



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Unand.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Unand.

**STUDI AWAL PROSES PEMOLINGAN DAN KARAKTERISASI
SIFAT LISTRIK BAHAN PIEZOELEKTRIK RAMAH LINGKUNGAN
(0,95-X) Bi_{0,5}Na_{0,5}TiO₃ - 0,05Ba_{0,5}TiO₃ - xBi_{0,5}TiO₃
(BNT-BT-BKT)**

SKRIPSI



**ARSAL CHAYRI IBY
07135034**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG 2012**

**STUDI AWAL PROSES PEMOLINGAN DAN KARAKTERISASI
SIFAT LISTRIK BAHAN PIEZOELEKTRIK RAMAH
LINGKUNGAN $(0,95-x) \text{Bi}_{0,5}\text{Na}_{0,5}\text{TiO}_3 - 0,05\text{Ba}_{0,5}\text{TiO}_3 - x\text{Bi}_{0,5}\text{K}_{0,5}\text{TiO}_3$
(BNT-BT-BKT)**

ABSTRAK

Telah dilakukan studi awal proses pemolangan dan karakterisasi sifat listrik terhadap bahan piezoelektrik ramah lingkungan BNT-BT-BKT. Dalam penelitian ini sintesis bahan dilakukan dengan metoda *solid state reaction*. Hasil analisis menunjukkan bahwa Bahan BNT-BT-BKT memiliki struktur kristal perovskite rhombohedral yang bersifat *hard ceramic*. Bahan piezoelektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT memiliki konstanta dielektrik $1,29 \times 10^2$ dan temperatur curie 428°C . Bahan piezoelektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT memiliki konstanta dielektrik $1,87 \times 10^2$ dan temperatur Curie 428°C . Hasil poling 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT didapatkan nilai frekuensi diri dan terlihat tegangan yang dihasilkan ketika dilakukan uji tekan terhadap bahan.

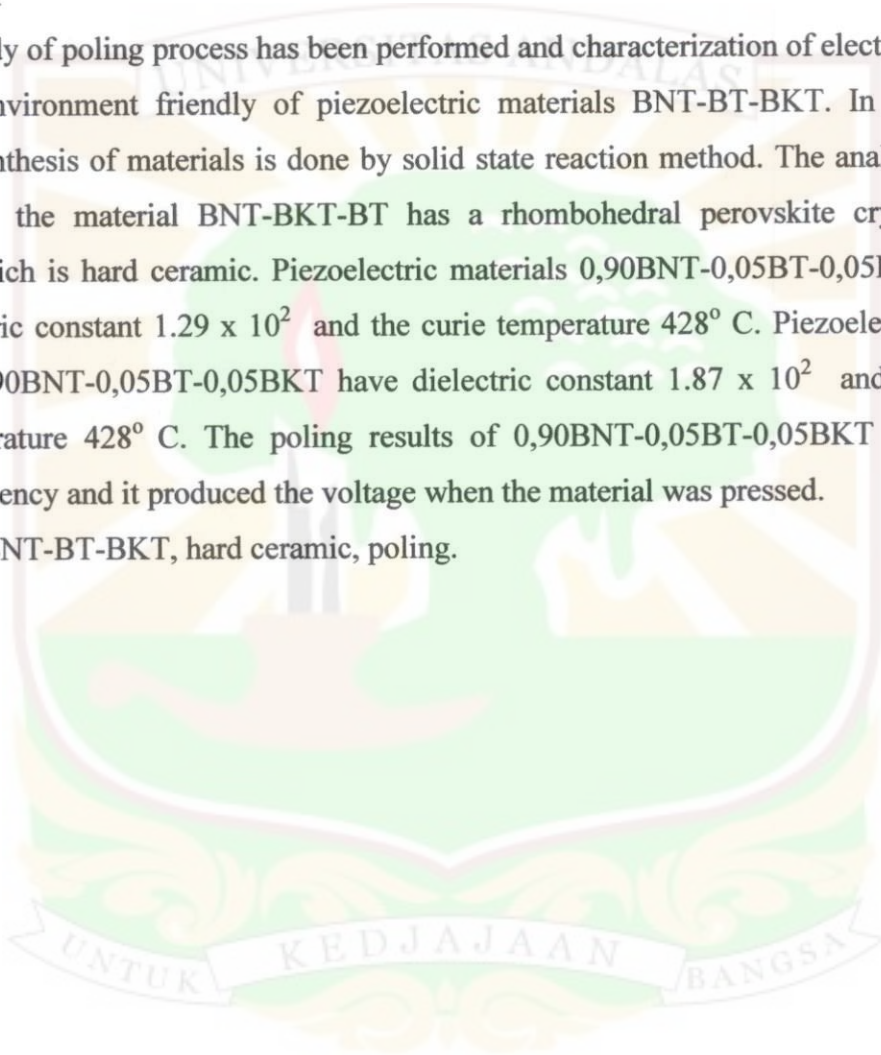
Kata kunci : BNT-BT-BKT, *hard ceramic*, poling.

**THE FIRST STUDY OF POLING PROCESS AND CHARACTERIZATION
ELECTRICAL PROPERTIES ENVIRONMENT FRIENDLY OF
PIEZOELECTRIC MATERIALS (0,95-x) $\text{Bi}_{0,5}\text{Na}_{0,5}\text{TiO}_3 - 0,05\text{Ba}_{0,5}\text{TiO}_3 -$
x $\text{Bi}_{0,5}\text{K}_{0,5}\text{TiO}_3$ (BNT-BT-BKT)**

ABSTRACT

The first study of poling process has been performed and characterization of electrical properties environment friendly of piezoelectric materials BNT-BT-BKT. In this study the synthesis of materials is done by solid state reaction method. The analysis showed that the material BNT-BKT-BT has a rhombohedral perovskite crystal structure which is hard ceramic. Piezoelectric materials 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT have dielectric constant 1.29×10^2 and the curie temperature 428°C . Piezoelectric materials 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT have dielectric constant 1.87×10^2 and the curie temperature 428°C . The poling results of 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT was natural frequency and it produced the voltage when the material was pressed.

Keyword: BNT-BT-BKT, hard ceramic, poling.



KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji dan syukur kehadiran ALLAH SWT, atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi dengan judul “ **Studi Awal Proses Pemolingan dan Karakterisasi Sifat Listrik Bahan Piezoelektrik Ramah Lingkungan (0,95-x) $\text{Bi}_{0,5}\text{Na}_{0,5}\text{TiO}_3 - \text{Ba}_{0,5}\text{TiO}_3 - x\text{Bi}_{0,5}\text{K}_{0,5}\text{TiO}_3$ (BNT-BT-BKT)**” merupakan bagian dari proyek program insentif dengan nomor RT2012-006 atas nama bapak Drs. Syahfandi Ahda, MT Penulisan skripsi merupakan salah satu syarat untuk mendapatkan gelar sarjana program S1 Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas.

Penulis menyadari bahwa tanpa bimbingan, bantuan, dan doa dari berbagai pihak, Tugas Akhir ini tidak akan dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini, terutama kepada :

1. Ibunda Kasniati, S.Pd dan Ayahanda Jasman Dt. Sampono Basau yang telah memberikan dukungan moril dan materil, selalu menyertai penulis dengan dorongan semangat, kasih sayang dan doa tulus.
2. Bapak Drs. Alimin Mahyudin, M.Si selaku pembimbing utama yang telah memberikan petunjuk, saran serta arahan selama penulisan skripsi ini.

3. Bapak Drs. Syahfandi Ahda, MT selaku pembimbing PTBIN-BATAN kawasan PUSPIPTEK Serpong Tangerang, yang telah memberikan petunjuk, saran dan arahan selama penelitian dan penulisan skripsi ini.
4. Bapak Dr. Elvaswer, Bapak Dr. Harmadi dan Ibu Sri Handani M.Si sebagai penguji yang telah memberikan kritikan, petunjuk, serta saran selama penulisan skripsi.
5. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Fisika FMIPA UNAND yang telah memberikan pendidikan selama di Jurusan Fisika FMIPA UNAND.
6. Seluruh staf PTBIN BATAN Serpong Tangerang yang telah memberikan saran dan bantuan selama penelitian di PTBIN-BATAN.
7. Adik-adikku tersayang Rosa chayrunnisa iby, Nurul nisa iby, Nurul hidayah iby, Ilham chayri iby serta Nashra chayri iby atas doa dan semangat dari kalian semua, semoga kita menjadi anak yang berbakti.
8. Teman seperjuanganku yang takkan pernah dilupakan all of RELATIVITAS07 (Moga kita semua tetap menjalin silaturahmi).

Dalam penulisan skripsi, penulis menyadari sepenuhnya bahwa masih banyak terdapat kekurangan, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini.

Akhir kata penulis berharap, semoga apa yang terdapat dalam skripsi dapat bermanfaat bagi semua pihak. Amin.

Padang, 1 september 2012

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN.....	
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG.....	xii
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	3
1.3 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian.....	4
II. LANDASAN TEORI.....	5
2.1 Kristal.....	5
2.1.1 Struktur Kristal.....	5
2.1.2 Bidang Kristal.....	7

2.2	Bahan Dielektrik	8
2.3	Piezoelektrik	10
	2.3.1 Material Piezoelektrik.....	10
	2.3.2 Struktur Kristal Piezoelektrik.....	12
	2.3.3 Prinsip Efek Piezoelektrik (Proses Poling).....	13
	2.3.4 Bahan Piezoelektrik Keramik	16
2.4	Temperatur Curie	18
2.5	XRD	19
2.5	LCR Meter.....	22
2.7	Metode <i>Solid State Reaction</i>	22
III. METODE PENELITIAN.....		26
3.1	Waktu dan Tempat penelitian	26
3.2	Bahan Penelitian	26
3.3	Alat Penelitian.....	26
	a. Alat Sintesis	26
	b. Alat Karakterisasi	27
3.4	Tahapan Penelitian	28
	3.4.1 Sintesis Bismuth Natrium Titanat- Barium Titanat – Bismuth Kalium Titanat (BNT-BT-BKT).....	28
	3.4.2 Menentukan hasil difraksi dengan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)...	29
	3.4.3 Menentukan Nilai Konstanta Dielektrik dan Temperatur Curie dari Bahan BNT-BT-BKT).....	30
	3.4.4 Proses Poling dan Uji Tekan terhadap Bahan BNT-BT-BKT...	30
	3.4.5 Menentukan Nilai Frekuensi Diri dari Bahan BNT-BT-BKT .	31

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Pola Difraksi BNT-BT-BKT	34
4.2 Konstanta dielektrik Bahan Piezoelektrik BNT-BT-BKT	35
4.2.1 Konstanta dielektrik Bahan Piezoelektrik 0,90BNT-0,5BT- 0,5BKT.....	35
4.2.2 Konstanta dielektrik Bahan Piezoelektrik 0,93BNT-0,5BT- 0,2BKT.....	36
4.2.3 Perbandingan Konstanta dielektrik Bahan Piezoelektrik 0,93 BNT-0,5BT-0,2BKT dan 0,90BNT-0,5BT-0,5BKT.....	38
4.3 Temperatur curie Bahan Piezoelektrik BNT-BT-BKT	39
4.4 Hasil Poling Bahan Piezoelektrik BNT-BT-BKT	39
4.5 Frekuensi Diri Bahan Piezoelektrik BNT-BT-BKT	41
V. KESIMPULAN DAN SARAN	48
5.1 Kesimpulan	48
5.2 Saran	49
DAFTAR PUSTAKA.....	50
LAMPIRAN.....	52

DAFTAR GAMBAR

1.1. Loket Tiket <i>Stasiun JR East Station</i>	2
2.1. Kurva Hysteresis dari Bahan Ferroelektrik	9
2.2. Struktur Perovskite dari Kristal PZT	12
2.3. Skematik dipol pada bahan monokristal dan polikristal	13
2.4. Momen dipol dari bahan piezoelektrik	14
2.5. Frekuensi diri dari bahan piezoelektrik.....	15
2.6. Perubahan posisi pusat simetri akibat efek piezoelektrik	16
2.7. Difraksi Sinar X.....	20
2.8. Tahapan <i>Solid State Reaction</i>	24
2.9. Proses <i>metallurgy powder</i>	25
3.1. Puncak tertinggi pada BNT-BT-BKT	29
3.2. Proses poling terhadap ban piezoelektrik BNT-BT-BKT	30
3.3. Uji tekan terhadap ban piezoelektrik BNT-BT-BKT.....	31
3.4. Tahapan Penelitian.....	32
4.1. Pola difraksi 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT dan 0,93BNT-0,05BT- 0,02BKT	33
4.2. Nilai kapasitansi dan konstanta dielektrik 0.90BNT-0.5BT-0.5BKT....	34
4.3. Nilai kapasitansi dan konstanta dielektrik 0.93BNT-0.5BT-0.2BKT....	35
4.4. Perbandingan nilai temperature Curie 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT dan 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT	37
4.5. Hasil uji poling bahan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT	42
4.6. Nilai frekuensi diri pada tekanan 3500 Psi.....	43

4.7. Nilai frekuensi diri pada tekanan 3500 Psi..... 44

4.8. Nilai frekuensi diri pada tekanan 5000 Psi..... 46

4.9. Nilai frekuensi diri pada tekanan 6000 Psi..... 47



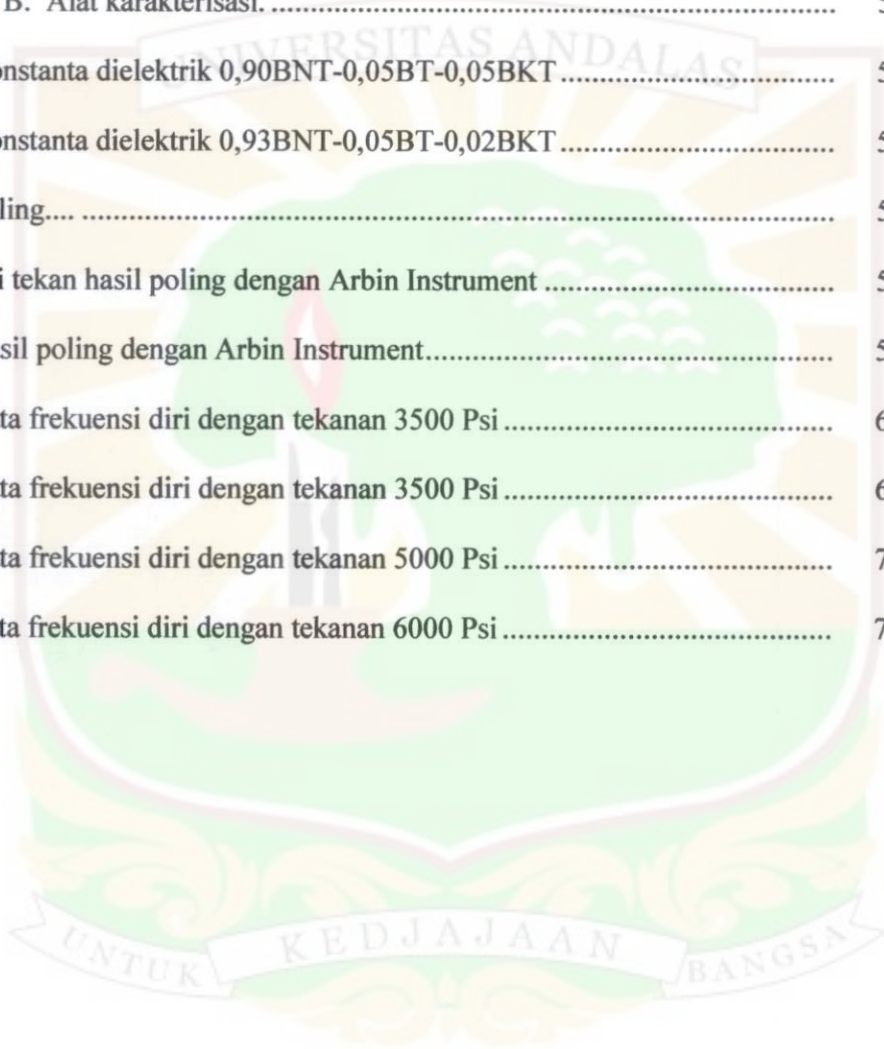
DAFTAR TABEL

2.1 Rincian tujuh bentuk sel satuan	6
2.2 Perbandingan Karakteristik <i>soft ceramic</i> dan <i>hard Ceramic</i>	17
2.3 Nilai temperature curie bahan piezoelektrik.	19
3.1 Massa bahan dasar sesuai dengan variasi penambahan % BKT.	28
4.3 Nilai temperature Curie bahan piezoelektrik.....	39



DAFTAR LAMPIRAN

1. Bahan penelitian	52
2. Alat penelitian	53
A. Alat sintesis.....	53
B. Alat karakterisasi.....	53
3. Konstanta dielektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT	54
4. Konstanta dielektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT	55
5. Poling.....	57
6. Uji tekan hasil poling dengan Arbin Instrument	58
7. Hasil poling dengan Arbin Instrument.....	59
8. Data frekuensi diri dengan tekanan 3500 Psi	68
9. Data frekuensi diri dengan tekanan 3500 Psi	69
10. Data frekuensi diri dengan tekanan 5000 Psi	70
11. Data frekuensi diri dengan tekanan 6000 Psi	71



DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	pemakaian Pertama kali Pada hal
BNT	<i>Bismuth Natrium Titanat</i>	1
PZT	<i>Lead Zirconium Titanat</i>	1
BNT-BT-BKT	<i>Bismuth Natrium Titanat Barium Titanat</i>	3
	<i>Bismuth Kalium Titanat</i>	
BT	<i>Bismuth Natrium</i>	4
Ec	<i>Electric Field Coercive</i>	10
Pr	<i>Polarization Remanen</i>	10
Tc	<i>Temperatur Curie</i>	18
KNN	<i>Kalium Natrium Neobium</i>	19
BNT-KNN	<i>Bismuth Natrium Titanat Kalium Natrium Neobium</i>	19
BNT-BKT-KNN	<i>Bismuth Natrium Titanat Barium Kalium Titanat</i>	19
	<i>Kalium Natrium Neobium</i>	
LAMBANG		
d_{hkl}	Jarak bidang kristal	7
a, c	Parameter kisi	7
$h, k, \text{ dan } l$	Indeks Miller parameter kisi	7
ϵ_r	Konstanta dielektrik	8
ϵ	Permitivitas bahan	8
ϵ_0	Permitivitas ruang vakum	8
d	tebal bahan	8
A	Luas permukaan bahan	8
C	Nilai kapasitansi	8

Z	Impedansi total	31
R	Hambatan resistansi	31
X_L	Hambatan induktansi	31
X_C	Hambatan kapasitansi	31



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Piezoelektrik didefinisikan sebagai suatu kemampuan yang dimiliki sebagian kristal maupun bahan-bahan tertentu lainnya yang dapat menghasilkan tegangan listrik jika mendapatkan perlakuan tekanan atau regangan. Piezoelektrik adalah suatu efek yang reversibel, dimana terdapat efek piezoelektrik langsung (*direct piezoelectric effect*) yaitu produksi potensial listrik akibat adanya tekanan mekanik dan efek piezoelektrik balikan (*converse piezoelectric effect*) yaitu produksi tekanan akibat pemberian tegangan listrik yang menghasilkan perubahan dimensi (Triwahyuni, 2010).

Pemanfaatan bahan piezoelektrik dapat menghasilkan beda potensial yang cukup besar sehingga banyak digunakan sebagai sumber tegangan tinggi. Piezoelektrik sudah mulai digunakan di Jepang, tepatnya di stasiun kereta api listrik *East Japan Railway Company* (JR East) sebagai alternatif energi sistem *ticketing*, *display* keberangkatan, dan lampu penerangan. Pengaplikasian piezoelektrik tersebut dimisalkan jika satu langkah tekanan kaki yang dapat menyalakan lampu dengan daya 60 Watt selama satu detik, maka dengan sedikit perhitungan manajemen *JR East Station* yakin bahwa dengan lantai yang efektif diinjak sebesar 25 meter kuadrat maka akan menghasilkan daya sebesar 1.400 kW. Energi ini dapat menjalankan satu buah kereta listrik (Saputri, 2011). Seperti yang terlihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Loket Tiket Stasiun JR East Station (sumber : anonim).

Material piezoelektrik yang saat ini banyak digunakan dan diproduksi adalah PZT karena memiliki sifat piezoelektrik yang sangat baik. PZT memiliki komposisi $Pb(ZrTi)O_3$, PZT yang mengandung unsur Timbal (Pb) dan berbahaya terhadap lingkungan jika diproduksi dalam skala besar. Oleh karena itu, penelitian terhadap material keramik piezoelektrik bebas Timbal dengan alternatif material pengganti yang ramah lingkungan perlu dikembangkan. Salah satu alternatif material pengganti yang ramah lingkungan dan telah dikembangkan untuk material piezoelektrik ini adalah Bismut Natrium Titanat (BNT). BNT merupakan bahan keramik yang memiliki sifat piezoelektrik yang cukup kuat, dapat diaplikasikan tanpa penambahan Pb.

Kualitas BNT masih di bawah PZT. Hal ini dapat dilihat dari besar temperatur curie bahan tersebut. Temperatur curie bahan piezoelektrik PZT adalah $450^{\circ}C$, sedangkan temperatur curie bahan piezoelektrik BNT adalah $320^{\circ}C$. Semakin tinggi temperatur curie suatu bahan maka bahan semakin baik

kualitas bahan tersebut. Karena dapat diaplikasikan sampai batas temperatur curie bahan tersebut (Takenaka, dkk, 1991).

Bahan BNT terus dimodifikasi dengan penambahan bahan-bahan lain seperti BT dan juga BKT. Penambahan bahan BT dan BKT pada material piezoelektrik ini diharapkan akan menghasilkan sifat piezoelektrik yang lebih kuat serta tetap merupakan bahan yang ramah lingkungan. Pada penelitian sebelumnya, telah dilakukan sintesis dengan metode *solid state reaction* terhadap bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT, didapatkan struktur perovskite yang optimal pada campuran 0.90BNT-0.05BT-0.05BKT (Wang, dkk, 2004) dan pada campuran 0.93BNT-0.05BT-0.02BKT (Fahyuan, 2011).

Penelitian ini dilakukan dengan mensintesis bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT dengan metode *solid state reaction* dan dilanjutkan dengan proses pemolangan serta karakterisasi sifat listrik bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT. Bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT memiliki keunggulan jika dibandingkan dengan bahan piezoelektrik bebas Pb lainnya. Sebagai perbandingan dengan BNT-BT-KNN besar konstanta piezoelektriknya adalah $d_{33} = 98 \text{ pc/N}$ (Hiruma, dkk, 2009). Sedangkan BNT-BT-BKT besar konstanta piezoelektriknya adalah $d_{33} = 148 \text{ pc/N}$ (Wang, dkk, 2004).

1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Menentukan sifat listrik dari bahan piezoelektrik dan proses pemolangan bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT.

2. Menentukan nilai konstanta dielektrik dan temperatur curie dari bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT.
3. Mengkarakterisasi bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT dengan XRD dan LCR meter.

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan tambahan informasi bagi pengembangan material piezoelektrik yang ramah lingkungan serta sebagai referensi pemilihan bahan piezoelektrik terbaik sehingga dapat memberikan dampak positif dalam pengaplikasian piezoelektrik untuk masa yang akan datang.

1.3 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

Penelitian sintesis BNT-BT-BKT dilakukan dengan metode *solid state reaction* dengan nilai 2% mol dan 5% mol BKT, dan penambahan 5% mol BT, kemudian dilanjutkan dengan proses pemolangan dengan menggunakan sumber tegangan tinggi dan karakterisasi produk sintesis dengan menggunakan XRD dan LCR meter.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Kristal

2.1.1 Struktur Kristal

Kristal adalah benda padat dengan bentuk polyhedron (bangun banyak-sisi) yang strukturnya terdiri atas atom-atom atau gugus-gugus atom yang tersusun dalam kesetangkupan ruang yang tinggi di seluruh volumenya.

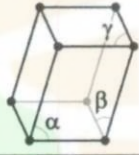
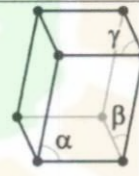
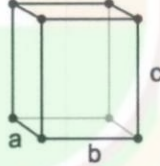
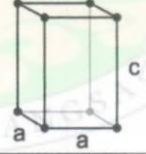
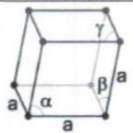
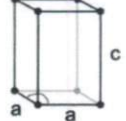
Menurut Cullity (1978), kristal dapat didefinisikan sebagai suatu material yang terdiri dari atom-atom yang tersusun secara berulang dalam pola tiga dimensi dengan rangkaian yang panjang.

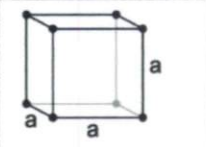
Geometri kristal setiap atom dalam kristal sempurna dianggap sebagai suatu titik, tepat pada kedudukan setimbang setiap atom dalam ruang. Pola geometrik yang diperoleh dinamakan kisi kristal.

Kisi kristal merupakan jarak antar atom pada kristal atau sering juga disebut dengan konstanta kisi. Suatu konstanta kisi kristal yang terbentuk dalam bentuk 3 dimensi diberi simbol dengan a , b dan c . Sudut antara ketiga konstanta kisi tersebut diberi simbol dengan α , β dan γ . Misalnya, untuk kristal yang berbentuk kubik, konstanta kisinya sama dalam ketiga arah koordinat a , b dan c serta sudut antara ketiga sisinya sama besar yaitu 90° ($\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$), sedangkan untuk kristal yang bukan kubik konstanta kisinya berbeda dalam ketiga arah koordinat. Volume sel satuan ditetapkan oleh parameter kisi (a , b dan c) dan 3 sudut (α , β dan γ).

Tujuh bentuk sel satuan yang berbeda bisa dibentuk dari parameter-parameter yang dikenal sebagai sel satuan konvensional, dan bila dikombinasikan dengan posisi atom khusus dengan sel satuan, akan menghasilkan 14 kisi bravais, yang rincinya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Rincian Tujuh Bentuk Sel Satuan

SISTEM KRISTALOGRAFI	PANJANG SUMBU DAN SUDUT	KISI BRAVAIS	SIMBOL KISI	SKEMA TIGA-DIMENSI SIMPLE
Triklinik	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$ $\neq 90^\circ$	-Simple	P	
Monoklinik	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$ atau $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	-Simple -Base-centered	P C	
Ortorombik	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple Base-centered Face-centered Body-centered	P C F I	
Tetragonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	-Simple -Body-centered	P I	
Trigonal Rombohedral	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ $< 120^\circ$	-Simple	P	
Hexagonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	-Simple	P	

Kubus	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma$ $= 90^\circ$	-Simple -Face-centered -Body-centered	P F I	
-------	--	---	-------------	--

2.1.2 Bidang Kristal

Bidang dalam sebuah kristal dapat ditentukan dengan menggunakan aturan-aturan sebagai berikut:

1. Menentukan titik-titik potong dari setiap sumbu kristal tiga dimensi.
2. Membalikkan nilai titik-titik potong tersebut dengan menjadikan penyebut suatu pecahan yang memiliki nilai pembilang 1.
3. Nilai dari ketiga bilangan tersebut dibuat dalam bentuk (hkl), yang disebut dengan indeks Miller.

Jarak bidang kristal diperlukan dalam menganalisis sebuah kristal. Jarak bidang kristal merupakan panjang garis yang diambil secara tegak lurus antara 2 bidang kristal yang sama dalam sebuah kristal. Penentuan jarak antara bidang kristal bergantung pada sistem kristal, karena setiap sistem kristal memiliki rumus jarak bidang kristal yang berbeda. PZT memiliki sistem kristal tetragonal, sehingga jarak bidang kristal diberikan oleh persamaan berikut:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2}} + \frac{c}{l} \quad (2.1)$$

Dengan: d_{hkl} = jarak bidang kristal

a dan c = parameter kisi

h , k dan l = indeks Miller bidang kristal

2.2 Bahan Dielektrik

Bahan dielektrik adalah suatu bahan yang secara kelistrikan bersifat isolator dan bisa memperlihatkan struktur dipol listrik, yaitu adanya pemisahan antara muatan listrik positif dan muatan listrik negatif pada tingkatan molekuler atau atomik (Callister, 1994). Bahan dielektrik ini memiliki muatan yang terikat dalam dipol.

Bahan dielektrik memiliki suatu konstanta yang dikenal dengan konstanta dielektrik. Konstanta dielektrik suatu bahan dapat ditentukan dari perbandingan antara permitivitas dielektrik bahan dengan permitivitas vakum (ruang hampa), yang diberikan oleh persamaan :

$$\begin{aligned}\epsilon &= C \frac{d}{A} \\ \epsilon_r &= \frac{\epsilon}{\epsilon_0}\end{aligned}\quad (2.2)$$

Dengan: ϵ_r = konstanta dielektrik

ϵ = permitivitas dielektrik bahan (F/m)

ϵ_0 = permitivitas vakum ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m)

d = tebal bahan (m)

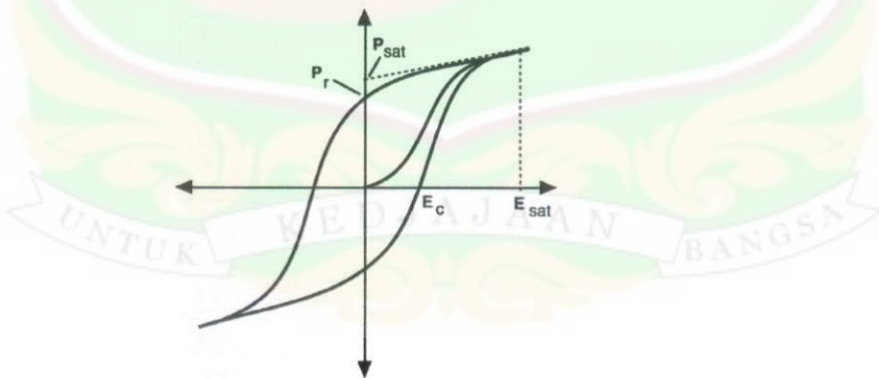
C = nilai kapasitansi (F)

A = luas permukaan bahan (m^2)

Konstanta dielektrik suatu bahan tidak memiliki satuan karena merupakan perbandingan antara 2 besaran yang memiliki satuan yang sama. Permitivitas dielektrik bahan itu sendiri ditentukan melalui pengukuran dengan alat atau dari percobaan.

Menurut Bishop dan Smallman (2000) bahan dielektrik juga mempunyai sifat piezoelektrik dan feroelektrik. Bahan dielektrik biasanya terikat kuat oleh masing-masing atom sehingga tidak dapat bergerak walaupun bahan itu berada dalam medan listrik. Bila suatu bahan dielektrik diberi medan listrik, maka dipol listrik yang terjadi akan mengarahkan diri sehingga pada permukaan bahan akan timbul muatan-muatan listrik induksi. Muatan-muatan ini akan menimbulkan medan listrik baru didalam bahan yang arahnya berlawanan dengan medan listrik luar akibatnya medan listrik di dalam bahan menjadi lebih lemah, yaitu $1/k$ kali medan listrik luar, sedangkan tetapan k disebut konstanta dielektrik.

Piezoelektrik merupakan bahan dielektrik yang polarisasinya disebabkan oleh pengaruh gaya dari luar seperti tekanan. Bahan piezoelektrik bersifat ferroelektrik. Ferroelektrik adalah ketika suatu bahan mempunyai suatu polarisasi listrik spontan yang dapat dibalikkan dengan menerapkan medan listrik eksternal. Proses ini disebut “switching” yang biasanya diikuti oleh hysteresis. Seperti Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Kurva hysteresis dari bahan ferroelektrik

Berdasarkan Kurva hysteresis bahan ferroelektrik di atas besarnya nilai E_c (*Electricfield coercive*) mempengaruhi nilai P_r (*polarization remanen*). Bahan yang bagus adalah jika nilai E_c kecil dan menghasilkan nilai P_r besar. Karena, jika nilai E_c yang kecil sangat membantu proses pemolangan.

Penerapan medan listrik terhadap bahan menyebabkan terjadinya proses ferroelektrifitas. Ferroelektrifitas adalah gejala terjadinya perubahan polarisasi listrik secara spontan pada material akibat penerapan medan listrik yang mengakibatkan adanya ketidaksimetrisan struktur kristal pada material ferroelektrik. Ferroelektrisitas biasanya menghilang di atas suhu tertentu yang disebut T_c (temperatur curie), biasanya di atas suhu tersebut bahan disebut paraelektrik sedangkan di bawah T_c , bahan akan bersifat ferroelektrik.

2.3 Piezoelektrik

2.3.1 Material Piezoelektrik

Piezoelektrik berasal dari bahasa Yunani *piezo* yang artinya tekanan dan elektrik yang berarti listrik. Bahan piezoelektrik adalah suatu bahan yang apabila diberi stres mekanik (tekanan) akan menghasilkan medan listrik sebaliknya apabila medan listrik diterapkan pada bahan piezoelektrik akan terjadi deformasi mekanik (perubahan dimensi bahan). Sifatnya yang reversibel ini membuat material piezoelektrik dapat berfungsi sebagai sensor dan aktuator (Sharma, 2006) serta menarik untuk dikembangkan.

Material piezoelektrik ditemukan pertama kali pada tahun 1880-an oleh Jacques dan Pierre Curie. Curie bersaudara memperlihatkan adanya muatan listrik

ketika diberikan suatu tekanan pada beberapa material tertentu. Tetapi mereka tidak memprediksi adanya sifat kebalikan dari efek piezoelektrik tersebut. Efek yang sebaliknya secara matematis didapat dari buku "*Fundamental Thermodynamic Principles*" oleh Gabriel Lippmann pada tahun 1881. Curie bersaudara segera membenarkan adanya efek kebalikan itu dan melanjutkan penelitian untuk memperoleh bukti kuantitatif bagaimana suatu material dapat bergetar karena diberi muatan listrik.

Sifat *reversibel* yang dimiliki oleh piezoelektrik dapat dijelaskan sebagai berikut. Di dalam sebuah kristal piezoelektrik, muatan listrik positif dan muatan listrik negatif terpisah namun terdistribusi simetris sehingga kristal keseluruhan secara listrik bersifat netral. Ketika diterapkan *stress* (tekanan), maka distribusi muatan yang simetris akan terganggu sehingga muatan menjadi tidak simetris lagi, dan muatan yang tidak simetris inilah yang menimbulkan medan listrik. Sebaliknya, ketika medan listrik diterapkan pada material piezoelektrik akan terjadi deformasi mekanik yang menyebabkan material berubah dimensi (struktur kristalnya dari kubik menjadi tetragonal atau rhombohedral). Peristiwa ini dikarenakan pada saat medan listrik melewati material, molekul yang terpolarisasi akan menyesuaikan dengan medan listrik, dihasilkan dipol yang terinduksi dengan molekul atau struktur kristal materi. Penyesuaian molekul ini mengakibatkan material berubah dimensi.

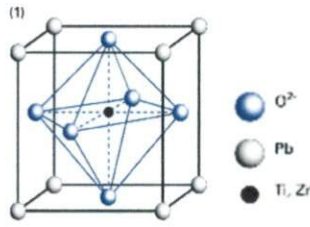
Sifat *reversibel* dari material piezoelektrik dapat dimanfaatkan untuk berbagai macam aplikasi, antara lain sumber tegangan, sensor, aktuator, transduser dan peralatan elektronik lainnya.

