

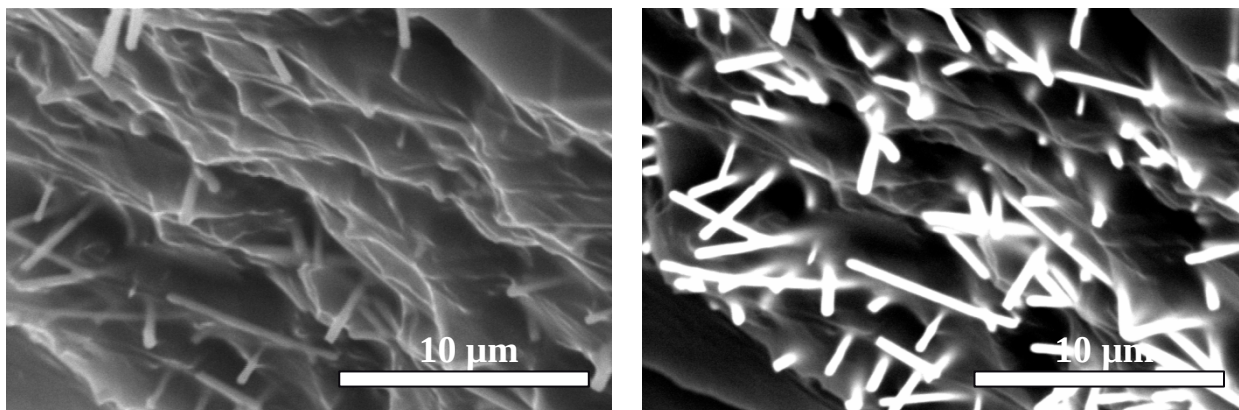
บทที่ 4

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

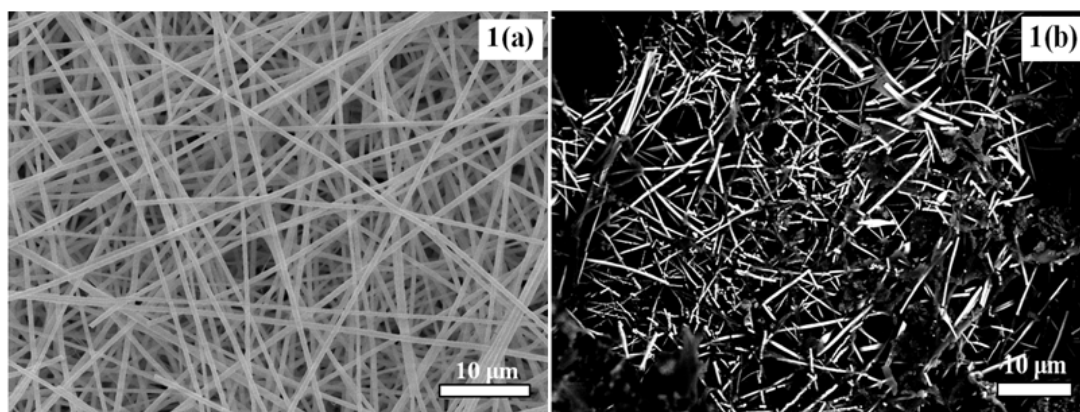


ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคภาพตัดขวางของคอมโพสิต PZ-PVDF ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (ก) แบบปกติ และ (ข) ที่ได้จากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน

4.1.2 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตของเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (PZ-CNT-PVDF)

หลังจากนำเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงไปเตรียมเป็นคอมโพสิตกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์และแท่งนาโนคาร์บอน จากนั้นจึงนำคอมโพสิตที่ได้

ไปทำการ ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาค ของเส้นใยเลดเซอร์โคเนต และคอมโพสิตที่เตรียมได้ จากภาพที่ 4.2(ก) แสดงลักษณะเส้นใยเลดเซอร์โคเนต ที่ได้จากการกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงพบว่า เส้นใยที่ได้เป็นเส้นใยที่มีความต่อเนื่อง ภาพที่ 4.2(ข) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่ได้จากการกระเจิงกลับ ของอิเล็กตรอนของคอมโพสิตโดยเกิดเป็น ของผสมสามเฟสโดยเฟสของ PZ และ CNT จะแสดงสีขาว ส่วนเฟสของ PVDF แสดงสีเทา จากรูปแสดงให้เห็นว่า คอมโพสิต ที่ได้เชื่อมโยงกันแบบ 3-3

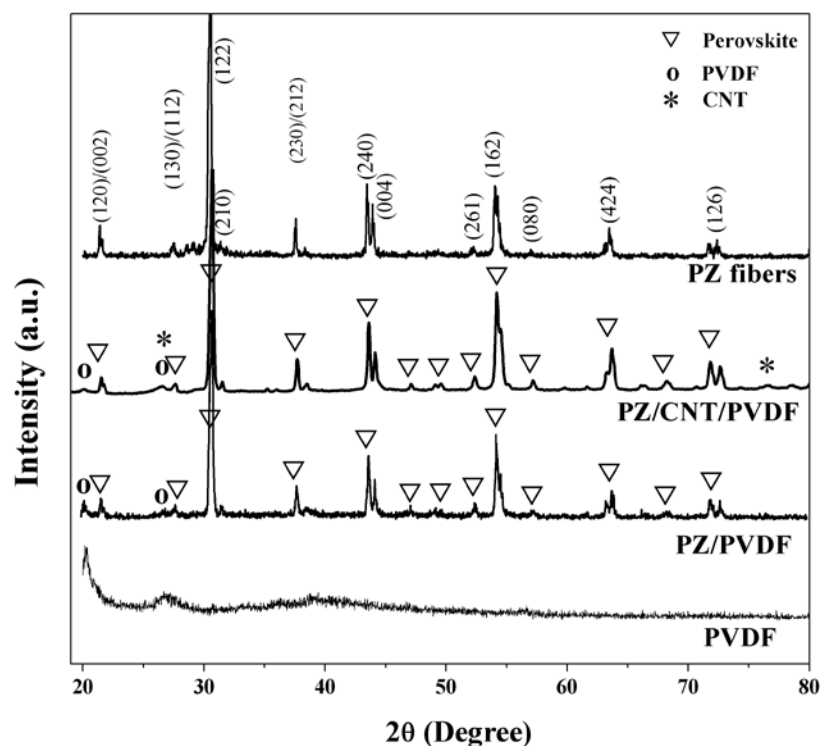


ภาพที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของ (ก) เส้นใยเลดเซอร์โคเนต และ (ข) คอมโพสิต PZ-CNT-PVDF ที่ได้จากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน

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 -phase) โดยเฟสอัลฟาถือว่าเป็นเฟสที่แสดงความเป็นผลึกที่เด่นชัดที่สุด ขณะที่พีคที่มุม $2\theta = 20^\circ$ บ่งบอกถึง การรวมการเลี้ยวเบนในระนาบ (110) และ (200) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเฟสเบต้า (β -phase) โดยเฟสเบต้าจะเป็นตัวแสดงความเป็นเฟสไอโซอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริก และ เพอโรอิเล็กทริก ซึ่งเป็นรูปแบบที่ทำให้ PVDF แสดงศักยภาพในการนำไปใช้งานในอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่าง PZ-PVDF ที่เตรียมได้เป็นคอมโพสิต ที่ประกอบด้วย 2 เฟส ได้แก่ เฟสของ เซรา มิก เลด เซอร์ โค เนต และ เฟสของ พอลิ เมอร์ PVDF โดยจากรูปแบบสเปกตรัมของคอมโพสิต PZ-CNT-PVDF ยังแสดงพีค (002) ที่มุม 26° และ 77° ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกของกราฟิต ดังนั้นจากข้อมูลเหล่านี้ จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่าง

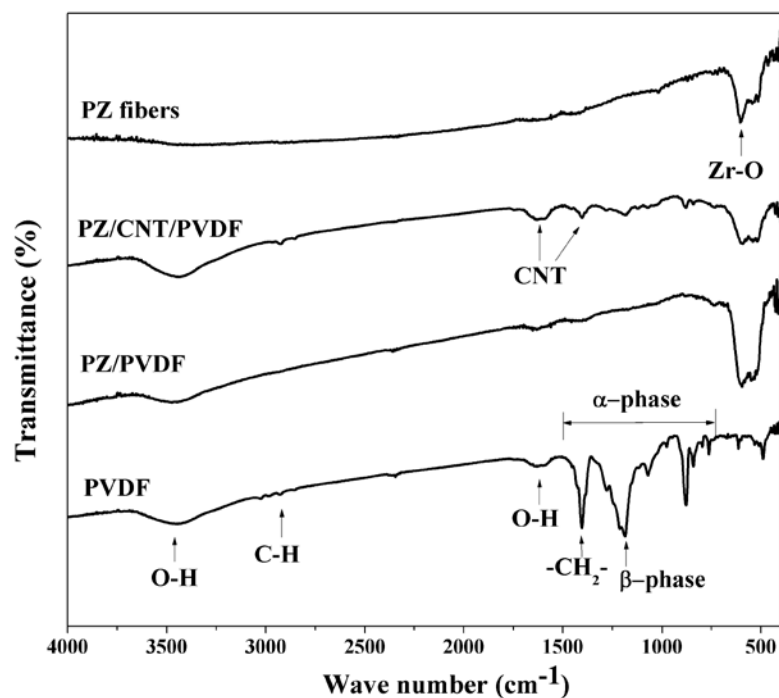
ที่เตรียมได้เป็นคอมโพสิตที่ประกอบด้วย 3 เฟส ได้แก่ เฟสของเซรามิกเลดเซอร์โคเนต เฟสของพอลิเมอร์ PVDF และเฟสของแท่งนาโนคาร์บอน



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

4.1.4 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-CNT-PVDF ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่น $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ 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 $1,450\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นของหมู่เอทิลฟาทิก CH_2 ของพอลิเมอร์ PVDF โดยพบการสั่นแบบสมมาตรและไม่สมมาตรของหมู่ CH ของ PVDF ที่ 2900 cm^{-1} และพบแถบการดูดกลืนที่ 760, 800, 860, 980 และ 1400 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกถึงเฟสของผลึกอัลฟา (α crystal phase) ขณะที่พีคที่ประมาณ 1220 cm^{-1} บ่งบอกถึงเฟสเบต้าของหมู่ไวนิลลิตินของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังพบพีคที่ประมาณ 1400 และ 1700 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการสั่นของ CNT ในคอมโพสิตของ PZ-CNT-PVDF อีกด้วย

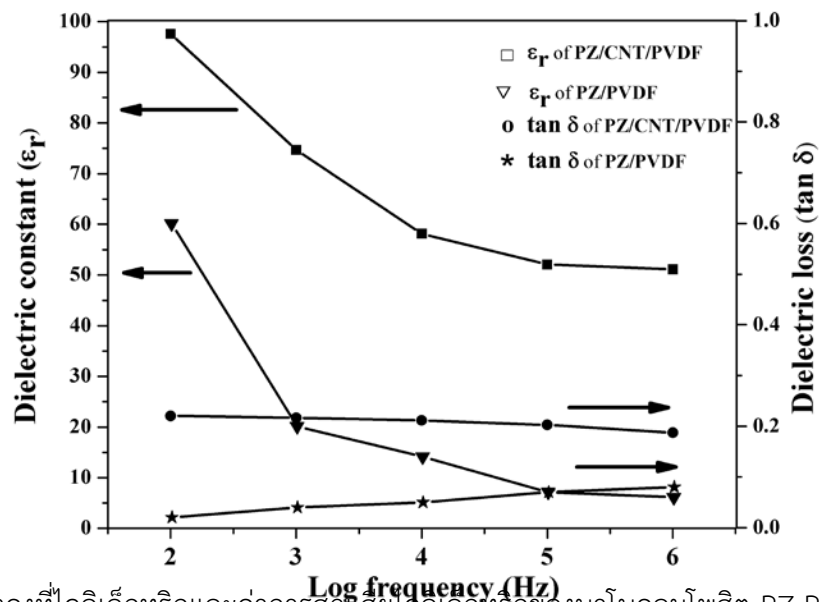


ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมการส่องผ่านรังสีอินฟราเรดของคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-CNT-PVDF

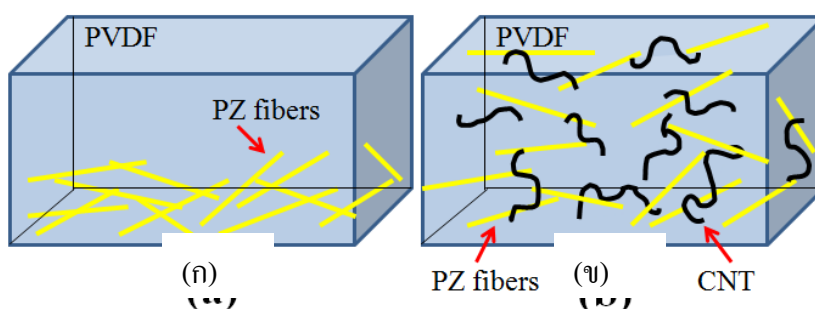
4.1.5 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก

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 เกิดการกระจายตัวได้ดีและสม่ำเสมออยู่ภายในคอมโพสิตได้ดีกว่าระบบที่ไม่มี CNT (ภาพที่ 4.6(ก)) นอกจากนี้โครงข่ายของ CNT ยังทำให้เกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าซึ่งสามารถลดความต้านทานภายในของวัสดุนาโนคอมโพสิต ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าของคอมโพสิตมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนโดยปริมาตรและโครงสร้างการเรียงติดกันของเฟสกระจายตัวของสารตัวเติม จึงส่งผลให้ตัวอย่างที่มีการเติม CNT มีค่าไดอิเล็กทริกที่สูงกว่า อีกทั้งยังมีการศึกษาวิจัยของ Dang และคณะ พบว่าคอมโพสิตที่มี CNT เป็นสารตัวเติมจะใช้สัดส่วนของ CNT เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคที่น้อยกว่าคอมโพสิตที่เติมสารตัวเติมทั่วไปอย่างเช่น อนุภาคโลหะหรือคาร์บอนแบล็ค (carbon black) เนื่องจากสารตัวเติมที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างสูงจะง่ายต่อการเกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคที่สัดส่วนโดยปริมาตรที่ต่ำ ดังนั้นจึงสามารถใช้ CNT เป็นวัสดุกระจายตัวและตัวนำไฟฟ้าในวัสดุนาโนคอมโพสิตได้

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของคอมโพสิต PZ-CNT-PVDF ยังมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.02 และมีค่าสูงสุดน้อยกว่า 0.6 ดังภาพที่ 4.5 ซึ่งถือได้ว่าเป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้งาน



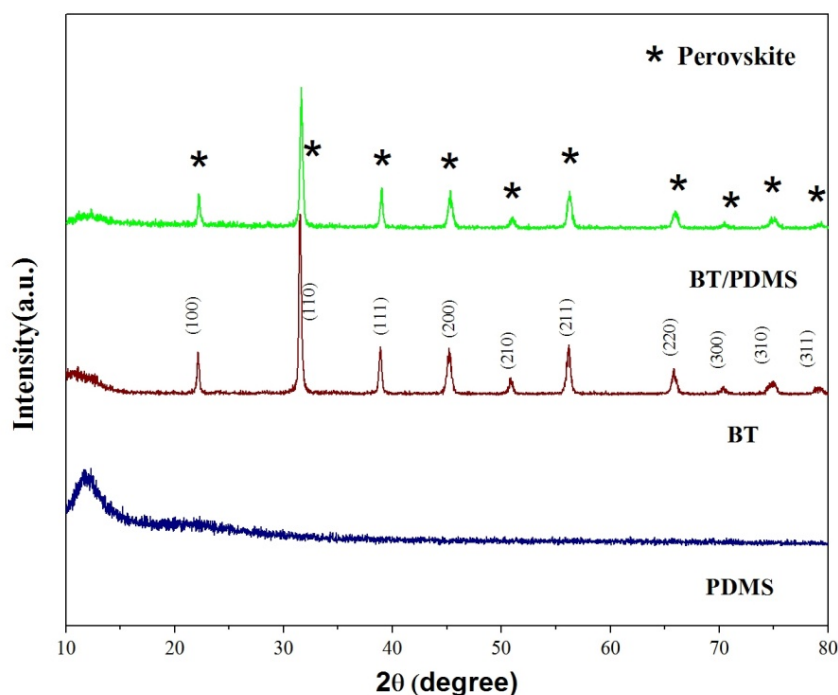
ภาพที่ 4.5 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของนาโนคอมโพสิต PZ-PVDF เทียบกับ PZ-CNT-PVDF



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

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

4.2.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิไคเมทิลซิลอกเซน (BT-PDMS) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



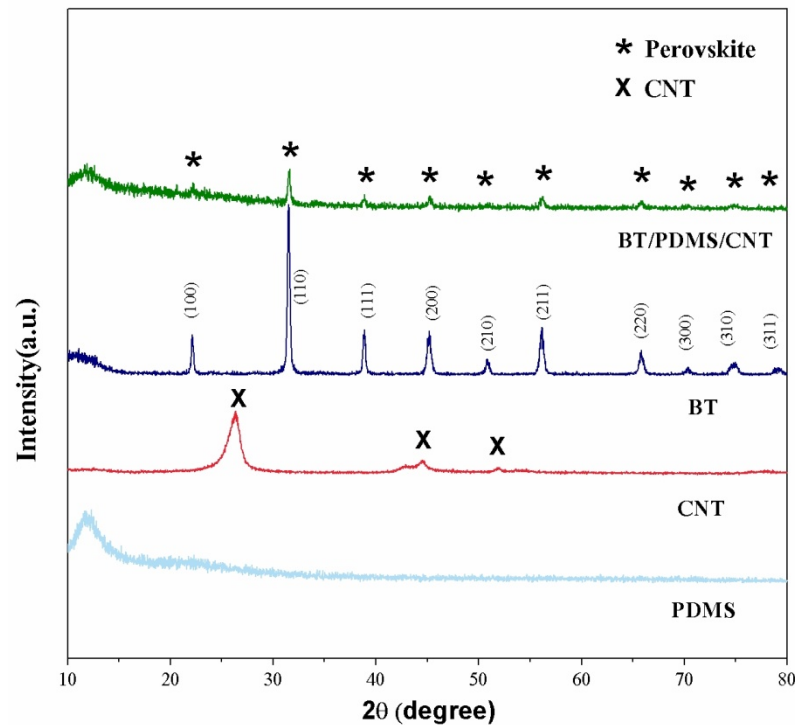
ภาพที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต BT-PDMS

เมื่อนำวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิไคเมทิลซิลอกเซน มาทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.7 โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุผสม มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BaTiO_3 ตามไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 05-0626 โดยพบพีค 2θ 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 โดยไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของพอลิไคเมทิลซิลอกเซน เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นอสัณฐานจึงไม่สามารถสะท้อนระนาบผลึกได้ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสารตัวอย่างที่ได้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม และไม่มีเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้น

4.2.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิไคเมทิลซิลอกเซนที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

จากการนำวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิไคเมทิลซิลอกเซนที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอนมาทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.8 เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต BT-PDMS-CNT โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตมีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BaTiO_3 ตามไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 05-0626 โดยมีพีค 2θ ขึ้นที่มุม 22.261° 31.645° 38.886° 45.375° 51.097° 56.249° 66.118° 70.657° 75.158° และ 79.466° ซึ่งสอดคล้อง

