



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI SIFAT MAGNETIK BAHAN MAGNET PERMANEN
BERBASIS MODEL JILES-ATHERTON**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
magister dalam bidang ilmu material

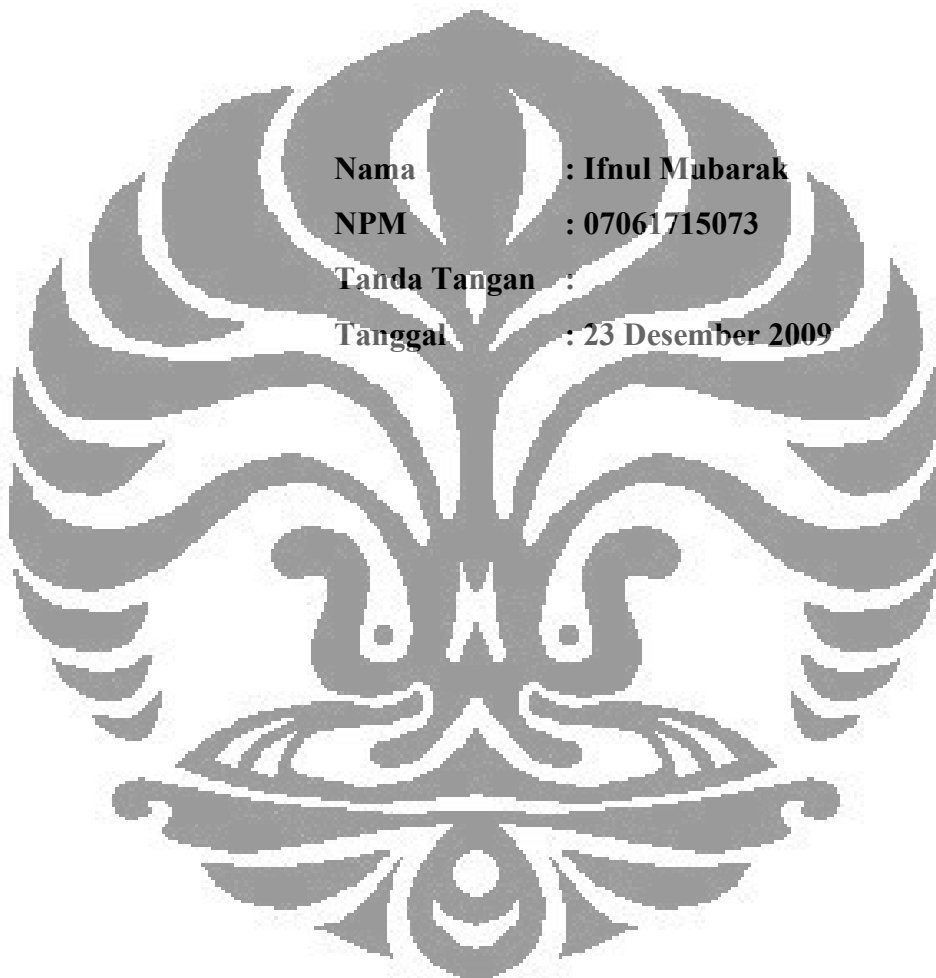
IFNUL MUBARAK

0706171573

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

DESEMBER 2009
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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



Nama : Ifnul Mubarak
NPM : 07061715073
Tanda Tangan :
Tanggal : 23 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
 Nama : Ifnul Mubarak
 NPM : 07061715073
 Program Studi : Ilmu Material
 Judul Tesis : Studi Sifat Magnetik Bahan Magnet Permanen
 Berbasis Model Jiles-Atherton

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Djoko Triyono (.....)
 Penguji : Dr. Azwar Manaf (.....)
 Penguji : Dr. Muhammad Aziz Majidi (.....)
 Penguji : Dr. Muhammad Hikam (.....)

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 23 Desember 2009

ABSTRACT

Name : Ifnul Mubarak
Study Program : Materials Science
Title : Magnetic Properties Study of Hard Magnetic Material Based on Jiles-Atherton Model

This research focused on a magnetic properties study of permanent magnet materials through simulation and parameters optimization of Jiles-Atherton (JA) model and modified-JA model that are gaussian JA model and extended JA model. Simulation and parameters model optimization conducted to $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ and $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ materials using their magnetic hysteresis data that measured by using permagraph. Genetic algorithm is utilized to optimize the parameters for each model and euler method is used to simulate the models and both of them are implemented by using MATLAB program.

The results of parameters optimization and model simulations show that the modification made by Gaussian JA model and extended JA-model produce a better match than the JA model in modeling of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ hysteresis curve. However, these modified JA-model are not better than JA model in modeling of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ hysteresis curve. This is due to the anisotropic properties that is shown by $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ which can not defined in the modified-JA model.

Keywords:

Magnetic hysteresis, Jiles-Atheron model, Gaussian JA model, extended JA model, *pinning site*, *domain wall*, genetic algorithm.

ABSTRAK

Nama : Ifnul Mubarak
Program Studi : Ilmu Material
Judul : Studi Sifat Magnetik Bahan Magnet Permanen Berbasis Model Jiles- Atheron

Pada penelitian ini dilakukan studi sifat magnetik bahan magnet permanen melalui simulasi dan optimasi parameter model Jiles-Atherton (JA) dan model JA-modifikasi, yaitu model JA-gaussian dan model JA-extended. Simulasi dan optimasi parameter model dilakukan terhadap dua buah data histeresis magnet bahan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang diukur menggunakan permagraph. Algoritma genetika digunakan untuk optimasi parameter setiap model dan metode euler digunakan untuk mensimulasikan setiap model, yang keduanya diimplementasikan menggunakan program MATLAB.

Hasil dari optimasi parameter dan simulasi model menunjukkan bahwa modifikasi yang dilakukan pada model JA-gaussian dan model JA-extended menghasilkan kecocokan yang lebih baik dari model JA dalam memodelkan kurva histeresis bahan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Akan tetapi kedua model modifikasi ini tidak lebih baik dari model JA dalam memodelkan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. Hal tersebut disebabkan oleh sifat keanisotropian bahan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang tidak didefinisikan dalam model JA-modifikasi.

Kata Kunci :

Histeresis magnet, model Jiles-Atheron, model JA-gaussian, model JA-extended, *pinning site*, *domain wall*, algoritma genetika.

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillahirabb 'alamin, segala puji dan syukur Penulis panjatkan kehadiran Allah SWT. Shalawat serta salam semoga tetap tercurah kepada junjungan kita Rasullullah SAW, beserta keluarga, sahabat, dan para pengikutnya. Atas rahmat dan karunia-Nya Penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Studi Sifat Magnetik Bahan Magnet Permanen dari Model Jiles-Atherton dan Model Jiles-Atherton Modifikasi”. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ketua Jurusan Ilmu Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Bapak Dr. Bambang Soegiyono.
2. Bapak Dr. Djoko Triyono, selaku pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahannya. Terima kasih banyak.
3. Seluruh panitia penguji tesis ini, yang telah memberikan arahan dan saran untuk kesempurnaan tesis ini.
4. Seluruh staf pengajar, sekretariat dan perpustakaan Program Pascasarjana Studi Ilmu Material.
5. Kedua orang tua, kakak dan adik tercinta yang selalu memberi semangat dan dukungan serta doanya.
6. Leny Felicia, yang tidak bosan-bosannya mendukung dalam penyelesaian tesis ini.

Sekali lagi Penulis mengucapkan terima kasih atas segala pertolongan yang telah diberikan, semoga seluruh amal dan kebaikan yang diberikan mendapatkan balasan yang lebih baik dari Allah SWT.

Jakarta, Desember 2009

Penulis

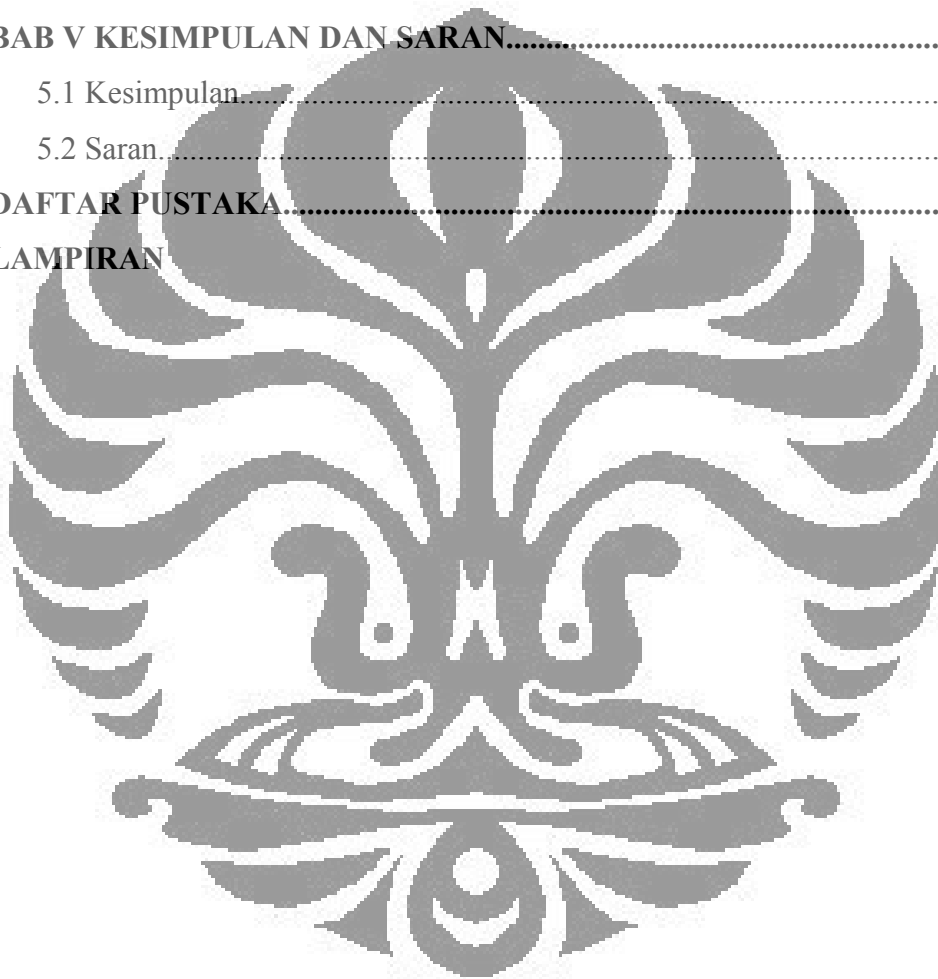
Universitas Indonesia

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ABSTRAK.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Penelitian.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Pembatasan Masalah.....	4
BAB II KAJIAN LITERATUR.....	5
2.1 Bahan Magnet.....	5
2.2 Temperature Curie.....	6
2.3 Domain Magnet.....	7
2.4 Histeresis Ferromagnetik.....	11
2.4.1 Magnetisasi Jenuh.....	12
2.4.2 Remanen.....	14
2.4.3 Koersifitas.....	14
2.4.4 Energi Produk Maksimum.....	15
2.5 Permagraph.....	16
2.6 Model Jiles-Atherton.....	17
2.6.1 Penurunan Model Jiles-Atherton.....	18
2.6.2 Modifikasi Model Jiles-Atherton.....	22
2.6.2.1 Model JA-Gaussian.....	23
2.6.2.2 Model JA-Extended.....	23
2.7 Metode Euler.....	24

2.8 Algoritma Genetika.....	25
2.8.1 Komponen Algoritma Genetika.....	25
2.8.1.1 Skema Pengkodean.....	26
2.8.1.2 Nilai <i>Fitness</i>	26
2.8.1.3 Seleksi Orangtua.....	27
2.8.1.4 Operator Genetika.....	27
2.8.1.5 Penggantian Populasi.....	28
2.8.2 Cara Kerja Algoritma.....	29
2.9 Sifat Magnetik Barium Hexaferrit dan Strontium Hexaferrit.....	30
2.9.1 Barium Hexaferrit.....	30
2.9.2 Strontium Hexaferrit.....	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	34
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	34
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian.....	34
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	35
3.3.1 Alat yang Digunakan.....	35
3.3.2 Bahan yang Digunakan.....	35
3.4 Tahapan-Tahapan Pelaksanaan Penelitian.....	35
3.4.1 Identifikasi Material dengan XRF dan XRD.....	35
3.4.2 Pengukuran Histeresis Magnet Sampel dengan Permagraph.....	35
3.4.3 Simulasi Model JA dan Model JA-Modifikasi.....	36
3.4.4 Pembuatan Program Optimasi Model JA dan Model JA-Modifikasi.....	38
3.4.5 Optimasi Parameter Model JA dan Model JA-Modifikasi dari Data Histeresis Sampel.....	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 Identifikasi Material dengan XRF dan XRD.....	41
4.2 Pengukuran Histeresis Magnet dengan Permagraph.....	42
4.3 Validasi Program Simulasi Model JA dan Model JA-Modifikasi.....	45
4.4 Validasi Program Optimasi Parameter Model JA dan Model JA-Modifikasi.....	47
4.4.1 Validasi Program Optimasi Parameter Model JA.....	49

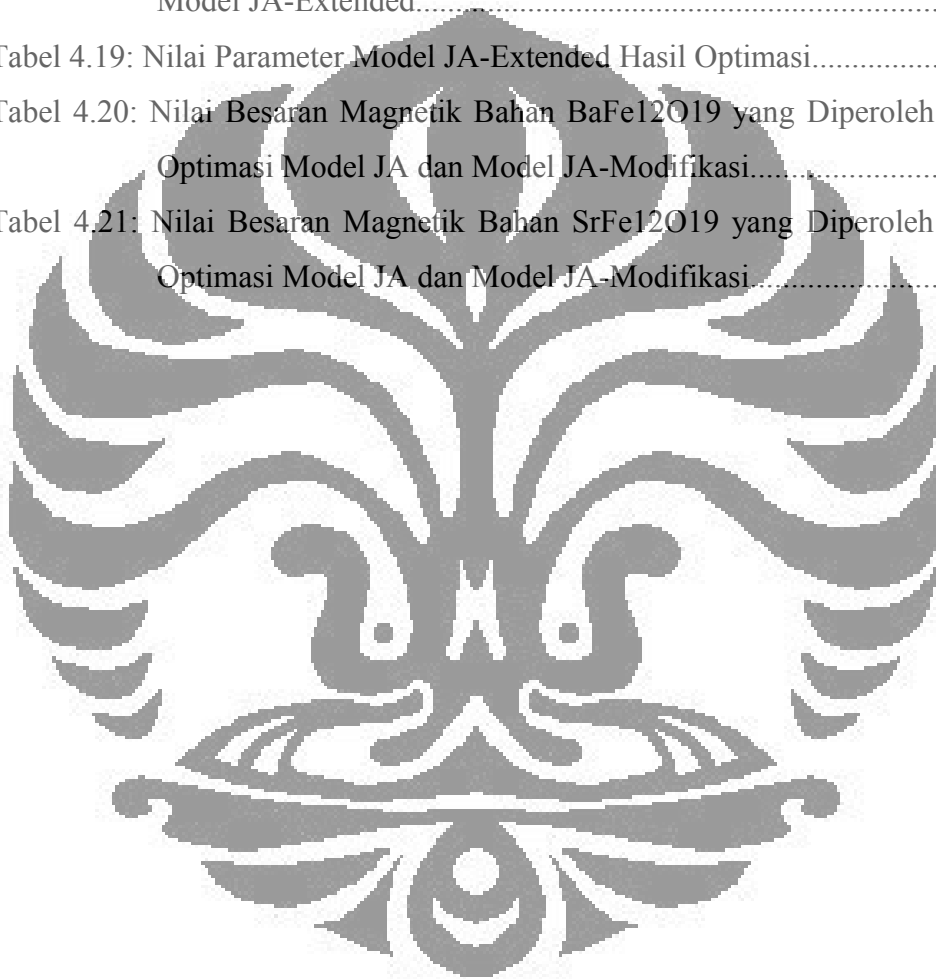
4.4.2 Validasi Program Optimasi Parameter Model JA-Gaussian.....	50
4.4.3 Validasi Program Optimasi Model JA-Extended.....	51
4.5 Optimasi Parameter Model JA dan Model JA-Modifikasi dari Data Histeresis BaFe ₁₂ O ₁₉	52
4.6 Optimasi Parameter Model JA dan Model JA-Modifikasi dari Data Histeresis SrFe ₁₂ O ₁₉	57
4.7 Analisa Sifat Magnetik Bahan BaFe ₁₂ O ₁₉ dan SrFe ₁₂ O ₁₉	62
.....	
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	65
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA.....	67
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 : Nilai Temperature Curie Beberapa Bahan Magnet.....	7
Tabel 2.2 : Nilai Magnetisasi Jenuh Beberapa Bahan Magnet.....	13
Tabel 2.3 : Spesifikasi Permagraph Electromagnet EP3.....	17
Tabel 3.1: Parameter Model JA, Model JA-Gaussian, dan Model JA-Extended	38
Tabel 3.2: Operator Algoritma Genetika yang Digunakan dalam Program Optimasi.....	39
Tabel 4.1 :Parameter Model JA, Model JA-Gaussian, dan Model JA-Extended	45
Tabel 4.2: Opsi Algoritma Genetika Model JA, Model JA-Gaussian, dan Model JA-Extended.....	48
Tabel 4.3 : Hasil Optimasi Parameter Model JA.....	49
Tabel 4.4 : Hasil Optimasi Parameter Model JA-Gaussian.....	50
Tabel 4.5 : Hasil Optimasi Parameter Model JA-Extended.....	51
Tabel 4.6:Fungsi Algoritma Genetika yang Digunakan dalam Optimasi Model JA dan Model JA-Modifikasi dari Data Histeresis BaFe ₁₂ O ₁₉	53
Tabel 4.7:Nilai Batas Populasi Awal Algoritma Genetika pada Optimasi Parameter Model JA.....	53
Tabel 4.8: Nilai Parameter Model JA Hasil Optimasi.....	53
Tabel 4.9: Nilai Batas Populasi Awal Algoritma Genetika pada Optimasi Model JA-Gaussian.....	54
Tabel 4.10: Nilai Parameter Model JA-Gaussian Hasil Optimasi.....	54
Tabel 4.11: Nilai Batas Populasi Awal Algoritma Genetika pada Optimasi Parameter Model JA-Extended.....	55
Tabel 4.12 : Nilai Parameter Model JA-Extended Hasil Optimasi.....	55
Tabel 4.13 : Opsi Algoritma Genetika yang Digunakan dalam Optimasi.....	57

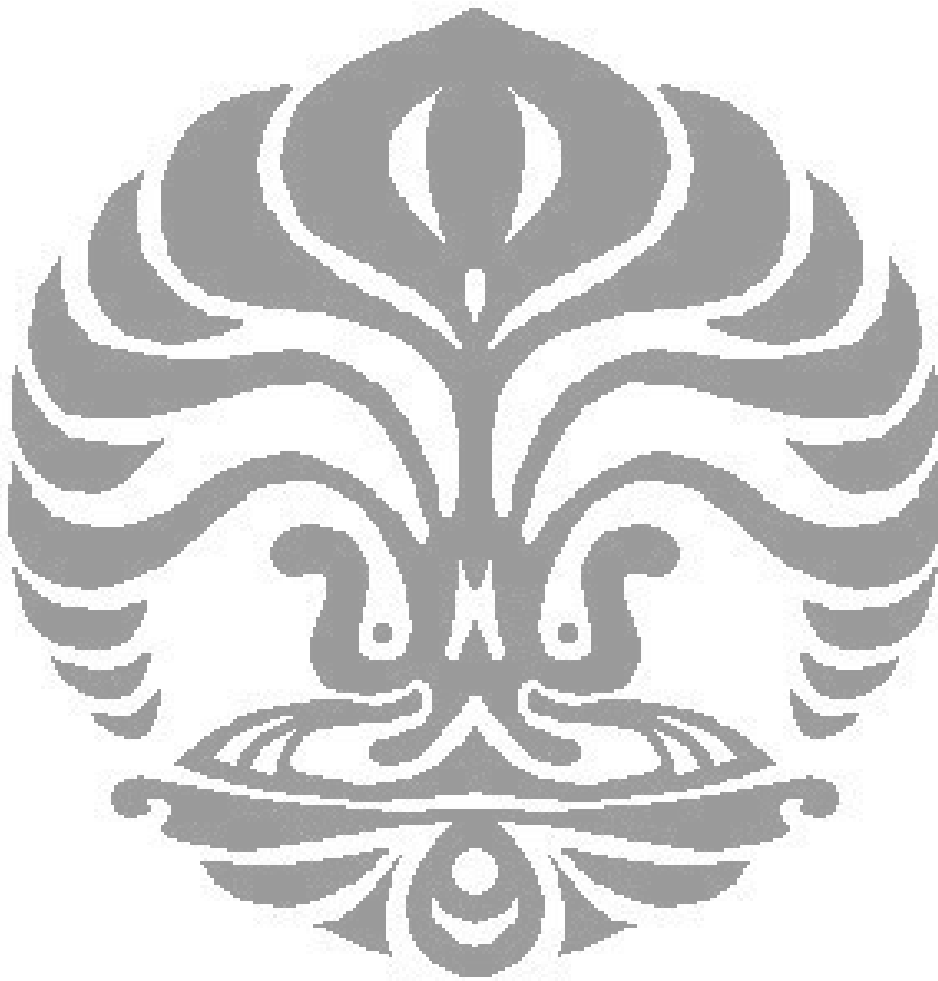
Tabel 4.14: Nilai Batas Populasi Awal Algoritma Genetika pada Optimasi Parameter Model JA.....	58
Tabel 4.15: Nilai Parameter Model JA Hasil Optimasi.....	58
Tabel 4.16: Nilai Batas Populasi Awal Algoritma Genetika pada Optimasi model JA-Gaussian.....	59
Tabel 4.17: Nilai Parameter Model JA-Gaussian Hasil Optimasi.....	59
Tabel 4.18: Nilai Batas Awal Algoritma Genetika pada Optimasi parameter Model JA-Extended.....	60
Tabel 4.19: Nilai Parameter Model JA-Extended Hasil Optimasi.....	60
Tabel 4.20: Nilai Besaran Magnetik Bahan BaFe ₁₂ O ₁₉ yang Diperoleh dari Optimasi Model JA dan Model JA-Modifikasi.....	62
Tabel 4.21: Nilai Besaran Magnetik Bahan SrFe ₁₂ O ₁₉ yang Diperoleh dari Optimasi Model JA dan Model JA-Modifikasi.....	63



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Struktur sifat-sifat magnet dari besi dan nikel.....	8
Gambar 2.2. Mekanisme perubahan magnetisasi.....	9
Gambar 2.3. Skema perubahan struktur domain dalam proses magnetisasi.....	10
Gambar 2.4. Pengaruh temperatur terhadap magnetisasi.....	11
Gambar 2.5. Loop histeresis bahan ferromagnetik.....	12
Gambar 2.6. Penyerahan momen magnet bahan ferromagnet.....	13
Gambar 2.7. Kurva anhisteresis.....	16
.....	
Gambar 2.8. Permagraph tipe Electromagnet EP3.....	16
Gambar 2.9. Bentuk kurva fungsi $k(M /M_s)$ dari parameter k_0 , k_1 dan k_2	24
.....	
Gambar 2.10. Diagram alir algoritma genetika.....	30
.....	
Gambar 2.11. Struktur kristal $BaFe_{12}O_{19}$	32
.....	
Gambar 2.12. Struktur kristal $SrFe_{12}O_{19}$	33
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.....	34
Gambar 3.2. Algoritma Program Simulasi Model JA dan Model JA-Modifikasi.....	37
Gambar 4.1. Grafik Intensitas vs 20 sampel 1.....	41
Gambar 4.2. Grafik Intensitas vs 20 sampel 2.....	42
Gambar 4.3. Kurva histeresis sampel $BaFe_{12}O_{19}$	43
Gambar 4.4. Kurva histeresis sampel $SrFe_{12}O_{19}$	43
Gambar 4.5. Perbandingan kurva histeresis model JA.....	46
Gambar 4.6. Perbandingan kurva histeresis model JA-Gaussian.....	46
Gambar 4.7. Perbandingan kurva histeresis model JA-Extended.....	47
Gambar 4.8. Kurva histeresis hasil optimasi parameter model JA.....	49
Gambar 4.9. Kurva histeresis hasil optimasi parameter model JA-Gaussian.....	50
Gambar 4.10. Kurva histeresis hasil optimasi parameter model JA-Extended.....	51
.....	
Gambar 4.11. Kurva histeresis hasil optimasi parameter model JA.....	54
Gambar 4.12. Kurva histeresis hasil optimasi parameter model JA-gaussian.....	55

Gambar 4.13. Kurva histeresis hasil optimasi parameter model JA-Extended	56
Gambar 4.14. Grafik error setiap model pada iterasi algoritma genetika.....	56
Gambar 4.15. Kuva histeresis hasil optimasi parameter model JA.....	58
Gambar 4.16. Kuva histeresis hasil optimasi parameter model JA-Gaussian.	59
Gambar 4.17. Kuva histeresis hasil optimasi parameter model JA-Extended.	60
Gambar 4.18. Grafik error setiap model pada iterasi algoritma genetika.....	61



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Sifat kemagnetan suatu bahan, yang biasanya dipetakan dalam kurva histeresis, akan dapat diketahui setelah diadakan berbagai eksperimen dan pengukuran besaran magnet. Kurva histeresis memberikan informasi mengenai magnetisasi remanen, koersifitas, serta besaran magnetis lainnya. Eksperimen tersebut memerlukan ketekunan dan proses yang berulang-ulang untuk mendapatkan data yang sesuai. Saat ini telah berkembang model histeresis magnet yang dapat menjelaskan sifat magnet yang lebih mendalam. Model ini tidak hanya memberikan gambaran kualitatif tetapi juga secara kuantitatif mengenai proses magnetisasi suatu bahan sehingga dapat dijadikan pelengkap dan memberikan pemahaman baru mengenai sifat magnetis suatu bahan.

Salah satu model histeresis magnet yang banyak digunakan saat ini adalah model histeresis magnet Jiles-Atherton (JA). Model ini menggunakan analisis makromagnetik yang didasarkan pada prinsip-prinsip fisika dan mengikuti hubungan input-output nonlinear [1]. Model ini mulai dikenal ketika D.C. Jiles dan D.L. Atherton (1984) mempublikasikan jurnal mereka dengan judul "*Theory of ferromagnetic hysteresis*" pada *Journal on magnetism and magnetic materials*. Pada jurnal tersebut dijelaskan bahwa proses magnetisasi dibagi menjadi dua komponen yaitu magnetisasi *reversibel* akibat rotasi domain (satu domain terdiri dari kurang lebih $10^{12} - 10^{15}$ atom) dan magnetisasi *irreversibel* karena adanya pergerakan dinding domain [2]. Model JA dalam pemodelan histeresis magnet telah banyak diaplikasikan karena memiliki kelebihan : dinyatakan dengan persamaan diferensial, hanya menggunakan lima parameter model dan penentuan parameter dapat dilakukan dengan pengukuran histeresis magnet tunggal [3].