Material piezoelektrik yang banyak diproduksi dan diaplikasikan pada saat ini adalah PZT, karena material ini memiliki sifat-sifat piezoelektrik yang sangat baik (Hussain, dkk, 2009). Semakin baik sifat piezoelektriknya maka akan semakin baik pula pengaplikasiannya. Hanya saja, PZT mengandung timbal (Pb) lebih dari 60% (Cross, 2004). Timbal merupakan bahan yang mengandung racun dan sangat berbahaya karena dapat menyebabkan kerusakan pada ginjal, otak dan sistem tubuh lainnya. Oleh sebab itu, maka dikembangkanlah material piezoelektrik PZT yang bebas timbal dan ramah lingkungan, alternatif terbaik jatuh kepada bismut natrium titanat (BNT).

2.3.2 Struktur Kristal Piezoelektrik (Perovskite)

Material keramik dielektrik memiliki struktur kristal perovskite. Struktur kristal perovskite adalah struktur kristal dengan rumus umum ABO_3 yang mempunyai 3 (tiga) tipe kation dan 1 (satu) tipe anion (Damjanovic, 2001). Struktur kristal perovskite digambarkan sebagai gabungan struktur FCC (Face Centered Cubic) dan BCC (Body Centered Cubic). Terdiri dari delapan ion besar A^{a+} , satu ion kecil B^{b+} , dan enam ion O^{2-} dimana ion A^{a+} berada pada sudut sel satuan, ion O^{2-} berada pada permukaan sel satuan dan ion B^{b+} menduduki lokasi *interstitial octahedral*.

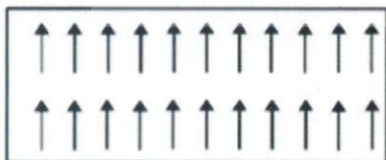
Salah satu contoh struktur perovskite dari material keramik dielektrik yang merupakan bahan piezoelektrik yang banyak dipakai saat ini adalah PZT ($Pb(Zr,Ti)O_3$). Struktur kristalnya dapat dilihat pada Gambar 2.2.



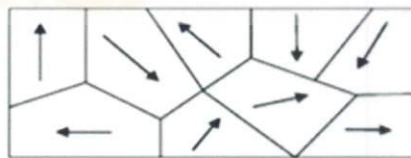
Gambar 2.2 Struktur Perovskite dari kristal PZT

2.3.3 Prinsip Efek Piezoelektrik (Proses Poling)

Bahan piezoelektrik adalah salah satu bahan yang menghasilkan muatan listrik ketika stres mekanik diterapkan (jika ditekan atau diregangkan). Sebaliknya, deformasi mekanik (menyusut atau mengembang) dihasilkan ketika medan listrik diterapkan. Efek ini terbentuk dalam kristal yang tidak memiliki pusat simetri. Setiap molekul memiliki polarisasi, satu ujung lebih bermuatan negatif dan ujung lainnya bermuatan positif, dan disebut sebuah dipol. Sumbu kutub adalah garis khayal yang berjalan melalui pusat-pusat muatan pada molekul. Pada monokristal sumbu kutub dari semua dipol terletak pada satu arah maka dikatakan simetris. Dalam polikristal, ada daerah yang berbeda dalam materi yang memiliki sumbu kutub yang berbeda. Hal ini dapat kita lihat pada Gambar 2.3.



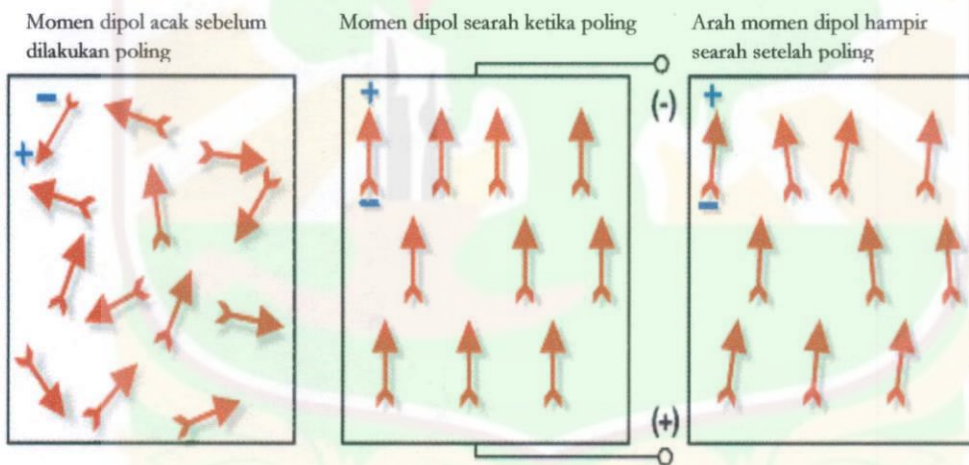
Arah dipol bahan monokristal



Arah dipol bahan monokristal

Gambar. 2.3 Skematik dipol pada bahan monokristal dan polikristal.

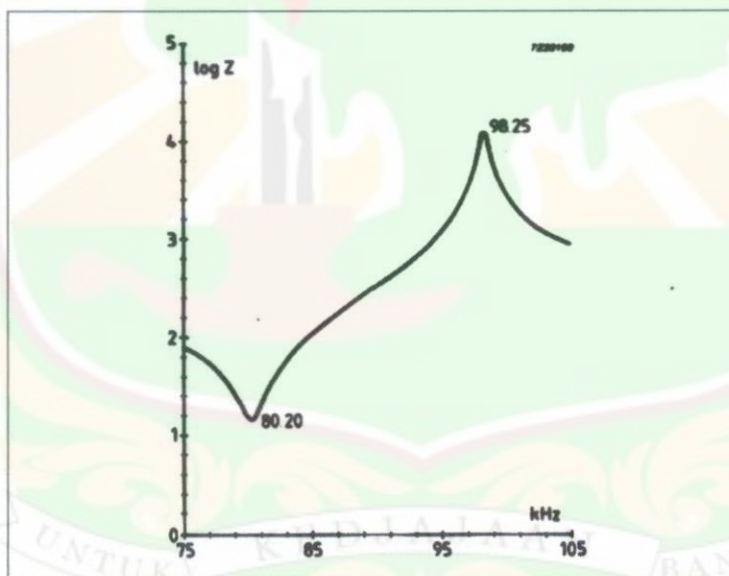
Untuk mendapatkan bahan piezoelektrik elemen aktif, yang memiliki momen dipol searah maka perlu dilakukan proses poling. Proses poling adalah pemberian medan listrik terhadap bahan, sehingga bisa menyearahkan momen dipol pada bahan piezoelektrik. Untuk menghasilkan efek piezoelektrik pada bahan polikristal ketika diberi medan listrik juga diperlukan pemanasan. Pengaruh pemanasan sangat memungkinkan molekul bergerak lebih bebas dan begitu juga pengaruh kekuatan medan listrik mengarahkan semua dipol dalam kristal ke arah yang sama. Dengan adanya pemanasan ini juga dapat mengurangi besar medan listrik yang digunakan. Proses poling ini sama prinsipnya dengan proses magnetisasi. Hal ini dapat kita lihat pada Gambar 2.4.



Gambar. 2.4 Momen dipol dari bahan piezoelektrik

- (a). momen dipol sebelum dilakukan proses poling (b). momen dipol saat dilakukan poling (c). momen dipol setelah dilakukan proses poling.

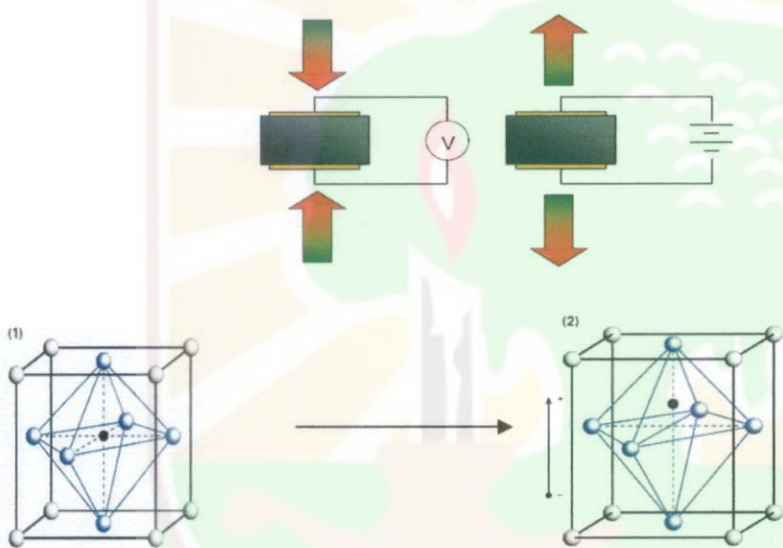
Bahan piezoelektrik yang telah dilakukan proses pemolangan bisa dilihat frekuensi diri (*natural frekuensi*) dari bahan tersebut. Frekuensi diri (*natural frekuensi*) dari bahan piezoelektrik adalah merupakan suatu daerah frekuensi dari bahan dimana ada resonan dan anti resonan. Pada frekuensi resonan adalah dimana gelombang frekuensi yang berdekatan saling menguatkan sehingga menghasilkan nilai puncak tertinggi, sedangkan pada frekuensi anti resonandimana gelombang frekuensi yang berdekatan saling meniadakan sehingga menghasilkan puncak terendah. Pada frekuensi diri (*natural frekuensi*) ini aplikasi bahan piezoelektrik baik untuk digunakan. Gambar frekuensi diri dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Frekuensi diri dari bahan piezoelektrik

Bahan Piezoelektrik terbentuk oleh keramik yang terpolarisasi sehingga beberapa bagian molekul bermuatan positif dan sebagian yang lain bermuatan negatif membentuk elektroda-elektroda yang menempel pada dua sisi yang

berlawanan dan menghasilkan medan listrik material yang dapat berubah akibat gaya mekanik. Pada saat medan listrik melewati material, molekul yang terpolarisasi akan menyesuaikan dengan medan listrik, dihasilkan dipol yang terinduksi dengan molekul atau struktur kristal materi. Penyesuaian molekul akan mengakibatkan material berubah dimensi. Fenomena ini disebut *electrostriction* (efek piezoelektrik). Proses yang mengakibatkan terjadinya Efek dari piezoelektrik ini dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar.2.6 Perubahan posisi pusat simetri akibat efek piezoelektrik

- Ket:
- (1). Posisi pusat simetri kristal sebelum adanya efek piezoelektrik.
 - (2). Posisi pusat simetri kristal setelah adanya efek piezoelektrik (posisi pusat simetri berubah)

2.3.4 Bahan piezoelektrik keramik

Bahan piezoelektrik keramik dibagi atas dua macam, yaitu *hard ceramic* dan *soft ceramic*. Yang membedakan bahan *hard ceramic* dan *soft ceramic*

adalah besarnya nilai temperatur curie suatu bahan. Jika suatu bahan piezoelektrik memiliki temperature curie dibawah 300°C , maka bahan tersebut termasuk *soft ceramic* dan jika bahan tersebut memiliki temperature curie diatas 300°C , maka bahan adalah *hard ceramic*. *Soft ceramic* dicirikan oleh besar faktor kopling elektromekanis, konstanta piezoelektrik besar, permitivitas tinggi, konstanta dielektrik besar, faktor dielektrik yang hilang tinggi, faktor kualitas mekanik yang rendah, dan linieritas buruk. Keramik lunak menghasilkan perpindahan yang lebih besar dan lebar sinyal yang lebih luas, tetapi mereka menunjukkan *hysteresis* lebih besar, dan lebih rentan terhadap depolarisasi atau kerusakan lainnya. *Soft ceramic* digunakan pada suhu yang lebih rendah. Umumnya nilai-nilai besar untuk permitivitas dan faktor disipasi dielektrik membatasi dari aplikasi yang memerlukan kombinasi input frekuensi tinggi dan medan listrik tinggi. Akibatnya, keramik lunak digunakan terutama dalam aplikasi penginderaan, bukan dalam aplikasi daya. Sedangkan *hard ceramic* karena memiliki sifat yang berbeda dan relatif lebih stabil dibandingkan *soft ceramic* bisa digunakan dalam aplikasi daya. Ada beberapa karakteristik dari bahan *hard ceramic* dan *soft ceramic*, yang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Perbandingan karakteristik *soft ceramic* dan *hard ceramic*

Karakteristik	<i>Soft Ceramic</i>	<i>Hard Ceramic</i>
Konstanta Piezoelektrik	Besar	Kecil
Permitivitas	Tinggi	Rendah
Konstanta Dielektrik	Besar	Kecil
Faktor Kehilangan Sifat Dielektrik	Tinggi	Rendah

Faktor Kopling Listrik Mekanik	Besar	Kecil
Hambatan Listrik	Sangat Tinggi	Rendah
Faktor Kualitas Mekanik	Rendah	Tinggi
Medan Koersif	Rendah	Lebih Tinggi
Linearitas	Buruk	Bagus
Polarisasi	Mudah	Lebih Sulit

Sumber : American Piezo (2012)

2.4 Temperatur Curie

Temperatur Curie (T_c) merupakan karakteristik penting dari material feroelektrik, ketika terjadi penurunan temperatur hingga berada di bawah temperatur Curie (T_c). Terjadi transisi fasa kristal dari fasa feroelektrik ke fasa paraelektrik (Sharma, 2006)

Temperatur kristal saat berada di atas temperatur curie, maka struktur kristal bahan tersebut adalah kubik dan kristal tidak memperlihatkan feroelektrisitas. Sedangkan ketika temperatur berada di bawah temperatur Curie strukturnya menjadi tetragonal atau rhombohedral dan kristal memperlihatkan feroelektrisitasnya.

Besarnya temperature curie suatu bahan sangat berpengaruh pada kualitas bahan itu sendiri. Bahan piezoelektrik yang telah banyak diteliti dan bebas timbal masih memiliki nilai temperature curie di bawah PZT. Hal ini dapat dilihat pada Table 2.3.

Tabel 2.3 Nilai temperatur curie bahan Piezoelektrik.

Bahan Piezoelektrik	T _c (°C)	Bahan Piezoelektrik	T _c (°C)
BNT- KNN (Zuo, R.Z.; Fang, X.S.; Ye, C., 2007)	375	BNT (Hiruma, Y.; Nagata, H.; Takenaka, T., 2007)	325
BNT-BKT-KNN (Yao, Z.H.; Liu, H.X.; Chen, L.; Cao., 2009)	340	BT (Frimasto, H., Irzaman, M Kurniati. , 2006)	130
KNN (Li, J.F.; Wang, K.; Zhang, B.P.; Zhang, L.M., 2006)	395	BNT-BT (Takenaka, T.; Maruyama, K.; Sakata, K., 1991)	288
BKT+0.6% wt B (Hiruma, Y.; Nagata, H.; Takenaka, T., 2007)	391	PZT (Donelly Nj, 2007)	450

2.5 XRD

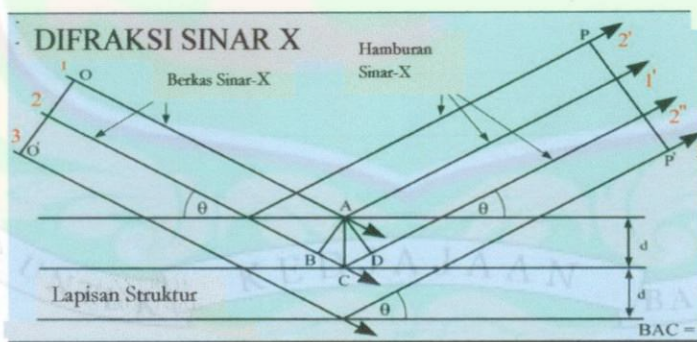
Spektroskopi difraksi sinar-X (*X-ray diffraction/XRD*) merupakan salah satu metode karakterisasi material yang paling tua dan paling sering digunakan hingga sekarang. Teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter kisi serta untuk mendapatkan ukuran partikel.

Difraksi sinar-X terjadi pada hamburan elastis foton-foton sinar-X oleh atom dalam sebuah kisi periodik. Hamburan monokromatis sinar-X dalam fasa tersebut memberikan interferensi yang konstruktif. Dasar dari penggunaan difraksi sinar-X untuk mempelajari kisi kristal adalah berdasarkan persamaan Bragg :

$$n\lambda = 2.d.\sin \theta \quad ; n = 1,2,\dots \quad (2.3)$$

Dengan λ adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan, d adalah jarak antara dua bidang kisi, θ adalah sudut antara sinar datang dengan bidang normal, dan n adalah bilangan bulat yang disebut sebagai orde pembiasan.

Hukum Bragg merupakan rumusan matematika tentang persyaratan yang harus dipenuhi agar berkas sinar-X yang dihamburkan tersebut merupakan berkas difraksi. Berkas sinar-X monokromatik yang datang pada permukaan kristal akan dipantulkan, dan pantulan terjadi hanya jika sudut datangnya mempunyai sudut tertentu. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.7:



Gambar 2.7 Difraksi sinar-X oleh bidang kristal (Cullity, 2011)

Berdasarkan persamaan Bragg, jika seberkas sinar-X dijatuhkan pada sampel kristal, maka bidang kristal itu akan membiaskan sinar-X yang memiliki panjang gelombang sama dengan jarak antar kisi dalam kristal tersebut. Sinar yang dibiaskan akan ditangkap oleh detektor kemudian diterjemahkan sebagai sebuah puncak difraksi.

Makin banyak bidang kristal yang terdapat dalam sampel, makin kuat intensitas pembiasan yang dihasilkannya. Tiap puncak yang muncul pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu dalam sumbu tiga dimensi. Puncak-puncak yang didapatkan dari data pengukuran ini kemudian dicocokkan dengan standar difraksi sinar-X untuk hampir semua jenis material. Standar ini disebut JCPDS.

Keuntungan utama penggunaan sinar-X dalam karakterisasi material adalah kemampuan penetrasinya, sebab sinar-X memiliki energi sangat tinggi akibat panjang gelombangnya yang pendek. Sinar-X adalah gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang 0,5-2,0 mikron. Sinar ini dihasilkan dari penembakan logam dengan elektron berenergi tinggi. Elektron itu mengalami perlambatan saat masuk ke dalam logam dan menyebabkan elektron pada kulit atom logam tersebut terpental membentuk kekosongan. Elektron dengan energi yang lebih tinggi masuk ke tempat kosong dengan memancarkan kelebihan energinya sebagai foton sinar-X.

