



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PEMBALIKAN POLARISASI DAN MODEL
HISTERISIS PADA MATERIAL FILM TIPIS
FERROELEKTRIK $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$ YANG DIDADAH Mg , Cu
DAN Pb**

TESIS

**TEGUH YOGA RAKSA
6305000246**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
JAKARTA
JULI 2008**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PEMBALIKAN POLARISASI DAN MODEL
HISTERISIS PADA MATERIAL FILM TIPIS
FERROELEKTRIK $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$ YANG DIDADAH Mg , Cu
DAN Pb**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
Gelar Magister Sains**

**TEGUH YOGA RAKSA
6305000246**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
JAKARTA
JULI 2008**

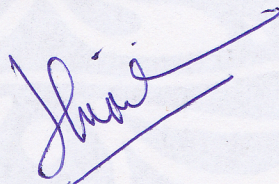
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : TEGUH YOGA RAKSA

NPM : 6305000246

Tanda Tangan :



Tanggal : 12 Juli 2008

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : TEGUH YOGA RAKSA

NPM : 6305000246

Program Studi : Ilmu Material

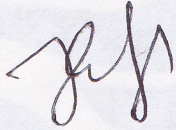
Judul Tesis :

**STUDI PEMBALIKAN POLARISASI DAN MODEL HISTERISIS PADA
MATERIAL FILM TIPIS FERROELEKTRIK $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$ YANG
DIDADAH Mg, Cu DAN Pb**

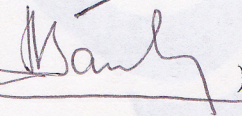
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Ilmu Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Muhammad Hikam

()

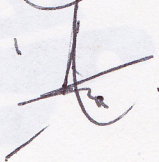
Penguji : Dr. Bambang Soegijono

()

Penguji : Dr. Suharjo Poetardji

()

Penguji : Dr. Azwar Manaf, M.Met.

()

Penguji : Dr. Imam F.

()

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 12 Juli 2008

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena atas karunia-NYA, penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan tesis yang berjudul “Studi Pembalikan Polarisasi dan Model Histerisis Pada Material Film Tipis Ferroelektrik Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO₃ yang didadah Mg, Cu dan Pb” sehingga tepat pada waktunya. Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam memperoleh gelar Magister dalam bidang Ilmu Material pada Program Pascasarjana, Program Studi Ilmu Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. DR. Bambang Soegijono, selaku Ketua Program Pascasarjana Program Studi Ilmu Material FMIPA Universitas Indonesia.
2. DR. Muhammad Hikam, selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktunya dalam membimbing penulis menyelesaikan tesis ini.
3. DR. Azwar Manaf, DR. Soehardjo Poetarji dan DR. Imam Fachrudin yang bersedia menjadi penguji untuk penulis
4. Mbak Yofentina Iriani, M.Si, Anif dan Pak nyoman, dan rekan-rekan satu kelompok dalam penelitian ini yang telah memberikan masukan berupa diskusi dan kerjasamanya dalam pembuatan dan pengujian sample.
5. Dr. Azwar Manaf atas waktunya untuk berdiskusi dengan penulis.
6. Seluruh dosen pengajar, staf dan karyawan di Sekretariat Program Pascasarjana Ilmu Material FMIPA Universitas Indonesia.
7. Rekan-rekan Matsci angkatan 2005 (Erwin Siregar, Edi, Gian, Juned, Edi, Haipan, Yorga dkk) atas masukan dan bantuannya.
8. Istri dan anakku tersayang, atas semua dukungan moril, material dan pengertiannya.
9. Ibu dan saudara-saudara kandungku atas semua dukungan moril dan doa yang tulus.

10. Serta kepada pihak yang tidak disebutkan namanya diatas, terima kasih atas dukungannya, semoga Allah SWT membalas segala kebajikannya, Amin.

Penulis sangat menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna, oleh sebab itu didalam kesempatan ini penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari para pembaca untuk kesempurnaan dari tesis ini.

Akhir kata penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi yang memerlukannya.

Jakarta, 12 Juli 2008

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Teguh Yoga Raksa
NPM : 6305000246
Program Studi : Ilmu Material
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan ilmu pengetahuan Alam
Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

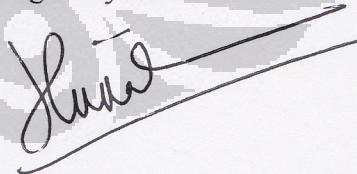
**STUDI PEMBALIKAN POLARISASI DAN MODEL HISTERISIS PADA
MATERIAL FILM TIPIS FERROELEKTRIK $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$ YANG
DIDADAH Mg , Cu DAN Pb**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*Database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta
Pada tanggal : 12 Juli 2008

Yang menyatakan



(Teguh Yoga Raksa)

Nama : Teguh Yoga Raksa
Program studi : Ilmu Material
Judul skripsi : **Studi Pembalikan Polarisasi dan Model Histerisis Pada Material Film Tipis Ferroelektrik $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$ Yang Didadah Mg , Cu dan Pb**

ABSTRAK

Fenomena pembalikan polarisasi pada material film tipis BST akan dipelajari dengan menggunakan pendekatan seperti pada material ferroelektrik *Bulk*. Pendekatan statis dan dinamis akan dilakukan dengan menggunakan persamaan energi bebas Landau – Devonshire (LD) dan persamaan Landau – Kalathikov (LK) untuk memperlihatkan hasil minimum dan maximum dari arus pembalikan polarisasi. Dengan menggunakan pendekatan respon medan listrik yang bersifat sinusoidal akan diperlihatkan pula loop histerisis dengan memvariasikan frekuensi dan amplitudo dari medan listrik yang diberikan.

Kata Kunci : Polarisasi Pembalikan , Model Histerisis, Teori Landau dan BST

Name : Teguh Yoga Raksa
Study Program: Material Science
Title : **Study Of Switching and Hysterisis in Ferroelectric Thin Film
 $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$ Doped by Mg, Cu and Pb**

ABSTRACT

Switching phenomenon in BST Thin film will be considered by approaching of Bulk ferroelectric material. Static and dynamic approach will be formulated by combination of Landau – Devinshire (LD) and Landau – Kalathikov (LK) equation for determined maximum and minimum of switching current. Hysterisis loop was developed using sinusoidal electrical field response by variation in frequency and amplitude of electrical field.

Key Word : Switching Phenomenon , Hysterisis Model, Landau Theory and BST

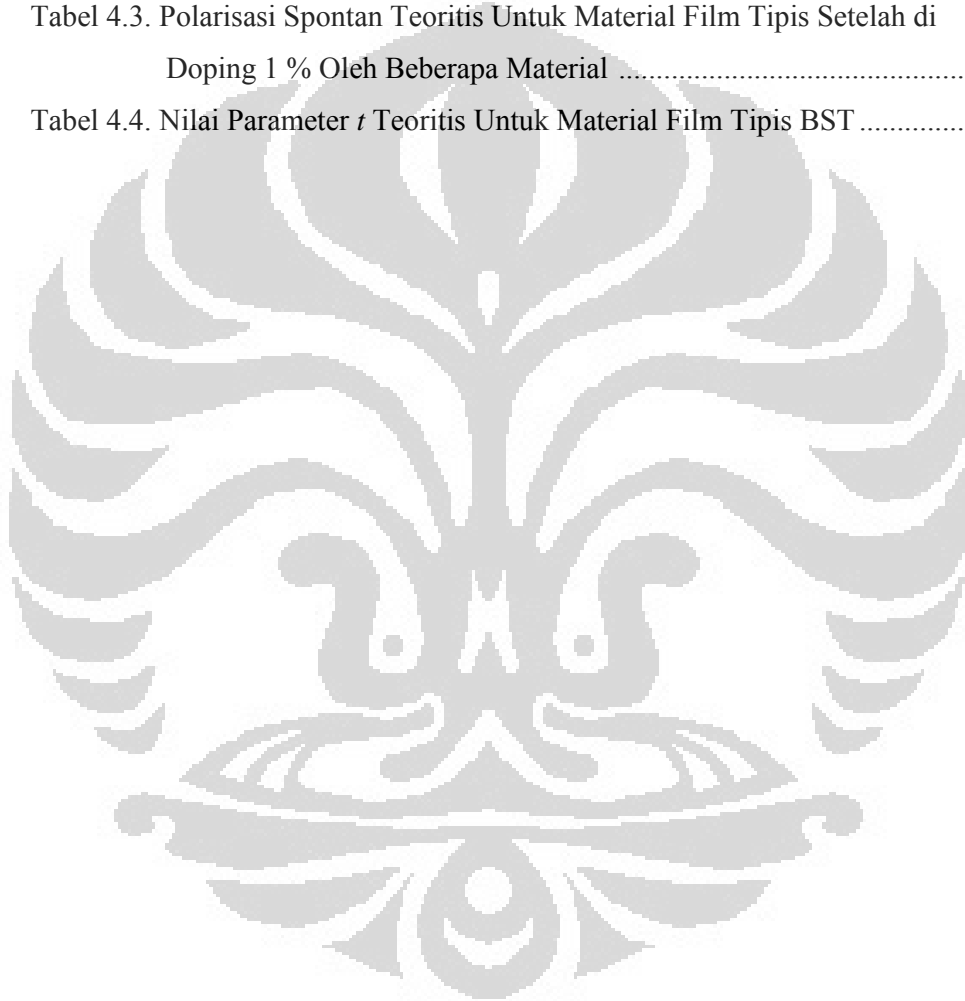
DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Ringkasan Isi	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Piezoelektik dan Material Ferroelektrik	4
2.1.1 Piezoelektik	4
2.1.2 Material Ferroelektrik	7
2.2 Fenomena Pembalikan Polarisasi	9
2.3 Domain Ferroelektrik dan Loop Histerisis	9
2.4 Termodinamika Material	14
2.4.1 Fase Paraelektrik	16
2.4.2 Orde Kedua Fase Transisi	17
2.5 Teori Domain Wall.....	18
BAB III METODE PERHITUNGAN.....	20
3.1 Tinjauan Umum Metode Perhitungan	20
3.2 Model Statis	21
3.3 Model Dinamis	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	24
4.1 Model Statis.....	24
4.2 Model Dinamis	30
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	36
5.1 Kesimpulan	36
5.2 Saran	36
DAFTAR ACUAN	37
LAMPIRAN	39

DAFTAR TABEL

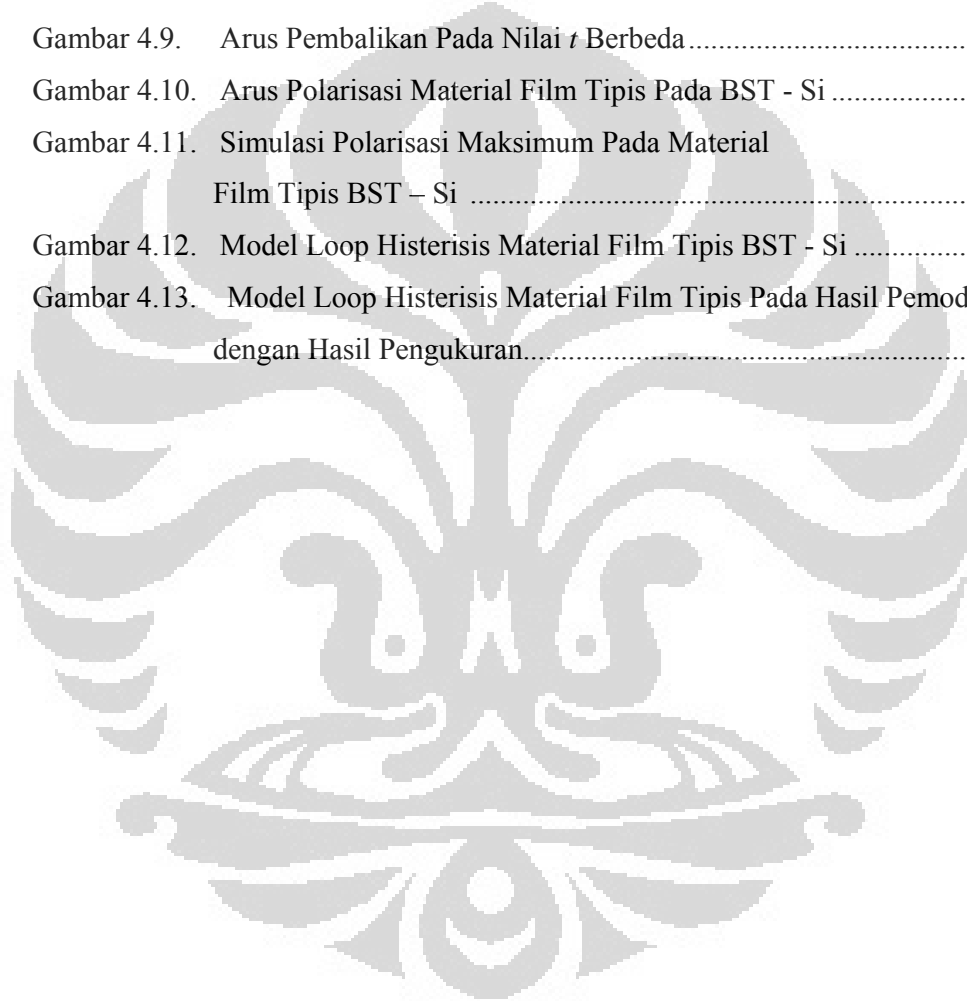
Tabel 4.1. Perhitungan Momen Dipol Material Film Tipis dengan Doping Mg	26
Tabel 4.2. Polarisasi Spontan Teoritis Untuk Material Film Tipis BST Murni	27
Tabel 4.3. Polarisasi Spontan Teoritis Untuk Material Film Tipis Setelah di Doping 1 % Oleh Beberapa Material	27
Tabel 4.4. Nilai Parameter t Teoritis Untuk Material Film Tipis BST	28



DAFTAR GAMBAR

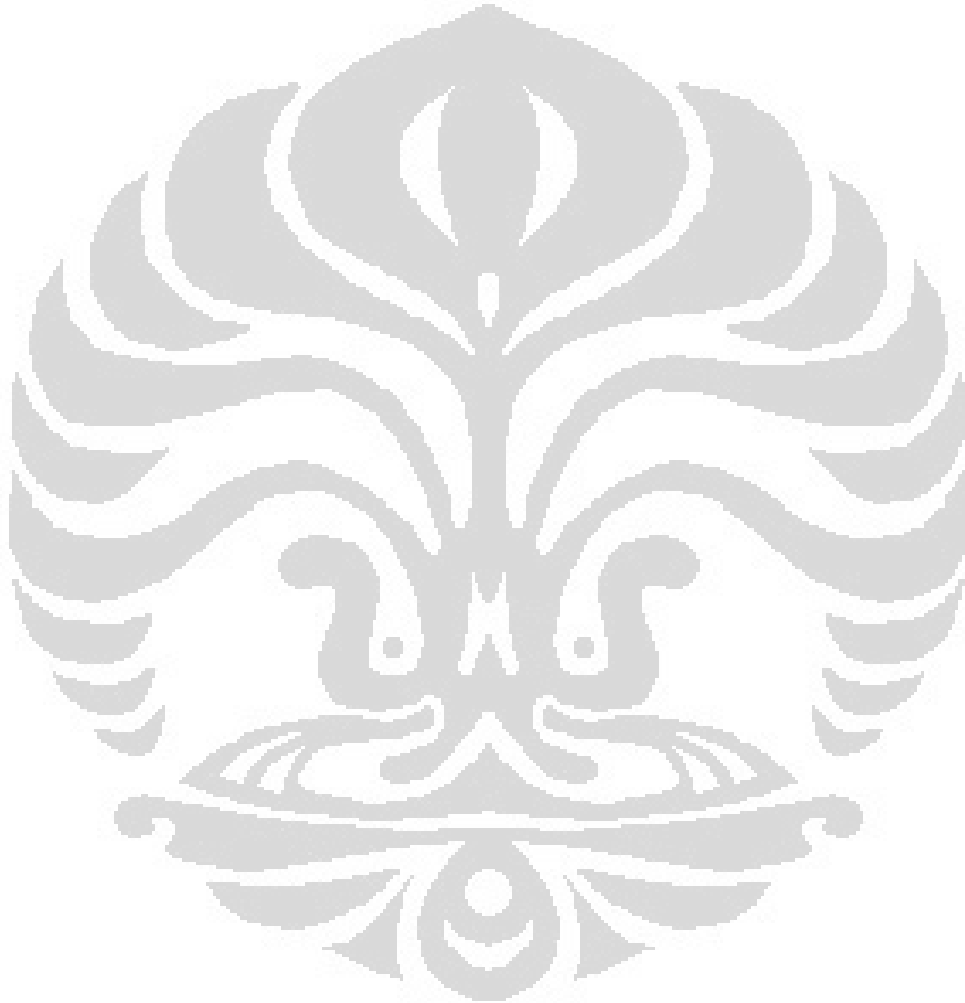
Gambar 2.1.	Unit Sel ABO_3 Struktur Material Tipe Perovskite.....	5
Gambar 2.2.	Skema Dari Transformasi Fase Pada Tingkat Unit Sel Untuk $PbTiO_3$ Dari Kubik Ke Tetragonal, T_c adalah Temperatur Curie	6
Gambar 2.3.	Skema Skala Material Ferroelektrik Pada Saat Tidak Terpolarisasi.....	7
Gambar 2.4.	Skema Mekanisme Pembalikan Polarisasi Ferroelektrik Dan Pembalikan Polarisasi Ferroelektrik	8
Gambar 2.5.	(a) Skema Mekanisme Pergeseran Atom Pada Batas Antara Domain Yang Terpolarisasi; (b) Struktur Domain Dengan Arah 180° Batas Antara Domain Yang Terpolarisasi Dengan Arah Berlawanan.....	10
Gambar 2.6.	Kurva Histerisis.....	11
Gambar 2.7.	(a) Loop Histerisis Material Ferroelektrik di Bawah Temperatur Curie;(b) Transisi Fasa Ferroelektrik-Paraelektrik (c) Loop Histerisis Material Ferroelektrik di Atas Temperatur Curie.....	12
Gambar 2.8.	Proses Pergeseran Ion $BaTiO_3$ Pada Suhu Kamar	13
Gambar 2.9.	Pembalikan Polarisasi Pada Fase Tetragonal. Tekanan Menunjukkan Gejala Pembalikan Polarisasi Ferroelastik Pada Arah 90° ,Sementara Pengaruh Medan Listrik Menyebabkan Pembalikan Polarisasi Ferroelektrik Pada Arah 90° atau 180°	14
Gambar 3.1.	Alur Pembuatan Model Interaksi Material Film Tipis BST.....	21
Gambar 4.1.	Model Histerisis Ekstrim Untuk Beberapa Nilai t	24
Gambar 4.2.	Hubungan Energi Bebas dengan Polarisasi Untuk Variasi Pemberian Medan Listrik pada saat $t = 0.375$	25
Gambar 4.3.	Hubungan Energi Bebas dengan Polarisasi Untuk Variasi Pemberian Medan Listrik pada saat $t = 1.7$	25
Gambar 4.4.	Pemodelan Histerisis Ekstrim Untuk BST – Si dan BST Setelah didadah Oleh Mg.....	28

Gambar 4.5. Pemodelan Energi Bebas Untuk BST – Si dan BST Setelah didadah Oleh Cu.....	29
Gambar 4.6. Simulasi Pemodelan Proses Polarisasi Pembalikan Pada Material Film Tipis BST.....	30
Gambar 4.7. Simulasi Pemodelan Loop Histerisis Pada Nilai t Berbeda	31
Gambar 4.8. Simulasi Pemodelan Polarisasi Maksimum Pada Nilai t Berbeda	31
Gambar 4.9. Arus Pembalikan Pada Nilai t Berbeda.....	32
Gambar 4.10. Arus Polarisasi Material Film Tipis Pada BST - Si	33
Gambar 4.11. Simulasi Polarisasi Maksimum Pada Material Film Tipis BST – Si	33
Gambar 4.12. Model Loop Histerisis Material Film Tipis BST - Si	34
Gambar 4.13. Model Loop Histerisis Material Film Tipis Pada Hasil Pemodelan dengan Hasil Pengukuran.....	34



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Pemodelan Material Film Tipis.....	39
Lampiran 2 Perbandingan Hasil Pengukuran dengn Pemodelan.....	48
Lampiran 3 Metode Range Kutta dan Pemograman.....	50



I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Piezoelektrik adalah material kristalin yang menunjukkan efek kopling sifat elektrik dan mekanik. Contoh material umum dari piezoelektrik adalah quartz, barium titanat (BaTiO_3), *lead-titanate* (PbTiO_3) dan *lead-zirconate-titanate* (PZT). Material – material ini umumnya digunakan untuk sensor, aktuator, transduser, mengubah energi mekanis ke energi listrik atau sebaliknya. Efek piezoelektrik digunakan untuk menghasilkan energi listrik dari tekanan mekanis yang diberikan, dan kebalikan dari prinsip ini digunakan untuk menghasilkan energi mekanik pada aplikasi motor listrik.

Kelompok turunan atau subkelompok dari material piezoelektrik adalah material ferroelektrik. Material ferroelektrik merupakan kelompok material dengan polarisasi listrik internal yang lebar $P(\text{C/m}^2)$, serta mempunyai kemampuan mengubah polarisasi internalnya dengan menggunakan medan listrik yang sesuai. Belakangan ini penelitian terhadap material ferroelektrik banyak menarik perhatian karena material ini sangat menjanjikan terhadap perkembangan devais generasi baru sehubungan dengan sifat-sifat unik yang dimilikinya. BaSrTiO_3 merupakan material ferroelektrik yang memiliki polarisasi listrik spontan tanpa gangguan dari luar, dibuat dengan mencampurkan barium asetat, stronsium asetat dan titanium isopropoksida dengan perbandingan $x : 1-x$, atau dapat dituliskan $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$. BST didadah oleh Mg, Al dan Cu, proses ini memberikan pengaruh pada sifat ferroelektrik material BST.

Fenomena polarisasi pembalikan pada material ferroelektrik sangat penting karena aplikasinya pada ferroelektrik memori [1]. Teori avrami sangat sering sekali digunakan untuk menggambarkan fenomena ini, dimana teori ini memberikan gambaran mengenai hubungan antara arus listrik baik tergantung waktu maupun tidak, pada sifat histerisis material ferroelektrik. Hal yang menarik bahwa fenomena ini berhubungan dengan pemutaran polarisasi pada material ferroelektrik [2]. Sifat pemutaran polarisasi pada ferroelektrik film tipis membuat penggunaan material ini terus berkembang khususnya pada bidang material bahan *memory* (non-volatile memories) dan sumber untuk emisi elektron.

Pada awal perkembangannya fenomena polarisasi pembalikan menunjukkan proses tidak homogen, seperti terlihat pada kristal tunggal barium titanat berdasarkan pada domain nukleasi yang tidak sejajar, dimana pertumbuhannya dibawah pengaruh medan listrik [2]. Sementara hasil lain menunjukkan pada keramik barium titanat bahwa pengaruh dimensi grain sangat berpengaruh pada sifat ferroelektrik material. Semua pendekatan avrami yang digunakan pada fenomena polarisasi pembalikan tidak bergantung pada ukuran akan tetapi tergantung pada kenaikan temperatur curie, sementara pengaruh batas sistem sistem ferroelektrik pada polarisasi pembalikan hanya tergantung pada bentuk geometrinya saja.

Pada perkembangan selanjutnya, teori landau menjadi metode standar untuk melihat pemutaran polarisasi tidak seragam diantara dua fase transisi, beberapa simulasi menunjukkan beberapa prediksi tentang fenomena polarisasi pembalikan sesuai dengan yang ditemukan pada eksperimen.

Hal penting yang lain pada material ferroelektrik adalah hubungan antara medan listrik yang diberikan dengan polarisasi yang terjadi (loop histerisis) [3]. Fenomena ini berhubungan dengan struktur domain dari material dan harus terdapat pada komponen material yang digunakan. Hal yang mendasar bahwa loop histerisis merupakan besaran yang sangat menentukan dalam material ferroelektrik, sementara pada level sistem histerisis dapat menghasilkan energi, dalam aktuator dapat menyebabkan panas yang keluar dari sistem yang terisolasi [3]. Pada dasarnya model histerisis pada material ferroelektrik dikategorikan secara mikroskopik, semi mikroskopik dan makroskopik berdasarkan penurunannya apakah itu kuantum mekanik, *magnetoelastic*, *thermodynamic relation* atau prinsip fenomenologis [4]. Penelitian ini akan memfokuskan pada pemodelan interaksi material dengan melihat fenomena polarisasi pembalikan dan model histerisis pada material film tipis BST.

1.2 Perumusan Masalah

Hasil sementara eksperimen menunjukkan adanya perbedaan pola polarisasi pembalikan dan loop histerisis pada material film tipis BST tergantung jumlah doping yang diberikan. Fenomena ini menunjukkan interaksi domain pada material

tersebut sehingga diperlukan penelusuran interaksi yang mungkin terjadi pada material. Pendekatan-pendekatan keadaan sistem pada material akan dilakukan dengan menggunakan informasi pada saat pembuatan dan perlakuan pada material film tipis BST yang dibuat.

Metode studi yang akan dipilih pada penelitian ini adalah dengan menggunakan persamaan Landau – Devonshire (LD) dan persamaan Landau – Kalathikov (LK) pada sistem statis dan dinamis.

Pada tahap penyelesaian persamaan akan digunakan metode range kuta, selanjutnya metode ini digunakan untuk menyelesaikan persamaan LK, hasil ini akan dibandingkan pula dengan penyelesain analitik dengan beberapa pendekatan yang dilakukan, dimana mengabaikan beberapa parameter yang ada.

1.3 Tujuan Penelitian

Mengacu pada paparan di atas, tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mempelajari fenomena pembalikan polarisasi pada material ferroelektrik
2. Membuat model polarisasi pembalikan dari material film tipis
3. Membuat model histerisis dari material film tipis

1.4 Ringkasan Isi

Hasil pemodelan memberikan gambaran mengenai proses mikroskopis yang terjadi pada material film tipis BST, selain itu juga dapat memberikan gambaran mengenai proses pendahan yang terjadi pada material dan pengaruh pada proses pembalikan polarisasi dari material film tipis. Model statis dan dinamis dari Teori Landau dijadikan acuan untuk pemodelan fenomena pembalikan polarisasi dan model histerisis pada lapisan film tipis BST. Model statis dari teori landau dijadikan referensi untuk menjelaskan kondisi ektrim dari lapisan film tipis BST sementara model dinamis untuk menjelaskan proses pembalikan polarisasi dengan melihat grafik Histerisis pada material film tipis BST.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 PIEZOELEKTRIK DAN MATERIAL FERROELEKTRIK

2.1.1. Piezoelektrik

Sifat piezoelektrik pertama kali ditemukan oleh J. Curie dan P. Curie pada tahun 1880, sementara kebalikan dari efek ini pertama kali diprediksikan oleh Lippmann berdasarkan prinsip termodinamika pada tahun 1881. Selanjutnya prediksi ini diverifikasi kebenarannya oleh Curie bersaudara. Sifat piezoelektrik biasanya digambarkan dengan timbulnya sifat listrik yang diakibatkan oleh tekanan mekanik yang diberikan. Pada tahun 1881, W. Hankel mendefinisikan apa itu sifat piezoelektrik, Hankel menjelaskan sebagai berikut “ Sifat piezoelektrik adalah polarisasi listrik yang dihasilkan oleh tekanan mekanik dalam kristal yang dimiliki oleh material tertentu, dengan besar polarisasi sebanding dengan tekanan dan perubahan arah/tanda pada material tersebut”. Polarisasi listrik dapat dilihat dari besarnya muatan pada permukaan. Kebalikan dari efek piezoelektrik dapat didefinisikan sebagai perubahan bentuk akibat adanya tegangan listrik.

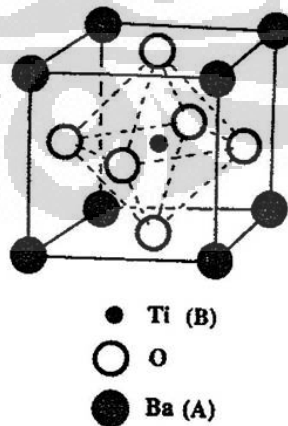
Salah satu contoh yang terkenal dari material di alam ini yang memiliki sifat piezoelektrik adalah quartz (SiO_2), material ini adalah mineral pada umumnya yang terdapat hampir 25% permukaan bumi. Material ini memiliki efek kebalikan dari sifat piezoelektrik, hal ini ditunjukkan dengan adanya vibrasi pada material ketika arus listrik dialirkan, sehingga biasanya material ini digunakan untuk bahan osilator dan resonator. Sedikit tekanan yang diberikan pada quartz akan menghasilkan tegangan listrik tinggi atau medan listrik tinggi, hal ini berbeda dengan kejadian sebaliknya, jika diberikan medan listrik 1 MV/m hanya akan menghasilkan strain 10^{-6} . Pada umumnya aplikasi material piezoelektrik lebih banyak menghasilkan lebih besar strain piezoelektrik, yang merupakan salah satu kunci sukses pengembangan material ini. Efek piezoelektrik maupun kebalikannya bersifat liner dan reversible. Selain Kristal tunggal dan keramik, efek piezoelektrik juga dapat ditemukan pada beberapa jenis polimer, Polyvinylidene Flouride (PVDF) merupakan contoh kelompok polimer yang

memiliki sifat piezoelektrik yang banyak digunakan untuk bahan sensor dan transduser [5].

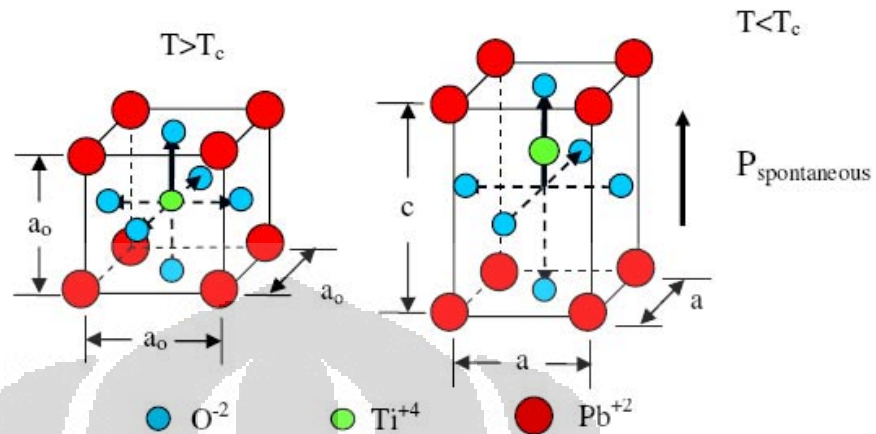
Pada perkembangan selanjutnya ditemukan pada material piezoelektrik tertentu memiliki sifat dielektrik dan sifat histerisis [6]. Klasifikasi material ini kemudian dikelompokkan sebagai material feroelektrik. Pemberian medan listrik yang besar dan pemberian tekanan pada material ini, dapat menyebabkan perubahan orientasi polarisasi, fenomena ini disebut sebagai sifat ferroelastik, pada umumnya sifat ferroelektrik dan ferroelastik selalu berpasangan. Pada tesis ini selanjutnya istilah ferroelektrik akan digunakan untuk menunjukkan fenomena perubahan orientasi polarisasi karena pemberian medan listrik maupun tekanan.

2.1.2. Material Ferroelektrik

Material ferroelektrik ditunjukkan dengan karakterisasi ikatan ionik. Ion – ion diantara kisi atom yang terorientasi pada konfigurasi struktur kristal terjadi pada saat energi dalam minimum. Orientasi ini sangat tergantung pada temperatur dan komposisi. Sifat feroelektrik terjadi ketika dibawah temperatur Curie sementara sifat paraelektrik terjadi saat diatas temperatur Curie, perubahan sedikit saja pada komposisi mendekati morphotropic phase boundary dapat menyebabkan perubahan struktur kristal menjadi tetragonal, monoklinik, ortorombik atau bahkan fase rombohedral [7]. Gambar 2.1 dan gambar 2.2 menunjukkan material ferroelektrik pada saat diatas temperatur Curie dan dibawah temperatur Curie.

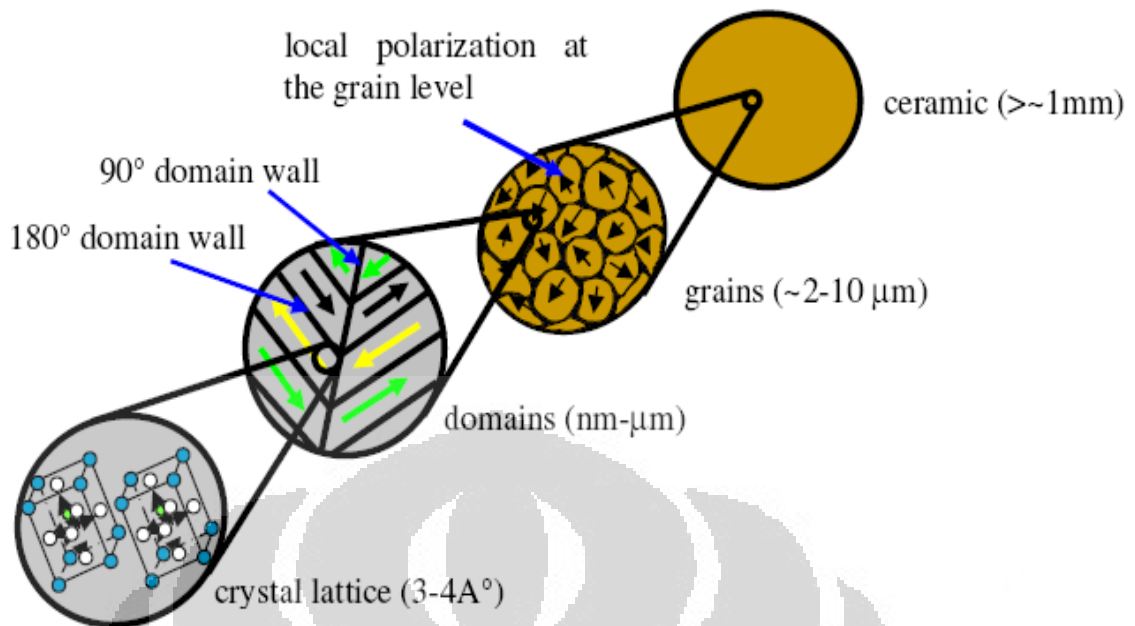


Gambar 2.1 Unit Sel ABO_3 Struktur Material Tipe Perovskite [8]



Gambar 2.2 Skema Dari Transformasi Fase Pada Tingkat Unit Sel Untuk PbTiO_3 Dari Kubik Ke Tetragonal, T_c adalah Temperatur Curie [6]

Sifat elektromekanik pada material ferroelektrik adalah hasil dari sifat material pada beberapa skala ukuran tertentu. Material terdiri dari kumpulan secara acak orientasi dari grain dan bergabung membentuk luasan yang kontinu potensial listrik, perpindahan mekanik dan gaya tarik normal sepanjang batasan grain, untuk kondisi tertentu batasan antar grain ini kemungkinan besar memiliki microcrack, pore ataupun bahan asing yang masuk. Setiap grain memiliki area tertentu arah polarisasi, selanjutnya area ini dinamakan domain. Domain terpisahkan oleh dinding domain yang akan melintasi dimana polarisasi spontan diskontinu[7]. Untuk struktur tetragonal, dinding domain akan menyebabkan orientasi 180° atau 90° pada arah orientasi polarisasi, sementara pada struktur kristal rhombohedral menyebabkan arah 71° atau 109° pada dinding domain. Pada gambar 2.2 memperlihatkan material ferroelektrik pada skala unit cell, selanjutnya pada gambar 2.3 menunjukkan gambaran beberapa skala pada keadaan tidak terpolarisasi untuk material ferroelektrik [6].



Gambar 2.3 Skema Skala Material Ferroelektrik Pada Saat Tidak Terpolarisasi

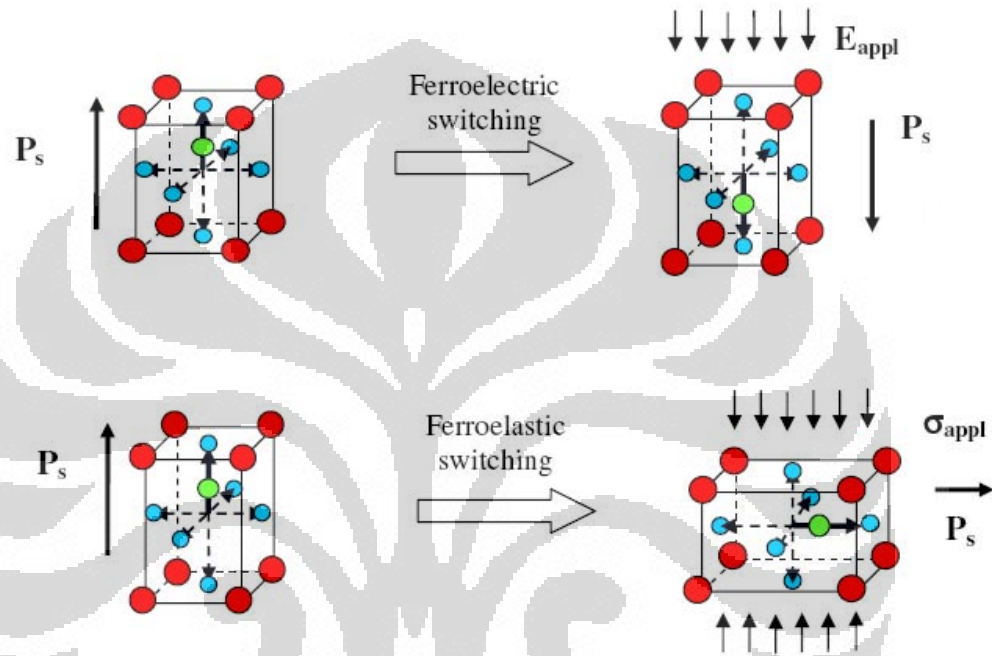
[6]

2.2 FENOMENA PEMBALIKAN POLARISASI

Transformasi dari paraelektrik ke ferroelektrik merupakan hasil dari proses struktur domain lokal dengan resultan polarisasinya adalah nol. Material ferroelektrik pada saat netral bersifat elastis isotropis tanpa sifat piezoelektrifitas, ketika diberikan medan listrik besar pada sistem, jika besar medan sebesar medan koersifitasnya domain yang terdiri dari grain sebagian akan terorientasi ke arah medan listrik luar yang diberikan, proses ini menghasilkan polarisasi remanen dan strain. Perubahan orientasi yang merupakan transformasi dari material isotropik elastis ke arah garis melintang isotropis material dengan piezoelektrik kopling biasa disebut ferroelektrik pembalikan polarisasi. Tekanan yang besar juga dapat menyebabkan ferroelektrik pembalikan polarisasi, skema proses ini pada unit sel digambarkan pada gambar 2.4.

Ferroelektrik pembalikan polarisasi sebagian besar merupakan hasil penyearahan dipol akibat medan listrik, sementara ferroelastik dibawah pengaruh pemberian tekanan akan mengakibatkan timbulnya dipol listrik yang tegak lurus dengan arah pemberian tekanan. Besarnya orientasi dipol ini tergantung pada efek

residu seperti bataran grain dan pembawa muatan bebas yang berlawanan dengan arah dengan arah orientasi polarisasi. Ferroelastik pembalikan polarisasi merupakan hasil dari deformasi inelastik (remanent strain) dan pengurangan yang signifikan dari polarisasi.



Gambar 2.4 Skema Mekanisme Pembalikan Polarisasi Ferroelektrik Dan Pembalikan Polarisasi Ferroelastik [6]

Fenomena pembalikan polarisasi biasanya digambarkan melalui proses nukleasi dan pertumbuhan domain yang berlawanan dengan arah polarisasi. Hal ini dapat menunjukkan hubungan antara arus listrik dengan waktu yang bergantung dan tidak bergantung pada karakteristik histeresis dari ferroelektrik material. Ishibashi dan Omura menunjukkan simulasi polarisasi pada material ferroelektrik berdasarkan keberadaan inti latent (latent nuclei)[2]. Penelitian lain menjelaskan fenomena histeresis dan pembalikan polarisasi pada material bulk ferroelektrik sebagai studi awal untuk menjelaskan fenomena ini pada material film tipis ferroelektrik. Pendekatan lain menunjukkan penggunaan energi bebas dari

persamaan Landau – Kalathikov (LK) dan persamaan Landau – Devonshire (LD) untuk menjelaskan fenomena pembalikan polarisasi pada material ferroelektrik.

2.3 DOMAIN FEROELEKTRIK DAN LOOP HISTERISIS

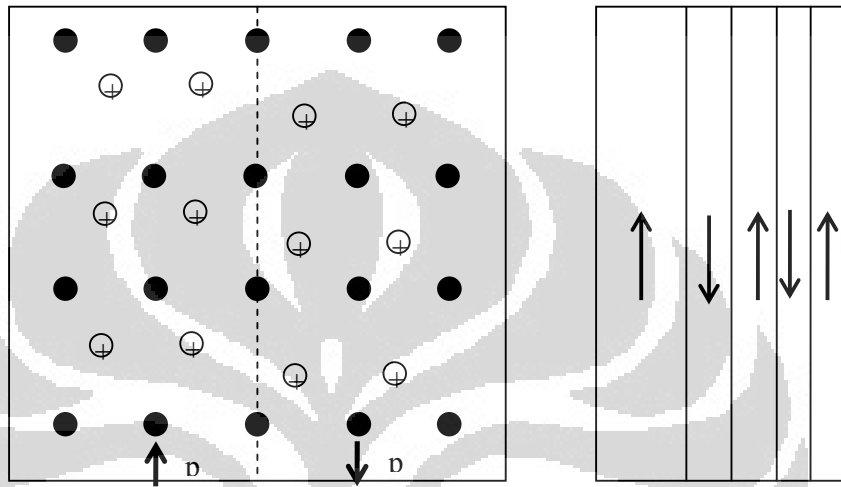
Sifat ferroelektrik ditemukan pertama kali oleh Valasek pada tahun 1921 pada garam rochele (rochele salt), hal ini dapat dilihat dari fenomena fisik yang terjadi dimana ferroelektrik kristal yang memiliki satu atau lebih fase ferroelektrik. Fase ferroelektrik adalah keadaan tertentu yang memperlihatkan polarisasi spontan yang dapat menyebabkan perubahan arah orientasi akibat medan luar yang diberikan. Pemutaran polarisasi ini dapat digambarkan sebagai kasus khusus pada saat perubahan orientasi terjadi[7].

Proses penyearahan arah orientasi dipol hanya terjadi pada satu area tertentu, sementara mungkin saja area lain terjadi penyearahan pada arah yang berlawanan. Area dengan arah polarisasi yang seragam dinamakan domain ferroelektrik, sementara perbatasan dinding antara dua area dengan arah berbeda dinamakan dinding domain.

Secara umum domain ferroelektrik dapat dijelaskan dari berbagai sudut pandang, misalnya dari fenomena yang terjadi dapat dijelaskan bahwa domain ferroelektrik adalah keadaan dimana sistem dengan banyak domain pada saat energi bebas minimum, sementara dari sudut pandang mikroskopik kita dapat menjelaskan dari dua sudut pandang. Penjelasan yang pertama adalah domain disebabkan oleh perubahan gaya elektrostatis pada permukaan kristal yang memperlihatkan terjadinya polarisasi spontan sebagaimana terjadinya transformasi dari fase paraelektrik ke fase ferroelektrik. Penjelasan yang kedua dari sisi mikroskopis adalah struktur domain akibat defect dan tekanan internal pada kristal yang memperlihatkan sifat piezoelektrik pada fase paraelektrik [7].

Struktur domain ferroelektrik tergantung pada struktur kristal ferroelektrik, beberapa faktor yang mempengaruhi struktur domain adalah distorsi kisi (termasuk deformasi spontan) pada dinding domain dan komponen polarisasi sepanjang arah normal pada dinding yang kontinu, namun demikian tidak ada muatan listrik yang terakumulasi pada dinding dan energi elektostatik adalah

minimum. Pada ferroelektrik kristal, variasi bentuk domain dan jumlah tipe dinding domain tergantung pada orientasi dari momen dipol yang mungkin ketika polarisasi spontan terjadi dari fase dasar (contoh : fase pada simetri tertinggi dibawah titik leleh kristal). Pada gambar 2.5 diperlihatkan struktur domain ferroelektrik dari BaTiO₃



Gambar 2.5 (a) Skema Mekanisme Pergeseran Atom Pada Batas Antara Domain Yang Terpolarisasi; (b) Struktur Domain Dengan Arah 180⁰ Batas Antara Domain Yang Terpolarisasi Dengan Arah Berlawanan [7].

