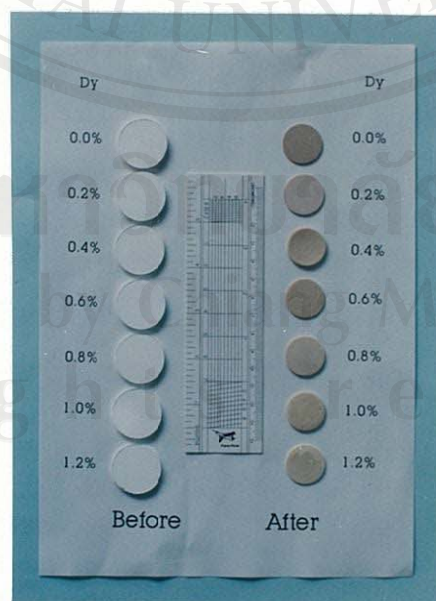


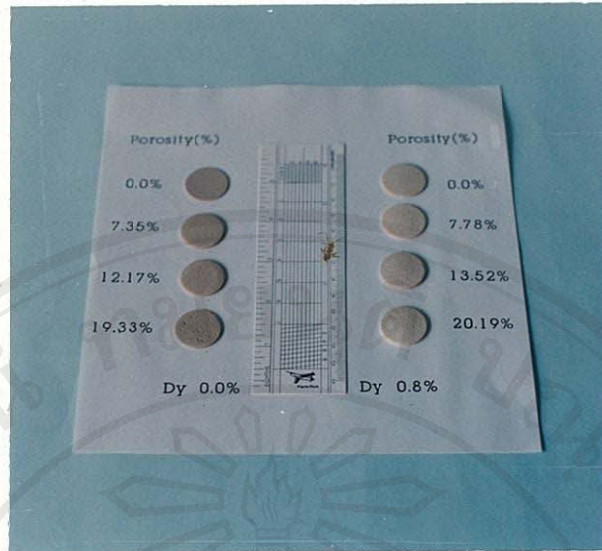
ในการวิจัยนี้ เป็นการศึกษาผลของความพรุนในสารไดอิเล็กตริกต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสารนั้น โดยสารที่ใช้ในการทดลองคือ แบเรียมไทตาเนตที่เจือด้วยสารดิสโพรเซียม ($Ba_{1-x}Dy_xTiO_3$) และควบคุมความพรุนของสารโดยการเติมสารอินทรีย์คือ Polymethylmethacrylate (PMMA) แล้วทำการศึกษาผลของความพรุนต่อสมบัติของสาร ซึ่งในการทดลองได้แบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน (รายละเอียดในบทที่ 3) ดังรายละเอียดของผลการทดลอง ต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 การเตรียมสารตัวอย่าง

ในการทดลองนี้การเตรียมสารใช้วิธีการ Solid State Reaction ซึ่งสารที่ได้จากการผสมจะต้องผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์และซินเตอร์ ในการทดลองนี้สารที่ผ่านการผสมก่อนการเผาแคลไซน์จะมีสีขาวขุ่นและมีเม็ดละเอียด แต่เมื่อนำสารผ่านการเผาแคลไซน์แล้ว สารจะมีสีออกสีเหลืองจางๆ โดยเมื่อปริมาณการเจือสาร Dy มากขึ้น สีของสารก็จะมึนเหลืองมากขึ้น ซึ่งผลนี้ก็เกิดขึ้นเมื่อสารผ่านการเผาซินเตอร์แล้วเช่นกัน (ดังรูปที่ 4.1) นอกจากนี้ ความพรุนของสารไม่มีผลต่อสีของเม็ดสารแต่อย่างใด





(ข)

รูปที่ 4.1 ลักษณะความแตกต่างของสีของเม็ดสาร

ก. เมื่อปริมาณ Dy แตกต่างกัน

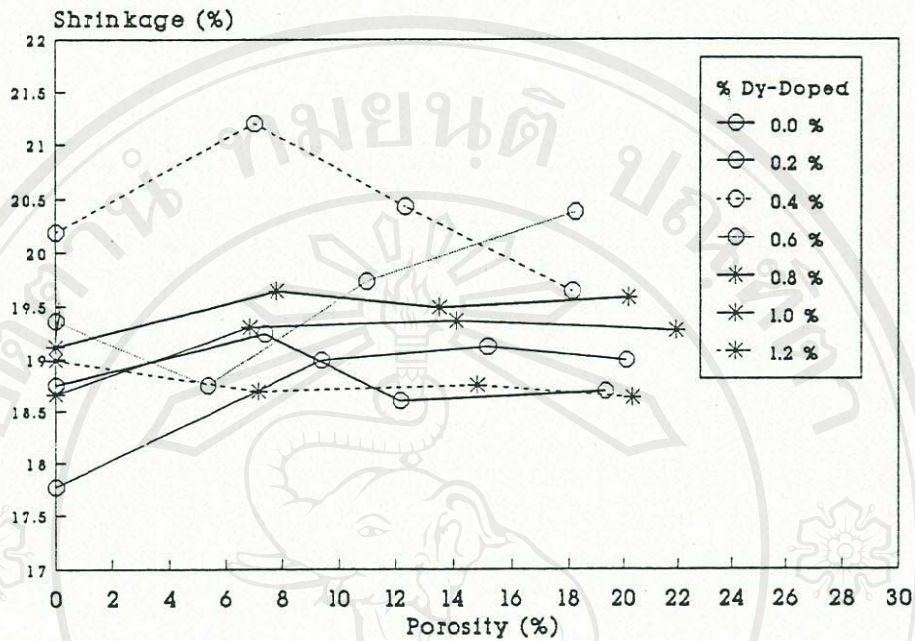
ข. เมื่อความพรุนแตกต่างกันและปริมาณ Dy คงที่

4.1.2 การศึกษา Shrinkage, Density และ Porosity ของสาร

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารในการทดลองนี้ เป็นการศึกษาผลของความพรุน (Porosity) ต่อค่าการหดตัว (Shrinkage) ของสาร โดยความพรุนของสารนั้นควบคุมด้วยปริมาณของ PMMA ที่เท่ากันในแต่ละปริมาณการเจือด้วย Dy แต่ผลของค่าความพรุนที่เกิดขึ้นก็มีค่าแตกต่างกันไป แต่อยู่ในช่วงเดียวกัน ซึ่งผลการทดลองทดลองในตอนนั้นแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการหดตัว (Shrinkage) กับความพรุน (Porosity) ในปริมาณการเจือ Dy ที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า จากตารางที่ 4.1 เมื่อปริมาณการเจือ PMMA มากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของสาร (Density) ลดลง ซึ่งส่งผลให้ค่าความพรุนซึ่งคำนวณมาจากค่าความหนาแน่นนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น (ดังสมการที่ 3.3) และจากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าความพรุนของสารไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความหดตัว ในด้านการเพิ่มขึ้นหรือลดลง นั่นคือความพรุนไม่มีผลต่อค่าความหดตัวของสาร นอกจากนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าความหดตัวของสารอยู่ในช่วง 17-21 % และค่าความพรุนซึ่งทำการควบคุมนั้นอยู่ในช่วง 0-22 % (ดังตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Density, Porosity และ Shrinkage ของสาร

Dy-Doped (mol%)	PMMA (wt%)	คุณสมบัติศึกษา		
		Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Shrinkage (%)
0.0	0.0	5.117	0.00	18.75
	0.5	4.741	7.35	19.24
	1.0	4.494	12.17	18.60
	2.0	4.128	19.33	18.69
0.2	0.0	5.597	0.00	17.77
	0.5	5.074	9.34	18.99
	1.0	4.747	15.19	19.12
	2.0	4.471	20.11	18.99
0.4	0.0	5.311	0.00	20.19
	0.5	4.940	6.98	21.20
	1.0	4.655	12.35	20.43
	2.0	4.349	18.11	19.64
0.6	0.0	5.421	0.00	19.36
	0.5	5.132	5.33	18.75
	1.0	4.826	10.97	19.73
	2.0	4.434	18.21	20.38
0.8	0.0	5.446	0.00	19.12
	0.5	5.022	7.78	19.64
	1.0	4.710	13.52	19.49
	2.0	4.346	20.19	19.50
1.0	0.0	5.457	0.00	18.66
	0.5	5.085	6.81	19.30
	1.0	4.687	14.11	19.36
	2.0	4.260	21.93	19.27
1.2	0.0	5.394	0.00	18.99
	0.5	5.010	7.12	18.69
	1.0	4.593	14.85	18.75
	2.0	4.297	20.34	18.63



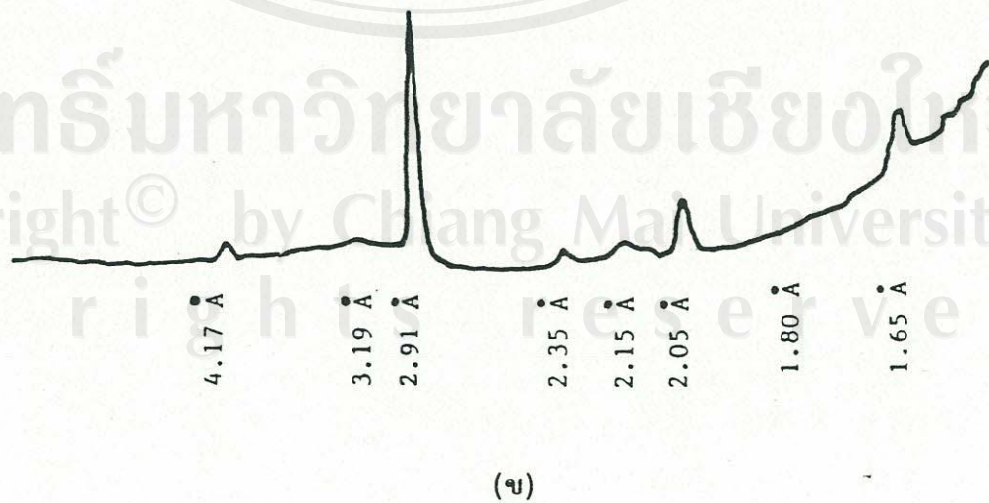
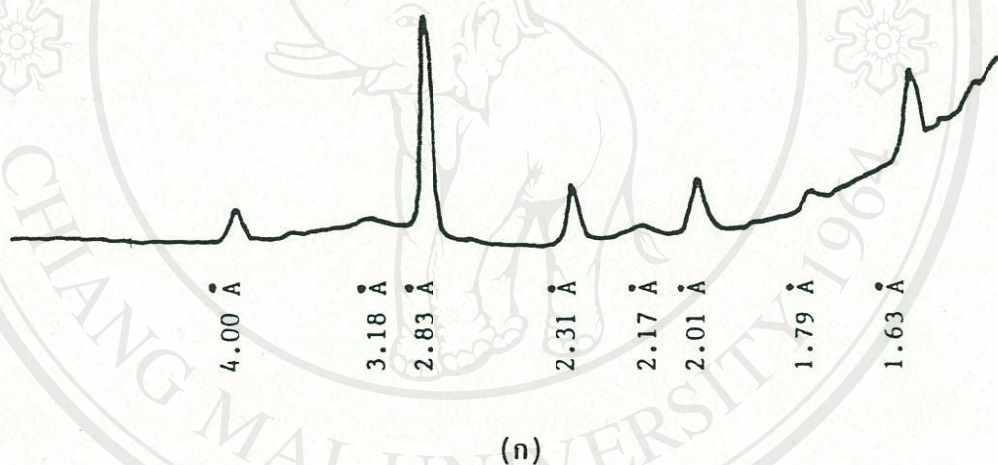
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shrinkage

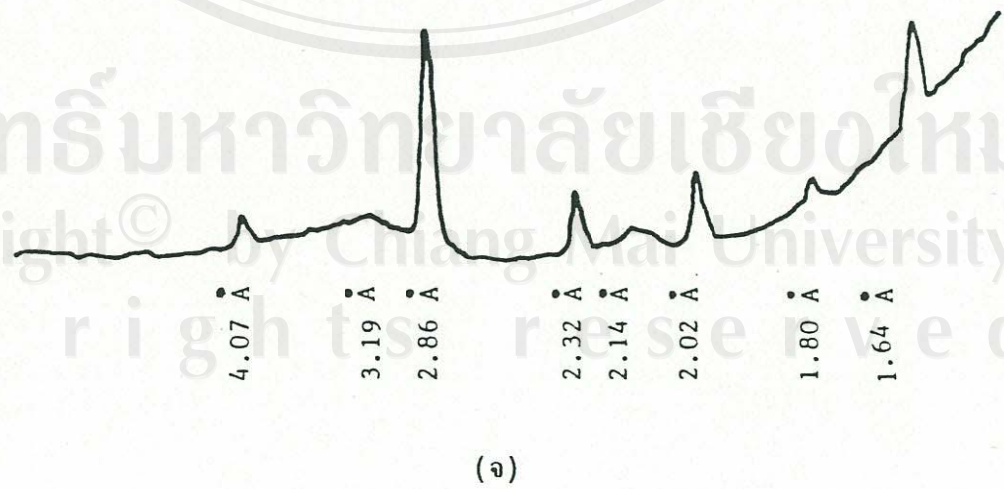
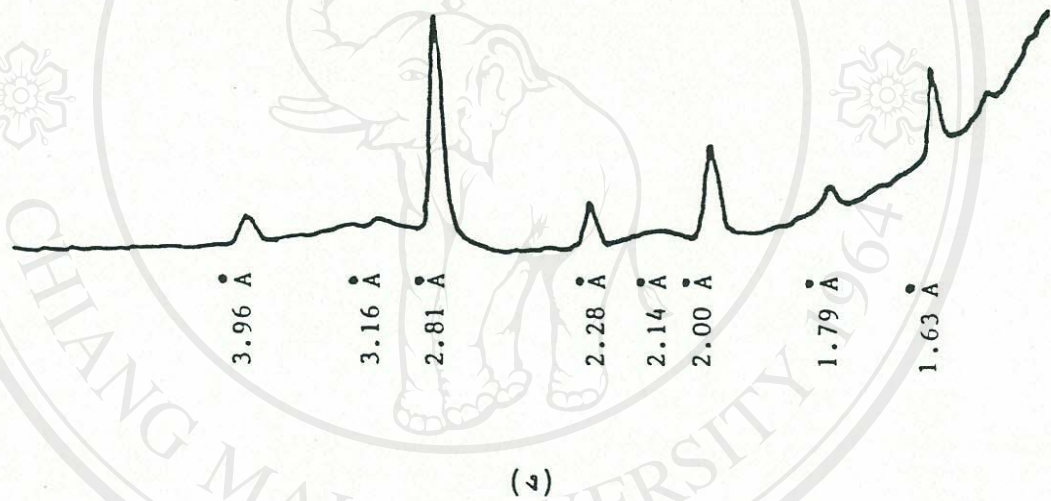
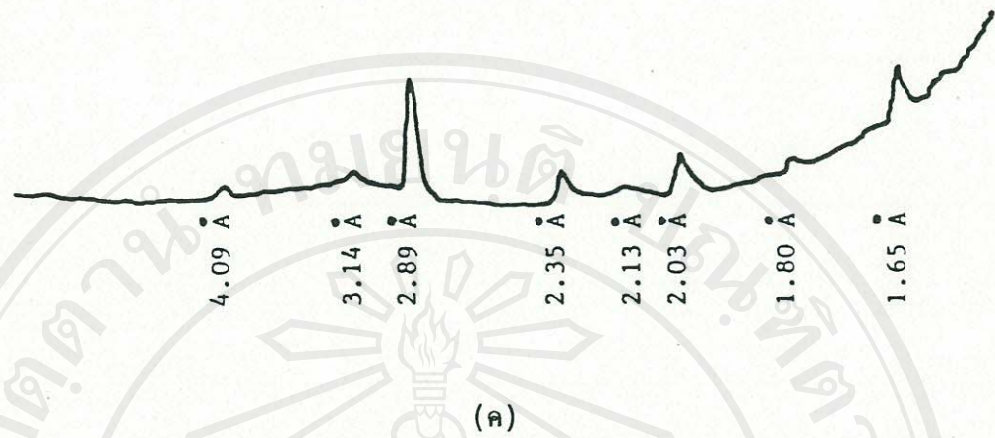
และ Porosity ของสาร

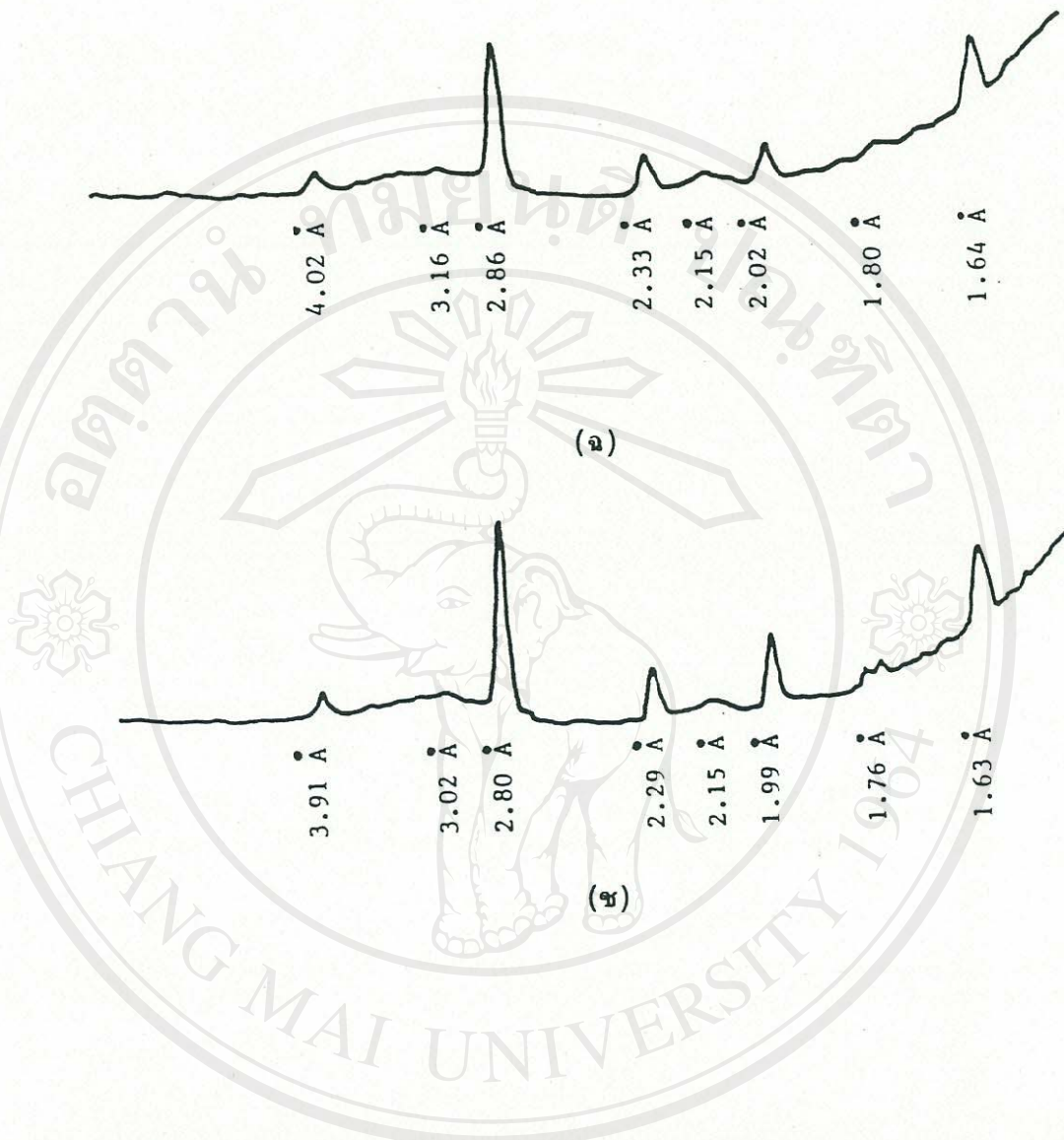
4.1.3 การตรวจสอบโครงสร้างของสารด้วย X-Ray Diffractometer