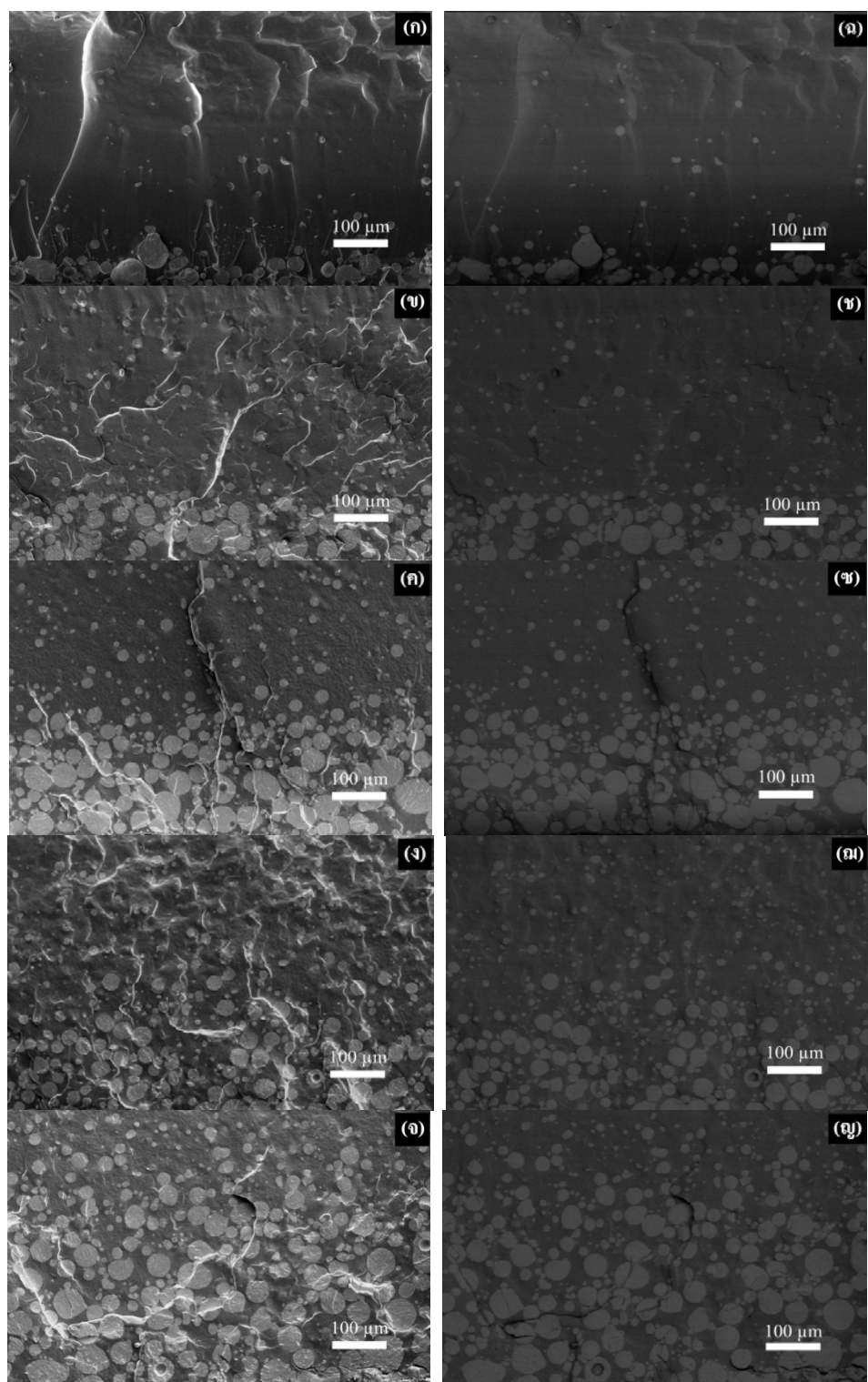
กับระนาบ (100), (110), (111), (200), (210), (211), (220), (300), (310) และ (311) ซึ่งมีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์แบบเตตระโกนอล โดยไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PDMS เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นอสัณฐานจึงไม่สามารถสะท้อนระนาบผลึกได้ และนอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของแท่งนาโนคาร์บอน มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ C ตามไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 75-1621 จะพบพีคที่มุม 2θ ขึ้นที่มุม 26.228, 44.365 และ 50.381 ° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (002), (101) และ (102) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสารตัวอย่างที่ได้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม และไม่มีเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้น



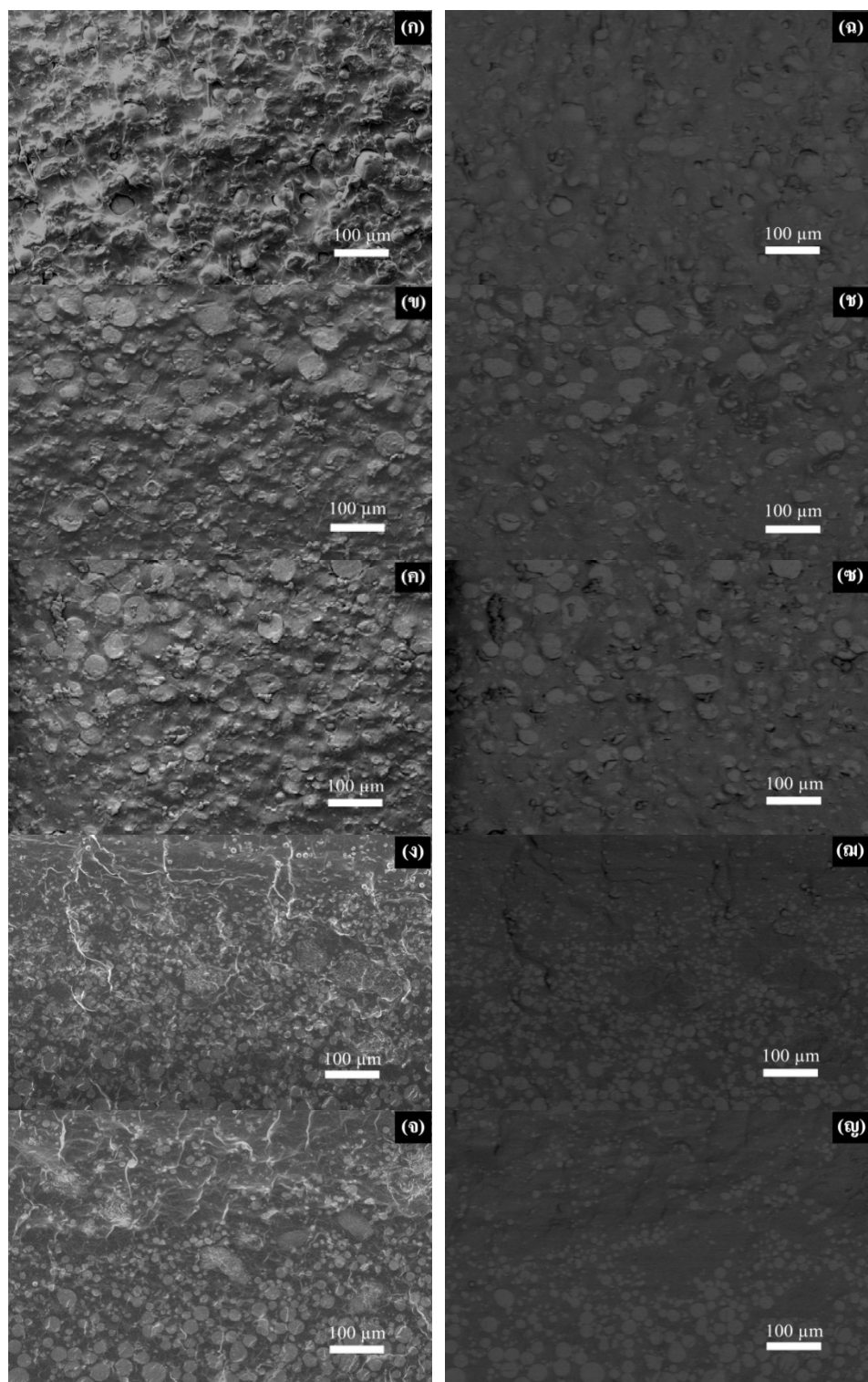
ภาพที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต BT/PDMS/CNT