Saat ini telah banyak dilakukan perbaikan atau modifikasi model JA agar diperoleh hasil yang lebih mendekati hasil pengukuran. Modifikasi dilakukan dari berbagai aspek parameter model terutama dari parameter yang menjelaskan tentang *pinning site*, yaitu sejenis batas kristal dan cacat pada kristal yang

menginduksikan energi minimum lokal ketika dinding domain melaluinya [1]. Pada model JA, parameter ini dianggap konstan selama proses magnetisasi, sedangkan secara fisis teori tersebut kurang tepat. Nilai koefisien pinning ini seharusnya berubah sebagai fungsi magnetisasi atau medan magnet eksternal [2].

1.2 Perumusan Masalah

Peter R. Wilson, J. Neil Ross, dan Andrew D. Brown (2000) mengusulkan bahwa perubahan koefisien pinning dipengaruhi oleh besar medan magnet eksternal yang diberikan [4]. Model yang beliau kembangkan dinamakan model JA-gaussian, karena perubahan nilai koefisien pinning berubah terhadap nilai medan magnet eksternal yang membentuk fungsi gauss. Sedangkan Roman Szewczyk (2007) berpendapat bahwa perubahan koefisien pinning disebabkan oleh perubahan energi rata-rata yang dibutuhkan untuk melewati pinning site. Nilai koefisien ini bukanlah berubah dalam fungsi medan magnet eksternal melainkan harus dikaitkan dengan keadaan magnetik dari bahan yang dijelaskan dengan besaran magnetisasi [5,6]. Model yang ia kembangkan dinamai dengan model JA-extended. Model ini menjelaskan bahwa perubahan nilai koefisien pinning dapat berubah secara linear atau eksponensial terhadap nilai magnetisasi bahan.

Untuk mengetahui ketepatan dari kedua pernyataan tersebut perlu dilakukan studi sifat magnetik bahan yaitu melalui simulasi serta optimisasi parameter dari model JA, dan model JA-modifikasi yaitu model JA-gaussian dan model JA-extended. Hasil simulasi setiap model kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran histeresis.

Simulasi model JA dan model JA-modifikasi dapat dilakukan dengan metode numerik. Persamaan diferensial yang digunakan pada model JA dan model JA-modifikasi dapat diselesaikan dengan metode numerik Euler. Optimasi parameter untuk mendapatkan nilai parameter terbaik model JA dan model JA dari data pengukuran dapat dilakukan dengan beberapa cara. Algoritma genetika merupakan metode optimasi yang paling banyak digunakan. Metode ini dipopulerkan oleh Holland (1975) dan Goldberg (1986) dengan meniru prinsip biologi yaitu proses evolusi makhluk hidup secara alami. Algoritma genetika

menggunakan populasi sebagai calon solusi terhadap suatu masalah lalu dilakukan proses evolusi secara berulang-ulang pada setiap generasi dengan menghasilkan keturunan melalui proses pemilihan individu untuk menjadi orangtua berdasarkan tingkat kecocokannya, lalu orangtua yang terpilih itu menghasilkan keturunan dengan menggunakan operator-operator genetika seperti pindah silang, mutasi dan elitisme [7].

Pada penelitian ini dilakukan simulasi dan optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi dari data pengukuran sampel bahan magnet permanen untuk mempelajari sifat magnetik bahan dan mengetahui model mana yang terbaik. Sampel diidentifikasi menggunakan XRF dan XRD, kemudian pengukuran histeresis magnet dilakukan menggunakan permagraph. Dari kurva histeresis model JA dan model JA-modifikasi yang diperoleh kemudian dapat diperoleh besaran magnetik yaitu, magnetisasi jenuh, remanen, koersifitas, dan energi produk maksimum yang menunjukkan sifat magnetik bahan. Dalam simulasi model, metode Euler digunakan untuk mendapatkan solusi numerik persamaan diferensial model JA dan model JA-modifikasi. Untuk memperoleh parameter terbaik dari hasil optimasi digunakan algoritma genetika. Simulasi dan optimasi parameter dilakukan menggunakan program MATLAB yang merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi yang berbasis pada matriks dan sering digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah analisis numerik, pengembangan algoritma, pemodelan, analisa dan optimasi. Model terbaik merupakan model yang memiliki tingkat kecocokan tertinggi dengan hasil pengukuran histeresis magnet.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Melakukan simulasi model JA dan model JA-modifikasi, yaitu model JA-gaussian dan model JA-extended untuk bahan magnet permanen dengan menggunakan program MATLAB.
2. Melakukan optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi dari data pengukuran permagraph setiap sampel, kemudian membandingkan kurva histeresis dan nilai besaran magnetik yang diperoleh dari optimasi tersebut

dengan kurva histeresis dan besaran magnetik hasil pengukuran sehingga dari hasil tersebut dapat diketahui model mana yang lebih baik dalam menaksir kurva histeresis bahan magnet permanen.

3. Melakukan studi sifat magnetik bahan dari simulasi dan optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi, serta dari pengukuran histeresis sampel menggunakan permagraph.

1.4 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah dalam penelitian ini adalah simulasi dan optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi dari data sampel hasil pengukuran histeresis. Metode euler digunakan untuk memperoleh solusi numerik persamaan diferensial model JA dan model JA-modifikasi. Algoritma genetika digunakan untuk optimasi parameter model. Program yang digunakan dalam simulasi dan optimasi parameter model yaitu program MATLAB. Identifikasi sampel dilakukan menggunakan XRF dan XRD, sedangkan pengukuran histeresis menggunakan permagraph. Asumsi-asumsi yang digunakan dalam simulasi dan optimasi parameter adalah sifat keanisotropian bahan diabaikan dan distribusi pinning site pada bahan adalah homogen. Dengan melakukan simulasi dan optimasi parameter model dari data pengukuran diharapkan dapat diketahui sifat magnetik bahan dan model mana yang memiliki ketelitian terbaik.

BAB 2

KAJIAN LITERATUR

2.1 Bahan Magnet

Di dalam bahan magnet secara mikroskopis terdapat arus-arus kecil karena revolusi elektron terhadap inti atom serta rotasi elektron terhadap sumbunya (*spinning*), sedangkan secara makro bahan magnet ini memiliki sekumpulan dipol-magnet. Arah dari momen dipol magnet ini adalah acak sehingga dampaknya saling menghilangkan. Jika suatu bahan magnet ditempatkan pada daerah yang dipengaruhi medan magnet eksternal (H dinyatakan dalam A/m), bahan tersebut akan mengalami reaksi yang berbeda-beda, yang dinyatakan dengan magnetisasi bahan (M dinyatakan dalam A/m). Reaksi tersebut dapat berupa terbentuknya keteraturan momen dipol magnet. Magnetisasi didefinisikan sebagai kerapatan dipol magnet atau jumlah dipol magnet persatuan volume. Kombinasi dari medan magnet eksternal H , magnetisasi bahan M akan menghasilkan induksi magnet (B dinyatakan dalam Tesla atau wb/m^2), secara matematis dituliskan dengan

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.1)$$

Setiap bahan yang berbeda akan memiliki ciri khas yang berbeda pula yang dapat dijelaskan dengan sifat bahan yang berkaitan dengan medan magnet eksternal, yaitu permeabilitas dan suseptibilitas. Permeabilitas, μ didefinisikan sebagai perbandingan induksi magnetik dengan medan magnet eksternal,

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.2)$$

Dan suseptibilitas χ didefinisikan sebagai perbandingan magnetisasi bahan terhadap magnet eksternal,

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2.3)$$

Nilai B dan M dapat berupa fungsi linear atau nonlinear dari H , tergantung pada jenis material atau medium, sehingga perlu ditekankan disini bahwa μ dan χ mungkin bernilai tetap atau mungkin juga tidak tetap. Oleh karena itu digunakan diferensial permeabilitas dan suseptibilitas seperti berikut

$$\mu = \frac{dB}{dH} \quad (2.4)$$

$$\chi = \frac{dM}{dH} \quad (2.5)$$

Berdasarkan suseptibilitas *bulk*, berbagai jenis bahan magnet dapat dikelompokkan yaitu diamagnetik, paramagnetik, dan ferromagnetik. Bahan diamagnetik yaitu bahan dengan χ kecil dan bernilai negatif, $\chi = 10^{-5}$. Bahan ini memberikan respon magnetik yang berlawanan terhadap medan magnetik yang diberikan kepadanya. Contohnya adalah tembaga, emas, perak, bismuth, dan berilium.

Paramagnetik yaitu bahan dengan nilai χ kecil dan positif, besar χ antara $\chi \approx 10^{-3}$ sampai 10^{-5} . Magnetisasi bahan ini lemah tetapi spin magnetiknya searah dengan medan magnet eksternal. Contohnya adalah aluminium, platinum dan mangan.

Ferromagnetik yaitu bahan dengan nilai χ positif dan jauh lebih besar dari 1, biasanya mempunyai nilai $\chi \approx 50$ sampai 10.000. Contohnya adalah besi, nikel, cobalt, dan beberapa unsur tanah jarang serta *alloy*nya[8]. Pada bahan ferromagnetik χ dan μ tidak bernilai tetap, keduanya dipengaruhi oleh medan magnet eksternal H dan riwayat bahan tersebut.

2.2 Temperatur Curie

Dari penjelasan telah dipahami bahwa, hubungan antara momen magnetik M dan intensitas magnet H bersifat tidak linear, sehingga mempunyai nilai suseptibilitas yang berbeda-beda, tidak seperti bahan diamagnetik atau paramagnetik yang mempunyai suseptibilitas konstan. Tetapi apabila dipanaskan hingga mencapai temperatur tertentu hubungan antara momen magnetik M dan intensitas magnetik H akan menjadi linier. Bahkan apabila terus dipanaskan akan menyebabkan bahan ferromagnetik berubah menjadi bahan paramagnetik. Temperatur di mana bahan ferromagnetik tepat akan berubah menjadi bahan paramagnetik disebut temperatur Curie. Karena sifat kamagnetan semakin lemah. Jadi di atas temperatur Curie bahan ferromagnetik kehilangan kemagnetannya.

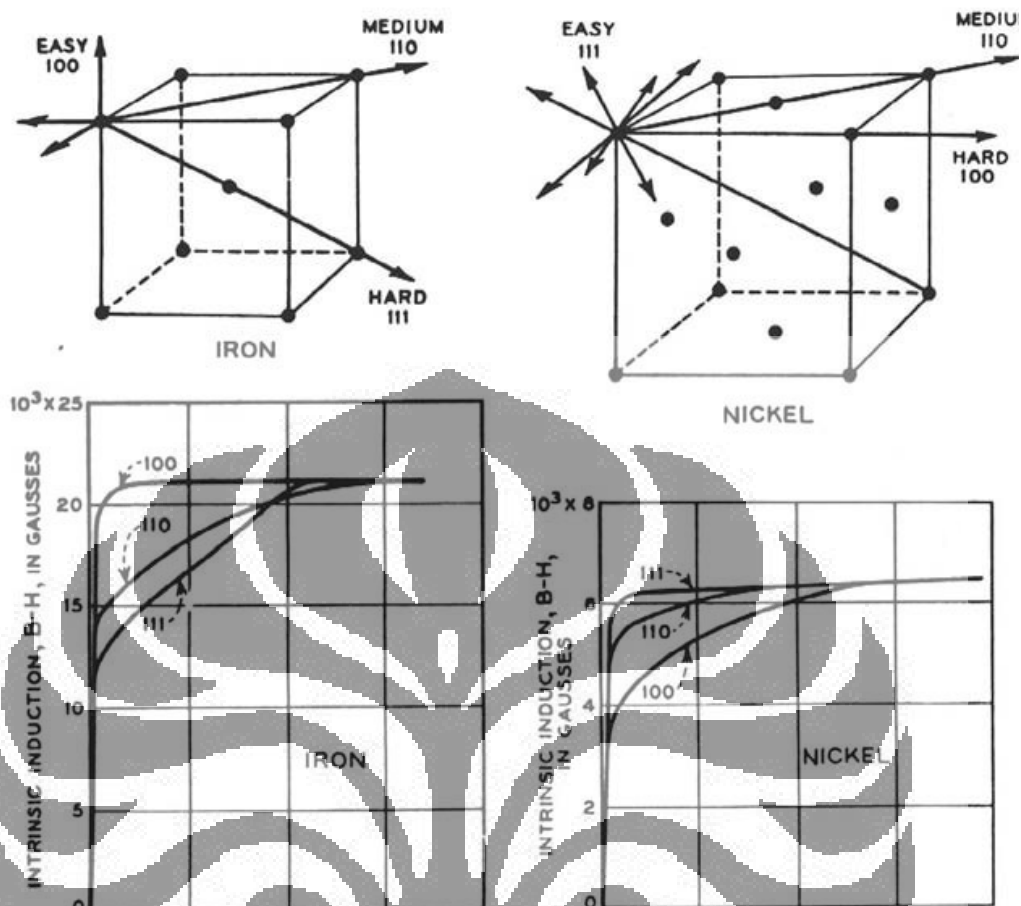
Tabel 2.1 Nilai temperatur Curie bebarapa bahan magnetik
(diambil dari [16])

No	Material	Temperatu Curie (°C)
1.	Iron	770
2.	Nickel	358
3.	Cobalt	130
4.	Godolinum	20
5.	Terfenol	380 – 430
6.	Nd ₂ Fe ₁₄ B	312
7.	Alnico	850
8.	SmCo ₅	720
9.	Hard ferrites	400 – 700
10.	Barium ferrite	450

Semua bahan ferromagnetik jika dipanaskan sampai temperatur tinggi akan menjadi ferromagnetik. Temperatur transisi antar ferromagnetik menjadi paramagnetik disebut temperatur Curie. Pada temperatur ini permeabilitas bahan berkurang secara tiba-tiba serta baik koersiftas maupun magnetisasi remanen menjadi nol.

2.3 Domain Magnet

Di dalam material ferromagnetik seperti besi dan nikel, momen dipol magnet berada dalam suatu bidang orientasi yang paralel satu sama lain dari beberapa atom dalam sistem kristal yang dinamakan domain magnet. Pada kristal besi terdapat enam arah domain magnet yaitu mengikuti sumbu koordinat X, -X, Y, -Y, Z, -Z dimana keadaan ini menyebabkan dipol-dipol magnetnya mudah dipengaruhi oleh medan magnet eksternal, atau mudah mengalami magnetisasi. Pada material non magnetik, dipol magnetnya berada pada bidang-bidang orientasi yang sukar untuk diarahkan.

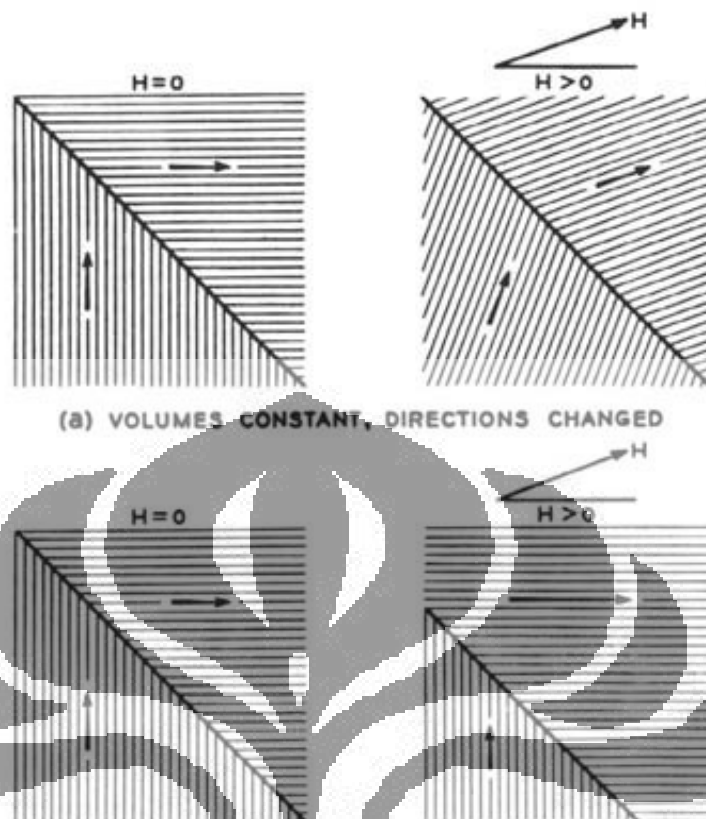


Gambar 2.1. Struktur sifat-sifat magnet dari besi dan nikel.

Intensitas magnet yang diperlukan agar domain-domain dapat termagnetisasi sama dengan intensitas saturasi, yang besarnya dipengaruhi oleh temperatur. Ada dua cara yang dapat menyebabkan perubahan domain akibat magnetisasi yaitu :

1. Terjadinya perubahan pada magnetisasi, akan menyebabkan terjadi perputaran domain.
2. Perubahan volume, akan menyebabkan terjadinya perpindahan batas-batas domain.

Kedua cara tersebut dapat digambarkan seperti gambar 2.2

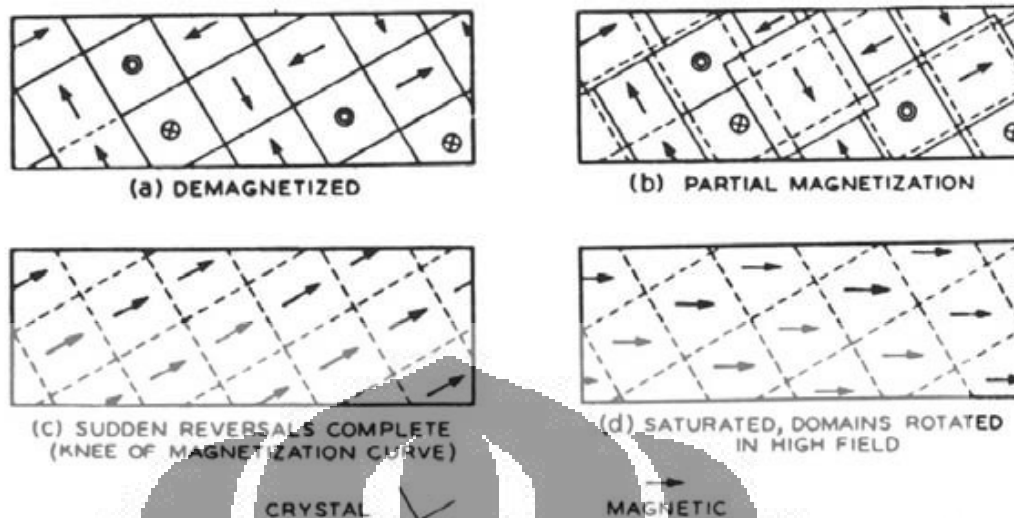


Gambar 2.2. Mekanisme perubahan magnetisasi, a. Rotasi domain
b. Perubahan volume domain (diambil dari [1])

Proses magnetisasi dapat dibagi menjadi tiga jenis yaitu :

1. Pergeseran batas butir yang reversibel, terjadi perubahan volume domain.
2. Pergeseran batas butir yang irreversibel.
3. Perputaran domain yang reversibel.

Perubahan struktur domain pada proses magnetisasi dapat digambarkan seperti gambar 2.3

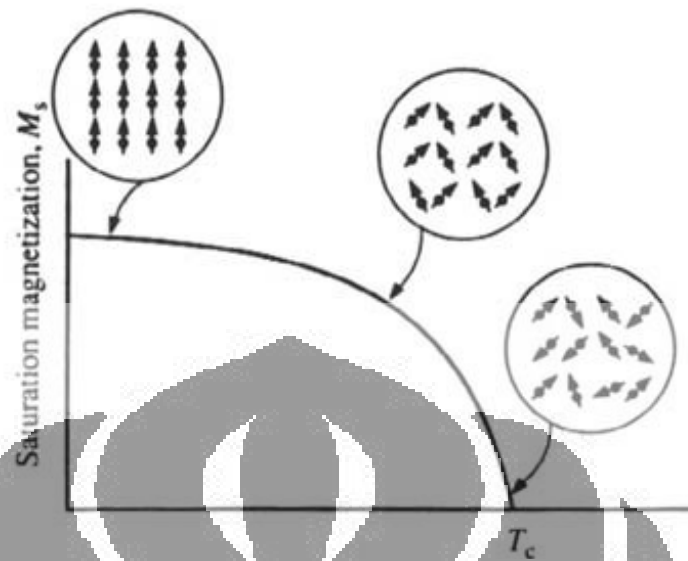


Gambar 2.3. Skema perubahan struktur domain dalam proses magnetisasi (diambil dari [1])

Dari gambar 2.3 dapat dijelaskan proses-proses magnetisasi, yaitu :

- Menggambarkan tahap demagnetisasi.
- Terjadi magnetisasi sebagian akibat terjadinya pergeseran domain wall secara reversibel.
- Terjadi pergeseran domain wall yang irreversibel.
- Terjadi perputaran domain yang reversibel.

Setelah medan magnet luar dihilangkan sebagian besar arah domain-domain tidak berubah, dan material menjadi magnet permanen. Agar material ini kehilangan daya kemagnetannya maka harus dilakukan demagnetisasi dengan cara pemanasan, atau memukul-mukul. Apabila temperatur naik hingga mencapai temperatur currie, maka domain-domain yang ada akan kembali pada keadaan demagnetisasi, dan akan kehilangan sifat-sifat ferromagnetiknya. Pengaruh temperatur terhadap magnetisasi dapat dinyatakan seperti gambar 2.4



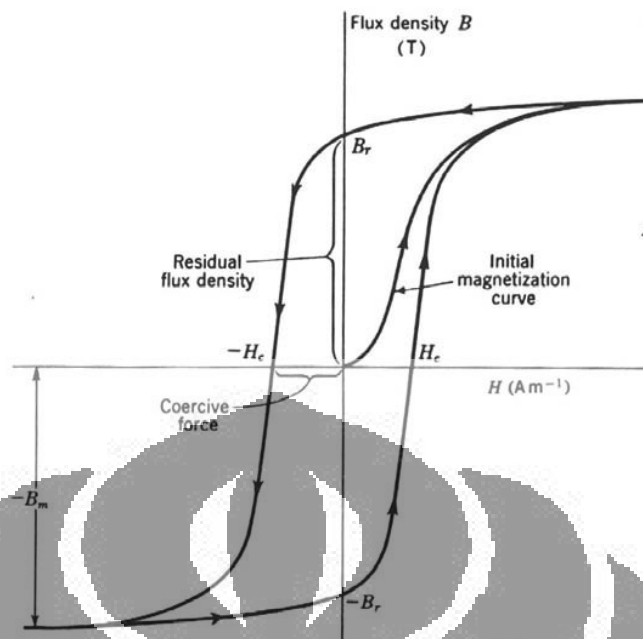
Gambar 2.4. Pengaruh temperatur terhadap magnetisasi (diambil dari [1])

2.4 Histeresis Ferromagnetik

Histeresis merupakan fenomena yang menunjukkan dua sifat fisis berhubungan dalam suatu cara yang bergantung pada apakah salah satu sifat naik atau turun dalam berhubungan dengan yang lain [9].

Bahan ferromagnetik memiliki momen magnetik spontan walaupun berada pada medan magnet eksternal nol. Keberadaan magnetisasi spontan ini menandakan bahwa spin elektron dan momen magnetik bahan ferromagnetik tersusun secara teratur.

Kurva histeresis dapat diperoleh dengan memetakan rapat fluks magnet B di dalam bahan ferromagnetik terhadap kuat medan magnet H yang bekerja. Cara lain adalah dengan memetakan magnetisasi bahan M untuk kuat medan magnet H yang berbeda-beda. Kedua cara tersebut memberikan informasi yang sama, karena antara B , M dan H memenuhi persamaan (2.1).



Gambar 2.5. Loop histeresis bahan ferromagnetik
(diambil dari makalah [1] halaman 8)

Kesesuaian penerapan bahan ferromagnetik ditentukan oleh karakteristik loop histeresis. Sebagai contoh untuk penerapan transformer memerlukan bahan dengan permeabilitas yang tinggi dan kerugian yang rendah karena untuk transformer diperlukan perubahan energi listrik yang efisien.

Informasi yang diperoleh dari kurva histeresis magnetik berupa magnetisasi jenuh, remanen, koersifitas dan energi produk maksimum. Penjelasan lebih rinci adalah sebagai berikut:

2.4.1 Magnetisasi Jenuh

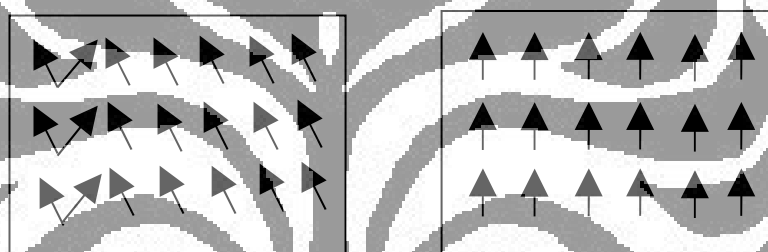
Dari kurva histeresis gambar 2.5 terlihat bahwa bahan ferromagnet pada awalnya belum termagnetisasi. Medan magnet H yang diberikan pada bahan menyebabkan induksi magnetik meningkat yang sebanding dengan medan magnet H . Jika medan magnet H meningkat terus-menerus magnetisasi akhirnya akan mencapai keadaan jenuh pada nilai M_0 . Nilai tersebut mewakili keadaan dimana seluruh dipol magnet di dalam bahan searah dengan arah medan magnet H . Magnetisasi jenuh hanya bergantung pada besar momen magnet m dan banyak atom per satuan volume N serta tidak tergantung kepada struktur bahan. Sehingga magnetisasi jenuh pada volume V besarnya

$$M_o = Nm \quad (2.6)$$

Tabel 2.2 Nilai magnetisasi jenuh beberapa bahan magnet
(diambil dari buku [8] hal. 71)

Bahan	(10^6 A/m)
Besi	1,71
Kobalt	1,42
Nikel	0,48
78 Permalloy (78% Ni ; 22% Fe)	0,86
Supermalloy (80% Ni, 15% Fe, 5% Mo)	0,63
Metglas 2605 (Fe80B20)	1,27
Metglas 2615 (Fe80P16C3B1)	1,36
Permendur (50% Cok 50% Fe)	1,91

M_o hanya bergantung pada jenis unsur yang terkandung pada bahan, bukan bergantung pada struktur bahan. Beberapa nilai magnetisasi jenuh dari berbagai bahan ferromagnetik ditunjukkan pada tabel 2.2.



Gambar 2.6. Penyebaran momen magnet bahan ferromagnet

(a) Pada temperatur di atas 0 K

(b) Pada temperatur 0 K

Magnetisasi jenuh terjadi ketika semua dipol magnet telah searah dengan medan magnet H dan dapat tercapai pada temperatur 0 K. Pada temperatur di atas 0 K, momen magnet memiliki energi termal yang menyebabkan berputar di sekitar arah medan magnetik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6. Perputaran arah momen magnet ini menjadikan momen magnet di dalam volume V tidak sepenuhnya searah dengan medan magnet H . Oleh karena itu diperoleh nilai magnetisasi jenuh lebih rendah dari M_o , nilai magnetisasi jenuh pada temperatur di atas 0 K disebut magnetisasi jenuh teknis M_s .

2.4.2 Remanen

Bila medan magnet H dikurangi hingga nol, magnetisasi yang masih tersisa disebut dengan magnetisasi remanen M_r , dan induksi yang masih tersisa disebut dengan Remanen B_r

$$B_r = \mu_0 M_r \quad (2.7)$$

Istilah remanen (*remanence*) memiliki arti berbeda dengan remanent. Istilah remanen digunakan untuk menjelaskan keadaan magnetisasi atau induksi yang tersisa setelah bahan mencapai kejenuhan kemudian medan magnet H dihilangkan hingga nol, sedangkan magnetisasi remanent digunakan untuk menyatakan keadaan magnetisasi yang tersisa setelah bahan mengalami magnetisasi pada tingkat sembarang lalu medan magnet dikurangi hingga nol.

2.4.3 Koersifitas

Induksi magnetik suatu bahan dapat dikurangi hingga nol dengan memberikan medan magnet H yang berlawanan sebesar H_c pada bahan tersebut. Kuat medan magnet tersebut adalah koersifitas. Koersifitas sangat bergantung pada keadaan sampel, yaitu dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti perlakuan panas dan deformasi.

Sama halnya dengan remanen, terdapat perbedaan arti antar medan koersif dan koersifitas. Medan koersif adalah medan yang diperlukan untuk menurunkan nilai magnetisasi atau induksi magnetik hingga mencapai nol dari nilai sembarang. Sedangkan koersifitas adalah kuat medan magnet yang diperlukan untuk menurunkan magnetisasi atau induksi magnetik hingga mencapai nol dari keadaan magnetisasi jenuh.

Koersifitas intrinsik disimbolkan dengan H_{ci} , yaitu kuat medan magnet pada saat magnetisasi diturunkan hingga mencapai nol. Pada bahan magnet lunak (*soft magnetic material*) H_c dan H_{ci} memiliki nilai yang hampir sama, dan biasanya tidak perlu pembedaan diantara keduanya. Sedangkan pada bahan magnet keras (*hard magnetic material*) terdapat perbedaan yang jelas antara H_c dan H_{ci} . Koersifitas H_c adalah kuat medan magnet eksternal yang diperlukan untuk membuat induksi magnetik sampel menjadi nol, sedangkan koersifitas intrinsik (H_{ci}) adalah kuat medan magnetik eksternal yang diperlukan untuk membuat magnetisasi bahan menjadi nol.

2.4.4 Energi Produk Maksimum

Energi produk maksimum $(BH)_{max}$ merupakan energi terbesar yang masih dipertahankan suatu bahan magnet saat bahan tersebut tidak lagi dipengaruhi medan luar. Sifat ini menjadi sangat penting karena menjadi acuan untuk menentukan kekuatan magnetik yang dimiliki bahan magnet yang telah dimagnetisasi. Besar energi ini sangat ditentukan oleh luasan kurva di kuadran kedua pada kurva histeresis magnetisasi bahan.

Nilai $(BH)_{max}$ merupakan tempat kedudukan titik koordinat antara magnetisasi induksi magnet, B dan medan luar, H pada kuadran kedua kurva histeresis. Nilai idealnya dapat dicari menggunakan persamaan

$$(BH) = (\mu_0 H + J) \cdot H \quad (2.8)$$

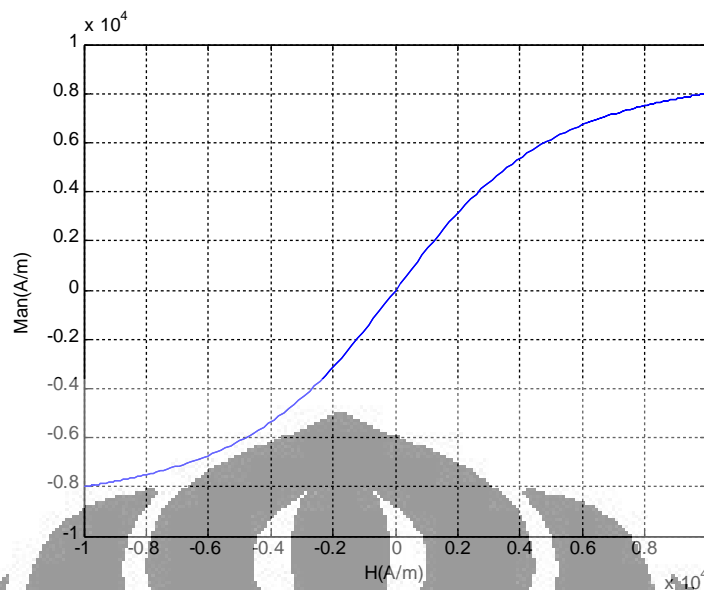
Nilai maksimum $(BH)_{max}$ terjadi pada saat diferensiasi pertamanya sama dengan nol dan diferensiasi keduanya negatif yang menunjukkan kondisi sistem dalam keadaan stabil.

Dari uraian di atas diharapkan dapat dikarakterisasi sifat magnetik suatu bahan dari kurva histeresis ke dalam beberapa parameter bebas yaitu magnetisasi jenuh atau induksi magnetik jenuh, koersifitas, remanen, dan energi produk maksimum.

Histeresis dapat terjadi karena adanya dislokasi (*dislocation*) atau pengotor (*impurities*) pada bahan sehingga menyebabkan meningkatnya energi yang hilang selama proses magnetisasi. Penyebab histeresis lainnya adalah karena terdapat *magnetocrystalline anisotropy* pada bahan. Bahan ferromagnetik yang memiliki tingkat keanisotropian yang tinggi akan memiliki histeresis yang lebih besar.

Apabila keberadaan cacat dan anisotropi pada bahan diabaikan, akan diperoleh bahan yang bebas histeresis. Magnetisasi akan menjadi fungsi tunggal dari H dan reversibel. Fungsi anhisteresis ini diperlihatkan pada persamaan berikut ini dan gambarnya ditunjukkan oleh gambar dibawah ini :

$$M_{an} = M_s \coth\left(\left(\frac{H}{a}\right) - \left(\frac{a}{H}\right)\right) \quad (2.9)$$



Gambar 2.7. Kurva anhisteresis

2.5 Permagraph

Permagraph merupakan peralatan standar yang digunakan untuk pengukuran kurva histeresis magnet permanen untuk penelitian, kontrol kualitas dan produksi. Peralatan ini dikendalikan oleh komputer untuk mengetahui karakteristik magnet dari bahan magnet permanen.

Sampel diletakkan ke dalam koil, kemudian dijepit oleh dua buah kutub yang menghasilkan medan magnet. Ketika sampel diberi medan magnet eksternal, medan magnet sampel yang sebanding dengan momen magnet, mengubah fluks magnetik melalui koil. Perubahan fluks magnet ini kemudian menginduksikan arus yang dapat diamplifikasi dan dideteksi menggunakan *lock in amplifier*. Medan magnet eksternal diberikan oleh elektromagnet vertikal.



Gambar 2.8. Permagraph tipe Electromagnet EP 3
(diambil dari [17])

Permagraph yang digunakan pada penelitian ini adalah permagraph tipe ELECTROMAGNET EP3. Alat ini merupakan salah satu jenis peralatan yang

digunakan untuk mempelajari sifat magnetik bahan. Dengan alat ini akan diperoleh informasi berupa besaran-besaran sifat magnetik sebagai akibat perubahan medan magnet luar yang digambarkan dalam kurva histeresis.

Spesifikasi dari permagraph tipe ELECTROMAGNET EP3 ditunjukkan oleh tabel 2.3 berikut

Tabel 2.3. Spesifikasi permagraph Electromagnet EP3
(diambil dari [17])

Power Supply	
Tegangan	0 – 120 V
Arus	0 – 25 A
Daya Output	3 kW
Berat	15 kg
Cabinet	
Lebar	520 mm
Panjang	500 mm
Tinggi	300 mm
Berat	0,5 kg
Unit kontrol dan Pengukuran	
Resolusi analog to digital converter	24 bit
Interface	RS232
Berat	0,5 kg
Sistem medan magnet luar	
Kuat medan maksimum	1700 kA/m
Ukuran kutub bawah	100 mm x 100 mm
Diameter kutub standard	92 mm
Celah udara (tanpa kutub)	73 – 102 mm
Celah udara (dengan kutub standard)	0 – 63 mm
Nilai beban listrik waktu singkat	3 kW
Berat	128 kg
Sistem Pengendali dan Pengolah Data	
Perangkat keras	PC Pentium IV
Perangkat lunak	PERMA

2.6 Model Jiles-Atherton

Ada beberapa model histeresis magnet yang telah berkembang saat ini, salah satu yang sering diaplikasikan adalah model Jiles-Atherton. Model Jiles-Atherton (model JA) merupakan model histeresis magnet yang berdasarkan pada teori pinning sites (yaitu inklusi, void, sejenis cacat pada batas kristal) yang menghalangi pergerakan *domain wall*. Pinning ini seperti hambatan bagi pergerakan domain wall dan diformulasikan sebagai momen friksi yang bekerja pada partikel untuk menghalangi kecenderungan vektor magnetisasi untuk berotasi. Teori pinning ini sangat berguna untuk mempelajari sifat magnetik

dalam bahan dimana pergerakan domain merupakan mekanisme utama dari histeresis[10].

Sifat utama dari model Jiles-Atherton yaitu dekomposisi dari besaran magnetisasi M menjadi komponen reversibel M_{rev} , yang berkaitan dengan melengkungnya dinding domain atau *domain wall* selama proses magnetisasi, dan komponen irreversibel M_{irr} , yang berkaitan dengan perpindahan domain wall melawan efek pinning. Hubungan kedua komponen tersebut dan magnetisasi anhisteresis dapat diturunkan dari sifat fisis proses magnetisasi [3].

2.6.1 Penurunan Model Jiles-Atherton

Model Jiles-Atherton diturunkan dari model Langevin yang menjelaskan karakteristik bahan paramagnetik, kemudian dimodifikasi oleh Weiss. Langevin menggunakan asumsi bahwa tidak ada interaksi antara momen magnetik dalam bahan paramagnetik serta menggunakan statistik Maxwell-Boltzmann untuk mengevaluasi probabilitas p sembarang elektron yang menempati keadaan energi E pada temperatur T .

$$p(E) = e^{-\frac{E}{k_B T}} \quad (2.10)$$

Banyaknya momen magnetik yang berada pada sudut θ dan $\theta+d\theta$ terhadap arah medan eksternal adalah

$$dn = \frac{N \sin \theta \exp\left(\frac{\mu_o m H \cos \theta}{k_B T}\right) d\theta}{\int_0^\pi \sin \theta \exp\left(\frac{\mu_o m H \cos \theta}{k_B T}\right) d\theta} \quad (2.11)$$

Dengan N adalah jumlah atom per satuan volume, k_B adalah konstanta Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K) dan m adalah momen magnetik per satuan volume.

Magnetisasi M adalah jumlah proyeksi semua momen magnetik pada arah medan magnet H .

$$M = \int_0^\pi m \cos \theta dn = \frac{Nm \int_0^\pi \cos \theta \sin \theta \exp\left(\frac{\mu_o m H \cos \theta}{k_B T}\right) d\theta}{\int_0^\pi \sin \theta \exp\left(\frac{\mu_o m H \cos \theta}{k_B T}\right) d\theta} \quad (2.12)$$

Evaluasi persamaan di atas akan menghasilkan persamaan magnetisasi bahan paramagnetik sebagai fungsi medan magnet H dan temperatur T .

$$M = M_s \left[\coth \left(\frac{\mu_o m H}{k_B T} \right) - \left(\frac{k_B T}{\mu_o m H} \right) \right] \quad (2.13)$$

Dimana $M_s = M_o = Nm$ adalah magnetisasi jenuh.

Pada temperatur tinggi, $\frac{\mu_o m H}{k_B T} \ll 1$, ini akan mengantarkan pada hukum Curie.

$$M = \frac{N\mu_o m^2 H}{3k_B T}, \text{ karena } \chi = \frac{M}{H} = \frac{N\mu_o m^2}{3k_B T} = \frac{C}{T} \quad (2.14)$$

Apabila pendekatan di atas diterapkan pada bahan ferromagnetik maka terlebih dahulu perlu dilakukan koreksi pada asumsi bahwa tidak ada interaksi diantara momen magnetik. Karena pada bahan ferromagnetik terdapat kopling antara momen magnet di dalam domain. Medan rerata Weiss yang sebanding dengan magnetisasi *bulk* M , $H_{\text{weiss}} = \alpha M$ dapat digunakan untuk menyatakan kopling magnetik. Akibatnya medan magnet efektif yang dialami oleh momen magnet individual adalah

$$H_e = H + \alpha M \quad (2.15)$$

Dengan mengganti H dengan H_e pada model Langevin untuk paramagnet, model Langevin-Weiss menggambarkan magnetisasi anhisteresis pada bahan ferromagnetik.

$$M_{an} = M_s \left[\coth \left(\frac{\mu_o m (H + \alpha M)}{k_B T} \right) - \left(\frac{k_B T}{\mu_o m (H + \alpha M)} \right) \right] \quad (2.16)$$

Dimana

$$a = \frac{\mu_o m}{k_B T} \quad (2.17)$$

Sehingga persamaan (2.16) dapat dituliskan

$$M_{an} = M_s \left[\coth \left(\frac{(H + \alpha M)}{a} \right) - \left(\frac{a}{H + \alpha M} \right) \right] \quad (2.18)$$

Disamping mempertimbangkan kopling antar individu momen magnetik, Jiles dan Atherton juga menggunakan medan rerata Weiss untuk menyatakan kopling antar domain dan mengembangkan model histeresis berdasarkan disipasi energi akibat pergerakan momen magnetik di dalam pengaruh medan magnet.

Pergerakan momen magnetik di bawah pengaruh medan magnet ini menyebabkan seluruh momen magnetik dalam domain menjadi sejajar dengan arah medan magnet dan terjadi pergerakan domain wall. Jika luasan domain wall yang memiliki sudut 180° terhadap medan magnet eksternal bergerak sejauh dx , perubahan magnetisasinya menjadi

$$VdM = 2M_s A dx \quad (2.19)$$

Sedang untuk domain wall yang memiliki sudut selain 180° , perubahan magnetisasinya adalah

$$VdM = M_s (1 - \cos \theta) A dx \quad (2.20)$$

Gerakan domain wall tersebut dihambat oleh pinning sites yang dihasilkan oleh cacat di dalam bahan yang menginduksi energi minimum lokal ketika domain wall memotong atau melaluinya. Diperlukan energi lebih oleh domain wall untuk melewati daerah energi minimum lokal ini, yang menghasilkan rugi histeresis. Pinning site ini dapat menyebabkan berkurangnya nilai permeabilitas awal suatu bahan ferromagnetik dan meningkatnya nilai koersifitas. Model ini menganggap distribusi pinning site homogen dan isotropik dengan kerapatan pinning site n dan setiap pinning site memiliki rerata energi pinning sama. Jika sebuah domain bergerak sejauh dx , energi yang hilang karena *domain wall pinning* adalah

$$VdE_{loss} = n\mu_o \varepsilon_\pi A dx \quad (2.21)$$

Dengan ε_π adalah energi pinning. Untuk domain dengan sudut bukan 180° , rugi energinya adalah

$$VdE_{loss} = \frac{1}{2} n\mu_o \varepsilon_\pi (1 - \cos \theta) A dx \quad (2.22)$$

Dengan memasukkan nilai dM dari persamaan (2.20) ke persamaan (2.22) diperoleh energi yang hilang per satuan volume V

$$dE_{loss} = \frac{\mu_o n \varepsilon_\pi dM}{2M_s} = \mu_o k dM \quad (2.23)$$

Dengan $k = \frac{n\varepsilon_\pi}{2M_s}$ yaitu koefisien pinning, Persamaan di atas mengandung arti bahwa rugi energi karena gerak domain wall sebanding dengan perubahan magnetisasi. Apabila tidak ada pinning site seluruh energi yang diberikan kepada

bahan akan sama dengan energi magnetostatik bahan, ini adalah magnetisasi anhisteresis.

Pada kasus histeresis, energi yang diberikan kepada bahan sama dengan energi magnetostatis ditambah rugi histeresis. Energi magnetostatis di dalam bahan adalah energi anhisteresis tanpa pinning, dikurangi rugi energi karena domain wall pinning [11], yang dapat dinyatakan ke dalam persamaan berikut

$$\mu_0 \int_p M(H_e) dH_e = \mu_0 \int M_{an}(H_e) dH_e - \mu_0 \int k \left(\frac{dM}{dH_e} \right) dH_e \quad (2.24)$$

dengan mendiferensialkan persamaan integral di atas, akan menghasilkan

$$M(H_e) = M_{an}(H_e) - k \left(\frac{dM}{dH_e} \right) \quad (2.25)$$

$$\frac{dM}{dH_e} = \frac{(M_{an} - M)}{k} \quad (2.26)$$

Dengan menyatakan medan efektif H_e ke dalam suku-suku H dan αM akan menghasilkan

$$\frac{dM}{dH} = \delta_M \frac{(M_{an} - M)}{\delta k - \alpha(M_{an} - M)} \quad (2.27)$$

Di mana δ mengambil nilai +1 ketika H bertambah pada arah positif ($dH/dt > 0$), dan -1 ketika H bertambah pada arah negatif ($dH/dt < 0$), untuk menjamin bahwa pinning selalu melawan perubahan magnetisasi. Sedangkan suku

δM pada persamaan (2.27) digunakan untuk menjamin nilai $\frac{dM}{dH}$ selalu positif atau nol tetapi tidak bernilai negatif.

$$\delta_M = \begin{cases} 0, & \text{jika } \frac{dH}{dt} < 0, \text{ dan } M_{an} - M \geq 0 \\ 0, & \text{jika } \frac{dH}{dt} > 0, \text{ dan } M_{an} - M \leq 0 \\ 1, & \text{selain dari itu} \end{cases} \quad (2.28)$$

Harus dicatat bahwa persamaan diferensial (2.27) adalah untuk komponen magnetisasi irreversibel.

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \delta_M \frac{(M_{an} - M_{irr})}{\delta k - \alpha(M_{an} - M_{irr})} \quad (2.29)$$

Selama proses magnetisasi, komponen magnetisasi reversibel yang dapat berupa lengkungan domain wall, dan translasi reversibel atau rotasi domain wall secara reversibel. Komponen magnetisasi reversibel M_{rev} dianggap sebanding dengan selisih antara Magnetisasi anhisteresis M_{an} dengan magnetisasi irreversibel M_{irr} , yang dikalikan dengan suatu konstanta reversibilitas c , yang secara matematis dituliskan dengan

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (2.30)$$

Total magnetisasi M adalah penjumlahan magnetisasi reversibel dengan magnetisasi irreversibel

$$M = M_{rev} + M_{irr} \quad (2.31)$$

Seperti terlihat dari persamaan-persamaan (2.18), (2.28), (2.29) bahwa model JA memiliki lima buah parameter yaitu α , a , c , k dan M_s , dengan

- α : Kuat interaksi antar momen magnetik
- a : Aspek termal dan diperkenalkan oleh Langevin ketika mendefinisikan perilaku anhisteresis
- c : komponen magnetisasi reversibel
- k : koefisien pinning
- M_s : Magnetisasi Jenuh

2.6.2 Modifikasi Model Jiles-Atherton

Saat ini telah banyak dilakukan modifikasi model JA agar diperoleh hasil yang lebih akurat. Salah satu aspek yang paling banyak dilakukan yaitu dari parameter pinning site k . D.C Jiles dan D.L Atherton mengemukakan bahwa dalam prakteknya nilai parameter k dapat berubah-ubah terhadap nilai M dan H [2]. Parameter k akan bernilai konstan jika perubahan nilai magnetisasi sepenuhnya disebabkan oleh hambatan pergerakan domain wall semata. Sedangkan pada kenyataannya, perubahan magnetisasi dapat disebabkan oleh pergerakan dinding domain dan rotasi domain. Teori tersebut kemudian menimbulkan dua pandangan baru yakni, perubahan nilai k sebagai fungsi M dan perubahan nilai k sebagai fungsi H .

Peter R Wilson (2000) mengusulkan bahwa nilai k ini dipengaruhi oleh perubahan nilai H yang mengikuti fungsi gauss. Model yang beliau kembangkan

dikenal dengan *Model JA-Gaussian*. Sedangkan Roman Szewczyk (2007) mengusulkan bahwa perubahan nilai k dipengaruhi oleh nilai M . Model yang dia kembangkan kemudian dikenal dengan *Model JA- Extended*.

2.6.2.1 Model JA Gaussian

Peter R Wilson (2001) menemukan bahwa dengan memodelkan perubahan k sebagai fungsi gauss dari nilai medan luar H pada model JA akan diperoleh hasil yang lebih akurat [4]. Fungsi gauss ini dapat mengatasi ketidakkontinuan nilai magnetisasi disekitar nol saat terjadi perubahan polarisasi medan luar. Fungsi ini dirumuskan dengan

$$k = k_0 e^{-\frac{H^2}{2\sigma^2}} \quad (2.32)$$

Dimana

k adalah parameter pinning site model JA-gaussian

k_0 adalah parameter koefisien pinning model JA

H adalah medan luar (A/m)

σ adalah standar deviasi dari fungsi gauss

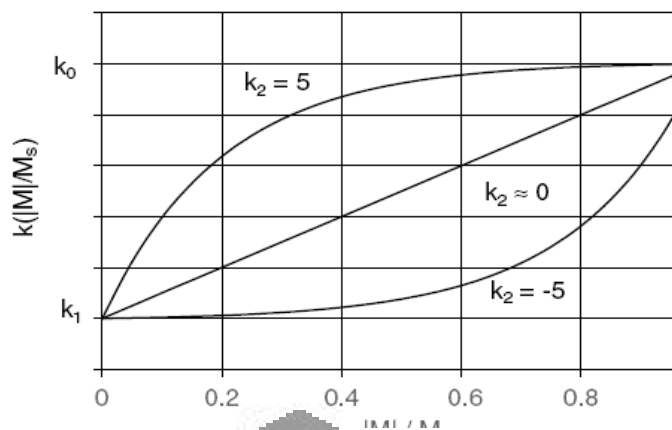
2.6.2.2 Model JA Extended

Menurut Roman Szewczyk Parameter k dalam model JA tidaklah konstan, melainkan berubah selama proses magnetisasi [5,6]. Sedangkan disisi lain, Peter R. Wilson, dengan model yang beliau kemukakan yaitu model JA-gaussian, menemukan bahwa nilai parameter k berubah sebagai fungsi medan luar H . Hal ini tidak tepat dari sudut pandang sifat fisis. Parameter k seharusnya dikaitkan dengan keadaan magnetik dari suatu bahan yang dijelaskan oleh besar M , bukanlah besaran H . Perubahan nilai k ini disebabkan oleh perubahan energi rata-rata yang dibutuhkan untuk melewati pinning sites.

Roman Szewczyk merumuskan perubahan k dalam fungsi M . Parameter k ini diuraikan menjadi tiga buah parameter k_0 , k_1 , dan k_2 [6], yaitu

$$k = k_0 + \frac{e^{k_2(1-|M|/M_s)} - 1}{e^{k_2} - 1} (k_1 - k_0) \quad (2.33)$$

Ketergantungan nilai k terhadap $|M|/M_s$, dimana $|M|$ adalah nilai mutlak dari magnetisasi M dideskripsikan oleh gambar berikut ini



Gambar 2.9. Bentuk kurva fungsi $k(|M|/M_s)$ dari parameter k_0 , k_1 dan k_2 (diambil dari [6])

Dalam persamaan (2.33), parameter k_0 menentukan nilai maksimal dari k , parameter k_1 menentukan nilai dari k , dan k_2 menentukan bentuk (fungsi) parameter. Untuk nilai k_2 yang negatif, fungsi $k(|M|/M_s)$ menjadi cekung, dan untuk nilai nilai k_2 yang positif, fungsi $k(|M|/M_s)$ menjadi cembung. Sedangkan jika k_2 bernilai nol, fungsi $k(|M|/M_s)$ menjadi linear seperti yang digambarkan oleh gambar (2.9).

2.7 Metode Euler

Metode Euler merupakan metode numerik yang banyak digunakan untuk menyelesaikan kasus-kasus persamaan diferensial. Metode Euler menyelesaikan persamaan diferensial menggunakan deret Taylor. Misalkan nilai magnetisasi bahan M saat medan luar H adalah $M(H)$, ekspansi ke dalam deret Taylor menjadi :

$$M(H) = M(a) + \frac{(H-a)}{1!} M'(a) + \frac{(H-a)^2}{2!} M''(a) + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(H-a)^n}{n} u^{(n)}(H) \dots\dots\dots(2.34)$$

untuk menghitung nilai magnetisasi bahan saat nilai medan luar $M(H+h)$ menjadi $H+h$, secara numerik, kita dapat mensubstitusikan nilai H dan a pada persamaan (3.1) menjadi H dan $H+h$, sehingga menjadi

$$M(H+h) = M(H) + \frac{h}{1!} M'(H) + \frac{(h)^2}{2!} M''(H) + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(h)^n}{n!} M^{(n)}(H) \quad (2.35)$$

dengan h adalah selisih antara H dan $H+h$. Dalam beberapa kasus biasanya kita dapat hanya mengambil dua suku pertama dari persamaan (2.35) dengan ketentuan:

$$M(H + h) = M(H) + hM'(H) + O(h^2) \quad (2.36)$$

di mana $O(h^2)$ merepresentasikan error aproksimasi yang sebanding dengan h^2 .

Metode euler dapat digunakan untuk menyelesaikan komponen magnetisasi irreversibel dari persamaan model JA maupun model JA modifikasi. Persamaan magnetisasi irreversibel tersebut yakni :

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \delta_M \frac{(M_{an} - M_{irr})}{\delta_k - \alpha(M_{an} - M_{irr})} \quad (2.37)$$

Dengan menganggap bahan pada keadaan awal memiliki magnetisasi nol ($H = 0$, $M_{irr} = 0$), maka dapat ditetapkan nilai awal $M_{irr0} = 0$. Dan nilai magnetisasi irreversibel dapat dihitung secara numerik dengan

$$M_{irr}(H + h) = M_{irr}(H) + h \left(\delta_M \frac{(M_{an} - M_{irr}(H))}{\delta_k - \alpha(M_{an} - M_{irr}(H))} \right) \quad (2.38)$$

Untuk magnetisasi reversibel yaitu digunakan persamaan berikut

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (2.39)$$

Nilai c pada persamaan diatas diperoleh dari nilai parameter model. Nilai M_{an} merupakan magnetisasi anhisteresis yaitu persamaan (2.16), Nilai M_{irr} dapat mengambil nilai dari persamaan (2.38).

2.8 Algoritma Genetika

2.8.1 Komponen Algoritma Genetika

Algoritma genetika (AG) adalah algoritma pencarian yang didasarkan pada mekanisme seleksi alamiah dan genetika alamiah [7]. Algoritma genetika ini ditemukan oleh John Holland dan dikembangkan oleh muridnya David Golberg. Kemunculan AG diinspirasi dari teori-teori dalam ilmu biologi, sehingga banyak istilah dan konsep biologi yang digunakan dalam AG.

Istilah kromosom pada AG digunakan untuk menyatakan kumpulan karakter yang mewakili solusi dari masalah yang akan dipecahkan. Sebuah kromosom adalah individu yang tersusun atas sejumlah gen. Sementara satu gen mewakili satu variabel solusi, sehingga jika ada enam gen di dalam satu kromosom berarti

masalah yang ingin dipecahkan mengandung enam variabel bebas. Sejumlah individu atau kromosom pada suatu waktu tertentu membentuk suatu populasi. Populasi tersebut berevolusi di mana individu secara terus menerus mengalami perubahan gen untuk menyesuaikan dengan lingkungan hidupnya. Hanya individu-individu yang kuat yang mampu bertahan.

Pada dasarnya AG terdiri dari lima komponen proses dan terdapat banyak metode yang diusulkan untuk tiap-tiap komponen tersebut. Lima komponen utama tersebut adalah

2.8.1.1 Skema Pengkodean

Untuk merepresentasikan variabel atau parameter ke dalam kromosom maka dilakukan suatu pengkodean. Terdapat tiga skema yang paling umum digunakan dalam pengkodean, yaitu :

- *Real-number encoding*. Pada skema ini, nilai gen berada dalam interval $[0, R]$, di mana R adalah bilangan real positif dan biasanya $R = 1$.
- *Discrete decimal encoding*. Setiap gen bisa bernilai salah satu bilangan bulat dalam interval $[0, 9]$.
- *Binary encoding*. Setiap gen hanya bisa bernilai 0 atau 1.

2.8.1.2 Nilai *Fitness*

Nilai *fitness* adalah nilai yang menyatakan baik tidaknya suatu solusi (individu). Nilai *fitness* ini yang dijadikan acuan dalam mencapai nilai optimal dalam algoritma genetika. Di dalam evolusi alam, individu yang memiliki nilai kecocokan (*fitness*) yang tinggi akan bertahan hidup. Sedangkan individu yang bernilai *fitness* rendah akan mati. Algoritma genetika bertujuan mencari individu dengan nilai *fitness* yang paling tinggi. Setiap individual dievaluasi dengan *fitness function*. Sebuah fungsi *fitness* mengembalikan nilai tertinggi untuk individual yang terbaik.

2.8.1.3 Seleksi Orangtua

Fungsi seleksi bertugas memilih orangtua untuk menghasilkan keturunan sebagai generasi berikutnya berdasarkan kecocokan terhadap nilai fitness. Di dalam matlab 7 terdapat 6 pilihan metode untuk memilih orangtua yaitu :

- *Stochastic uniform*. Setiap individu yang menjadi calon orangtua menempati satu bagian yang panjangnya sesuai dengan nilai skala individu itu pada suatu garis. Algoritma bekerja dengan cara bergerak sepanjang garis dengan ukuran langkah yang sama, pada setiap langkah, algoritma memilih satu orangtua pada bagian yang terkena langkahnya.
- *Remainder*. Pemilihan orang tua dengan cara ini adalah dengan menggunakan nilai skala kecocokannya.
- *Uniform*. Memilih orang tua secara acak dari distribusi seragam dengan menggunakan harga ekspektasi dan jumlah orang tua. Hasil ini diperoleh dengan pencarian secara tidak langsung.
- *Roulette wheel*. Metode ini menirukan permainan roulette-wheel di mana masing-masing kromosom menempati potongan lingkaran pada roda roulette secara proporsional sesuai dengan nilai fitnessnya. Kromosom yang memiliki nilai fitness lebih besar menempati golongan yang lebih besar dibandingkan dengan kromosom bernilai fitness rendah.
- *Tournament*. Fungsi menyeleksi setiap orang tua dengan memilih individu-individu secara acak untuk mengikuti turnamen, jumlah yang diinginkan dapat diatur dalam ukuran yang diinginkan, dan kemudian dipilih individu yang terbaik yang kemudian dijadikan orang tua pada proses berikutnya.
- *Custom*. Memungkinkan pengguna untuk menentukan sendiri fungsi seleksi yang

2.8.1.4 Operator Genetika

Untuk menghasilkan generasi baru, dilakukan beberapa prosedur operator genetika seperti pindah silang, mutasi dan elitisme pada orang tua yang terpilih melalui proses seleksi [12]. Pindah silang (*crossover*) merupakan proses memindah-silangkan dua buah kromosom agar diperoleh kromosom yang

mendekati solusi yang diinginkan. Pindah silang dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu satu titik potong, n titik potong, uniform dan heuristik.

Mutasi terjadi dalam probabilitas yang rendah. Mutasi proses merupakan mengubah susunan gen pada kromosom secara random berdasarkan probabilitas mutasi tertentu. Cara pengubahannya dapat menggunakan distribusi acak gauss. Untuk semua gen yang ada, jika bilangan random yang dibangkitkan kurang dari probabilitas mutasi yang ditentukan maka ubah gen tersebut menjadi nilai kebalikannya (dalam *binary encoding*, 0 diubah 1 dan 1 diubah 0). Biasanya mutasi sangat jarang terjadi, dalam satu generasi mungkin hanya satu atau dua individu yang mengalami mutasi.

Karena seleksi dilakukan secara acak, maka tidak ada jaminan bahwa suatu individu bernilai fitness tertinggi akan selalu terpilih. Kalaupun individu bernilai fitness tertinggi akan selalu terpilih, mungkin saja individu tersebut akan rusak (nilai fitnessnya menurun) karena proses pindah silang. Untuk menjaga agar individu bernilai fitness tertinggi tersebut tidak hilang selama evolusi, maka perlu dibuat satu atau beberapa kopinya. Prosedur ini dikenal sebagai elitisme.

2.8.1.5 Penggantian Populasi

Setelah diperoleh populasi baru melalui proses pindah silang, mutasi dan elitisme, maka populasi tersebut dijadikan populasi yang menggantikan seluruh anggota populasi sebelumnya. Dalam AG dikenal skema penggantian populasi yang disebut dengan *generational replacement*, yang berarti suatu generasi digantikan sekaligus oleh N individu baru hasil pindah silang, mutasi dan elitisme. Skema penggantian ini tidak realistis dari sudut pandang biologi. Di dunia nyata, individu-individu dari generasi berbeda bisa berada dalam waktu yang bersamaan. Fakta lainnya adalah individu-individu muncul dan hilang secara konstan, tidak pada generasi tertentu. Secara umum skema penggantian populasi dapat dirumuskan berdasarkan suatu ukuran yang disebut dengan *generational gap* G . Ukuran ini menunjukkan persentase yang digantikan dalam setiap generasi.

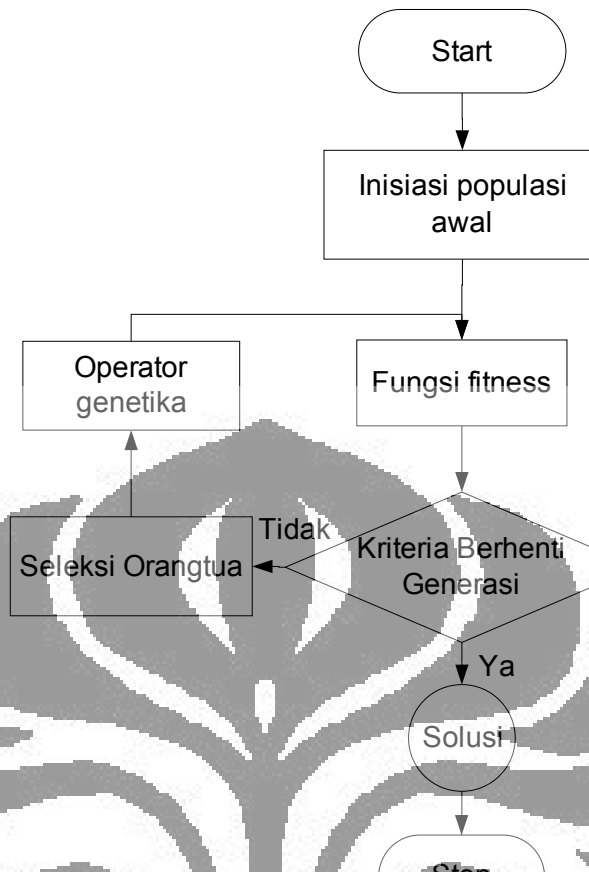
Skema penggantian yang paling ekstrim adalah hanya mengganti satu individu dalam generasi yaitu, $G = 1/N$, di mana N adalah jumlah individu dalam populasi. Skema penggantian ini disebut sebagai *steady-state reproduction*. Pada

skema tersebut G biasanya sama dengan $1/N$ atau $2/N$. Dalam setiap generasi, sejumlah NG individu harus dihapus untuk menjaga ukuran populasi tetap N . Terdapat beberapa prosedur penghapusan individu, yaitu penghapusan individu yang bernilai fitness paling rendah atau penghapusan individu yang paling tua. Penghapusan bisa berlaku hanya pada individu orang tua saja atau bisa juga berlaku pada semua individu dalam populasi.

2.8.2 Cara Kerja Algoritma Genetika

Untuk memperoleh solusi yang diinginkan dengan menggunakan AG, proses pertama yang dilakukan adalah dengan mendefinisikan individu, dimana individu menyatakan salah satu solusi yang mungkin dari permasalahan yang diangkat. Individu dengan jumlah tertentu ini kemudian dibangkitkan sebagai populasi awal. Lalu tiap-tiap individu di dalam populasi diuji tingkat kecocokannya dengan menggunakan fungsi fitness sehingga masing-masing individu tersebut memiliki nilai kecocokan. Berdasarkan nilai fitness tersebut kemudian dipilih sejumlah individu sebagai calon orang tua. Dengan menggunakan operator genetika pada orangtua tersebut maka dihasilkan generasi baru yang berjumlah sama dengan generasi sebelumnya. Proses tersebut berlangsung terus hingga pada akhirnya diperoleh individu yang paling mendekati solusi yang sebenarnya dari fungsi yang dievaluasi.

Cara kerja algoritma secara garis besar dapat digambarkan dengan diagram alir sebagai berikut



Gambar 2.10. Diagram alir algoritma genetika

2.9 Sifat Magnetis Barium Hexaferrit dan Strontium Hexaferrit

2.9.1 Barium Hexaferrit

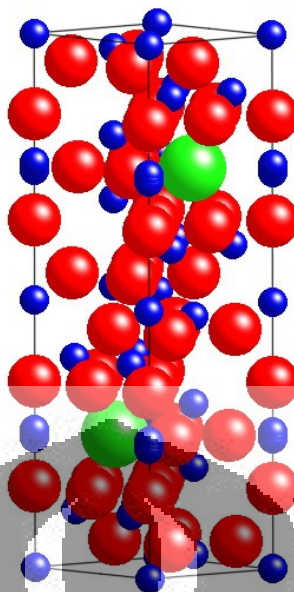
Barium hexaferrit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ merupakan bahan ferrimagnetik. Bahan Ferrimagnetik menunjukkan magnetisasi spontan pada temperatur ruang seperti halnya bahan ferromagnetik, sehingga hal tersebut menjadikan bahan ferrimagnetik menjadi penting dalam perindustrian. Serupa dengan bahan ferromagnetik, bahan ferrimagnetik juga memiliki domain yang tersaturasi dengan sendirinya. Bahan ferrimagnetik baru dikenal setelah Neel mempublikasikan makalahnya pada tahun 1948, sebelumnya bahan ferrimagnetik selalu diasosiasikan dengan bahan ferromagnetik karena adanya persamaan diantara keduanya. Persamaan bahan ferrimagnetik dengan bahan ferromagnetik adalah pada terjadinya magnetisasi spontan di bawah temperatur tertentu. Sedangkan perbedaannya terletak pada ukuran momen magnetik, bahan ferromagnetik memiliki momen magnetik berukuran sama, sedangkan pada bahan ferrimagnetik memiliki ukuran momen yang berbeda.

Bahan ferrimagnetik dapat dibagi menjadi dua kelompok utama yang memiliki struktur kristal berbeda [13] :

1. Kubik. Rumus umum untuk bahan yang berada pada kelompok ini adalah $MO.Fe_2O_3$, di mana M adalah ion logam divalen seperti Mn, Ni, Fe, Co, Mg dan lain-lain. Ferrit kobalt $CaO.Fe_2O_3$ adalah magnet keras (hard magnetic), tetapi ferrit kubus yang lainnya termasuk magnet lunak (soft magnetic).
2. Hexagonal. Oksida ferrimagnetik heksagonal jumlahnya banyak, tetapi bahan paling penting secara komersial adalah barium hexaferrit dengan rumus kimia $BaO_6.Fe_2O_3 (=BaFe_{12}O_{19})$ dan Strontium hexaferrit.

Sel satuan heksagonal yang dimiliki barium hexaferrit terdiri dari dua molekul sehingga jumlah atom-atom yang terdapat didalamnya menjadi $2 \times 32 = 64$ atom. Parameter kisi barium hexaferrit adalah sebagai berikut $c = 23,2\text{\AA}$ dan $a = 5,88\text{\AA}$. Ion Ba^{2+} dan O^{2-} berukuran besar dan hampir sama serta bersifat non magnetik, mereka tersusun sedemikian hingga dalam suatu tatanan *close packed*. Ion yang lebih kecil Fe^{3+} terletak pada lokasi interstisial.

Satu-satunya ion yang bersifat magnetik pada barium hexaferrite adalah Fe^{3+} , masing-masingnya memiliki momen magnetik $5 \mu_B$. Ion-ion Fe^{3+} ini terletak pada tiga lokasi kristal yang berbeda yaitu tetrahedral, octahedral dan heksahedral. Secara keseluruhan magnetisasi jenuh spesifik barium hexaferrit pada 0 K (σ_0) adalah 100 emu/gram, sementara magnetisasi jenuh spesifik 20°C (σ_s) besarnya 72 emu/gram. Magnetisasi jenuh barium hexaferrit pada 20°C (M_s) besarnya adalah 380 emu/cm^3 , sehingga $4\pi M_s = 660,176 \text{ Gauss}$.



Gambar 2.11. Struktur kristal $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Atom biru adalah Fe, atom hijau adalah Ba, atom merah adalah O (diambil dari [18])

Barium hexaferrit memiliki struktur gabungan antara hpc dan ccp atau fcc secara skematik ditunjukkan pada gambar 2.11. Terdapat 10 lapisan ion-ion besar (Ba^{2+} atau O^{2-}), dengan 4 ion pada tiap lapisnya. Delapan dari 10 lapisan ini terisi oleh oksigen, sedang 2 lainnya terisi oleh barium. Secara keseluruhan 10 lapis ini dapat dipandang sebagai 4 blok, dengan 2 blok kubus dan 2 blok heksagonal. Pada blok kubus susunan ion oksigen menempati lokasi tetrahedral dan oktahedral. Pada masing-masing blok heksagonal sebuah ion barium menggantikan ion oksigen di tengah dari tiga lapisan.

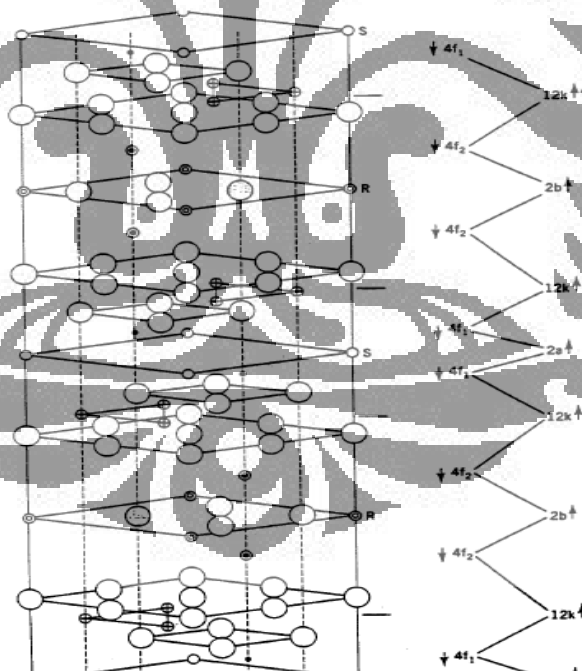
2.9.2 Strontium Hexaferrite

Sama seperti barium hexaferrite, strontium hexaferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) juga merupakan bahan ferrimagnetik. Parameter kisinya yaitu $c = 3,03\text{\AA}$ dan $a = 5,88\text{\AA}$ pada temperatur ruang, serta *space group* nya adalah $P6_3/mmc$. Atom-atom oksigen bersifat non magnetik dan tersusun dalam suatu tatanan *close packed*. Atom Sr dan Fe terletak pada lokasi interstitial [14].

Satu-satunya ion yang bersifat magnetik pada strontium hexaferrite adalah ion Fe^{3+} , masing-masingnya memiliki momen magnetik $40 \mu_B$ dan spin polarisasi $S = 5/2$. Secara keseluruhan magnetisasi jenuh (M_s) strontium hexaferrite pada

temperatur 0 K adalah 38 emu/gram dan koefisien intrinsik (iHc) nya adalah 525oe. Pada proses anealing selama 2 jam dengan temperatur 1000°C nilai magnetisasi jenuhnya meningkat menjadi 62 emu/gram dan koefisien intrinsiknya menjadi 1950oe [14].

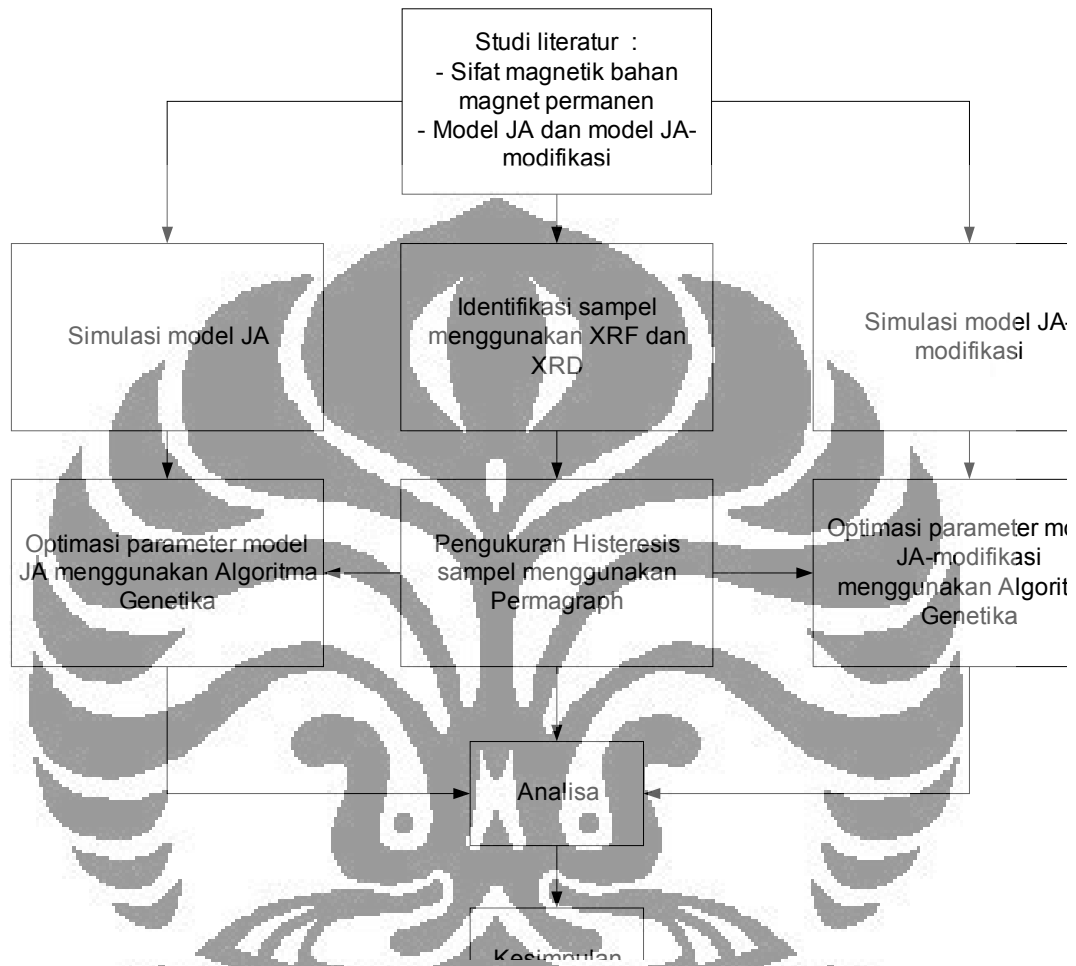
Strontium hexaferrite memiliki struktur gabungan antara hcp dan fcc. Terdapat 10 lapisan atom oksigen. Ion-ion Fe^{3+} terletak pada lima lokasi kristal yang berbeda seperti yang ditunjukkan gambar 2.13. Atom Fe pada lapisan 2a merupakan oktahedral dengan jarak antaratom Fe-O yang sama, sedang ion Fe dikoordinasi secara oktahedral di lapisan 4f2 dan 12k dengan jarak antaratom Fe-O yang berbeda-beda antara 1,85 Å hingga 2,37 Å. Atom Fe pada 4f1 berkoordinasi secara tetrahedral oleh empat ion oksigen, sedangkan pada 2b berkoordinasi dengan lima ion oksigen. Terdapat ikatan Fe-Fe dengan jarak antaratom yang pendek pada struktur ini. Atom Fe pada 4f2 memiliki ikatan Fe-Fe sebesar 2,7 Å. Ion Fe pada 12k membentuk jaringan dengan empat ion Fe lainnya dengan jarak antaratom sekitar 2,9Å hingga 3,0Å



Gambar 2.12. Struktur kristal $SrFe_{12}O_{19}$
(diambil dari [14])

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan pada bulan November 2008 sampai dengan Desember 2009. Pengukuran histeresis bahan menggunakan Permagraph magnetomer bertempat di Laboratorium Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia, Depok. Penggunaan peralatan identifikasi XRF dan XRD bertempat di Program Pascasarjana Ilmu Material, FMIPA, Universitas Indonesia, Salemba.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1 Alat yang digunakan

Alat yang dipakai pada penelitian ini adalah

1. Permagraph.
2. X ray Fluoresence (XRF).
3. X ray Difraction (XRD).
4. Laptop Acer Aspire 4920.

3.3.2 Bahan yang digunakan

Penelitian ini menggunakan bahan sebagai berikut :

1. Sampel 1 berbentuk pelet padatan berdiameter 12mm, tebal 3 mm.
2. Sampel 2 berbentuk pelet padatan berdiameter 10mm, tebal 5 mm.

3.4 Tahapan-tahapan Pelaksanaan Penelitian

3.4.1 Identifikasi Material dengan XRF dan XRD

Analisa dengan menggunakan XRF dilakukan untuk mengetahui unsur-unsur pada sampel. Identifikasi sampel dilakukan menggunakan XRD dengan spesifikasi eksperimen sebagai berikut : target sumber sinar-X yang digunakan adalah Co (cobalt) dengan panjang gelombang 1,78896 Å, generator voltage 40 kVolt dan *tube current* 30 mA. Metode yang telah digunakan adalah menggunakan standar sudut awal 20° sampai 90°.

3.4.2 Pengukuran Histeresis Magnet Sampel dengan Permagraph

Sampel 1 dan sampel 2 sebelumnya dipanaskan hingga temperatur 800°C agar kemagnetan bahan hilang, kemudian kurva histeresis diukur menggunakan permagraph. Permagraph merupakan salah satu jenis peralatan yang digunakan untuk mempelajari sifat magnetik bahan. Dengan alat ini akan diperoleh informasi berupa besaran-besaran sifat magnetik sebagai akibat perubahan medan magnet luar yang digambarkan dalam kurva histeresis. Analisa sampel dengan permagraph ini dilakukan dengan besar kuat medan magnet maksimum 150 kA/m, $dH/dt = 10\%$, $-I_{max} = 50\%$, $+I_{max} = 50\%$, dan $J_{max} = 0,6 T$.

3.4.3 Simulasi Model JA dan Model JA-modifikasi

Simulasi gejala histeresis model JA dan model JA-modifikasi dilakukan dengan menggunakan program MATLAB ver 7.1. Persamaan model JA yaitu persamaan magnetisasi total yang merupakan penjumlahan dari magnetisasi irreversibel dan magnetisasi reversibel. Persamaan magnetisasi irreversibel merupakan persamaan diferensial yaitu

$$M_{irr} = \delta_M \frac{(M_{an} - M)}{\delta k - \alpha(M_{an} - M)} \quad (3.1)$$

Persamaan ini dapat diselesaikan secara numerik dengan metode Euler. Sedangkan persamaan magnetisasi reversibel yaitu :

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (3.2)$$

Persamaan ini dapat diselesaikan dengan menghitung nilai M_{an} yaitu dari persamaan magnetisasi anhisteresis dan M_{irr} dari hasil solusi numerik metode Euler persamaan (3.1).

Sama halnya dengan model JA, persamaan model JA-modifikasi yaitu model JA-gaussian dan model JA-extended merupakan penjumlahan dari magnetisasi irreversibel dan magnetisasi reversibel. Yang membedakan dari kedua model tersebut dengan model JA yaitu pada nilai parameter koefisien pinning k . Untuk model JA Gaussian parameter k didefinisikan dengan

$$k = k_0 e^{-(H^2/2\sigma^2)} \quad (3.3)$$

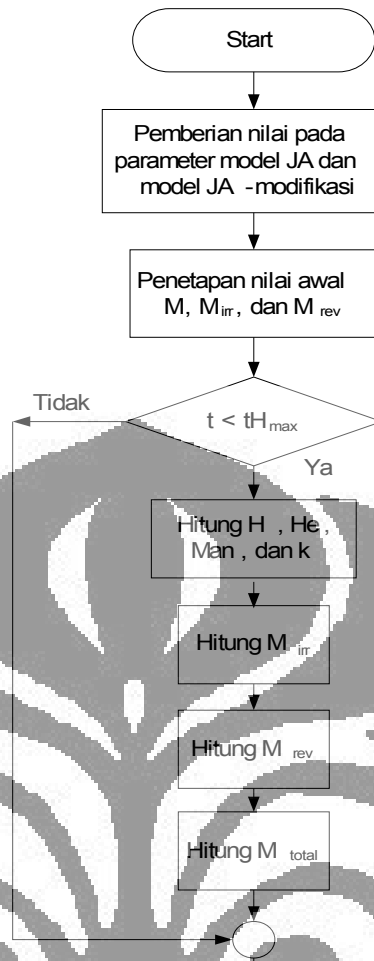
Sedangkan untuk model JA Extended, parameter k didefinisikan dengan

$$k = k_0 + \frac{e^{k_2(1-|M|/M_s)} - 1}{e^{k_2} - 1} (k_1 - k_0) \quad (3.4)$$

Program simulasi model JA dan model JA-modifikasi dilakukan berulang terus dengan mencari magnetisasi total untuk setiap nilai medan magnet luar dan akan berakhir apabila nilai t_{max} (*user input*) terlampaui. Variasi nilai medan magnet luar diperoleh menggunakan persamaan

$$H = H_m \sin(\omega t) \quad (3.5)$$

Secara skematis algoritma program simulasi model JA dan model JA-modifikasi adalah sebagai berikut :



Gambar 3.2. Algoritma program simulasi model JA dan model JA-modifikasi

Untuk validasi, program-program tersebut disimulasikan menggunakan parameter model JA yang diperoleh dari makalah [15], dan parameter model JA-modifikasi, yaitu model JA gaussian dari kurva histeresis bahan siemens N30 [4] dan parameter model JA extended dari kurva histeresis bahan power ferrite $Mn_{0,7}Zn_{0,24}Fe_{2,06}O_4$ [5]. Adapun parameter-parameter tersebut disajikan dalam tabel berikut ini

Tabel 3.1. Parameter Model JA, Model JA Gaussian dan Model JA Extended dari makalah [15], [4], dan [5]

Model JA [15]		Model JA-Gaussian (Bahan Siemens N30) [4]		Model JA-Extended (Power ferrite $Mn_{0,7}Zn_{0,24}Fe_{2,06}O_4$) [5]	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
M_s	$1,6 \times 10^6$ A/m	M_s	2.68.562 A/m	M_s	$4,986 \times 10^5$ A/m
K	2000 A/m	k_0	12,67 A/m	k_0	999,3 A/m
A	0,001	α	$2,91 \times 10^{-6}$	k_1	35,75 A/m
A	1000 A/m	a	9,29 A/m	k_2	-8,66 A/m
c	0,1	c	0,497	α	$2,4 \times 10^{-4}$
		SD	16,55	a	51,02 A/m
				c	0,658

3.4.4 Pembuatan Program Optimasi Parameter Model JA dan Model JA-modifikasi

Data histeresis yang telah diperoleh dari hasil simulasi model JA dan model JA-modifikasi, yaitu model JA-gaussian dan model JA-extended kemudian dicari kembali melalui optimasi. Optimasi adalah proses untuk mendapatkan nilai minimum atau maksimum secara sistematis dari suatu fungsi, dalam hal ini untuk memperoleh nilai parameter minimum dari model JA dan model JA-modifikasi.

Program optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi dari suatu set data dibuat menggunakan program MATLAB. Algoritma Genetika digunakan untuk optimasi nilai parameter model dari data histeresisnya. Pada program MATLAB ver 7.1 telah tersedia *toolbox* algoritma genetika yaitu *Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox* (GADS) ver 2.0. Penggunaan *toolbox* ini dilakukan dengan menggunakan *control panel* yang telah tersedia kemudian sebuah kode program MATLAB dapat dibangkitkan berdasarkan operator algoritma genetika yang telah dipilih. Adapun operator algoritma genetika yang digunakan yaitu seperti yang disajikan pada tabel 3.2

Tabel 3.2. Operator algoritma genetika yang digunakan dalam program optimasi

Operator	Opsi
Jumlah populasi	50
Jumlah elit	5
Jumlah generasi	400
Fungsi kecocokan	<i>Fit Scaling Rank</i>
Fungsi pindah silang	<i>Crossover Heuristic 1.2</i>
Fungsi mutasi	<i>Mutation Gaussian 1.1</i>
Fungsi seleksi	<i>Selection Roullete</i>

Proses pencarian nilai parameter dilakukan beberapa kali hingga diperoleh tingkat kecocokan yang terbaik yang didefinisikan dengan fungsi fitness atau fungsi evaluasi $fval$. Fungsi $fitness$ yang digunakan pada algoritma genetika ini yaitu nilai rata-rata jumlah kuadrat selisih nilai model dan nilai pada data percobaan atau *mean sum squared error* (MSSE) [11].

$$fval = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{exp} - M_{model})_i^2}{N \cdot M_s} \quad (3.6)$$

Dengan:

M_{exp} : Nilai magnetisasi dari data eksperimen.

M_{model} : Nilai magnetisasi yang dari model.

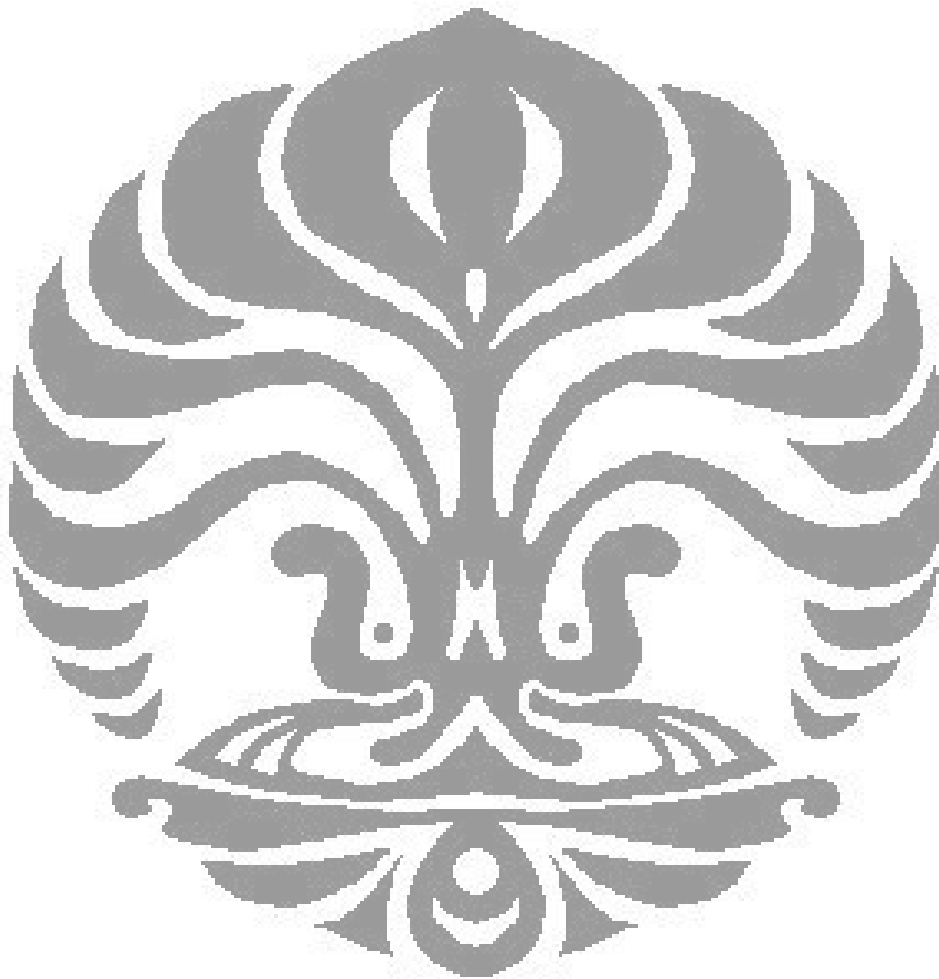
N : Jumlah titik data M

M_s : Nilai magnetisasi jenuh dari data eksperimen

Untuk validasi atau pengujian terhadap ketepatan program dalam menaksir parameter dari suatu set data percobaan, data histeresis nilai M dan H hasil dari program model JA dan model JA-modifikasi, yang telah dibuat selanjutnya disimulasikan sebagai data percobaan dan disimpan ke dalam file matlab (tipe data: .mat). Dari data tersebut kemudian dicari nilai parameternya menggunakan program optimasi. Tingkat validasi program dapat terlihat dari kecocokan antara parameter yang digunakan dengan parameter yang dihasilkan dari program optimasi parameter model.

3.4.5 Optimasi Parameter Model JA dan Model JA-Modifikasi dari Data Histeresis Sampel

Data histeresis yang telah diperoleh dari hasil pengukuran sampel-sampel diatas kemudian ditentukan nilai parameternya dari model JA dan model JA-modifikasi melalui proses optimasi menggunakan algoritma genetika. Operator algoritma yang digunakan sama dengan yang tercantum pada tabel 3.2 dan variasi dilakukan dengan mengubah nilai batas populasi awal.



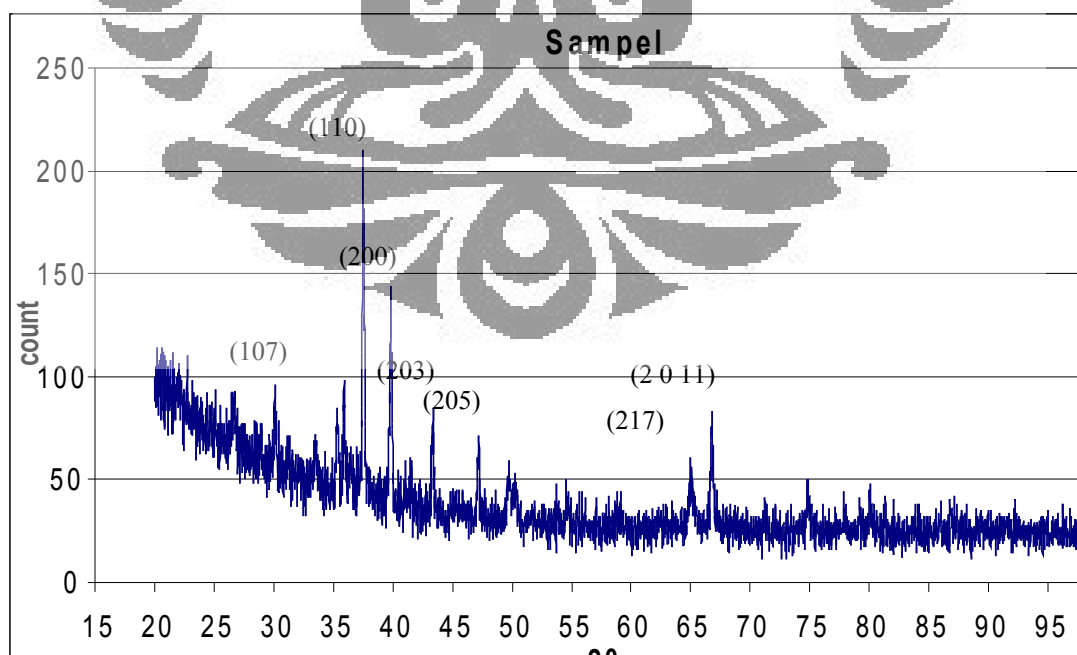
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Identifikasi Material dengan XRF dan XRD

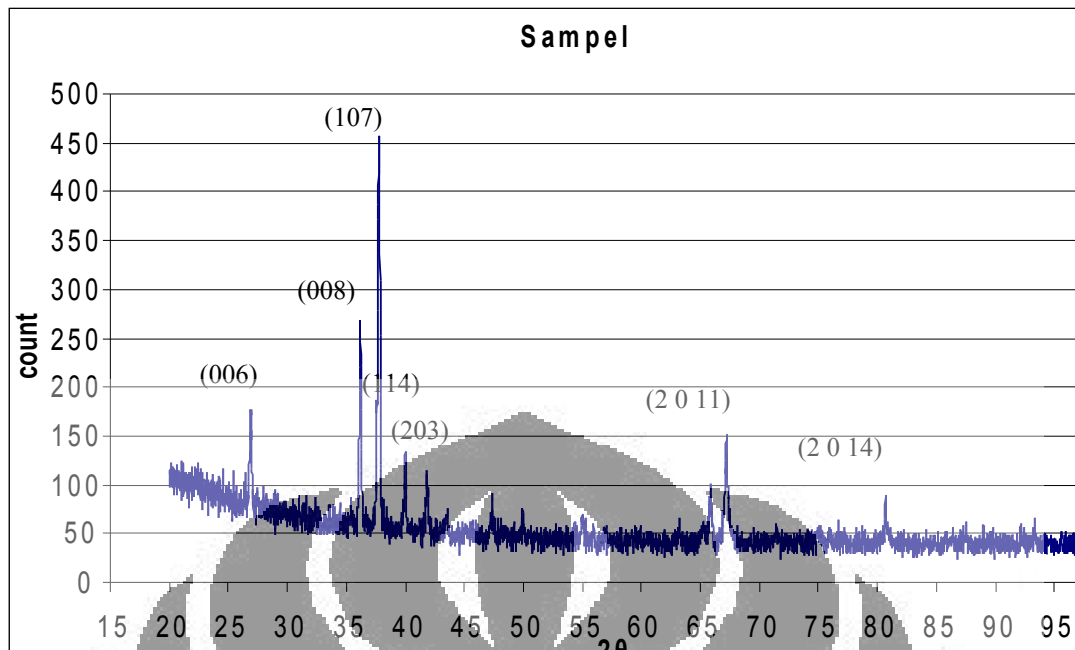
Dari hasil analisa dengan menggunakan XRF diketahui bahwa sampel 1 mengandung Fe (wt : 76,2728%, at/mole: 84,2468%), Ba (wt: 20,2714%, at/mole 9,1048%), S (wt: 3,4558%, at/mole: 6,6464%). Dan sampel 2 mengandung Fe (wt: 87,2231%, at/mole: 91,5859%), Sr (wt :11,6879%, at/mole: 7,8219%), Ag (wt: 1,0899%, at/mole: 0,5925%) .

Unsur lain yaitu atom ringan seperti unsur Karbon, Nitrogen dan Oksigen tidak dapat terdeteksi menggunakan XRF, begitupula dengan senyawa. XRF belum dapat memberikan informasi mengenai struktur material, sehingga dibutuhkan informasi lainnya yaitu melakukan pengukuran dengan XRD.

Dari hasil difraksi sinar-X terhadap sampel dengan menggunakan XRD didapatkan pola difraksi yang ditampilkan dengan menggunakan *software* APD. Pola Difraksi ini kemudian dikonversi menggunakan *software* Bella. Adapun pola difraksi sampel 1 dan sampel 2 yang berupa grafik Intensitas terhadap sudut 2θ ini ditunjukkan pada gambar 4.1 dan gambar 4.2.



Gambar 4.1. Grafik Intensitas vs 2θ sampel 1



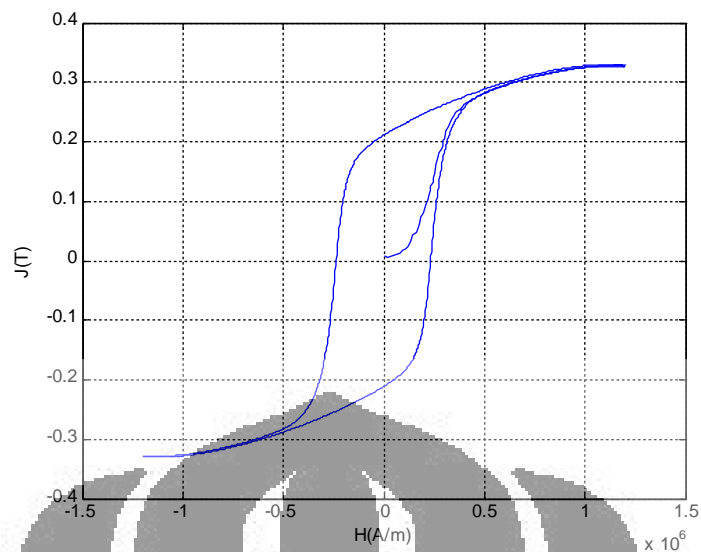
Gambar 4.2. Grafik Intensitas vs 2θ sampel 2

Dengan membandingkan data pola difraksi gambar 4.1 dan gambar 4.2 dengan data pola difraksi standar yang terhimpun dalam ICDD (*International Centre for Diffraction*) yaitu dengan menggunakan software PC-PDFWIN, diketahui bahwa sampel 1 dan sampel 2 mengandung tiga unsur yaitu :

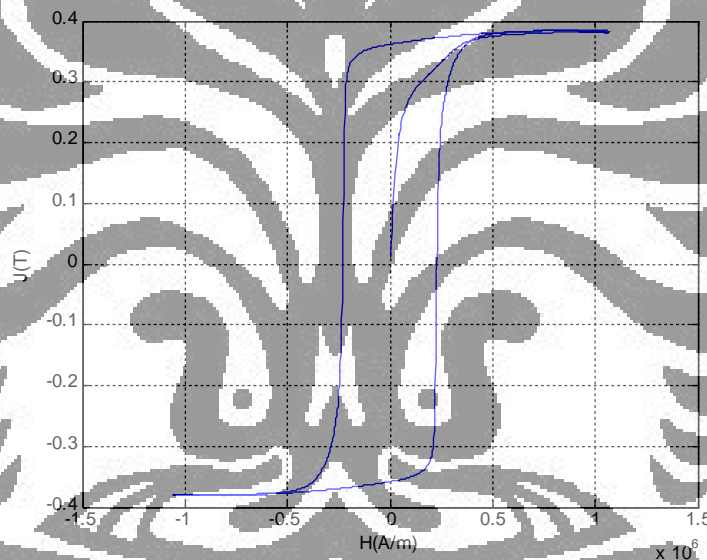
- Sampel 1 yaitu $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (JCPDS 430002) – Heksagonal, dengan *space group* $P63/mmc$, memiliki parameter kisi $a = 5,892 \text{ \AA}$, $b = 5,892 \text{ \AA}$, $c = 23,18 \text{ \AA}$.
- Sampel 2 yaitu $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ (JCPDS 331340) – Heksagonal, dengan *space group* $P63/mmc$, memiliki parameter kisi $a = 5,886 \text{ \AA}$, $b = 5,886 \text{ \AA}$, $c = 23,03 \text{ \AA}$.

4.2 Pengukuran Histeresis Magnet dengan Permagraph

Output yang dihasilkan dari permagraph yaitu kurva histeresis J vs H . Berikut adalah hasil pengukuran histeresis sampel $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dan sampel $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$.



Gambar 4.3. Kurva histeresis sampel $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$



Gambar 4.4. Kurva histeresis sampel $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$

Nilai besaran magnetis yang diperoleh dari kurva histeresis bahan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (gambar 4.3), yaitu :

- $H_c = 2,32 \times 10^5 \text{ A/m}$
- $M_r = 1,69 \times 10^5 \text{ A/m}$
- $(BH)_{\max} = 2,54 \times 10^5 \text{ A/m}$
- $M_s = 2,62 \times 10^5 \text{ A/m}$

Sedangkan nilai besaran magnetis dari kurva histeresis bahan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ (gambar 4.4), yaitu :

- $H_c = 2,28 \times 10^5 \text{ A/m}$

- $M_r = 1,88 \times 10^5 \text{ A/m}$
- $(BH)_{\max} = 6,55 \times 10^5 \text{ A/m}$
- $M_s = 3,06 \times 10^5 \text{ A/m}$

Nilai besaran magnetisasi jenuh yang terukur dari permagraph merupakan magnetisasi jenuh teknis (M_s). Nilai magnetisasi jenuh teknis merupakan nilai yang terukur pada suhu di atas 0 K di mana momen magnet di dalam bahan belum seluruhnya searah dengan medan magnet luar karena bahan tersebut masih memiliki energi termal. Nilai magnetisasi jenuh terjadi ketika semua dipol telah searah dengan medan magnet luar H yang dapat dicapai pada temperatur 0 K. Nilai magnetisasi jenuh pada keadaan tersebut disimbolkan dengan besaran M_0 . Nilai M_0 bahan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ adalah $3,58 \times 10^5 \text{ A/m}$, sedangkan untuk bahan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ adalah $3,18 \times 10^5 \text{ A/m}$ [20].

Dari kurva histeresis bahan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ terlihat bahwa nilai magnetisasi remanen yang diperoleh cukup besar yaitu lebih dari separuh nilai magnetisasi jenuhnya ($M_r \geq \frac{1}{2}M_s$), sehingga dapat dikatakan bahan ini bersifat anisotropi. Bahan ferromagnetik yang bersifat anisotropi akan memiliki luas kurva histeresis yang lebih besar [2]. Sifat anisotropi pada bahan dapat memberikan pengaruh pada proses magnetisasi bahan, di mana rotasi domain irreversibel dan rotasi domain reversibel dipengaruhi oleh *magnetocrystalline anisotropy*.

Untuk suatu kristal tertentu, besarnya energi dari momen magnetik mempunyai nilai yang bervariasi tergantung pada sumbu kristal. Atom-atom yang memiliki energi terbesar akan menempati sumbu yang disebut dengan *hard axis*, dan atom-atom yang memiliki energi terendah akan menempati sumbu yang disebut dengan *easy axis*. Variasi besarnya energi terhadap orientasi kristal ini dikenal dengan nama energi magnetokristalin (*magnetocrystalline anisotropy energy*). Akibat adanya energi anisotropi magnetokristalin, maka jika magnetisasi telah searah dengan *easy axis*, maka diperlukan usaha yang lebih besar dibandingkan dengan jika magnetisasi telah searah dengan *hard axis* [21].

Pada penelitian ini digunakan model JA dan Model JA-modifikasi, dimana pada model ini diasumsikan bahan bersifat isotropi [6]. Dengan kata lain model-model tersebut mengabaikan sifat keanisotropian bahan yang memberikan pengaruh pada proses magnetisasi bahan. Sehingga pemodelan yang dilakukan

terhadap bahan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ kemungkinan akan menghadapi keterbatasan dalam memprediksi sifat magnetik bahan tersebut.

4.3 Validasi Program Simulasi Model JA dan Model JA-Modifikasi

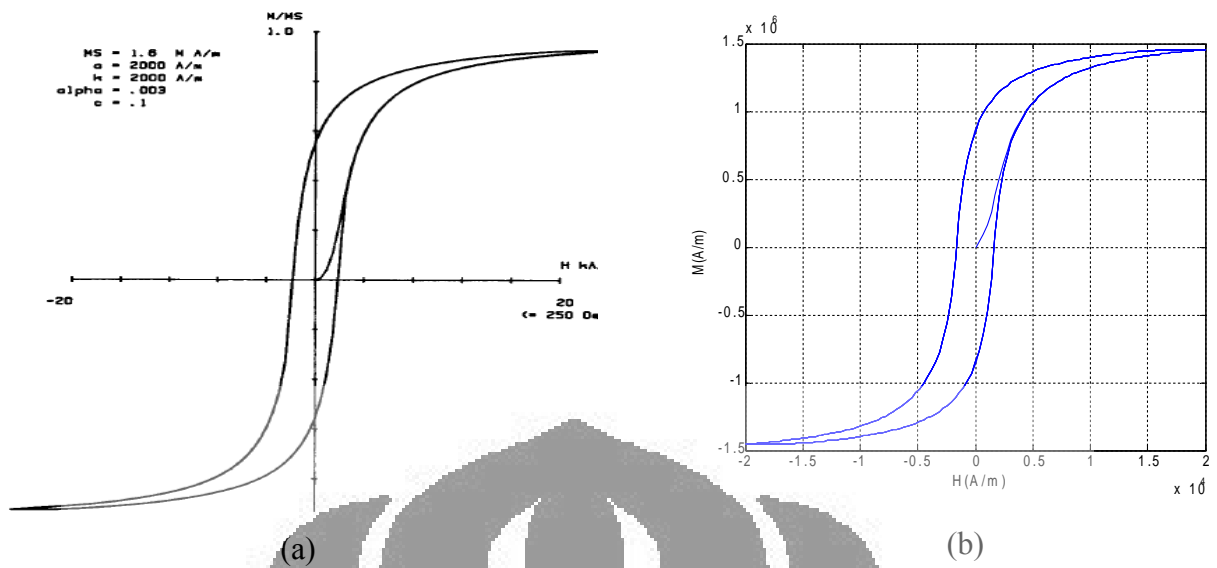
Untuk mengetahui ketepatan hasil simulasi model JA yang telah dibuat, Dilakukan validasi program simulasi yaitu dengan membandingkan kurva histeresis model JA menggunakan nilai parameter yang terdapat pada makalah [15] dengan kurva histeresis yang digambarkan pada makalah tersebut. Begitu pula validasi program simulasi model JA-modifikasi yaitu kurva histeresis model JA-gaussian berdasarkan parameter model dari bahan Siemens N30 yang terdapat pada makalah [4], dan kuva histeresis model JA-extended berdasarkan parameter model dari bahan power ferrite $\text{Mn}_{0,7}\text{Zn}_{0,24}\text{Fe}_{2,06}\text{O}_4$ yang terdapat pada makalah[5]. Adapun parameter-parameter tersebut disajikan dalam tabel berikut ini :

Tabel 4.1. Parameter model JA, model JA-gaussian dan model JA-extended dari makalah [15], [4], dan [5]

Model JA [15]		Model JA-Gaussian (Bahan Siemens N30) [4]		Model JA-Extended (Power ferrite $\text{Mn}_{0,7}\text{Zn}_{0,24}\text{Fe}_{2,06}\text{O}_4$) [5]	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
M_s	$1,6 \times 10^6 \text{ A/m}$	M_s	268562 A/m	M_s	$4,986 \times 10^5 \text{ A/m}$
k	2000 A/m	k_0	12,67 A/m	k_0	999,3 A/m
α	0,003	α	$2,91 \times 10^{-6}$	k_1	35,75 A/m
a	2000 A/m	a	9,29 A/m	k_2	-8,66 A/m
c	0,1	c	0,497	α	$2,4 \times 10^{-4}$
		SD	16,55	a	51,02 A/m
				c	0,658

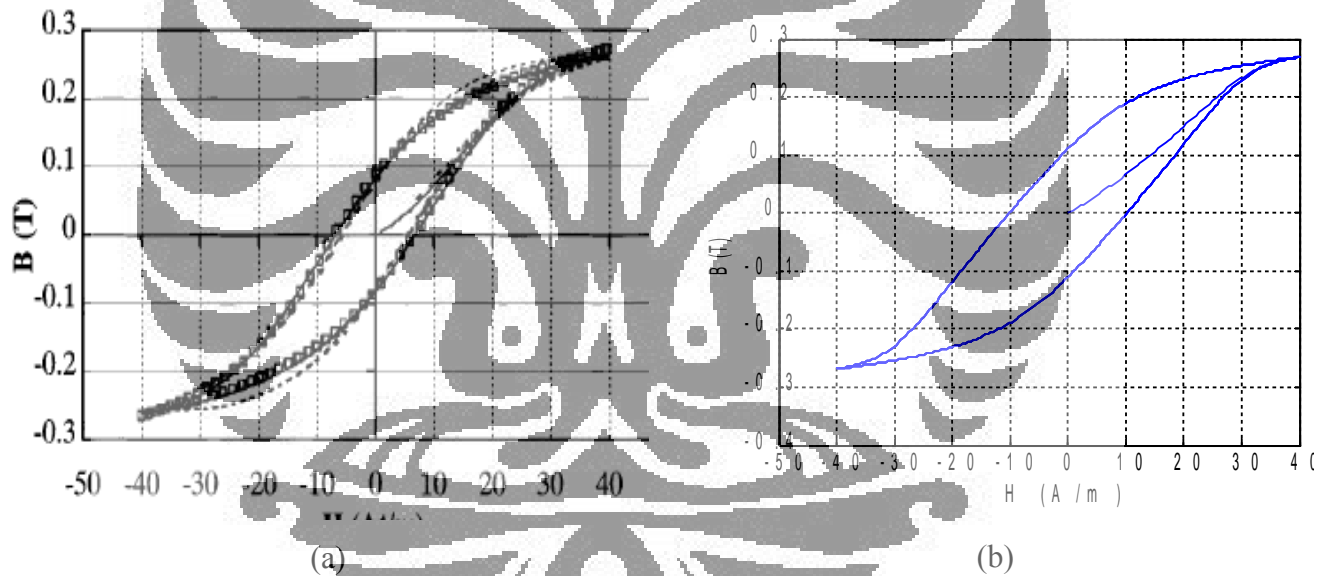
Berikut adalah kurva histeresis hasil simulasi model JA, model JA-gaussian, model JA-extended yang dibandingkan dengan kurva histeresis berdasarkan makalah-makalahnya.

- Model JA :



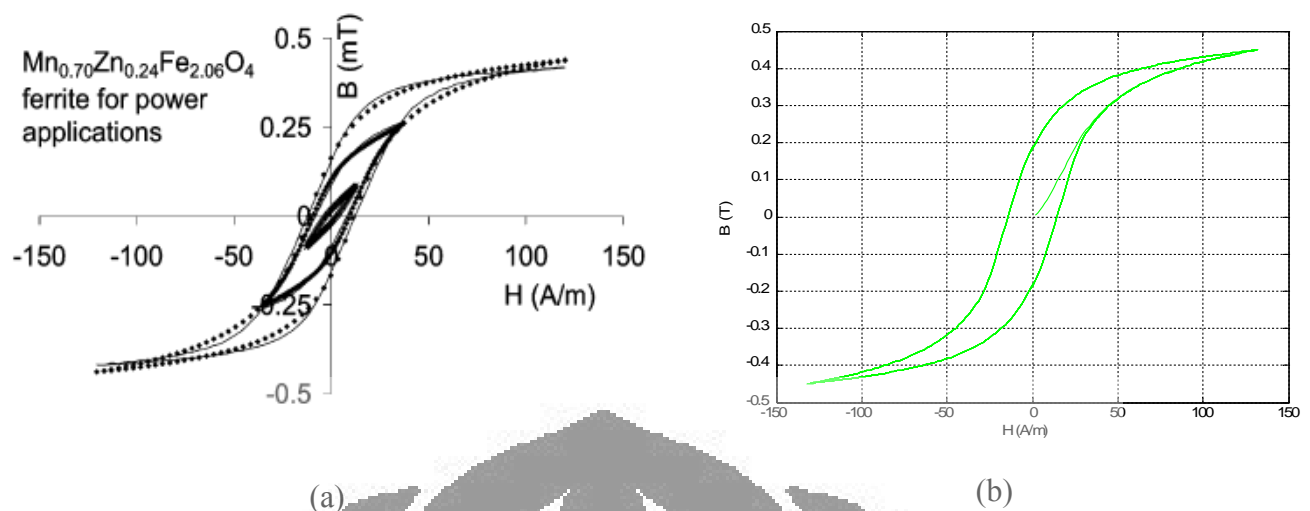
Gambar 4.5. Perbandingan kurva histeresis model JA
(a) sesuai referensi [15], (b) hasil simulasi

- Model JA-Gaussian



Gambar 4.6.. Perbandingan kurva histeresis model JA-gaussian
sesuai referensi [4], (b) hasil simulasi.

- Model JA-Extended :



Gambar 4.7. Perbandingan kurva histeresis M-H model JA-extended (a) sesuai referensi [5], (b) hasil simulasi.

Dengan membandingkan hasil simulasi kurva histeresis model JA dan model JA-modifikasi dengan kurva histeresis dari masing-masing makalah yang ditunjukkan pada gambar 4.5, gambar 4.6, dan gambar 4.7, terlihat bahwa kurva histeresis dari setiap model cocok dengan kurva histeresis dari makalahnya masing-masing. Hasil tersebut memberi keyakinan bahwa program MATLAB yang dibuat telah siap digunakan untuk mensimulasikan model JA dan model JA-modifikasi.

4.4 Validasi Program Optimasi Parameter Model JA dan Model JA-Modifikasi

Optimasi parameter dari hasil simulasi model JA dan model JA-modifikasi diatas dilakukan menggunakan algoritma genetika dan program MATLAB. Program MATLAB versi 7.1 telah menyediakan *toolbox* algoritma genetika sehingga memudahkan untuk membuat program optimasi parameter dengan fungsi-fungsi algoritma genetika yang diinginkan. Pada program optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi ini dilakukan beberapa variasi fungsi algoritma genetika. Variasi ini dilakukan disetiap pengulangan yaitu pada nilai batas awal populasi dan jumlah generasi hingga diperoleh hasil yang terbaik.

Tabel 4.2. Opsi algoritma genetika model JA, model JA gaussian, dan model JA extended

Opsi	Pengulangan ke-1	Pengulangan ke-2	Pengulangan ke-3
------	------------------	------------------	------------------

Batas populasi awal model JA			
M_s (A/m)	$1 \times 10^6 - 9 \times 10^6$	$1,4 \times 10^6 - 1,8 \times 10^6$	$1,4 \times 10^6 - 1,8 \times 10^6$
k (A/m)	500 - 1000	1500 - 2500	1500 - 2500
α	0 - 1	0 - 0,01	0 - 0,01
a (A/m)	500 - 5000	1500 - 2500	1500 - 2500
c	0 - 1	0 - 0,5	0 - 0,5
Batas populasi awal model JA-gaussian			
M_s (A/m)	$1 \times 10^5 - 9 \times 10^5$	$1 \times 10^5 - 3 \times 10^5$	$1 \times 10^5 - 3 \times 10^5$
k_0 (A/m)	1 - 100	5 - 20	5 - 20
α	$1 \times 10^{-6} - 9 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-6}$
a (A/m)	0 - 50	0 - 15	0 - 15
c	0 - 1	0 - 1	0 - 1
SD	0 - 20	0 - 20	0 - 20
Batas populasi awal model JA-extended			
M_s (A/m)	$1 \times 10^4 - 1 \times 10^6$	$1 \times 10^4 - 1 \times 10^6$	$1 \times 10^5 - 1 \times 10^6$
k_0 (A/m)	50 - 1000	100 - 1000	500 - 1000
k_1 (A/m)	1 - 100	10 - 100	20 - 50
k_2 (A/m)	-100 - 10	-15 - 10	-15 - 10
α	$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$
a (A/m)	1 - 100	10 - 100	40 - 60
c	0 - 1	0 - 1	0 - 1
Jumlah populasi	50	50	50
Jumlah elit	5	5	5
Jumlah generasi	100	100	400
Fungsi kecocokan	@fitscaligrank	@fitscaligrank	@fitscaligrank
Fungsi pindah silang	@crossoverheuristic	@crossoverheuristic	@crossoverheuristic
	1.2	1.2	1.2
Fungsi mutasi	@mutationgaussian	@mutationgaussian	@mutationgaussian
	1.1	1.1	1.1
Fungsi seleksi	@selectionroullete	@selectionroullete	@selectionroullete

Validasi program optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi dilakukan dengan mencocokkan parameter hasil optimasi dengan parameter yang digunakan untuk melakukan simulasi model JA dan model JA-modifikasi yaitu berdasarkan makalah [14], [4], dan [5]. Berikut adalah hasil optimasi nilai parameter model JA dan model JA-modifikasi :

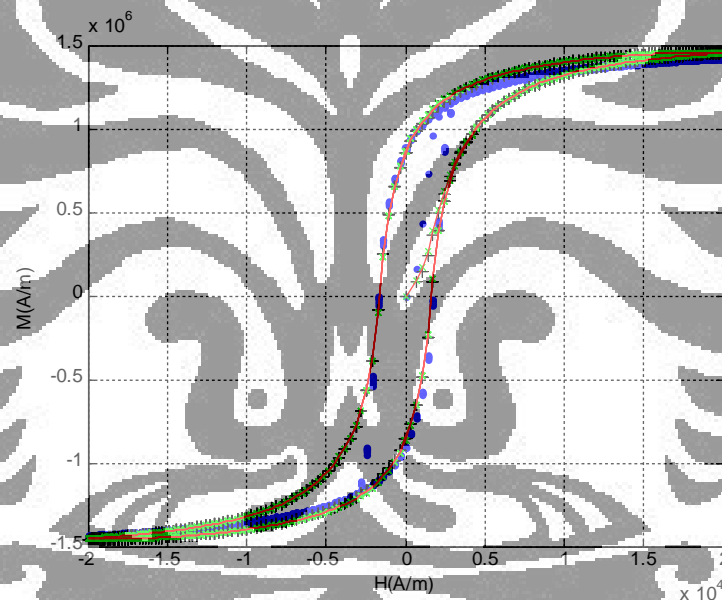
4.4.1 Validasi Program Optimasi Parameter Model JA

Hasil optimasi parameter model JA disajikan pada tabel berikut

Tabel 4.3. Hasil optimasi parameter model JA

Parameter	Parameter dari Literatur [15]	Parameter Hasil Optimasi		
		1	2	3
$fval$		$3,12 \times 10^{-3}$	$6,02 \times 10^{-6}$	$1,14 \times 10^{-6}$
M_s (A/m)	$1,60 \times 10^6$	$1,36 \times 10^6$	$1,62 \times 10^6$	$1,60 \times 10^6$
k (A/m)	2000	4270	2020	1980
a (A/m)	0,003	0,0052	0,0034	0,0029
α	2000	2170	2220	1930
c	0,1	1,1362	0,0638	0,1291

Perbandingan antara kurva model dengan kurva data percobaan ditunjukkan pada gambar berikut ini.

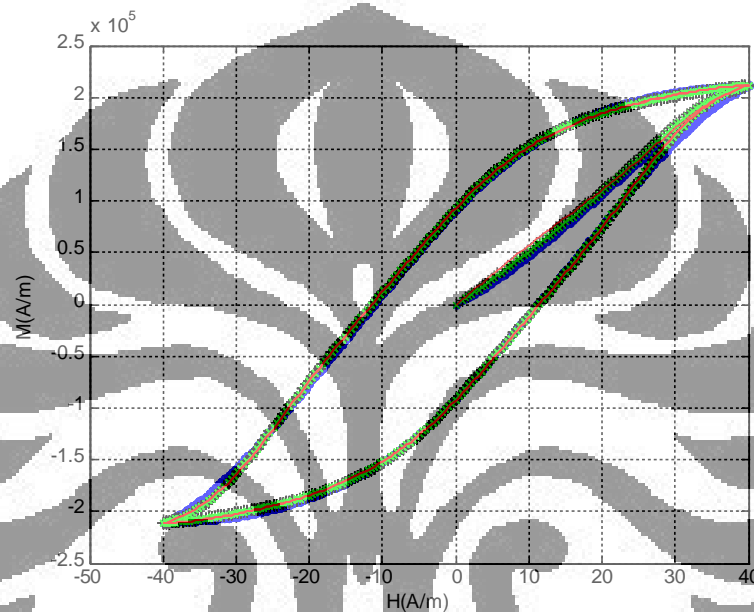


Gambar 4.8. Kurva Histeresis Hasil Optimasi parameter model JA
 Garis merah menyatakan kurva hasil pengukuran,
 garis biru menyatakan hasil optimasi pengulangan ke-1,
 garis hitam menyatakan hasil optimasi pengulangan ke-2,
 garis hijau menyatakan hasil optimasi pengulangan ke-3

4.4.2 Validasi Program Optimasi Parameter Model JA Gaussian

Tabel 4.4. Hasil optimasi parameter model JA-gaussian

Parameter	Parameter dari Literatur [4]	Parameter Hasil Optimasi		
		1	2	3
$fval$		$7,39 \times 10^{-4}$	$2,46 \times 10^{-4}$	$6,43 \times 10^{-6}$
M_s (A/m)	268562	273680	251060	255840
k_0 (A/m)	12,67	11,67	13,47	13,16
α	$2,91 \times 10^{-5}$	$4,73 \times 10^{-6}$	$7,10 \times 10^{-8}$	$2,80 \times 10^{-5}$
a (A/m)	9,29	8,13	6,28	6,88
c	0,49	0,28	0,33	0,31
SD	16,55	20,45	15,84	16,53



Gambar 4.9. Kurva Histeresis Hasil Optimasi parameter model JA-gaussian.

Garis merah menyatakan kurva hasil pengukuran,
 garis biru menyatakan hasil optimasi pengulangan ke-1,
 garis hitam menyatakan hasil optimasi pengulangan ke-2,
 garis hijau menyatakan hasil optimasi pengulangan ke-3

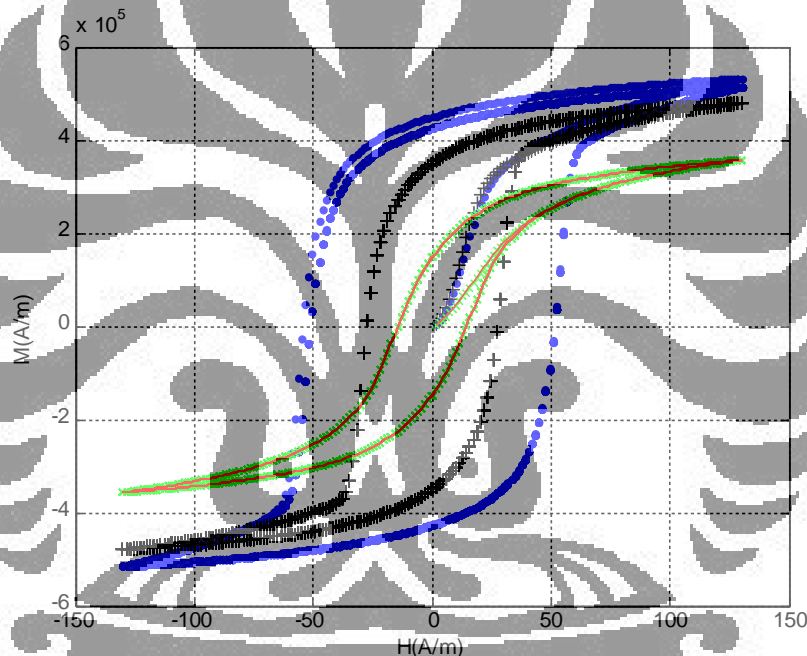
4.4.3 Validasi Program Optimasi Parameter Model JA Extended

Nilai parameter model JA-extended yang diperoleh dari hasil optimasi menggunakan algoritma genetika yaitu disajikan pada tabel berikut

Tabel 4.5. Hasil optimasi parameter model JA-extended

Parameter	Parameter dari Literatur [5]	Parameter Hasil Optimasi		
		1	2	3
$fval$		$7,39 \times 10^{-4}$	$2,46 \times 10^{-4}$	$6,43 \times 10^{-7}$
a (A/m)	51,02	51,51	45,46	52,28
k_0 (A/m)	999,30	544,52	211,97	845,94
k_1 (A/m)	35,75	156,04	57,04	34,14
k_2 (A/m)	-8,66	-65,90	-13,17	-8,10
c	0,66	0,59	0,70	0,65
α	$2,40 \times 10^{-4}$	$3,01 \times 10^{-4}$	$2,66 \times 10^{-4}$	$2,45 \times 10^{-4}$
M_s	$4,99 \times 10^5$	$7,40 \times 10^5$	$5,99 \times 10^5$	$5,01 \times 10^5$

Perbandingan antara kurva model dengan kurva data percobaan dapat dilihat pada gambar berikut ini



Gambar 4.10. Kurva Histeresis Hasil Optimasi parameter model JA-Extended.

Garis merah menyatakan kurva hasil pengukuran,
 garis biru menyatakan hasil optimasi pengulangan ke-1,
 garis hitam menyatakan hasil optimasi pengulangan ke-2,
 garis hijau menyatakan hasil optimasi pengulangan ke-3

Tingkat kecocokan antara hasil optimasi dengan nilai eksperimen dapat ditunjukkan dengan nilai fungsi evaluasi $fval$. Nilai $fval$ yang semakin kecil artinya memiliki tingkat kecocokan yang tinggi terhadap nilai eksperimen, begitu pula sebaliknya. Dari hasil optimasi parameter model JA, model JA-gaussian dan model JA-extended pada tabel 4.3, tabel 4.4, dan tabel 4.5, serta gambar 4.8, gambar 4.9, dan gambar 4.10, terlihat bahwa terdapat perbedaan tingkat kecocokan hasil optimasi yang cukup jelas dari pengulangan ke-1, pengulangan

ke-2, dan pengulangan ke-3 terhadap nilai eksperimen. Dengan rentang nilai batas populasi awal yang lebih kecil pada pengulangan ke-2 dapat menghasilkan optimasi parameter yang lebih baik. Kemudian dengan jumlah generasi yang lebih besar pada pengulangan ke-3 dapat diperoleh nilai parameter yang lebih mendekati nilai eksperimen.

Rentang nilai batas populasi awal yang lebih kecil akan mempermudah proses optimasi menggunakan algoritma untuk menemukan nilai parameter terbaik selama rentang nilai batas populasi awal tersebut masih memuat solusi yang dicari.

Dengan jumlah generasi yang lebih besar maka semakin besar pula jumlah individu yang dibangkitkan sebagai populasi disetiap iterasinya. Tiap-tiap individu di dalam populasi ini kemudian diuji tingkat kecocokannya hingga diperoleh individu terbaik. Hal ini berarti semakin besar jumlah generasi maka semakin besar pula peluang diperoleh nilai individu atau nilai parameter yang paling mendekati solusi sebenarnya.

4.5 Optimasi Parameter Model JA dan Model JA-Modifikasi dari Data Histeresis $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

Program optimasi penentuan model JA dan model JA-modifikasi yang telah divalidasi seperti diuraikan di atas kemudian digunakan untuk menentukan parameter model JA dan model JA-modifikasi dari data histeresis $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ menggunakan algoritma genetika.

Pada optimasi parameter ini dilakukan variasi pada nilai batas populasi awal. Pemberian nilai batas populasi awal ini tidak menghalangi algoritma genetika untuk menemukan solusi di luar batas tersebut.

Untuk opsi algoritma genetika lainnya disajikan pada tabel berikut :

Tabel 4.6. Fungsi algoritma gentika yang digunakan dalam optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi dari data histeresis bahan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

Fungsi	Opsi
Jumlah populasi	50
Jumlah elit	5
Jumlah generasi	400
Fungsi kecocokan	<i>Fit Scaling Rank</i>
Fungsi pindah silang	<i>Crossover Heuristic 1.2</i>

Fungsi mutasi	<i>Mutation Gaussian 1.1</i>
Fungsi seleksi	<i>Selection Roulette</i>

Berikut adalah hasil dari optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi dari data histeresis bahan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$:

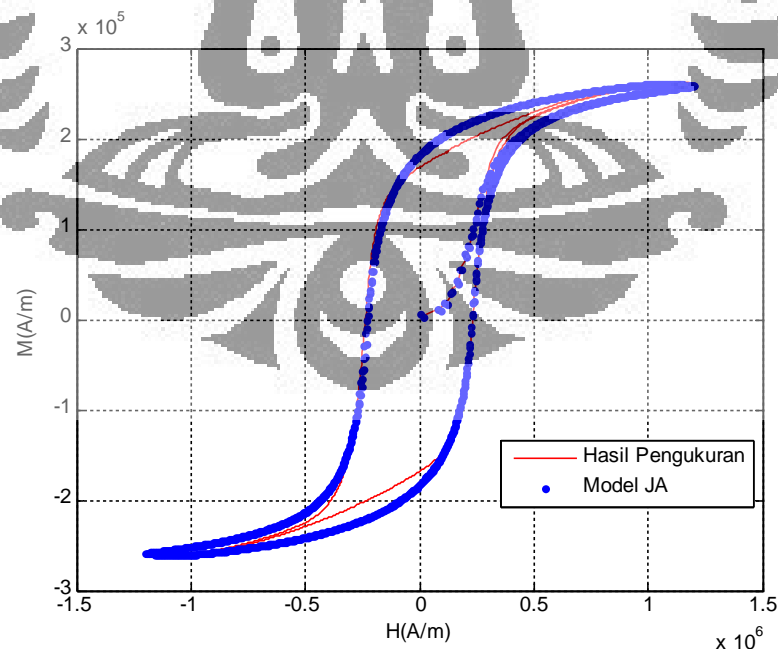
1. Model JA

Tabel 4.7. Nilai batas populasi awal algoritma genetika pada optimasi parameter model JA

Opsi	Pengulangan ke-1	Pengulangan ke-2	Pengulangan ke-3
Batas populasi awal :			
M_s (A/m)	0 - 1×10^5	1×10^5 - 3×10^5	1×10^5 - 3×10^5
k (A/m)	0 - 1×10^5	0 - 5×10^5	1×10^4 - 5×10^5
α	0 - 1	0 - 1	0 - 1
a (A/m)	0 - 1×10^5	0 - 1×10^5	1×10^3 - 5×10^5
c	0 - 1	0 - 1	0 - 1

Tabel 4.8. Nilai parameter model JA hasil optimasi

No	Nilai Kecocokan (<i>fval</i>)	Nilai Parameter				
		M_s (A/m)	k (A/m)	α	a (A/m)	c
1	0,005364	$2,84 \times 10^5$	$2,82 \times 10^5$	1,137	$1,30 \times 10^5$	-0,529
2	0,002127	$3,03 \times 10^5$	$2,93 \times 10^5$	2,520	$2,54 \times 10^5$	-1,1615
3	0,001908	$2,61 \times 10^5$	$2,83 \times 10^5$	2,920	$2,96 \times 10^5$	-1,1208



Gambar 4.11. Kurva histeresis hasil optimasi parameter model JA

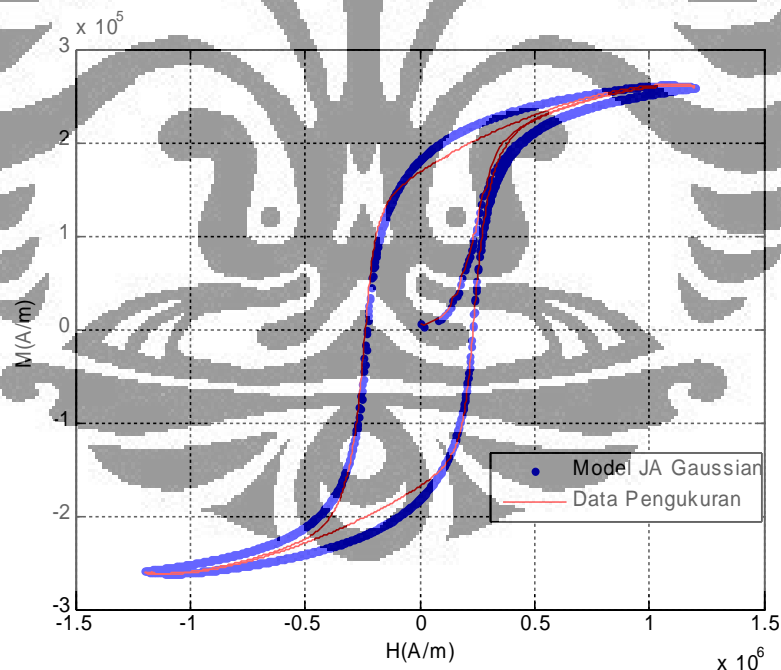
2. Model JA Gaussian

Tabel 4.9. Nilai batas populasi awal algoritma genetika pada optimasi parameter model JA-gaussian

Opsi	Pengulangan ke-1	Pengulangan ke-2	Pengulangan ke-3
Batas populasi awal :			
M_s (A/m)	$0 - 1 \times 10^5$	$1 \times 10^5 - 3 \times 10^5$	$0 - 4 \times 10^5$
k_0 (A/m)	$0 - 1 \times 10^5$	$1 \times 10^2 - 6 \times 10^5$	$0 - 4 \times 10^5$
α	$0 - 1$	$0 - 1$	$0 - 1$
a (A/m)	$0 - 1 \times 10^5$	$1 \times 10^4 - 6 \times 10^5$	$0 - 3 \times 10^5$
c	$0 - 1$	$0 - 1$	$0 - 1$
SD	$0 - 1 \times 10^5$	$1 \times 10^3 - 7 \times 10^5$	$0 - 5 \times 10^5$

Tabel 4.10. Nilai parameter model JA-gaussian hasil optimasi

No	Nilai Kecocokan	Nilai Parameter					
		M_s (A/m)	k_0 (A/m)	A	A (A/m)	c	SD
1	0,003843	$-2,82 \times 10^5$	$3,19 \times 10^5$	0,6314	$-1,09 \times 10^5$	-0,1921	$2,97 \times 10^5$
2	0,002536	$2,94 \times 10^5$	$3,15 \times 10^5$	1,3046	$1,56 \times 10^5$	0,3752	$2,42 \times 10^5$
3	0,000908	$2,65 \times 10^5$	$3,25 \times 10^5$	2,8518	$3,20 \times 10^5$	-0,782	$3,36 \times 10^8$



Gambar 4.12. Kurva histeresis hasil optimasi parameter model JA-gaussian

3. Model JA Extended

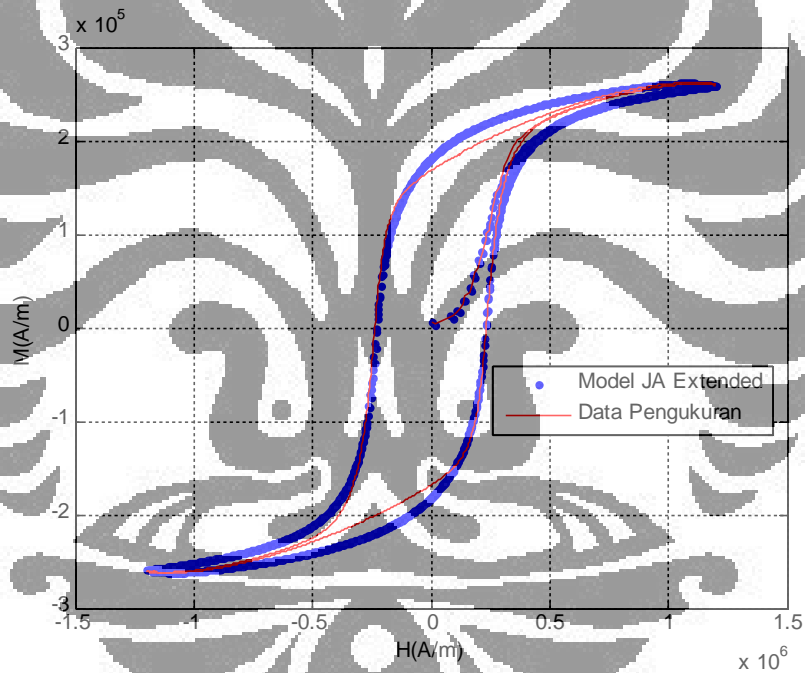
Tabel 4.11. Nilai batas populasi awal algoritma genetika pada optimasi parameter model JA-extended

Opsi	Pengulangan ke-1	Pengulangan ke-2	Pengulangan ke-3
------	------------------	------------------	------------------

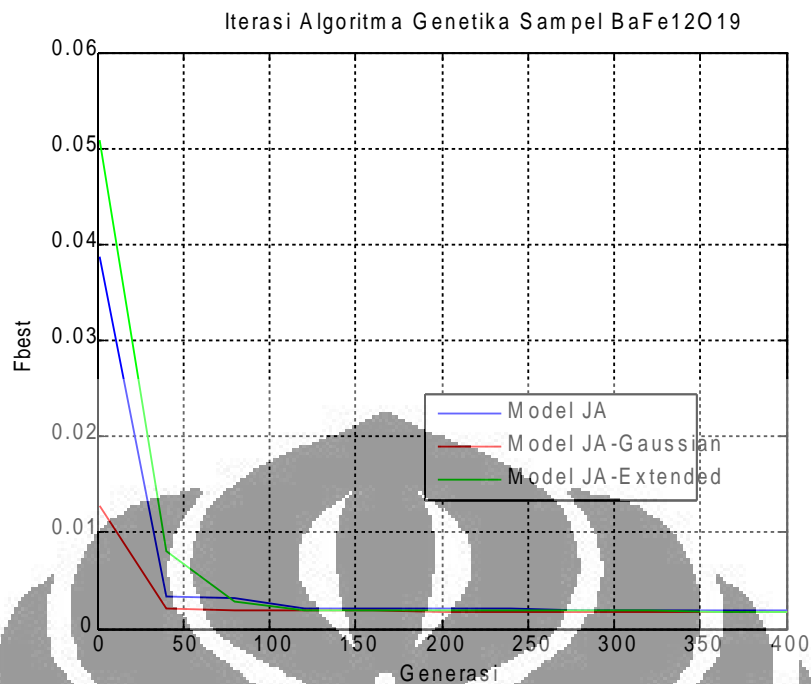
Batas populasi awal :			
M_s (A/m)	$0 - 1 \times 10^6$	$1 \times 10^4 - 8 \times 10^5$	$9 \times 10^4 - 3 \times 10^5$
k_0 (A/m)	$0 - 1 \times 10^6$	$0 - 8 \times 10^5$	$1 \times 10^5 - 1 \times 10^6$
k_1 (A/m)	$0 - 1 \times 10^6$	$0 - 8 \times 10^5$	$9 \times 10^4 - 5 \times 10^5$
k_2 (A/m)	$-1 \times 10^6 - 1 \times 10^6$	$-1 \times 10^6 - 8 \times 10^5$	$-1 \times 10^6 - 8 \times 10^5$
α	$0 - 1$	$0 - 1$	$0 - 1$
a (A/m)	$0 - 1$	$0 - 1$	$0 - 1$
c	$0 - 1 \times 10^6$	$1 \times 10^5 - 3 \times 10^5$	$1 \times 10^5 - 3 \times 10^5$

Tabel 4.12. Nilai parameter model JA-extended hasil optimasi

No	Nilai Kecocokan	Nilai Parameter						
		M_s (A/m)	k_0 (A/m)	k_1 (A/m)	k_2 (A/m)	α	a (A/m)	c
1	0,00555	$2,77 \times 10^5$	$5,67 \times 10^5$	$3,00 \times 10^5$	$-5,88 \times 10^6$	0,954	$1,09 \times 10^5$	-0,6455
2	0,002899	$2,91 \times 10^5$	$4,85 \times 10^4$	$3,04 \times 10^5$	$-3,41 \times 10^5$	1,8145	$1,83 \times 10^5$	-1,0428
3	0,001792	$2,62 \times 10^5$	$-1,64 \times 10^6$	$2,78 \times 10^5$	$-6,81 \times 10^5$	3,1954	$3,28 \times 10^5$	-1,0974



Gambar 4.13. Kurva histeresis hasil optimasi parameter model JA-extended



Gambar 4.14. Grafik error setiap model pada iterasi algoritma genetika

Dari optimasi parameter model JA yang dapat dilihat dari tabel 4.7, diperoleh nilai kecocokan *fval* yang cukup kecil. Nilai *fval* terbaik yang diperoleh dari optimasi parameter model JA yaitu 0,001908, sedangkan dari model JA-gaussian adalah 0,000908 dan dari model JA-extended adalah 0,001792. Tingkat kecocokan ini pun dapat dilihat dengan membandingkan kurva histeresis model JA dengan kurva histeresis data pengukuran yang dilukiskan pada gambar 4.11.

Jika dibandingkan antara hasil optimasi parameter model JA, model JA-gaussian, dan model JA-extended dari faktor nilai *fval*, maka nilai model JA-gaussian merupakan model yang paling baik untuk memodelkan kurva histeresis bahan BaFe₁₂O₁₉. Model JA-gaussian berhasil memperoleh nilai *fval* yang terkecil dibandingkan model lainnya. Proses iterasi optimasi parameter grafik gambar 4.11.

4.6 Optimasi Parameter Model JA dan Model JA-Modifikasi dari Data Histeresis SrFe₁₂O₁₉

Sama halnya dengan optimasi parameter dari data histeresis BaFe₁₂O₁₉, pada optimasi parameter dari data histeresis SrFe₁₂O₁₉ juga dilakukan variasi pada

nilai batas populasi awal. Opsi algoritma genetika yang digunakan seperti yang tercantum pada tabel berikut ini :

Tabel 4.13. Opsi algoritma genetika yang digunakan dalam optimasi

Opsi	Pengulangan ke-1
Jumlah populasi	50
Jumlah elit	5
Jumlah generasi	400
Fungsi kecocokan	<i>Fit Scaling Rank</i>
Fungsi pindah silang	<i>Crossover Heuristic 1.2</i>
Fungsi mutasi	<i>Mutation Gaussian 1.1</i>
Fungsi seleksi	<i>Selection Roullete</i>

Berikut adalah hasil dari optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi dari data histeresis bahan SrFe₁₂O₁₉.

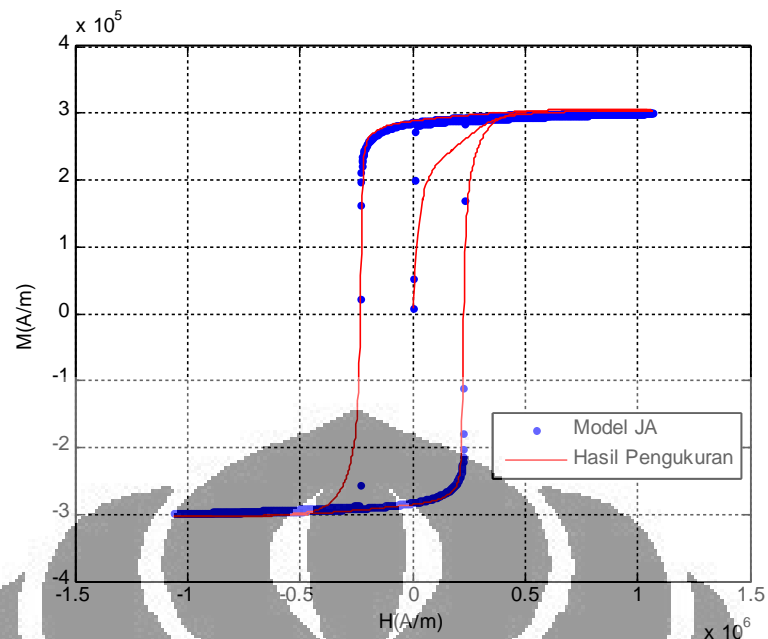
1. Model JA

Tabel 4.14. Nilai batas populasi awal algoritma genetika pada optimasi parameter model JA

Opsi	Pengulangan ke-1	Pengulangan ke-2	Pengulangan ke-3
Batas populasi awal :			
M_s (A/m)	$1 \times 10^5 - 5 \times 10^5$	$1 \times 10^5 - 5 \times 10^5$	$1 \times 10^5 - 5 \times 10^5$
k (A/m)	$0 - 9 \times 10^5$	$0 - 9 \times 10^5$	$1 \times 10^2 - 9 \times 10^5$
α	$0 - 1$	$0 - 1$	$0 - 1$
a (A/m)	$0 - 9 \times 10^5$	$0 - 9 \times 10^5$	$0 - 1 \times 10^5$
c	$0 - 1$	$0 - 1$	$0 - 1$

Tabel 4.15. . Nilai parameter model JA hasil optimasi

No	Nilai Kecocokan	Nilai Parameter				
		M_s (A/m)	k (A/m)	α	a (A/m)	C
1	0,010498	$3,60 \times 10^5$	$3,03 \times 10^5$	0,9611	$5,21 \times 10^4$	0,1641
2	0,006119	$3,55 \times 10^5$	$3,68 \times 10^5$	1,4107	$2,71 \times 10^4$	0,8583
3	0,005917	$3,79 \times 10^5$	$1,14 \times 10^6$	1,5309	$3,41 \times 10^4$	0,8069



Gambar 4.15. Kurva histeresis hasil optimasi parameter model JA

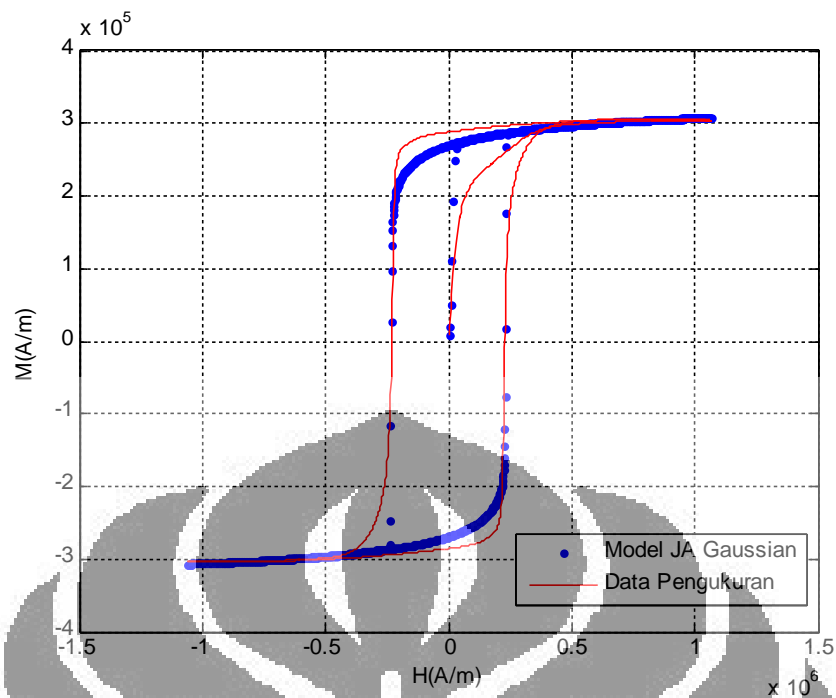
2. Model JA Gaussian

Tabel 4.16. Nilai batas populasi awal algoritma genetika pada optimasi parameter model JA-gaussian

Opsi	Pengulangan ke-1	Pengulangan ke-2	Pengulangan ke-3
Batas populasi awal :			
M_s (A/m)	$1 \times 10^5 - 7 \times 10^5$	$0 - 1 \times 10^6$	$1 \times 10^5 - 7 \times 10^5$
k_0 (A/m)	$0 - 9 \times 10^9$	$0 - 1 \times 10^6$	$0 - 1 \times 10^6$
α	$0 - 1$	$0 - 1$	$0 - 1$
a (A/m)	$-0 - 9 \times 10^5$	$0 - 1 \times 10^6$	$0 - 9 \times 10^5$
c	$0 - 1$	$0 - 1$	$0 - 1$
SD	$0 - 1 \times 10^5$	$0 - 1 \times 10^6$	$0 - 1 \times 10^5$

Tabel 4.17. . Nilai parameter model JA-gaussian hasil optimasi

No	Nilai Kecocokan	Nilai Parameter					
		M_s (A/m)	k_0 (A/m)	A	a (A/m)	c	SD
1	0,005692	$2,65 \times 10^5$	$-6,20 \times 10^9$	1,3519	$2,28 \times 10^4$	1,1435	$1,69 \times 10^5$
2	0,005041	$2,98 \times 10^5$	$-4,74 \times 10^6$	2,9135	$1,59 \times 10^5$	1,1269	$1,08 \times 10^5$
3	0,004688	$3,00 \times 10^5$	$1,01 \times 10^6$	2,3184	$1,11 \times 10^5$	1,1108	$3,58 \times 10^4$



Gambar 4.16. Kurva histeresis hasil optimasi parameter model JA-gaussian

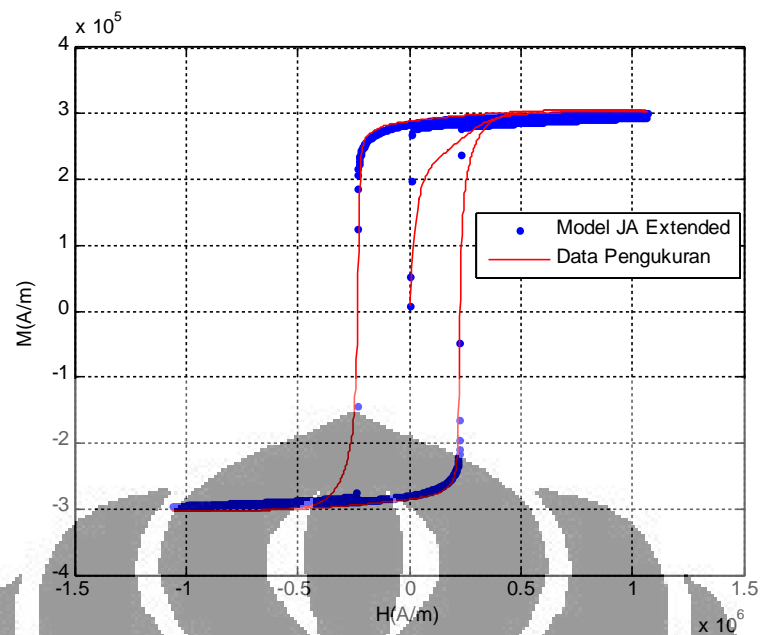
3. Model JA Extended

Tabel 4.18: Nilai batas populasi awal algoritma genetika pada optimasi parameter model JA-extended

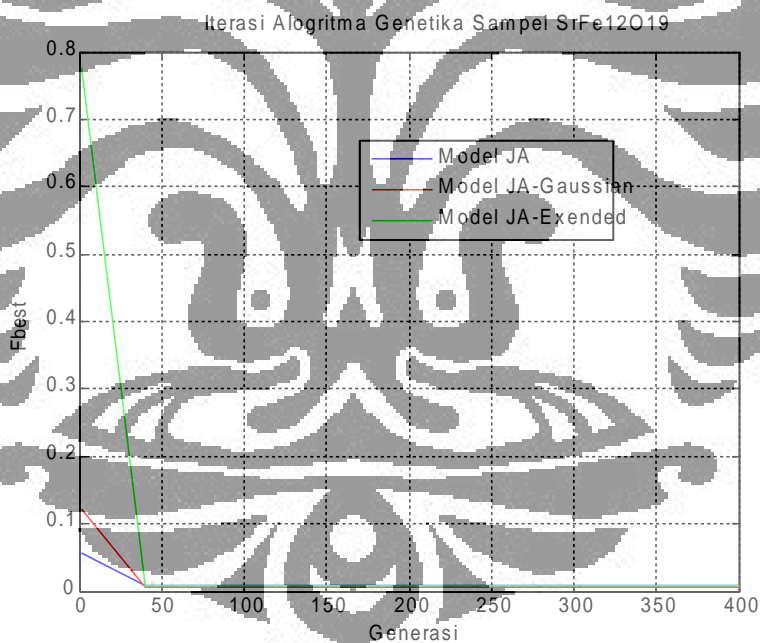
Options	Pengulangan ke-1	Pengulangan ke-2	Pengulangan ke-3
Batas populasi awal :			
a (A/m)	$0 - 9 \times 10^5$	$1 \times 10^4 - 9 \times 10^4$	$1 \times 10^4 - 9 \times 10^5$
k_0 (A/m)	$0 - 9 \times 10^5$	$1 \times 10^4 - 9 \times 10^5$	$1 \times 10^3 - 9 \times 10^5$
k_1 (A/m)	$0 - 9 \times 10^5$	$1 \times 10^5 - 9 \times 10^5$	$1 \times 10^3 - 50$
k_2 (A/m)	$-1 \times 10^6 - (-1 \times 10^5)$	$-8 \times 10^5 - 1 \times 10^5$	$-9 \times 10^5 - 10$
c	$0 - 1$	$0 - 1$	$0 - 1 \times 10^{-3}$
α	$0 - 1$	$0 - 1$	$0 - 60$
M_s (A/m)	$1 \times 10^5 - 3,5 \times 10^5$	$1 \times 10^5 - 3,5 \times 10^5$	$1 \times 10^5 - 4 \times 10^5$

Tabel 4.19. . Nilai parameter model JA-extended hasil optimasi

No	Nilai Kecocokan	Nilai Parameter						
		M_s (A/m)	k_0 (A/m)	k_1 (A/m)	k_2 (A/m)	α	a (A/m)	c
1	0,912042	$3,30 \times 10^5$	$-1,24 \times 10^5$	$2,82 \times 10^5$	$-1,83 \times 10^5$	0,8187	$2,70 \times 10^4$	-0,3085
2	0,007316	$2,09 \times 10^5$	$4,10 \times 10^5$	$2,12 \times 10^6$	$-1,68 \times 10^6$	2,1409	$8,25 \times 10^4$	1,5249
3	0,005726	$3,70 \times 10^5$	$1,03 \times 10^5$	$4,52 \times 10^5$	$-4,61 \times 10^5$	1,407	$3,01 \times 10^4$	0,8049



Gambar 4.17. Kurva histeresis hasil optimasi model JA-extended



Gambar 4.18. Grafik error setiap model pada iterasi algoritma genetika

Dari hasil optimasi parameter model data histeresis $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ diatas, diperoleh nilai terbaik $fval$ dari model JA yaitu 0,005917, sedangkan nilai $fval$ model JA-gaussian adalah 0,004688 dan nilai $fval$ model JA-extended adalah 0,005726. Sama halnya dengan optimasi parameter dari data histeresis $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, diperoleh nilai $fval$ yang cukup kecil dan nilai terbaik diantara ketiga model yaitu dari model JA-gaussian.

Dari hasil kurva histeresis yang ditunjukkan oleh gambar 4.16, kurva tersebut kurang cocok dalam memperkirakan nilai magnetisasi remanen dibandingkan dengan model JA dan model JA-extended. Akan tetapi kurva model JA-gaussian lebih banyak memiliki titik yang sesuai dengan titik kurva histeresis dari data pengukuran, sehingga secara keseluruhan model JA-gaussian lebih cocok dari model lainnya terhadap data pengukuran sehingga memiliki nilai $fval$ yang paling kecil.

Grafik iterasi algoritma genetika yang ditunjukkan gambar 4.15 memperlihatkan pada model JA diperoleh nilai fungsi evaluasi terbaik f_{best} yang paling kecil di awal iterasi, namun pada akhirnya model JA-gaussian menghasilkan f_{best} yang paling kecil. Nilai f_{best} ini artinya nilai fungsi evaluasi terbaik dalam iterasi. Proses pencarian parameter terbaik dengan menggunakan algoritma genetika dilakukan melalui tahapan iterasi. Proses iterasi berjalan terus dengan melakukan fungsi-fungsi algoritma genetika hingga diperoleh nilai parameter yang terbaik.

4.7 Analisa Sifat Magnetik Bahan $BaFe_{12}O_{19}$ dan $SrFe_{12}O_{19}$

Keakuratan suatu model terhadap data pengukuran dapat dilihat dari tingkat nilai kecocokan dari optimasi dengan menggunakan algoritma genetika. Selain itu dapat juga dilihat dari kecocokan nilai-nilai parameter dan besaran magnetiknya. Besaran-besaran magnetik yang dapat diketahui dari data kurva histeresis yaitu koersifitas H_c , magnetisasi remanen M_r , energi produk maksimum $(BH)_{max}$, dan magnetisasi jenuh M_s .

Untuk nilai magnetisasi jenuh, nilai yang terukur pada permagraph merupakan nilai magnetisasi jenuh teknis M_s , sedangkan nilai magnetisasi jenuh yang diperoleh dari optimasi model merupakan nilai magnetisasi jenuh M_o ($M_s = M_o$). Nilai magnetisasi jenuh teknis M_s model yaitu nilai magnetisasi pada saat nilai H terbesar ($M_s = M(H_{max})$). Untuk itu dalam analisa magnetik ini digunakan data M_o yang diperoleh dari literatur [20].

Berikut adalah nilai besaran-besaran magnetis yang diperoleh dari data pengukuran, literatur dan hasil optimasi parameter model JA, model JA-gaussian, dan model JA-extended.

Tabel 4.20. Nilai besaran magnetik bahan BaFe₁₂O₁₉ yang diperoleh dari optimasi model JA dan model JA-modifikasi

Sumber Data	Sampel BaFe ₁₂ O ₁₉					
	H_c (A/m)	M_r (A/m)	(BH) _{max} (J/m ³)	M_s (A/m)	M_o (A/m)	f_{val}
Pengukuran Sampel	2,32 x 10 ⁵	1,69 x 10 ⁵	2,54 x 10 ⁴	2,62 x 10 ⁵		
Literatur					3,58 x 10 ⁵	
Model JA Klasik	2,28 x 10 ⁵	1,83 x 10 ⁵	2,28 x 10 ⁴	2,61 x 10 ⁵	3,09 x 10 ⁵	0,001908
Model JA Gaussian	2,30 x 10 ⁵	1,81 x 10 ⁵	2,29 x 10 ⁴	2,65 x 10 ⁵	3,14 x 10 ⁵	0,000908
Model JA Extended	2,29 x 10 ⁵	1,81 x 10 ⁵	2,28 x 10 ⁴	2,62 x 10 ⁵	3,13 x 10 ⁵	0,001792

Tabel 4.21. Nilai besaran magnetik bahan SrFe₁₂O₁₉ yang diperoleh dari optimasi model JA dan model JA-modifikasi

Sumber Data	Sampel SrFe ₁₂ O ₁₉					
	H_c (A/m)	M_r (A/m)	(BH) _{max} (J/m ³)	M_s (A/m)	M_o (A/m)	f_{val}
Pengukuran Sampel	2,28 x 10 ⁵	2,88 x 10 ⁵	6,55 x 10 ⁴	3,06 x 10 ⁵		
Literatur					3,18 x 10 ⁵	
Model JA Klasik	2,28 x 10 ⁵	2,86 x 10 ⁵	6,62 x 10 ⁴	3,06 x 10 ⁵	3,79 x 10 ⁵	0,005917
Model JA Gaussian	2,36 x 10 ⁵	2,71 x 10 ⁵	5,57 x 10 ⁴	3,00 x 10 ⁵	3,00 x 10 ⁵	0,004688
Model JA Extended	2,29 x 10 ⁵	2,84 x 10 ⁵	6,61 x 10 ⁴	3,00 x 10 ⁵	3,70 x 10 ⁵	0,005724

Hasil optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi dari data pengukuran kurva histeresis bahan BaFe₁₂O₁₉ ditunjukkan pada tabel 4.20. Dari hasil tersebut terlihat bahwa model JA-Gaussian paling berhasil dalam memodelkan kurva histeresis bahan BaFe₁₂O₁₉, hal ini dapat dilihat dari kedekatan nilai besaran magnetis terhadap hasil pengukuran dan tingkat kecocokan (f_{val}) yang paling rendah. Hasil yang diperoleh dari model JA-extended ternyata lebih baik dari model JA, terlihat dari kecocokan nilai-nilai besaran magnetis terhadap nilai hasil pengukuran, dan tingkat kecocokan yang lebih kecil. Hal ini menandakan modifikasi yang dilakukan model ini telah dapat menghasilkan keakuratan model yang lebih baik.

Hasil optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi dari data pengukuran kurva histeresis bahan SrFe₁₂O₁₉ ditunjukkan pada tabel 4.21. Dari hasil tersebut ternyata memberikan *trend* yang berbeda dengan hasil optimasi dari data pengukuran bahan BaFe₁₂O₁₉. Dari hasil optimasi dari data pengukuran bahan

$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ dapat diketahui ternyata model JA paling akurat dalam memodelkan kurva histeresis bahan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ dibandingkan dengan model JA-modifikasi. Ketidakakuratan model JA-modifikasi ini dapat disebabkan oleh sifat keanisotropian bahan yang dimiliki oleh bahan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$.

Dari hasil optimasi parameter model dapat diprediksi nilai magnetisasi jenuh bahan M_o , sedangkan dari hasil pengukuran hanya dapat diketahui nilai magnetisasi jenuh teknis M_s . Nilai magnetisasi jenuh M_o sulit untuk diukur karena harus dicapai temperatur bahan hingga 0 K. Oleh karena itu dengan melakukan pemodelan dapat memberikan informasi tambahan yaitu nilai besaran magnetisasi jenuh M_o .



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Model JA dan model JA-modifikasi telah berhasil diimplementasikan ke dalam program MATLAB dan telah divalidasi dengan pembandingan kurva histeresis dari makalah D.C. Jiles dan J.B Thoeke [5], Peter R. Wilson [4], dan makalah Roman Szewczyk [5].

Optimasi parameter model JA dan model JA-modifikasi dari data pengukuran kurva histeresis bahan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ menggunakan algoritma genetika telah berhasil dilakukan. Hasil dari optimasi parameter menunjukkan bahwa modifikasi yang dilakukan pada model JA-gaussian dan model JA-extended menghasilkan kecocokan yang lebih baik dalam memodelkan kurva histeresis bahan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Akan tetapi kedua model modifikasi ini tidak lebih baik dari model JA dalam memodelkan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. Hal tersebut disebabkan sifat keansiotropian bahan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang tidak didefinisikan dalam model JA-modifikasi.

Keakuratan model JA-gaussian dalam memodelkan kurva histeresis bahan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ memberikan keyakinan bahwa nilai parameter k secara matematis dapat berubah terhadap fungsi medan magnet luar. Namun keakuratan model JA-extended yang dihasilkan juga memberikan gambaran bahwa nilai parameter k dapat berubah selama proses magnetisasi. Perubahan nilai k ini disebabkan oleh energi rata-rata yang dibutuhkan domain wall untuk melewati pinning site.

5.2 Saran

Dalam penelitian ini digunakan metode euler untuk mendapatkan solusi numerik persamaan diferensial model JA dan model JA-modifikasi. Untuk mendapatkan solusi yang lebih teliti lagi, pada penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan metode numerik lainnya yang lebih akurat seperti metode runge-kutta.

Dalam optimasi parameter menggunakan algoritma genetika memiliki ruang pencarian yang sangat luas dan terdapat banyak pilihan metode yang dapat

digunakan, maka disarankan selanjutnya terlebih dahulu dilakukan penentuan secara kasar dengan bantuan titik-titik acuan seperti, koersifitas, magnetisasi remanen, magnetisasi jenuh, dan suseptibilitas pada titik nol.

Pengukuran kurva histeresis sampel akan lebih akurat lagi jika digunakan alat yang lebih baik lagi seperti *vibrating sample magnetometer* (VSM).

Dari hasil penelitian dengan melakukan pengukuran kurva histeresis dan optimasi parameter model dari bahan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ diperoleh kendala karena sifat keanisotropian bahan yang dimilikinya. Oleh karena itu pada penelitian selanjutnya disarankan untuk mendefinisikan sifat keanisotropian bahan ke dalam model histeresis magnet yang digunakan.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saghafifar, Mahmoud. (2004). *Magnetic Hysteresis Modelling Using Knowledge Based Engineering Techniques*. Tesis pada School of Electrical and Infromation Engineering. University of South Australia.
- [2] Jiles, D.C and Ahterton, D.L. (1984). Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *Journal Applied Physics*. 55, 2115.
- [3] Lederer, D. Igarashi, H. Kost, A. Honma, T. (1999). On the Parameter Identification and Aplication of the Jiles-Atherton Hysteresis Model for Numerical Modelling of Measured Characteristics. *IEEE Trans. Mag*. 35.
- [4] Wilson, Peter R. (2001). Optimizing the Jiles-Atherton Model of Hysteresis by a Genetic Algorithm. *IEEE Trans. Mag*. 40, 2.
- [5] Szewczyk R; Bienkowski, A; Salach, J. (2008). Extended Jiles-Atherton Model for Modelling the Magnetic Characteristic of Isotropic Materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 320, 1049-1052.
- [6] Szewczyk, Roman (2007). Extension of the model of the magnetic characteristics of anisotropic metallic glasses. *Journal Phys. D*. 40, 4109-4113.
- [7] Suyanto. (2005). *Algoritma Genetika dalam MATLAB*. Jogjakarta: Penerbit Andi Offset.
- [8] Jiles, D.C. (1997). *Introduction to Magnetism and Magnetic Material*. Great Britain : St Edmundsbury Press Ltd.
- [9] Isaacs, Alan. (1994). *Kamus Lengkap Fisika*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- [10] Jiles, D.C and Ahterton, D.L. (1984). Theory of the magnetisation process in ferromagnets and its application to the magnetomechanical effect. *Journal Physics D*. 17, 1265-1281.
- [11] Jiles, D.C and Ahterton, D.L. (2004). Real Coded Genetic Algoritm for Jiles-Atherton Parameters Identification. *IEEE. Trans Magn*. 40. 2.
- [12] The MathWorks, Inc.. (2004). *Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox's User's Guide*. www.mathmorks.com.
- [13] B.D. Cullity. (1972). *Introduction to Magnetics Materiasl*. Addison-Weasley.

- [14] Pei Fu, Yen. (2003). Strontium hexaferrite powders prepared by a microwave-induced combustion process and some of their properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 349. 1. 228-231.
- [15] Jiles, D.C and Thoeke, J.B. (1989). Theory of Ferromagnetic Hysteresis Determination of Model Parameters from Experimental Hysteresis Loops. *IEEE Trans. Mag.* 25. 5. 3928-3930.
- [16] Syamsudin, Udin. (2004). *Pengaruh Quenching Terhadap Hysteresis Magnet pada Sampel Baja Karbon Rendah*. Tesis, Jurusan Ilmu Material FMIPA, Universitas Indonesia .
- [17] http://www.magnet-physik.de/download/permagraph-1_e.pdf
- [18] <http://som.web.cmu.edu/structures/S063-BaFe12O19.html>
- [19] Yani, Ahmad (2006). *Penentuan Parameter Model Jiles-Atherton dengan Algoritma Genetika*. Tesis, Jurusan Ilmu Material, FMIPA, Universitas Indonesia.
- [20] Cardarelli, Francois. (2008). *Materials Handbook, A Concise Desktop Reference*. New York: Springer.
- [21] Bijaksana, Satria (2004). *Ulasan Tentang Landasan Fisis Anisotropi Magnetik pada Batuan*. Departemen Fisika, Institut Teknologi Bandung.

LAMPIRAN

Source code file optimasi_parameter.m :

%Program untuk memperoleh nilai parameter

```

clear all;
clc;

%load('sampel7d1_baru.mat');
%Hexp = sampel7d1_baru(:,1);
%Mexp = sampel7d1_baru(:,2);

load('sampel5_1.mat');
Hexp = sampel5_1(:,1);
Mexp = sampel5_1(:,2);

[x fval] = alg_genetika;
fval
Ms = x(1)
k = x(2)
alpha = x(3)
a = x(4)
c = x(5)

step = 0.01;

%SET PARAMETER
%Ms = 3.79e5;
%k = 1.14e6;
%alpha = 1.5309;
%a = 3.41e4;
%c = 0.8069;

%set initial condition
M(1) = Mexp(1);
H(1) = Hexp(1);
Mt(1) = M(1);
Ht(1) = H(1);
Man = 0;
Mirr = 0;
Mrev = 0;
oldH = H(1);
N = length(Hexp);

for i=2:1:N;
    H(i) = Hexp(i);
    He = H(i) + alpha*M(i-1);
    dH = H(i)-oldH;
    oldH = H(i);

    %Modifikasi nilai k
    %k = k0*exp(-1*((H(i)^2)/(2*SD^2)));
    Kvar(i) = k;

    %oldH = H;
    if dH > 0
        dk = k;

```

```

else
    dk = -k;
end

Man = Ms*(coth(He/a)- (a/He));
deltaM = (Man-M(i-1));

if dH<0 & deltaM >= 0
    delM=0;
elseif dH>0 & deltaM <= 0
    delM=0;
else
    delM=1;
end

dMdH = delM*(deltaM)/(dk-alpha*deltaM);

Mirr = Mirr+dMdH*dH;
Mrev = c*(Man-Mirr);

M(i) = Mrev+Mirr;
Mt(i) = M(i);
Ht(i) = H(i);
end

%plot(H,M,'r-'), hold on
%Jexp = Mexp*(4*pi*1e-7);
%plot(Hexp,Jexp), hold on
plot(Ht,Mt,'b'), hold on
plot(Hexp,Mexp,'r')
xlabel('H(A/m)')
ylabel('M(A/m)'), grid on
hold off;
%plot(Ht,Kvar)

```

Source code file fungsi fitness.m :

```
%Fitness Function Program untuk mencocokkan data pengukuran dengan
model menggunakan MSSE
%Load data eksperimen
```

```
function y = fungsi_fitness(x)
```

```
load('sampel5_1.mat');
Hexp = sampel5_1(:,1);
Mexp = sampel5_1(:,2);
```

```
%load('sampel7d1_baru.mat');
%Hexp = sampel7d1_baru(:,1);
%Mexp = sampel7d1_baru(:,2);
```

```
Ms = x(1);
k = x(2);
alpha = x(3);
a = x(4);
c = x(5);
```

```
%Ms = 268562;
%k = 12.67;
%alpha = 29.1e-6;
%a = 9.29;
%c = 0.497;
%SD = 16.55;
```

```
%Set Initial Condition
```

```
M(1) = Mexp(1);
H(1) = Hexp(1);
Man = 0;
Mirr = 0;
Mrev = 0;
oldH = H(1);
```

```
Hmodel(1)=H(1);
Mmodel(1)=M(1);
%sumsqr = (Mexp(1) - Mmodel(1))^2;
sumsqr = 0;
N = length(Hexp);
```

```
for i = 2:1:N;
```

```
    H(i) = Hexp(i);
    Hmodel(i) = H(i);
    He = H(i)+alpha*M(i-1);
    dH = H(i)-oldH;
    oldH = H(i);
```

```
    %oldH = H(t);
```

```
    %Modifikasi nilai k
    %k = k0*exp(-1*((H(i)^2)/(2*SD^2)));
```

```
    if dH>0
        dk = k;
    else
        dk = -k;
    end
```

```

Man = Ms * (coth(He/a) - a/He);
deltaM = Man - M(i-1);

if dH<0 & deltaM >= 0
    delM = 0;
elseif dH>0 & deltaM <= 0
    delM = 0;
else
    delM = 1;
end

dMdH = delM*(deltaM)/(dk-alpha*deltaM);

Mirr = Mirr + dMdH*dH;
Mrev = c*(Man-Mirr);

M(i) = Mrev + Mirr;
Mmodel(i) = M(i);

sumsq = sumsq + (Mexp(i) - Mmodel(i))^2 ;
end
y = sumsq/(N-1);
%plot(Hexp,Mmodel);

```

Source code file alg_genetika.m :

```

function [X,FVAL,REASON,OUTPUT,POPULATION,SCORES] = alg_genetika
%% This is an auto generated M file to do optimization with the
Genetic Algorithm and
% Direct Search Toolbox. Use GAOPTIMSET for default GA options
structure.

```

```

%%Fitness function
fitnessFunction = @fungsi_fitness;
%%Number of Variables
nvars = 5 ;
%%Linear inequality constraints
Aineq = [];
Bineq = [];
%%Linear equality constraints
Aeq = [];
Beq = [];
%%Bounds
LB = [];
UB = [];
%%Nonlinear constraints
nonlconFunction = [];
%%Start with default options
options = gaoptimset;
%%Modify some parameters
options = gaoptimset(options, 'PopInitRange' , [1e5 1e4 0 1e3 0 ;
3e5 5e5 1 5e5 1]);
options = gaoptimset(options, 'PopulationSize' , 50);
options = gaoptimset(options, 'EliteCount' , 5 );
options = gaoptimset(options, 'Generations' , 400);
options = gaoptimset(options, 'StallGenLimit' , Inf);
options = gaoptimset(options, 'StallTimeLimit' , Inf);
options = gaoptimset(options, 'SelectionFcn' , @selectionroulette);
options = gaoptimset(options, 'CrossoverFcn' , { @crossoverheuristic
1.2 });
options = gaoptimset(options, 'MutationFcn' , { @mutationgaussian 1
1 });
options = gaoptimset(options, 'Display' , 'iter');
%%Run GA
[X, FVAL, REASON, OUTPUT, POPULATION, SCORES] =
ga(fitnessFunction, nvars, Aineq, Bineq, Aeq, Beq, LB, UB, nonlconFunction
, options);

```

Source code file optimasi_parameter_gaussian.m :

%Program untuk memperoleh nilai parameter

```

clear all;
clc;

load('sampel7d1_baru.mat');
Hexp = sampel7d1_baru(:,1);

```

```

Mexp = sampel7d1_baru(:,2);

%load('sampel5_1.mat');
%Hexp = sampel5_1(:,1);
%Mexp = sampel5_1(:,2);

[x fval] = alg_genetika_gaussian;
fval
Ms = x(1)
k0 = x(2)
alpha = x(3)
a = x(4)
c = x(5)
SD = x(6)

step = 0.01;

%SET PARAMETER
%Ms = 314280;
%k0 = 325090;
%alpha = 2.8518;
%a = 320230;
%c = -0.782;
%SD = 335630;

%set initial condition
M(1) = Mexp(1);
H(1) = Hexp(1);
Mt(1) = M(1);
Ht(1) = H(1);
Man = 0;
Mirr = 0;
Mnev = 0;
oldH = H(1);
N = length(Hexp);
sigma1 = 0;
sigma2 = 0;
sigma3 = 0;
sigma4 = 0;
sigma5 = 0;
sumsqr = 0;

for i=2:1:N;
    H(i) = Hexp(i);
    He = H(i) + alpha*M(i-1);
    dH = H(i)-oldH;
    oldH = H(i);

    %Modifikasi nilai k
    k = k0*exp(-1*((H(i)^2)/(2*SD^2)));
    Kvar(i) = k;

    %oldH = H;
    if dH > 0
        dk = k;
    else
        dk = -k;
    end
    Man = Ms*(coth(He/a) - (a/He));

```

```

deltaM = (Man-M(i-1));

if dH<0 & deltaM >= 0
    delM=0;
elseif dH>0 & deltaM <= 0
    delM=0;
else
    delM=1;
end

dMdH = delM*(deltaM)/(dk-alpha*deltaM);

Mirr = Mirr+dMdH*dH;
Mrev = c*(Man-Mirr);

M(i) = Mrev+Mirr;
Mt(i) = M(i);
Ht(i) = H(i);

sumsq = sumsq + (Mexp(i) - Mt(i))^2;
%PEARSON CORRELATION1
%sigma1 = sigma1 + (Mexp(i)*Mt(i));
%sigma2 = sigma2 + Mexp(i);
%sigma3 = sigma3 + Mt(i);
%sigma4 = sigma4 + Mt(i)^2;
%sigma5 = sigma5 + Mt(i)^2;
end

%plot(H,M,'r-'), hold on
%Jt = Mt/(4*pi*1e-7); hold on
%plot(Ht,Jt),hold on
plot(Ht,Mt,'b'), hold on
%plot(Hexp,Mexp,'r')
xlabel('H(A/m)')
ylabel('M(A/m)'),grid on
k
%pearson_correlation = (((N-1)*sigma1 - sigma2*sigma3)/(sqrt(((N-1)*sigma4-(sigma2)^2)*((N-1)*sigma5-(sigma3)^2))))^2
%error = (1/(N-1))*sqrt(sumsqr)
error = (1/(N-1))*(sumsq)
hold off;
%plot(Ht,Kvar)

```

Source code file fungsi_fitness_gaussian.m :

```
%Program untuk memperoleh nilai parameter
```

```

clear all;
clc;

load('sampel7d1_baru.mat');
Hexp = sampel7d1_baru(:,1);
Mexp = sampel7d1_baru(:,2);

%load('sampel5_1.mat');
%Hexp = sampel5_1(:,1);

```

```

%Mexp = sampel5_1(:,2);

[x fval] = alg_genetika_gaussian;
fval
Ms = x(1)
k0 = x(2)
alpha = x(3)
a = x(4)
c = x(5)
SD = x(6)

step = 0.01;

%SET PARAMETER
%Ms = 314280;
%k0 = 325090;
%alpha = 2.8518;
%a = 320230;
%c = -0.782;
%SD = 335630;

%set initial condition
M(1)= Mexp(1);
H(1) = Hexp(1);
Mt(1) = M(1);
Ht(1) = H(1);
Man = 0;
Mirr = 0;
Mrev=0;
oldH = H(1);
N = length(Hexp);
sigma1 = 0;
sigma2 = 0;
sigma3 = 0;
sigma4 = 0;
sigma5 = 0;
sumsqr = 0;

for i=2:1:N;
    H(i) = Hexp(i);
    He = H(i) + alpha*M(i-1);
    dH = H(i)-oldH;
    oldH = H(i);

    %Modifikasi nilai k
    k = k0*exp(-1*((H(i)^2)/(2*SD^2)));
    Kvar(i) = k;

    %oldH = H;
    if dH > 0
        dk = k;
    else
        dk = -k;
    end
    Man = Ms*(coth(He/a)- (a/He));
    deltaM = (Man-M(i-1));

    if dH<0 & deltaM >= 0
        delM=0;

```



```

elseif dH>0 & deltaM <= 0
    delM=0;
else
    delM=1;
end

dMdH = delM*(deltaM)/(dk-alpha*deltaM);

Mirr = Mirr+dMdH*dH;
Mrev = c*(Man-Mirr);

M(i) = Mrev+Mirr;
Mt(i) = M(i);
Ht(i) = H(i);

sumsq = sumsq + (Mexp(i) - Mt(i))^2;
%PEARSON CORRELATION1
%sigma1 = sigma1 + (Mexp(i)*Mt(i));
%sigma2 = sigma2 + Mexp(i);
%sigma3 = sigma3 + Mt(i);
%sigma4 = sigma4 + Mt(i)^2;
%sigma5 = sigma5 + Mt(i)^2;
end

%plot(H,M,'r-'), hold on
%Jt = Mt/(4*pi*1e-7); hold on
%plot(Ht,Jt), hold on
plot(Ht,Mt,'b'), hold on
%plot(Hexp,Mexp,'r')
xlabel('H(A/m)')
ylabel('M(A/m)'), grid on
k
%pearson_correlation = (((N-1)*sigma1 - sigma2*sigma3)/(sqrt(((N-1)*sigma4-(sigma2)^2)*((N-1)*sigma5-(sigma3)^2))))^2
%error = (1/(N-1))*sqrt(sumsqr)
error = (1/(N-1))*(sumsq)
hold off;
%plot(Ht,Kvar)

```

Source code file `alg_genetika_gaussian.m`:

```

function [X,FVAL,REASON,OUTPUT,POPULATION,SCORES] =
alg_genetika_gaussian
%% This is an auto generated M file to do optimization with the
Genetic Algorithm and
% Direct Search Toolbox. Use GAOPTIMSET for default GA options
structure.

%%Fitness function
fitnessFunction = @funksi_fitness_gaussian;
%%Number of Variables
nvars = 6 ;
%Linear inequality constraints
Aineq = [];
Bineq = [];
%Linear equality constraints

```

```

Aeq = [];
Beq = [];
%Bounds
LB = [];
UB = [];
%Nonlinear constraints
nonlconFunction = [];
%Start with default options
options = gaoptimset;
%%Modify some parameters
options = gaoptimset(options, 'PopInitRange' , [1e5 1e5 0 1e5 0
1e5 ; 3e5 4e5 1 3e5 1 4e5]);
options = gaoptimset(options, 'PopulationSize' , 50);
options = gaoptimset(options, 'EliteCount' , 5 );
options = gaoptimset(options, 'Generations' , 400);
options = gaoptimset(options, 'StallGenLimit' , Inf);
options = gaoptimset(options, 'StallTimeLimit' , Inf);
options = gaoptimset(options, 'SelectionFcn' , @selectionroulette);
options = gaoptimset(options, 'CrossoverFcn' , { @crossoverheuristic
1.2 });
options = gaoptimset(options, 'MutationFcn' , { @mutationgaussian 1
1 });
options = gaoptimset(options, 'Display' , 'iter');
%%Run GA
[X, FVAL, REASON, OUTPUT, POPULATION, SCORES] =
ga(fitnessFunction, nvars, Aineq, Bineq, Aeq, Beq, LB, UB, nonlconFunction
, options);

```

Source code file optimasi_parameter_extended.m :

%Program untuk memperoleh nilai parameter

```

clear all;
clc;

load('sampel5_1.mat');
Hexp = sampel5_1(:,1);
Mexp = sampel5_1(:,2);

%load('sampel7d1_baru.mat');
%Hexp = sampel7d1_baru(:,1);
%Mexp = sampel7d1_baru(:,2);

[x fval] = alg_genetika_extended;

```

```

fval
a = x(1)
k0 = x(2)
k1 = x(3)
k2 = x(4)
c = x(5)
alpha = x(6)
Ms = x(7)

%step = 0.01;

%SET PARAMETER
%a = 30050;
%k0 = 103080;
%k1 = 451960;
%k2 = -460590;
%c = 0.8049;
%alpha = 1.4701;
%Ms = 369860;

%set initial condition
M(1) = Mexp(1);
H(1) = Hexp(1);
Mt(1) = M(1);
Ht(1) = H(1);
Man = 0;
Mirr = 0;
Mrev = 0;
oldH = H(1);
N = length(Hexp);

for i=2:1:N;
    H(i) = Hexp(i);
    He = H(i) + alpha*M(i-1);
    dH = H(i)-oldH;
    oldH = H(i);

    %Modifikasi nilai k
    k = k0 + ((exp(k2*(1 - abs(M(i-1))/Ms))-1)/(exp(k2)-1)) *
(k1-k0);

    %oldH = H;
    if dH > 0
        dk = k;
    else
        dk = -k;
    end
    Man = Ms*(coth(He/a) - (a/He));
    deltaM = (Man-M(i-1));

    if dH<0 & deltaM >= 0
        delM=0;
    elseif dH>0 & deltaM <= 0
        delM=0;
    else
        delM=1;
    end

    dMdH = delM*(deltaM)/(dk-alpha*deltaM);

```

```

    Mirr = Mirr+dMdH*dH;
    Mrev = c*(Man-Mirr);

    M(i) = Mrev+Mirr;
    Mt(i) = M(i);
    Ht(i) = H(i);
end

plot(Ht,Mt,'b'), hold on
plot(Hexp,Mexp,'r-')
xlabel('H (A/m)')
ylabel('M (A/m)'),grid on
hold off;
%plot(Ht,Kvar)

```

Source code file fungsi_fitness_extended.m :

```

%Fitness Function Program untuk mencocokkan data pengukuran dengan
model menggunakan MSSE
%Load data eksperimen

function y = fungsi_fitness_extended(x)

load('sampel5_1.mat');
Hexp = sampel5_1(:,1);
Mexp = sampel5_1(:,2);

%load('sampel7d1_baru.mat');
%Hexp = sampel7d1_baru(:,1);
%Mexp = sampel7d1_baru(:,2);

a = x(1);
k0 = x(2);

```

```

k1 = x(3);
k2 = x(4);
c = x(5);
alpha = x(6);
Ms = x(7);

%Ms = 268562;
%k0 = 12.67;
%alpha = 29.1e-6;
%a = 9.29;
%c = 0.497;
%SD = 16.55;

%Set Initial Condition
M(1) = Mexp(1);
H(1) = Hexp(1);
Man = 0;
Mirr = 0;
Mrev = 0;
oldH = H(1);

Hmodel(1)=H(1);
Mmodel(1)=M(1);
%sumsq = (Mexp(1) - Mmodel(1))^2;
sumsq = 0;
N = length(Hexp);

for i = 2:1:N;
    H(i) = Hexp(i);
    Hmodel(i) = H(i);
    He = H(i)+alpha*M(i-1);
    dH = H(i)-oldH;
    oldH = H(i);

    %oldH = H(t);

    %model JA extended
    k = k0 + ((exp(k2*(1 - abs(M(i-1))/Ms))-1)/(exp(k2)-1)) *
(k1-k0);

    if dH>0
        dk = k;
    else
        dk = -k;
    end

    Man = Ms * (coth(He/a) - a/He);
    deltaM = Man - M(i-1);

    if dH<0 & deltaM >= 0
        delM = 0;
    elseif dH>0 & deltaM <= 0
        delM = 0;
    else
        delM = 1;
    end

    dMdH = delM*(deltaM)/(dk-alpha*deltaM);

```

```

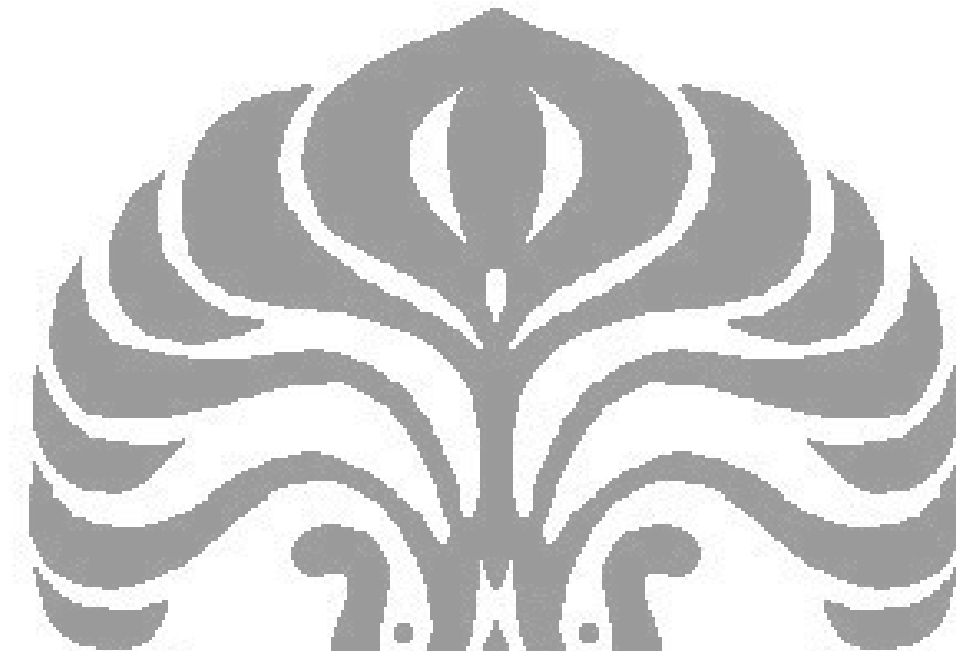
    Mirr = Mirr + dMdH*dH;
    Mrev = c*(Man-Mirr);

    M(i) = Mrev + Mirr;
    Mmodel(i) = M(i);

    sumsqr = sumsqr + (Mexp(i) - Mmodel(i))^2 ;
end
y = sumsqr/(N-1);
z = y;

%y = sumsqr;
%plot (Hexp,Mtot);

```



Source code file `alg_genetika_extended.m` :

```

function [X,FVAL,REASON,OUTPUT,POPULATION,SCORES] =
alg_genetika_extended
%% This is an auto generated M file to do optimization with the
Genetic Algorithm and
% Direct Search Toolbox. Use GAOPTIMSET for default GA options
structure.

%%Fitness function
fitnessFunction = @fungsi_fitness_extended;
%%Number of Variables
nvars = 7 ;
%Linear inequality constraints
Aineq = [];
Bineq = [];
%Linear equality constraints
Aeq = [];
Beq = [];
%Bounds
LB = [];
UB = [];
%Nonlinear constraints
nonlconFunction = [];
%Start with default options

```

```

options = gaoptimset;
%%Modify some parameters
%[ a k0 k1 k2 c alpha Ms]
options = gaoptimset(options, 'PopInitRange' , [2e5 1e4 1e5 -8e5 0
0 1e5 ; 4e5 9e5 9e5 -1e5 1 1 4e5]);
options = gaoptimset(options, 'PopulationSize' ,50);
options = gaoptimset(options, 'EliteCount' ,5 );
options = gaoptimset(options, 'Generations' ,400);
options = gaoptimset(options, 'StallGenLimit' ,Inf);
options = gaoptimset(options, 'StallTimeLimit' ,Inf);
options = gaoptimset(options, 'SelectionFcn' ,@selectionroulette);
options = gaoptimset(options, 'CrossoverFcn' ,{ @crossoverheuristic
1.2 });
options = gaoptimset(options, 'MutationFcn' ,{ @mutationgaussian 1
1 });
%options = gaoptimset(options, 'Display' , 'off');
options = gaoptimset(options, 'Display' , 'iter');
%%Run GA
[X, FVAL, REASON, OUTPUT, POPULATION, SCORES] =
ga(fitnessFunction, nvars, Aineq, Bineq, Aeq, Beq, LB, UB, nonlconFunction
, options);

```

