

บทที่ 4

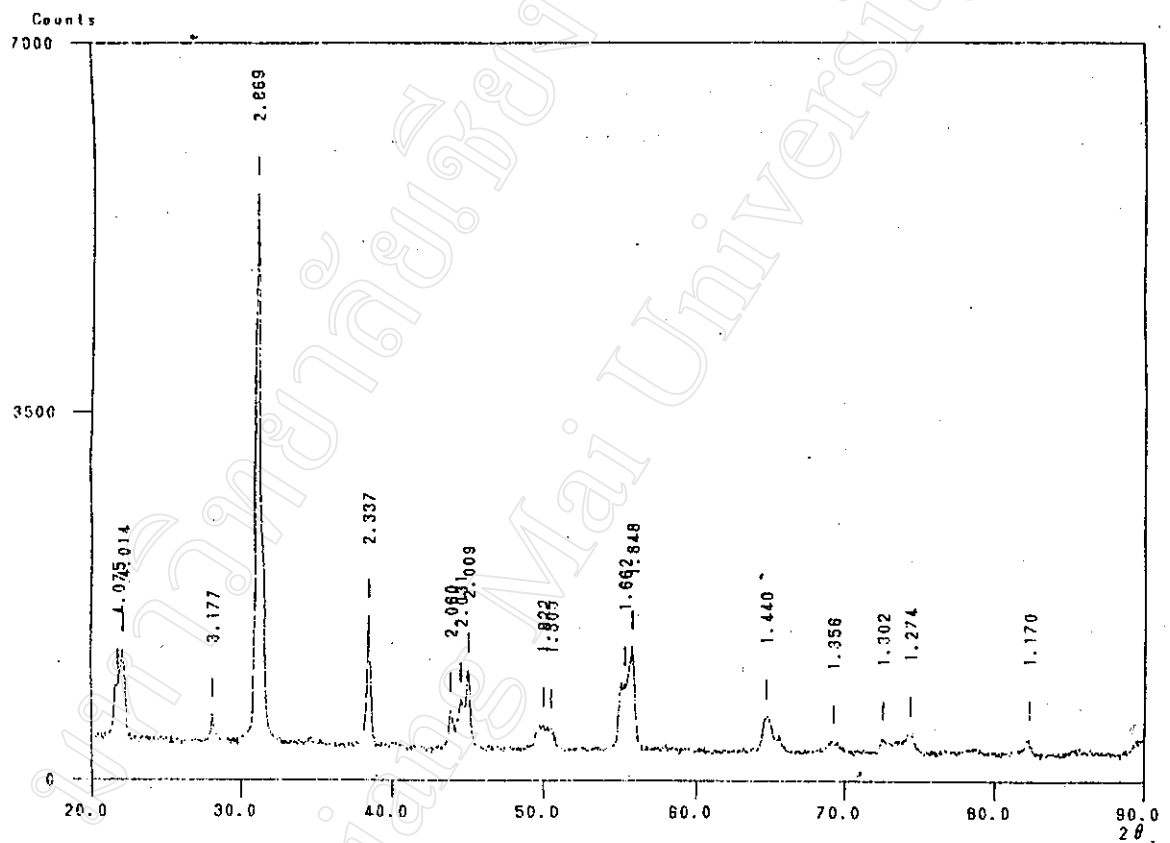
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริก และสมบัติเพียโซอิเล็กตริกในของผสมแบบ 0-3 ที่มีเฟสเซรามิกเป็นผงพีแซดทีเซรามิกและเมตริกซ์พอลิเมอร์เป็นโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยผงเซรามิกที่ใช้มีขนาดต่างๆ กัน 5 ขนาดคือ ผงที่ร่อนอยู่ระหว่างตะแกรงในลอนเบอร์ 17 และ 28 (NO.5), ระหว่างตะแกรงเบอร์ 28 และ 36 (NO.4), ระหว่างตะแกรงเบอร์ 36 และ 120 (NO.3), ระหว่างตะแกรงเบอร์ 120 และ 140 (NO.2) และผงสารที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 140 (NO.1) ทำการเตรียมของผสมที่สองอัตราส่วนคือ อัตราส่วนผงเซรามิกพีแซดที 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ศึกษาผลการไหลต่อสมบัติเพียโซอิเล็กตริก และไดอิเล็กตริกของของผสมที่เตรียมได้ โดยรายละเอียดของผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลที่ได้ มีดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย X-ray diffractometer

การศึกษาในขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์ตรวจสอบว่าสารที่เตรียมได้เป็นสารพีแซดทีจริงหรือไม่ สารพีแซดทีที่เตรียมได้โดยวิธี Solid state reaction หรือวิธี mixed oxide จากสารประกอบออกไซด์ของตะกั่วออกไซด์ เซอร์โคเนียมออกไซด์ และติตานิยมออกไซด์ เจือด้วยแมงกานีสออกไซด์ ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffractometer ได้ diffraction pattern ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ตัวเลขที่ปรากฏในรูปคือค่า d-spacing (ในหน่วยอังสตรอม $\text{\AA}$) ของระนาบผลึก ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของสาร และในตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า d-spacing ของเซรามิกพีแซดทีที่เตรียมได้ กับค่า d-spacing จากค่ามาตรฐาน (JCPDS File NO.33-784) แสดงให้เห็นว่าเซรามิกพีแซดทีที่เตรียมได้มีค่า d-spacing ซึ่งใกล้เคียงและสอดคล้องกับค่า JCPDS แสดงให้เห็นว่าสารที่เตรียมได้มีโครงสร้างสอดคล้องกับ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}, \text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ จริง



รูปที่ 4.1 Diffraction pattern ของเซรามิกพีแซดที่เตรียมได้

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่า d-spacing ของเซรามิกพีแซดที

ข้อมูลสารตัวอย่าง			ข้อมูลจาก JCPDS File NO.33-784		
2θ	d (°A)	I/I_0	d (°A)	I/I_0	[hkl]
21.440	4.075	16	4.146	9	001
22.000	4.014	21	4.036	12	100
27.880	3.177	11			
30.960	2.869	100	2.89, 2.85	100	101, 110
38.320	2.337	28	2.351	15	111
43.680	2.060	12	2.073	9	002
44.360	2.031	13			
44.960	2.009	19	2.018	16	200
49.440	1.822	10	1.844	5	102
50.440	1.805	9	1.81	6	201, 210
54.760	1.662	16	1.677	12	112
55.600	1.648	18	1.655	25	211
64.480	1.440	10	1.446	9	022
65.440			1.427	5	003
			1.382	2	212, 221,
64.920	1.356	7	1.361, 1.35	6	300
72.320	1.302	7	1.308	6	103
74.320	1.273	8	1.28	9	301, 310
			1.244	2	113
			1.220	2	311
82.00	1.170	7	1.176	5	222
85.280			1.14, 1.13,	4	203, 302,
89.200			1.12	15	320
			1.10, 1.09,		123, 312,
			1.08		321

4.1.2 ผลการวัดค่าความหดตัว

นำสารตัวอย่างที่ผ่านการเผาซินเตอร์ และยังไม่ได้ทำการขัดผิว มาวัดหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเวอร์เนีย คาลิเปอร์ (vernier caliper) สุ่มสารตัวอย่างจำนวน 10 เม็ด ทำการวัด 5 ครั้งต่อชิ้นสารตัวอย่าง หลังจากนั้นหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย $\bar{D}_S$ นำมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความหดตัวตามสมการ (3.2) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางสารตัวอย่างก่อนทำการเผาซินเตอร์ จะเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ ในการทดลองนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ $D_b = 20.0$ มิลลิเมตร ค่าวนค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวอยู่ในช่วง 0.65-1.837 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์หดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 1.276 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ความหดตัวของเซรามิกพีแชนด์ที่

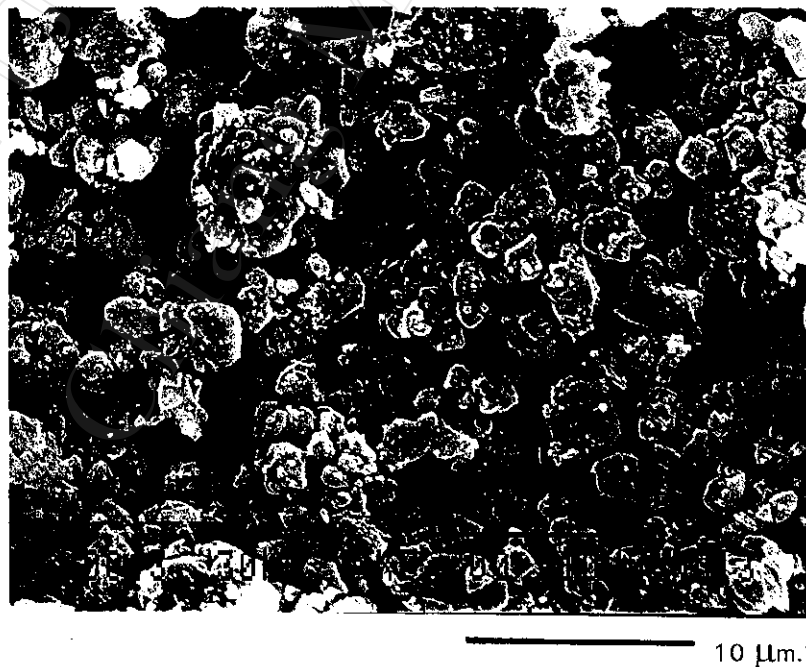
สารตัวอย่าง	$\bar{D}_S$ (mm.)	เปอร์เซ็นต์ความหดตัว
1	19.773	1.135
2	19.6326	1.837
3	19.6567	1.716
4	19.8145	0.926
5	19.858	0.71
6	19.6424	1.577
7	19.7408	1.296
8	19.870	0.65
9	19.781	1.095
10	19.6396	1.802

4.1.3 ผลการหาขนาดผงสารพีแชนด์ที่

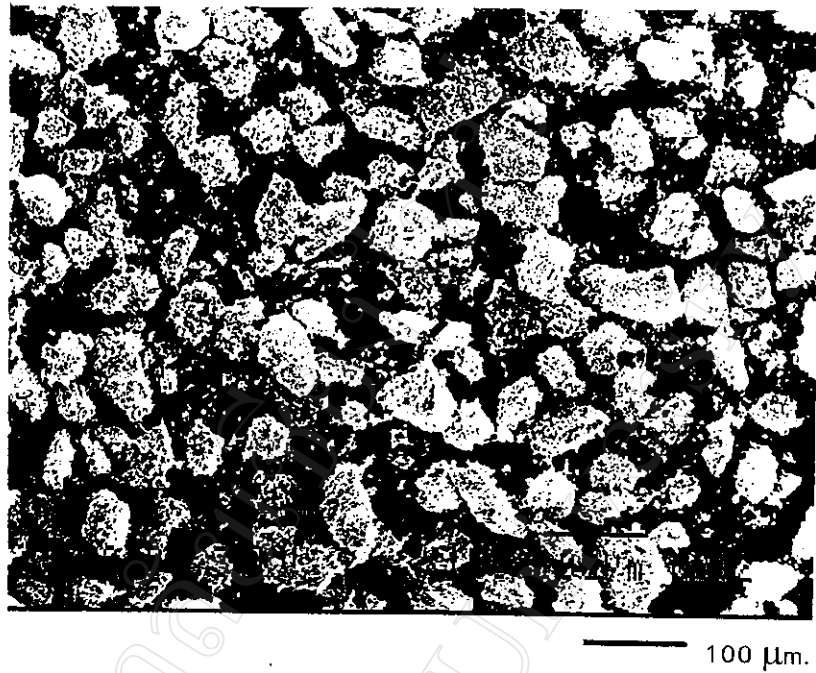
สำหรับการวิเคราะห์หาขนาดผงพีแชนด์ที่ผ่านการซินเตอร์แล้ว หรือเซรามิกพีแชนด์ที่ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในงานวิจัยนี้ เนื่องจากจุดประสงค์คือต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดผงของเฟสเซรามิกที่มีต่อสมบัติในด้านต่างๆ ของของผสม โดยในการทดลองนี้ใช้ขนาดผงจะสามารถอ้างอิงได้จากขนาดรูของตะแกรงในลอน ซึ่งขนาดของรูในลอนนี้ศึกษาโดยกล้อง scanning electron microscope แสดงดังภาคผนวก ก สามารถหาขนาดผงสารได้ แสดงดังตารางที่ 4.3 และแสดงภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิกที่ผ่านการบด แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ ดังรูปที่ 4.2-4.6 นอกจากนี้ยังแสดงโครงสร้างทางจุลภาคของเม็ดเซรามิกพีแชนด์ที่จากภาพถ่าย SEM ดังรูป 4.7