4.2.3 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิไธเมทิลไซลอกเซน (BT-PDMS)

เมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสมของแบเรียมไททาเนตกับพอลิไธเมทิลไซลอกเซนที่เตรียมได้จากการนำไปหักในไนโตรเจนเหลว 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 โดยส่วนมืดแสดงเฟสของพอลิไธเมทิลไซลอกเซน ส่วนสว่างแสดงเฟสของแบเรียมไททาเนต ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของแบเรียมไททาเนตมากขึ้นจะเกิดการตกตะกอน และอนุภาคของแบเรียมไททาเนต มีการเกาะตัวกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งอนุภาคของแบเรียมไททาเนตที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดอนุภาคเพียง 50 นาโนเมตรเท่านั้น แต่จากภาพจะเห็นได้ว่าส่วนสว่างมีขนาดถึงระดับไมโครเมตร



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)



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

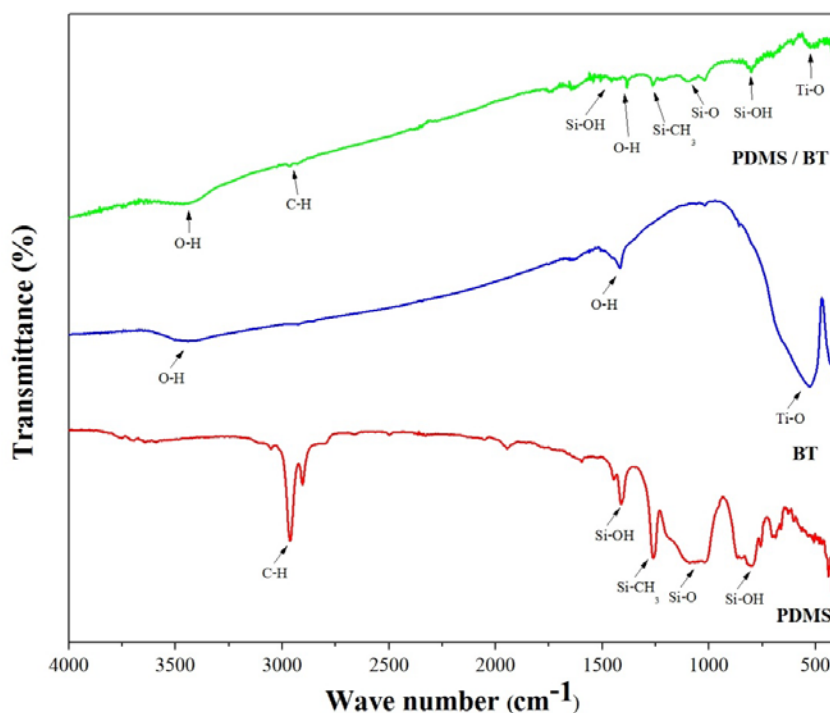
4.2.4 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตแบบเรียมไททานีตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

เมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสม แบบเรียมไททานีตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซนและมีการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอนที่เตรียมได้จากการนำไปหักในไนโตรเจนเหลวมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (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) โดยการเติมแท่งนาโนคาร์บอนเข้าไปนั้นเพื่อต้องการให้แบบเรียมไททานีตเกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น และไม่เกิดการตกตะกอน ซึ่งผลที่ได้จากการส่องภาพ SEM จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณแท่งนาโนคาร์บอนมากขึ้น จะทำให้แบบเรียมไททานีตเกิดการกระจายตัวมากยิ่งขึ้น และการตกตะกอนน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบภาพ (ก),(ฉ) ที่มีการเติมแท่งนาโนคาร์บอน 1% และภาพ (จ),(ญ) ที่มีการเติมแท่งนาโนคาร์บอนที่ 5 % จะเห็นได้ชัดเจนว่าอนุภาคแบบเรียมไททานีตมีขนาดลดลง โดยที่แท่งนาโนคาร์บอน 1% อนุภาคแบบเรียมไททานีตจะมีขนาด 30-60 ไมโครเมตร แต่เมื่อมีการเติมแท่งนาโนคาร์บอน 5% ขนาดอนุภาคของแบบเรียมไททานีตจะมีขนาดประมาณ 10-20 ไมโครเมตร

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

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

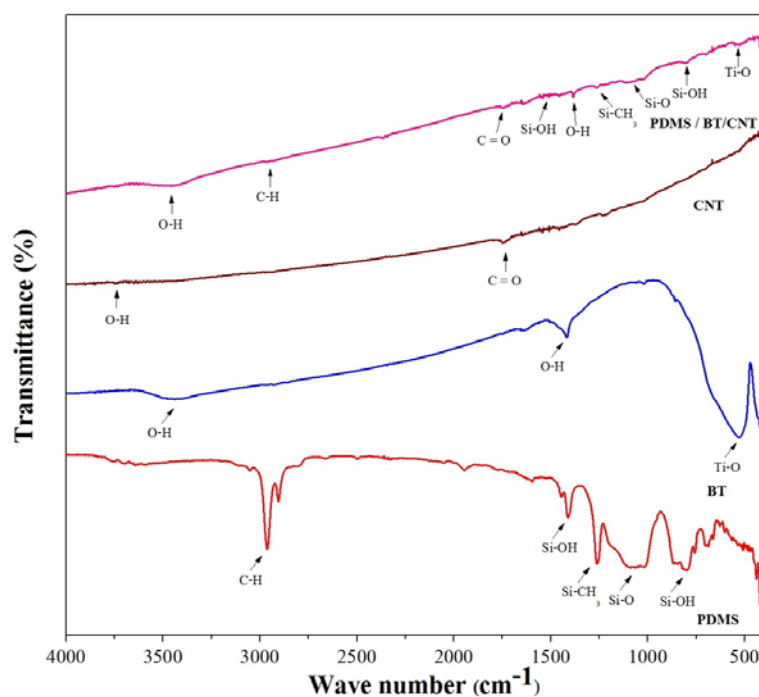
จากภาพที่ 4.11 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุผสมแบบเรียมไททานีตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน พบว่าสเปกตรัมแสดงพีคที่เลขคลื่นประมาณ 3400 cm^{-1} 1630 cm^{-1} และ 1384 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับพีคการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) อันเนื่องมาจากความชื้นและสารออกแกนิคส์ที่อยู่ในสารละลายพอลิเมอร์ และพบพีคการสั่นของ Ti-O (stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ 539 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารแบบเรียมไททานีต 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} โดยแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในพอลิไดเมทิลซิลอกเซน แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมดังกล่าวประกอบด้วย 2 เฟส คือ เฟสของเซรามิกแบบเรียมไททานีตและเฟสของพอลิเมอร์พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ผสมกันอยู่โดยไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม



ภาพที่ 4.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของคอมโพสิต BT-PDMS

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

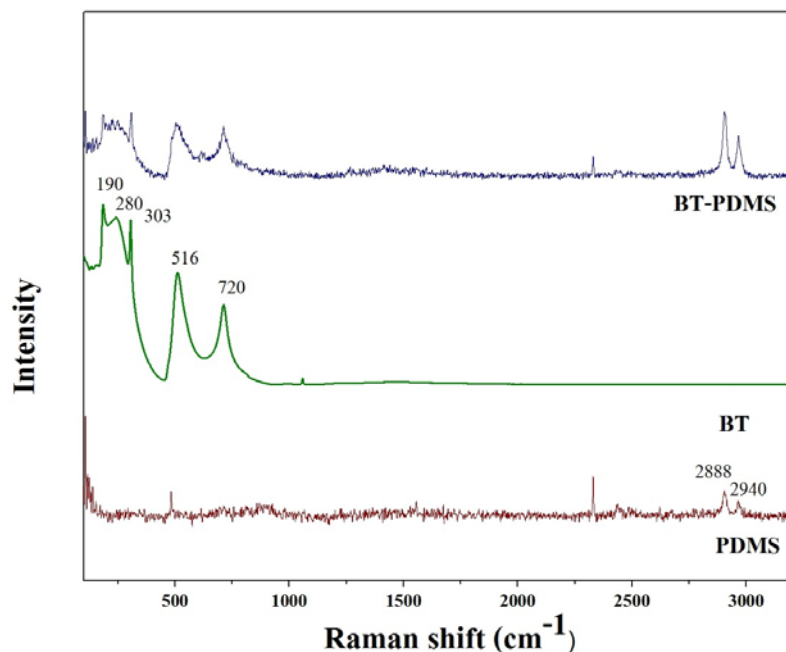
จากนั้นทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของวัสดุผสมแบบเรียมไททานเต พอลิไดเมทิลไซลอกเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน จากภาพที่ 2.6 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุผสมแบบเรียมไททานเต พอลิไดเมทิลไซลอกเซนและแท่งนาโนคาร์บอน มีแนวโน้มเดียวกับของวัสดุผสมแบบเรียมไททานเตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนคือพบพีคที่เลขคลื่นประมาณ 3400 cm^{-1} และเลขคลื่นประมาณ 1630 cm^{-1} และที่เลขคลื่นประมาณ 1384 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) อันเนื่องมาจากความชื้นและสารออกแกนิกส์ ในสารละลายพอลิเมอร์ และพบพีคการสั่นของ (Ti-O stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ 539 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารแบบเรียมไททานเต นอกจากนี้ยังพบพีคการสั่นของพันธะภายในพอลิเมอร์ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ $1000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ โดยพบพีคการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 2963 cm^{-1} ของ (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} โดยแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในพอลิไดเมทิลไซลอกเซน นอกจากนี้พบว่าพบพีคการสั่นของพันธะ (C = O stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ 1713 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะภายในแท่งนาโนคาร์บอน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมดังกล่าวประกอบด้วย 3 เฟส คือ เฟสของเซรามิกแบบเรียมไททานเต เฟสของพอลิเมอร์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน และเฟสของแท่งนาโนคาร์บอน ผสมกันอยู่โดยไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม



ภาพที่ 4.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุผสมแบบเรียมไททานเต พอลิไดเมทิลซิลอกเซนและแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

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

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

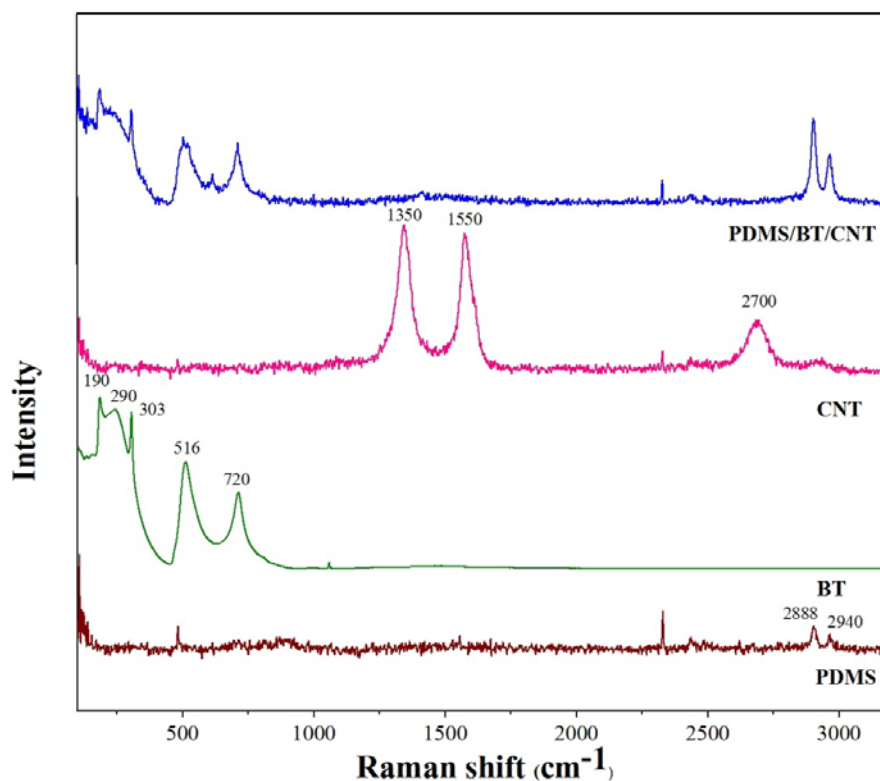


ภาพที่ 4.13 รามานสเปกตรัมของคอมโพสิต BT-PDMS

จากภาพที่ 4.13 แสดงลักษณะของรามานสเปกตรัมของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน พบพีคของแบเรียมไททาเนตเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 190, 280, 303, 516 และ 720 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบสเปกตรัมของ BaTiO_3 (P4mm) แบบเตตระโกนอล คือ $4\text{E}(\text{TO} + \text{LO}) + 3\text{A}_1(\text{TO} + \text{LO}) + \text{B}_1(\text{TO} + \text{LO})$ โดยพีคที่เลขคลื่นประมาณ 190 cm^{-1} สอดคล้องกับรูปแบบ (TO) พีคที่เลขคลื่นประมาณ 140, 303 และ 640 cm^{-1} สอดคล้องกับรูปแบบ $\text{E}(\text{LO})$ พีคที่เลขคลื่นประมาณ 280 cm^{-1} แสดงรูปแบบ $\text{A}_1(\text{TO})$ และ $\text{E}(\text{TO})$ พีคที่เลขคลื่นประมาณ 520 cm^{-1} แสดงรูปแบบ $\text{E}(\text{TO})$ และ $\text{A}_1(\text{TO})$ ส่วนพีคที่เลขคลื่นประมาณ 720 cm^{-1} สอดคล้องกับรูปแบบ $\text{A}_1(\text{LO}) + \text{E}(\text{LO})$ นอกจากนี้ยังแสดงพีคที่เลขคลื่นประมาณ 303 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบ $\text{E}(\text{3TO}) + \text{E}(\text{2LO}) + \text{B}_1$ 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)

หลังจากนั้นนำคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต พอลิไดเมทิลซิลอกเซนและแท่งนาโนคาร์บอน ที่เตรียมได้มาทำการทดสอบโครงสร้างของสารด้วยเทคนิครามาน เพื่อยืนยันโครงสร้างของสารที่เกิดขึ้น โดยทำการวัดในช่วง 100 – 3200 cm^{-1} ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะดังในภาพที่ 4.14



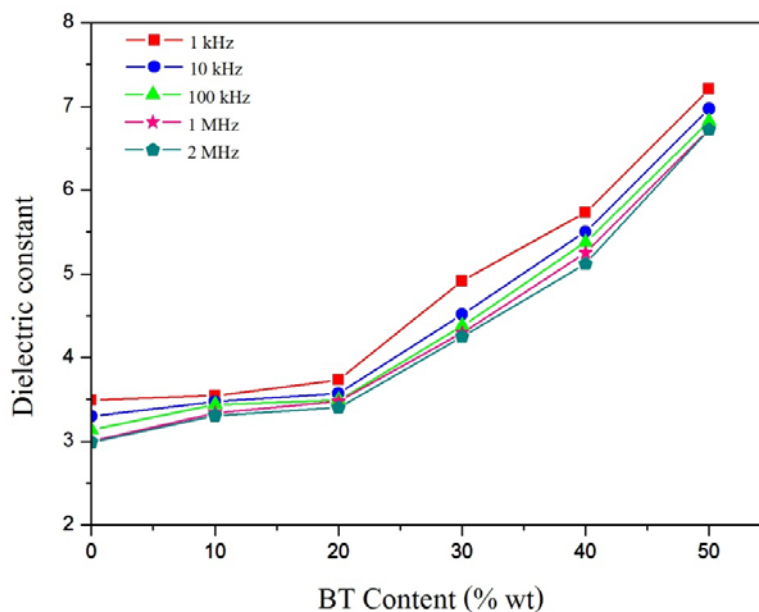
ภาพที่ 4.14 รามานสเปกตรัมของคอมโพสิต BT-PDMS-CNT

จากภาพที่ 4.14 แสดงลักษณะของสเปกตรัมของโครงสร้างของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต พอลิไดเมทิลซิลอกเซนและแท่งนาโนคาร์บอน การแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต พอลิไดเมทิลซิลอกเซนและแท่งนาโนคาร์บอน มีแนวโน้มเดียวกับของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน 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] และพบพีคของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน เกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 2888 cm^{-1} และ 2940 cm^{-1} แต่จะพบพีคของแท่งนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 1350, 1550, 2700 cm^{-1} โดยแสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างที่ได้เป็นวัสดุผสมที่ประกอบด้วย 3 เฟส คือเฟสของเซรามิกแบเรียมไททาเนต เฟสของพอลิเมอร์พอลิไดเมทิลซิลอกเซน และเฟสของแท่งนาโนคาร์บอน ผสมกันอยู่โดยไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเป็นวัสดุผสม ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ผลที่ได้จาก FT-IR

4.2.9 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (BT-PDMS)

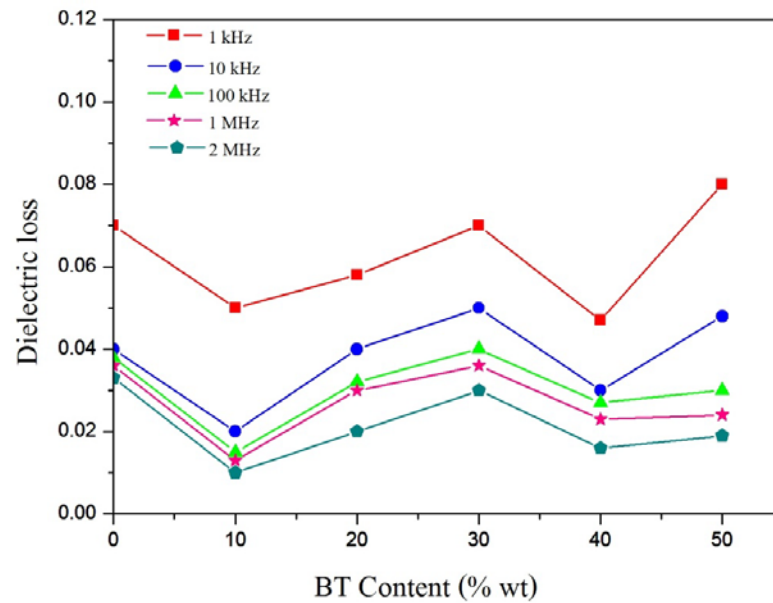
เมื่อพิจารณาที่ความถี่การวัด 1 kHz PDMS มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 3.49 และเมื่อเพิ่มปริมาณของแบเรียมไททาเนต ส่งผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ 7.406

ในวัสดุผสมที่มีปริมาณของแบเรียมไททาเนต 50% สำหรับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่าค่าความสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่ได้ค่อนข้างต่ำ อยู่ในช่วง 0.01-0.08 เท่านั้น ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน



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

จากผลการตรวจสอบอิมพีแดนซ์ของค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่เตรียมได้ พบว่าวัสดุผสมในทุกอัตราส่วนแสดงพฤติกรรมทางไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่คล้ายคลึงกัน โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.15 ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกพบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.16



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

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิตทางทฤษฎีโดยการคาดการณ์จากสมการที่แตกต่างกันเพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายค่าไดอิเล็กทริกที่ได้จากการทดลองดังนี้

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)

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

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

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_m \left[1 + \frac{v_f(\varepsilon_i - \varepsilon_m)}{\varepsilon_m + n(1 - v_f)(\varepsilon_i - \varepsilon_m)} \right]$$

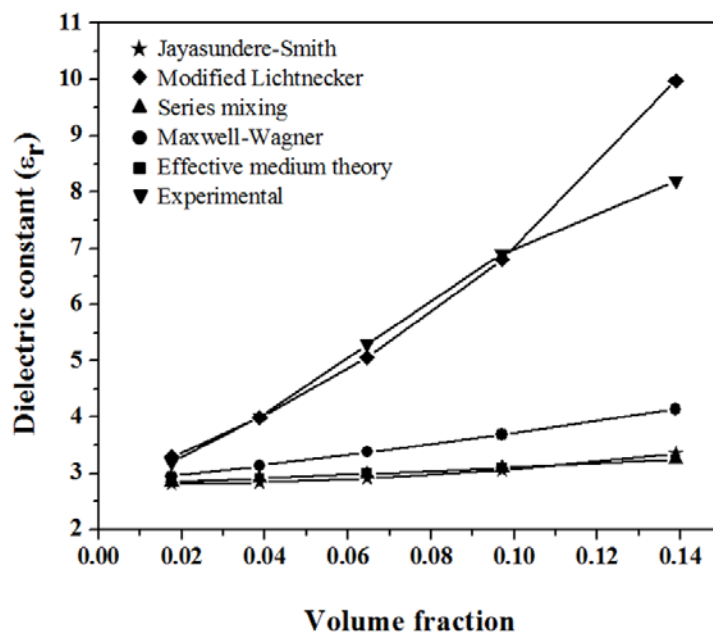
เมื่อ	ε_{eff}	คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต
	ε_i	คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารตัวเติม
	ε_m	คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเมทริกซ์
	n	คือตัวแปรทางสัญญาณวิทยา
	v_f	คือสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิก

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 แบเรียมไททาเนตอยู่ในรูปของผงผลึก ดังนั้นสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิตดังกล่าวอาจแตกต่างจากในรูปแบบบิลค์เซรามิก เนื่องจากการไม่มีอยู่ของขอบเกรนและความหนาแน่นของโดเมนที่ลดลงเนื่องจากการลดขนาดอนุภาคจะส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกของแบเรียมไททาเนตลดลง นอกจากนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคหรือขนาดเกรนอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการยากที่จะได้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของผงผลึกที่ถูกต้อง ในปี 2004 Ohno และคณะ ได้รายงานสมบัติทางไดอิเล็กทริกของอนุภาคนาโน โดยทำการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากสเปกตรัมของรามานโดยการใช้ความสัมพันธ์แบบ LST จากเทคนิคดังกล่าวพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 1254.6 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าดังกล่าวในการคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต BT-PDMS โดยใช้สมการทางทฤษฎีต่างๆ ดังภาพที่ 4.17



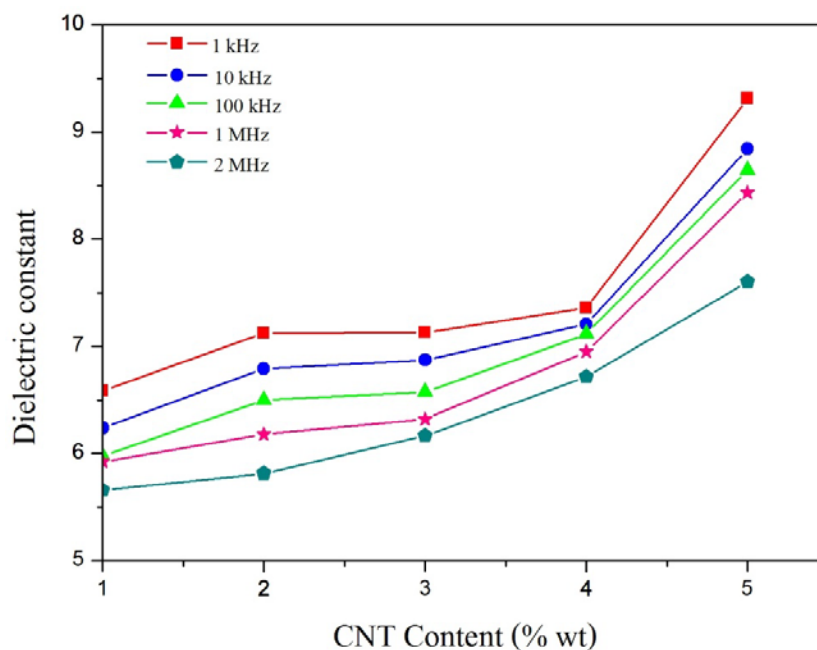
ภาพที่ 4.17 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต BT-PDMS ที่ขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณจากสมการต่างๆ

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

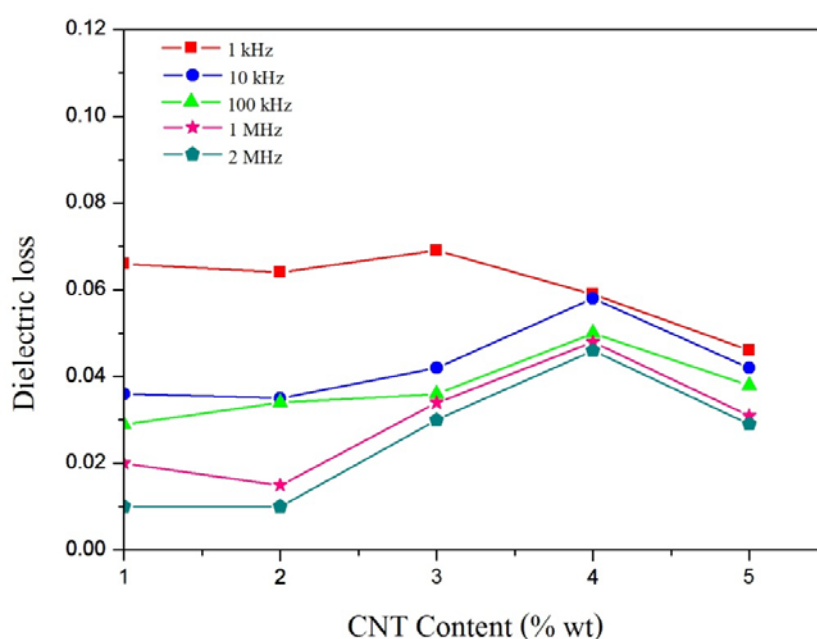
4.2.10 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตแบบเรียมไททานเตกับพอลิโดเมทิลซิลลอกเซนที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

เนื่องจากการทดลองพบว่า วัสดุผสมแบบเรียมไททานเตที่ 50% กับพอลิโดเมทิลซิลลอกเซน จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุด จึงได้นำวัสดุผสมสูตรนี้ไปการทดลองต่อโดยการผสมแท่งนาโนคาร์บอน ลงไปด้วยอัตราปริมาตรที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ความถี่การวัด 1 kHz พบว่าวัสดุผสมที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาตรของแท่งนาโนคาร์บอน จะส่งผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ 9.134 ในวัสดุผสมที่มีปริมาตรของแท่งนาโนคาร์บอน 5% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen-Rong Yu ได้รายงานไว้ว่าวัสดุผสมจาก พอลิเอทิลีน แบบเรียมไททานเตและแท่งนาโนคาร์บอน จะมีค่าไดอิเล็กทริกที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาตรของทั้งแบบเรียมไททานเตและแท่งนาโนคาร์บอน ลงไปในวัสดุผสม ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมแท่งนาโน

คาร์บอน 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



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