ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 ผลการขึ้นรูปสารตัวอย่างที่ใช้แรงอัดและอุณหภูมิในการทดลอง

แรงอัด และตันอุณหภูมิที่ใช้	ความพรุน (%)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	การดูดซับน้ำ (%)
แรงอัด 1ตันอุณหภูมิ 25 °C	36.43	3.05	12.83
แรงอัด 1ตันอุณหภูมิ 50 °C	34.28	3.13	12.52
แรงอัด 1ตันอุณหภูมิ 100 °C	31.46	3.21	11.99
แรงอัด 1ตันอุณหภูมิ 150 °C	28.92	3.32	9.58
แรงอัด 1ตันอุณหภูมิ 200 °C	26.38	3.45	8.17
แรงอัด 1ตันอุณหภูมิ 250 °C	แตกขึ้นรูปไม่ได้	แตกขึ้นรูปไม่ได้	แตกขึ้นรูปไม่ได้
แรงอัด 1ตันอุณหภูมิ 300 °C	แตกขึ้นรูปไม่ได้	แตกขึ้นรูปไม่ได้	แตกขึ้นรูปไม่ได้

แรงอัด และตันอุณหภูมิที่ใช้	ความพรุน (%)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	การดูดซับน้ำ (%)
แรงอัด 2ตันอุณหภูมิ 25 °C	31.58	3.38	17.28
แรงอัด 2ตันอุณหภูมิ 50 °C	30.78	3.44	17.23
แรงอัด 2ตันอุณหภูมิ 100 °C	29.61	3.51	17.11
แรงอัด 2ตันอุณหภูมิ 150 °C	29.17	3.53	17.08
แรงอัด 2ตันอุณหภูมิ 200 °C	28.42	3.57	16.99
แรงอัด 2ตันอุณหภูมิ 250 °C	28.24	3.65	16.92
แรงอัด 2ตันอุณหภูมิ 300 °C	แตกขึ้นรูปไม่ได้	แตกขึ้นรูปไม่ได้	แตกขึ้นรูปไม่ได้

ตาราง ก-1 (ต่อ)

แรงอัด และตันอุณหภูมิที่ใช้	ความพรุน (%)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	การดูดซับน้ำ (%)
แรงอัด 3ตันอุณหภูมิ 25 °C	27.76	3.63	17.32
แรงอัด 3ตันอุณหภูมิ 50 °C	27.20	3.67	17.13
แรงอัด 3ตันอุณหภูมิ 100 °C	26.86	3.68	17.02
แรงอัด 3ตันอุณหภูมิ 150 °C	26.59	3.72	16.95
แรงอัด 3ตันอุณหภูมิ 200 °C	26.26	3.78	16.93
แรงอัด 3ตันอุณหภูมิ 250 °C	26.12	3.84	16.87
แรงอัด 3ตันอุณหภูมิ 300 °C	แตกขึ้นรูปไม่ได้	แตกขึ้นรูปไม่ได้	แตกขึ้นรูปไม่ได้

แรงอัด และตันอุณหภูมิที่ใช้	ความพรุน (%)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	การดูดซับน้ำ (%)
แรงอัด 5ตันอุณหภูมิ 25 °C	26.58	3.56	18.74
แรงอัด 5ตันอุณหภูมิ 50 °C	24.29	3.86	17.28
แรงอัด 5ตันอุณหภูมิ 100 °C	22.32	3.94	17.12
แรงอัด 5ตันอุณหภูมิ 150 °C	21.34	4.02	16.99
แรงอัด 5ตันอุณหภูมิ 200 °C	20.13	4.09	16.92
แรงอัด 5ตันอุณหภูมิ 250 °C	19.78	4.12	16.73
แรงอัด 5ตันอุณหภูมิ 300 °C	แตกขึ้นรูปไม่ได้	แตกขึ้นรูปไม่ได้	แตกขึ้นรูปไม่ได้

แรงอัด และตันอุณหภูมิที่ใช้	ความพรุน (%)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	การดูดซับน้ำ (%)
แรงอัด 10ตันอุณหภูมิ 25 °C	แม่พิมพ์ทนไม่ได้		
แรงอัด 10ตันอุณหภูมิ 50 °C	แม่พิมพ์ทนไม่ได้		
แรงอัด 10ตันอุณหภูมิ 100°C	แม่พิมพ์ทนไม่ได้		
แรงอัด 10ตันอุณหภูมิ 150°C	แม่พิมพ์ทนไม่ได้		
แรงอัด 10ตันอุณหภูมิ 200°C	แม่พิมพ์ทนไม่ได้		
แรงอัด 10ตันอุณหภูมิ 250°C	แม่พิมพ์ทนไม่ได้		
แรงอัด 10ตันอุณหภูมิ 300°C	แม่พิมพ์ทนไม่ได้		

ตาราง ก-2 ผลการวัดเปอร์เซ็นต์ความพรุน เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นและ เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่มีผลมาจากแรงอัดและอุณหภูมิในการทดลอง

