

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

บทที่ 4 เป็นผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของคอมโพสิต $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ ที่ได้จากการเตรียมในห้องปฏิบัติการ

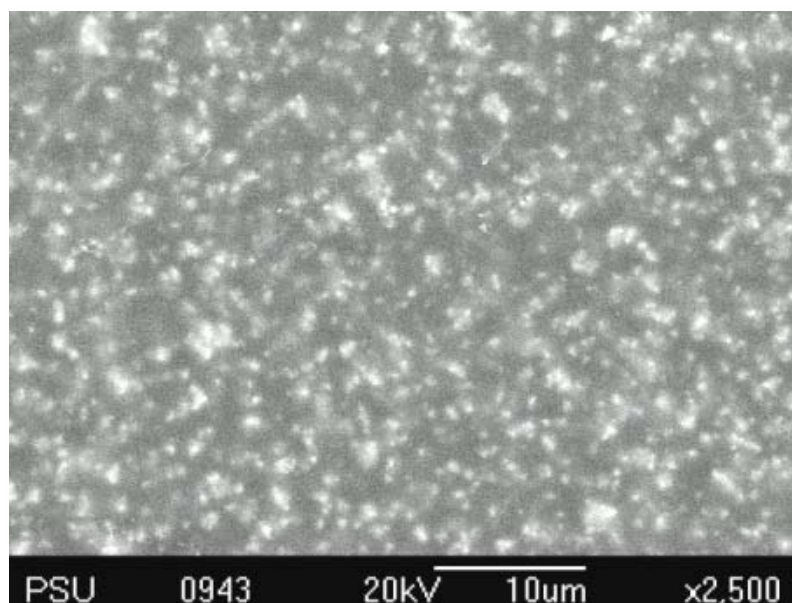
4.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิต $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$

4.1.1 ลักษณะของคอมโพสิต $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ

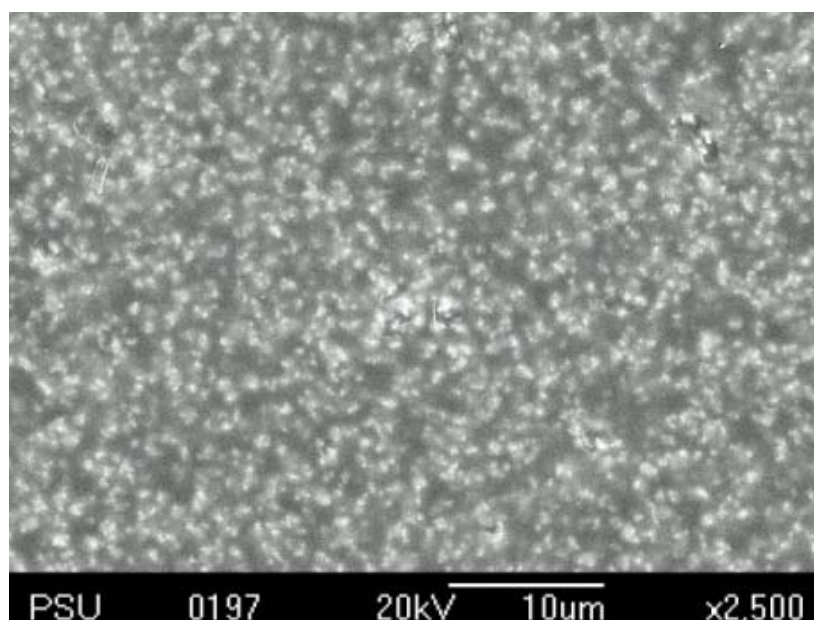
การเตรียมคอมโพสิต $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ โดยใช้สารละลาย PVDF : NMP ในอัตราส่วน 10:90 และใช้ BaTiO_3 : PVDF ในอัตราส่วน 15 : 85 และ 30 : 70 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ เนื่องจากสัดส่วนของเซรามิกที่มีค่าต่ำกว่า 50 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะถือว่าน้อยและสามารถนำแบบจำลองเพาเออร์มาใช้ได้ ขึ้นรูปด้วยวิธีขึ้นรูปแบบเทปทำให้สารตัวอย่างเป็นแผ่นที่มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น ความหนาไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่นโดยมีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง $(28 \pm 3) \mu\text{m}$

4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของคอมโพสิต $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ

ผลจากภาพถ่าย SEM ของคอมโพสิต $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ ทำให้สามารถทราบถึงลักษณะของการกระจายตัวของเซรามิกในเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้ ซึ่งสามารถแสดงดังภาพประกอบที่ 4.1 และภาพประกอบที่ 4.2



