

บทที่ 4

ผลการทดลอง

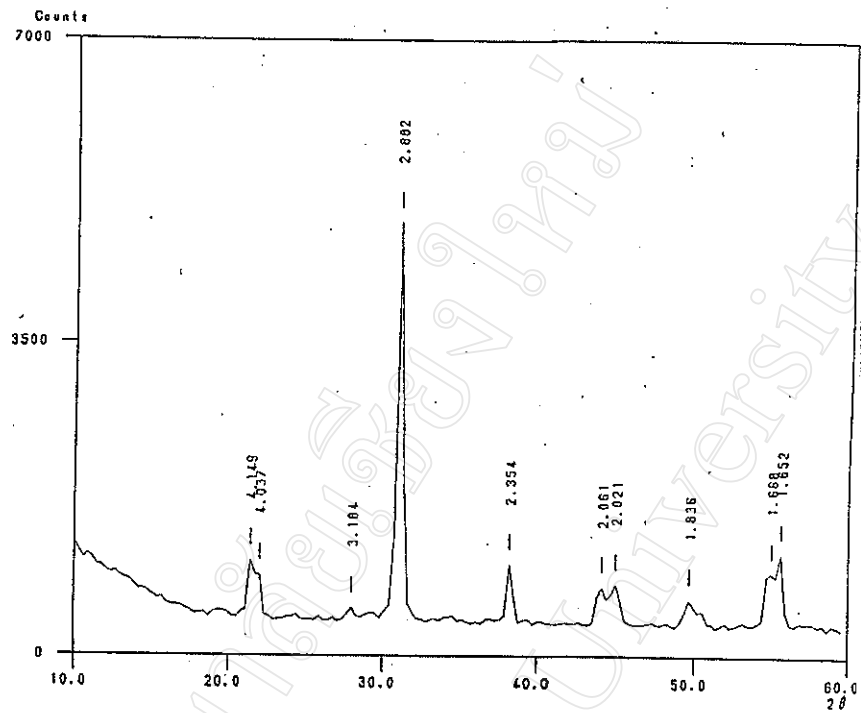
ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและสมบัติพียโซอิเล็กตริกในของผสมพียโซอิเล็กตริกเซรามิกกับพอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูงความหนาแน่นสูงพอลิเมอร์ ในแบบ 0-3 ในอัตราส่วนเซรามิกต่อพอลิเมอร์เท่ากับ 60/40 พร้อมกับศึกษา เทคนิคการเชื่อมคาร์บอนแกรไฟต์ลงไปในวัสดุผสมพียโซอิเล็กตริกเพื่อช่วยในกระบวนการโพล โดยทำการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการโพลและสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการโพล โดยรายละเอียดของผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลที่ได้มีดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer

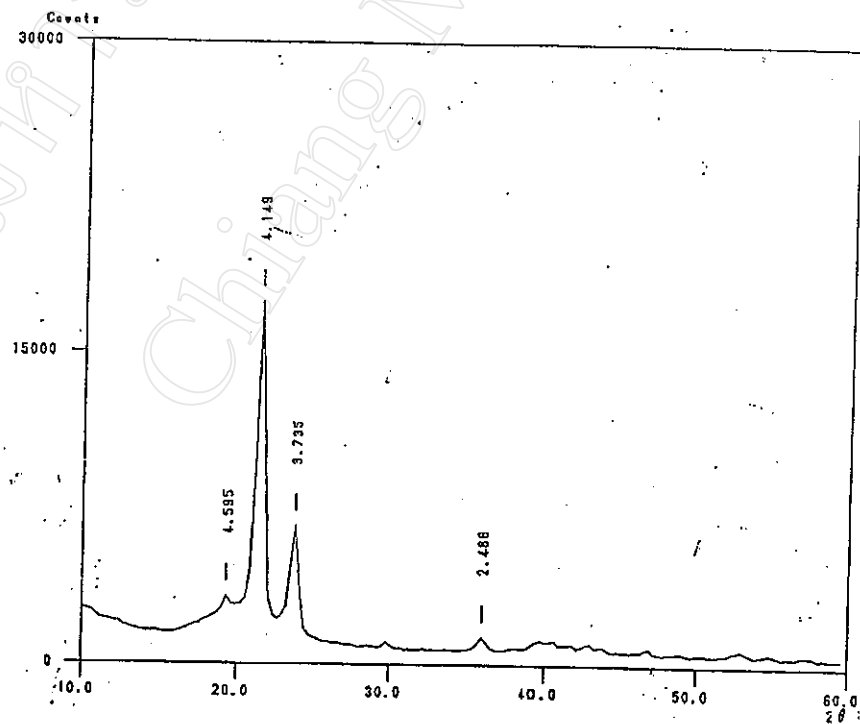
ในการศึกษาด้วย X-Ray diffractometer นี้เพื่อใช้ในการตรวจสอบว่าเซรามิกที่เตรียมขึ้นมาได้นั้นเป็นสารพีแซดที่ที่ต้องการหรือไม่ ซึ่งสารพีแซดที่เตรียมได้โดยวิธี Solid state reaction จากสารประกอบออกไซด์ของตะกั่วออกไซด์ เซอร์โคเนียมออกไซด์ และดีตาเนียมออกไซด์ ทำการเชื่อมแกนนี้สออกไซด์ หลังจากนั้นทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ผงพีแซดที่กลายเป็นเซรามิกพีแซดที่และทำการตรวจสอบด้วย X-Ray diffractometer อีกครั้งเพื่อให้แน่ใจว่ายังเป็นพีแซดที่อยู่

ซึ่งผลการวิเคราะห์จะได้เป็น Diffraction pattern ออกมาดังรูปที่ 4.1 ซึ่งรูปแบบของแต่ละ diffraction pattern นั้นจะเป็นรูปแบบเฉพาะของผลึกแต่ละชนิดทำการเปรียบเทียบ d-spacing ที่วิเคราะห์ได้กับพีแซดที่มาตรฐานจาก JCPDS file No. 33-784 จะได้ว่าเซรามิกที่เตรียมได้มีค่า d-spacing ใกล้เคียงกับค่าใน JCPDS ทุกค่าดังแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าสารที่เตรียมได้มีโครงสร้างสอดคล้องกับ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ จริง

จากนั้นทำการตรวจสอบ Matrix phase ซึ่ง Matrix phase ที่ใช้คือ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ซึ่งแสดง diffraction pattern ดังรูปที่ 4.2 นำ diffraction pattern ที่วิเคราะห์ได้ไปเปรียบเทียบกับพอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูงดังตารางที่ 4.2 จาก JCPDS-file No. 11-834 พบว่าใกล้เคียงเหมือนกันกับใน JCPDS-file ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ที่ใช้เป็น Matrix phase คือ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง



รูปที่ 4.1 Diffraction pattern ของเซรามิกพีแซดที่เตรียมเพื่อผสมในวัสดุผสม



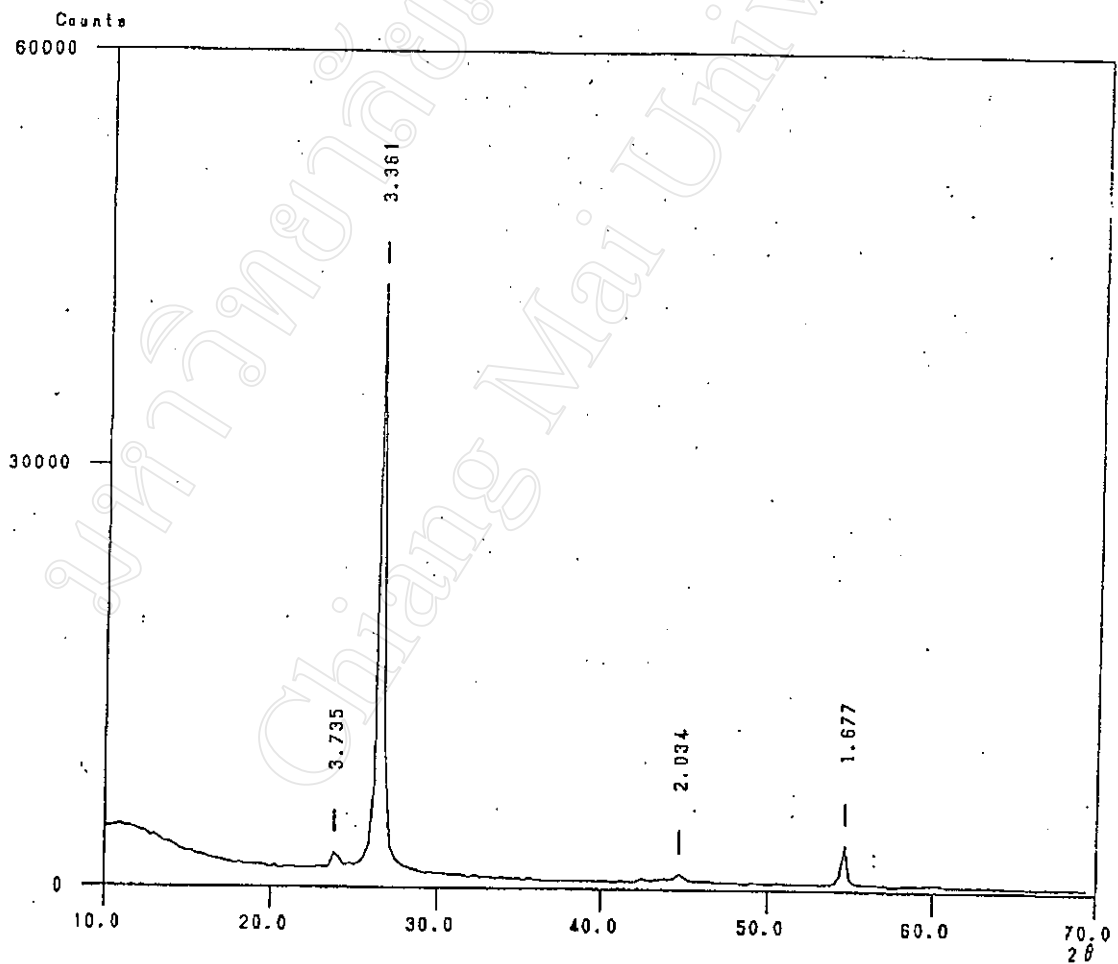
รูปที่ 4.2 Diffraction pattern ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่เตรียมเพื่อผสมในวัสดุผสม

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่า d-spacing ของเซรามิกพีเซดที่

ข้อมูลสารตัวอย่าง			ข้อมูลจาก JCPDS File NO.33-784		
2θ	$d(^{\circ}\text{\AA})$	I/I_0	$d(^{\circ}\text{\AA})$	I/I_0	[hkl]
21.400	4.149	22	4.146	9	001
22.000	4.037	18	4.036	12	100
28.000	3.184	11			
31.000	2.882	100	2.89, 2.85	100	101, 110
38.200	2.354	21	2.351	15	111
43.900	2.061	16	2.073	9	002
44.800	2.021	16			
49.600	1.836	13	2.018	16	200
55.000	1.668	19	1.844	5	102
55.600	1.652	24	1.81	6	201, 210
			1.677	12	112
			1.655	25	211
			1.446	9	022
			1.427	5	220
			1.382	2	003
			1.361, 1.35	6	212, 221, 300
			1.308	6	
			1.28	9	103
			1.244	2	301, 310
			1.220	2	113, 311
			1.176	5	222
			1.14, 1.13,	4	203, 302, 320
			1.12		
			1.10, 1.09,	15	123, 312, 321
			1.08		

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า d-spacing ของพอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง

ข้อมูลสารตัวอย่าง			ข้อมูลจาก JCPDS File No.11-834		
2θ	$d(^{\circ}\text{A})$	I/I_0	$d(^{\circ}\text{A})$	I/I_0	[hkl]
19.300	4.595	18	4.6	30	
21.400	4.149	100	4.1	100	
23.800	3.735	38	3.6	50	
36.100	2.486	7	2.49	40	



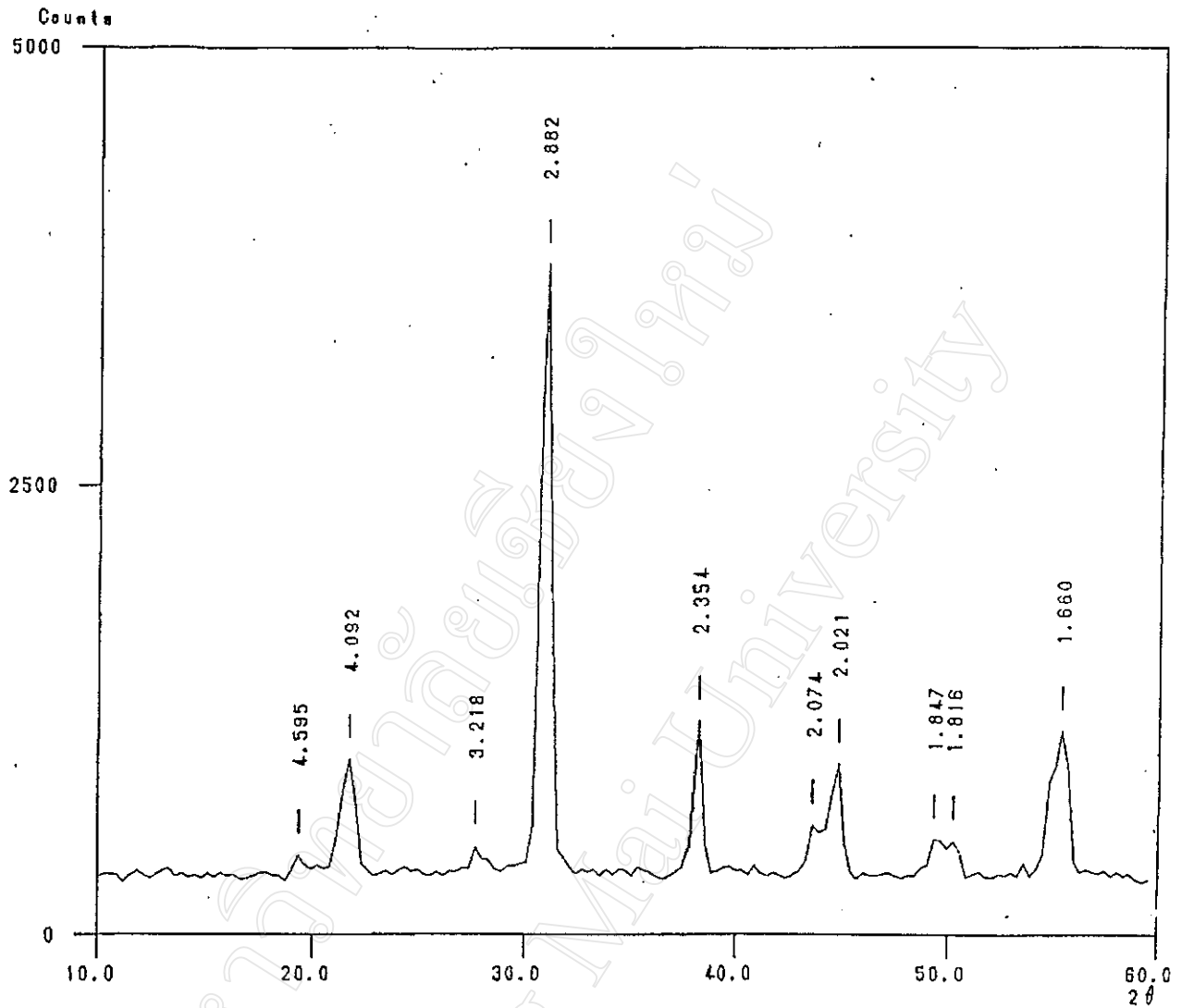
รูปที่ 4.3 Diffraction pattern ของผงแกรไฟต์ที่เตรียมเพื่อผสมในวัสดุผสม

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า d-spacing ของแกรไฟต์

ข้อมูลสารตัวอย่าง			ข้อมูลจาก JCPDS File NO.23-64		
2θ	$d(^{\circ}\text{\AA})$	I/I_0	$d(^{\circ}\text{\AA})$	I/I_0	[hkl]
23.800	3.735	6	3.36	100	002
26.500	3.361	100	2.13	10	100
44.500	2.034	3	2.03	50	101
54.700	1.677	8	1.800	5	102
			1.678	80	004
			1.544	10	103
			1.232	30	110
			1.158	50	112
			1.138	5	105
			1.120	20	006
			1.054	5	201
			0.994	40	114, 106
			0.841	10	008
			0.829	40	116
			0.801	5	211

หลังจากนั้นนำ Carbon Graphite มาตรวจสอบด้วย X-Ray Diffraction ได้ Diffraction pattern ดังรูปที่ 4.3 ออกมาทำการเปรียบเทียบรูปแบบกับ Graphite ที่ได้จาก JCPDS-file No 23-64 ดังตารางที่ 4.3 พบว่าตรงกับรูปแบบใน JCPDS-file จึงแสดงให้เห็นว่าคาร์บอนแกรไฟต์ที่เลือกใช้เป็นคาร์บอนแกรไฟต์ Graphite

ทำการวิเคราะห์วัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่างเซรามิกพีแซดที่กับพอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูงในอัตราส่วน PZT/HDPE 60/40 ด้วย X-Ray Diffraction ได้ diffraction pattern ดังรูปที่ 4.4

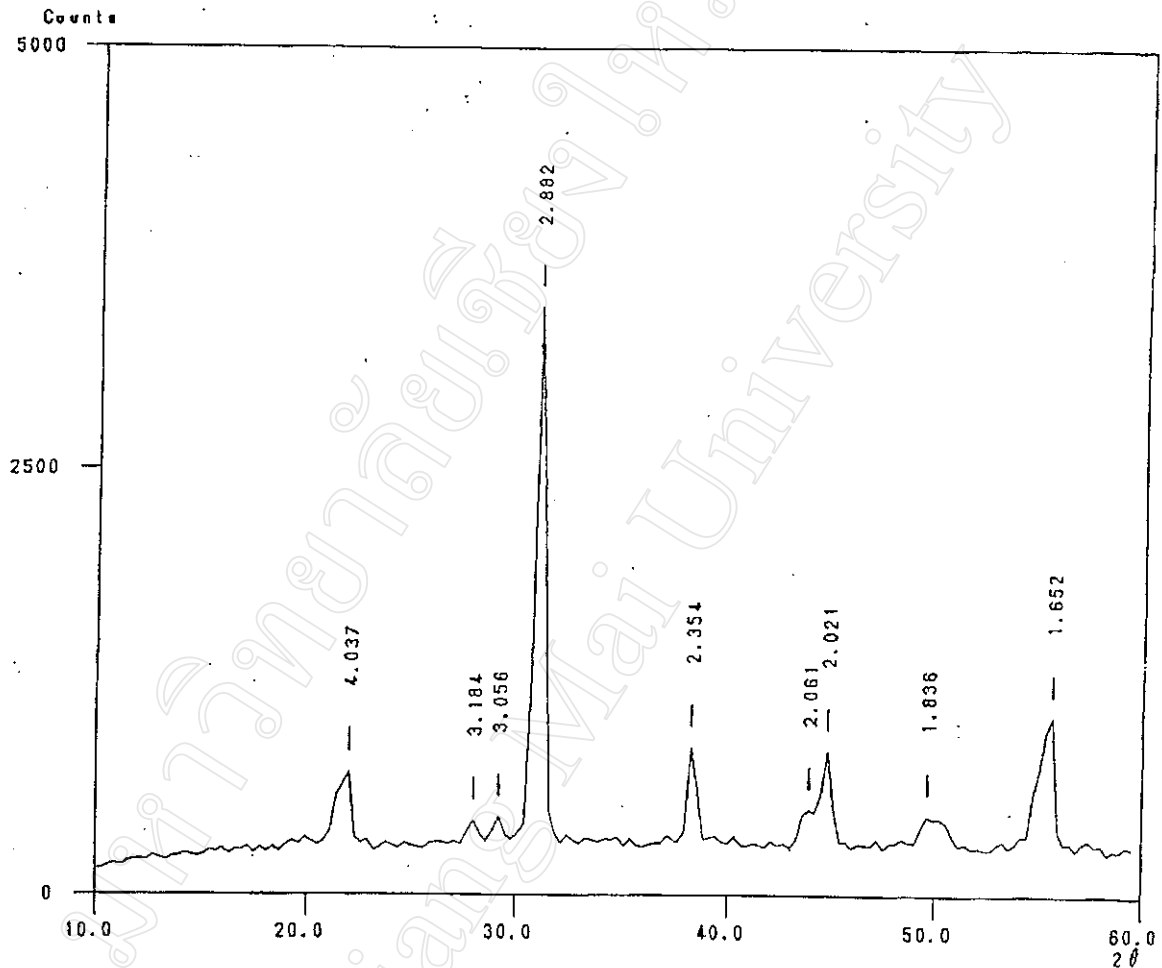


รูปที่ 4.4 Diffraction pattern ของวัสดุผสมแบบ 0-3 60PZT /40HDPE

ตารางที่ 4.4 แสดง d-spacing ของวัสดุผสมแบบ 0-3 60PZT /40HDPE

ข้อมูลสารตัวอย่าง			
2θ	d (° Å)	I (COUNT)	I/I ₀
19.300	4.595	429	11
21.700	4.092	961	26
27.700	3.218	479	13
31.000	2.882	3761	100
38.200	2.354	1178	31
43.600	2.074	598	16
44.800	2.021	936	25
49.300	1.847	520	14
50.200	1.816	510	14
55.300	1.660	1123	30

