

บทที่ 4

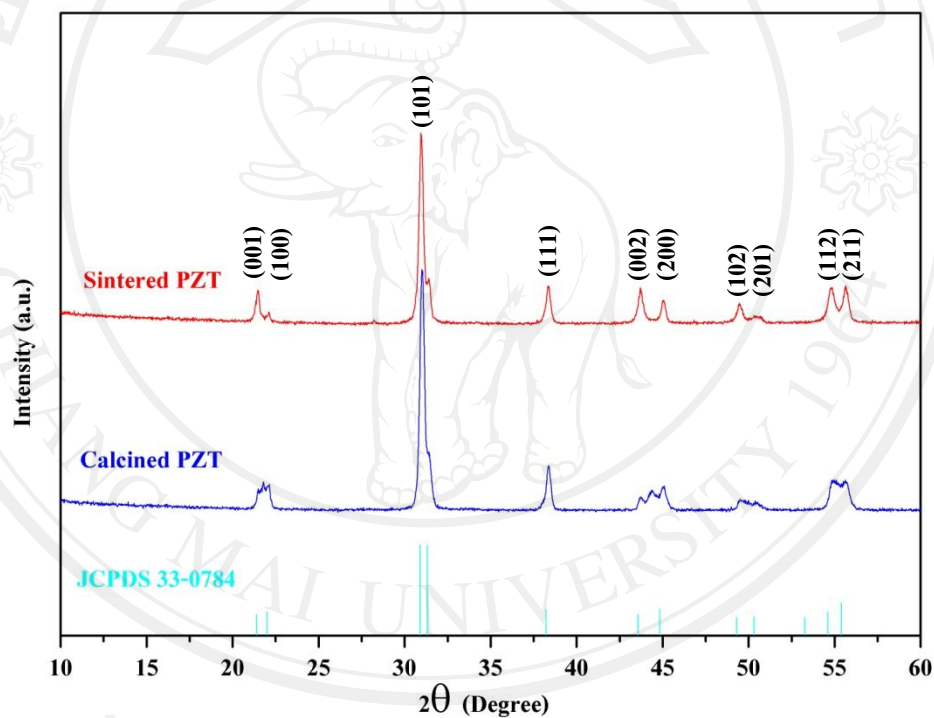
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์

4.1.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

แผนภาพ XRD ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก PZT, BT และพอลิเมอร์ PVDF แสดงดังรูป

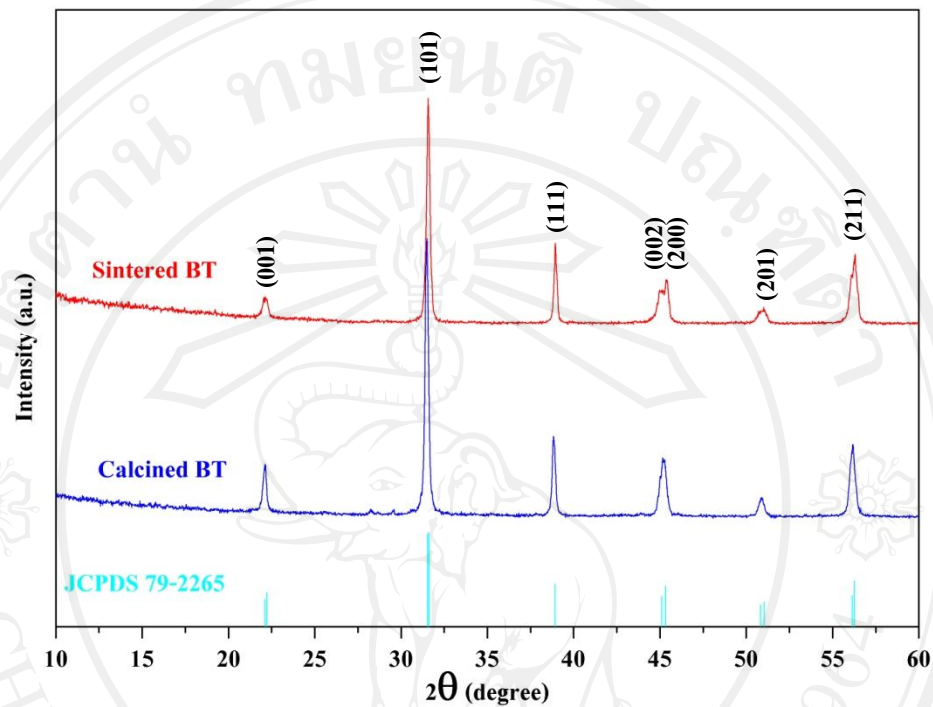
4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูป 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก PZT ที่ได้เมื่อเทียบกับข้อมูลใน JCPDS file no. 33-0784

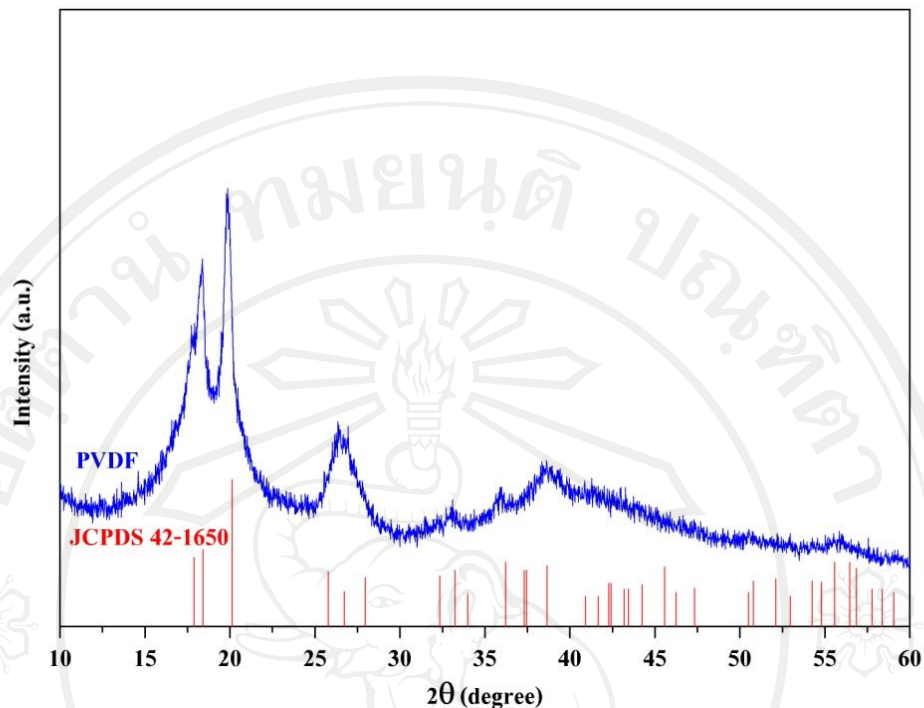
จากแผนภาพ XRD ของ PZT ที่ได้จากการสังเคราะห์ ณ อุณหภูมิของการแคลไซน์และการเผาซินเตอร์ พบว่าการเผาทั้งสองสถานะ ได้ผลึก PZT ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการเผาจากอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (Calcination temperature) เป็น 1,225 องศาเซลเซียส (Sintering temperature) พบว่าระดับของความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ของ PZT เพิ่มขึ้น

เป็นอย่างมาก และมีความสอดคล้องกับข้อมูลของสาร PZT สูตร $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS file no. 33-0784



รูป 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก BT ที่ได้เมื่อเทียบกับข้อมูลใน JCPDS file no. 79-2265

จากแผนภาพ XRD ของ BT ที่ได้จากการค้า เมื่อนำมาทำการเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส (Sintering temperature) พบว่าผลึก BT ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงและมีระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) เพิ่มสูงขึ้น และพบว่าเซรามิก BT ที่ได้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มีความสอดคล้องกับข้อมูลของสาร BT สูตร BaTiO_3 ในแฟ้มข้อมูล JCPDS file no. 79-2265 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเพอรอฟสไกต์เป็นแบบเตตระโกนอล



รูป 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PVDF เมื่อเทียบกับข้อมูลใน JCPDS file no. 42-1650

จากแผนภาพ XRD ของพอลิเมอร์ PVDF ทางการค้า พบว่า PVDF มีลักษณะโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous phase) และส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline phase) โดยผลึกใน PVDF นี้เป็นผลึกชนิดเบต้า (β -type crystalline) ซึ่งชนิดที่ทำให้สมบัติไดอิเล็กทริกที่ดีกว่า โดยสังเกตได้จากพีคที่ปรากฏในช่วง 17.3° - 20.7° [49] และมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มีความสอดคล้องกับข้อมูลของสาร PVDF สูตร $-(CH_2CF_2)-$ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS file no. 42-1650

4.1.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผงเซรามิก PZT และ BT (Particle size analysis)

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาควัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิดเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (Lead Zirconate Titanate, PZT) และ แบเรียมไทเทเนต (Barium Titanate, BT) ทำได้โดยการนำเม็ด PZT และ BT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์แล้วมาบดด้วยครกอะเกตจนเป็นผงละเอียด แล้วทำการคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนมาตรฐาน เพื่อแยกอนุภาควัสดุเซรามิกออกเป็น 3 ช่วงขนาด คือ <45 ไมครอน 45-75 ไมครอน และ 75-125 ไมครอน จากนั้นนำอนุภาควัสดุเซรามิกหลังการคัดขนาด

วิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ PZT และ BT ในช่วงขนาดต่างๆ แสดงดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุเซรามิก

ขนาดตะแกรง (mesh)	ช่วงขนาด (μm)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	
		PZT	BT
-325	<45	26.39	16.27
-200+325	45-75	53.73	25.92
-120+200	75-125	107.77	95.24

จากผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของเซรามิก พบว่า อนุภาคเซรามิก PZT และ BT ที่ลอดผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 26.39 และ 16.27 ไมครอน ตามลำดับ อนุภาคเซรามิก PZT และ BT ที่ลอดผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช และค้ำบนตะแกรงขนาด 325 เมช มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 53.73 และ 25.92 ไมครอน ตามลำดับ และอนุภาคเซรามิก PZT และ BT ที่ลอดผ่านตะแกรงขนาด 120 เมช และค้ำบนตะแกรงขนาด 200 เมช มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 107.77 และ 95.24 ไมครอน ตามลำดับ

4.1.3 การหาค่าความหดตัวของเซรามิก (Shrinkage)

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาถึงค่าความหดตัวของเซรามิกหลังจากการเผาซินเตอร์ โดยนำเม็ดเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์และยังไม่ได้ทำการขัดผิว มาวัดหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier calliper) โดยสุ่มเม็ดเซรามิกมาจำนวน 15 เม็ด ทำการวัด 5 ครั้งต่อเม็ดเซรามิก จากนั้นหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย R_2 นำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความหดตัวหลังเผาตามสมการ 3.3 แสดงดังตาราง 4.2 โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเซรามิกก่อนทำการเผาซินเตอร์จะเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ $R_1 = 28$ มิลลิเมตร คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความหดตัว (%shrinkage) ของเซรามิก PZT และเซรามิก BT อยู่ในช่วง 15.21-15.96 เปอร์เซ็นต์ และ 17.04-20.82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีเปอร์เซ็นต์หดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 15.60 และ 18.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตาราง 4.2 เปอร์เซ็นต์ความหดตัวของเซรามิก PZT และเซรามิก BT

เม็ดเซรามิก	R_2 (mm)		%Shrinkage	
	PZT	BT	PZT	BT
1	23.68	22.51	15.43	19.61
2	23.74	22.59	15.21	19.32
3	23.55	23.17	15.89	17.25
4	23.55	22.17	15.89	20.82
5	23.63	22.89	15.61	18.25
6	23.67	22.89	15.46	18.25
7	23.66	22.74	15.50	18.79
8	23.65	22.70	15.54	18.93
9	23.74	22.94	15.21	18.07
10	23.74	23.10	15.21	17.50
11	23.53	22.23	15.96	20.61
12	23.58	23.23	15.79	17.04
13	23.59	23.01	15.75	17.82
14	23.54	22.29	15.93	20.39
15	23.62	22.68	15.64	19.00
เฉลี่ย	23.63 ± 0.07	22.74 ± 0.32	15.60 ± 0.26	18.78 ± 1.16

4.1.4 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของผงเซรามิก PZT และ BT (Density measurement)

การวิเคราะห์ความหนาแน่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก หาได้จากการชั่งน้ำหนักในของเหลว อาศัยหลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes principle) วิธีการชั่งมวลเพื่อหาความหนาแน่นของเซรามิก PZT และ BT ทำได้โดยนำเซรามิกชั่งมวลในอากาศ อ่านค่ามวลแล้วปรับเป็นศูนย์ โดยที่เซรามิกยังชั่งอยู่ จากนั้นนำเซรามิกไปชั่งในของเหลว เครื่องจะประมวลผลความหนาแน่นของเซรามิกออกมาให้เลย โดยค่าความหนาแน่นที่ได้สัมพันธ์กับสมการ 3.4

ตาราง 4.3 ความหนาแน่นของเซรามิก PZT และ BT

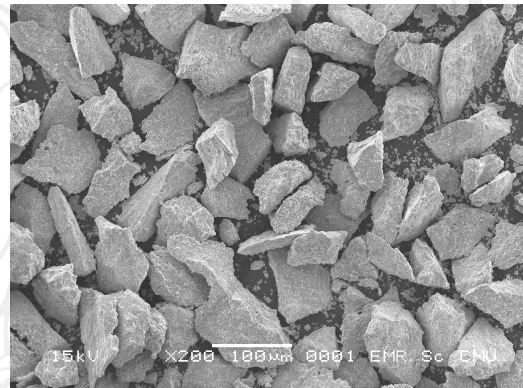
วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm^3)
PZT	7.614 ± 0.04
BT	5.317 ± 0.11

