

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อ	ง
Abstract	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพประกอบ	ญ
อักษรย่อ และสัญลักษณ์	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 Piezoelectricity	3
2.2 Spontaneous Polarization	5
2.3 โครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์	7
2.4 Lead Zirconate Titanate	8
2.5 สมบัติทางไฟฟ้า	10
2.5.1 สมบัติไดอิเล็กตริก	10
2.5.2 การสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กตริก	12
2.5.3 สมบัติพิโซอิเล็กตริก	14
2.5.4 Piezoelectric change Coefficient	15
2.5.5 Piezoelectric Voltage Coefficient	16
2.5.6 Compliance	16
2.5.7 Piezoelectric Coupling Factor	17
2.6 พอลิเมอร์	18
2.6.1 พอลิเอทิลีน	20
2.6.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์	21

	2.7 วัสดุผสม	22
	2.7.1 วัสดุผสม	22
	2.7.2 วัสดุผสมพียโซอิเล็กตริก	23
	2.7.3 การโพลวัสดุผสมแบบ 0-3	23
	2.7.4 การทดลองที่ผ่านมา	25
บทที่ 3	วิธีการทดลอง	
	3.1 การเตรียมสารพียโซอิเล็กตริกเซรามิกพีแซดที่ใช้ในวัสดุผสม	27
	3.1.1 ขั้นตอนการเผาซินเตอร์	30
	3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมเซรามิกโดยวิธีการบดร่อน	32
	3.1.3 การวิเคราะห์เซรามิกที่จะนำไปเป็นเศษวัสดุผสม	32
	3.1.3.1 การวิเคราะห์สารด้วย DTA	33
	3.1.3.2 การหาค่าความหดตัว	33
	3.1.3.3 การหาค่าความหนาแน่น	34
	3.1.3.4 การหาค่าความหนาแน่นของผงพีแซด	34
	3.2 การเตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3	35
	3.2.1 การรีดแผ่น	35
	3.2.2 การอัดเม็ดวัสดุผสม	36
	3.2.3 การขัด	36
	3.2.4 การทำขั้วอิเล็กโทรด	37
	3.2.5 เทคนิคการเจือเฟสตัวนำ	37
	3.2.6 การโพล	39
	3.2.7 สมบัติพียโซอิเล็กตริก	40
	3.2.8 การวัดค่า f_p , f_u	41
	3.2.9 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	42
บทที่ 4	ผลการทดลอง	
	4.1 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffractometer	43
	4.2 ผลการวัดค่าความหดตัว	57
	4.3 ผลการหาค่าความหนาแน่น	58
	4.4 ผลการหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	58
	4.5 ผลการหาค่า D_{33}	63
	4.6 ผลการหาค่า Piezoelectric Capping Factor	70

	4.7 ผลการวัดเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำนักคาร์บอนเกรไฟต์	70
	4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง	71
	4.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	75
บทที่ 5	การวิเคราะห์ผลการทดลอง	90
บทที่ 6	สรุปและข้อเสนอแนะ	98

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆ ของพอลิเอธิลีน	21
ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนน้ำหนักสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมผงพีแซดที่	27
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่า d-spacing ของเซรามิกพีแซดที่	45
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า d-spacing ของพอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง	46
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า d-spacing ของแกรไฟต์	47
ตารางที่ 4.4 แสดง d-spacing ของวัสดุผสมแบบ 0-3 60PZT /40HDPE	48
ตารางที่ 4.5 แสดง d-spacing ของวัสดุผสมแบบ 0-3 58.5PZT /40HDPE/1.5C	49
ตารางที่ 4.6 แสดง d-spacing ของวัสดุผสมแบบ 0-3 (1.5C)58.5PZT /40HDPE	50
ตารางที่ 4.7 แสดง d-spacing ของวัสดุผสมแบบ 0-3 (0.75C)59.25PZT /40HDPE/0.75C	51
ตารางที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ความหดตัวของเซรามิกพีแซดที่	57
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมและเซรามิกพีแซดที่	58
ตารางที่ 4.10 แสดงค่า D_{33} ที่วัดได้จาก Piezometer ในความหนาของวัสดุผสม โดยโพลที่ 8 kv/mm เป็นเวลา 30 min และค่าความหนาแน่น	63
ตารางที่ 4.11 แสดงค่า D_{33} เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการโพลโดยให้สนามไฟฟ้า คงที่ 4, 6, 8 kv/mm	64
ตารางที่ 4.12 แสดงค่า D_{33} เมื่อเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าในการโพลโดยให้เวลา ในการโพลคงที่	65