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการหาขนาดผงเซรามิกที่ผ่านการบด แล้วร่อนผ่านตะแกรงไนลอน
ขนาดต่างๆ

ตะแกรงไนลอนที่ใช้	No.สาร	ขนาด ($\mu\text{m.}$)	ขนาดเฉลี่ย($\mu\text{m.}$)
สารที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 140	size 1	< 34	17
สารที่ร่อนค้ำระหว่างตะแกรง เบอร์ 120 และ 140	size 2	34-60	47
สารที่ร่อนค้ำระหว่างตะแกรง เบอร์ 36 และ 120	size 3	60-167	113
สารที่ร่อนค้ำระหว่างตะแกรง เบอร์ 28 และ 36	size 4	167-181	174
สารที่ร่อนค้ำระหว่างตะแกรง เบอร์ 28 และ 17	size 5	181-316	249



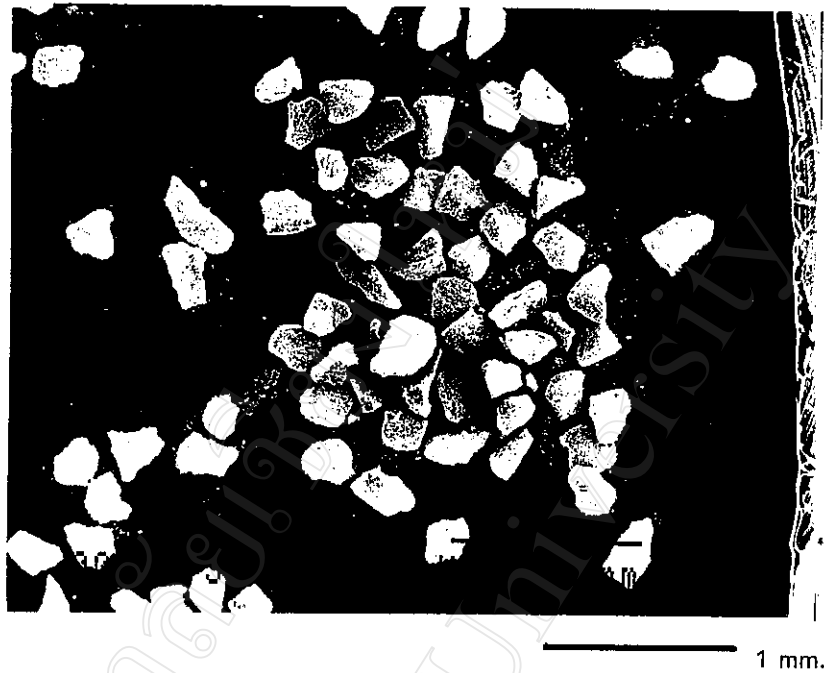
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิกที่ผ่านการบด-ร่อนผ่านตะแกรง
ไนลอนเบอร์ 140 (ผงสาร size 1 ขนาดเล็กกว่า $34 \mu\text{m}$)



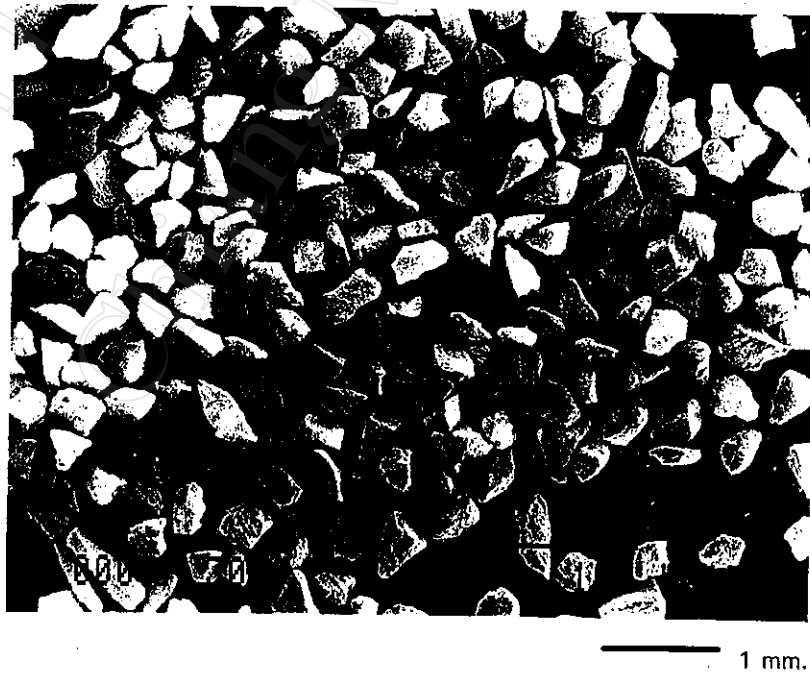
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิกที่ผ่านการบด-ร่อนค้างระหว่างตะแกรงไนลอนเบอร์ 120 และ 140 (ผงสาร size 2 ขนาดประมาณ 34-60 μm)



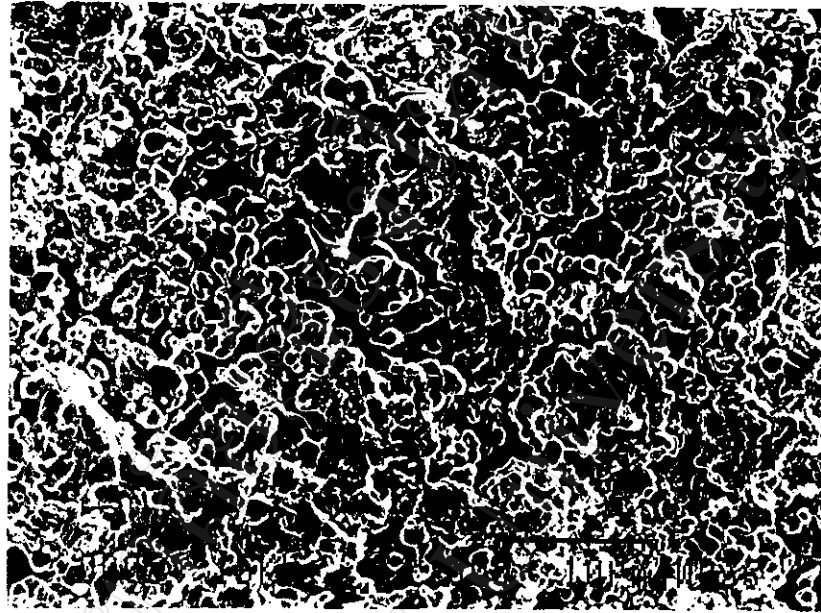
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิกที่ผ่านการบด-ร่อนค้างระหว่างตะแกรงไนลอนเบอร์ 36 และ 120 (ผงสาร size 3 ขนาดประมาณ 60-167 μm)



รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิกที่ผ่านการบด-ร่อนค้ำระหว่างตะแกรง
ไนลอนเบอร์ 28 และ 36 (ผงสาร size 4 ขนาดประมาณ 167-181 μm)



รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิกที่ผ่านการบด-ร่อนค้ำระหว่างตะแกรง
ไนลอนเบอร์ 28 และ 17 (ผงสาร size 5 ขนาดประมาณ 181-316 μm)



10 μm .

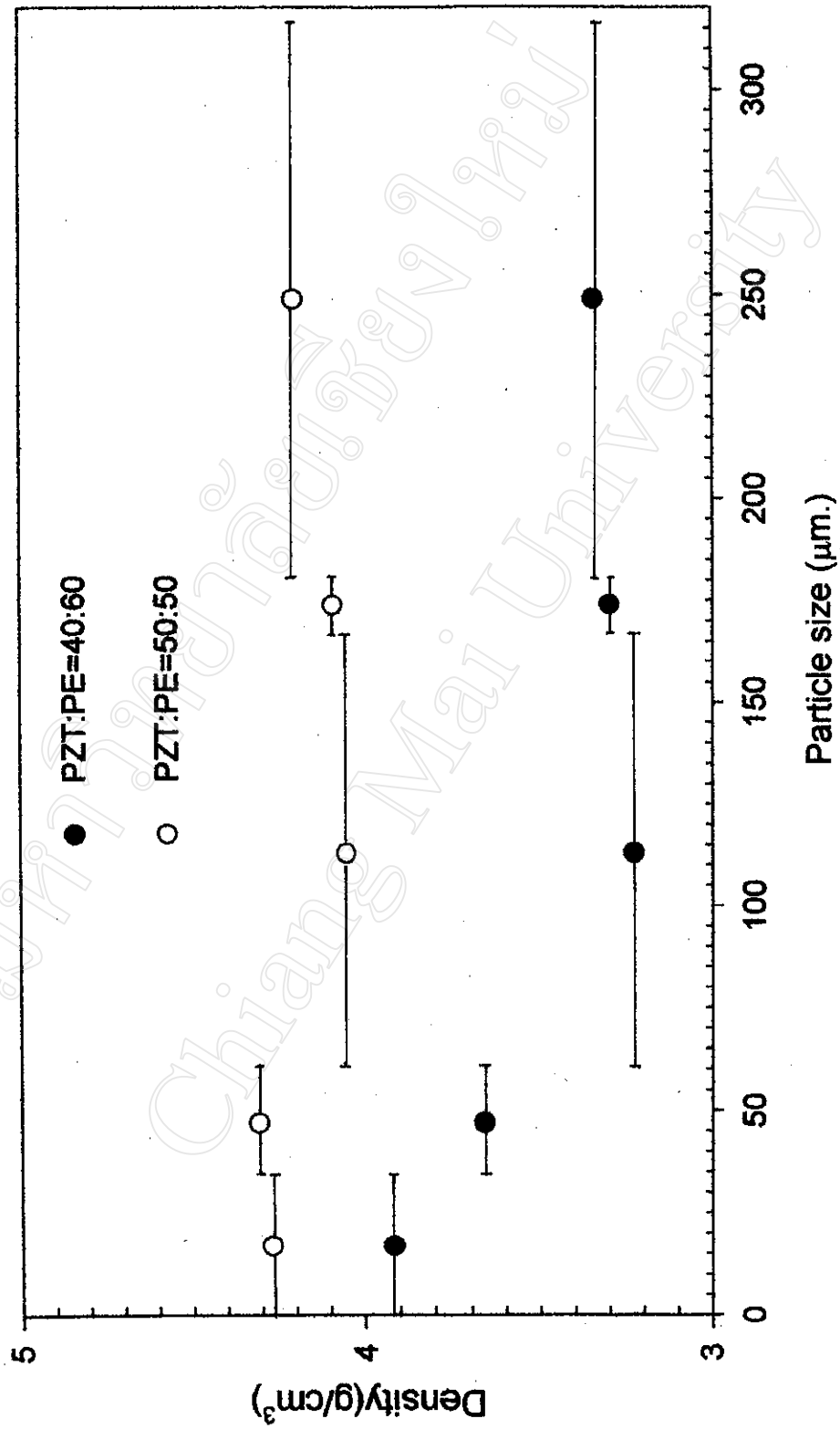
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของเม็ดเซรามิกฟิแซดที

4.1.4 ผลการหาความหนาแน่น

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของของผสมแบบ 0-3 ระหว่างเซรามิกฟิแซดทีและโพลีเอทิลีนนั้น ความหนาแน่นของของผสมสัมพันธ์กับความหนาแน่นของเฟสเซรามิกและความหนาแน่นของเมตริกซ์พอลิเมอร์ และยังสัมพันธ์กับสัดส่วนโดยปริมาตรของทั้งสองเฟสด้วย ดังนั้นในการทดลองจึงทำการวัดหาความหนาแน่นของเซรามิกฟิแซดที โพลีเอทิลีนและของผสมที่เตรียมได้ ดังสรุปในตารางที่ 4.4 และในรูปที่ 4.8 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับขนาดผงเซรามิกที่ใช้เตรียมของผสมเมื่อทำการเตรียมโดยใช้อัตราส่วนระหว่างฟิแซดทีกับพอลิเมอร์เป็น 40:60 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร และ 50:50 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง

สารตัวอย่าง	ความหนาแน่น (g/cm ³)
PZT (powder)	7.328
PZT (disk)	7.156
PE (powder)	0.946
PE (disk)	0.952
PZT:PE=40:40 (size 1)	3.918
PZT:PE=40:40 (size 2)	3.662
PZT:PE=40:40 (size 3)	3.229
PZT:PE=40:40(size 4)	3.299
PZT:PE=40:40(size 5)	3.3445
PZT:PE=50:50(size 1)	4.2705
PZT:PE=50:50(size 2)	4.308
PZT:PE=50:50(size 3)	4.050
PZT:PE=50:50(size 4)	4.088
PZT:PE=50:50(size 5)	4.201



รูปที่ 4.8 กราฟความหนาแน่นกับขนาดของผงเซรามิกพีแซดที่ใช้เตรียมของผสม

4.1.5 ผลการหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะต้องคำนึงถึงตัวแปรหลายตัวที่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิและความถี่ ได้ทำการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเทียบกับความถี่ที่อุณหภูมิคงที่และศึกษาผลการโพลงต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสมที่เตรียมได้ ดังนี้

- การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเทียบกับสนามไฟฟ้าที่โพลง

เป็นการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสมก่อนทำการโพลงและที่ผ่านการโพลงด้วยสนามไฟฟ้าที่ต่าง ๆ กัน โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้า C ณ ความถี่คงที่ 1 kHz ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 80°C แล้วนำมาคำนวณดังสมการ (3.5) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการเตรียมของผสมโดยใช้ผงเซรามิกเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 ส่วนความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสมกับขนาดของผงเซรามิกที่ใช้ในการเตรียมของผสมนั้น แสดงด้วยกราฟรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

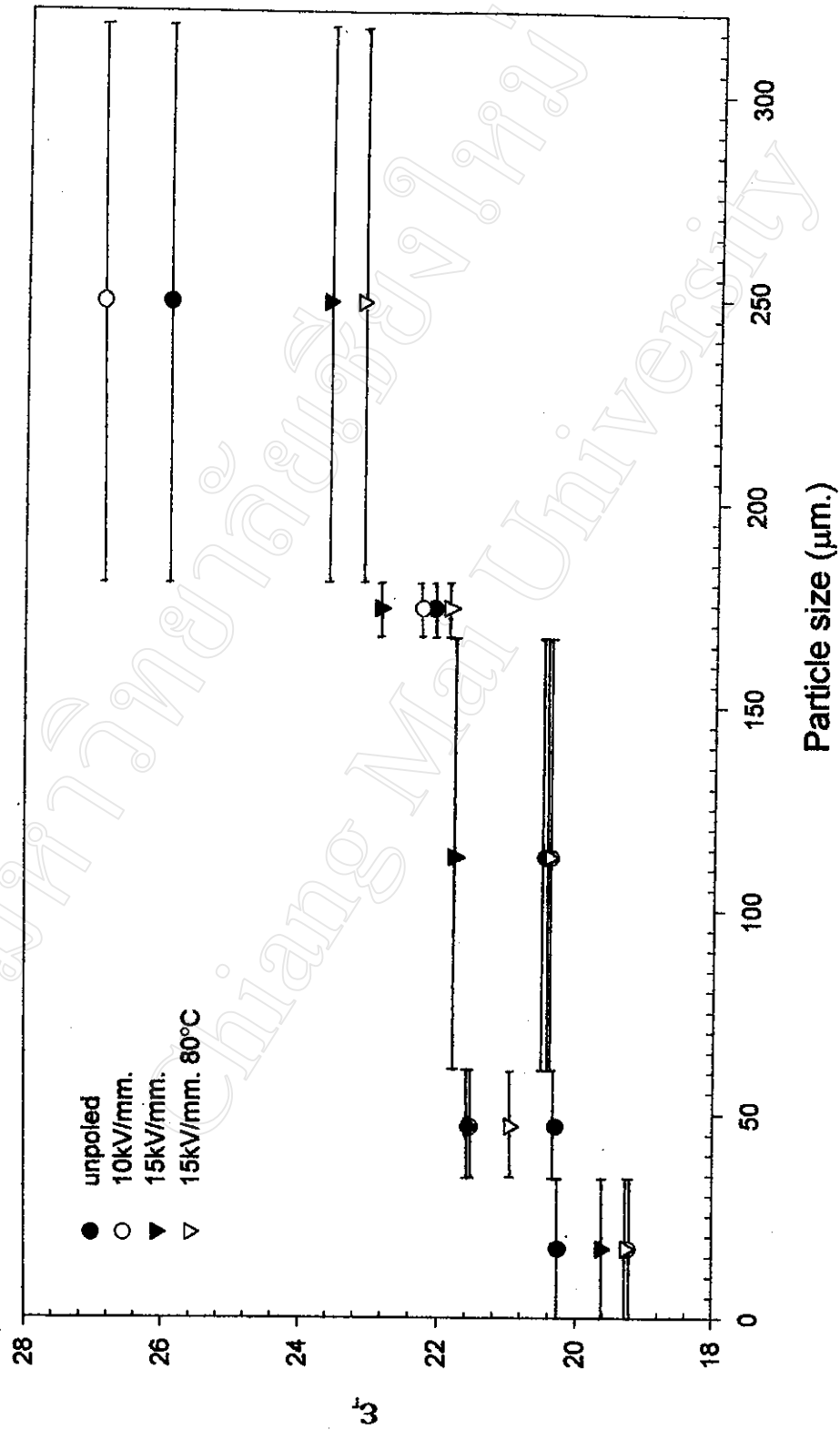
ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสมเทียบกับสนามไฟฟ้าที่ใช้โพลงสำหรับของผสมที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนระหว่างผงพีแซดกับพอลิเมอร์เท่ากับ 40:60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

สารตัวอย่าง	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก			
	ก่อนโพลง	โพลงที่ 10 KV/mm	โพลงที่ 15 KV/mm	โพลงที่ 15 KV/mm ที่ 80°C
PZT:PE=40:60 (size 1)	20.251	19.233	19.635	19.270
PZT:PE=40:60(size 2)	20.288	21.529	21.545	20.961
PZT:PE=40:60(size 3)	20.461	20.383	21.761	20.401
PZT:PE=40:60(size 4)	22.051	22.224	22.831	21.844
PZT:PE=40:60(size 5)	25.923	26.89	23.618	23.113

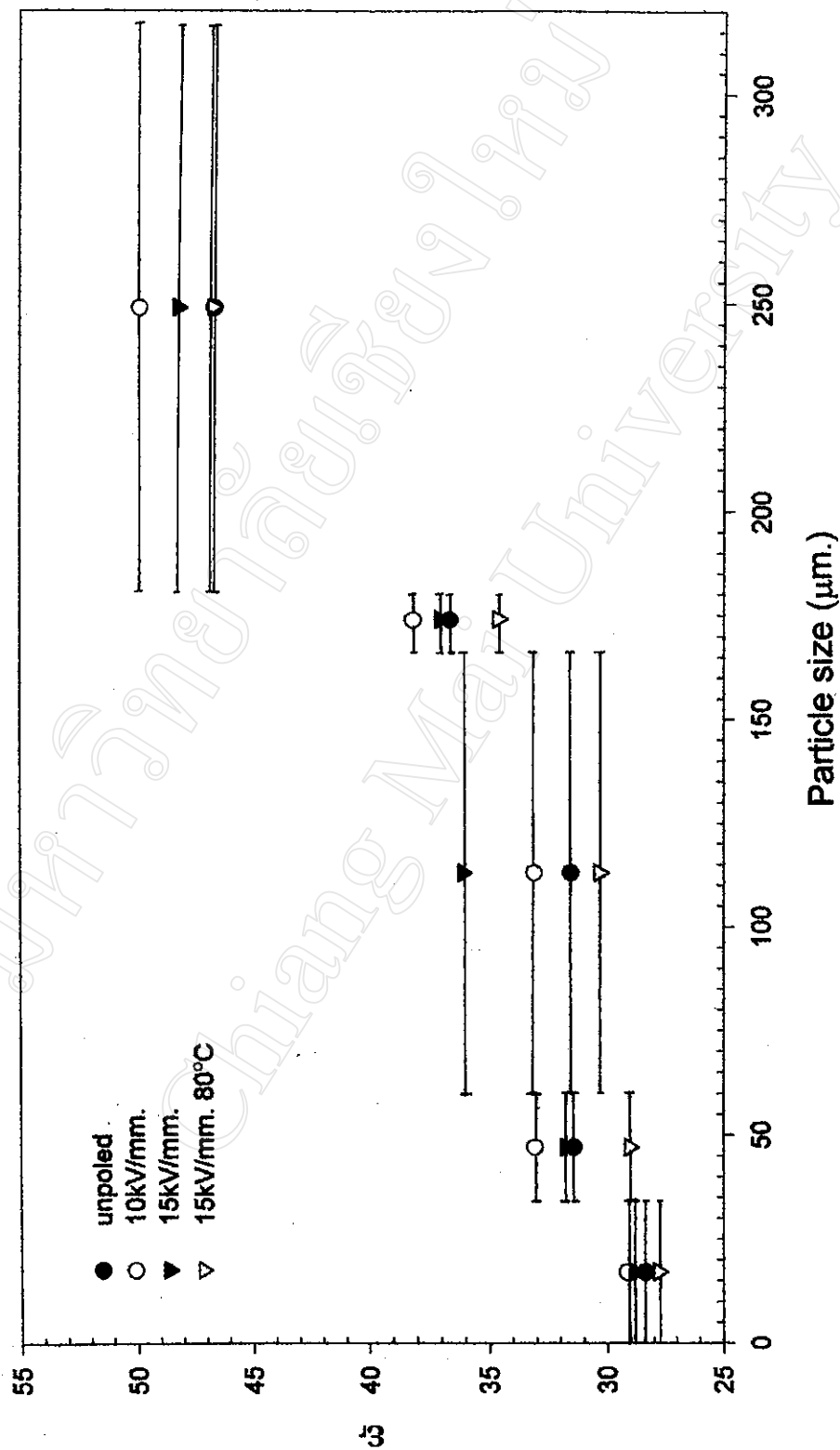
ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสมเทียบกับสนามไฟฟ้าที่ใช้โพลสำหรับของผสม
ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนระหว่างผงพีแซดที่กับพอลิเมอร์เท่ากับ 50:50
เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

สารตัวอย่าง	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก			
	ก่อนโพล	โพลที่ 10 KV/mm	โพลที่ 15 KV/mm	โพลที่ 15 KV/mm ที่ 80°
PZT:PE=50:50(size 1)	28.35	29.132	28.848	27.782
PZT:PE=50:50(size 2)	31.407	33.06	31.766	29.047
PZT:PE=50:50(size 3)	31.537	33.09	36.009	30.321
PZT:PE=50:50(size 4)	36.531	38.065	36.929	34.599
PZT:PE=50:50(size 5)	46.616	49.825	48.196	46.678

สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเม็ดเซรามิกพีแซดที่ก่อนทำการโพลและพอลิเมอร์ เมื่อ
วัดค่าความถี่ 1 kHz ณ อุณหภูมิห้อง ได้เท่ากับ 573.362 และ 3.022 ตามลำดับ