แรงอัดและอุณหภูมิ	ความพรุน (%)		ความหนาแน่น (kg/m^3)		การดูดซึมน้ำ (%)	
	$BaTiO_3$	$KNbO_3$	$BaTiO_3$	$KNbO_3$	$BaTiO_3$	$KNbO_3$
1 t 25 °C	36.43	32.25	3.05	3.64	12.83	11.35
1 t 50 °C	34.28	31.02	3.13	3.78	12.52	11.21
1 t 100 °C	31.46	29.22	3.21	3.92	11.99	11.08
1 t 150 °C	28.92	28.13	3.32	4.13	9.58	10.65
1 t 200 °C	26.38	27.11	3.45	4.28	8.17	10.32
1 t 250 °C	-	-	-	-	-	-
1 t 300 °C	-	-	-	-	-	-

แรงอัดและอุณหภูมิ	ความพรุน (%)		ความหนาแน่น (kg/m^3)		การดูดซึมน้ำ (%)	
	$BaTiO_3$	$KNbO_3$	$BaTiO_3$	$KNbO_3$	$BaTiO_3$	$KNbO_3$
2 t 25 °C	31.58	29.25	3.38	4.48	17.28	15.21
2 t 50 °C	30.78	28.32	3.44	4.57	17.23	15.09
2 t 100 °C	29.61	27.21	3.51	4.65	17.11	14.88
2 t 150 °C	29.17	26.79	3.53	4.76	17.08	14.23
2 t 200 °C	28.42	26.09	3.57	4.88	16.99	13.97
2 t 250 °C	28.24	25.68	3.65	4.96	16.92	13.76
2 t 300 °C	-	-	-	-	-	-

ตาราง ก-2 (ต่อ)

แรงอัดและอุณหภูมิ	ความพรุน (%)		ความหนาแน่น (kg/m^3)		การดูดซึมน้ำ (%)	
	$BaTiO_3$	$KNbO_3$	$BaTiO_3$	$KNbO_3$	$BaTiO_3$	$KNbO_3$
3 t 25 °C	27.76	26.22	3.63	4.87	17.32	14.22
3 t 50 °C	27.2	25.34	3.67	4.98	17.13	14.10
3 t 100 °C	26.86	25.02	3.68	5.12	17.02	13.87
3 t 150 °C	26.59	24.76	3.72	5.34	16.95	13.56
3 t 200 °C	26.26	24.25	3.78	5.47	16.93	13.25
3 t 250 °C	26.12	23.88	3.84	5.68	16.87	12.92
3 t 300 °C	-	-	-	-	-	-

แรงอัดและอุณหภูมิ	ความพรุน (%)		ความหนาแน่น (kg/m^3)		การดูดซึมน้ำ (%)	
	$BaTiO_3$	$KNbO_3$	$BaTiO_3$	$KNbO_3$	$BaTiO_3$	$KNbO_3$
5 t 25 °C	26.58	22.56	3.56	5.52	18.74	12.86
5 t 50 °C	24.29	22.04	3.86	5.63	17.28	12.66
5 t 100 °C	22.32	21.27	3.94	5.71	17.12	12.35
5 t 150 °C	21.34	20.45	4.02	5.79	16.99	12.06
5 t 200 °C	20.13	19.89	4.09	5.83	16.92	11.98
5 t 250 °C	19.78	19.12	4.12	5.90	16.73	11.45
5 t 300 °C	-	-	-	-	-	-

ตาราง ก-3 แสดงค่าความถี่กับการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์

Frequency (kHz)	Voltage (mV)	Frequency (kHz)	Voltage (mV)	Frequency (kHz)	Voltage (mV)
34.10	16.00	43.10	24.00	62.50	33.20
34.20	16.40	43.20	24.20	62.60	33.30
34.30	16.60	43.25	24.30	62.70	33.40
34.31	16.60	43.30	24.40	62.80	33.60
34.32	16.70	43.31	24.40	62.81	33.60
34.33	16.80	43.32	24.50	62.82	33.70
34.34	16.90	43.33	24.50	62.83	33.70
34.35	17.00	43.34	24.60	62.84	33.80
34.36	17.00	43.35	24.60	62.85	33.80
34.37	17.10	43.36	24.70	62.86	33.90
34.38	17.20	43.37	24.70	62.87	33.90
34.39	17.20	43.38	24.80	62.88	34.00
34.40	17.30	43.39	24.90	62.89	34.10
34.41	17.40	43.40	25.00	62.90	34.20
34.42	17.40	43.41	25.20	62.91	34.40
34.43	17.60	43.42	25.40	62.92	34.60
34.44	17.80	43.43	25.60	62.93	34.80
34.45	17.80	43.44	26.00	62.94	35.00
34.46	17.90	43.45	26.30	62.95	35.30
34.47	18.10	43.46	26.50	62.96	35.50
34.48	18.30	43.47	27.00	62.97	35.80
34.49	18.50	43.48	27.40	62.98	36.20
34.50	18.70	43.49	28.00	62.99	37.00
34.58	17.00	43.50	28.80	63.00	37.50
34.64	15.80	43.54	26.30	63.02	35.00
34.65	16.20	43.57	24.40	63.04	32.50
34.66	16.60	43.60	22.50	63.06	30.10

ตาราง ก-3 (ต่อ)

Frequency (kHz)	Voltage (mV)	Frequency (kHz)	Voltage (mV)	Frequency (kHz)	Voltage (mV)
34.67	17.00	43.61	23.20	63.07	30.90
34.68	17.20	43.62	23.80	63.08	31.50
34.69	17.40	43.63	24.60	63.09	31.90
34.70	17.40	43.64	25.00	63.10	32.30
34.71	17.60	43.65	25.40	63.11	32.60
34.72	17.60	43.66	25.80	63.12	32.80
34.73	17.80	43.67	26.00	63.13	33.00
34.74	18.00	43.68	26.30	63.14	33.20
34.75	18.00	43.69	26.50	63.15	33.30
34.76	18.10	43.70	26.90	63.16	33.40
34.77	18.20	43.75	27.40	63.17	33.50
34.78	18.30	43.80	27.80	63.18	33.70
34.79	18.30	43.85	28.20	63.19	33.80
34.80	18.40	43.90	28.60	63.20	33.80
34.81	18.40	44.00	29.00	63.25	34.00

Frequency (kHz)	Voltage (mV)	Frequency (kHz)	Voltage (mV)	Frequency (kHz)	Voltage (mV)
105.00	47.20	126.00	45.90	129.00	59.90
106.00	47.40	126.80	46.00	129.80	60.00
107.00	47.60	127.00	46.10	130.00	60.10
107.40	47.70	127.20	46.20	130.20	60.20
107.60	47.80	127.30	46.30	130.30	60.30
107.80	47.80	127.30	46.30	130.30	60.30
108.00	47.90	127.40	46.40	130.40	60.40
108.20	47.90	127.40	46.50	130.40	60.50
108.40	48.00	127.50	46.60	130.50	60.60

ตาราง ก-3 (ต่อ)

Frequency (kHz)	Voltage (mV)	Frequency (kHz)	Voltage (mV)	Frequency (kHz)	Voltage (mV)
108.60	48.10	127.50	46.70	130.50	60.70
108.80	48.30	127.60	47.20	130.60	61.20
109.00	48.50	127.70	47.80	130.70	61.80
109.20	48.80	127.80	48.50	130.80	62.50
109.40	49.10	127.80	49.00	130.80	63.20
109.60	49.50	128.00	48.50	131.40	61.80
109.80	50.00	128.80	46.50	132.00	59.60
110.00	50.40	129.60	45.00	132.60	56.00
111.00	48.20	129.70	45.50	132.70	57.80
112.00	46.00	129.70	45.80	132.70	58.60
112.20	46.80	129.80	46.00	132.80	59.40
112.40	47.40	129.80	46.20	132.80	59.80
112.60	47.80	129.90	46.30	132.90	60.00
112.80	48.10	129.90	46.50	132.90	60.10
113.00	48.30	130.20	47.00	133.00	60.20
113.20	48.40	131.40	48.00	133.00	60.30

Frequency (kHz)	Voltage (mV)	Frequency (kHz)	Voltage (mV)	Frequency (kHz)	Voltage (mV)
112.00	144.90	120.00	109.20	146.00	127.90
112.80	145.00	121.00	109.40	146.80	128.00
113.00	145.10	122.00	109.60	147.00	128.10
113.20	145.20	122.40	109.70	147.20	128.20
113.30	145.30	122.60	109.80	147.30	128.30
113.30	145.30	122.80	109.80	147.40	128.50
113.40	145.40	123.00	109.90	147.50	128.70
113.40	145.50	123.20	109.90	147.60	129.20

ตาราง ก-3 (ต่อ)

Frequency (kHz)	Voltage (mV)	Frequency (kHz)	Voltage (mV)	Frequency (kHz)	Voltage (mV)
113.50	145.60	123.40	110.00	147.70	129.80
113.50	145.70	123.60	110.10	148.40	126.00
113.60	146.20	123.80	110.30	148.90	123.40
113.70	146.80	124.00	110.50	149.10	124.40
113.80	147.50	124.20	110.80	149.20	125.20
113.80	148.10	124.40	111.10	149.40	125.90
114.80	145.00	124.60	111.50	149.50	126.30
115.60	142.70	124.80	112.00	149.60	126.50
116.00	141.80	125.00	112.40	149.80	126.80
116.10	144.00	125.90	110.00	150.00	127.00
116.20	145.20	126.80	107.60	151.00	128.00

ตาราง ก-4 แสดงค่าความถี่กับการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์

1.0 ton 50 °C1.15 mm								
ความถี่ (Hz)	Cp (pF)				D			
	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	351.30	348.60	347.30	349.10	0.70	0.71	0.71	0.71
120	324.10	319.80	326.20	323.40	0.55	0.57	0.54	0.56
1000	251.36	252.11	253.75	252.41	0.42	0.42	0.42	0.42
10000	235.81	235.49	235.62	235.64	0.22	0.22	0.22	0.22
100000	205.73	206.42	205.81	205.99	0.12	0.12	0.12	0.12

ตาราง ก-4 (ต่อ)

1.0 ton 50 °C1.15 mm								
ความถี่	Cp (pF)				D			
(Hz)	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	351.30	348.60	347.30	349.10	0.70	0.71	0.71	0.71
120	324.10	319.80	326.20	323.40	0.56	0.57	0.54	0.56
1000	251.36	252.11	253.75	252.41	0.42	0.42	0.42	0.42
10000	235.81	235.49	235.62	235.64	0.22	0.22	0.22	0.22
100000	205.73	206.42	205.81	205.99	0.12	0.12	0.12	0.12

1.5 ton 50 °C1.25 mm								
ความถี่	Cp (pF)				D			
(Hz)	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	321.90	318.60	320.90	320.50	1.31	1.25	1.23	1.26
120	298.70	298.40	298.20	298.40	1.12	1.12	1.11	1.12
1000	198.22	198.04	197.91	198.06	0.37	0.38	0.38	0.63
10000	160.12	160.27	160.19	160.19	0.14	0.14	0.14	0.14
100000	140.98	141.17	140.86	141.00	0.10	0.10	0.10	0.10
2.5 ton 50 °C1.10 mm								
ความถี่	Cp (pF)				D			
(Hz)	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	360.50	359.40	358.30	359.40	6.72	6.70	6.71	6.71
120	344.60	344.50	344.00	344.40	5.870	5.87	5.87	5.87
1000	266.04	265.92	265.81	265.92	1.00	1.00	1.00	0.62
10000	225.40	225.39	225.37	225.39	0.20	0.20	0.20	0.20
100000	199.87	199.54	199.62	119.68	0.10	0.10	0.10	0.10

ตาราง ก-4 (ต่อ)

3.0 ton 50 °C1.10 mm								
ความถี่ (Hz)	Cp (pF)				D			
	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	638.40	638.30	637.90	638.20	3.46	3.47	3.48	3.47
120	609.70	609.90	608.90	609.50	3.10	3.11	3.10	3.11
1000	429.56	429.37	429.19	429.37	0.64	0.72	0.84	0.47
10000	313.24	312.81	311.98	312.68	0.22	0.22	0.212	0.22
100000	260.31	259.82	260.11	260.08	0.21	0.21	0.21	0.21

1.0 ton 100 °C1.00 mm								
ความถี่ (Hz)	Cp (pF)				D			
	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	187.50	187.40	187.40	187.40	0.68	0.69	0.69	0.69
120	180.50	180.40	180.30	180.40	0.64	0.64	0.64	0.64
1000	122.90	123.43	122.96	113.10	0.29	0.29	0.29	0.36
10000	98.80	99.20	98.86	98.95	0.13	0.13	0.13	0.13
100000	86.23	86.19	86.02	86.15	0.01	0.10	0.10	0.10
1.5 ton 100 °C1.05 mm								
ความถี่ (Hz)	Cp (pF)				D			
	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	289.10	288.50	288.10	288.60	0.40	0.40	0.40	0.60
120	278.60	278.30	278.10	278.30	0.38	0.37	0.37	0.57
1000	219.96	220.10	219.33	219.80	0.16	0.17	0.17	0.31
10000	192.24	192.18	192.10	192.17	0.09	0.08	0.08	0.08
100000	173.62	173.57	173.44	173.54	0.08	0.08	0.08	0.08

ตาราง ก-4 (ต่อ)

2.0 ton 100 °C0.80 mm								
ความถี่	Cp (pF)				D			
(Hz)	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	572.20	571.40	571.70	571.80	1.78	1.77	1.77	1.77
120	549.70	549.40	549.00	549.40	1.59	1.59	1.61	1.60
1000	387.04	386.96	386.77	386.92	0.42	0.42	0.45	0.37
10000	317.47	317.27	317.19	317.31	0.15	0.15	0.15	0.15
100000	274.98	275.13	274.78	274.96	0.10	0.10	0.10	0.10
2.5 ton 100 °C1.10 mm								
ความถี่	Cp (pF)				D			
(Hz)	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	394.30	388.60	366.20	383.00	0.98	0.97	0.99	0.99
120	383.80	377.60	381.30	380.90	0.95	0.94	0.97	0.95
1000	230.03	229.73	228.96	229.57	0.35	0.35	0.35	0.28
10000	176.79	176.91	176.83	176.84	0.16	0.16	0.16	0.16
100000	149.98	149.83	149.99	149.93	0.11	0.11	0.11	0.11

3.0 ton 100 °C1.15 mm								
ความถี่	Cp (pF)				D			
(Hz)	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	600.70	598.10	597.20	598.70	0.78	0.80	0.80	0.79
120	560.70	565.10	566.70	564.10	0.77	0.77	0.77	0.77
1000	333.41	333.76	333.23	333.47	0.37	0.38	0.38	0.27
10000	262.20	261.96	261.66	261.94	0.14	0.14	0.14	0.14
100000	229.64	230.05	229.81	229.83	0.09	0.09	0.09	0.09

ตาราง ก-4 (ต่อ)

1.0 ton 150 °C1.15 mm								
ความถี่	Cp (pF)				D			
(Hz)	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	720.20	722.90	724.30	722.50	0.98	0.99	0.98	0.99
120	705.30	711.20	708.60	708.40	0.90	0.90	0.88	0.89
1000	458.96	458.66	458.71	458.78	0.47	0.47	0.47	0.47
10000	393.93	393.97	393.88	393.93	0.15	0.15	0.15	0.15
100000	336.51	336.49	337.13	336.71	0.14	0.13	0.13	0.13
2.0 ton 150 °C1.10 mm								
ความถี่	Cp (pF)				D			
(Hz)	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	901.40	900.30	899.60	900.40	0.83	0.83	0.83	0.83
120	860.50	860.10	859.80	860.10	0.76	0.77	0.77	0.77
1000	613.12	612.98	612.87	612.99	0.29	0.29	0.29	0.49
10000	490.52	490.49	490.42	490.48	0.15	0.15	0.15	0.15
100000	413.82	414.21	413.78	413.94	0.12	0.12	0.11	0.12
2.5 ton 150 °C1.05 mm								
ความถี่	Cp (pF)				D			
(Hz)	1	2	3	mean	1	2	3	mean
100	523.80	524.90	525.20	524.60	1.34	1.36	1.36	1.35
120	490.10	490.10	491.30	490.80	1.24	1.24	1.23	1.23
1000	281.96	281.88	282.13	281.99	0.49	0.48	0.48	0.48
10000	215.40	215.33	215.44	215.39	0.17	0.17	0.17	0.16
100000	187.03	186.94	187.17	187.05	0.10	0.10	0.10	0.09

ตาราง ก-5 แสดงค่าความพรุนและค่า d_h, g_h, FoM และ M

Pressure	Porosity (%)			d_h (pCN^{-1})		
(ton)	50	100	150	50	100	150
1	31.16	26.61	28.62	67.67	130.50	87.00
1.5	26.98	26.43	27.42	106.33	106.33	98.23
2	24.85	25.85	26.34	99.87	87.00	111.17
2.5	22.22	23.37	25.94	96.67	72.50	101.50
3	19.42	23.20	24.32	87.00	62.83	96.23

Pressure	porosity (%)			g_h ($mVm^{-1}.Pa^{-1}$)		
(ton)	50	100	150	50	100	150
1	31.16	26.61	28.62	4.58	20.81	3.24
1.5	26.98	26.43	27.35	8.43	9.04	3.24
2	24.85	25.85	26.34	7.45	5.52	3.24
2.5	22.22	23.37	25.94	6.49	5.63	6.73
3	19.42	23.20	24.32	3.62	3.22	4.26

Pressure	porosity (%)			FoM ($x10^{-15}.Pa^{-1}$)		
(ton)	50	100	150	50	100	150
1	31.16	26.61	28.62	301.00	2715.00	281.00
1.5	26.98	26.43	27.54	896.00	961.00	321.00
2	24.36	25.85	26.34	739.00	480.00	360.00
2.5	22.22	23.37	25.94	627.00	408.00	683.00
3	19.42	23.20	24.36	314.00	202.00	465.00

ตาราง ก-5 (ต่อ)

pressure	Porosity (%)			M ($uV.Pa^{-1}$)		
(ton)	50	100	150	50	100	150
1	31.16	26.61	28.62	5.22	20.81	3.72
1.5	26.98	26.43	27.22	1.05	9.49	3.62
2	24.32	25.85	26.34	4.52	4.41	3.56
2.5	22.22	23.37	25.94	7.13	6.20	7.06
3	19.42	23.20	26.22	3.98	3.70	7.44

ตาราง ก-6 แสดงค่าแอมปลิจูดกับระยะการกระจัด

Distance	Amplitude (Volt)				
(m)	No.1	No.2	No.3	A_{AV}	SD
0.01	3.76	3.84	3.79	3.80	0.04
0.02	2.20	2.16	2.20	2.19	0.02
0.03	1.04	1.00	1.04	1.03	0.02
0.04	0.56	0.52	0.52	0.53	0.02
0.05	0.32	0.40	0.32	0.35	0.05
0.06	0.23	0.22	0.22	0.22	0.01

Distance	Amplitude (Volt)				
(m)	No.1	No.2	No.3	A_{AV}	SD
0.005	2.42	2.56	2.72	2.57	0.15
0.01	1.20	1.26	1.00	1.15	0.14
0.015	0.64	0.76	0.74	0.71	0.06
0.02	0.56	0.60	0.61	0.59	0.03
0.025	0.29	0.38	0.37	0.35	0.05

ตาราง ก-6 (ต่อ)

Distance	Amplitude (Volt)				
(m)	No. 1	No. 2	No. 3	A_{AV}	SD
0.01	7.44	7.52	7.36	7.44	0.08
0.02	5.28	5.36	5.52	5.39	0.12
0.03	4.80	4.88	4.72	4.80	0.08
0.04	4.50	4.57	4.61	4.56	0.06
0.05	4.28	4.24	4.24	4.25	0.02
0.06	3.52	3.56	3.52	3.53	0.02
0.07	3.24	3.20	3.16	3.20	0.04
0.08	2.96	3.04	3.00	3.00	0.04
0.09	2.76	2.52	2.64	2.64	0.12
0.10	2.32	2.28	2.24	2.28	0.04
0.11	2.16	2.20	2.24	2.20	0.04
0.12	2.01	2.15	2.16	2.11	0.08
0.13	1.96	1.92	1.86	1.91	0.05
0.14	1.82	1.72	1.68	1.74	0.07
0.15	1.50	1.42	1.62	1.51	0.10

Distance	Amplitude (Volt)				
(m)	No. 1	No. 2	No. 3	A_{AV}	SD
0.01	12.65	12.40	12.11	12.39	0.27
0.02	11.04	11.10	10.10	11.05	0.05
0.03	9.84	9.76	9.10	9.86	0.11
0.04	9.28	9.20	9.28	9.25	0.04
0.05	8.80	8.78	8.72	8.77	0.04
0.06	8.48	8.24	8.00	8.24	0.24
0.07	7.76	7.84	7.60	7.73	0.12

ตาราง ก-6 (ต่อ)

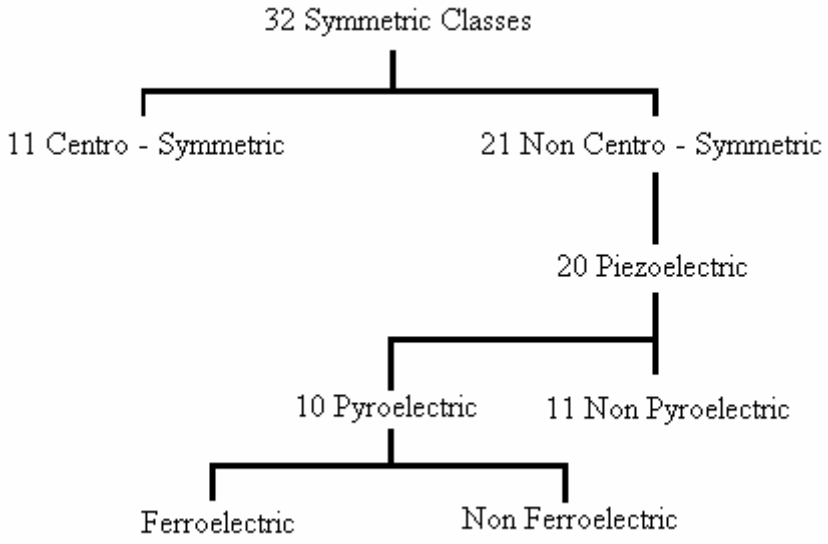
Distance	Amplitude (Volt)				
(m)	No. 1	No. 2	No. 3	A_{AV}	SD
0.08	6.72	6.72	6.72	6.72	0.00
0.09	6.56	6.40	6.48	6.48	0.08
0.10	5.76	5.68	5.62	5.69	0.07
0.11	4.88	4.89	4.56	4.78	0.19
0.12	4.24	4.32	4.24	4.27	0.05
0.13	4.00	4.24	4.08	4.11	0.12
0.14	3.92	4.08	3.95	3.98	0.09
0.15	3.85	3.68	3.87	3.80	0.10

Distance	Amplitude (Volt)				
(m)	No.1	No.2	No.3	A_{AV}	SD
0.01	3.76	3.84	3.79	3.80	0.04
0.02	2.20	2.16	2.20	2.19	0.02
0.03	1.04	1.00	1.04	1.03	0.02
0.04	0.56	0.52	0.52	0.53	0.02
0.05	0.32	0.40	0.32	0.35	0.05
0.06	0.23	0.22	0.22	0.22	0.01

Distance	Amplitude (Volt)				
(m)	No.1	No.2	No.3	A_{AV}	SD
0.01	2.42	2.56	2.72	2.57	0.15
0.02	1.20	1.26	1.00	1.15	0.14
0.03	0.64	0.76	0.74	0.71	0.06
0.04	0.56	0.60	0.61	0.59	0.03
0.05	0.29	0.38	0.37	0.35	0.05

ภาคผนวก ข

ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกค้นพบครั้งแรก ปี ค.ศ. 1880 โดย ปีแอร์ คูรี และ แจ็ค คูรี ซึ่งทั้งสองได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อให้แรงกด-อัดแก่ ผลึกควอตซ์ จะเกิดประจุที่บริเวณผิวของวัสดุ โดยปริมาณประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงกด-อัด แต่เมื่อเอาแรงกด-อัดออก ประจุที่บริเวณผิวหน้าทั้งสองจะหายไป ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบตรง คำว่า “piezo” มาจากภาษากรีก หมายถึง “press” การนำคำว่า “piezo” มาใช้กับคำว่า “electric” เป็น “piezoelectric” ซึ่งเกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงไฟฟ้า แต่ปีแอร์ คูรี และ แจ็ค คูรี ไม่ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติไพอิโซอิเล็กตริกแบบผันกลับในทันที สมบัติดังกล่าวได้จากการเขียนสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์เบื้องต้นโดย ลิปแมนน์ (Lippmann) ในปี 1881 ซึ่งใช้ทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ทำนายว่า มีปรากฏการณ์แบบผันกลับ ในวัสดุดังกล่าวเช่นกัน ในระยะต่อมามีการศึกษาค้นคว้าเพื่อวางรากฐานทางด้านไพอิโซอิเล็กตริก ซึ่งมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่มีส่วนร่วมในการพัฒนาปรับปรุงวางกฎเกณฑ์และทฤษฎีต่างๆ เช่น ลอร์ด เคลวิน (Lord Kelvin) โวล์มาร์ วอยท์ (Woldemar Voigt) ร่วมกันตั้งกฎและทฤษฎี เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริก ความเป็นไพอิโซอิเล็กตริกนั้นจะขึ้นกับลักษณะสมมาตร(symmetry) ของหน่วยเซลล์ (unit cell) โดยสารที่สามารถแสดงสมบัติไพอิโซอิเล็กตริกได้ดีนั้นจะต้องมีหน่วยเซลล์ที่ไม่มีศูนย์กลางความสมมาตร (non-centrosymmetry) มีการจัดกลุ่มผลึกตามความสมมาตรของผลึก แสดงดังภาพประกอบที่ ข-1 ซึ่งสามารถแบ่งผลึกออกเป็น 32 กลุ่ม (crystal class หรือ point group) โดยมีกลุ่มผลึก 21 กลุ่มที่ขาดจุดศูนย์กลางความสมมาตรและในจำนวนนี้มี 20 กลุ่ม ที่แสดงสมบัติความเป็นไพอิโซ อิเล็กตริก



ภาพประกอบที่ ข-1 แสดงการจัดกลุ่มผลึกตามความสมมาตรของผลึก

(ที่มา : Lang and Gupta, 2000)

สมบัติไพอิโซอิเล็กตริก

ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกเกี่ยวข้องกับสมบัติกลและไฟฟ้าของวัสดุ เมื่อให้ความเค้นกล แก่วัสดุไพอิโซเซรามิกจะก่อให้เกิดการกระจัดทางไฟฟ้าขึ้น และในทางกลับกันเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้แก่วัสดุไพอิโซอิเล็กตริกจะทำให้เกิดความเครียด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางกลของวัสดุ ดังนี้

$$D=dT+\varepsilon^{T}E \qquad (1)$$

$$S = s^{E}T + dE \qquad (2)$$

D คือ การกระจัดทางไฟฟ้า[1] (electric displacement)

T คือ ความเค้นกล (mechanical stress) มีหน่วยเป็น $N.m^{-2}$

E คือ สนามไฟฟ้า (mechanical strain) มีหน่วยเป็น $V.m^{-1}$

S คือ ความเครียดกล (mechanical strain)

d คือ ค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กตริกความเครียด (piezoelectric strain coefficient) มีหน่วยเป็น $m.V^{-1}$

s^{E} คือ ค่าคงที่ยืดหยุ่น (elastic compliance) ภายใต้สนามไฟฟ้าคงที่ มีหน่วยเป็น $m.N^{-1}$

ε^{T} คือ สภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของตัวกลาง (permittivity) ภายใต้ความเค้นคงที่ มีหน่วยเป็น $F.m^{-1}$

จากสมการที่ (1) เมื่อสนามไฟฟ้าคงที่ หรือ $E = 0$ จะได้ ดังนี้

$$D = dT \qquad (3)$$

ทำนองเดียวกัน กรณีที่ความเค้นกลมีค่าคงที่หรือ $T = 0$ สมการที่ (2) จะลดรูปจะได้

---

[1] การกระจัดทางไฟฟ้า (D) มีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามไฟฟ้า (E) และโพลาไรเซชัน (P) ของวัสดุดังสมการ $D = \varepsilon E + P$ เมื่อ ε คือสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของตัวกลาง (Nye, 1987:68)

