สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(7)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(10)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(15)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	3
1.3 วัตถุประสงค์	8
2 ทฤษฎี	9
2.1 ประวัติการค้นพบปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริก	9
2.2 การจำแนกวัสดุคอมโพสิท	11
2.3 ทฤษฎี 0 – 3 คอมโพสิท	13
2.4 กระบวนการขึ้นรูปแบบเทป	15
2.5 สมบัติไพอิโซอิเล็กตริก	16
2.6 สมบัติไพโรอิเล็กตริก	19
2.7 สมบัติไดอิเล็กตริกและการสูญเสียไดอิเล็กตริก	21
2.8 ทฤษฎีของระบบอินเทอร์เฟอร์โรมิเตอร์	23
2.9 สมบัติของสารตัวอย่าง	27
2.9.1 แบเรียมไททาเนต	27
2.9.2 พอลิเมอร์ PVDF	28
3 วัสดุและวิธีการวิจัย	34
3.1 วัสดุ	34
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	34
3.3 วิธีดำเนินการ	37
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง	37

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง	37
3.3.2 ตรวจสอบสมบัติกายภาพของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF	42
3.3.3 ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF	43
4 ผลและการอภิปรายผล	53
4.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF	53
4.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF	55
5 บทสรุป	66
5.1 สรุปผลการทดลอง	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
5.3 งานวิจัยต่อเนื่องในอนาคต	68
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก	77
ก กระบวนการโพลิง	78
ข การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยเครื่อง LCR Meter HP4263	81
ค ผลการวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM	86
ง ค่าความจุความร้อน	88
จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	96
ฉ Manuscripts Songklanakarin J. Sci. Technol.	97
ประวัติผู้เขียน	109

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กตริกกับตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง	18
2.2	แสดงโครงสร้างผลึกของแบเรียมไททาเนตในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	28
4.1	แสดงการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบระหว่าง $\phi = 0.15$ กับ $\phi = 0.30$ และค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีอยู่ในวงเล็บ	65
5.1	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่าคงที่ไพโรอิเล็กตริก และค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กตริกของวัสดุคอมโพสิทที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้	66
5.2	แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบกับสารเมื่อไม่มีเฟสพอลิเมอร์และไม่มีเฟสเซรามิกและค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีอยู่ในวงเล็บ	67

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่		หน้า
2.1	แสดงการจัดกลุ่มผลึกตามความสมมาตรของผลึก	11
2.2	การเรียงติดกัน 10 รูปแบบของวัสดุคอมโพสิทที่มี 2 เฟส	13
2.3	แบบจำลองของเพาเออร์สำหรับ 0 – 3 คอมโพสิท	15
2.4	แสดงการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบเทป	16
2.5	แสดงเครื่องหมายของแกนสำหรับวัสดุไพอิโซเซรามิก	18
2.6	ปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กตริก	20
2.7	แผนภาพเวกเตอร์ของแทนเจนต์ความสูญเสีย	22
2.8	แสดงความเข้มแสงที่จุดศูนย์กลางของริ้วแทรกสอด ที่ Δd ต่างๆ จุด x ในภาพ คือจุดกึ่งกลางของความเข้มแสง สอดคล้องกับ $\Delta d = \frac{\lambda}{8}$	24
2.9	แสดงการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันระหว่างกระจกอ้างอิงและสารตัวอย่างเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก	25
2.10	ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเพอร์รอฟไกต์ของ $BaTiO_3$	28
2.11	ลักษณะสูตรโครงสร้าง (ก) โมโนเมอร์ (ข) พอลิเมอร์ PVDF (ค) โครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ PVDF	29
2.12	หน่วยเซลล์ของพอลิเมอร์ PVDF 4 เฟส (a) เฟสแอลฟา (b) เฟสบีตา (c) เฟสเดลตา (d) เฟสแกมมา ∘ แทนอะตอมของคาร์บอน ○ แทนอะตอมของฟลูออรีน ส่วนอะตอมของไฮโดรเจนไม่แสดงในภาพ	30
2.13	โซ่โมเลกุลพหุสัณฐาน ของพอลิเมอร์ PVDF	31
2.14	แผนภาพแสดงวิธีการเปลี่ยนเฟสของพอลิเมอร์ PVDF	32
3.1	ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการเตรียมวัสดุคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF	38
3.2	รูปแสดงการเตรียมสารละลายคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF (ก) เตาให้ความร้อน (ข) บีกเกอร์แก้วและแท่งแม่เหล็กกวนสาร (ค) เทอร์โมมิเตอร์	39
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะกวนสาร	39
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะที่คอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF ผ่านกระบวนการอบที่อุณหภูมิเป็น 120 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	40

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
3.5	รูปการจัดเครื่องมือและอุปกรณ์โคโรนาโพลิง (A) เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (B) เข็มปลายแหลมขั้วบวก (C) แท่นวางสารตัวอย่าง	41
3.6	(ก) วงจรการโพลิง (ข)ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของตัวต้านทานและวัสดุที่มีความจุไฟฟ้าโดย $V = IR+V_s$	42
3.7	รูปแสดงเครื่อง Thickness Gauge Handing	43
3.8	แท่นวางสารตัวอย่างเลือกใช้หัววัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm	43
3.9	หน้าปัดของเครื่อง LCR meter ขณะทำการ open correction	44
3.10	หน้าปัดของเครื่อง LCR meter ขณะทำการ short correction	44
3.11	หน้าปัดของเครื่อง LCR meter ขณะทำการวัดและอ่านค่า Cp และ D	45
3.12	(ก) ไดอะแกรมอุปกรณ์ทดลองสำหรับวัดค่าคงที่ไพโรอิเล็กตริก (ข) รูปแสดงชุดทดลองที่ใช้ในการวัดค่าคงที่ไพโรอิเล็กตริก (ค) รูปแสดงลักษณะการจัดวางสารตัวอย่าง อุปกรณ์เพลเตียร์ และหัววัดอุณหภูมิ	46
3.13	ลักษณะโดยทั่ว ๆ ไป ของหัววัดอุณหภูมิโดยด้าน A×B×C เท่ากับ 2 × 5 × 1.1 mm มีขาเล็ก ๆ 2 ขา ยาว 11 mm	47
3.14	วงจร PT 100 ในขณะใช้งาน	47
3.15	(ก) ไดอะแกรมอย่างง่ายแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์เพลเตียร์ (ข) ไดอะแกรมแสดงลักษณะและขนาดของอุปกรณ์เพลเตียร์ (ค) แสดงการเกิดปรากฏการณ์เพลเตียร์	48
3.16	แสดงแผนผังอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบอินเทอร์เฟอร์โมิเตอร์	50
3.17	แสดงระบบอินเทอร์เฟอร์โรมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง (A) ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ (B) กระจกอ้างอิง (C) ตัวแบ่งแสง (D) แท่นทรานสเลชัน (E) ที่จับยึดสารตังอย่าง (F) หัววัดแสง	50
3.18	แสดงสารตัวอย่างวัสดุคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF บนฐานรอง (A) วัสดุคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF (B) ฐานรอง	51

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
4.1	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF สำหรับ ϕ = 0.15 กำลังขยาย 2,500 เท่า	54
4.2	ภาพถ่าย SEM ของวัสดุคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF สำหรับ ϕ = 0.30 กำลังขยาย 2,500 เท่า	54
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความถี่ของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF สำหรับ ϕ = 0.30 ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ โดยที่ A คือ โพลิงทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน B คือ โพลิงในทิศตรงข้ามกัน และ C คือ ไม่มีการโพลิง	55
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความถี่ของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF สำหรับ ϕ = 0.15 ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการโดยที่ A คือ โพลิงทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน B คือ โพลิงในทิศตรงข้ามกันและ C คือ ไม่มีการโพลิง	56
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกกับความถี่ของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF โดยที่ A และ C โพลิงทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกัน B และ D คือ โพลิงในทิศเดียวกัน	57
4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับอุณหภูมิของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF ที่ ϕ = 0.15 และโพลิงทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกัน ค่าความชันของกราฟคือค่าคงที่ไพโรอิเล็กตริก มีค่าเท่ากับ - 19 $\mu C/m^{2\circ}C$	58
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับอุณหภูมิของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF ที่ ϕ = 0.15 และโพลิงทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน ค่าความชันของกราฟคือค่าคงที่ไพโรอิเล็กตริก มีค่าเท่ากับ - 25 $\mu C/m^{2\circ}C$	58
4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับอุณหภูมิของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF ที่ ϕ = 0.30 และโพลิงทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกัน ค่าความชันของกราฟคือค่าคงที่ไพโรอิเล็กตริก มีค่าเท่ากับ - 24 $\mu C/m^{2\circ}C$	59

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับอุณหภูมิของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF ที่ $\phi = 0.30$ และโพลลิงทั้งสองเฟสในทิศเดียวกัน ค่าความชันของกราฟคือค่าคงที่ไพโรอิเล็กตริก มีค่าเท่ากับ - 41 $\mu C/m^{2o}C$	59
4.10	แสดงแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากสารตัวอย่าง และแผ่นกระจกอ้างอิงที่รวมเป็นจุดเดียวกันและเกิดการแทรกสอด	61
4.11	แสดงภาพบนจอออสซิลโลสโคป เป็นสัญญาณจากหัววัดแสงเมื่อมีการสั่นกระจกอ้างอิงเพียงอย่างเดียวในขณะที่วงจรป้อนสัญญาณย้อนกลับกำลังทำงาน ในภาพ V_{p-p} ขณะที่ถูกควบคุมด้วยวงจรป้อนสัญญาณย้อนกลับแอมปลิจูดของสัญญาณในภาพ คือ V_{p-p} มีค่า 0.3 V โดยประมาณ	61
4.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของ PZT ทางการค้าที่ ความถี่ 4 kHz	62
4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงผิวกับความต่างศักย์ของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF ที่ $\phi = 0.30$ และโพลิงทั้งสองเฟสในทิศเดียวกันที่ความถี่ 5 kHz ค่าความชันของกราฟคือค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กตริกเท่ากับ 8.9 pm/V	63
4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงผิวกับความต่างศักย์ของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF ที่ $\phi = 0.30$ และโพลิงทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกันที่ความถี่ 5 kHz ค่าความชันของกราฟคือค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กตริกเท่ากับ 11.6 pm/V	63
4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กตริก (d_{33}) กับ ความถี่ในช่วง 1-7 kHz ของคอมโพสิท $BaTiO_3$/PVDF $\phi = 0.30$ ที่ได้รับการโพลลิงทั้งสองเฟสในทิศตรงข้ามกัน และได้รับการโพลิงในทิศเดียวกัน	64
ก-1	การจัดเรียงตัวของการโพลาไรเซชันของพอลิเมอร์ โดยที่ (1) ก่อนได้รับการโพลิง (2) หลังการโพลิง	78
ก-2	การจัดเครื่องมือและอุปกรณ์การโคโรนาโพลิง เมื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้า 10 kVให้ระยะระหว่างเข็มกับพอลิเมอร์เท่ากับ 1 cm	80

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
ข-1	รูปแบบพื้นฐานของเครื่องมือวัดวัสดุไดอิเล็กตริก	81
ข-2	ลักษณะการวางวัสดุทดสอบ ในการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยวิธี Contacting Electrode Method (used with Rigid Metal Electrode) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและ Dissipation factor ของวัสดุทดสอบหาได้จากสมการ	83
ข-3	ลักษณะการวางวัสดุทดสอบ ในการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยวิธี Contacting Electrode Method (used with Thin Film Electrode)	84
ข-4	ลักษณะการวางวัสดุทดสอบในการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยวิธี Non-contacting Electrode Method (Air Gap Method)	85

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	พื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้า
C	ค่าความจุไฟฟ้า
c	ค่าความจุความร้อน
D	การกระจัดทางไฟฟ้า
d_{ii}	ค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กตริกเทนเซอร์
d , e	ค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กทริกความเครียด
E	สนามไฟฟ้า
F	ความถี่
FoM	ค่า figure of merit
g , h	ค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กทริกความเค้น
I	ความเข้มแสงเลเซอร์
I(t)	การเปลี่ยนแปลงกระแสไพโรอิเล็กตริกขึ้นกับเวลา
p	ค่าคงที่ไพโรอิเล็กตริก
Q	ประจุไฟฟ้า
S	ความเครียดกล
s^E	ค่าคงที่ยืดหยุ่นภายใต้สนามไฟฟ้าคงที่
T	ความเค้นกล
T_c	อุณหภูมิคูรี
t	ความหนาของสารตัวอย่าง
$\tan\delta$	ค่าสภาพสูญเสียไดอิเล็กตริก
V	ศักย์ไฟฟ้า
Z	ค่าอิมพิแดนซ์ทางอะคูสติก
ε_0	สภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ
ε^T	สภาพยอมได้ทางไฟฟ้าภายใต้ความเค้นคงที่
ε_r	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
ε^*	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

ε'	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกส่วนจริง
ε''	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกส่วนจินตภาพ
λ	ความยาวคลื่น
ρ	ความหนาแน่น