การศึกษาในขั้นตอนนี้ เป็นการตรวจสอบว่าสารที่เตรียมได้เป็นสาร BaTiO_3 จริงหรือไม่ แต่ในกระบวนการเตรียมสารนั้น เราได้เตรียมสาร $\text{Ba}_{1-x}\text{Dy}_x\text{TiO}_3$ ดังนั้นสิ่งที่จะต้องศึกษาอีกจุดหนึ่งก็คือ ปริมาณการเจือ Dy มีผลอย่างไรต่อโครงสร้างของสาร นอกจากนี้ประเด็นสำคัญที่สุดที่ต้องการศึกษาก็คือ ผลของความพรุนต่อโครงสร้างของสาร

ในการตรวจสอบว่าสารที่เตรียมได้นั้นเป็นสาร BaTiO_3 หรือไม่ พิจารณาจากรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็น Diffraction Pattern ของสารที่เตรียมได้ และจากตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่า d-spacing ของสารที่เตรียมได้กับค่า d-spacing จาก JCPDS cards no. 5-626 จะเห็นได้ว่าจากรูปที่ 4.3 นั้นปริมาณการเจือ Dy ไม่แสดงผลในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของสาร BaTiO_3 แต่อย่างใด (เมื่อเทียบกับ Dy-Dope 0% ในรูปที่ 4.3 ก.) แต่ถ้าพิจารณาจากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าสารที่เตรียมได้มีค่า d-spacing ซึ่งใกล้เคียงและสอดคล้องกับ JCPDS card ทุกค่า แสดงให้เห็นว่า สารที่เตรียมได้มีโครงสร้างสอดคล้องกับ BaTiO_3 จริง







รูปที่ 4.3

แสดง Diffraction Pattern ของ $\text{Ba}_{1-x}\text{Dy}_x\text{TiO}_3$

- ก. สาร BaTiO_3 ที่ได้จากการเตรียม โดยไม่ได้เจือสาร Dy
- ข. สาร BaTiO_3 ที่ได้จากการเตรียม โดยเจือสาร Dy 0.2 mol%
- ค. สาร BaTiO_3 ที่ได้จากการเตรียม โดยเจือสาร Dy 0.4 mol%
- ง. สาร BaTiO_3 ที่ได้จากการเตรียม โดยเจือสาร Dy 0.6 mol%
- จ. สาร BaTiO_3 ที่ได้จากการเตรียม โดยเจือสาร Dy 0.8 mol%
- ฉ. สาร BaTiO_3 ที่ได้จากการเตรียม โดยเจือสาร Dy 1.0 mol%
- ช. สาร BaTiO_3 ที่ได้จากการเตรียม โดยเจือสาร Dy 1.2 mol%

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า d-spacing ของสาร $Ba_{1-x} Dy_x TiO_3$

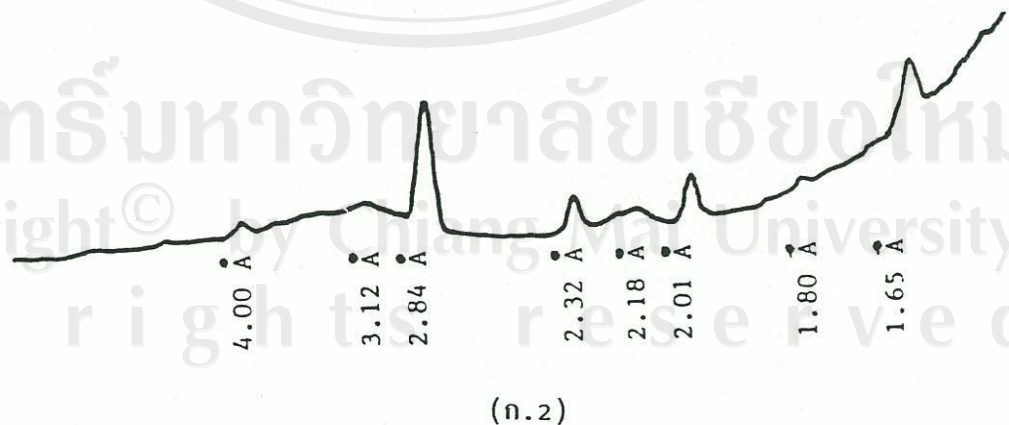
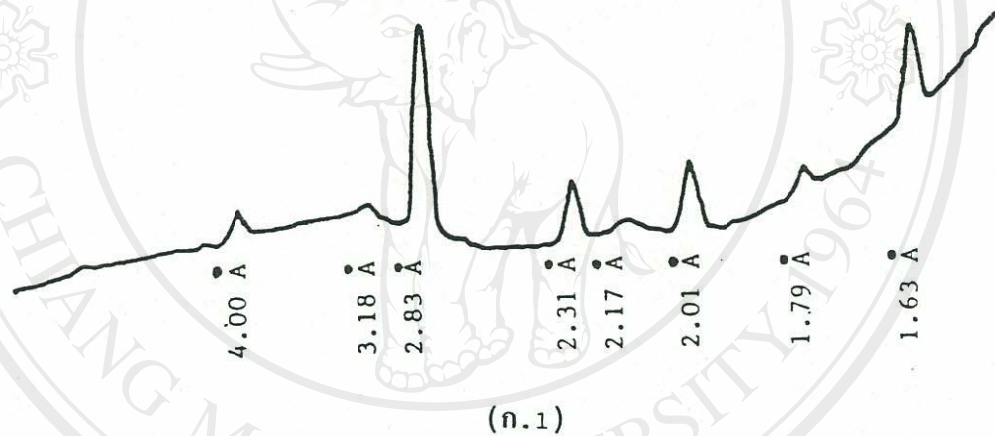
No	JCPDS Card		Fluka	Measurement (Å) at each Dy%						
	I/I ₀	d(Å)		0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
1	12	4.03	4.02	-	-	-	-	-	-	-
2	25	3.99	-	4.00	4.17	4.09	3.96	4.07	4.02	3.91
				3.18	3.19	3.14	3.16	3.19	3.16	3.02
3	100	2.838	2.85	2.83	2.91	2.89	2.81	2.86	2.86	2.80
	100	2.825								
4	46	2.314	2.32	2.31	2.35	2.35	2.28	2.32	2.33	2.29
				2.17	2.15	2.13	2.14	2.14	2.15	2.15
5	12	2.019	2.00	2.01	2.05	2.03	2.00	2.02	2.02	1.99
6	37	1.997								
7	8	1.79	1.79	1.79	1.80	1.80	1.79	1.80	1.80	1.76
8	35	1.63	1.64	1.63	1.65	1.65	1.63	1.64	1.64	1.63

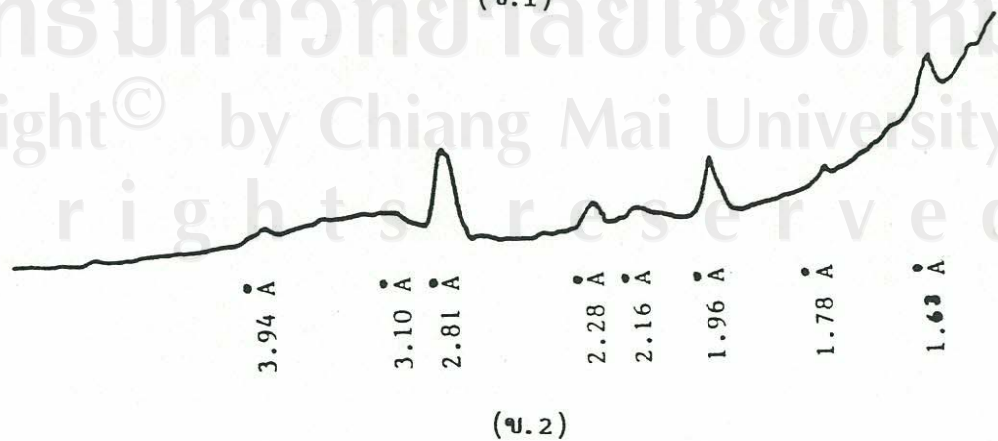
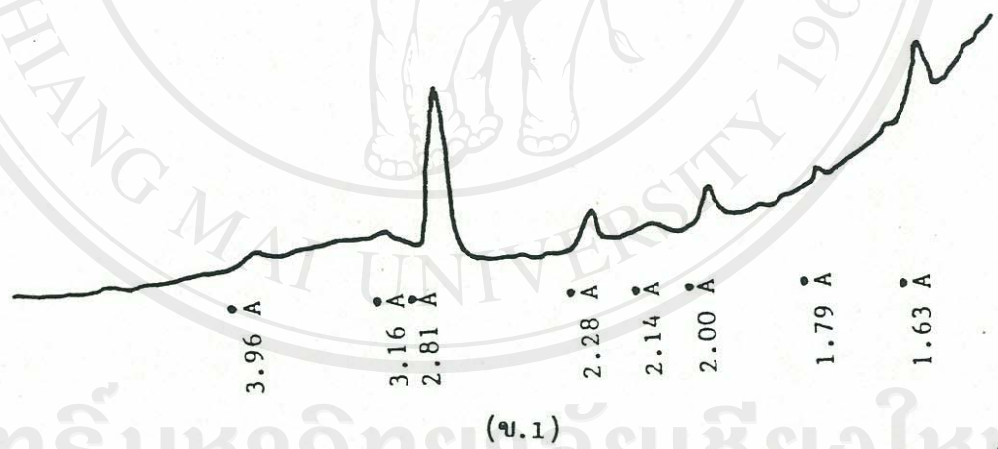
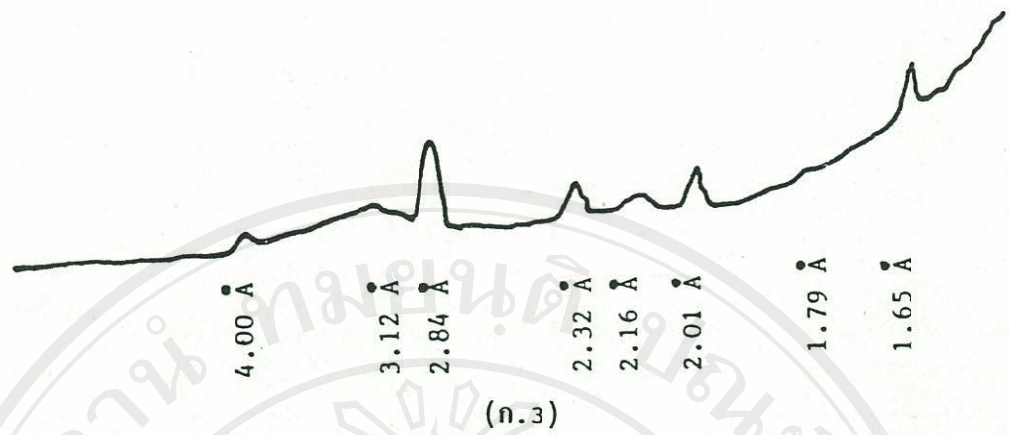
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

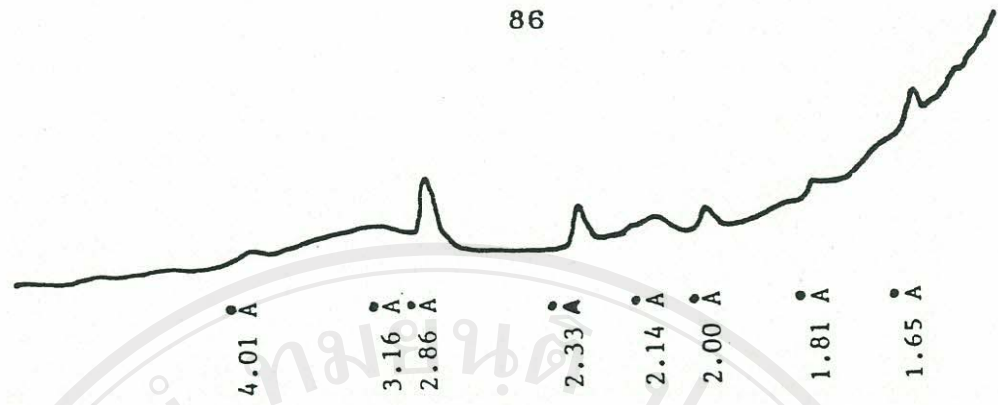
Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

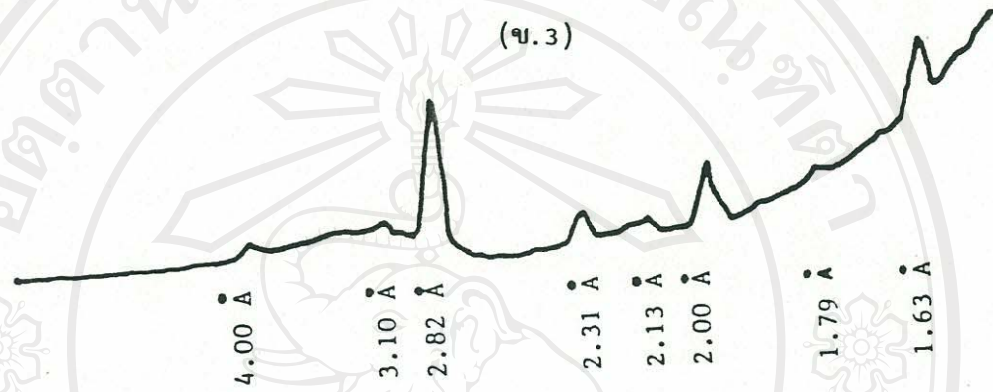
เมื่อพิจารณาผลของความพรุน (Porosity) ต่อโครงสร้างของสาร $Ba_{1-x}Dy_xTiO_3$ จากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดง Diffraction Pattern ของสารเมื่อปริมาณการเจือ Dy เป็น 0.0, 0.6, 1.2 mol% โดยมีความพรุนแตกต่างกัน และในตารางที่ 4.3 ซึ่งเปรียบเทียบค่า d-spacing กับ JCPDS card จะเห็นได้ว่า Diffraction Pattern ของสารเมื่อมีความพรุนแตกต่างกันนั้น จะไม่มีความแตกต่างกันในค่า d-spacing แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้ม (ความสูงของ Peak) นั้นแสดงว่าความพรุนไม่มีผลทำให้สารมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง แต่จะทำให้ความสูงของ Peak ใน Diffraction Pattern เปลี่ยนไป โดยจะลดลงเมื่อความพรุนมากขึ้น



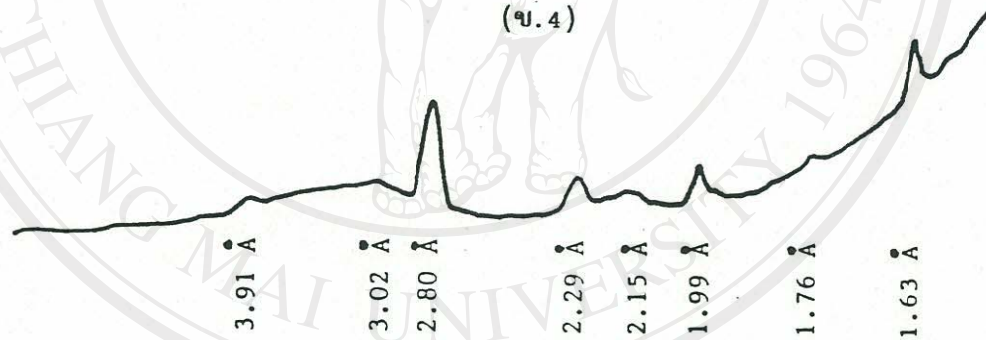




(a.3)