ภาพประกอบที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF สำหรับ $\phi = 0.15$ กำลังขยาย 2,500 เท่า



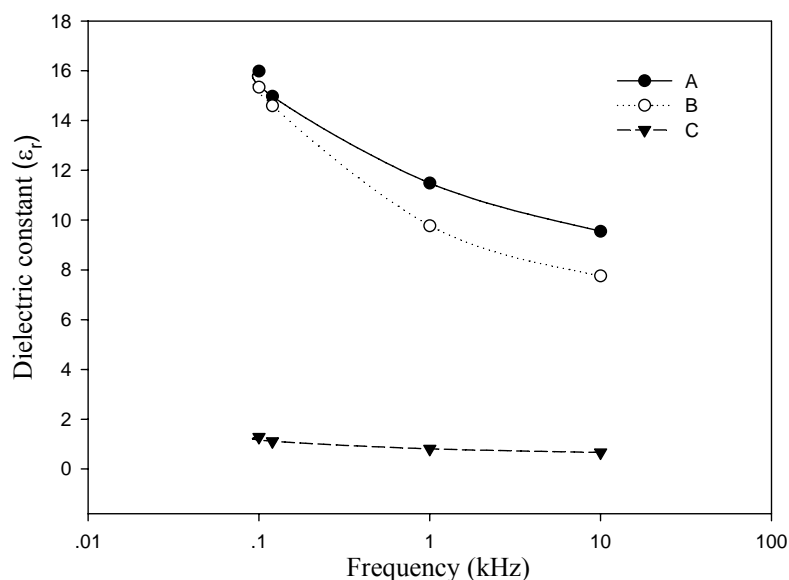
ภาพประกอบที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF สำหรับ $\phi = 0.3$ กำลังขยาย 2,500 เท่า

จากภาพของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF ที่ถ่ายด้วยกำลังขยาย 2,500 เท่า ที่เตรียมด้วยวิธีขึ้นรูปแบบเทป และผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์การกระจายเม็ดเซรามิกมีการเรียงติดกันแบบ 0-3 เป็นส่วนใหญ่ อีกแบบหนึ่งคือแบบ 3-3 โดยจุดสีขาวขุ่นที่เห็นในรูป คือ อนุภาคของแบเรียมไททาเนตที่กระจายตัวในพอลิเมอร์ PVDF

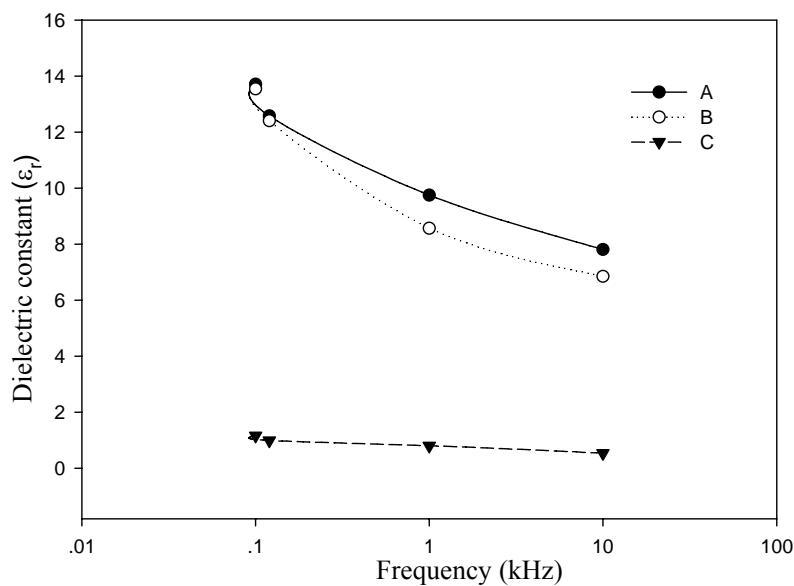
4.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF

4.2.1 สมบัติไดอิเล็กตริก

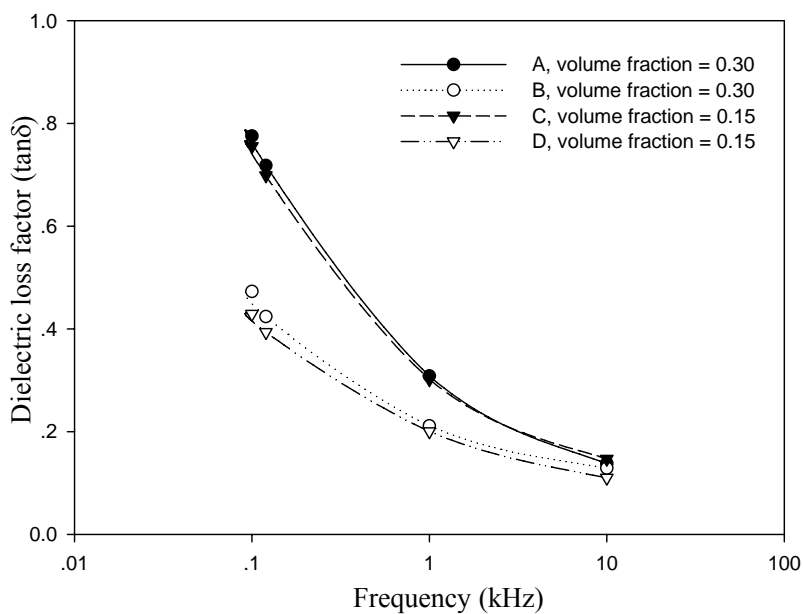
สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ นำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริก โดยใช้สมการที่ (2.22) ส่วนค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่าง ๆ สามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากเครื่อง LCR meter ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าที่ไดอิเล็กตริกและ ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกกับความถี่ต่างๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.3, 4.4 และ 4.5



ภาพประกอบที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความถี่ของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF สำหรับ $\phi = 0.30$ ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ โดยที่ A คือ โพลิงทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน B คือ โพลิงในทิศตรงข้ามกันและ C คือ ไม่มีการโพลิง



ภาพประกอบที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความถี่ของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF สำหรับ $\phi = 0.15$ ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการโดยที่ A คือ โพลิงทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน B คือ โพลิงในทิศตรงข้ามกันและ C คือ ไม่มีการโพลิง



ภาพประกอบที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกกับความถี่ของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF โดยที่ A และ C โพลิงทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกัน B และ D คือ โพลิงในทิศเดียวกัน

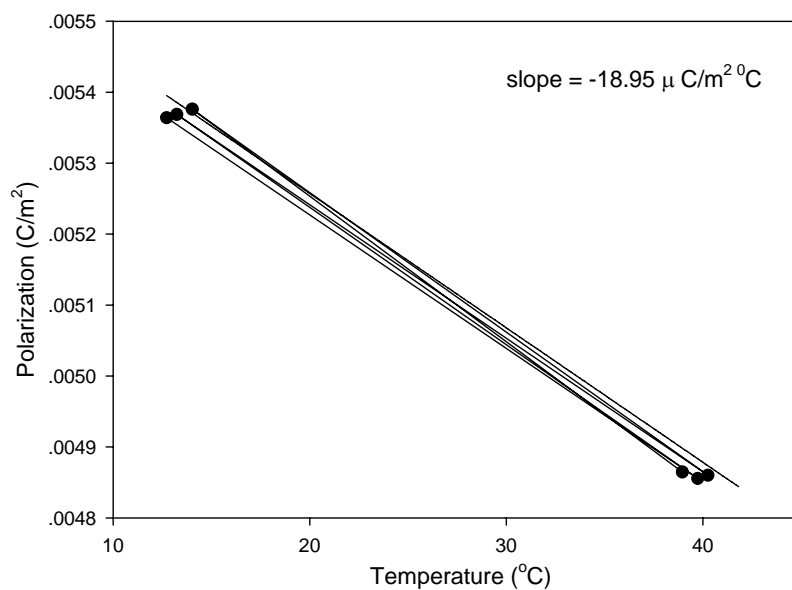
จากภาพประกอบที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกกับความถี่ในช่วงต่างๆ ป้อนให้แก่สาร พบว่าพฤติกรรมมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือในช่วงความถี่ต่ำค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าสูงและลดลงก่อนข้างคงที่ในช่วงที่ความถี่สูง เนื่องจากช่วงความถี่ต่ำเป็นความถี่ที่โมเมนต์ขั้วคู่ทางไฟฟ้าสุทธิมีค่ามากในวัสดุคอมโพสิตตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าได้ดี จึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่ามากขึ้นเช่นกัน ในขณะที่เดียวกันมีพลังงานไฟฟ้าส่วนหนึ่งสูญเสียไปในเนื้อสารด้วย ซึ่งพฤติกรรมนี้มีลักษณะคล้ายวัสดุพรุน (porous material) คือ มีการสูญเสียพลังงานไปเป็นรูปอื่นได้ง่ายขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการโพลิงในเฟสของแบเรียมไททานเตและเฟสของพอลิเมอร์ PVDF กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก พบว่าเมื่อมีการโพลิงทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน คอมโพสิต $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงที่สุด และในขณะเดียวกันมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำที่สุดในช่วงความถี่ที่ใช้ทดลอง เนื่องจากเมื่อมีการโพลิงทั้ง 2 เฟสแล้ว จะทำให้เกิดการเสริมกันของโมเมนต์ขั้วคู่ทางไฟฟ้าของแต่ละเฟสส่งผลให้โมเมนต์ขั้วคู่ทางไฟฟ้าสุทธิมีค่ามากในวัสดุ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกจะแปรผันตรงตามสัดส่วนของเซรามิกที่ใช้

