

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)

วัสดุผสมนาโนคอมโพสิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุ
พลังงานสูง

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557

ประจำปีงบประมาณ 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 วิทยากร

ผู้ร่วมโครงการวิจัย ดร. รังสรรค์ เมืองเหลือ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง ในสองรูปแบบคือรูปแบบ 3-3 ของเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตกับพอลิไวนิลลิธินฟลูออไรด์ (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 พอลิไวนิลลิธินฟลูออไรด์ แบเรียมไททาเนต พอลิไดเมทิลซิลอกเซน แท่งนาโนคาร์บอน

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

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็น วัสดุผสมนาโนคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง นี้ประสบความสำเร็จได้ ต้องขอกราบขอบพระคุณ จากบุคคลดังต่อไปนี้

การวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ด้วยเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณชนิศา นวนิล ที่ช่วยเหลือแนะนำเทคนิค เกี่ยวกับการวิจัย ตอบข้อซักถาม และช่วยปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจนกระทั่งงานวิจัยนี้บรรลุไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ

ขอบคุณสมาชิกหน่วยวิจัยอิเล็กทรอนิกส์โทรคมนาคมขั้นสูงทุกคน ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และคอยช่วยเหลือให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่มีความสนใจในงานที่เกี่ยวข้องทางด้านนี้หรือผู้ที่ต้องการศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับงานวิจัย หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ผศ.ดร. นราธิป วิทยากร

ดร. รังสรรค์ เมืองเหลือ

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	โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ (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

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.....	4
3		
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 การประติษฐ์เส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง.....	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

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

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของ PVDF เทียบกับ PZT และ BaTiO_3 ที่อุณหภูมิ 20°C	16
2.2 ความหนาแน่น ค่าความจุความร้อน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ ที่ได้จากการคำนวณ.....	35

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 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อปริมาณการเกิดโพลาริเซชันของผลึก BaTiO ₃	9
2.6 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์.....	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 ที่เตรียมได้จากกระบวนการโซลเจลภายหลังการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	25
2.18 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของฟิล์มบาง PZ ในช่วงความถี่ 10 ⁻¹ -10 ³ kHz.....	26
2.19 ความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้สัมพันธ์กับเวลาภายใต้ความเครียดกดอัดที่ 2 Hz.....	27
2.20 ค่าความแข็งแรงยืดหยุ่น (Young's modulus) เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณไททาเนีย.....	28
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเพียโซอิเล็กทริกกับสนามไฟฟ้าของเส้นใยนาโน BNT.....	28

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 เวเฟอร์ของอินเตอร์ดิจิตอลโทรดกับเส้นใย 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 ของวัสดุคอมโพสิตและฟิล์มโพลีเมอร์ภายใต้การดึงยืดในทิศทางเดียว	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 ระบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับประดิษฐ์เส้นใยนาโนเซรามิกเลดเซอร์โคเนต (PZ).....	46
3.2 แบบจำลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	48
3.3 ส่วนประกอบของเครื่อง FTIR spectrometer.....	50
3.4 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5 กราฟแสดงโพลาริเซชันของวัสดุในช่วงความถี่ต่างๆ.....	53
3.6 (ก) ตัวเก็บประจุแผ่นโลหะขนานอย่างง่ายที่ตัวกลางระหว่างแผ่นเป็นสุญญากาศ (ข) ตัวเก็บประจุแบบเดียวกันแต่มีวัสดุไดอิเล็กทริกคั่นระหว่างแผ่นโลหะ.....	55
3.7 ลักษณะเฟสที่เกิดขึ้นในสารไดอิเล็กทริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ.....	55
4.1 โครงสร้างจุลภาคภาพตัดขวางของคอมโพสิต PZ-PVDF ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (ก) แบบปกติ และ (ข) ที่ได้จากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน.....	58
4.2 โครงสร้างจุลภาคของ (ก) เส้นใยเลดเซอร์โคเนต และ (ข) คอมโพสิต PZ-CNT-PVDF ที่ได้จากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน.....	59
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-CNT-PVDF.....	60
4.4 สเปกตรัมการส่องผ่านรังสีอินฟราเรดของคอมโพสิต PZ-PVDF และ PZ-CNT-PVDF.....	61
4.5 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต 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 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาตรของ BT-PDMS.....	73
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การสูญเสียไดอิเล็กทริกกับปริมาตรของ BT-PDMS.....	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

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

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับปริมาตรของแท่งนาโนคาร์บอน.....	78
--	----