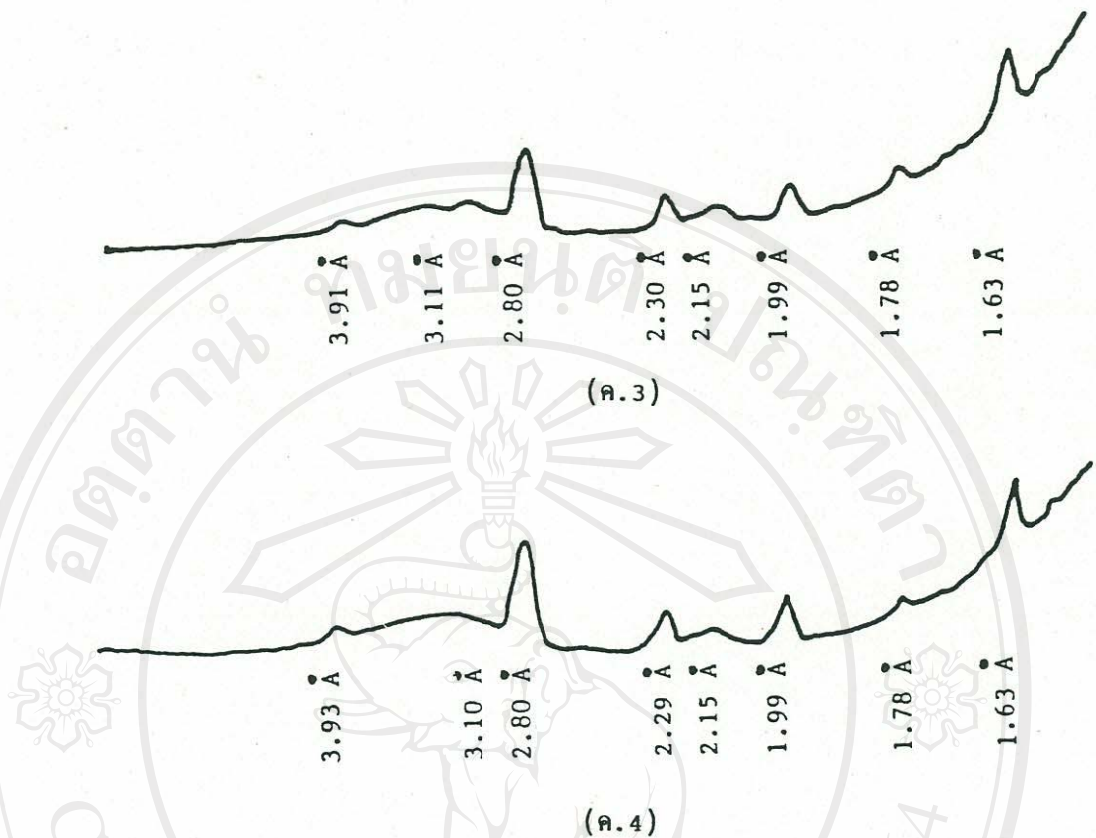
(a.4)



(a.1)



(a.2)



รูปที่ 4.4 Diffraction Pattern ของ $Ba_{1-x}Dy_xTiO_3$ เมื่อความพรุนแตกต่างกัน

- ก.1 สาร $BaTiO_3$ ที่ไม่ได้เจือสาร Dy ความพรุน 0.0%
- ก.2 สาร $BaTiO_3$ ที่ไม่ได้เจือสาร Dy ความพรุน 7.35%
- ก.3 สาร $BaTiO_3$ ที่ไม่ได้เจือสาร Dy ความพรุน 12.17%
- ก.4 สาร $BaTiO_3$ ที่ไม่ได้เจือสาร Dy ความพรุน 19.33%
- ข.1 สาร $BaTiO_3$ ที่เจือสาร Dy 0.6 mol% ความพรุน 0.0%
- ข.2 สาร $BaTiO_3$ ที่เจือสาร Dy 0.6 mol% ความพรุน 6.98%
- ข.3 สาร $BaTiO_3$ ที่เจือสาร Dy 0.6 mol% ความพรุน 12.35%
- ข.4 สาร $BaTiO_3$ ที่เจือสาร Dy 0.6 mol% ความพรุน 18.11%
- ค.1 สาร $BaTiO_3$ ที่เจือสาร Dy 1.2 mol% ความพรุน 0.0%
- ค.2 สาร $BaTiO_3$ ที่เจือสาร Dy 1.2 mol% ความพรุน 7.12%
- ค.3 สาร $BaTiO_3$ ที่เจือสาร Dy 1.2 mol% ความพรุน 14.85%
- ค.4 สาร $BaTiO_3$ ที่เจือสาร Dy 1.2 mol% ความพรุน 20.34%

ตารางที่ 4.3 ค่า d-spacing ของ $\text{Ba}_{1-x}\text{Dy}_x\text{TiO}_3$ เมื่อความพรุนแตกต่างกัน

JCPDS no.		ค่า d-spacing จากการ์ด (Å)											
		Dy 0.0%				Dy 0.6%				Dy 1.2%			
		Porosity (%)				Porosity (%)				Porosity (%)			
I/I ₀	d (Å)	0.0	7.35	12.17	19.33	0.0	6.98	12.35	18.11	0.0	7.12	14.85	20.34
12	4.03												
25	3.99	4.00	4.00	4.00	4.00	3.96	3.94	4.01	4.00	3.91	3.98	3.91	3.93
		3.18	3.12	3.12	3.11	3.16	3.10	3.16	3.10	3.02	3.12	3.11	3.10
100	2.838												
		2.83	2.84	2.84	2.85	2.81	2.81	2.86	2.82	2.80	2.81	2.80	2.80
100	2.825												
46	2.314	2.31	2.32	2.32	2.32	2.28	2.28	2.33	2.31	2.29	2.30	2.30	2.29
		2.17	2.18	2.16	2.17	2.14	2.16	2.14	2.13	2.15	2.14	2.15	2.15
12	2.019	2.01	2.01	2.01	2.01	2.00	1.96	2.03	2.00	1.99	2.00	1.99	1.99
37	1.997												
8	1.790	1.79	1.80	1.79	1.80	1.79	1.78	1.81	1.79	1.76	1.78	1.78	1.78
35	1.630	1.63	1.65	1.65	1.64	1.63	1.63	1.65	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63

All rights reserved

4.1.4 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ

การทดลองตอนนี้เป็นการศึกษาผลของความพรุนต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) และค่าแฟกเตอร์ความสูญเสีย ($\tan \delta$) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป (โดยความถี่คงที่ที่ 1 kHz) ผลการทดลองสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.5-4.11 โดยสามารถเปรียบเทียบค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิห้อง (30°C) ได้ดังตารางที่ 4.4

4.1.5 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เมื่อเทียบกับความถี่

การทดลองในตอนนี้อาจจะศึกษาผลของความพรุนต่อสมบัติไดอิเล็กตริก (ϵ_r และ $\tan \delta$) เมื่อความถี่มีการเปลี่ยนแปลง (100 Hz ถึง 20 kHz) ซึ่งผลการทดลองสามารถเขียนเป็นกราฟได้ ดังรูปที่ 4.12-4.18

4.1.6 ผลของความพรุนต่อค่า Dielectric Strength

ในการทดลองนี้เป็น การทดลองหาค่า Breakdown Voltage ของสารตัวอย่าง แล้วเปลี่ยนค่า Breakdown Voltage ให้เป็นค่า Dielectric Strength ตามสมการที่ (3.6) เพื่อที่จะศึกษาผลของความพรุนต่อค่า Dielectric Strength ของสาร ดังเขียนเป็นกราฟในรูปที่ 4.19-4.25 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้ากับค่ากระแส และแสดงให้เห็นถึงค่า Dielectric Strength ของสารด้วย นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาค่า Maximum Resistivity (ρ_{MAX}) ได้จากสมการที่ (3.7) ทำให้สามารถสรุปความสัมพันธ์ของความพรุนกับค่า Dielectric Strength (E) และ Maximum Resistivity (ρ_{MAX}) ดังตารางที่ 4.5

4.1.7 การศึกษา Microstructure ของสาร

การศึกษาในตอนนี้เป็น การดูผลของความพรุนต่อลักษณะของเกรนของสารที่เจือ Dy ในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงแยกพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกพิจารณาถึงผลของ Dy ที่มีผลต่อ Microstructure ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.26 ก.-ข. และกรณีที่ 2 เป็นการดูผลของความพรุนที่มีต่อ Microstructure ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ก.-ง.

ตารางที่ 4.4 ค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 kHz

Dy-Doped (mol%)	Porosity (%)	Dielectric Properties		T_c (°C)
		ϵ_r	$\tan \delta$	
0.0	0.00	1498.53	0.013	100
	7.35	1123.9	0.049	60
	12.17	897.31	0.047	60
	19.33	848.752	0.049	77
0.2	0.00	2126.44	0.024	94
	9.34	1640.4	0.041	93
	15.19	1605.57	0.038	92
	20.11	1302	0.040	90
0.4	0.00	2169.53	0.045	75
	6.98	2012.05	0.015	72
	12.35	1849.99	0.026	71
	18.11	1682.22	0.044	68
0.6	0.00	2699.83	0.034	73
	5.33	2508.7	0.025	72
	10.97	2347.93	0.018	73
	18.21	2210.68	0.021	74
0.8	0.00	2514.27	0.018	92
	7.78	2011.03	0.036	53
	13.52	1743.45	0.034	48
	20.19	1514.93	0.033	45
1.0	0.00	2365.42	0.028	72
	6.81	2244.65	0.021	71
	14.11	2105.08	0.026	70
	21.93	1533.49	0.016	69
1.2	0.00	2712.55	0.020	72
	7.12	2636.39	0.024	72
	14.85	2613.51	0.019	74
	20.34	2456.87	0.022	75

ตารางที่ 4.5 ค่า Dielectric Strength และ Resistivity

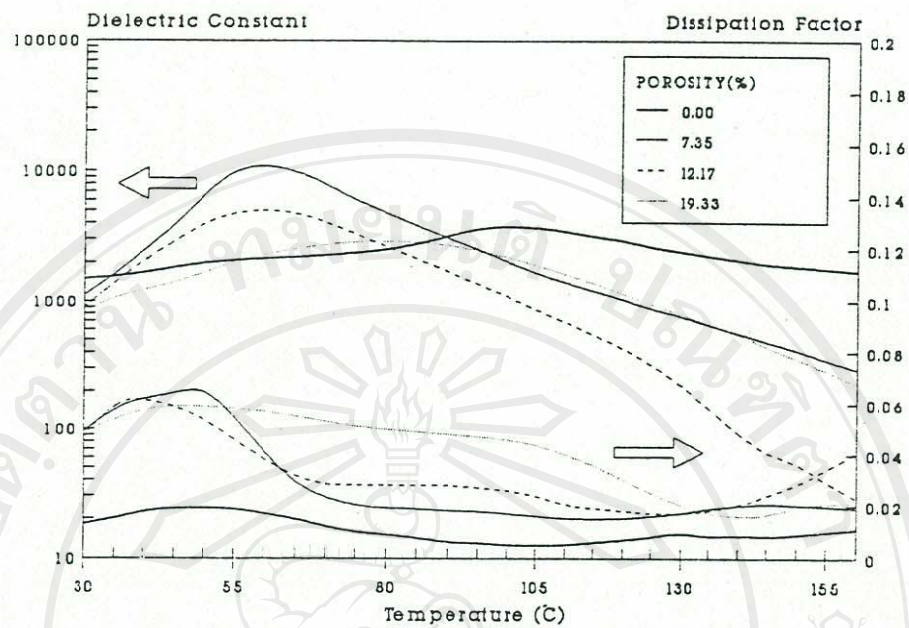
Dy-Doped (mol%)	Porosity (%)	Dielectric Strength (kV/mm)	Resistivity (ohm•cm)
0.0	0.00	7.083	1.64E+11
	7.35	5.238	1.50E+11
	12.17	4.091	1.43E+11
	19.33	3.478	1.37E+10
0.2	0.00	4.854	3.81E+10
	9.34	4.369	2.86E+10
	15.19	3.000	2.09E+10
	20.11	2.500	1.96E+10
0.4	0.00	5.000	7.85E+10
	6.98	4.545	5.48E+10
	12.35	2.778	4.68E+10
	18.11	1.948	3.39E+10
0.6	0.00	5.454	1.07E+11
	5.33	2.800	9.42E+10
	10.97	2.333	5.24E+10
	18.21	1.923	3.02E+10
0.8	0.00	8.730	1.25E+11
	7.78	3.383	8.86E+10
	13.52	3.125	7.01E+10
	20.19	2.000	3.93E+10
1.0	0.00	6.696	1.05E+11
	6.81	3.053	6.00E+10
	14.11	2.903	5.07E+10
	21.93	2.121	3.57E+10
1.2	0.00	5.078	9.20E+10
	7.12	4.400	6.28E+10
	14.85	3.266	4.75E+10
	20.34	3.070	3.44E+10

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของส่วในการทดลอง

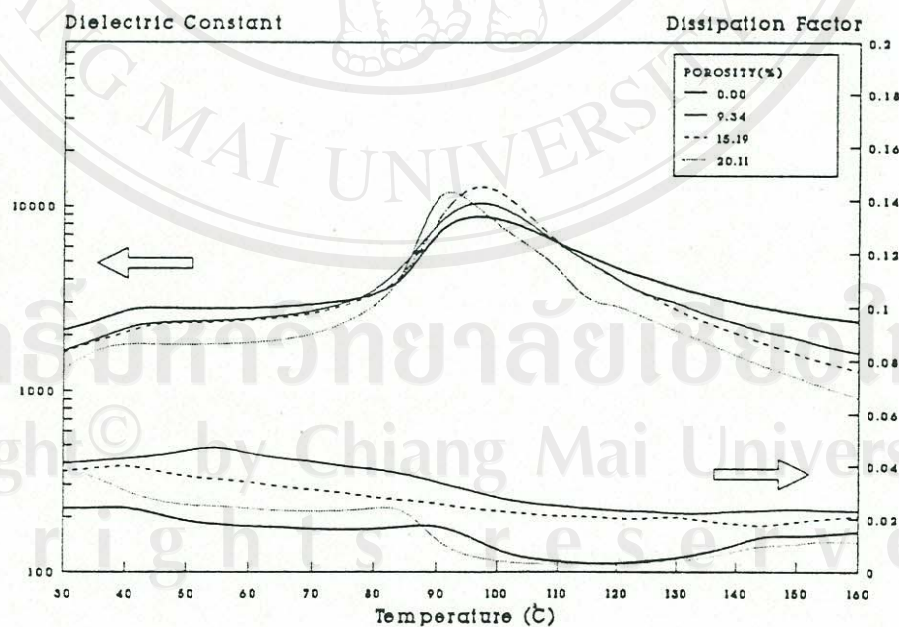
Dy-Doped (mol%)	Porosity (%)	Shrinkage (%)	Dielectric Properties		T _g (°C)	Dielectric Strength (kV/mm)	Resistivity (ohm.cm)
			ε _r	tan δ			
0.0	0.00	18.75	1498.53	0.013	100	7.083	1.64E+11
	7.35	19.24	1123.9	0.049	60	5.238	1.50E+11
	12.17	18.60	897.31	0.047	60	4.091	1.43E+11
	19.33	18.69	848.752	0.049	77	3.478	1.37E+10
0.2	0.00	17.77	2126.44	0.024	94	4.854	3.81E+10
	9.34	18.99	1640.4	0.041	93	4.369	2.86E+10
	15.19	19.12	1605.57	0.038	92	3.000	2.09E+10
	20.11	18.99	1302	0.040	90	2.500	1.96E+10
0.4	0.00	20.19	2169.53	0.045	75	5.000	7.85E+10
	6.98	21.20	2012.05	0.015	72	4.545	5.48E+10
	12.35	20.43	1849.99	0.026	71	2.778	4.68E+10
	18.11	19.64	1682.22	0.044	68	1.948	3.39E+10
0.6	0.00	19.36	2699.83	0.034	73	5.454	1.07E+11
	5.33	18.75	2508.7	0.025	72	2.800	9.42E+10
	10.97	19.73	2347.93	0.018	73	2.333	5.24E+10
	18.21	20.38	2210.68	0.021	74	1.923	3.02E+10

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) คุณสมบัติของสารในการทดลอง

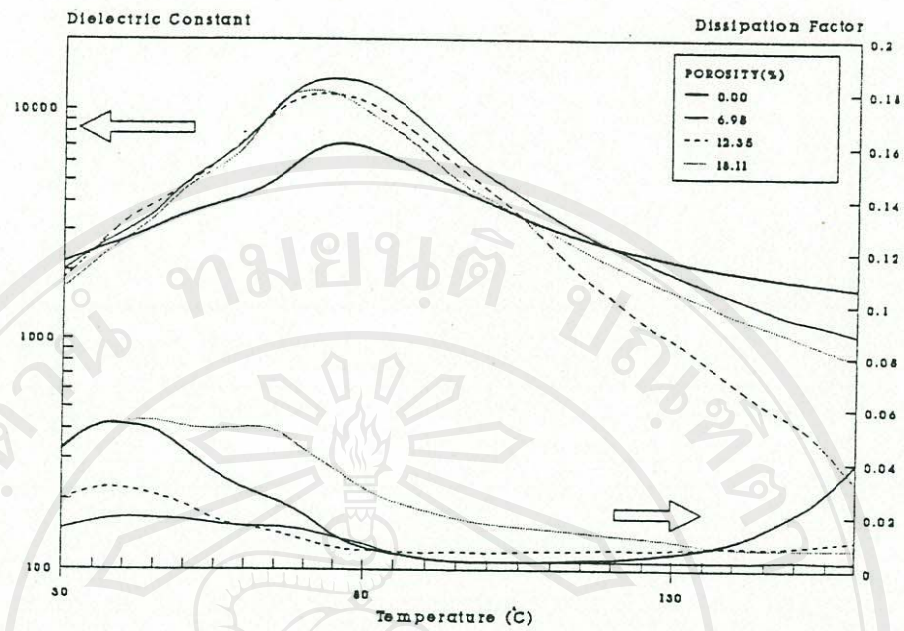
Dy-Doped (mol%)	Porosity (%)	Shrinkage (%)	Dielectric Properties		T _c (°C)	Dielectric Strength (kV/mm)	Resistivity (ohm.cm)
			ε _r	tan δ			
0.8	0.00	19.12	2514.27	0.018	92	8.730	1.25E+11
	7.78	19.64	2011.03	0.036	53	3.383	8.86E+10
	13.52	19.49	1743.45	0.034	48	3.125	7.01E+10
	20.19	19.50	1514.93	0.033	45	2.000	3.93E+10
1.0	0.00	18.66	2365.42	0.028	72	6.696	1.05E+11
	6.81	19.30	2244.65	0.021	71	3.053	6.00E+10
	14.11	19.36	2105.08	0.026	70	2.903	5.07E+10
	21.93	19.27	1533.49	0.016	69	2.121	3.57E+10
1.2	0.00	18.99	2712.55	0.020	72	5.078	9.20E+10
	7.12	18.69	2636.39	0.024	72	4.400	6.28E+10
	14.85	18.75	2613.51	0.019	74	3.266	4.75E+10
	20.34	18.63	2456.87	0.022	75	3.070	3.44E+10