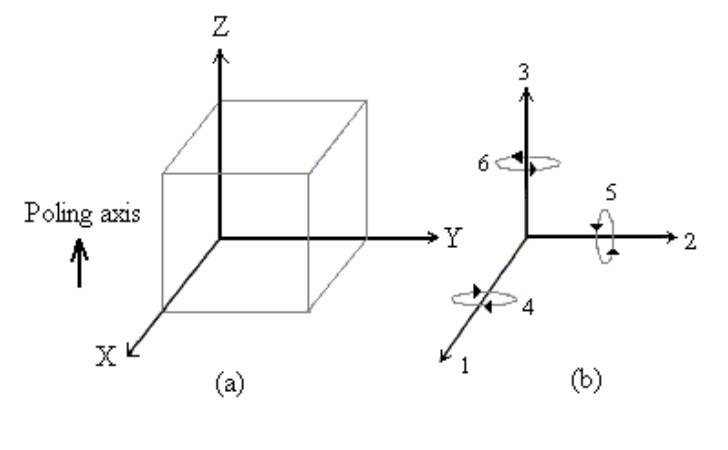
$$S = dE \tag{4}$$

อย่างไรก็ตาม ถ้าสารตัวอย่างไม่มีสมบัติไพอิโซอิเล็กตริก จากสมการ จะหมายถึงสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสารทั่วไป ดังนี้

$$D = \varepsilon^T E \tag{5}$$

$$S = s^E T \tag{6}$$

สัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กตริกบางชนิด มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความเครียด และการกระจัดทางไฟฟ้าใน 3 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน จึงมักระบุตัวเลขห้อยท้าย 2 ตัว เช่น d_{33} d_{15} เป็นต้น โดยตัวเลขเหล่านี้หมายถึงทิศทางต่างๆ ดังภาพประกอบที่ ข-2



ภาพประกอบที่ ข-2 แสดงเครื่องหมายของแกนสำหรับวัสดุไพอิโซเซรามิก

ในรูป (a) แสดงถึงลักษณะแกนหลัก 3 ทิศทาง ส่วนรูป (b) ใช้สำหรับวัสดุไพอิโซเซรามิกโดยใช้ตัวเลขเป็นตัวกำกับแกนคือใช้เลข 1, 2 และ 3 ใช้แทนแนวแกน X แนวแกน Y และทิศทางในแนวแกน Z ตามลำดับ ส่วนเลข 4, 5 และ 6 แสดงถึงแกนเฉือน (shear axis) รอบแกน 1, 2 และ 6 ตามลำดับ เมื่อตัวเลขแรกหมายถึง ทิศทางโพลาไรเซชัน ตัวเลขตัวที่สองจะหมายถึงทิศทางของความเครียด

ตารางที่ ข-1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าไพอิโซอิเล็กตริกกับตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กตริก	นิยาม	หน่วย SI
d	$\frac{\partial D}{\partial T}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบตรงเมื่อ E คงที่	$C.N^{-1}$
	$\frac{\partial S}{\partial E}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบผันกลับเมื่อ T คงที่	$m.V^{-1}$
g	$\frac{\partial E}{\partial T}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบตรงเมื่อ D คงที่	$Vm.N^{-1}$
	$\frac{\partial S}{\partial D}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบผันกลับเมื่อ T คงที่	$m^2.C^{-1}$
e	$\frac{\partial D}{\partial S}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบตรงเมื่อ E คงที่	$C.m^{-2}$
	$\frac{\partial T}{\partial E}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบผันกลับเมื่อ S คงที่	$N.mV^{-1}$
h	$\frac{\partial E}{\partial S}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบตรงเมื่อ D คงที่	$V.m^{-1}$
	$\frac{\partial T}{\partial D}$ ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบผันกลับเมื่อ S คงที่	$N.C^{-1}$

ค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กตริกในตารางที่ ข-1 นั้นมีความสัมพันธ์กับสมการ (2.1-2.2)

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าคงที่ต่างๆที่นำมาใช้ในการทำไฮโดรโฟนทางการค้า

		BM300	UNITS
Electrical			
Relative Dielectric Constant	$K_{33}T$	200	
Dissipation Factor		2.0	%
Piezoelectric			
Coupling Factor	k_p	0.05	-
	k_{31}	0.03	-
	k_{33}	0.48	-
Charge Constant	d_{31}	3.0	10^{-12}C/N
	d_{33}	65	10^{-12}C/N
Voltage Constant	g_{31}	2.0	10^{-3}Vm/N
	g_{33}	35	10^{-3}Vm/N
Mechanical Quality Factor	Q_M	800	-
Frequency Constants	N_P	2700	Hz.m
	N_1	2100	Hz.m
	N_3	2200	Hz.m
Elastic Modulus			
Compliance	S_{11}^E	7.2	$10^{-12}m^2/N$
	S_{33}^E	9.0	$10^{-12}m^2/N$
Density		6.7	g/cm^3
Curie Temperature	T_C	225	^{0}C
Ageing Characteristics			
Coupling Factor	k_p	0.05	-
Dielectric Constant	K_{33T}	1.5	-
Frequency Constant	$\mathbf{N_p}$	0.8	Hz.m