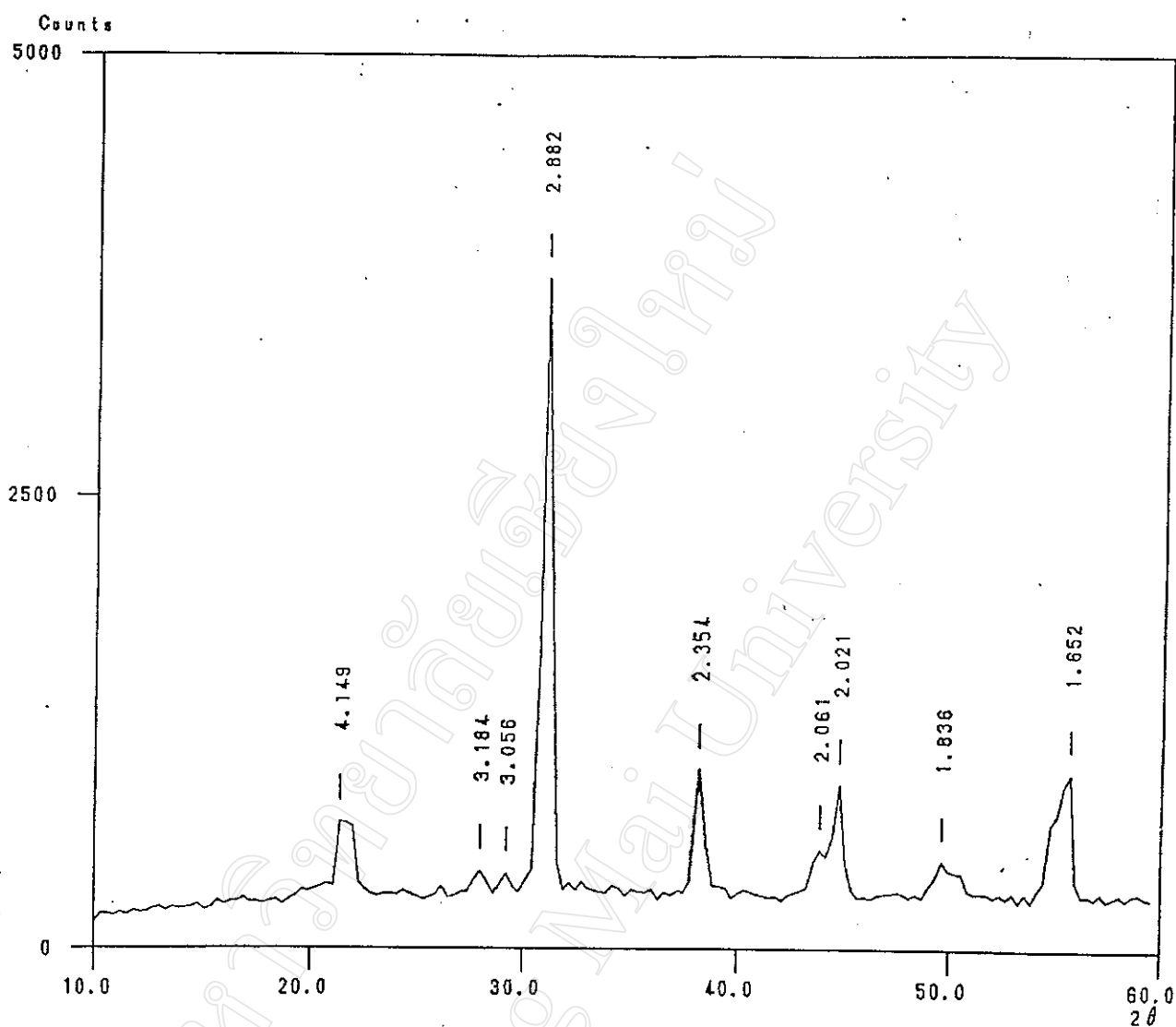
นำวัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่างเซรามิกพีแซดที่กับพอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูงเชื้อ Graphite ในเทคนิคต่างๆ 4 แบบ พร้อมกับวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffraction ได้ diffraction pattern ดังรูปที่ 4.4 , 4.5 , 4.6 , 4.7



รูปที่ 4.5 Diffraction pattern ของวัสดุผสมแบบ 0-3 58.5PZT /40HDPE/1.5C

ตารางที่ 4.5 แสดง d-spacing ของวัสดุผสมแบบ 0-3 58.5PZT /40HDPE/1.5C

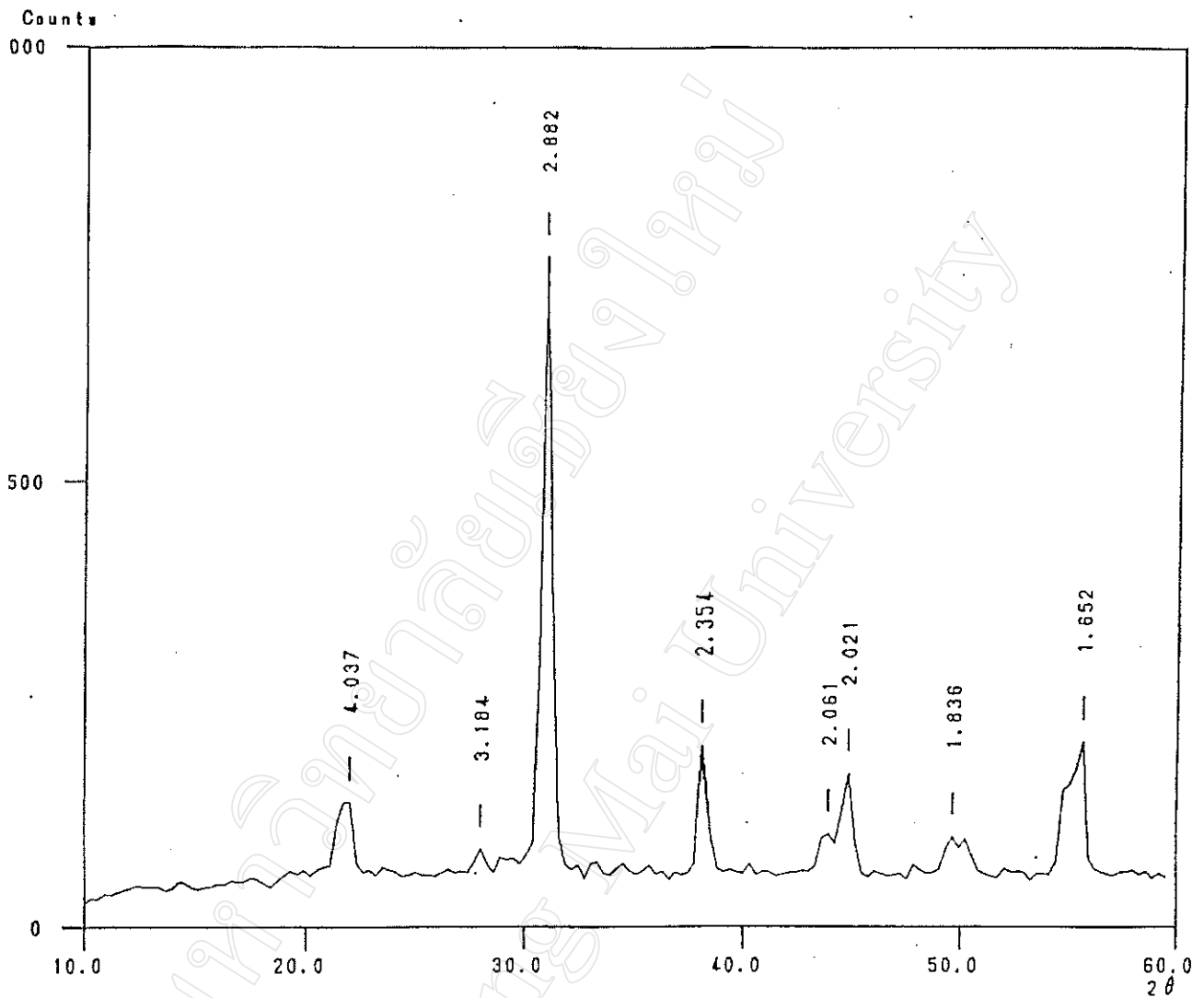
ข้อมูลสารตัวอย่าง			
2θ	$d(^{\circ}A)$	I (COUNT)	I/I_0
22.000	4.037	713	21
28.000	3.184	431	12
29.200	3.056	153	13
31.000	2.882	3466	100
38.200	2.354	858	25
43.900	2.061	498	14
44.800	2.021	838	24
49.600	1.836	466	13
55.600	1.652	1038	30



รูปที่ 4.6 Diffraction pattern ของวัสดุผสมแบบ 0-3 (1.5C)58.5PZT /40HDPE

ตารางที่ 4.6 แสดง d-spacing ของวัสดุผสมแบบ 0-3 (1.5C)58.5PZT /40HDPE

ข้อมูลสารตัวอย่าง			
2θ	$d(\text{\AA})$	I (COUNT)	I/I_0
21.400	4.149	693	19
28.000	3.184	423	11
29.200	3.056	409	11
31.000	2.882	3721	100
38.200	2.354	979	26
43.900	2.061	543	15
44.800	2.021	901	24
49.600	1.836	485	13
55.600	1.652	966	26

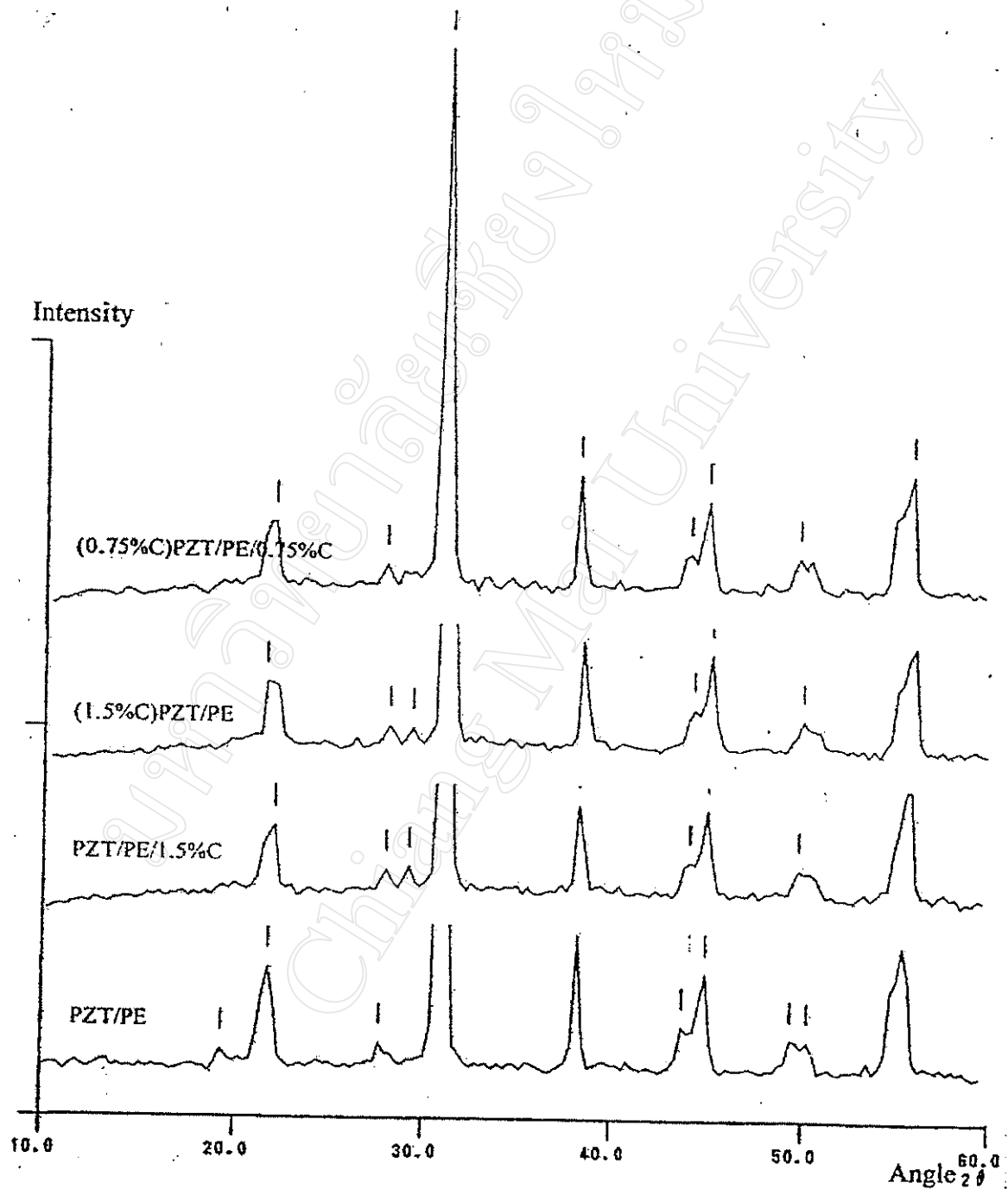


รูปที่ 4.7 Diffraction pattern ของวัสดุผสมแบบ 0-3 (0.75C)59.25PZT /40HDPE/0.75C

ตารางที่ 4.7 แสดง d-spacing ของวัสดุผสมแบบ 0-3 (0.75C)59.25PZT /40HDPE/0.75C

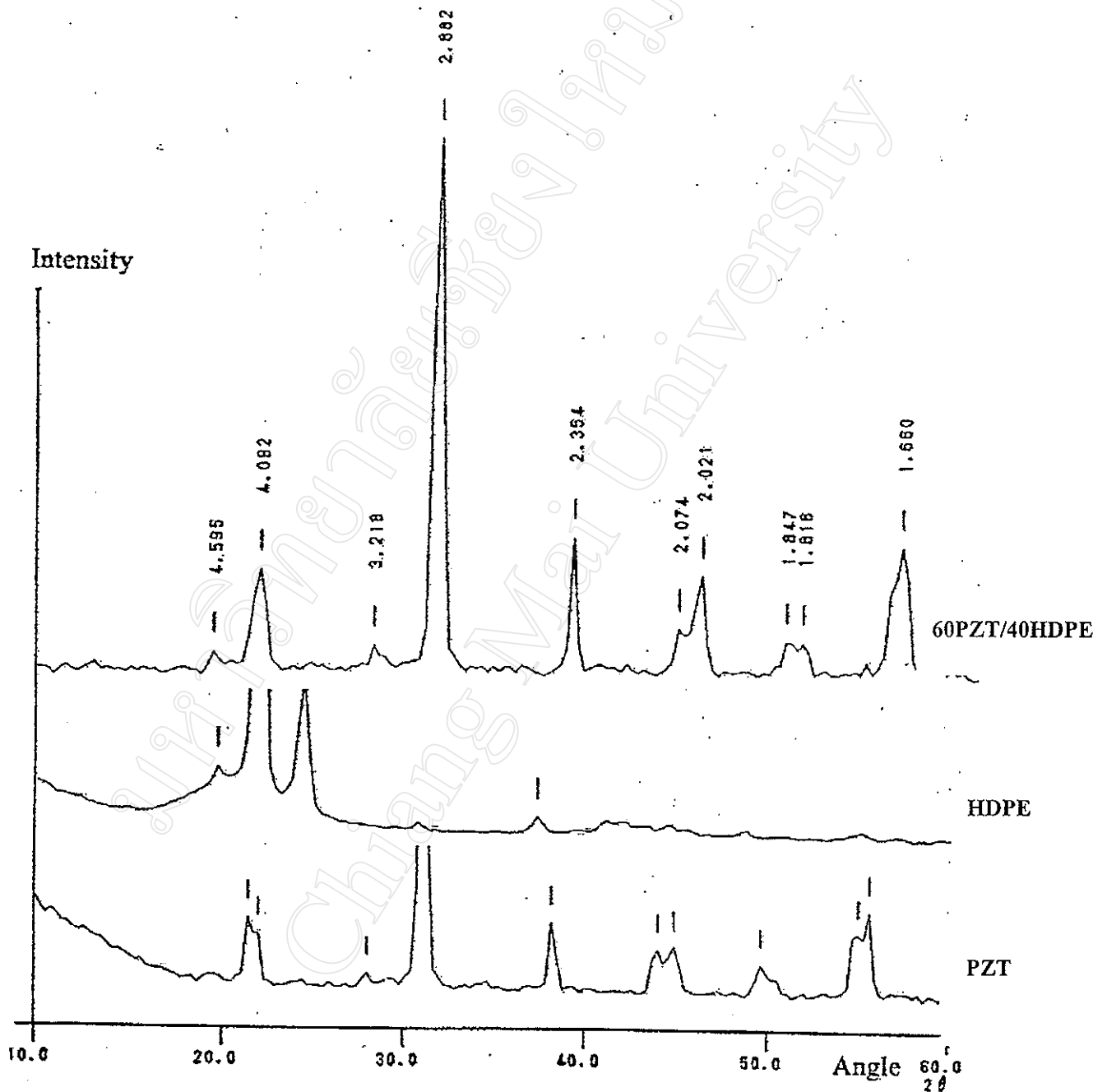
ข้อมูลสารตัวอย่าง			
2θ	$d (^{\circ} \text{\AA})$	I (COUNT)	I/I_0
22.000	4.037	701	18
28.000	3.184	437	12
31.000	2.882	3793	100
38.200	2.354	1015	27
43.900	2.061	521	14
44.800	2.021	855	23
49.600	1.836	502	13
55.600	1.652	1035	27

และทำการแสดงการเปรียบเทียบ diffraction pattern ของวัสดุผสมแบบ 0-3 โดยเทคนิคการ
เจือแกรไฟต์แบบต่างๆในรูปที่ 4.8

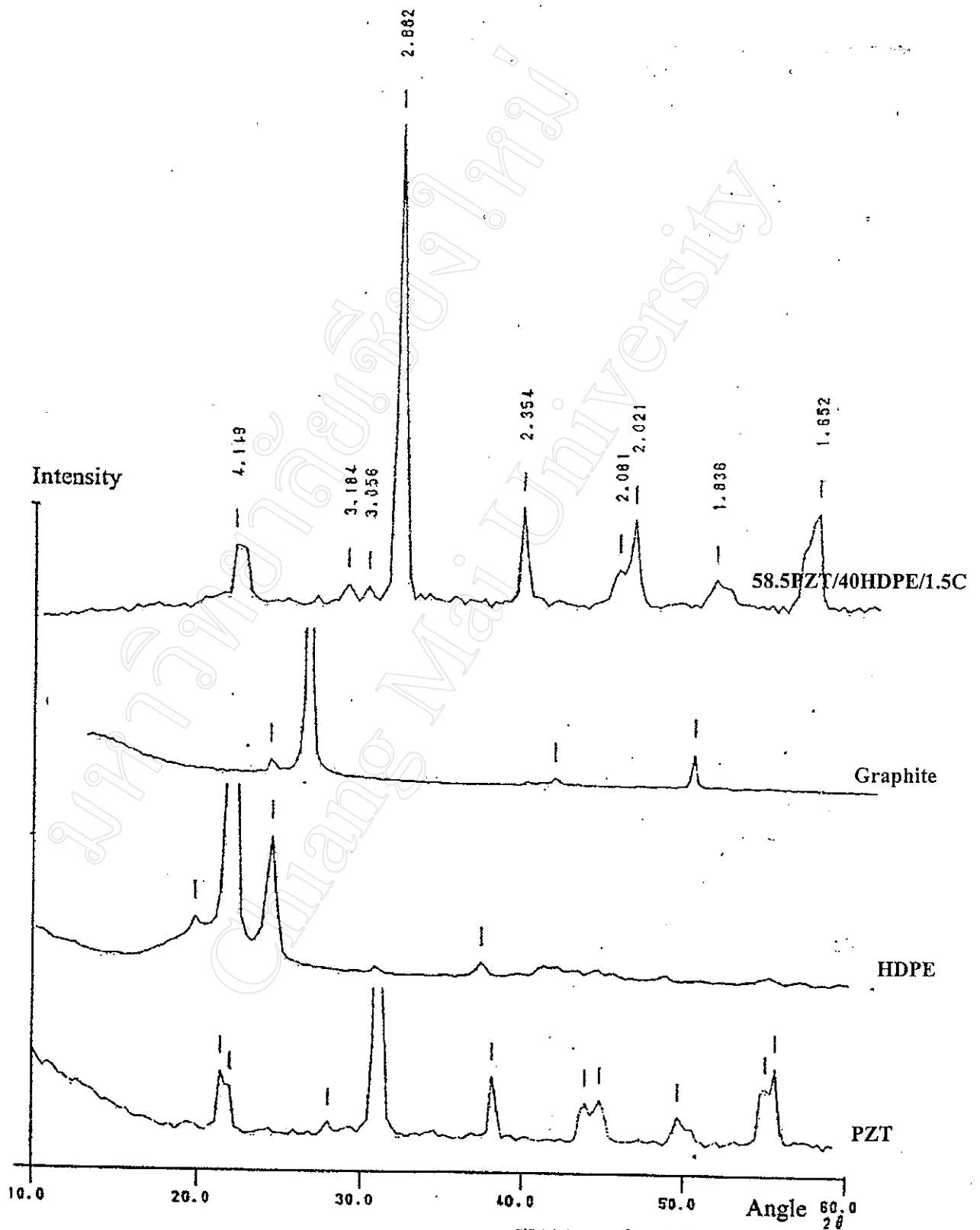


รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบ Diffraction pattern ของวัสดุผสมแบบ 0-3 พีแซดที/ พอลิเอธิลีน
ความหนาแน่นสูง ในอัตราส่วน 60:40 โดยเทคนิคการเจือแกรไฟต์แบบต่างๆ