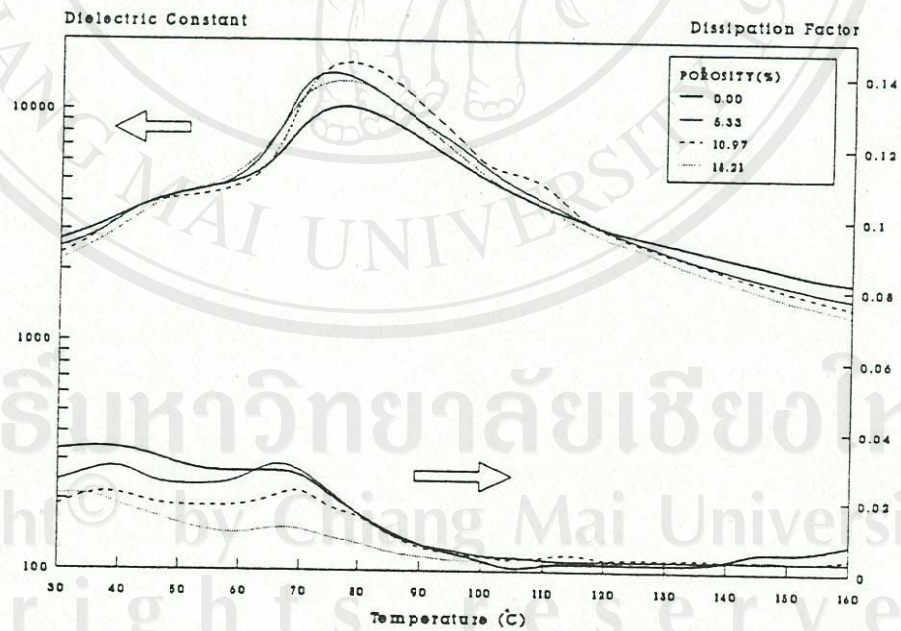
รูปที่ 4.5 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับอุณหภูมิ ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.0 mol%



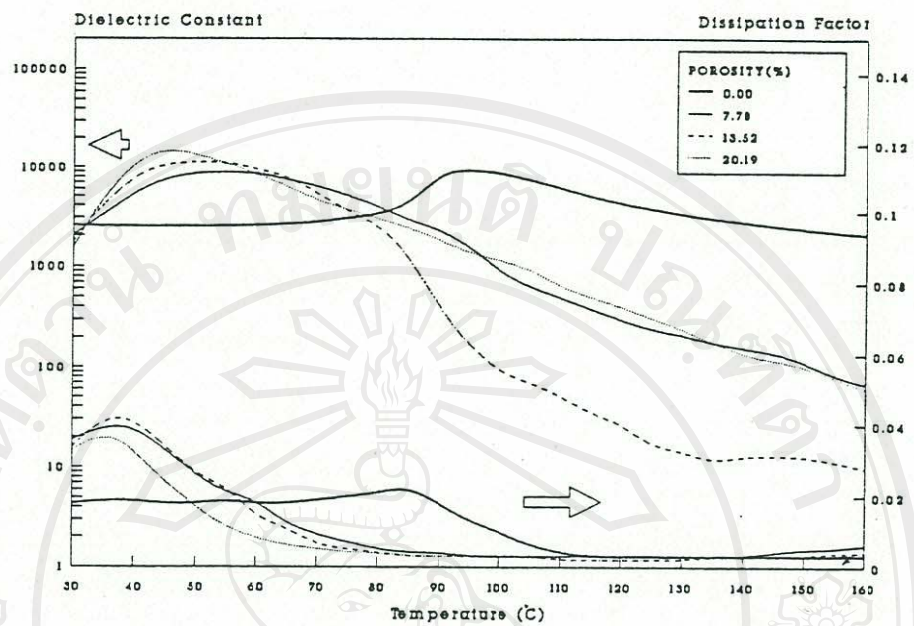
รูปที่ 4.6 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับอุณหภูมิ ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.2 mol%



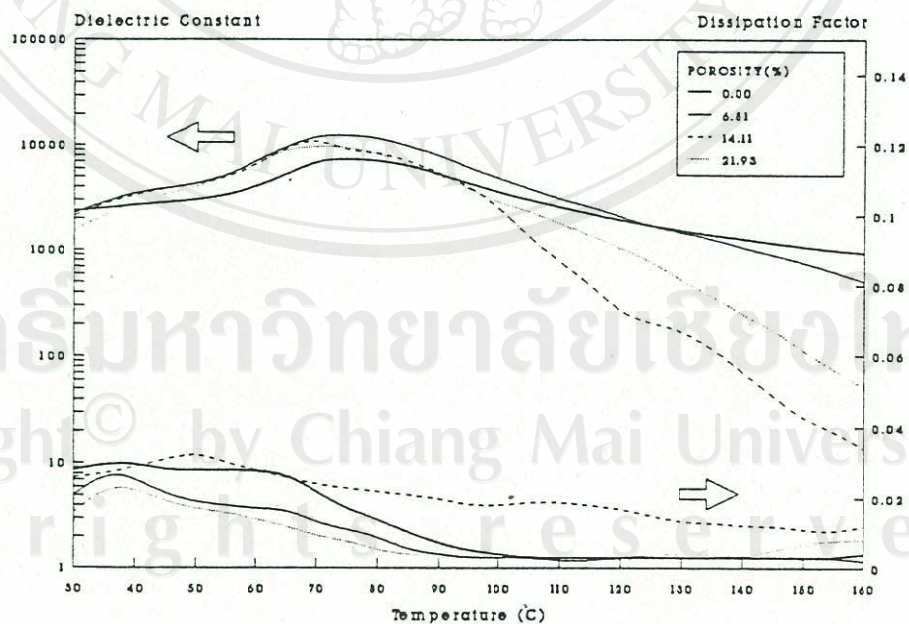
รูปที่ 4.7 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับอุณหภูมิ ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.4 mol%



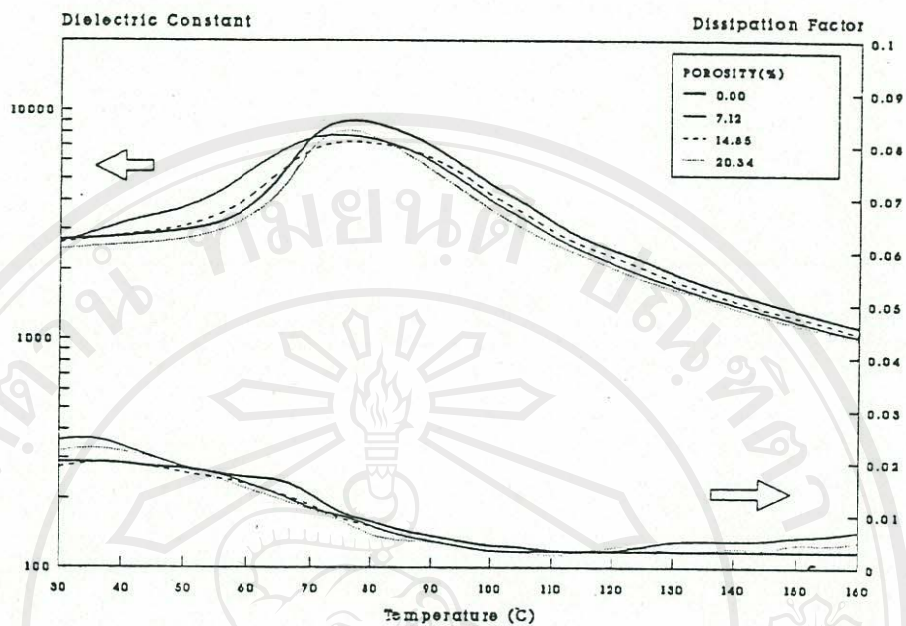
รูปที่ 4.8 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับอุณหภูมิ ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.6 mol%



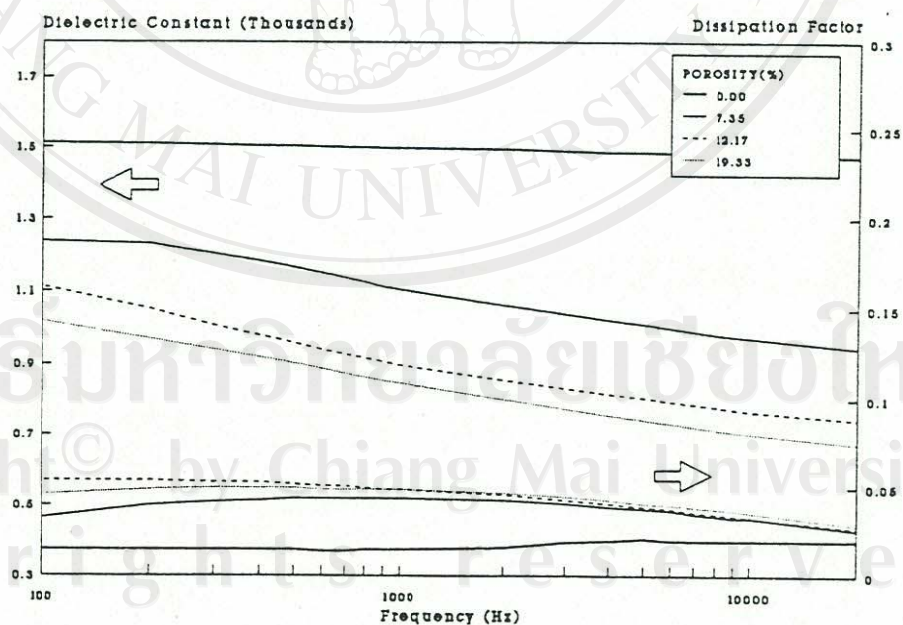
รูปที่ 4.9 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับอุณหภูมิ ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.8 mol%



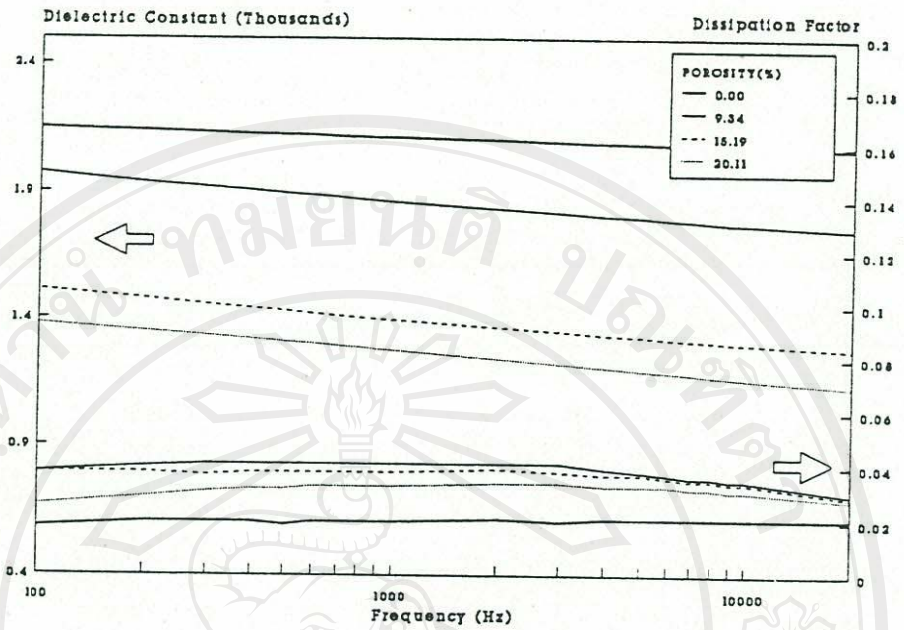
รูปที่ 4.10 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับอุณหภูมิ ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 1.0 mol%



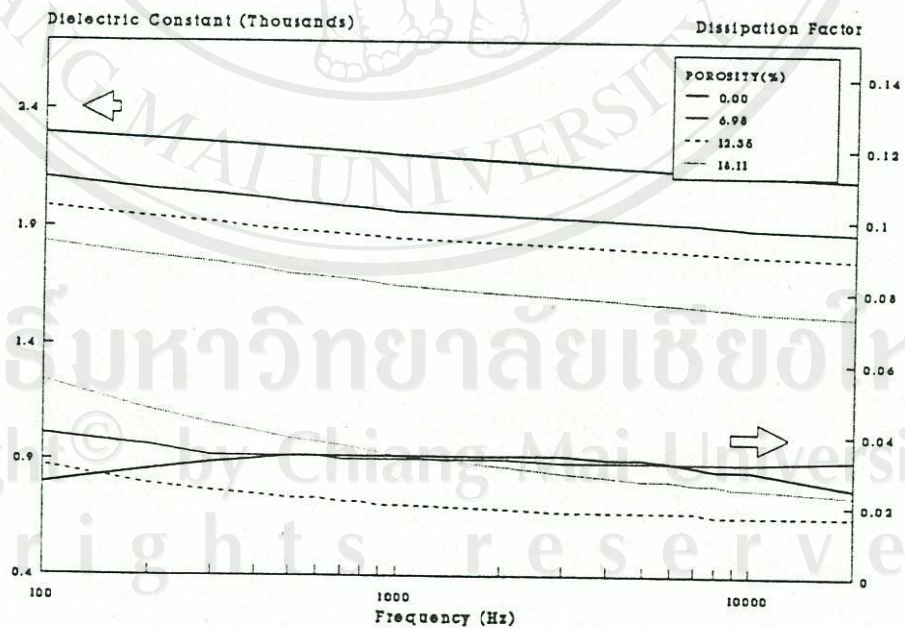
รูปที่ 4.11 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับอุณหภูมิ ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 1.2 mol%



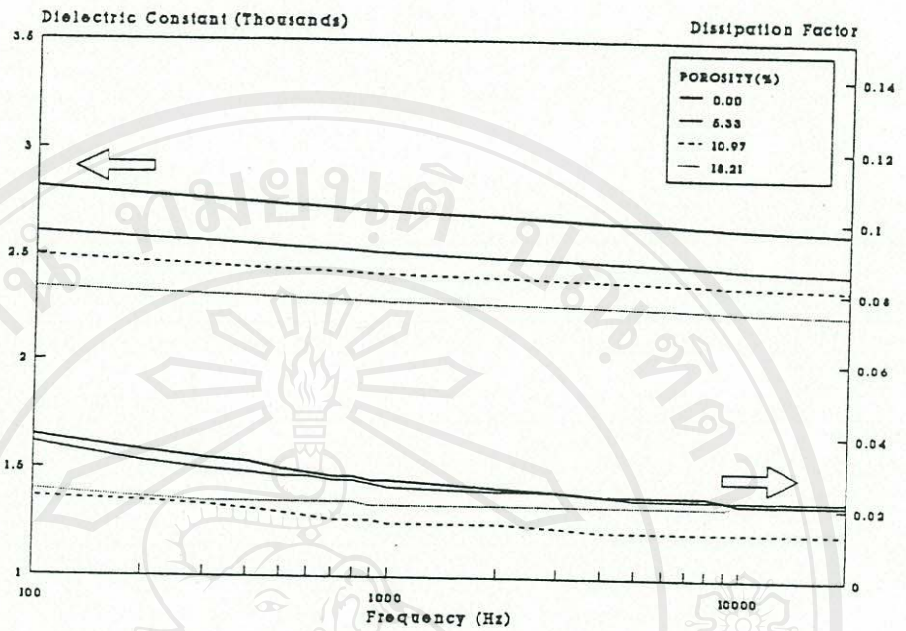
รูปที่ 4.12 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับความถี่ ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.0 mol%



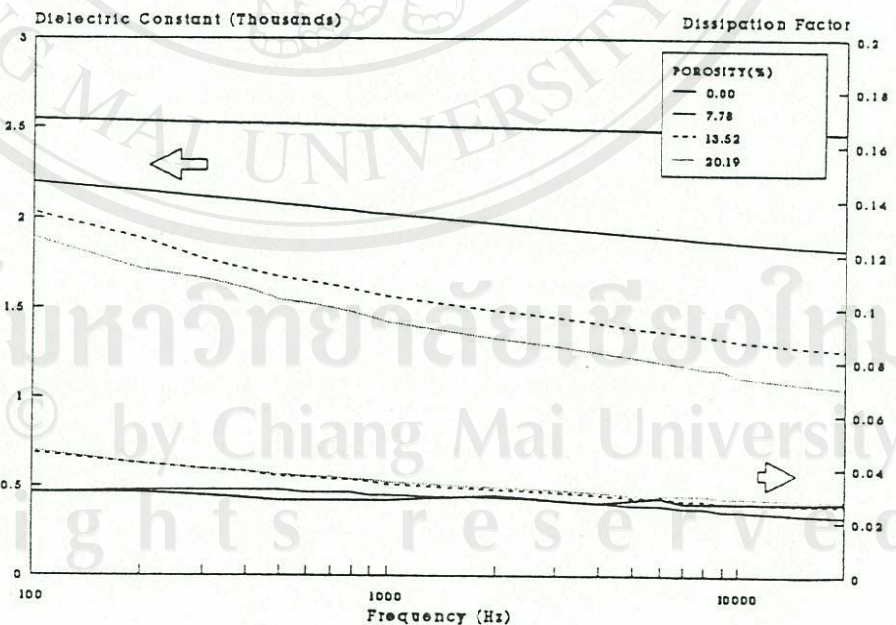
รูปที่ 4.13 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับความถี่ ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.2 mol%