Kristal ferroelektrik selalu memiliki struktur polydomain ketika baru saja tumbuh, akan tetapi kristal dengan domain tunggal akan tercapai ketika medan luar yang diberikan sangat tinggi. Medan yang besar akan memutar polarisasi spontan dari domain. Proses pemutaran domain ini dikenal dengan nama domain swithcing. Proses pemutaran ini bersifat anisotropik dan tergantung pada temperatur yang diberikan. Ketika medan luar sebesar E diberikan dan berlawanan arah dengan arah polarisasi domain, domain baru akan terbentuk dalam domain yang sudah ada, dengan kata lain adanya nukleasi dan pertumbuhan. Probabilitas nukleasi dari domain dapat diformulasikan seperti persamaan 2.1.

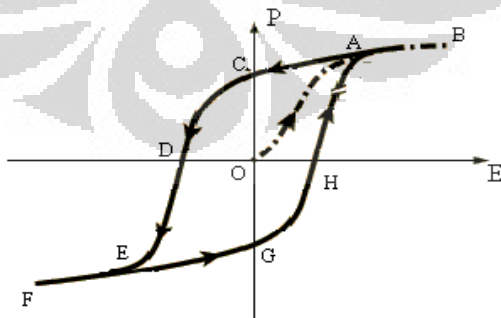
$$P_n = p_0 \exp\left(-\frac{\alpha}{E}\right) \dots\dots\dots(2.1)$$

α , medan aktivasi untuk nukleasi dan merupakan fungsi temperatur, E besar medan listrik luar yang diberikan. Sementara kecepatan gerak untuk dinding domain v dapat di rumuskan seperti persamaan 2.2.

$$v = \mu E \dots\dots\dots(2.2)$$

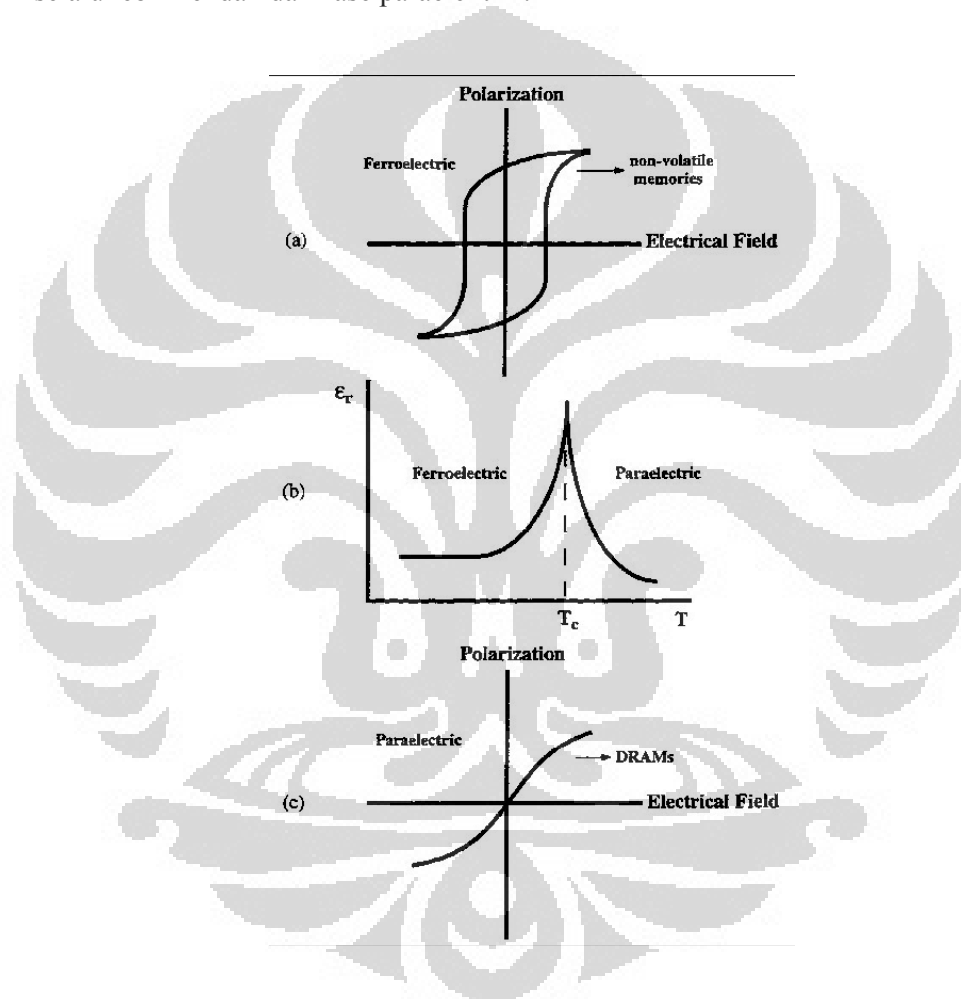
μ , mobilitas dinding domain, pada kenyataannya gerak dinding domain tergantung pada distribusi tekanan, muatan dan defect yang terjadi pada kristal.

Grafik hubungan antara polarisasi listrik P dengan kuat medan listrik E seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6. Jika kuat medan listrik dinaikan secara bertahap, hal ini menyebabkan polarisasi meningkat sesuai kurva OA, apabila dilanjutkan dengan meningkatkan medan listrik maka akan mengalami saturasi dimana arah orientasi tidak berubah lagi seperti ditunjukkan kurva AB. Selanjutnya kuat medan listrik diturunkan, maka polarisasi listrik tidak akan kembali ke titik O, tetapi cenderung mengikuti kurva BC. Ketika medan listrik diturunkan menjadi nol, maka material ferroelektrik akan memiliki polarisasi remanen P_r (OC). Untuk mengembalikan nilai polarisasi dari material dapat dilakukan dengan memberikan medan listrik pada arah yang berlawanan (negatif). Besar medan listrik yang dibutuhkan untuk mengembalikan nilai polarisasi menjadi nol disebut medan koersif E_c . Jika selanjutnya medan listrik dinaikan kembali, maka material akan kembali mengalami saturasi, hanya saja bernilai negatif (EF). Kurva yang terbentuk akan lengkap jika medan listrik dinaikan lagi dan pada akhirnya didapatkan kurva hubungan polarisasi P dengan medan koersif E_c yang ditunjukkan pada loop histeresis [9].



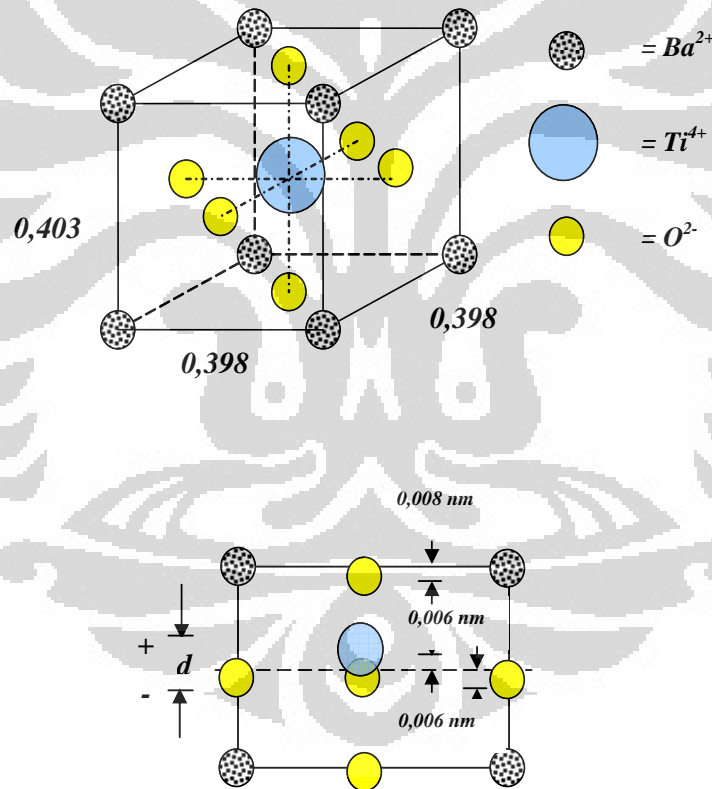
Gambar 2.6. Kurva histeresis [9]

Fase paraelektrik dan ferroelektrik ditunjukkan pada gambar 2.7, perubahan fase dari paraelektrik ke fase ferroelektrik ditentukan oleh temperatur material tersebut, temperatur Curie merupakan parameter penentu apakah material ferroelektrik berada pada fase paraelektrik atau fase ferroelektrik. Secara umum diyakini bahwa struktur ferroelektrik terjadi akibat adanya distorsi pada struktur paraelektrik seperti dapat dilihat bahwa simetri pada kisi dari fase ferroelektrik selalu lebih rendah dari fase paraelektrik.



Gambar 2.7. (a) Loop Histerisis Material Ferroelektrik di Bawah Temperatur Curie
 (b) Transisi Fasa Ferroelektrik-Paraelektrik
 (c) Loop Histerisis Material Ferroelektrik di Atas Temperatur Curie [9]

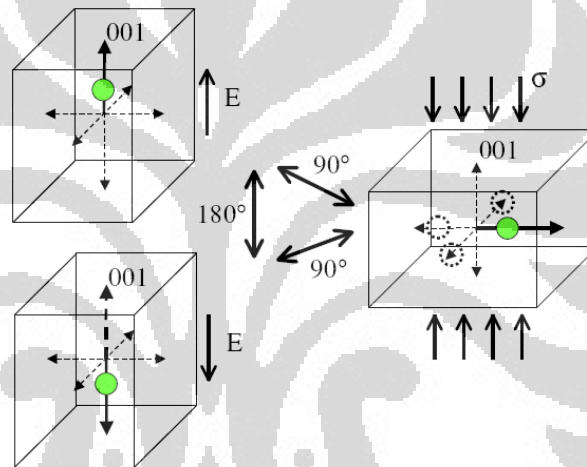
Sebagai contoh kita dapat mempelajari apa yang terjadi pada struktur BaTiO_3 , temperatur Curie pada material ini adalah 120° , dimana pada temperatur ini terjadi transisi fase, akan tetapi dibawah temperatur ini BaTiO_3 memiliki tiga fase ferroelektrik berbeda, fase itu terjadi pada 0°C dan -80°C , namun kedua temperatur ini tidak dinamakan temperatur Curie dikarena perubahan fasenya dari ferroelektrik fase satu ke fase ferroelektrik yang lain. Seperti disinggung sebelumnya bahwa struktur ferroelektrik merupakan hasil distorsi dari fase paraelektriknya, proses ini dapat dilihat pada gambar 2.8, mengenai distorsi yang terjadi pada material BaTiO_3 . Material ferroelektrik lain ada yang memiliki temperatur curre lebih dari satu misalnya Rochele Salt (RS) berada pada fase ferroelektrik pada suhu di atas 24°C dan di bawah -18°C [7].



Gambar 2.8. Proses Pergeseran Ion BaTiO_3 Pada Suhu Kamar [10]

Pada proses histerisis sebetulnya terjadi fenomena pembalikan polarisasi, untuk menjelaskan hal ini, kita dapat menggambarkan proses pembalikan

polarisasi pada fase tetragonal dari struktur ABX_3 , pada fase ini pembalikan polarisasi pada arah 90° atau 180° memiliki enam arah yang sama, jika arah polarisasi ini disebabkan oleh medan listrik, proses ini dikenal dengan pembalikan polarisasi ferroelektrik pada arah 90° atau 180° , selanjutnya jika pembalikan polarisasi ini disebabkan oleh tekanan maka dikenal dengan pembalikan polarisasi ferroelastik pada arah 90° . Tekanan tidak mempengaruhi pembalikan polarisasi arah 180° karena tidak terjadi perubahan strain spontan pada arah ini. Gejala ini ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9. Pembalikan Polarisasi Pada Fase Tetragonal. Tekanan Menunjukkan Gejala Pembalikan Polarisasi Ferroelastik Pada Arah 90° , Sementara Pengaruh Medan Listrik Menyebabkan Pembalikan Polarisasi Ferroelektrik Pada Arah 90° atau 180° [5]

2.4 TERMODINAMIKA MATERIAL FERROELEKTRIK

Perkembangan teori untuk menjelaskan fenomena ferroelektrik sempat menjadi misteri hampir 20 tahun, semenjak ditemukannya sifat ferroelektrik oleh Valasek pada tahun 1920. Pertama kali model yang diperkenalkan adalah model mikroskopis dari ketidakaturan komposisi proton, selanjutnya dikembangkan

menjadi model pseudo-spin. Beberapa pendekatan fenomenologi juga diperkenalkan seperti teori fase transisi Landau – Ginzburg (LG) untuk menjelaskan transisi fase ferroelektrik[7].

Pada perkembangan selanjutnya diperkenalkan dua tipe mekanisme transisi fase ferroelektrik, yaitu tipe pergeseran dan tipe teratur – ketidakteraturan, akan tetapi pada umumnya pendekatan mekanisme yang banyak digunakan adalah tipe mekanisme pergeseran dibanding dengan tipe kedua yaitu tipe teratur-ketidakteraturan. Akan tetapi ada juga beberapa model yang merupakan kombinasi kedua mekanisme ini.

Berdasarkan teori transisi LG, Devonshire selanjutnya mengembangkan teori ini menjadi teori fenomenologi dari material ferroelektrik dengan menggunakan polarisasi sebagai parameter. Selanjutnya diturunkan formulasi untuk energi bebas dalam bentuk fungsi elastis Gibbs sebagai fungsi keadaan pada sistem ferroelektrik dengan beberapa variabel yang mempengaruhi sistem tersebut yaitu temperatur (Θ), tekanan (T) dan polarisasi (P) seperti persamaan 2.3 [7].

$$dG_1 = -\sigma d\Theta - \sum_{i,j} S_i dT_j + \sum_{n,m} E_n dP_m \dots\dots\dots(2.3)$$

(i,j = 1, 2,,6; m,n = 1, 2, 3) , dimana σ adalah entropi , S_i adalah komponen strain dan E_n adalah komponen medan listrik. Sementara persamaan keadaan pada keadaan stabil , energi bebas Gibbs diformulasika seperti persamaa 2.4

$$G = G_1 - E_n P_m \dots\dots\dots(2.4)$$

G adalah energi bebas Gibbs.

Persamaan keadaan sistem ferroelektrik dapat ditunjukkan dengan menggunakan beberapa asumsi, misalnya material dengan polarisasi spontan intrinsik sepanjang sumbu c pada sistem koordinat, tekanan luar konstan (1 atm), G_1 tidak tergantung pada arah dari polarisasi akan tetapi hanya tergantung pada besarnya polarisasi, maka persamaan Gibbs yang tergantung pada temperatur dan besarnya polarisasi dengan menggunakan persamaan 2.3 dapat diformulasikan seperti persamaan 2.5.

$$G_1(\Theta, P) = G_{10}(\Theta) + \frac{1}{2}\beta(\Theta)P^2 + \frac{1}{4}\xi(\Theta)P^4 + \frac{1}{6}\zeta(\Theta)P^6 + \dots, \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

Koefisien $G_{10}, \beta, \xi, \zeta, \dots$, merupakan fungsi temperatur Θ . G_{10} adalah energi bebas Gibbs pada sistem ketika $P = 0$. Keadaan stabil sistem termodinamika ditunjukkan oleh nilai minimum dari energi bebas G , sehingga $G_1 = G$ ketika $E = 0$ dalam hal ini G dapat menggantikan G_1 .

Pada saat struktur kristal menunjukkan polarisasi spontan stabil (P_s) pada temperatur tertentu, kondisi untuk G minimum terjadi sesuai dengan persamaan 2.6.

$$\left(\frac{\partial G_1}{\partial P}\right)_{P_s} = 0, \left(\frac{\partial^2 G_1}{\partial P^2}\right)_{P_s} = 0, \text{ atau } \left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)_{P_s} = \chi^{-1} > 0. \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana χ adalah suseptibilitas, dengan menggunakan persamaan 2.6 dan 2.5 dapat diperoleh persamaan keadaan ketika polarisasi spontan stabil.

$$P_s(\beta + \xi P_s^2 + \zeta P_s^4) = 0 \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\chi^{-1} = \beta + 3\xi P_s^2 + 5\zeta P_s^4 > 0 \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

Persamaan 2.7 memiliki dua akar persamaan dimana menunjukkan dua fase dalam material ferroelektrik, ketika $P_s = 0$ berkaitan dengan fase paraelektrik, sementara untuk $P_s \neq 0$ berkaitan dengan fase ferroelektrik.

2.4.1 FASE PARAELEKTRIK

Ketika polarisasi spontan nol, maka suseptibilitas dielektrik dapat diperlihatkan seperti persamaan 2.9

$$\chi^{-1} = \beta(\Theta) > 0 \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

Hal ini menunjukkan bahwa nilai β akan selalu lebih besar dari nol, walaupun kondisi batas pada temperatur Curie, temperatur transisi pada saat sistem bertransformasi dari fase stabil paraelektrik ke fase tidak stabil ferroelektrik. Deret Taylor orde pertama pada persamaan 2.9, dapat digunakan untuk membuat

penjabaran dari nilai β sebagai fungsi dari temperatur, hal ini akan menghasilkan hukum Curie – Weiss yang berlaku pada susceptibilitas dielektrik pada fase paraelektrik, seperti diformulasikan pada persamaan 2.10

$$\chi = \frac{C}{4\pi(\Theta - \Theta_0)}, (\Theta > \Theta_0), \dots \dots \dots (2.10)$$

Nilai konstanta C adalah $4\pi/\beta$, sementara sesuai dengan persamaan 2.5, nilai $\xi(\Theta)$ dan $\zeta(\Theta)$ lebih besar dari nol akan tetapi nilainya sangat kecil sekali, sehingga walaupun tergantung pada temperatur, selanjutnya kedua koefisien persamaan ini dianggap tidak tergantung pada temperatur.

2.4.2 ORDE KEDUA FASE TRANSISI ($\xi > 0$)

Fase kedua transisi terjadi ketika $\xi > 0$, dengan asumsi ini selanjutnya persamaan 2.7 dapat diselesaikan dengan akar persamaan kuadrat seperti persamaan 2.11

$$P_s = [-\xi \pm (\xi^2 - 4\beta\zeta)^{1/2}] / 2\zeta, (\xi > 0, \zeta > 0) \dots \dots \dots (2.11)$$

Dari persamaan 2.11 dapat diperlihatkan bahwa ferroelektrik kristal terjadi ketika $|\beta|\zeta \ll \xi^2$, dengan menggunakan persamaan 2.11 dengan hasil polarisasi spontan bernilai positif, nilai $G_1 = G$ pada saat $E = 0$ dan nilai β kurang dari nol, maka kita akan memperoleh persamaan selisih energi bebas seperti ditunjukkan pada persamaan 2.12.

$$G - G_0 = [\xi(\xi^2 - 6\beta\zeta) - (\xi^2 - 4\beta\zeta)^{3/2}] \dots \dots \dots (2.12)$$

dari persamaan 2.12 selanjutnya dapat digambarkan keadaan – keadaan pada material ferroelektrik.

- Keadaan ferroelektrik stabil

Keadaan ini terjadi ketika $|\beta|\zeta \ll \xi^2$, dengan asumsi $\xi(\xi^2 - 6\beta\zeta) > 0$ dan $(\xi^2 - 4\beta\zeta) > 0$ maka akan diperoleh persamaan selisih energi bebas bernilai negatif, keadaan ini menunjukkan bahwa keadaan stabil akan tercapai ketika polarisasi spontan tidak sama dengan nol.

- Hukum Curie –Weiss

Curie-Weiss menunjukkan koefisien β sebagai fungsi temperatur dalam sistem CGS dapat ditunjukkan seperti persamaan 2.13

$$\beta = \frac{4\pi(\Theta - \Theta_0)}{C} \dots\dots\dots(2.13)$$

C merupakan konstanta yang bernilai positif, selanjutnya dapat diperlihatkan dari akar persamaan 2.12 bahwa polarisasi spontan akan terjadi ketika $\beta < 0$, $\xi > 0$, hal ini sesuai dengan persamaan 2.13 terjadi ketika $\Theta < \Theta_0$ dimana Θ_0 adalah temperatur Curie (Θ_C), sementara pada saat suhu di atas temperatur Curie nilai suseptibilitas akan sama dengan nilai β .

2.5 DOMAIN WALL TEORI

Model histerisis dari ferroelektrik material dapat dikelompokkan menjadi beberapa kategori, salah satu kategorinya adalah teori mikroskopis material yang mengacu pada proses pembalikan domain, mekanisme pergerakan dinding domain akibat adanya pengaruh medan listrik dari luar. Sifat dielektrik dari material ferroelektrik dapat dijadikan acuan untuk pemodelan dengan menggunakan statistik boltzman untuk menghitung probabilitas dipol yang menempati energi level tertentu. Beberapa pemodelan yang mengacu pada fenomena domain akan diperkenalkan, yaitu pemodelan dengan menggunakan perumusan Langevin, model Ising Spin dan model yang ketiga adalah gabungan dari keduanya [3,4].

Pemodelan pada umumnya menggambarkan adanya area padat dimana perputaran dipol berlawanan arah dengan konfigurasi ionik sehingga menyebabkan perubahan yang sangat besar pada polarisasinya, dan hal ini memperlihatkan adanya saturasi pada saat level medan tinggi ketika distribusi muatan tidak diperkenankan untuk perubahan selanjutnya. Sebaliknya pengukuran kurva polarisasi pada saat level yang tinggi anhysterisis memiliki nilai tunggal dan reversibel. Medan efektif dengan asumsi ideal dapat diformulasikan seperti persamaan 2.14.

$$E_e = E + \alpha P \dots\dots\dots(2.14)$$

Besaran E, P menunjukkan medan listrik dan hasil polarisasi sementara nilai αP merupakan menunjukkan interdomain kopling. Pendekatan statistik Boltzman digunakan untuk menghitung probabilitas dipol – dipol yang menempati energi keadaan tertentu, dengan asumsi material isotropik , orientasi sel ke segala arah dan dicapainya keseimbangan termal dan elektrostatik maka diperoleh persamaan Langevin untuk polarisasi anhisterisis.

$$P_{an} = P_s \left[\coth\left(\frac{E_e}{a}\right) - \frac{a}{E_e} \right] \dots\dots\dots(2.15)$$

Model yang kedua pada polarisasi anhisterisis adalah model Ising Spin, dimana mengasumsikan bahwa orientasi momen dipol hanya pada arah medan listrik atau berlawanan arah diformulasikan pada persamaan 2.16

$$P_{an} = P_s \left[\tanh\left(\frac{E_e}{a}\right) \right] \dots\dots\dots(2.16)$$

Model yang ketiga adalah model gabungan dari model Langevin dan Ising Spin, model ini dibuat dengan asumsi grain pada material terdistribusi secara acak, akan tetapi dipol – dipol setiap sel hanya memiliki dua arah orientasi yang mungkin, ketiga model ini dapat dpergunakan untuk menghitung polarisasi anhysteritic akibat adanya medan listrik luar[3,4].