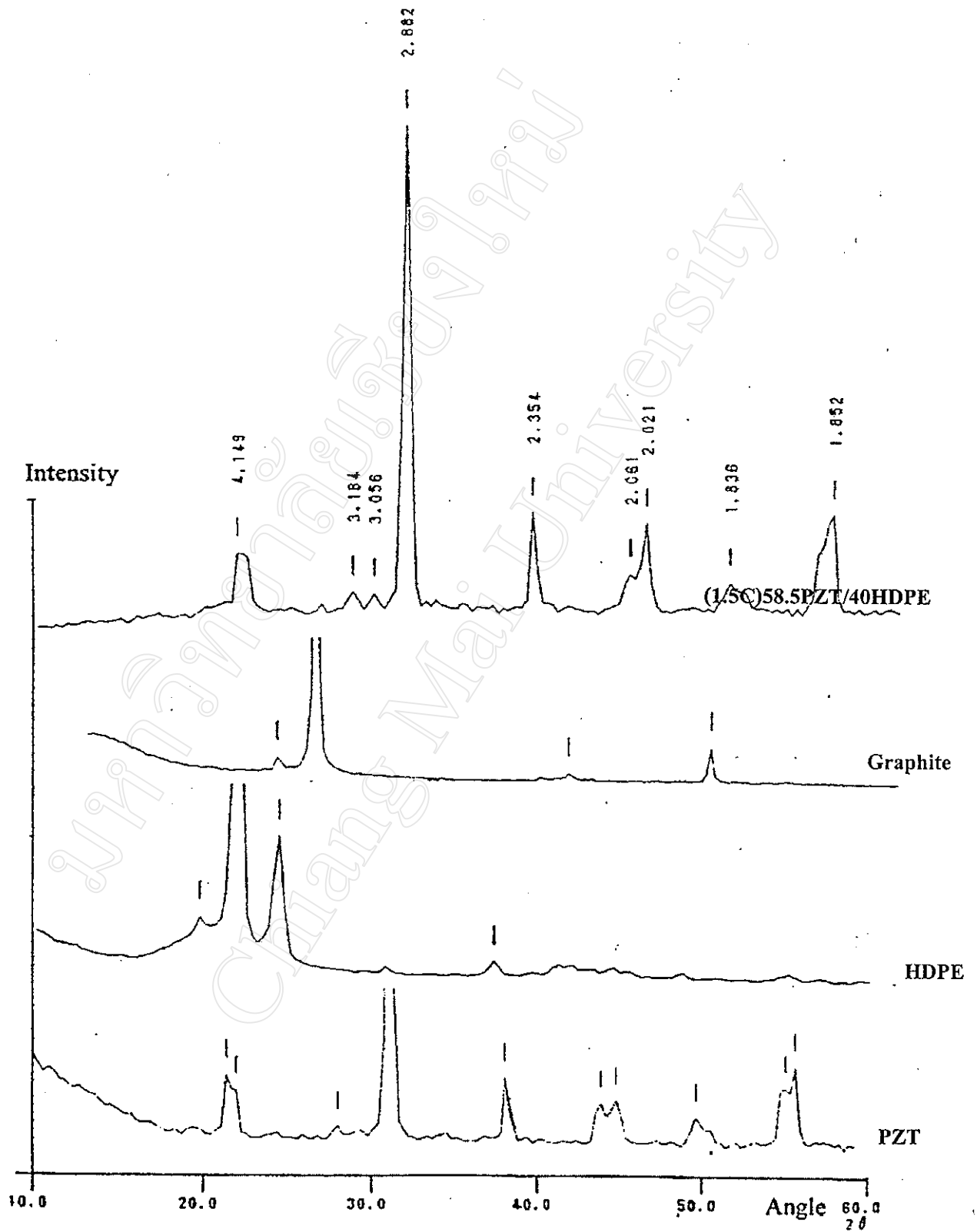
พร้อมกับแสดง diffraction pattern ของสารตั้งต้นเทียบกับ diffraction pattern ของวัสดุผสม ในแบบต่างดังรูปที่ 4.9-4.12



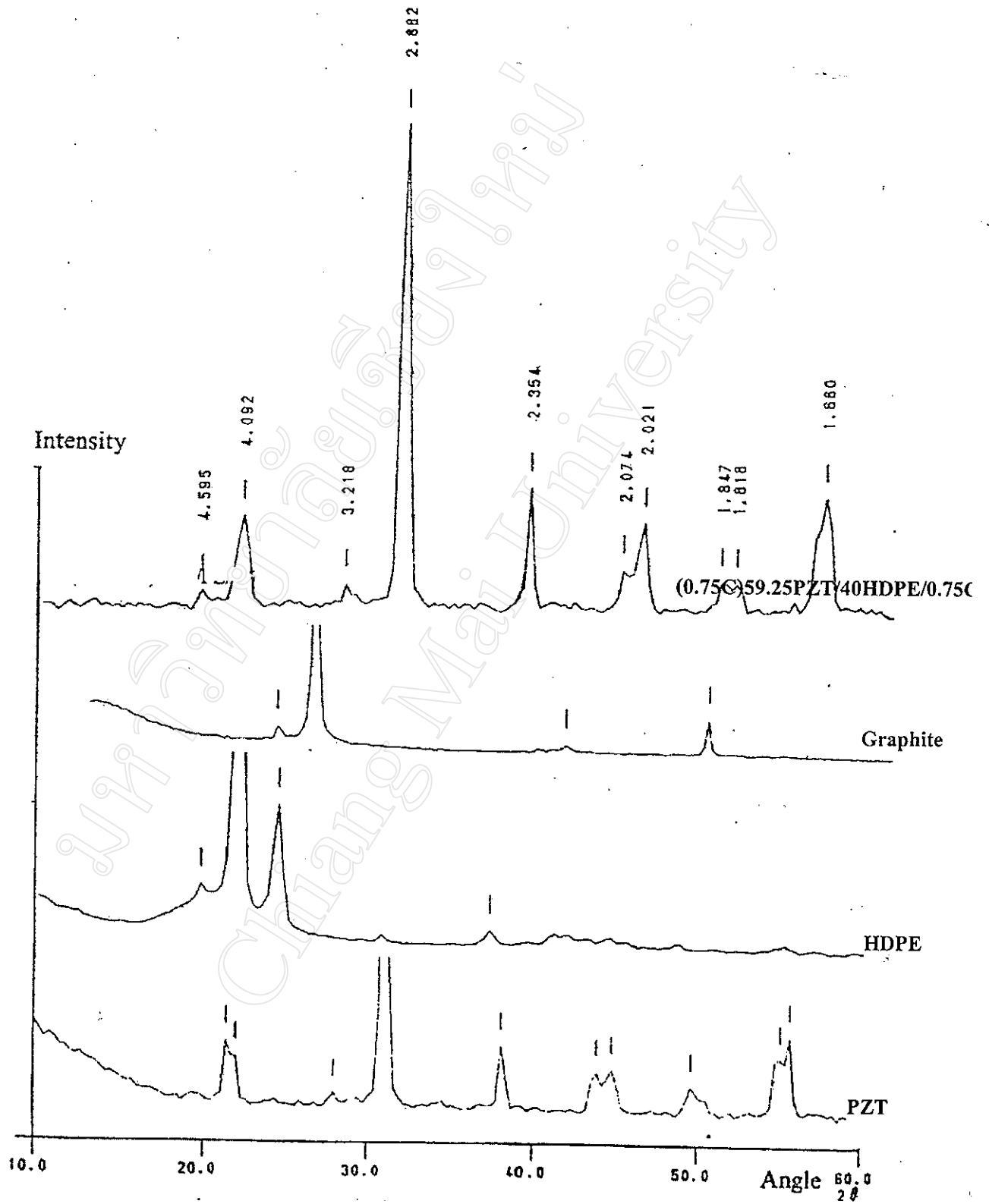
รูปที่ 4.9 แสดง Diffraction pattern ของสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 พีแซดที/พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ในอัตราส่วน 60:40 เทียบกับ Diffraction pattern ของวัสดุผสมที่เตรียมได้



รูปที่ 4.10 แสดง Diffraction pattern ของสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 พีแซดที/พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ในอัตราส่วน 60:40 เทียบกับ Diffraction pattern ของวัสดุผสมที่เตรียมได้โดยเทคนิคการเจือแกรไฟต์ : 58.5PZT/40HDPE/1.5C



รูปที่ 4.11 แสดง Diffraction pattern ของสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 พิเศษที่/
 พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง ในอัตราส่วน 60:40 เทียบกับ Diffraction pattern
 ของวัสดุผสมที่เตรียมได้โดยเทคนิคการเจือแกรไฟต์ (1.5C)58.5PZT/40HDPE



รูปที่ 4.12 แสดง Diffraction pattern ของสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 พีแซดที/พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ในอัตราส่วน 60:40 เทียบกับ Diffraction pattern ของวัสดุผสมที่เตรียมได้โดยเทคนิคการเจือแกรไฟต์ (0.75C)59.25PZT/40HDPE/0.75C

4.2 ผลการวัดค่าความหดตัว

นำเซรามิกพีแซดที่ผ่านขบวนการเผาซินเตอร์และยังไม่ได้ขัดผิวหน้าออกมาวัดหาขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยเวอร์เนียร์ คิจิตอล ทำการวัด 5 ครั้ง ต่อ 1 ชิ้นงาน โดยการเลือกสุ่มชิ้นงานทั้งหมด 5 ชิ้น แล้วทำการหาเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย $\bar{D}_s$ นำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวดังสมการ ได้ดังตารางที่ 4.8 แสดงซึ่งการทดลองนี้เส้นผ่าศูนย์กลางของแม่พิมพ์ D_0 มีค่าเท่ากับ 20 mm

ตารางที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ความหดตัวของเซรามิกพีแซดที่

สารตัวอย่าง	D_s (mm)	$\bar{D}_s$ (mm)	เปอร์เซ็นต์การหดตัว
1	19.732		
	19.732	19.729	1.355
	19.700		
	19.721		
	19.730		
2	19.852		
	19.851	19.847	0.765
	19.800		
	19.880		
	19.852		
3	19.632		
	19.620	19.6414	1.793
	19.630		
	19.635		
	19.690		
4	19.741		
	19.738	19.736	1.312
	19.740		
	19.731, 19.738		
5	19.770		
	19.757	19.766	1.17
	19.762		
	19.771, 19.770		

สามารถคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวอยู่ในช่วง 0.765 – 1.793 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าเฉลี่ยการหดตัวเท่ากับ 1.279 เปอร์เซ็นต์

4.3 ผลการหาความหนาแน่น

การศึกษาสมบัติของวัสดุผสมแบบ 0-3 นั้น สมบัติต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของ dispersed phase และ Matrix phase ที่ผสมอยู่ ดังนั้นจึงทำการวัดหาความหนาแน่นของเซรามิกพีแซดที่ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูงวัสดุผสมที่เตรียมได้และวัสดุผสมที่เกิดจากการเชื่อมคาร์บอนแกรไฟต์ในเทคนิคต่างๆ ดังสรุปได้ดังตารางที่ 4.9 แสดง

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมและเซรามิกพีแซดที่

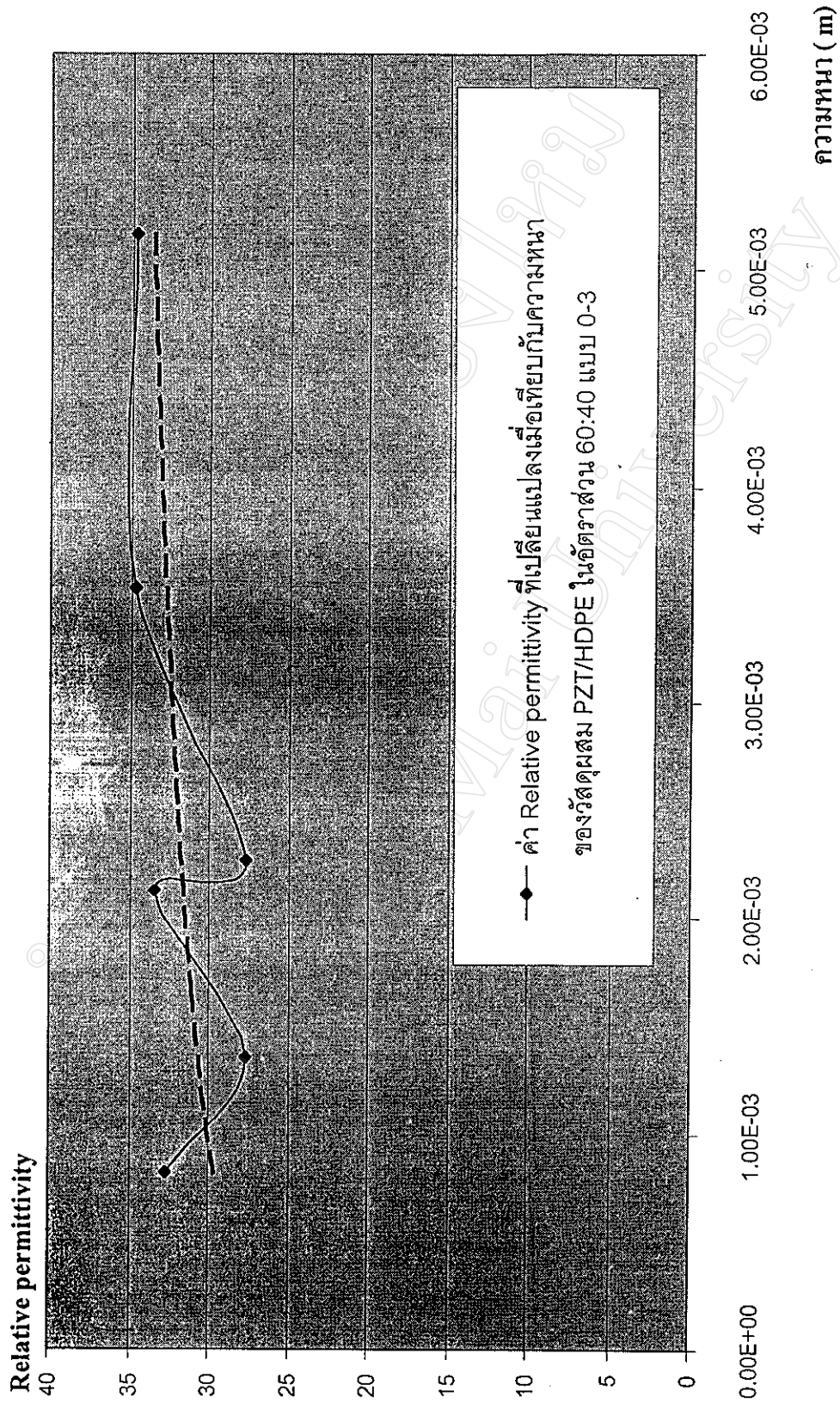
สารตัวอย่าง	ความหนาแน่น (g/cm ³)
PZT (powder)	7.226
PZT (disk)	6.846
PZT / 1.5% C (disk)	7.33
HDPE (powder)	0.9479
HDPE (disk)	0.9526
PZT / HDPE = 60 : 40	4.755
58.5PZT/40HDPE/1.5C	4.847
(1.5C)58.5PZT/40HDPE	4.877
(0.75C)59.25PZT/40HDPE/0.75C	4.867

4.4 ผลการหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

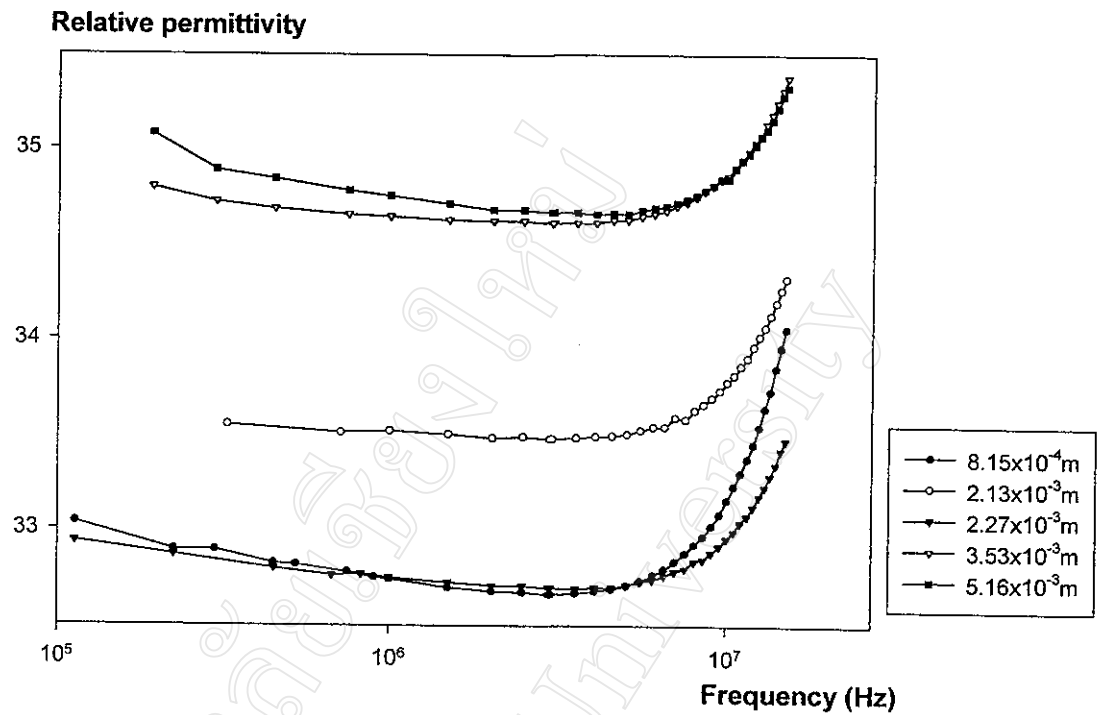
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นค่าหนึ่งที่สูงขึ้นกับตัวแปรหลายตัวที่มีผลเช่น อุณหภูมิและความถี่ ปัจจัยอีกชนิดหนึ่งที่เข้ามามีผลคือ ความหนาและสารเชื่อมซึ่งการทดลองครั้งนี้ได้ทำการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาผลความหนาต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเมื่อความถี่คงที่ 1MHz ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12
2. ศึกษาผลความหนาต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 100kHz – 15 MHz ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.13
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลของ ค่า Dielectric loss กับ ความถี่ ของวัสดุผสม 60/40 PZT/HDPE แบบ 0-3 ต่อความหนาต่างๆ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.14

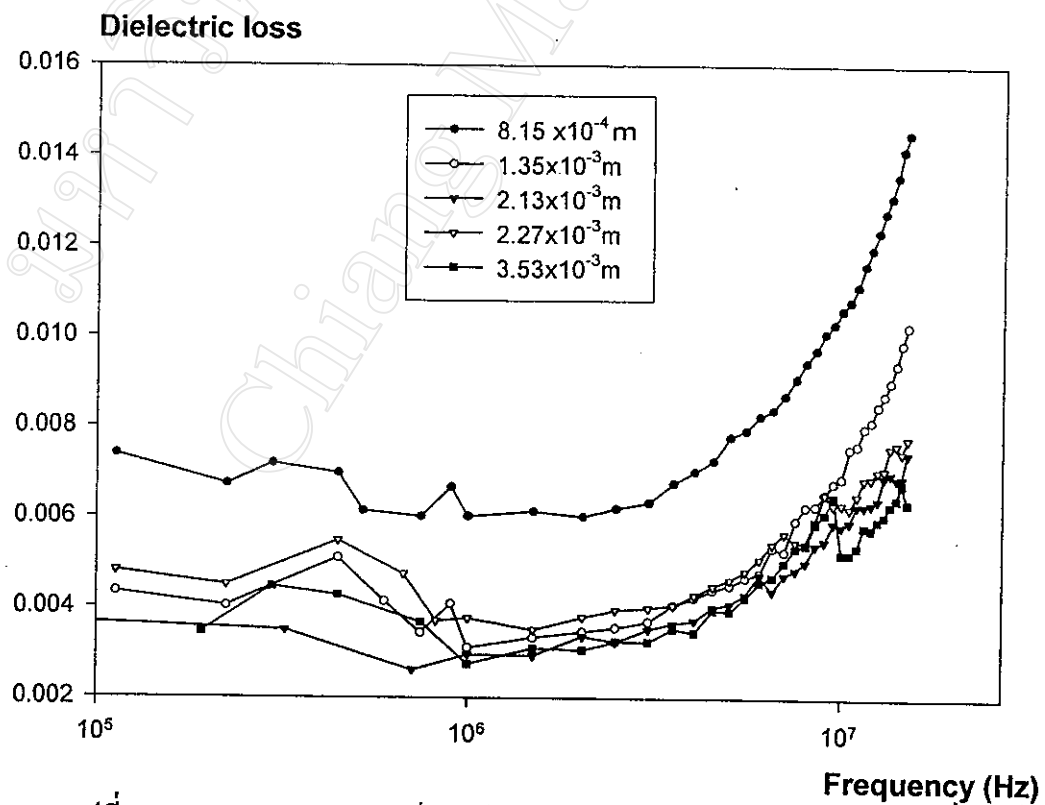
4. ศึกษาผลของการเชื่อมคาร์บอนแกรไฟต์ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้า C ที่ความถี่ต่างๆ ตั้งแต่ 100kHz – 15 MHz โดยให้อุณหภูมิคงที่พร้อมนำมาคำนวณด้วยสมการ ได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.15
5. นำชิ้นสารตัวอย่างที่เตรียมด้วยเทคนิคการเชื่อมคาร์บอนแกรไฟต์แบบต่างๆ มาทำการวัดหาค่า ความจุไฟฟ้า C ที่ความถี่ 1 kHz โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 10 - 80 °C พร้อมกับคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกตาม สมการ ได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.16



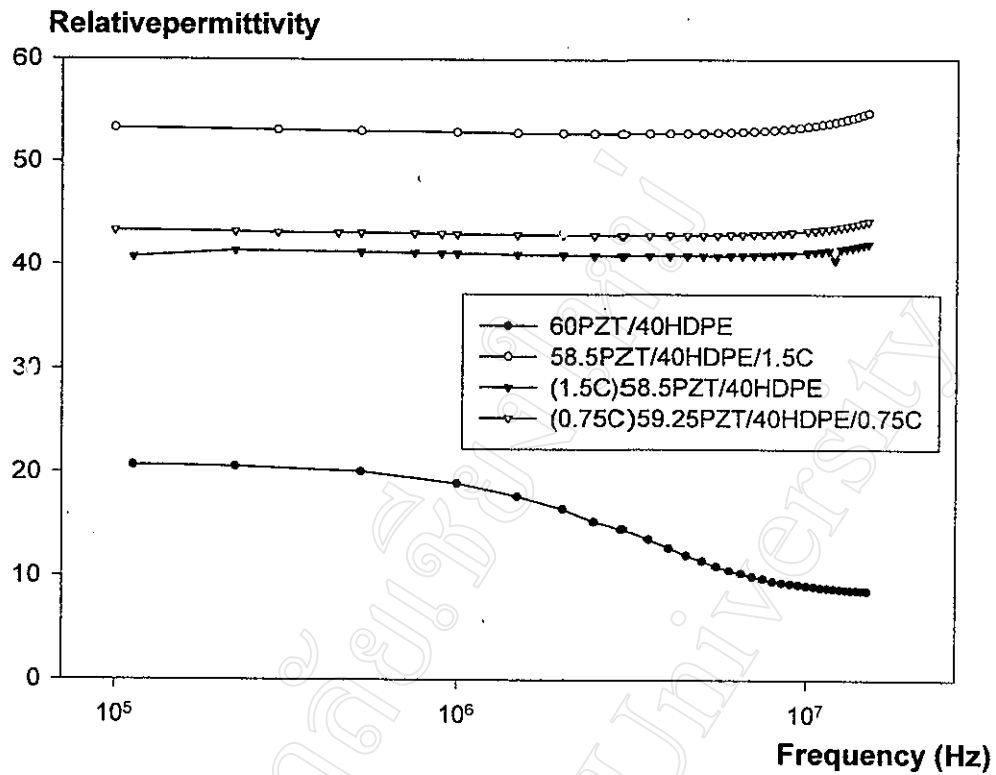
รูปที่ 4.13 แสดงค่า Relative permittivity ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับความหนา
ของวัสดุผสม PZT/HDPE ในอัตราส่วน 60:40 แบบ 0-3 ที่ความถี่ 1 MHz โดยให้อุณหภูมิคงที่



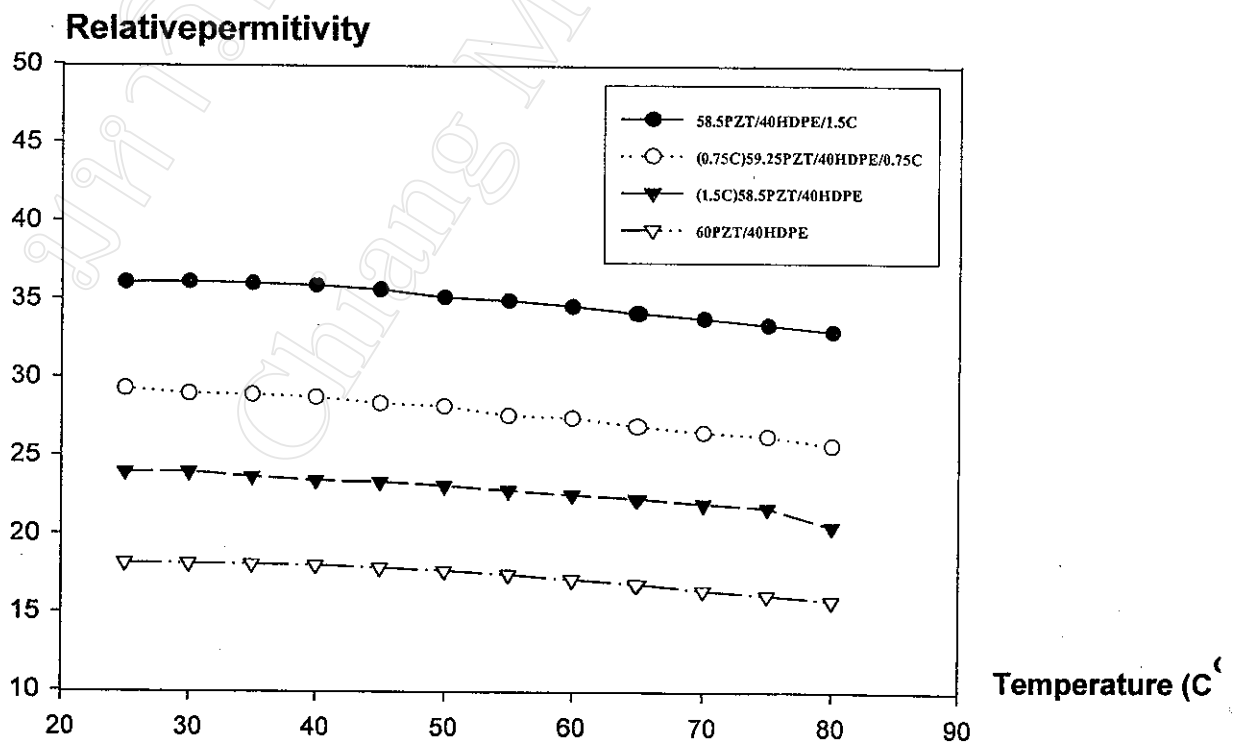
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับ ความถี่
ของวัสดุผสม 60PZT/40HDPE โดยปริมาตร แบบ 0-3 ณ.ความหนาต่างๆ



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของ ค่า Dielectric lossกับ ความถี่
ของวัสดุผสม 60/40 PZT/HDPE แบบ 0-3 ณ.ความหนาต่างๆ



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความถี่โดยเทคนิค
การเจาะคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสม PZT/HDPE แบบ 0-3



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับอุณหภูมิโดยเทคนิค
การเจาะคาร์บอนในแบบต่าง ๆ ของวัสดุผสม PZT/HDPE แบบ 0-3

4.5 ผลการหาค่า D_{33}

สารพีโซอิเล็กทริกจะแสดงสมบัติพีโซอิเล็กทริกออกมาในรูปแบบใด รูปแบบหนึ่งถึงค่า D_{33} เป็นค่าๆ หนึ่งที่สารพีโซอิเล็กทริกแสดงความเป็นพิโซออกมา การวัดค่า D_{33} ด้วยเครื่อง Piezometer system โดยในการทดลองนี้ได้ศึกษาค่า D_{33} ของวัสดุผสมที่เตรียมได้ในความหนาต่างๆ ผลของเทคนิคการเจือในแบบต่างๆและสนามไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการโพล โดยใช้สนามไฟฟ้าเท่ากับ 4 kv/mm , 6 kv/mm และ 8 kv/mm ที่อุณหภูมิ 80 °C โดยใช้เวลาในการโพลเท่ากับ 10 นาที, 20 นาที, 30 นาที ตามลำดับ โดยอัตราส่วนระหว่างเซรามิกพีแซดที่ต่อพอลิเมอร์เท่ากับ 60:40 โดยปริมาตร โดยวัดค่า D_{33} ของเม็ดเซรามิกพีแซดที่เมื่อผ่านการโพลที่สนาม 4 kv/mm เป็นเวลา 30 นาที มีค่าเท่ากับ 236.4 PC/N และผลของความหนาของวัสดุผสม, เทคนิคการเจือคาร์บอนแกรไฟต์, สนามไฟฟ้า และเวลาที่ใช้ในการโพล แสดงดังรูปที่ 4.18-4.24

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า D_{33} ที่วัดได้จาก Piezometer ในความหนาของวัสดุผสม

โดยโพลที่ 8 kv/mm เป็นเวลา 30 min และค่าความหนาแน่น

สารตัวอย่าง	D_{33} (PC/N)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
PZT : HDPE = 60 : 40 (0.5 mm)	4.4	4.16
PZT : HDPE = 60 : 40 (1.18 mm)	5.4	4.32
PZT : HDPE = 60 : 40 (2.0 mm)	6.8	4.67

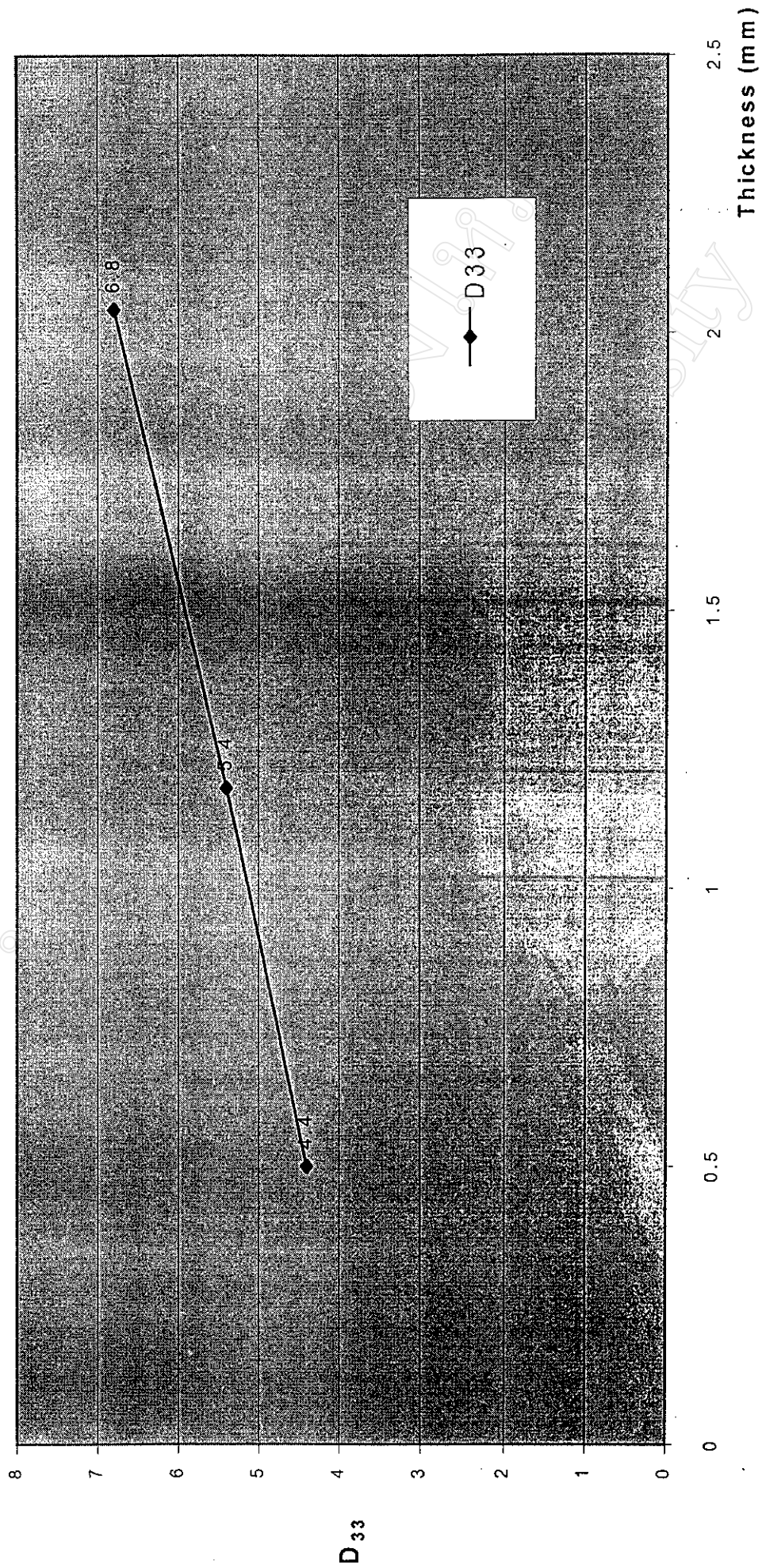
ตารางที่ 4.11 และ 4.12 แสดงค่า D_{33} ที่ได้จาก Piezometer เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการโพล โดยโพลที่ 4 kv/mm คงที่เป็นเวลา 10 นาที , 20 นาที , 30 นาที ตามลำดับของวัสดุผสม 0-3 PZT/HDPE โดยเจือคาร์บอนแกรไฟต์ในแบบต่างๆ และทำการวัดหลังจากโพลเสร็จและหลังจากโพลแล้ว

ตารางที่ 4.11 แสดงค่า D_{33} เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการโพลโดยให้สนามไฟฟ้าคงที่ 4, 6, 8 kv/mm

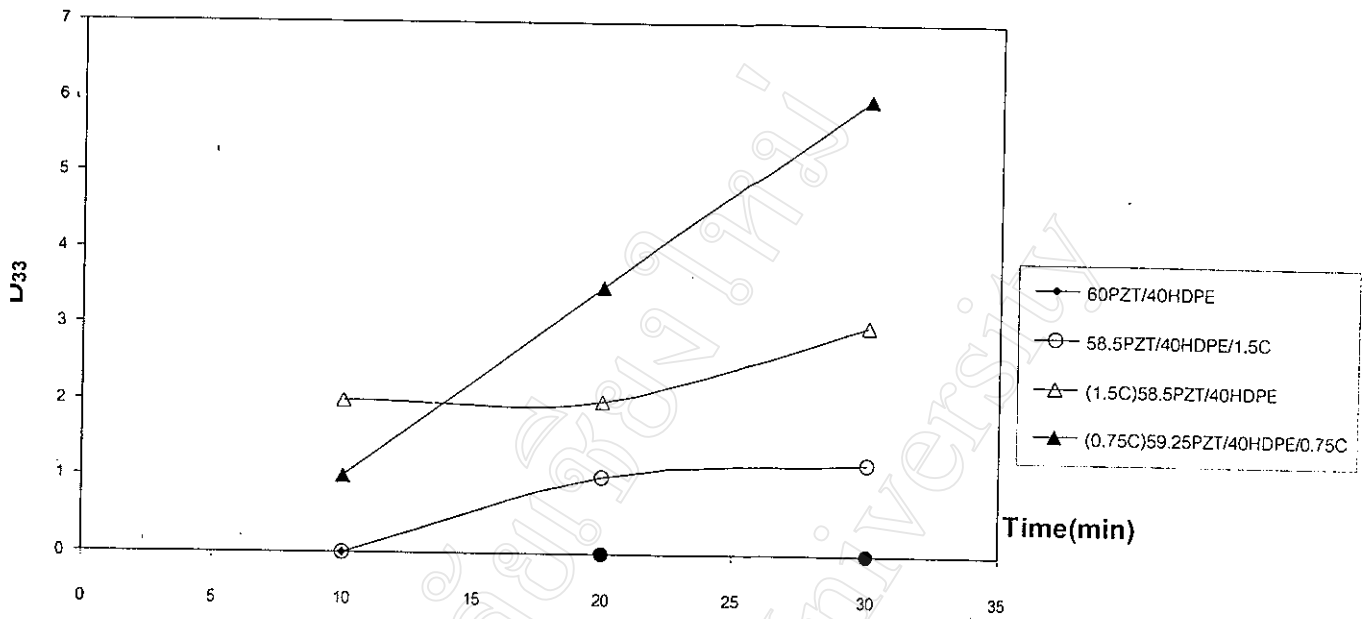
สนามที่ใช้ในการโพล (kv/mm)	เวลา (นาที)	60PZT / 40HDPE			58.5PZT / 40HDPE / 1.5C			(1.5 C) 58.5 PZT / 40HDPE			(0.75 C) 59.25PZT / 40HDPE / 0.75 C		
		ก่อนโพล	หลังโพล	หลังโพล (24 h)	ก่อนโพล	หลังโพล	หลังโพล (24 h)	ก่อนโพล	หลังโพล	หลังโพล (24 h)	ก่อนโพล	หลังโพล	หลังโพล (24 h)
Pole ที่ 4 kv/mm	10	0	0	0	0	1	0	0	3	2	0	2	1
	20	0	0	0	0	1	1	0	3	2	0	4.2	3.5
	30	0	1	0	0	1.6	1.2	0	3.5	3	0	6.3	6
Pole ที่ 6 kv/mm	10	0	1	0	0	1	1	0	3.3	2.5	0	6.5	5.6
	20	0	3	2	0	3	3	0	5	4	0	7	6
	30	0	3	3	0	4	4	0	6	5	0	10	9
Pole ที่ 80 kv/mm	10	0	3	2	0	6.4	6	0	6	5	0	10	10
	20	0	3	2	0	8	7	0	7	6	0	11	10
	30	0	3	2	0	10	9.2	0	8	7	0	12	11

ตารางที่ 4.12 แสดงค่า D_{33} เมื่อเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าในการโพลด้วยระยะเวลาในการโพลดงที่

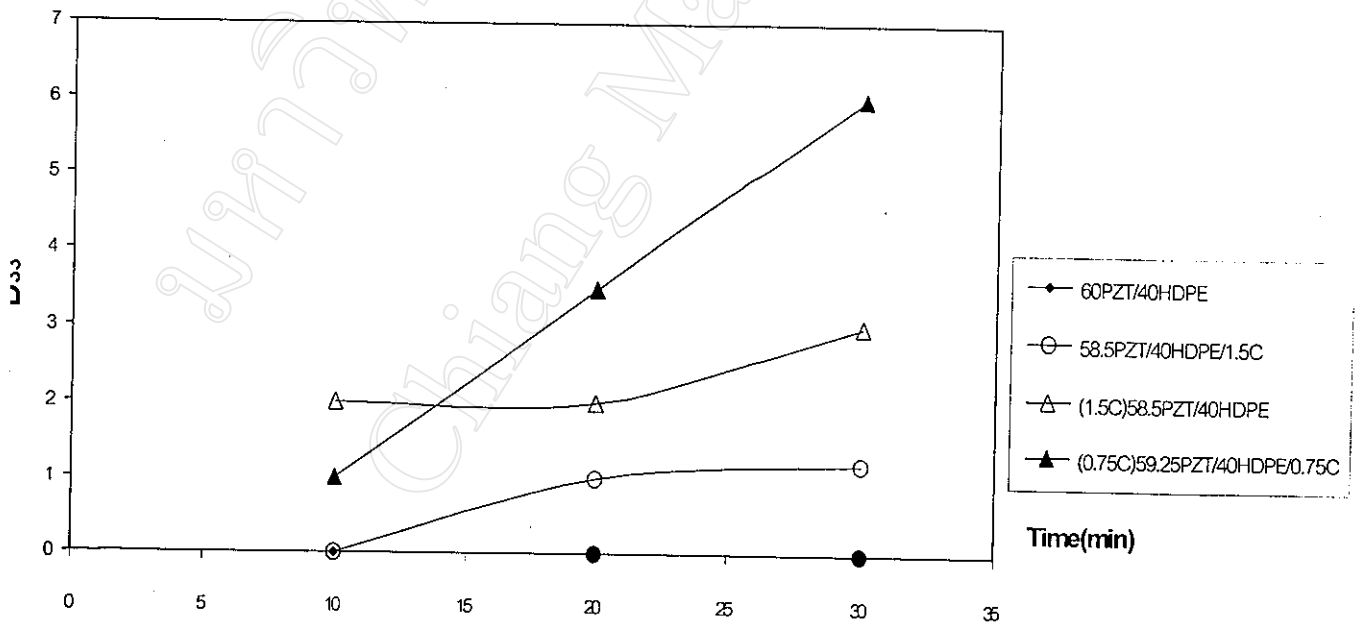
เวลาที่ใช้ในการโพล	สนามไฟฟ้า (kv/mm)	60PZT / 40HDPE			58.5PZT / 40HDPE / 1.5C		(1.5 C) 58.5 PZT / 40HDPE			(0.75 C) 59.25PZT / 40HDPE / 0.75 C		
		ก่อนโพล	หลังโพล	หลังโพล (24 h)	ก่อนโพล	หลังโพล	หลังโพล (24 h)	ก่อนโพล	หลังโพล	หลังโพล (24 h)	ก่อนโพล	หลังโพล
10min	4	0	0	0	0	1	0	0	3	2	0	2
	6	0	1	0	0	1	1	0	3.3	2.5	0	3.5
	8	0	3	2	0	6.4	6	0	6	5	0	10
20min	4	0	0	0	0	1	0	0	3	2	0	4.2
	6	0	3	2	0	3	3	0	5	4	0	7
	8	0	3	2	0	8	7	0	7	6	0	11
30min	4	0	1	0	0	1.6	1.2	0	3.5	3	0	6.3
	6	0	3	3	0	4	4	0	6	3.5	0	10
	8	0	3	3	0	10	9	0	8	7	0	12



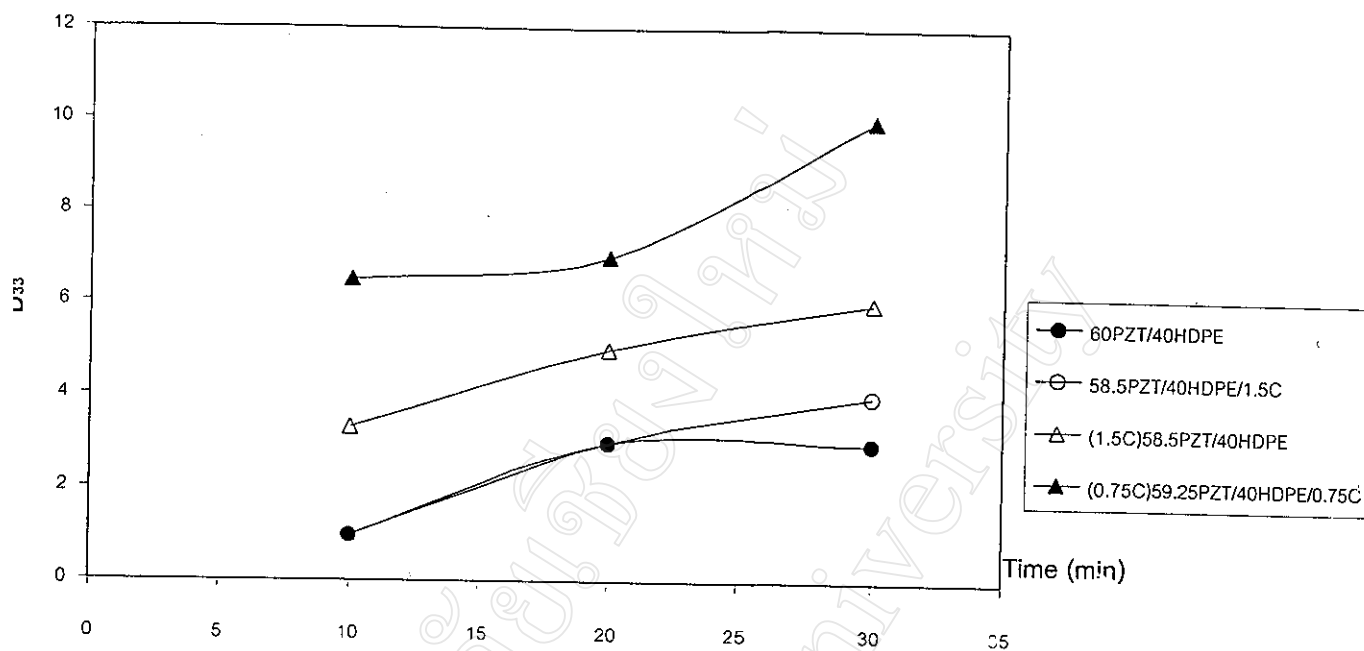
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_{33} กับ Thickness (mm)
โดย Pole at 8 Kv/mm เป็นเวลา 30 นาทีของวัสดุผสม 60PZT/40HDPE แบบ 0-3



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการ Pole กับ D_{33} โดย Pole ที่ 4Kv/mm หลังทำการ Pole 24 h โดยเทคนิคการการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสมแบบ 0-3

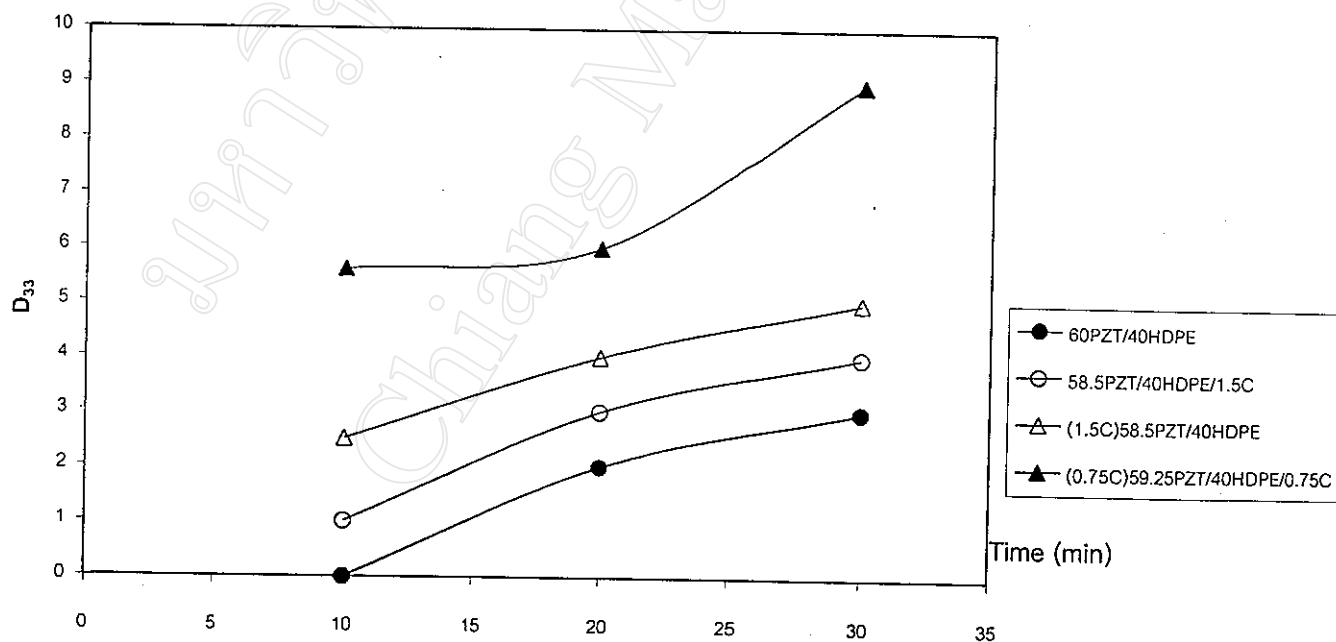


รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการ Pole กับ D_{33} โดย Pole ที่ 4Kv/mm หลังทำการ Pole 24 h โดยเทคนิคการการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสมแบบ 0-3



รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการ Pole กับ D_{33} โดย Pole ที่ 6Kv/mm

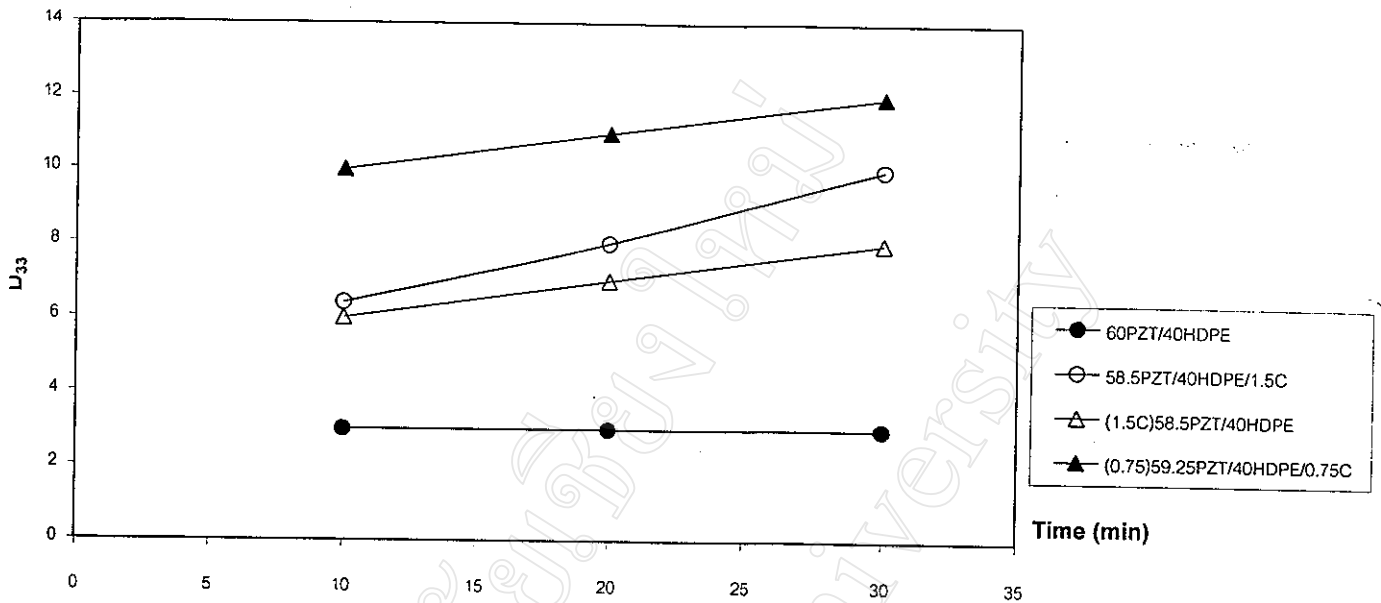
โดยเทคนิคการการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสม PZT/HDPEแบบ 0-3



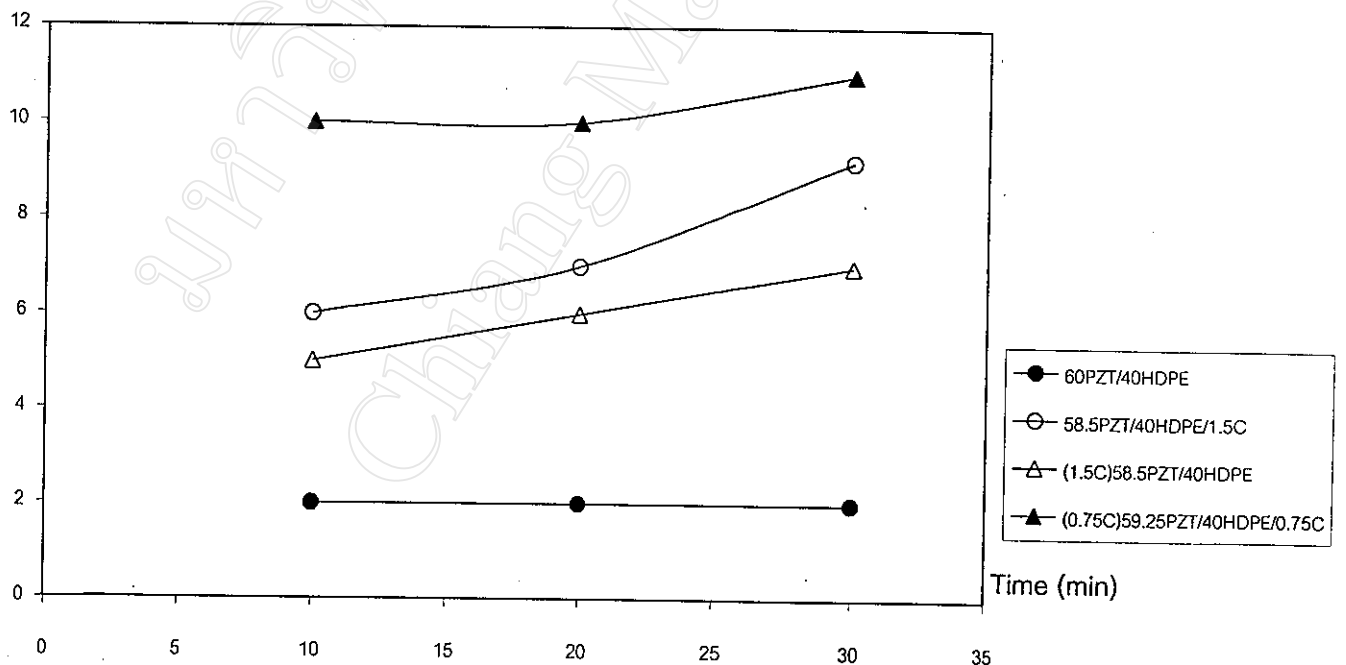
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการ Pole กับ D_{33} โดย Pole ที่ 6Kv/mm

หลังทำการ Pole 24 h โดยเทคนิคการการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของ

วัสดุผสม PZT/HDPEแบบ 0-3



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการ Pole กับ D_{33} โดย Pole ที่ 8Kv/mm โดยเทคนิคการการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของวัสดุผสม PZT/HDPE แบบ 0-3



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการ Pole กับ D_{33} โดย Pole ที่ 8Kv/mm

หลังทำการ Pole 24 h โดยเทคนิคการการเจือคาร์บอนในแบบต่างๆของ

วัสดุผสม PZT/HDPE แบบ 0-3

4.6 ผลการหาค่า Piezoelectric Capling Factor

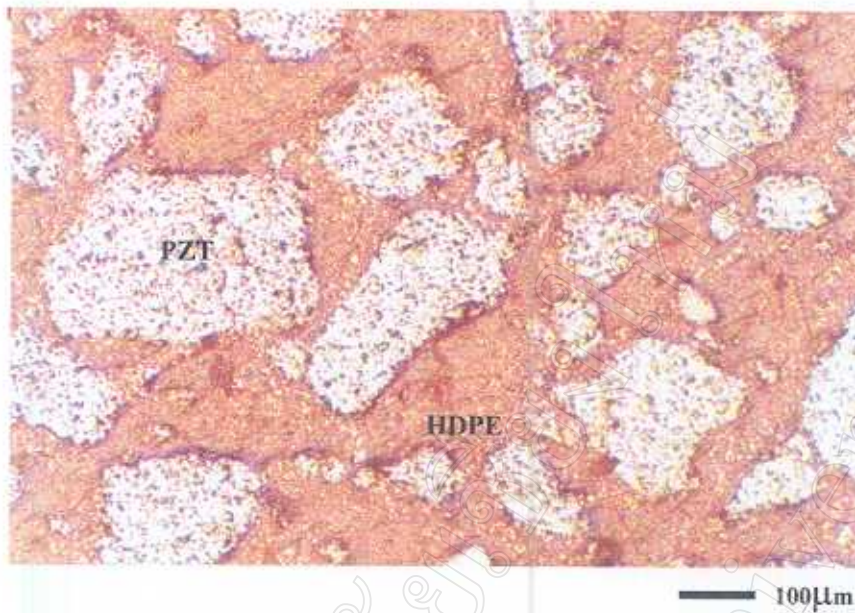
จากการศึกษาค่า K_p ของเซรามิกพีแซดที่สามารถวัดค่า f_r และ f_a ได้ดังรูป พบว่าเซรามิกพีแซดที่มีค่า $f_r = 74.60959$ kHz $f_a = 77.61461$ kHz นำค่า f_r และ f_a มาคำนวณโดยใช้สมการได้ค่า K_p เท่ากับ 0.47732

4.7 ผลการวัดเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักคาร์บอนแกรไฟต์

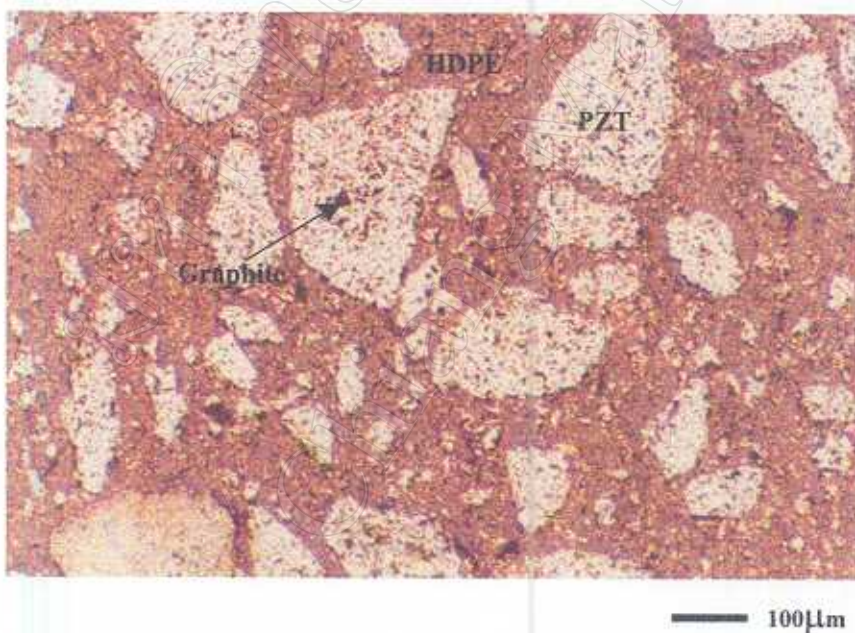
เมื่อนำผงคาร์บอนแกรไฟต์ที่ผ่านกระบวนการเผาอินเตอร์ในรูปแบบที่เหมือนกันกับการเผาอินเตอร์ของเซรามิกพีแซดที่ โดยเผาอุณหภูมิอินเตอร์ที่ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แห่อุณหภูมิที่ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้นลงเท่ากับ $3^\circ\text{C}/\text{นาท}$ โดยกลบผงคาร์บอนแกรไฟต์ด้วยผงอะลูมินาพบว่าเปอร์เซ็นต์การหายไปของผงคาร์บอนแกรไฟต์แสดงดังตาราง

ปริมาณคาร์บอนแกรไฟต์ ก่อนเผาซินเตอร์	ปริมาณคาร์บอนแกรไฟต์หลัง เผาซินเตอร์โดยมิได้กลบ	เปอร์เซ็นต์การหายไป ของคาร์บอนแกรไฟต์
2.6446 g	0 g	100%
ปริมาณคาร์บอนแกรไฟต์ ก่อนเผาซินเตอร์	ปริมาณคาร์บอนแกรไฟต์หลังเผา ซินเตอร์โดยกลบด้วยอะลูมินา	เปอร์เซ็นต์การหายไป ของคาร์บอนแกรไฟต์
2.6446 g	1.1809 g	55.35%

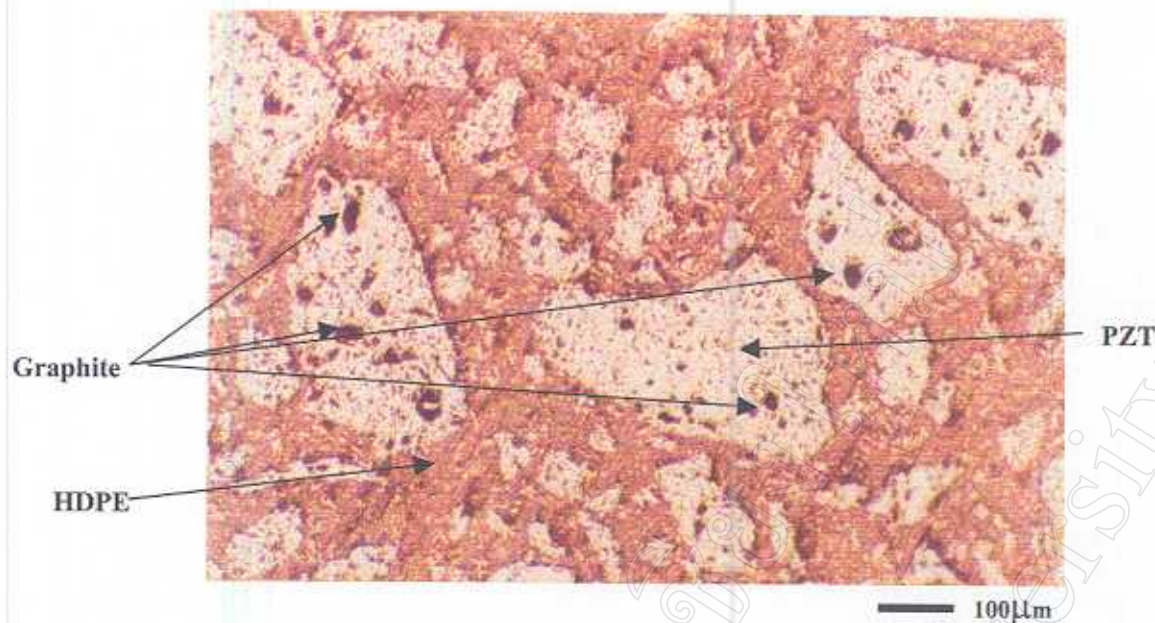
4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง



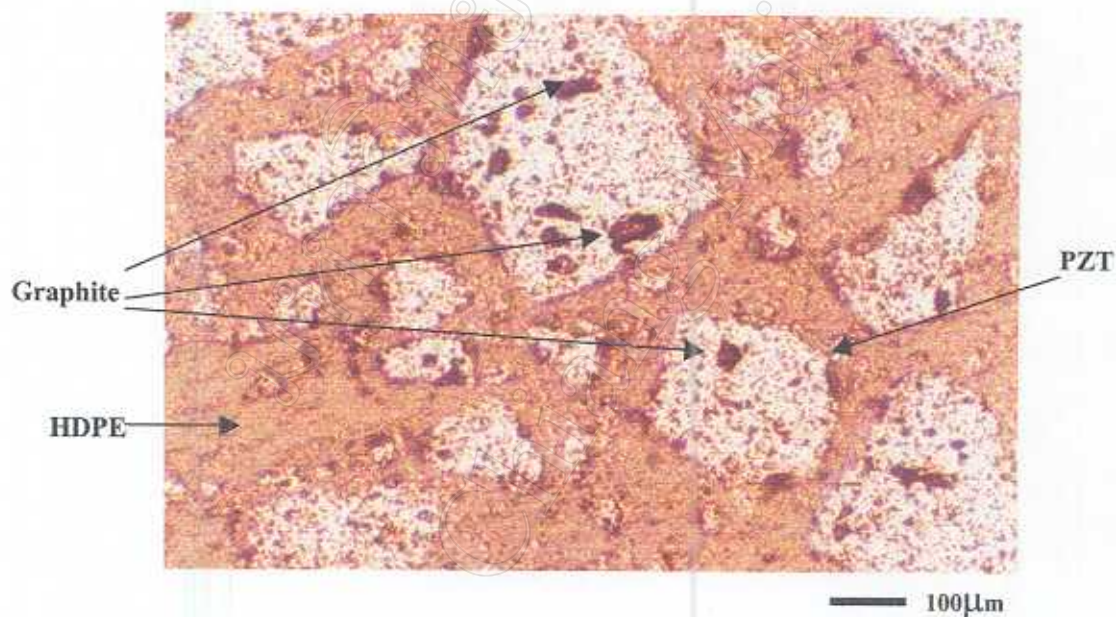
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40



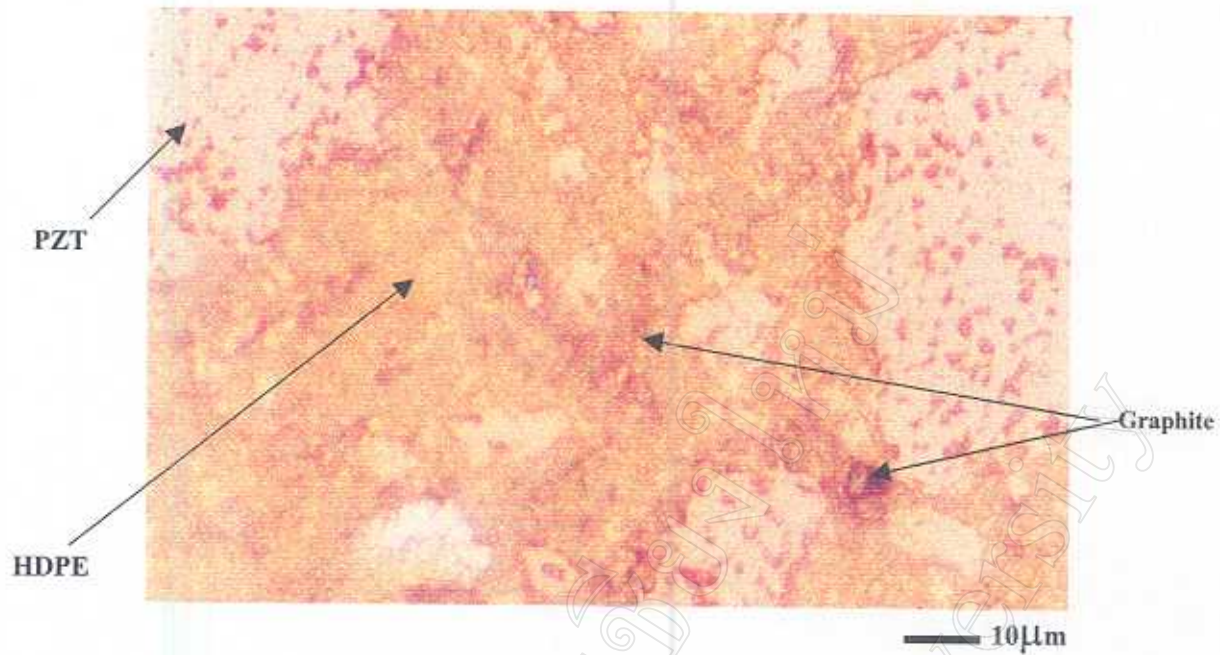
รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ 58.5PZT/40 HDPE/1.5C



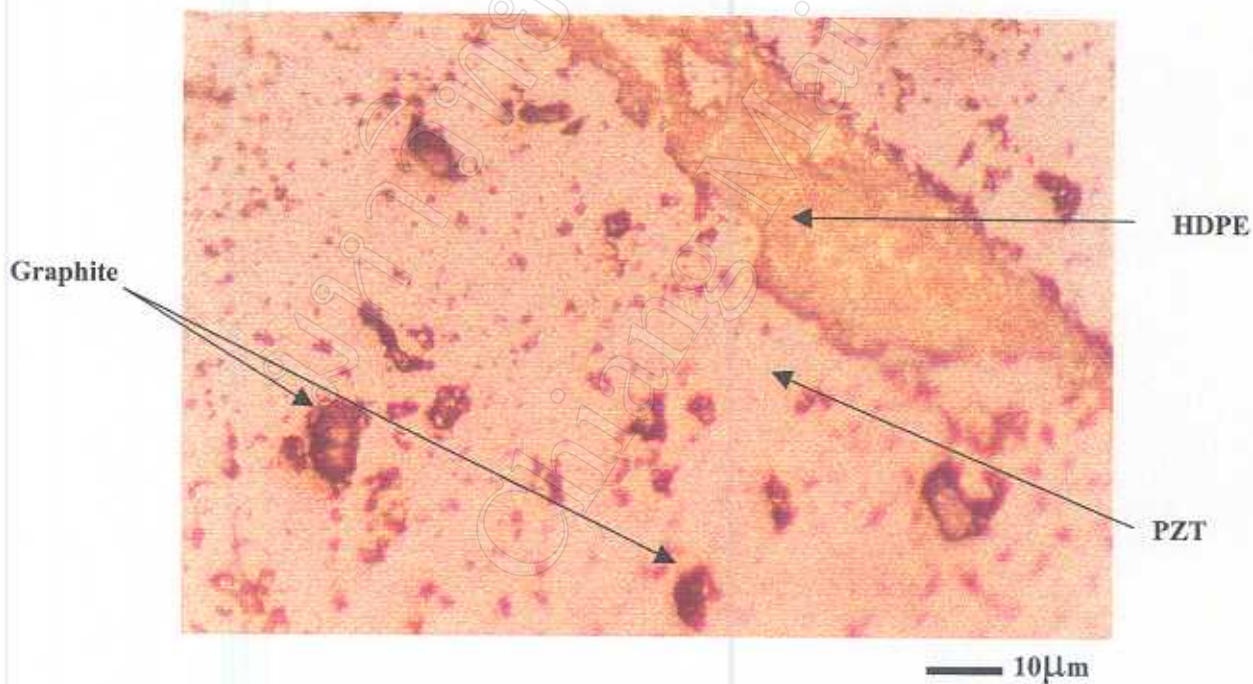
รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ (1.5C)58.5PZT/ 40HDPE



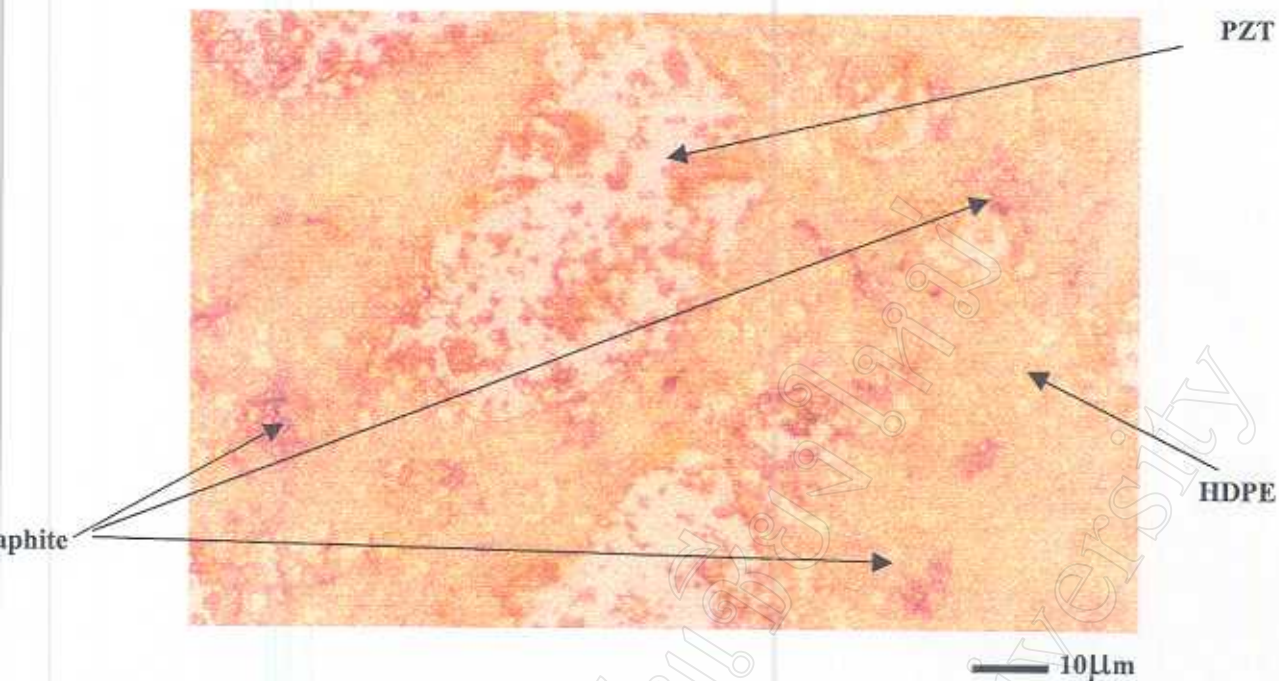
รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ (0.75C)59.5PZT/40HDPE/ 0.75C



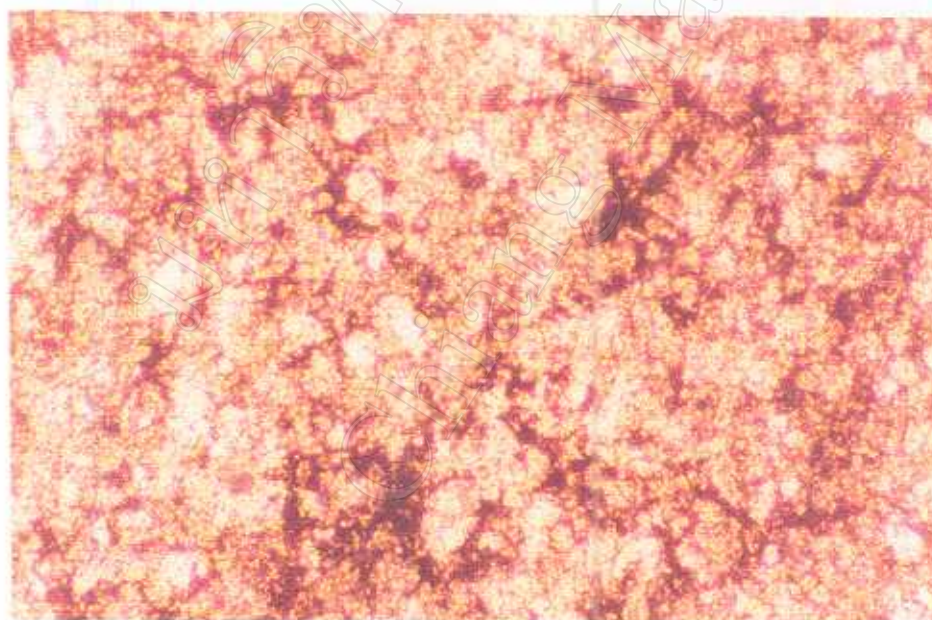
รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ 58.5PZT/40HDPE/1.5C



รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ (1.5C)58.5PZT/40HDPE

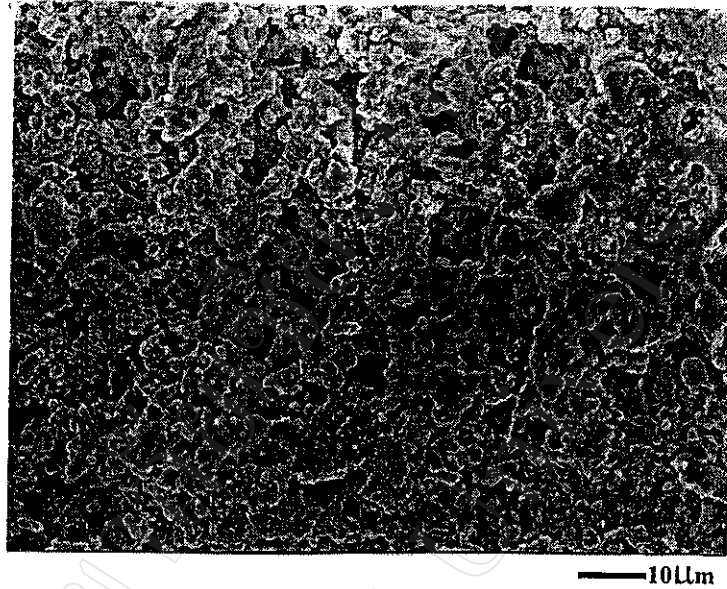


รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ (0.75C)PZT/ HDPE/ 0.75C



รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40

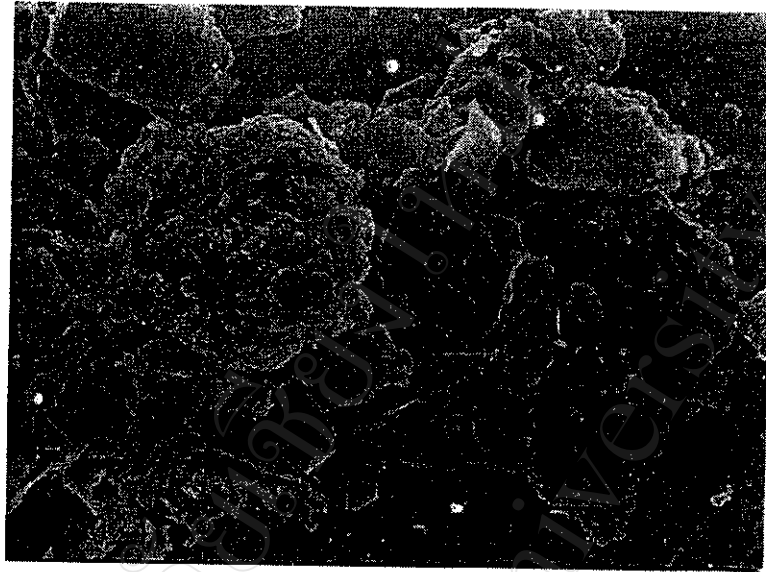
4.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายแสดงพื้นผิวหน้าของเม็ดเซรามิกพีแซดที่ กำลังขยาย 1000 เท่า

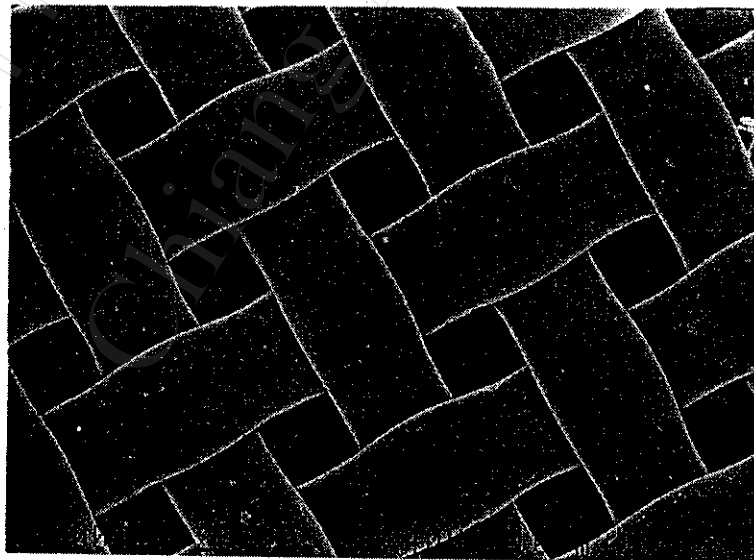


รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายแสดงเม็ดพีแซดที่ผ่านการบดร้อนด้วยตะแกรงไนลอนเบอร์ 36
กำลังขยาย 100 เท่า



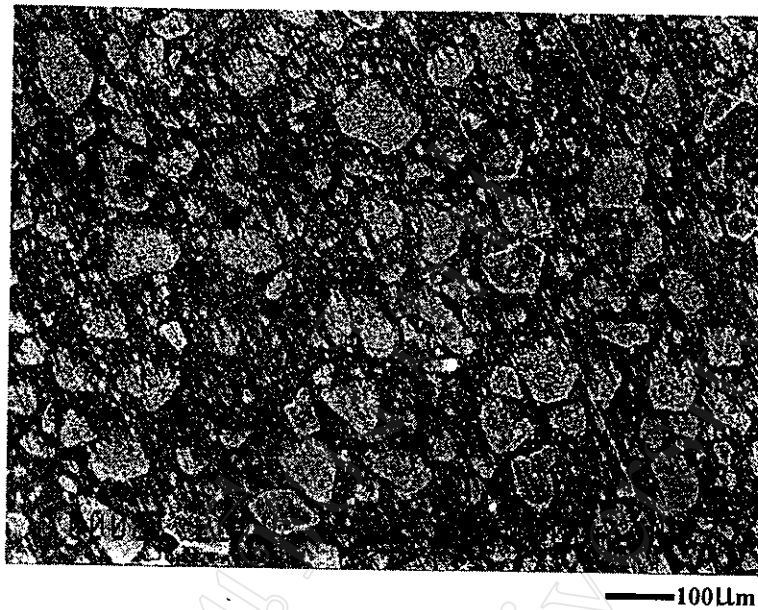
— 10μm

รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของผงแกรไฟต์ กำลังขยาย 1500 เท่า

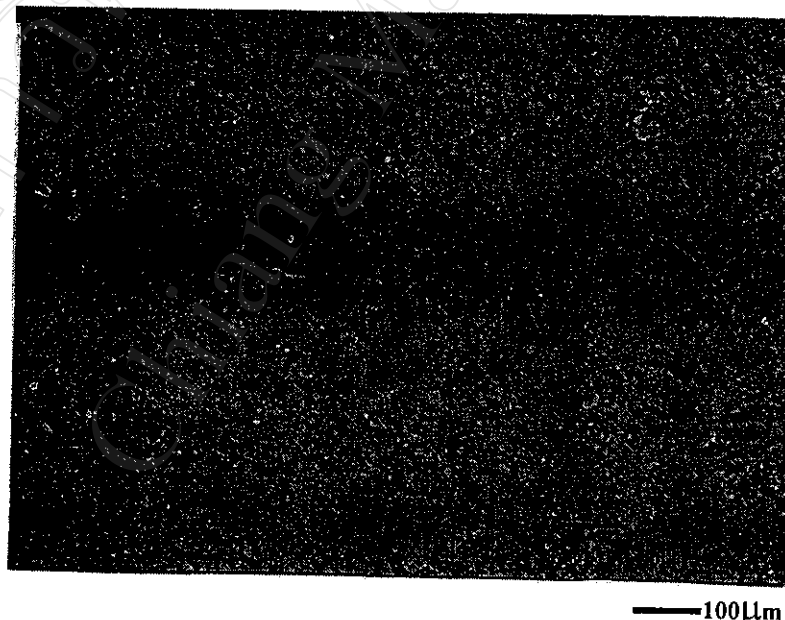


— 10μm

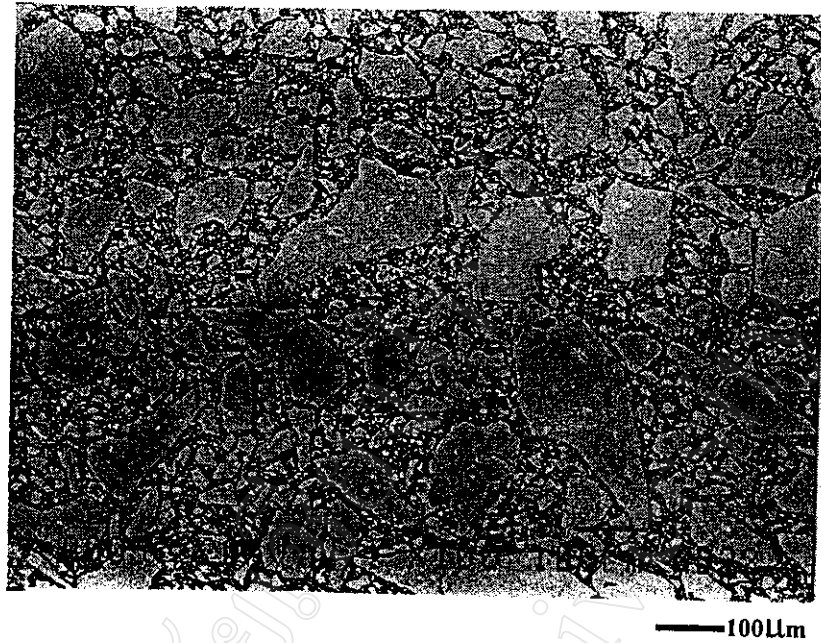
รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายแสดงตาข่ายไนลอนเบอร์ 36



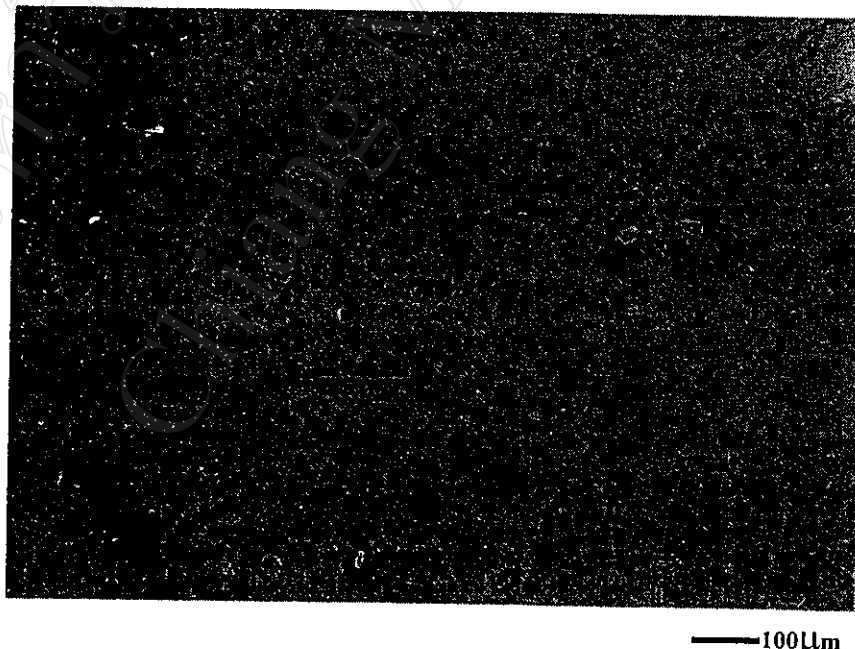
รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีน
ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 100 เท่า



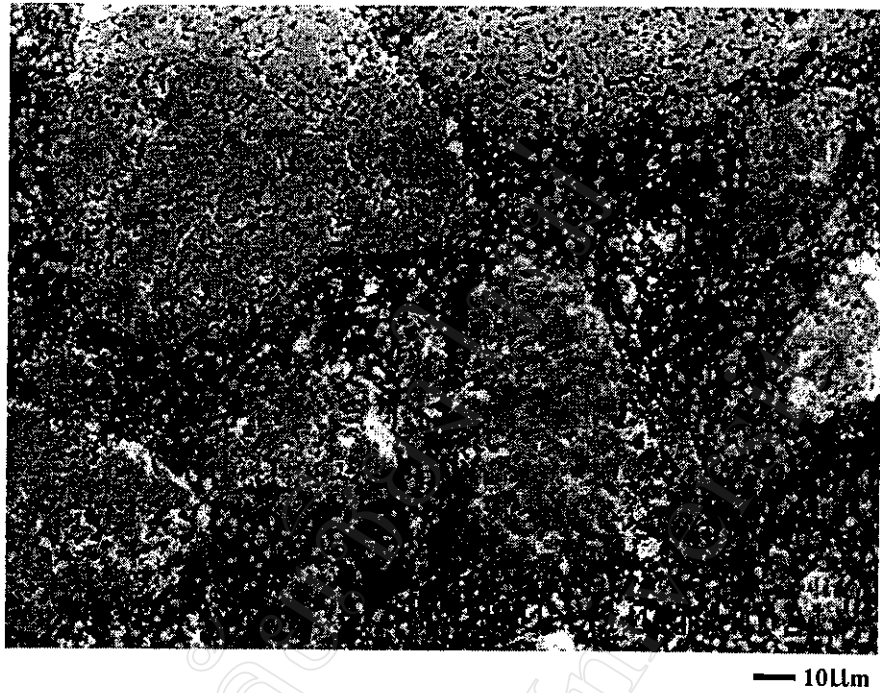
รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ PZT/ PE/ 1.5% C กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.39 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ (1.5% C) PZT/PE กำลังขยาย 100 เท่า



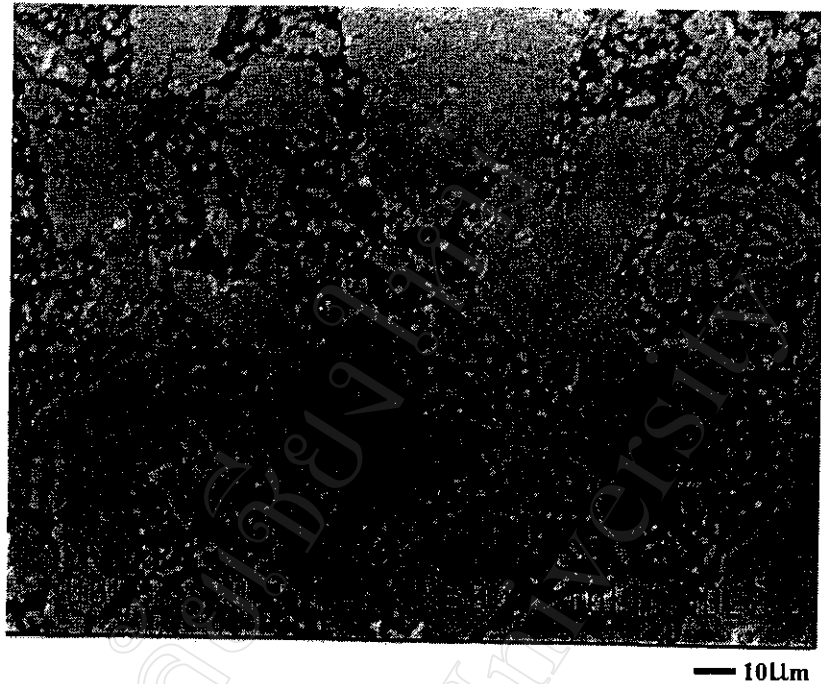
รูปที่ 4.40 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ (0.75% C) PZT/PE/0.75% C กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.41 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 500 เท่า



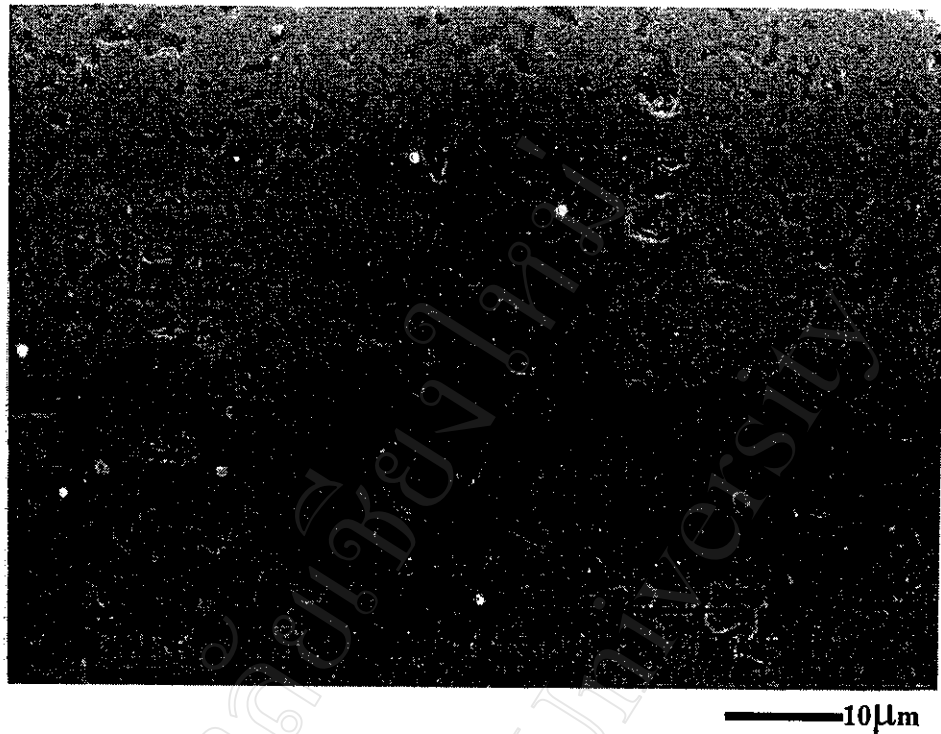
รูปที่ 4.42 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ 58.5PZT/40HDPE/1.5C กำลังขยาย 500 เท่า



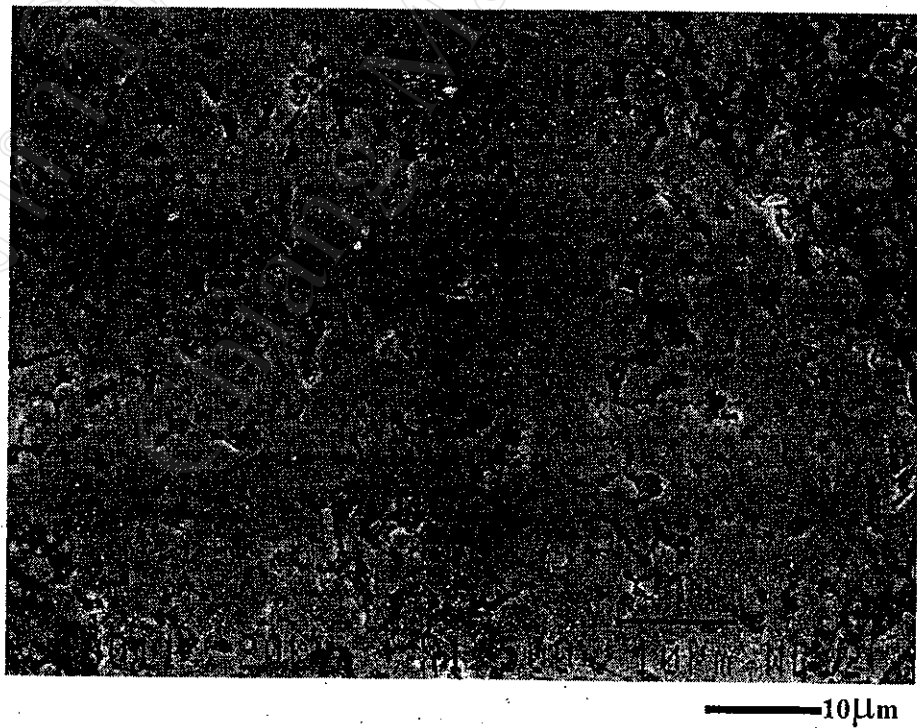
รูปที่ 4.43 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ (1.5C)58.5PZT/40HDPE กำลังขยาย 500 เท่า



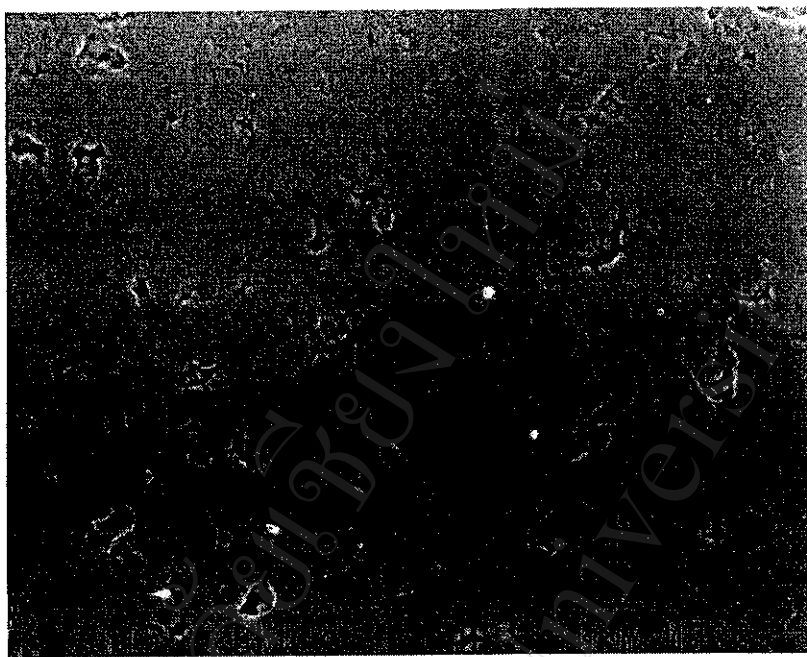
รูปที่ 4.44 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ (0.75C)59.5PZT/40HDPE/0.75C กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายแสดงลักษณะอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง
ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 1500 เท่า



รูปที่ 4.46 ภาพถ่ายแสดงลักษณะอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง
ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเชื่อมแกรไฟต์แบบ 58.5PZT/40HDPE/1.5C
กำลังขยาย 1500 เท่า



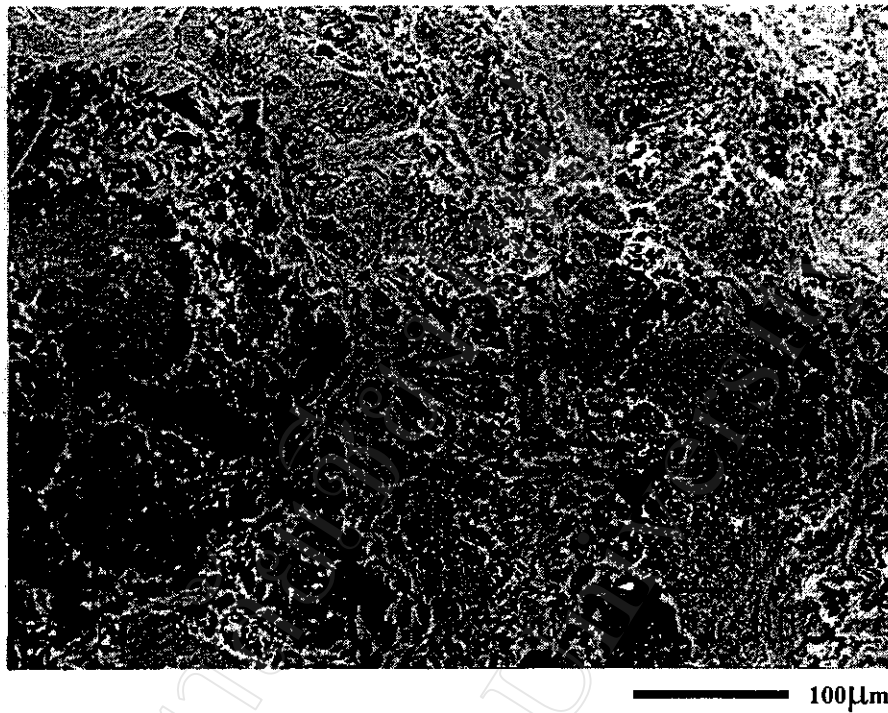
10 μm

รูปที่ 4.47 ภาพถ่ายแสดงลักษณะอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ (1.5C)58.5PZT/40HDPE กำลังขยาย 1500 เท่า

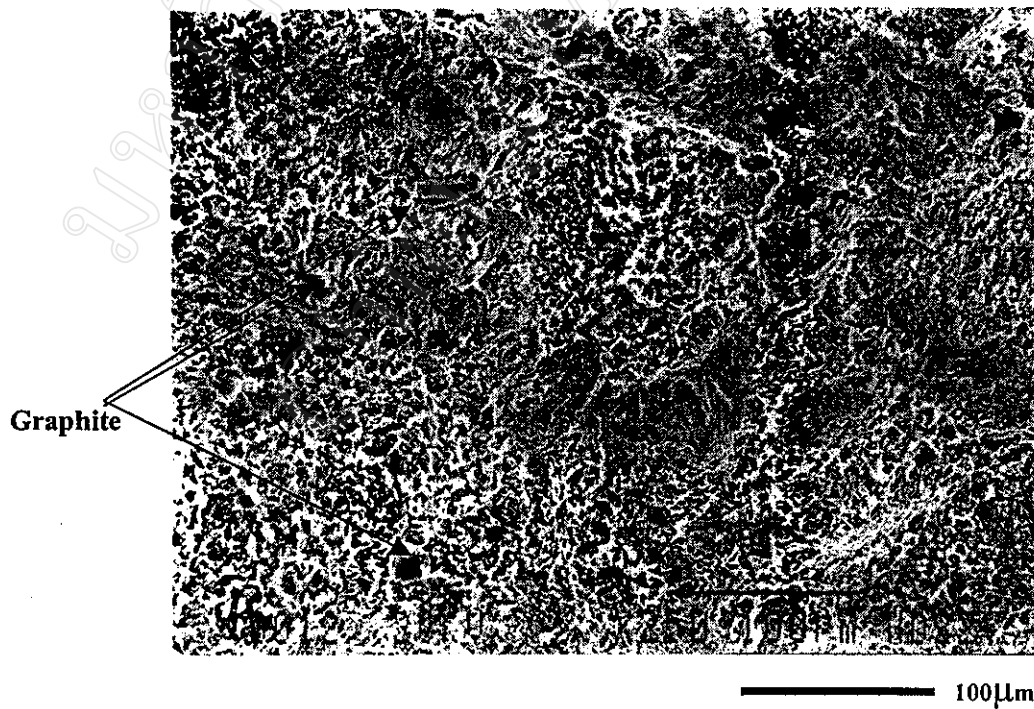


10 μm

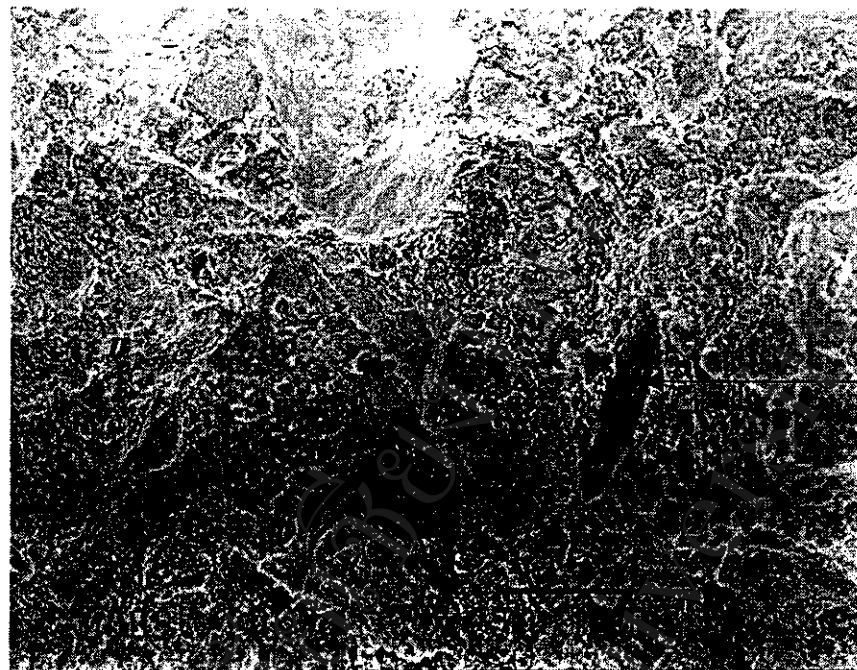
รูปที่ 4.48 ภาพถ่ายแสดงลักษณะอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์แบบ (0.75C)59.5PZT/40HDPE/0.75C กำลังขยาย 1500 เท่า



รูปที่ 4.49 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 200 เท่า



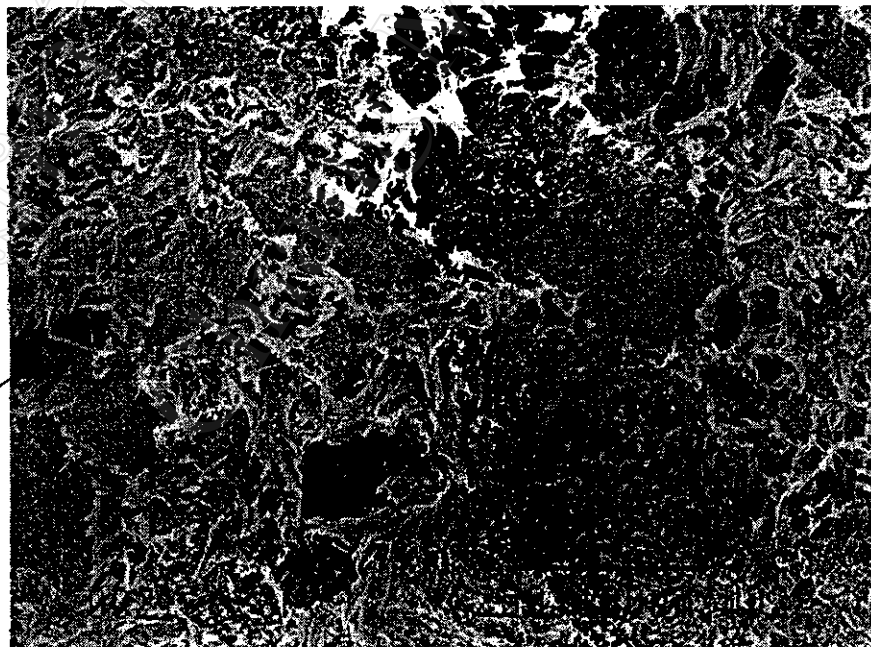
รูปที่ 4.50 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์ แบบ 58.5PZT/40HDPE/1.5C โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 250 เท่า



Graphite

100μm

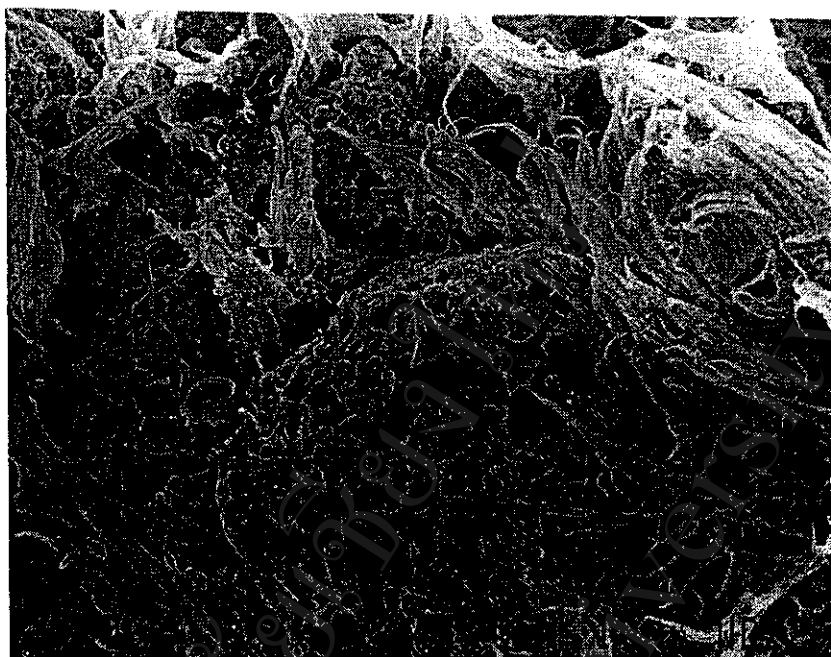
รูปที่ 4.51 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ (1.5C)58.5PZT/40HDPE โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 250 เท่า



Graphite

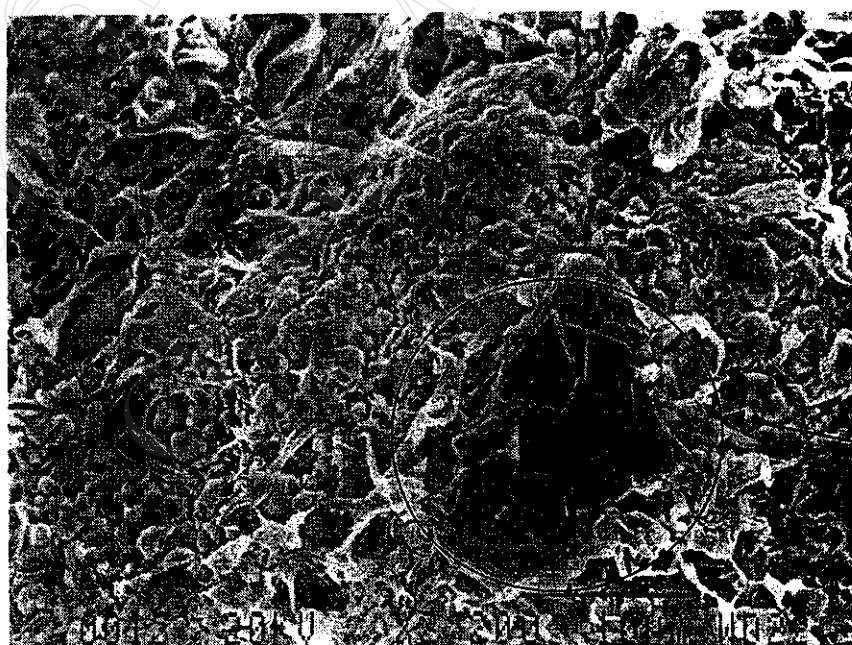
100μm

รูปที่ 4.52 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีและผงแกรไฟต์ในเมตริกซ์
พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผงแกรไฟต์
แบบ (0.75C)59.5PZT/40HDPE/0.75C โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 250 เท่า



10 μm

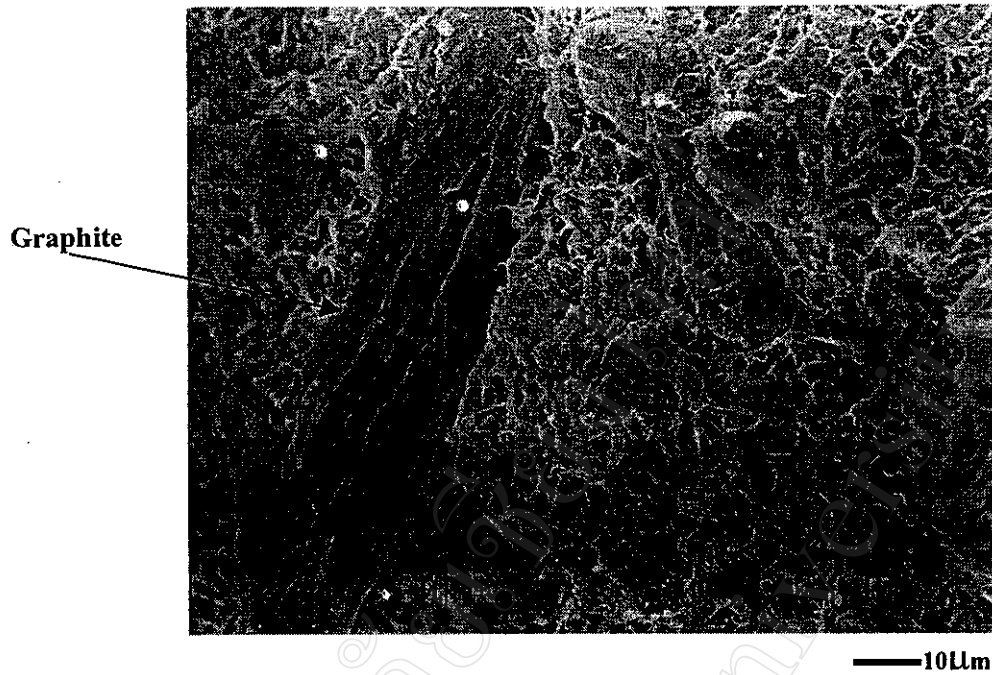
รูปที่ 4.53 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพีแซดทีในเมตริกซ์พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 1000 เท่า



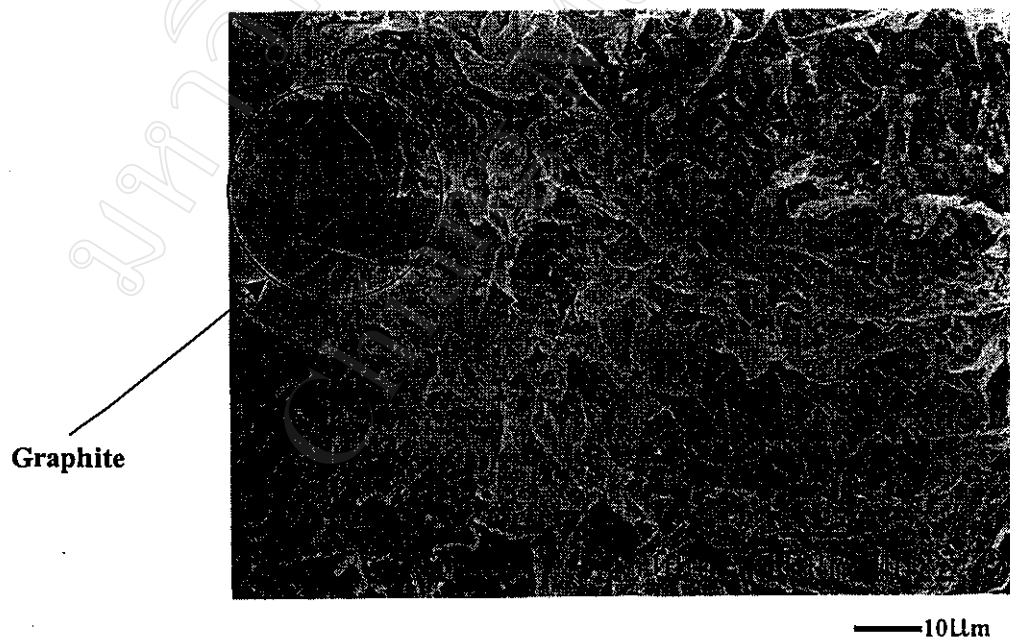
Graphite

10 μm

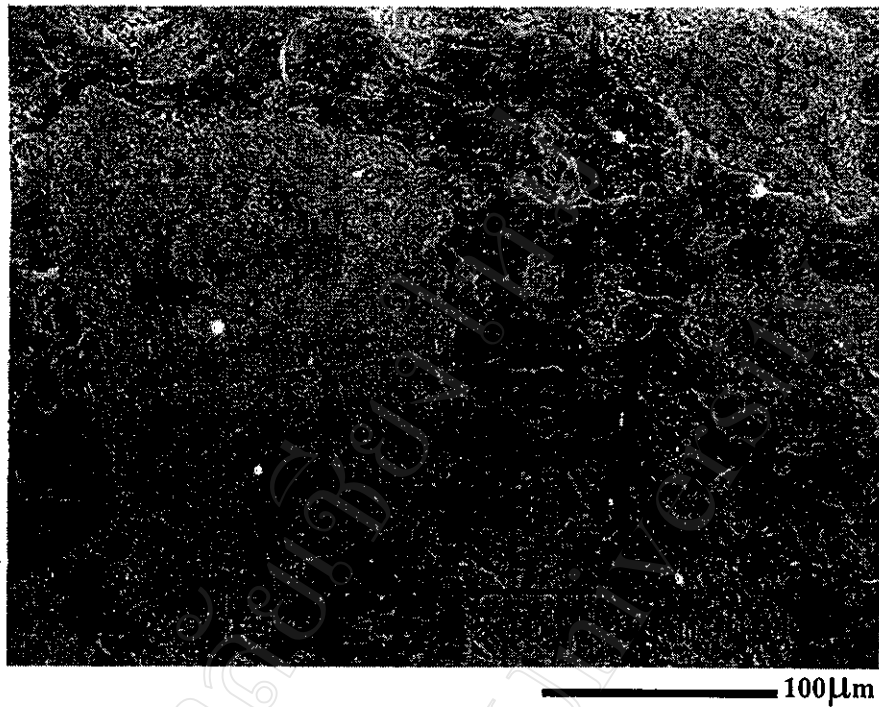
รูปที่ 4.54 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของแกรไฟต์ที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผสมแกรไฟต์ แบบ 58.5PZT/40HDPE/1.5C โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 2200 เท่า



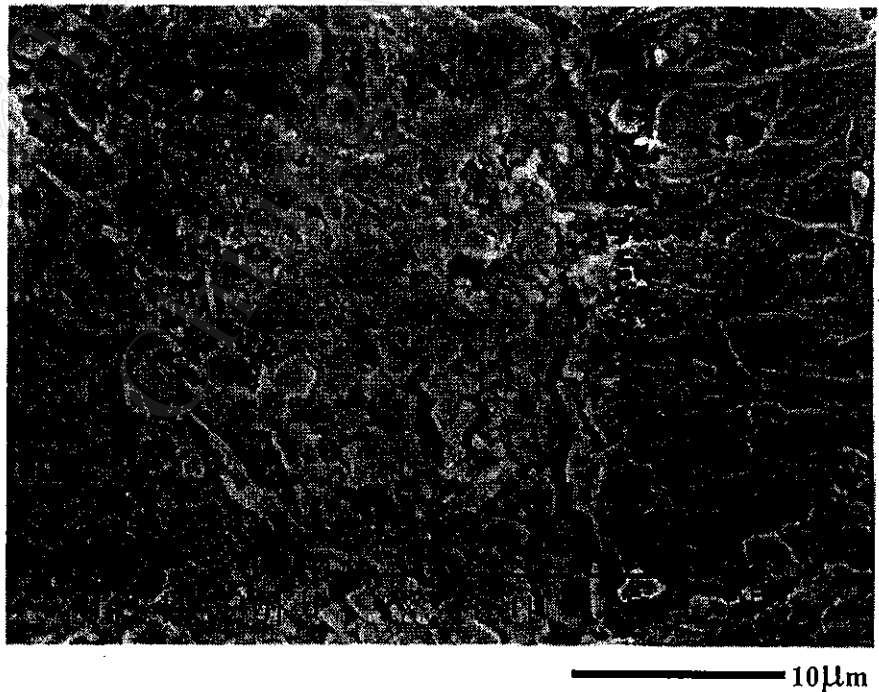
รูปที่ 4.55 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของแกรไฟต์ที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผสมแกรไฟต์ แบบ (1.5C)58.5PZT/40HDPE โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 1000 เท่า



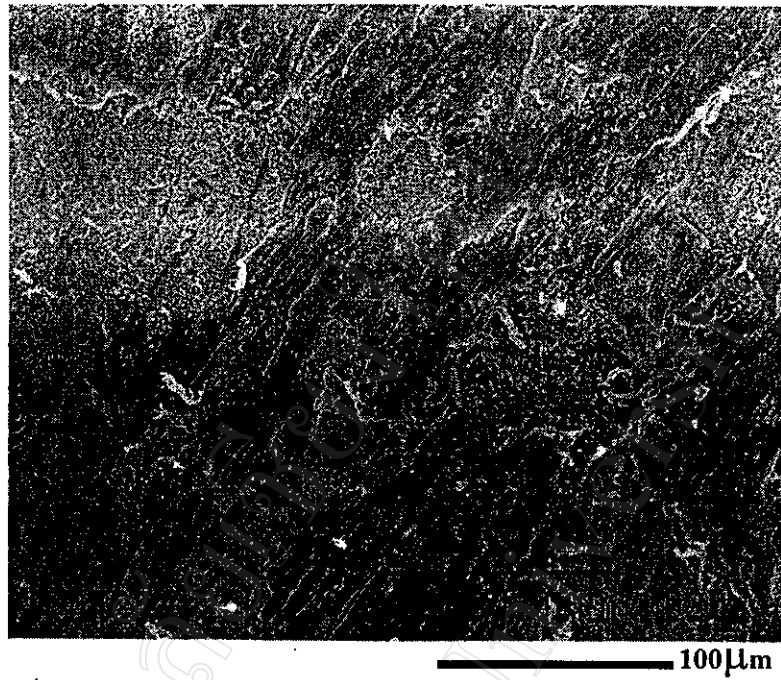
รูปที่ 4.56 ภาพถ่ายแสดงลักษณะของแกรไฟต์ที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน ความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วน 60 : 40 โดยเทคนิคการเจือผสมแกรไฟต์ แบบ (0.75C)59.5PZT/40HDPE/0.75C โดยหักสารตัวอย่าง กำลังขยาย 1000 เท่า



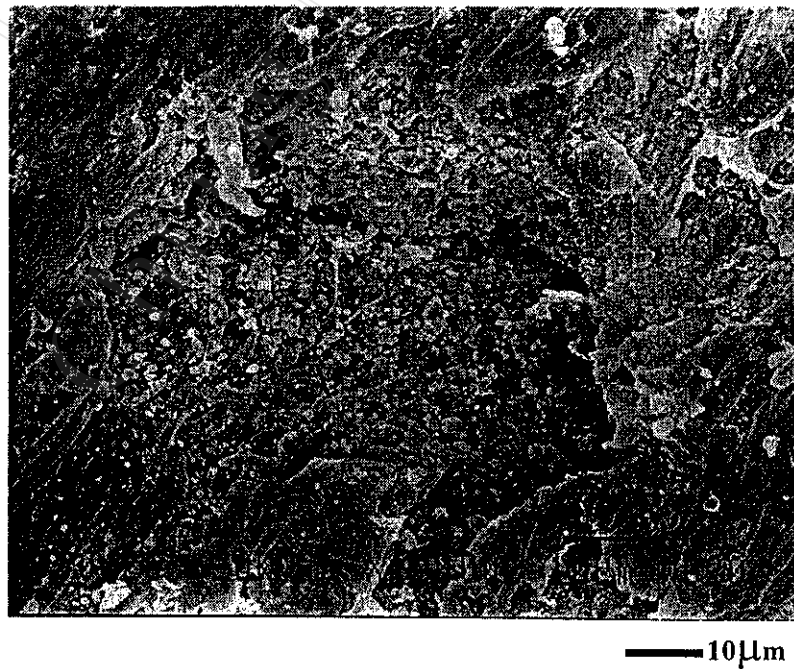
รูปที่ 4.57 ภาพถ่ายแสดงลักษณะลยต่อของวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน
ความหนาแน่นสูง โดยผ่านการขัดจาก ความหนาเดิมลง 1mm
ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 300 เท่า



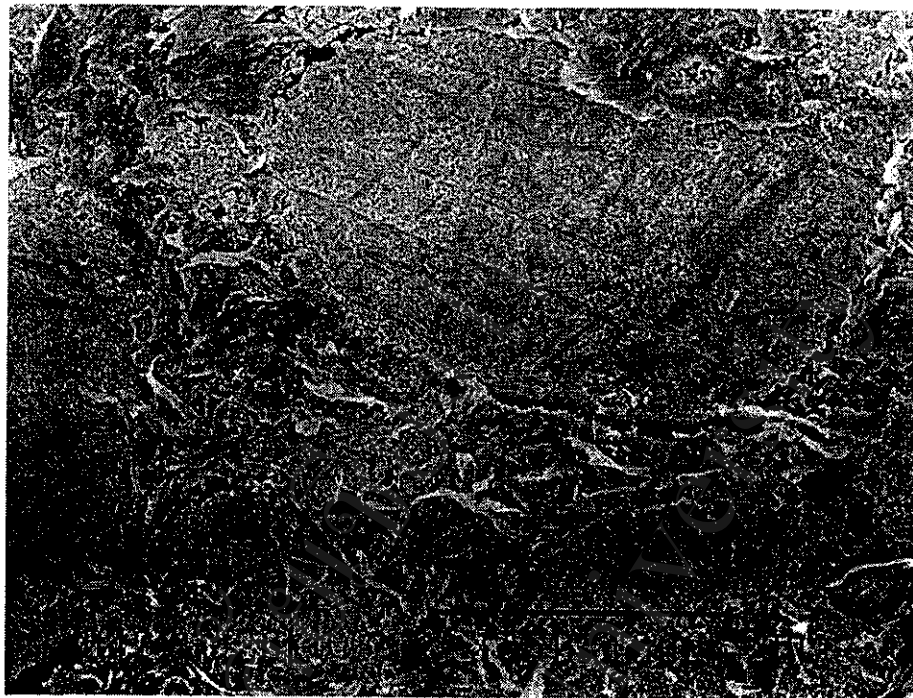
รูปที่ 4.58 ภาพถ่ายแสดงลักษณะลยต่อของวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน
ความหนาแน่นสูง โดยผ่านการขัดจาก ความหนาเดิมลง 1mm
ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 3000 เท่า



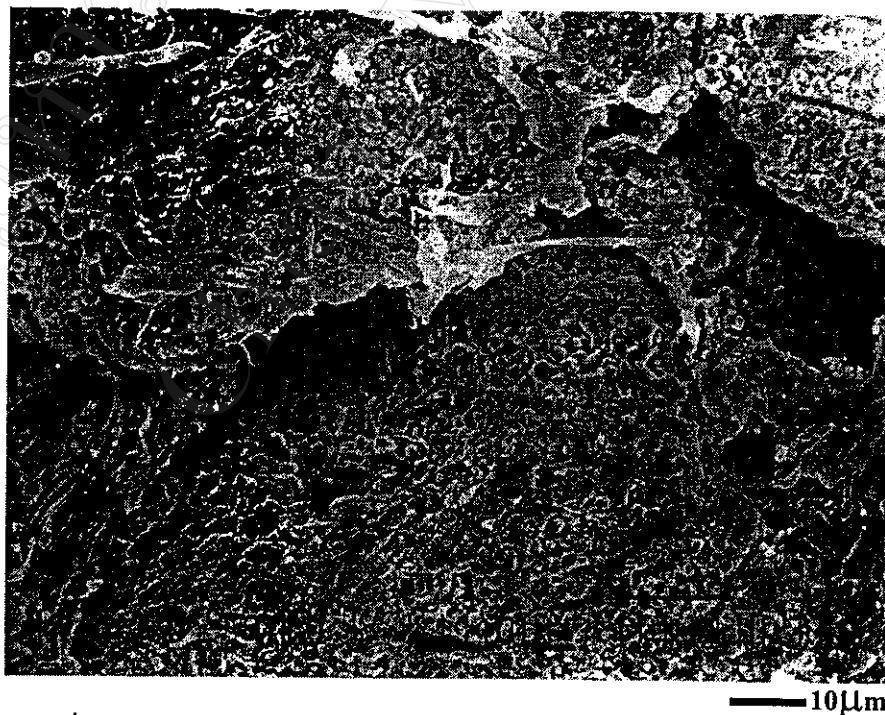
รูปที่ 4.59 ภาพถ่ายแสดงลักษณะลยต่อของวัสดุผสมพีแชนด์ที / พอลิเอธิลีน
ความหนาแน่นสูง โดยผ่านการขัดจาก ความหนาเดิมลง 2 mm
ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 300 เท่า



รูปที่ 4.60 ภาพถ่ายแสดงลักษณะลยต่อของวัสดุผสมพีแชนด์ที / พอลิเอธิลีน
ความหนาแน่นสูง โดยผ่านการขัดจาก ความหนาเดิมลง 2 mm
ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.61 ภาพถ่ายแสดงลักษณะลยต่อของวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน
ความหนาแน่นสูง โดยผ่านการขัดจาก ความหนาเดิมลง 3 mm
ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 350 เท่า



รูปที่ 4.62 ภาพถ่ายแสดงลักษณะลยต่อของวัสดุผสมพีแซดที / พอลิเอธิลีน
ความหนาแน่นสูง โดยผ่านการขัดจาก ความหนาเดิมลง 3 mm
ที่อัตราส่วน 60 : 40 กำลังขยาย 1000 เท่า