4.1.5 การศึกษาพื้นฐานวิทยาของผงเซรามิก PZT และ BT

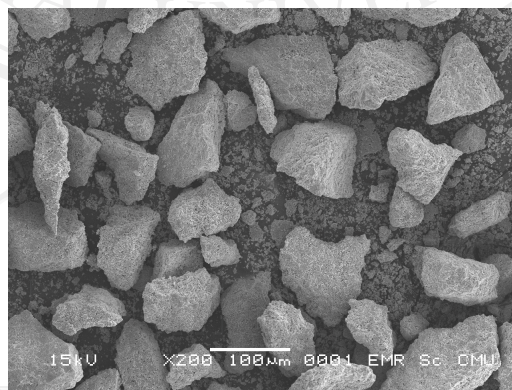
การศึกษาลักษณะของอนุภาคเซรามิก PZT และ BT ที่ขนาดต่างๆ ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) แสดงดังรูป 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



(a)



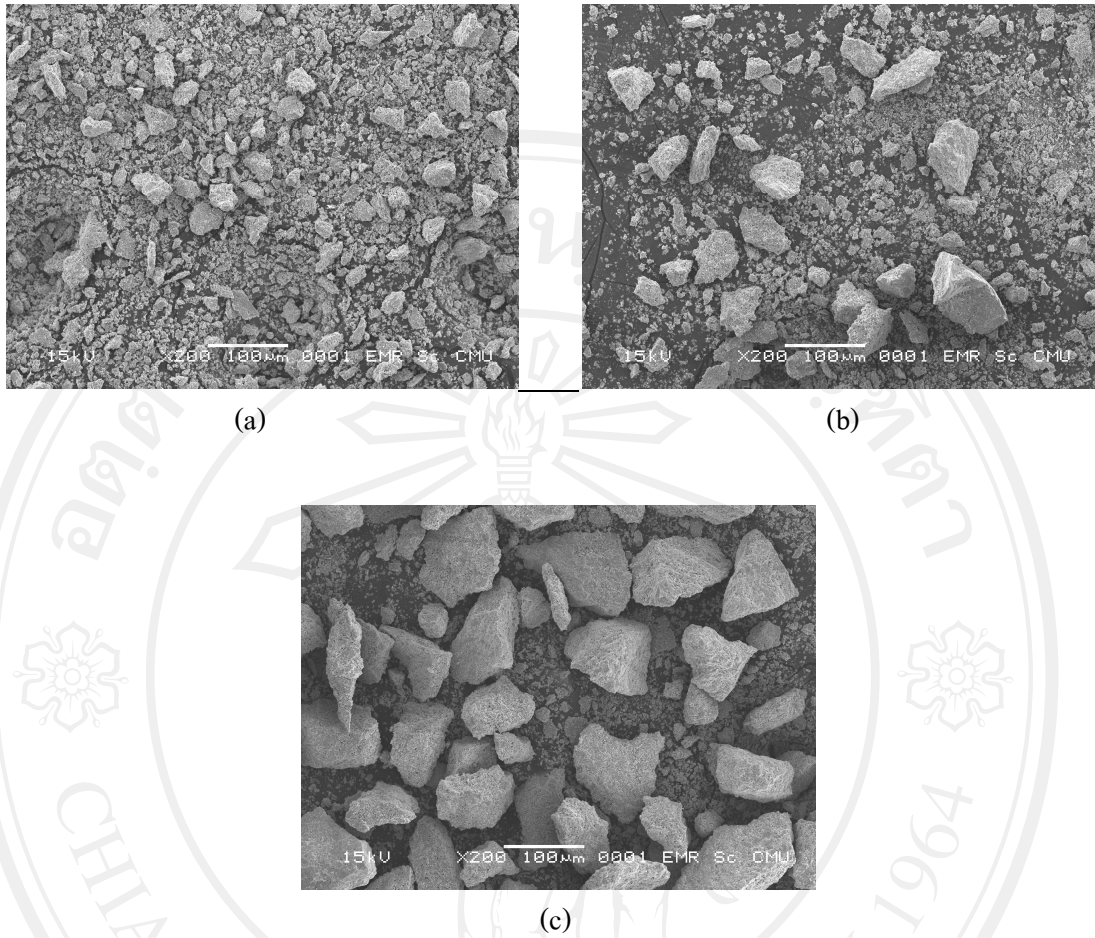
(b)



(c)

รูป 4.4 SEM micrographs ของอนุภาคเซรามิก PZT ขนาดต่างๆ; (a) <45 ไมครอน

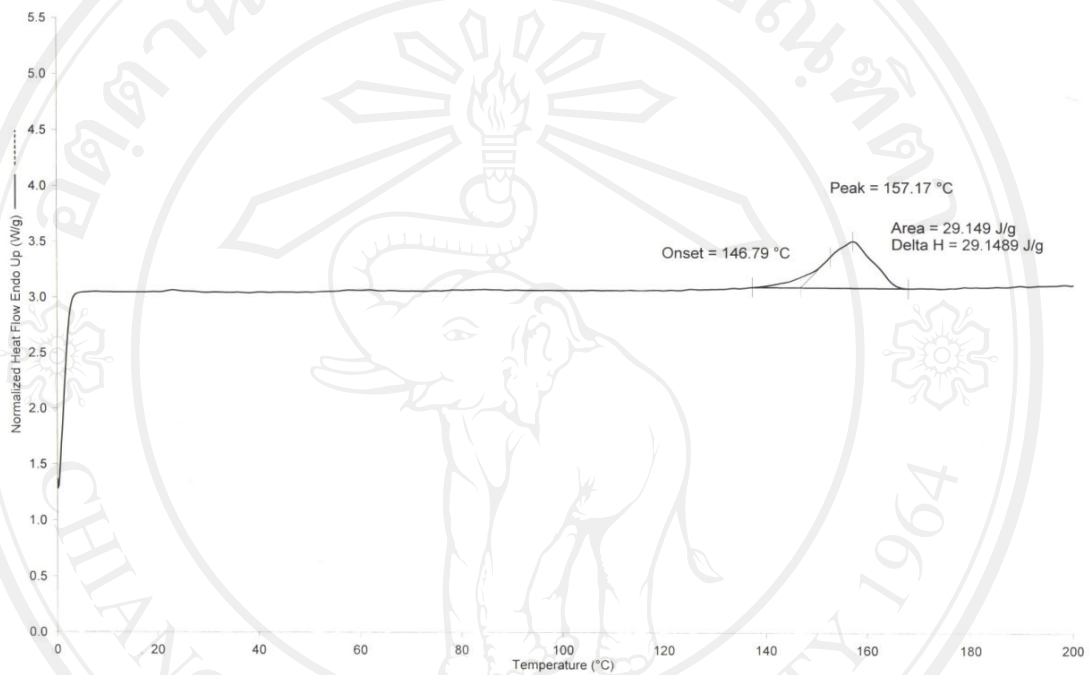
(b) 45-75 ไมครอน และ (c) 75-125 ไมครอน



รูป 4.5 SEM micrographs ของอนุภาคเซรามิก BT ขนาดต่างๆ; (a) <45 ไมครอน
(b) 45-75 ไมครอน และ (c) 75-125 ไมครอน

4.1.6 การวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ด้วยเทคนิค DSC

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PVDF เพื่อดูอุณหภูมิหลอมเหลว PVDF ด้วยเทคนิค DSC แสดงดังรูป 4.6 สามารถหาอุณหภูมิหลอมเหลวได้เท่ากับ 157.17 องศาเซลเซียส



รูป 4.6 DSC thermogram ของ PVDF

4.2 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต PVDF/PZT และ PVDF/BT โดยได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดและปริมาณอนุภาค PZT และ BT ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตที่เตรียมได้ โดยได้ตั้งรหัสสำหรับขั้นตอนทดสอบต่างๆ ในงานวิจัยนี้ ดังตาราง 4.4 และ 4.5

ตาราง 4.4 รหัสขั้นตอนทดสอบ PVDF/PZT คอมโพสิต

รหัส	ขนาดอนุภาค PZT (μm)	ปริมาณอนุภาค PZT (%vol.)
PVDF	-	-
PVDF/PZT45	45	30
PVDF/PZT45-75	45-75	30
PVDF/PZT75-125	75-125	30
PVDF/PZT10	75-125	10
PVDF/PZT20	75-125	20
PVDF/PZT30	75-125	30
PVDF/PZT40	75-125	40
PVDF/PZT50	75-125	50

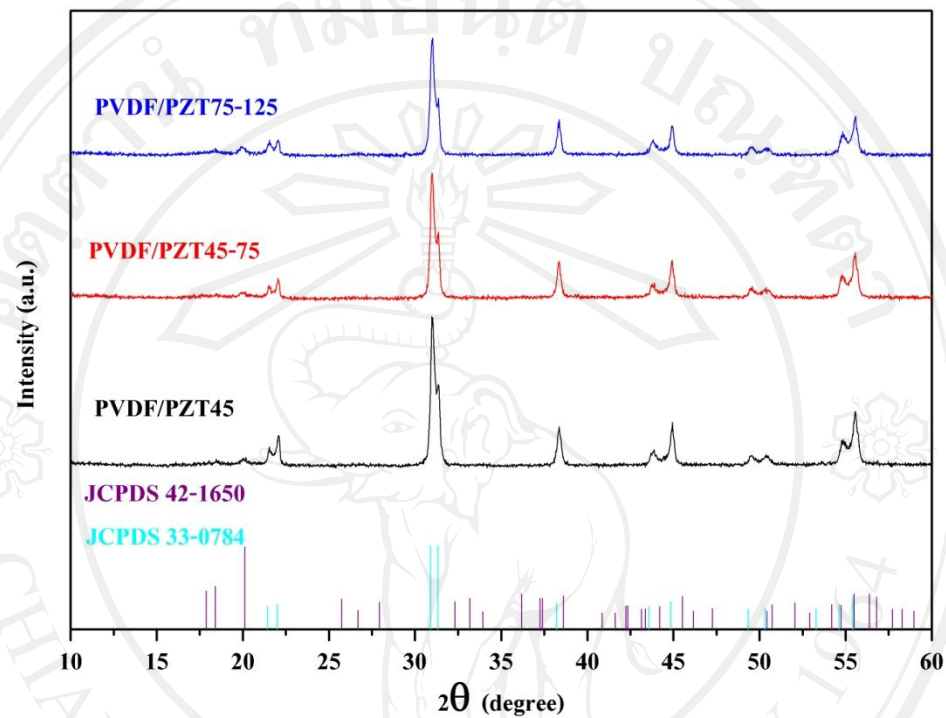
ตาราง 4.5 รหัสขั้นตอนทดสอบ PVDF/BT คอมโพสิต

รหัส	ขนาดอนุภาค BT (μm)	ปริมาณอนุภาค BT (%vol.)
PVDF	-	-
PVDF/BT45	45	30
PVDF/BT45-75	45-75	30
PVDF/BT75-125	75-125	30
PVDF/BT10	75-125	10
PVDF/BT20	75-125	20
PVDF/BT30	75-125	30
PVDF/BT40	75-125	40
PVDF/BT50	75-125	50

4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตด้วยเทคนิค XRD

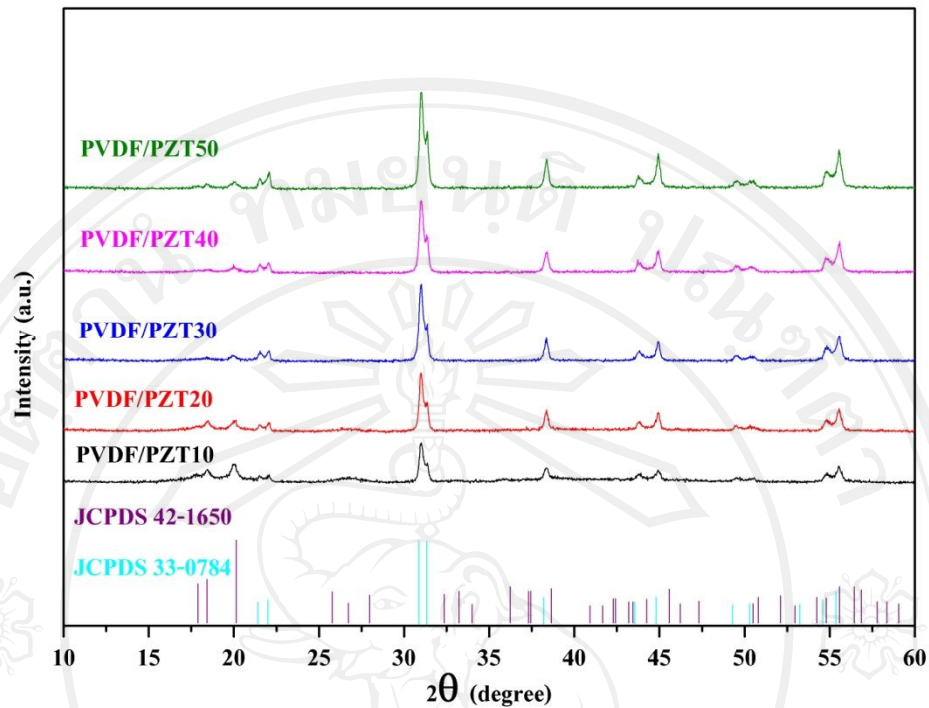
- ผลการวิเคราะห์ XRD ของ PVDF/PZT คอมโพสิต

แผนภาพ XRD ของ PVDF/PZT คอมโพสิต แสดงดังรูป 4.7-4.8



รูป 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PVDF/PZT คอมโพสิต
ที่เติมอนุภาคเซรามิก PZT ขนาดต่างๆ

จากแผนภาพ XRD ของ PVDF/PZT คอมโพสิต ที่เติมอนุภาค PZT ขนาดต่างๆ พบว่าคอมโพสิตมีโครงสร้างผลึกของ PZT ที่เป็นเพอรอฟสไกต์และโครงสร้างผลึกของ PVDF รวมกันอยู่ ซึ่งเฟสที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก

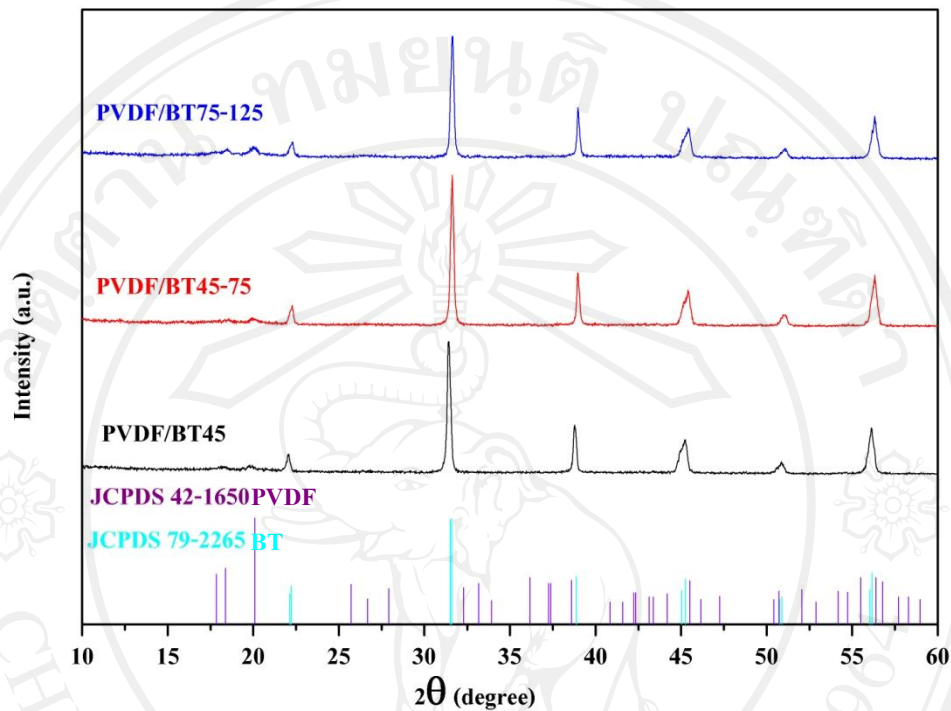


รูป 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PVDF/PZT คอมโพสิต
ที่ปริมาณเซรามิก PZT ต่างๆ

จากแผนภาพ XRD ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่ปริมาณเซรามิก PZT ต่างๆ พบว่า โครงสร้างที่ได้นั้นมีโครงสร้างของ PZT ที่เป็นเตตระโกนอล เมื่อ PVDF/PZT คอมโพสิตที่มี ปริมาณเซรามิก PZT เพิ่มขึ้น จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เลื่อน (Shift) ไป จากรูปแบบ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PVDF ไปยังรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PZT ตาม ปริมาณเซรามิก PZT ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความเป็นเตตระโกนอลก็เพิ่มขึ้นและส่งผลให้ระดับความเป็น ผลึก (Degree of crystallinity) เพิ่มสูงขึ้นด้วย

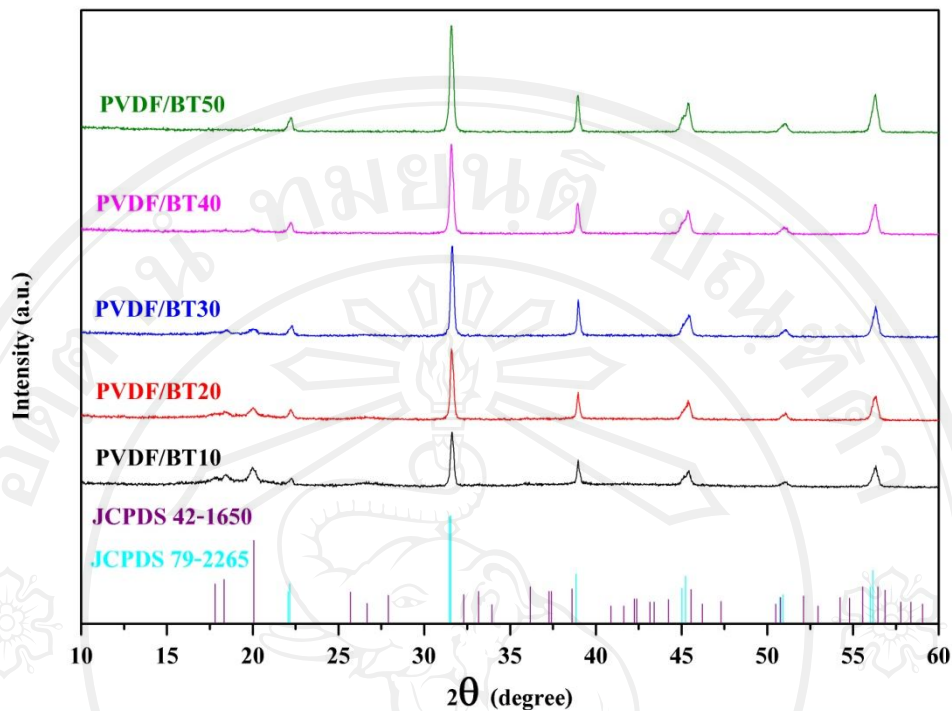
- ผลการวิเคราะห์ XRD ของ PVDF/BT คอมโพสิต

แผนภาพ XRD ของ PVDF/BT คอมโพสิต แสดงดังรูป 4.9-4.10



รูป 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PVDF/BT คอมโพสิต
ที่เติมอนุภาคเซรามิก BT ขนาดต่างๆ

จากแผนภาพ XRD ของ PVDF/BT คอมโพสิต ที่เติมอนุภาคเซรามิก BT ขนาดต่างๆ พบว่า
เฟสที่ได้นั้นมีโครงสร้างผลึกของ BT ที่เป็นเตตระโกนอลและโครงสร้างผลึกของ PVDF รวมกันอยู่
โดยเฟสที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก

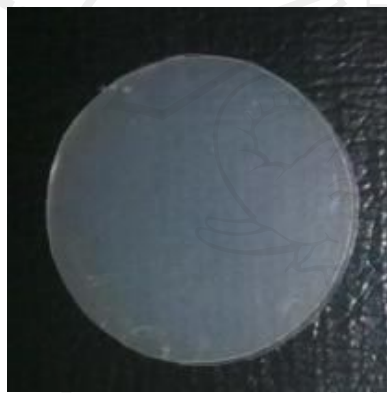


รูป 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PVDF/BT คอมโพสิต
ที่มีปริมาณเซรามิก BT ต่างๆ

จากแผนภาพ XRD ของ PVDF/BT คอมโพสิต พบว่า โครงสร้างที่ได้มีโครงสร้างผลึกของ BT ที่เป็นเตตระโกนอล เมื่อ PVDF/BT คอมโพสิตที่มีปริมาณเซรามิก BT เพิ่มขึ้น จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เลื่อน (Shift) ไป จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PVDF ไปยังรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ BT ตามปริมาณของเซรามิก BT ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความเป็นเตตระโกนอลเพิ่มขึ้นด้วย

4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตสามารถเตรียมได้โดยการผสม PVDF และผงเซรามิกด้วยวิธีทางกล จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด โดยใช้อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1,500 psi เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นทำการอัดหล่อเย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที หลังการกดอัด จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดเบอร์ 600, 800 และ 1,000 ตามลำดับ เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนบริเวณผิวของชิ้นทดสอบ ลักษณะชิ้นทดสอบ PVDF/PZT คอมโพสิต และ PVDF/BT คอมโพสิตแสดงดังรูป 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



(a)



(b)

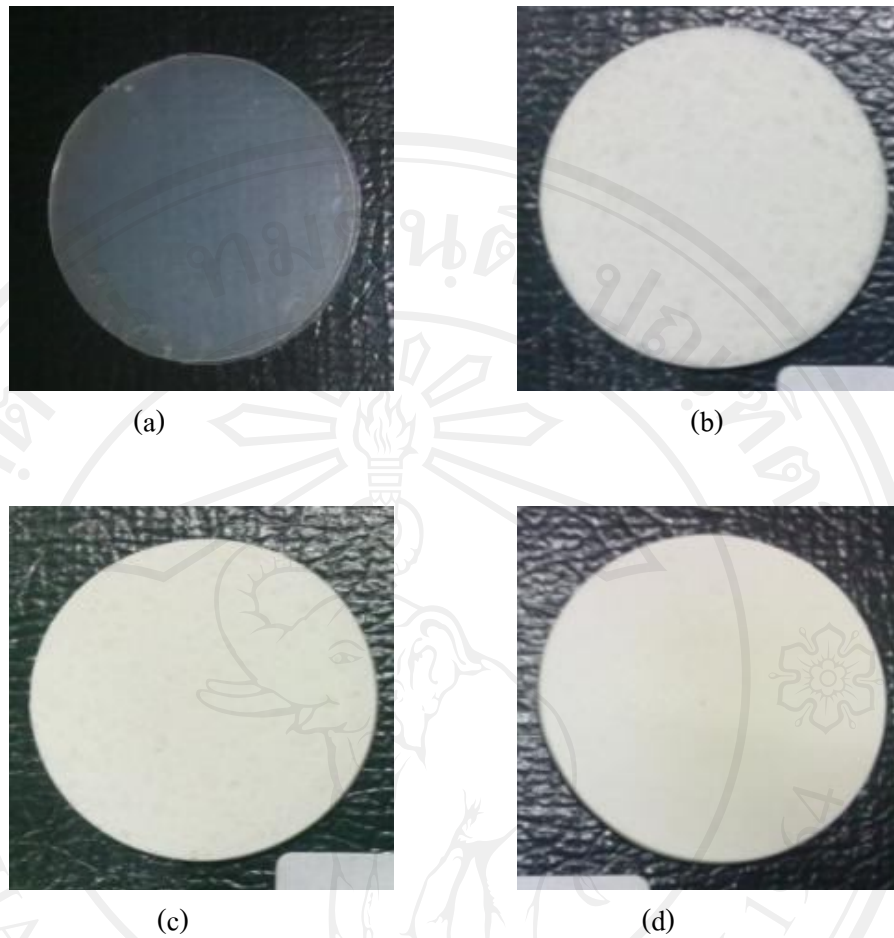


(c)



(d)

รูป 4.11 ชิ้นทดสอบ (a) PVDF และ PVDF/PZT คอมโพสิต; (b) 10% vol. PZT, (c) 30% vol. PZT และ (d) 50% vol. PZT



รูป 4.12 ชิ้นทดสอบ (a) PVDF และ PVDF/BT คอมโพสิต; (b) 10% vol. BT, (c) 30% vol. BT และ (d) 50% vol. BT

จากรูป 4.11 และ 4.12 พบว่าชิ้นทดสอบ PVDF มีลักษณะเป็นแผ่นสีขาวขุ่นเล็กน้อย และเมื่อทำการเติมอนุภาคเซรามิกลงไปมีผลทำให้ความโปร่งแสงของ PVDF หายไป โดยคอมโพสิตที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นสีขาวนวลและทึบแสง นอกจากนี้ยังพบว่าไม่สามารถทำการเตรียม PVDF/BT ที่มีปริมาณอนุภาคเซรามิก BT มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรได้ เนื่องจากคอมโพสิตจะมีความเปราะมากจนไม่สามารถคงรูปในลักษณะเป็นแผ่นได้

All rights reserved

4.3.1 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของคอมโพสิต (Density measurement)

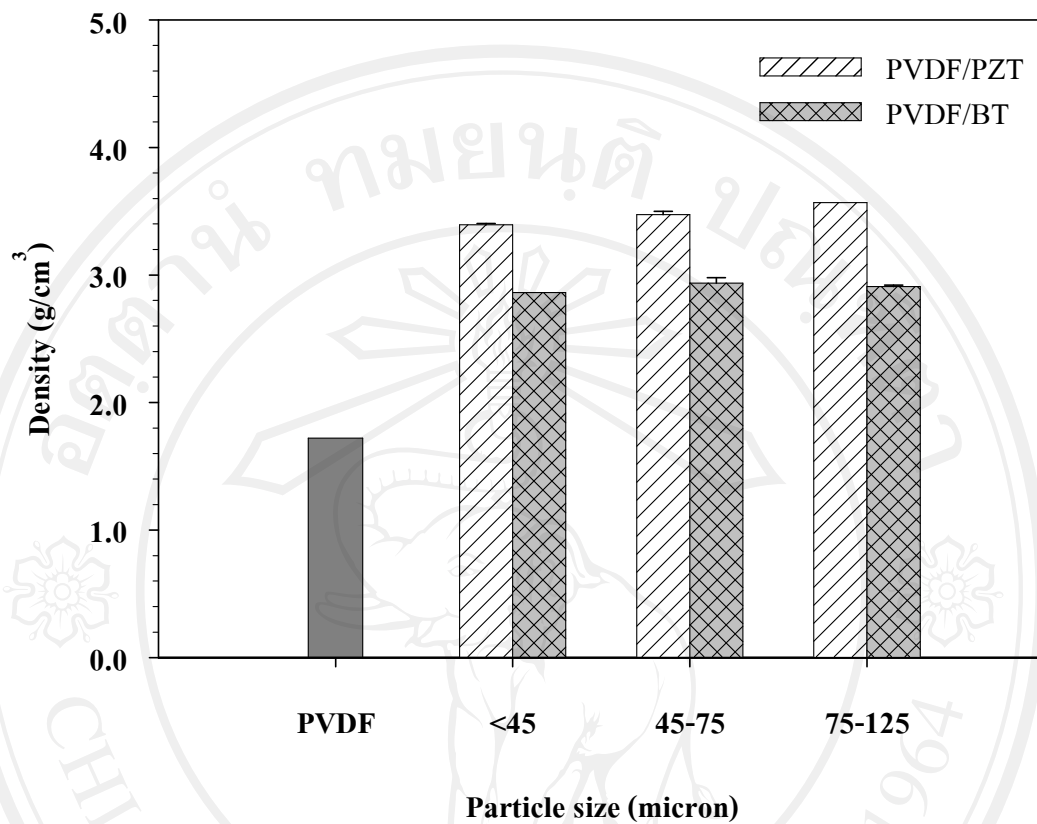
การวิเคราะห์ความหนาแน่นของคอมโพสิต จะทำการตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาด 10 x 10 x 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปทดสอบความหนาแน่นด้วยเครื่องทดสอบค่าความหนาแน่น

- การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ค่าความหนาแน่นของ PVDF/PZT คอมโพสิต และ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แสดงดังตาราง 4.6 และรูป 4.13

ตาราง 4.6 ความหนาแน่นของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ

ขนาดอนุภาค (μm)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	
	PVDF/PZT	PVDF/BT
PVDF	1.721 ± 0.01	
<45	3.394 ± 0.05	2.863 ± 0.06
45-75	3.474 ± 0.08	2.936 ± 0.07
75-125	3.569 ± 0.13	2.910 ± 0.04



รูป 4.13 ความหนาแน่นของ PVDF/PZT คอมโพสิต และ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ

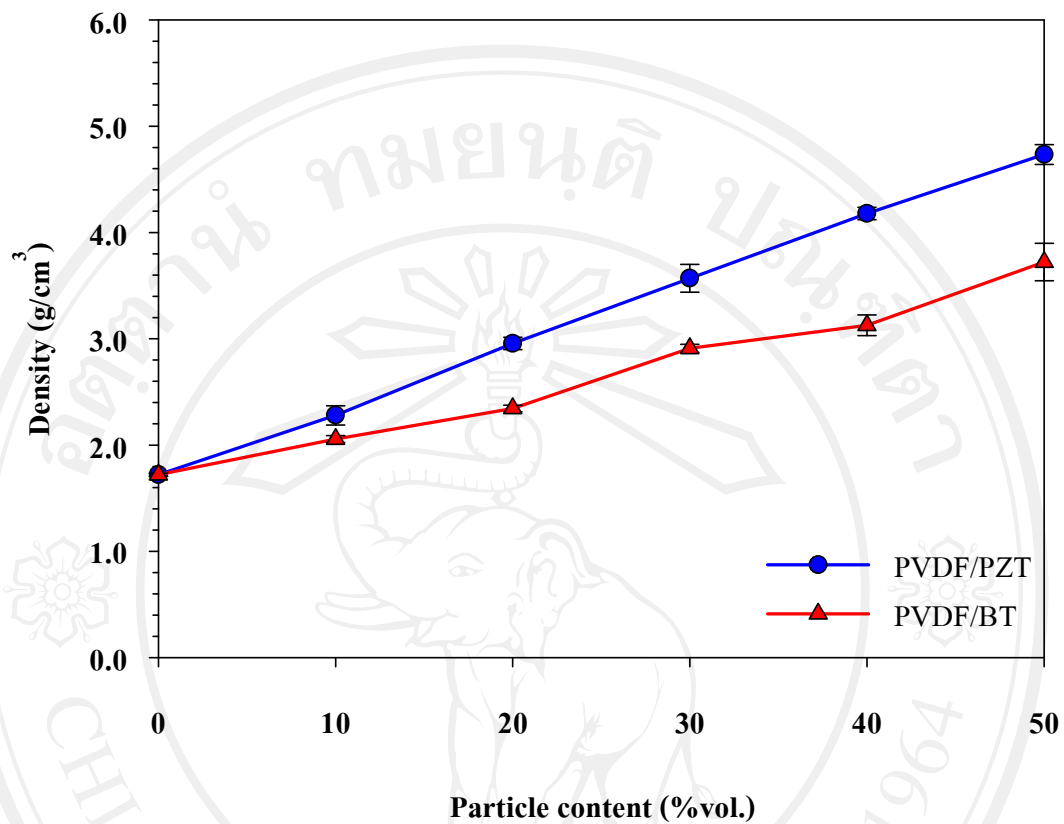
จากตาราง 4.6 และรูป 4.13 พบว่าการเติมอนุภาคเซรามิก PZT และ BT มีผลทำให้ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตมีความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตไม่ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของเซรามิก

- การศึกษาอิทธิพลของปริมาณอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ค่าความหนาแน่นของ PVDF/PZT คอมโพสิต และ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาด 75-125 ไมครอนในปริมาณต่างๆในช่วง 0-50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แสดงดังตาราง 4.7 และรูป 4.14

ตาราง 4.7 ความหนาแน่นของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ

ปริมาณอนุภาคเซรามิก (%vol.)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	
	PVDF/PZT	PVDF/BT
PVDF	1.721 ± 0.01	
10	2.280 ± 0.09	2.056 ± 0.03
20	2.956 ± 0.06	2.344 ± 0.03
30	3.569 ± 0.13	2.910 ± 0.04
40	4.179 ± 0.06	3.128 ± 0.10
50	4.734 ± 0.09	3.722 ± 0.18



รูป 4.14 ความหนาแน่นของ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์ และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ

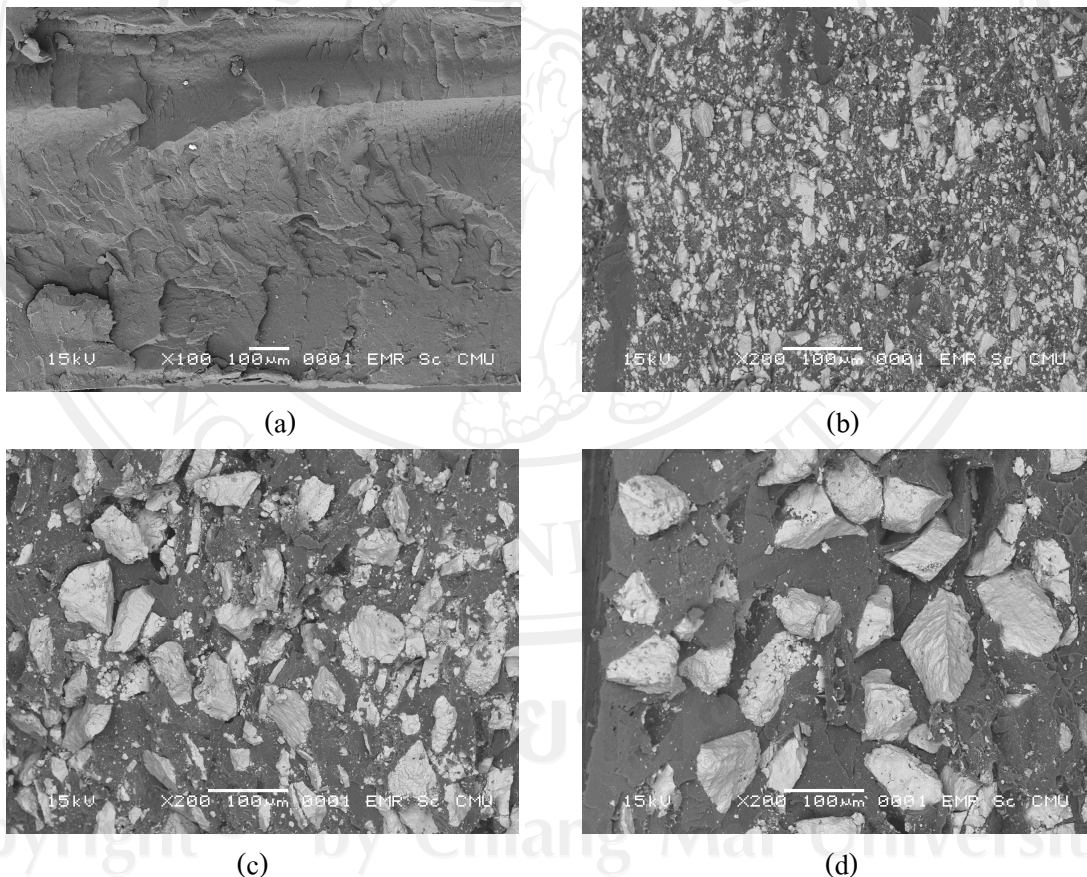
จากตาราง 4.7 และรูป 4.14 พบว่าการเติมอนุภาคเซรามิก PZT และ BT มีผลทำให้ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาคของเซรามิกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของเซรามิกดังตาราง 4.3 มีค่ามากกว่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ เมื่อทำการเติมอนุภาคเซรามิกในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นโดยค่าความหนาแน่นของ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์มากกว่าของ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์

4.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต

การศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต ด้วยเทคนิค SEM โดยรูปที่บ่งชี้ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกในพอลิเมอร์ที่มีความสมบูรณ์ของภาพ จะอยู่ในการทำงานของภาพที่สัญญาณอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Backscatter electron signal)

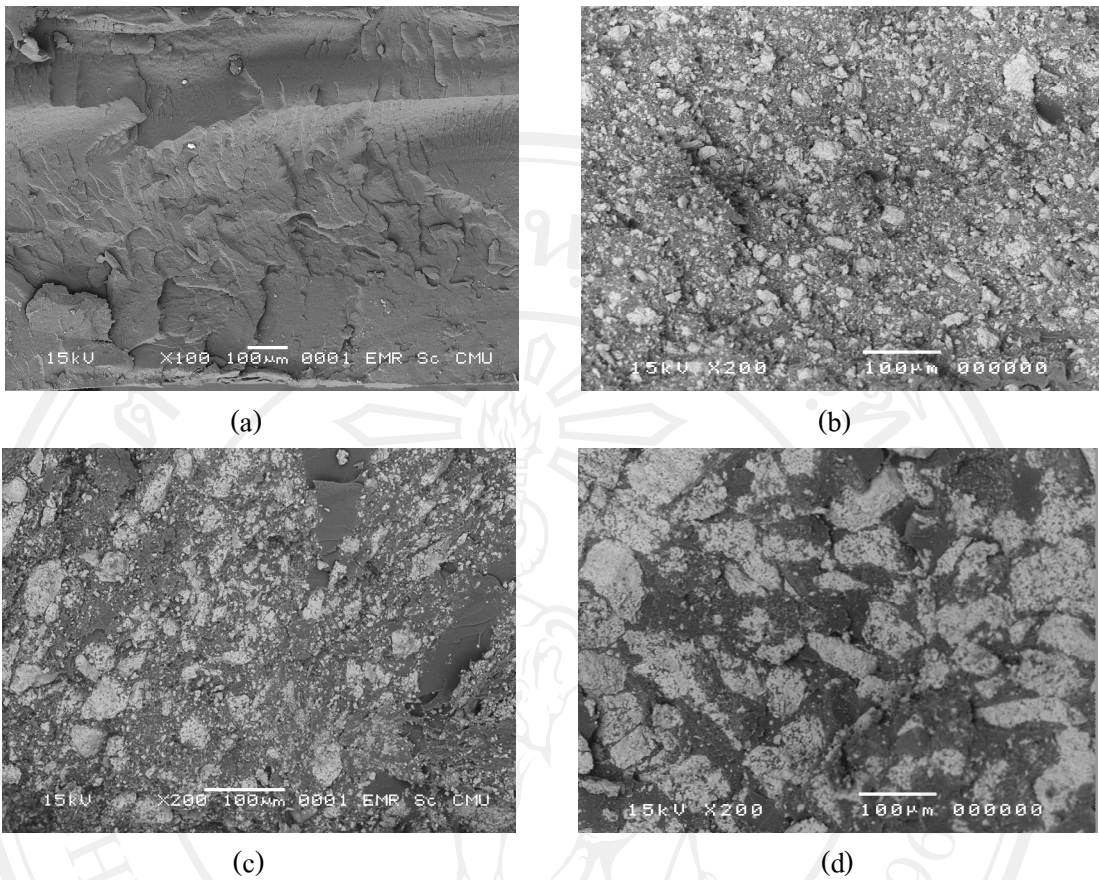
- การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

SEM micrographs ของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแสดงดังรูป 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



รูป 4.15 SEM micrographs ของ (a) PVDF และ PVDF/PZT คอมโพสิตที่เติม PZT ขนาดต่างๆ;

(b) <45 ไมครอน (c) 45-75 ไมครอน และ (d) 75-125 ไมครอน

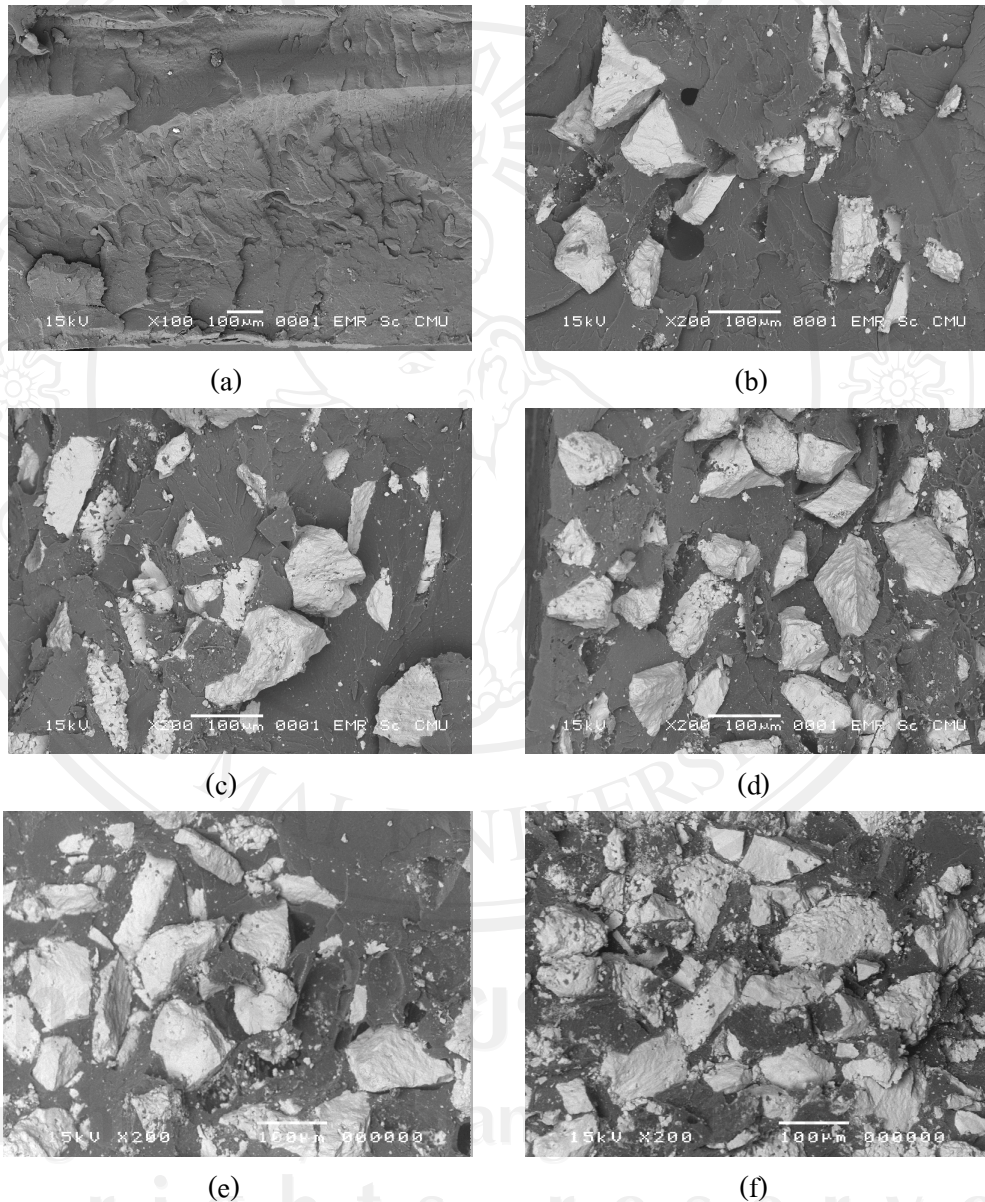


รูป 4.16 SEM micrographs ของ (a) PVDF และ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติม BT ขนาดต่างๆ;
(b) <45 ไมครอน (c) 45-75 ไมครอน และ (d) 75-125 ไมครอน

จากรูป 4.15 และ 4.16 พบว่าอนุภาคเซรามิก PZT และ BT สามารถกระจายตัวได้ดีและ
ค่อนข้างสม่ำเสมอในเฟสของ PVDF โดยพบว่าอนุภาคเซรามิกขนาดใหญ่ (75-125 ไมครอน)
สามารถกระจายตัวเข้ากับเฟสพอลิเมอร์ได้ดีที่สุด

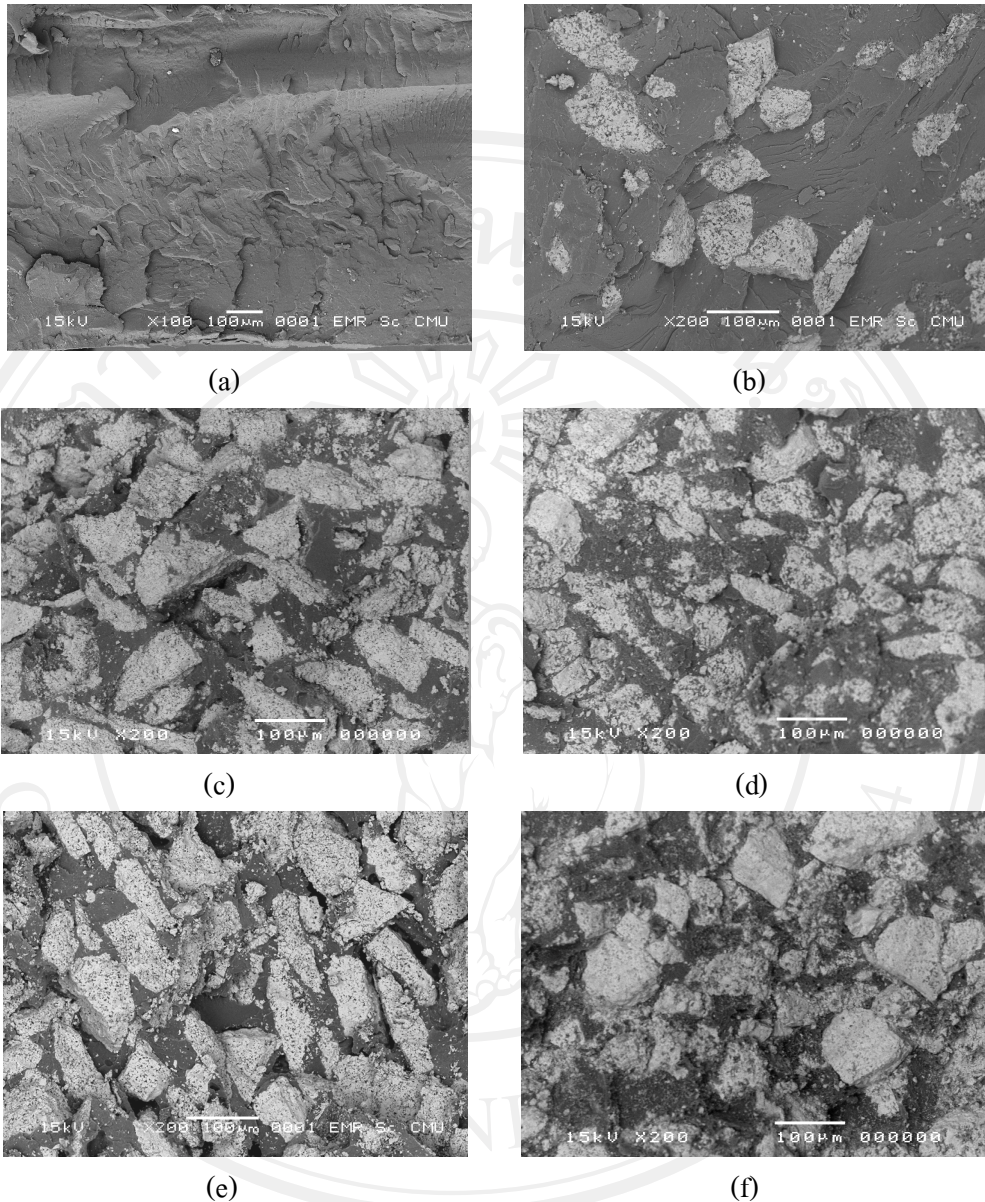
- การศึกษาอิทธิพลของปริมาณอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

SEM micrographs ของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาด 75-125 ไมครอนในปริมาณต่างๆ ในช่วง 0-50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแสดงดังรูป 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ



รูป 4.17 SEM micrographs ของ (a) PVDF และ PVDF/PZT คอมโพสิตที่เติม PZT ปริมาณต่างๆ;

(b) 10%vol., (c) 20%vol., (d) 30%vol., (e) 40%vol. และ (f) 50%vol.



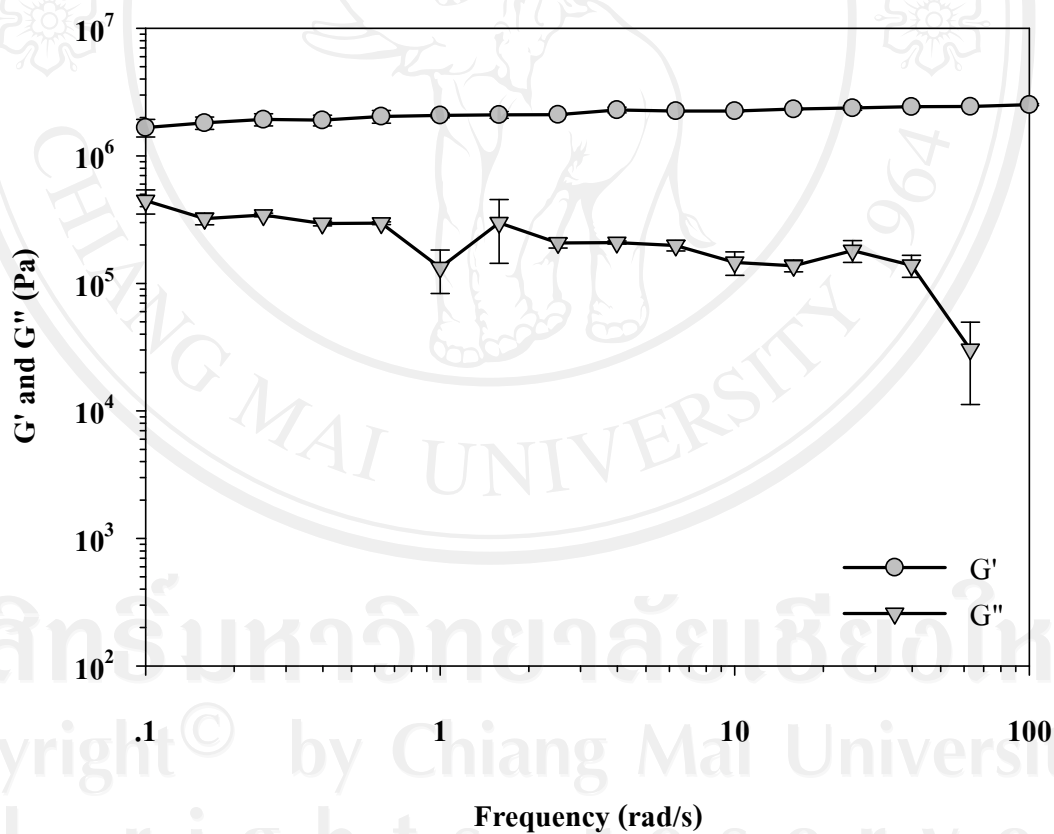
รูป 4.18 SEM micrographs ของ (a) PVDF และ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติม BT ปริมาณต่างๆ; (b) 10%vol., (c) 20%vol., (d) 30%vol., (e) 40%vol. และ (f) 50%vol.

จากรูป 4.17 และ 4.18 พบว่าอนุภาคเซรามิก PZT และ BT สามารถกระจายตัวได้ดีและค่อนข้างสม่ำเสมอในเฟสของ PVDF แม้จะเติมอนุภาคเซรามิกในปริมาณสูงจนถึง 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

4.4 การทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้ากล (Electromechanical properties) ของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต

สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้ากลของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกระแสวิทยาภายใต้สนามไฟฟ้า (Electrorheology) โดยเตรียมชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หนา 1.0 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้เครื่องรีโอมิเตอร์ให้แรงเฉือนกับชิ้นทดสอบด้วยความถี่ในการทดสอบเท่ากับ 0.1-100 รอบต่อวินาที และอุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 27 องศาเซลเซียส โดยทำการปรับเปลี่ยนความแรงสนามไฟฟ้าในช่วง 0-2,000 โวลต์ต่อมิลลิเมตร

จากการทดสอบกระแสวิทยาของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต โดยทำการศึกษา PVDF เพื่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์ โดยการทดสอบแสดงดังรูป 4.19



รูป 4.19 สมบัติกระแสวิทยาของ PVDF เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า

จากรูป 4.19 พบว่า PVDF พอลิเมอร์มีค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, G') มากกว่าค่ามอดุลัสการสูญเสีย (Loss modulus, G'') แสดงให้เห็นว่า PVDF พอลิเมอร์มีความเป็นของแข็งมากกว่าของเหลว

การทดสอบการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของ PVDF พอลิเมอร์และเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต โดยการศึกษาการตอบสนองของค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus response, $\Delta G'$) ที่ความถี่ 1.0 rad/s และเปอร์เซ็นต์ความเครียด 0.05% สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.5 สำหรับค่า G' ของ PVDF พอลิเมอร์เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า เท่ากับ 2.08×10^5 พาสคัล และค่า $\Delta G'$ ที่สนามไฟฟ้าต่างๆ แสดงดังตาราง 4.8

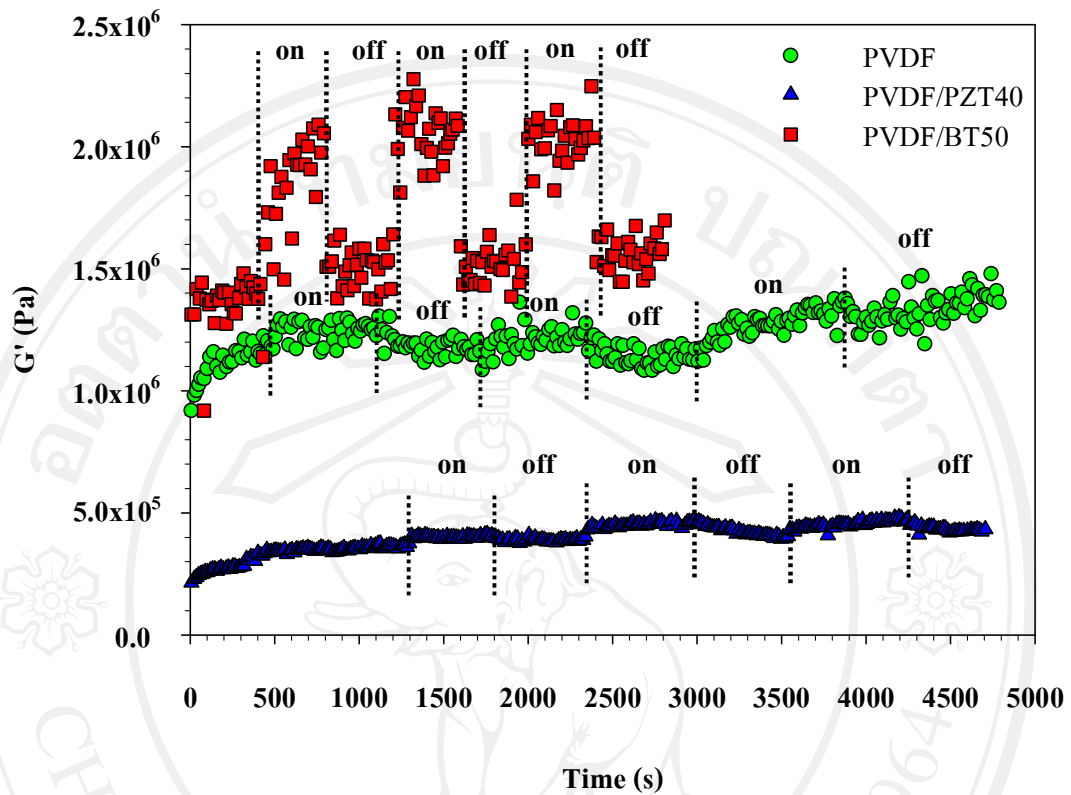
ตาราง 4.8 การตอบสนองของค่ามอดุลัสสะสม ($\Delta G'$) ของ PVDF พอลิเมอร์

E-field (V/mm)	100	500	1,000	1,500	2,000
$\Delta G'$ (Pa)	1.47×10^5	3.20×10^5	2.91×10^5	2.21×10^5	1.88×10^5

จากตาราง 4.8 พบว่า ความแรงสนามไฟฟ้ามีผลทำให้สมบัติของ PVDF พอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป โดยที่ความแรงสนามไฟฟ้าจาก 100 ถึง 500 โวลต์ต่อมิลลิเมตร มีค่า $\Delta G'$ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งที่ความแรงสนามไฟฟ้า 1,000 โวลต์ต่อมิลลิเมตร ค่า $\Delta G'$ มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งพบว่า PVDF พอลิเมอร์มีสภาพของเป็นของแข็งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าพอลิเมอร์สามารถถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการโพลาไรซ์แล้วเกิดการจัดเรียงไดโพลโมเมนต์ขึ้น ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ความแรงสนามไฟฟ้าไม่ค่อยมีผลต่อการตอบสนองของ PVDF พอลิเมอร์มากนัก

4.4.1 การตอบสนองเชิงเวลา (Temporal response) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต

จากรูป 4.20 แสดงการตอบสนองเชิงเวลาของ PVDF PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิต จากการทดสอบเวลาการกวาด (Time sweep test) โดยการเปิด-ปิดสนามไฟฟ้าสลับกันไป การตอบสนองเชิงเวลาของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยวัดค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, G') ทำการศึกษาที่ความแรงสนามไฟฟ้าเท่ากับ 2,000 โวลต์ต่อมิลลิเมตร ที่ความถี่ 1 rad/s และเปอร์เซ็นต์ความเครียด 0.05%

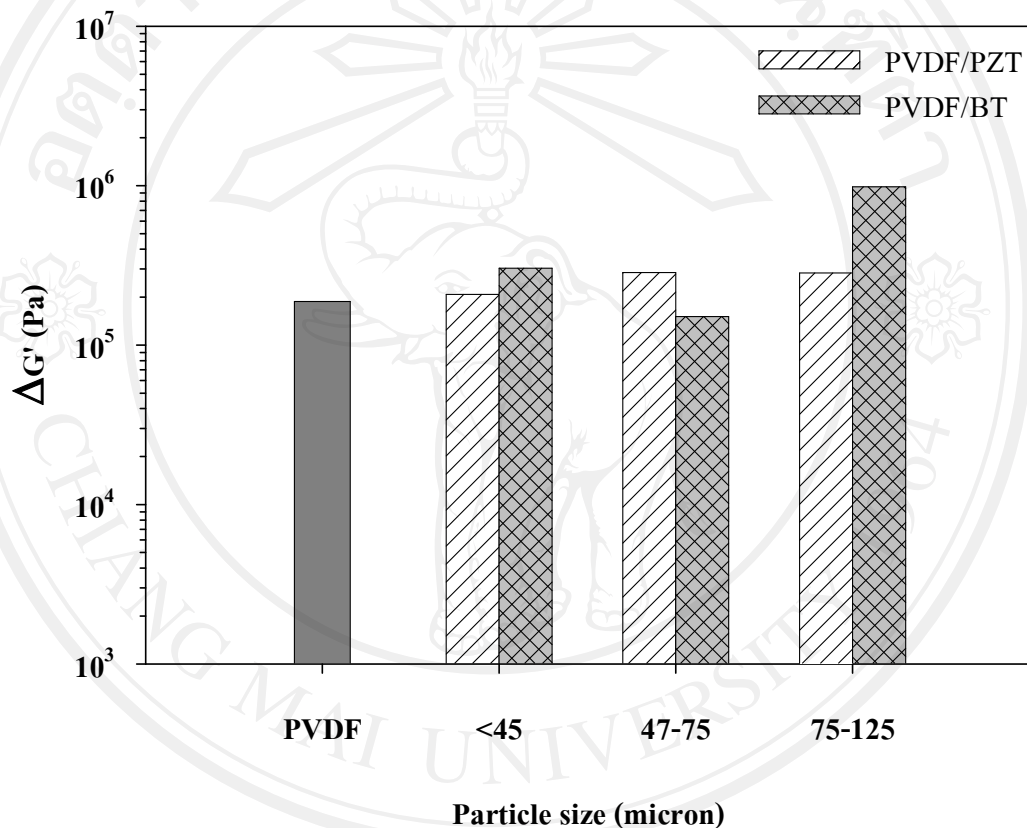


รูป 4.20 ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, G') ของ PVDF, PVDF/PZT40 คอมโพสิต และ PVDF/BT50 คอมโพสิต

จากผลการทดสอบพบว่า ค่ามอดุลัสสะสมของ PVDF และ PVDF/PZT คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปิดสนามไฟฟ้าและลดลงอย่างช้าๆเมื่อปิดสนามไฟฟ้าแต่ไม่สามารถกลับสู่ค่าเริ่มต้นได้ สำหรับ PVDF/BT คอมโพสิตค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นจาก 1.31×10^6 พาสคัลถึง 2.06×10^6 พาสคัล เมื่อเปิดสนามไฟฟ้าและเข้าสู่สถานะคงที่ (Steady state) เมื่อทำการปิดสนามไฟฟ้า PVDF/BT คอมโพสิตแสดงพฤติกรรมผันกลับได้บางส่วน โดยค่ามอดุลัสสะสมลดลงจาก 2.04×10^6 พาสคัลถึง 1.70×10^6 พาสคัล แต่ไม่สามารถผันกลับสู่ค่าเริ่มต้นได้ พฤติกรรมนี้บ่งบอกถึงแรงกระทำบางอย่างที่ไม่สามารถกลับคืนได้ อาจเนื่องมาจากไดโพลโมเมนต์ที่เหลืออยู่ระหว่างแรงกระทำของอนุภาคเซรามิกที่มีปริมาณมากและไดโพลโมเมนต์ที่เหลืออยู่ระหว่างแรงกระทำของอนุภาคเซรามิกและพอลิเมอร์ [50]

4.4.2 อิทธิพลของขนาดอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ผลการทดสอบอิทธิพลของขนาดอนุภาคเซรามิกต่อการตอบสนองของค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus response, $\Delta G'$) ของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความถี่ 1.0 rad/s เปอร์เซ็นต์ความเครียด 0.05% และ ความแรงสนามไฟฟ้า 2,000 V/mm แสดงดังรูป 4.21



รูป 4.21 การตอบสนองของค่ามอดุลัสสะสม ($\Delta G'$) ของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ที่ $E = 2,000$ V/mm

จากรูป 4.21 พบว่าเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตสามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าได้เนื่องจากความแรงสนามไฟฟ้าทำให้เกิดโพลาริเซชัน โดยเกิดการจัดเรียงประจุตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ทำให้ประจุบวกและประจุลบจัดเรียงตัวในทิศทางตรงข้ามกัน เกิดไดโพลโมเมนต์และนำไปสู่การเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลขึ้น ทำให้วัสดุสามารถต้านทานแรงที่มากระทำได้ดีขึ้น [51] นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมอนุภาค PZT และอนุภาค BT มีผลทำให้ $\Delta G'$ ของคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่มีการเติมอนุภาคเซรามิก (PVDF) นอกจากนี้

ค่า $\Delta G'$ ของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามขนาดอนุภาคเซรามิกที่เติมลงไป โดยคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดใหญ่ (75-125 ไมครอน) มี $\Delta G'$ มากกว่า PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาค BT ขนาดเล็ก (<45 ไมครอน) และขนาด 45-75 ไมครอน ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของ $\Delta G'$ เป็นผลเนื่องจากการโพลาริเซชันเกิดได้ดีขึ้น โดยค่า $\Delta G'$ ของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ และความแรงสนามไฟฟ้าต่างๆ แสดงดังตาราง 4.9 และ 4.10

ตาราง 4.9 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ($\omega = 1.0$ rad/s)

E-field (V/mm)	$\Delta G'$ (Pa)		
	PVDF/PZT45	PVDF/PZT45-75	PVDF/PZT75-125
100	2.19×10^4	5.09×10^4	1.17×10^5
500	3.83×10^4	1.26×10^5	1.61×10^5
1,000	5.51×10^4	1.06×10^5	2.30×10^5
1,500	1.27×10^5	2.23×10^5	2.50×10^5
2,000	2.08×10^5	2.85×10^5	2.84×10^5

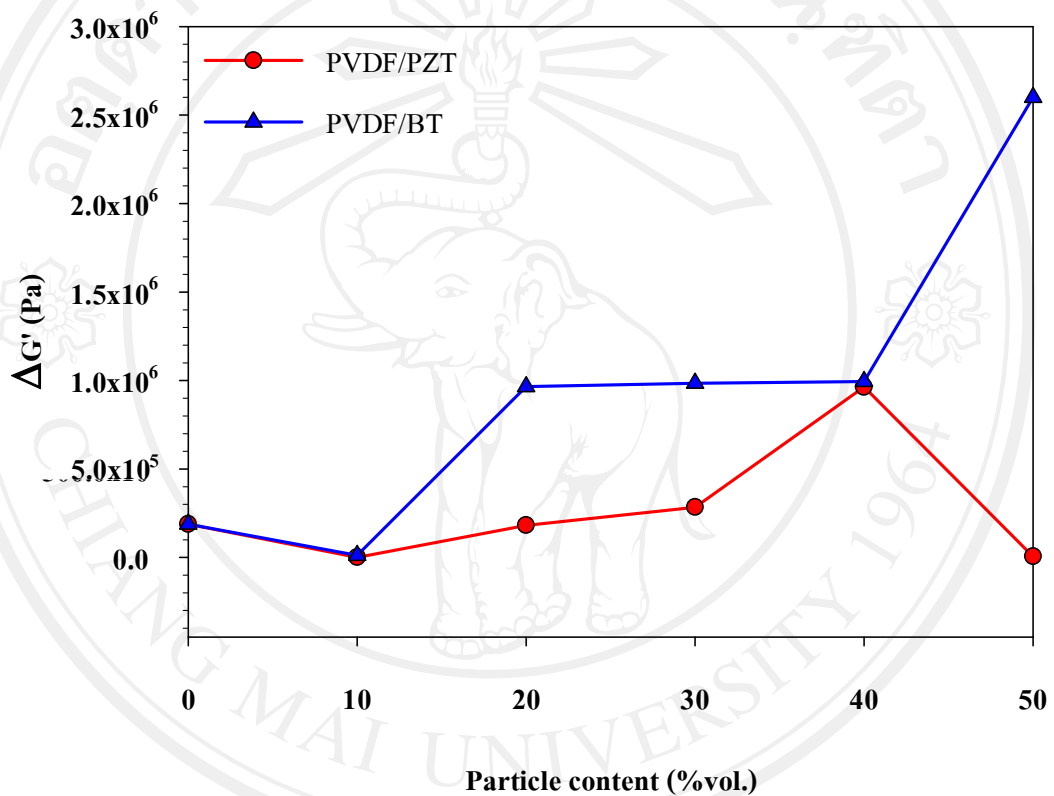
ตาราง 4.10 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ($\omega = 1.0$ rad/s)

E-field (V/mm)	$\Delta G'$ (Pa)		
	PVDF/BT45	PVDF/BT45-75	PVDF/BT75-125
100	9.45×10^4	9.60×10^3	1.37×10^4
500	7.51×10^4	3.10×10^4	1.14×10^5
1,000	1.04×10^5	6.59×10^4	2.60×10^5
1,500	1.87×10^5	8.55×10^4	3.89×10^5
2,000	3.03×10^5	1.51×10^5	9.85×10^5

จากตาราง 4.9 และ 4.10 พบว่า PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคขนาดต่างๆ มีค่า $\Delta G'$ มากกว่า PVDF/PZT คอมโพสิต อาจเนื่องมาจากอนุภาคเซรามิก BT และเมทริกซ์เกิดแรงกระทำระหว่างกัน ทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์หลังการโพลาริเซชันได้ดีขึ้น ทำให้วัสดุสามารถต้านทานแรงที่มากกระทำได้ดีขึ้น

4.4.3 อิทธิพลของปริมาณอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ผลการทดสอบอิทธิพลของปริมาณอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกต่อค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิก ขนาด 75-125 ไมครอนในปริมาณต่างๆ ในช่วง 0-50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความถี่ 1.0 rad/s เปอร์เซ็นต์ความเครียด 0.05% และความแรงสนามไฟฟ้า 2,000 V/mm แสดงดังรูป 4.22