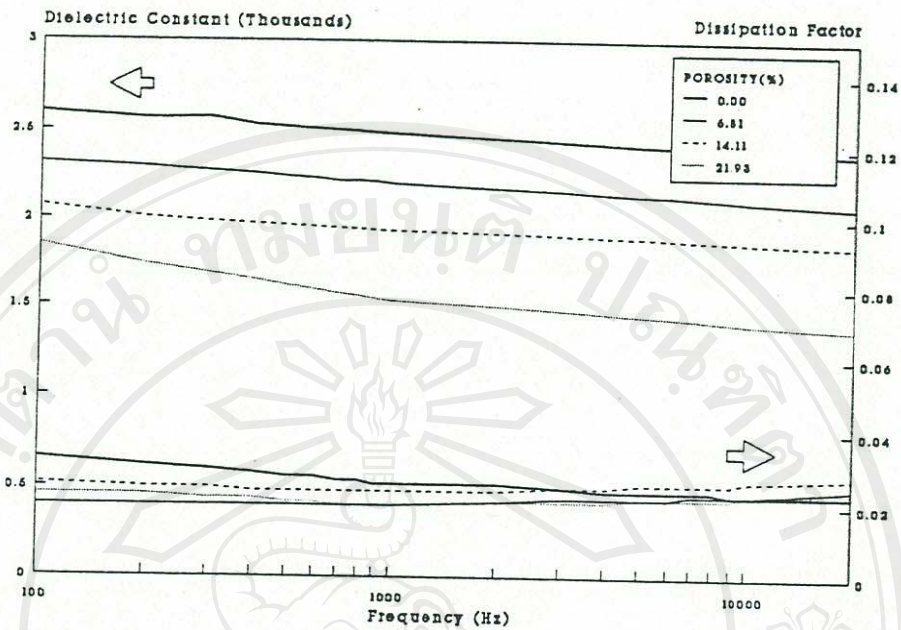
รูปที่ 4.14 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับความถี่ ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.4 mol%



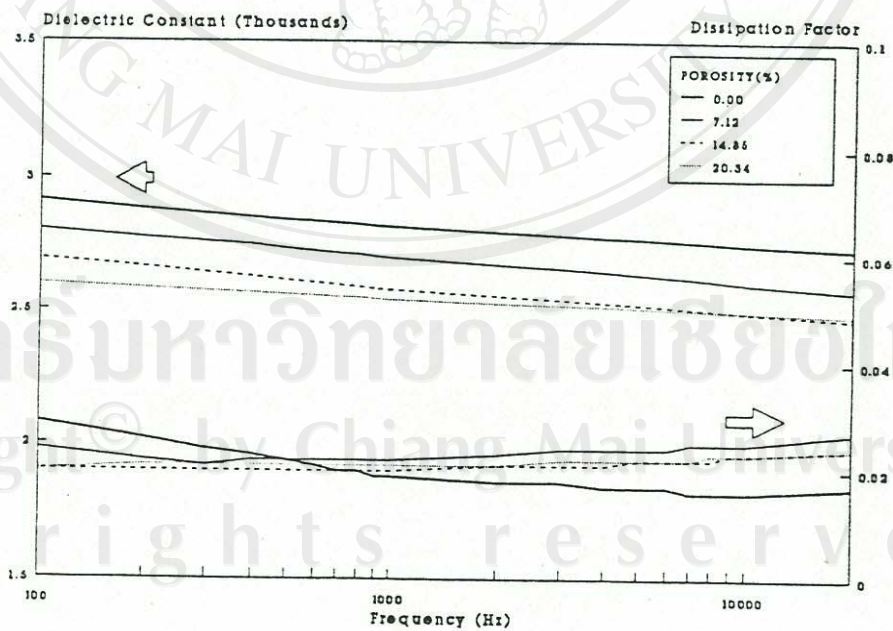
รูปที่ 4.15 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับความถี่ ของสาร BaTiO₃ เจือด้วย Dy 0.6 mol%



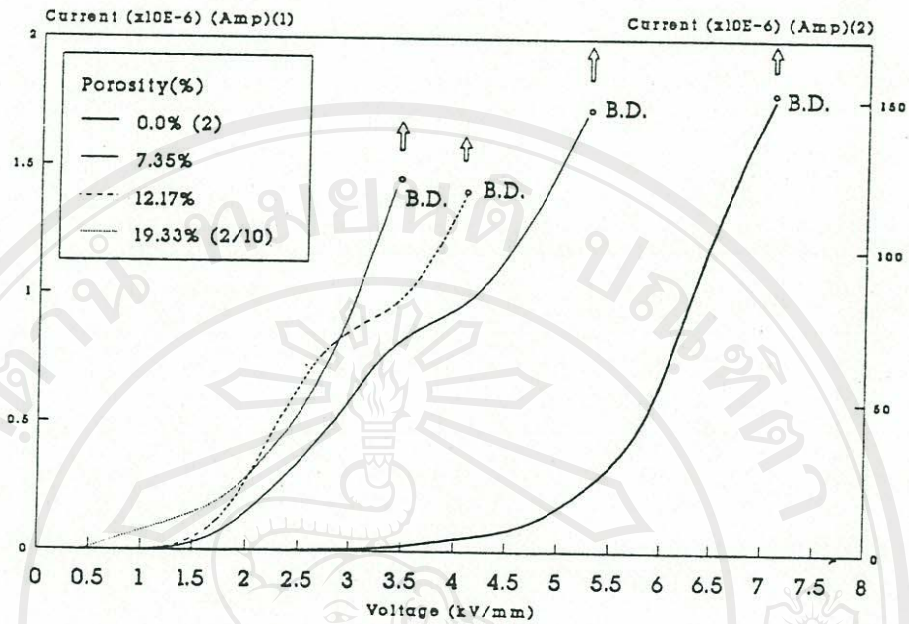
รูปที่ 4.16 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับความถี่ ของสาร BaTiO₃ เจือด้วย Dy 0.8 mol%



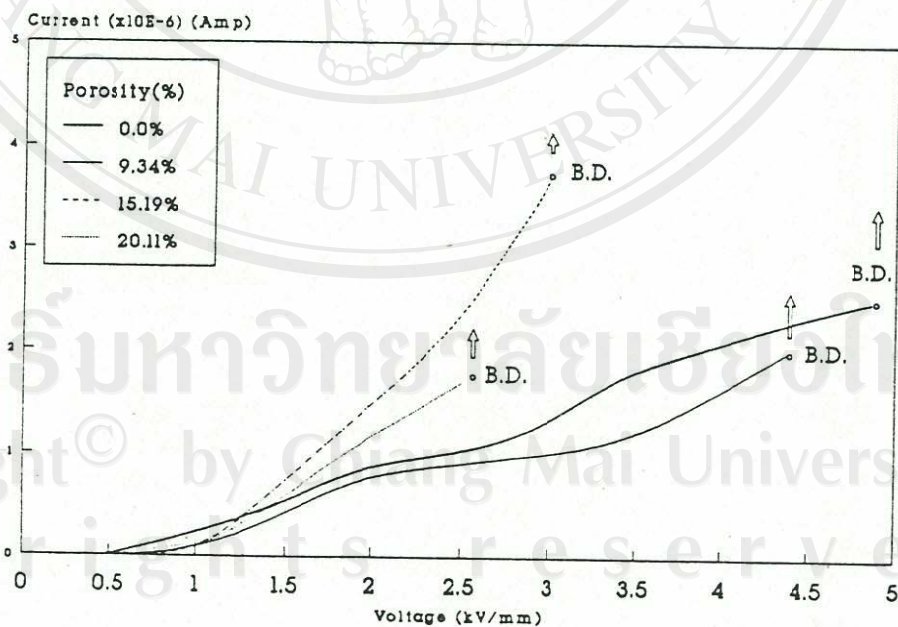
รูปที่ 4.17 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับความถี่ ของสาร BaTiO₃ เจือด้วย Dy 1.0 mol%



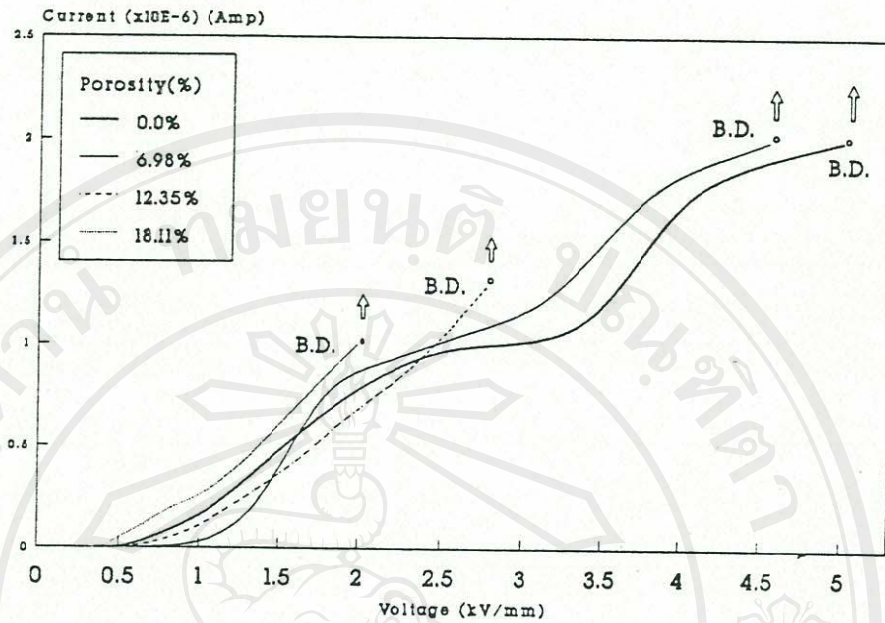
รูปที่ 4.18 ผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับความถี่ ของสาร BaTiO₃ เจือด้วย Dy 1.2 mol%



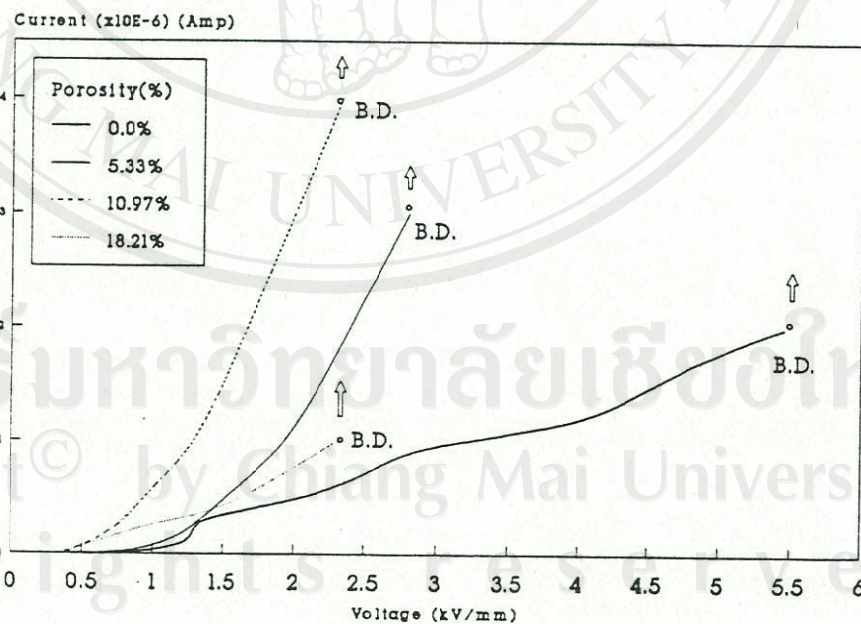
รูปที่ 4.19 ผลของความพรุนต่อค่า Dielectric Strength ของสาร BaTiO₃ เจือด้วย Dy 0.0 mol%



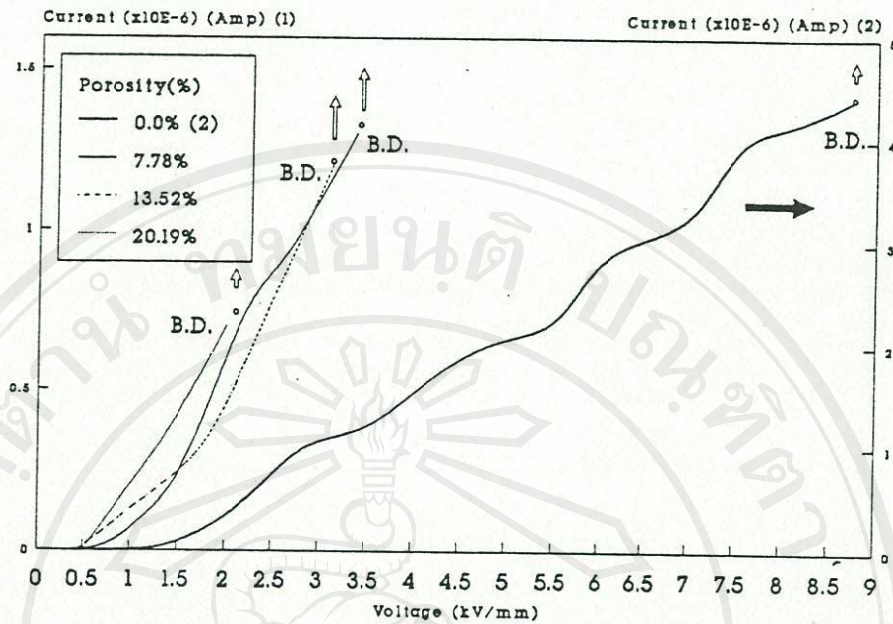
รูปที่ 4.20 ผลของความพรุนต่อค่า Dielectric Strength ของสาร BaTiO₃ เจือด้วย Dy 0.2 mol%



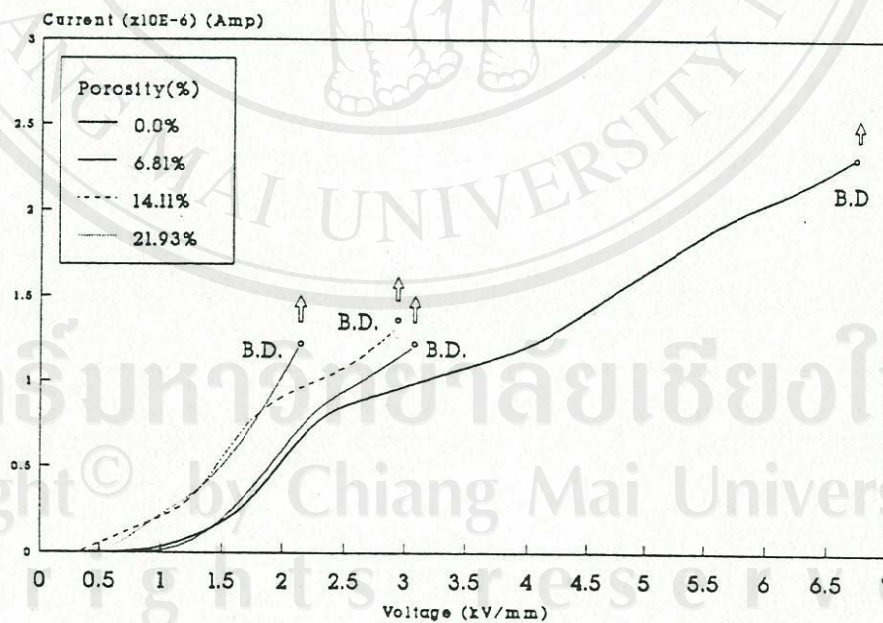
รูปที่ 4.21 ผลของความพรุนต่อค่า Dielectric Strength ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.4 mol%



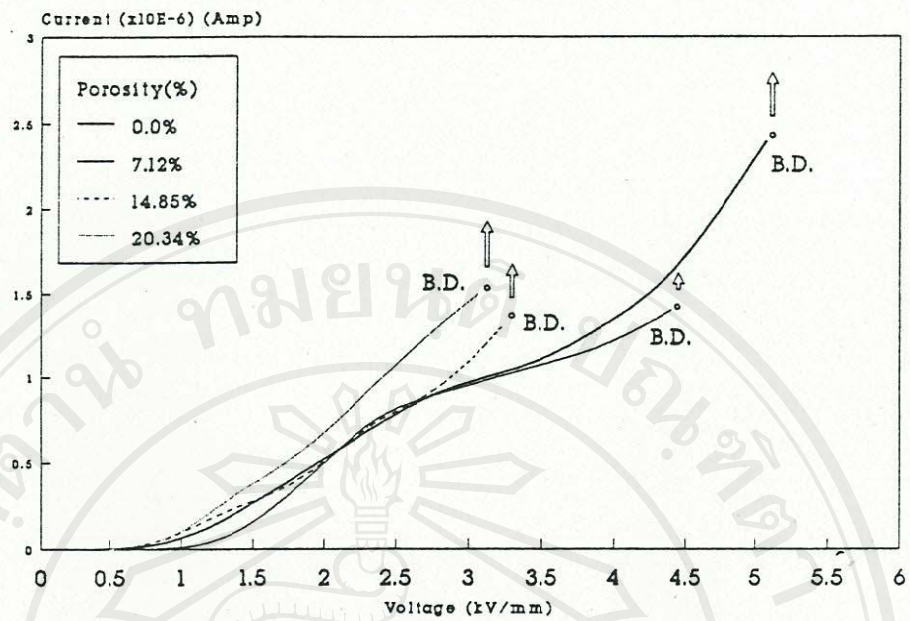
รูปที่ 4.22 ผลของความพรุนต่อค่า Dielectric Strength ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.6 mol%



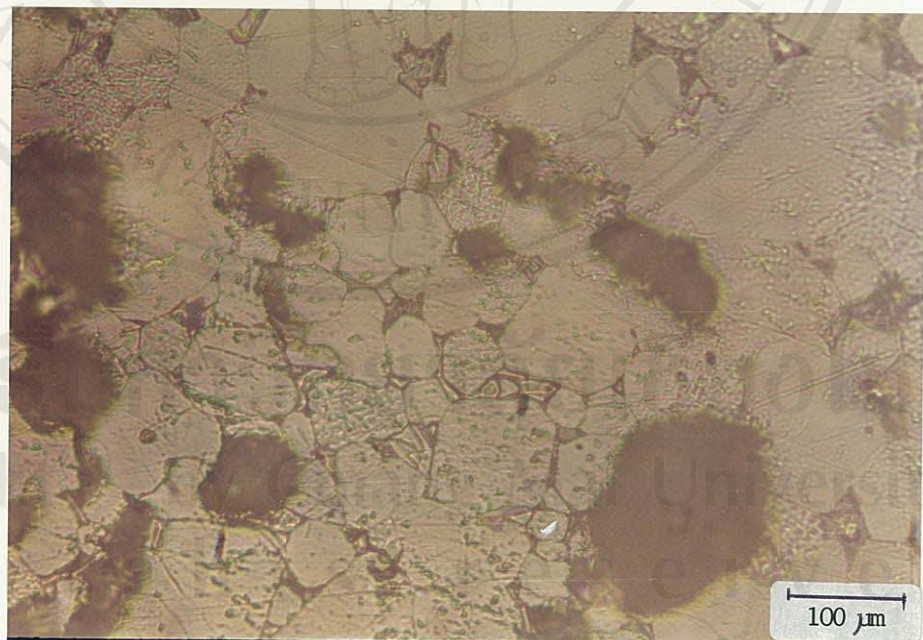
รูปที่ 4.23 ผลของความพรุนต่อค่า Dielectric Strength ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.8 mol%



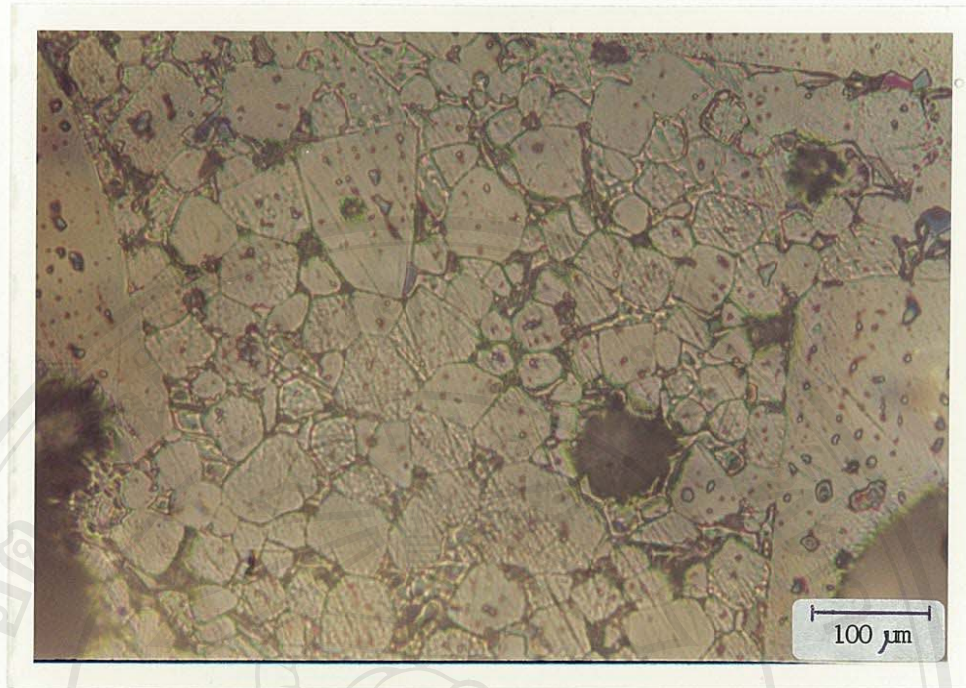
รูปที่ 4.24 ผลของความพรุนต่อค่า Dielectric Strength ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 1.0 mol%



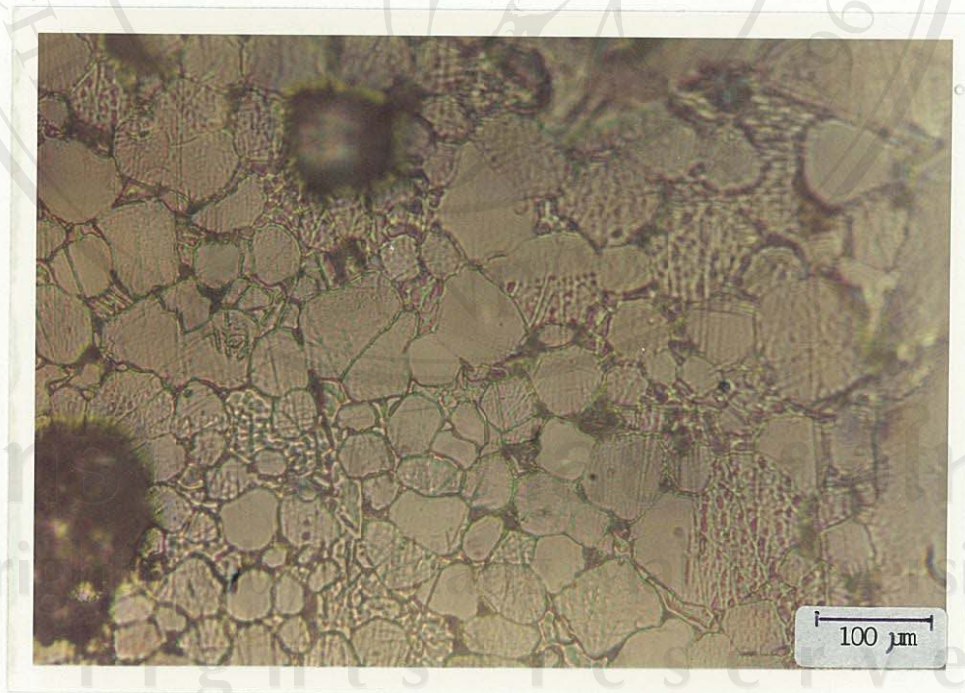
รูปที่ 4.25 ผลของความพรุนต่อค่า Dielectric Strength ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 1.2 mol%



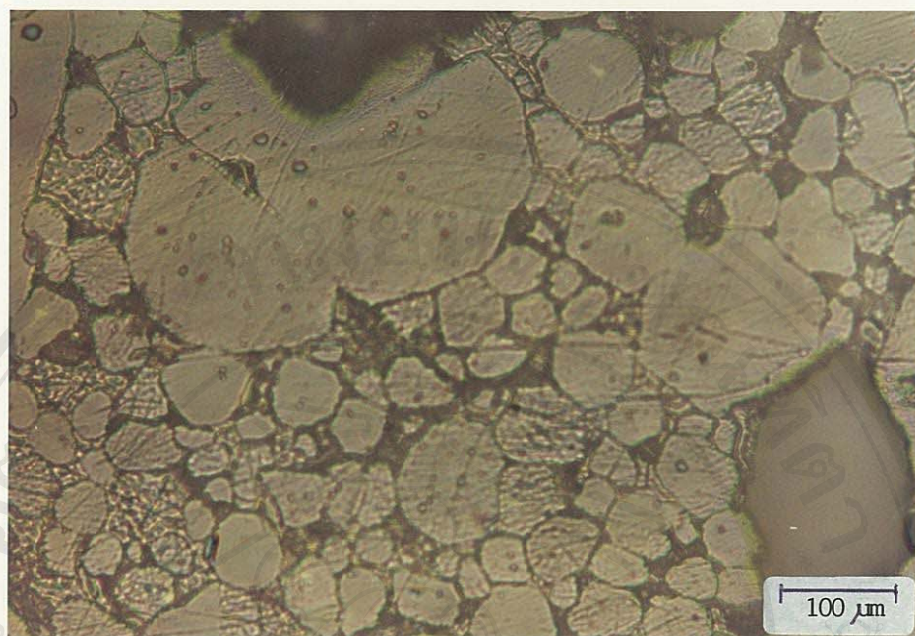
รูปที่ 4.26 ก. Microstructure ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.0 mol%



รูปที่ 4.26 ข. Microstructure ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.2 mol%



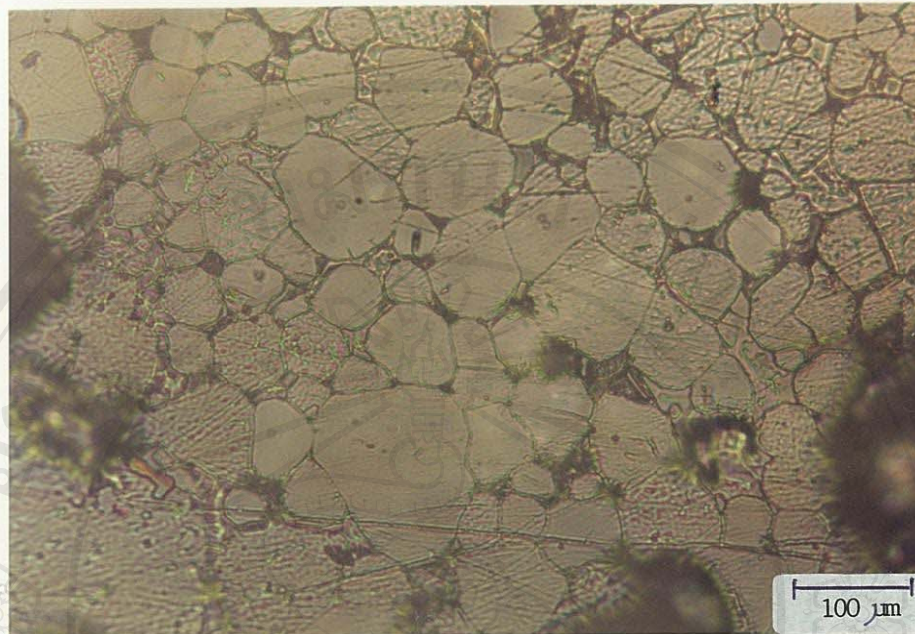
รูปที่ 4.26 ค. Microstructure ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.4 mol%



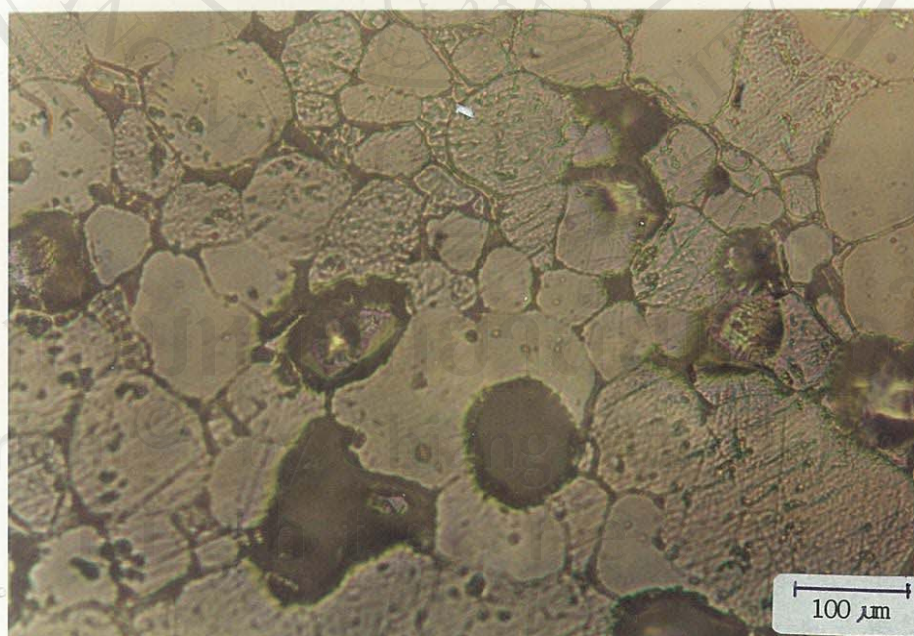
รูปที่ 4.26 จ. Microstructure ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.6 mol%



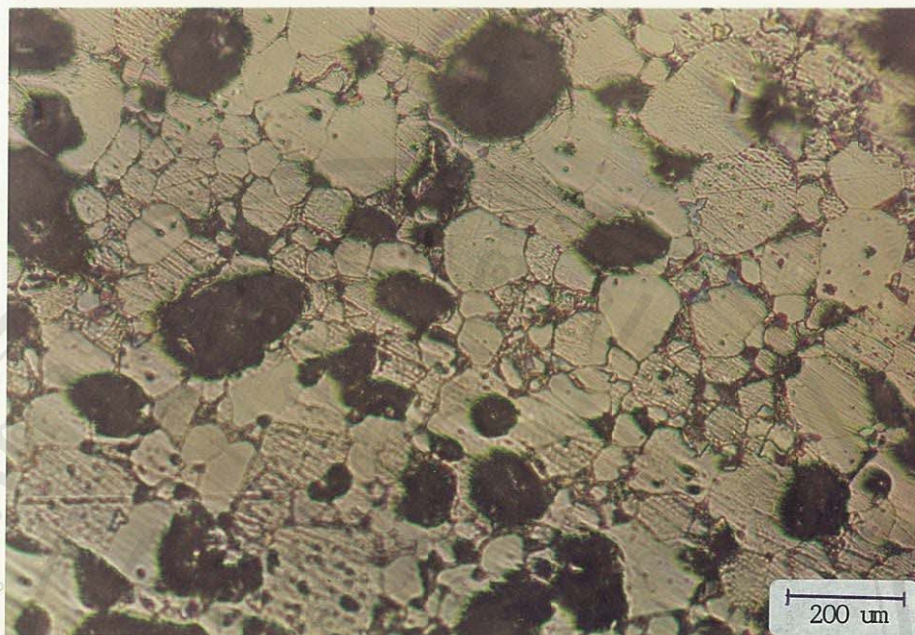
รูปที่ 4.26 จ. Microstructure ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.8 mol%



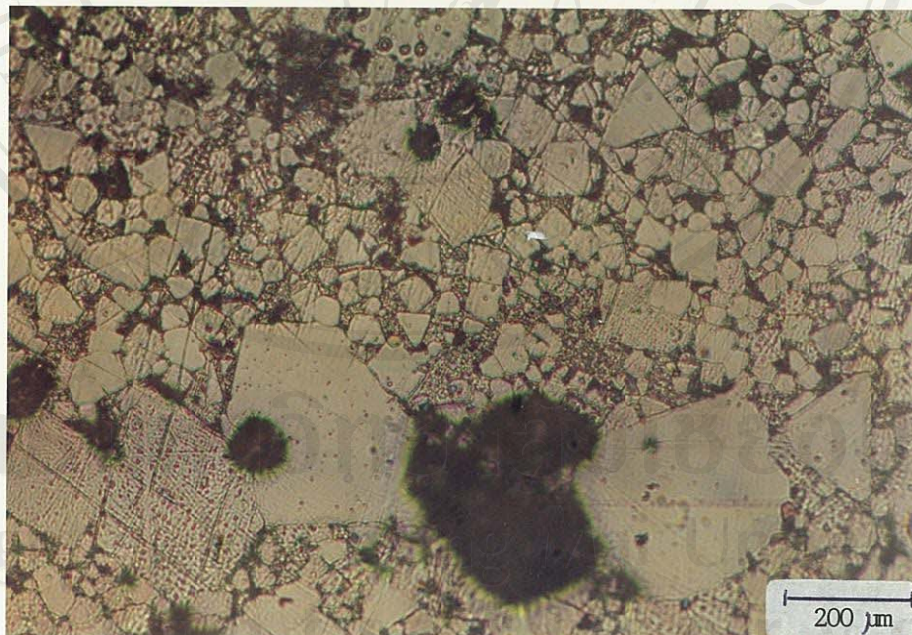
รูปที่ 4.26 จ. Microstructure ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 1.0 mol%



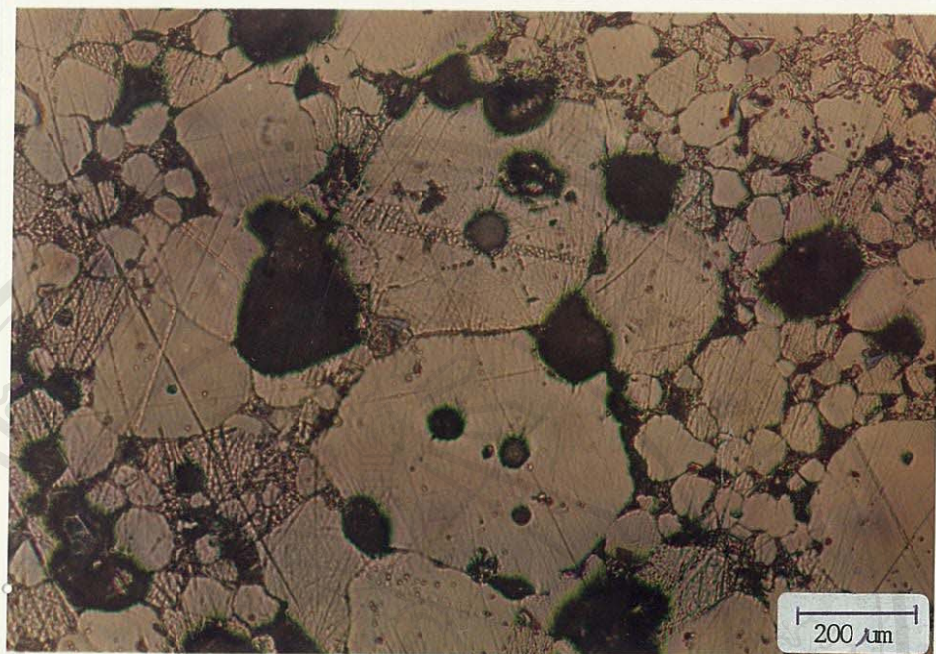
รูปที่ 4.26 ข. Microstructure ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 1.2 mol%



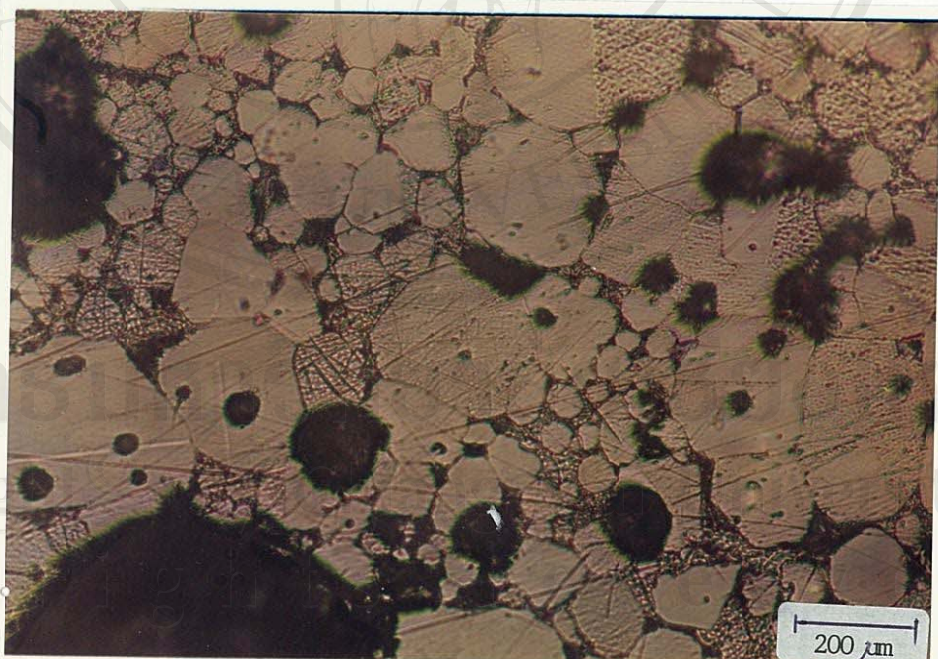
รูปที่ 4.27 ก. Microstructure ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.8 mol%
ความพรุน 0.0%