BAB III

METODE PERHITUNGAN

3.1 Tinjauan Umum Metode Perhitungan

Metoda perhitungan secara detail dapat dilihat pada gambar 1, dimana dari model interaksi yang ada, selanjutnya dilakukan pendekatan model statis dan dinamis. pada model statis menggunakan persamaan LD, sementara pada model dinamis menggunakan persamaan LK dikombinasikan dengan model statis[1,2].

Pada langkah pertama akan dilakukan simulasi dengan menggunakan persamaan LD pada orde pertama :

$$G = \frac{a(\Theta - \Theta_0)}{2\varepsilon_0} P^2 - \frac{B}{4\varepsilon_0^2} P^4 + \frac{C}{6\varepsilon_0^3} P^6 - EP \dots\dots\dots(3.1)$$

a, B, C adalah konstanta, Θ adalah temperatur dan E, P adalah medan listrik dan polarisasi, selanjutnya dibuat simulasi untuk range temperatur dengan membuat titik kritis pada sistem tersebut. Pada prinsipnya bahwa metode ini akan menggunakan energi bebas paling minimum untuk menentukan titik kritis dari sistem.

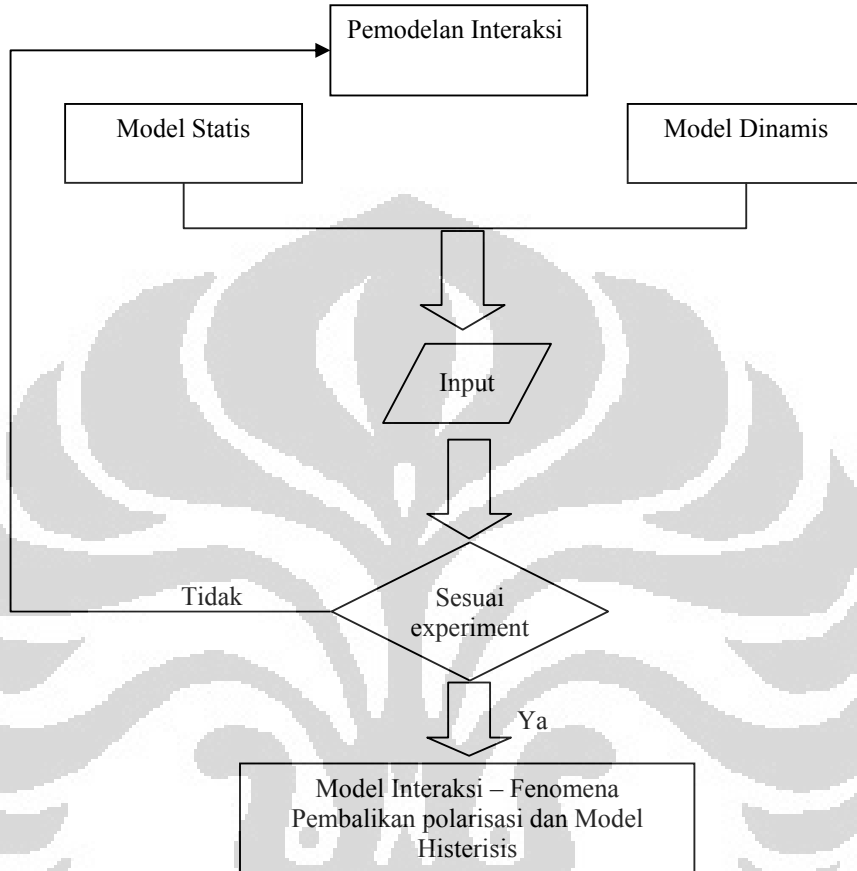
Pada tahap selanjutnya akan dilakukan pemodelan dinamis dengan menggunakan persamaan gerak LK :

$$\gamma \frac{dP}{d\tau} = -\frac{\partial G}{\partial P} \dots\dots\dots(3.2)$$

dimana parameter γ menunjukkan kecepatan untuk pembalikan polarisasi. Dengan menggabungkan persamaan 3.1 dan persamaan 3.2 akan dibuat model dengan analisa numerik untuk penyelesaian persamaan differensial tersebut, diharapkan dengan menggunakan model ini dapat digunakan untuk mempelajari interaksi yang terjadi pada material film tipis.

Metode domain wall, pada intinya adalah melihat proses pembalikan polarisasi yang terjadi pada domain dari material. Mekanisme ini ditunjukkan pada

proses nukleasi dari domain seperti halnya pergerakan dinding domain akibat respon dari medan listrik yang diberikan, pada model ini beberapa asumsi dipergunakan seperti material isotropik dan orientasi sel ke segala arah.



Gambar 3.1. Alur Pembuatan Model Interaksi Material Film Tipis BST

3.2 Pemodelan Statis

Pemodelan dimulai dengan menggunakan persamaan 2.4, dan memasukan perumusan G_1 sesuai dengan persamaan 2.5, pendekatan persamaan ini akan menghasilkan persamaan LD untuk dengan persamaan energi bebas sebagai fungsi polarisasi, orde pertama material seperti persamaan 3.1.

Dengan memasukan beberapa variable yang tidak berdimensi dapat diperoleh seperti persamaan 3.3 , 3.4, 3.5 dan 3.6 maka dapat diperoleh persamaan 3.7.

$$t = \frac{4aC(\Theta - \Theta_0)}{B^2} \dots\dots\dots(3.3)$$

$$p = \frac{P}{P_0} \rightarrow P_0^2 = \frac{\epsilon_0 B}{2C} \dots\dots\dots(3.4)$$

$$e = \frac{E}{E_0} \rightarrow E_0^2 = \frac{B^5}{32\epsilon_0 C^3} \dots\dots\dots(3.5)$$

$$g = \frac{G}{G_{10}} \rightarrow G_{10} = \frac{B^3}{8C^2} \dots\dots\dots(3.6)$$

$$g = \frac{1}{2}tp^2 - \frac{1}{2}p^4 + \frac{1}{6}p^6 - ep \dots\dots\dots(3.7)$$

Pendekatan ketika $e = 0$, dapat dilakukan pada persamaan 3.7 untuk mendefinisikan energi bebas ketika tidak ada medan yang bekerja dalam hal ini persamaan 3.5 dapat disederhanakan menjadi persamaan 3.7a

$$g = \frac{1}{2}tp^2 - \frac{1}{2}p^4 + \frac{1}{6}p^6 - ep = g_0 - ep \dots\dots\dots(3.7a)$$

definisi g_0 adalah energi bebas ketika tidak ada medan listrik luar yang bekerja.

Asumsi dasar teori LD adalah keadaan setimbang ketika energi bebas g minimum sebagai fungsi p , sehingga memberikan persamaan 3.8

$$e = tp - 2p^3 + p^5 \dots\dots\dots(3.8)$$

Persamaan ini dapat digunakan untuk memodelkan histerisis pada kondisi ekstrim dengan menentukan nilai t dari asumsi polarisasi spontan hasil perhitungan teoritis adalah polarisasi pada keadaan ekstrim, dengan mencari akar persamaan dari $de/dp = 0$. Persamaan nilai akar kuadrat ini akan digunakan untuk menentukan nilai t dari material. Nilai t didefinisikan menjadi empat keadaan pada material [1], t_{sc} keadaan supercooling, nilai t_c keadaan temperatur kritis, t_{SH} superheating dan t_2 adalah temperatur limit atas dari fase ferroelektrik yang terinduksi medan listrik.

3.3 Pemodelan Dinamis

Persamaan gerak LK (persamaan 3.2) digunakan untuk menggambarkan proses pembalikan polarisasi dan histerisis, seperti pada pemodelan statis didefinisikan variable waktu yang tidak berdimensi seperti pada persamaan 3.9

$$\tau_R = \tau \left(\frac{B^2}{4\epsilon_0 C \gamma} \right) \dots\dots\dots(3.9)$$

dengan menggunakan persamaan 3.7 dan persamaan 1.2 diperoleh perumusan arus pembalikan polarisasi sesuai dengan persamaan 3.8

$$j = \left(\frac{2^5 \epsilon_0 C^3}{B^5} \right)^{1/2} \gamma J \dots\dots\dots(3.10)$$

dimana $J = dP/d\tau$ adalah besaran fisis dari arus pembalikan polarisasi, dengan sedikit melakukan manipulasi matematika pada persamaan 3.9,

$$\frac{\partial j}{\partial \tau_R} = \frac{\partial j}{\partial p} \frac{dp}{d\tau_R} = - \frac{\partial^2 g_0}{\partial p^2} \frac{dp}{d\tau_R} \dots\dots\dots(3.11)$$

dengan menggunakan hasil ini dapat ditentukan nilai J maximum dan minimum. Selanjutnya dengan menggunakan penyelesaian persamaan differensial LK dengan menggunakan rangekutta orde 4 akan diperlihatkan tahap pembalikan polarisasi pada setiap sampel dari medan listrik nol ke medan listrik tertentu dalam hal ini e_0 .

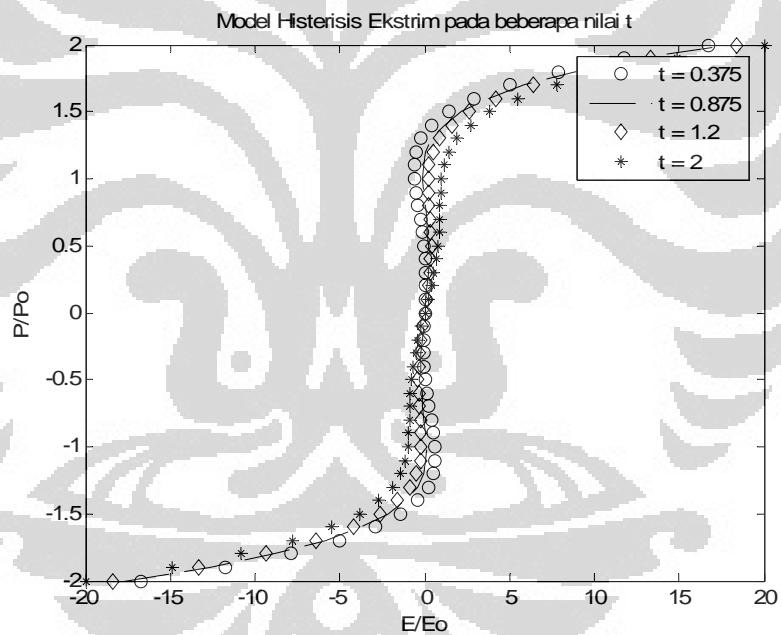
Model selanjutnya akan dicoba dengan menggunakan fungsi sinusoidal dari peningkatan medan yang diberikan, maka model histerisis yang cenderung terbentuk akan diperlihatkan.

BAB IV

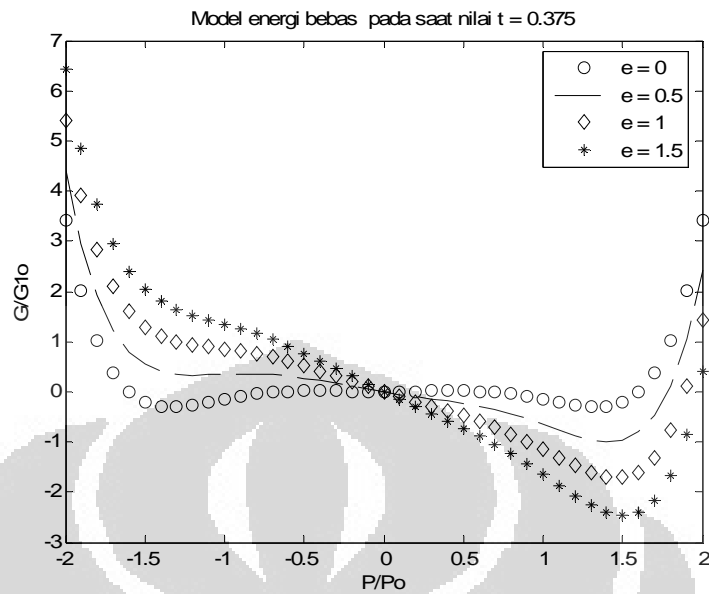
Hasil dan Pembahasan

4.1 Model Statis

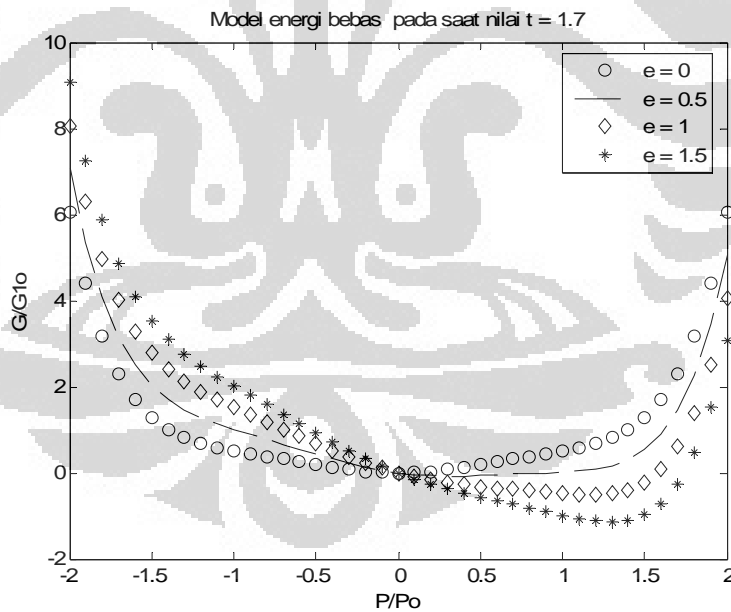
Model statis dipergunakan untuk memperlihatkan pengaruh medan listrik jika dikenakan pada material. Persamaan 3.7a dan persamaan 3.8 digunakan untuk menggambarkan proses pembalikan polarisasi pada material film tipis yang diamati, karakteristik material sangat dipengaruhi oleh nilai t , gambar 4.1, 4.2 dan 4.3 memperlihatkan pengaruh nilai t , pada model histerisis ektrim dan energi bebas material film tipis.



Gambar 4.1 Model Histerisis Ektrim Untuk Beberapa Nilai t



Gambar 4.2 Hubungan Energi Bebas dengan Polarisasi Untuk Variasi Pemberian Medan Listrik Pada Saat $t = 0.375$



Gambar 4.3 Hubungan Energi Bebas dengan Polarisasi Untuk Variasi Pemberian Medan Listrik Pada Saat $t = 1.7$

Selanjutnya metode pendekatan ini digunakan untuk menentukan nilai t dari material film tipis yang sampel yang diamati, melalui nilai polarisasi spontan

teoritis. Pendekatan teoritis untuk nilai polarisasi spontan dapat menggunakan pendekatan interaksi dipol diantara atom pada struktur kristal, selanjutnya dengan menggunakan persamaan 3.8, pada kondisi maksimum diperoleh nilai t, dari nilai polarisasi yang diperoleh secara teori, seperti terlihat pada persamaan 4.1.

$$P^2 = -\frac{3}{5} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{5t}{9}} \right) \dots\dots\dots(4.1)$$

Selanjutnya kita dapat menghitung nilai polarisasi spontan secara teori dengan menggunakan pendekatan proses doping, Perhitungan polarisasi spontan untuk BST dapat menggunakan asumsi proses hard doping dimana proses pendadahan menyebabkan sangat efektifnya pembangkitan dipol – dipol ion. Pemodelan interaksi yang dilakukan dengan mengasumsikan atom pendadah menggantikan atom Ba/Sr pada struktur kristal. Tabel 4.1 menunjukkan posisi atom pada struktur Kristal BST yang telah didoping oleh Pb.

Tabel 4.1. Perhitungan Momen Dipol Lapisan Tipis BST dengan Doping Pb

No	Atom	Posisi Atom			q
		x	y	Z	
1	Ba/Sr	0	0	0	0,25e
2	Ba/Sr	1	0	0	0,25e
3	Ba/Sr	1	1	0	0,25e
4	Ba/Sr	0	1	0	0,25e
5	Ba/Sr	0	1	1	0,25e
6	Ba/Sr	0	0	1	0,25e
7	Ba/Sr	1	0	1	0,25e
8	Pb	1	1	1	0,25e
9	Ti	0,5	0,5	0,5	4e
10	O	0,5	0	0,5	-1e
11	O	0,5	1	0,5	-1e
12	O	1	0,5	0,5	-1e
13	O	0	0,5	0,5	-1e
14	O	0,5	0,5	0	0
15	O	0,5	0,5	1	-1e

Momen dipol : $p = \sum_{i=1}^n q_i r_i$

Analisis momen dipol :

$$\begin{aligned}
 p &= \sum_{i=1}^{15} q_i r_i = 0.25q(0\hat{i} + 0\hat{j} + 0\hat{k}) + 0.25q(\hat{i} + 0\hat{j} + 0\hat{k}) + 0.25q(\hat{i} + 1\hat{j} + 0\hat{k}) \\
 &+ 0.25q(0\hat{i} + 1\hat{j} + 0\hat{k}) + 0.25q(0\hat{i} + 1\hat{j} + 1\hat{k}) + 0.25q(0\hat{i} + 0\hat{j} + 1\hat{k}) + 0.25q(\hat{i} + 0\hat{j} + 1\hat{k}) \\
 &+ 0.25q(\hat{i} + 1\hat{j} + 1\hat{k}) + 4q(0.5\hat{i} + 0.5\hat{j} + 0.5\hat{k}) - 1q(0.5\hat{i} + 0\hat{j} + 0.5\hat{k}) - 1q(0.5\hat{i} + 1\hat{j} + 0.5\hat{k}) \\
 &- 1q(\hat{i} + 0.5\hat{j} + 0.5\hat{k}) - 1q(0\hat{i} + 0.5\hat{j} + 0.5\hat{k}) - 0q(0.5\hat{i} + 0.5\hat{j} + 0\hat{k}) - 1q(0.5\hat{i} + 0.5\hat{j} + 1\hat{k})
 \end{aligned}$$

panjang vektor polarisasi : $|p| = \sqrt{(0.25qa)^2 + (0.25qa)^2 + (-qa)^2} = 0.707qa$

polarisasi spontan : $P_s = \frac{pxa}{V} = \frac{0.707 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 3.9505 \times 10^{-10}}{(3.939049 \times 10^{-10})^3}$

$= 72,4947 \mu C / cm^2$

nilai perhitungan polarisasi spontan akan digunakan acuan untuk penentuan nilai P_{max} untuk setiap material film tipis. Selanjutnya dengan cara yang sama digunakan untuk semua material sampel yang dijadikan untuk studi.

Tabel 4.2 Polarisasi Sponstan Teoritis Untuk Material Film Tipis BST Murni

No	Sampel	Parameter Kisi (Å)	Polarisasi Spontan, P_s ($\mu C/cm^2$)
1	BST - Si	3.9465	72.63957
2	BST - Pt	3.9535	72.38312

Berikut adalah material film tipis setelah di dadah oleh beberapa material.

Tabel 4.3 Polarisasi Sponstan Teoritis Untuk Material Film Tipis BST Setelah di Dadah 1 % Oleh Beberapa Material

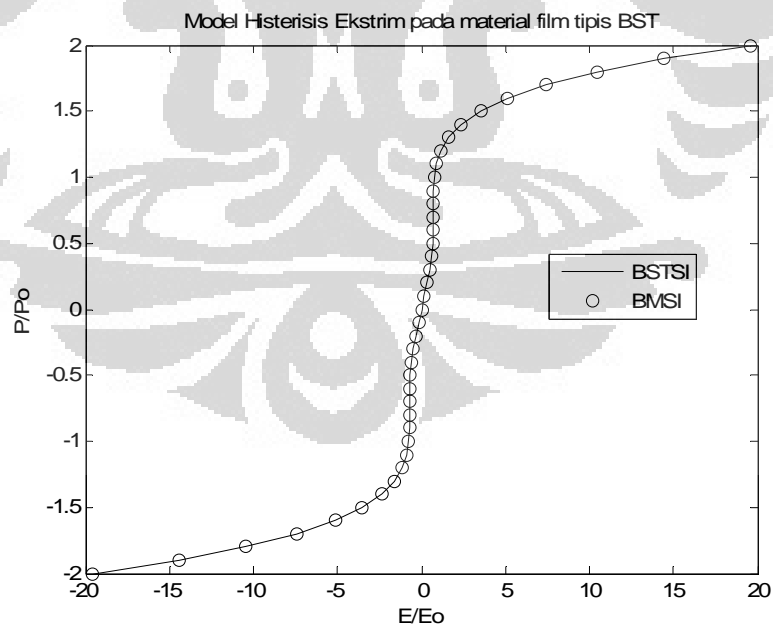
No	Sampel	Dopan	Parameter Kisi (Å)	Polarisasi Spontan, P_s ($\mu C/cm^2$)
1	BST - Si	Cu	3.8879	74.84549
2	BST - Pt	Cu	3.9390	72.9159
3	BST - Si	Mg	3.9450	72.51329
4	BST - Pt	Mg	3.9553	72.31795
5	BST - Si	Pb	3.9505	72.49468
6	BST - Pt	Pb	3.9490	72.5484

Dengan menggunakan pendekatan persamaan 4.1 diperoleh nilai t untuk menentukan model statis dari material.

