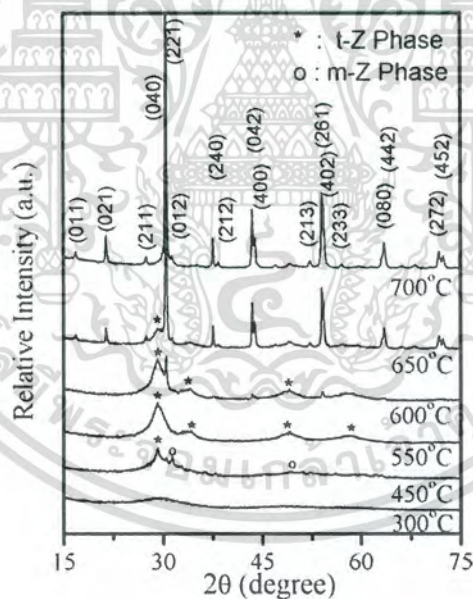


ภาพที่ 2.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PZ ที่เวลาในการเผาแคลไซน์ 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10°C/นาที [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PZ จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C และอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10°C/นาที [18]

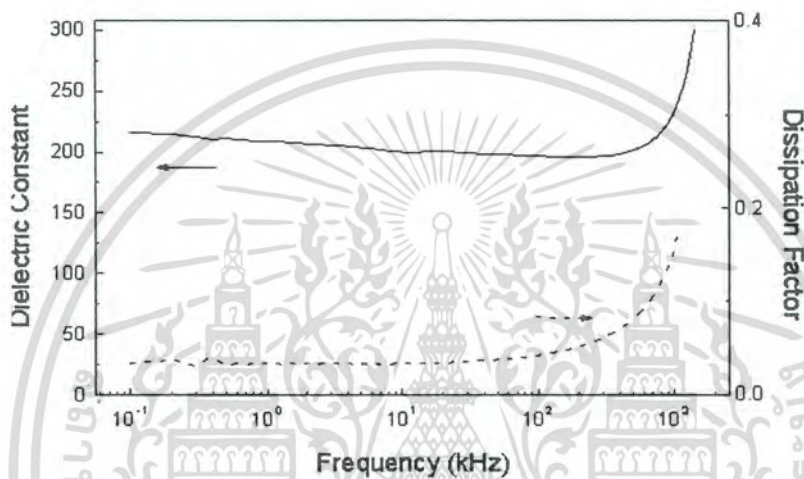


ภาพที่ 2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก PZ ที่เตรียมได้จากกระบวนการโซลเจล ภายหลังจากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 1 ชั่วโมง [20]

ในปี 2009 Singh และคณะ [20] ได้ทำการประดิษฐ์ผงผลึกนาโน PZ ด้วยเทคนิคโซลเจล โดยใช้เลดอะซิเตตไตรไฮเดรต (Lead acetate trihydrate; $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และสารละลายเซอร์โคเนียมบิวทอกไซด์ (Zirconium (IV) butoxide; $\text{Zr}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$) เป็นสารตั้งต้น พบว่าผงผลึก PZ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เตรียมได้จากกระบวนการโซลเจลใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เพื่อให้เกิดผลึกบริสุทธิ์ที่ต่ำกว่าจากผลึก PZ ที่เตรียมจากวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งแบบทั่วไป โดยสามารถเตรียมผลึกบริสุทธิ์ PZ ได้ที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังภาพที่ 2.17

ในปี 1998 Kim และคณะ [21] ได้รายงานการเตรียม PZ ในรูปของฟิล์มบางด้วยเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอร์ร่วม (Reactive magnetron co-sputtering) และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 700°C ซึ่งพบว่ามีค่าโพลาริเซชันสูงสุดที่ $41 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องเป็น 196 ที่ความถี่ 100 kHz โดยมีค่ามากกว่าในรูปของบัลค์เซรามิกดัง ภาพที่ 2.18 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของฟิล์ม



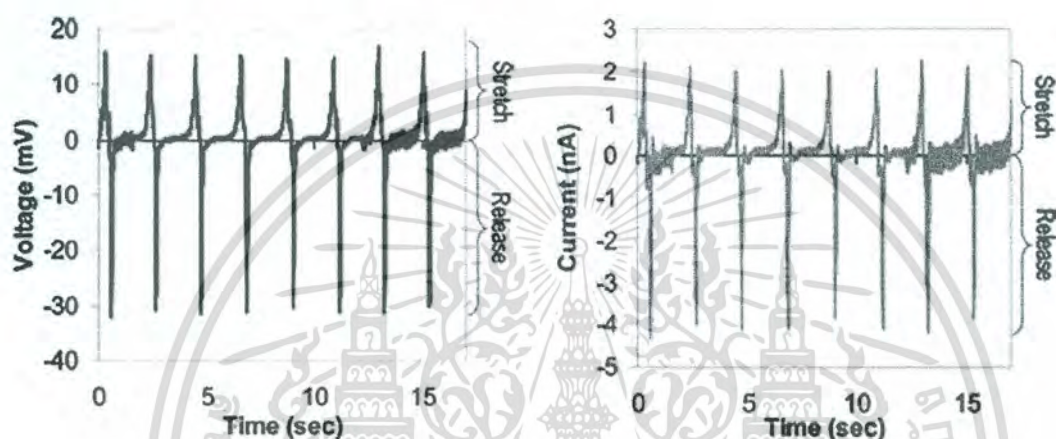
ภาพที่ 2.18 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของฟิล์มบาง PZ ในช่วงความถี่ 10^{-1} - 10^3 kHz [21]

จะเห็นได้ว่าการเตรียมเซรามิกให้มีขนาดที่เล็กลงในระดับนาโนเมตรและการลดมิติลง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุ ทำให้เซรามิกที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้น ดังนั้นการเตรียมวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในรูปของวัสดุนาโนจึงได้รับความสนใจอย่างมาก

นอกจากนี้ยังพบว่ามีโพลิเมอร์ที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้ ยกตัวอย่างเช่น PVDF ซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิจัยในการพัฒนาอุปกรณ์บนพื้นฐานของสภาพเพียโซอิเล็กทริก เช่น เครื่องอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ใต้น้ำ (underwater ultrasonic transducers) และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์อะคูสติกทรานสดิวเซอร์ (electroacoustic transducers) เช่น ไมโครโฟน หูฟัง และลำโพง

ในปี 2010 Chang และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาการเตรียมเส้นใยนาโน PVDF จากการกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระดับนาโน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแปลงพลังงานจากแหล่งพลังงานเชิงกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้ต้นทุนต่ำ และไม่ใช้สารกึ่งตัวนำ ซึ่งวัสดุนาโนอินทรีย์ได้รับความสนใจสำหรับการใช้งานมากมาย รวมทั้งการเก็บพลังงาน โดยทำการเตรียมเส้นใยพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

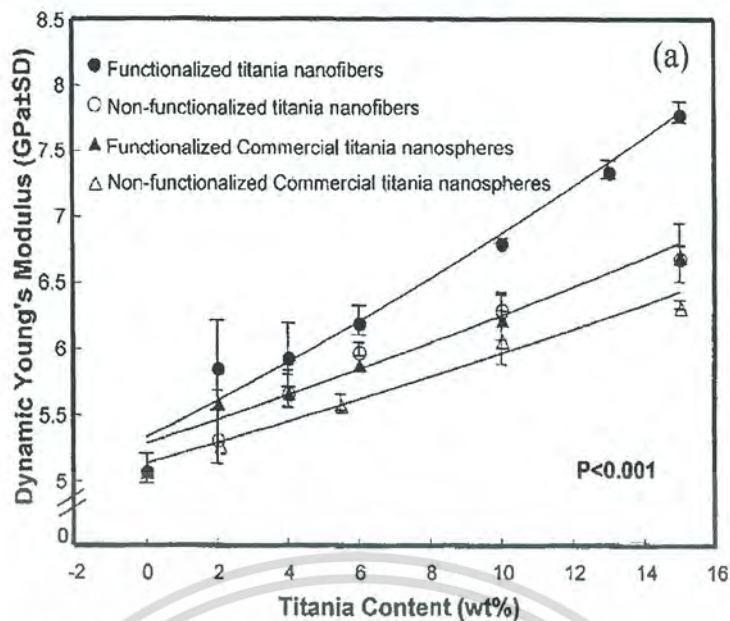
รสปินนิ่งที่มีการยึดเชิงกลและการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า ซึ่งเส้นใยเพียโซอิเล็กทริกนับว่าเป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจอย่างมาก เมื่อเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างทั่วไป เช่น บัลค์ (bulk) หรือฟิล์มบาง เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการออกแบบและการนำไปใช้งานในโครงสร้างที่หลากหลาย อีกทั้งยังสามารถเตรียมเส้นใยได้จากสารเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกหลากหลายชนิด จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าวัสดุกำเนิดพลังงานจากเส้นใยนาโนจะแสดงพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงกว่าฟิล์มบาง ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในตัวตรวจจับและแอคชูเอเตอร์ โดยเส้นใยที่ได้มีขนาดอยู่ในช่วง 500 nm ถึง 6.5 μm ซึ่งให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแส 5-30 mV และ 0.5-3 nA ตามลำดับ แสดงในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้สัมพันธ์กับเวลาภายใต้ความเครียดกดอัดที่ 2 Hz [22]

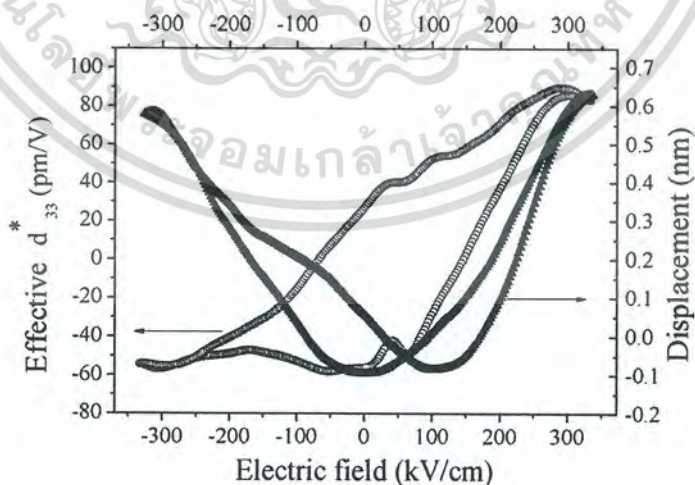
มีงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์เส้นใยนาโนเพียโซอิเล็กทริกอย่างต่อเนื่องในปี 2007 Khaled และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาการเตรียมเส้นใยนาโนคอมโพสิตของไททาเนียมออกไซด์กับพอลิเมทิลเมทาอะครีเลท (TiO_2/PMMA) พบว่าเส้นใยคอมโพสิตที่เตรียมได้ให้ค่าความแข็งแรงยืดหยุ่น (Young's modulus) ที่สูงถึง 7.7 GPa ที่ปริมาณของไททาเนีย 15 % โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าอนุภาคนาโน (6.5 GPa) ดังภาพที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.20 ค่าความแข็งแรงยืดหยุ่น (Young's modulus) เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณไททานี ของ (●) เส้นใยนาโนไททานีเปรียบเทียบกับ (▲) อนุภาคนาโน [23]

ในปี 2009 Li และคณะ [24] ได้ทำการสังเคราะห์เส้นใย BT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 92-182 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงพบว่าเส้นใยที่ได้มีอุณหภูมิคูรีสูงถึง 220°C ซึ่งมากกว่าบัลก์ BT ($T_C \approx 130^\circ\text{C}$) และในปี 2010 Liao และคณะ [25] ได้ทำการสังเคราะห์เส้นใยในระบบ $\text{Bi}_{3.15}\text{Nd}_{0.85}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BNT) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30-200 นาโนเมตร พบว่าเส้นใยที่ได้มีอุณหภูมิคูรีสูงถึง 500 °ซ และมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่ 89 pm/V (ดังภาพที่ 2.21) ซึ่งสูงกว่าค่าที่วัดได้จากบัลก์ BNT



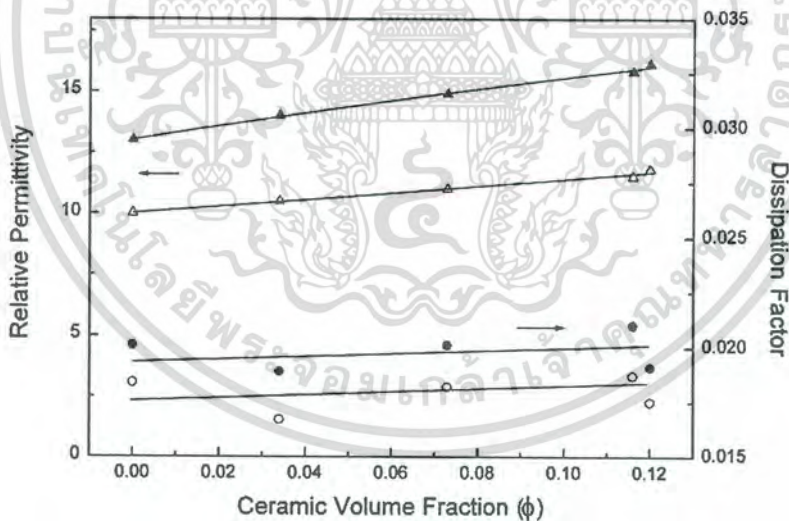
ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเพียโซอิเล็กทริกกับสนามไฟฟ้าของเส้นใยนาโน BNT [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามเส้นใยเซรามิกที่เตรียมได้นั้นค่อนข้างเปราะ ไม่เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน จึงได้มีการศึกษาการขึ้นรูปในรูปแบบของวัสดุคอมโพสิต

โดยในปี 1991 เชตคักดี แซ่ลี [26] ได้เตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่าง PZT กับพอลิเอทิลีน โดยวิธีอัดรีดเป็นแผ่น (Calendaring method) โดยเตรียมผงเซรามิกด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) และทำการศึกษสมบัติต่างๆ พบว่า วัสดุผสมที่เตรียมได้มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและไดอิเล็กทริกสัมพันธ์กับปริมาตรของ PZT สำหรับวัสดุผสมที่เติม PZT 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ได้ 14.5 pC/N และ 18.8 ตามลำดับ โดยที่ค่า d_{33} ของ PZT วัดได้ 173 pC/N และค่า ϵ_r ของ PZT และพอลิเอทิลีน เท่ากับ 410 และ 4 ตามลำดับ

ในปี 1998 Chan และคณะ [27] เตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่างเลดไทเทเนตเซรามิก (PbTiO_3 หรือ PT) และไวโนลิดีนฟลูออไรด์-ไตรฟลูออโรเอทิลีนโคพอลิเมอร์ ([P(VDF-TrFE)]) โดยเตรียมเลดไทเทเนตด้วยกระบวนการโซล-เจล ทำให้ได้ผงเซรามิกที่มีขนาดเล็ก (Nanocrystalline powder) และเตรียมวัสดุผสมชนิดฟิล์มบางแบบ 0-3 ที่มีผงเซรามิก PT กระจายอยู่ในพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบ (Spin-coating technique) และได้ศึกษาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าเมื่อปริมาณผงเซรามิกเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.22

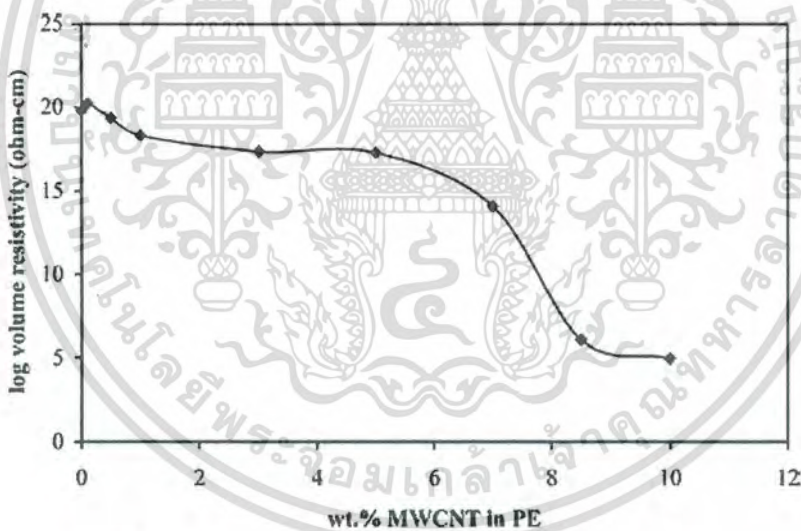


ภาพที่ 2.22 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) และการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dissipation factor) ของคอมโพสิตที่มีปริมาตรต่าง ๆ กันของวัสดุผสมก่อนและหลังการโพลิง (Poling) [27]

ในปี 2001 Ploss และคณะ [28] ศึกษาขั้นตอนการโพลของวัสดุผสมระหว่างสารเซรามิก PZT กับไวโนลิดีนฟลูออไรด์-ไตรฟลูออโรเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (P(VDF-TrFE)) โดยเตรียมคอมโพสิต ด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการหล่อด้วยตัวทำละลายแล้วตามด้วยเทคนิคการกดอัด (Compression moulding) จากการศึกษาพบว่า การโพลีวัสดุผสมในแต่ละขั้นตอน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมและการเพิ่มอุณหภูมิหรือการเพิ่มสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการโพลจะส่งผลทำให้ค่า d_{33} ของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณสารเซรามิก PZT เพิ่มขึ้นสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมจะดีขึ้น

ในปี 2005 Tony McNally และคณะ [29] ได้ศึกษาวัสดุผสมของพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) กับท่อนาโนคาร์บอน (multiwalled carbon nanotubes; MWCNTs) ด้วยสัดส่วนตั้งแต่จาก 0.1 ถึง 10 โดยน้ำหนัก และเตรียมได้จากการการผสมกันโดยใช้เครื่องรีดแบบสกรูคู่ (mini-twin screw extruder) โดยพบว่าที่ประมาณ 7.5% โดยน้ำหนักจะเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาค (Percolation threshold) และการนำไฟฟ้า (electrical Conductivity) ของ PE จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) และค่าการยืดของชิ้นงานที่จุดขาด (elongation at break) ของวัสดุประกอบนาโนจะลดลงเมื่อเพิ่ม MWCNTs และพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ PE เพิ่มขึ้น 20 K เมื่อเติม MWCNT 10% โดยน้ำหนัก

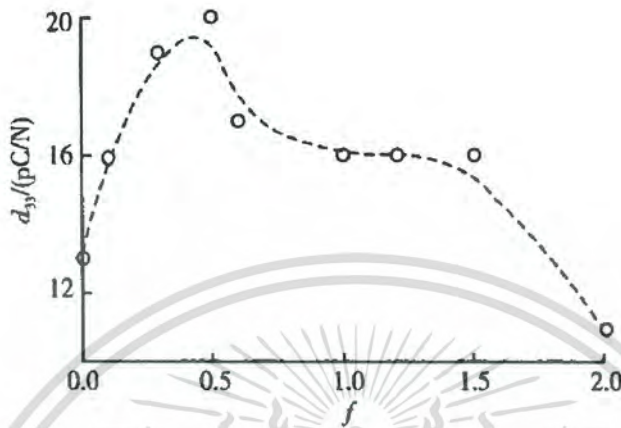


ภาพที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความต้านทานของนาโนคอมโพสิต PE/MWCNT [29]

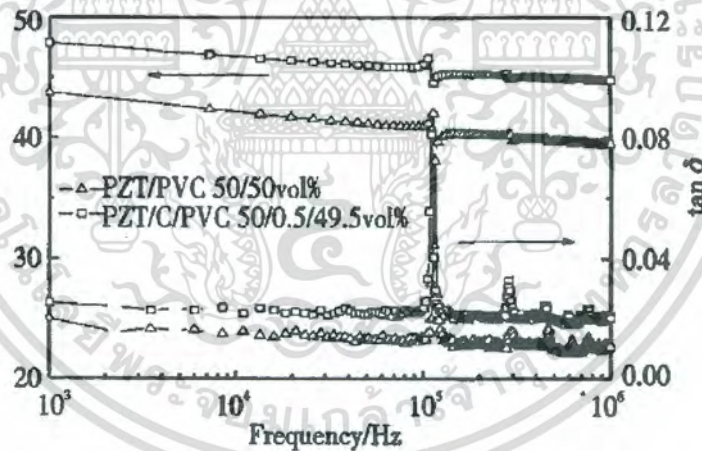
จากภาพที่ 2.23 แสดงให้เห็นว่าปริมาณความต้านทาน (volume resistivity) และการนำไฟฟ้า (conductivity) มีการเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนน้ำหนักของ MWCNT ที่เติมลงใน PE เมทริกซ์ โดยปริมาณความต้านทาน (volume resistivity) จะปรับตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาตรของ MWCNT

ในปี 2006 Liu และคณะ [30] ได้ศึกษาสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและไดอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PZT และพอลิไวนิลคลอไรด์ ที่มีการเติมแกรไฟต์ในวัสดุคอมโพสิต โดยเตรียมวัสดุคอมโพสิตนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีเมอร์ด้วยเทคนิคกดอัดร้อน (Hot-pressing) จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าวัสดุคอมโพสิตที่เติมแกรไฟต์โดย สัดส่วนโดยปริมาตร เท่ากับ 0.5 มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่สูงกว่าวัสดุคอมโพสิตที่ไม่เติมแกรไฟต์ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 2.24 และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่า ดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.24 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต PZT/PVC 50/50 vol% และ PZT/C/PVC 50/0.5/49.5 vol% ที่อุณหภูมิห้อง [30]

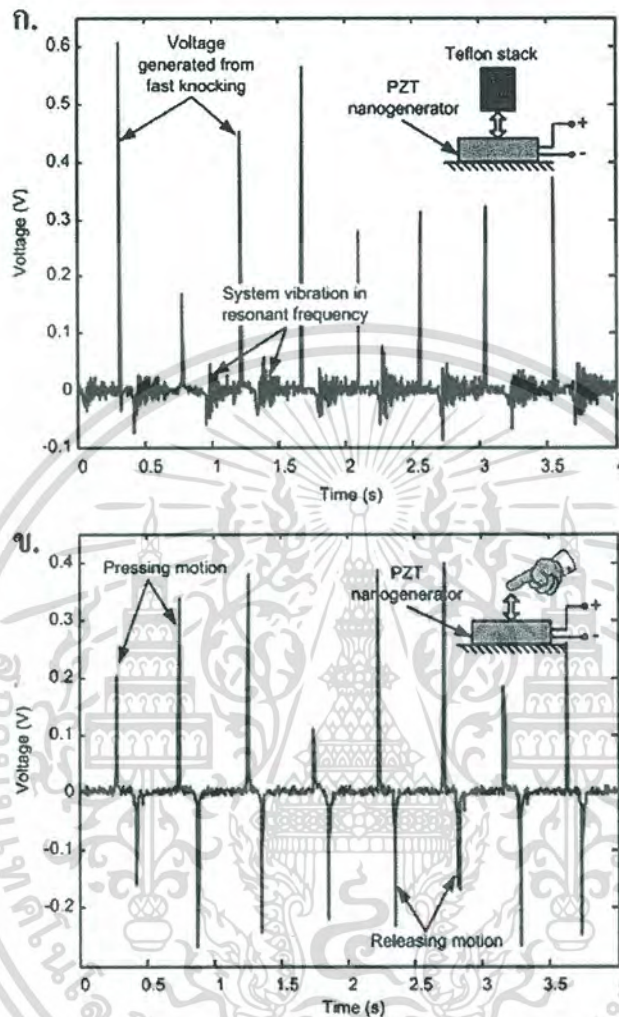


ภาพที่ 2.25 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกของคอมโพสิต PZT/C/PVC 50/f/(50 - f) กับสัดส่วนโดย ปริมาตรของคาร์บอน [30]

ในปี 2007 H. Chen และคณะ [31] ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PZT กับพอลิเมทิลเมทาคริลเลต (PMMA) โดยเตรียม PZT ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) และเตรียมวัสดุคอมโพสิตโดยวิธีแทรกซึมพอลิเมอร์เหลวเข้าไปในรูพรุนของ PZT จากการศึกษาค้นคว้าพบว่า เมื่อปริมาณของ PZT เซรามิกลดลง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่า d_{33} ของวัสดุคอมโพสิตมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าที่สัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกที่เท่ากัน วัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

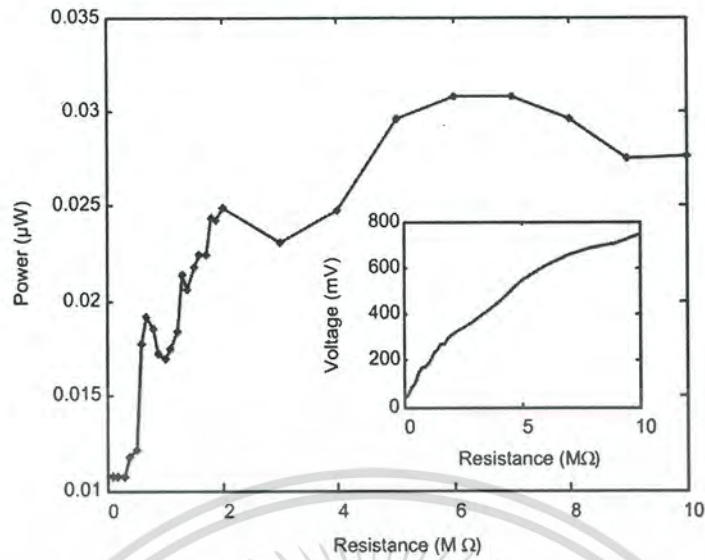
คอมโพสิตแบบแผ่น (Sheet) มีความทนต่อการแตกหัก (Fracture strength) สูงกว่าวัสดุคอมโพสิตรูปทรง โดยวัสดุคอมโพสิตชนิดนี้เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุตรวจวัด (Sensors) และแอกชูเอเตอร์ (Actuators)



ภาพที่ 2.26 ค่าศักย์ไฟฟ้าของวัสดุ PZT เมื่อให้แรงเชิงกล โดยใช้ ก) แท่งเทฟลอน และ ข) นิ้วมือกดที่เวลาต่างกัน [31]

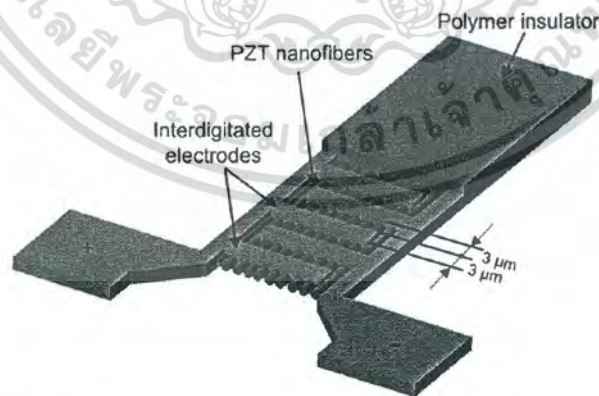
ในปี 2010 X. Chen และคณะ [32] ได้ทำการประดิษฐ์วัสดุเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระดับนาโน (nanogenerator) จากเส้นใยนาโนเพียโซอิเล็กทริกของ PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 นาโนเมตร จัดเรียงบนแพลตฟอร์มอินเทอร์ดิจิติอิเล็กโทรดบนแผ่นซิลิกอนจากนั้นเคลือบด้วยพอลิเมอร์ PDMS พบว่าเมื่อให้แรงเชิงกลกับวัสดุโดยใช้แท่งเทฟลอนกดลงไปบนแหล่งกำเนิดไฟฟ้า PZT จะให้ค่าต่างศักย์ไฟฟ้าออกมาถึง 600 mV ดังภาพที่ 2.26 ก และเมื่อเปลี่ยนแรงที่ให้นิ้วมือกดจะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.63 V (ภาพที่ 2.26 ข) นอกจากนี้เมื่อให้ความต้านทานแก่วัสดุ $6 \text{ M}\Omega$ พบว่าวัตต์กำลังไฟฟ้าได้ถึง $0.3 \text{ }\mu\text{W}$ แสดงดังภาพที่ 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



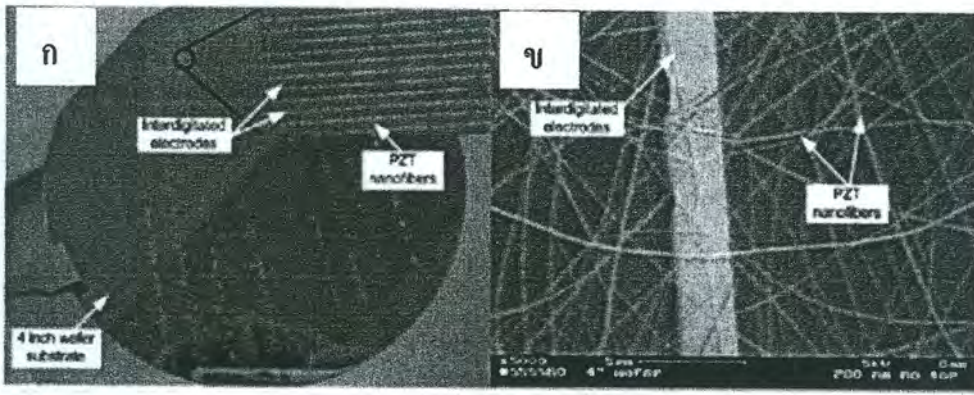
ภาพที่ 2.27 ค่ากำลังไฟฟ้าของวัสดุ PZT ที่ความต้านทานต่างๆ [32]

ในปี 2011 Chen และคณะ [33] ได้ทำการประดิษฐ์ เส้นใยนาโนคอมโพสิตที่สามารถสร้างพลังงานตัวเอง (self-powered Nanoscale Active Fiber Composite; NAFC) ในการสร้างตัวตรวจจับที่มีความไวสูงบนพื้นฐานของการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติก โดยการจัดเรียงเส้นใยนาโน PZT ขนาด 80 นาโนเมตร บนแผ่นซิลิกอน จากนั้นสร้างอินเตอร์ดิจิตอลเล็กทรอดบนเส้นใยจากนั้น สปินทับด้วยชั้นของพอลิเมอร์ PDMS ดังภาพที่ 2.28 และ 2.29 จากนั้นทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเทียบกับเวลาพบว่าสามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้ออกมาได้ถึง 35 mV ดังภาพที่ 2.30

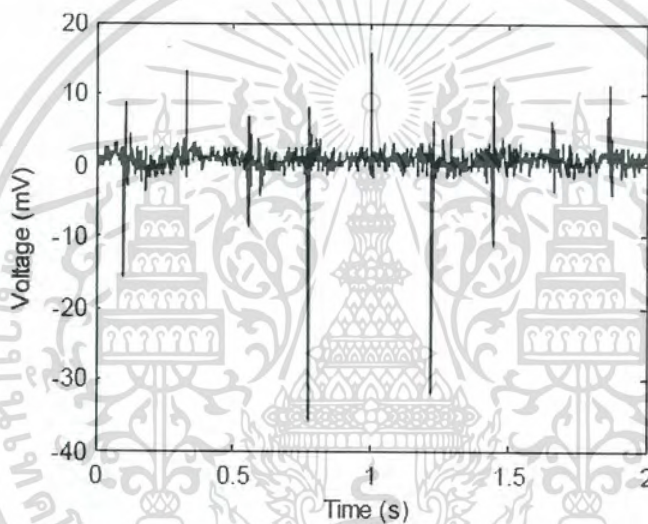


ภาพที่ 2.28 แผนภาพจำลองของตัวตรวจจับ PZT NAFCs AE [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.29 เวเฟอร์ของอินเตอร์ดิจิทอโทรดกับเส้นใย PZT ที่ได้จาก ก) กล้องแสง และ ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [33]



ภาพที่ 2.30 สัญญาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวตรวจจับเทียบกับเวลา [33]

อย่างไรก็ตามในขณะที่ผลข้างต้นนี้เป็นที่โดดเด่น เรายังคงต้องการอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพการส่งออกของพลังงานที่สูงโดยใช้วัสดุเพอโรอิเล็กทริกที่เตรียมได้ง่ายและไม่เป็นพิษ

ในปี 2006 Hajeesaeh และคณะ[34]ได้ทำการเตรียมคอมโพสิต $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ เพื่อให้ได้คอมโพสิตแบบ 0-3 โดยไม่มีการเชื่อมต่อกันของผงเซรามิก จึงใช้แบเรียมไททาเนต ที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรต่ำเท่ากับ 0.3 ใส่ลงในเมทริกซ์พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) และกวนของผสมอย่างต่อเนื่อง จากนั้นทำการขึ้นรูปคอมโพสิตเป็นแผ่น จากการตรวจสอบโครงสร้างของคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าการเรียงตัวของแบบ 0-3 จากนั้นนำแบบจำลองทางทฤษฎีและสมการมาใช้ในการศึกษาคอมโพสิตเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยมีค่าความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนเท่ากับ 3.21103 kg/m^3 และ $3021.7 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.2 โดยคอมโพสิตได้ผ่านการโพลิงแบบโคโรนาก่อนการทดสอบการตอบสนองทางไดอิเล็กทริก พบว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

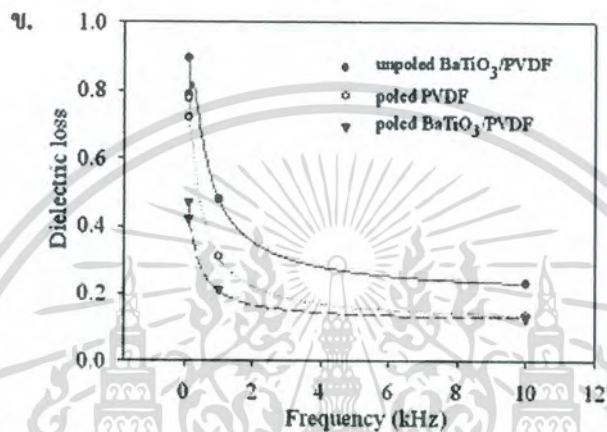
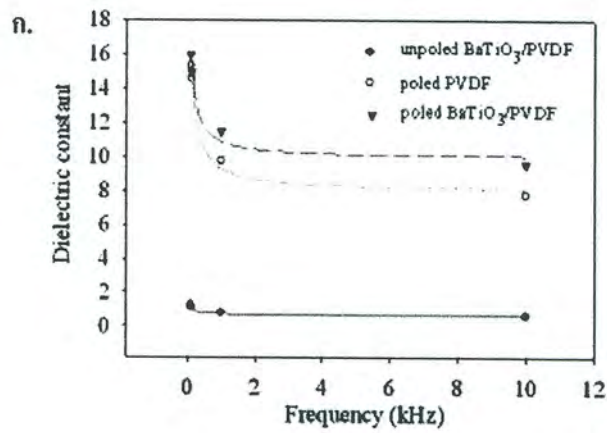
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตที่ 1 kHz ที่อุณหภูมิห้อง เท่ากับ 11.5 และ 0.21 ตามลำดับ ดังภาพที่ 2.31 โดยการเป็นไดอิเล็กทริกที่ดีและมีความสามารถในการดัดงอได้ของสาร ชี้ให้เห็นว่าคอมโพสิตนี้น่าสนใจสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการน้ำหนักเบา ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ผลิตง่ายและราคาประหยัด

ในปี 2009 F. Fang และคณะ [35] ได้ศึกษาลักษณะพฤติกรรมการเสีรูปร่างและการแตกหักภายใต้แรงดึงในทิศทางเดียวของคอมโพสิตแบบ 0-3 ของ BaTiO₃/poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) จากภาพที่ 2.32 การเพิ่มปริมาณของผง BaTiO₃ ขนาดเล็ก เข้าไปจะยับยั้งการเจริญเติบโตของขนาดผลึก ทำให้เกิดการลดลงของขนาดผลึกและรวมตัวกันแบบหลวมๆ ในโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล ดังนั้นความเครียดของการแตกหักของคอมโพสิตจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงแตกหักลดลง

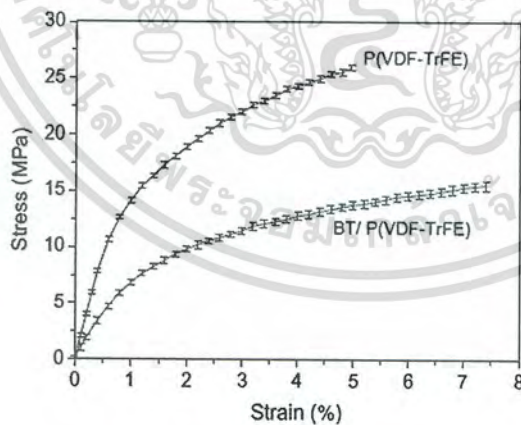
ตารางที่ 2.2 ความหนาแน่น ค่าความจุความร้อน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF ที่ได้จากการคำนวณ [34]

Materials	Density at 25°C 10 ³ (kg/m ³)	Heat capacity (J/kg°C)	Dielectric constant (at 1 kHz, 25°C)	Dielectric loss (at 1 kHz, 25°C)
Poled PVDF	1.901	2322.7	8.4 - 13.51	-
Poled BaTiO ₃	5.462	738.6	13012	-
Unpoled BaTiO ₃ /PVDF			0.8	0.48
Poled PVDF			9.7	0.31
Poled BaTiO ₃ /PVDF	3.21 (3.04)	3021.7 (1847.5)	11.5	0.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



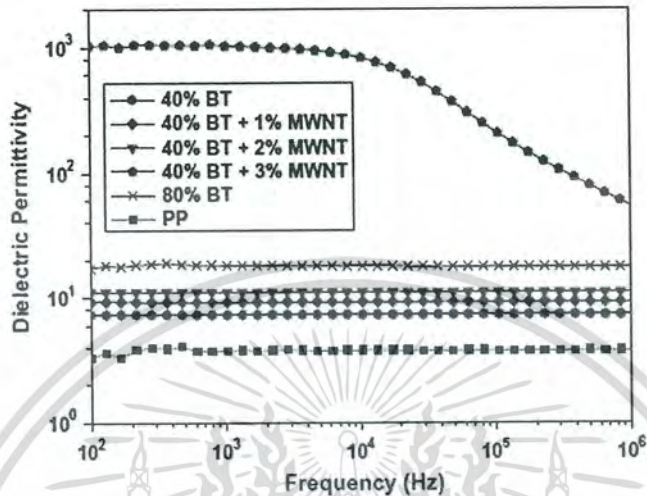
ภาพที่ 2.31 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก (ข) ของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF ที่ 1 kHz [34]



ภาพที่ 2.32 กราฟ Stress-strain ของวัสดุคอมโพสิตและฟิล์มโคพอลิเมอร์ภายใต้การดึงยืดในทิศทางเดียว [35]

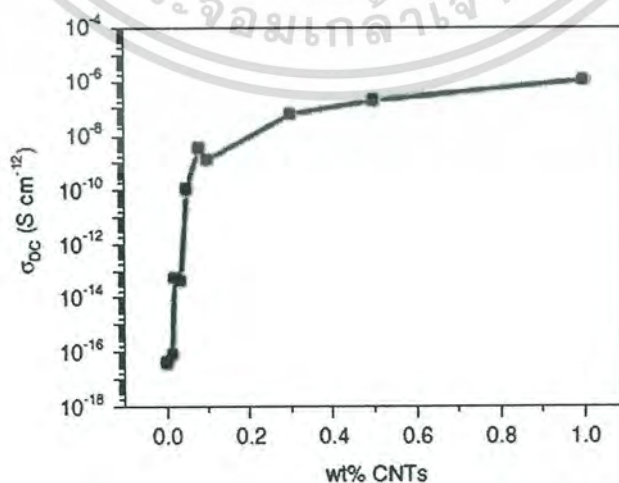
ในปี 2010 Chang-Rong Yu และคณะ[36] ได้ทำการศึกษาโนคอมโพสิตของโพลิโพรพิลีน (Polypropylene;PP) และแบเรียมไททานเนต (BaTiO₃;BT) และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWNT) พบว่าที่ BT 40 wt.% ที่มี MWNT 2 wt.% ค่าสภาพยอมไดอิเล็กทริก (dielectric permittivity) มีค่าถึง 28 ที่ 100 Hz โดยมค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในระดับที่ต่ำ และเมื่อเพิ่มปริมาณของ MWNT เป็น 3% ทำให้ค่าสภาพยอมไดอิเล็กทริก (dielectric permittivity) ของ คอมโพลีต PP/BT เพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 2.33 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อเทียบกับความถี่ของคอมโพลีต PP/40 wt. % BT ที่ 0–3 wt.% MWNT [36]

ในปี 2010 Jeffrey Salzbrenner และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาผลกระทบทางไฟฟ้าและทางเชิงกลของท่อคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNT) ที่อยู่บนพื้นผิวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) พบว่าจากการรวมกันของท่อคาร์บอนบนพื้นผิวไม่เพียงมีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเท่านั้น แต่ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดในด้านของประสิทธิภาพทางไฟฟ้า โดยพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CNT เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 2.34

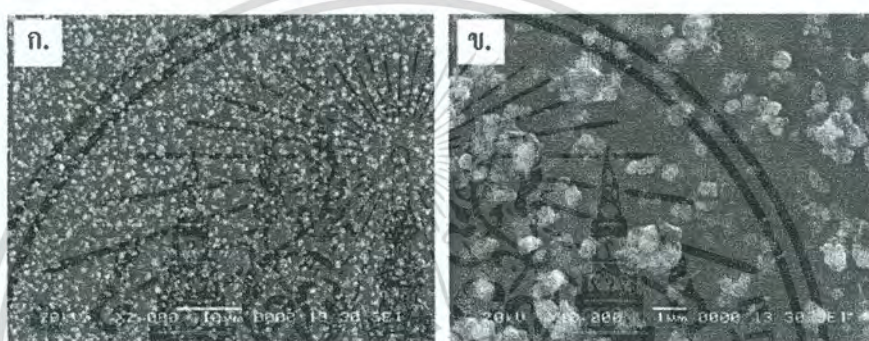


ภาพที่ 2.34 ค่าการนำไฟฟ้าเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CNT [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญาตรหน้าไปไซประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

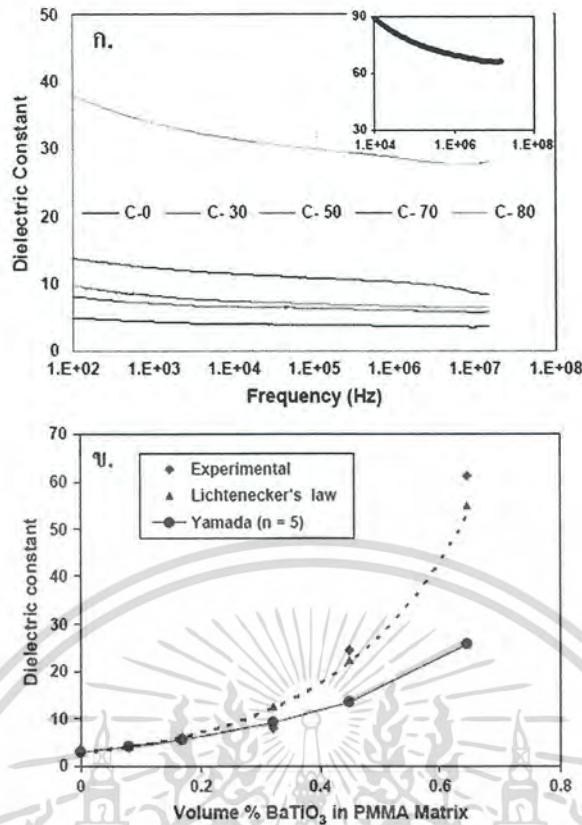
ต่อมา R.K. Goyal และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาวัสดุผสมของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate; PMMA) กับ $BaTiO_3$ โดยเตรียมได้จากการทำเป็นสารละลายอย่างง่าย (simple solution method) และตามด้วยการกดอัดด้วยความร้อน (hot pressing) โดยใช้ปริมาณ $BaTiO_3$ ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0-65 % โดยปริมาตร ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจากเทคนิค SEM แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวและการยึดเกาะกันที่ดีของ $BaTiO_3$ กับ PMMA

จากภาพที่ 2.35 แสดงให้เห็นภาพ SEM ของวัสดุผสมที่มี BT 45 % โดยปริมาตรจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอนุภาค BT กระจายอยู่ในเมทริกซ์ แต่บางครั้งพบว่าการรวมตัวของ BT จะส่งผลทำให้เกิดช่องว่าง ส่งผลให้ความหนาแน่นที่ได้ต่ำกว่าความหนาแน่นทางทฤษฎี



ภาพที่ 2.35 SEM ของ PMMA/ $BaTiO_3$ คอมโพสิตที่ $BaTiO_3$ 45% ปริมาตร
(ก) กำลังขยายกล้องต่ำ (ข) กำลังขยายกล้องสูง [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



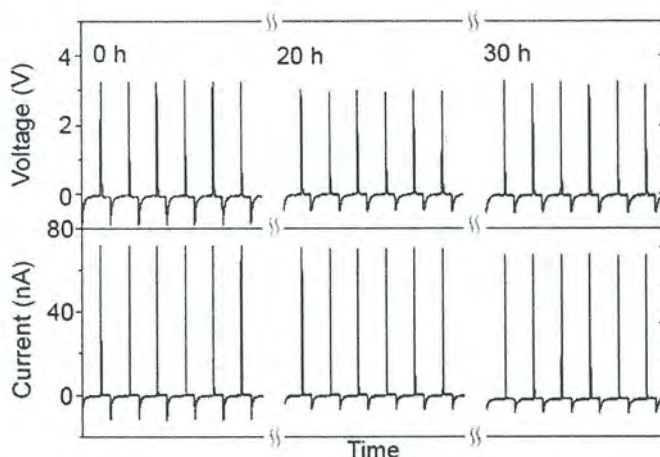
ภาพที่ 2.36 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมขึ้นกับ (ก) ความถี่ (ข) ปริมาตร BT ใน PMMA เมทริกซ์ [38]

จากรูป 2.36(ก) และ 2.36(ข) จะแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของวัสดุผสม PMMA/BT จะขึ้นอยู่กับลอการิทึมของความถี่และปริมาตร BT ที่ใส่ตามลำดับ โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่มีปริมาตร BT 45% ขึ้นไปจะค่อนข้างเสถียรที่ความถี่ต่าง ๆ ดังรูป 2.36(ก) และพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ BT ใน PMMA เมทริกซ์ ดังรูป 2.36(ข) ซึ่งการที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากโพลาไรเซชันของ BT สูงกว่าใน PMMA เมทริกซ์

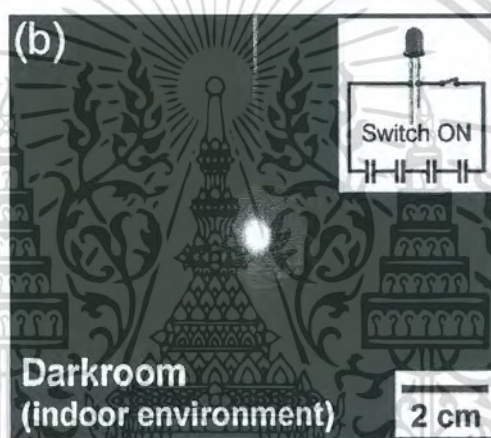
โดยในปี 2011 Jung และคณะ [39] ได้รายงานการประดิษฐ์วัสดุกำเนิดไฟฟ้าปลอดสารตะกั่วระดับนาโนที่มีความยืดหยุ่นและให้ประสิทธิภาพสูง โดยใช้ลวดนาโน (nanowire) ของโซเดียมไนโอเบต (sodium niobate; NaNbO_3 ; NN) เตรียมเป็นคอมโพสิตกับพอลิเมอร์ (polydimethyl siloxane; PDMS) โดยทำการเตรียมลวดนาโน NN จากวิธีไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) ที่อุณหภูมิต่ำและเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งพบว่าอุปกรณ์คอมโพสิตของลวดนาโน NN กับ PDMS พอลิเมอร์ ให้สัญญาณเพียโซอิเล็กทริกที่สูงและมีความเสถียร ดังภาพที่ 2.37 โดยแสดงศักย์ไฟฟ้าออกมา 3.2 V และให้กระแส 72 nA (ความหนาแน่นกระแส 16 nA/cm^2) ภายใต้อุณหภูมิ 0.23% ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าลวดนาโน NN อาจนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีใน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไร้สารตะกั่วในระดับที่ใหญ่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



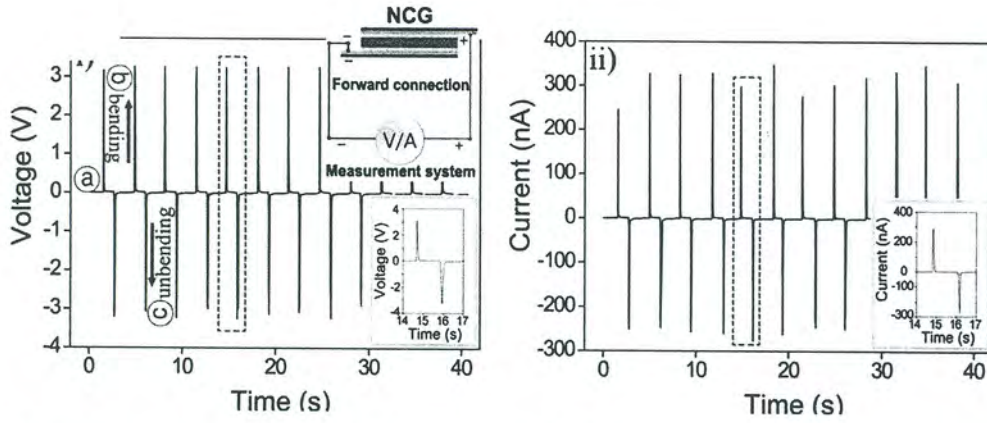
ภาพที่ 2.37 เสถียรภาพของคอมโพสิตภายใต้ความเครียดกดอัด 0.23% เป็นเวลา 30 ชั่วโมงที่ ความถี่ 0.33 Hz (ประมาณ 36000 รอบ) [39]



ภาพที่ 2.38 ภาพจากกล้องดิจิทัลแสดงแสงจากหลอด LED ที่เปิดด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้จาก อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโนคอมโพสิต [40]

ในปี 2012 Park และคณะ [40] ได้ทำการประดิษฐ์วัสดุกำเนิดพลังงานนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้ง่าย ต้นทุนต่ำ และมีพื้นที่ผิวสูงได้จากอนุภาคนาโน BT ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล ร่วมกับนาโนคาร์บอนโดยทำการกระจายตัวในพอลิเมอร์ PDMS ด้วยวิธีการปั่นกวินเชิงกล จากนั้นทำการหมุนเคลือบบนแผ่นรองรับพลาสติกที่เคลือบด้วยโลหะ พบว่าภายใต้การเปลี่ยนแปลงเชิงกลจากภายนอกโดยการงอหรือจากการเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์จากมือหรือเท้า จะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าจากอุปกรณ์ขึ้นและสามารถจ่ายให้กับหลอด LED ได้ดังภาพที่ 2.38 จากการบิดงอวัสดุอย่างต่อเนื่องพบว่าให้ศักย์ไฟฟ้าออกมา 3.2 V และให้กระแส 250-350 nA แสดงในภาพที่ 2.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.39 สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้จากอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโนคอมโพสิต ขณะทำการบิดงออย่างต่อเนื่อง [40]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตสำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูงในสองรูปแบบคือรูปแบบ 3-3 ของเส้นใย นาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอนโดยเตรียมเส้นใยนาโนเซรามิกเลดเซอร์โคเนตด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) ร่วมกับกระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process) และทำการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตในรูปแบบ 0-3 ของแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และปรับปรุง สมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการ ในการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตแสดงไว้ตามลำดับต่อไปนี้

3.1 สารเคมี

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนต (PZ)

1. เลดอะซิเตตไตรไฮเดรต (Lead acetate trihydrate; $Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$) ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. สารละลายเซอร์โคเนียมโพรพอกไซด์ในโพรพานอลเข้มข้น 70% (Zirconium (IV) propoxide solution ~70% in propanol; $C_{16}H_{36}O_4Zr$) ผลิตโดยบริษัท Fluka. ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
3. 2-เมทอกซีอีทานอล (2-Methoxyethanol; $C_2H_8O_2$) ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. โพลีเอทิลีนออกไซด์ (Polyethyleneoxide; PEO) มวลโมเลกุล 300 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท Aldrich-Chemistry ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. กรดอะซิติก (Acetic acid; CH_3COOH) ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PZ-PVDF) และการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (PZ-PVDF-CNT)

1. เส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตที่เตรียมได้
2. แท่งนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ผลิตโดย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
3. พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF; MW ~ 534,000) ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. สารละลายไดเมทิลฟอร์มามาไมด์ (Dimethyl formamide; DMF)
5. เอทานอล (CH_3CH_2OH) Analytical Reagent A.R. ผลิตโดยบริษัท RCI Labscan Limited ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (BT-PDMS) และการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

1. แบเรียมไททาเนตขนาดอนุภาคนาโน (BaTiO_3) ความบริสุทธิ์ 99.95% ผลิตโดยบริษัท Advanced Materials ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เบส หรือ พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ($\text{C}_2\text{H}_6\text{OSi}$)_n ผลิตโดยบริษัท DOWN-CORNING ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เคียวริง เอเจนท์ (SILICONE ELASTOMER CURING AGENT) ผลิตโดยบริษัท DOWN-CORNING ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เอทานอล ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) Analytical Reagent A.R. ผลิตโดยบริษัท RCI Labscan Limited ประเทศไทย
5. แท่งนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ผลิตโดย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนต (PZ)

1. บีกเกอร์ ขนาด 25 50 และ 100 มิลลิลิตร
2. แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร ขนาด 1 เซนติเมตร
3. ซ้อนตักสาร
4. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
5. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 10 25 และ 100 มิลลิลิตร
6. กระดาษฟอยล์ (Foil)
7. หลอดหยด
8. เตาสำหรับเผาสาร (Crucible)
9. แท่งแก้วคนสาร
10. ครอบอกเอทานอล
11. แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage)
12. หลอดบรรจุสารละลายขนาด 10 มิลลิลิตร
13. เข็มฉีดยาเบอร์ 24
14. อุปกรณ์ควบคุมการไหลของสารละลาย (Syringe pump)
15. วัสดุรองรับโลหะทำจากแผ่นอลูมิเนียม (Aluminium plate)
16. เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific
20. เตาเผาสารผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific
21. เครื่องอัลตราโซนิกส์ ผลิตโดยบริษัท NDI รุ่น 136 H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PZ-PVDF) และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (PZ-PVDF-CNT)

1. กระจกอะทานอล
2. ซ้อนตักสาร
3. ปีเปตขนาด 5 มิลลิลิตร 1 ปีเปต
4. ปีเปตขนาด 1 มิลลิลิตร 1 ปีเปต
5. เข็มฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตร 1 อัน
6. ปีกเกอร์ ขนาด 25 มิลลิลิตร 3 ใบ
7. อลูมิเนียมฟรอยล์ (aluminum foil)
8. แท่งแก้วคนสาร
9. แท่งแม่เหล็กคนสาร
10. หลอดหยด
11. เวอร์เนียดิจิตอล
12. เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท Sartorius
13. เครื่องอัลตราโซนิกส์ ผลิตโดยบริษัท NDI รุ่น 136 H

3.2.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของแบเรียมไททานตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT-PDMS) และการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

1. กล่องพลาสติกแบบ 3 ช่อง
2. กระจกอะทานอล
3. ซ้อนตักสาร
4. ปีเปตขนาด 5 มิลลิลิตร 1 ปีเปต
5. ปีเปตขนาด 1 มิลลิลิตร 1 ปีเปต
6. เข็มฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตร 1 อัน
7. ปีกเกอร์ ขนาด 25 มิลลิลิตร 5 ใบ
- ขนาด 50 มิลลิลิตร 5 ใบ
- ขนาด 500 มิลลิลิตร 1 ใบ
8. อลูมิเนียมฟรอยล์ (aluminum foil)
9. แท่งแก้วคนสาร
10. แท่งแม่เหล็กคนสาร
11. หลอดหยด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. เทปทองแดง (copper tape)
13. เทปคาร์บอน (carbon tape)
14. กรรไกร
15. เวอร์เนียดิจิตอล
16. เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท Sartorius
17. เครื่อง Plasma Cleaner PDC-001 (115V); PDC-002 (230V) ผลิตโดยบริษัท Harrick Plasma

3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ Zeiss รุ่น EVO MA 10
2. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared Spectrometer :IR) ผลิตโดยบริษัท PerkinElmer
3. เครื่องตรวจการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD) ผลิตโดยบริษัท Siemens รุ่น D8 Advance
4. เครื่อง LCZ มิเตอร์ รุ่น Agilent E4980A ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) ในช่วงความถี่ 20 Hz ถึง 2 MHz

3.3 การเตรียมคอมโพสิตของเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PZ-PVDF) และทำการปรับปรุงสมบัติ ด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (PZ-PVDF-CNT)

3.3.1 การเตรียมสารละลายตั้งต้นเลดเซอร์โคเนตด้วยกระบวนการโซล-เจล

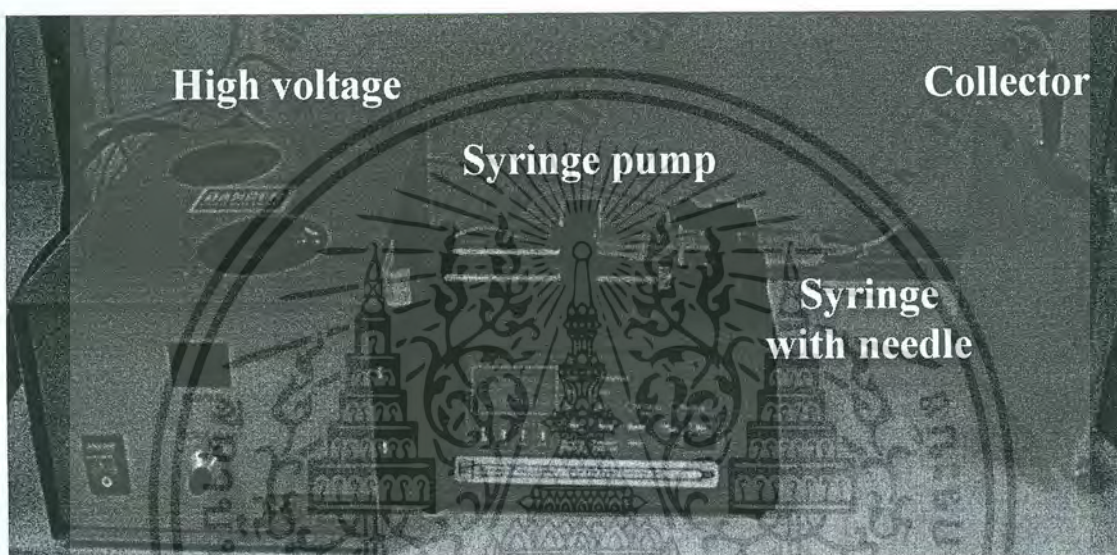
ในการเตรียมสารละลายตั้งต้นเลดเซอร์โคเนต (PZ) ด้วยกระบวนการโซล-เจล จะใช้เลดอะซิเตตไตรไฮเดรต ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และสารละลายเซอร์โคเนียมบิวทอกไซด์ ($\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{O}_4\text{Zr}$) ที่มีความบริสุทธิ์สูงเป็นสารตั้งต้น และใช้ 2-เมทอกซีเอทานอล (2-Methoxyethanol; $\text{C}_2\text{H}_8\text{O}_2$) เป็นตัวทำละลาย โดยเริ่มจากการละลายเลดอะซิเตตไตรไฮเดรตและเซอร์โคเนียมบิวทอกไซด์ด้วย 2-เมทอกซีเอทานอลในปิกเกอร์แยกกัน ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที โดยให้ความร้อนในการละลายเลดอะซิเตตที่ 70°C จากนั้นผสมสารละลายสองส่วนเข้าด้วยกันในขวดวัดปริมาตร 10 มิลลิลิตร เติมกรดอะซิติกเข้มข้นลงไป 1 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วย 2-เมทอกซีเอทานอล โดยให้ความเข้มข้นสุดท้ายเป็น 1.0 โมลาร์ และใช้ปริมาณเลดอะซิเตตไตรไฮเดรตมากเกิดพอ 3%โดยโมล จากนั้นทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมสารละลายของเลดเซอร์โคเนตกับพอลิเอทิลีนออกไซด์

นำพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO; $M_w \sim 300,000$) มาละลายด้วยเอทานอลบริสุทธิ์ ให้ได้ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำสารละลายเลดเซอร์โคเนตที่เตรียมได้ข้างต้นผสมกับสารละลายพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) ในอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารตั้งต้นเลดเซอร์โคเนตต่อพอลิเอทิลีนออกไซด์เป็น 10:3 ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารละลายคอมพอลิเมอร์ตั้งต้นสำหรับกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง

3.3.3 การประดิษฐ์เส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง



ภาพที่ 3.1 ระบบอิเล็กโตรสปินนิงสำหรับประดิษฐ์เส้นใยนาโนเซรามิกเลดเซอร์โคเนต (PZ)

นำสารละลายของเลดเซอร์โคเนตกับพอลิเอทิลีนออกไซด์ที่เตรียมไว้ข้างต้นมา 10 มิลลิลิตร บรรจุลงในหลอดฉีดยาพลาสติกที่ติดด้วยเข็มโลหะ จากนั้นติดตั้งลงในระบบอิเล็กโตรสปินนิง โดยเชื่อมต่อเข้ากับระบบควบคุมอัตราการไหล (syringe pump) และต่อปลายหัวบวกของเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (high voltage) เข้ากับเข็มโลหะ ส่วนอีกขั้วต่อกับแผ่นอลูมิเนียมห่อด้วยอลูมิเนียมฟลอยด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุรองรับแบบคงที่ ดังภาพที่ 3.1 โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับคงที่ที่ 15 เซนติเมตร ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 kV และอัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เมื่อได้เส้นใยคอมพอลิเมอร์จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงแล้ว ลอกเส้นใยที่ได้ออกจากแผ่น อลูมิเนียมฟลอยด์ใส่ลงในครุชชีเบลที่มีฝาปิด จากนั้นนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°C เพื่อให้เกิดเฟสบริสุทธิ์ของเพอรอฟสไกต์

3.3.4 การเตรียมคอมพอลิเมอร์ของเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PZ-PVDF) และปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (PZ-PVDF-CNT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตที่ได้มาเตรียมเป็นคอมโพสิตกับพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ โดยเริ่มจากการละลายพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF; $M_w \sim 534,000$; Aldrich) ในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) เพื่อให้ได้พอลิเมอร์เมทริกของคอมโพสิต โดยทำการเตรียมสารสองชุด ชุดแรกไม่มีการเติมสารตัวเติมแห่งชาตินาโนคาร์บอน (PZ/PVDF) ส่วนชุดที่สองนำไปผสมกับแห่งชาตินาโนคาร์บอน (carbon nanotubes; CNT) ในอัตราส่วน 1wt% ของ CNT (PZ/CNT/PVDF) หลังจากทำการปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เทของผสมที่ได้ลงบนเส้นใยเลดเซอร์โคเนต และนำไปใส่ฟองอากาศเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4 การเตรียมคอมโพสิตแบบเรียบไททานิตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT-PDMS) และการปรับปรุงสมบัติด้วยแห่งชาตินาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

ซึ่งแบบเรียบไททานิต (BaTiO_3) อนุภาคนาโน ตามอัตราส่วนที่ต้องการที่ 10-50% โดยน้ำหนัก ใส่ในบีกเกอร์ เติมพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ($\text{C}_2\text{H}_6\text{OSi}$)_n 10 ml และซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เคียวริง เอเจนท์ 1 ml ปั่นกวนให้สารผสมเข้ากันเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเทของผสมที่ได้ลงแม่พิมพ์ แล้วเกลี่ยให้เสมอกัน ทิ้งไว้ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการลอกชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ทำเช่นเดียวกันจนครบทุกสัดส่วน โดยทำการเตรียมสารสองชุด ชุดแรกไม่มีการเติมสารตัวเติมแห่งชาตินาโนคาร์บอน (PZ/PVDF) ส่วนชุดที่สองนำไปผสมกับแห่งชาตินาโนคาร์บอน (carbon nanotubes; CNT) ในอัตราส่วน 1-5wt% ของ CNT (PZ/CNT/PVDF)

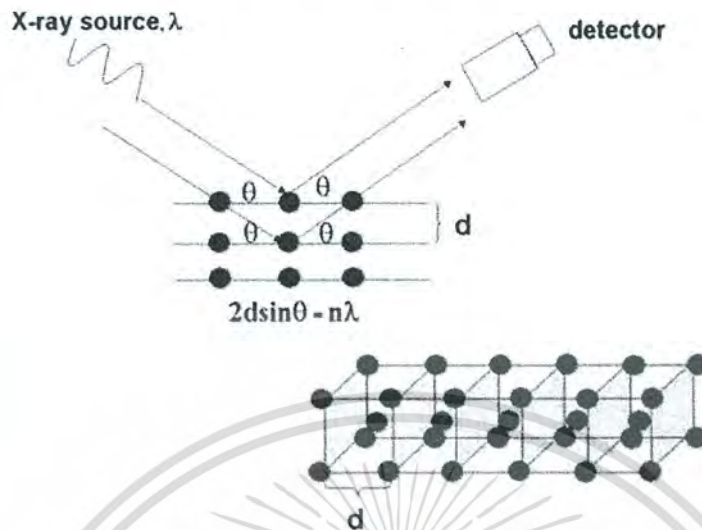
3.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction Analysis; XRD) [41]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ภายในเนื้อวัสดุ โดยอาศัยองค์ความรู้พื้นฐานของวิชาโครงสร้างผลึก (Crystallography) ซึ่งเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์นี้ เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์วัสดุแบบไม่ทำลาย (Non-destructive analysis) โดยสามารถใช้ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (Crystal structure) องค์ประกอบของสารประกอบ การจัดเรียงของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบ ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) โดยเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมและตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนต่าง ๆ

ในปี ค.ศ. 1915 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเราสามารถมองผลึกว่าประกอบด้วย ชั้น (Layer) หรือ ระนาบ (Plane) ของอะตอมซึ่งสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบจะเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกมาจากระนาบต่าง ๆ จะมีความเข้มสูง ถ้าหาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างระหว่างระยะเดินทาง (Path difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แบบจำลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

จากกฎของแบร็ก (Bragg's law) จะสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบได้ โดยปกติแล้วของแข็งที่เป็นผลึกจะมีโครงสร้างที่แน่นอน โดยผลึกจะประกอบด้วยอะตอม ไอออน หรือโมเลกุลที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบมีการซ้ำกันเกิดขึ้นในทิศทางระยะไกลในทุกทิศทาง มีมุมและระยะห่างระหว่างอะตอมที่แน่นอน โดยจะศึกษาในรูปแบบโครงข่าย (Lattice) ที่มีรูปร่างที่แน่นอน

โดยงานวิจัยนี้จะนำผลตัวอย่างที่ได้จากการเผาแคลไซน์ไปทำการศึกษาค่าพหุคูณการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer หรือ XRD) เพื่อหาเฟสของโครงสร้างผลึก (Crystal phase identification) ซึ่งจะอาศัยการบังคับคลื่นเอกซเรย์ที่มีความยาวคลื่นเดียวตกกระทบบตัวอย่างเพื่อศึกษาชั้น (Layer) หรือระนาบ (Plane) ของอะตอมในผลึกที่มุมต่างๆกัน นำผลการวิเคราะห์เทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS) เพื่อระบุวิวัฒนาการของสารตัวอย่างการกระเจิงของรังสีเอกซ์ โดยเป็นไปตามกฎของแบร็ก (Bragg's law) ซึ่งสามารถหาระยะห่างระหว่างระนาบได้ ดังสมการที่ 3.1

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$

- เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก hkl
 θ คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
 n คือ เลขจำนวนเต็มใดๆ ($n = 1, 2, 3, \dots$)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ได้จากเป่าทองแดงมีค่า 1.54056 \AA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ คือ

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
มุม 2θ เริ่มต้น - สิ้นสุด	20 - 80	องศา
Step size	0.02	องศา
Time step	1	วินาที

ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอกซ์ที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ และความเข้มของรังสีเอกซ์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นี้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เพื่อระบุวัฏภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง และสามารถคำนวณหาขนาดผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้จากสมการที่ 3.2

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.2)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของผลึก (Å)

k คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.89

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ได้จากเป้าทองแดงมีค่า 1.54056 Å

θ คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Degree)

β คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Radian)

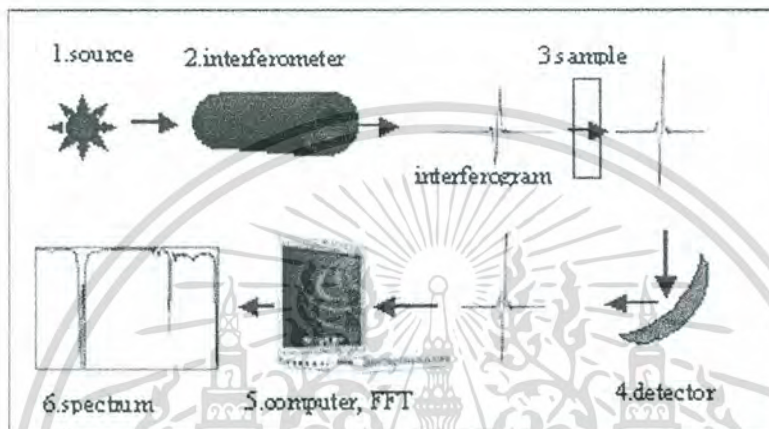
3.6 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) [42]

รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าคลื่นแสงวิสิเบิล รังสีอินฟราเรดนี้แบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ อินฟราเรดย่านใกล้ (Near IR) แลพบการดูดกลืนแสงของโมเลกุลในย่านนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโอเวอร์โทนซึ่งจะเริ่มตั้งแต่ 0.8-2.5 μm (12500-4000 cm^{-1}) อินฟราเรดย่านกลาง (Middle IR) อยู่ระหว่าง 2.5-50 μm ใช้ศึกษาคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ ในช่วงนี้จะแบ่งเป็นช่วงกลุ่มความถี่ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชันและช่วงลายนิ้วมือที่จะให้ข้อมูลที่เกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุล และอินฟราเรดย่านไกล (Far IR) อยู่ระหว่าง 50-100 μm (200-10 cm^{-1}) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการหมุนของโมเลกุลเนื่องจากพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการทรานสิชันมีระดับพลังงานค่อนข้างต่ำ

เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Infrared spectrophotometer) จะใช้หลักการกระจายแสงของสเปกตรัม การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงของอินฟราเรด แล้วทำการวัดค่าความเข้มแสงเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นหรือเลขคลื่น (Frequency-domain spectrum) ซึ่งก็จะได้ออกมาเป็นสเปกตรัม แต่สำหรับอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) จะใช้การวัดความเข้มของแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ กันอย่างต่อเนื่องเปรียบเทียบกับเวลา (Time-domain spectrum) จากนั้นจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกเปลี่ยนให้เป็นสเปกตรัมของความเข้มของแสงต่อความยาวคลื่นหรือเลขคลื่น โดยการ Fourier transform ด้วยคอมพิวเตอร์ จะได้ออกมาเป็น Fourier transform spectrum ด้วยวิธีการนี้จะช่วยให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็วเพิ่มขึ้น พร้อมทั้งมีความละเอียดมากขึ้นด้วย

โดยเริ่มจากการนำสารตัวอย่างมาบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่ปราศจากความชื้น จากนั้นใส่ลงในแม่พิมพ์ แล้วจึงนำเข้าเครื่องอัดเม็ด ภายใต้ความดัน 10^{-4} กิโลกรัมต่อตารางเมตร นาน 5 นาที แล้วจึงนำเม็ดโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ออกจากแม่พิมพ์ จะได้เม็ดโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่โปร่งแสง จากนั้นนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR)



ภาพที่ 3.3 ส่วนประกอบของเครื่อง FTIR spectrometer [43]

3.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) [44]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นระบบที่ภาพเกิดจากการสแกนด้วยลำอิเล็กตรอนกระทบชิ้นงานตัวอย่าง ทำให้เกิดอันตรกิริยากับอะตอมของโครงสร้างในชิ้นงานตัวอย่าง และเกิดการปลดปล่อยอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่าง ได้เป็นสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron signal) ซึ่งสามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

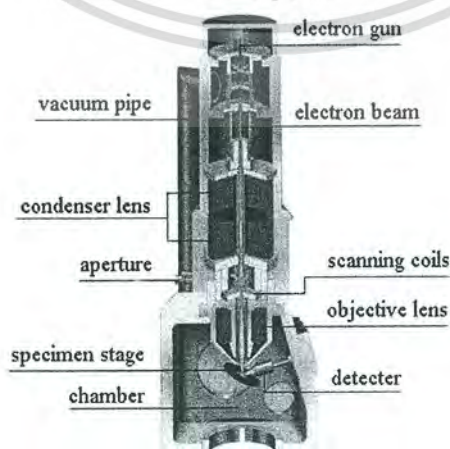
- (1) อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอม เนื่องจากได้ดูดกลืนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electrons) ดังนั้นทำให้ อิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าพลังงานต่ำ และเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมค่อนข้างต่ำ
- (2) อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattering electrons) เป็นอิเล็กตรอนที่มีการสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอะตอมแล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมา เกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง
- (3) อิเล็กตรอนทะลุผ่าน (Transmitted electrons) เป็นส่วนของอิเล็กตรอนที่เหลือจากการดูดกลืนพลังงานของชิ้นงานตัวอย่าง จึงสามารถทะลุผ่านออกมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (4) รังสีเอกซ์ (X-rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาหลังการทำอันตรกิริยาระหว่างอะตอมบนชิ้นงานตัวอย่างกับอิเล็กตรอนพลังงานสูง
- (5) อิเล็กตรอนที่ถูกดูดกลืนในชิ้นงานตัวอย่าง (Absorbed electrons) เป็นอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานตัวอย่างหมด

ในการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ส่วนใหญ่เลือกวัดสัญญาณอิเล็กตรอน 2 แบบ คือ สัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattering electrons) และสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) ซึ่งสัญญาณอิเล็กตรอนทั้งสองแตกต่างกันที่ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าพลังงานอิเล็กตรอนต่ำกว่าสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ และพบว่าสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมาจากพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างระดับนาโนเมตร ส่วนสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับมาจากพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่ระดับลึกกว่า ทำให้สัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับมีความสามารถในการแจกแจงต่ำกว่าสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ความคมชัดของภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับขึ้นกับเลขอะตอมของชิ้นงานตัวอย่าง คือ ถ้าชิ้นงานมีเลขอะตอมมาก ทำให้ภาพที่ได้มีความคมชัดมาก ส่วนความคมชัดของภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้นกับเลขอะตอม และลักษณะพื้นผิว (Topograph) ของชิ้นงานตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นภาพ จะปรากฏภาพให้เห็นบน CRT เหมือนสัญญาณภาพจากโทรทัศน์

โดยงานวิจัยนี้จะทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของเกรนหรือสิ่งแปลกปลอมที่ได้ นำมาอธิบายความสัมพันธ์ที่มีต่อเงื่อนไขต่างๆ เริ่มจากติดสารตัวอย่างลงบนคาร์บอนเทป แล้วจึงนำแผ่นคาร์บอนเทปที่มีสารตัวอย่างติดอยู่นั้นไปติดลงบนแผ่นอะลูมิเนียม (Stub) จากนั้นเคลือบผิวหน้าชิ้นงานที่เตรียมได้ด้วยทองคำบริสุทธิ์ โดยใช้เทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพที่ 3.4 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) [46-48]

ไดอิเล็กทริก เป็นสมบัติหนึ่งของฉนวนไฟฟ้า เมื่อนำมาคั่นระหว่างแผ่นตัวนำในตัวเก็บประจุ จะทำให้ตัวเก็บประจุสามารถเก็บสะสมพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำได้ โดยจะทำให้เกิดการเรียงตัวของโพลาริเซชันขึ้นภายในเนื้อสารไดอิเล็กทริก ทำให้เกิดโครงสร้างของตัวเก็บประจุขึ้น ค่าความเก็บประจุจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารที่คั่นระหว่างแผ่นตัวนำตามการทดลองของฟาราเดย์ ดังนั้น การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารต่างๆ รวมถึงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก สามารถทำได้โดยการวัดค่าตัวเก็บประจุของสารนั้นๆ ที่ค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ โดยใช้วงจร RLC

เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สารไดอิเล็กทริก วัสดุจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดพฤติกรรมที่เรียกว่าโพลาริเซชัน โดยทั่วไปโพลาริเซชันในวัสดุสามารถเกิดได้ 4 แบบ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความถี่ ดังแสดงในภาพที่ 3.5 คือ อิเล็กทรอนิกส์ (electronic) อะตอมมิก (atomic polarization) โอเรียนเทชัน หรือ ไดโพล (orientation or dipole) และอินเทอร์เฟซเชียล หรือสเปซชาร์จ โพลาริเซชัน (interfacial or space charge polarizations)

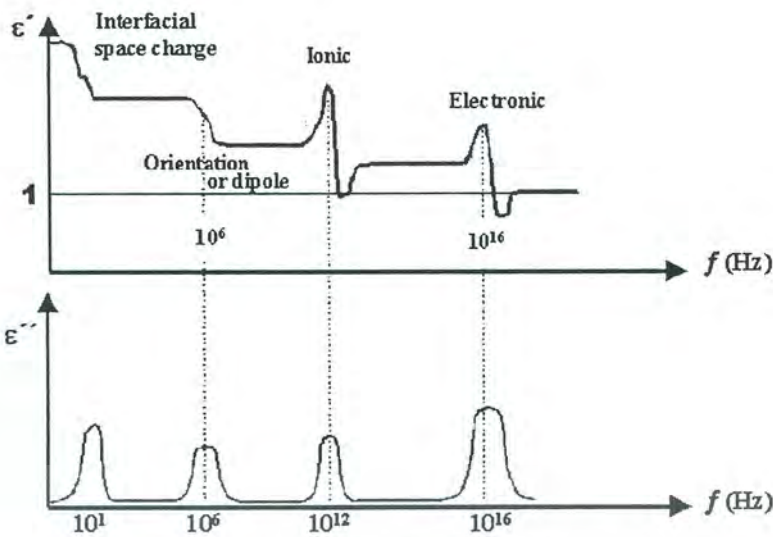
(1) อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชันเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของอิเล็กตรอนจากนิวเคลียส เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า

(2) อะตอมมิกโพลาริเซชัน เกิดจากพันธะ ระหว่างอะตอมถูกยืดออก หรือมีการเปลี่ยนแปลงการเรียงตัวของอะตอมมิกนิวเคลียสในโมเลกุลเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า

(3) โอเรียนเทชันหรือไดโพลโพลาริเซชันเกิดเนื่องจากโมเลกุลมีขั้วเกิดการหมุนสั้นหรือเคลื่อนที่เพื่อเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าที่ได้รับ

(4) อินเทอร์เฟซเชียลหรือสเปซชาร์จโพลาริเซชันเป็นกระบวนการที่เกิดจากการสะสมของไอออนที่พื้นผิวของวัสดุกับพื้นผิวของอิเล็กโทรด หรือระหว่างพื้นผิวของวัสดุที่มีความต่างของความสามารถในการนำไฟฟ้าซึ่งโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 กราฟแสดงโพลาริเซชันของวัสดุในช่วงความถี่ต่างๆ

3.8.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)

หลักการพื้นฐานของไดอิเล็กทริกเริ่มจากการให้สนามไฟฟ้ากับตัวเก็บประจุ หรือเรียกว่าคาปาซิเตอร์ (capacitor) ที่อยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่น สิ่งที่เกิดขึ้นคือ ประจุบวกถูกเก็บไว้ที่แผ่นอิเล็กโทรดแผ่นหนึ่ง ส่วนประจุลบถูกเก็บไว้ในแผ่นอิเล็กโทรดอีกแผ่นที่ขนานกัน (เห็นได้จากภาพที่ 2) ความจุไฟฟ้า (capacitance) ที่ปราศจากวัสดุที่เป็นตัวเก็บประจุและอยู่ในระบบสุญญากาศ (C_0) มีความสัมพันธ์กับปริมาณประจุที่เก็บในแผ่นอิเล็กโทรดคู่ขนานทั้ง 2 แผ่น (Q_0) และความต่างศักย์ของแผ่นคู่ขนาน (V_0) ดังสมการที่ 3.3

$$C_0 = \frac{Q_0}{V_0} \quad (3.3)$$

เมื่อใส่แผ่นวัสดุที่เป็นตัวเก็บประจุเข้าไประหว่างแผ่นอิเล็กโทรดคู่ขนานดังกล่าว ความจุไฟฟ้าบนแผ่นอิเล็กโทรดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความสามารถของวัสดุเก็บประจุในการปรับสนามไฟฟ้าให้เป็นกลางซึ่งจะทำให้แผ่นคู่ขนานสามารถเก็บประจุได้เพิ่มขึ้น ประจุบนแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองจึงเพิ่มจาก Q_0 เป็น Q และค่าความจุไฟฟ้าจาก C_0 เพิ่มขึ้นเป็น C การเพิ่มของประจุ Q เกี่ยวข้องกับการเกิดโพลาริเซชัน (polarization, P) ที่เหนี่ยวนำในวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า (ดังภาพที่ 3.6) ส่งผลให้อัตราส่วนของ C ต่อ C_0 มีความสัมพันธ์กับ Q และ P เป็นดังสมการที่ 3.4

$$\epsilon = \frac{C}{C_0} = \frac{Q+P}{Q} \quad (3.4)$$

อัตราส่วนของ C ต่อ C_0 เรียกว่า เรเลทีฟ เพอร์มิททิวิตี (relative permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เนื่องจากความจุไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกับพื้นที่ A และระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทริกหรือความหนาของวัสดุเก็บประจุ ดังนั้นจึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พื้นที่ และระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนานอิเล็กทริก ดังแสดงในสมการที่ (3.5) กรณีที่จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุเท่ากัน ความสามารถในการเก็บพลังงานในรูปแบบ สนามไฟฟ้า (ประจุ) จะขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่คั่นระหว่างแผ่นตัวนำ

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

เมื่อ ϵ_0 เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในสภาวะสุญญากาศ (vacuum permittivity) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร

ϵ_r เป็นสภาพ ยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) หรือที่นิยมเรียกกันว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของสารไดอิเล็กทริก

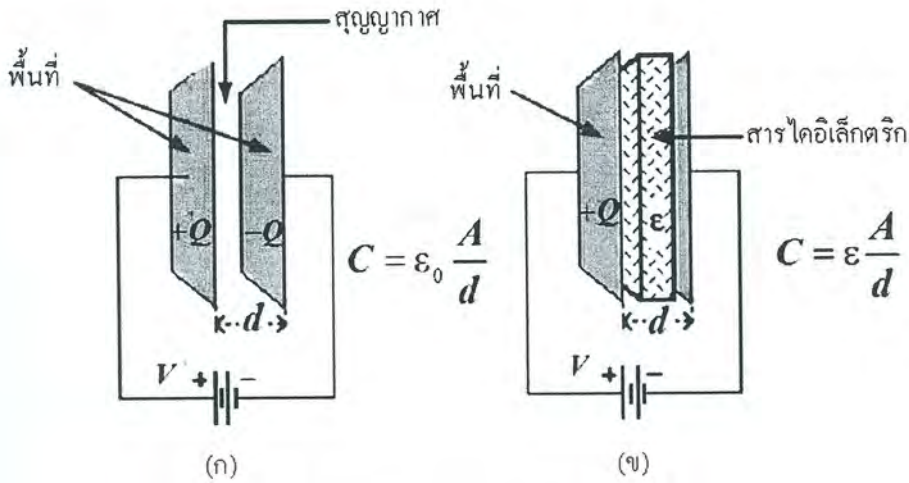
จากทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าหรือค่าการแทนที่ ไดอิเล็กทริก (dielectric displacement) K มีค่าเท่ากับปริมาณประจุที่เก็บอยู่ในแผ่นอิเล็กทริก และผลของการเกิดโพลาริเซชัน P ต่อสนามไฟฟ้าที่ได้รับ E สำหรับวัสดุใดๆ ที่วางอยู่ระหว่างแผ่นคู่ขนานอิเล็กทริก เรียกว่า ไดอิเล็กทริก ซัสเซพทิบิลิตี (dielectric susceptibility) χ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\epsilon - 1$ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง P , K , χ , E , ϵ จึงแสดงได้ดังสมการที่ 3.6

$$P = \chi \epsilon_0 E = K - \epsilon_0 E \quad (3.6)$$

เมื่อพิจารณาในระดับโมเลกุลสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อวัสดุได้รับสนามไฟฟ้า ประจุที่อยู่ศูนย์กลางในโมเลกุลมีการขยับเคลื่อนที่ซึ่งจะทำให้ค่าไดโพลโมเมนต์ของโมเลกุลเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น กรณีของการเกิดอิเล็กทริกโพลาริเซชัน ถ้าศูนย์กลางของประจุ ไฟฟ้าขยับเคลื่อน ด้วยปริมาณ δ และมีประจุทั้งหมดเป็นจำนวน e โมเลกุลจะมีค่าไดโพลโมเมนต์ μ เท่ากับ $e\delta$ ค่าไดโพลโมเมนต์ถือเป็นปริมาณเวกเตอร์ชนิดหนึ่ง เมื่อมีการให้ สนามไฟฟ้าในปริมาณน้อย ค่าไดโพลโมเมนต์ของโมเลกุลเดี่ยวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสนามไฟฟ้าตั้งต้น ดังนั้นความสัมพันธ์ ระหว่างค่าโพลาริเซชัน ไดโพลโมเมนต์ และจำนวนไดโพล ต่อหน่วยปริมาตร Nm สามารถเขียนได้ดังแสดงในสมการที่ 3.7

$$P = Nm\mu \quad (3.7)$$

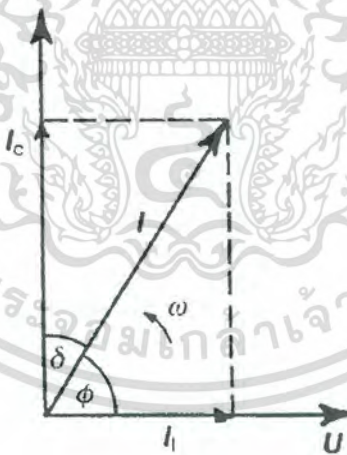
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.6 (ก) ตัวเก็บประจุแผ่นโลหะขนานอย่างง่ายที่ตัวกลางระหว่างแผ่นเป็นสูญญากาศ (ข) ตัวเก็บประจุแบบเดียวกันแต่มีวัสดุไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างแผ่นโลหะ

3.8.2 การสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (Dielectric loss tangent)

เมื่อสารไดอิเล็กตริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสที่ไหลผ่านสารไดอิเล็กตริกจะมีเฟสหน้าค่าความต่างศักย์เป็นมุม 90 องศา แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเนื่องจากการที่ไดอิเล็กตริกมีความต้านทานไม่ถึงอนันต์ ทำให้เกิดเฟสของกระแสไฟฟ้านำหน้าค่าความต่างศักย์น้อยกว่า 90 องศา ดังภาพที่ 2.36



ภาพที่ 3.7 ลักษณะเฟสที่เกิดขึ้นในสารไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ [38]

ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการสูญเสียพลังงาน โดยการสูญเสียพลังงานเฉลี่ยสามารถหาได้โดยพิจารณากระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสีย

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T UI dt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{T} \int_0^T U_0 \sin(\omega t) I_0 \cos(\omega t - \delta) dt \quad (3.8)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (3.8) จะได้

$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_0 U_0 \sin \delta$$

เนื่องจาก $I_0 = I_c / \cos \delta$ และ $I_c = \omega U_0 C$ ดังนั้น พลังงานที่สูญเสียเฉลี่ย คือ

$$\bar{P} = \frac{1}{2} U_0^2 \omega C \tan \delta \quad (3.9)$$

เมื่อ $U_0 / \sqrt{2}$ และ $I_0 / \sqrt{2}$ คือ ความต่างศักย์รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (rms voltage) และ กระแสรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (rms current) ตามลำดับ โดยที่ $\tan \delta$ เรียกว่า การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss tangent)

งานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก โดยทำการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ของเซรามิกที่เตรียมได้เทียบกับการเปลี่ยนแปลงความถี่และสัดส่วนองค์ประกอบ แล้วนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้จากสมการที่ 3.10

$$\epsilon_r = \frac{C_p d}{\epsilon_0 A} \quad (3.10)$$

เมื่อ ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของสารตัวอย่าง

C_p คือ ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของสารตัวอย่าง

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง (cm)

A คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่าง (cm²)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ มีค่า 8.85×10^{-12} ฟารัด/เมตร

ค่าความสามารถเก็บประจุของสารสามารถวัดได้ที่ความถี่ต่างๆ แต่โดยทั่วไปจะวัดที่ความถี่ 1 kHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าไม่คงที่ ขึ้นกับอุณหภูมิ (T) ของเนื้อสาร ตามสมการของ Curie-Weiss Law คือ

$$\epsilon_r - 1 = \frac{C}{T - T_c} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ T คือ อุณหภูมิของสาร ($^{\circ}\text{C}$)
 T_c คือ อุณหภูมิคูรี (curie temperature) หรือ อุณหภูมิที่สารเฟอร์ไรต์หรือเฟอร์ริกออกไซด์เปลี่ยนจากเฟอร์โรแมกเนติกไปเป็นพาราแมกเนติก
 มีข้อผิดพลาดหรือค่าโพราไรเซชันมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของสาร
 C คือ ค่าคงที่คูรี (curie constant) มีค่าอยู่ระหว่าง 10^3 - 10^5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

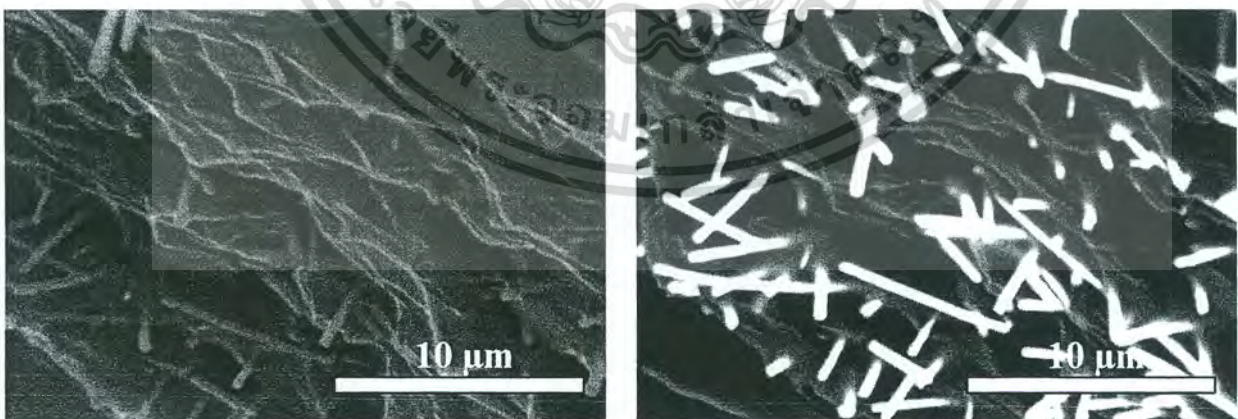
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิตของเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PZ-PVDF) และทำการปรับปรุงสมบัติ ด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (PZ-PVDF-CNT)

4.1.1 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตของเส้นใยเซรามิกเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PZ-PVDF)

สัณฐานวิทยาของวัสดุนาโนคอมโพสิต PZ-PVDF ที่ได้จากการฝัง PZ ในพอลิเมอร์ PVDF แสดงดังภาพที่ 1.1 จากภาพที่ 1.1(ก) แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์เมทริกเฟสจะเข้าไปแทรกซึมอยู่ในโครงข่ายของเส้นใยและเกิดเป็นของผสมสองเฟส ภาพที่ 1.1(ข) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ได้จากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน (backscattering electrons) ของคอมโพสิต ซึ่งแสดงเฟสของ PZ เป็นบริเวณสีขาวสว่าง ส่วนเฟสของ PVDF แสดงบริเวณเป็นสีเทาทึบ จากรูปแสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตที่ได้เชื่อมโยงกันแบบ 3-3 โดยใช้กฎการเชื่อมโยงคอมโพสิตของนิวแฮม (Newnham's convention) ที่ซึ่ง PZ และพอลิเมอร์เมทริกเฟส เชื่อมต่อกันแบบสามมิติในระดับไมโครเมตร โดยลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและพอลิเมอร์เมทริกถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญ เมื่อพิจารณาจากกฎของการผสมพบว่าสมบัติที่ได้สามารถควบคุมได้ด้วยการลักษณะการเชื่อมต่อของแต่ละเฟส

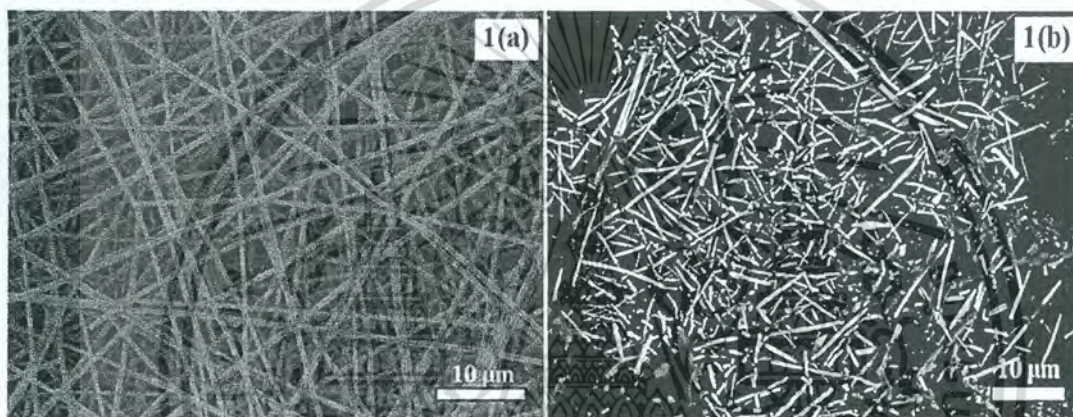


ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคภาพตัดขวางของคอมโพสิต PZ-PVDF ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (ก) แบบปกติ และ (ข) ที่ได้จากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตของเส้นใยนาโนลวดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (PZ-CNT-PVDF)

หลังจากนำเส้นใยนาโนลวดเซอร์โคเนตที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงไปเตรียมเป็นคอมโพสิตกับพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์และแท่งนาโนคาร์บอน จากนั้นจึงนำคอมโพสิตที่ได้ไปทำการ ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาค ของเส้นใยลวดเซอร์โคเนต และคอมโพสิตที่เตรียมได้ จากภาพที่ 4.2(ก) แสดงลักษณะเส้นใยลวดเซอร์โคเนต ที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงพบว่า เส้นใยที่ได้เป็นเส้นใยที่มีความต่อเนื่อง ภาพที่ 4.2(ข) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่ได้จากการกระเจิงกลับ ของอิเล็กตรอนของคอมโพสิตโดยเกิดเป็น ของผสมสามเฟสโดยเฟสของ PZ และ CNT จะแสดงสีขาว ส่วนเฟสของ PVDF แสดงสีเทา จากรูปแสดงให้เห็นว่า คอมโพสิต ที่ได้เชื่อมโยงกันแบบ 3-3



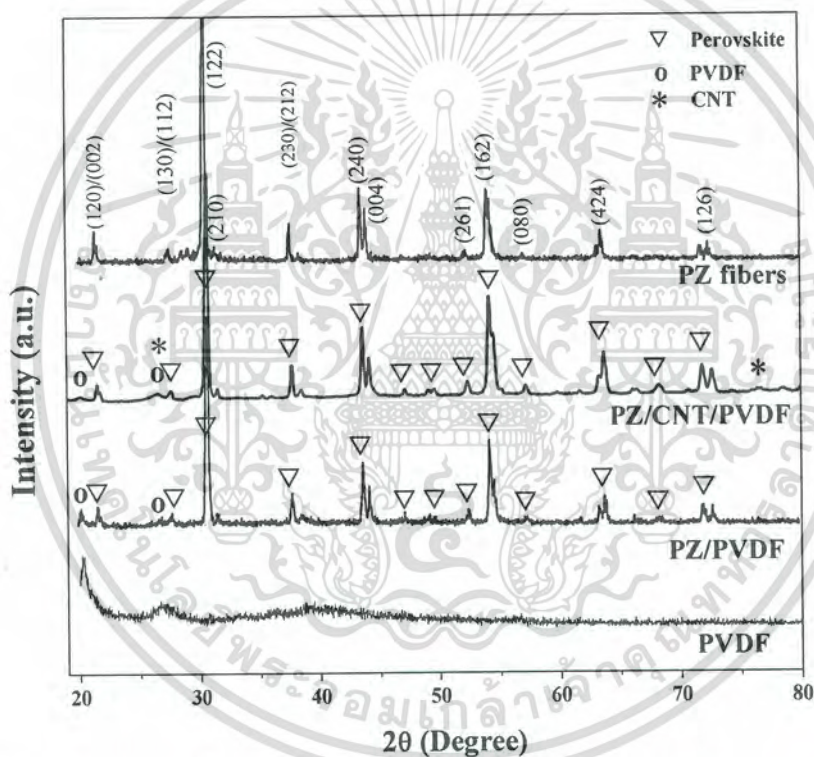
ภาพที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของ (ก) เส้นใยลวดเซอร์โคเนต และ (ข) คอมโพสิต PZ-CNT-PVDF ที่ได้จากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน

4.1.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้าง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

จากการศึกษาโครงสร้างเฟสของนาโนคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-CNT-PVDF ด้วยเทคนิค การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังภาพที่ 4.3 พบว่าคอมโพสิตสองเฟสและสามเฟส ที่ได้เกิดเป็นเฟสบริสุทธิ์ของ เพอโรฟสไกต์ โดยพบพีคการเลี้ยวเบนที่มุม 2θ เป็น 44.30° 51.55° 76.05° 92.55° และ 98.15° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (111) (200) (220) (311) และ (222) ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการเกิดเฟสบริสุทธิ์ของ เลดเซอร์โคเนต เมื่อพิจารณาจากไฟล์ข้อมูล มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 75-1607 พบว่าพีคการเลี้ยวเบน แสดงโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ แบบออร์โธโรมบิก นอกจากนี้ยังพบพีคของ PVDF ในรูปแบบ XRD ของคอมโพสิตอีกด้วย เนื่องจาก PVDF เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymer) ที่มีเปอร์เซ็นต์ ความเป็นผลึก 50% โดยพบสเปกตรัมของพอลิเมอร์ PVDF ที่มุม $2\theta = 18^\circ$ และ $2\theta = 26^\circ$ ซึ่งสอดคล้องกับการเลี้ยวเบนในระนาบ (020) และ (021) ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงลักษณะเฉพาะของเฟสอัลฟา (α -

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

phase) โดยเฟสอัลฟาถือว่าเป็นเฟสที่แสดงความเป็นผลึกที่เด่นชัดที่สุด ขณะที่พีคที่มุม $2\theta = 20^\circ$ บ่งบอกถึง การรวมการเลี้ยวเบนในระนาบ (110) และ (200) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเฟสเบต้า (β -phase) โดยเฟสเบต้าจะเป็นตัวแสดงความเป็นเพียโซอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริก และ เฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งเป็นรูปแบบที่ทำให้ PVDF แสดงศักยภาพในการนำไปใช้งานในอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่าง PZ-PVDF ที่เตรียมได้เป็นคอมโพสิต ที่ประกอบด้วย 2 เฟส ได้แก่ เฟสของ เซรามิก เลด เซอร์ โคนีต และ เฟสของ พอลิเมอร์ PVDF โดยจากรูปแบบสเปกตรัมของคอมโพสิต PZ-CNT-PVDF ยังแสดงพีค (002) ที่มุม 26° และ 77° ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกของกราฟิต ดังนั้นจากข้อมูลเหล่านี้ จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่าง ที่เตรียมได้เป็นคอมโพสิตที่ประกอบด้วย 3 เฟส ได้แก่ เฟสของเซรามิกเลดเซอร์โคนีต เฟสของพอลิเมอร์ PVDF และเฟสของแท่งนาโนคาร์บอน



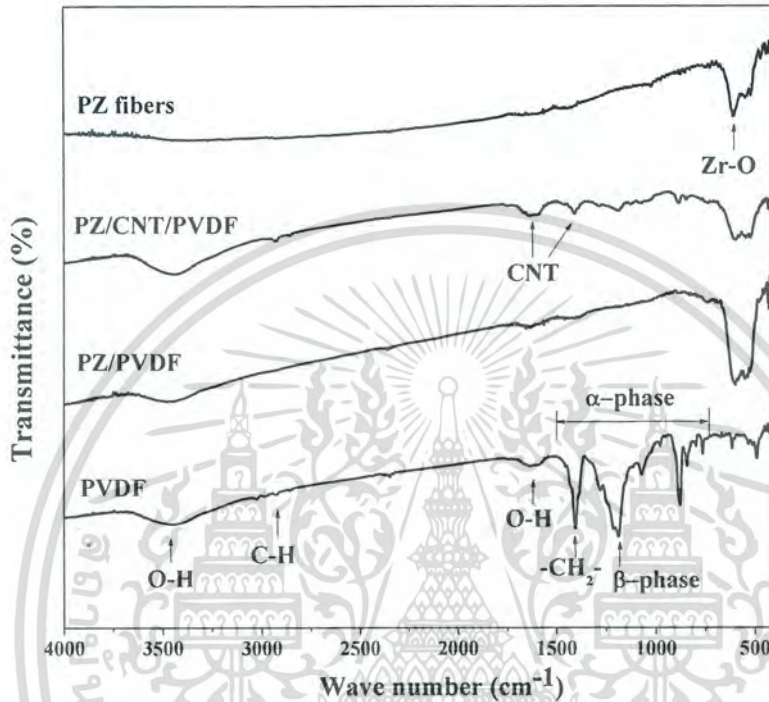
ภาพที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-CNT-PVDF

4.1.4 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-CNT-PVDF ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่น $400-4000\text{ cm}^{-1}$ จากภาพที่ 4.4 จะพบพีคการดูดกลืนที่ 548 cm^{-1} โดยสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (stretching vibration) ของพันธะ Zr-O ซึ่งแสดงถึงการเกิดเป็น ผลึกเส้นใยของ PZ โดยพีคที่ประมาณ $3,400\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H ของความชื้น ที่อยู่ในคอมโพสิต พีคที่ประมาณ $1,450\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับพันธะ C-H ของพอลิเมอร์ PVDF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล้องกับการสั่นของหมู่อะลิฟาติก CH_2 ของพอลิเมอร์ PVDF โดยพบการสั่นแบบสมมาตร และไม่สมมาตรของหมู่ CH ของ PVDF ที่ 2900cm^{-1} และพบแถบการดูดกลืนที่ 760, 800, 860, 980 และ 1400cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกถึงเฟสของผลึกอัลฟา (α crystal phase) ขณะที่พีคที่ประมาณ 1220cm^{-1} บ่งบอกถึงเฟสเบต้าของหมู่ไวนิลลิตินของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังพบพีคที่ประมาณ 1400 และ 1700cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการสั่นของ CNT ในคอมโพสิตของ PZ-CNT-PVDF อีกด้วย

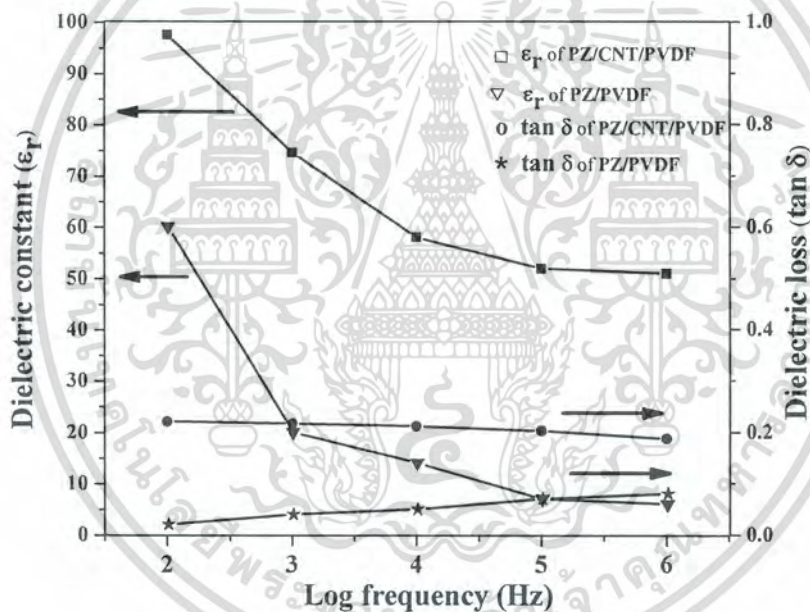


ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมการส่องผ่านรังสีอินฟราเรดของคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-CNT-PVDF

4.1.5 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก

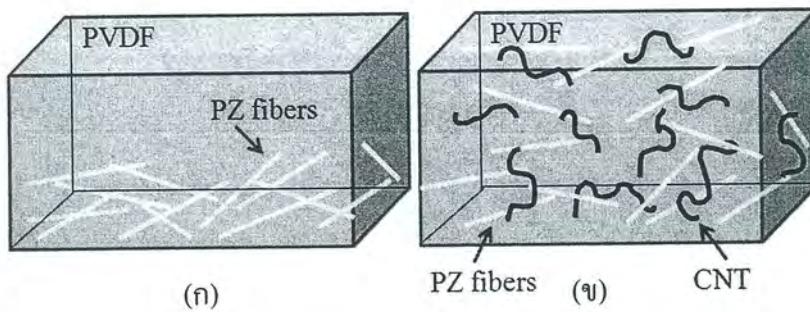
จากการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต ด้วยเครื่อง LCR ผลแสดงดังภาพที่ 4.5 จากรูปแสดงกราฟความถี่ที่ขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของนาโนคอมโพสิต PZ-PVDF เปรียบเทียบกับนาโนคอมโพสิต PZ-CNT-PVDF พบว่านาโนคอมโพสิตของ PZ-PVDF มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 60-8 ในช่วงความถี่ที่ทำการวัดจาก 100 Hz to 2 MHz ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต PZ-CNT-PVDF มีค่าอยู่ในช่วง 97-49 ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต PZ/PVDF ดังภาพที่ 4.5 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใย PZ สามารถกระจายตัวได้ดีโดยการเกิดเป็นของผสมเชิงซ้อนกับโครงข่ายของ CNT โดยพิจารณาจากทฤษฎีการเชื่อมต่อกันของอนุภาค (percolation theory) ซึ่งเป็นลักษณะของการเชื่อมต่อกันแบบสุ่มเป็นสายโซ่ยาว โดยสามารถจำลองปรากฏการณ์นี้ได้ดังภาพที่ 4.6 จากรูปแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มี CNT (ภาพที่ 4.6(ข)) จะเกิดการผสมและเกี่ยวพันกับเส้นใย PZ ในพอลิเมอร์เมทริก ส่งผลให้เส้นใย PZ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการกระจายตัวได้ดีและสม่ำเสมออยู่ในคอมโพสิตได้ดีกว่าระบบที่ไม่มี CNT (ภาพที่ 4.6(ก)) นอกจากนี้โครงข่ายของ CNT ยังทำให้เกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าซึ่งสามารถลดความต้านทานภายในของวัสดุนาโนคอมโพสิต ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าของคอมโพสิตมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนโดยปริมาตร และโครงสร้างการเรียงติดกันของเฟสกระจายตัวของสารตัวเติม จึงส่งผลให้ตัวอย่างที่มีการเติม CNT มีค่าไดอิเล็กทริกที่สูงกว่า อีกทั้งยังมีการศึกษาวิจัยของ Dang และคณะ พบว่าคอมโพสิตที่มี CNT เป็นสารตัวเติมจะใช้สัดส่วนของ CNT เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคที่น้อยกว่าคอมโพสิตที่เติมสารตัวเติมทั่วไปอย่างเช่น อนุภาคโลหะหรือคาร์บอนแบล็ค (carbon black) เนื่องจากสารตัวเติมที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างสูงจะง่ายต่อการเกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคที่สัดส่วนโดยปริมาตรที่ต่ำ ดังนั้นจึงสามารถใช้ CNT เป็นวัสดุกระจายตัวและตัวนำไฟฟ้าในวัสดุนาโนคอมโพสิตได้ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต PZ-CNT-PVDF ยังมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.02 และมีค่าสูงสุดน้อยกว่า 0.6 ดังภาพที่ 4.5 ซึ่งถือได้ว่าเป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้งาน



ภาพที่ 4.5 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต PZ-PVDF เทียบกับ PZ-CNT-PVDF

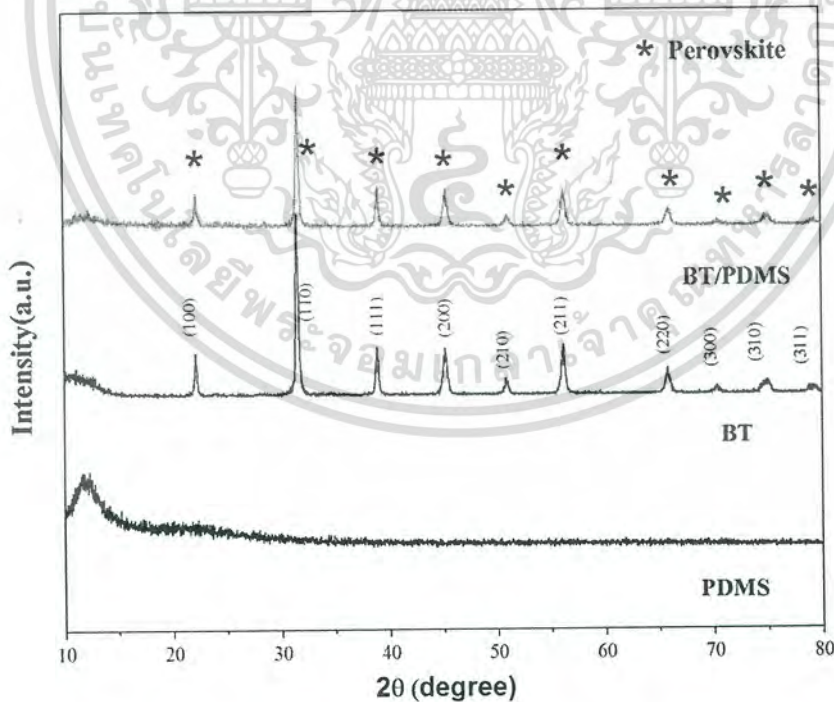
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 แบบจำลองปรากฏการณ์การเชื่อมต่อกันของอนุภาคของคอมโพสิต (ก) PZ-PVDF เทียบกับ (ข) PZ-CNT-PVDF

4.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตแบเรียมไททานेटกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (BT-PDMS) และการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโน คาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

4.2.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างของคอมโพสิตแบเรียมไททานेटกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (BT-PDMS) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



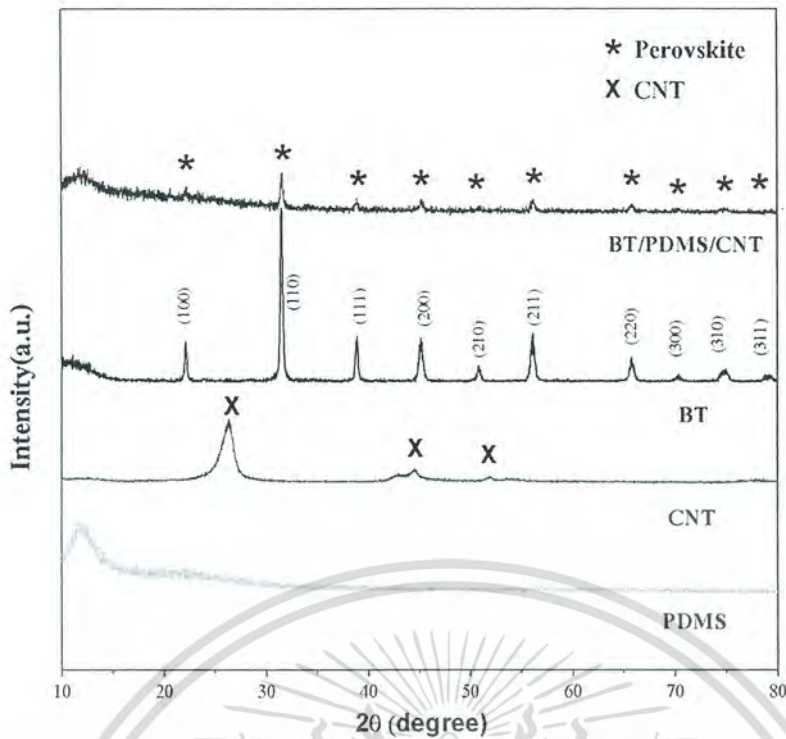
ภาพที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต BT-PDMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำวัสดุผสมแบบเรียบไททานิคกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน มาทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.7 โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุผสม มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BaTiO_3 ตามไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 05-0626 โดยพบพีค 2 θ ขึ้นที่มุม 22.261 31.645 38.886 45.375 51.097 56.249 66.118 70.657 75.158 และ 79.466° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (100) (110) (111) (200) (210) (211) (220) (300) (310) และ (311) มีโครงสร้างเป็นแบบเพอรอฟสไกต์แบบเตตระโกนอล โดยไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นออสัญฐานจึงไม่สามารถสะท้อนระนาบผลึกได้ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสารตัวอย่างที่ได้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม และไม่มีเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้น

4.2.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างของคอมโพสิตแบบเรียบไททานิคกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

จากการนำวัสดุผสมแบบเรียบไททานิคกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอนมาทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.8 เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต BT-PDMS-CNT โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตมีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BaTiO_3 ตามไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 05-0626 โดยมีพีค 2 θ ขึ้นที่มุม 22.261, 31.645, 38.886, 45.375, 51.097, 56.249, 66.118, 70.657, 75.158 และ 79.466° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (100), (110), (111), (200), (210), (211), (220), (300), (310) และ (311) ซึ่งมีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์แบบเตตระโกนอล โดยไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PDMS เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นออสัญฐานจึงไม่สามารถสะท้อนระนาบผลึกได้ และนอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของแท่งนาโนคาร์บอน มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ C ตามไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 75-1621 จะพบพีคที่มุม 2 θ ขึ้นที่มุม 26.228, 44.365 และ 50.381° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (002), (101) และ (102) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสารตัวอย่างที่ได้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม และไม่มีเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้น

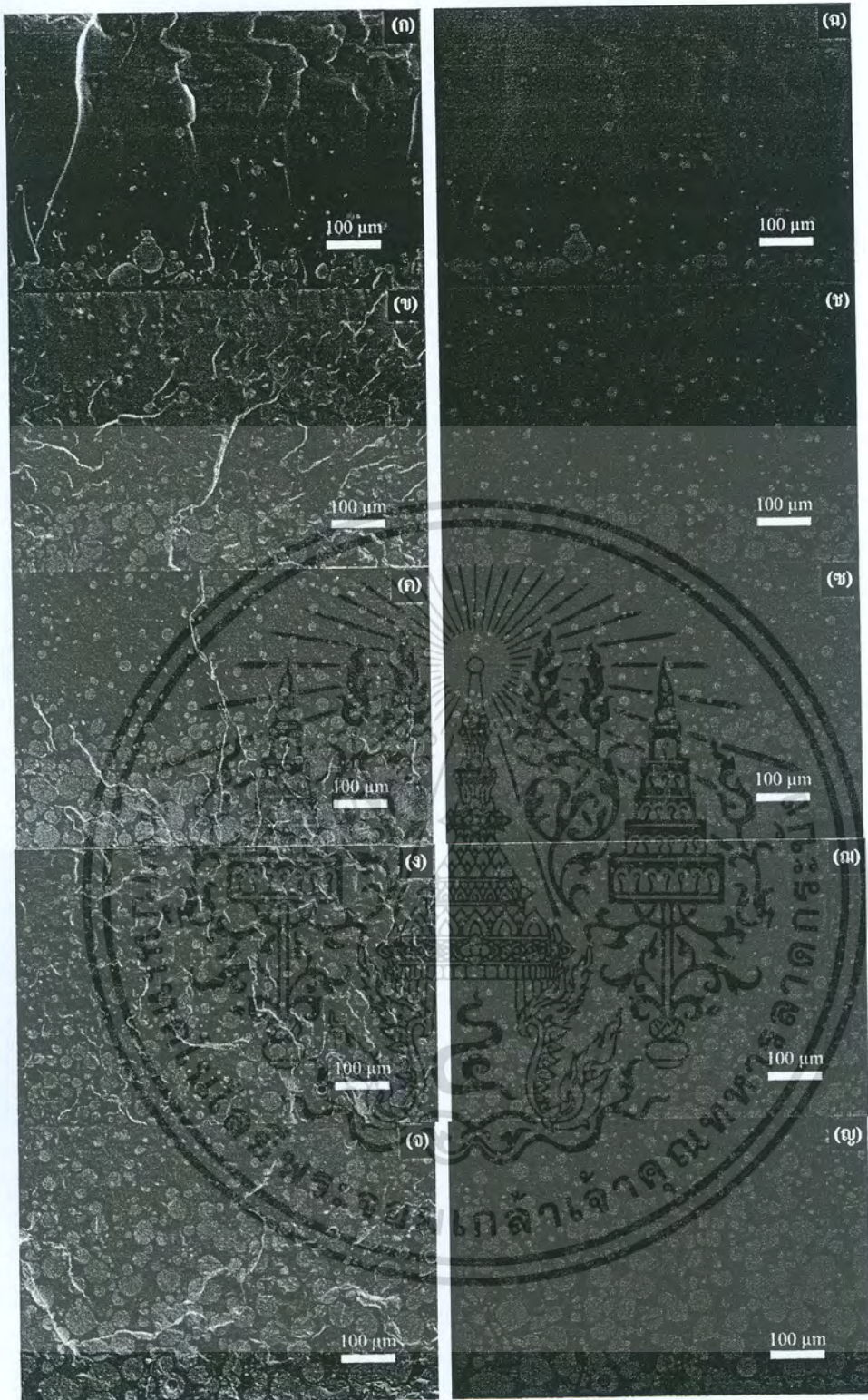


ภาพที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต BT/PDMS/CNT

4.2.3 ผลการตรวจสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (BT-PDMS)

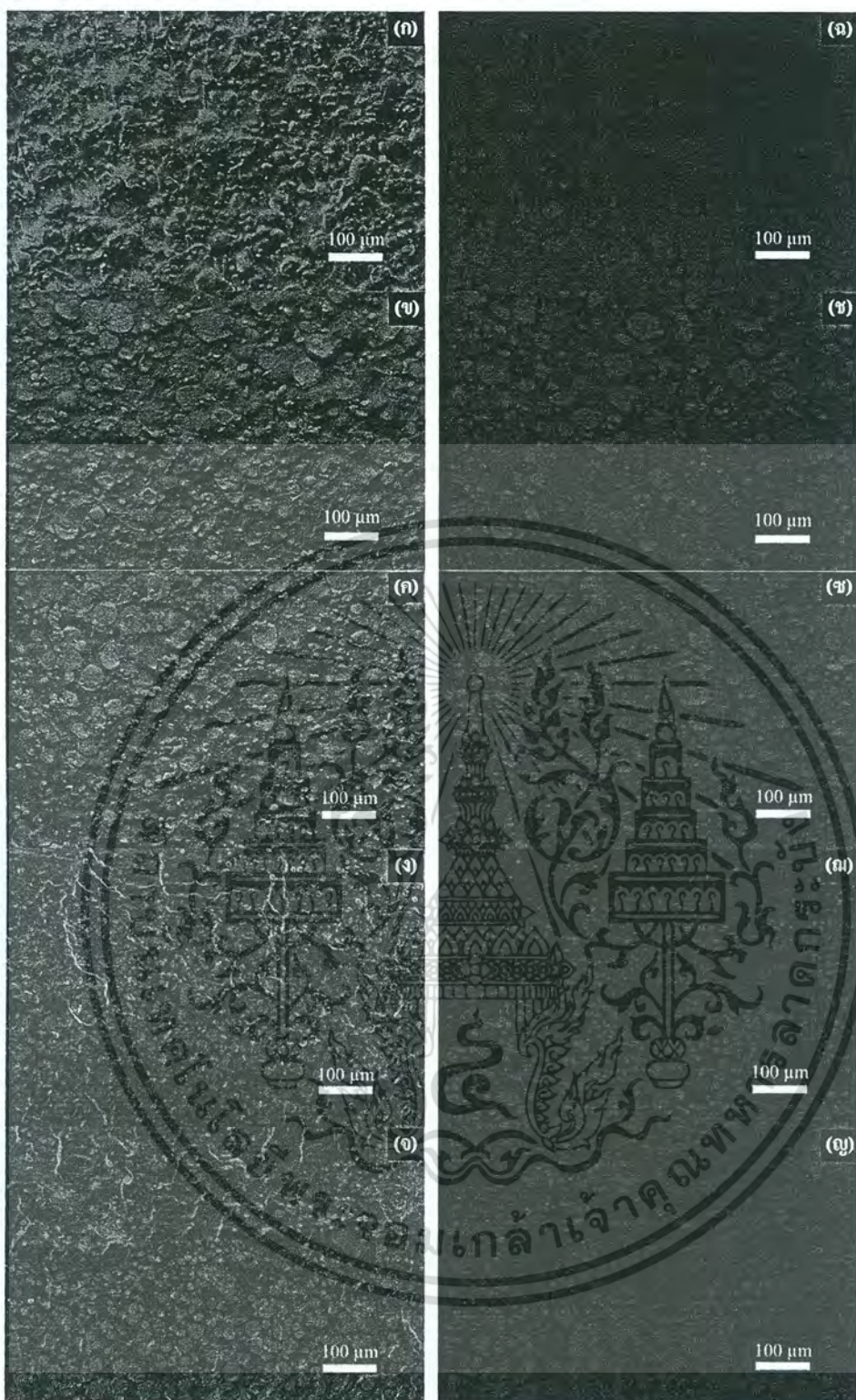
เมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสมของแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เตรียมได้จากการนำไปหักในไนโตรเจนเหลว มาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณรอยหักของวัสดุผสม ที่มีการปรับปริมาณแบเรียมไททาเนต 10% 20% 30% 40% 50% ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.9 (ก)-(ญ) ซึ่งภาพ (ก)-(จ) เป็นภาพที่ได้จาก Secondary electron (SE) และ (ฉ)-(ญ) เป็นภาพที่ได้จาก Backscattered electron (BSE) ซึ่งจากภาพ BSE จะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าของผสมประกอบด้วย 2 เฟส โดยส่วนมืดแสดงเฟสของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน ส่วนสว่างแสดงเฟสของแบเรียมไททาเนต ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของแบเรียมไททาเนตมากขึ้นจะเกิดการตกตะกอน และอนุภาคของแบเรียมไททาเนต มีการเกาะตัวกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งอนุภาคของแบเรียมไททาเนตที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดอนุภาคเพียง 50 นาโนเมตรเท่านั้น แต่จากภาพจะเห็นได้ว่าส่วนสว่างมีขนาดถึงระดับไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยหักของคอมโพสิต BT-PDMS เมื่อมีการปรับปริมาตร BT ที่ (ก), (ฉ) 10% (ข),(ช) 20% (ค),(ซ) 30% (ง),(ฅ) 40% (จ),(ญ) 50% ในรูปแบบ SE (ก),(ข),(ค),(ง),(จ) และรูปแบบ BSE (ฉ),(ช),(ซ),(ฅ),(ญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เป็นภาพแบบ SE (ก),(ข),(ค),(ง),(จ) และ ภาพแบบ BSE (ฉ),(ช),(ซ),(ณ),(ญ) ของรอยทึบของคอมโพสิต BT-PDMS-CNT เมื่อมีการปรับปริมาตร CNT ที่ (ก),(ฉ) 1% (ข),(ช) 2% (ค),(ซ) 3% (ง),(ณ) 4% (จ),(ญ) 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิโดเมทิลซิลลอกเซนที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

เมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสม แบเรียมไททาเนตกับพอลิโดเมทิลซิลลอกเซนและมีการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอนที่เตรียมได้จากการนำไปหักในไนโตรเจนเหลวมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณรอยหักของวัสดุผสม ซึ่งมีการปรับปริมาณแท่งนาโนคาร์บอน 1% 2% 3% 4% 5% ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.10 (ก)-(ญ) ซึ่งภาพ (ก)-(จ) เป็นภาพแบบ Secondary electron (SE) และ (ฉ)-(ญ) เป็นภาพแบบ Backscattered electron (BSE) โดยการเติมแท่งนาโนคาร์บอนเข้าไปนั้นเพื่อต้องการให้แบเรียมไททาเนตเกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น และไม่เกิดการตกตะกอน ซึ่งผลที่ได้จากการส่องภาพ SEM จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณแท่งนาโนคาร์บอนมากขึ้น จะทำให้แบเรียมไททาเนตเกิดการกระจายตัวมากยิ่งขึ้น และการตกตะกอนน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบภาพ (ก),(ฉ) ที่มีการเติมแท่งนาโนคาร์บอน 1% และภาพ (จ),(ญ) ที่มีการเติมแท่งนาโนคาร์บอนที่ 5 % จะเห็นได้ชัดเจนว่าอนุภาคแบเรียมไททาเนตมีขนาดลดลง โดยที่แท่งนาโนคาร์บอน 1% อนุภาคแบเรียมไททาเนตจะมีขนาด 30-60 ไมโครเมตร แต่เมื่อมีการเติมแท่งนาโนคาร์บอน 5% ขนาดอนุภาคของแบเรียมไททาเนตจะมีขนาดประมาณ 10-20 ไมโครเมตร

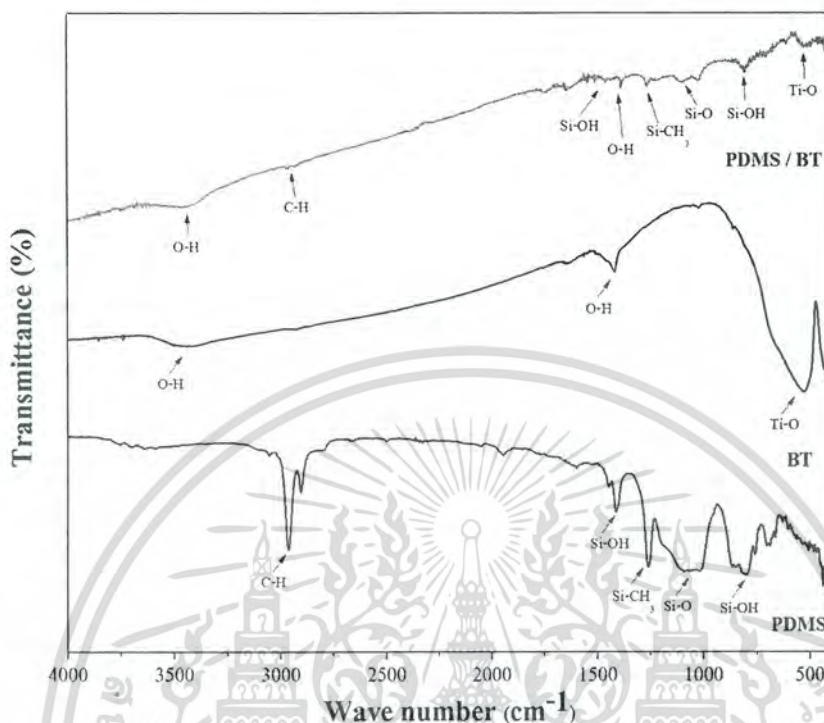
4.2.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิโดเมทิลซิลลอกเซน (BT-PDMS) โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR)

หลังจากการทำการเตรียมคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิโดเมทิลซิลลอกเซนแล้ว จากนั้นนำมาตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เพื่อเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบเอกลักษณ์จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเริ่มจากนำวัสดุผสมมาอัดเป็นเม็ดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium bromide, KBr) เนื่องจากโพแทสเซียมโบรไมด์ จัดเป็นสารเฉื่อยที่ยอมให้คลื่นรังสีอินฟราเรดผ่านได้และมีช่วงคลื่นอินฟราเรดที่กว้างกว่าสารอื่นๆ ที่มีสมบัติเช่นเดียวกัน

จากภาพที่ 4.11 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิโดเมทิลซิลลอกเซน พบว่าสเปกตรัมแสดงพีคที่เลขคลื่นประมาณ 3400 cm^{-1} 1630 cm^{-1} และ 1384 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับพีคการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) อันเนื่องมาจากความชื้นและสารออกแกนิคส์ที่อยู่ในสารละลายพอลิเมอร์ และพบพีคการสั่นของ Ti-O (stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ 539 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารแบเรียมไททาเนต นอกจากนี้ยังพบพีคการสั่นของพันธะภายในพอลิเมอร์ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ $1000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ โดยพบพีคการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 2963 cm^{-1} ของหมู่ CH_3 (stretching) และพีคการสั่นของ Si-OH (bending) ที่เลขคลื่นประมาณ 1412 cm^{-1} อีกทั้งยังพบพีคการสั่นของ Si- CH_3 (stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ 1251 cm^{-1} และพีคการสั่นของ Si-O (stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ 1091 cm^{-1} โดยแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในพอลิโดเมทิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลอกเซน แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมดังกล่าวประกอบด้วย 2 เฟส คือ เฟสของเซรามิกแบเรียมไททานเตตและเฟสของพอลิเมอร์พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ผสมกันอยู่โดยไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้น ภายหลังจากเตรียมเป็นวัสดุผสม



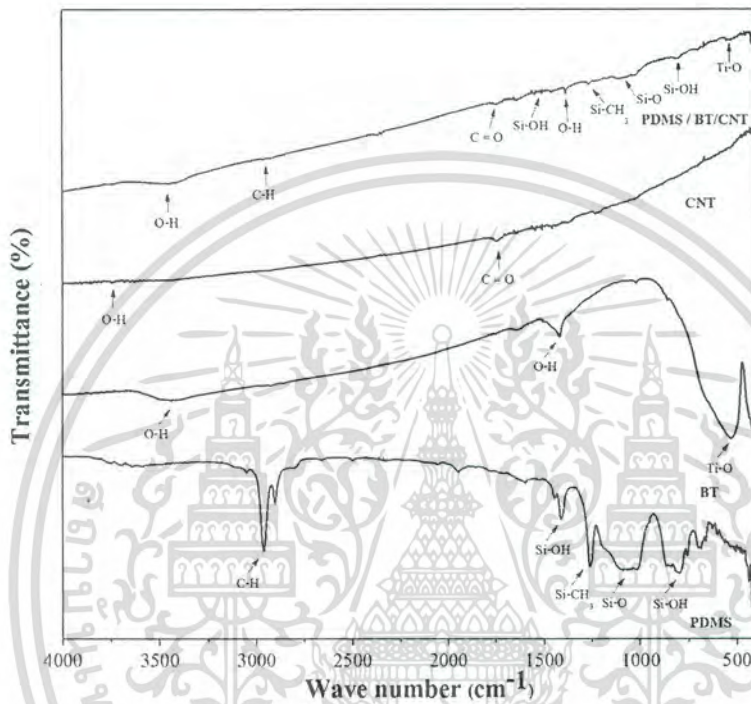
ภาพที่ 4.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของคอมโพสิต BT-PDMS

4.2.6 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของคอมโพสิตแบเรียมไททานเตตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT) โดยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR)

จากนั้นทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของวัสดุผสมแบเรียมไททานเตต พอลิไดเมทิลซิลอกเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน จากภาพที่ 2.6 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุผสมแบเรียมไททานเตต พอลิไดเมทิลซิลอกเซนและแท่งนาโนคาร์บอน มีแนวโน้มเดียวกับของวัสดุผสมแบเรียมไททานเตตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซนคือพบพีคที่เลขคลื่นประมาณ 3400 cm^{-1} และเลขคลื่นประมาณ 1630 cm^{-1} และที่เลขคลื่นประมาณ 1384 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) อันเนื่องมาจากความชื้นและสารออกแกนิคในสารละลายพอลิเมอร์ และพบพีคการสั่นของ (Ti-O stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ 539 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารแบเรียมไททานเตต นอกจากนี้ยังพบพีคการสั่นของพันธะภายในพอลิเมอร์ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ $1000\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ โดยพบพีคการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 2963 cm^{-1} ของ (CH₃ stretching) และพีคการสั่นของ (Si-OH bending) ที่เลขคลื่นประมาณ 1412 cm^{-1} อีกทั้งยังพบพีคการสั่นของ (Si-CH₃ stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ 1251 cm^{-1} และพีคการสั่นของ (Si-O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ 1091 cm^{-1} โดยแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในพอลิไดเมทิลซิลอกเซน นอกจากนี้พบว่าพบพีคการสั่นของพันธะ ($\text{C} = \text{O}$ stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ 1713 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในแท่งนาโนคาร์บอน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมดังกล่าวประกอบด้วย 3 เฟส คือ เฟสของเซรามิกแบเรียมไททาเนต เฟสของพอลิเมอร์พอลิไดเมทิลซิลอกเซน และเฟสของแท่งนาโนคาร์บอน ผสมกันอยู่โดยไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม

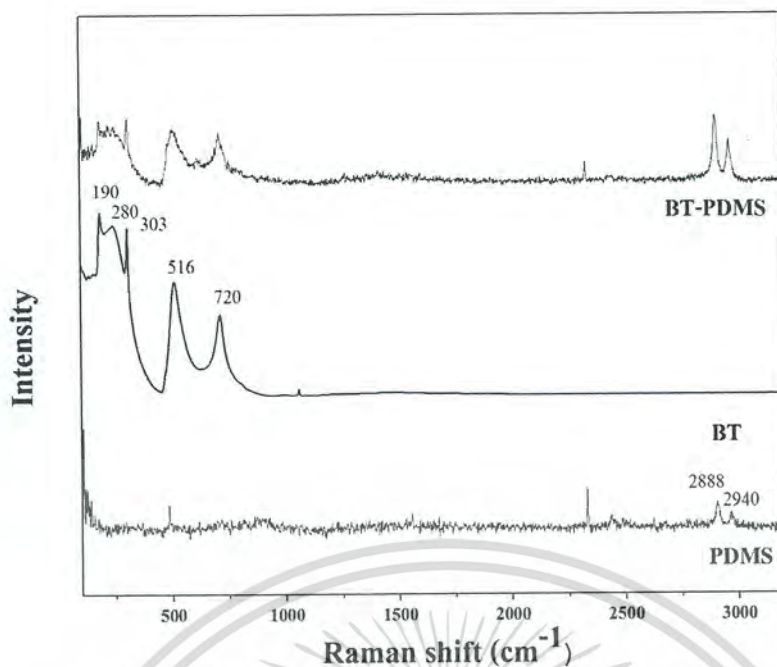


ภาพที่ 4.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต พอลิไดเมทิลซิลอกเซนและแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

4.2.7 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยเครื่องรามาน (Raman) สเปกโทรสโกปี ของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซนคาร์ (BT-PDMS)

นำคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่เตรียมได้มาทำการทดสอบโครงสร้างของสารด้วยเทคนิครามาน เพื่อยืนยันโครงสร้างของสารที่เกิดขึ้น โดยทำการวัดในช่วง $100 - 3200\text{ cm}^{-1}$ ผลการทดลองที่ได้มีแสดงดังภาพที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



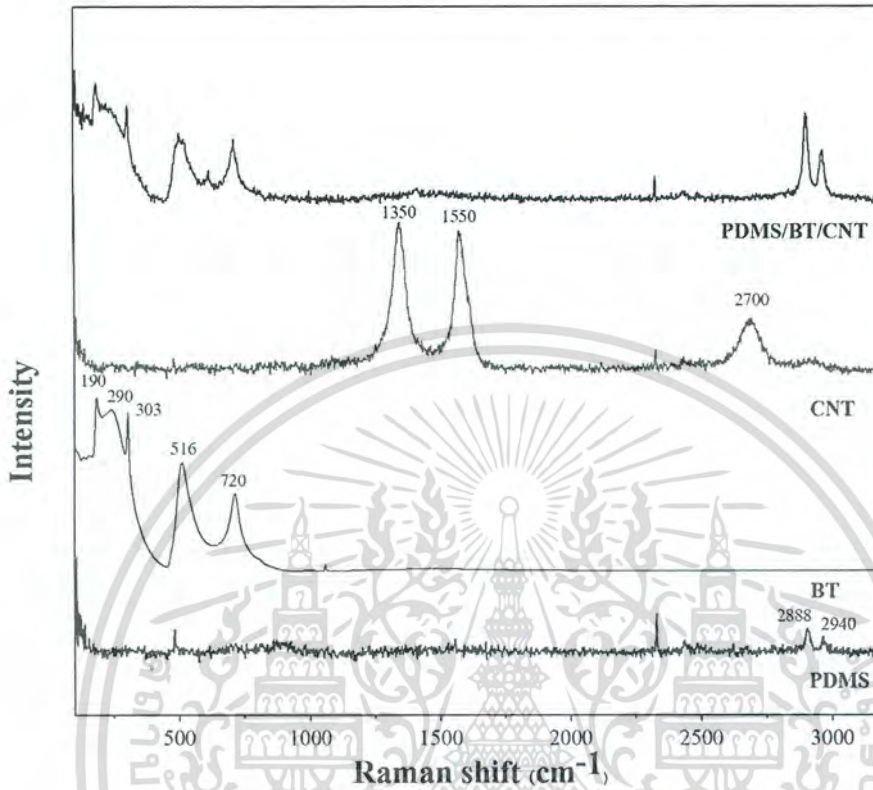
ภาพที่ 4.13 รามานสเปกตรัมของคอมโพสิต BT-PDMS

จากภาพที่ 4.13 แสดงลักษณะของรามานสเปกตรัมของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน พบพีคของแบเรียมไททาเนตเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 190, 280, 303, 516 และ 720 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบสเปกตรัมของ BaTiO_3 ($P4mm$) แบบเตตระโกนอล คือ $4E(\text{TO} + \text{LO}) + 3A1(\text{TO} + \text{LO}) + B1(\text{TO} + \text{LO})$ โดยพีคที่เลขคลื่นประมาณ 190 cm^{-1} สอดคล้องกับรูปแบบ (TO) พีคที่เลขคลื่นประมาณ 140, 303 และ 640 cm^{-1} สอดคล้องกับรูปแบบ $E(\text{LO})$ พีคที่เลขคลื่นประมาณ 280 cm^{-1} แสดงรูปแบบ $A1(\text{TO})$ และ $E(\text{TO})$ พีคที่เลขคลื่นประมาณ 520 cm^{-1} แสดงรูปแบบ $E(\text{TO})$ และ $A1(\text{TO})$ ส่วนพีคที่เลขคลื่นประมาณ 720 cm^{-1} สอดคล้องกับรูปแบบ $A1(\text{LO}) + E(\text{LO})$ นอกจากนี้ยังแสดงพีคที่เลขคลื่นประมาณ 303 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบ $E(3\text{TO}) + E(2\text{LO}) + B1$ และพบพีคของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน เกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 2888 cm^{-1} และ 2940 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างที่ได้เป็นวัสดุผสมที่ประกอบด้วย 2 เฟส คือเฟสของเซรามิกแบเรียมไททาเนตและเฟสของพอลิเมอร์พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ผสมกันอยู่โดยไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก FT-IR

4.2.8 การตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องรามาน (Raman) สเปกโทรสโกปีของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นนำคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต พอลิไดเมทิลไซลอกเซนและแท่งนาโนคาร์บอน ที่เตรียมได้มาทำการทดสอบโครงสร้างของสารด้วยเทคนิครามาน เพื่อยืนยันโครงสร้างของสารที่เกิดขึ้น โดยทำการวัดในช่วง $100 - 3200 \text{ cm}^{-1}$ ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะดังในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 รามานสเปกตรัมของคอมโพสิต BT-PDMS-CNT

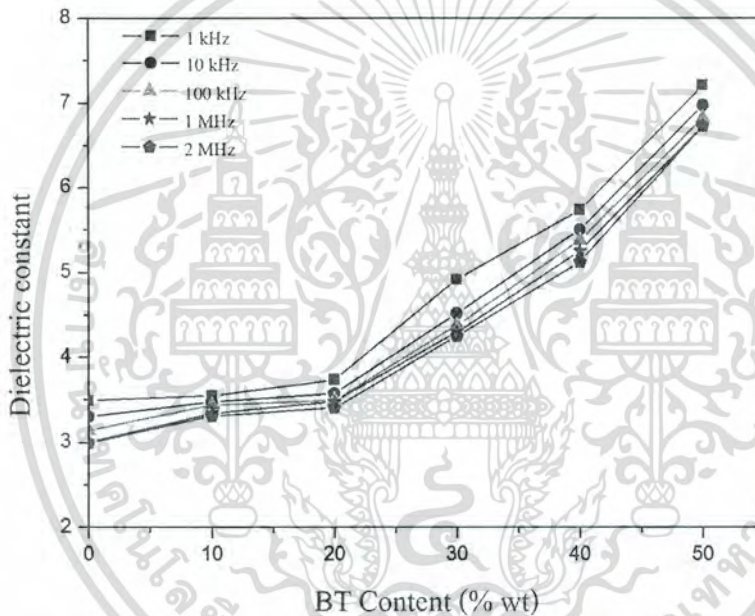
จากภาพที่ 4.14 แสดงลักษณะของสเปกตรัมของโครงสร้างของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต พอลิไดเมทิลไซลอกเซนและแท่งนาโนคาร์บอน การแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต พอลิไดเมทิลไซลอกเซนและแท่งนาโนคาร์บอน มีแนวโน้มเดียวกับของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน โดยพบพีคของแบเรียมไททาเนตเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 190 280 303 516 และ 720 cm^{-1} สอดคล้องกับผลรามานของ BaTiO_3 (P4mm) แบบเตตระโกนอล คือ $4E(\text{TO} + \text{LO}) + 3A_1(\text{TO} + \text{LO}) + B_1(\text{TO} + \text{LO})$ ซึ่งพีคที่เลขคลื่นประมาณ 190 cm^{-1} สอดคล้องกับโหมด $E(\text{TO})$ เลขคลื่นประมาณ 140 , 303 และ 640 cm^{-1} คือโหมด $E(\text{LO})$ เลขคลื่นประมาณ 280 cm^{-1} คือโหมด $A_1(\text{TO})$ และโหมด $E(\text{TO})$ เลขคลื่นประมาณ 520 cm^{-1} เป็นโหมด $E(\text{TO})$ และ $A_1(\text{TO})$ เลขคลื่นประมาณ 720 cm^{-1} คือโหมด $A_1(\text{LO}) + E(\text{LO})$ [69] นอกจากนี้ยังมีพีคที่เลขคลื่นประมาณ 303 cm^{-1} สอดคล้องกับ $E(3\text{TO})+E(2\text{LO})+B_1$ [68] และพบพีคของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน เกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 2888 cm^{-1} และ 2940 cm^{-1} แต่จะพบพีคของแท่งนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 1350 , 1550 , 2700 cm^{-1} โดยแสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นวัสดุผสมที่ประกอบด้วย 3 เฟส คือเฟสของเซรามิกแบเรียมไททาเนต เฟสของพอลิเมอร์พอลิไดเมทิลซิลอกเซน และเฟสของแท่งนาโนคาร์บอน ผสมกันอยู่โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ผลที่ได้จาก FT-IR

4.2.9 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (BT-PDMS)

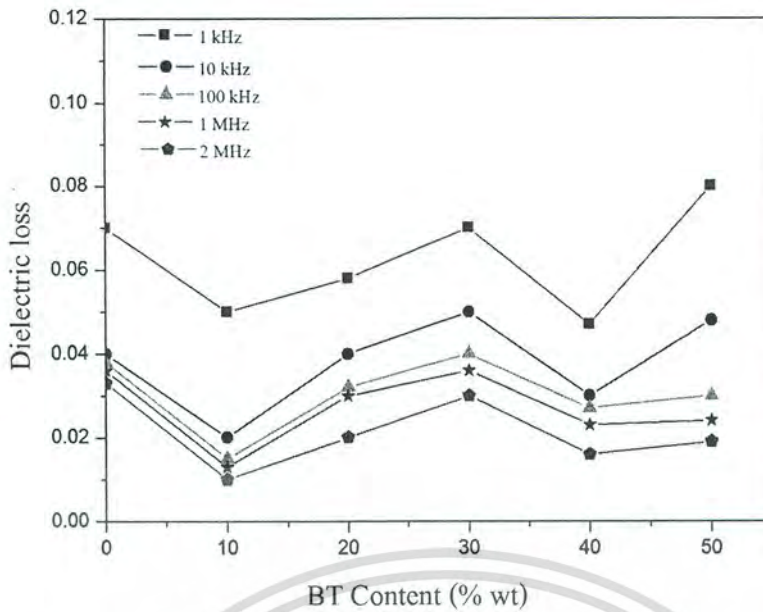
เมื่อพิจารณาที่ความถี่การวัด 1 kHz PDMS มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 3.49 และเมื่อเพิ่มปริมาณของแบเรียมไททาเนต ส่งผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ 7.406 ในวัสดุผสมที่มีปริมาตรของแบเรียมไททาเนต 50% สำหรับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่าค่าความสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่ได้ค่อนข้างต่ำ อยู่ในช่วง 0.01-0.08 เท่านั้น ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาณของแบเรียมไททาเนตในพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (BT-PDMS) ที่ความถี่การวัด 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz และ 2 MHz

จากผลการตรวจสอบอิมพีแดนซ์ของค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่เตรียมได้ พบว่าวัสดุผสมในทุกอัตราส่วนแสดงพฤติกรรมทางไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่คล้ายคลึงกัน โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.15 ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกพบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับปริมาณของแบเรียมไททานเตในพอลิไธเมทิลไซลอกเซน ที่ความถี่การวัด 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz และ 2 MHz

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิตทางทฤษฎีโดยการคาดการณ์จากสมการที่ต่างกัันเพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายค่าไดอิเล็กทริกที่ได้จากการทดลองดังนี้

1. สมการ Jayasundere-Smith (eq. 4.1)

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_m(1 - v_f) + \epsilon_i v_f \left[\frac{3\epsilon_m}{\epsilon_i + 2\epsilon_m} \right] \left[\frac{1 + 3v_f(\epsilon_i - \epsilon_m)}{\epsilon_i + 2\epsilon_m} \right]}{1 - v_f + v_f \left[\frac{3\epsilon_m}{\epsilon_i + 2\epsilon_m} \right] \left[\frac{1 + 3v_f(\epsilon_i - \epsilon_m)}{\epsilon_i + 2\epsilon_m} \right]}$$

2. สมการ Modified Lichtnecker (eq. 4.2)

$$\log \epsilon_{\text{eff}} = \log \epsilon_m + v_f(1 - n) \log \frac{\epsilon_i}{\epsilon_m}$$

3. สมการ Series mixing formula (eq. 4.3)

$$\frac{1}{\epsilon_{\text{eff}}} = \frac{v_f}{\epsilon_i} + \frac{(1 - v_f)}{\epsilon_m}$$

4. สมการ Maxwell-Wagner (eq. 4.4)

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_m \frac{2\epsilon_m + \epsilon_i + 2v_f(\epsilon_i - \epsilon_m)}{2\epsilon_m + \epsilon_i - v_f(\epsilon_i - \epsilon_m)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สมการ Effective medium theory (EMT) (eq. 4.5)

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_m \left[1 + \frac{v_f(\epsilon_i - \epsilon_m)}{\epsilon_m + n(1 - v_f)(\epsilon_i - \epsilon_m)} \right]$$

เมื่อ	ϵ_{eff}	คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต
	ϵ_i	คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารตัวเติม
	ϵ_m	คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเมทริกซ์
	n	คือตัวแปรทางสัมฐานวิทยา
	v_f	คือสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิก

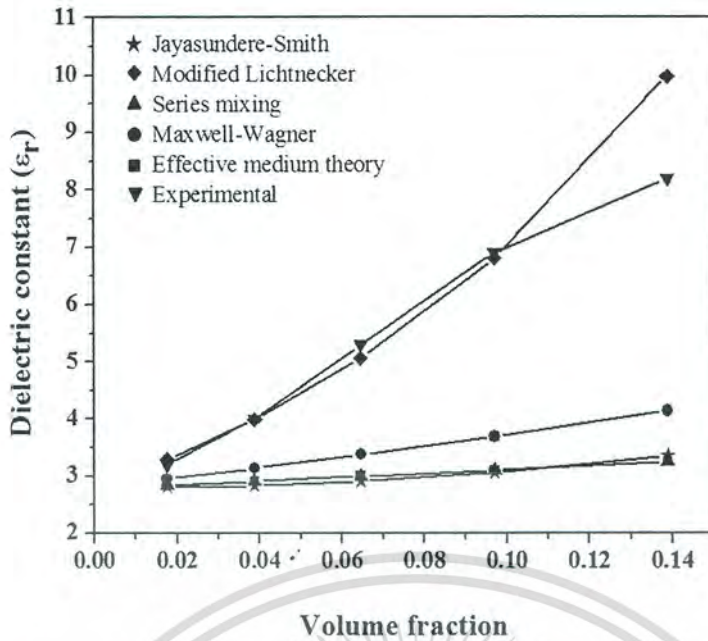
โดยใช้สมการในการคำนวณค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิก v_f ดังสมการ

$$m_c = m_p \times \frac{\rho_c}{\rho_p} \times \frac{v_f}{1 - v_f} \quad (4.6)$$

เมื่อ	m_c	คือมวลของเซรามิก
	m_p	คือมวลของพอลิเมอร์
	ρ_c	คือความหนาแน่นของเซรามิก
	ρ_p	คือความหนาแน่นของพอลิเมอร์

ในการวัดค่าทางไดอิเล็กทริก วัสดุเซรามิกจะถูกทำการอัดขึ้นรูปเป็นเม็ด อย่างไรก็ตามในกรณีของวัสดุคอมโพสิตนี้ แบริยมไททานเตออยู่ในรูปของผงผลึก ดังนั้นสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิตดังกล่าวอาจแตกต่างจากในรูปแบบบิลค์เซรามิก เนื่องจากการไม่มีอยู่ของขอบเกรนและความหนาแน่นของโดเมนที่ลดลงเนื่องจากการลดขนาดอนุภาคจะส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกของแบริยมไททานเตอลดลง นอกจากนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคหรือขนาดเกรนอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการยากที่จะได้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของผงผลึกที่ถูกต้อง ในปี 2004 Ohno และคณะ ได้รายงานสมบัติทางไดอิเล็กทริกของอนุภาคนาโน โดยทำการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากสเปกตรัมของรามานโดยการใช้ความสัมพันธ์แบบ LST จากเทคนิคดังกล่าวพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอนุภาคนาโนแบริยมไททานเตอที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 1254.6 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าดังกล่าวในการคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต BT-PDMS โดยใช้สมการทางทฤษฎีต่างๆ ดังภาพที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.17 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต BT-PDMS ที่ขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณจากสมการต่างๆ

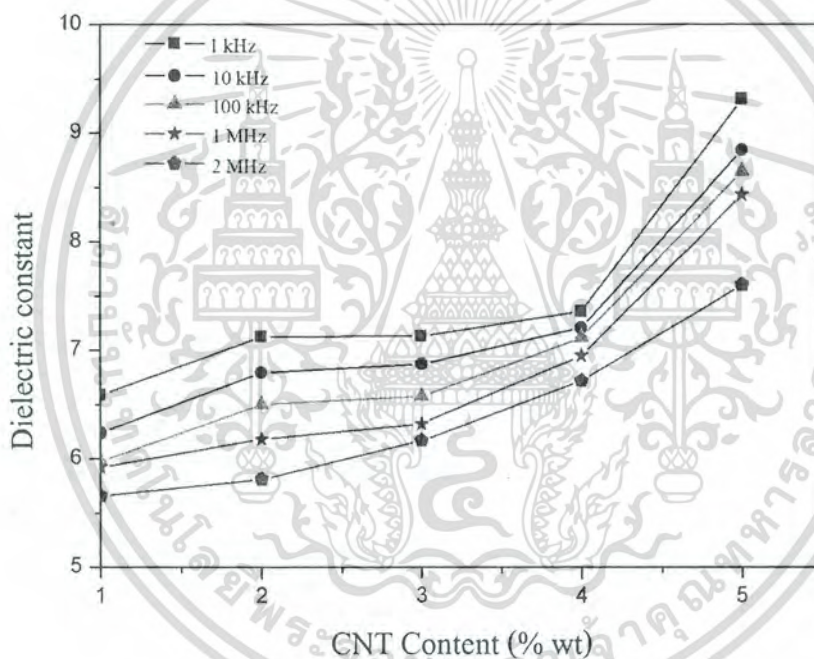
จากภาพที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าสมการ Modified Lichtnecker มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ได้จริงจากการทดลอง โดยสมการดังกล่าวประกอบด้วยตัวแปร n ซึ่งบ่งบอกถึงอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่าสมบัติไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตนอกจากขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารตัวเติมแล้วยังขึ้นกับอันตรกิริยาระหว่างเซรามิกกับพอลิเมอร์อีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Q. Lu และคณะ et.al. ที่พบว่าสัญญาณวิทยาและการแยกของเฟสเป็นปัจจัยที่สำคัญในวัสดุนาโนคอมโพสิต โดยสมบัติของวัสดุนาโนคอมโพสิตถูกควบคุมโดยความแข็งแรงระหว่างผิวของวัสดุผสม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าที่ได้จากสมการ Modified Lichtnecker เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าไดอิเล็กทริกมีความแตกต่างกันอย่างมากที่สัดส่วนโดยปริมาตรที่สูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ไม่ดีของอนุภาคเซรามิกในพอลิเมอร์ที่สัดส่วนโดยปริมาตรที่สูงขึ้น และอาจเนื่องมาจากรูพรุนหรืออากาศที่ถูกกักไว้ภายในวัสดุคอมโพสิต

4.2.10 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิโดเมทิลไซลอกเซนที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

เนื่องจากการทดลองพบว่า วัสดุผสมแบเรียมไททาเนตที่ 50% กับพอลิโดเมทิลไซลอกเซนจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุด จึงได้นำวัสดุผสมสูตรนี้ไปการทดลองต่อโดยการผสมแท่งนาโนคาร์บอน ลงไปด้วยอัตราปริมาตรที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ความถี่การวัด 1 kHz พบว่าวัสดุผสมที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาตรของแท่งนาโนคาร์บอน จะส่งผลทำ

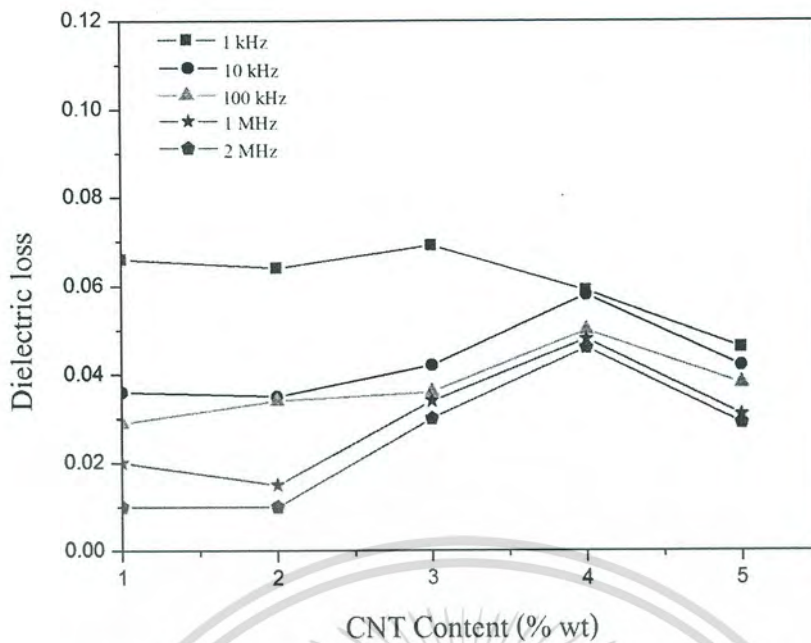
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ 9.134 ในวัสดุผสมที่มีปริมาตรของแท่งนาโนคาร์บอน 5% ซึ่งมียาค่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen-Rong Yu ได้รายงานว่วัสดุผสมจาก พอลิเอทิลีน แบเรียมไททาเนตและแท่งนาโนคาร์บอน จะมีค่าไดอิเล็กทริกที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาตรของทั้งแบเรียมไททาเนตและแท่งนาโนคาร์บอน ลงไปในวัสดุผสม ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมแท่งนาโนคาร์บอน ทำให้วัสดุผสมมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มสมบัติ percolation ให้กับวัสดุผสมจึงทำให้เมื่อผสมแท่งนาโนคาร์บอนลงในวัสดุผสมค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมจึงมีค่าสูงขึ้นดังภาพที่ 4.18 สำหรับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่าที่ความถี่ 1 kHz วัสดุผสมที่มีปริมาตรของแท่งนาโนคาร์บอน 3% จะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกสูงที่สุดโดยมีค่าโดยประมาณ 0.059 แต่วัสดุผสมที่มีปริมาตรของแท่งนาโนคาร์บอน 5% จะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกต่ำที่สุดมีค่าค่าโดยประมาณ 0.046 นอกจากนี้ยังพบว่าที่ 10 kHz 100 kHz 1 MHz และ 2 MHz วัสดุผสมจะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมากที่สุดเมื่อมีแท่งนาโนคาร์บอน 4% ดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาตรของแท่งนาโนคาร์บอนของวัสดุคอมโพสิตที่ความถี่ 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz และ 2 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับปริมาณของแท่งนาโนคาร์บอนของคอมโพสิตที่ความถี่ 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz และ 2 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณสมบัติวัสดุผสมนาโนคอมโพสิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง โดยการเตรียมคอมโพสิตแบบ 3-3 ของเส้นใยเซรามิกเลคเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ และแบบ 0-3 ของแบเรียมไททานเนตกับพอลิโดเมทิลไซลอคเซน และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของเส้นใยเซรามิกเลคเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์

1. จากการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าคอมโพสิตที่ได้เชื่อมโยงกันแบบ 3-3
2. คอมโพสิตที่ได้เกิดเป็นเฟสบริสุทธิ์ของเพอโรฟสไกต์ ตามไฟล์ข้อมูลมาตรฐาน JC PDS หมายเลข 75-1607 พบว่าพีคการเลี้ยวเบนแสดงโครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบ ออร์โธโรมบิก และพบสเปกตรัมของ PVDF ที่มีมุม $2\theta = 18^\circ$ และ $2\theta = 26^\circ$ เนื่องจาก PVDF เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกที่มีเปอร์เซ็นต์ ความเป็นผลึก 50% จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่าง PZ-PVDF ที่เตรียมได้เป็นคอมโพสิต ที่ประกอบด้วย 2 เฟส ได้แก่ เฟสของเซรามิกเลคเซอร์โคเนต และเฟสของพอลิเมอร์ PVDF
3. จากผลตรวจสอบเอกลักษณ์ของวัสดุผสมโดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปีพบพีคการดูดกลืนที่ 548 cm^{-1} โดยสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Zr-O ซึ่งแสดงถึงการเกิดเป็นผลึกเส้นใยของ PZ และพบแถบการดูดกลืน ซึ่งบ่งบอกถึงเฟสของ ผลึกอัลฟา และเฟสเบต้าของหมู่ไวนิลิดีนของพอลิเมอร์
4. จากการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิตพบว่านาโนคอมโพสิตของ PZ-PVDF มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 60-8 ในช่วงความถี่ที่ทำการวัดจาก 100 Hz to 2 MHz

5.1.2 จากการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของเส้นใยเซรามิกเลคเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

1. จากการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าคอมโพสิตที่ได้เกิดเป็นของผสมสามเฟสของ PZ CNT และ PVDF
2. จากรูปแบบสเปกตรัมของคอมโพสิต PZ-CNT-PVDF พบว่าคอมโพสิตที่ได้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเฟสบริสุทธิ์ของเพอโรฟสไกต์ ตามไฟล์ข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 75-1607 และพบสเปกตรัมของ PVDF ที่มีมุม $2\theta = 18^\circ$ และ $2\theta = 26^\circ$ และแสดงพีค (002) ที่มีมุม 26° และ 77° ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกของกราฟไฟต์ จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่าง ที่เตรียมได้เป็นคอมโพสิตที่ประกอบด้วย 3 เฟส ได้แก่ เฟสของเซรามิกเลดเซอร์โคเนต เฟสของพอลิเมอร์ PVDF และเฟสของแท่งนาโนคาร์บอน

5. จากผลตรวจสอบเอกลักษณ์ของวัสดุผสมโดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี สามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่าง PZ-CNT-PVDF ที่เตรียมได้เป็นคอมโพสิต ที่ประกอบด้วย 3 เฟส ได้แก่ เฟสของเซรามิกเลดเซอร์โคเนต เฟสของพอลิเมอร์ PVDF และยังมีพีคที่ประมาณ 1400 และ 1700 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการสั่นเฟส CNT

6. จากการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิตพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต PZ-CNT-PVDF มีค่าอยู่ในช่วง 97-49 ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต PZ/PVDF เนื่องจากเส้นใย PZ สามารถกระจายตัวได้ดีโดยการเกิดเป็นของผสมเชิงซ้อนกับโครงข่ายของ CNT และโครงข่ายของ CNT ยังทำให้เกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าซึ่งสามารถลดความต้านทานภายในของวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต PZ-CNT-PVDF ยังมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.02 และมีค่าสูงสุดน้อยกว่า 0.6

5.1.3 จากการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของแบเรียมไททาเนตกับพอลิโดเมทิลไซลอกเซน

1. คอมโพสิตที่เตรียมได้มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BaTiO_3 ตามไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 05-0626 ซึ่งมีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบเตตระโกนอล โดยไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของพอลิโดเมทิลไซลอกเซนเนื่องจาก มีโครงสร้างเป็นอสัณฐานจึงไม่สามารถสะท้อนระนาบผลึกได้

2. จากผลตรวจสอบเอกลักษณ์ของวัสดุผสมด้วยโดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบพีคเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 539, 1384, 1630 และ 3400 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารแบเรียมไททาเนต และพีคการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 1091, 1251, 1412 และ 2963 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในพอลิโดเมทิลไซลอกเซน

3. จากผลตรวจสอบเอกลักษณ์ของวัสดุผสมโดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปีพบพีคของแบเรียมไททาเนตเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 190, 280, 303, 516 และ 720 cm^{-1} และพบพีคของพอลิโดเมทิลไซลอกเซน เกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 2888 และ 2940 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ผลที่ได้จาก FT-IR

4. จากการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมไททาเนตลงในวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิโดเมทิลไซลอกเซน จะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จากการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม พบว่าวัสดุผสมแบเรียมไททานेटกับพอลิไคเมทิลไซลอกเซน มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาตรของแบเรียมไททานेट

5.1.4 จากการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของแบเรียมไททานेटกับพอลิไคเมทิลไซลอกเซน ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน

1. คอมโพสิตที่เตรียมได้มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BaTiO_3 ตามไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 05-0626 ซึ่งมีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบเตตระโกนอล โดยไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของพอลิไคเมทิลไซลอกเซน และพบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแท่งนาโนคาร์บอนมีความสอดคล้องกับไฟล์ JCPDS มาตรฐาน 75-1621

2. จากผลตรวจสอบเอกลักษณ์ของวัสดุผสมด้วยโดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่าวัสดุผสมแบเรียมไททานेटกับพอลิไคเมทิลไซลอกเซนและสมบัติสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน มีพีกเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 539, 1384, 1630 และ 3400 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารแบเรียมไททานेट พบพีกการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 1091, 1251, 1412 และ 2963 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในพอลิไคเมทิลไซลอกเซน และยังพบพีกเลขคลื่นประมาณ 1713 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในแท่งนาโนคาร์บอน

3. จากผลตรวจสอบเอกลักษณ์ของวัสดุผสมโดยใช้เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี พบว่าวัสดุผสมแบเรียมไททานेटกับพอลิไคเมทิลไซลอกเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน จะพบพีกของแบเรียมไททานेटเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 190 280 303 516 และ 720 cm^{-1} พบพีกของพอลิไคเมทิลไซลอกเซน เกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 2888 cm^{-1} และ 2940 cm^{-1} และยังพบพีกของแท่งนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 1350 1550 และ 2700 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ผลที่ได้จาก FT-IR

4. เมื่อมีการเพิ่มปริมาณแท่งนาโนคาร์บอน ทำให้แบเรียมไททานेटเกิดการกระจายตัวมากยิ่งขึ้น และการตกตะกอนน้อยลง

5. จากการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมพบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาตรของแท่งนาโนคาร์บอน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การกระจายตัวของวัสดุคอมโพสิตไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำให้เกิดการตกตะกอน

5.2.2 ศึกษาเทคนิคอื่นๆที่สามารถเตรียมคอมโพสิตให้มีการกระจายตัวที่ดี

5.2.3 การเตรียมขั้วไฟฟ้าเพื่อวัดสมบัติไดอิเล็กทริกยังไม่มีประสิทธิภาพ

5.2.4 ศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้าและเทคนิคการวัดสมบัติที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลผลิต

6.1 ผลงานเชิงวิชาการ

งานวิจัยนี้ได้นำบางส่วนไปใช้ประยุกต์ในการเรียนการสอนใน ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. จากการทำวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ในการความรู้แก่นักศึกษา ปริญญา ตรี โท เอก เจ้าหน้าที่ นักวิจัย และ อาจารย์ มีทักษะในการทำวิจัยเพิ่มขึ้น

6.2 ผลงานเชิงสาธารณะ

งานวิจัยนี้ทำให้เกิดความร่วมมือหลายภาคส่วน ทั้งองค์กรภายในสถาบัน และองค์กรภายนอก เช่น ผศ.ดร. วรณวิทย์ วิทยากร วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง และ ดร. อนุชา เรืองพานิช นักวิจัย และ ดร. จริณ ศรีธรราริคุณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ(NECTEC)

6.3 ผลงานที่ได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการ

กำลังจะส่งผลงานวิชาการ วรสาร Ferroelectrics(IF = 0.3) เรื่อง “Fabrication of 3-3 Lead Zirconate-Polyvinylidene Fluoride for high density energy capacitor” ในปี ค.ศ. 2016

และกำลังดำเนินการส่งผลงานวิชาการที่ วรสารอื่นๆ ต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] G. H. Haertling. 1999. "Ferroelectric ceramics: History and technology". Journal of American Ceramic Society. Volume 82, 797-818.
- [2] J. Valasek. 1921. "Piezoelectricity and applied phenomena in Roshelle salt". Journal of Physics Review. Volume 17, 475-481.
- [3] A. Safari, R. K. Panda and V. F. Janas. 1996. "Ferroelectric Ceramics: Processing, Properties and applications". Key Engineering Material. Volume 122-124, 35-70.
- [4] A. J. Moulson and J. M. Herbert. 2003. Electroceramics. 2nd ed. London: Johnwiley and Sons.
- [5] L. Hongbo. 2011. "Investigation of new multiferroic materials with coexistence of several ferroic and structural instabilities". Ecole Centrale Paris Grande Voie des Vignes.
- [6] E. E. Oren, E. Taspinar and A.C. Tas. 1997. "Preparation of lead zirconate by homogeneous precipitation and calcination. Journal of American Ceramic Society". Volume 80, Numbers 10, 2714-16.
- [7] M. M. Vijatovic, J. D. Bobic and B. D. Stojanovi. 2008. "History and Challenges of Barium Titanate: Part I". Science of Sintering. Volume 40, 155-165.
- [8] M. M. Vijatovic, J. D. Bobic and B. D. Stojanovic. 2008. "History and Challenges of Barium Titanate: Part II". Science of Sintering. Volume 40, 235-244.
- [9] H. C. Hilborg. 2001. "Loss and recovery of hydrophobicity of polydimethylsiloxane after exposure to electrical discharges". Department of polymer technology, Royal institute of technology, Stockholm, Sweden.
- [10] L. Qiaoyu. 2012. "Synthesis of PDMS-metal oxide hybrid nanocomposites using an in situ sol-gel route". Dissertation: Michigan Technological University, Available from:<http://digitalcommons.mtu.edu/etds/14>.
- [11] นายนิธิพจน์ พุทธพงษ์. 2552. "ผลของสมบัติวัสดุ PZTs ต่อการเก็บเกี่ยวพลังงาน". วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] APC International. 2002. "Piezoelectric ceramic: Principles and applications". APC International, Ltd.
- [13] K. Uchino. 2003. "Introduction to Piezoelectric Actuators and Transducers". International Center for Actuators and Transducers, Penn State University, University Park, PA 16802.
- [14] D. Li, J. T. McCann and Y. Xia. 2006. "Electrospinning: A simple and versatile technique for producing ceramic nanofibers and nanotubes". Journal of the American Ceramic Society. Volume 89, Numbers 6, 1861-1869.
- [15] J. Yuh, L. Perez, W. M. Sigmund and J. C. Nino. 2007. "Sol-gel based synthesis of complex oxide nanofibers". Journal of Sol-Gel Science Technology. Volume 42, 323-329.
- [16] P. Gupta and G. L. Wilkes. 2003. "Some investigations on the fiber formation by utilizing a side-by-side bicomponent electrospinning approach". Polymer. Volume 44, 6353-6359.
- [17] W. Teo and S. Ramakrishna. 2006. "A review on electrospinning design and nanofibre assemblies". Nanotechnology. Volume 17, 89-106.
- [18] สุปถ อนันตา. 2543. "กระบวนการประดิษฐ์เซรามิกชั้นสูง". ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [19] K. Uchino. 2009. "Ferroelectric Devices; Composite Materials". Marcel Dekker, Inc , Newyork, NY, 255-269. ISBN: 0824781333
- [20] S. Singh and S. B. Krupanidhi. 2009. "Fabrication and phase transformation in crystalline nanoparticles of $PbZrO_3$ derived by sol-gel". Current Nanoscience. Volume 5, 489-492.
- [21] I. Kim, S. Bae, K. Kim and H. Kim. 1998. "Characteristics of antiferroelectric $PbZrO_3$ thin films". Journal of the Korean Physical Society. Volume 33, Number 2, 180-183.
- [22] C. Chang, V. H. Tran, J. Wang, Y.-K. Fuh and L. Lin. 2010. "Direct-write piezoelectric polymeric nanogenerator with high energy conversion efficiency". Nano Letter. Volume 10, 726-731.
- [23] S. M. Khaled, R. Sui, P. A. Charpentier and A. S. Rizkalla. 2007. "Synthesis of TiO_2 -PMMA nanocomposite: using methacrylic acid as a coupling agent". Langmuir. Volume 23, 3988-3995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] H. Li, H. Wu, D. Lin and W. Pan. 2009. "High T_C in electrospun $BaTiO_3$ nanofibers". Journal of the American Ceramic Society. Volume 92, Number 9, 2162-2164.
- [25] M. Liao, X. L. Zhong, J. B. Wang, S. H. Xie and Y. C. Zhou. 2010. "Structure and electrical properties of $Bi_{3.15}Nd_{0.85}Ti_3O_{12}$ nanofibers synthesized by electrospinning and sol-gel method". Applied Physics Letters. Volume 96, 012904.
- [26] เชิดศักดิ์ แซ่ลี. 2534. "สมบัติไดอิเล็กตริกและเพียโซอิเล็กตริกในของผสมแบบ 0-3 พีแซดที่กับเทอร์มัลพลาสติก". วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [27] Y. Chan, H.L.W Chan and C.L. Choy. 1998. "Pyroelectric Properties of $PbTiO_3/P(VDF-TrFE)$ 0-3 Nanocomposite Films". Thin Solid Films. Volume 323, 270-274.
- [28] B. Ploss, W. Ng, H.L. Chan, B. Ploss and C. Choy. 2001. "Poling study of PZT/P(VDF-TrFE) composites". Composites Science and Technology. Volume 61, 957-962.
- [29] T. McNally, P. Potschke, P. Halley, M. Murphy, D. Martin, S.E.J. Bell, G.P. Brennan, D. Bein, P. Lemoine, J.P. Quinn. 2005. "Polyethylene multiwalled carbon nanotube composites". Polymer. Volume 46, 8222-8232.
- [30] L. Xiaofang, X. Chuanxi, S. Huajun, D. Lijie, L. Rui and L. Yang. 2005. "Characterization of PZT/PVC Composites Added with Carbon Black". Journal of Wuhan University of Technology – Mater. Sci. Ed. Volume 20, Number 4, 60-64.
- [31] H. Chen, X. Dong, T. Zeng, Z. Zhou and H. Yang. 2007. "The Mechanical and Electric Properties of Infiltrated PZT/Polymer Composites". Ceramics International. Volume 33, 1369-1374.
- [32] X. Chen, S. Xu, N. Yao and Y. Shi. 2010. "Nanogenerator for mechanical energy harvesting using PZT nanofibers". Nano Letters. Volume 10, 2133-2137.
- [33] X. Chen, R. Galos and Y. Shi. 2011. "A self powered PZT nanofiber composite sensor for structural health monitoring". The 6th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, ANCRISST2011. Dalian, China.
- [34] S. Hajeesaeh and S. Muensit. 2007. "Theory and measurements for 0-3 $BaTiO_3/PVDF$ composites". Songklanakarin Journal of Science and Technology. Volume 2, 413-418.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [35] F. Fang , W. Yang, M.Z. Zhang and Z. Wang. 2009. “Mechanical response of barium-titanate/polymer 0–3 ferroelectric nano-composite film under uniaxial tension”. *Composites Science and Technology*. Volume 69, 602–605.
- [36] C.R. Yu , D.M. Wu, Y. Liu , H. Qiao , Z.Z Yu , A. Dasari, X.S. Du and Y.W. Mai. 2011. “Electrical and dielectric properties of polypropylene nanocomposites based on carbon nanotubes and barium titanate nanoparticles”. *Composites Science and Technology*. Volume 71, 1706–1712.
- [37] J. Salzbrenner, C. Apblett and T. Khraishi. 2013. “Mechanical and electrical properties of carbon nanotubes surface-stamped on polydimethylsiloxane for microvalve actuation”. *Polymer International*. Volume 62, 608–615.
- [38] R.K. Goyal , S.S. Katkade and D.M. Mule. 2013. “Dielectric, mechanical and thermal properties of polymer/BaTiO₃ composites for embedded capacitor”. *Composites: Part B*. Volume 44, 128–132.
- [39] J. H. Jung, M. Lee, J. Hong, Y. Ding, C.-Y. Chen, L.-J. Chou and Z. L. Wang. 2011. “Lead-free NaNbO₃ nanowires for a high output piezoelectric nanogenerator”. *American Chemical Society*. Volume 5, Number 12, 10041–10046.
- [40] K. Park , M. Lee , Y. Liu , S. Moon , G.-T. Hwang , G. Zhu , J. E. Kim , S. O. Kim , D. K. Kim , Z. L. Wang and K. J. Lee. 2012. “Flexible nanocomposite generator made of BaTiO₃ nanoparticles and graphitic carbons”. *Advance Material*, 201200105.
- [41] บัญชา ชนบุญสมบัติ. 2544. “การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน”. ส.ส.ท., กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย.
- [42] [Online]. Available; <http://e-book.ram.edu/e-book/inside/html>.
- [43] [Online]. Available; <http://www.mfu.ac.th/center/stic/images/articles/FTIR/FT-IR02.jpg>
- [44] รศ.แมน อมรสิทธิ์. 2534. “หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ”. พิมพ์ครั้งที่ 1 ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์ กรุงเทพฯ.
- [45] [Online]. Available; <http://www.mfu.ac.th/center/stic/images/articles/SEM/sem001.jpg>
- [46] ธานินทร์ ปัจจุโส. 2555. “วัสดุเจแอนท์ไดอิเล็กตริก”. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. ปีที่ 40 ฉบับที่ 1, 54-65.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [48] ประพันธ์ แมนย่า. 2554. “การปลูกผลึกเดี่ยวเชิงทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น ไดเฟนนิวกันดิเนียม ไฮโดรเจนเอลทาเทรต โมโนไฮเดรต และผลการกำหนดลักษณะ”. สาขาวิชาฟิสิกส์, สำนักวิชาวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [37] P. Atorngitjwat. 2013. “Dielectric Relaxations of Polymers”. Burapha Sci. J. Volume 18, Number 2, 288-294.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ผศ.ดร.นราธิป วิทยาการ
(ภาษาอังกฤษ) Asst.Dr. Naratip Vittayakorn
2. หมายเลขบัตรประชาชน 3500100413242
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
4. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520

โทรศัพท์ 089-7002136 โทรสาร 02-3264415

E-mail Address : naratipcmu@yahoo.com

5. ประวัติการศึกษา

วุฒิ	ปีที่ยับ	ชื่อสถาบัน
วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต วศ.ด.(วัสดุศาสตร์)	2548	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วศ.ม.(วัสดุศาสตร์)	2544	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
วิทยาศาสตรบัณฑิต วท.บ.(วัสดุศาสตร์)	2542	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