รูปที่ 4.27 ข. Microstructure ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.8 mol%
ความพรุน 7.78%



รูปที่ 4.27 ค. Microstructure ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.8 mol%
ความพรุน 13.52%



รูปที่ 4.27 ง. Microstructure ของสาร BaTiO_3 เจือด้วย Dy 0.8 mol%
ความพรุน 20.19%

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ในการเตรียมสารตัวอย่าง ซึ่งได้เตรียม $Ba_{1-x}Dy_xTiO_3$ โดยที่ x มีค่าระหว่าง 0.0-1.2 mol%^(5,29,30) ซึ่งจะให้สารที่มีสมบัติเป็นสารที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารไดอิเล็กตริกที่ใช้ทำตัวเก็บประจุ นอกจากนี้ถ้ามีการเจือสาร Dy ในปริมาณที่มากเกินไปก็จะทำคุณสมบัติที่เหมาะสมในการทำตัวเก็บประจุลดลง และถ้ามีการเจือสารจนถึง 6 mol% สารก็จะเปลี่ยนเฟสเป็น Cubic แทน⁽³¹⁾ ในการเตรียมสารเริ่มต้นโดยการคำนวณจากสูตรดังกล่าวข้างต้นนั้นมีการตั้งสมมติฐานว่า Dy จะเข้าไปแทนในตำแหน่งของ Ba แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ได้มีการทำการวิจัยพบว่า Dy จะเข้าไปแทนในตำแหน่ง Ti ด้วย^(11,31) สารที่ได้จากการเตรียมในการวิจัยนี้มีสีเป็นสีขาวปนเหลือง (ดังรูปที่ 3.21) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Murakami และ Yamaji⁽⁵⁾ ซึ่งเตรียมสารได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้จากการทดลองซึ่งถ้าการผสมสารไม่ดีเท่าที่ควรจะทำให้สารนั้นแสดงสมบัติทางตัวต้านทาน (Resistance) จะมีลักษณะสีของเม็ดสารเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งสอดคล้องกับผู้ที่ได้ศึกษาไว้แล้ว⁽¹⁰⁾

2. ในการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของสาร คือ การหาค่า Shrinkage, Density และ Porosity ของสารนั้น ถ้าพิจารณาจากผลของการเจือสาร Dy ซึ่งจะต้องมีผลในการยับยั้งการเติบโตของเกรน^(31,32) ซึ่งจะส่งผลให้ค่า Shrinkage ลดลงเมื่อปริมาณของ Dy มากขึ้น และค่า Density ก็จะมีมากขึ้นด้วย แต่จากภาพถ่ายทาง Microstructure ดังรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าการทดลองนี้ไม่มีการลดลงของขนาดของเกรน (คาดว่าจะเป็นผลมาจากสารอื่นที่ปนเปื้อน ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป) ทำให้สารที่เตรียมได้ไม่มีความสัมพันธ์ของ Density เทียบกับปริมาณ Dy นอกจากนี้ถ้าพิจารณาถึง Shrinkage นั้นพบว่าปริมาณการเจือสาร Dy ไม่มีความสัมพันธ์กับ Shrinkage เช่นกัน ซึ่งได้มีผู้ทดลองไว้⁽³²⁾ พบว่าปริมาณสารเจือที่มากขึ้นจะทำให้ Shrinkage ลดลง เพราะว่าขนาดของเกรนเล็กลง แต่จากผลการทดลองซึ่งไม่สอดคล้องดังกล่าว ดังรูปที่ 4.26 อาจเป็นเพราะขนาดของเกรนในการทดลองไม่ได้มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้การหา Shrinkage จะต้องเป็นการหาเชิงปริมาตร แต่ในการทดลองนี้เป็น การวัดในเชิงเส้นจากการวัดการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดสาร ซึ่งอาจทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้ สำหรับผลของความพรุนต่อ Shrinkage นั้น พบว่าให้ผลในทางตรงกันกับที่กล่าวมาข้างต้น แต่สำหรับผลของความพรุนต่อ Density นั้น เมื่อมีการเจือสาร PMMA มากขึ้นก็จะมีผลทำให้สารมีความหนาแน่นน้อยลง เนื่องจากมีปริมาตรบางส่วนของสารตัวอย่างถูกแทนที่ด้วยอากาศ (ช่องว่าง) ทำให้ปริมาตรมวลต่อปริมาตรลดลงนั่นเอง (ดังผลในตารางที่ 4.1)

3. การตรวจสอบโครงสร้างของสารที่ได้จากการเตรียมโดยใช้ X-Ray Diffractometer นั้น ในขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาถึงผลของการเจือสาร Dy ต่อโครงสร้างของสาร BaTiO_3 จาก Diffraction Pattern ในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า การเจือสาร Dy เข้าไปใน BaTiO_3 ในปริมาณ 0.2-1.2 mol% โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากรูปที่ 4.3 ก. ซึ่งเป็น BaTiO_3 ที่ไม่ได้เจือสาร Dy กับรูปที่ 4.3 ข.-ค. ซึ่งเป็น Diffraction Pattern ของสาร BaTiO_3 ที่เจือด้วยสาร Dy ในปริมาณ 0.2 ถึง 1.2 mol% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในรูปร่างของ Diffraction Pattern นั้นแสดงว่าการเจือ Dy ลงใน BaTiO_3 นั้นไม่ทำให้สารเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสาร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Hanafi และคณะ⁽³¹⁾ ซึ่งได้เจือสาร Dy_2O_3 ลงในสาร BaTiO_3 ในปริมาณต่างกัน และพบว่า เมื่อเจือสาร Dy_2O_3 มากกว่า 6 mol% จะทำให้สาร BaTiO_3 เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็น Cubic ดังนั้นจึงสรุปได้จากการทดลองว่าการเจือสาร Dy_2O_3 ใน BaTiO_3 ในปริมาณ 0.2-1.2 mol% ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสาร แต่อย่างใด (แต่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของยูนิตเซลล์^(5,31))

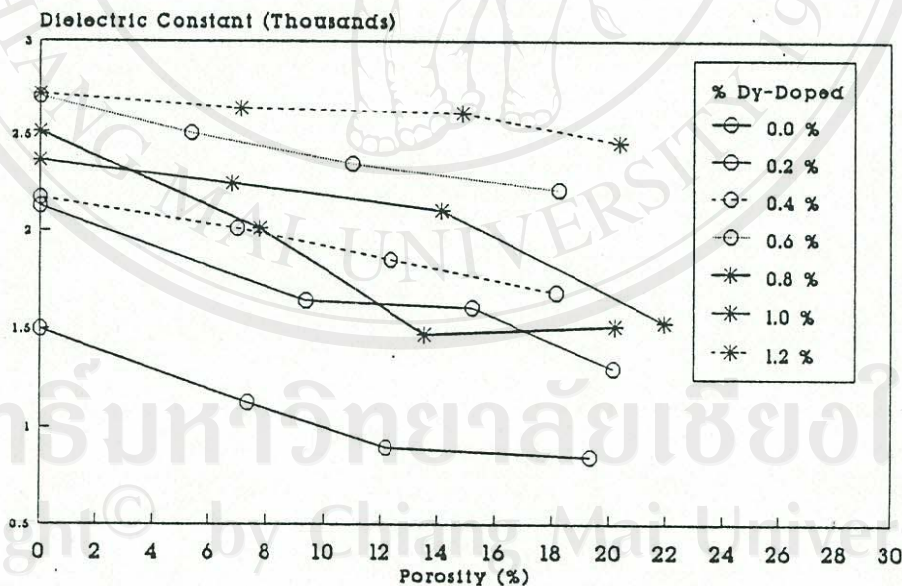
เมื่อพิจารณาผลความพรุนต่อโครงสร้างของสารนั้น (จากรูปที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.3) เห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาในเฉพาะสารที่มีปริมาณการเจือ Dy เท่ากัน แต่เติมสาร PMMA ในปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อควบคุมความพรุน ก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของ Diffraction Pattern (ในด้านของมุม 2θ) แต่จะเปลี่ยนแปลงในด้านของความสูงของ Peak ซึ่งลดลง ทั้งนี้ เป็นเพราะสารที่มีความพรุนจะเกิดการไม่สม่ำเสมอของผิว ทำให้การสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ผิวของสารมีการลดลงทำให้ความเข้ม (ความสูงของ Peak) ลดลง นั่นคือ ความพรุนไม่มีผลต่อโครงสร้างของสาร BaTiO_3 ที่เตรียมได้

4. ในส่วนของการศึกษาผลของความพรุนต่อสมบัติไดอิเล็กตริก (ϵ_r และ $\tan \delta$) ของสารเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ (ดังรูปที่ 4.5-4.11) และเมื่อเทียบกับความถี่ (ดังรูปที่ 4.12-4.18) พิจารณาในกรณีแรกผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาค่า ϵ_r จะเห็นว่าเมื่อความพรุนของสารมากขึ้นจะทำให้ค่า ϵ_r ลดลง (ที่อุณหภูมิห้อง) ดังรูปที่ 4.28 แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอื่นๆ โดยเฉพาะเมื่อสารถูกเพิ่มอุณหภูมิจนเข้าใกล้ T_c จะทำให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นไม่เป็นจริง ส่วนเมื่อพิจารณาเมื่ออุณหภูมิของสารผ่าน T_c มาแล้วจะทำให้สารมีการลดลงของค่า ϵ_r เมื่อความพรุนมากขึ้นอีกเช่นกัน จากผลการทดลองที่พบว่าค่า ϵ_r ลดลงเมื่อความพรุนมากขึ้นสอดคล้องกับที่มีผู้ศึกษาไว้^(9,11,33) อาจจะสามารถอธิบายได้

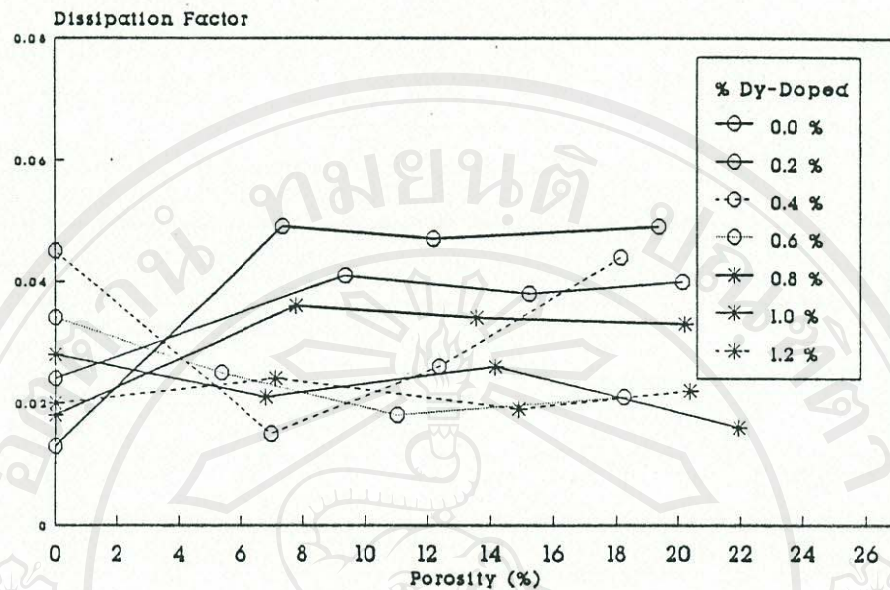
โดยพิจารณาว่าถ้าความพรุนมากขึ้น นั่นคือ สารมีการถูกแทนที่ด้วยช่องว่างมากขึ้น ทำให้บริเวณของสารไดอิเล็กตริกต่อปริมาตรลดลง นั่นคือทำให้ Polarization ลดลงด้วย (จากสมการที่ 2.23) ซึ่งปริมาณ Polarization ก็เป็นตัวบ่งชี้ถึงค่า ϵ_r ได้ด้วย ทำให้ค่า ϵ_r ลดลงได้ สำหรับกรณีที่สารไม่มีการลดลงของ ϵ_r เมื่อความพรุนมากขึ้นในช่วงที่อุณหภูมิเข้าใกล้ T_C เพราะว่าสารมีการเพิ่มขึ้นของค่า ϵ_r แตกต่างกันที่จุด T_C ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r แตกต่างกันไป อาจจะสรุปได้ว่าความพรุนของสารมีผลต่อสถานะการเปลี่ยนเฟสของสารได้ นอกจากนี้ผลที่น่าสนใจและสำคัญมากอีกอย่างหนึ่งก็คือ ความพรุนของสารมีผลต่ออุณหภูมิคูรี (T_C) นั่นคือเมื่อความพรุนของสารเปลี่ยนไปในสารเดียวกันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ T_C ดังแสดงในรูปที่ 2.30 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณการเจือสาร Dy คงที่ เมื่อความพรุนมากขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของ T_C โดยมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในสารที่เจือ Dy ในปริมาณ 0.0 และ 0.8 mol% ส่วนในปริมาณอื่นนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยการเปลี่ยนแปลงอาจจะมีการลดลงของ T_C เมื่อความพรุนมากขึ้นในสารที่เจือ Dy ในปริมาณ 0.2, 0.8 และ 1.0 mol% ดังรูปที่ 4.30 และมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของตรงกันข้ามกับสารดังกล่าวข้างต้น เมื่อเจือสาร Dy ในปริมาณ 1.2 mol% ดังรูปที่ 4.30 และสารที่เจือสาร Dy ในปริมาณ 0.0, 0.4, 0.6 mol% นั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน จากผลการทดลองดังกล่าวอาจจะสรุปได้ว่า ความพรุนมีผลต่อสถานะการเปลี่ยนสถานะของสาร BaTiO_3 ได้ ถ้าพิจารณาถึงค่า $\tan \delta$ ดังรูปที่ 4.29 จะเห็นว่า ค่า $\tan \delta$ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อความพรุนมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าค่า $\tan \delta$ เป็นการวัด Relaxation ของขบวนการ Polarization และวัดค่าการรั่วของกระแสจะเห็นว่าในกรณีแรกนั้นแสดงว่าความพรุนไม่มีผลต่อ Relaxation ของ Polarization แต่ถ้าพิจารณาถึงการรั่วของกระแสในสภาพการทดลองซึ่งมีการให้สัญญาณที่มีความต่างศักย์ต่ำ ซึ่งจะไม่แสดงผลในการรั่วของกระแสมากนัก ทำให้ค่า $\tan \delta$ ไม่เพิ่มขึ้นมากเมื่อความพรุนมากขึ้น แต่ถ้าพิจารณาในสารที่ไม่มีความพรุน (Porosity เป็นศูนย์) ดังรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าการเจือสาร Dy_2O_3 มีผลในการเพิ่มของค่า $\tan \delta$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีผู้ศึกษาไว้แล้ว (5, 27, 29, 30) นอกจากนี้จะเห็นว่าใน Paraelectric Phase นั้นค่า $\tan \delta$ จะมีการลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน (34)

สำหรับในกรณีของการศึกษาผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เมื่อเทียบกับความถี่ดังแสดงในรูปที่ 4.12-4.18 จะเห็นได้ว่าถ้าไม่พิจารณาผลของความพรุนในสาร BaTiO_3 ที่เจือสาร Dy ในปริมาณ 0.0-1.2 mol% เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความถี่ในช่วง 100 Hz ถึง 20 kHz จะไม่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ ดังที่พบในการอธิบายของ Debye (ดังรายละเอียดใน บทที่ 2) แสดงให้เห็นได้ว่าในช่วงความถี่ที่

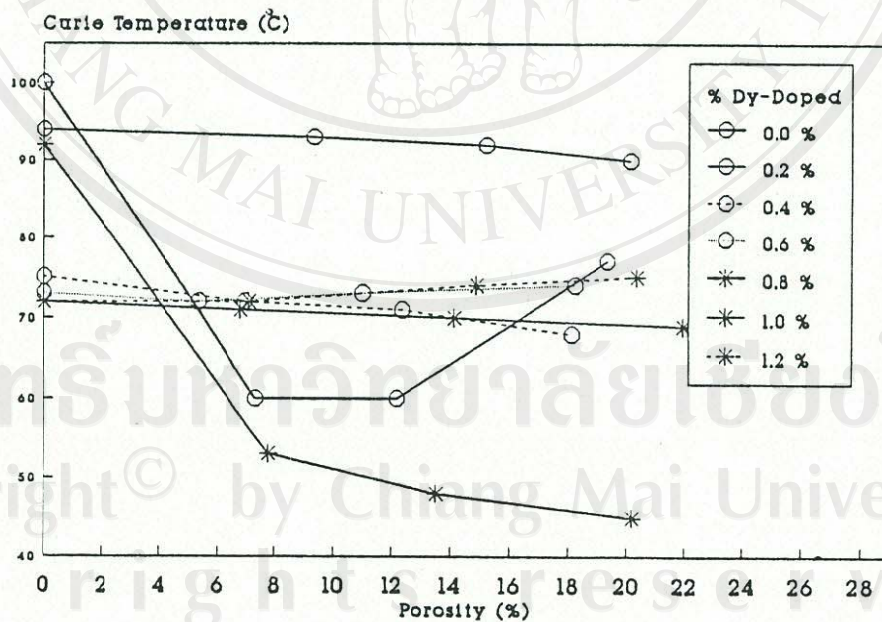
ทำการทดลองจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ มากนัก ซึ่งแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 4.12-4.18 โดยเฉพาะเมื่อ Porosity เป็นศูนย์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Murakami และ Yamaji⁽⁵⁾ ซึ่งพบว่าการลดลงของ ϵ_r อย่างรวดเร็วเมื่อความถี่มากกว่า 10^8 Hz และเมื่อความถี่ต่ำกว่า 10^8 Hz จะมีการลดลงของ ϵ_r เพียงเล็กน้อย ซึ่งจากผลการทดลองก็พบว่าเมื่อความถี่มากขึ้นจะทำให้ค่า ϵ_r ลดลงเล็กน้อยเช่นกัน แต่สำหรับค่า $\tan \delta$ จากผลการทดลองไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักตลอดช่วงความถี่ของการทดลอง และถ้าพิจารณาผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r เมื่อเทียบกับความถี่นั้นพบว่าเมื่อสารไดอิเล็กตริกมีความพรุนมากขึ้นจะทำให้อัตราการลดลงของค่า ϵ_r เมื่อความถี่ของสัญญาณมากขึ้น โดยเฉพาะในสาร BaTiO₃ ที่เจือสาร Dy ในปริมาณ 0.0, 0.2 และ 0.8 mol% ส่วนค่า $\tan \delta$ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อสารมีความพรุนมากขึ้น สรุปได้ว่าความพรุนของสารไดอิเล็กตริกมีผลทำให้เพิ่มอัตราการลดลงของค่า ϵ_r เมื่อเทียบกับความถี่ และค่าความพรุนไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อค่า $\tan \delta$ เมื่อเทียบกับความถี่



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Dielectric Constant กับ Porosity ที่อุณหภูมิห้อง และ ความถี่ 1 kHz.