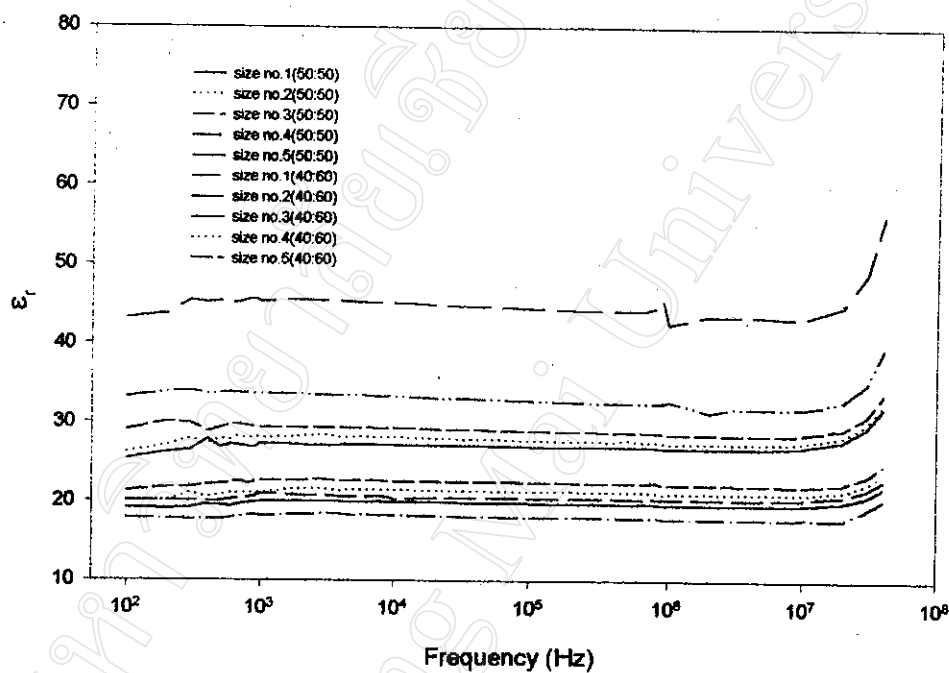
รูปที่ 4.9 ค่าคงที่ได้จากกราฟของผลสมที่เตรียมขึ้นโดยใช้อัตราส่วนระหว่างผงพีแซดที่ กับพอลิเมอร์เท่ากับ 40:60 เปรอ์เซนได้โดยปริมาตร เทียบกับขนาดของผงเซรามิกที่ใช้เตรียมของผสม



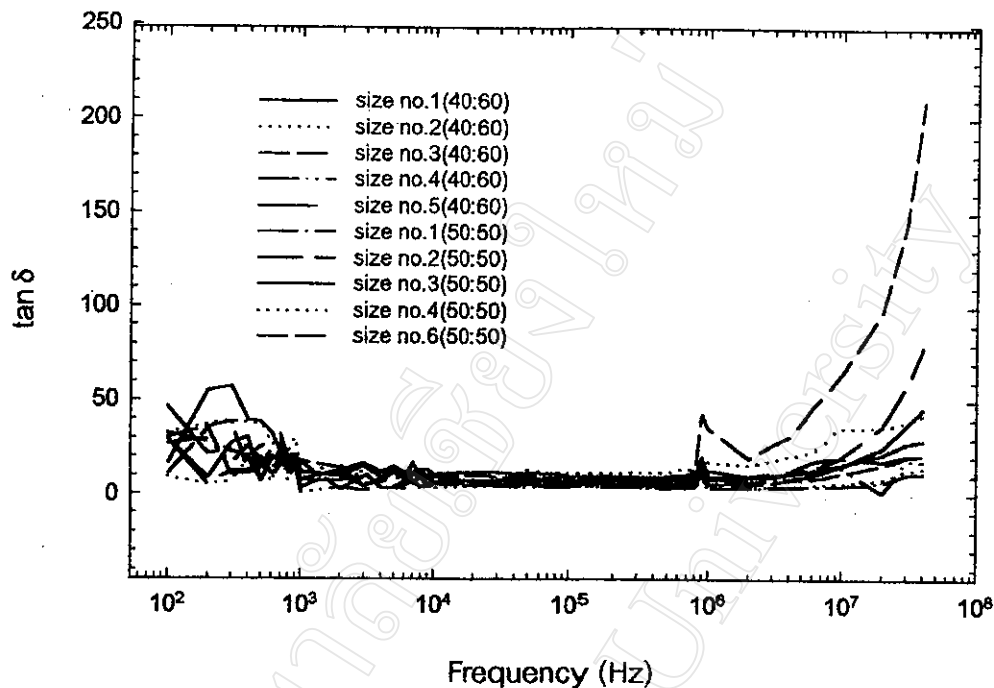
รูปที่ 4.10 ค่าคงที่ได้จากการวัดของผลสมที่เตรียมขึ้นโดยใช้อัตราส่วนระหว่างผงพีแซดที่กับพอลิเมอร์เท่ากับ 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เทียบกับขนาดของผงเซรามิกที่ใช้เตรียมของผสม

- การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่า $\tan\delta$ เทียบกับความถี่

เป็นการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสมที่โพลด้วยสนามไฟฟ้า 15 KV/mm ที่ 80°C กับความถี่ 1-40 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) นำมาเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้า C ในอากาศด้วย Impedance/Gain-Phase Analyzer : Hewlett 4194 A



รูปที่ 4.11 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสมเทียบกับความถี่



รูปที่ 4.12 ค่า $\tan \delta$ ของของผสมเทียบกับความถี่

4.1.6 ผลการหาค่า d_{33}

ค่า d_{33} เป็นค่าที่แสดงถึงความเป็นเพียโซอิเล็กทริกของสารตัวอย่าง การวัดค่า d_{33} ด้วยเครื่อง Piezometer system โดยเครื่องจะทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า V ที่ตัวเก็บประจุที่ต่อขนานอยู่ และคำนวณด้วยสมการ (3.14) แล้วแสดงค่า d_{33} ออกมาปรากฏบนจอแสดงผล เนื่องจากการวัดค่าเปรียบเทียบกับตัวมาตรฐานโดยใช้แรงเท่ากัน และใช้ตัวเก็บประจุตัวเดียวกัน ซึ่งตัวมาตรฐานที่ใช้มักมีค่า d_{33} เท่ากับ 248 pC/N ในการทดลองนี้ได้ศึกษาค่า d_{33} ของของผสมที่เตรียมขึ้นจากขนาดผงเซรามิกต่างๆ แล้วผ่านการโพลด้วยสนามไฟฟ้าเท่ากับ 10 KV/mm. , 15 KV/mm. , ที่อุณหภูมิห้อง และ 15 KV/mm. ที่ 80°C เพื่อศึกษาผลของการโพลที่มีต่อค่า d_{33} ของของผสม โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเซรามิกพีแซดที่ต่อพอลิเมอร์เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แสดงค่า d_{33} ของของผสมที่วัดได้ดังตาราง 4.7 และ 4.8 และแสดงความสัมพันธ์ของค่า d_{33} ของของผสมกับขนาดของผงเซรามิกเมื่อผ่านการโพลที่สนามต่างๆ ดังกราฟรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

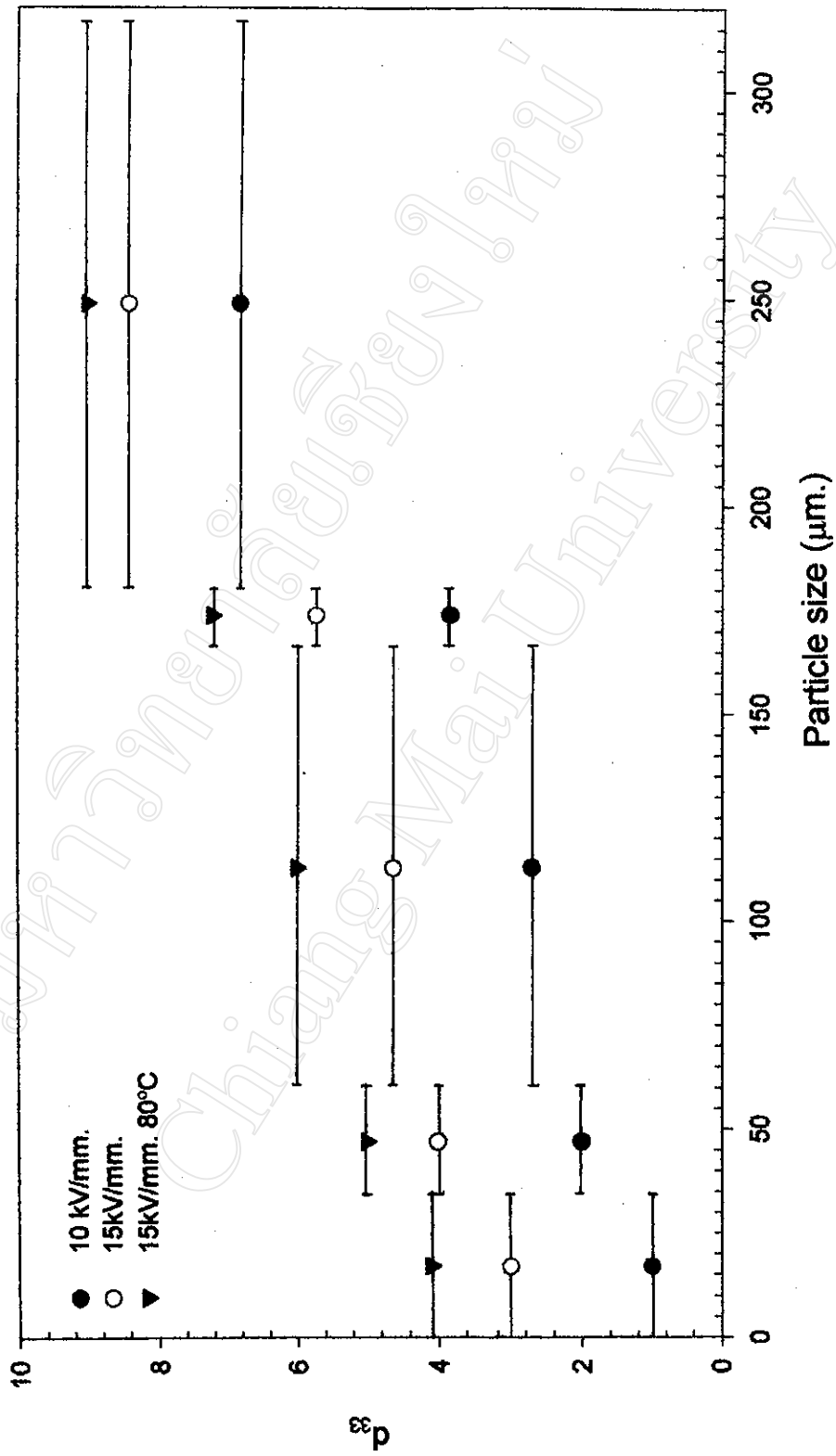
ตารางที่ 4.7 ค่า d_{33} ของของผสมเทียบกับสนามไฟฟ้าที่โพลสำหรับของผสมที่เตรียมได้
โดยใช้อัตราส่วนระหว่างผงพีแซดทีกับพอลิเมอร์เท่ากับ 40:60 เปอร์เซ็นต์
โดยปริมาตร

สารตัวอย่าง	ค่า d_{33} (pC/N)		
	โพลที่ 10 KV/m	โพลที่ 15 KV/m	โพลที่ 15 KV/mm ที่ 80°
PZT:PE=40:60(size 1)	1	3	4.1
PZT:PE=40:60(size 2)	2	4	5
PZT:PE=40:60(size 3)	2.7	4.6	6
PZT:PE=40:60(size 4)	3.8	5.7	7.2
PZT:PE=40:60(size 5)	6.8	8.4	9

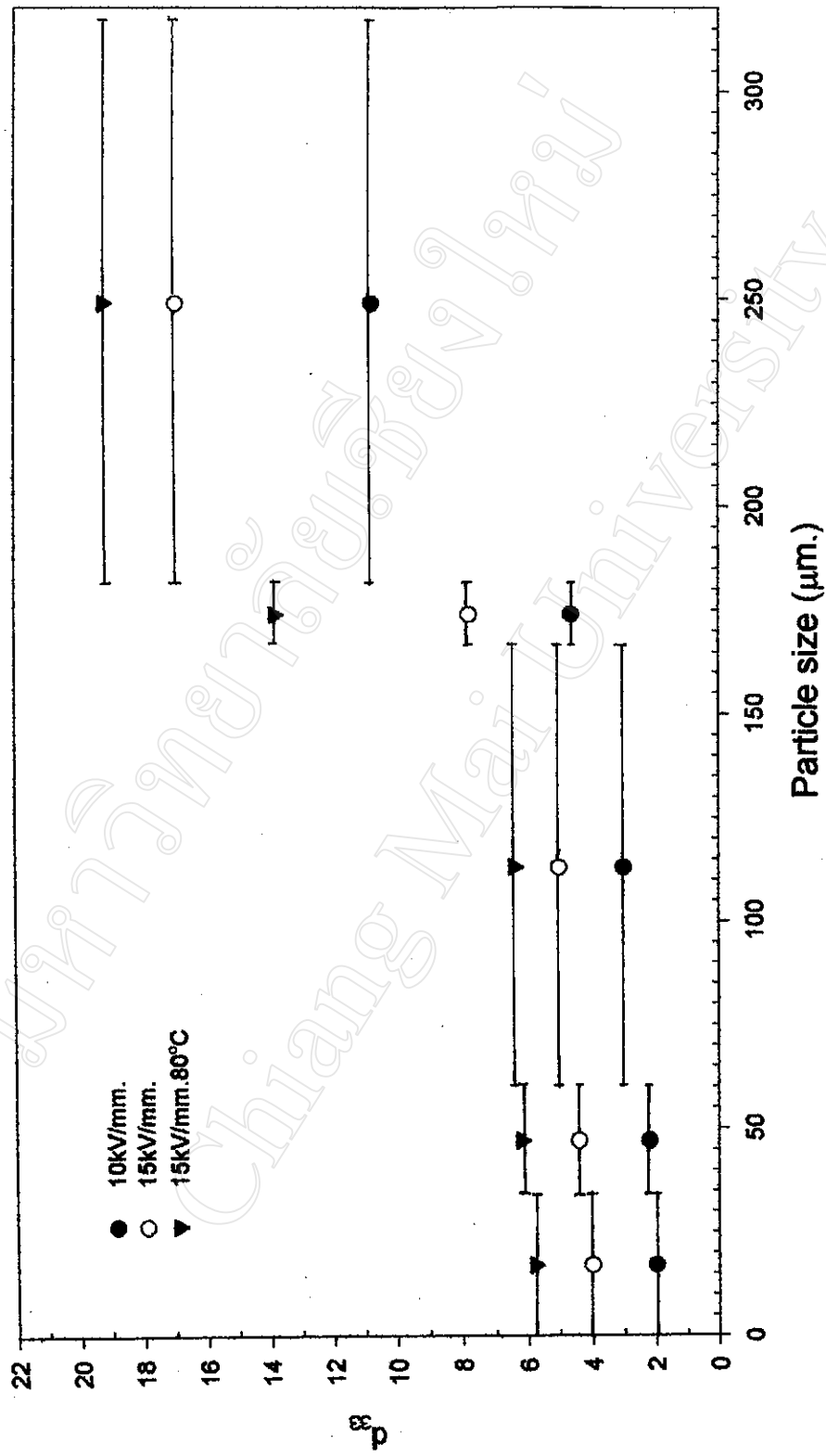
ตารางที่ 4.8 ค่า d_{33} ของของผสมเทียบกับสนามไฟฟ้าที่โพลสำหรับของผสมที่เตรียมได้
โดยใช้อัตราส่วนระหว่างผงพีแซดทีกับพอลิเมอร์เท่ากับ 50:50 เปอร์เซ็นต์
โดยปริมาตร

สารตัวอย่าง	ค่า d_{33} (pC/N)		
	โพลที่ 10 KV/mm	โพลที่ 15 KV/mm	โพลที่ 15 KV/mm ที่ 80°C
PZT:PE=50:50(size 1)	2	4	5.8
PZT:PE=50:50(size 2)	2.2	4.4	6.2
PZT:PE=50:50(size 3)	3	5	6.4
PZT:PE=50:50(size 4)	4.6	7.7	13.8
PZT:PE=50:50(size 5)	10.7	16.9	19.2

สำหรับ d_{33} ของเม็ดเซรามิกพีแซดทีเมื่อผ่านการโพลที่สนามไฟฟ้า 4 KV/mm มีค่าเท่ากับ 244.5 pC/N



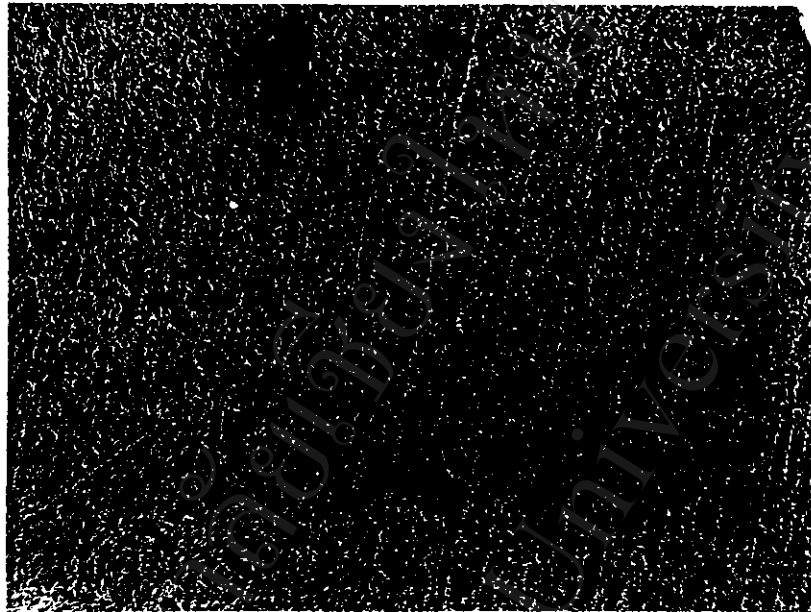
รูปที่ 4.13 ค่า d_{33} ของผสมที่เตรียมขึ้นโดยใช้อัตราส่วนระหว่างผงพีเอชทีกับพอลิเมอร์เท่ากับ 40:60 เปรียบเทียบโดยปริมาตร
เทียบกับขนาดของผงเซรามิกที่ใช้เตรียมของผสม



รูปที่ 4.14 ค่า d_{33} ของของผสมที่เตรียมขึ้นโดยใช้อัตราส่วนระหว่างผงพีแซดที่กับพอลิเมอร์เท่ากับ 50:50 เปรียบเทียบโดยปริมาตร เทียบกับขนาดของผงเซรามิกที่ใช้เตรียมของผสม

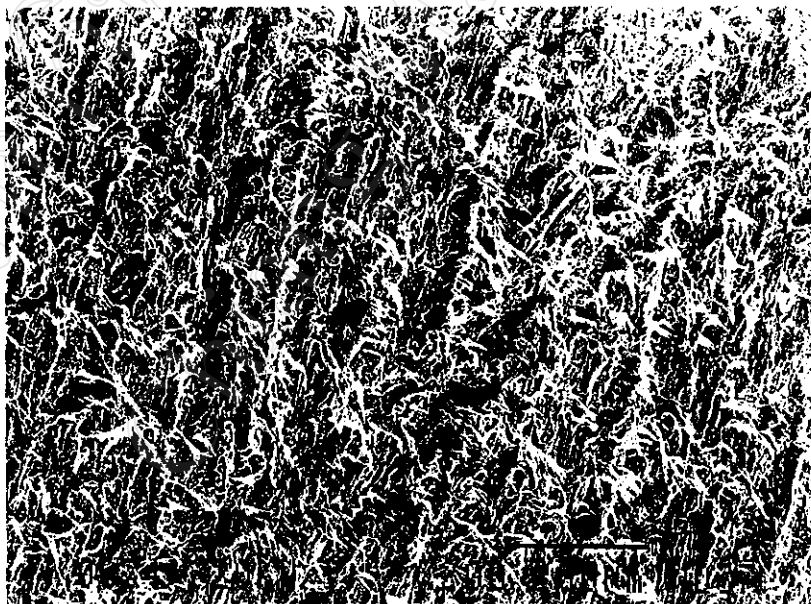
4.1.7 การกระจายของอนุภาคเซรามิกพีแซดที่โดยการถ่ายภาพ SEM

แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของผงเซรามิกในเมตริกซ์



(a)

100 μm



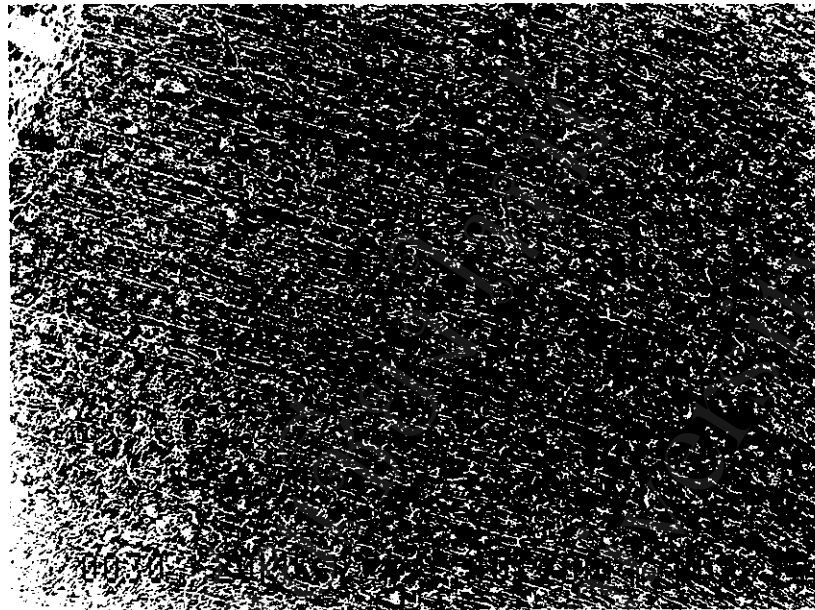
(b)

100 μm.

รูปที่ 4.15 การกระจายของอนุภาคพีแซดที่ในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 40:60
ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดเล็กกว่า 34 μm

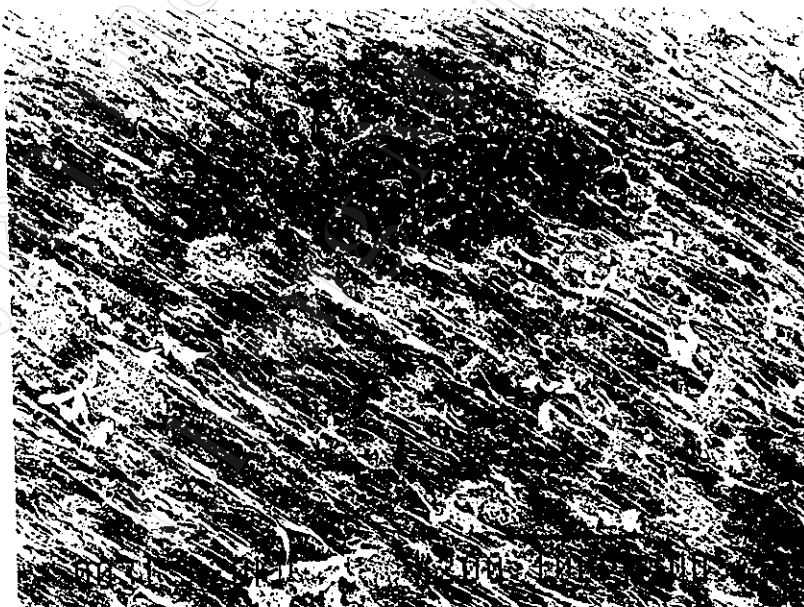
(a) ขยาย 40 เท่า

(b) ขยาย 200 เท่า



(a)

— 100 μm.



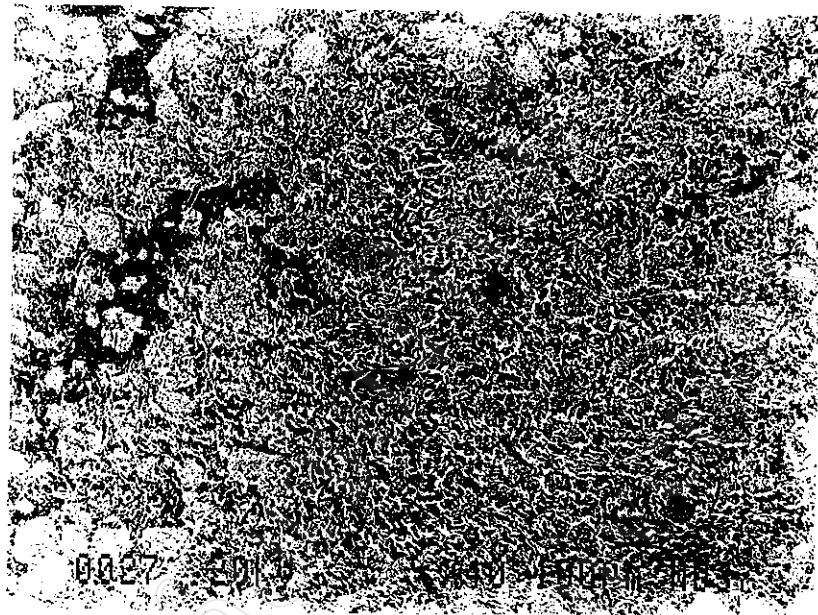
(b)

— 100 μm.

รูปที่ 4.16 การกระจายของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 40:60
ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 34-60 μm

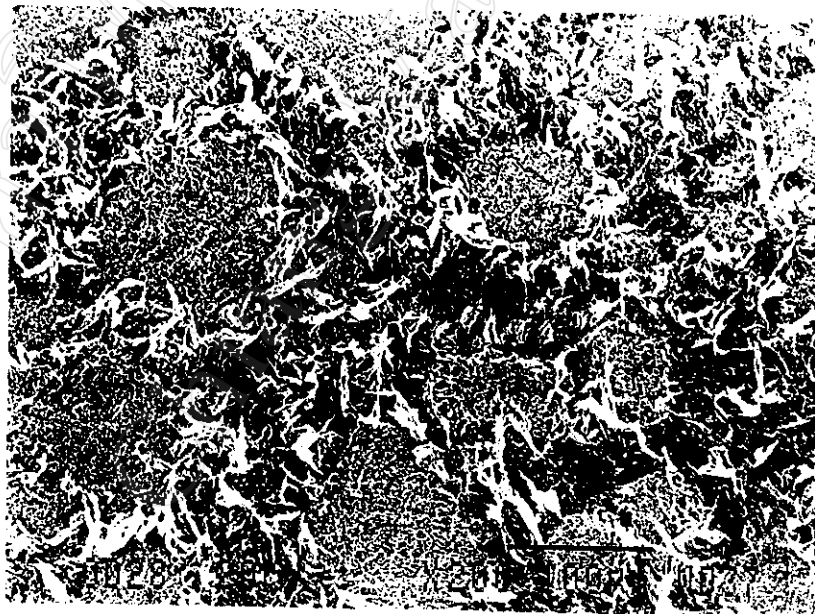
(a) ขยาย 40 เท่า

(b) ขยาย 200 เท่า



(a)

100 μm.



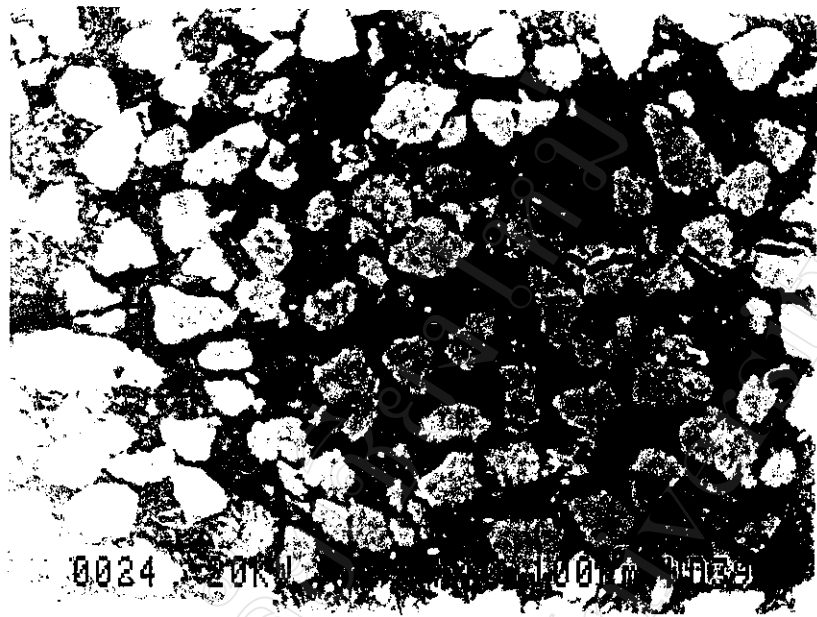
(b)

100 μm.

รูปที่ 4.17 การกระจายของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 40:60
ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 60-167 μm

(a) ขยาย 40 เท่า

(b) ขยาย 200 เท่า



(a)

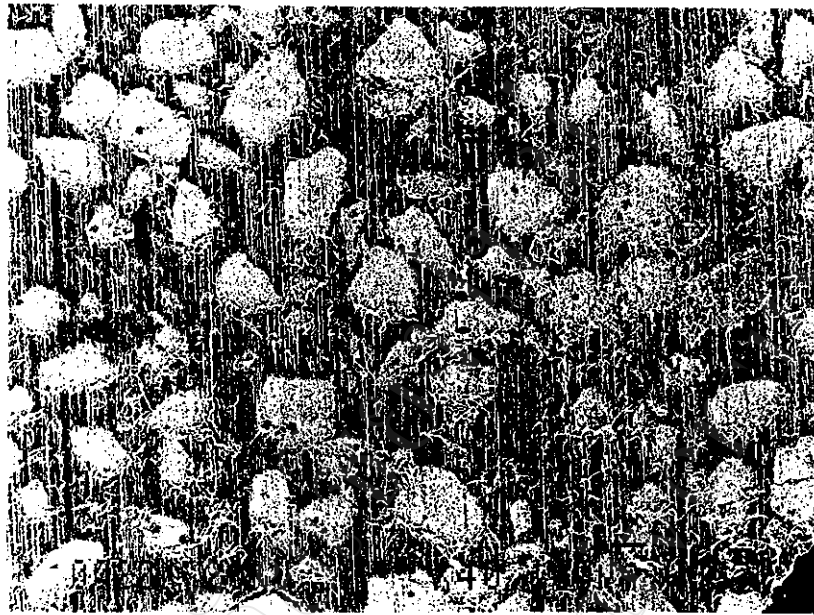


(b)

รูปที่ 4.18 การกระจายของอนุภาคพีแชนด์ทีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 40:60
ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 167-181 μm

(a) ขยาย 40 เท่า

(b) ขยาย 200 เท่า



(a)

100 μm.



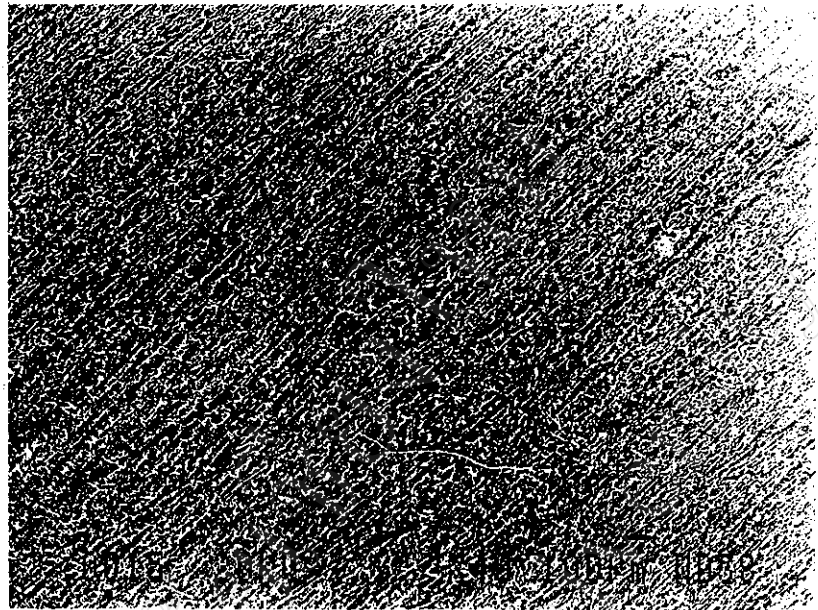
(b)

100 μm.

รูปที่ 4.19 การกระจายของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 40:60
ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 181-316 μm

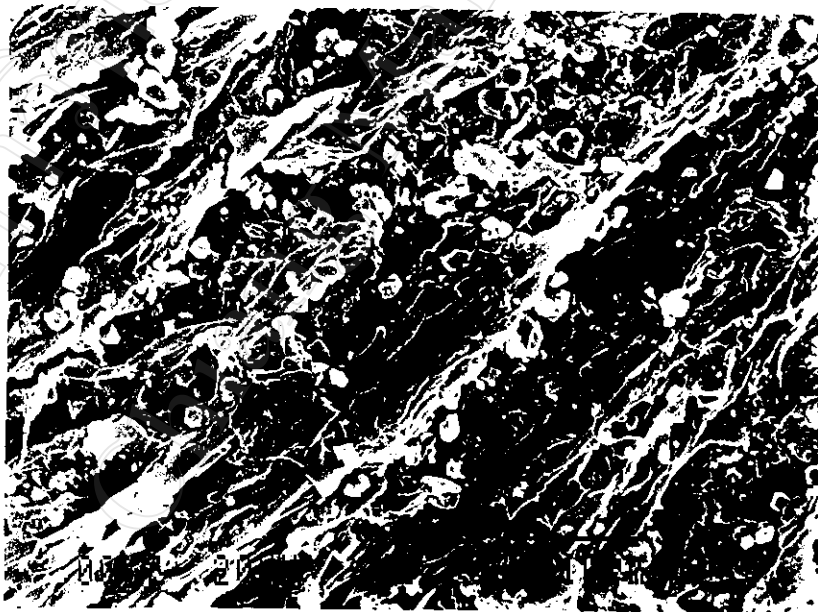
(a) ขยาย 40 เท่า

(b) ขยาย 200 เท่า



— 100 μm .

(a)



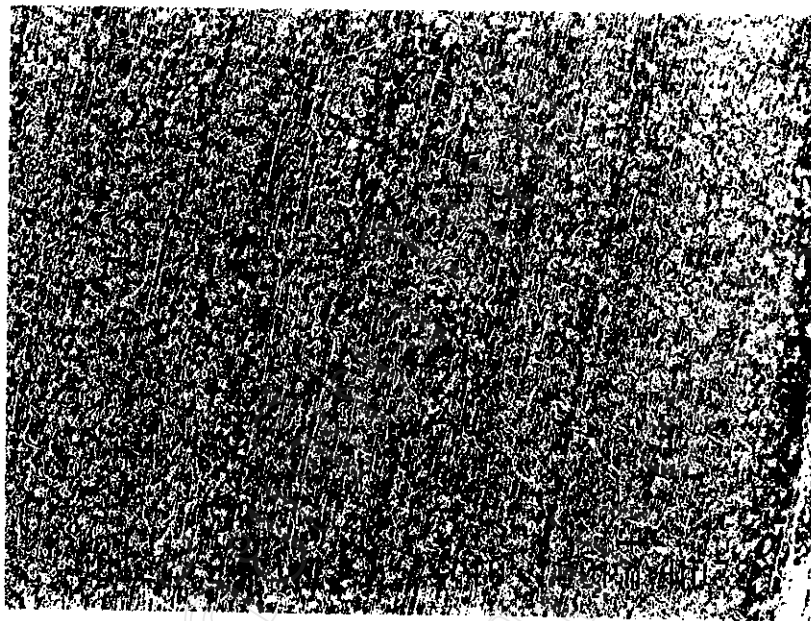
— 100 μm .

(b)

รูปที่ 4.20 การกระจายของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 50:50
ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดเล็กกว่า $34\ \mu\text{m}$

(a) ขยาย 40 เท่า

(b) ขยาย 2000 เท่า



(a)

— 100 μm .

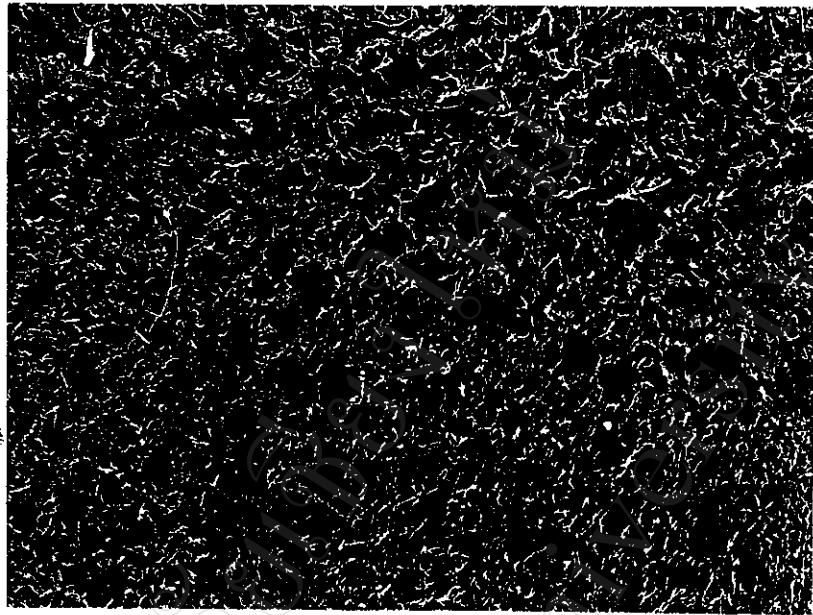
(b)

— 1 μm .

รูปที่ 4.21 การกระจายของอนุภาคพีแชนด์ทีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 50:50
ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 34-60 μm

(a) ขยาย 40 เท่า

(b) ขยาย 4000 เท่า



— 100 μm .

(a)



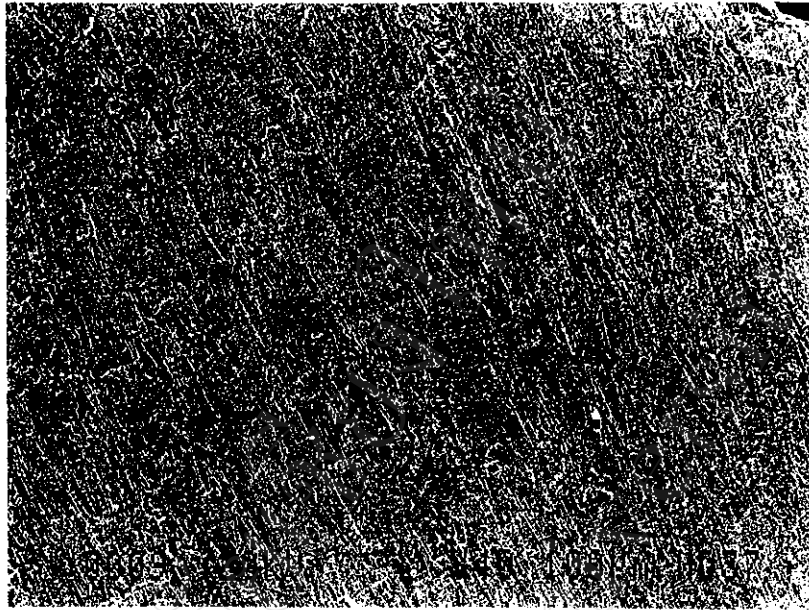
— 10 μm .

(b)

รูปที่ 4.22 การกระจายของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 50:50
ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 60-167 μm

(a) ขยาย 40 เท่า

(b) ขยาย 1000 เท่า



(a)

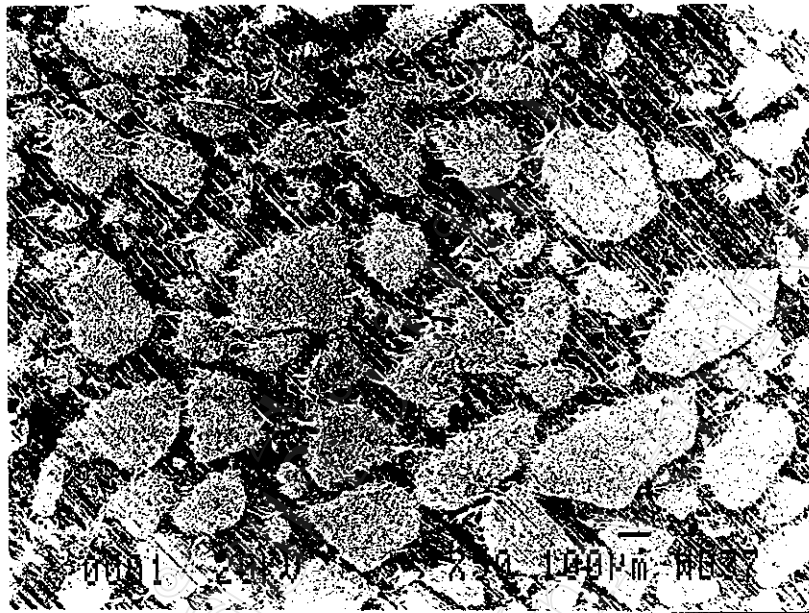


(b)

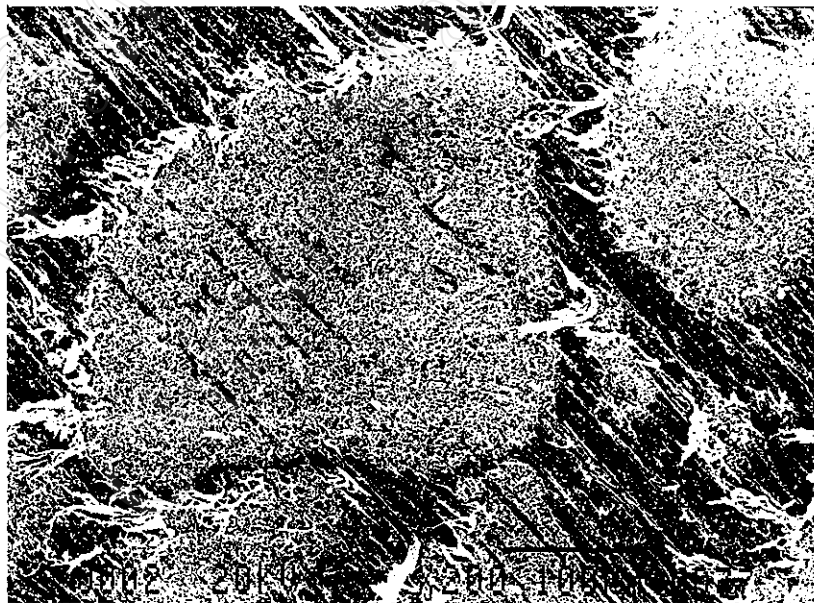
รูปที่ 4.23 การกระจายของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 50:50
ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 167-181 μm

(a) ขยาย 40 เท่า

(b) ขยาย 200 เท่า



(a)



100 μm.

(b)

รูปที่ 4.24 การกระจายของอนุภาคพีแชนต์ที่ในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 50:50
ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 182-316 μm

(a) ขยาย 40 เท่า

(b) ขยาย 200 เท่า

4.1.8 ผลการหาค่า planar coupling factor (k_p)

การศึกษา k_p ของสารตัวอย่างที่ได้เฉพาะสารตัวอย่างที่เป็นเม็ดเซรามิกพีแซดที่มี ความหนา 1.76 mm. เม็ดเซรามิกพีแซดที่ที่วัดได้ แสดงค่า f_r และ f_a ดังรูป 4.19 โดยมีค่า f_r เท่ากับ 101.650 kHz. และ f_a เท่ากับ 105.225 kHz. คำนวณโดยใช้สมการ (2.9) ได้ค่า k_p เท่ากับ 0.453

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.2.1 การวิเคราะห์ผลที่ได้จาก x-ray diffractometer

จากผล diffraction pattern ของเซรามิกพีแซดที่เตรียมขึ้นเพื่อนำไปใช้เป็นเพลส เซรามิกในของผสมแบบ 0-3 พบว่า ผงเซรามิกที่เตรียมได้เป็น $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ จากการ เปรียบเทียบตำแหน่ง peak และความเข้มของ peak โดยเปรียบเทียบกับ JCPDS File NO. 33-784 แต่ลักษณะ pattern ของสารที่เตรียมได้มี peak แปลกปลอม ปรากฏขึ้นมาที่ตำแหน่ง $d=3.177^\circ\text{A}$ และ 2.031°A ซึ่งมีความเข้มต่อความเข้มสูงสุดประมาณ 11 และ 13 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าเป็นผลเนื่องจากการที่มีสารอื่นเจือปนในขั้นตอนการเตรียม เมื่อ ค้นหาใน JCPDS ยังไม่พบ จึงยังไม่ทราบว่าเป็นสารใด ซึ่งอาจมีผลมากหรือน้อยต่อสมบัติที่ ต้องการศึกษา

4.2.2 การวิเคราะห์ผลการหดตัวของเซรามิกพีแซดที่

เนื่องจากกระบวนการเผาซินเตอร์เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมของสารเคลื่อนที่เข้า ไกลกัน จนทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคสารถูกจำกัด ทำให้สารแน่น และแกร่งมากขึ้น ซึ่ง กระบวนการเช่นนี้จะทำให้เม็ดสารมีการหดตัวเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อก่อนทำการเผาซินเตอร์ ในการทดลองนี้พบว่าค่าการหดตัวเฉลี่ยประมาณ 1.3 เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์การหดตัวนี้ค่อนข้างน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าเซรามิกพีแซดที่นี้จะมีรูพรุนมาก ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์เท่ากับ 1100°C ซึ่งน้อยไป โดยทั่วไปแล้วมักทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1200-1350^\circ\text{C}$ และต้องควบคุมบรรยากาศ PbO ในการเผา

4.2.3 การวิเคราะห์การหาขนาดของผงสารพีแซดที่

เมื่อพิจารณาจากภาพถ่าย SEM จะเห็นว่าขนาดของเกรนของสารเซรามิกพีแซดที่มี ขนาดเล็กมากประมาณ $1\ \mu\text{m}$ แต่ลักษณะของผงสารที่ผ่านการบดร่อนจะมีขนาดเล็กกว่า $316\ \mu\text{m}$ แสดงให้เห็นว่าลักษณะผงสารที่ร่อนได้นั้นประกอบไปด้วยอนุภาคเกาะกันเป็นกลุ่ม

4.2.4 การวิเคราะห์ผลการหาค่าความหนาแน่นของเซรามิกพีแซดที, โพลีเอธิลีน และของผสม

จากผลการหาค่าความหนาแน่นของสารตัวอย่าง ดังตารางที่ 4.4 พบว่าความหนาแน่นของสารที่เป็นเม็ดมีความหนาแน่นของผงพีแซดที เนื่องจากผงเซรามิกพีแซดทีนั้นได้จากการบดร่อนจากเม็ดเซรามิกพีแซดที ความหนาแน่นที่หาได้จึงเป็นความหนาแน่นของเนื้อสารที่อาจมีรูพรุนเปิด (opened pore) แต่ความหนาแน่นของเม็ดเซรามิกพีแซดทีนั้นเป็นความหนาแน่นของเนื้อสารที่มีทั้งรูพรุนเปิดและรูพรุนปิด (close pore) รูพรุนปิดนี้มีลักษณะเป็นช่องว่างที่ไม่ติดกับรูพรุนอื่น ดังนั้นเวลาวัดโดยการแทนที่น้ำ น้ำจึงไม่สามารถเข้าไปได้ ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งเป็นความหนาแน่นของเนื้อสารจริงและช่องว่างนั่นเอง

ความหนาแน่นทางทฤษฎี (ρ_{theory}) ของสารที่เป็นผลึกคำนวณจากมวลโมเลกุลและปริมาตรหน่วยเซลล์

$$\rho_{theory} = \frac{Mn}{V_{abc}Na}$$

โดยที่ M คือมวลโมเลกุลของสารที่เป็นผลึก

n คือจำนวนโมเลกุลในหน่วยเซลล์

V_{abc} คือปริมาตรของหน่วยเซลล์ประกอบด้วยด้าน a, b และ c

Na คือเลขอวอกาโดร (Avogadro constant) มีค่าเท่ากับ $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