สารบัญภาพประกอบ

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการจำแนกสารโดยใช้สมมาตรของผลึก	3
รูปที่ 2.2 แสดง Unit cell ของ BaTiO_3 ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อ อุณหภูมิสูงกว่า อุณหภูมิคูรี	4
รูปที่ 2.3 แสดงภาพจำลอง electric dipoles ในวัสดุ Piezoelectric (b)การเปลี่ยนแปลง	5
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ E-Pของสาร Ferroelectric	6
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะโครงสร้างแบบ เพอร์อฟสไกต์	7
รูปที่ 2.6 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$	9
รูปที่ 2.7 แสดงภาพPolarizationที่เกิดขึ้นในสารไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า	10
รูปที่ 2.8 แสดงค่า loss tangent ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก	13
รูปที่ 2.9 แสดงปรากฏการณ์ 2 แบบ คือ Direct Effect และ Converse Effect ในสาร พิโซอิเล็กตริก	14
รูปที่ 2.10 แสดงการกำหนดทิศทางในสารพิโซอิเล็กตริก	15
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง impedance กับ ความถี่	17
รูปที่ 2.12 แสดงวงจรที่ใช้ในการหาค่า Resonance frequency (f_r) และAntiresonance frequency (f_a)	18
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของพอลิเมอร์ส่วนที่เป็นsemi-crystalline และamorphous	19
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นsemi-crystalline และamorphous	19
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะความเป็นไปได้ของการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟส 10 แบบ ของวัสดุผสมระหว่าง 2 เฟส	22
รูปที่ 2.16แสดงลักษณะการกระจายตัวของเฟสตัวนำในวัสดุผสม	24
รูปที่ 3.1 การใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์	28
รูปที่ 3.2 แสดงแบบแม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป	29
รูปที่ 3.3แสดงการจัดเรียงเม็ด พีแซดที และการกลบด้วยผงพีแซดที เพื่อมิให้ PbO เกิดการระเหยออกไป	30
รูปที่ 3.4 แสดงอุณหภูมิที่ใช้เพื่อเผาผงพีแซดทีให้เป็นเซรามิกพีแซดที	31
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการเกิด Neck ขึ้นเมื่อสารผ่านกระบวนการซินเตอร์ ส่งผลให้ช่องว่างภายในระหว่างเกรนนั้นลดลง ส่งผลให้สารมีความหนาแน่นสูงขึ้น	31

รูปที่ 3.6 แสดงภาพการวิเคราะห์ด้วย DTA	33
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะการผสม PZT ด้วยการใช้เทคนิคการรีดเป็นแผ่น (calendering)	36
รูปที่ 3.8 แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อเตรียมในการโพล	38
รูปที่ 3.9 แสดงหลักการวัดค่า d_{33}	40
รูปที่ 4.1 Diffraction pattern ของเซรามิกพีแซดทีที่เตรียมเพื่อผสมในวัสดุผสม	44
รูปที่ 4.2 Diffraction pattern ของพอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่เตรียมเพื่อผสมในวัสดุผสม	44
รูปที่ 4.3 Diffraction pattern ของผงแกรไฟต์ที่เตรียมเพื่อผสมในวัสดุผสม	46
รูปที่ 4.4 Diffraction pattern ของวัสดุผสมแบบ 0-3 60PZT /40HDPE	48
รูปที่ 4.5 Diffraction pattern ของวัสดุผสมแบบ 0-3 58.5PZT /40HDPE/1.5C	49
รูปที่ 4.6 Diffraction pattern ของวัสดุผสมแบบ 0-3 (1.5C)58.5PZT /40HDPE	50
รูปที่ 4.7 Diffraction pattern ของวัสดุผสมแบบ 0-3 (0.75C)59.25PZT /40HDPE/0.75C	51
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบ Diffraction pattern ของวัสดุผสมพีแซดที/พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูงแบบ 0-3 ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยปริมาตร โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบต่างๆ	52
รูปที่ 4.9 Diffraction pattern ของวัสดุผสมพีแซดที/พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูงแบบ 0-3 ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยปริมาตร	53
รูปที่ 4.10 Diffraction pattern ของวัสดุผสมพีแซดที/พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูงแบบ 0-3 ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยปริมาตร โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์ 58.5PZT/40HDPE/1.5C	54
รูปที่ 4.11 Diffraction pattern ของวัสดุผสมพีแซดที/พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูงแบบ 0-3 ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยปริมาตร โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์ (1.5C)58.5PZT/40HDPE	55
รูปที่ 4.12 Diffraction pattern ของวัสดุผสมพีแซดที/พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูงแบบ 0-3 ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยปริมาตร โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์ (0.75)59.25PZT/40HDPE/0.75C	56
รูปที่ 4.13 แสดงค่า Relative permittivity ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับความหนาของวัสดุผสม PZT/HDPE ในอัตราส่วน 60:40 แบบ 0-3 ที่ความถี่ 1 MHz โดยให้อุณหภูมิคงที่	60
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความถี่ของวัสดุผสม 60PZT/40HDPE ณ ความหนาต่างๆ	61

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่าDielectric loss กับความถี่ ของวัสดุผสม60PZT/40HDPE ณ.ความหนาต่างๆ	61
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความถี่ โดยเทคนิคการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสมPZT/HDPE แบบความหนาต่างๆ	62
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับอุณหภูมิ โดยเทคนิคการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสมPZT/HDPE แบบความหนาต่างๆ	62
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่า D_{33} กับกับความหนาโดยPole ที่ 8Kv/mm เป็นเวลา 30นาที่ของวัสดุผสมแบบ 0-3	66
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่า D_{33} กับกับความหนาโดยPole ที่ 4Kv/mm โดยเทคนิคการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสมPZT/HDPE	67
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่า D_{33} กับกับความหนาโดยPole ที่ 4Kv/mm หลังโพล 24ชั่วโมงโดยเทคนิคการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสมPZT/HDPE	67
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่า D_{33} กับกับความหนาโดยPole ที่ 6Kv/mm โดยเทคนิคการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสมPZT/HDPE	68
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่า D_{33} กับกับความหนาโดยPole ที่ 6Kv/mm หลังโพล 24ชั่วโมงโดยเทคนิคการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสมPZT/HDPE	68
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่า D_{33} กับกับความหนาโดยPole ที่ 8Kv/mm โดยเทคนิคการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสมPZT/HDPE	69
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่า D_{33} กับกับความหนาโดยPole ที่ 8Kv/mm หลังโพล 24ชั่วโมงโดยเทคนิคการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสมPZT/HDPE	69
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยปริมาตร	71
รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและ ผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยปริมาตรโดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์58.5PZT/40HDPE/1.5C	71
รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและ ผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์ แบบ (1.5C)58.5PZT/40HDPE	72

รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและ ผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ (0.75)59.25PZT/40HDPE/0.75C	72
รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยปริมาตร โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ 58.5PZT/40HDPE/1.5C	73
รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ (1.5C)58.5PZT/40HDPE	73
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ (0.75)59.25PZT/40HDPE/0.75C	74
รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40	74
รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายแสดงพื้นผิวหน้าของเม็ดเซรามิกพีแซดที กำลังขยาย 1000 เท่า	75
รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายแสดงเม็ดพีแซดทีที่ผ่านการบดร่อนด้วยตะแกรงไนลอนเบอร์ 36 กำลังขยาย 100 เท่า	75
รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของผงแกรไฟต์ กำลังขยาย 1500 เท่า	76
รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายแสดงลักษณะตาข่ายไนลอนเบอร์ 36	76
รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 100 เท่า	77
รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ ในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิค การเจือผงแกรไฟต์แบบ 58.5PZT/40HDPE/1.5C กำลังขยาย 100 เท่า	77
รูปที่ 4.39 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ ในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิค การเจือผงแกรไฟต์แบบ (1.5C)58.5PZT/40HDPE กำลังขยาย 100 เท่า	78
รูปที่ 4.40 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ ในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิค การเจือผงแกรไฟต์แบบ (0.75)59.25PZT/40HDPE/0.75C กำลังขยาย 100 เท่า	78

รูปที่ 4.41 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 500 เท่า	79
รูปที่ 4.42 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ ในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ 58.5PZT/40HDPE/1.5C กำลังขยาย 500 เท่า	79
รูปที่ 4.43 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ ในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ (1.5C)58.5PZT/40HDPE กำลังขยาย 500 เท่า	80
รูปที่ 4.44 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ ในเมตริกซ์พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ (0.75)59.25PZT/40HDPE/0.75C กำลังขยาย 500 เท่า	80
รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายแสดงลักษณะอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 1500 เท่า	81
รูปที่ 4.46 ภาพถ่ายแสดงลักษณะอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ58.5PZT/40HDPE/1.5C กำลังขยาย 1500 เท่า	81
รูปที่ 4.47 ภาพถ่ายแสดงลักษณะอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ (1.5C)58.5PZT/40HDPE กำลังขยาย 1500 เท่า	82
รูปที่ 4.48 ภาพถ่ายแสดงลักษณะอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ (0.75)59.25PZT/40HDPE/0.75C กำลังขยาย 1500 เท่า	82
รูปที่ 4.49 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 200 เท่า	83
รูปที่ 4.50 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ใน เมตริกซ์พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดย เทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ 58.5PZT/40HDPE/1.5C โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 250 เท่า	83

รูปที่ 4.51 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ ในเมตริกซ์พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือ ผงแกรไฟต์ แบบ (1.5C)58.5PZT/40HDPE โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 250 เท่า	84
รูปที่ 4.52 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ ในเมตริกซ์พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือ ผงแกรไฟต์แบบ(0.75)59.25PZT/40HDPE/0.75C โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 250 เท่า	84
รูปที่ 4.53 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 1000 เท่า	85
รูปที่ 4.54 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของแกรไฟต์ที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์ แบบ 58.5PZT/40HDPE/1.5C โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 2200 เท่า	85
รูปที่ 4.55 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของแกรไฟต์ที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์ แบบ (1.5C)58.5PZT/40HDPE โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 1000 เท่า	86
รูปที่ 4.56 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของแกรไฟต์ที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์ แบบ (0.75)59.25PZT/40HDPE/0.75C โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 1000 เท่า	86
รูปที่ 4.57 ภาพถ่ายแสดงลักษณะรอยต่อของวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง โดยผ่านการขัดจาก ความหนาเดิมลง 1mm ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 300 เท่า	87
รูปที่ 4.58 ภาพถ่ายแสดงลักษณะรอยต่อของวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง โดยผ่านการขัดจาก ความหนาเดิมลง 1mm ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 3000 เท่า	87
รูปที่ 4.59 ภาพถ่ายแสดงลักษณะรอยต่อของวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง โดยผ่านการขัดจาก ความหนาเดิมลง 2 mm ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 300 เท่า	88
รูปที่ 4.60 ภาพถ่ายแสดงลักษณะรอยต่อของวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง โดยผ่านการขัดจาก ความหนาเดิมลง 2 mm ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 1000 เท่า	88

- รูปที่ 4.61 ภาพถ่ายแสดงลักษณะรอยต่อของวัสดุผสมพีแซคที / พอลิเอธิลีน 89
ความหนาแน่นสูง โดยผ่านการขัดจาก ความหนาเดิมลง 3 mm
ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 350 เท่า
- รูปที่ 4.62 ภาพถ่ายแสดงลักษณะรอยต่อของวัสดุผสมพีแซคที / พอลิเอธิลีน 89
ความหนาแน่นสูง โดยผ่านการขัดจาก ความหนาเดิมลง 3 mm
ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 1000 เท่า

อักษรย่อและสัญลักษณ์

ϵ_r	Dielectric constant หรือค่า relative permittivity
ϵ_0	permittivity ของ free space
ω	ความถี่เชิงมุม
λ	ความยาวคลื่นของ x-ray
ρ	ความหนาแน่น
θ	มุมที่วัดจากระนาบอะตอมที่ขนานกันห่างกัน d
a	Lattice parameter a
A	พื้นที่หน้าตัดของแผ่นโลหะที่ประกบวัสดุไดอิเล็กตริก
b	Lattice parameter b
c	Lattice parameter c
C	ความจุไฟฟ้าของวัสดุ
C_0	ความจุไฟฟ้าของอากาศ
d	d-spacing
d	ความหนา
D	Dielectric displacement
d_{15}	Piezoelectric coefficient ในแนวเฉือน
d_{31}	Piezoelectric coefficient ในแนวตั้งจากการโพล
d_{33}	Piezoelectric coefficient ในแนวนอนการโพล
D_0	เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนเผาซินเตอร์
d_h	Hydrostatic piezoelectric coefficient
$d_h g_h / \tan \delta$	Figure of merit for hydroplane application
D_s	เส้นผ่านศูนย์กลางหลังทำการเผาซินเตอร์
E	Electrical field
E_a	Applied electrical field
F	แรง
f_a	Antiresonance frequency
f_r	Resonance frequency
g	Piezoelectric voltage coefficient

HDPE	High Density Polyethylene
I/I_0	อัตราส่วนความเข้มต่อความเข้มสูงสุด
I_c	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ
I_R	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน
k	Electromechanical coupling factor
k'	Relative dielectric constant
k''	Planar coupling factor
LDPE	Low Density Polyethylene
M	มวล
MBP	mophotropic phase boundary
N_A	Avogadro number
P	Electrical polarization
PZT	Lead Zirconate Titanate
Q	Total charge
s	material compiance
S	เปอร์เซ็นต์ความหดตัว
S	Scanning Electron Microscope
t	ความหนา
$\tan \delta$	Dissipation loss factor, loss tangent
T	Applied mechanical stress
T_c	อุณหภูมิวิกฤติ
T_d	Degradation temperature
T_m	Melting temperature
T_g	Glass transition temperature
V	ปริมาตร
Z	Impedance