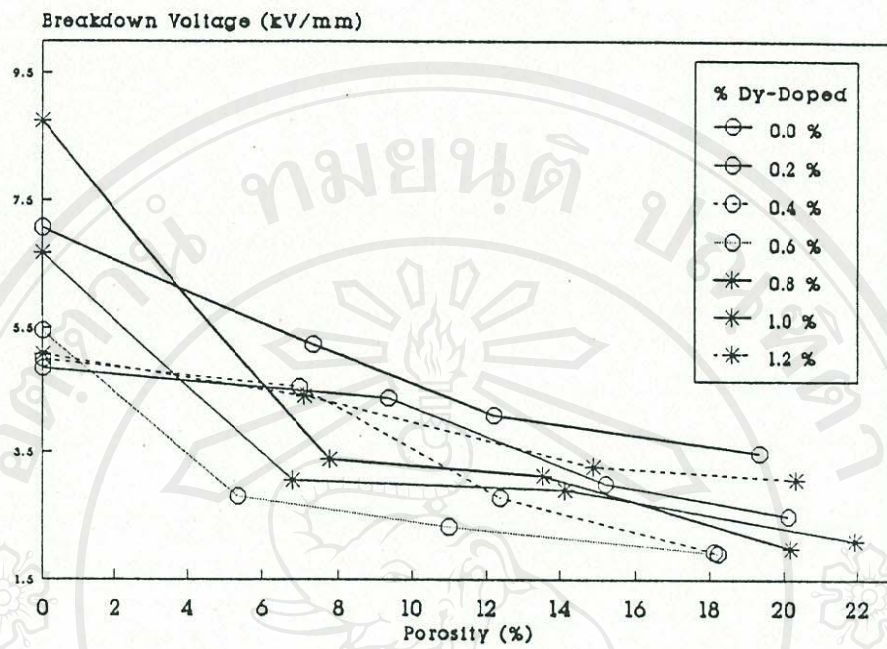
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Dissipation Factor กับ Porosity ที่อุณหภูมิห้อง และ ความถี่ 1 kHz.



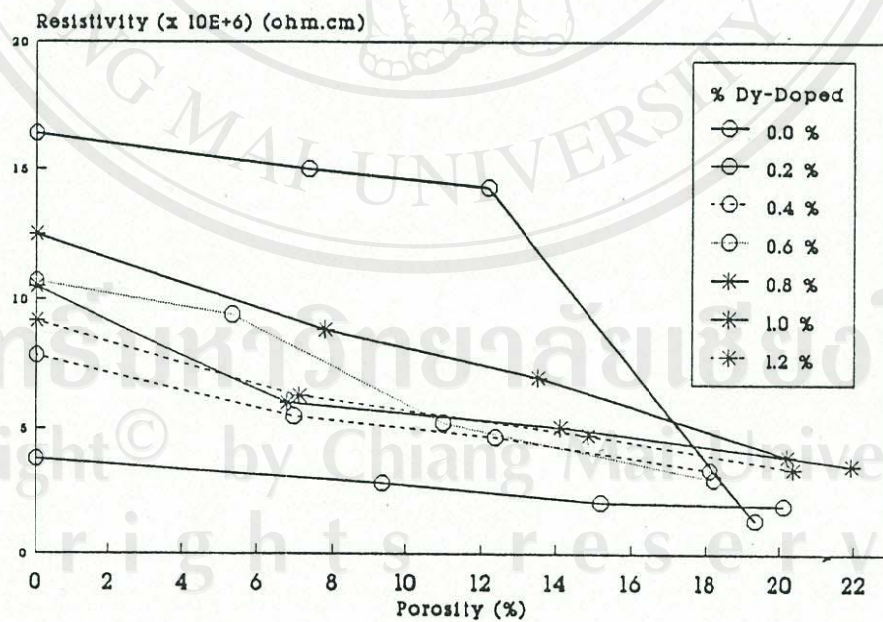
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงผลของความพรุนต่ออุณหภูมิคูรี (T_c)

5. ในการศึกษาผลของความพรุนต่อค่า Dielectric Strength จากผลการทดลองในรูปที่ 4.19-4.25 และ ตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่พิจารณาเมื่อความพรุนของสารไดอิเล็กตริกมีค่าเป็นศูนย์ (ไม่ได้เติมสาร PMMA) พบว่าเมื่อปริมาณการเจือสาร Dy เป็นศูนย์ (ไม่ได้เจือสาร Dy) นั้น ค่า Dielectric Strength จะมีค่าสูง แต่เมื่อเจือสาร Dy เข้าไปแล้วจะทำให้ค่า Dielectric Strength ลดลง ทั้งนี้เพราะว่า BaTiO_3 นั้นเป็นสารที่มีค่า Resistivity สูงเมื่อเจือสาร Dy_2O_3 เข้าไปจะทำให้ Resistivity ลดลง ซึ่งทำให้เกิดการเบรคดาวน์ได้ง่ายขึ้น⁽¹⁰⁾ แต่ว่าการเจือสาร Dy_2O_3 เข้าไปนั้นทำให้ค่า ϵ_r ของสาร BaTiO_3 สูงขึ้น^(5,29,30) ทำให้ต้องเจือสาร Dy_2O_3 เข้าไปเพื่อพัฒนาให้สารเหมาะที่จะทำตัวเก็บประจุมากขึ้น นอกจากนี้จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการเจือสาร Dy_2O_3 ก็จะทำให้ค่า Maximum Resistivity ลดลงด้วย ดังรูปที่ 4.32 ซึ่งสอดคล้องกับที่ มีผู้ศึกษาไว้แล้ว^(5,10,29,30) และถ้าพิจารณาถึงผลของความพรุนต่อค่า Dielectric Strength และค่า Maximum Resistivity จะเห็นได้จากผลการทดลองได้ว่า เมื่อสารมีความพรุนมากขึ้น จะทำให้ค่า Dielectric Strength มีค่าลดลง ดังในรูปที่ 4.31 ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการที่สารมีช่องว่างปรากฏในเนื้อสาร จะทำให้เกิดการเบรคดาวน์ได้ง่ายขึ้น (ดังรายละเอียดในบทที่ 2) และส่งผลให้ค่า Maximum Resistivity ของสารเมื่อความพรุนมากขึ้นมีการลดลงด้วย อนึ่งสาร BaTiO_3 ที่ไม่ได้เจือสาร Dy_2O_3 จะมีค่ากระแสรั่วค่อนข้างสูง (ดังรูปที่ 4.19) แต่เมื่อมีการเจือสาร Dy_2O_3 เข้าไปจะทำให้สารที่ได้มีการรั่วของกระแสลดลง เราสามารถสรุปได้ว่า ความพรุนของสาร ไดอิเล็กตริกมีผลในการลดลงของค่า Dielectric Strength และค่า Resistivity

6. การศึกษา Microstructure ของสารที่เตรียมได้ จากลักษณะของ grain ในรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าในสาร BaTiO_3 ที่ไม่ได้เจือสาร Dy_2O_3 (รูปที่ 4.26 ก.) นั้นขนาดของ grain มีอยู่ในช่วงมากกว่า 30 μm และมีบาง grain ที่มีขนาดถึง 200 μm และเมื่อเจือสาร Dy_2O_3 เข้าไป (ดังรูปที่ 4.26 ข.-ค.) จะเห็นได้ว่าลักษณะของ grain ก็อยู่ในลักษณะเดิมคือมี grain ใหญ่ๆ บางเกรนเกิดขึ้น และไม่มีการลดลงของขนาด grain ซึ่งการเจือสาร Dy_2O_3 นั้นมีจุดประสงค์ที่ต้องการจะลดขนาดของ grain ลง^(5,29,30) แต่จากผลการทดลองนั้น แสดงให้เห็นว่า Dy_2O_3 ในการทดลองนี้ไม่ได้แสดงผลในการยับยั้งการเติบโตของเกรน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของความพรุนต่อลักษณะทาง Microstructure พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันมากนักเมื่อความพรุนของสารมากขึ้น (ดังรูปที่ 4.27) นั้นแสดงว่าความพรุนหรือรูพรุนไม่มีผลต่อการยับยั้งการเติบโตของเกรน ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีผู้ศึกษาไว้แล้ว⁽³³⁾



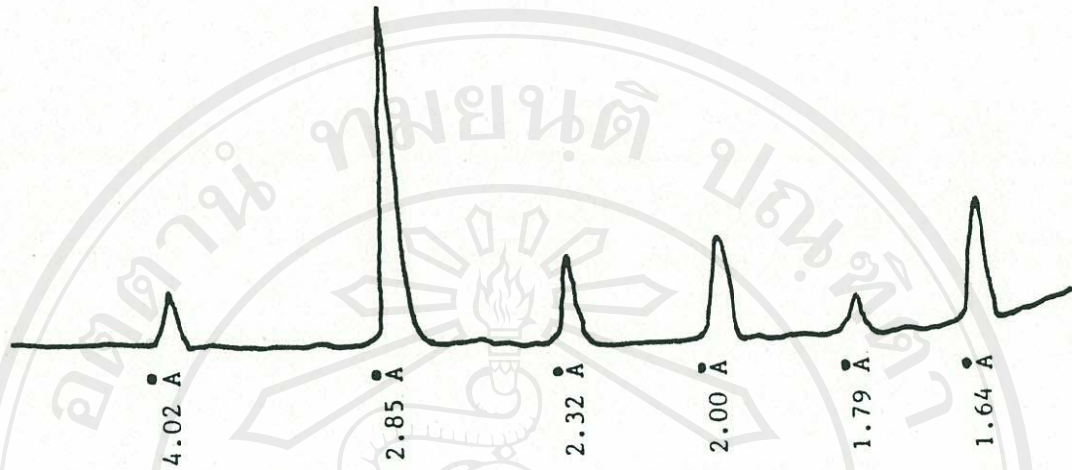
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Breakdown Voltage กับ Porosity



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum Resistivity กับ Porosity

7. จากผลการทดลองในขั้นตอนต่างๆ คือ การตรวจสอบโครงสร้างของสารด้วย X-Ray Diffractometer, การศึกษาผลของความพรุนต่อค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิและจากการศึกษา Microstructure ของสาร โดยเฉพาะการเลื่อนของอุณหภูมิคูรี (T_c) ของสาร BaTiO_3 ซึ่งปกติแล้วสาร BaTiO_3 มีอุณหภูมิคูรี (T_c) ประมาณ 120°C และเมื่อมีการเจือสาร Dy_2O_3 ในปริมาณ 0.2-1.2 mol% จะมีการเลื่อนของ T_c น้อยกว่า 10°C (5, 29, 30) แต่จากผลการทดลองพบว่ามี การเลื่อนของอุณหภูมิคูรี (T_c) อยู่ในช่วง $20-60^\circ\text{C}$ ในสารที่ไม่ได้เติมสาร PMMA (ดังรูปที่ 4.30) แสดงให้เห็นว่ามีสารอื่นปนเปื้อนมากับสารที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า (11, 35) สารที่ทำให้เกิดการเลื่อนของ T_c ลงมาคือ Sr, Zr และ Sn และจากการทดลองนำสารที่ได้จากการเตรียมไปหาสารที่เป็นองค์ประกอบโดยใช้ X-Ray Fluorescent (XRF) พบว่าสารที่เตรียมได้นั้นมีสาร Sr และ Zr ปะปนมาด้วย (ดังผลการทดสอบในภาคผนวก ข) ซึ่งเมื่อนำสาร BaCO_3 ที่ได้จากการ Upgraded ไปทดสอบด้วย XRF เช่นกัน พบว่า BaCO_3 ที่ได้จากการ Upgraded นั้นมีสาร Sr ปะปนมาในปริมาณที่มากพอสมควร ทั้งนี้ เพราะกระบวนการในการ Upgraded นั้นไม่สามารถจะแยก Sr และ Ba ออกจากกันได้ (BaCl_2 และ SrCl_2) ถึงแม้ว่าในการตรวจสอบในขั้นต้นด้วย X-Ray Diffractometer จะได้ Diffraction Pattern ที่สอดคล้องกับ BaCO_3 ที่บริสุทธิ์ และปริมาณของสาร Sr ก็ไม่มากเกินไป จึงไม่สามารถตรวจสอบความบริสุทธิ์ได้ด้วย X-Ray Diffraction ทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดลองและเมื่อพิจารณาถึงการปนเปื้อนของ Zr ในสารตัวอย่างนั้น เมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่า Zr ที่ปะปนมานั้นมาจากขั้นตอนการ Wet mill ด้วยเครื่องบดละเอียด Planetary Ball Mill ซึ่งอุปกรณ์ในการบดนั้นคือ ZrO_2 จึงทำให้มีการปนเปื้อนของสาร Zr มากับสารที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีนี้ เมื่อพิจารณาแล้วสารที่เตรียมได้ในการทดลองนี้ ซึ่งคาดหวังไว้ว่าจะเป็น $\text{Ba}_{1-x}\text{Dy}_x\text{TiO}_3$ แต่พบว่าสารที่ได้จากการเตรียมนี้น่าจะเป็นสารในระบบ $(\text{Ba}, \text{Sr}, \text{Dy})(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$ แทน ซึ่งจากการปนเปื้อนของสาร Sr และ Zr ในสารตัวอย่างนั้น ทำให้สามารถพิจารณาผลการทดลองได้ดังนี้

7.1 พิจารณาจากผลการทดลองของการศึกษาโครงสร้างของสารด้วย X-Ray Diffractometer เมื่อนำสาร BaTiO_3 ซึ่งมีความบริสุทธิ์ 99.8 % มาทำการหา X-Ray Diffraction Pattern (ภาคผนวก ข) และเปรียบเทียบกับสารที่ได้จากการเตรียม จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งค่า d-spacing เท่ากับ $3.18 \text{ \AA}$ และ $2.15 \text{ \AA}$ ในสารที่เตรียมได้นั้นไม่ใช่ว่า d-spacing ของสาร BaTiO_3 บริสุทธิ์ ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 แสดง Diffraction Pattern ของ BaTiO_3

จากการค้นคว้าจากการทดลองที่ผู้ศึกษาไว้แล้ว (1,33) พบว่าตำแหน่งค่า d-spacing มีค่าเท่ากับ $3.18 \text{ \AA}$ นั้นอาจจะเป็นผลมาจาก ZrO_2 ที่ตกค้างอยู่ และตำแหน่ง d-spacing ที่มีค่าเท่ากับ $2.15 \text{ \AA}$ นั้นไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นสารใด (แต่จากการศึกษาโดยตรวจสอบจาก JCPDS Card no. 35-817 พบว่าตำแหน่งของ d-spacing เท่ากับ $2.15 \text{ \AA}$ นั้นอาจจะเป็นผลมาจากสาร $\text{Ba}_6\text{Ti}_{17}\text{O}_{40}$ ซึ่งเกิดเนื่องมาจากผลของ Ba/Ti ที่มีค่า < 1 ซึ่งผู้ทดลองคาดว่าสารที่ได้จากการเตรียมอาจจะมีค่า Ba/Ti < 1 เพราะว่าตำแหน่งของ Ba นั้นถูกแทนที่มากกว่า Ti) ดังนั้นจาก Diffraction Pattern ในรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าสารที่เตรียมได้นั้นมีสารอื่นปะปนมาด้วย ทำให้ Diffraction Pattern แตกต่างกับสาร BaTiO_3 ที่บริสุทธิ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.33 และ ผลในภาคผนวก ข.

7.2 จากการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น ทำให้สรุปได้ถึงการเลื่อนอนุกรมคูรี (T_c) ในการทดลองของสมบัติไดอิเล็กตริกเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ (ดังรูปที่ 4.5-4.11) ทั้งนี้เป็นเพราะมีการปนเปื้อนของสาร Sr และ Zr มาในสารตัวอย่าง ซึ่งสารดังกล่าวก็มีผลทำให้เกิดการเลื่อนอนุกรมคูรี แต่เมื่อพิจารณาผลของความพรุนนั้นสามารถสรุปได้ว่าความพรุนมีผลต่อการเลื่อนอนุกรมคูรี T_c บ้างเล็กน้อย (เมื่อเทียบกับสารที่มีความพรุนเป็นศูนย์)

7.3 เมื่อพิจารณาถึง Microsturcture ของสาร ซึ่งพบว่าสารที่เตรียมได้มีขนาดของ grain ที่ใหญ่และมีการกระจายตัวไม่ดี เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารเจือ Dy ซึ่งมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับสาร Sr และ Zr ที่ปนเปื้อนเข้ามาในสารตัวอย่าง ทำให้ผลของ Dy ในการยับยั้งการเติบโตของเกรนนั้นถูกลดลงไป นอกจากนี้จากการศึกษา^(11,36-38) พบว่าสาร Zr ที่ปนเปื้อนเข้ามามีทำให้เกิดการกระจายตัวของขนาด grain ได้ โดยมีทั้ง grain ขนาดเล็กและใหญ่อยู่ร่วมกัน และการที่ค่า $Ba/Ti < 1$ นั้นมีผลทำให้เกิด $Ba_6Ti_{17}O_{40}$ เกิดขึ้นซึ่งส่งผลให้เกิดการขยายตัวของ grain มาก ทำให้มี grain บางอันที่มีขนาดใหญ่มากปะปนอยู่ เราอาจจะสรุปได้ว่า การปนเปื้อนของสาร Sr และ Zr ทำให้ลักษณะทาง Microstructure ของสารเปลี่ยนแปลงไปได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved