

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา เจริญฤทธิ์และ/หรือเชิงประยุกต์	3
บทที่ 2 ทฤษฎี และเหตุผล	4
2.1 วัสดุฉลาด (Smart materials)	4
2.2 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)	10
2.2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric properties)	10
2.2.2 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient: d_{33})	13
2.2.3 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric effect)	15
2.2.4 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)	16
2.2.5 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity: ϵ_r)	17
2.2.6 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss, $\tan \delta$)	19
2.4 เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (Lead Zirconate Titanate, PZT)	20
2.5 แบเรียมไทเทเนต (Barium titanate: BT)	22
2.6 พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์	24
2.7 วัสดุคอมโพสิต (Composite materials)	27

2.8 การเรียงติดกันของวัสดุคอมโพสิต	28
2.9 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	30

บทที่ 3 วิธีการทดลอง	33
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	33
3.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	35
3.3 วิธีการทดลอง	36
3.3.1 การเตรียมผงเซรามิกพีแซดที (PZT) และบีที (BT)	36
3.3.2 การเตรียมเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต PVDF/PZT และ PVDF/BT	45
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	47
3.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุ PZT และ BT ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	47
3.4.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผงเซรามิก PZT และ BT (Particle analysis)	48
3.4.3 การหาค่าความหดตัวของเซรามิก (Shrinkage)	48
3.4.4 การวิเคราะห์ความหนาแน่น (Density measurement)	49
3.4.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาของเซรามิก (Morphology study)	50
3.6 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	51
3.6.1 การวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแคลอริเมทรีแบบกราด (Differential scanning calorimetry, DSC)	51
3.6.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต ด้วยเทคนิค XRD	51
3.7 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	51
3.7.1 การวิเคราะห์ความหนาแน่น (Density measurement)	51
3.7.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology study)	52
3.8 การทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้ากล (Electromechanical properties) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	52
3.9 การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	53

3.10 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient, d_{33}) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	53
---	----

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	55
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและ พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์	55
4.1.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	55
4.1.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผงเซรามิก PZT และ BT (Particle size analysis)	57
4.1.3 การหาค่าความหดตัวของเซรามิก (Shrinkage)	58
4.1.4 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของผงเซรามิก PZT และ BT (Density measurement)	59
4.1.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาของผงเซรามิก PZT และ BT	60
4.1.6 การวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ ด้วยเทคนิค DSC	62
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	63
4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต ด้วยเทคนิค XRD	64
4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	68
4.3.1 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของคอมโพสิต (Density measurement)	70
4.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	74
4.4 การทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้ากล (Electromechanical properties) ของ เพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	78
4.4.1 การตอบสนองเชิงเวลา (Temporal response) ของวัสดุ เพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	79
4.4.2 อิทธิพลของขนาดอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	81
4.4.3 อิทธิพลของปริมาณอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	83
4.4.4 อิทธิพลของความแรงสนามไฟฟ้า	85
4.5 การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)	87

4.6 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient, d_{33}) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	91
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	95
5.1 การเตรียมอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	95
5.1.1 เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (Lead Zirconate Titanate, PZT)	95
5.1.2 แบเรียมไทเทเนต (Barium Titanate, BT)	95
5.2 การเตรียมวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	95
5.3 การศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้ากล (Electromechanical properties) ของ เพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	95
5.4 การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก (Electrical properties) ของ เพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	96
5.5 การศึกษาสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric properties) ของ เพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต	96
5.6 ข้อเสนอแนะ	96
บรรณานุกรม	97
ภาคผนวก	102
ภาคผนวก ก	103
ภาคผนวก ข	104
ภาคผนวก ค	109
ประวัติผู้เขียน	117

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ประเภทของสิ่งเร้า (Input) ที่เซ็นเซอร์สามารถตอบสนอง	4
2.2 โครงสร้างผลึกของแบเรียมไทเทเนตในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	23
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	33
3.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	35
4.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุเซรามิก	58
4.2 เปอร์เซ็นต์ความหดตัวของเซรามิก PZT และเซรามิก BT	59
4.3 ความหนาแน่นของเซรามิก PZT และ BT	60
4.4 รหัสขึ้นทดสอบ PVDF/PZT คอมโพสิต	63
4.5 รหัสขึ้นทดสอบ PVDF/BT คอมโพสิต	63
4.6 ความหนาแน่นของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ	70
4.7 ความหนาแน่นของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ	72
4.8 การตอบสนองของค่ามอดุลัสสะสม ($\Delta G'$) ของ PVDF พอลิเมอร์	79
4.9 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ($\omega = 1.0 \text{ rad/s}$)	82
4.10 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ($\omega = 1.0 \text{ rad/s}$)	82
4.11 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ ($\omega = 1.0 \text{ rad/s}$)	84
4.12 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ ($\omega = 1.0 \text{ rad/s}$)	84
4.13 สมบัติไดอิเล็กทริกของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ที่ความถี่ต่ำ เท่ากับ 20 Hz	87
4.14 สมบัติไดอิเล็กทริกของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ ที่ความถี่ต่ำ เท่ากับ 20 Hz	89
4.15 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ	91
4.16 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ	93

ก-1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาค PZT	103
ก-2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาค BT	103
ข-1 ความหนาแน่นของเซรามิก PZT และ BT ทดสอบที่อุณหภูมิ 23.8 องศาเซลเซียส	104
ข-2 ความหนาแน่นของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ	105
ข-3 ความหนาแน่นของ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ	106
ข-4 ความหนาแน่นของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ ที่ขนาดอนุภาค PZT 75-125 ไมครอน	107
ข-5 ความหนาแน่นของ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ ที่ขนาดอนุภาค BT 75-125 ไมครอน	108
ค-1 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่ $\omega = 0.1$ rad/s	109
ค-2 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่ $\omega = 1.0$ rad/s	109
ค-3 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่ $\omega = 10$ rad/s	110
ค-4 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่ $\omega = 100$ rad/s	110
ค-5 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/BT คอมโพสิตที่ $\omega = 0.1$ rad/s	111
ค-6 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/BT คอมโพสิตที่ $\omega = 1.0$ rad/s	111
ค-7 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/BT คอมโพสิตที่ $\omega = 10$ rad/s	112
ค-8 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/BT คอมโพสิตที่ $\omega = 100$ rad/s	112
ค-9 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่ $\omega = 0.1$ rad/s	113
ค-10 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่ $\omega = 1.0$ rad/s	113
ค-11 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่ $\omega = 10$ rad/s	114
ค-12 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่ $\omega = 100$ rad/s	114
ค-13 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่ $\omega = 0.1$ rad/s	115
ค-14 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/BT คอมโพสิตที่ $\omega = 1.0$ rad/s	115
ค-15 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/BT คอมโพสิตที่ $\omega = 10$ rad/s	116
ค-16 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/BT คอมโพสิตที่ $\omega = 100$ rad/s	116

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect)	6
2.2 ปรากฏการณ์การยืดตัวไฟฟ้า (Electrostrictive effect)	6
2.3 โลหะจำรูป (Shape memory Alloy)	7
2.4 ปรากฏการณ์แมกนีโตสตริกทิฟ (Magnetostrictive effect)	8
2.5 โครงสร้างแบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3): ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric effect) ระหว่างการเคลื่อนของอะตอมกลาง	8
2.6 ตัวอย่างปรากฏการณ์แสงขับเคลื่อนไฟฟ้า (Photovoltaic effect) และ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect)	9
2.7 พอลิเมอร์เจล (Polymer gel) ที่มีการตอบสนองต่อความร้อน (Thermosensitive) เมื่อมีการระเหยของตัวทำละลาย (Solvent)	9
2.8 การแบ่งกลุ่มวัสดุตามลักษณะสมมาตร	11
2.9 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (a) แบบทางตรง และ (b) แบบผกผัน	12
2.10 ไดโพลภายในเนื้อสาร (a) ก่อนทำการโพลลิง (b) ระหว่างทำการโพลลิง (c) หลังทำการโพลลิง	13
2.11 การกำหนดทิศทางและระนาบสำหรับเพียโซอิเล็กทริก	14
2.12 ความสัมพันธ์ E-P ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก	16
2.13 การเกิดโพลาริเซชัน	17
2.14 ตัวเก็บแบบแผ่นขนาน	17
2.15 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานสองตัวสาร ไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลางและอีกตัวหนึ่ง เป็นสุญญากาศ (a) มีสุญญากาศอยู่กลาง และ (b) มีสารไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลาง	18
2.16 โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ของเลคเซอร์โคเนตไทเทเนต	21
2.17 เฟสไดอะแกรมของระบบ $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$	22
2.18 โครงสร้างผลึกของแบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3)	22
2.19 การเปลี่ยนแปลงยูนิตเซลล์ของผลึกเดี่ยว BaTiO_3	23

2.20 การเลื่อนตำแหน่งของอะตอมในแบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3) โดยที่ (a) อุณหภูมิสูงกว่า อุณหภูมิคูรี (b) และ (c) อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี	24
2.21 การสังเคราะห์พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF)	24
2.22 โครงสร้างผลึกของ PVDF	26
2.23 การยึดและการโพลแผ่นฟิล์ม PVDF เฟส β	27
2.24 รูปแบบการเชื่อมต่อเฟสแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตที่มี 2 เฟส	29
3.1 สารตั้งต้น (a) เลคออกไซด์ (b) เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ และ (c) ไทเทเนียมไดออกไซด์	36
3.2 การเตรียมสารผสมแขวนลอย	37
3.3 เครื่องผสมสารแบบ Ball milling	37
3.4 ขั้นตอนการระเหยเอทานอล	38
3.5 สารผสมที่ได้หลังการระเหยเอทานอล	38
3.6 แผนภาพแสดงการใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของผง PZT	39
3.7 ผง PZT หลังการเผาแคลไซน์	39
3.8 ครกบดสาร (Agate mortar) ใช้บดสารให้เป็นผงละเอียด	40
3.9 (a) ชุดแม่พิมพ์โลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 มิลลิเมตร (b) เครื่องอัดไฮดรอลิก	40
3.10 เม็ด PZT ที่ผ่านการอัดขึ้นรูป	40
3.11 ลักษณะของการจัดเรียงเม็ด PZT สำหรับการเผาซินเตอร์	41
3.12 แผนภาพแสดงการใช้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ของผงเซรามิก PZT	41
3.13 เม็ดเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์	42
3.14 การเตรียม BT สำหรับอัดขึ้นรูป	42
3.15 เม็ด BT ที่ผ่านการอัดขึ้นรูป	43
3.16 ลักษณะของการจัดเรียงเม็ด BT สำหรับการเผาซินเตอร์	43
3.17 แผนภาพแสดงการใช้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ของผงเซรามิก BT	44
3.18 เม็ดเซรามิก BT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์	44
3.19 การผสมด้วยวิธีทางกล (Mechanical mixing)	45
3.20 แม่แบบสำหรับเตรียมชิ้นทดสอบ	46
3.21 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) ชิ้นทดสอบ	46
3.22 ตัวอย่างชิ้นทดสอบ (a) PVDF/PZT คอมโพสิต และ (b) PVDF/BT คอมโพสิต	47
3.23 เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer)	48

3.24 เครื่องวัดความหนาแน่น	50
3.25 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	51
3.26 เครื่องรีโอมิเตอร์ (Melt rheometer)	53
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก PZT ที่ได้เมื่อเทียบกับข้อมูลใน JCPDS file no. 33-0784	55
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก BT ที่ได้เมื่อเทียบกับข้อมูลใน JCPDS file no. 79-2265	56
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PVDF เมื่อเทียบกับข้อมูลใน JCPDS file no. 42-1650	57
4.4 SEM micrographs ของอนุภาคเซรามิก PZT ขนาดต่างๆ; (a) <45 ไมครอน (b) 45-75 ไมครอน และ (c) 75-125 ไมครอน	60
4.5 SEM micrographs ของอนุภาคเซรามิก BT ขนาดต่างๆ; (a) <45 ไมครอน (b) 45-75 ไมครอน และ (c) 75-125 ไมครอน	61
4.6 DSC thermogram ของ PVDF	62
4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PVDF/PZT คอมโพสิต ที่เติมอนุภาคเซรามิก PZT ขนาดต่างๆ	64
4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PVDF/PZT คอมโพสิต ที่ปริมาณเซรามิก PZT ต่างๆ	65
4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PVDF/BT คอมโพสิต ที่เติมอนุภาคเซรามิก BT ขนาดต่างๆ	66
4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PVDF/BT คอมโพสิต ที่ปริมาณเซรามิก BT ต่างๆ	67
4.11 ชั้นทดสอบ (a) PVDF และ PVDF/PZT คอมโพสิต; (b) 10% vol. PZT, (c) 30% vol. PZT และ (d) 50% vol. PZT	68
4.12 ชั้นทดสอบ (a) PVDF และ PVDF/BT คอมโพสิต; (b) 10% vol. BT, (c) 30% vol. BT และ (d) 50% vol. BT	69
4.13 ความหนาแน่นของ PVDF/PZT คอมโพสิต และ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติม อนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ	71
4.14 ความหนาแน่นของ PVDF/PZT คอมโพสิต และ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติม อนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ	73

4.15 SEM micrographs ของ (a) PVDF และ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์ที่เติม PZT ขนาดต่างๆ; (b) <45 ไมครอน (c) 45-75 ไมครอน และ (d) 75-125 ไมครอน	74
4.16 SEM micrographs ของ (a) PVDF และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติม BT ขนาดต่างๆ; (b) <45 ไมครอน (c) 45-75 ไมครอน และ (d) 75-125 ไมครอน	75
4.17 SEM micrographs ของ (a) PVDF และ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์ที่เติม PZT ปริมาณ ต่างๆ; (b) 10%vol., (c) 20%vol., (d) 30%vol., (e) 40%vol. และ (f) 50%vol.	76
4.18 SEM micrographs ของ (a) PVDF และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติม BT ปริมาณต่างๆ; (b) 10%vol., (c) 20%vol., (d) 30%vol., (e) 40%vol. และ (f) 50%vol.	77
4.19 สมบัติกระแสไฟฟ้าของ PVDF เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า	78
4.20 ค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus, G') ของ PVDF, PVDF/PZT40 คอมโพลีเมอร์ และ PVDF/BT50 คอมโพลีเมอร์	80
4.21 การตอบสนองของค่ามอดูลัสสะสม ($\Delta G'$) ของ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆที่ $E = 2,000 \text{ V/mm}$	81
4.22 การตอบสนองของค่ามอดูลัสสะสม ($\Delta G'$) ของ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆที่ $E = 2,000 \text{ V/mm}$	83
4.23 มอดูลัสสะสม (G') ของคอมโพลีเมอร์ (PVDF/BT50) ที่ $\% \text{strain} = 0.05\%$	85
4.24 การตอบสนองของค่ามอดูลัสสะสม ($\Delta G'$) ของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพลีเมอร์ที่เติม อนุภาคเซรามิกปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความแรงสนามไฟฟ้าต่างๆ	86
4.25 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติม อนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ที่ความถี่เท่ากับ 20 Hz	88
4.26 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติม อนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ ที่ความถี่เท่ากับ 20 Hz	90
4.27 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ	92
4.28 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ	93

อักษรย่อและสัญลักษณ์

BT	Barium Titanate
PZT	Lead Zirconate Titanate
PVDF	Poly (vinylidene Fluoride)
d_{33}	Piezoelectric Coefficient
ϵ_r	Relative Permittivity (Dielectric Constant)
$\tan \delta$	Dielectric Loss
MPB	Morphotropic Phase Boundary
PVA	Polyvinyl Alcohol
XRD	X-ray Diffraction
SEM	Scanning Electron Microscopy
DSC	Differential Scanning Calorimetry
T_m	Melting Temperature
G'	Storage Modulus
G''	Loss Modulus
$\Delta G'$	Storage Modulus Response
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standard