Alat yang digunakan pada difraksi sinar X dinamakan dengan difraktometer sinar X. Sampel diletakkan pada sampel holder difraktometer sinar X. Proses difraksi sinar X dimulai dengan menyalakan difraktometer sehingga

diperoleh hasil difraksi berupa difraktogram yang menyatakan hubungan antara sudut difraksi 2θ dengan intensitas sinar X yang dipantulkan. Untuk difraktometer sinar X, sinar X terpancar dari tabung sinar X.

2.6 LCR Meter

LCR meter merupakan alat yang berfungsi untuk mengukur konduktivitas listrik sebagai fungsi dari frekuensi dan temperatur pemanasan. LCR meter memiliki beberapa parameter yang dapat diukur, antara lain:

- Z = Impedansi
- Y = Admintansi
- θ = Sudut fase impedansi
- C_s = Kapasitansi paralel
- C_s = Kapasitas seri
- L_p = Induktansi Paralel
- L_s = Induktansi Seri
- R_p = Hambatan paralel
- R_s = Hambatan seri
- G = Konduktansi

Nilai maksimum yang dapat dilihat adalah 4 buah dari 10 tes parameter yang termasuk di dalamnya, tidak hanya impedansi (Z), Sudut fase (θ), tapi juga L , C , R dan sebagainya. Keempat parameter dapat serentak tampil pada layar monitor.

2.7 Metode Padat (*Solid state reaction*) Struktur Kristal

Metode padat (*solid state reaction*) disebut juga dengan metode kering/metode konvensional. *Solid state reaction* merupakan reaksi padatan yang terjadi antar partikel yang bereaksi di atas permukaan, yang dipengaruhi oleh sifat kehomogenan bahan, tekanan saat dikompaksi dan suhu sintering. Metode padat merupakan metode yang lebih banyak digunakan secara universal, dengan proses pelaksanaannya tidak terlalu lama dibandingkan dengan metode basah.

Tahapan dari metode *solid state reaction*, yaitu:

a) Penggerusan/*blending*

Merupakan proses menghomogenisasi bahan.

b) Kompaksi/*compacting*

Merupakan proses pemberian tekanan terhadap bahan sehingga membentuk pelet.

c) Pemanasan/*sintering*

Proses *sintering* adalah proses pemanasan serbuk pada suhu di bawah titik lelehnya dalam rentang waktu yang cukup lama dengan tujuan mendapatkan kualitas bahan yang lebih bagus. Selain itu, agar butiran-butiran yang berdekatan dapat bereaksi dan berdekatan.

Pada metode padat ini bahan tidak dapat tercampur secara homogen sehingga akan mempengaruhi proses reaksinya, untuk itu diperlukan suhu yang tinggi pada proses sintering agar bahan dasar dapat tercampur secara homogen.

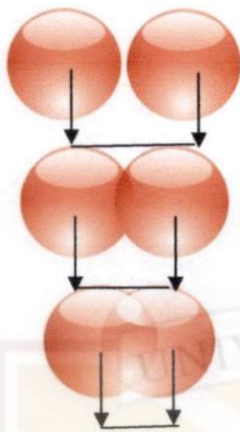
Tahapan dari metode *solid state reaction* dapat dilihat pada Gambar 2.8:



(a) (b) (c)
Gambar. 2.8 Tahapan proses metode padat (*solid state reaction*).

(a) bahan digerus dengan mortar. (b) setelah digerus bahan kemudian dikompaksi dengan *Hydraulic Press* (c) bahan dipanaskan dalam *Electric Furnace*

Metode padat diawali dengan proses penggerusan, dimana akan mengurangi rongga antar partikel pereaksi dan juga membuat ukuran serbuknya lebih kecil, sehingga permukaan partikel yang dapat bereaksi lebih luas. Kemudian proses kompaksi atau pemberian tekanan terhadap bahan yang dapat meningkatkan luas kontak antarmuka pereaksi-pereaksi. Proses sintering atau sering juga disebut proses pematatan atau pematangan dari serbuk bahan yang dibentuk pada suhu tinggi, namun masih berada di bawah titik leleh bahan tersebut untuk menjadi bahan padat. Selama proses sintering terjadi pengurangan pori-pori bahan yang disertai oleh pembesaran dari masing-masing butir sehingga jarak dari butir semakin kecil, sehingga terjadi ikatan yang kuat antara masing-masing butir. Hal ini dapat kita lihat pada Gambar 2.9



Gambar. 2.9 Proses *metallurgy powder* yang menyebabkan jarak butir antar kristal semakin dekat (Ahda, 2010)



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan dari bulan Januari – April 2012 di Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN), Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Kawasan Puspitek Serpong, Tangerang, Propinsi Banten.

3.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Bismut Oksida (Bi_2O_3), merek dagang ABCR, Puratrem AB106142, kemurnian 99,999%.
2. Natrium Karbonat (Na_2CO_3), MERCK KgaA 64271, No 1.06392.1000, kemurnian 99,9%.
3. Titanium Oksida (TiO_2), STREM, No 93-2207, kemurnian 99,99%.
4. Barium Karbonat (BaCO_3), MERCK KgaA 64271, No 1.01714.0250, kemurnian 99%.
5. Kalium karbonat (K_2CO_3), ABCR, No AB 101373, kemurnian 99,998%.

Bahan penelitian ini dapat dilihat pada lampiran 1.

3.3 Alat Penelitian

a. Alat sintesis

1. Timbangan *electronic* OHAUS GALAXY™160, neraca digital yang memiliki ketelitian yang tinggi (0,0001 gr) digunakan untuk menimbang sampel.

2. Mortar AGATE, yang digunakan sebagai tempat penggerus sampel.
3. Spatula, fungsinya sebagai sendok dan pengaduk sampel.
4. Dies, fungsinya sebagai pencetak pelet berdiameter 1 cm dan 1,5 cm.
5. *Hidraulic press* CARVER, fungsinya sebagai alat penekan pelet/kompaksi yang memiliki kemampuan tekan 15000 Psi.
6. *Elektrik Furnace* (47900 Furnace), digunakan dalam proses sintering.
7. Keramik tahan panas sebagai wadah tempat mensintering dan kalsinasi bahan.
8. Sumber tegangan tinggi (10 KV), digunakan sebagai sumber tegangan pada saat poling.
9. Elektroda, digunakan sebagai tempat sampel ketika dilakukan pengukuran temperature curie dalam furnace yang disambungkan dengan LCR meter.
10. Elektroda elastis, digunakan sebagai tempat posisi sampel ketika dilakukan uji tekan.
11. Arbin instrument, digunakan untuk uji tekan pada bahan piezoelektrik untuk melihat tegangan yang dihasilkan ketika bahan ditekan.

Alat-alat diatas dapat dilihat pada lampiran 2.

b. Alat Karakterisasi

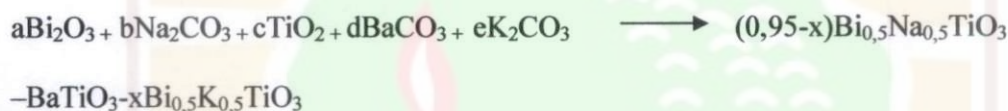
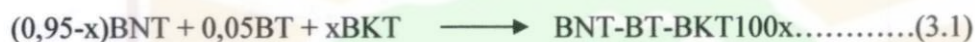
1. XRD (*Shimadzu x-ray diffraction*) digunakan untuk mengkarakterisasi sampel dengan melihat pola difraksi (puncak-puncak difraksi).
2. LCR (*inductor capacitor resistor*) meter - (HIOKI 3532-50 LCR HITESTER) digunakan untuk menentukan konstanta dielektrik, Temperatur Curie dan frekuensi diri dari bahan piezoelektrik.

Alat karakterisasi ini dapat dilihat pada lampiran 1.

3.4 Tahapan Penelitian

3.4.1 Sintesis Bismuth Natrium Titanat – Barium Titanat – Bismuth Kalium Titanat (BNT-BT-BKT)

Sintesis BNT-BT-BKT dimulai dengan penimbangan dan pencampuran bahan dasar Bi_2O_3 , Na_2CO_3 , TiO_2 , BaCO_3 , K_2CO_3 stokiometri dengan variasi % BKT sesuai dengan persamaan 3.1:



Tabel 3.1 Massa bahan dasar sesuai dengan variasi penambahan % BKT

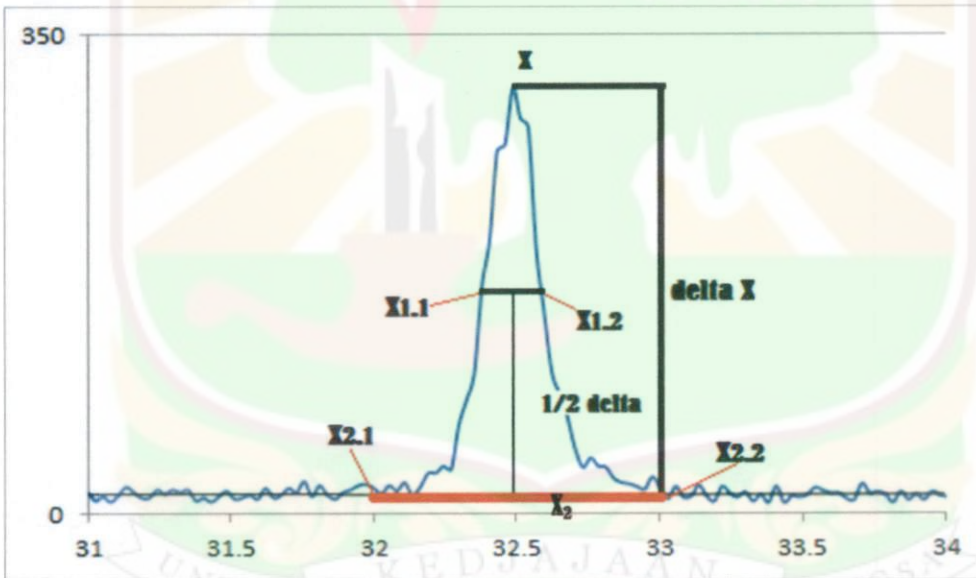
% Mol BKT	Mol					Massa 1 Pelet (gr)				
	Bi_2O_3	Na_2CO_3	TiO_2	BaCO_3	K_2CO_3	Bi_2O_3	Na_2CO_3	TiO_2	BaCO_3	K_2CO_3
2 %	0,237	0,232	1	0,05	0,005	0,4897	0,1088	0,3534	0,0437	0,0031
5 %	0,237	0,225	1	0,05	0,0125	0,4903	0,1056	0,3538	0,0437	0,0076

Bahan-bahan dasar (serbuk BNT-BT-BKT) ditimbang dengan variasi mol BKT (2% dan 5%), kemudian digerus. Penggerusan dilakukan selama 4 jam dengan mortar. Sintesis ini dilakukan dengan metode *solid state reaction* dengan parameter yang dominan pada penelitian kali ini adalah homogenisasi yang cukup merata, kompaksi dan suhu sintering. Penghomogenisasian ditentukan dengan lamanya penggerusan selama 4 jam dan kompaksi dengan penekanan 3500 Psi

dan 5000 Psi serta suhu sintering 1000°C selama 4 jam. Untuk kalsinasi pada suhu 300°C selama 1 jam. Setelah proses sintesis dilakukan.

3.4.2 Menentukan Pola difraksi dengan X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi dengan menggunakan XRD dilakukan dengan menentukan puncak-puncak difraksi bahan, Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai *Full Width Half Maximum* (FWHM) dari Bahan BNT-BT-BKT. Untuk menentukan nilai FWHM diambil masing-masing puncak tertinggi dari hasil difraksi, kemudian diolah dengan menggunakan *paint* sehingga didapatkan nilai FWHM bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT dari Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Puncak tertinggi pada BNT-BT-BKT

Berdasarkan Gambar 3.1 diambil puncak tertinggi dan di gambar dengan *paint*, kemudian dilakukan perhitungan untuk mencari nilai FWHM dari BNT-BT-BKT dan didapatkan nilai FWHMnya dalam satuan ° (derajat).

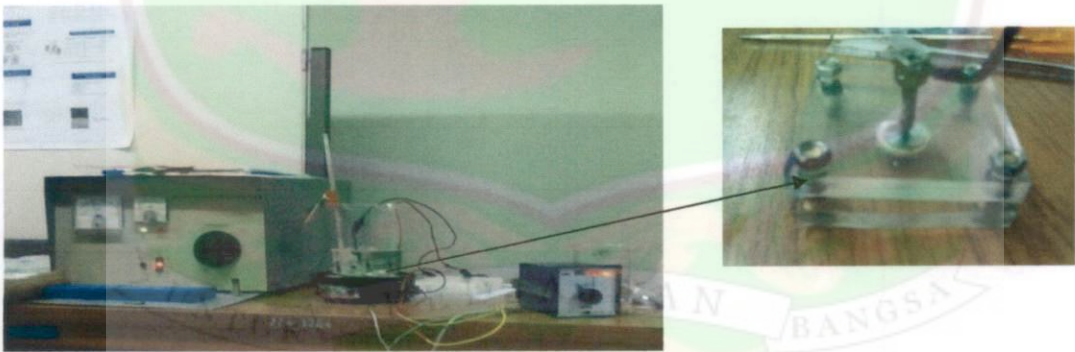
3.4.3 Menentukan Nilai Konstanta Dielektrik dan Temperatur Curie dari Bahan BNT-BT-BKT

Bahan dipanaskan di dalam *furnace* yang disambungkan dengan LCR meter untuk menentukan nilai kapasitansi (C). Bahan dipanaskan dari suhu rendah sampai suhu tinggi sehingga didapatkan nilai kapasitansi tertinggi dari bahan tersebut. Nilai kapasitansi tertinggi yang terukur kemudian diubah menjadi konstanta dielektrik.

Suhu pada saat didapatkan nilai konstanta dielektrik menunjukkan nilai temperatur Curie dari bahan tersebut.

3.4.4. Proses Poling dan Uji Tekan terhadap Bahan BNT-BT-BKT

Bahan hasil sintesis yang telah berbentuk pelet dipoling dengan menggunakan sumber tegangan tinggi yang dihubungkan dengan elektroda yang direndam dalam *silica oil*, proses poling dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2. Proses poling terhadap bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT

Bahan diberikan tegangan sebesar 3KV terhadap bahan selama 45 menit dengan tujuan agar momen dipol pada bahan menjadi searah. Bahan yang berhasil

dipoling dilanjutkan dengan uji tekan menggunakan *arbin instrument* untuk melihat adanya tegangan yang dihasilkan ketika bahan tersebut ditekan. Penekanan dilakukan dalam rentang waktu yang tidak beraturan. Uji tekan dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Uji tekan terhadap bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT

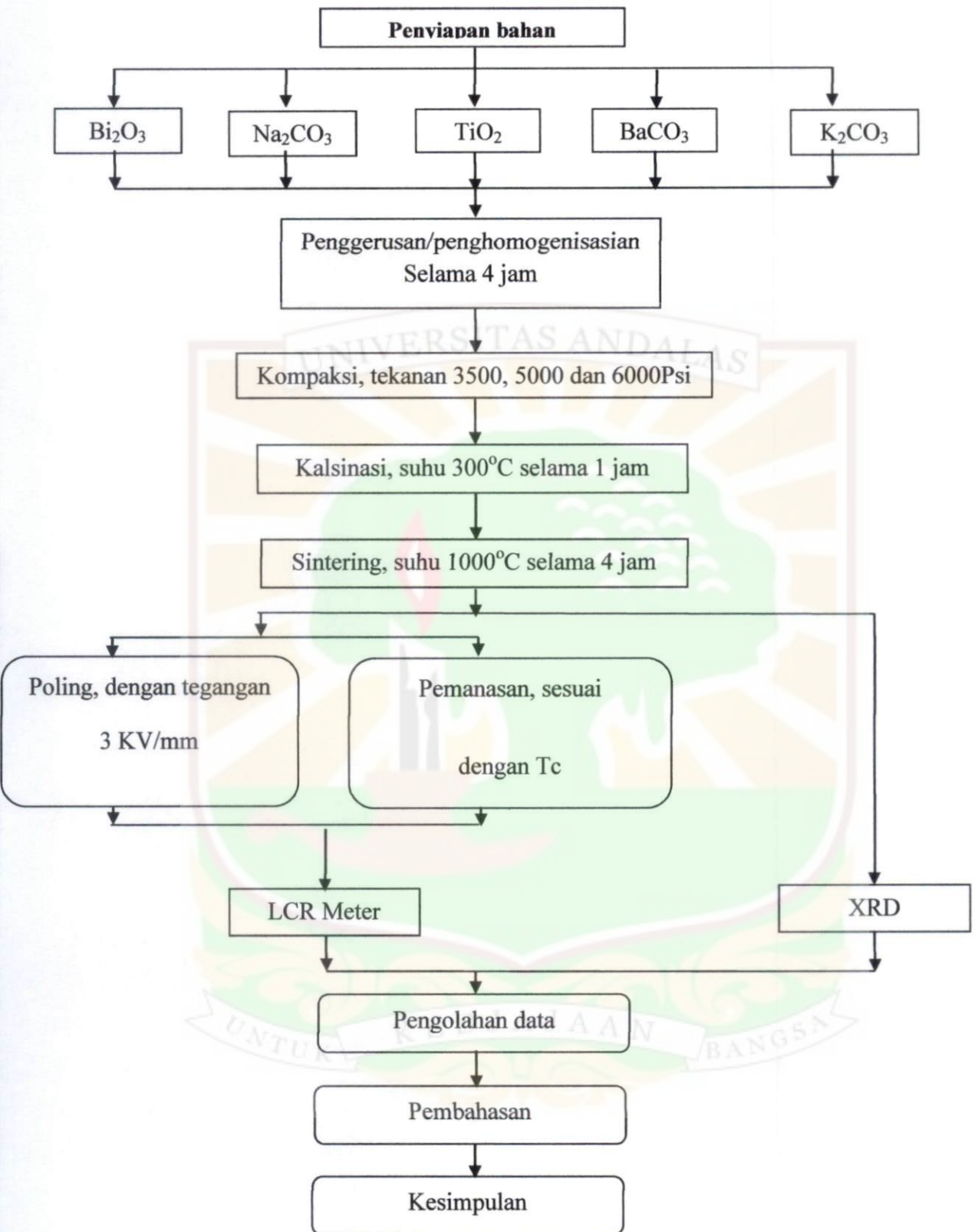
3.4.5 Menentukan Nilai Frekuensi Diri dari Bahan BNT-BT-BKT

Bahan hasil poling disambungkan dengan LCR meter. Pada LCR meter diukur nilai impedansi dan pengukuran dilakukan pada frekuensi 1 MHz. Nilai impedansi yang didapat kemudian diubah dalam bentuk grafik sehingga memperlihatkan adanya frekuensi dari bahan tersebut. Besarnya nilai impedansi pada bahan dipengaruhi oleh hambatan pada kapasitansi, yang sesuai dengan persamaan 3.2.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L^2 - X_C^2)} \quad (3.2)$$

Dengan: Z = Impedansi Total (Ω) ; X_L = Hambatan induktansi (Ω)
R = Hambatan resistor (Ω) ; X_C = Hambatan kapasitansi (Ω)

Diagram tahapan proses penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.4.



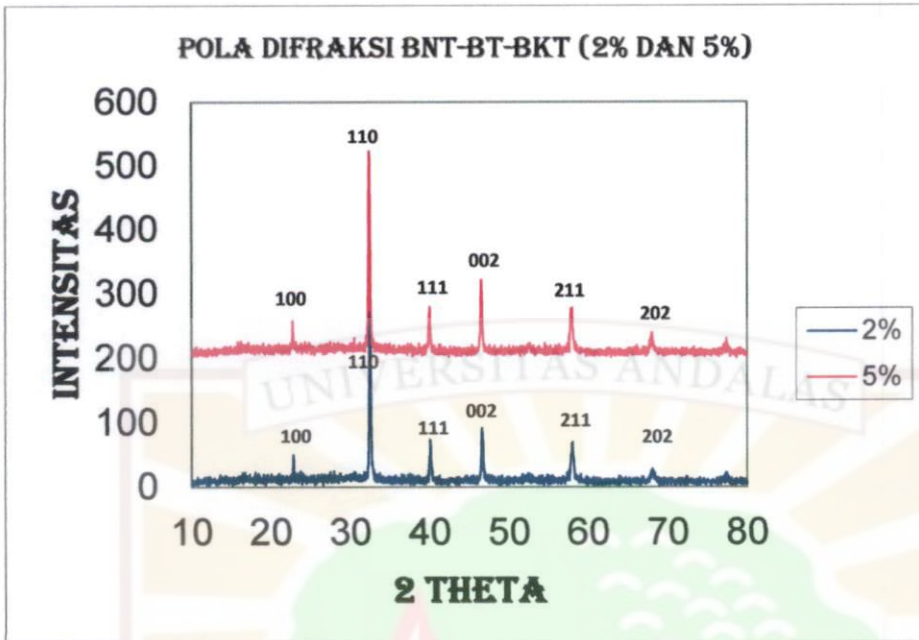
Gambar 3.4 Tahapan penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pola Difraksi Kristal BNT-BT-BKT

Sintesis Bismut Natrium Titanat – Barium Titanat – Bismut Kalium Titanat (BNT-BT-BKT) dilakukan dengan metode *solid state reaction*. Penelitian terhadap bahan BNT-BT-BKT telah dilakukan sebelumnya oleh para peneliti dari Cina sehingga mendapatkan komposisi terbaik adalah pada bahan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT (Wang, dkk, 2004). Selanjutnya di PTBIN BATAN dilakukan penelitian juga tentang bahan yang sama sehingga mendapatkan daerah MPB pada penambahan 2% BKT dan juga mendapatkan struktur perovskite dengan komposisi optimal pada penambahan 5% BKT (Fahyuan, 2011). Penelitian yang telah dilakukan tersebut masih sebatas menentukan struktur kristal. Sehingga penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian sebelumnya, yang bertujuan untuk studi awal proses pemolangan dan menentukan sifat piezoelektrik dari bahan 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT dan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT. Langkah awal yang dilakukan adalah melakukan karakterisasi bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT dengan XRD. Sehingga didapat struktur kristal 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT dan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT yang memiliki pola difraksi yang sesuai dengan pola difraksi bahan piezoelektrik. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Pola Difraksi 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT dan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT

Berdasarkan Gambar 4.1 didapatkan hasil pola difraksi dari bahan piezoelektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT dan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT dan memiliki bidang-bidang tertentu. Bahan dengan dopan BKT 2% memiliki ketinggian intensitas berbeda dengan bahan dopan BKT 5%, dimana bahan dengan dopan BKT 5% puncaknya lebih tinggi intensitasnya dibandingkan dengan bahan dopan BKT 2%. Puncak-puncak yang muncul karena sensitivitas alat yang dipakai dan juga efek permukaan sampel, karena tidak semua bidang (hkl) berada di permukaan.

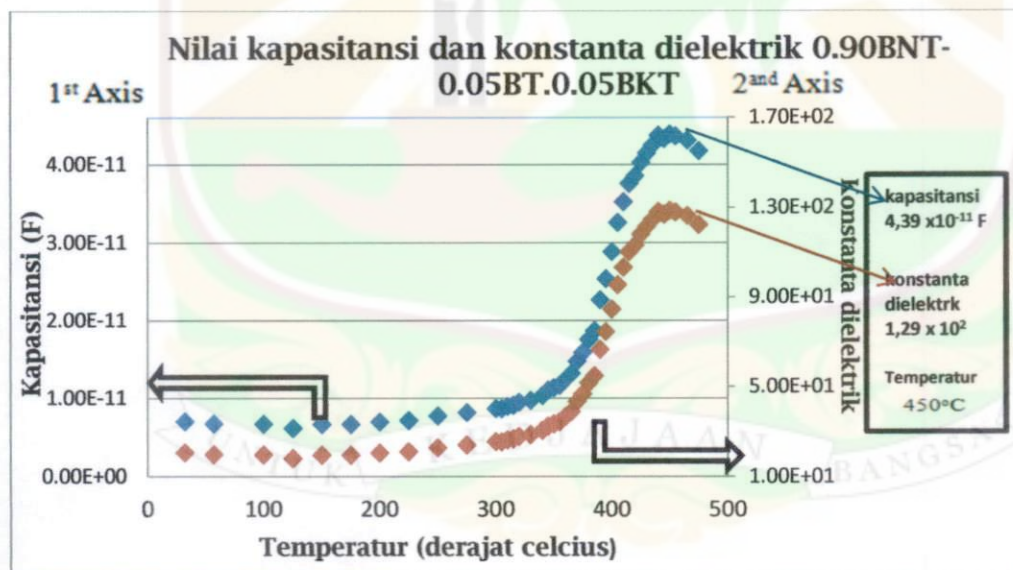
Nilai *Full Width Half Maximum* (FWHM) dari Bahan 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT yaitu $0,2158273^\circ$ dan nilai FWHM dari bahan piezoelektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT adalah $0,207143^\circ$.

Berdasarkan hasil yang didapatkan nilai FWHM dari bahan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT lebih kecil dibandingkan nilai FWHM dari bahan 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT. Suatu bahan yang memiliki nilai FWHM lebih kecil memiliki jarak antar kisi lebih kecil dan butiran yang besar. Maka dapat disimpulkan bahwa pada bahan dengan penambahan 5% BKT memiliki jarak antar kisi lebih kecil dan butiran yang besar dibandingkan bahan dengan penambahan BKT 2%.

4.2 Konstanta Dielektrik Bahan Piezoelektrik BNT-BT-BKT

4.2.1 Konstanta Dielektrik Bahan Piezoelektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT

Dari hasil percobaan data yang didapatkan adalah nilai kapasitansi dan konstanta dielektrik. Besarnya nilai kapasitansi dan konstanta dielektrik dapat dilihat pada Gambar 4.2.



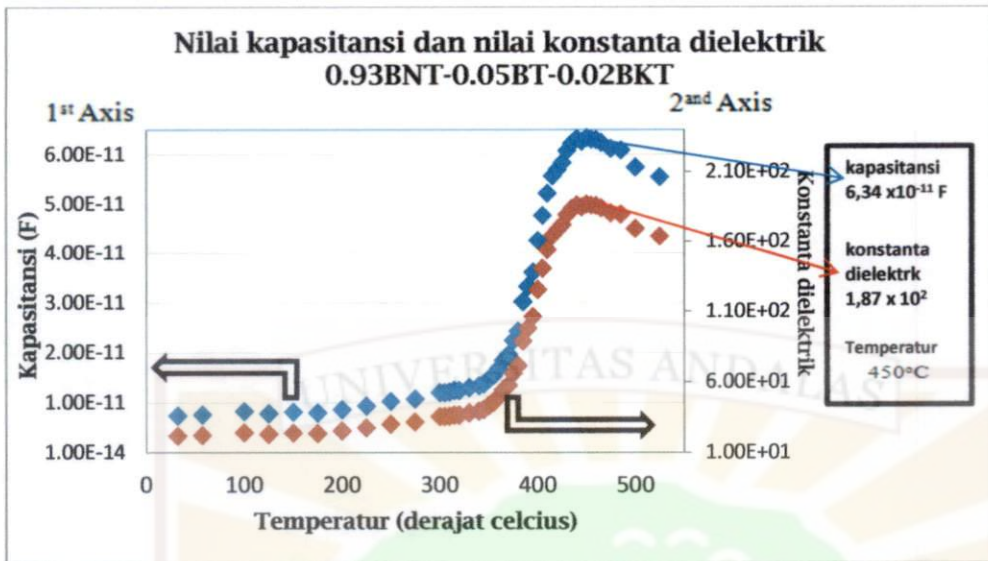
Gambar. 4.2 Nilai kapasitansi dan Konstanta dielektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT

Berdasarkan Gambar 4.2 didapatkan nilai kapasitansi maksimum pada temperatur 450°C sebesar $4,39 \times 10^{-11}\text{ F}$, kemudian nilai kapasitansi yang didapat diubah menjadi nilai konstanta dielektrik. Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai konstanta dielektrik sebesar $1,29 \times 10^2$.

Berdasarkan hasil yang didapatkan dapat dianalisa bahwa nilai kapasitansi ataupun konstanta dielektrik berubah berdasarkan perubahan suhu. Pada saat suhu 50°C sampai 350°C terjadi kenaikan nilai kapasitansi namun masih sedikit. Namun, pada saat suhu diatas 350°C terjadi kenaikan yang sangat tinggi sampai suhu 450°C dan setelah itu terjadi penurunan nilai kapasitansi. Hal ini menunjukkan bahwa ketika suhu diatas 450°C bahan piezoelektrik 0.90BNT-0.05BT-0.05BKT ini telah berubah fasa dari ferroelektrik menjadi paraelektrik.

4.2.2 Konstanta Dielektrik Bahan Piezoelektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT

Bedasarkan hasil percobaan dan perhitungan data didapatkan nilai kapasitansi dan konstanta dielektrik. Besarnya nilai kapasitansi dan konstanta dielektrik dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar : 4.3 Nilai kapasitansi dan Konstanta dielektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT

Berdasarkan Gambar 4.3 dapat dianalisa bahwa nilai kapasitansi berubah berdasarkan perubahan suhu didapatkan nilai kapasitansi maksimum pada temperatur 450° C sebesar $6,34 \times 10^{-11}$ F, kemudian nilai kapasitansi yang didapat diubah menjadi nilai konstanta dielektrik. Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai konstanta dielektrik sebesar $1,87 \times 10^2$.

Berdasarkan hasil yang didapat dianalisa juga bahwa nilai kapasitansi ataupun konstanta dielektrik berubah berdasarkan perubahan suhu. Pada saat suhu 50° C sampai 350° C juga terjadi kenaikan nilai kapasitansi namun masih belum signifikan. Tetapi, pada saat suhu diatas 350° C terjadi kenaikan yang sangat tinggi sampai suhu 450° C dan setelah itu terjadi penurunan nilai kapasitansi. Hal ini menunjukkan bahwa ketika suhu diatas 450° C bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT ini telah berubah fasa dari ferroelektrik menjadi paraelektrik. Nilai

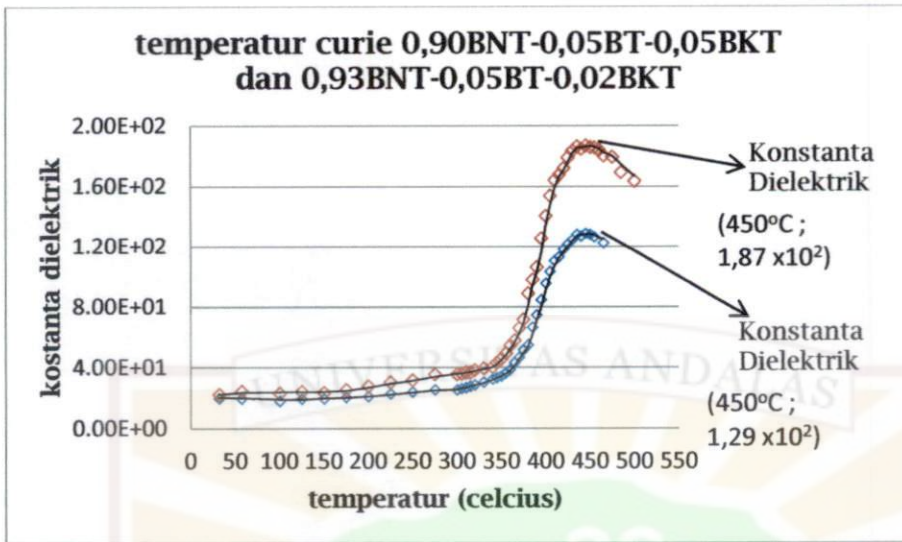
kapasitansi yang berubah terhadap suhu disebabkan karena nilai hambatan kapasitansi semakin kecil dengan bertambahnya suhu yang diberikan.

4.2.3 Perbandingan Konstanta Dielektrik Bahan Piezoelektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT dan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT

Setelah dilakukan percobaan terhadap bahan untuk menentukan konstanta dielektrik. Maka dibandingkan nilai konstanta dielektrik bahan 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT dengan bahan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT dengan tujuan manakah diantara kedua bahan tersebut yang lebih bersifat *soft ceramic*. Hasil perbandingan nilai konstanta dielektrik didapatkan bahwa nilai konstanta dielektrik pada bahan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT lebih kecil dibandingkan nilai konstanta dielektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT. Bahan akan bersifat *Hard Ceramic* jika memiliki nilai konstanta dielektrik yang kecil (American Piezo, 2012). Maka bahan piezoelektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT lebih bersifat *Hard Ceramic* dibandingkan 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT.

4.3 Temperatur Curie Bahan Piezoelektrik BNT-BT-BKT

Untuk menentukan kualitas bahan piezoelektrik bisa dilihat dari besarnya nilai temperatur curie suatu bahan. Semakin tinggi temperatur curie maka bahan tersebut akan bisa diaplikasikan pada suhu yang tinggi juga. Nilai temperatur curie suatu bahan ditentukan dari hasil pengukuran nilai konstanta dielektrik. Besarnya temperatur curie yang didapatkan dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 perbandingan nilai temperature curie 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT dan 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT

Berdasarkan Gambar 4.7 didapatkan besarnya temperatur curie bahan dengan dopan 2% dan 5% adalah 450° C. Namun, untuk memastikan bahwa data ini akurat, setelah percobaan dilakukan kalibrasi terhadap alat pemanas yang digunakan. Ternyata setelah kalibrasi didapatkan perbedaan suhu sebesar 22° C. Sehingga temperatur Curie bahan adalah 428° C. Temperatur curie bahan hasil eksperimen ini lebih tinggi dari pada temperatur curie bahan piezoelektrik bebas Pb lainnya. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Nilai temperatur curie bahan piezoelektrik bebas Pb.

Bahan Piezoelektrik	Tc (°C)	Bahan Piezoelektrik	Tc (°C)
BNT- KNN	375	BNT-BF	340
BNT-BKT-KNN	340	BNT	325

KNL-N-BT	380	BT	130
KNN	395	BNT-BT	288
BKT+0.6% wt B	391		
PZT	450	BNT-BT-BKT(exp)	428

Sesuai dengan Tabel 4.3 bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT memiliki temperature curie yang tinggi dibandingkan bahan piezoelektrik bebas Pb yang lainnya. Dan hampir mendekati nilai temperatur curie PZT. Nilai temperatur Curie dari bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT lebih baik dibandingkan bahan piezoelektrik bebas Pb lainnya yang telah diteliti sebelumnya.

4.4 Hasil Poling Bahan Piezoelektrik BNT-BT-BKT

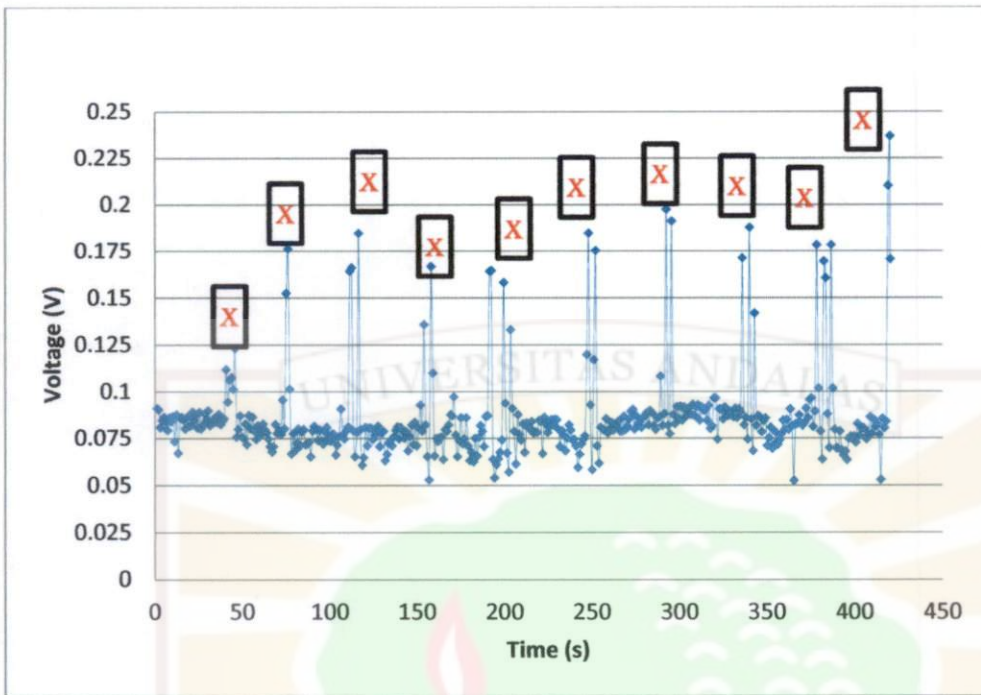
Proses pemolangan bahan piezoelektrik dilakukan pada 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT dan 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT. Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan didapatkan proses pemolangan terhadap bahan piezoelektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT gagal. Pada percobaan pertama dilakukan poling dengan tegangan yang diberikan sebesar 3 KV. Terjadi *short* sehingga poling tidak bisa dilanjutkan. Bahan tersebut terlihat berlubang walaupun agak kecil. Kemudian dilanjutkan dengan percobaan kedua, dengan sampel yang sama dan diberikan tegangan sebesar 3 KV. Ternyata hasilnya sama. Terjadi *short* pada bahan tersebut. Maka, dari hasil proses pemolangan terhadap bahan piezoelektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT tidak didapatkan hasil yang maksimal. Karena, hasil

yang didapat gagal semua. Hal ini terjadi mungkin adanya kesalahan mikro terhadap bahan ataupun pengaruh lain yang untuk sementara tidak diketahui. Dan proses pemolangan terhadap bahan piezoelektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT dihentikan sampai di sini.

Proses pemolangan dilanjutkan pada bahan piezoelektrik BNT-BT-BKT5%. Tegangan yang diberikan sama yaitu 3 KV dan berhasil dilakukan, bahan tidak *short* sehingga poling bisa dilakukan.

Proses pemolangan terhadap bahan piezoelektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT berhasil dan tidak terjadi *short*, maka dari hasil pemolangan ini didapatkan bahwa bahan piezoelektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT lebih baik dibandingkan dengan 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT.

Bahan piezoelektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT dilanjutkan dengan uji poling dengan menggunakan *arbin instrument* untuk melihat tampilan tegangan yang dihasilkan dari tekanan yang diberikan terhadap sampel. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.6 Hasil uji poling bahan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT

X : tampilan ketika ditekan

Berdasarkan gambar 4.8 bahan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT ini memang merupakan bahan piezoelektrik. Karena dapat dilihat bahan tersebut bisa menghasilkan tegangan jika ditekan. Walaupun nilainya masih kecil tetapi telah mengindikasikan bahwa bahan ini telah bisa menghasilkan tegangan sesuai dengan prinsip bahan piezoelektrik dan siap dikembangkan sebagai bahan piezoelektrik ramah lingkungan yang juga memiliki nilai temperature Curie yang tinggi untuk diaplikasikan.

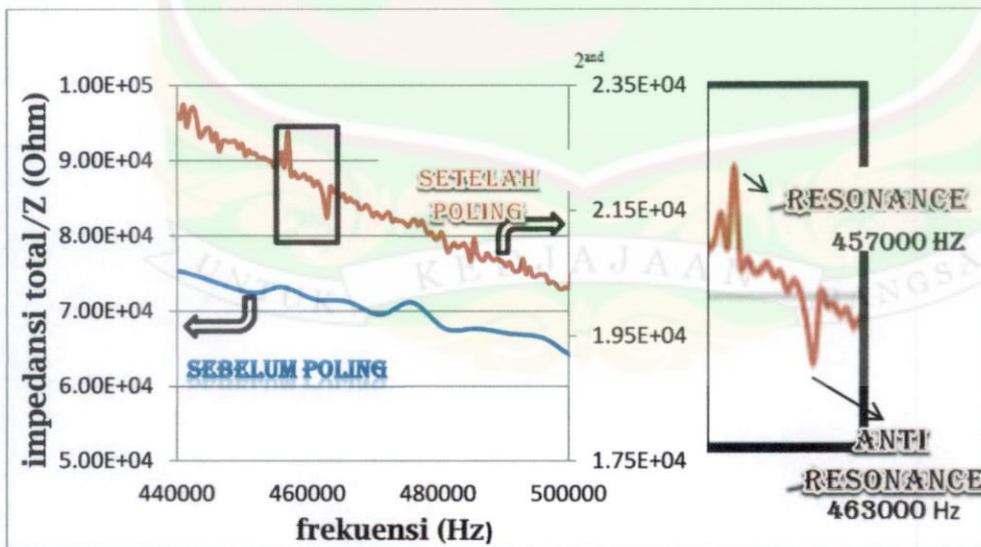
4.5 Frekuensi Diri Bahan Piezoelektrik BNT-BT-BKT

Frekuensi diri (frekuensi resonan dan anti resonan) dari bahan piezoelektrik dilakukan dengan mengukur nilai impedansi dengan menggunakan LCR meter. Karena pada proses pemolingan terjadi kegagalan pada bahan piezoelektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT maka hanya dilakukan pengukuran pada bahan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT namun dengan tiga variasi tekanan yaitu 3500 Psi, 5000 Psi dan 6000Psi. Pada bahan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT dengan tekanan 3500 Psi didapatkan frekuensi diri dua buah yaitu pertama frekuensi diri (frekuensi resonan 129 KHz dan anti resonan 131.5 KHz), frekuensi diri yang kedua frekuensi resonan 457 KHz dan anti resonan 463 KHz) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.



Gambar 4.7 Nilai frekuensi diri pada tekanan 3500 Psi.

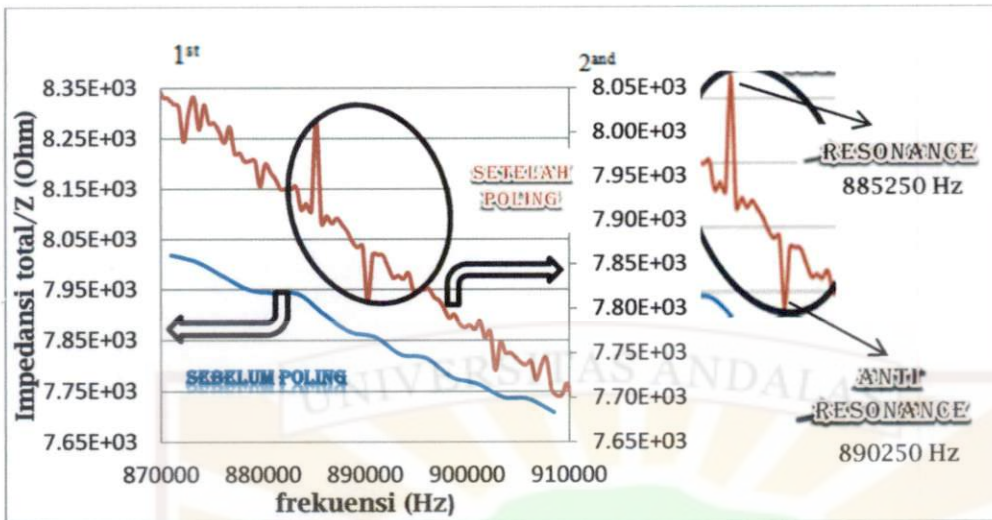
Berdasarkan hasil pada Gambar 4.7 didapatkan, jika frekuensi semakin tinggi maka harga impedansi total semakin rendah. Nilai impedansi total sesudah dan sebelum proses pemolingan menunjukkan pengukuran impedansi yang berbeda, dimana impedansi setelah proses pemolingan lebih rendah dari nilai impedansi sebelum proses pemolingan yaitu dengan perbandingan 1:3. Hal ini disebabkan karena nilai impedansi dari bahan dipengaruhi oleh besarnya nilai hambatan kapasitansi pada bahan tersebut. Besarnya nilai hambatan kapasitansi X_c ketika dilakukan poling semakin besar sehingga nilai impedansi total Z semakin kecil dibandingkan sebelum dilakukan proses pemolingan. Akan tetapi impedansi sebelum dipoling tidak memberikan informasi yang jelas tentang keberadaan frekuensi resonan dan anti resonan. Sedangkan pada pengukuran impedansi setelah dipoling menunjukkan adanya efek frekuensi resonan dan anti resonan. Pengukuran impedansi ini ditampilkan dengan data semi kuantitatif, sehingga harga mutlak dari impedansi harus dikoreksi dengan bahan dasar.



Gambar 4.8 Nilai frekuensi diri pada tekanan 3500 Psi

Berdasarkan Gambar 4.8 juga didapatkan bahwa perbandingan nilai impedansi sesudah dan sebelum poling sama yaitu 1:3. Nilai impedansi pada daerah frekuensi yang ditunjukkan oleh gambar 4.8 jauh lebih kecil dibandingkan nilai impedansi pada gambar 4.8 ini menunjukkan bahwa nilai impedansi berbanding terbalik dengan nilai frekuensi yaitu semakin besar frekuensi maka nilai impedansinya semakin kecil dan sebaliknya. Pada frekuensi 490 KHz seakan-akan juga menampilkan nilai frekuensi resonan dan anti resonan akan tetapi sangat kecil dan kemungkinan frekuensi tersebut adalah *noise* dari pengukuran yang dilakukan.

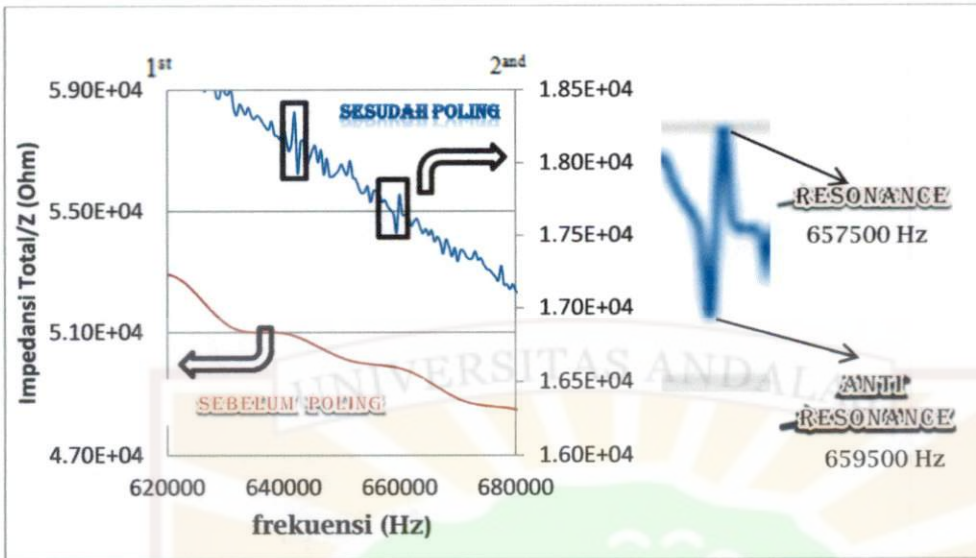
Frekuensi diri pada bahan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT dengan tekanan 5000 Psi lebih tinggi jika dibandingkan dengan bahan piezoelektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT dengan tekan 3500 Psi. Pada tekanan 5000 Psi ini, didapatkan nilai frekuensi dirinya yaitu frekuensi resonan pada 885,25 KHz dan frekuensi anti resonan pada 890,25 KHz. Pada daerah frekuensi 870 KHz dan 902 KHz juga terlihat seakan-akan merupakan nilai frekuensi resonan dan anti resonan. Namun hasilnya kecil, ini juga merupakan frekuensi *noise* dari pengukuran. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Nilai frekuensi diri pada tekanan 5000 Psi

Pada Gambar 4.9 terlihat perbedaan yang cukup signifikan antara bentuk grafik sebelum poling dan setelah poling. Namun hampir tidak ada perbedaan pada nilai impedansi sebelum poling dan sesudah poling. Hal ini menjelaskan bahwa semakin tinggi frekuensi maka perbedaan nilai impedansi keduanya berkurang, bahkan nilai impedansinya hampir sama.

Selanjutnya, frekuensi diri pada bahan piezoelektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT dengan tekanan 6000 Psi memiliki nilai frekuensi diri yaitu frekuensi resonan pada 657,5 KHz dan frekuensi anti resonan pada 659,5 KHz. Namun gambar yang ditampilkan berbeda dengan frekuensi diri dengan tekanan 3500 Psi dan 5000 Psi, dimana jika sebelumnya yang muncul frekuensi resonan tapi pada tekanan 6000 Psi yang tampil duluan adalah frekuensi anti resonan yang ditunjukkan oleh Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Nilai frekuensi diri pada tekanan 6000 Psi

Berdasarkan Gambar 4.10 di atas juga terlihat frekuensi resonan pada frekuensi 642 KHz dan anti resonan pada frekuensi 642,5 KHz serta resonan pada frekuensi 660 KHz dan anti resonan pada frekuensi 659,5 KHz. Namun pada frekuensi diri yang kedua, yang pertama kali tampil adalah frekuensi resonannya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

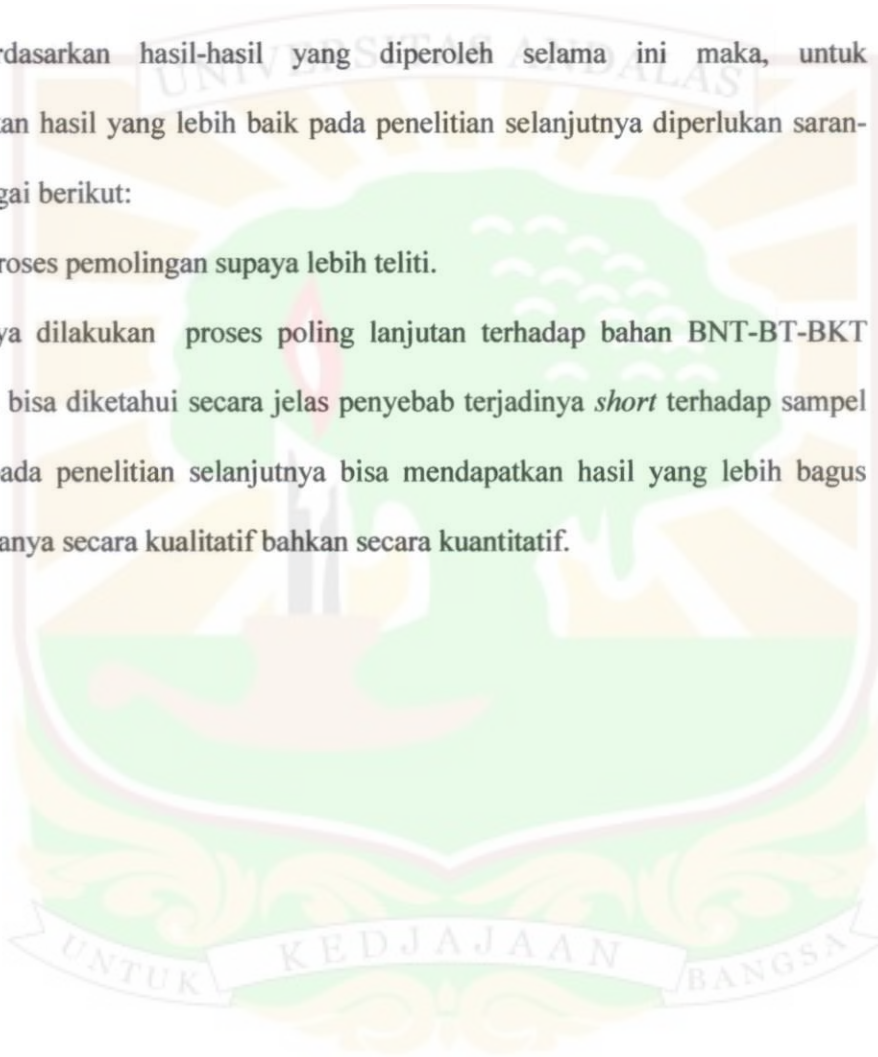
1. Bahan BNT-BT-BKT memiliki struktur kristal perovskite rhombohedral yang merupakan sistem kristal piezoelektrik.
2. Bahan piezoelektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT memiliki nilai FWHM (*Full Width Half Maximum*) sebesar $0,2158273^\circ$ dan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT sebesar $0,207143^\circ$.
3. Bahan piezoelektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT memiliki konstanta dielektrik $1,87 \times 10^2$ lebih besar dari konstanta dielektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT yaitu $1,29 \times 10^2$.
4. Bahan piezoelektrik dengan komposisi 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT lebih bersifat *Hard Ceramic* dibandingkan 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT.
5. Bahan Piezoelektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT dan 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT memiliki temperatur Curie 428°C .
6. Proses pemolangan pada bahan piezoelektrik dengan komposisi 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT gagal. Sedangkan pada bahan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT berhasil dilakukan.

7. Pada bahan 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT hasil poling didapatkan nilai frekuensi diri serta ketika dilakukan uji tekan terdapat beda potensial (tegangan) yang dihasilkan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil-hasil yang diperoleh selama ini maka, untuk mendapatkan hasil yang lebih baik pada penelitian selanjutnya diperlukan saran-saran sebagai berikut:

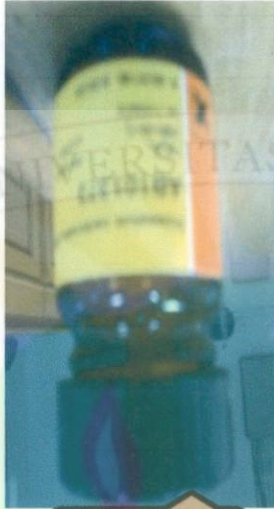
1. Pada proses pemolangan supaya lebih teliti.
2. Perlunya dilakukan proses poling lanjutan terhadap bahan BNT-BT-BKT supaya bisa diketahui secara jelas penyebab terjadinya *short* terhadap sampel serta pada penelitian selanjutnya bisa mendapatkan hasil yang lebih bagus tidak hanya secara kualitatif bahkan secara kuantitatif.



DAFTAR PUSTAKA

- Ahda and Mardiyanto, 2010, *Synthesis of Lead Free Piezoelektric BNT Ceramics by Use of Solid State Reaction Method*, To be Published.
- Callister, 1994, *Material Science and Engineering and introduction*, 3rd Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, pp.9 – 14, 623 – 633.
- Cullity, 1978, *Element of X-Ray Diffraction*. Addison- Wesley pub, Co. Inc., Massachusets.
- Donnelly, Harada, and Yamashita, 2007, *Cristal Growth and Elektrical Properties of Lead-Free Piezoelektric Material. (Na_{0,5}Bi_{0,5})TiO₃ – BaTiO₃*. Japanese Journal Applied Physics, 40, 5722-5726.
- Fahyuan, H.D, 2011, Pengaruh Penambahan BKT, *Piezo ceramic*. BNT-BT dengan metode *Solid State Reaction*.
- Hiruma., dkk, Thermal depoling process and piezoelectric properties of bismuth sodium titanate ceramics. *J. Appl. Phys.* **2009**, *105*, 084112.
- Hiruma, Y., dkk, Ferroelectric and piezoelectric properties of (Bi_{1/2}K_{1/2}) TiO₃ ceramics. *Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 1* **2005**, *44*, 5040-5044.
- Hussain, dkk, 2009, *Anisotropic electrical properties of Bi_{0.5}(Na_{0.75}K_{0.25})_{0.5}TiO₃ ceramics fabricated by reactive templated grain growth (RTGG)*, Applied Physics.
- Li, J.F., dkk, Ferroelectric and piezoelectric properties of fine-grained Na_{0.5}K_{0.5}NbO₃ lead-free piezoelectric ceramics prepared by spark plasma sintering. *J. Amer. Ceram. Soc.* **2006**, *89*, 706-709.
- Listrik Tegangan Manusia, 2006, <http://Budimanlai.wordpress.com>, Diakses Februari 2012.
- Mielke, A.; Roubicek, T., (2003). "A Rate-Independent Model for Inelastic Behavior of Shape-Memory Alloys", *Multiscale Model. Simul.* 1 (4): 571–597
- Nagata, dkk, Lead-free piezoelectric ceramics of (Bi_{1/2}Na_{1/2}) TiO₃- BiFeO₃ system, *Key Eng. Mat*, **1999**, *169-170*, 37-40.

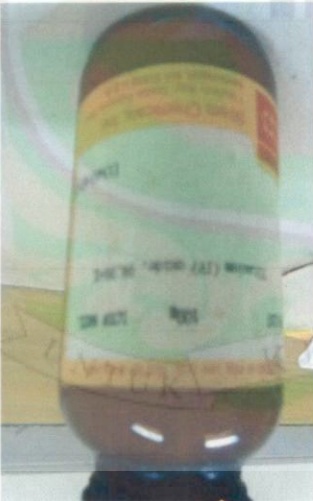
- Saputri, Winda, 2011, Penggunaan Piezoelektrik sebagai Sumber energi LED *Street Light* untuk penerangan jalan.
- Sharma, M., *Studies on structural dielectric and Piezoelectric properties of doped Pct ceramics.*
- Takenaka, dkk, (Bi_{1/2}Na_{1/2}) TiO₃-BaTiO₃ System for Lead-Free Piezoelectric Ceramics. *Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 1* **1991**, 30, 2236-2239.
- Theory piezo ceramic, 2012, <http://www.Americanpiezo.com>, Diakses Mei 2012.
- Theory piezoelektrik, 2009, <http://elreg-04.blogspot.com>, Diakses September 2012.
- Triwahyuni, Dona, 2011, Sintesis dan Karakterisasi Bahan Piezoelektrik Bi_{0,5}Na_{0,5}TiO₃ (BNT) dengan Metoda *Molten Salt*.
- Wang, X. G. Tang, and H.L.W.Chan., 2004, Bi_{1/2}Na_{1/2}TiO₃ – Bi_{1/2}K_{1/2}TiO₃ – BaTiO₃ *lead-free piezoelektrik ceramics*, Department of Applied Physics and Material Research Center, the Hongkong Politechnic University, Huanghom kowlon, Hongkong, China.
- Yao, Z., dkk, *Morphotropic phase boundary and piezoelectric properties of (Bi_{1/2}Na_{1/2})_{1-x}(Bi_{1/2}K_{1/2})_xTiO₃-0.03(Na_{0.5}K_{0.5})NbO₃ ferroelectric ceramics. Mater. Lett.* **2009**, 63, 547-550.
- Zuo, R., dkk, Phase structures and electrical properties of new lead-free (Na_{0.5}K_{0.5}) NbO₃-(Bi_{0.5}Na_{0.5}) TiO₃ ceramics. *Appl. Phys. Lett.* **2007**, 90, 092904.



(K_2CO_3)



$(BaCO_3)$



(TiO_2)



(Na_2CO_3)



(Bi_2O_3)

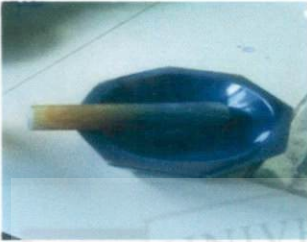
LAMPIRAN 1

LAMPIRAN 2

alat Penelitian



timbangan



Mortar



Spatula



Dies



Ball mill carver



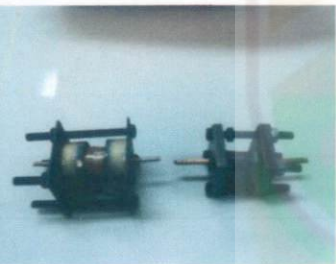
Furnace



Keramik tahan panas



Sumber tegangan



Elektroda



Elektroda statis



Arbin

Karakterisasi



XRD



LCR meter

LAMPIRAN 3

Konstanta Dielektrik 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT

C	Permitivitas Bahan	konstanta dielektrik
7.04E-12	1.82745E-10	2.06E+01
6.74E-12	1.75094E-10	1.98E+01
6.69E-12	1.73862E-10	1.96E+01
6.18E-12	1.60449E-10	1.81E+01
6.67E-12	1.7326E-10	1.96E+01
6.69E-12	1.73675E-10	1.96E+01
6.97E-12	1.81039E-10	2.05E+01
7.17E-12	1.86356E-10	2.11E+01
7.76E-12	2.01491E-10	2.28E+01
8.17E-12	2.12306E-10	2.40E+01
8.68E-12	2.25387E-10	2.55E+01
8.65E-12	2.24569E-10	2.54E+01
8.97E-12	2.33104E-10	2.63E+01
9.12E-12	2.36787E-10	2.68E+01
9.50E-12	2.46668E-10	2.79E+01
9.73E-12	2.52706E-10	2.86E+01
1.04E-11	2.69636E-10	3.05E+01
1.11E-11	2.87195E-10	3.25E+01
1.14E-11	2.95039E-10	3.33E+01
1.17E-11	3.03974E-10	3.43E+01
1.25E-11	3.23506E-10	3.66E+01
1.32E-11	3.43091E-10	3.88E+01
1.48E-11	3.83273E-10	4.33E+01
1.59E-11	4.12961E-10	4.67E+01
1.76E-11	4.57299E-10	5.17E+01
1.87E-11	4.85273E-10	5.48E+01
2.27E-11	5.89143E-10	6.66E+01
2.54E-11	6.59922E-10	7.46E+01
2.89E-11	7.4987E-10	8.47E+01
3.26E-11	8.4626E-10	9.56E+01
3.52E-11	9.14961E-10	1.03E+02
3.76E-11	9.76935E-10	1.10E+02
3.86E-11	1.00148E-09	1.13E+02
4.03E-11	1.04605E-09	1.18E+02
4.14E-11	1.07636E-09	1.22E+02
4.25E-11	1.10306E-09	1.25E+02
4.37E-11	1.13499E-09	1.28E+02
4.33E-11	1.12429E-09	1.27E+02
4.39E-11	1.13904E-09	1.29E+02
4.36E-11	1.1326E-09	1.28E+02
4.31E-11	1.11919E-09	1.26E+02
4.17E-11	1.08358E-09	1.22E+02

d	0.00225
A	0.000086625
Perm vakum	8.85E-12

LAMPIRAN 4

Konstanta Dielektrik 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT

Suhu	C	permitivitas bahan	konstanta dielektrik
32	7.46E-12	1.94672E-10	2.20E+01
57	7.62E-12	1.98723E-10	2.25E+01
100	8.27E-12	2.15833E-10	2.44E+01
125	7.90E-12	2.06005E-10	2.33E+01
150	8.20E-12	2.1385E-10	2.42E+01
175	8.01E-12	2.08992E-10	2.36E+01
200	8.65E-12	2.2565E-10	2.55E+01
225	9.42E-12	2.45781E-10	2.78E+01
250	1.03E-11	2.68695E-10	3.04E+01
275	1.08E-11	2.81375E-10	3.18E+01
300	1.21E-11	3.14952E-10	3.56E+01
305	1.21E-11	3.15369E-10	3.56E+01
310	1.22E-11	3.18135E-10	3.59E+01
315	1.25E-11	3.2557E-10	3.68E+01
320	1.25E-11	3.25518E-10	3.68E+01
330	1.30E-11	3.39476E-10	3.84E+01
340	1.34E-11	3.50147E-10	3.96E+01
345	1.37E-11	3.58704E-10	4.05E+01
350	1.47E-11	3.84141E-10	4.34E+01
355	1.55E-11	4.0543E-10	4.58E+01
360	1.68E-11	4.39112E-10	4.96E+01
365	1.85E-11	4.8242E-10	5.45E+01
370	1.96E-11	5.12423E-10	5.79E+01
375	2.24E-11	5.85082E-10	6.61E+01
380	2.43E-11	6.34574E-10	7.17E+01
385	3.02E-11	7.87693E-10	8.90E+01
390	3.32E-11	8.66666E-10	9.79E+01
395	3.61E-11	9.41204E-10	1.06E+02
400	4.26E-11	1.11102E-09	1.26E+02
405	4.77E-11	1.24371E-09	1.41E+02
410	5.22E-11	1.36148E-09	1.54E+02
415	5.57E-11	1.45277E-09	1.64E+02
420	5.70E-11	1.48585E-09	1.68E+02
425	5.84E-11	1.52331E-09	1.72E+02
430	6.08E-11	1.58587E-09	1.79E+02
435	6.23E-11	1.6253E-09	1.84E+02
440	6.32E-11	1.64841E-09	1.86E+02
445	6.27E-11	1.63552E-09	1.85E+02
450	6.34E-11	1.65392E-09	1.87E+02
455	6.31E-11	1.64533E-09	1.86E+02
460	6.30E-11	1.64408E-09	1.86E+02
465	6.24E-11	1.6284E-09	1.84E+02

475	6.12E-11	1.59634E-09	1.80E+02
485	6.09E-11	1.58914E-09	1.80E+02
500	5.74E-11	1.49874E-09	1.69E+02
525	5.55E-11	1.4483E-09	1.64E+02

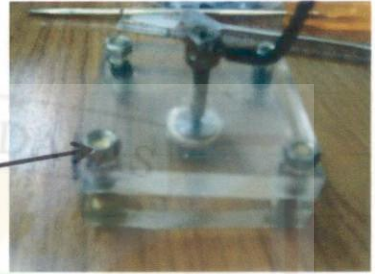
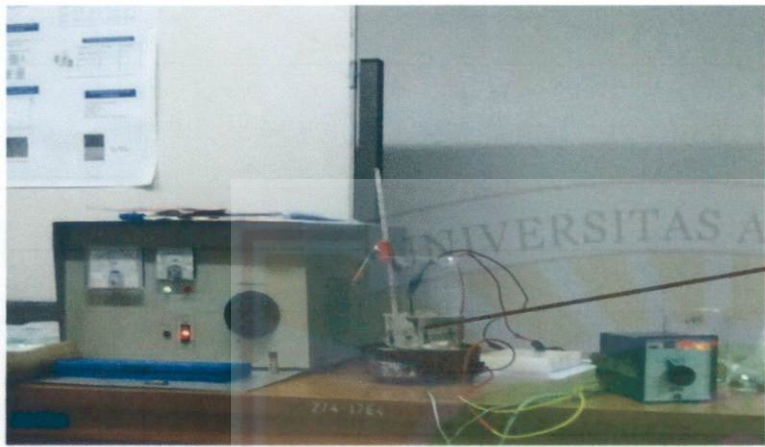
d	0.00226
A	8.66E-05
permitivita	8.85E-12



MILIK
UPT PERPUSTAKAAN
UNIVERSITAS ANDALAS

LAMPIRAN 5

Poling



Hasil Poling 0,93BNT-0,05BT-0,02BKT (gagal)



Hasil Poling 0,90BNT-0,05BT-0,05BKT (Berhasil)

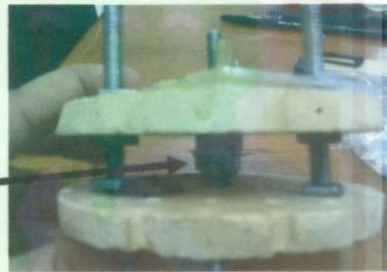


LAMPIRAN 6

Uji Tekan Hasil poling dengan Arbin Instrument



Di tekan dalam interval waktu yang berbeda dan tekanan yang tidak ditentukan



LAMPIRAN 7

Hasil poling dengan Arbin Instrument

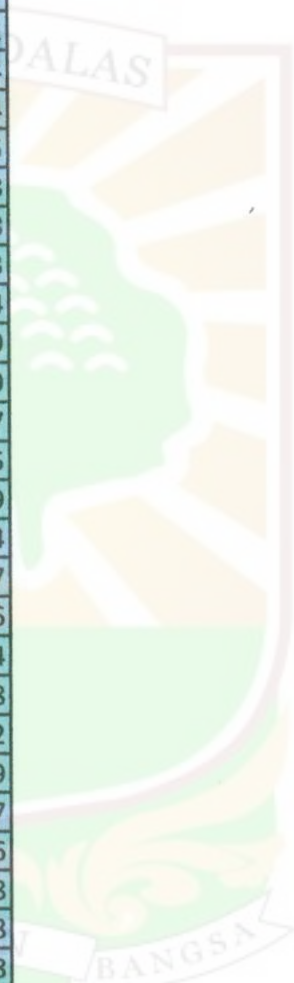
waktu (detik)	V
1.001850345	0.091167063
2.017464411	0.09055429
3.017471826	0.081056342
4.033031858	0.084732965
5.048643414	0.086571276
6.064151682	0.084120192
7.079757052	0.079524413
8.095448451	0.086264893
9.095511459	0.084120192
10.1109467	0.086877666
11.11106471	0.073396705
12.12654741	0.087796822
13.12657512	0.078273098
14.12670976	0.085958511
15.1421238	0.086571276
16.14214289	0.085039347
17.15769422	0.080443569
18.1734351	0.086571276
19.1889384	0.081669115
20.20453825	0.081975497
21.22023112	0.089328751
22.23587951	0.084732965
23.25135327	0.087796822
24.26698078	0.080749951
25.26736957	0.089022361
26.28257687	0.080443569
27.29815441	0.08228188
28.3138267	0.088409588
29.32950738	0.08565212
30.34499149	0.089941517
31.36058143	0.081975497
32.37620676	0.084120192
33.37628183	0.083507426
34.39179526	0.086571276
35.40740367	0.083813809
36.42298425	0.088103205
37.42307846	0.08258827
38.43860245	0.084426582
39.45420605	0.08565212
40.469813	0.11200127
41.46991908	0.094537303
42.48540983	0.106179945

43.50101436	0.107711874
44.50107623	0.101584166
45.51671182	0.12333753
46.53225799	0.07584779
47.53226691	0.080137186
48.5477864	0.087184049
49.54778946	0.07584779
50.54792548	0.075235017
51.56338208	0.082894653
52.57898038	0.071864776
53.59457787	0.087490432
54.59469016	0.080443569
55.61017062	0.086571276
56.62588036	0.07921803
57.64140082	0.074622244
58.6415054	0.081975497
59.65697692	0.076154172
60.67261971	0.078605257
61.67263607	0.082894653
62.68827532	0.079830796
63.70380334	0.078298874
64.71938809	0.074928634
65.73499094	0.070639238
66.73510887	0.067881763
67.75060779	0.070639238
68.76623165	0.08258827
69.78181845	0.077992484
70.78193462	0.07921803
71.7973962	0.077379711
72.81302675	0.095762841
73.81302872	0.080443569
74.81306059	0.152750537
75.81310321	0.176342219
76.82858278	0.101584166
77.84416591	0.066962607
78.85976826	0.066741169
79.85987673	0.068800919
80.87537728	0.072477549
81.8909927	0.080443569
82.90658673	0.071252003
83.90666502	0.078605257
84.92217076	0.079830796
85.93779731	0.071864776
86.95340674	0.072171159
87.95347034	0.073090315
88.96897273	0.065430678
89.98457895	0.07921803



91.00020517	0.081669115
92.00030515	0.080137186
93.0158785	0.074009478
94.03148229	0.079524413
95.04700064	0.073703088
96.04709717	0.072171159
97.0471546	0.07891164
98.06266712	0.081056342
99.07817054	0.074315861
100.0939759	0.074928634
101.1093965	0.077686101
102.1249998	0.077379711
103.1406085	0.066349842
104.1407168	0.06857948
105.1562149	0.076154172
106.1718031	0.090860672
107.187407	0.077073328
108.1875213	0.074928634
109.2030355	0.079524413
110.2186074	0.081362724
111.2342811	0.164393187
112.2343943	0.166231498
113.2498128	0.07921803
114.2498264	0.065430678
115.2654781	0.078298874
116.2811247	0.184921011
117.2966207	0.079830796
118.3123096	0.0608349
119.3123616	0.064817913
120.3279759	0.081056342
121.3434892	0.071252003
122.3591589	0.080749951
123.3746301	0.080749951
124.3747801	0.074622244
125.3902322	0.077073328
126.4058453	0.07891164
127.4214444	0.081669115
128.4215432	0.070639238
129.4370396	0.077992484
130.4526685	0.07891164
131.4682472	0.063285984
132.468344	0.066656224
133.4838473	0.072477549
134.4994559	0.073703088
135.5151682	0.071252003
136.5307519	0.076154172
137.5462883	0.079524413

138.5463916	0.081362724
139.5618821	0.074928634
140.5620676	0.081056342
141.5774712	0.07921803
142.5930683	0.075235017
143.6087136	0.078605257
144.6087959	0.068494536
145.624326	0.076154172
146.6243359	0.08228188
147.6398652	0.073566594
148.6399051	0.083813809
149.6399725	0.071252003
150.6555066	0.080749951
151.6710285	0.093005374
152.6710532	0.07891164
153.6867788	0.135899335
154.7022618	0.08228188
155.7022862	0.065430678
156.7178421	0.053175263
157.7335229	0.166844264
158.7490428	0.110162959
159.7646531	0.065737069
160.7646552	0.075235017
161.780321	0.073396705
162.7958421	0.075737069
163.8114717	0.089472864
164.8115022	0.063898757
165.8271646	0.079830796
166.843002	0.07891164
167.8582725	0.08228188
168.8738782	0.087796822
169.8739712	0.087184049
170.8894802	0.09729477
171.9051514	0.088051656
172.9206628	0.065430678
173.920755	0.073703088
174.9362666	0.063430678
175.9519189	0.073702188
176.9519441	0.074928634
177.9676005	0.086264893
178.9830634	0.070945621
179.9986769	0.063285984
181.0144317	0.06757538
182.0299706	0.062673211
183.0455187	0.075235017
184.0611452	0.061226231
185.0768284	0.062008893



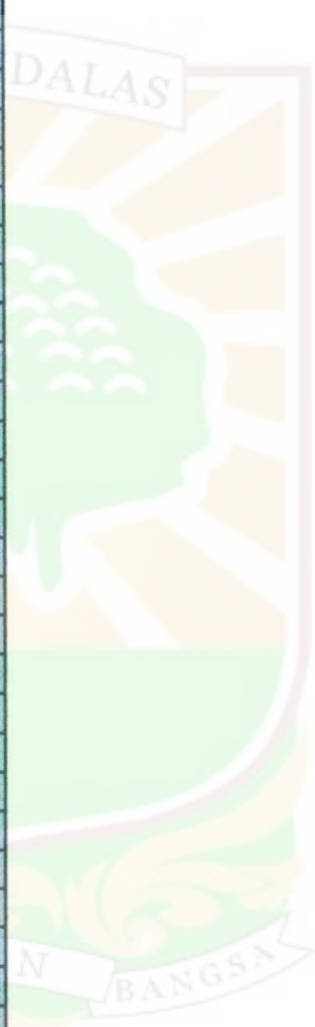
186.0924133	0.081975497
187.1079529	0.07891164
188.1080078	0.070639238
189.1236913	0.061728283
190.1391537	0.060698406
191.1547345	0.164393187
192.1703755	0.164699569
193.1704407	0.063898757
194.1859327	0.054094419
195.2015483	0.061141286
196.2172534	0.06420514
197.2172556	0.06757538
198.2327957	0.074315861
199.2483685	0.158265471
200.2639798	0.09392453
201.2640684	0.067268997
202.2795444	0.057158276
203.2951547	0.13314186
204.310881	0.091167063
205.3264108	0.07891164
206.3419841	0.061447673
207.3420511	0.087796822
208.357579	0.077379711
209.3577468	0.074009478
210.3731963	0.082894653
211.3887836	0.06757538
212.4043767	0.083507426
213.4044628	0.080749951
214.4199736	0.080749951
215.435564	0.084120192
216.4511869	0.077992484
217.4512731	0.078605257
218.4668096	0.078298874
219.4823719	0.084732965
220.4980028	0.084120192
221.4980682	0.066962607
222.513575	0.086571276
223.529221	0.08258827
224.5292512	0.078298874
225.544878	0.081362724
226.5603721	0.085039347
227.5759871	0.08228188
228.5915944	0.085345738
229.5916947	0.085039347
230.592023	0.080137186
231.6072037	0.070639238
232.6228323	0.07921803

233.6385458	0.076766945
234.6539868	0.068494536
235.6540626	0.075235017
236.6695793	0.08228188
237.6853331	0.079524413
238.7008132	0.074315861
239.7163933	0.074622244
240.7320142	0.070945621
241.7321087	0.059609357
242.7476136	0.066656224
243.7632144	0.072171159
244.7788297	0.074622244
245.7789129	0.076460555
246.794426	0.119967289
247.8100417	0.184921011
248.825684	0.093005374
249.8257291	0.058383815
250.8412152	0.117209822
251.8412173	0.175423056
252.85682	0.070945621
253.8725289	0.061754055
254.8880243	0.081056342
255.8880487	0.080137186
256.9036844	0.079524413
257.9037121	0.08565212
258.9192273	0.077992484
259.9348209	0.079830796
260.9504309	0.083813809
261.9505168	0.079524413
262.9660482	0.08258827
263.981613	0.08228188
264.9973165	0.084426582
266.0129482	0.07891164
267.028522	0.07891164
268.0440662	0.086877666
269.0597107	0.079830796
270.0597581	0.081669115
271.075258	0.085345738
272.0909412	0.089635134
273.0911167	0.09055429
274.106565	0.080137186
275.1220687	0.087184049
276.1220689	0.08258827
277.122079	0.083813809
278.1377491	0.081056342
279.138045	0.086571276
280.1532241	0.086877666

281.1532945	0.088715978
282.1688067	0.08228188
283.1845387	0.089941517
284.2000229	0.088715978
285.2156212	0.081975497
286.2313009	0.079830796
287.2314076	0.085958511
288.2469219	0.086571276
289.2624469	0.108324647
290.2780516	0.081975497
291.2781436	0.088409588
292.2936738	0.197789192
293.2936951	0.081975497
294.3092668	0.077686101
295.3250715	0.191355109
296.3404359	0.087796822
297.356053	0.082894653
298.3716687	0.092086218
299.3717523	0.08565212
300.3872472	0.092392601
301.402842	0.084732965
302.4184582	0.091779828
303.4185559	0.090247907
304.4340655	0.087490432
305.4496514	0.091473445
306.4652774	0.087796822
307.4653656	0.093311757
308.480846	0.087184049
309.4808525	0.092086218
310.4964387	0.093005374
311.5121575	0.084732965
312.5276971	0.092086218
313.5433057	0.090247907
314.5433193	0.090247907
315.5589776	0.084732965
316.5745188	0.092698984
317.5900743	0.080443569
318.5901058	0.081669115
319.5901505	0.096681997
320.6057758	0.096681997
321.6213418	0.074622244
322.6368704	0.090860672
323.6526493	0.09055429
324.6680879	0.085345738
325.6836953	0.091779828
326.6993148	0.087184049
327.6993888	0.087184049



328.7148818	0.089635134
329.730494	0.087490432
330.7461917	0.086571276
331.7617373	0.091167063
332.7773077	0.086264893
333.7929188	0.090860672
334.8086606	0.089328751
335.8241518	0.17144005
336.8397565	0.08228188
337.8399953	0.086264893
338.8554571	0.074622244
339.8709436	0.187984869
340.8865597	0.085345738
341.9022553	0.068494536
342.9177803	0.14202705
343.933374	0.081975497
344.9489922	0.087184049
345.9647012	0.086571276
346.9647236	0.078605257
347.980184	0.084426582
348.9958004	0.085958511
350.011493	0.071252003
351.0115394	0.075235017
352.0270553	0.081056342
353.0425947	0.069720075
354.0583185	0.071864776
355.0739456	0.078298874
356.0895002	0.071864776
357.1050412	0.074009478
358.1052025	0.077379711
359.1206292	0.084732965
360.1362281	0.079830796
361.1518434	0.085039347
362.1519262	0.079830796
363.1674356	0.090860672
364.1830072	0.081669115
365.1986367	0.052562494
366.1987381	0.08258827
367.2142149	0.082894653
368.2298949	0.087490432
369.2455775	0.083507426
370.2610591	0.081975497
371.2766598	0.083507426
372.2922522	0.091167063
373.3079982	0.085958511
374.3080909	0.095762841
375.323456	0.096681997



376.3390663	0.081362724
377.3548054	0.089635134
378.3702792	0.178486913
379.3858891	0.101890549
380.4016113	0.07891164
381.4171215	0.063898757
382.4327079	0.169601738
383.4483188	0.160716563
384.4640468	0.088103205
385.4795418	0.070026465
386.4951405	0.169601738
387.4952352	0.160716563
388.5108437	0.088103205
389.5263848	0.070026465
390.5419499	0.160986563
391.5575898	0.160716561
392.5576494	0.088103208
393.5731585	0.066043451
394.5887586	0.068188153
395.5887596	0.063592367
396.6044884	0.074928634
397.6200221	0.076154172
398.635609	0.075541399
399.6511655	0.076154172
400.6513142	0.072783932
401.6668417	0.082894653
402.6823595	0.076460555
403.6824312	0.080749951
404.6980757	0.080749951
405.7135595	0.080137186
406.7136189	0.074622244
407.7291525	0.076766945
408.7448788	0.086571276
409.7603841	0.077686101
410.775973	0.085039347
411.7915838	0.081362724
412.791665	0.08258827
413.8072124	0.077073328
414.8227937	0.053175263
415.8227985	0.093566594
416.8385615	0.080749951
417.8540053	0.084120192
418.8696077	0.210351005
419.8852095	0.23700653
420.0570809	0.170827284



LAMPIRAN 8

Data frekuensi diri bahan dengan tekanan 3500 Psi

frekuensi	sebelum poling	frekuensi	sesudah poling
50	1.99E+08	500	1.64E+07
60	1.74E+08	1000	8.66E+06
70	1.35E+08	1500	5.93E+06
80	1.33E+08	2000	4.51E+06
90	1.20E+08	2500	3.65E+06
100	1.07E+08	3000	3.08E+06
110	1.01E+08	3500	2.66E+06
120	9.53E+07	4000	2.33E+06
130	8.84E+07	4500	2.08E+06
140	8.45E+07	5000	1.88E+06
150	8.01E+07	5500	1.71E+06
160	7.61E+07	6000	1.58E+06
170	7.30E+07	6500	1.46E+06
180	7.00E+07	7000	1.36E+06
190	6.73E+07	7500	1.27E+06
200	6.49E+07	8000	1.20E+06
210	6.25E+07	8500	1.13E+06
220	6.05E+07	9000	1.07E+06
230	5.85E+07	9500	1.01E+06
240	5.69E+07	10000	9.62E+05
250	5.53E+07	10500	9.28E+05
260	5.33E+07	11000	8.82E+05
270	5.16E+07	11500	8.49E+05
280	5.02E+07	12000	7.55E+05
290	4.89E+07	12500	7.75E+05
300	4.78E+07	13000	7.47E+05
310	4.69E+07	13500	7.14E+05
320	4.55E+07	14000	6.87E+05
330	4.45E+07	14500	6.70E+05
340	4.36E+07	15000	6.56E+05
350	4.23E+07	15500	6.30E+05
360	4.14E+07	16000	6.13E+05
370	4.08E+07	16500	5.95E+05
380	4.01E+07	17000	5.86E+05
390	3.93E+07	17500	5.71E+05
400	3.86E+07	18000	5.51E+05
410	3.78E+07	18500	5.34E+05
420	3.71E+07	19000	5.19E+05
430	3.66E+07	19500	5.02E+05
440	3.61E+07	20000	4.82E+05
450	3.53E+07	20500	4.79E+05
460	3.46E+07	21000	4.66E+05

LAMPIRAN 9

Data frekuensi diri bahan dengan tekanan 3500 Psi

frekuensi	sesudah poling	frekuensi	sebelum poling
500	1.64E+07	500	3.03E+07
1000	8.66E+06	510	3.00E+07
1500	5.93E+06	520	2.95E+07
2000	4.51E+06	545	2.85E+07
2500	3.65E+06	570	2.75E+07
3000	3.08E+06	595	2.67E+07
3500	2.66E+06	620	2.60E+07
4000	2.33E+06	645	2.52E+07
4500	2.08E+06	670	2.45E+07
5000	1.88E+06	695	2.38E+07
5500	1.71E+06	720	2.32E+07
6000	1.58E+06	745	2.26E+07
6500	1.46E+06	770	2.21E+07
7000	1.36E+06	795	2.16E+07
7500	1.27E+06	820	2.11E+07
8000	1.20E+06	845	2.06E+07
8500	1.13E+06	870	2.01E+07
9000	1.07E+06	895	1.98E+07
9500	1.01E+06	920	1.93E+07
10000	9.62E+05	945	1.90E+07
10500	9.28E+05	970	1.87E+07
11000	8.82E+05	995	1.83E+07
11500	8.49E+05	1020	1.80E+07
12000	7.55E+05	1045	1.77E+07
12500	7.75E+05	1070	1.74E+07
13000	7.47E+05	1095	1.71E+07
13500	7.14E+05	1120	1.68E+07
14000	6.87E+05	1145	1.66E+07
14500	6.70E+05	1200	1.60E+07
15000	6.56E+05	1250	1.55E+07
15500	6.30E+05	1300	1.50E+07
16000	6.13E+05	1350	1.46E+07
16500	5.95E+05	1400	1.42E+07
17000	5.86E+05	1450	1.39E+07
17500	5.71E+05	1500	1.35E+07
18000	5.51E+05	1550	1.32E+07
18500	5.34E+05	1600	1.29E+07
19000	5.19E+05	1650	1.25E+07
19500	5.02E+05	1700	1.23E+07
20000	4.82E+05	1750	1.19E+07
20500	4.79E+05	1800	1.18E+07
21000	4.66E+05	1850	1.15E+07

LAMPIRAN 10

Data frekuensi diri bahan dengan tekanan 5000 Psi

frekuensi	sesudah poling	frekuensi	sebelum poling
869750	8.05E+03	871000	8.05E+03
870250	8.05E+03	873500	8.02E+03
870750	8.04E+03	876000	8.00E+03
871250	8.04E+03	878500	7.98E+03
871750	8.03E+03	881000	7.95E+03
872250	8.03E+03	883500	7.94E+03
872750	7.99E+03	886000	7.94E+03
873250	8.02E+03	888500	7.90E+03
873750	8.04E+03	891000	7.87E+03
874250	8.00E+03	893500	7.86E+03
874750	8.03E+03	896000	7.82E+03
875250	8.01E+03	898500	7.82E+03
875750	8.01E+03	901000	7.78E+03
876250	8.00E+03	903500	7.76E+03
876750	7.99E+03	906000	7.74E+03
877250	8.01E+03	908500	7.73E+03
877750	7.98E+03	911000	7.71E+03
878250	7.98E+03		
878750	7.97E+03		
879250	7.97E+03		
879750	7.97E+03		
880250	7.94E+03		
880750	7.96E+03		
881250	7.96E+03		
881750	7.95E+03		
882250	7.94E+03		
882750	7.94E+03		
883250	7.94E+03		
883750	7.94E+03		
884250	7.91E+03		
884750	7.92E+03		
885250	7.91E+03		
885750	8.01E+03		
886250	7.90E+03		
886750	7.91E+03		
887250	7.90E+03		
887750	7.90E+03		
888250	7.90E+03		
888750	7.89E+03		
889250	7.88E+03		
889750	7.87E+03		
890250	7.87E+03		

LAMPIRAN 11

Data frekuensi diri bahan dengan tekanan 6000 Psi

frekuensi	sesudah poling	frekuensi	sebelum poling
600500	1.93E+04	601100	5.53E+04
601000	1.93E+04	611100	5.38E+04
601500	1.94E+04	621100	5.26E+04
602000	1.92E+04	631100	5.29E+04
602500	1.93E+04	641100	5.12E+04
603000	1.93E+04	651100	5.09E+04
603500	1.93E+04	661100	5.01E+04
604000	1.92E+04	671100	4.98E+04
604500	1.92E+04	681100	4.88E+04
605000	1.93E+04	691100	4.84E+04
605500	1.92E+04	701100	4.77E+04
606000	1.92E+04	711100	4.75E+04
606500	1.92E+04	721100	4.64E+04
607000	1.92E+04	731100	4.51E+04
607500	1.93E+04	741100	4.63E+04
608000	1.90E+04	751100	4.43E+04
608500	1.91E+04	761100	4.38E+04
609000	1.91E+04	771100	4.35E+04
609500	1.92E+04	781100	4.23E+04
610000	1.90E+04	791100	4.21E+04
610500	1.91E+04	801100	4.17E+04
611000	1.90E+04		
611500	1.90E+04		
612000	1.90E+04		
612500	1.91E+04		
613000	1.90E+04		
613500	1.89E+04		
614000	1.89E+04		
614500	1.89E+04		
615000	1.89E+04		
615500	1.89E+04		
616000	1.88E+04		
616500	1.89E+04		
617000	1.90E+04		
617500	1.89E+04		
618000	1.89E+04		
618500	1.89E+04		
619000	1.88E+04		
619500	1.87E+04		
620000	1.88E+04		
620500	1.88E+04		
621000	1.88E+04		