รูป 4.22 การตอบสนองของค่ามอดุลัสสะสม ($\Delta G'$) ของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT

คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆที่ $E = 2,000$ V/mm

จากรูป 4.22 พบว่า PVDF/PZT คอมโพสิตที่เติมอนุภาค PZT ขนาด 75-125 ไมครอนในสัดส่วนต่างๆ มีค่า $\Delta G'$ มากขึ้นตามปริมาณอนุภาค PZT ที่เพิ่มขึ้นและ PVDF/PZT คอมโพสิตที่เติมอนุภาค PZT ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรค่า $\Delta G'$ ลดลง สำหรับ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาค BT ในสัดส่วนต่างๆ ค่า $\Delta G'$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาค BT ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตที่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณอนุภาคเซรามิกเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า

$\Delta G'$ ของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ และความแรงสนามไฟฟ้าต่างๆ แสดงดังตาราง 4.11 และ 4.12

ตาราง 4.11 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/PZT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ ($\omega = 1.0$ rad/s)

E-field (V/mm)	$\Delta G'$ (Pa)				
	PVDF/PZT10	PVDF/PZT20	PVDF/PZT30	PVDF/PZT40	PVDF/PZT50
100	-	6.05×10^4	1.17×10^5	1.57×10^5	2.92×10^3
500	-	7.68×10^4	1.61×10^5	2.12×10^5	3.66×10^3
1,000	-	1.21×10^5	2.30×10^5	4.03×10^5	4.99×10^3
1,500	-	1.35×10^5	2.50×10^5	5.10×10^5	5.66×10^3
2,000	-	1.81×10^5	2.84×10^5	9.63×10^5	4.75×10^3

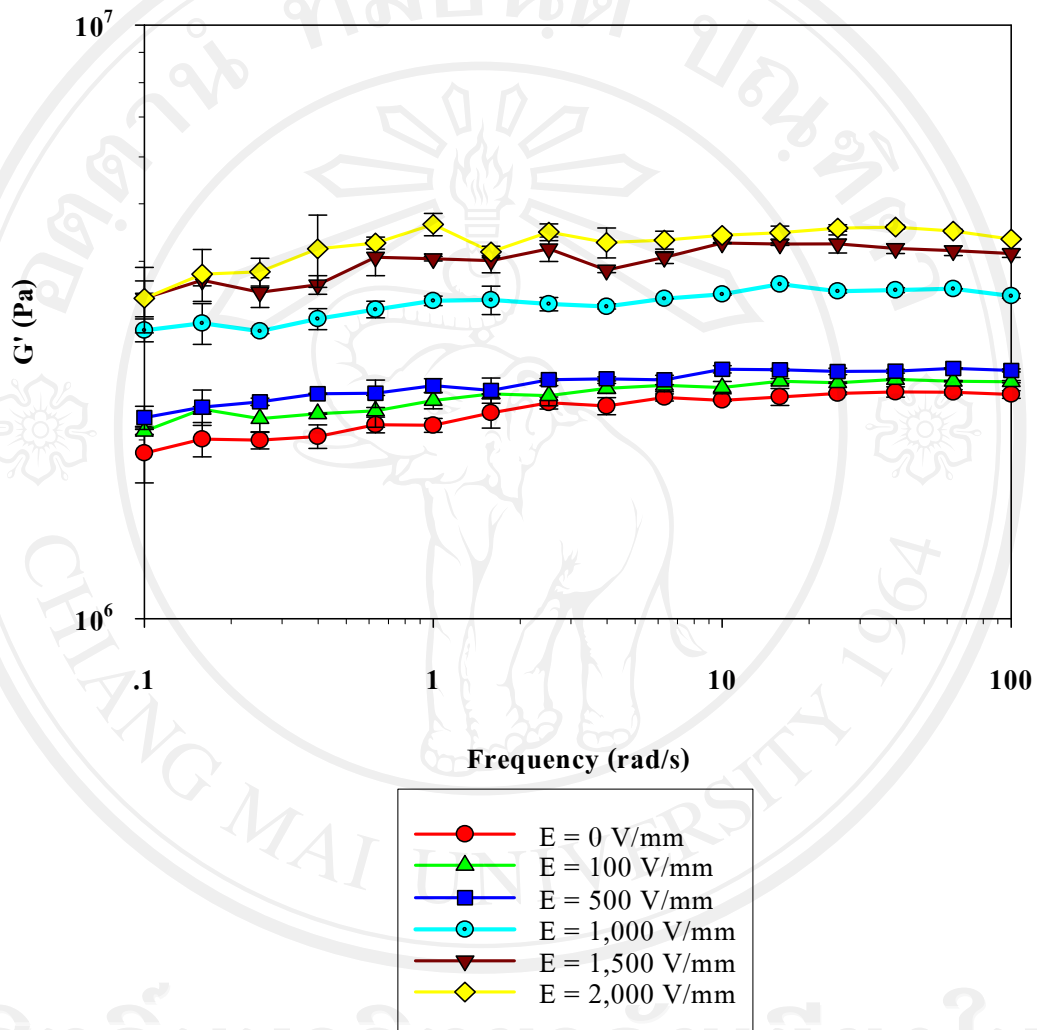
ตาราง 4.12 ค่า $\Delta G'$ ของ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ ($\omega = 1.0$ rad/s)

E-field (V/mm)	$\Delta G'$ (Pa)				
	PVDF/BT10	PVDF/BT20	PVDF/BT30	PVDF/BT40	PVDF/BT50
100	9.34×10^4	1.46×10^5	1.37×10^4	7.15×10^4	2.25×10^5
500	9.80×10^4	2.39×10^5	1.14×10^5	1.81×10^5	6.44×10^5
1000	5.15×10^4	2.61×10^5	2.60×10^5	3.77×10^5	1.23×10^6
1,500	2.26×10^4	5.58×10^5	3.89×10^5	7.49×10^5	1.91×10^6
2,000	1.18×10^4	9.66×10^5	9.85×10^5	9.94×10^5	2.60×10^6

จากตาราง 4.11 และ 4.12 พบว่าทั้ง PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิต ค่า $\Delta G'$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาคเซรามิกที่เพิ่มขึ้น นั่นคือคอมโพสิตมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคเซรามิกที่เติมเข้าไป ทำให้คอมโพสิตเกิดการโพลาไรเซชันมากขึ้น มีแรงกระทำระหว่างอนุภาคเซรามิกและเมทริกซ์ได้ดีขึ้นและยังพบว่าอนุภาคเซรามิกทำหน้าที่เป็นตัวเติมเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คอมโพสิตอีกด้วย [50]

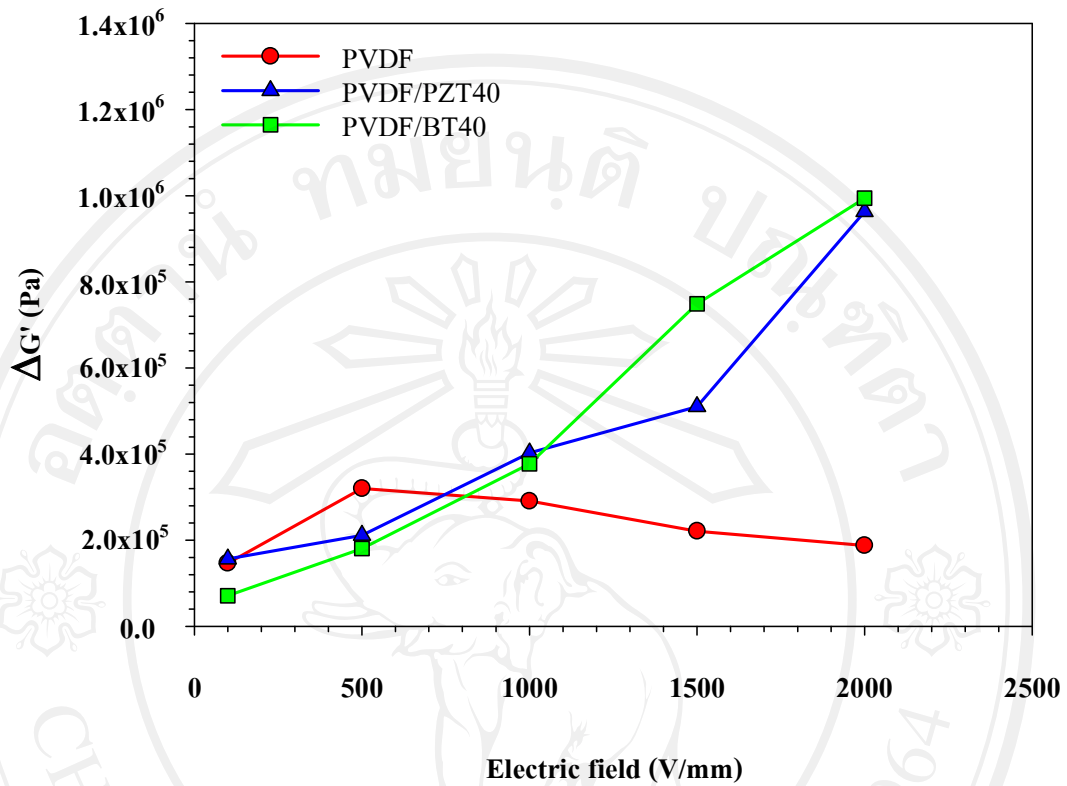
4.4.4 อิทธิพลของความแรงสนามไฟฟ้า

การทดสอบอิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อสมบัติเชิงไฟฟ้ากลของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต จะทำการปรับเปลี่ยนความแรงสนามไฟฟ้าในช่วง 0-2,000 V/mm แสดงดังรูป 4.23-4.24



รูป 4.23 มอดุลัสสะสม (G') ของคอมโพสิต (PVDF/BT50) ที่ %strain = 0.05%

จากรูป 4.23 พบว่า ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, G') ของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อทดสอบทุกความถี่ เนื่องจากเมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทำให้คอมโพสิตเกิดการโพลาไรเซชันและไดโพลโมเมนต์เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันตามสนามไฟฟ้า และเกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้มากขึ้น คอมโพสิตจึงสามารถต้านทานแรงที่มากกว่าได้ดีขึ้น



รูป 4.24 การตอบสนองของค่ามอดุลัสสะสม ($\Delta G'$) ของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความแรงสนามไฟฟ้าต่างๆ

จากรูป 4.24 พบว่าเมื่อความแรงของสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นค่าการตอบสนองของค่ามอดุลัสสะสม ($\Delta G'$) ของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตมีค่ามากขึ้น แสดงว่าเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความแรงของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการโพลาไรเซชันได้มากขึ้น เกิดไดโพลโมเมนต์และการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลขึ้น ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น และความแรงสนามไฟฟ้ายังช่วยเพิ่มความชัดเจนของมอดุลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ของทั้งเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและพอลิเมอร์ของคอมโพสิตซึ่งเกี่ยวข้องกับทั้งสองปัจจัย [52] นอกจากนี้ยังพบว่าค่า $\Delta G'$ ของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตมีค่ามากกว่า PVDF พอลิเมอร์ เนื่องจากคอมโพสิตมีทั้งอนุภาคเซรามิกและพอลิเมอร์ที่สามารถถูกโพลาไรเซชันได้ จึงทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์และมีการยึดเหนี่ยวกันได้ดีกว่า

4.5 การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)

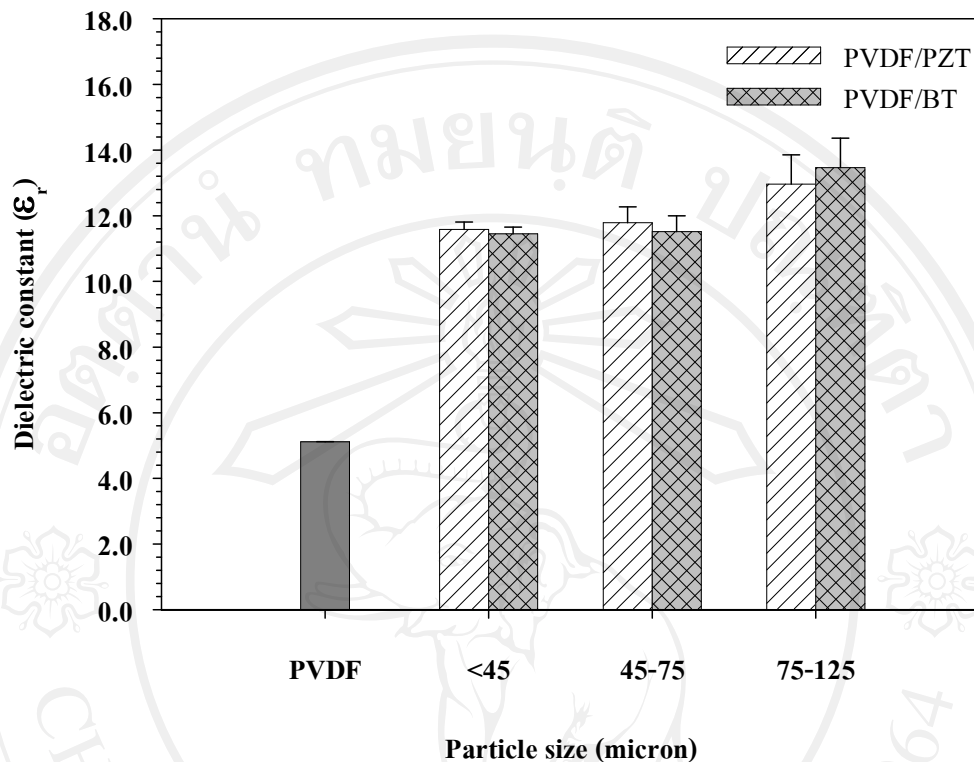
ผลการวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก โดยการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant, ϵ_r) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต สามารถวัดได้จากเครื่อง LCR มิเตอร์ (HP HEWLETT PACKARD รุ่น 4284A) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องรีโอมิเตอร์ ณ อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส โดยใช้ความถี่ต่ำ เท่ากับ 20 Hz ค่าที่คำนวณได้จะสัมพันธ์กับสมการ 2.7

- การศึกษاثิพลของขนาดอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ผลการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิต ที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแสดงตาราง 4.13 และรูป 4.25

ตาราง 4.13 สมบัติไดอิเล็กทริกของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ที่ความถี่ต่ำ เท่ากับ 20 Hz

ขนาดอนุภาค (μm)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ที่ 20 Hz		ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ที่ 20 Hz	
	PVDF/PZT	PVDF/BT	PVDF/PZT	PVDF/BT
PVDF	5.106		0.281	
<45	11.738	11.324	0.473	0.472
45-75	12.066	11.229	0.528	0.394
75-125	12.459	13.993	0.597	0.379



รูป 4.25 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ที่ความถี่เท่ากับ 20 Hz

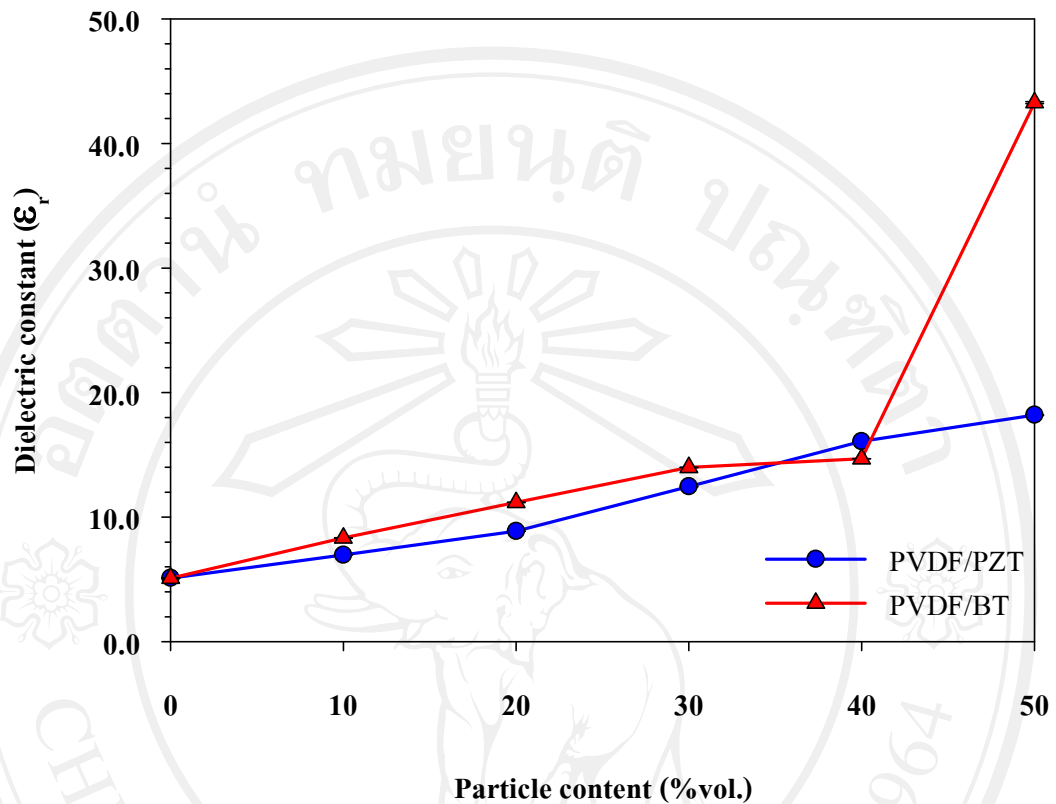
จากรูป 4.25 พบว่าการเติมอนุภาค PZT และอนุภาค BT มีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่ไม่มีการเติมเซรามิก (PVDF) โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิก PZT และอนุภาคเซรามิก BT จะอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน และคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดใหญ่ (75-125 ไมครอน) มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากกว่า PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาค BT ขนาดเล็ก (<45 ไมครอน) และขนาด 45-75 ไมครอน เป็นผลเนื่องจากเมื่ออนุภาคเซรามิกใหญ่ขึ้น โครงสร้างของเฟสมีความต่อเนื่องและจะทำให้มีการเชื่อมโยงกันของเฟสดีขึ้น

- การศึกษาอิทธิพลของปริมาณอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ผลการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ PVDF/PZT และ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาด 75-125 ไมครอนในปริมาณต่างๆ ในช่วง 0-50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแสดงดังตาราง 4.14 และรูป 4.26

ตาราง 4.14 สมบัติไดอิเล็กทริกของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ ที่ความถี่ต่ำเท่ากับ 20 Hz

ปริมาณอนุภาคเซรามิก (%vol.)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ที่ 20 Hz		ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ที่ 20 Hz	
	PVDF/PZT	PVDF/BT	PVDF/PZT	PVDF/BT
PVDF	5.106		0.281	
10	6.968	8.327	0.401	0.484
20	8.864	11.180	0.468	0.548
30	12.459	13.993	0.597	0.379
40	16.077	14.685	0.442	0.320
50	18.199	43.281	0.379	1.352



รูป 4.26 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ ที่ความถี่เท่ากับ 20 Hz

จากรูป 4.26 พบว่า PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติมอนุภาค PZT และ BT ขนาด 75-125 ไมครอนในสัดส่วนต่างๆ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคเซรามิกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณอนุภาคเซรามิกเพิ่มขึ้นคอมโพลีเมอร์สามารถเกิดโพลาไรเซชันได้มากขึ้น ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติมอนุภาค BT ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรสูงขึ้นอย่างชัดเจน

4.6 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient, d_{33}) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต

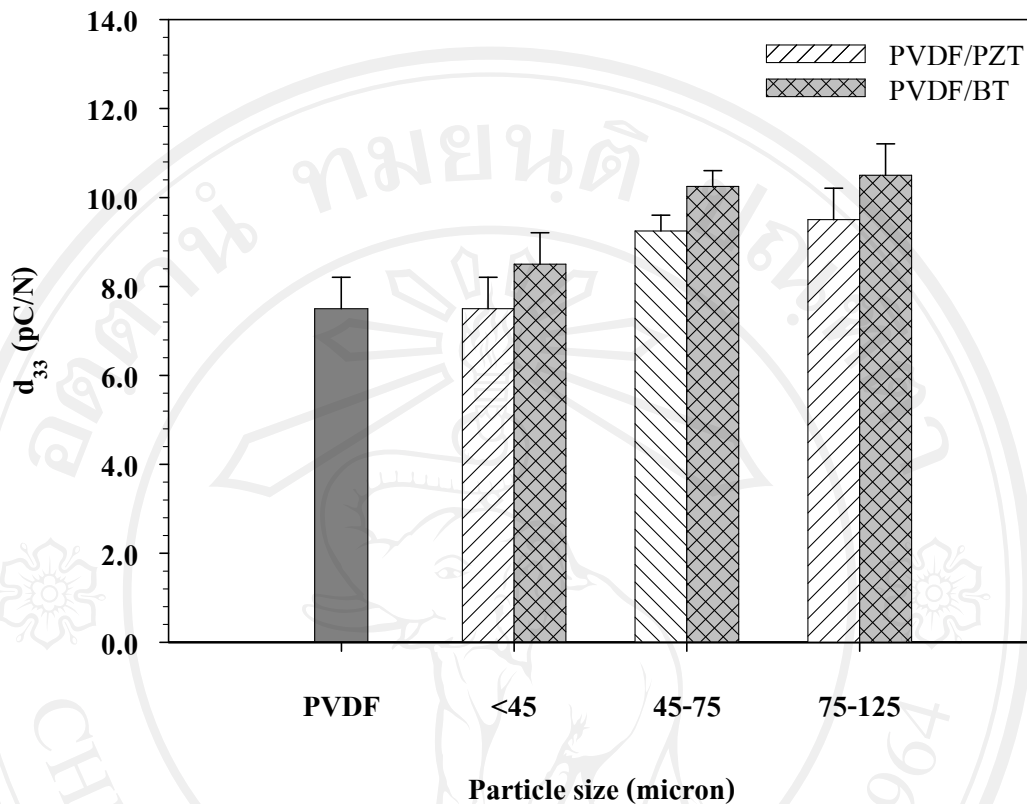
การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค PZT ต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของคอมโพสิตทำได้โดยการเตรียมชิ้นทดสอบคอมโพสิตที่เติมอนุภาค PZT สัดส่วน 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และทำการปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาค PZT ดังนี้ <45 ไมครอน 45-75 ไมครอน และ 75-125 ไมครอน จากนั้นนำสารผสม PVDF และ PZT ไปขึ้นรูปด้วยการกดอัดเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หนา 1.0 มิลลิเมตร ก่อนการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกได้ทำการโพลขึ้นทดสอบในน้ำมันซิลิโคน เพื่อให้ไดโพลภายในชิ้นทดสอบเกิดการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ชิ้นทดสอบ โดยขึ้นทดสอบ PVDF/PZT คอมโพสิตจะทำการโพลที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยสนามไฟฟ้าที่ใช้โพลมีขนาดเท่ากับ 4 kV/mm สำหรับชิ้นทดสอบ PVDF/BT คอมโพสิตจะทำการโพลที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยสนามไฟฟ้าที่ใช้โพลมีขนาดเท่ากับ 3 kV/mm จากนั้นจึงนำชิ้นทดสอบที่ผ่านการโพลแล้วไปทดสอบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ด้วยเครื่อง Piezo d_{33} meter

- การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ ในปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแสดงดังตาราง 4.15 และรูป 4.27

ตาราง 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ

ขนาดอนุภาค (μm)	d_{33} (pC/N)	
	PVDF/PZT	PVDF/BT
PVDF	8	
<45	8	9
45-75	9.5	10.5
75-125	10	11



รูป 4.27 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ

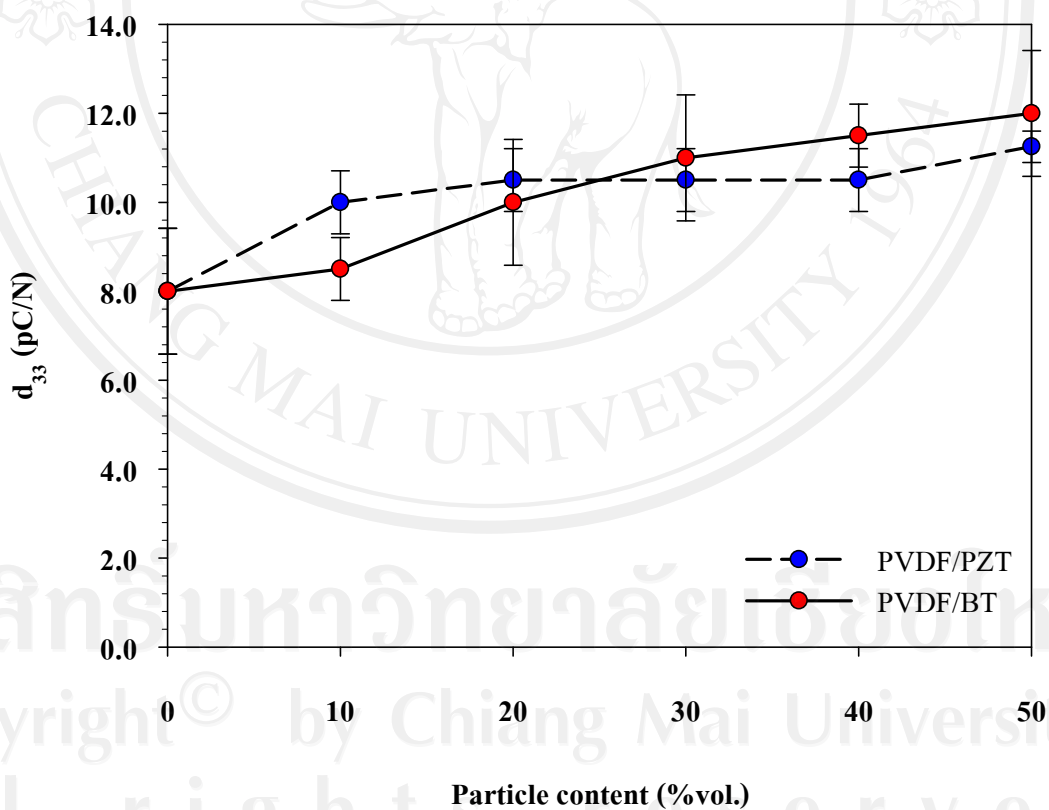
จากรูป 4.27 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาดต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคเซรามิกที่เติมลงในคอมโพสิต

- การศึกษาอิทธิพลของปริมาณอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของ PVDF/PZT คอมโพสิตและ PVDF/BT คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิกขนาด 75-125 ไมครอนในปริมาณต่างๆ ในช่วง 0-50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแสดงดังตาราง 4.16 และรูป 4.28

ตาราง 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ

ปริมาณอนุภาคเซรามิก (%vol.)	d_{33} (pC/N)	
	PVDF/PZT	PVDF/BT
PVDF	8	
10	10	8.5
20	10.5	10.0
30	10	11
40	10.5	11.5
50	11	12.0



รูป 4.28 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติมอนุภาคเซรามิกปริมาณต่างๆ

จากรูป 4.28 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์เฟียโซอิเล็กทริกของ PVDF/PZT คอมโพลีเมอร์และ PVDF/BT คอมโพลีเมอร์ที่เติมอนุภาคเซรามิก ขนาด 75-125 ไมครอนในปริมาณต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุภาคเซรามิกที่เติมลงในคอมโพลีเมอร์



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved