

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การทบทวนเอกสารทางวิชาการ	3
2.1 ประวัติการค้นคว้าและพัฒนาสารพิโซอิเล็กทริก	3
2.2 พิโซเซรามิก	5
2.3 พอลิเอทิลีน	10
2.4 วัสดุผสม	18
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	34
3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้	34
3.2 การเตรียมสารตัวอย่าง	35
3.2.1 การเตรียมผง PZT	35
3.2.2 การเตรียมวัสดุผสมเซรามิก PZT / พอลิเมอร์ PE	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	68
4.1 ผลการเตรียมผง PZT	68
4.2 ผลการเตรียมวัสดุผสมเซรามิก PZT/PE	71
4.2.1 ผลการเตรียมวัสดุผสม PZT/PE แบบ 0-3	71
4.2.2 ผลการเตรียมวัสดุผสม PZT/PE แบบ 2-2	89
4.2.3 ผลการเตรียมวัสดุผสม PZT/PE แบบ 1-3	94
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	103
5.1 สรุปผล	103
5.2 ข้อเสนอแนะ	104
เอกสารอ้างอิง	105

ภาคผนวก	109
ภาคผนวก ก	110
ภาคผนวก ข	111
ประวัติผู้เขียน	114

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	การเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุระหว่างเซรามิก พอลิเมอร์และวัสดุผสม	22
4.1	การเปรียบเทียบค่า d-spacing ของสาร PZT ที่เตรียมได้กับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 33-784	69

สารบัญภาพ

รูป		หน้า
2.1	ตัวอย่างทรานสดิวเซอร์ที่ผลิตจากสารพีโซอิเล็กทริกแบบต่างๆ	4
2.2	การจัดจำแนกประเภทของวัสดุโดยใช้ลักษณะทางสมมาตรของผลึก	6
2.3	เซลล์หน่วยแบบเพอโรฟสไกต์ของสาร PZT	7
2.4	เฟสไดอะแกรมของสารในระบบ PbZrO_3 - PbTiO_3	8
2.5	ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบพีโซอิเล็กทริก (k) และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของสารในระบบ PbZrO_3 - PbTiO_3	9
2.6	ปรากฏการณ์ (ก) ตรง และ (ข) ย้อนกลับ เมื่อ (1) แทนกรณีที่สารเกิดการหดตัวและ (2) เกิดการขยายตัว	9
2.7	รูปแบบจำลองโครงสร้างของพอลิเอทิลีน	11
2.8	รูปแบบดั้งเดิมของการเชื่อมต่อกันระหว่างเฟส 10 รูปแบบ ของวัสดุผสมระหว่าง 2 เฟส ที่เป็นไปได้	19
2.9	การพัฒนาารูปแบบของวัสดุผสมแบบต่างๆ	19
2.10	วิธีการเตรียมวัสดุผสมระหว่างเซรามิกพีโซอิเล็กทริก / พอลิเมอร์ ด้วยวิธี Dice และ Fill (ก) ชิ้นงานเซรามิก (ข) หลังการตัดครั้งแรก (ค) หลังการตัดครั้งที่ 2 และ (ง) เมื่อเทพอลิเมอร์ลงไปจนได้เป็นวัสดุผสมแบบ 1-3	27
2.11	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมแบบ 2-2 และ 1-3 โดยวิธีเทปคาสติ้ง	29
2.12	ภาพถ่าย SEM ของเส้นใย PZT ที่ผ่านการเผาแล้ว	30
2.13	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมแบบ 2-2 โดยอาศัยวิธี jet-machining	32
2.14	การเตรียมวัสดุผสมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกกับพอลิเมอร์ โดยวิธีอัดรีดร่วม	33
3.1	ลูกบดเซอร์โคเนียและสารตั้งต้นที่ใช้	37
3.2	เครื่อง ball mill	37
3.3	แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมผง PZT ที่ใช้	38
3.4	เครื่องอัดขึ้นรูประบบไฮดรอลิก	39
3.5	แม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป	40

รูป		หน้า
3.6	ภาพถ่ายเตาไฟฟ้าพลังงานสูง	40
3.7	การจัดเรียงเม็ดสาร PZT ในถ้วยอะลูมินา	41
3.8	แผนผังการเผาซินเตอร์	41
3.9	เม็ดเซรามิกที่ผ่านกระบวนการซินเตอร์	42
3.10	ภาพถ่ายเครื่องบดเม็ดเซรามิก	42
3.11	ผงเซรามิก PZT ที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบด	43
3.12	การคัดขนาดผงเซรามิกด้วยตะแกรงไนลอน	43
3.13	เม็ด PE ประเภท HDPE	44
3.14	ขั้นตอนการเตรียมสารผสมระหว่างผงเซรามิก PZT กับพอลิเมอร์ PE	45
3.15	เครื่องรีด model LR 110	46
3.16	ลักษณะการรีดเป็นแผ่นโดยใช้เทคนิคคาเลนเดอร์	47
3.17	แม่พิมพ์สแตนเลสที่ใช้อัดขึ้นรูปให้เป็นแผ่น	48
3.18	เครื่องอัดร้อน	49
3.19	แผ่นวัสดุผสมที่ผ่านการอัดร้อนแล้ว	49
3.20	แม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป	50
3.21	การจัดเรียงเม็ดสาร PZT ในถ้วยอะลูมินา	51
3.22	แผ่นเซรามิกกลมแบน	51
3.23	ขั้นตอนการเตรียมแผ่น PE	53
3.24	แผ่น PE ที่ผ่านการอัดร้อนในแม่พิมพ์สแตนเลส	54
3.25	แผ่นกลมแบนของ PE	54
3.26	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมแบบ 2-2	55
3.27	ขั้นตอนการเตรียมแท่งเซรามิก PZT	57
3.28	ลักษณะของแท่ง PZT ที่ผ่านการฉีดยา	58
3.29	แผนผังการเผาซินเตอร์ของแท่ง PZT ที่ใช้	58
3.30	การจัดเรียงแท่งสาร PZT ในอุณหภูมิเพื่อจะนำไปเผาซินเตอร์	59
3.31	แท่งเซรามิก PZT ที่ได้จากการเผาซินเตอร์	59
3.32	ชิ้นโลหะสำหรับใส่แท่งเซรามิก PZT	61

รูป		หน้า
3.33	ชั้นโลหะที่ทำการใส่แท่งเซรามิก PZT แล้ว	61
3.34	ผงพอลิเมอร์ PE	62
3.35	การฝังชั้นโลหะลงในผงพอลิเมอร์ PE	62
3.36	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมเซรามิก PZT / พอลิเมอร์ PE แบบ 1-3	63
3.37	ชิ้นงานที่นำออกจากบีกเกอร์	64
3.38	วัสดุผสมเซรามิก PZT / พอลิเมอร์ PE แบบ 1-3 ที่นำออกจากชั้นโลหะ	64
3.39	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่อง sputtering	66
3.40	เครื่อง sputtering	66
3.41	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง SEM	67
4.1	X-ray diffraction pattern ของผง PZT ที่เตรียมได้	69
4.2	ภาพถ่าย SEM ของผง PZT ที่เตรียมได้เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้น	70
4.3	ภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิก PZT ที่เตรียมได้ ที่ (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง	72
4.4	ภาพถ่ายวัสดุผสม PZT / PE ที่เตรียมได้	73
4.5	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ที่บริเวณผิวหน้าที่เกิดจากการขัด	75
4.6	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ที่บริเวณเนื้อในที่เกิดจากการหัก	76
4.7	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ที่บริเวณเนื้อในที่เกิดจากการตัด	77
4.8	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 0-3 บริเวณเนื้อในที่เกิดจากการตัดและมีอัตราส่วนเป็น 50/50 โดยใช้อนุภาคเซรามิก PZT ที่มีขนาด (ก,ข) น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร (ค,ง) 2-6 ไมโครเมตร และ (จ,ฉ) 6-10 ไมโครเมตร	78
4.9	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 0-3 บริเวณเนื้อในที่เกิดจากการหักและมีอัตราส่วนเป็น 50/50 โดยใช้อนุภาคเซรามิก	

รูป	หน้า
PZT ที่มีขนาด (ก,ข) น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร (ค,ง) 2-6 ไมโครเมตร และ (จ,ฉ) 6-10 ไมโครเมตร	79
4.10 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 0-3 บริเวณเนื้อในที่เกิดจากการตัดและมีอัตราส่วนเป็น 40/60 โดยใช้อนุภาคเซรามิก PZT ที่มีขนาด (ก,ข) น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร (ค,ง) 2-6 ไมโครเมตร และ (จ,ฉ) 6-10 ไมโครเมตร	80
4.11 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 0-3 บริเวณเนื้อในที่เกิดจากการหักและมีอัตราส่วนเป็น 40/60 โดยใช้อนุภาคเซรามิก PZT ที่มีขนาด (ก,ข) น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร (ค,ง) 2-6 ไมโครเมตร และ (จ,ฉ) 6-10 ไมโครเมตร	81
4.12 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 0-3 บริเวณเนื้อในที่เกิดจากการตัดและมีอัตราส่วนเป็น 30/70 โดยใช้อนุภาคเซรามิก PZT ที่มีขนาด (ก,ข) น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร (ค,ง) 2-6 ไมโครเมตร และ (จ,ฉ) 6-10 ไมโครเมตร	82
4.13 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 0-3 บริเวณเนื้อในที่เกิดจากการหักและมีอัตราส่วนเป็น 30/70 โดยใช้อนุภาคเซรามิก PZT ที่มีขนาด (ก,ข) น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร (ค,ง) 2-6 ไมโครเมตร และ (จ,ฉ) 6-10 ไมโครเมตร	83
4.14 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 0-3 บริเวณเนื้อในที่เกิดจากการตัดและมีอัตราส่วนเป็น 20/80 โดยใช้อนุภาคเซรามิก PZT ที่มีขนาด (ก,ข) น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร (ค,ง) 2-6 ไมโครเมตร และ (จ,ฉ) 6-10 ไมโครเมตร	84
4.15 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 0-3 บริเวณเนื้อในที่เกิดจากการหักและมีอัตราส่วนเป็น 20/80 โดยใช้อนุภาคเซรามิก PZT ที่มีขนาด (ก,ข) น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร (ค,ง) 2-6 ไมโครเมตร และ (จ,ฉ) 6-10 ไมโครเมตร	85
4.16 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 0-3 บริเวณเนื้อในที่เกิดจากการตัดและมีอัตราส่วนเป็น 10/90 โดยใช้อนุภาคเซรามิก	

รูป	หน้า
PZT ที่มีขนาด (ก) น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร (ข) 2-6 ไมโครเมตร และ (ค) 6-10 ไมโครเมตร	86
4.17 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 0-3 บริเวณเนื้อในที่เกิดจากการหักและมีอัตราส่วนเป็น 10/90 โดยใช้อนุภาคเซรามิก PZT ที่มีขนาด (ก,ข) น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร (ค,ง) 2-6 ไมโครเมตร และ (จ,ฉ) 6-10 ไมโครเมตร	87
4.18 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ที่มีอัตราส่วนของ PZT/PE เป็น (ก) 50/50 (ข) 40/60 (ค) 30/70 (ง) 20/80 และ (จ) 10/90	88
4.19 ภาพถ่ายวัสดุผสมเซรามิก PZT / พอลิเมอร์ PE แบบ 2-2	89
4.20 ภาพถ่าย SEM บริเวณ (ก) ชั้นพอลิเมอร์ PE (ข) ชั้นเซรามิก PZT	90
4.21 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 2-2 ที่กำลังขยาย (ก) 40 เท่า (ข) 20 เท่า	91
4.22 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 2-2 บริเวณรอยต่อของชั้น PE และ PZT ที่กำลังขยาย (ก) 170 เท่า (ข) 300 เท่า	92
4.23 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสม PZT/PE แบบ 2-2 บริเวณรอยต่อของชั้น PE และ PZT ที่กำลังขยาย 1500 เท่า	93
4.24 แสดงภาพถ่าย SEM ของแท่งเซรามิก PZT ที่กำลังขยาย (ก) 60 เท่า (ข) 22 เท่า (ค,ง) 37 เท่า	95
4.25 ภาพถ่าย SEM ของแท่งเซรามิก PZT ที่กำลังขยาย (ก) 8000 เท่า (ข,ค) 4000 เท่า (ง) 5000 เท่า	96
4.26 ภาพถ่ายวัสดุผสมเซรามิก PZT / พอลิเมอร์ PE แบบ 1-3	97
4.27 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสมเซรามิก PZT/พอลิเมอร์ PE แบบ 1-3 ที่บริเวณผิวซึ่งทำการตัดตามยาว	98
4.28 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสมเซรามิก PZT/พอลิเมอร์ PE แบบ 1-3 ที่บริเวณผิวซึ่งทำการตัดตามขวางที่กำลังขยาย 12 เท่า	99
4.29 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสมเซรามิก PZT/พอลิเมอร์ PE แบบ 1-3 ที่บริเวณผิวซึ่งทำการตัดตามขวางที่กำลังขยาย 60 เท่า	100

รูป		หน้า
4.30	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสมเซรามิก PZT/พอลิเมอร์ PE แบบ 1-3 ที่บริเวณเฟสเซรามิก	101
4.31	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสมเซรามิก PZT/พอลิเมอร์ PE แบบ 1-3 ที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสเซรามิก PZT และเฟสพอลิเมอร์ PE	102

อักษรย่อและสัญลักษณ์

HDPE	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
HF	กรดไฮโดรฟลูออริก
HMWPE	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นและน้ำหนักโมเลกุลสูง
LDPE	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
LLDPE	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้น
MPB	มอร์โฟโทรปิกเฟสไบวเดอรี
PE	พอลิเอทิลีน
PMN	เลดแมกนีเซียมไนโอเบต
PN	เลดไนโอเบต
PT	เลดไทเทเนต
PTC	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิเชิงบวก
PVDF	พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์
PZT	เลดไทเทเนต
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
TrFE	ไตรฟลูออโรเอทิลีน
UHMWPE	พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก
VDF	ไวนิลิดีนฟลูออไรด์
VLDPE	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาก
XRD	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
d_{33}	ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดพิโซอิเล็กตริก
d_h	ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดพิโซอิเล็กตริกอุทกสถิต
g	ค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์พิโซอิเล็กตริก
k	ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบพิโซอิเล็กตริก
k_t	ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบพิโซอิเล็กตริกเชิงความหนา
T_c	อุณหภูมิคูรี
$\tan\delta$	ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก
Z	ค่าความต้านทานพลังงานเสียงเชิงซ้อน
ϵ_r	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์