เมื่อ M ของสาร $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ มีค่าเท่ากับ 325.6 g โค้งผลึกของพีแซดทีเป็นเตตระโกนอลมีปริมาตร $6.749 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$ และมีโมเลกุลเดียวในหน่วยเซลล์ ดังนั้นความหนาแน่นโดยทฤษฎีของพีแซดทีคือ 8.011 g/cm^3 ดังนั้นค่าความหนาแน่นของผงเซรามิกและเม็ดสารเซรามิกที่วัดได้ มีความคลาดเคลื่อนจากค่าทฤษฎีเท่ากับ 8.53 เปอร์เซ็นต์ และ 10.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สำหรับการศึกษาความหนาแน่นของของผสมแบบ 0-3 ที่เตรียมขึ้นจากขนาดของผงเซรามิกที่แตกต่างกัน ซึ่งใช้อัตราส่วนของผงพีแซดทีเป็น 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรนั้น เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนเดียวกันแต่ขนาดผงต่างกัน พบว่าของผสมที่เตรียมขึ้นจากผงขนาดเล็กจะให้ค่าความหนาแน่นมากกว่าของผสมที่เตรียมขึ้นจากผงขนาดใหญ่เล็กน้อย ซึ่งอาจมีเหตุผลมาจากผงสารที่มีขนาดเล็กสามารถถูกผสมในพอลิเมอร์ได้ดีกว่าผงขนาดใหญ่ ทำให้ที่ผิวรอยต่อระหว่างผงสารกับพอลิเมอร์ไม่มีรูพรุนหรือรอยแตก ค่าความหนาแน่นจึงสูงกว่า แต่เมื่อพิจารณาที่ขนาดของผงสารเท่ากันแต่อัตราส่วนผสมต่างกัน พบว่าของผสมที่เตรียมขึ้นจากอัตราส่วนผสมของผงเซรามิกพีแซดทีที่สูงกว่าจะมีค่าความหนาแน่นมากกว่า โดยสามารถ

อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของของผสมกับอัตราส่วนโดยปริมาตรของ เซรามิกพีแซดทีและโพลิเอธิลีนดังนี้ จากกฎทรงมวลของสาร

$$M = M_{PZT} + M_{PE} \quad (4.1)$$

โดยที่ M คือมวลของของผสมเซรามิกกับโพลิเอธิลีน
 M_{PZT} คือมวลของเซรามิกพีแซดทีในของผสม
 M_{PE} คือมวลของโพลิเอธิลีนในของผสม

จากนิยามของความหนาแน่นคือ อัตราส่วนของมวลต่อหน่วยปริมาตร จะได้

$$\rho V = \rho_{PZT} V_{PZT} + \rho_{PE} V_{PE} \quad (4.2)$$

โดยที่ V คือปริมาตรของของผสมเซรามิกกับโพลิเอธิลีน
 V_{PZT} คือปริมาตรของเซรามิกพีแซดทีในของผสม
 V_{PE} คือปริมาตรของโพลิเอธิลีนในของผสม
 ρ คือความหนาแน่นของของผสมเซรามิกกับโพลิเอธิลีน
 ρ_{PZT} คือความหนาแน่นของเซรามิกพีแซดทีในของผสม
 ρ_{PE} คือความหนาแน่นของโพลิเอธิลีนในของผสม

ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ดังนั้น

$$V = V_{PZT} + V_{PE} \quad (4.3)$$

แทน V_{PE} ลงในสมการ (4.2) จะได้

$$\begin{aligned} \rho V &= \rho_{PZT} V_{PZT} + \rho_{PE} (V - V_{PZT}) \\ \rho &= (\rho_{PZT} - \rho_{PE}) \\ \rho &= (\rho_{PZT} - \rho_{PE}) \frac{V_{PZT}}{V} + \rho_{PE} \end{aligned} \quad (4.4)$$

ดังนั้นจากสมการนี้จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของผงเซรามิกพีแซดทีและ โพลีเมอร์ กับความหนาแน่นของของผสมจะเป็นลักษณะเส้นตรง มีความชันเท่ากับ $(\rho_{PZT} - \rho_{PE})$

เมื่อทำการแทนค่าความหนาแน่นของผงเซรามิกพีแซดที, ความหนาแน่นของโพลีเอทิลีน และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกพีแซดทีในของผสมแล้ว พบว่าที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกพีแซดที ในของผสมเท่ากับ 40% โดยปริมาตร สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของของผสมตามทฤษฎีข้างต้นได้เท่ากับ 3.4988 g/cm^3 และที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของพีแซดทีในของผสมเท่ากับ 50% โดยปริมาตรนั้น สามารถคำนวณค่าได้เท่ากับ 4.137 g/cm^3 จะเห็นได้ว่าค่าที่ทำการวัดจากการทดลอง มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณตามทฤษฎี แสดงให้เห็นว่า ในกระบวนการเตรียม สามารถควบคุมอัตราส่วนระหว่างผงเซรามิก กับโพลีเอทิลีนได้ และการกระจายตัวของผงเซรามิกในเมตริกซ์พอลิเมอร์ค่อนข้างดี

4.2.5 การวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของพีแซดที, โพลีเอทิลีนและของผสม

ในการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนั้น มีตัวแปรหลายตัวที่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งในการทดลองนี้ได้นำการศึกษาผลของขนาดผงเซรามิกพีแซดทีในของผสมที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เมื่อทำการวัดที่ความถี่คงที่และเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ รวมทั้งยังศึกษาถึงสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการโพลีมีผลอย่างไรต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสม

- ผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเม็ดเซรามิกพีแซดทีเมื่อทำการวัดที่ความถี่และอุณหภูมิคงที่มีค่าสูงกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของโพลีเอทิลีนมาก
- ผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสมที่เตรียมขึ้นจากขนาดของผงต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบในเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของผงเท่ากัน และทำการวัดที่ความถี่เดียวกัน พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีการเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของผงเซรามิกมีขนาดใหญ่ขึ้น
- ผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสมที่เตรียมขึ้นจากผงเซรามิกขนาดเดียวกัน แต่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของพีแซดทีเซรามิกแตกต่างกัน พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีการเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยปริมาตรของพีแซดที จากทฤษฎีของของผสมที่มีสารไดอิเล็กตริกเป็นทรงกลม กระจายอยู่ในสารไดอิเล็กตริกอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งในกรณีนี้ J. W. Rayleigh ได้แสดงให้เห็นถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสม (ϵ_r) ที่มีสารไดอิเล็กตริกเป็นรูปทรงกลมกระจายตัวอย่างสุ่ม โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็น (ϵ_1) อยู่ในเมตริกซ์อื่นซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_2) จะได้ว่า

$$\epsilon_r = \epsilon_2 \left(\frac{2\epsilon_2 + \epsilon_1 + 2v_1(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{2\epsilon_2 + \epsilon_1 + v_1(\epsilon_1 - \epsilon_2)} \right) \quad (4.5)$$

โดยที่ v_1 คืออัตราส่วนโดยปริมาตรของสารไดอิเล็กตริกที่กระจายตัวอยู่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสมการ 4.5 นี้ไม่ขึ้นกับขนาดของอนุภาคของสารไดอิเล็กตริกที่กระจายในเมตริกซ์ไดอิเล็กตริก

- เมื่อใช้สนามไฟฟ้าค่าต่างๆ ในการโพลของผสมพบว่า มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกไม่มากนัก หรืออาจกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการโพลแทบจะไม่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสม
- ในการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเทียบกับความถี่พบว่า ในกรณีของเม็ดเซรามิกพีแชนด์ที่ ในความถี่ช่วงตั้งแต่ 100 Hz จนกระทั่งถึง 10^5 Hz ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อความถี่ที่ให้ค่าคงที่สูงขึ้นกว่า 10^5 Hz ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีการแกว่งไม่คงที่
- ในการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเทียบกับความถี่ของของผสมระหว่างพีแชนด์กับพอลิเมอร์นั้นพบว่า ทุกสารตัวอย่างจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่อนข้างคงที่ในช่วง 10^3 Hz- 10^6 Hz
- ในการศึกษาค่า $\tan\delta$ ของของผสมเทียบกับความถี่ พบว่าเป็นในทำนองเดียวกันกับ ผลของการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเทียบกับความถี่ นั่นคือ ค่า $\tan\delta$ จะมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงความถี่ 10^4 - 10^6 Hz

4.2.6 การวิเคราะห์ผลค่า d_{33} ของเซรามิกพีแชนด์ที่และของผสม

การศึกษาค่า d_{33} สำหรับการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของขนาดของเซรามิกพีแชนด์ที่มีผลต่อค่า d_{33} และผลของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการโพล ที่มีต่อค่า d_{33} ดังนี้

- ผลของค่า d_{33} ของเซรามิกพีแชนด์ที่มีค่าสูงกว่า ค่า d_{33} ของของผสมมาก
- ผลของค่า d_{33} ของของผสมเมื่อเปรียบเทียบกับสนามการโพลเดียวกัน แต่ขนาดของผงเซรามิกที่ใช้ในการเตรียมของผสมที่ใช้ต่างกัน พบว่า ขนาดของผงเซรามิกมีผลต่อค่า d_{33} นั่นคือ เมื่อใช้ขนาดของผงเซรามิกใหญ่ขึ้นถึงแม้ว่าจะใช้ในอัตราส่วนระหว่างเซรามิกและพอลิเมอร์คงที่ ค่า d_{33} จะเพิ่มขึ้น
- สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการโพลของผสมมีผลต่อค่า d_{33} สำหรับทุกๆ สารตัวอย่าง นั่นคือเมื่อใช้สนามในการโพลสูงขึ้นค่า d_{33} จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

ซึ่งการโพลโดยใช้สนามไฟฟ้าเป็นตัวทำให้ไดโพลในเฟสเซรามิกพีแชนด์ที่ เกิดการเรียงตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้ ทำให้เกิดโพลาริเซชันแกกก่อนสาร แต่ถ้าให้สนามไฟฟ้าน้อยการเกิดโพลาริเซชันจะไม่อิ่มตัว แต่ถ้าให้สนามไฟฟ้ามากพอจะสามารถทำให้เกิดโพลาริเซชันอิ่มตัวขึ้นได้ นั่นคือถึงแม้จะให้สนามไฟฟ้าแก่สารมากขึ้นโพลาริเซชันก็จะไม่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มสนามไฟฟ้านี้ต้องคำนึงถึงการเกิดเบรคดาวน์ทางไฟฟ้า (electrical breakdown)

ในกรณีของของผสมที่เตรียมขึ้นจากผงเซรามิกที่มีขนาดใหญ่ จะให้ค่า d_{33} ที่มากกว่าของผสมที่เตรียมขึ้นจากผงเซรามิกที่มีขนาดเล็ก ภายใต้สนามการโพลเดียวกันนั้น อาจใช้อธิบายได้ในแง่ของ potential drop นั่นคือ สนามไฟฟ้าที่ให้แก่สาร สำหรับผงเซรามิกขนาดใหญ่ นั้น มีโอกาสที่จะเกิด potential drop ที่บริเวณ surface ได้มากกว่าผงเซรามิกขนาดเล็ก

ทำให้เกิดโพลาเซชันในเนื้อเซรามิกได้มากกว่า ซึ่งมีผลต่อค่า d_{33} ทำให้ถึงแม้ว่าจะโพลที่สนามไฟฟ้าเท่ากัน แต่ค่า d_{33} ที่วัดได้จะมีค่ามากกว่าในของผสมที่เตรียมขึ้นจากผงเซรามิกที่มีขนาดเล็ก

4.2.7 การวิเคราะห์ผลจากภาพถ่าย SEM

จากภาพถ่ายของสารตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ของผสมที่เตรียมขึ้นนั้นมีรูพรุนเกิดขึ้นมากทั้งรูพรุนระหว่างอนุภาคสารเซรามิกที่เกาะกลุ่มกัน และรูพรุนระหว่างรอยต่อของเนื้อเซรามิกกับพอลิเมอร์ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้สมบัติทางไฟฟ้า และทางเพียโซอิเล็กทริก ที่วัดได้ไม่ดีเท่าที่ควร