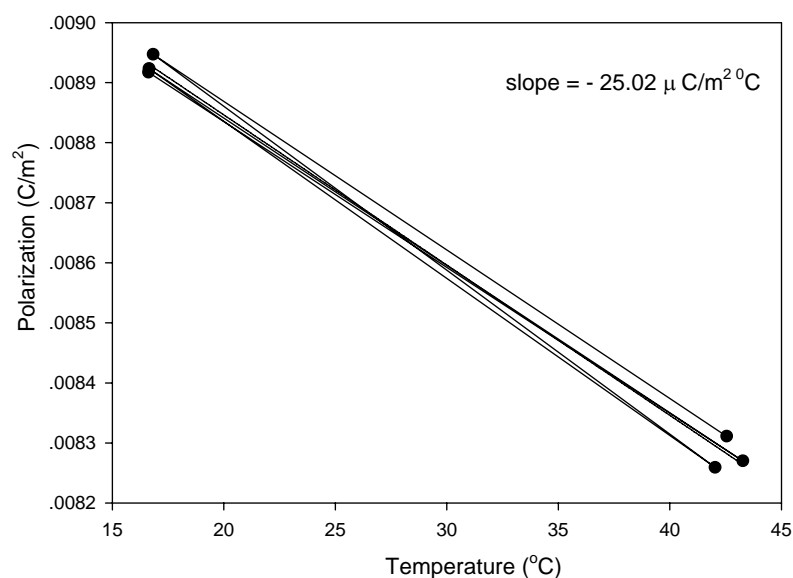
สำหรับแบบที่ไม่มีมีการโพลิง พอลิเมอร์ PVDF จะไม่เกิดการตกผลึกและเปลี่ยนเฟสเบตา ทำให้ไม่มีโมเมนต์ขั้วคู่สุทธิและไม่มีสภาพความเป็นขั้ว จึงไม่แสดงสมบัติไดอิเล็กตริกที่ดี

4.2.2 สมบัติไพโรอิเล็กตริก

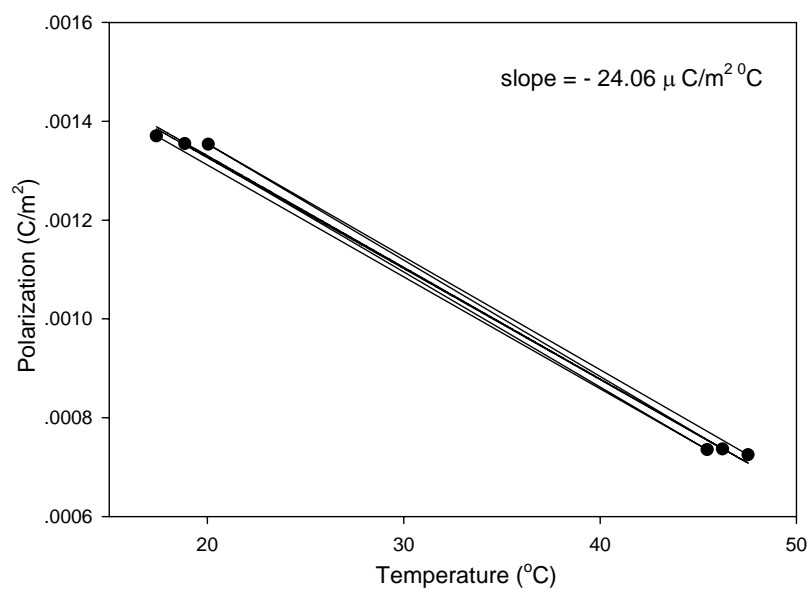
จากการศึกษาค่าคงที่ไพโรอิเล็กตริกของคอมโพสิต $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ โดยหาได้จากสมการที่ (2.16) หรือความชันของกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและโพลาริเซชัน ดังภาพประกอบที่ 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9 ตามลำดับดังนี้



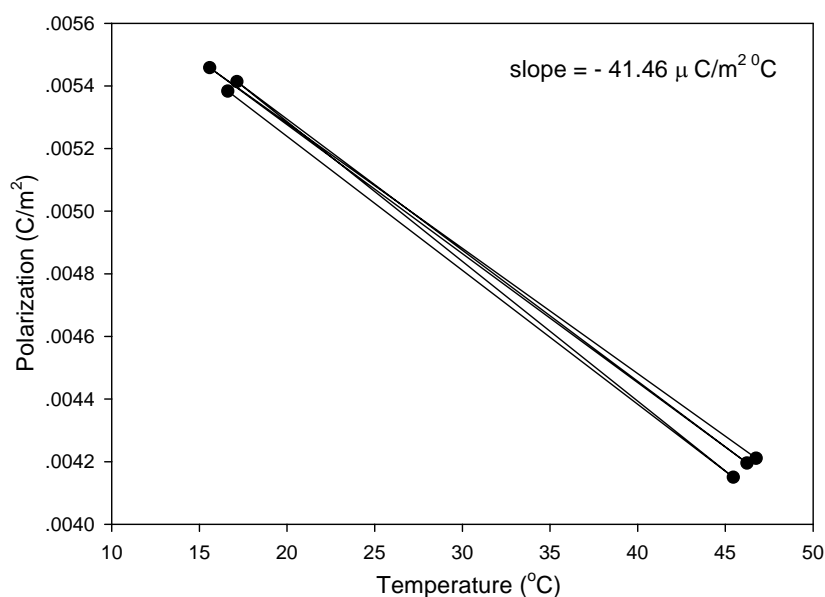
ภาพประกอบที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับอุณหภูมิของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF ที่ $\phi = 0.15$ และโพลิงทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกัน ค่าความชันของกราฟ เท่ากับ $-19 \mu\text{C}/\text{m}^2\text{°C}$



ภาพประกอบที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับอุณหภูมิของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF ที่ $\phi = 0.15$ และโพลิงทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน ค่าความชันของกราฟ เท่ากับ $-25 \mu\text{C}/\text{m}^2\text{°C}$



ภาพประกอบที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับอุณหภูมิของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF ที่ $\phi = 0.30$ และโพลิงทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกัน ค่าความชันของกราฟ เท่ากับ $-24 \mu\text{C}/\text{m}^2\text{°C}$

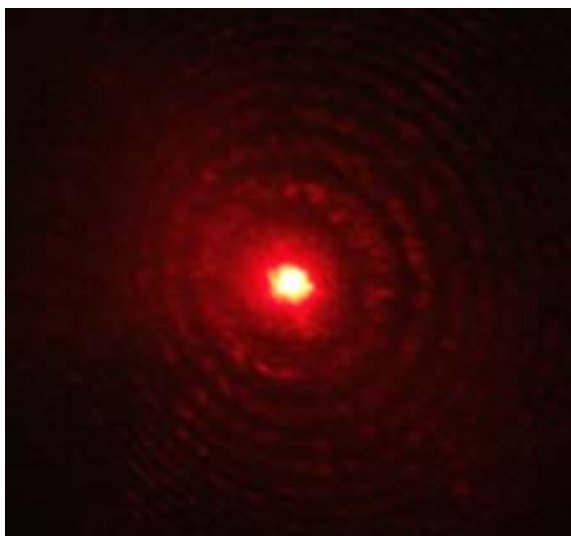


ภาพประกอบที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับอุณหภูมิของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF ที่ $\phi = 0.30$ และโพลิงทั้งสองเฟสในทิศเดียวกันค่าความชันของกราฟ เท่ากับ $-41 \mu\text{C}/\text{m}^2\text{°C}$

จากภาพประกอบที่ 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9 พิจารณาความสัมพันธ์ค่าคงที่ไพโรอิเล็กทริกที่วัดโดยวิธีของ Byer และ Roundy (Byer and Roundy, 1972) สามารถวัดค่าคงที่ไพโรอิเล็กทริกได้จากการวัดปริมาณการเปลี่ยนแปลงของประจุในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารตัวอย่างในอัตราคงที่ และหาค่าคงที่ไพโรอิเล็กทริกได้จากค่าความชันของกราฟพบว่า ค่าคงที่ไพโรอิเล็กทริกของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF ที่ $\phi = 0.15$ และ $\phi = 0.30$ และโพลิงทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน เท่ากับ 25 และ 41 $\mu\text{C}/\text{m}^2\text{C}$ ตามลำดับ และเมื่อโพลิงทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกัน มีค่าเท่ากับ 19 และ 24 $\mu\text{C}/\text{m}^2\text{C}$ ตามลำดับ ค่าคงที่ไพโรอิเล็กทริกที่ได้เป็นผลรวมที่ไม่ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว แต่มาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดเนื่องจากสมบัติไพโซอิเล็กทริกและการขยายตัวทางความร้อนของสารร่วมด้วย จะเห็นว่าค่าคงที่ไพโรอิเล็กทริกมีเครื่องหมายลบ (ค่าความชันของกราฟเป็นลบ) แสดงว่าการที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การจัดเรียงตัวของไดโพลไฟฟ้าในสารมีความไร้ระเบียบมากขึ้น

4.2.3 สมบัติไพโซอิเล็กทริก

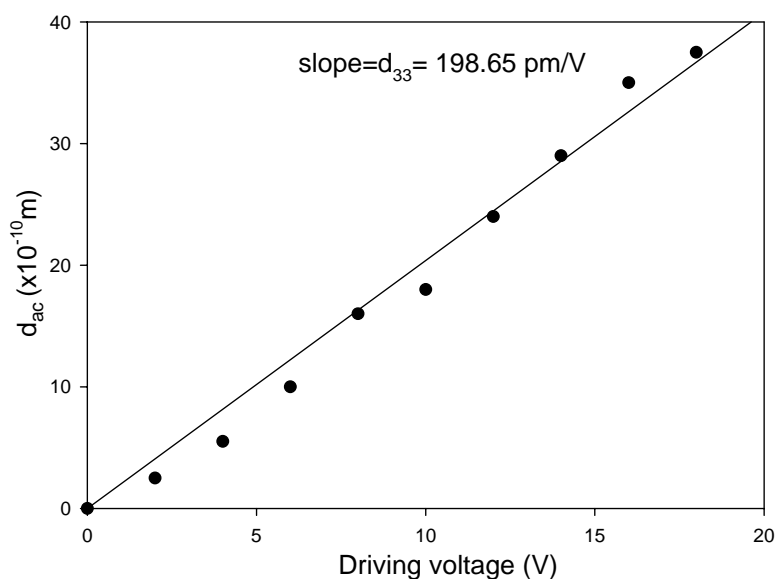
ทำการปรับเทียบระบบอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์โดยใช้สารตัวอย่าง PZT ทางการค้า ผ่านการทำขั้วไฟฟ้าและนำมายึดติดกับระบบอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์ ปรับทางเดินแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากสารตัวอย่าง และแผ่นกระจกอ้างอิงให้รวมเป็นจุดเดียวกันเพื่อให้เกิดการแทรกสอดมากที่สุดที่สอดคล้องกับสมการที่ (2.27) แสดงดังภาพประกอบที่ 4.10 เปิดวงจรป้อนสัญญาณย้อนกลับ โดยไม่มีการสั้นของ PZT พบว่าสัญญาณที่เกิดจากกรสั้นของกระจกอ้างอิงมีลักษณะดังภาพประกอบที่ 4.11 ซึ่งทำให้ได้ค่า V_{p-p} จากนั้นป้อนสัญญาณให้กับสารตัวอย่างและวัดการกระจัดผิวหน้า ภาพประกอบที่ 4.12 แสดงระยะการกระจัดต่อศักย์ไฟฟ้าที่ให้ จากกราฟความชันของกราฟคือค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกในแนวความหนาของสารตัวอย่าง



ภาพประกอบที่ 4.10 แสดงแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากสารตัวอย่าง และแผ่นกระจกอ้างอิงที่รวมเป็นจุดเดียวกันและเกิดการแทรกสอด



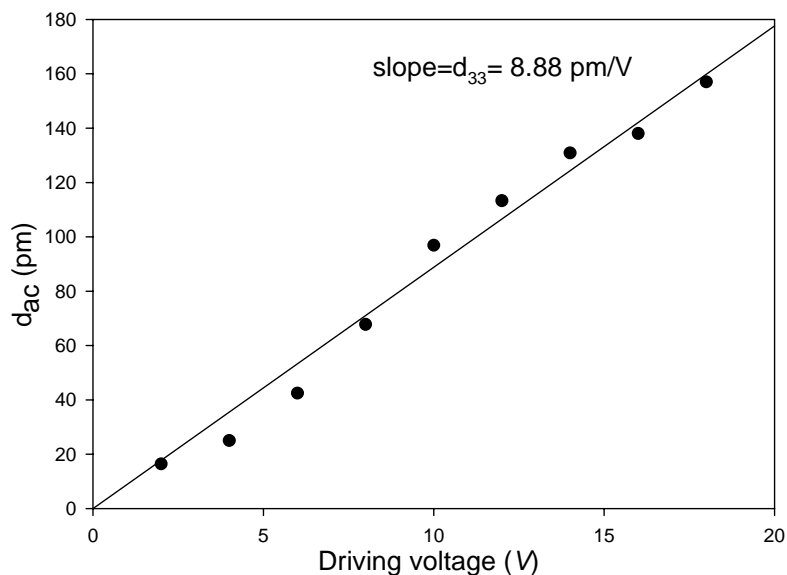
ภาพประกอบที่ 4.11 แสดงภาพบนจอออสซิลโลสโคป เป็นสัญญาณจากหัววัดแสงเมื่อมีการส่งกระจกอ้างอิงเพียงอย่างเดียวในขณะที่วงจรป้อนสัญญาณย้อนกลับกำลังทำงาน ในภาพ V_{p-p} ขณะที่ถูกควบคุมด้วยวงจรป้อนสัญญาณย้อนกลับ แอมพลิจูดของสัญญาณในภาพ คือ V_{p-p} มีค่า 0.3 V โดยประมาณ



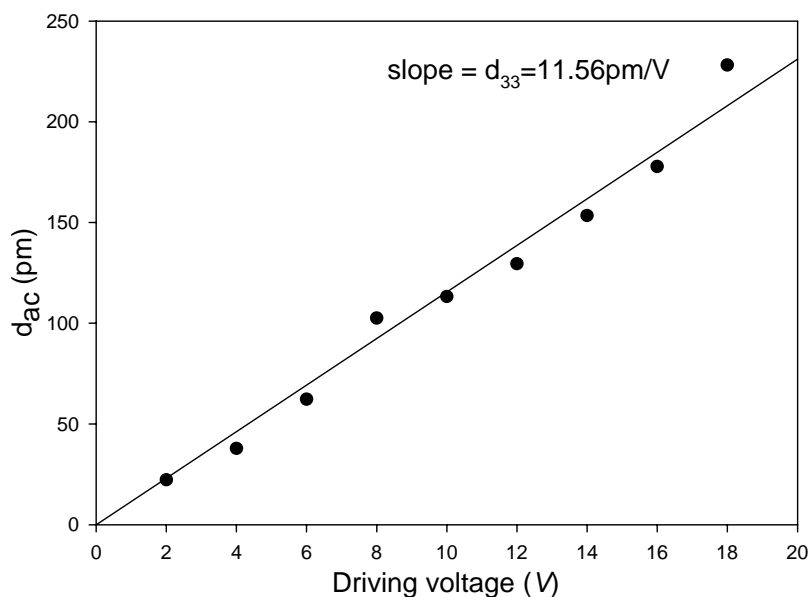
ภาพประกอบที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของ PZT ทาง การค้าที่ความถี่ 4 kHz

ความชันของกราฟคือค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกของ PZT ทางการค้า พบว่า $d_{33} = 198 \text{ pm/V}$ ในขณะที่ค่า d_{33} ของ PZT จะอยู่ในช่วง 180 – 250 pm/V (Pan and Cross, 1989)

จากนั้นศึกษาค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกของของคอมโพสิต $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ พบว่าที่ $\phi = 0.30$ เท่านั้นที่แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริก ส่วนที่ $\phi = 0.15$ ไม่แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริก อาจเป็นเพราะสารตัวอย่างมีความยืดหยุ่นสูงเพราะมีสัดส่วนของพอลิเมอร์มากเกินไป แต่อย่างไรก็ตามอาจวัดค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกได้ ถ้าสารตัวอย่างมีการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉาบแบบหมุน (spin - coater) และค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกหาได้จากสมการที่ (2.30) หรือความชันของกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงผิวกับความต่างศักย์ดังภาพประกอบที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับดังนี้



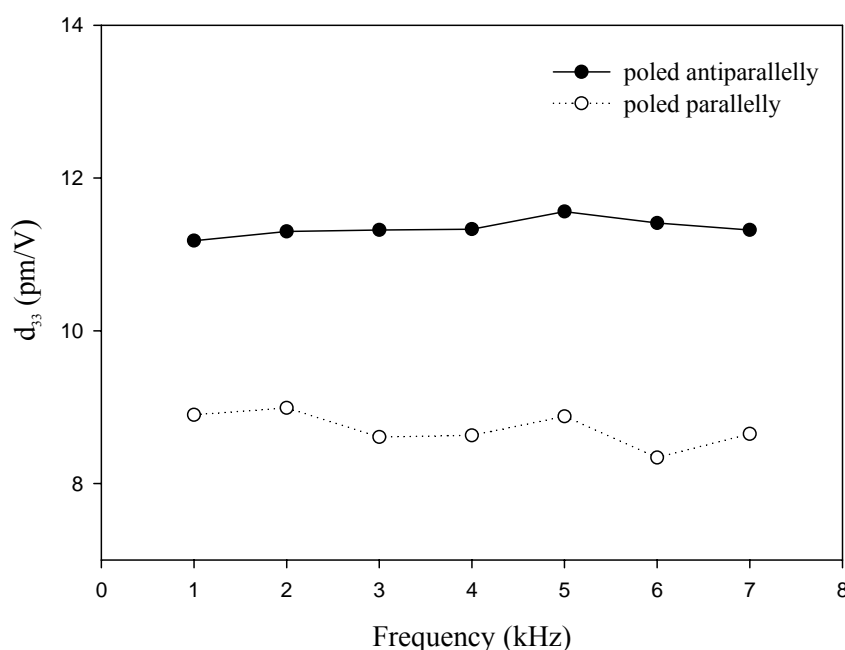
ภาพประกอบที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงผิวกับความต่างศักย์ของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF ที่ $\phi = 0.30$ และ โพลิงทั้งสองเฟสในทิศทางเดียวกันที่ความถี่ 5 kHz ค่าความชันของกราฟคือค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กตริกเท่ากับ 8.9 pm/V



ภาพประกอบที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงผิวกับความต่างศักย์ของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF ที่ $\phi = 0.30$ และ โพลิงทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกันที่ความถี่ 5 kHz ค่าความชันของกราฟคือค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กตริกเท่ากับ 11.6 pm/V

จากการศึกษาค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF $\phi = 0.30$ ที่ความถี่ 1-7 kHz พบว่าเมื่อสารตัวอย่างได้รับการโพลิ่งทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกัน มีค่าค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (d_{33}) เฉลี่ยเท่ากับ (11.4 ± 0.1) pm/V ซึ่งจะแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ดีกว่าเมื่อสารตัวอย่างได้รับการโพลิ่งทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน ที่มีค่าค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (d_{33}) เฉลี่ยเท่ากับ (8.7 ± 0.1) pm/V ดังภาพประกอบที่ 4.15

ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าคงที่ไพโรอิเล็กทริกจะพบว่าเมื่อสารตัวอย่างได้รับการโพลิ่งทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกัน จะมีค่าที่น้อยกว่าเมื่อสารตัวอย่างได้รับการโพลิ่งทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Chan และคณะ (Chan *et. al*, 1999)



ภาพประกอบที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (d_{33}) กับ ความถี่ในช่วง 1-7 kHz ของฟิล์มคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF $\phi = 0.30$ ที่ได้รับการโพลิ่งทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกัน และได้รับการโพลิ่งเฉพาะทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน

ตารางที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบระหว่าง $\phi = 0.15$ กับ $\phi = 0.30$ และค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีอยู่ในวงเล็บ

BaTiO ₃ /PVDF at 25 °C	$\phi = 0.15$			$\phi = 0.30$		
	A	B	C	A	B	C
ϵ_r (1 kHz)	0.80	9.75	8.77	0.80	11.48	9.77
$\tan \delta$ (1 kHz)	0.43	0.20	0.30	0.48	0.21	0.31
p ($\mu\text{C}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)	-	25	19	-	41	24
d_{33} ($\times 10^{-12} \text{ m/V}$)	-	*	*	-	8.7	11.6
c (J/kg °C)	866.2 (2085.1)	-	-	3021.7 (1847.5)	-	-
ρ ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	2.52 (2.39)	-	-	3.21 (3.04)	-	-

* ไม่สามารถวัดได้

เมื่อ A ไม่มีการโพลง

B โพลงทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน

C โพลงทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกัน

จากตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาปริมาณต่างที่ได้ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก, ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก และค่าคงที่ไพโรอิเล็กตริก พบว่า จะขึ้นกับปัจจัย 2 ปัจจัย ได้แก่ สัดส่วนของเซรามิกที่ใช้ และกระบวนการโพลงในแต่ละเฟส ส่วนค่าคงที่ไพโรโซอิเล็กตริก ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ว่าขึ้นกับสัดส่วนของเซรามิกที่ใช้ เนื่องจากสารตัวอย่างไม่มีการตอบสนองทางไพโรโซอิเล็กตริกที่ ϕ เท่ากับ 0.15 ส่วนค่าความจุความร้อนที่ได้จากการทดลองและคำนวณทางทฤษฎีนั้นมีความคลาดเคลื่อนที่สูงมาก อาจเป็นผลมาจากการขยายตัวของเฟสพอลิเมอร์ในระหว่างการวิเคราะห์ผล แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองและคำนวณทางทฤษฎีนั้น มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีของ 0–3 คอมโพสิต จากค่าต่างๆ ที่ได้ จะเห็นได้ว่า สามารถนำคอมโพสิตนี้ มาประยุกต์ใช้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการสิ่งประดิษฐ์น้ำหนักเบา ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (ดูภาคผนวก ฉ)