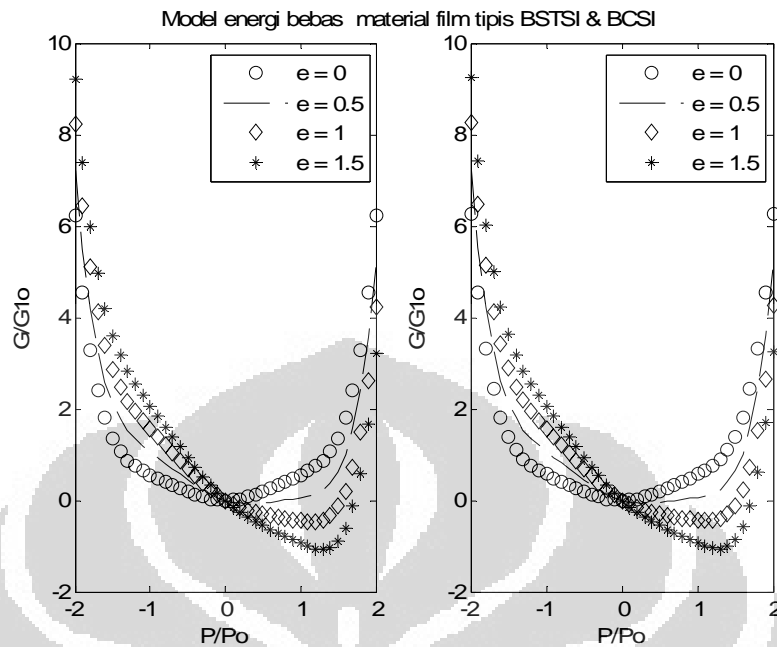
Tabel 4.4 Nilai Parameter t Teoritis Untuk Material Film Tipis BST

No	Sampel	Dopan	t	Code Sampel
1	BST - Si	-	1.773827943	BSTSI
2	BST - Pt	-	1.771068044	BSTPT
3	BST - Si	Cu	1.792073742	BCSI
4	BST - Pt	Cu	1.776656964	BCSPT
5	BST - Si	Mg	1.772484949	BMSI
6	BST - Pt	Mg	1.770346249	BMPT
7	BST - Si	Pb	1.772284382	BPSI
8	BST - Pt	Pb	1.772861505	BPPT

Nilai ini digunakan untuk memodelkan histerisis pada kondisi ekstrim dimana energi bebas minimum, berikut contoh pemodelan untuk BST sebelum dan sesudah didadah, untuk pemodelan material lainnya dapat dilihat di lampiran 1.



Gambar 4.4 Pemodelan Histerisis Ekstrim Untuk BST - Si dan BST setelah didadah oleh Mg

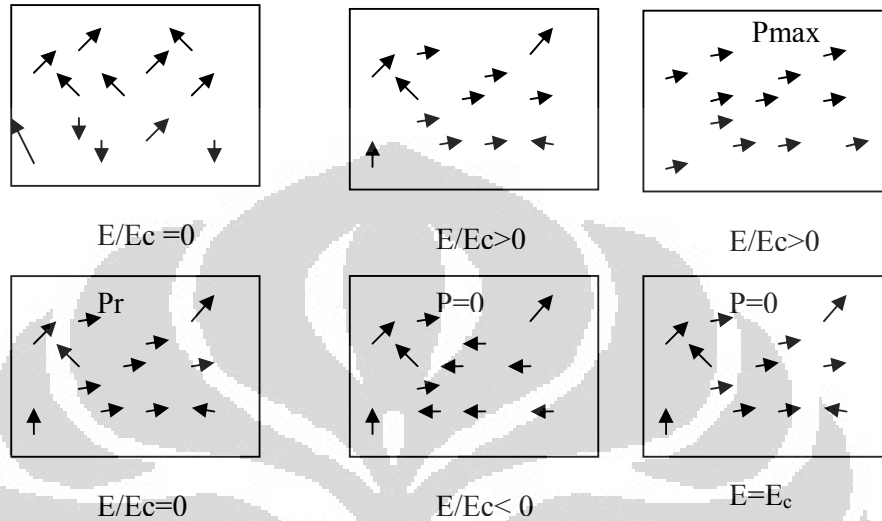


Gambar 4.5 Pemodelan Energi Bebas Untuk BST - Si dan BST Setelah didadah Oleh Cu

Dari model ini, diperoleh persamaan umum untuk setiap keadaan p , sebelum dan sesudah didadah, dari hasil pemodelan menunjukkan bahwa untuk kondisi ekstrim keadaan sebelum dan sesudah doping tidak memperlihatkan perbedaan yang signifikan. Dari pengelompokan untuk material ferroelektrik dapat dilihat bahwa nilai t menunjukkan bahwa semakin diberi medan listrik besar fase material berubah menjadi lebih stabil, nilai t lebih besar dari 1 ($t > 1$) menunjukkan bahwa fase material pada saat pengukuran berada pada kondisi fase ferroelektrik yang terinduksi medan listrik [1]. Dari model energi bebas ditunjukkan bahwa semakin besar medan listrik yang berikan semakin stabil fase dari material film tipis.

Nilai – nilai pemodelan statis di atas dapat menjelaskan proses pembalikan polarisasi pada material dan merekonstruksi histerisis yang terjadi. Material film tipis akan terpolarisasi ketika dikenai medan listrik luar, terjadi saturasi ketika diberikan medan listrik tinggi, pada saat ini polarisasi maksimum terjadi dan semua domain terpolarisasi pada satu arah, selanjutnya medan listrik diturunkan dan akan terbentuk beberapa domain dengan arah tertentu, hal ini selanjutnya yang disebut polarisasi remanen dari material film tipis. Jika diteruskan medan

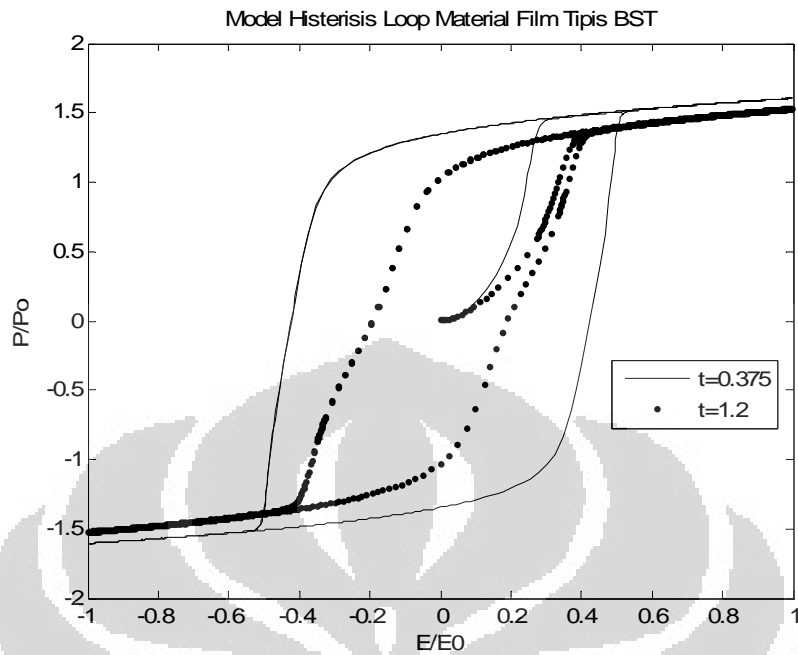
listrik dan selanjutnya arahnya diubah maka selanjutnya akan diketahui nilai medan listrik koersif dari material, model proses pembalikan polarisasi digambarkan pada gambar 4.6.



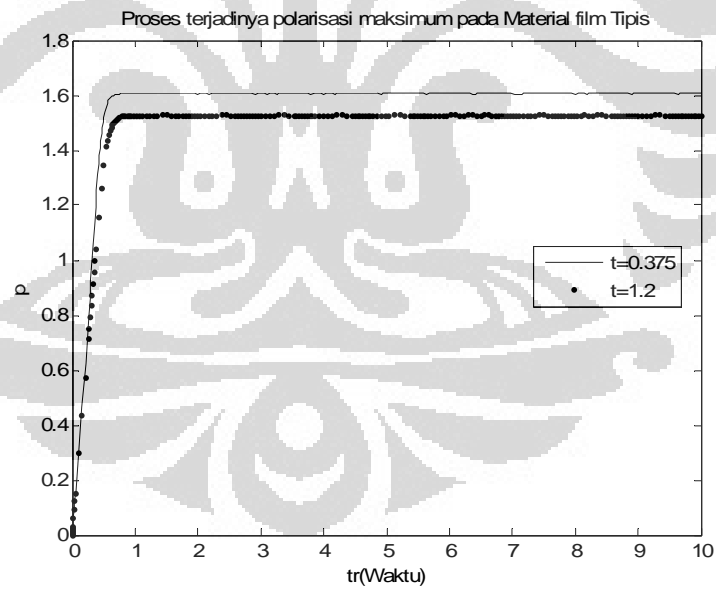
Gambar 4.6 Simulasi Pemodelan Proses Polarisasi Pembalikan Pada Material Film Tipis BST

4.2 Pemodelan Dinamis

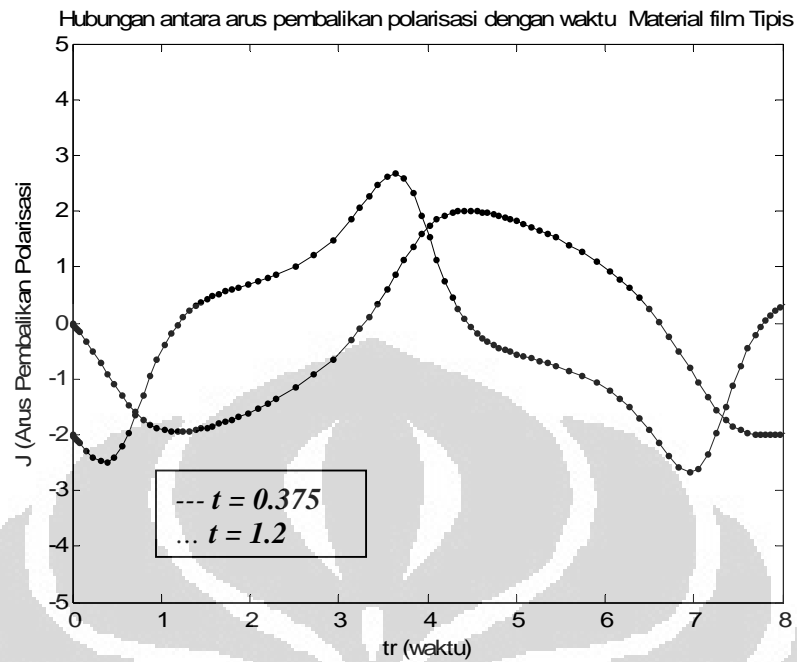
Model dinamis dilakukan dengan menyelesaikan persamaan 3.2 dengan menggunakan metode range kutta orde 4. Model ini tergantung pada beberapa parameter diantaranya nilai t , nilai ini menunjukkan fase dari material yang bergantung pada suhu lingkungan. Nilai ini menggambarkan apakah material berada fase stabil / tidak, hal ini juga terkait dengan suhu material tersebut. Berikut adalah contoh parameter t berpengaruh pada hasil pemodelan histerisis :



Gambar 4.7 Simulasi Pemodelan Loop Histerisis Pada Nilai t Berbeda



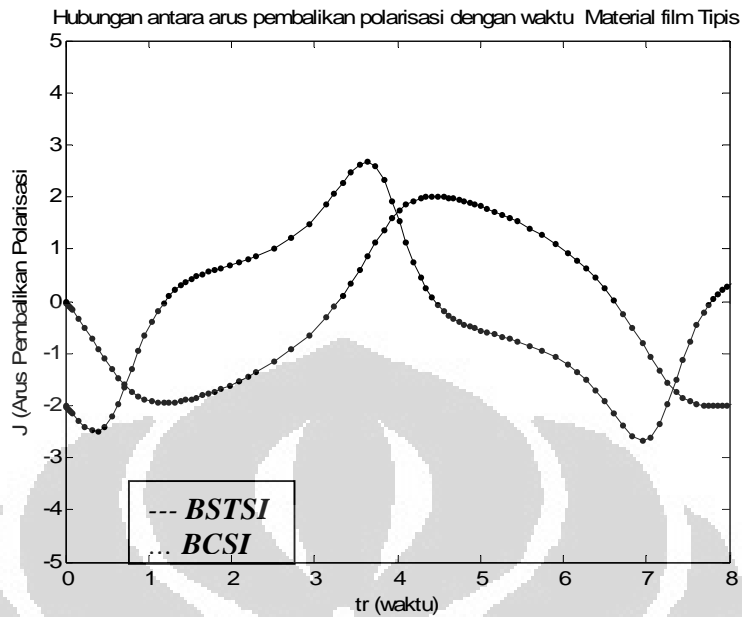
Gambar 4.8 Simulasi Pemodelan Polarisasi Maksimum Pada Nilai t Berbeda



Gambar 4.9 Arus Pembalikan Pada Nilai t Berbeda

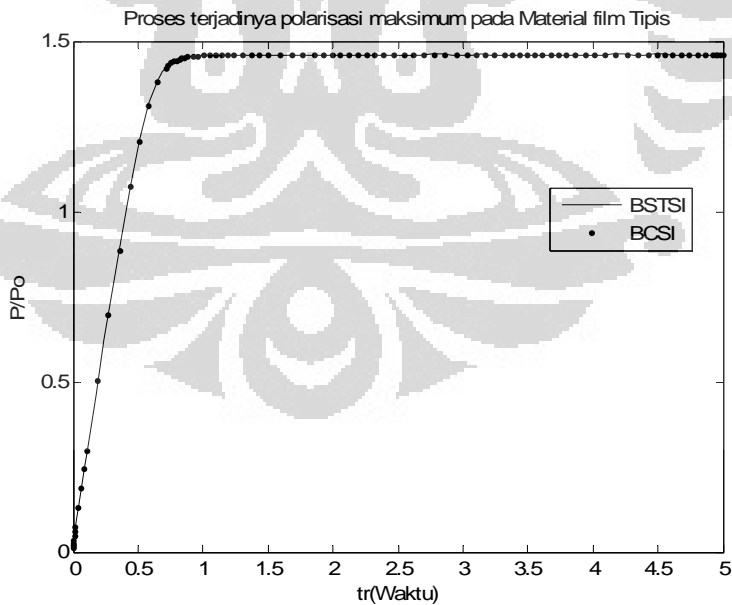
Dari simulasi di atas dapat dilihat, nilai t mempengaruhi interaksi mikro dari material film tipis. Nilai t sangat mempengaruhi model histerisis dan polarisasi maksimum, sementara tidak terlalu signifikan terhadap arus pembalikan polarisasi.

Gambar 4.10, 4.11 dan 4.12 menunjukkan pemodelan arus pembalikan polarisasi, polarisasi maksimum dan model histerisis dari material film tipis BST - Si dan BST - Si yang didadah oleh Cu.



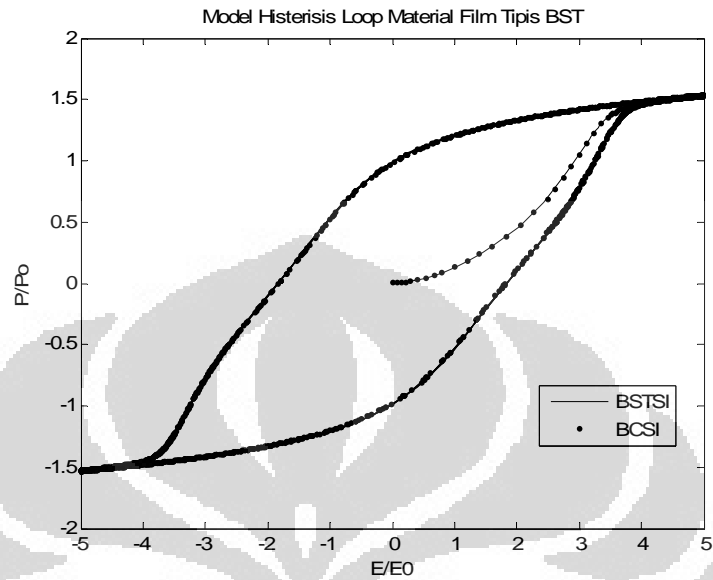
Gambar 4.10 Arus Polarisasi Material Film Tipis Pada BST-Si

Dari pemodelan arus pembalikan polarisasi, selanjutnya dilakukan simulasi waktu yang diperlukan untuk polarisasi maksimum pada material BST - Si dan BST - Si yang sudah didadah Cu..

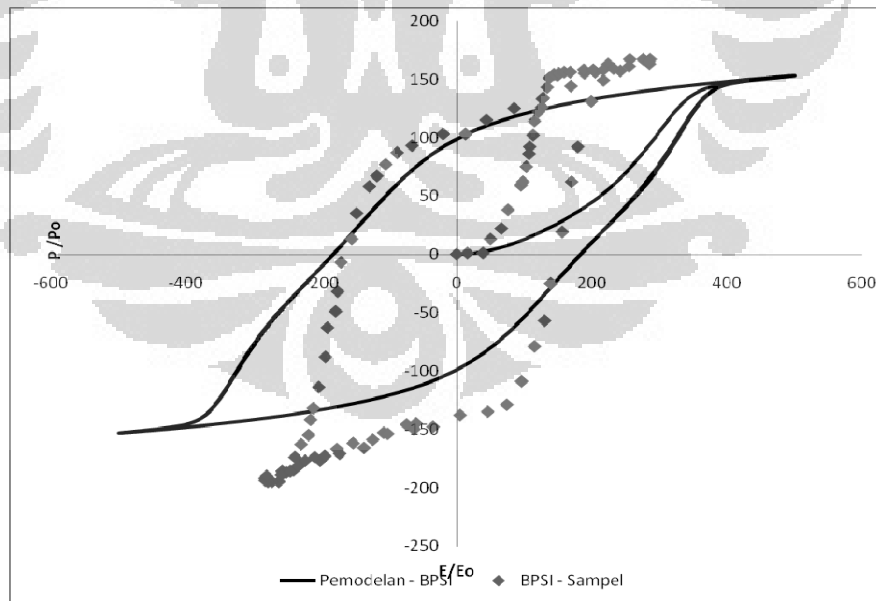


Gambar 4.11 Simulasi Polarisasi Maksimum Pada Material Film Tipis Pada BST – Si

Dari persamaan dinamis LK selanjutnya dibuat pemodelan loop histerisis untuk material BST - Si dan BST yang sudah didadah Cu.



Gambar 4.12 Model Loop Histerisis Material Film Tipis Pada BST-Si
Berikut adalah contoh perbandingan pemodelan dengan hasil eksperimen untuk loop histerisis, pada material BST yang sudah didadah oleh Pb.



Gambar 4.13 Model Loop Histerisis Material Film Tipis Pada Hasil Pemodelan Dengan Hasil Pengukuran

Hasil pemodelan untuk material BST dan material BST yang sudah didadah menunjukkan hasil yang agak berbeda dengan hasil pengukuran, akan tetapi memperlihatkan model yang hampir mirip, nilai medan koersif menunjukkan hasil yang hampir sama (lampiran 2), hal ini dimungkinkan model pendekatan pada proses pendadahan yang terjadi. Pada pemodelan interaksi dipol digambarkan proses pendadahan dimana Penambahan pendadah Pb/Cu/Mg akan menggantikan posisi dari ion Ba/Sr, pergantian ini didasarkan pada besar atau kecilnya jari-jari atom dari material doping. Karena muatan Pb^{2+} / Mg^{2+} / Cu^{2+} lebih kecil daripada Ti^{4+} sebesar dua muatan positif dan terjadi fenomena elektrostatis antara Mg^{2+} dengan Ti^{4+} , maka mengakibatkan terlepasnya ion O^{2-} , Semakin banyak pendadahan yang diberikan maka akan semakin banyak O^{2-} yang terlepas. Pemberian pendadahan ion donor $Pb^{2+}/Mg^{2+}/Cu^{2+}$ ke dalam BST berfungsi untuk membuat cacat kristal dalam ion oksigen.

Dari hasil pemodelan interaksi secara umum sudah memperlihatkan pendekatan model statis dan dinamis bisa memperlihatkan interaksi secara umum terkait polarisasi pembalikan dan model histerisis. Model statis menunjukkan keadaan dimana nilai ekstrim untuk material sebelum didadah dan sesudah didadah tidak memperlihatkan perbedaan yang signifikan, walaupun sebetulnya diharapkan dengan adanya doping diharapkan ada perubahan pada polarisasi pembalikan yang signifikan.

Model dinamis dapat memperlihatkan polarisasi maksimum dan polarisasi remanen pada material film tipis. Model yang diharapkan tidak begitu sesuai dengan hasil eksperimen yang diperoleh, akan tetapi prinsip pendekatan proses pendadahan yang terjadi dan interaksi yang diusulkan secara umum sudah mendekati gejala yang terjadi pada hasil pengukuran.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Dari hasil studi dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pemodelan statis dan dinamis secara umum dapat memperlihatkan proses pembalikan polarisasi pada material film tipis yang diamati .
2. Model statis memperlihatkan interaksi material film tipis pada keadaan ekstrim.
3. Model dinamis memperlihatkan model histerisis material.
4. Secara umum, interaksi pada struktur kristal material digambarkan melalui model proses pendadahan terjadi pada material film tipis BST.
5. Model Loop Histerisis yang paling mendekati pengukuran adalah model untuk material film tipis BST – Si yang didadah oleh Pb.

5.2. SARAN

1. Untuk memperlihatkan lebih detail interaksi yang terjadi pada material dapat dibuatkan terlebih dahulu peta elektron pada material film tipis.
2. Membuat beberapa pendekatan model proses pendadahan yang terjadi, sehingga pendekatan model inteaksi lebih akurat.
3. Algoritma pemograman lebih dilengkapi dengan memproses parameter percobaan yang sudah dilakukan , sehingga pemodelan teori secara langsung bisa dikoreksi dengan melakukan pengecekan pada hasil percobaan.

DAFTAR ACUAN

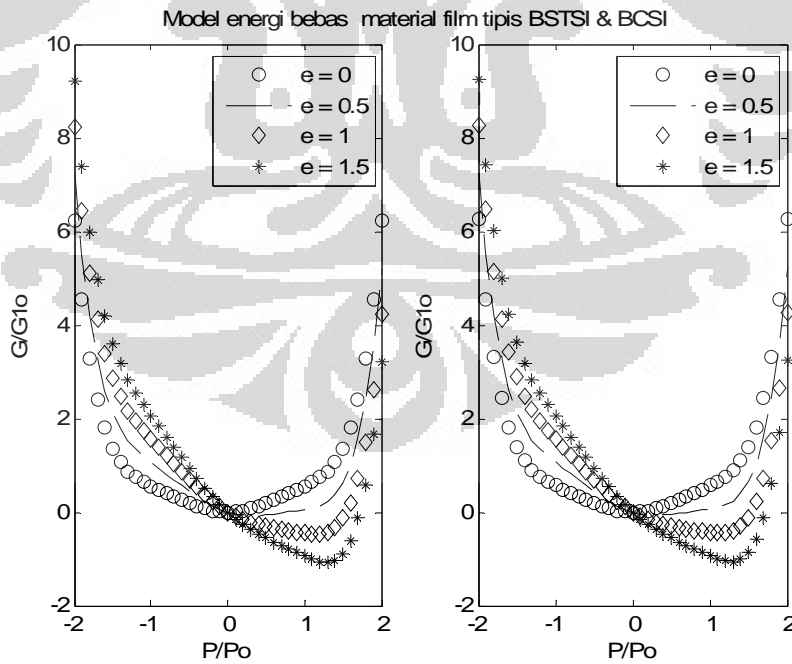
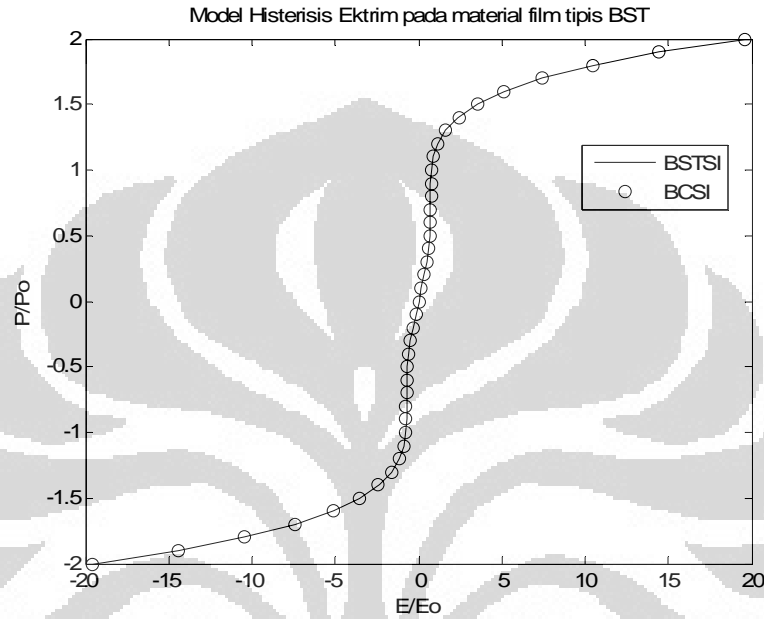
- [1] Eng –Kian Tan, J Osman dan D.R. Tilley , *Theory of Switching in Bulk First –Order Ferroelectric Material*, phys. stat. sol. (b) 228, No. 3, 765–776 (2001)
- [2] Dan Richinshci, Papusoi, C. Hargagea, V. Tura dan L. Mitoseriu, *Model for switching in finite ferroelectric media as a landau phase transition and comparison with experiment*, ANALELE ȘTIINȚIFICE ALE UNIVERSITĂȚII "AL.I.CUZA" DIN IAȘI Tomul XLIII-XLIV, s.I.b.fasc.2 Fizica Solidelor - Fizică Teoretică, 1997-1998
- [3] Ralph C Smith dan Craig L. Hom, *A domain Wall Theory for Ferroelectric Material* , Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 10, No. 3, 195-213 (1999)
- [4] Ralph C Smith dan ,Craig L. Hom, *A domain Wall Model for Ferroelectric Material* , SPIE Conference on Mathematics and Control in Smart Structures, SPIE Volume 3667 (1999)
- [5] Tieqi Liu, *Electromechanical Behavior of Relaxor Ferroelectric Crystals*, Disertasi program doctor, Georgia Institute of Technology (2004)
- [6] William S. Oates, *Fracture of Ferroelectric Material*, Disertasi program doctor, Georgia Institute of Technology (2004)
- [7] M.E. Lines dan A.M. Glass, *Principles and Applications of Ferroelectric and Related Materials*, Clarendon Press, Oxford (1997)
- [8] Seung Ho Park (2007), *The Brief Background of Piezoelectricity*, dari Tesis Seung Ho Park, Pennsylvania State University.
- [9] Irzaman. 2005. *Studi lapisan tipis pyroelektrik PbZr0,52Ti0,48O3 (PZT) yang didadah tantalum dan penerapannya sebagai detektor infra merah*, Disertasi. Institut Teknologi Bandung, Bandung , Dalam : Anggraini, P.W.K, 2006. Karakteristik Struktur Mikro dan Uji Sifat Ferroelektrik Film Lapisan Tipis Ba0,5Sr0,5TiO3 Doping Nb2O5 (BGST), Tesis Universitas Indonesia , Jakarta
- [10] T. Sumardi, 2006 . *Penumbuhan dan Uji Histerisis Lapisan Tipis Ba0,5Sr0,5TiO3 Doping Ga2O3 (BGST)*, Tesis Universitas Indonesia , Jakarta
- [11] Robert Dautray dan Jacques –Louis Lions, *Mathematical Analysis and Numerical Methods for Science and Technology*, Volume 6, Springer – Verlag.

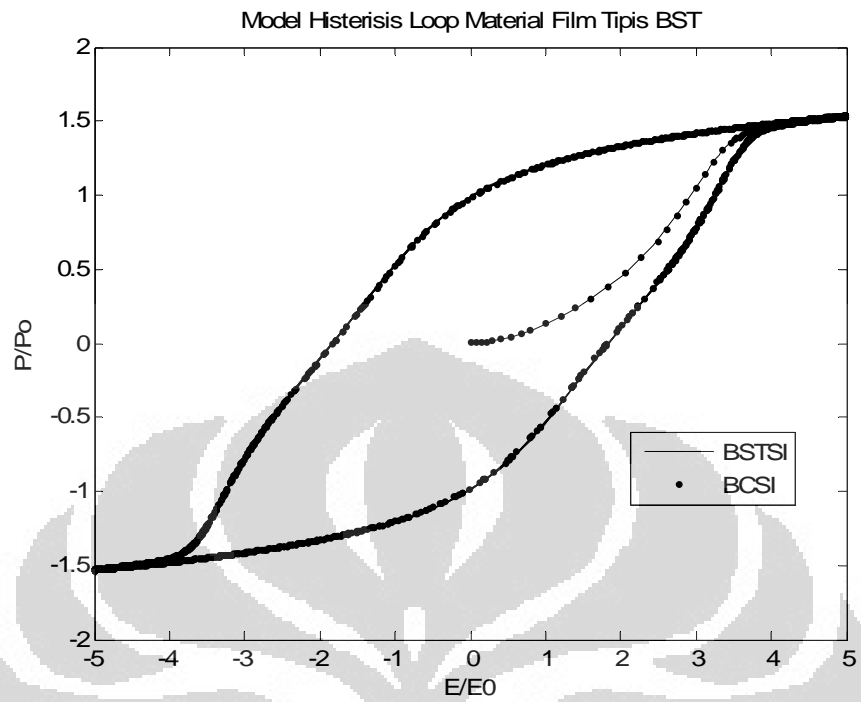
- [12] M Sayer, dan V Chivukulas., 1995. *Hand book of thin film process technology*. Dalam: Azizahwati. 2002. *Studi morfologi permukaan film tipis $PbZr_{0.525}Ti_{0.475}O_3$ yang ditumbuhkan dengan metode DC unbalanced magnetron sputtering*. Jurnal Natur Indonesia, **Vol. 5** (1): 50-56.
- [13] M. Hikam., B. Soegijono, P. W. K. Anggraini, T. Sumardi, C. Sunandar, T. Yogaraksa. 30 Mei 2006. *Development of barium strontium titanate (BST) thin film doped by Fe*. One Day Workshop on Materials & Metalurgy [Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia (UI) & Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM)].
- [14] K. Uchino. 2000. *Ferroelectric devices*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- [15] F. Jona. dan G. Shirane. 1993. *Ferroelectric crystals*. Dalam: Irzaman. 2005. *Studi lapisan tipis pyroelektrik $PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O_3$ (PZT) yang didadah tantalum dan penerapannya sebagai detektor infra merah*, Disertasi. Institut Teknologi Bandung, Bandung: 147 hlm.
- [16] Ralph C Smith dan Zoubeida Ounaies., *A Hysterisis Model for Piezoceramic*, NASA/CR-199-209368, ICASE Report No.99-29.
- [17] David Vanderbilt., *First-Principles Theory of Polarization and Electric Field in Ferroelectric*, *Ferroelectrics*, 301:9-14, 2004, Taylor & Francis Inc
- [18] M. Fecioru-morariu , D.Richinschi dkk, *Firts Order Reversal Curves and Hysteresis Loops of Ferroelectric Films Described by Phenomenology Models*, journal of optoelectronics and advance material Vol 6, No. 3, September 2004, p.1059 – 1063
- [19] M. Hikam, P.W.K Anggraini dan Sumardi, T, *Ferroelectric and Crystallographic Studies of Barium Strontium Titanate Thin Films doped by Nb_2O_5* , dipresentasikan di konferensi internasional *Tecnological Advance of Thin Films & Surface Coatings – THINFILMS 2006*.
- [20] E. Sarwono. 2004. *Perhitungan polarisasi spontan dan momen quadrupol potensial listrik bahan PIZT ($PbIn_xZr_yTi_{1-x-y}O_{3-x/2}$)*, Tesis. Universitas Indonesia, Jakarta: 43 hlm, Dalam Sumardi, T 2006, tesis universitas Indonesia hal 34 – 35.
- [21] P.W.K Anggraini, 2006. *Karakteristik Struktur Mikro dan Uji Sifat Ferroelektrik Film Lapisan Tipis $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ Doping Nb_2O_5 (BGST)*, Tesis Universitas Indonesia , Jakarta.

LAMPIRAN

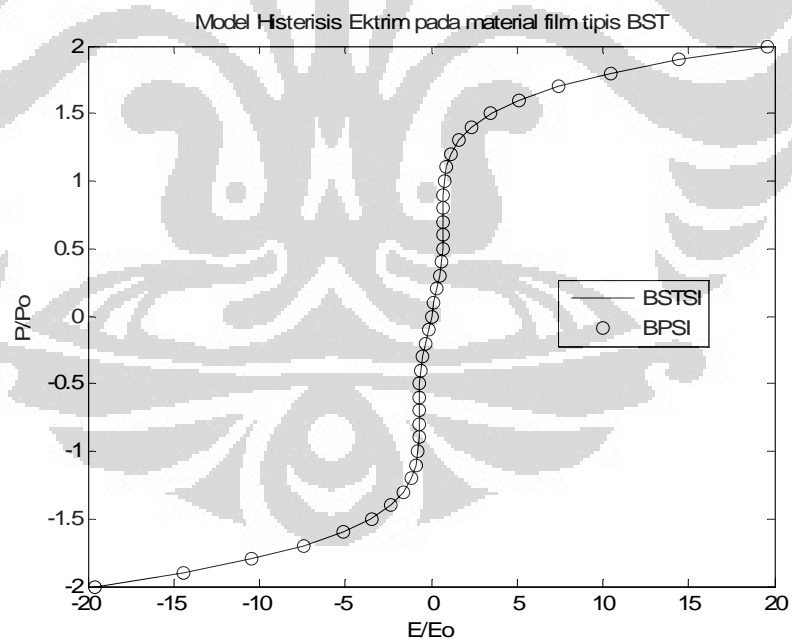
Lampiran 1. Hasil Pemodelan Material Film Tipis

1. Material film Tipis BSTSI dan BST yang didadah oleh Cu

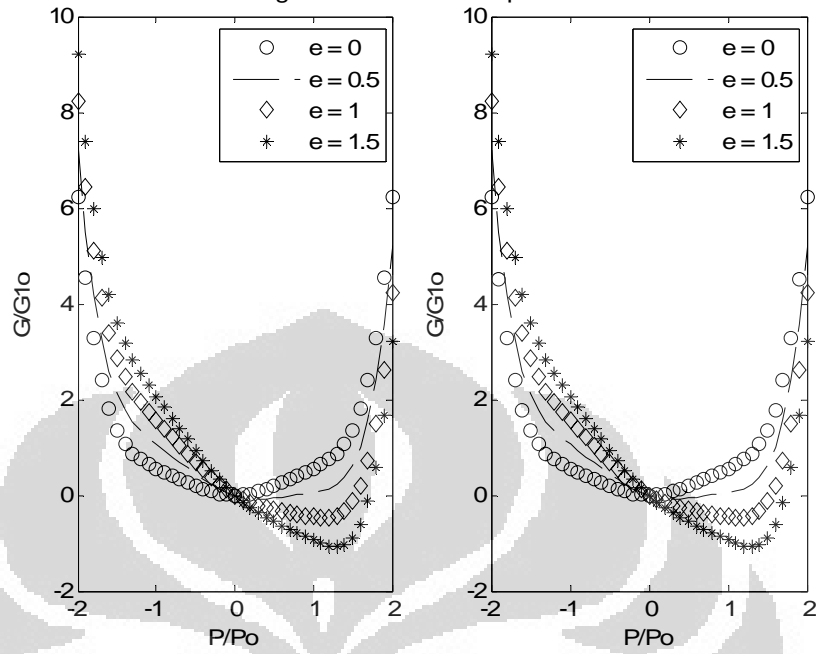




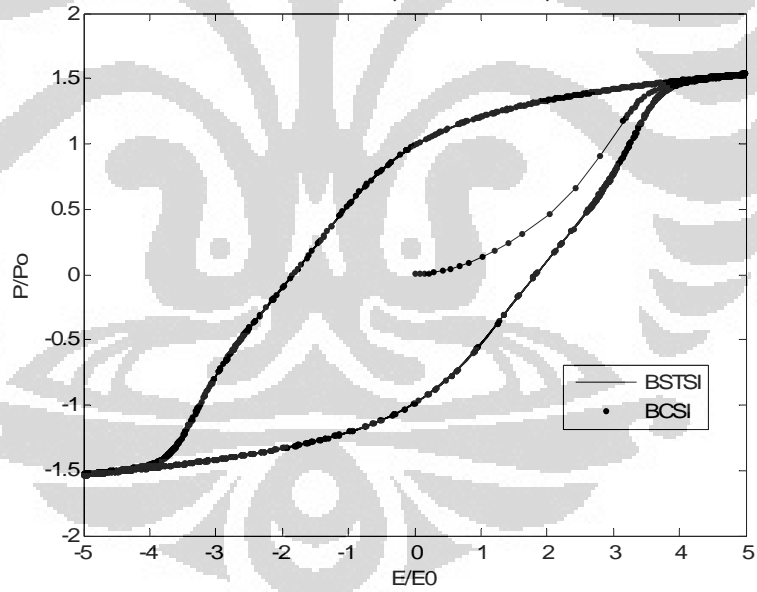
2. Material film Tipis BSTSI dan BST yang didadah oleh Pb



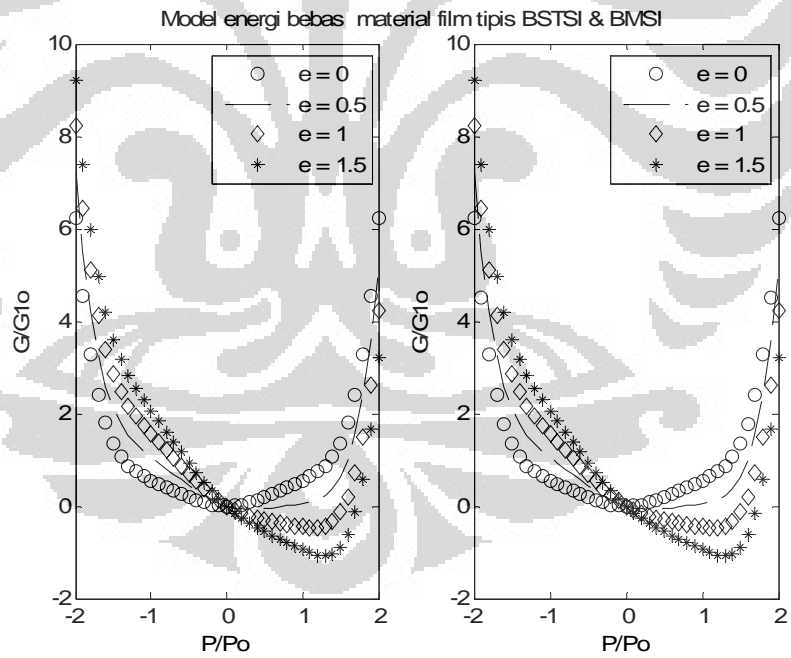
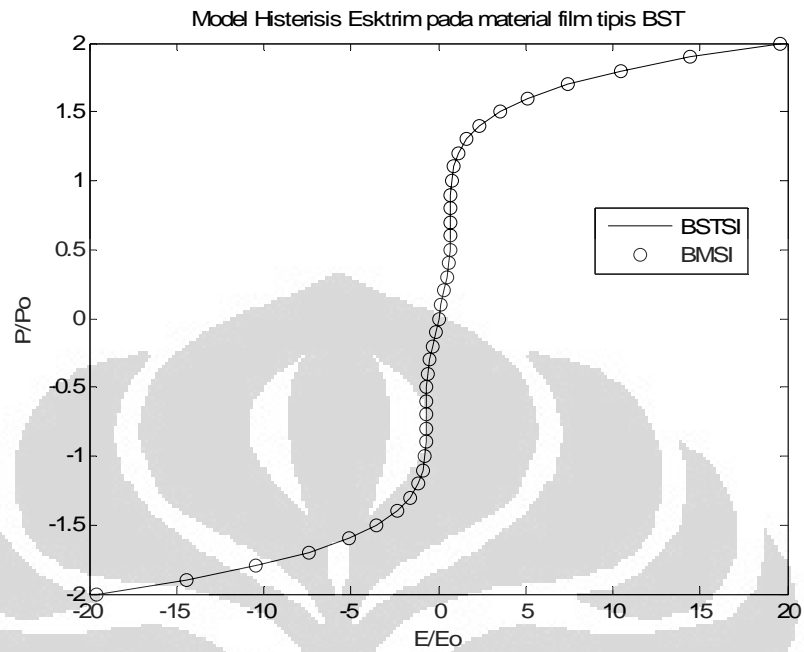
Model energi bebas material film tipis BSTSI & BPSI

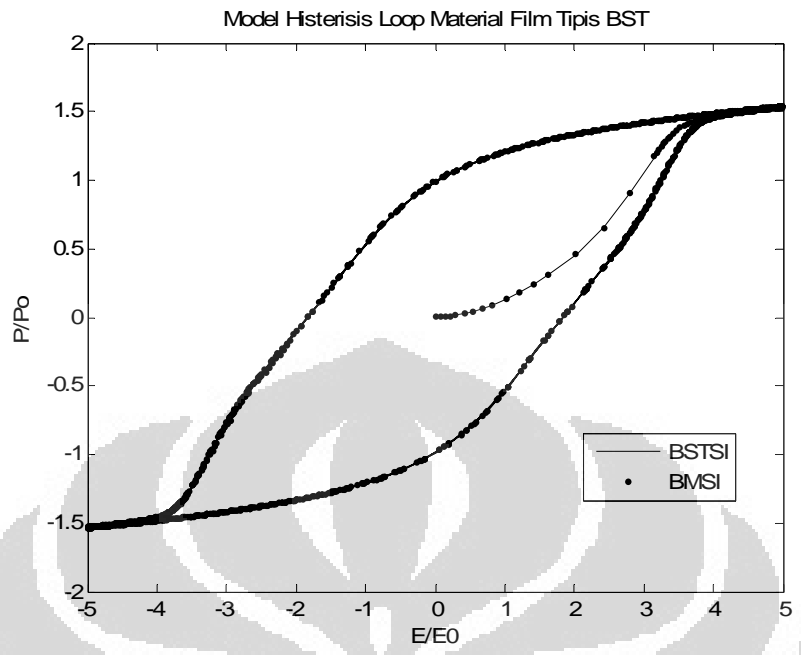


Model Histerisis Loop Material Film Tipis BST

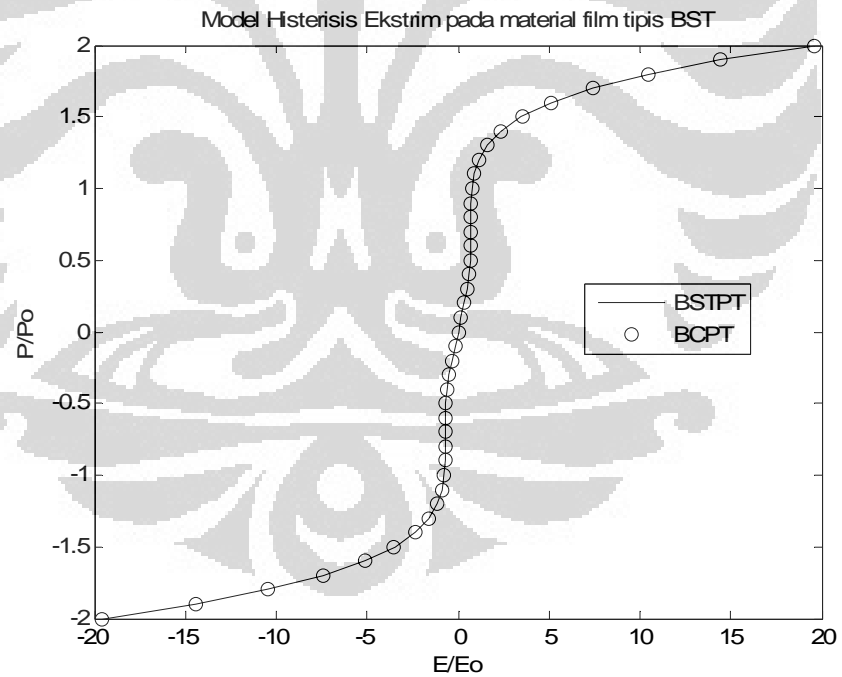


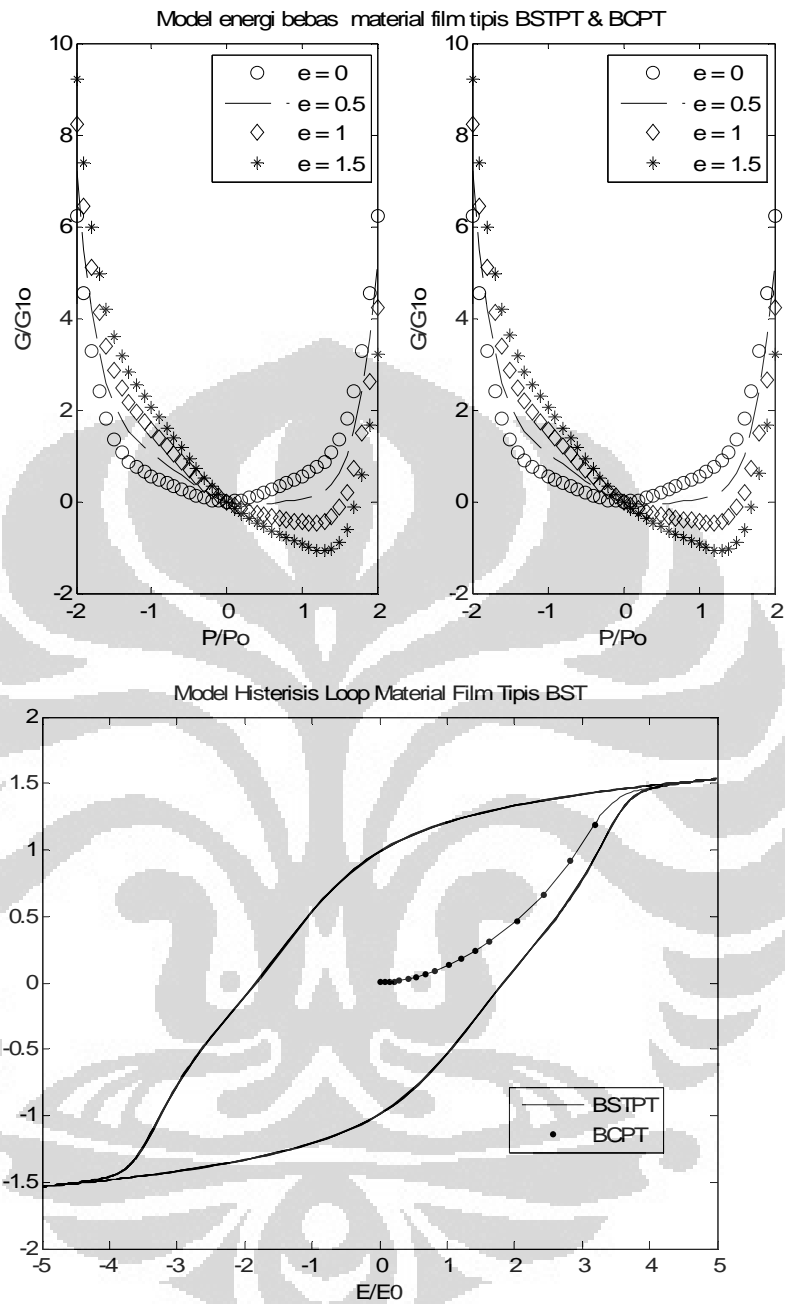
3. Material film Tipis BSTSI dan BST yang didadah oleh Mg



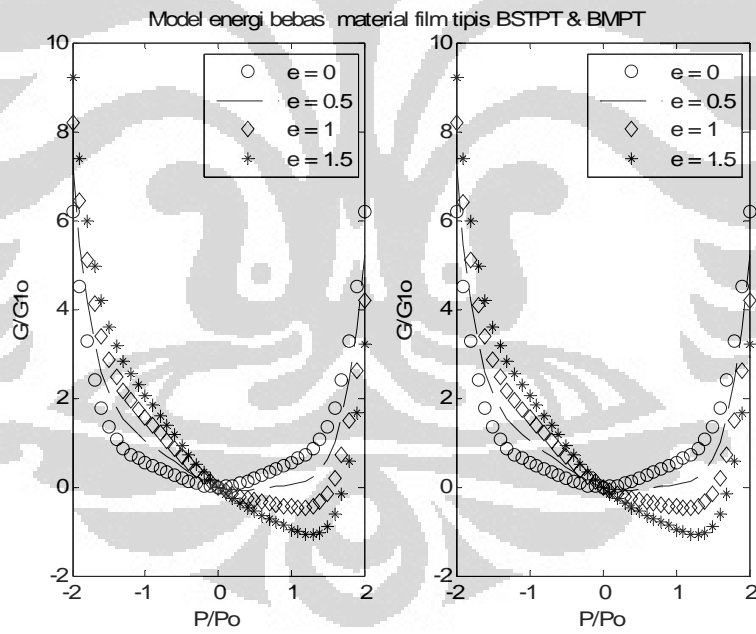
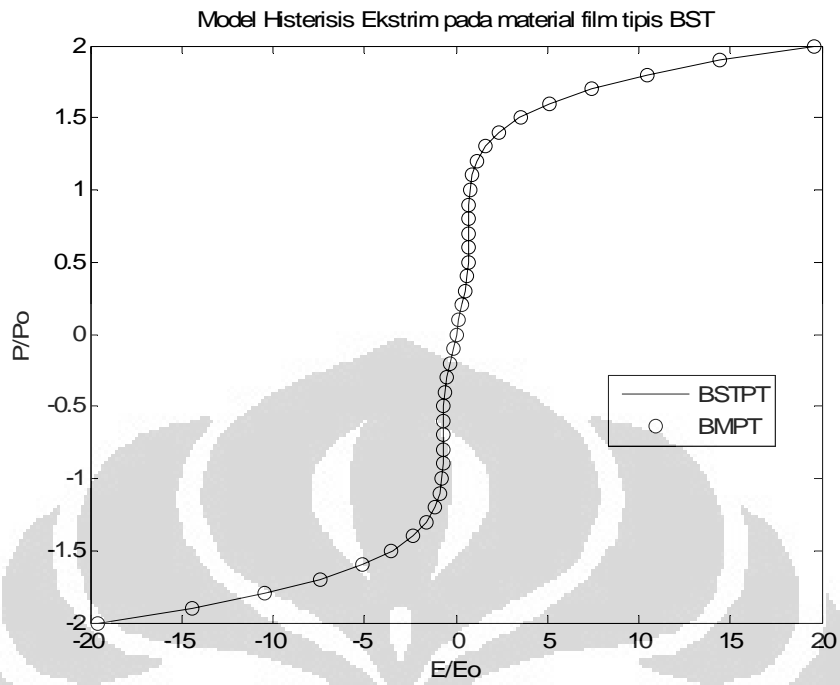


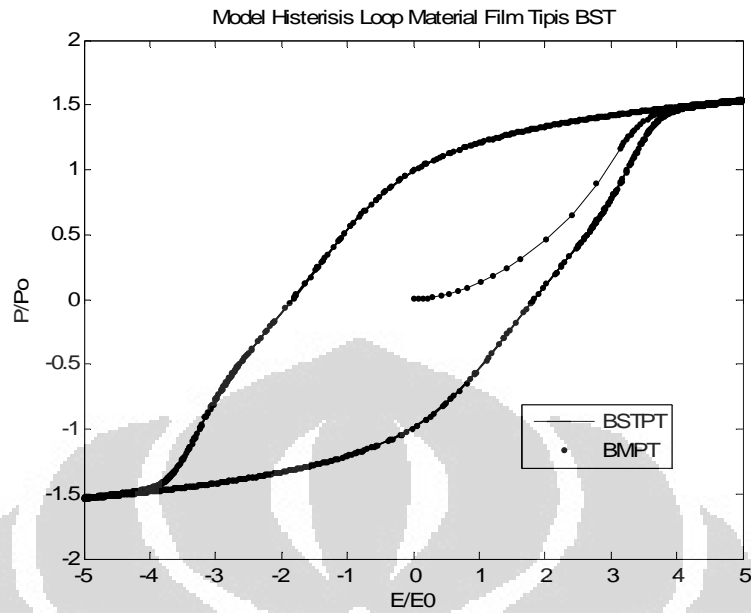
4. Material film Tipis BSTPT dan BST yang didadah oleh Cu



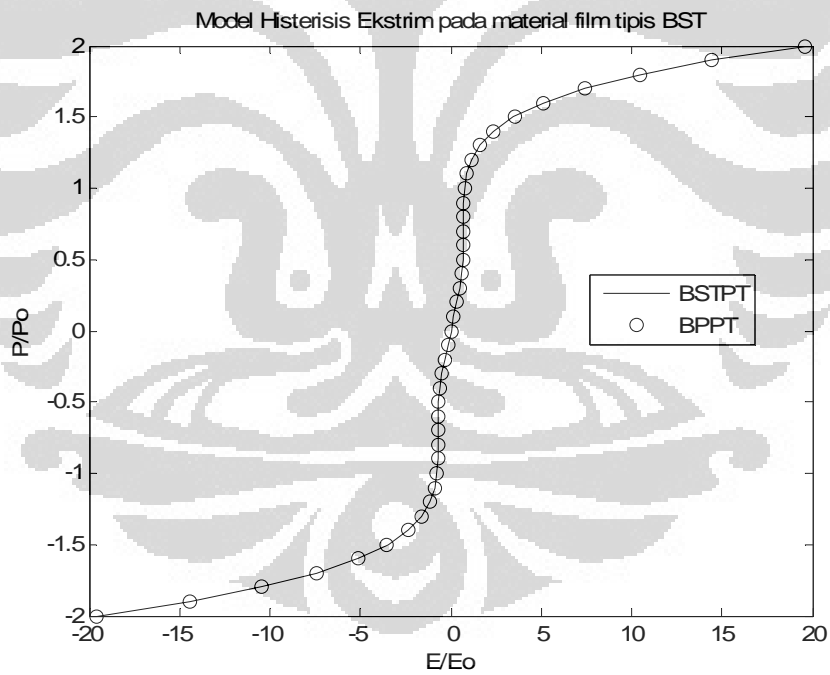


5. Material film Tipis BSTPT dan BST yang didadah oleh Mg

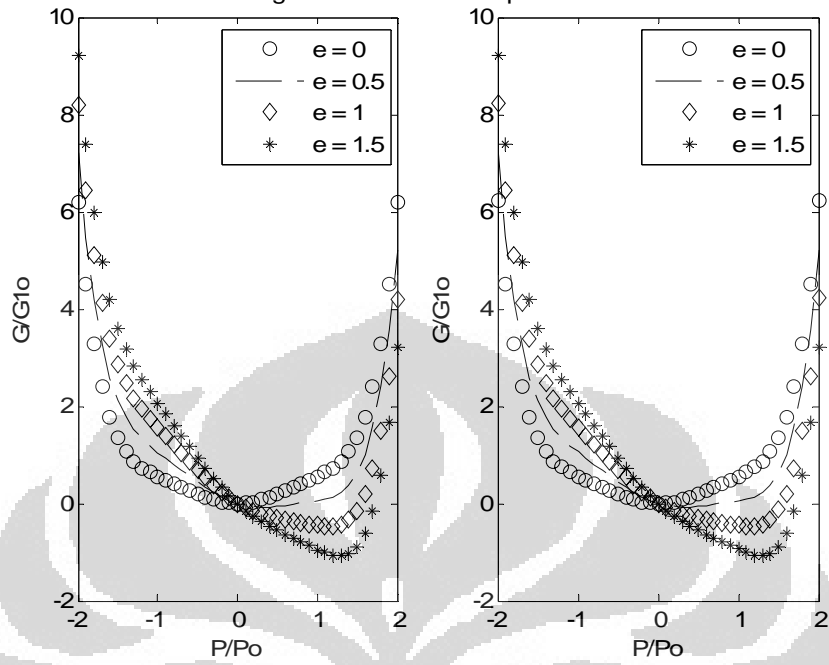




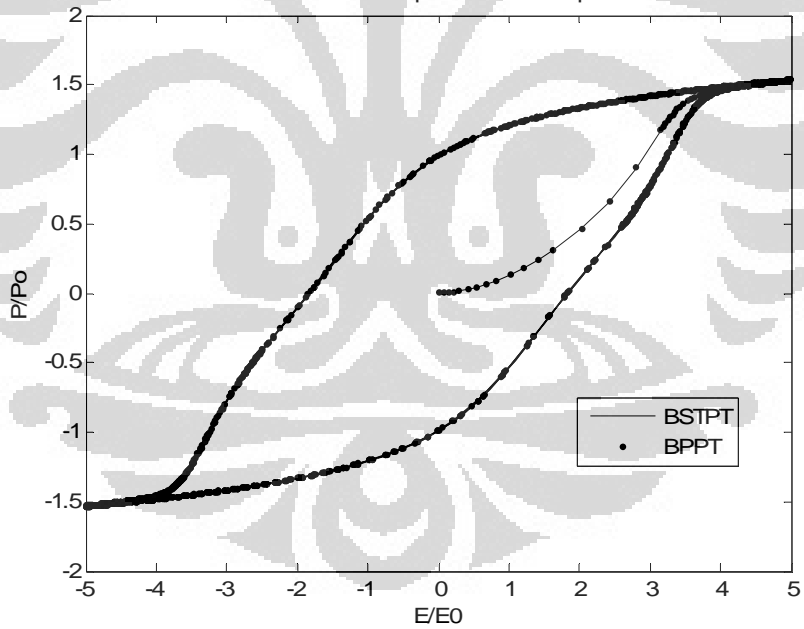
6. Material film Tipis BSTPT dan BST yang didadah oleh Pb



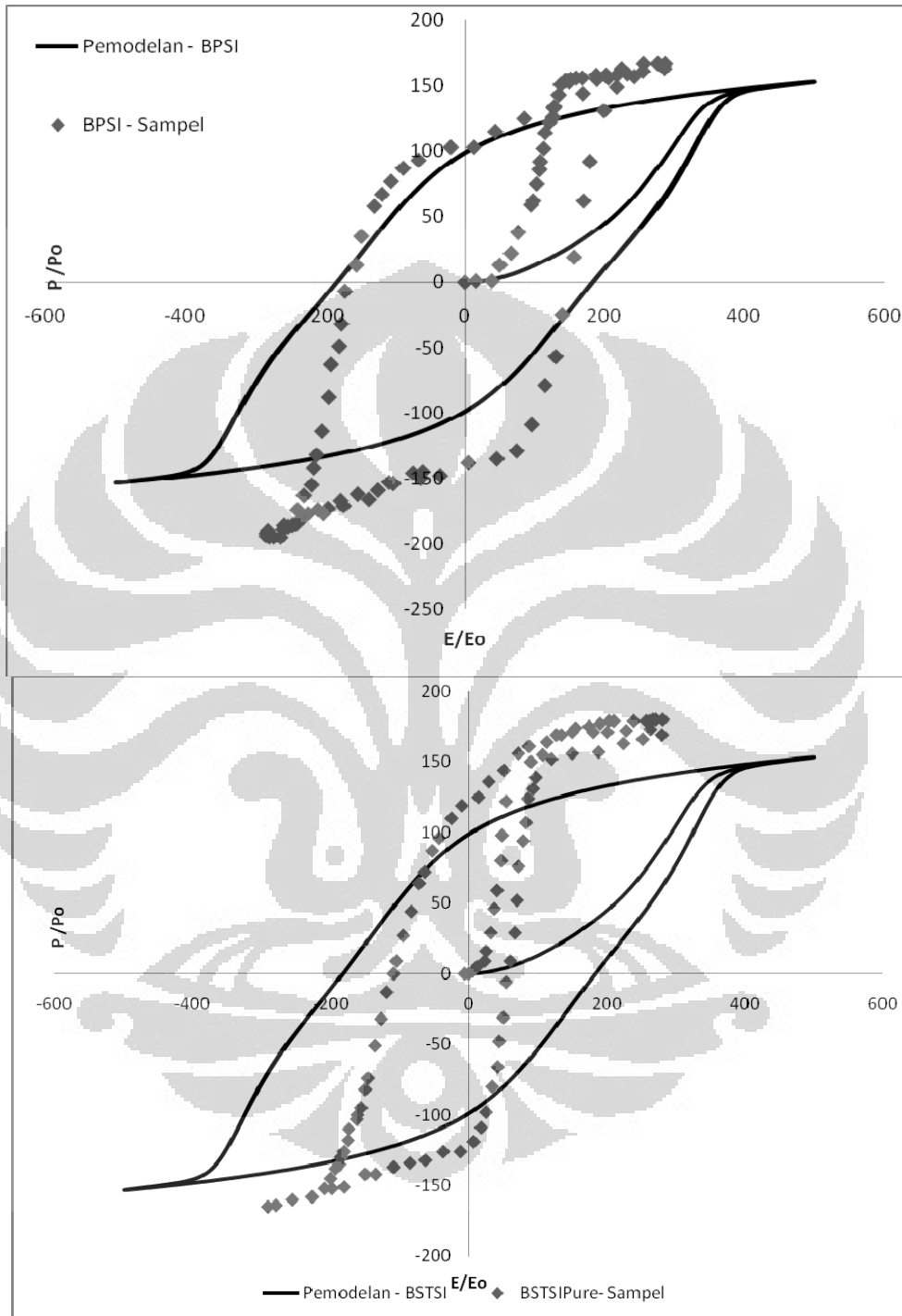
Model energi bebas material film tipis BSTPT & BPPT

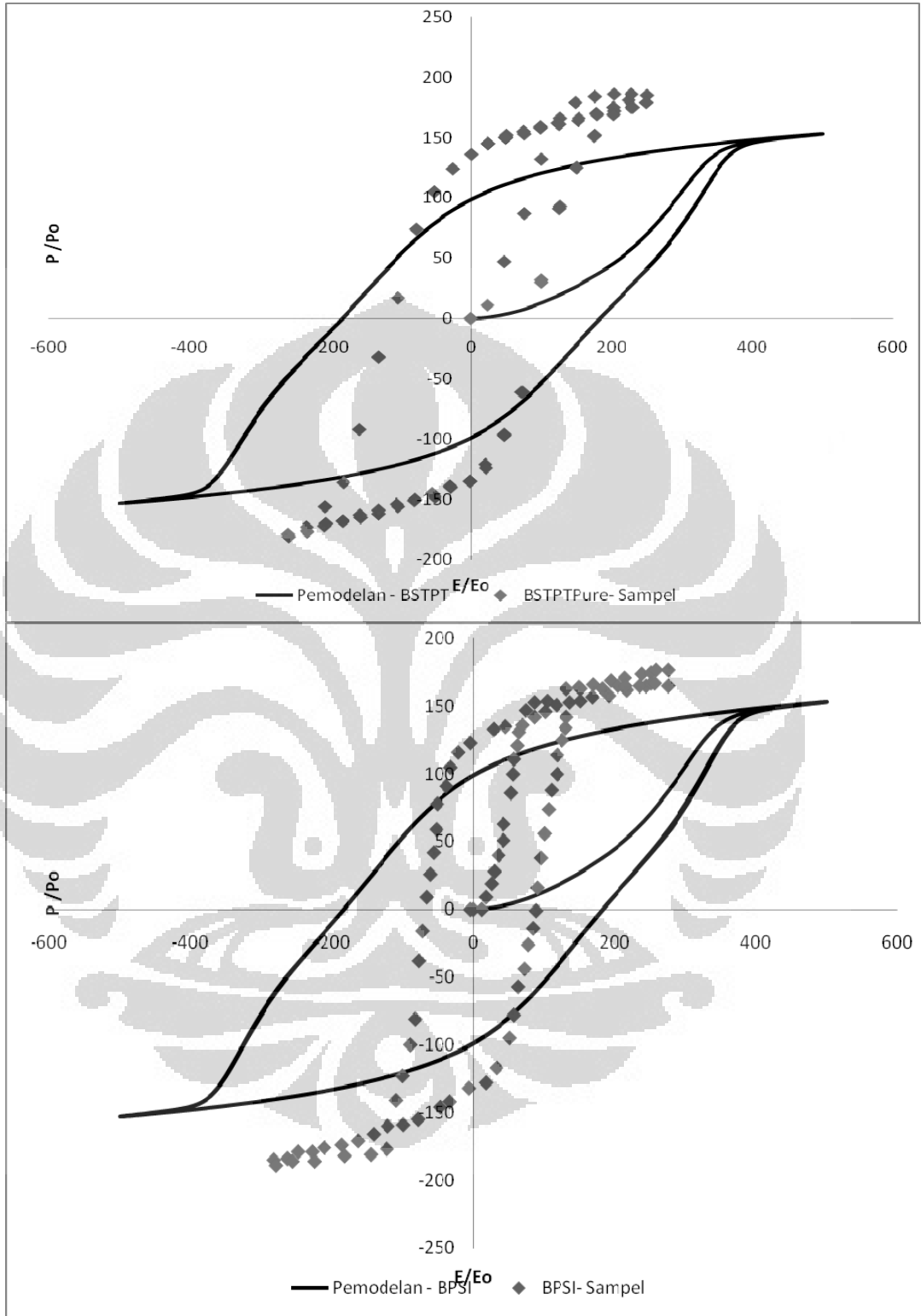


Model Histerisis Loop Material Film Tipis BST



Lampiran 2. Perbandingan Hasil Pengukuran dengan Pemodelan





Lampiran 3. – Metode Range Kutta & Pemograman

Penyelesaian persamaan akan digunakan metode range kutta, algoritma penyelesaian persamaan differential orde 1 :

$$\int_0^{\tau_i} \psi(t) dt \cong \sum_{j=1}^q a_{i,j} \psi(\tau_j), \quad i = 1, 2, \dots, q$$

$$\int_0^1 \psi(t) dt \cong \sum_{j=1}^q b_j \psi(\tau_j),$$

dengan menggunakan $t_{n,1} = t_n + \tau_i \Delta t$, model umum dari penyelesaian range –kutta pada dengan q langkah adalah

$$y_{n,i} = y_n + \Delta t \sum_{j=1}^q a_{i,j} f(t_{n,j}, y_{n,j}), \quad i = 1, 2, \dots, q$$

$$y_{n+1} = y_n + \Delta t \sum_{j=1}^q b_j f(t_{n,j}, y_{n,j}),$$

$$y_{n+1} = y_n + \Delta \Phi(t_n, y_n, \Delta t)$$

Program menggunakan fungsi ODE45 dalam Matlab :

```
function varargout = ode45(ode,tspan,y0,options,varargin)
%ODE45 Solve non-stiff differential equations, medium order
method.
% [T,Y] = ODE45(ODEFUN,TSPAN,Y0) with TSPAN = [T0 TFINAL]
integrates the
% system of differential equations y' = f(t,y) from time T0 to
TFINAL with
% initial conditions Y0. Function ODEFUN(T,Y) must return a
column vector
% corresponding to f(t,y). Each row in the solution array Y
corresponds to
% a time returned in the column vector T. To obtain solutions at
specific
% times T0,T1,...,TFINAL (all increasing or all decreasing), use
% TSPAN = [T0 T1 ... TFINAL].
%
% [T,Y] = ODE45(ODEFUN,TSPAN,Y0,OPTIONS) solves as above with
default
% integration properties replaced by values in OPTIONS, an
argument created
% with the ODESET function. See ODESET for details. Commonly
used options
% are scalar relative error tolerance 'RelTol' (1e-3 by default)
and vector
% of absolute error tolerances 'AbsTol' (all components 1e-6 by
default).
%
% [T,Y] = ODE45(ODEFUN,TSPAN,Y0,OPTIONS,P1,P2...) passes the
additional
```



```

% parameters P1,P2,... to the ODE function as
ODEFUN(T,Y,P1,P2...), and to
% all functions specified in OPTIONS. Use OPTIONS = [] as a
place holder if
% no options are set.
%
% ODE45 can solve problems  $M(t,y)*y' = f(t,y)$  with mass matrix M
that is
% nonsingular. Use ODESET to set the 'Mass' property to a
function MASS if
% MASS(T,Y) returns the value of the mass matrix. If the mass
matrix is
% constant, the matrix can be used as the value of the 'Mass'
option. If
% the mass matrix does not depend on the state variable Y and
the function
% MASS is to be called with one input argument T, set
'MStateDependence' to
% 'none'. ODE15S and ODE23T can solve problems with singular
mass matrices.
%
% [T,Y,TE,YE,IE] = ODE45(ODEFUN,TSPAN,Y0,OPTIONS...) with the
'Events'
% property in OPTIONS set to a function EVENTS, solves as above
while also
% finding where functions of (T,Y), called event functions, are
zero. For
% each function you specify whether the integration is to
terminate at a
% zero and whether the direction of the zero crossing matters.
These are
% the three vectors returned by EVENTS:
[VALUE,ISTERMINAL,DIRECTION] =
% EVENTS(T,Y). For the I-th event function: VALUE(I) is the
value of the
% function, ISTERMINAL(I)=1 if the integration is to terminate
at a zero of
% this event function and 0 otherwise. DIRECTION(I)=0 if all
zeros are to
% be computed (the default), +1 if only zeros where the event
function is
% increasing, and -1 if only zeros where the event function is
decreasing. Output TE is a column vector of times at which
events
% occur. Rows of YE are the corresponding solutions, and indices
in vector
% IE specify which event occurred.
%
% SOL = ODE45(ODEFUN,[T0 TFINAL],Y0...) returns a structure that
can be
% used with DEVAL to evaluate the solution or its first
derivative at
% any point between T0 and TFINAL. The steps chosen by ODE45 are
returned
% in a row vector SOL.x. For each I, the column SOL.y(:,I)
contains
% the solution at SOL.x(I). If events were detected, SOL.xe is a
row vector

```

```

% of points at which events occurred. Columns of SOL.ye are the
corresponding
% solutions, and indices in vector SOL.ie specify which event
occurred.
%
% Example
%     [t,y]=ode45(@vdp1,[0 20],[2 0]);
%     plot(t,y(:,1));
%     solves the system y' = vdp1(t,y), using the default relative
error
%     tolerance 1e-3 and the default absolute tolerance of 1e-6
for each
%     component, and plots the first component of the solution.
%
% Class support for inputs TSPAN, Y0, and the result of
ODEFUN(T,Y):
%     float: double, single
%
% See also
%     other ODE solvers:      ODE23, ODE113, ODE15S, ODE23S,
ODE23T, ODE23TB
%     options handling:      ODESET, ODEGET
%     output functions:      ODEPLOT, ODEPHAS2, ODEPHAS3,
ODEPRINT
%     evaluating solution:    DEVAL
%     ODE examples:          RIGIDODE, BALLODE, ORBITODE
%
% NOTE:
%     The interpretation of the first input argument of the ODE
solvers and
%     some properties available through ODESET have changed in
this version
%     of MATLAB. Although we still support the v5 syntax, any new
functionality is available only with the new syntax. To see
the v5
%     help, type in the command line
%     more on, type ode45, more off
%
% NOTE:
%     This portion describes the v5 syntax of ODE45.
%
%     [T,Y] = ODE45('F',TSPAN,Y0) with TSPAN = [T0 TFINAL]
integrates the
%     system of differential equations y' = F(t,y) from time T0 to
TFINAL with
%     initial conditions Y0. 'F' is a string containing the name of
an ODE
%     file. Function F(T,Y) must return a column vector. Each row
in
%     solution array Y corresponds to a time returned in column
vector T. To
%     obtain solutions at specific times T0, T1, ..., TFINAL (all
increasing
%     or all decreasing), use TSPAN = [T0 T1 ... TFINAL].
%
%     [T,Y] = ODE45('F',TSPAN,Y0,OPTIONS) solves as above with
default
%     integration parameters replaced by values in OPTIONS, an
argument

```

```

% created with the ODESET function. See ODESET for details.
Commonly
% used options are scalar relative error tolerance 'RelTol' (1e-
3 by
% default) and vector of absolute error tolerances 'AbsTol' (all
% components 1e-6 by default).
%
% [T,Y] = ODE45('F',TSPAN,Y0,OPTIONS,P1,P2,...) passes the
additional
% parameters P1,P2,... to the ODE file as F(T,Y,FLAG,P1,P2,...)
(see
% ODEFILE). Use OPTIONS = [] as a place holder if no options
are set.
%
% It is possible to specify TSPAN, Y0 and OPTIONS in the ODE
file (see
% ODEFILE). If TSPAN or Y0 is empty, then ODE45 calls the ODE
file
% [TSPAN,Y0,OPTIONS] = F([],[],'init') to obtain any values not
supplied
% in the ODE45 argument list. Empty arguments at the end of the
call list
% may be omitted, e.g. ODE45('F').
%
% ODE45 can solve problems  $M(t,y)*y' = F(t,y)$  with a mass matrix
M that is
% nonsingular. Use ODESET to set Mass to 'M', 'M(t)', or
'M(t,y)' if the
% ODE file is coded so that F(T,Y,'mass') returns a constant,
% time-dependent, or time- and state-dependent mass matrix,
respectively.
% The default value of Mass is 'none'. ODE15S and ODE23T can
solve problems
% with singular mass matrices.
%
% [T,Y,TE,YE,IE] = ODE45('F',TSPAN,Y0,OPTIONS) with the Events
property in
% OPTIONS set to 'on', solves as above while also locating zero
crossings
% of an event function defined in the ODE file. The ODE file
must be
% coded so that F(T,Y,'events') returns appropriate information.
See
% ODEFILE for details. Output TE is a column vector of times at
which
% events occur, rows of YE are the corresponding solutions, and
indices in
% vector IE specify which event occurred.
%
% See also ODEFILE

% ODE45 is an implementation of the explicit Runge-Kutta (4,5)
pair of
% Dormand and Prince called variously RK5(4)7FM, DOPRI5, DP(4,5)
and DP54.
% It uses a "free" interpolant of order 4 communicated privately
by
% Dormand and Prince. Local extrapolation is done.

```

```

% Details are to be found in The MATLAB ODE Suite, L. F.
Shampine and
% M. W. Reichelt, SIAM Journal on Scientific Computing, 18-1,
1997.

% Mark W. Reichelt and Lawrence F. Shampine, 6-14-94
% Copyright 1984-2004 The MathWorks, Inc.
% $Revision: 5.74.4.4 $ $Date: 2004/04/16 22:05:30 $

solver_name = 'ode45';

% Check inputs
if nargin < 4
    options = [];
    if nargin < 3
        y0 = [];
        if nargin < 2
            tspan = [];
            if nargin < 1
                error('MATLAB:ode45:NotEnoughInputs',...
                    'Not enough input arguments. See ODE45.');
            end
        end
    end
end

% Stats
nsteps = 0;
nfailed = 0;
nfevals = 0;

% Output
FcnHandlesUsed = isa(ode, 'function_handle');
output_sol = (FcnHandlesUsed && (nargout==1)); % sol =
odeXX(...)
output_ty = (~output_sol && (nargout > 0)); % [t,y,...] =
odeXX(...)
% There might be no output requested...

sol = []; f3d = [];
if output_sol
    sol.solver = solver_name;
    sol.extdata.odefun = ode;
    sol.extdata.options = options;
    sol.extdata.varargin = varargin;
end
odeFcn = ode;

% Set solver arguments
[neq, tspan, ntspan, next, t0, tfinal, tdir, y0, f0, odeArgs, ...
options, threshold, rtol, normcontrol, normy, hmax, htry, htspan,
...
dataType] = ...
    odearguments(FcnHandlesUsed, solver_name, odeFcn, tspan, y0,
    ...
        options, varargin);

```

```

nfevals = nfevals + 1;

% Handle the output
if nargout > 0
    outputFcn = odeget(options, 'OutputFcn', [], 'fast');
else
    outputFcn = odeget(options, 'OutputFcn', @odeplot, 'fast');
end
outputArgs = {};
if isempty(outputFcn)
    haveOutputFcn = false;
else
    haveOutputFcn = true;
    outputs = odeget(options, 'OutputSel', 1:neq, 'fast');
    if isa(outputFcn, 'function_handle')
        % With MATLAB 6 syntax pass additional input arguments to
        outputFcn.
        outputArgs = varargin;
    end
end
refine = max(1, odeget(options, 'Refine', 4, 'fast'));
if ntspan > 2
    outputAt = 'RequestedPoints';           % output only at tspan
points
elseif refine <= 1
    outputAt = 'SolverSteps';               % computed points, no
refinement
else
    outputAt = 'RefinedSteps';             % computed points, with
refinement
    S = (1:refine-1) / refine;
end
printstats = strcmp(odeget(options, 'Stats', 'off', 'fast'), 'on');

% Handle the event function
[haveEventFcn, eventFcn, eventArgs, valt, teout, yeout, ieout] = ...
    odeevents(FcnHandlesUsed, odeFcn, t0, y0, options, varargin);

% Handle the mass matrix
[Mtype, Mfun, Margs, M] =
    odemass(FcnHandlesUsed, odeFcn, t0, y0, options, varargin);
if Mtype > 0 % non-trivial mass matrix
    Msingular = odeget(options, 'MassSingular', 'no', 'fast');
    if strcmp(Msingular, 'maybe')
        warning('MATLAB:ode45:MassSingularAssumedNo', ['ODE45 assumes '
...
        'MassSingular is 'no'. See ODE15S or ODE23T.']);
    elseif strcmp(Msingular, 'yes')
        error('MATLAB:ode45:MassSingularYes', ...
            ['MassSingular cannot be 'yes' for this solver. See
ODE15S '...
            ' or ODE23T.']);
    end
if Mtype == 1
    [L,U] = lu(M);
else
    L = [];
    U = [];
end

```

```

end

% Incorporate the mass matrix into odeFcn and odeArgs.
[odeFcn,odeArgs] =
odemassexplicit(FcnHandlesUsed,Mtype,odeFcn,odeArgs,Mfun,Margs,L,U
);
f0 = feval(odeFcn,t0,y0,odeArgs{:});
nfevals = nfevals + 1;
end

t = t0;
y = y0;

% Allocate memory if we're generating output.
nout = 0;
tout = []; yout = [];
if nargin > 0
    if output_sol
        chunk = min(max(100,50*refine), refine+floor((2^11)/neq));
        tout = zeros(1,chunk,dataType);
        yout = zeros(neq,chunk,dataType);
        f3d = zeros(neq,7,chunk,dataType);
    else
        if ntspan > 2 % output only at tspan
            points
                tout = zeros(1,ntspan,dataType);
                yout = zeros(neq,ntspan,dataType);
            else % alloc in chunks
                chunk = min(max(100,50*refine), refine+floor((2^13)/neq));
                tout = zeros(1,chunk,dataType);
                yout = zeros(neq,chunk,dataType);
            end
        end
        nout = 1;
        tout(nout) = t;
        yout(:,nout) = y;
    end

% Initialize method parameters.
pow = 1/5;
A = [1/5, 3/10, 4/5, 8/9, 1, 1];
B = [
    1/5      3/40      44/45      19372/6561      9017/3168
35/384
    0          9/40      -56/15      -25360/2187      -355/33      0
    0          0          32/9       64448/6561      46732/5247
500/1113
    0          0          0          -212/729      49/176
125/192
    0          0          0          0          -5103/18656      -
2187/6784
    0          0          0          0          0
11/84
    0          0          0          0          0          0
];
E = [71/57600; 0; -71/16695; 71/1920; -17253/339200; 22/525; -
1/40];
f = zeros(neq,7,dataType);

```

```

hmin = 16*eps(t);
if isempty(htry)
    % Compute an initial step size h using y'(t).
    absh = min(hmax, htspan);
    if normcontrol
        rh = (norm(f0) / max(normy,threshold)) / (0.8 * rtol^pow);
    else
        rh = norm(f0 ./ max(abs(y),threshold),inf) / (0.8 * rtol^pow);
    end
    if absh * rh > 1
        absh = 1 / rh;
    end
    absh = max(absh, hmin);
else
    absh = min(hmax, max(hmin, htry));
end
f(:,1) = f0;

% Initialize the output function.
if haveOutputFcn
    feval(outputFcn,[t tfinal],y(outputs),'init',outputArgs{:});
end

% THE MAIN LOOP
done = false;
while ~done

    % By default, hmin is a small number such that t+hmin is only
    slightly
    % different than t. It might be 0 if t is 0.
    hmin = 16*eps(t);
    absh = min(hmax, max(hmin, absh)); % couldn't limit absh
    until new hmin
    h = tdir * absh;

    % Stretch the step if within 10% of tfinal-t.
    if 1.1*absh >= abs(tfinal - t)
        h = tfinal - t;
        absh = abs(h);
        done = true;
    end

    % LOOP FOR ADVANCING ONE STEP.
    nofailed = true; % no failed attempts
    while true
        hA = h * A;
        hB = h * B;
        f(:,2) = feval(odeFcn,t+hA(1),y+f*hB(:,1),odeArgs{:});
        f(:,3) = feval(odeFcn,t+hA(2),y+f*hB(:,2),odeArgs{:});
        f(:,4) = feval(odeFcn,t+hA(3),y+f*hB(:,3),odeArgs{:});
        f(:,5) = feval(odeFcn,t+hA(4),y+f*hB(:,4),odeArgs{:});
        f(:,6) = feval(odeFcn,t+hA(5),y+f*hB(:,5),odeArgs{:});

        tnew = t + hA(6);
        if done
            tnew = tfinal; % Hit end point exactly.
        end
    end
end

```

```

end
h = tnew - t;      % Purify h.

ynew = y + f*hB(:,6);
f(:,7) = feval(odeFcn,tnew,ynew,odeArgs{:});
nfevals = nfevals + 6;

% Estimate the error.
if normcontrol
    normynew = norm(ynew);
    err = absh * (norm(f * E) /
max(max(normy,normynew),threshold));
else
    err = absh * norm((f * E) ./
max(max(abs(y),abs(ynew)),threshold),inf);
end

% Accept the solution only if the weighted error is no more
than the
% tolerance rtol. Estimate an h that will yield an error of
rtol on
% the next step or the next try at taking this step, as the
case may be,
% and use 0.8 of this value to avoid failures.
if err > rtol % Failed step
    nfailed = nfailed + 1;
    if absh <= hmin
        warning('MATLAB:ode45:IntegrationTolNotMet',['Failure at
t=%e. ' ...
'Unable to meet integration tolerances without
reducing ' ...
'the step size below the smallest value allowed
(%e) ' ...
'at time t.'],t,hmin);

    solver_output = odefinalize(solver_name, sol,...
outputFcn, outputArgs,...
printstats, [nsteps, nfailed,
nfevals],...
nout, tout, yout,...
haveEventFcn, teout, yeout,
ieout,...
f3d);

    if nargout > 0
        varargout = solver_output;
    end
    return;
end

if nfailed
    nfailed = false;
    absh = max(hmin, absh * max(0.1, 0.8*(rtol/err)^pow));
else
    absh = max(hmin, 0.5 * absh);
end
h = tdir * absh;
done = false;

```



```

else                                     % Successful step
    break;

end
end
nsteps = nsteps + 1;

if haveEventFcn
    [te,ye,ie,valt,stop] = ...

odezero(@ntrp45,eventFcn,eventArgs,valt,t,y,tnew,ynew,t0,h,f);
if ~isempty(te)
    if output_sol || (nargout > 2)
        teout = [teout, te];
        yeout = [yeout, ye];
        ieout = [ieout, ie];
    end
    if stop                                     % Stop on a terminal event.
        % Adjust the interpolation data to [t te(end)].

        % Update the derivatives using the interpolating
        polynomial.
        taux = t + (te(end) - t)*A;
        [ignore,f(:,2:7)] = ntrp45(taux,t,y,[],[],h,f);

        tnew = te(end);
        ynew = ye(:,end);
        h = tnew - t;
        done = true;
    end
end
end

if output_sol
    nout = nout + 1;
    if nout > length(tout)
        tout = [tout, zeros(1,chunk,dataType)]; % requires chunk >=
refine
        yout = [yout, zeros(neq,chunk,dataType)];
        f3d = cat(3,f3d,zeros(neq,7,chunk,dataType));
    end
    tout(nout) = tnew;
    yout(:,nout) = ynew;
    f3d(:, :, nout) = f;
end

if output_ty || haveOutputFcn
switch outputAt
case 'SolverSteps'           % computed points, no refinement
    nout_new = 1;
    tout_new = tnew;
    yout_new = ynew;
case 'RefinedSteps'         % computed points, with refinement
    tref = t + (tnew-t)*S;
    nout_new = refine;
    tout_new = [tref, tnew];
    yout_new = [ntrp45(tref,t,y,[],[],h,f), ynew];
case 'RequestedPoints'     % output only at tspan points

```

```

nout_new = 0;
tout_new = [];
yout_new = [];
while next <= ntspan
    if tdir * (tnew - tspan(next)) < 0
        if haveEventFcn && stop % output tstop,ystop
            nout_new = nout_new + 1;
            tout_new = [tout_new, tnew];
            yout_new = [yout_new, ynew];
        end
        break;
    end
    nout_new = nout_new + 1;
    tout_new = [tout_new, tspan(next)];
    if tspan(next) == tnew
        yout_new = [yout_new, ynew];
    else
        yout_new = [yout_new,
ntrp45(tspan(next),t,y,[],[],h,f)];
    end
    next = next + 1;
end
end

if nout_new > 0
    if output_ty
        oldnout = nout;
        nout = nout + nout_new;
        if nout > length(tout)
            tout = [tout, zeros(1,chunk,dataType)]; % requires
chunk >= refine
            yout = [yout, zeros(neq,chunk,dataType)];
        end
        idx = oldnout+1:nout;
        tout(idx) = tout_new;
        yout(:,idx) = yout_new;
    end
    if haveOutputFcn
        stop =
feval(outputFcn,tout_new,yout_new(outputs,:),'',outputArgs{:});
        if stop
            done = true;
        end
    end
end
end

if done
    break
end

% If there were no failures compute a new h.
if nofailed
    % Note that absh may shrink by 0.8, and that err may be 0.
    temp = 1.25*(err/rtol)^pow;
    if temp > 0.2
        absh = absh / temp;
    else

```

```

        absh = 5.0*absh;
    end
end

% Advance the integration one step.
t = tnew;
y = ynew;
if normcontrol
    normy = normynew;
end
f(:,1) = f(:,7); % Already evaluated
feval(odeFcn,tnew,ynew,odeArgs)

end

solver_output = odefinalize(solver_name, sol,...
    outputFcn, outputArgs,...
    printstats, [nsteps, nfailed,
nfevals],...
    nout, tout, yout,...
    haveEventFcn, teout, yeout, ieout,...
    f3d);
if nargout > 0
    varargout = solver_output;
end

```

Model Statis :

```

% Function modelstatis
% menggunakan persamaan energi bebas  $g=0.5tp^2-1/2p^4+1/6p^6-ep$ 
% menggunakan persamaan  $e=tp-2p^3+p^5$ 
% Diperoleh nilai solusi untuk persamaan  $p$  max
% pada saat  $de/dp = t -6p^2 + 5p^4 = 0$ 
%  $Pmax = \sqrt{3/5*(1 +/- \sqrt{1 - 5t/9})}$ 
t1=1.773827943; %-->BSTSI
t2=1.771068044; %-->BSTPT
t3=1.792073742;%-->BCSI
t4=1.776656964;%-->BCPT
t5=1.772484949;%-->BMSI
t6=1.770346249;%-->BMPT
t7=1.772284382;%-->BPSI
t8=1.772861505;%-->BPPT
e01 = 0;
e02 = 0.5;
e03 =1;
e04 =1.5;
p=-2:0.1:2;
    e1=t1*p-2*p.^3+p.^5;
    e2=t2*p-2*p.^3+p.^5;
    e3=t3*p-2*p.^3+p.^5;
    e4=t4*p-2*p.^3+p.^5;
    e5=t5*p-2*p.^3+p.^5;
    e6=t6*p-2*p.^3+p.^5;
    e7=t7*p-2*p.^3+p.^5;
    e8=t8*p-2*p.^3+p.^5;
plot(e2,p, 'k-');
hold on
plot(e8,p, 'ko');

```

```

hold on
Title('Model Histerisis Ekstrim pada material film tipis BST');
xlabel('E/Eo');
ylabel('P/Po');
legend('BSTPT','BPPT');
hold off
figure ,
subplot (1,2,1)
    g1=0.5*t2*p.^2-0.5*p.^4+(1/6)*p.^6-e01*p;
    g2=0.5*t2*p.^2-0.5*p.^4+(1/6)*p.^6-e02*p;
    g3=0.5*t2*p.^2-0.5*p.^4+(1/6)*p.^6-e03*p;
    g4=0.5*t2*p.^2-0.5*p.^4+(1/6)*p.^6-e04*p;
plot(p,g1,'ko');
hold on
plot(p,g2,'k--');
hold on
plot(p,g3,'kd');
hold on
plot(p,g4,'k*');
Title('
Model energi bebas material film tipis BSTPT & BPPT');
xlabel('P/Po');
ylabel('G/Glo');
legend('e = 0','e = 0.5','e = 1','e = 1.5');
hold off
Subplot (1,2,2)
g1=0.5*t8*p.^2-0.5*p.^4+(1/6)*p.^6-e01*p;
g2=0.5*t8*p.^2-0.5*p.^4+(1/6)*p.^6-e02*p;
g3=0.5*t8*p.^2-0.5*p.^4+(1/6)*p.^6-e03*p;
g4=0.5*t8*p.^2-0.5*p.^4+(1/6)*p.^6-e04*p;
plot(p,g1,'ko');
hold on
plot(p,g2,'k--');
hold on
plot(p,g3,'kd');
hold on
plot(p,g4,'k*');
xlabel('P/Po');
ylabel('G/Glo');
legend('e = 0','e = 0.5','e = 1','e = 1.5');
hold off

```

Model Dinamis :

```

function switching5
[t,y]=ode45('LK7',[0 100],0.001);
e0=5;
e=e0*sin(0.5*t);
plot(e,y,'k-')
xlabel('E/E0')
ylabel('P/Po')
Title('Model Histerisis Loop Material Film Tipis BST')
hold on
    [t,y]=ode45('LK6',[0 100],0.001);
    e0=5;
    e=e0*sin(0.5*t);
    plot(e,y,'k.')

```

```
legend('BSTPT', 'BPPT');  
hold off
```

dimana :

```
function LK = LK7(t,y)  
a1=1.773827943; %-->BSTSI  
a2=1.771068044; %-->BSTPT  
a3=1.792073742; %-->BCSI  
a4=1.776656964; %-->BCPT  
a5=1.772484949; %-->BMSI  
a6=1.770346249; %-->BMPT  
a7=1.772284382; %-->BPSI  
a8=1.772861505; %-->BPPT
```

```
e0=4;  
LK=-a2*y+2*y.^3-y.^5+e0*sin(0.5*t);
```

