



**ANALISIS SIFAT MAGNETIK BERDASARKAN UKURAN KRITIS  
BAHAN NiFe BERBENTUK *NANOCUBE* MENGGUNAKAN  
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

**SKRIPSI**

Oleh :

**Dyanti Arumdari**

**NIM 151810201006**

**JURUSAN FISIKA**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**UNIVERSITAS JEMBER**

**2019**



**ANALISIS SIFAT MAGNETIK BERDASARKAN UKURAN KRITIS  
BAHAN NiFe BERBENTUK *NANOCUBE* MENGGUNAKAN  
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

**SKRIPSI**

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Studi di Program Studi Fisika (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Fisika.

Oleh :

**Dyanti Arumdari**

**NIM 151810201006**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2019**

## PERSEMBAHAN

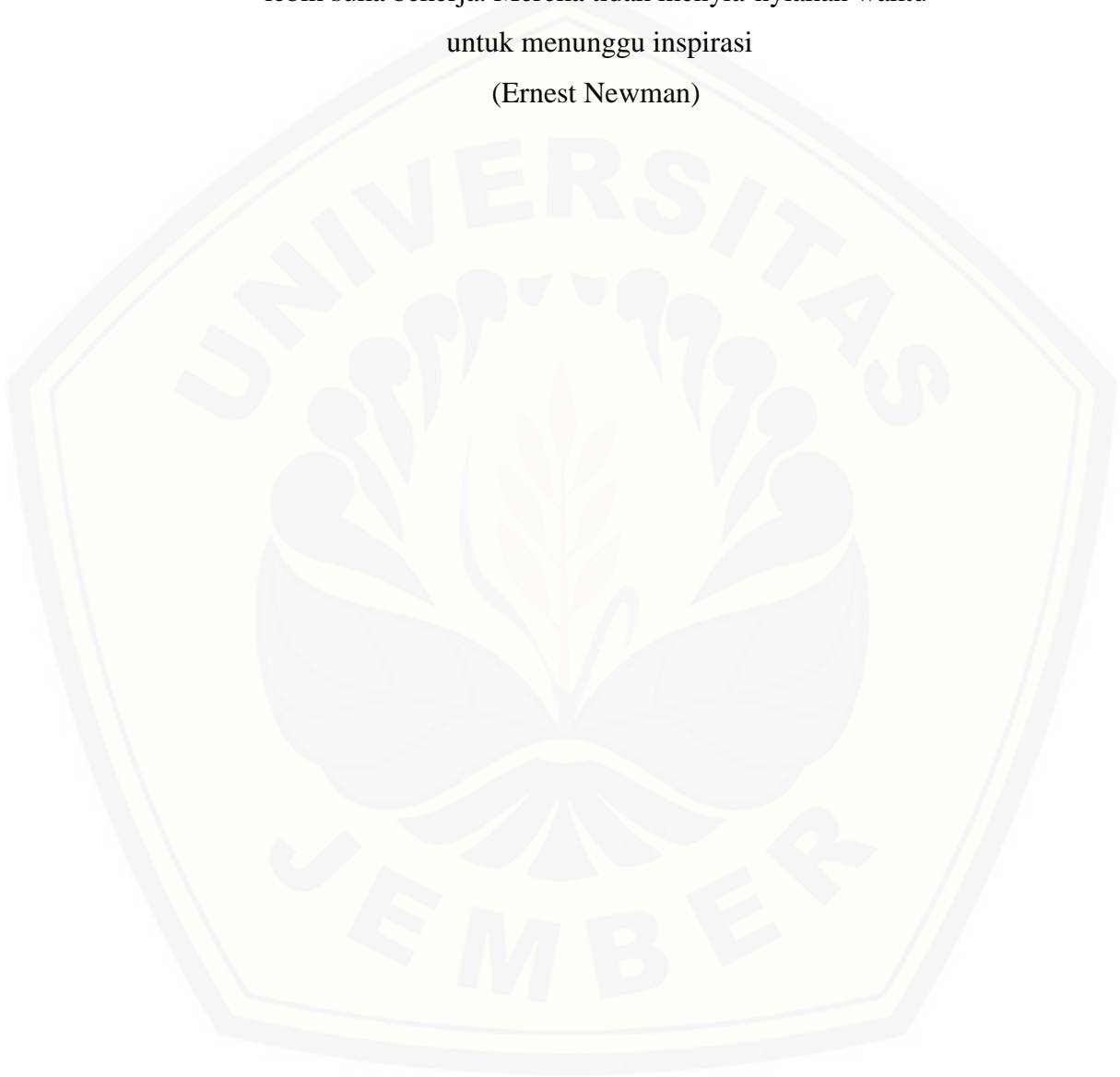
Dengan memanjatkan puji syukur kehadirat Allah SWT, skripsi ini penulis persembahkan untuk:

1. Ibunda Surati Indah Wahyuni dan Ayahanda Sumardi atas segala doa yang selalu dipanjatkan, motivasi, nasehat, kasih sayang serta pengorbanan yang tak terbatas;
2. Adikku Agni Wahyu Pangestuti yang penulis sayangi;
3. Guru-guru mulai TK hingga SMA dan dosen-dosen yang telah membimbing dan memberikan ilmunya kepada penulis;
4. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Jember.

**MOTTO**

Orang-orang hebat di bidang apapun bukan baru bekerja karena mereka terinspirasi, namun mereka menjadi terinspirasi karena mereka lebih suka bekerja. Mereka tidak menia-nyiakan waktu untuk menunggu inspirasi

(Ernest Newman)



**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dyanti Arumdari

NIM : 151810201006

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Analisis Sifat Magnetik Berdasarkan Ukuran Kritis Bahan NiFe Berbentuk *Nanocube* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan mahasiswa dan hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Juli 2019

Yang menyatakan,

Dyanti Arumdari

NIM 151810201006

**SKRIPSI**

**ANALISIS SIFAT MAGNETIK BERDASARKAN UKURAN KRITIS  
BAHAN NiFe BERBENTUK *NANOCUBE* MENGGUNAKAN  
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

Oleh

Dyanti Arumdari  
NIM 151810201006

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Lutfi Rohman, S.Si, M.Si.

Dosen Pembimbing Anggota : Endhah Purwandari, S.Si, M.Si.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Analisis Sifat Magnetik Berdasarkan Ukuran Kritis Bahan NiFe Berbentuk *Nanocube* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” karya Dyanti Arumdari telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal :

Tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

**Tim Penguji:**

Dosen Pembimbing Utama

Dosen Pembimbing Anggota

Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si.  
NIP 19720820 199802 1 001

Endhah Purwandari, S.Si., M.Si.  
NIP 19811111 200501 2 001

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D.  
NIP 1959112 199103 1 002

Ir. Misto, M.Si  
NIP 1959112 199103 1 002

Mengesahkan

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Drs. Sujito, Ph.D.  
NIP 19610204 198711 1 001



## RINGKASAN

**Analisis Sifat Magnetik Berdasarkan Ukuran Kritis Bahan NiFe Berbentuk Nanocube Menggunakan Simulasi Mikromagnetik;** Dyanti Arumdari, 151810201006; 2019: 54 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Material magnetik menjadi bagian yang sangat penting dalam penyimpanan data jangka panjang dan menjadi basis dalam sistem perekaman audio-video. Sistem penyimpanan data di dalam material magnetik sering disebut dengan penyimpanan magnetik atau *magnetic storage*. Salah satu aplikasi media perekam magnetik yaitu *hard disk drive* (HDD). *Hard disk drive* adalah sebuah media penyimpanan sekunder pada sebuah komputer, meskipun disebut sebagai media penyimpanan sekunder namun pada kenyataannya berfungsi sangat penting bahkan tidak bisa ditinggalkan lagi untuk kebutuhan sebuah komputer. Salah satu bahan magnetik yang digunakan untuk melapisi *hard disk drive* adalah bahan feromagnetik. Material feromagnetik yang digunakan untuk media perekam magnetik *hard disk drive* yaitu material feromagnetik yang memiliki anisotropi magnetik yang tinggi, temperature Curie tinggi, dan tahan terhadap korosi. Salah satu material feromagnetik yang dapat digunakan dalam pembuatan HDD adalah material NiFe. Material NiFe ini memiliki stabilitas yang sangat baik dalam ketahanan korosi sehingga berpotensi diaplikasikan dalam media perekam magnetik. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui ukuran kritis bahan NiFe dengan bentuk geometri *nanocube* berdasarkan variasi ukuran sisi kubus. Adapun sifat kemagnetan bahan NiFe dijelaskan dengan mengidentifikasi medan koersivitas bahan menggunakan kurva histerisis.

Penelitian ini menggunakan *software* NMAG berbasis *finite element* dengan sistem operasinya linux. Penelitian ini menggunakan variasi sisi kubus sebesar 20 nm- 47 nm dengan interval 3 untuk  $M_s=860 \times 10^3 \text{ A/m}$  sedangkan  $M_s= 769 \times 10^3 \text{ A/m}$  variasi ukuran sisi kubus yang dilakukan sebesar 23 nm – 49 nm dengan interval 3. Ukuran kritis dianalisis dengan grafik hubungan rapat energi dengan ukuran sisi kubus. Rapat energi yang digunakan pada grafik yaitu rapat energi *exchange*, rapat energi demagnetisasi dan rapat energi total (jumlah dari energi yang dihasilkan dari simulasi). Kurva histerisis ini menganalisis tiga daerah domain yaitu *single* domain, transisi, dan *multi* domain.

Hasil simulasi yang diperoleh dengan menganalisis grafik hubungan rapat energi dengan ukuran sisi kubus terdapat tiga daerah yakni *single* domain, transisi, dan *multi* domain yang menunjukkan bahwa ukuran kritis pada  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$



sebesar 32 nm sedangkan pada  $M_s = 769 \times 10^3$  A/m nilai ukuran kritis yang di tunjukkan dalam grafik sebesar 34 nm. Nilai tersebut didapatkan dari hasil titik terakhir dalam daerah *single* domain yang akan menuju ke daerah transisi. Hasil menunjukkan bahwa ukuran kritis sesuai dengan persamaan Brown. Volume kritis pada grafik hubungan rapat energi dengan volume untuk  $M_s = 860 \times 10^3$  A/m adalah sebesar  $34.455 \text{ nm}^3$  sedangkan jika dibandingkan dengan volume bola nilai volume kritis bola sebesar  $34.457 \text{ nm}^3$ . Untuk  $M_s = 769 \times 10^3$  A/m nilai volume kubus sebesar  $40.283 \text{ nm}^3$  sedangkan volume bola sebesar  $40.288 \text{ nm}^3$ . Dalam hal ini bentuk geometri tidak mempengaruhi kondisi kritis pada domain spin yang terbentuk saat keadaan *ground state* apabila bentuk geometri bola dan kubus mempunyai volume kritis yang sama. Persamaan diameter kritis Brown pada bola dapat digunakan untuk menentukan sisi kritis pada kubus bahan NiFe. Persamaan

$$\text{diameter kritis Brown pada bola adalah } S_c = Dc_r \times \sqrt[3]{\frac{1}{6}\pi}.$$

Analisis kurva histerisis pada tiga daerah domain untuk menunjukkan sifat magnetiknya, perlakuan pertama dengan  $M_s = 860 \times 10^3$  A/m daerah *single* domain dianalisis dengan ukuran 20 nm. Adapun daerah transisi diwakilkan pada ukuran sisi kubus sebesar 32 nm dan untuk *multi* domain diwakilkan pada ukuran sisi kubus sebesar 44 nm. Untuk  $M_s = 769 \times 10^3$  A/m daerah *single* domain diambil untuk mewakili daerah *single* domain, transisi dan *multi* domain secara berurutan adalah sebesar 23 nm, 34 nm dan 46 nm. Melalui analisis kurva histerisis menunjukkan bahwa semakin besar nilai ukuran sisi kubus maka nilai dari medan koersivitas yang dihasilkan juga akan semakin besar.

## PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. karena atas berkat, rahmat serta hidayah-NYA, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “ Analisis Sifat Magnetik Berdasarkan Ukuran Kritis Bahan NiFe Berbentuk *Nanocube* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik”. Sholawat dan salam semoga senantiasa selalu menuntun dan mengiringi langkah dan aktivitas kita dalam melangkah menggapai ridhlo-NYA. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) Jurusan Fisika Fakultas Matematik dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis ingin mengucapkan beribu-ribu terimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu, mendampingi, dan mengarahkan penulis dalam menyusun skripsi ini. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Lutfi Rohman, S.Si, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama sekaligus Dosen Pembimbing Akademik, dan Ibu Endhah Purwandari, S.Si, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, tenaga, dan perhatian dalam membantu penulisan skripsi ini;
2. Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D., selaku Dosen Penguji I dan Ir. Misto, M.Si., selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Segenap Dosen dan Karyawan Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam yang selalu membantu dan mendukung;
4. Orang tuaku Ayahanda Sumardi dan Ibunda Surati Indah Wahyuni tercinta yang telah memberikan semangat, doa, materi, kasih sayang dan dukungan yang tiada henti;
5. Adikku Agni Wahyu Pangestuti yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama penulis menempuh pendidikan;
6. Mukhammad Ulumuddin Maulfi yang telah memberikan dukungan, nasehat, serta motivasi kepada penulis;

7. Sahabat-sahabat tercinta Irmawati Hasanah, Intan Romadhony, Dessy Putri Elok Susanti, Silmina Laili, dan teman-teman tim komputasi magnetik yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama perjalanan studi hingga penulis menyelesaikan jenjang studi ini;
8. Teman-teman seperjuangan angkatan 2015 (Ganesha Phi) yang telah memberikan bantuan dan dukungannya;
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Dengan segala kerendahan hati penulis juga menerima segala kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang Fisika.

Jember, Juli 2019

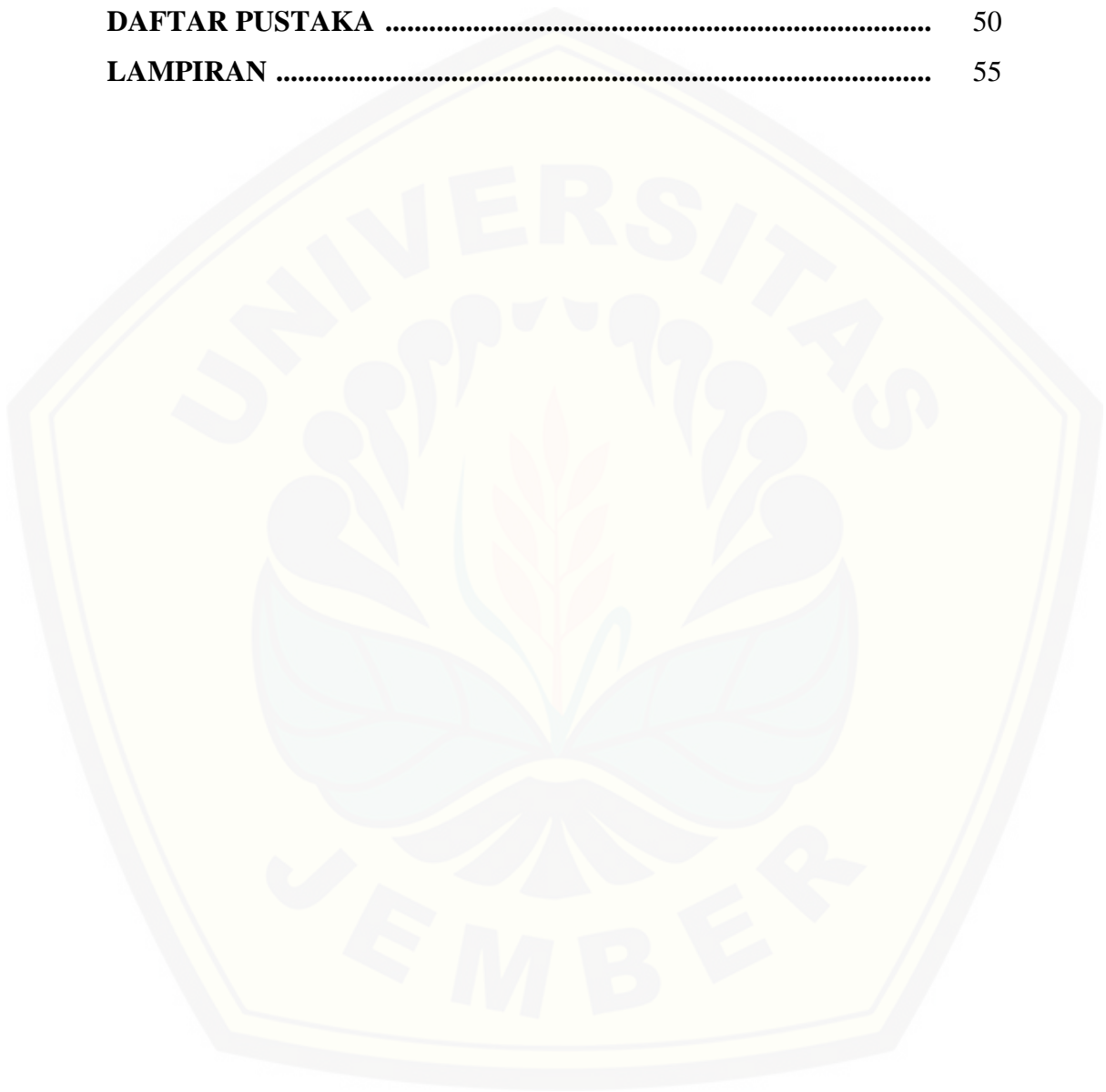
Penulis

**DAFTAR ISI**

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PEMBIMBING</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>RINGKASAN</b> .....	vii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b>	
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	4
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	4
<b>1.4 Tujuan Penelitian</b> .....	5
<b>1.5 Manfaat</b> .....	5
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
<b>2.1 Bahan Magnetik</b> .....	6
2.1.1 Diamagnetik .....	7
2.1.2 Bahan Paramagnetik .....	7
2.1.3 Bahan Feromagnetik .....	7
<b>2.2 Struktur Kristal</b> .....	8
2.2.1 <i>Body Centered Cubic (BCC)</i> .....	8
2.2.2 <i>Face Centered Cubic (FCC)</i> .....	9
2.2.3 <i>Hexagonal Close Pack (HCP)</i> .....	9
<b>2.3 Bahan Feromagnetik NiFe</b> .....	10

2.4 Dinamika Magnetisasi .....	11
2.5 Persamaan Landau-Lifshitz (LL) .....	13
2.6 Diameter Kritis .....	13
2.7 Struktur Domain .....	14
2.7.1 Domain Tunggal ( <i>Single-Domain</i> ) .....	14
2.7.2 <i>Multi Domain</i> .....	15
2.8 Kurva Histerisis .....	16
2.9 Energi pada Sistem Feromagnetik .....	17
2.9.1 Energi <i>Exchange</i> .....	17
2.9.2 Energi Magnetostatik .....	18
2.9.3 Energi Anisotropi .....	19
2.9.4 Energi Zeeman .....	21
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Rancangan Penelitian .....	22
3.2 Jenis dan Sumber Data .....	23
3.3 Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukuran ...	23
3.4 Kerangka Pemecahan Masalah .....	24
3.5 Prosedur Penelitian .....	24
3.6 Metode Analisis Data .....	26
3.6.1 Analisis Penentuan Persamaan Ukuran Kritis .....	26
3.6.2 Analisis Rapat Energi terhadap Sisi Kubus	
Bahan NiFe .....	27
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	28
4.1 Ukuran Kritis dari Bahan NiFe .....	28
4.1.1 Grafik Hubungan Rapat Energi dengan Ukuran Sisi	29
4.1.2 Grafik Hubungan Rapat Energi dengan Volume .....	34
4.2 Analisis Sifat Magnetik Bahan NiFe Menggunakan	
Kurva Histerisis .....	36
4.2.1 Kurva histerisis bahan NiFe untuk	
$M_s=860 \times 10^3 \text{ A/m}$ .....	36
4.2.2 Kurva histerisis bahan NiFe untuk	

$M_s=769 \times 10^3 \text{ A/m}$ .....	42
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	48
<b>5.1 Kesimpulan</b> .....	48
<b>5.2 Saran</b> .....	49
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	50
<b>LAMPIRAN</b> .....	55



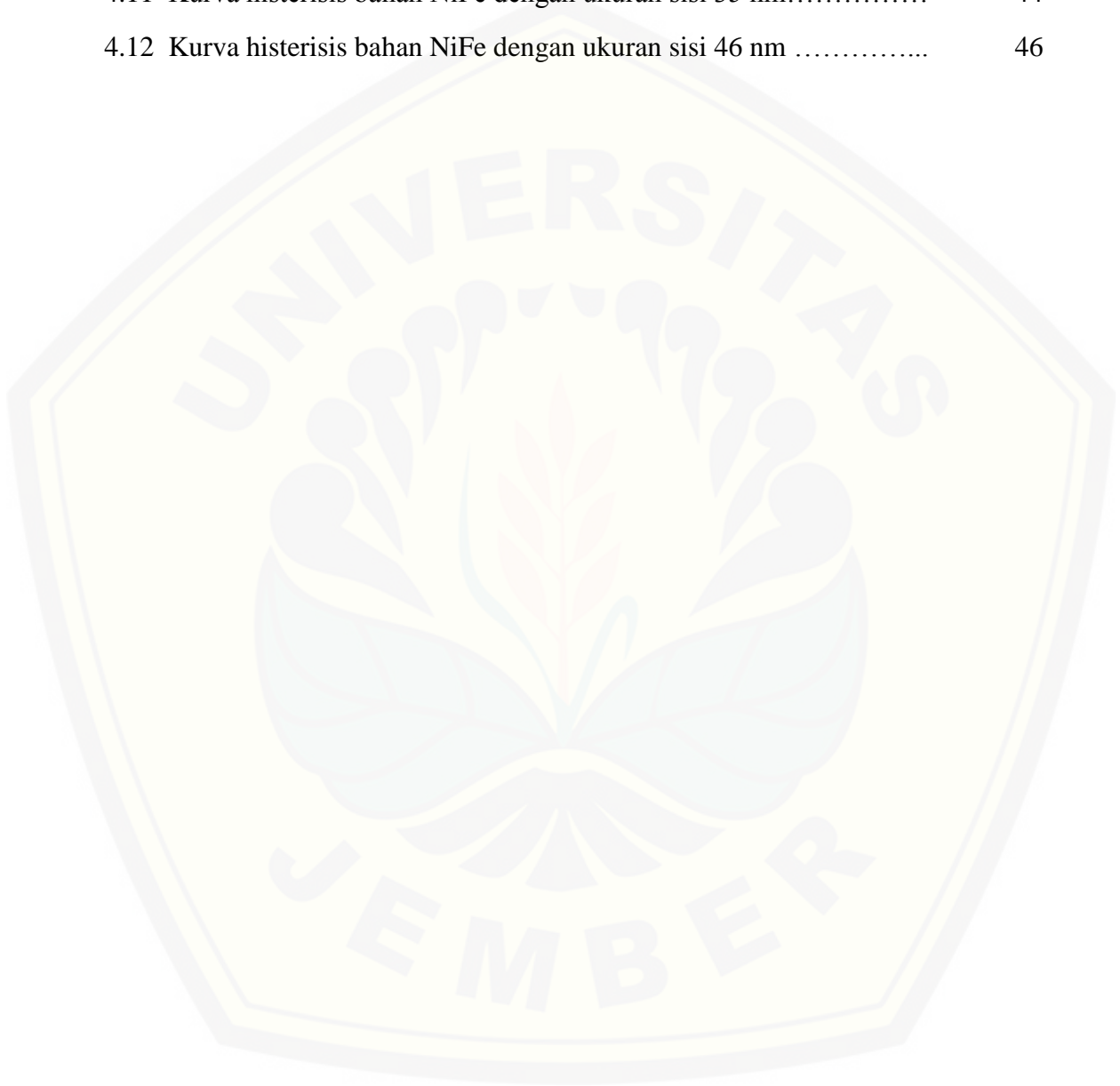


## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Struktur Kristal BCC (Body Centered Cubic) .....	8
2.2 Struktur Kristal FCC (Face Centered Cubic) .....	9
2.3 Struktur Kristal HCP(Hexagonal Close Pack) .....	10
2.4 Struktur kristal FCC pada material NiFe ( ○ atom Ni dan ● atom Fe) .....	11
2.5 Gerak presisi dari momen magnet terhadap medan efektif .....	12
2.6 Tiga kemungkinan keadaan konfigurasi domain magnet saat energi minimum (groundstate) dari partikel magnet bol.....	16
2.7 Kurva histerisis untuk material feromagnetik.....	17
2.8 Pengurangan energi magnetostatik atau energi demagnetisasi akibat orientasi arah dari dipol-dipol magnet.....	19
2.9 Ilustrasi arah magnetisasi dari Fe (kiri) yang mempunyai $K_1 > 0$ arah easy axis pada [100], [010], dan [001].....	20
3.1 Diagram alir penelitian .....	24
3.2 Desain geometri bentuk kubus dengan sisi 15 nm.....	25
3.3 Grafik hubungan rapat energi ( $K \text{ J/m}^3$ ) dengan diameter (nm) .....	26
3.4 Kurva histerisis bahan Feromagnetik .....	27
4.1 Grafik hubungan rapat energi dengan ukuran sisi kubus.....	29
4.2 Visualisasi stuktur domain bahan NiFe dengan bentuk <i>nanocube</i> ...	29
4.3 Grafik hubungan rapat energi dengan ukuran sisi kubus.....	32
4.4 Visualisasi stuktur domain bahan NiFe dengan bentuk <i>nanocube</i> ...	32
4.5 Grafik hubungan rapat energi dengan volume.....	34
4.6 Grafik hubungan rapat energi dengan volume .....	35
4.7 Kurva histerisis bahan NiFe dengan ukuran sisi 20 nm.....	37
4.8 Kurva histerisis bahan NiFe dengan ukuran sisi 32 nm .....	39

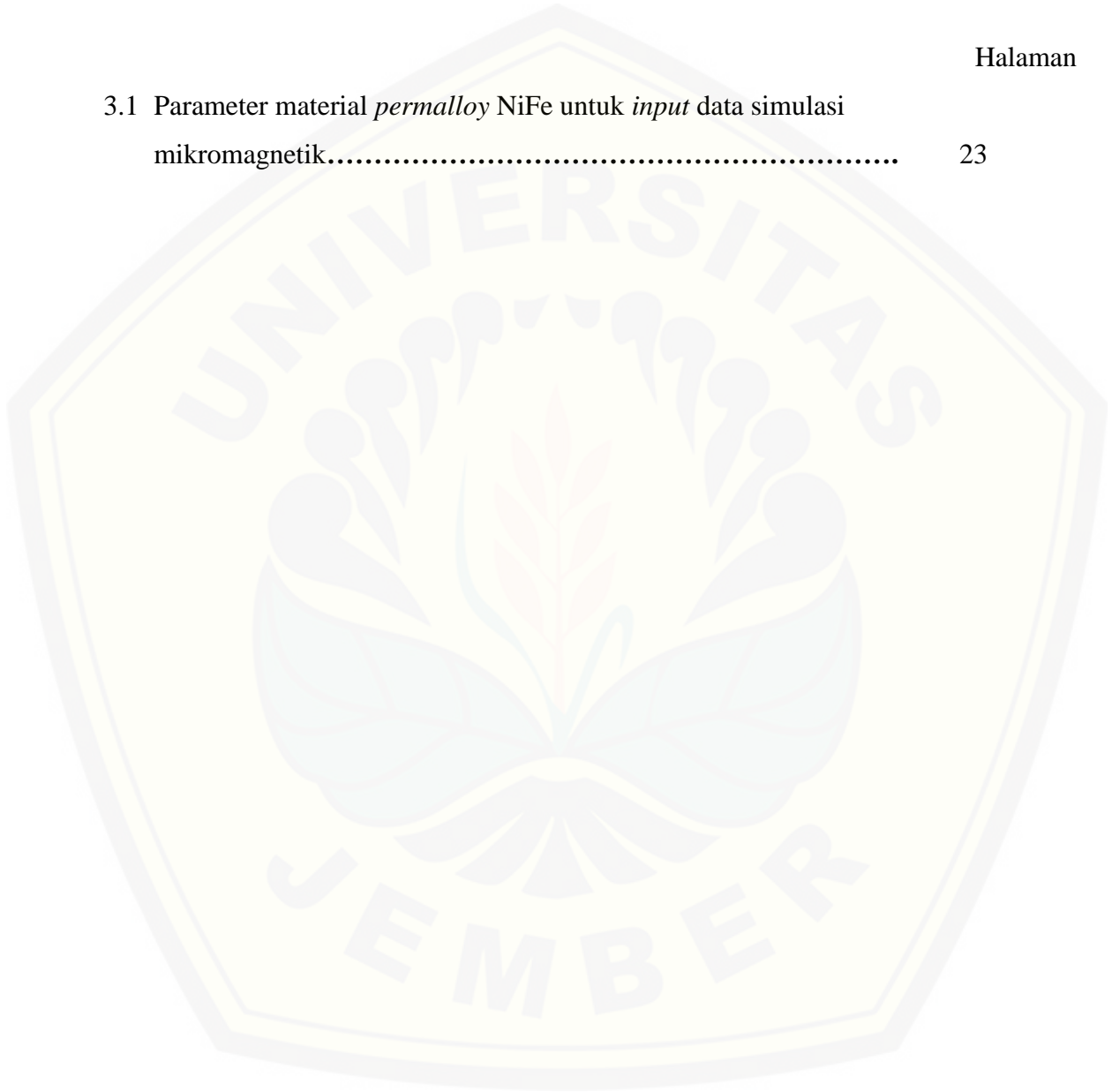


4.9	Kurva histerisis bahan NiFe dengan ukuran sisi 44 nm.....	41
4.10	Kurva histerisis bahan NiFe dengan ukuran sisi 23 nm .....	43
4.11	Kurva histerisis bahan NiFe dengan ukuran sisi 35 nm.....	44
4.12	Kurva histerisis bahan NiFe dengan ukuran sisi 46 nm .....	46



**DAFTAR TABEL**

	Halaman
3.1 Parameter material <i>permalloy</i> NiFe untuk <i>input</i> data simulasi mikromagnetik.....	23



**DAFTAR LAMPIRAN**

	Halaman
4.1 Perhitungan Ukuran Kritis Bahan NiFe dengan Bentuk <i>Nanocube</i> .....	55
4.2 Perhitungan Volume Kubus dan Bola.....	56
4.3 Grafik Hubungan Rapat Energi dengan Sisi dan Volume .....	57
4.4 Kurva Histerisis Bahan NiFe terhadap Variasi Ukuran Sisi Kubus.	59

## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kemampuan teknologi menjadi faktor utama yang dilihat sebagai acuan daya tarik terhadap minat masyarakat yang semakin pintar dalam menentukan standart kualitas setiap teknologi. Salah satu teknologi yang tidak dapat dipisahkan dari manusia adalah komputer yang bisa digunakan untuk membantu memudahkan pekerjaan manusia yang berhubungan dengan komputer, dimana masyarakat mencari dengan harga yang terjangkau tetapi memenuhi kemampuan spesifikasi yang bagus. Pesatnya kemajuan teknologi komputer saat ini, diikuti dengan kian maraknya berbagai produk komputer di pasaran yang memiliki spesifikasi dan harga yang terjangkau. Masyarakat pada umumnya akan memilih komputer dengan harga terjangkau dan spesifikasi yang tinggi (Rogers, 1991). Pemanfaatan teknologi yang sering dijumpai dalam komputer yaitu *hard disk drive* (HDD) yang merupakan media penyimpanan data jangka panjang dan media perekam magnetik yang tidak dapat dipisahkan dari bagian komputer. Upaya peningkatan kapasitas *hard disc drive* (HDD) dilakukan dengan cara meningkatkan kerapatan bit (*bit-areal-density*). Untuk meningkatkan kerapatan bit, ukuran data bit dalam *disc* harus dibuat kecil, namun ketika nilai kerapatan bit ditingkatkan dengan memperkecil ukuran *disc* maka energy magnetisasi akan menurun (Dobisz, 2008). Hingga saat ini kapasitas *Hard Disk Drive* (HDD) masih ditingkatkan guna memenuhi kebutuhan manusia yang semakin membutuhkan teknologi.

*Hard Disk Drive* atau biasa dikenal dengan HDD adalah sebuah media penyimpanan sekunder pada sebuah komputer. Meskipun disebut sebagai media penyimpanan sekunder namun pada kenyataannya berfungsi sangat penting bahkan tidak bisa ditinggalkan lagi untuk kebutuhan sebuah komputer. Bermula pada sekitar tahun 1950 dimana komputer mulai dikenalkan di seluruh penjuru dunia oleh

perusahaan IBM yang berusaha membuat sebuah media penyimpanan dengan kapasitas yang sangat besar untuk memenuhi sekaligus mendukung kinerja sebuah komputer. Pada tahun 1956 IBM menciptakan 305 RAMAC (*Random Acces Method of Accountig and Control*), yaitu media penyimpanan sekunder pertama berupa sebuah *hard disk* dengan fisik yang sangat besar dengan kapasitas data yang disimpan adalah sebesar 5 MB (*Mega Byte*) (Wahyudi, 2005). Salah satu bahan magnetik yang digunakan untuk melapisi *hard disk drive* adalah bahan feromagnetik. Feromagnetik merupakan bahan magnetik yang mempunyai kemampuan suseptibilitas magnetik besar serta mempunyai nilai positif, karena struktur yang dimiliki bahan feromagnetik berbeda dengan bahan magnetik lainnya. Perbedaan struktur tersebut dapat dilihat pada adanya domain magnetik, dimana daerah pada bahan feromagnetik mempunyai momen magnetik yang sejajar (Chaundry dan Kansal, 2015). Beberapa bahan yang termasuk golongan ini, antara lain adalah besi (Fe), nikel (Ni), cobalt (Co), dan paduannya (*alloy*) (Sujadmoko, 2005).

Bahan feromagnetik adalah bahan yang mempunyai resultan medan atomik besar yang disebabkan adanya spin elektron. Adanya spin yang tidak berpasangan akan menimbulkan medan magnetik, sehingga total medan magnetik yang dihasilkan suatu atom menjadi lebih besar (Halliday dan Resnick, 1989). Karakteristik bahan feromagnetik ditentukan dengan loop kurva histerisis, dimana terdapat dua macam karakteristik berdasarkan kurva histerisis *soft magnet* dan *hard magnet*. Loop akan cenderung berbentuk pipih jika medan koersivitasnya kecil, maka bahan dikategorikan kedalam bahan yang *soft magnet*. Medan koersivitas besar yang menghasilkan kurva histerisis merupakan bahan yang termasuk *hard magnet* (Diandra, 1996). Bahan feromagnetik ini menghasilkan anisotropi yang tinggi maka koersivitas yang dihasilkan juga tinggi, sehingga berpotensi diaplikasikan dalam media perekam magnetik (Lestari, 2017).

Tahun 1984 Stoner dan Wohlfirth mengusulkan model yang menggambarkan fenomena magnetik pada partikel kecil (*small particles*). Model ini menggambarkan magnetik yang tersusun atas partikel kecil memiliki orientasi spin domain yang

homogen (domain tunggal) dalam bentuk bangun ellipsoid. Pada keadaan ini, magnetisasi dihasilkan oleh dipol-dipol yang searah (baik besar maupun arah). Magnetisasi total dari sistem ini merupakan penjumlahan vektor dipol individu yang terkandung di dalam sistem. Partikel magnetik berbentuk kubus, setelah melewati daerah diameter tertentu, yang dikenal sebagai diameter kritis (*critical diameter*), umumnya struktur domainnya berubah dari keadaan *single-domain* menjadi *two-domain* atau *vortex* (Widodo, 2013). Pada keadaan ini, energi magnetostatik akan minimum, meskipun semua spin tidak sejajar, namun perubahan arah secara bertahap cukup kecil, sehingga pengurangan diri energi magnetostatiknya lebih besar dibanding kenaikan energi *exchange* (Alberto, 2009). Simulasi mikromagnetik diameter kritis dengan bentuk nanocube menggunakan lapisan tipis bahan NiFe. Bahan *permalloy* NiFe memiliki kemampuan bahan untuk menerima satu keadaan magnetisasi, karena mempunyai polarisasi tunggal atau arah magnetisasi tunggal. Bahan *permalloy* NiFe merupakan bahan feromagnetik yang dapat merespon medan magnet dengan cepat yang diakibatkan oleh adanya perubahan arus (Budi, *et al.*, 2004). Berbagai hasil penelitian mengenai sifat-sifat instrinsik yang dimiliki oleh material feromagnetik pada skala nano menggunakan simulasi mikromagnetik telah banyak dipublikasikan, misalnya konfigurasi struktur domain magnet pada keadaan *groundstate*, yaitu keadaan stabil pada energi minimum tanpa pengaruh medan magnet eksternal (*zero field*) untuk pengamatan dinamika proses magnetisasi (Richard, *et al.*, 2005).

Pada tahun 2013, Widodo telah melakukan pengamatan struktur domain magnet pada kondisi *groundstate*. Di dalam penelitiannya, diameter kritis bahan berbentuk bola pada keadaan *groundstate* telah diperoleh pada masing-masing material feromagnetik. Analisa diameter kritis dilakukan berdasarkan pengamatan keadaan struktur domain yang terbentuk. Selanjutnya dilakukan analisa terhadap energi sistem yang berkontribusi pada keadaan tersebut. Pengamatan struktur domain magnet pada keadaan tanpa medan magnet eksternal (*zero field*) lebih difokuskan pada bentuk struktur domain yang stabil setelah mencapai energi minimum. Terdapat hubungan antara profil energi sistem yang dihasilkan terhadap stuktur domain stabil yang



terbentuk. Analisa dari profil energi sistem lebih difokuskan pada perubahan yang terjadi dari profil energi *exchange* dan energi demagnetisasi terhadap variasi diagonal. Selanjutnya, pada tahun 2016 Bagus Fath Nagara juga melakukan penelitian dengan bentuk yang berbeda yakni bentuk *ellipsoid* dengan variasi diameter yang digunakan ada 20 nilai dengan menganalisis diameter kritis berdasarkan keadaan struktur domain yang terbentuk.

Berdasarkan kajian di atas akan dilakukan penelitian pada bentuk kubus dengan menganalisa dan mengamati ukuran kritis bahan *permalloy* NiFe. Simulasi mikromagnetik ini juga menganalisa kurva histerisis yang menunjukkan sifat magnetik dari bahan *permalloy* NiFe. Beberapa data sifat magnetik bahan yang akan digunakan simulasi mikromagnetik adalah magnetisasi saturasi, konstanta anisotropi, konstanta *exchange*, parameter damping dan *exchange length*. Simulasi mikromagnetik ukuran kritis bahan NiFe dilakukan dengan program NMAG, sebuah program *open source* yang diaplikasikan dalam sistem operasi *Linux*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penelitian simulasi mikromagnetik yang dilakukan, rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah :

1. Berapakah ukuran kritis bahan NiFe yang dihasilkan dari hasil simulasi mikromagnetik?
2. Bagaimanakah sifat magnetik bahan NiFe yang dianalisis berdasarkan kurva histerisis?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian simulasi mikromagnetik antara lain yaitu:

1. Bahan yang digunakan dalam simulasi mikromagnetik bahan NiFe.



2. Aplikasi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu NMAG dalam sistem operasi *Linux*.
3. Bentuk bahan yang digunakan dalam simulasi mikromagnetik ialah *nanocube*.
4. Bahan yang digunakan adalah *Permalloy* NiFe dengan komposisi 80% nikel dan 20% besi.
5. Variabel kontrol yang ada dalam penelitian ini adalah magnetisasi saturasi.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang dilakukan adalah:

1. Mengetahui ukuran kritis bahan yang dihasilkan dari simulasi mikromagnetik,
2. Mendapatkan kurva histerisis untuk sifat magnetik bahan NiFe.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dalam penelitian analisis sifat magnetik untuk ukuran kritis bahan NiFe berbentuk *nanocube* menggunakan simulasi mikromagnetik yaitu dapat memberikan informasi adanya pengaruh variasi sisi terhadap sifat magnetik material NiFe, sehingga memperoleh sifat magnetik terbaik pada bahan NiFe dengan komposisi tertentu dan geometri tertentu yang dapat dijadikan sebagai prediksi atau acuan penelitian *Permalloy* NiFe secara eksperimen untuk diterapkan dalam pembuatan *Hard Disk Drive*.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Bahan Magnetik

Magnetik merupakan fenomena magnetik dimana bahan memiliki kekuatan untuk menarik dan menolak bahan tanpa dipengaruhi sentuhan secara langsung. Bahan magnetik memiliki definisi sebagai material yang memiliki sifat kemagnetan dalam komponen pembentukannya. Secara umum, material magnetik dapat digolongkan menjadi diamagnetik, paramagnetik, dan feromagnetik. Sebagai contohnya dari bahan magnetik yaitu besi, baja, nikel, kobalt serta paduannya (Halliday *et al*, 2011). Bahan dapat dikatakan memiliki sifat magnet jika momen magnet memiliki arah yang sama (tersusun teratur). Pada bahan logam yang merupakan bukan magnet momen magnetnya mempunyai arah sembarangan (tidak teratur) sehingga, efeknya saling meniadakan yang mengakibatkan tidak adanya kutub-kutub magnet pada ujung logam. Seperti diketahui magnet memiliki dua kutub magnet, yaitu kutub utara dan kutub selatan. Kutub magnet adalah daerah magnet yang berada pada ujung-ujungnya. Kekuatan magnet yang paling besar berada pada kutub-kutub magnet tersebut (Callister dan Rethwisch, 2009).

Material diamagnetik merupakan suatu bahan yang memiliki momen magnetik dari seluruh elektron dalam setiap atom yang saling meniadakan, yang membuat setiap atom bernilai nol pada momen magnetik tanpa adanya medan luar. Material paramagnetik ialah suatu material yang atom-atomnya memiliki momen magnetik permanen yang berinteraksi satu sama lain secara lemah dimana momen magnetiknya akan cenderung searah dengan medan magnet luar. Sedangkan material feromagnetik merupakan material yang memiliki resultan momen dipol magnetik sejajar, yang menghasilkan daerah dengan momen dipol magnetik kuat. Sejumlah medan luar yang sangat kecil dapat menyebabkan momen dipol magnetik atomnya memiliki derajat penyearahan yang tinggi (Halliday, *et al.*, 2011).

### 2.1.1 Diamagnetik

Bahan diamagnetik merupakan bahan yang permeabilitasnya relatif lebih kecil dari satu dan suseptibilitasnya negatif sangat kecil yaitu antara  $-10^{-5}$  hingga  $-10^{-4}$  (Tipler, 2001). Momen magnetik pada bahan diamagnetik ini saling meniadakan satu dengan yang lainnya. Jika medan magnet diberikan untuk bahan diamagnetik ini maka gerakan dalam elektron-elektron akan berubah sehingga menghasilkan arah dari resultan medan magnet berlawanan, dapat dikatakan magnetisasi (M) yang terjadi berlawanan arah dengan medan magnet luar (H). Sifat diamagnetik bahan menimbulkan gerak orbital pada bahan yang bersifat diamagnetik karena atom mempunyai elektron orbital pada bahan tersebut. Suatu bahan dapat bersifat magnet apabila susunan atomnya memiliki spin elektron yang tidak berpasangan. Dalam bahan diamagnetik ini hampir semua bahan memiliki spin elektron yang berpasangan, sehingga bahan ini tidak dapat menarik garis gaya (Donald, *et al.*, 2011).

### 2.1.2 Bahan Paramagnetik

Bahan paramagnetik merupakan bahan yang memiliki nilai suseptibilitasnya sangat kecil namun positif (Tipler, 2001). Bahan ini memiliki resultan medan magnet atomik bernilai tidak nol pada masing-masing atomnya, namun resultan medan magnet atomik total pada seluruh atom di bahan ini bernilai nol. Hal ini karena gerakan atomnya acak, sehingga resultan medan magnet atomik masing-masing atom saling meniadakan (Jiles, D.C, 1998). Perbandingan momen yang menyearahkan dengan medan ini bergantung pada kekuatan medan dan pada temperaturnya. Pada medan magnetik luar yang kuat pada suhu yang sangat rendah, hampir seluruh momen akan disearahkan dengan medannya (Tipler, 2001).

### 2.1.3 Bahan Feromagnetik

Bahan feromagnetik merupakan bahan yang memiliki nilai suseptibilitas magnetiknya tinggi dan bernilai positif, serta muncul dalam bahan yang atom-atomnya memiliki momen magnet permanen yang kuat satu sama lain dan meskipun medan

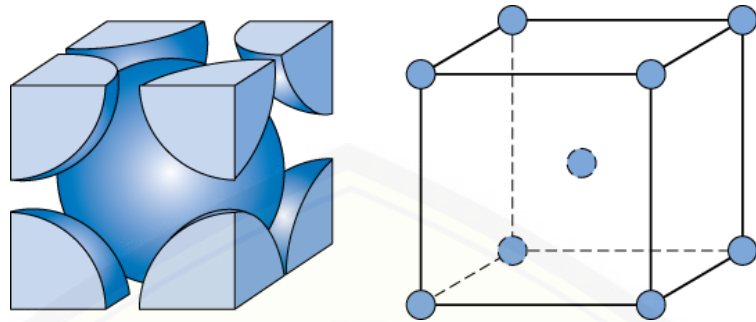
magnet luarnya dihilangkan bahan ini mampu mempertahankan sifat-sifat magnetiknya. Medan magnet luar dalam bahan ini menyebabkan derajat penyearahan yang tinggi pada momen dipol magnet atomnya. Hal ini terjadi karena momen dipol magnetik atom dari bahan feromagnetik ini mengerahkan gaya-gaya yang kuat pada atom tetangganya sehingga dalam daerah ruang yang sempit momen ini diserahkan satu sama lain sekalipun medan luarnya tidak ada lagi. Daerah ruang momen magnetik yang diserahkan ini disebut dengan daerah magnetik. Semua momen magnetik dalam daerah ini diserahkan, tetapi arah penyearahnya beragam dari daerah ke daerah sehingga kepingan mikroskopik momen magnetik total dari bahan ini adalah nol dalam keadaan normal (Tipler, 2001).

## 2.2 Struktur Kristal

Struktur Kristal dapat dibagi menjadi tiga jenis yang banyak dijumpai pada kebanyakan logam, yaitu : kubus pusat ruang (*Body Centered Cubic = BCC*), kubus pusat sisi (*Face Centered Cubic = FCC*), dan heksagonal (*Hexagonal Close Packed = HCP*) (Callister dan Rethwisch, 2009).

### 2.2.1 *Body Centered Cubic (BCC)*

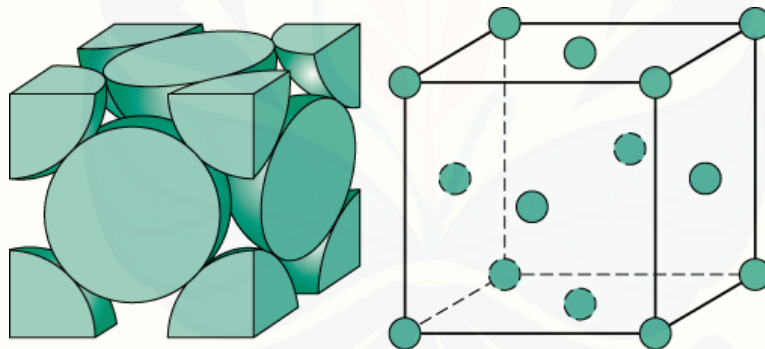
Kristal BCC merupakan struktur kristal dengan satu atom berada di setiap sudut dan di tengah terdapat satu atom, sehingga jumlah atom dalam satu unit sel terdapat sembilan atom. Bilangan koordinasi untuk struktur kristal BCC adalah delapan. Contoh bahan yang memiliki struktur kristal BCC adalah Na, Ba, Cr, Fe, Mo, Cs dan Rb (Borg, 1992). Struktur Kristal BCC dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur Kristal BCC (*Body Centered Cubic*) (Sumber: Callister dan Rethwisch, 2009)

### 2.2.2 *Face Centered Cubic* (FCC)

Kristal FCC merupakan struktur kristal dengan satu atom berada di setiap sudut dan setiap pertengahan sisi terdapat satu atom, sehingga jumlah atom dalam satu unit sel terdapat empat belas atom. Bilangan koordinasi untuk struktur kristal FCC adalah dua belas. Contoh bahan yang memiliki struktur Kristal FCC adalah Al, Ca, Au, Ni, Ag, Sr, Kr, dan Pt (Borg, 1992). Struktur Kristal FCC dapat dilihat pada Gambar 2.2.



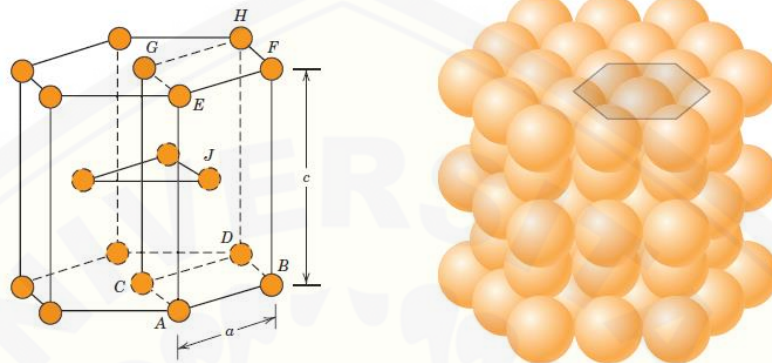
Gambar 2.2 Struktur Kristal FCC (*Face Centered Cubic*) (Sumber: Callister dan Rethwisch, 2009)

### 2.2.3 *Hexagonal Close Pack* (HCP)

Kristal HCP merupakan struktur kristal dengan satu atom berada di setiap sudut, di tengah sisi atas dan bawah terdapat satu atom dan di tengah heksagonal terdapat tiga taom, sehingga jumlah atom dalam satu unit sel terdapat tujuh belas atom. Bilangan koordinasi untuk struktur kristal HCP adalah dua belas. Contoh bahan yang



memiliki struktur kristal HCP adalah Co, Mg, Zn, Ti, Zr, dan Te (Borg, 1992). Struktur kristal HCP dapat dilihat pada Gambar 2.3.



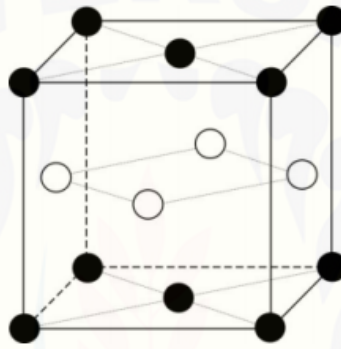
Gambar 2.3 Struktur Kristal HCP(*Hexagonal Close Pack*) (Sumber: Callister dan Rethwisch, 2009)

### 2.3 Bahan Feromagnetik NiFe

Bahan feromagnetik NiFe merupakan bahan campuran logam atau bahan *permalloy* yang tersusun atas 80% nikel dan 20% besi (Putu, 2013). Fe merupakan bahan yang mudah mengalami korosi dalam udara lembab, relative lunak dan juga sebuah bahan logam mengkilat berwarna putih. Bahan Fe mudah dicampurkan dengan material lain, sehingga menjadi material yang keras dan tidak mudah berkarat. Material yang cocok dipadukan dengan Fe yakni material Ni. Ni sendiri merupakan material yang berwarna putih mengkilat, keras dan tahan terhadap korosi (Smith, 1993). Bahan feromagnetik NiFe ini dipilih karena menghasilkan anisotropi yang tinggi maka koersivitas yang dihasilkan juga tinggi, sehingga berpotensi diaplikasikan dalam media perekam magnetik (Lestari, 2017).

Perpaduan logam NiFe merupakan salah satu contoh paduan yang dibuat untuk memperbaiki sifat magnetik bahan dengan tingkatan mutu yang beragam (Sudjadmoko, 2005). *Permalloy* merupakan kombinasi dalam senyawa atau larutan dua atau lebih elemen, salah satu bahan tersebut adalah logam dan hasilnya memiliki

sifat metalik tinggi. *Permalloy* NiFe merupakan paduan dari anisotropi magnetik rendah, magnetisasi yang tinggi, resistansi kuat terhadap korosi dan material feromagnetik dengan susceptibilitas yang lebih (Sihues *et al*, 2007). Bahan *permalloy* NiFe mempunyai magnetisasi tunggal atau hanya satu keadaan polarisasi magnetik, bahan ini dapat dianalisis dengan XRD yang mengindikasikan bahwa struktur lapisan bahan yang terbentuk didominasi oleh suatu karakteristik kubus berpusat sisi (FCC) (Purnama, *et al.*, 2004).



Gambar 2.4 Struktur kristal FCC pada material NiFe (  $\circ$  Ni dan  $\bullet$  Fe) (Sumber: VERNYHORA, 2009)

Menurut Crangle dan Hallam (1962), perubahan struktur Kristal dari BCC ke FCC pada saat komposisi Ni 30% dan struktur BCC terjadi pada komposisi 0% - 32,2 % Ni dan FCC pada komposisi 31% dan 80% Ni.

#### 2.4 Dinamika Magnetisasi

Keadaan setimbang magnetisasi dari material feromagnetik dapat ditentukan dengan persamaan Brown, namun tidak dapat menjelaskan proses dinamika magnetisasi yang terjadi ketika menuju setimbang. Model dinamika magnetisasi pertama kali diperkenalkan oleh Landau dan Lifshitz (LL) pada tahun 1935. Pada perkembangannya, persamaan LL sangat baik dalam menjelaskan dinamika magnetisasi pada kondisi energi kecil dan dengan faktor redaman yang kecil. Selanjutnya, pada tahun 1955 Gilbert kembali memformulasikan persamaan LL



dengan memperhitungkan parameter redaman dan yang sekarang dikenal dengan persamaan *Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)* (Gilbert, T.L, 1995).

Dinamika magnetisasi adalah suatu momen magnet  $\mathbf{m}$  yang mendapatkan medan eksternal  $\mathbf{H}$ , sehingga melakukan gerak presisi (*precession motion*) di sekitar arah dari medan magnet eksternal yang diberikan. Hubungan torca dan perubahan momentum angular terhadap waktu adalah :

$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{M} \times \mathbf{H} \quad (2.1)$$

Pada momen magnet sendiri terdapat orde atom yang memiliki hubungan dengan momentum angular yang didefinisikan sebagai berikut :

$$\mathbf{M} = -\gamma\mathbf{L} \quad (2.2)$$

dimana  $\gamma = 2,11 \times 10^5 \text{mA}^{-1}\text{s}^{-1}$  ialah nilai absolut dari *gyromagnetic ratio* untuk sebuah elektron :

$$\gamma = g \frac{|e|\hbar}{2m_e c} \quad (2.3)$$

dimana,  $g \approx 2$  adalah factor *Lande*, muatan elektron  $e = -1,6 \times 10^{-19} \text{C}$  dan massa elektron  $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{kg}$ , kecepatan cahaya  $c = 3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ , maka untuk persamaan momen magnetik  $\mathbf{m}$  terhadap waktu dapat ditulis :

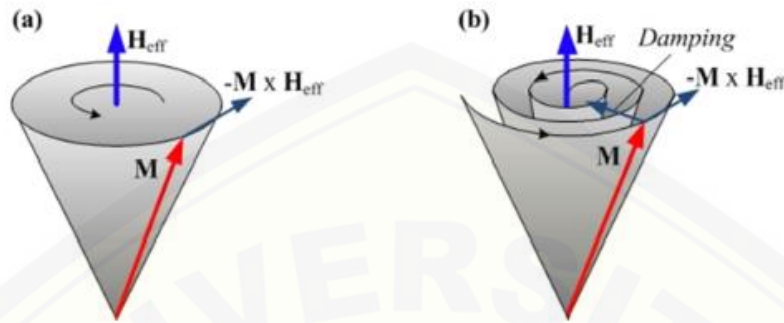
$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\gamma\mathbf{m} \times \mathbf{H} \quad (2.4)$$

Dapat diasumsikan untuk spin momen magnet yang bergerak sepanjang elemen volume  $dV$ , maka dapat persamaannya dapat dituliskan :

$$\frac{1}{dV} \frac{d\sum \mathbf{m}}{dt} = -\gamma \frac{d\sum \mathbf{m}}{dV} \times \mathbf{H} \quad (2.5)$$

dimana,  $\mathbf{M} = \frac{d\sum \mathbf{m}}{dt}$ , sehingga persamaan (2.5) menjadi :

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H} \quad (2.6)$$



Gambar 2.5 Gerak presisi dari momen magnet terhadap medan efektif. (a) tanpa redaman, (b) dengan redaman (*damping*) (Widodo, 2013)

## 2.5 Persamaan Landau-Lifshits (LL)

Dinamika gerak spin magnet dapat digambarkan sebagai gerak rotasi dari momen magnet terhadap arah medan magnet efektif  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$  pada saat keadaan equilibrium. Maka secara matematis hubungan diatas dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times H_{\text{eff}} \quad (2.7)$$

Dari persamaan (2.7) dapat dideskripsikan bahwa tidak ada kecenderungan gerak spin magnet yang menyearahkan diri terhadap  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ . Seperti pada Gambar (2.5) (a). Landau-Lifshitz telah menyempurnakan dengan memasukkan faktor redaman pada gambar (2.) (b.) ke persamaan (2.7) sehingga menjadi :

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\mathbf{M} \times H_{\text{eff}} \frac{\lambda}{|\mathbf{M}|} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times H_{\text{eff}}) \quad (2.8)$$

dimana  $\lambda > 0$  merupakan factor redaman Landau-Lifshitz dan  $|\mathbf{M}| = M_s$ . Persamaan (2.8) tersebut dikenal dengan persamaan Landau-Lifshitz (LL) (Ismail, 2013).

## 2.6 Diameter Kritis

Menurut Widodo (2013) tahun 1996 Kittel memaparkan mengenai diameter kritis *single domain* dengan cara membandingkan energi yang diperlukan untuk membuat dinding domain terhadap pengurangan energy magnetostatik atau energy demagnetostatik selama penciptaan atau pembuatan struktur domain, maka diberikan persamaan :

$$DC_1 = \left( \frac{9\gamma_w}{2\pi M_s^2} \right) \quad (2.9)$$

dengan  $\gamma_w = 2\sqrt{AK}$  adalah energy permukaan *Blochwall* dalam material, A adalah konstanta *exchange*, K adalah konstanta anisotropi, dan  $M_s$  adalah magnetisasi saturasi. Kemudian Brown, menghitung secara rinci batas ukuran diameter kritis untuk struktur *single-domain* dengan meninjau energy minimumnya dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$DC_2 = 7,221 \sqrt{\frac{2A}{\mu M_s^2}} = 7,221 l_{ex} \quad (2.10)$$

dengan,  $l_{ex} = \sqrt{\frac{2A}{\mu M_s^2}}$ ,  $l_{ex}$  adalah *exchange length* dan  $\mu$  adalah permeabilitas bahan.

Menurut R, Skomsi (2008) memprediksikan diameter kritis untuk struktur *single-domain* pada temperature ruang dengan persamaan :

$$DC_3 = \frac{72\sqrt{AK}}{\mu_0 M_s^2} \quad (2.11)$$

Sedangkan untuk energy system, Brown secara terperinci telah memprediksi energy transisi yang terjadi dari keadaan struktur *single-domain* menjadi *multi-domain*. Untuk material *soft-magnet* maka diberikan persamaan :

$$DC_4 = \frac{9,0584 \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}}}{1 - 2,8075 \frac{2K}{\mu_0 M_s^2}} = \frac{9,0584}{1 - 2,8075K} l_{ex} \quad (2.12)$$

dengan  $k = \frac{2K}{\mu_0 M_s^2}$ , adalah *Hadness parameter* sedangkan untuk *Hard-magnet* :

$$DC_5 = 9\pi \sqrt{\frac{2A(K_1 + 2\sigma\mu M_s^2)}{\mu_0 M_s^2(3\sigma - 2)}} = \frac{9\pi\sqrt{k+4\sigma}}{\sqrt{2(3\sigma-2)}} l_{ex} \quad (2.13)$$

dengan  $\sigma = 0,785398$ .

## 2.7 Struktur Domain

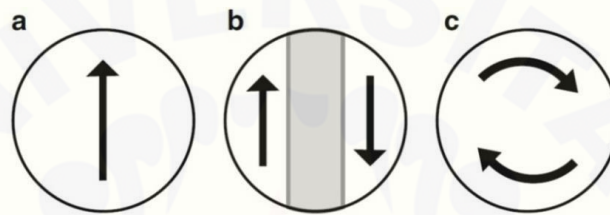
### 2.7.1 Domain Tunggal (*Single-domain*)

Tahun 1984 Stoner dan Wohlfarth mengusulkan model yang menggambarkan fenomena magnetik pada partikel kecil (*small particles*). Model ini dianggap bahwa partikel magnetik pada homogen memiliki domain tunggal dengan bentuk ellipsoid. Magnetisasi pada keadaan ini menghasilkan dipol-dipol yang searah, magnetisasi total dari sistem merupakan penjumlahan vektor dipol individu yang terkandung di dalam sistem. Sehingga magnetisasi sistem ini dapat digambarkan sebagai vektor tunggal  $|M| = \sum_i^N m_i = Nm$ . Model ini menganggap spin-spin dalam sistem berinteraksi sangat lemah, dapat dikatakan model ini mengabaikan interaksi *exchange* yang terjadi dalam sistem. Berdasarkan pendekatan mikromagnetik, pada saat *single-domain*, momen magnet sejajar sumbu anisotropi secara keseluruhan, maka kontribusi energy *exchange* dan energi anisotropi dari total energi sistem adalah nol. Energi magnetostatik adalah satu-satunya energi yang relevan. Sebuah partikel dengan struktur domain tunggal (*single-domain*) dapat disebut dengan partikel Stoner-Wohlfarth (Mardona, 2012).

### 2.7.2 Multi Domain

Domain magnet ini dibagi menjadi 2 bagian yaitu, *single domain* dan *multi domain*. *Single domain* sendiri adalah suatu domain magnet yang pergerakan spinnya searah atau searah dengan jarum jam. *Multi domain* adalah pergerakan spinnya tidak searah, sedangkan transisi pergerakan spin yang awalnya searah atau *single domain* lalu pada selang beberapa waktu spinnya berbelok arah. Keadaan *multi domain* ini

umumnya ialah perubahan dari keadaan *single-domain* menjadi *two-domain* atau *vortex* pada diameter bahan yang disimulasikan. Pada keadaan ini, energy magnetostatik akan minimum meskipun semua spin tidak sejajar namun perubahan arah secara bertahap cukup kecil sehingga pengurangan dari energy magnetostatik lebih besar dibandingkan kenaikan energy *exchange*. Perubahan antara *single-domain* ke *multi-domain* akan melewati daerah transisi yang menjadi penghubung antar kedua daerah tersebut (Widodo, 2013).



Gambar 2.6 Tiga kemungkinan keadaan konfigurasi domain magnet saat energi minimum (*groundstate*) dari partikel magnet bol (*spherical magnetik particle*) (a) *single domain* (b) *two domain* (c) *vortek state* (Widodo, 2013)

## 2.8 Kurva Histerisis

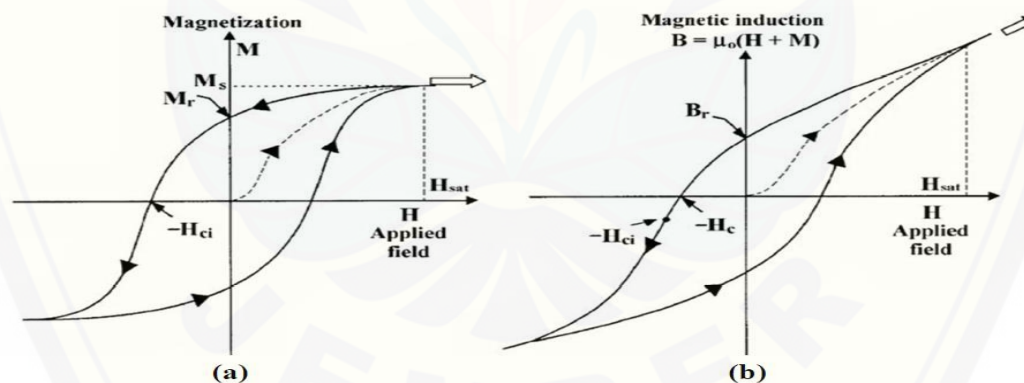
Material feromagnetik mempunyai karakteristik yang cukup berbeda dari material lainnya yaitu ketika diberi gangguan medan luar ( $\mathbf{H}$ ), kurva yang terbentuk dapat berupa *loop* histerisis. Histerisis adalah suatu sifat yang dimiliki oleh suatu system yang tidak secara cepat mengikuti gaya yang diberikan kepadanya, tetapi memberikan reaksi secara perlahan atau bahkan tidak kembali pada keadaan awalnya. Pemetaan induksi magnet  $B$  terhadap kuat medan magnet  $H$  yang berbeda selain itu juga dapat dilakukan pemetaan hubungan antara magnetisasi dan kuat medan. Gambar 2.7 (a) merupakan kurva histerisis antara  $M$  dan  $H$  atau antara  $J$  ( $J = \mu_0 M$ ) dan  $H$  disebut dengan kurva histerisi instrinsik. Kurva histerisis pada bahan merupakan bentuk disipasi energy yang terjadi selama proses pembentukan kurva  $B$ - $H$  yang biasa disebut dengan kurva histerisis normal yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 (b). Kedua gambar tersebut memberikan informasi yang sama karena antara  $B$ ,  $M$  dan  $H$  memenuhi persamaan :



$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.14)$$

Simbol-simbol pada persamaan (2.21) menunjukkan bahwa  $B$  adalah induksi magnetik,  $\mu_0$  adalah permeabilitas ruang hampa,  $H$  adalah medan magnet dan  $M$  adalah magnetisasi (Yani *et al*, 2014).

Dapat dilihat dari kurva histerisis Gambar 2.7 terlihat bahwa material feromagnetik pada awalnya belum termagnetisasi. Medan magnet  $H$  yang diberikan pada material menyebabkan magnetisasi meningkat sebanding dengan medan magnet  $H$ . Pertambahan nilai magnetisasi  $M$  ini diakibatkan oleh pergerakan dari domain magnet. Jika besar medan magnet  $H$  yang diberikan meningkat terus menerus, magnetisasi akhirnya akan mencapai keadaan jenuh (saturasi). Besarnya nilai magnetisasi pada keadaan saturasi ini dikenal dengan magnetisasi saturasi  $M_s$ . Sedangkan besar medan yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan saturasi dikenal dengan medan saturasi  $H_{sat}$ . Pada keadaan ini seluruh momen magnet membentuk domain tunggal yang terorientasi searah dengan medan magnet  $H$  yang diberikan.



Gambar 2.7 Kurva histerisis untuk material feromagnetik. (a)  $M$  terhadap  $H$  :  $M_r$  adalah magnetisasi remanen;  $H_{ci}$  adalah koersivitas instrinsik;  $M_s$  adalah magnetisasi saturasi; (b)  $B$  terhadap  $H$  :  $B_r$  adalah remanen;  $H_c$  adalah medan koersivitas (Yani *et al*, 2014)

Medan koersivitas adalah intensitas medan magnet yang diterapkan atau diperlukan untuk magnetisasi bahan ke nol setelah magnetisasi telah mencapai saturasi.



Sedangkan definisi dari magnetisasi remanen adalah sisa medan magnet  $B$  dalam proses magnetisasi pada saat medan magnet  $H$  dihilangkan atau remanensi terjadi pada saat intensitas medan magnetik  $H$  bernilai nol dan medan magnet  $B$  menunjukkan nilai tertentu (Nurul. A, 2011).

## 2.9 Energi pada Sistem Feromagnetik

### 2.9.1 Energi *Exchange*

Energi *exchange* ( $E_{ex}$ ) merupakan energy yang ditimbulkan oleh interaksi spin dengan spin tetangganya melalui *exchange coupling*. Energi ini dapat dijelaskan dengan model Heisenberg sebagai berikut :

$$E_{ex} = -2J \sum_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \quad (2.15)$$

dimana,  $J$  adalah konstanta *exchange* ( $J/m$ ),  $\mathbf{S}_i$  dan  $\mathbf{S}_j$  adalah unit vektor dua spin atom yang berinteraksi. Interaksi dua spin tergantung pada spin paralel atau antiparalel yang harus disesuaikan dengan prinsip larangan Pauli (*Pauli exclusion*) yaitu tidak diperkenankan ada dua elektron yang mempunyai bilangan kuantum yang sama pada tempat dan waktu yang sama. Sehingga, energi *exchange* untuk seluruh volume bahan magnet adalah

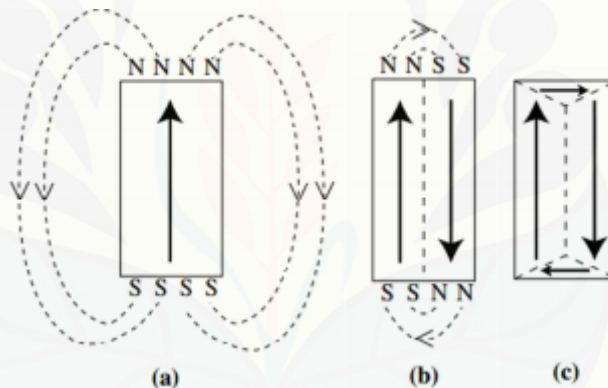
$$E_{ex} = A \int_V (\nabla \mathbf{m})^2 dV = \frac{A}{M_s^2} \int_V (\nabla \mathbf{M})^2 dV \quad (2.16)$$

dengan  $A = \left(\frac{1}{6}\right) nJS^2 \sum \Delta \mathbf{r}_j^2$  merupakan konstanta *exchange stiffness* ( $J/m$ ),  $\mathbf{M} = M_s \cdot \mathbf{m}$ , dimana  $\mathbf{M}$  adalah magnetisasi ( $A/m$ ) dan  $M_s$  adalah magnetisasi saturasi ( $A/m$ ). Persamaan di atas bersifat isotropik karena  $E_{ex}$  tidak bergantung pada arah perubahan magnetisasi (Getzlaff, 2008).

### 2.9.2 Energi Magnetostatik

Energi magnetostatik material magnet berasal dari interaksi muatan kutub-kutub seperti muatan kutub positif dan kutub negatif (dipol-dipol) yang berasal dari

bahan itu sendiri. Gambar 2.8 mengilustrasikan bahwa magnetisasi menyebabkan dipol-dipol berperilaku sebagai magnet dengan medan magnetik di sekitarnya. Medan magnetik tersebut dikenal dengan sebutan medan demagnetisasi (*demagnetizing field*)  $H_d$ . Sehingga energi magnetostatik sering juga disebut sebagai energi demagnetisasi. Besarnya energi magnetostatik sangat bergantung pada jumlah dipol serta arah orientasi antara dipol-dipol. Ketika dipol-dipol pada bahan magnet memiliki orientasi arah yang sama satu dengan lainnya, energi magnetostatiknya akan lebih besar, seperti pada gambar 2.8 (a), bila dibandingkan dengan bahan magnet dengan dipol-dipol anti paralel satu dengan lainnya, seperti pada gambar 2.8 (b). Sedangkan keadaan dipol-dipol seperti pada gambar 2.8 (c) menyebabkan energi magnetostatik ini bernilai minimum (Guimarães, 2009).



Gambar 2.8 Pengurangan energi magnetostatik atau energi demagnetisasi akibat orientasi arah dari dipol-dipol magnet (Nicola, 2011)

Energi magnetostatik  $E_d$ , dapat dianggap sebagai besarnya energi magnetisasi di dalam medan demagnetisasi yang dituliskan oleh persamaan berikut:

$$E_d = -\frac{1}{2}\mu_0 \int_V \mathbf{H}_d \mathbf{M} dV \quad (2.17)$$

Dimana  $\mathbf{H}_d$  adalah medan demagnetisasi dan  $\mathbf{M}$  adalah magnetisasi. Energi magnetostatik  $E_d$  dapat juga ditentukan nilainya menggunakan persamaan berikut

$$E_d = \frac{1}{2}\mu_0 \int_{allspace} \mathbf{H}_d^2 dV \quad (2.18)$$

Nilai  $H_d$  ditentukan oleh persamaan

$$\mathbf{H}_d = -N_d \mathbf{M} \quad (2.19)$$

dimana  $N_d$  adalah faktor demagnetisasi yang bergantung pada bentuk bahan dan arah magnetisasi. Faktor demagnetisasi  $N_d$  untuk bahan berbentuk bola adalah  $\frac{1}{3}$  (Guimarães, 2009).

### 2.9.3 Energi Anisotropi

Energi anisotropi adalah energi yang mengacu pada arah magnetisasi dan sumbu kristalografi (*crystallographic axis*). Pada banyak kasus yang ditemui, acuan magnetisasi memiliki kecenderungan untuk sejajar sepanjang arah sumbu mudah kristal (*easy axis direction*). Energi anisotropi per unit volume  $E_{ani}(\mathbf{m})$  berbentuk bola dengan sudut magnetisasi disimbolkan  $\varnothing$  dan  $\theta$  dalam bentuk persamaan

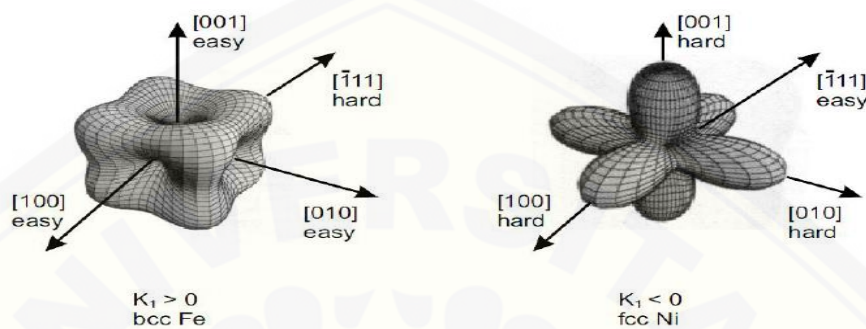
$$E_{ani}(\mathbf{m}) = \int_V E_{ani}(\mathbf{m}) dV \quad (2.20)$$

dimana  $\mathbf{m} = (\sin \theta \cos \varnothing e_x + \sin \theta \sin \varnothing e_y + \cos \theta e_z)$  dan vektor  $e_x$ ,  $e_y$ , dan  $e_z$  bersesuaian dengan sumbu kristalografi  $a$ ,  $b$ , dan  $c$ . Dalam kasus uniaksial, maka energi anisotropi dinyatakan dengan persamaan

$$\epsilon_{ani} = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + K_3 \sin^6 \theta + \dots \quad (2.21)$$

dengan  $K_1$ ,  $K_2$ , dan  $K_3$  adalah konstanta anisotropi dalam satuan  $J/m^3$  dan  $\theta$  merupakan sudut antar magnetisasi dengan sumbu kristalografi.  $K_1$  adalah konstanta uniaksial anisotropi yang dapat bernilai positif atau negatif. Untuk nilai  $K > 0$ , maka energi minimumnya terletak pada  $\theta = 0$  dan  $\theta = \pi$ . Hal ini dapat menunjukkan bahwa sumbu mudah (*easy axis*) sejajar dengan sumbu simetris dan dikenal sebagai *easy axis anisotropy*. Untuk nilai  $K < 0$ , maka energi minimumnya terletak pada  $\theta = \pi/2$ . Hal

ini menunjukkan bahwa sudut ini biasa disebut sebagai *easy plane anisotropy* (Guimarães, 2009).



Gambar 2.9 Ilustrasi arah magnetisasi dari Fe (kiri) yang mempunyai  $K_1 > 0$ , arah *easy axis* pada  $[100]$ ,  $[010]$ , dan  $[001]$ . Untuk arah *hard axis* pada  $[111]$ . Untuk Ni (kanan) dengan  $K_1 < 0$ , arah *easy axis*  $[\bar{1}11]$  dan arah *hard axis*  $[100]$ ,  $[010]$ , dan  $[001]$  (Boardman, et. al, 2004)

Kontribusi energi anisotropi yang lain adalah energi anisotropi dari pengaruh bentuk (*shape anisotropy energy*). Anisotropi bentuk berasal dari interaksi magnetostatik yang bergantung pada bentuk sampel (bola, elips, dan kubus). Pengaruh bentuk ini dapat dinyatakan dalam sebuah faktor demagnetisasi  $N$  dalam 3 sumbu utama ( $x, y, z$ ). Hal ini terdapat hubungan sederhana yaitu  $N_a + N_b + N_c = 1$ . Contoh bentuk bola mempunyai faktor demagnetisasi  $N = 1/3$  dimana  $N_a = N_b = N_c$ , untuk silinder dengan  $N_a = N_b$  dan  $N_c = \infty$ , silinder mempunyai  $N_a = N_b = 1/2$ , dan untuk bidang datar  $N_a = N_b = 0$  dan  $N_c = 1$  (Hughes, 2000).

#### 2.9.4 Energi Zeeman

Energi Zeeman adalah bentuk energi yang berasal dari interaksi medan vektor magnetisasi (momen magnet) dengan medan magnet luar  $\mathbf{H}_{ext}$ . Besarnya energi Zeeman dapat ditentukan dengan persamaan

$$E_z = -\mu_0 \int \mathbf{H}_{ext} \cdot \mathbf{M} dV \quad (2.22)$$

dimana,  $M$  adalah magnetisasi dan  $H_{ext}$  adalah medan magnet eksternal yang diberikan pada bahan magnetik. Energi Zeeman akan bernilai kecil pada saat arah magnetisasi searah dengan arah medan luar (Guimarães, 2009).





## BAB 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Pelaksanaan kegiatan penelitian ini dimulai dari bulan Februari sampai Maret 2019. Alat yang digunakan pada penelitian ini berupa 1 set perangkat computer yang terdiri atas layar monitor, CPU, keyboard, dan mouse dengan spesifikasi minimum adalah prosesor Intel (R) Core (TM) i5-340 CPU @ 3.20GHz 3.60GHz sistem tipe 64 *bit*, RAM 4.00 GB (3.90 GB *usable*), sistem operasi : *Linux*

Penelitian simulasi mikromagnetik ini diawali dengan studi pustaka dari beberapa sumber berupa buku, jurnal ilmiah, skripsi, dan tesis. Hal ini dilakukan untuk observasi terhadap topik penelitian. Kemudian dilakukan penginstallan *software* pada komputer. *Software* yang digunakan dalam penelitian simulasi mikromagnetik ini adalah program NMAG, *software* MayaVi dan Origin. Program NMAG digunakan untuk *running* simulasi mikromagnetik berbasis *Finite Element*. MayaVi digunakan untuk membuat visualisasi struktur domain dalam 3 dimensi dan untuk Origin digunakan untuk membuat grafik-grafik dari pengolahan data simulasi. Setelah *software terinstall* dan siap digunakan maka dilakukan kegiatan simulasi. Simulasi dilakukan dengan membuat file bahan yang berisi parameter *input* bahan *permalloy NiFe* (.py) yaitu Ms (magnetisasi saturasi), K (konstanta anisotropi), A (konstanta *exchange*), dan konstanta *damping*. Selain parameter *input* yang ada diatas, juga membuat parameter input berupa bentuk dan ukuran geometri (.geo). Kedua file tersebut ditempatkan dalam satu folder, kemudian dilakukan *running* simulasi. Simulasi mikromagnetik ini dijalankan dengan menentukan ukuran kritis pada bagian *single domain*, *multi domain*, dan transisi serta menganalisa kurva histerisis pada bahan *NiFe*. Kemudian dari data output yang ada dilakukan analisis, hasil analisis yang didapatkan dapat membuat kesimpulan.



### 3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis dan Sumber data yang dilakukan dalam penelitian ini, berupa jenis data sekunder yang diperoleh dari berbagai referensi. Data input yang digunakan untuk *input* simulasi mikromagnetik pada *permalloy NiFe* sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.1. Data tersebut meliputi  $M_s$  (magnetisasi saturasi),  $K$  (konstanta anisotropi),  $A$  (konstanta *exchange*) dan konstanta *damping*. Jenis data berupa parameter *permalloy NiFe* digunakan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Parameter material *permalloy NiFe* untuk *input* data simulasi Mikromagnetik

Besaran	Nilai
Magnetisasi Saturasi ( $M_s$ );	
untuk ukuran kritis 32,54 nm <sup>1)</sup>	860 x 10 <sup>3</sup> A/m
untuk ukuran kritis 34,28 nm <sup>2)</sup>	769 x 10 <sup>3</sup> A/m
Konstanta Anisotropi ( $K$ ) <sup>1,2)</sup>	5 x 10 <sup>3</sup> J/m
Konstanta <i>Exchange</i> ( $A$ ) <sup>1,2)</sup>	1,3 x 10 <sup>-11</sup> J.m <sup>3</sup>
Konstanta <i>Damping</i> <sup>1,2)</sup>	0,5
<i>Exchange Length</i>	
untuk ukuran kritis 32,54 nm <sup>1)</sup>	5,6 nm
untuk ukuran kritis 34,28 nm <sup>2)</sup>	5,9 nm

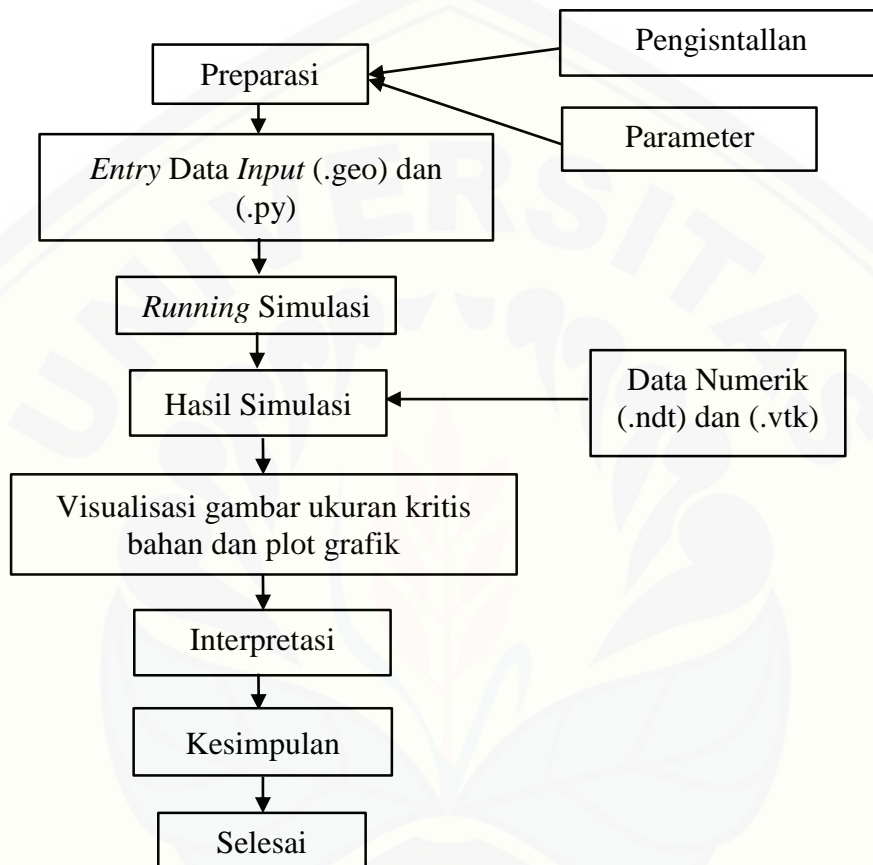
Sumber: <sup>1)</sup>Indrawati dan Suharyadi (2014),  
<sup>2)</sup>Lefter dan Dimian (2012).

### 3.3 Definisi Operasional Variabel

Pada penelitian ini, terdapat tiga variabel penelitian yang terdiri dari variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol, variabel bebas pada penelitian ini adalah besarnya ukuran sisi kubus bahan NiFe. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah magnetisasi pada kurva histerisis untuk melihat sifat magnetik bahan NiFe, energi yang dihasilkan dari grafik hubungan rapat energi dengan volume dan panjang sisi kubus bahan NiFe, yang terdapat pada tiga daerah yakni *multi domain*, *transisi*, dan *single domain*.

### 3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

Penelitian yang dilakukan secara umum digambarkan dalam diagram alir dengan melalui tahapan penelitian seperti pada Gambar 3.1 yaitu:



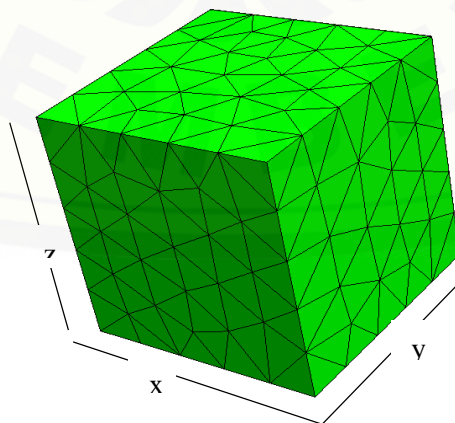
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

### 3.5 Prosedur Penelitian

Simulasi mikromagnetik ini menggunakan software NMAG (*Nano Magnetic*) yang dapat dijalankan pada system operasi *Linux*. Jenis metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Finite Element*. Konsep dasar metode ini adalah menyelesaikan suatu permasalahan dengan cara membagi objek analisa menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisa dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian keseluruhan daerah.

Penggunaan metode elemen ini dapat menyelesaikan permasalahan LLG dari sebuah system dengan mengkonversikan menjadi system diskrit sehingga memungkinkan untuk diselesaikan secara numerik. Penelitian ini melalui beberapa tahapan atau langkah yang dapat dilakukan, yakni yang pertama dengan penginstallan *software* (program NMAG, *software* MayaVi dan *software* Origin) yang akan digunakan untuk *running* dan mempersiapkan parameter-parameter untuk bahan *NiFe* yang akan dimasukkan ke dalam *script*. Parameter-parameter bahan *permalloy NiFe* yang digunakan seperti pada tabel 3.1 yakni  $M_s$  (Magnetisasi Saturasi),  $K$  (Konstanta anisotropi),  $A$  (Konstanta *exchange*) dan konstanta *damping*.

Parameter-parameter di dalam *script* berupa file (.py), selanjutnya untuk data input meliputi file (.geo) yaitu berisi ukuran sisi *nanocube* dan nilai *maxh*. Tahap selanjutnya ialah *running* simulasi pada terminal *Linux*. Hasil yang didapatkan dari *running* tersebut berupa data numerik yang terdiri dari file (.vtk) dan (.ndt) yang digunakan pada tahap visualisasi. Visualisasi gambar dari geometri bahan dapat dilihat pada Gambar 3.2. Untuk membuat geometri tersebut dilakukan dengan menggunakan *software* MayaVi melalui file (.vtk). Langkah berikutnya ialah pembuatan grafik dengan file (.ndt) menggunakan *software* Origin untuk masing-masing parameter yang telah divariasikan. Hasil dari visualisasi gambar dan kurva tersebut nantinya akan dianalisis dan melalui proses interpretasi hasil. Setelah dilakukan analisis, maka akan diperoleh suatu kesimpulan yang akan menjadi indikasi bahwasanya penelitian ini telah selesai dilakukan.



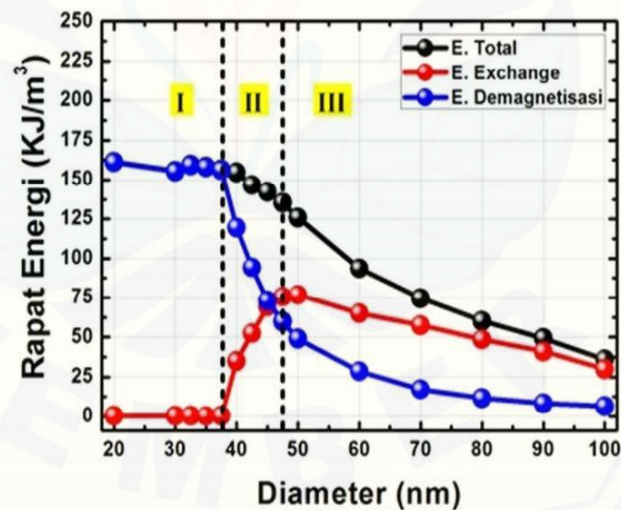
Gambar 3.2 Desain geometri bentuk kubus dengan sisi 15 nm

### 3.6 Metode Analisis Data

Analisis data yang digunakan dalam penelitian simulasi mikromagnetik pada bahan *NiFe* antara lain :

#### 3.6.1 Analisis Penentuan Ukuran Kritis Bahan

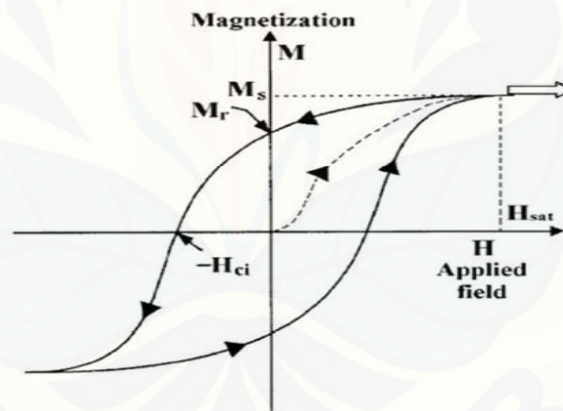
Penelitian ini menganalisis penentuan ukuran kritis yang terjadi pada bentuk kubus. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan penentuan diameter kritis pada bentuk bola yang dilakukan oleh Agus tahun 2013. Analisa penentuan ukuran kritis bahan ini didapatkan grafik hubungan antara rapat energy dengan sisi dan volume. Setelah mendapatkan grafik tersebut selanjutnya menganalisa tiga daerah yaitu *single domain*, *multi domain* dan transisi. Penelitian ini digunakan bentuk geometri berupa kubus. Saat ini, belum ada rumusan yang mendasari penentuan ukuran kritis pada bentuk ini. Oleh sebab itu, penelitian ini mengacu pada hasil 3 energi yaitu energi total, energi *exchange* dan energi demagnetisasi seperti pada Gambar 3.3. Analisa ini sesuai dengan keadaan struktur domain yang dihasilkan.



Gambar 3.3 Grafik hubungan rapat energi ( $\text{K J/m}^3$ ) dengan diameter (nm) (Sumber: Widodo, 2013)

### 3.6.2 Analisis Sifat Magnetik Bahan *Nife* pada Kurva Histerisis

Simulasi mikromagnetik dilakukan dengan menggunakan parameter bahan *permalloy* seperti yang tertera pada Tabel 3.1. Untuk mendapatkan sifat magnetik bahan berdasarkan kurva histerisis, simulasi dilakukan dengan menggunakan program *Origin*. Program *Origin* ini merupakan program untuk menentukan kurva histerisis dengan file *running* berupa (.ndt). Sifat magnetik yang dianalisis meliputi medan koersivitas, yang dapat digunakan untuk mengetahui apakah magnet yang disumulasikan bersifat *hard* magnet atau *soft* magnet. Magnet dapat dikategorikan *soft* magnet dapat terjadi apabila medan koersivitasnya kecil, apabila koersivitas yang dihasilkan besar maka magnet dapat dikategorikan *hard* magnet. Bentuk bahan yang dianalisis pada kurva histerisis ini adalah bentuk *nanocube* dengan variasi sisi. Sifat magnetik bahan NiFe yang akan di analisis adalah magnetisasi yang ditunjukkan pada dalam kurva histerisis Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Kurva histerisis bahan Feromagnetik (Sumber : Yani *et al*, 2014)

Berdasarkan Gambar 3.4, akan ditentukan besarnya medan koersivitas yang diukur dari  $H_{ci}$  hingga garis magnetisasi ( $M$ ). Kurva histerisis nantinya akan dideskripsikan untuk tiga macam daerah domain, meliputi daerah single domain, daerah transisi dan daerah multi domain. Setiap kurva histerisis tersebut akan dibuat dalam dua keadaan magnetisasi saturasi, yakni pada  $M_s=860 \times 10^3$  A/m dan  $M_s = 769 \times 10^3$  A/m.



## BAB 5 PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian mengenai sifat magnetik berdasarkan ukuran kritis bahan NiFe menggunakan simulasi mikromagnetik adalah

1. Ukuran kritis bahan NiFe dengan bentuk *nanocube* untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$  adalah sebesar 32 nm. Struktur domain yang terbentuk pada rentang (20 – 32) nm adalah *single domain*, sedangkan pada *multi domain* terletak pada interval ukuran sisi kubus sebesar (38 – 47) nm. Selanjutnya untuk  $M_s$  sebesar  $769 \times 10^3 \text{ A/m}$ , ukuran kritis bahan NiFe bernilai 34 nm dengan struktur *single domain* terletak pada rentang (23 – 34) nm dan pada *multi domain* terletak pada rentang (40 – 50) nm. Grafik hubungan rapat energi dengan volume didapatkan dari data grafik hubungan rapat energi dengan ukuran sisi kubus. Analisis dari grafik menunjukkan volume kritis bahan NiFe dengan bentuk kubus untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$  memiliki nilai sebesar  $34.455 \text{ nm}^3$  apabila nilai ini dibandingkan dengan volume bola dengan nilai  $34.457 \text{ nm}^3$  volume bola memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan volume kubus. Begitu juga volume kritis untuk  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$  nilai volume kubus sebesar  $40.283 \text{ nm}^3$  sedangkan nilai dari volume bola sebesar  $40.288 \text{ nm}^3$ . Jika dilihat dari nilai-nilai tersebut perbedaan antara volume kubus dengan bola tidak dipengaruhi dari bentuk kubus dengan bola untuk bahan NiFe.
2. Pada saat bahan memiliki magnetisasi saturasi sebesar  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$ , medan koersivitas bahan NiFe untuk keadaan *single domain* dan transisi adalah sebesar  $3,2604 \times 10^{-6} \text{ T}$ , sedangkan pada keadaan *multi domain* diperoleh sebesar  $8,151 \times 10^{-6} \text{ T}$ . Ketiga struktur domain tersebut mengindikasikan bahwa bahan bersifat *soft magnet*. Untuk bahan NiFe dengan magnetisasi saturasi sebesar  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$ , medan koersivitas pada keadaan *single domain* dan



transisi adalah sebesar  $3,2604 \times 10^{-6}$  T, sedangkan pada keadaan *multi* domain diperoleh sebesar  $8,572 \times 10^{-6}$  T. Bahan ini juga tergolong ke dalam *soft* magnet.

## 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diketahui nilai ukuran kritis, karakteristik kurva histerisis dan juga struktur domain dari material NiFe bentuk *nanocube* dengan menggunakan simulasi mikromagnetik. Namun ada beberapa hal yang masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut, diantaranya dengan melakukan penentuan nilai ukuran kritis dengan menggunakan banyak referensi parameter agar lebih akurat saat divisualisasikan di dalam grafik hubungan rapat energi dengan sisi kubus. Selain itu juga melakukan perbandingan volume bentuk *nanocube* dengan bentuk bola untuk bahan yang lain yang divisualisasikan dengan grafik hubungan rapat energi dengan volume. Dengan begitu dapat dibandingkan dengan bahan lain selain NiFe apakah bentuk geometri mempengaruhi volume kritis *nanocube* dengan bola.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Alberto P. Guimarães. 2009. *Principles of Nanomagnetism*, Springer-Rio de Janeiro,.
- Boardman, R. P., Fangohr, H., Cox, S.J., Goncharov, A. V., dan Zhukov, A. A. 2004. Micromagnetic simulation of ferromagnetic part-spherical particles. *J. Appl. Phys.* 95, 7037.
- Borg, R. J. 1992. *The Physical Chemistry of Solids*. USA: Academic Press, Inc.
- Budi P., Nurosyid F., Abraha K., dan Sudjatmoko. 2004. Analisis Sifat Listrik dan Magnetik Lapisan Tipis Ni 80 Fe 20 Hasil Deposisi *Sputtering* Sebagai Bahan Dasar Sensor Magnet. *Majalah IPTEK*. 15(2). 55-60.
- Callister, W.D. dan Rethwisch, D.G. 2009. *Materials Science and engineering An Introduction*. Eighth Edition. New York: John Wiley and Sons.
- Chaundhary, R, dan A. Kansal. 2015. A Persperctive on the future of the magnetic hard disk drive (HDD) technology. *International Journal of Technical Research and Applications*. 3(3): 63-74.
- Coey, J.M.D. 2009. *Magnetism and Magnetic Materials*. United States of America: Cambridge University Press.
- Crangle, J dan Hallam, G.C. 1962. The Magnetization of face-centered cubic and Body-centered Cubic Iron + Nickel Alloys. *Proceeding the Royal of Society A*. 19 Februari (272): 119-132.
- Cullity, B.D. dan Graham, C.D., 2009, Introduction to Magnetic Materials,., Second Edition. *International Journal of Technical Research and Applications*. New Jersey : IEEE Press&Wiley.
- Diandra L. Leslie-Pelecky. 1996. Magnetic properties of nanostructured materials. *Chem. Mater.* 8, 1770-1783

Dobisz, E.A. 2008. Patterned media: Nanofabrication challenges of future disk drives. *Proceedings of the IEEE*, ISBN : 0018-9219. 96, 11.

Donald R. A., Pradeep P. F., dan Weddelin J. W. 2011. *The Science and Engineering of Materials*. Sixth Edition. USA: Cengage Learning.

Getzlaff, M. 2008. *Fundamentals of Magnetism*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.

Gilbert, T.L. 1995. A Lagrangian formulation of the gyromagnetic equation of the magnetic field, *Phys. Rev.* 100, 1243.

Guimarães, A.P. 2009. *Principle of Nanomagnetism*. Rio de Janeiro: Springer.

Halliday, D. dan Resnick, R. 1989. *FISIKA*. Jakarta: Penerbit Erlangga.

Halliday, D., Resnick, R., dan Walker, J. 2011. *Fundamentals of Physics 9<sup>th</sup> Edition*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

Hughes, G. F. 2000. *Patterned media write design*. *IEEE Trans. Magn.* 36.

Indrawati, A. dan Edi, S. 2014. Studi pengaruh bentuk terhadap pergeseran domain wall magnetik pada lapisan tipis permalloy. *Jurnal Sains*. 2(1): 264-267.

Ismail. 2013. Studi Micromagnetik Proses Magnetisasi dan Spektrum Suseptibilitas Feromagnetik Elemen Diamond-Shaped. *Tesis*. Depok: Universitas Indonesia.

Jiles, D. 1998. *Introduction To Magnetism And Magnetic Materials*. Ames Iowa USA: Iowa State University

Lefter dan D. Mihai. 2012. Micromagnetic Analysis of magnetization Behaviour in permalloy Nanoparticles for Data Storage Applications. *Jurnal of Physic*. 6(1): 1-6.

- Lestari, M. 2017. Simulasi Pengaruh Sudut Datang Medan Magnet Luar Terhadap Bentuk Kurva Histerisis Permalloy (NiFe) Feromagnetik. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Mardona. 2012. Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi pada Material Ferroamagnet Co dan Ni Berbentuk Nanowire. *Tesis*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Mukhopadhyay, A. 2015. Measurement of Magnetic Hysteresis Loops in Continuous and Patterned Ferromagnetic Nanostructures by Static Magneto-Optical Kerr Effect Magnetometer. Indian: India University State.
- Nagara, B. F. 2016. Investigasi Sifat-sifat Magnetik Bahan CoPd dan Pengaruh Penerapan Microwave Assisted Menggunakan Simulasi Mikromagnetik. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember FMIPA.
- Nicola, A.S. 2011. *Magnetic Materials Fundamentals and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nurul, Anwar. 2011. Pembuatan Magnet Permanen Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B Melalui Mechanical Alloying. *Skripsi*. Jakarta : UIN Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Peter. 2004. *Engineering Electromagnetics Second Edition*. USA: Springer
- Purnama B., Prihanto H.S.B.R., Artono D.S., Suharyana. 2013. Karakteristik Magnetik Lapisan Tipis Ni-Fe Sebagai *Flat Core Flux Gate* Sensor. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*. 9 (2013) 191-196.
- Purnama, B., Nurosyid, F., Abraha, K., dan Sudjatmoko. 2004. Analisa Sifat Listrik dan Magnetik Lapisan Tipis Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> Hasil Deposisi Sputtering Sebagai Bahan Dasar Sensor Magnet. *Majalah IPTEK*. 15 (2). 55-60.
- Putu R. A. 2013. Bahan Isolasi Keramik. *Skripsi*. Denpasar: Fakultas Teknik Universitas Udayana.

- Richard P. Boardman, Jürgen Zimmermann, dan Hans Fangohr. 2005. Micromagnetic simulation of ferromagnetic part-spherical particles, *J. Appl. Phys.* 97, 10E305.
- Rogers, Everett M. 1991., *Communication Technology: The New Media in Society*, diterjemahkan oleh Zulkarnaina Mohd. Mess dengan judul “Teknologi Komunikasi: Media baru Dalam Masyarakat”, Kuala Lumpur-Malaysia: Dewan Bahasa dan Pustaka
- Sihues, M. D., Rincon, C. A. D., dan Fermin, J. R. 2007. A ferromagnetic resonance study of NiFe alloy thin films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 316. e462 - e465.
- Skomski, R. 2008. *Simple Models of Magnetism*. New York: Oxford University Press.
- Smith, W.F. 1993. *Foundation of Materials of Science and Engineering*. USA: Prentice Hall.
- Sudjatmoko. 2005. Kajian Sifat Bahan Lapisan Tipis Feromagnetik  $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}$  Hasil Deposisi dengan Teknik Evaporasi Hampa. *Ganendra.* 8(2). 37 - 43.
- Tipler P., A. 2001. *Fisika Untuk Sains dan Teknik Edisi Ketiga*. Jakarta: Erlangga.
- Vernyhora, I. 2009. Modélisation á l'échelle atomique de l'évolution microstructurale dans les alliages Ni-Fe : Corrélation entre les propriétés magnétiques et structurales. *Tesis*. Français: Physique [physics] Université de Rouen.
- Wahyudi, E. 2005. Mengenal harddisk lebih dekat. *Jurnal Teknologi Informasi Dinamik.* 10(3): 168-177.
- Widodo, A.T. 2013. *Studi Mikromagnetik Dinamika Struktur Domain pada Material Feromagnetik Py, Ni, Fe, dan Co Model Nanosphere*. Depok: Universitas Indonesia Press.



Yani, A., Ridwan dan Mujamilah. 2014. Simulasi Histerisis Pada Bahan Feromagnetik Dengan Model JILES-ATHERTON. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, ISSN: 1411-1098: 85-90

#### Lampiran 4.1 Perhitungan Ukuran Kritis Bahan NiFe dengan Bentuk *Nanocube*

Menggunakan rumus Brown :

$$DC = 7,221 \sqrt{\frac{2A}{\mu M_s^2}} = 7,221 l_{ex}$$

Diperoleh diameter kritis bentuk bola bahan NiFe sebesar  $D_{c_r} = 40,38$  , lalu dibandingkan antara bentuk bola dengan kubus.

Bola

$$D_{c_r}$$

$$V_{c_r} = \frac{4}{3} \pi D_{c_r}^3$$

$$V_{bola} = \frac{4}{3} \pi R^3$$

$$= \frac{4}{3} \pi \left(\frac{1}{2} D_{c_r}\right)^3 = S_{c_r}^3$$

$$= \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{8} \pi D_{c_r}^3 = S_{c_r}^3$$

$$= \frac{1}{6} \pi D_{c_r}^3 = S_{c_r}^3$$

$$\text{Jadi, } S_{c_r}^3 = \sqrt[3]{\frac{1}{6} \pi D_{c_r}^3}$$

$$= D_{c_r} \sqrt[3]{\frac{1}{6} \pi}$$

$$= 40,38 \sqrt[3]{0,167 \times 3,14}$$

$$= 40,38 \sqrt[3]{0,5234}$$

$$= 40,38 \times 0,806$$

$$= 32,54 (\text{untuk } M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m})$$

Kubus

$$S_{c_r}$$

$$V_{c_r} = S_{c_r}^3$$

$$S_{c_r}^3 = \sqrt[3]{\frac{1}{6} \pi D_{c_r}^3}$$

$$= D_{c_r} \sqrt[3]{\frac{1}{6} \pi}$$

$$= 42,54 \sqrt[3]{0,167 \times 3,14}$$

$$= 42,54 \sqrt[3]{0,5234}$$

$$= 42,54 \times 0,806$$

$$= 34,28 (\text{untuk } M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m})$$



**Lampiran 4.2 Perhitungan Volum Kubus dan Bola****1. Untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$** 

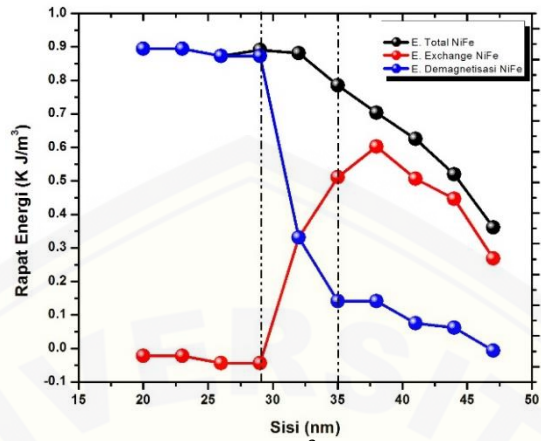
$$\begin{aligned} V. \text{ bola} &= \frac{4}{3} \pi \left( \frac{1}{2} D_{c_r} \right)^3 & V. \text{ kubus} &= S^3 \\ &= \frac{1}{6} \pi (D_{c_r})^3 & &= 32,54 \times 32,54 \times 32,54 \\ &= \frac{1}{6} \cdot 3,14 (40,38)^3 & &= 34.455 \text{ nm}^3 \\ &= 34.457 \text{ nm}^3 \end{aligned}$$

**2. Untuk  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$** 

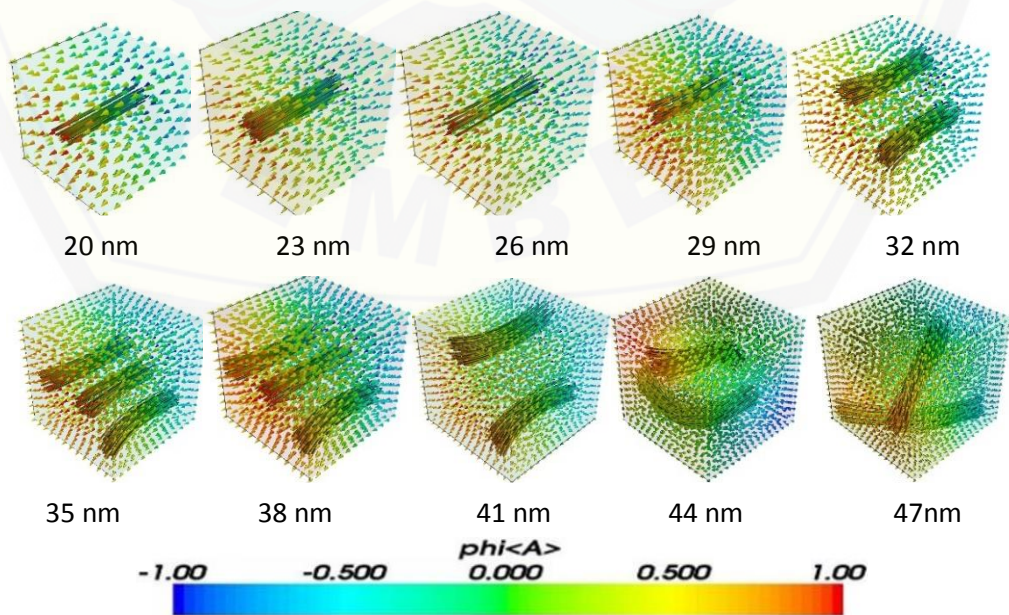
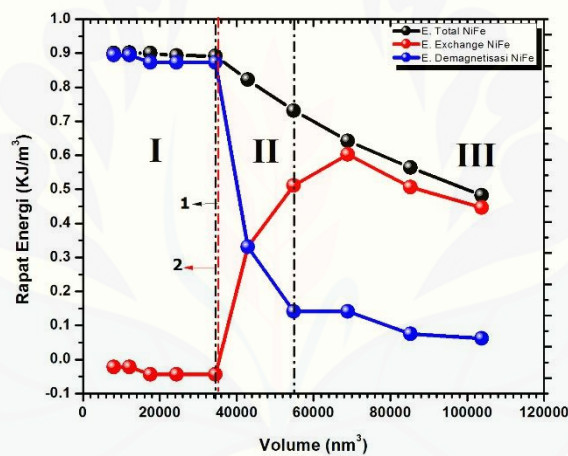
$$\begin{aligned} V. \text{ bola} &= \frac{4}{3} \pi \left( \frac{1}{2} D_{c_r} \right)^3 & V. \text{ kubus} &= S^3 \\ &= \frac{1}{6} \pi (D_{c_r})^3 & &= 34. 34 .34 \\ &= \frac{1}{6} \cdot 3,14 (42,54)^3 & &= 40.283 \text{ nm}^3 \\ &= 40.288 \text{ nm}^3 \end{aligned}$$

**Lampiran 4.3 Grafik Hubungan Rapat Energi dengan Sisi dan Volume**

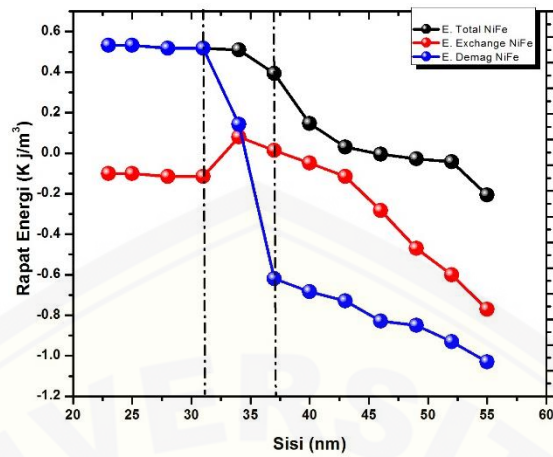
1. Grafik hubungan rapat energi ( $\text{K J/m}^3$ ) terhadap sisi (nm)  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$



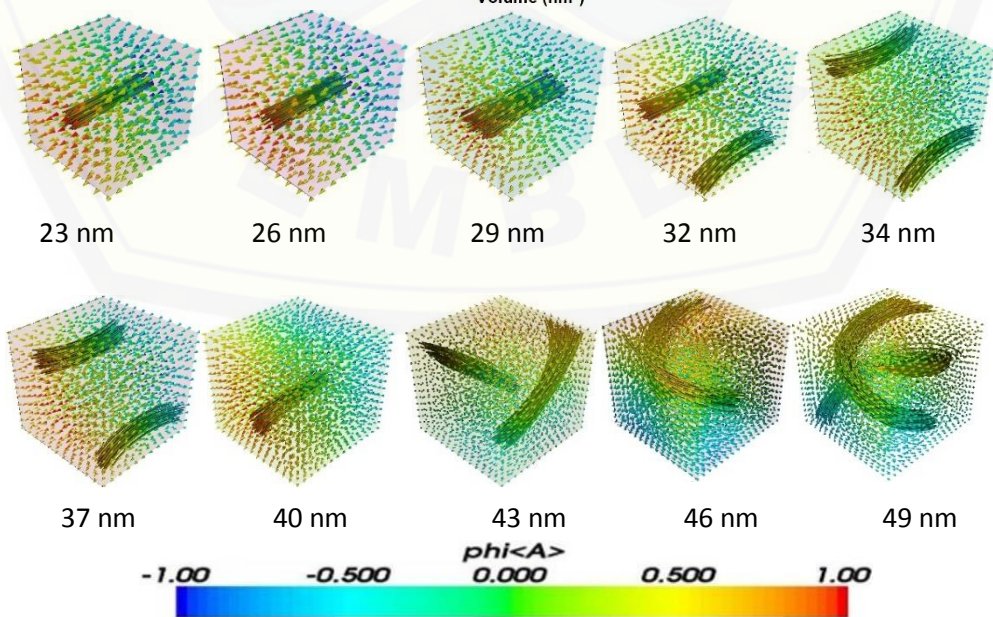
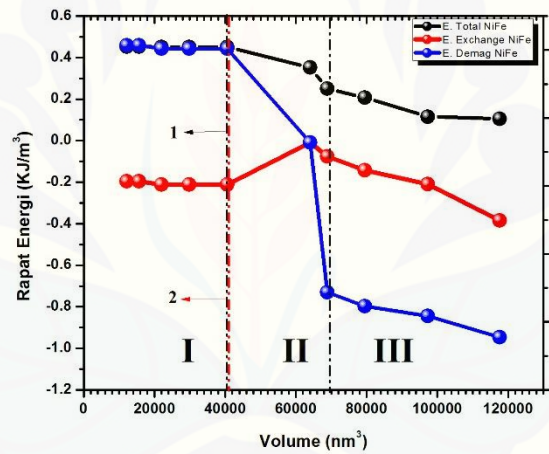
2. Grafik hubungan rapat energi ( $\text{K J/m}^3$ ) terhadap volume ( $\text{nm}^3$ )  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$



3. Grafik hubungan rapat energi ( $\text{K J/m}^3$ ) terhadap sisi (nm)  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$



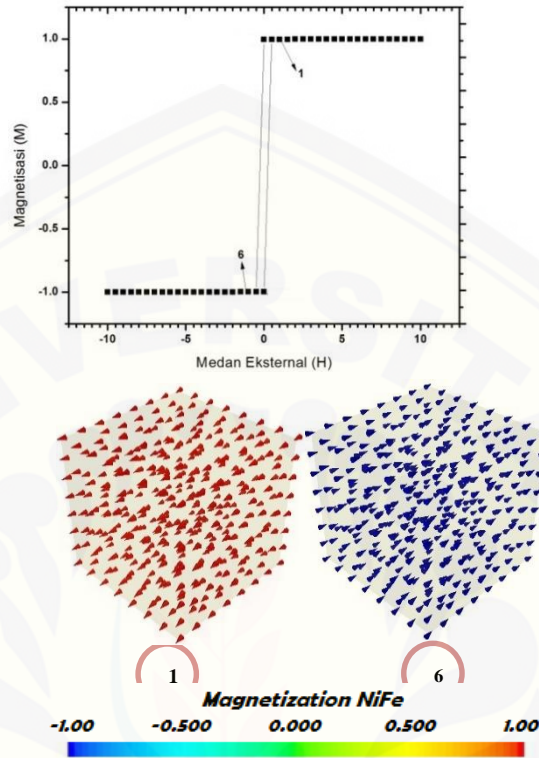
4. Grafik hubungan rapat energi ( $\text{K J/m}^3$ ) terhadap volume ( $\text{nm}^3$ )  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$



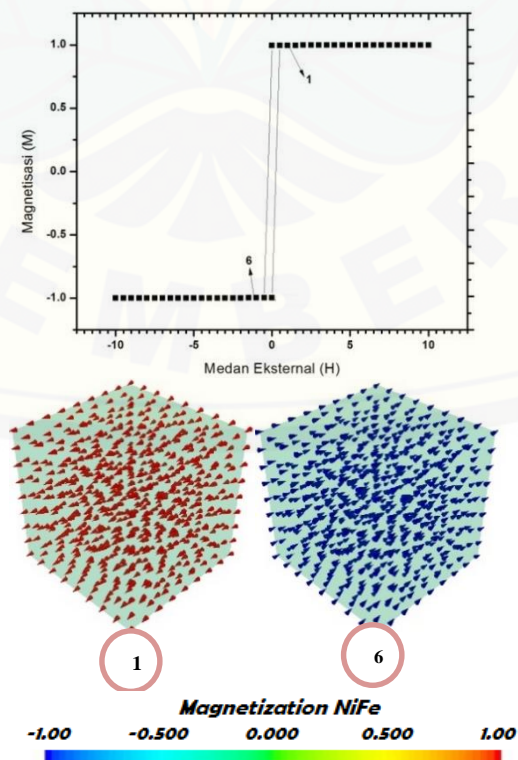


**Lampiran 4.4 Kurva Histerisis Bahan NiFe terhadap Variasi Ukuran Sisi Kubus**

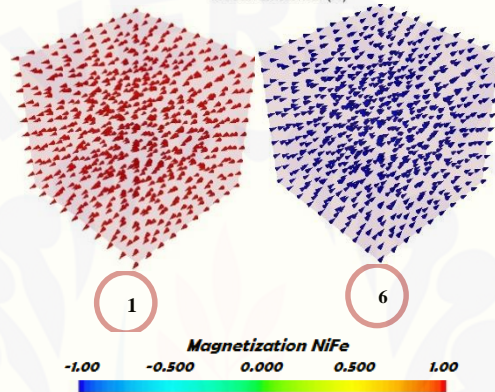
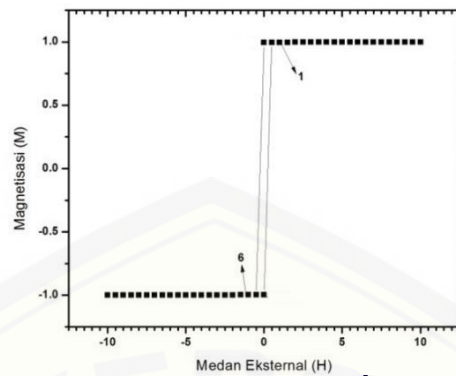
1. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 20 untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$



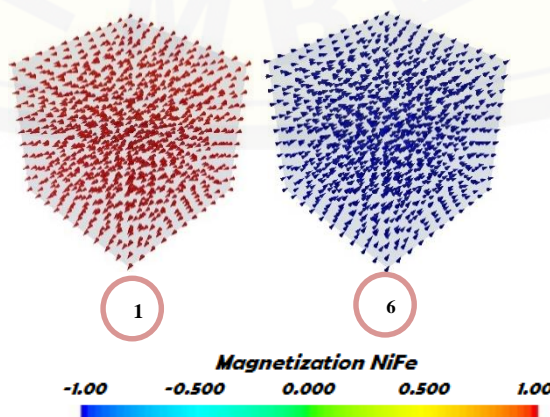
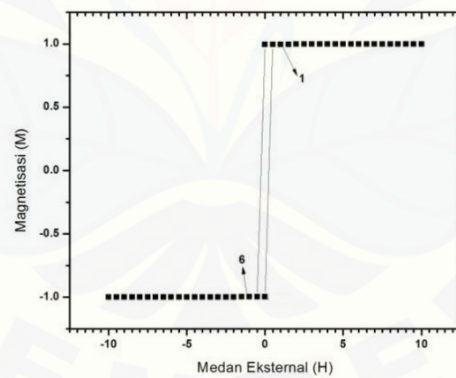
2. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 23 nm untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$



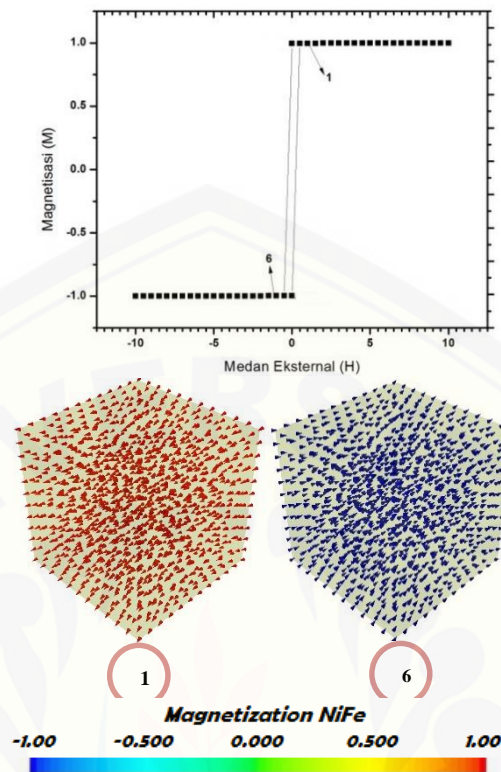
3. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 26 nm untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$



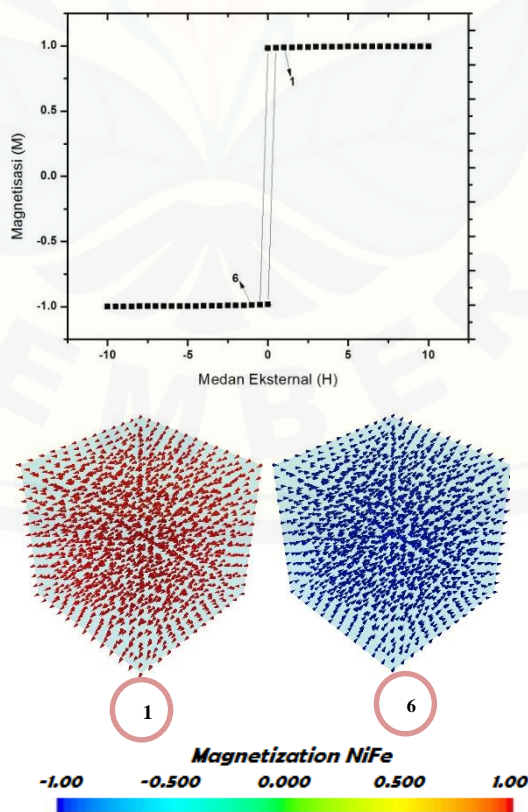
4. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 29 nm untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$



5. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 32 nm untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$

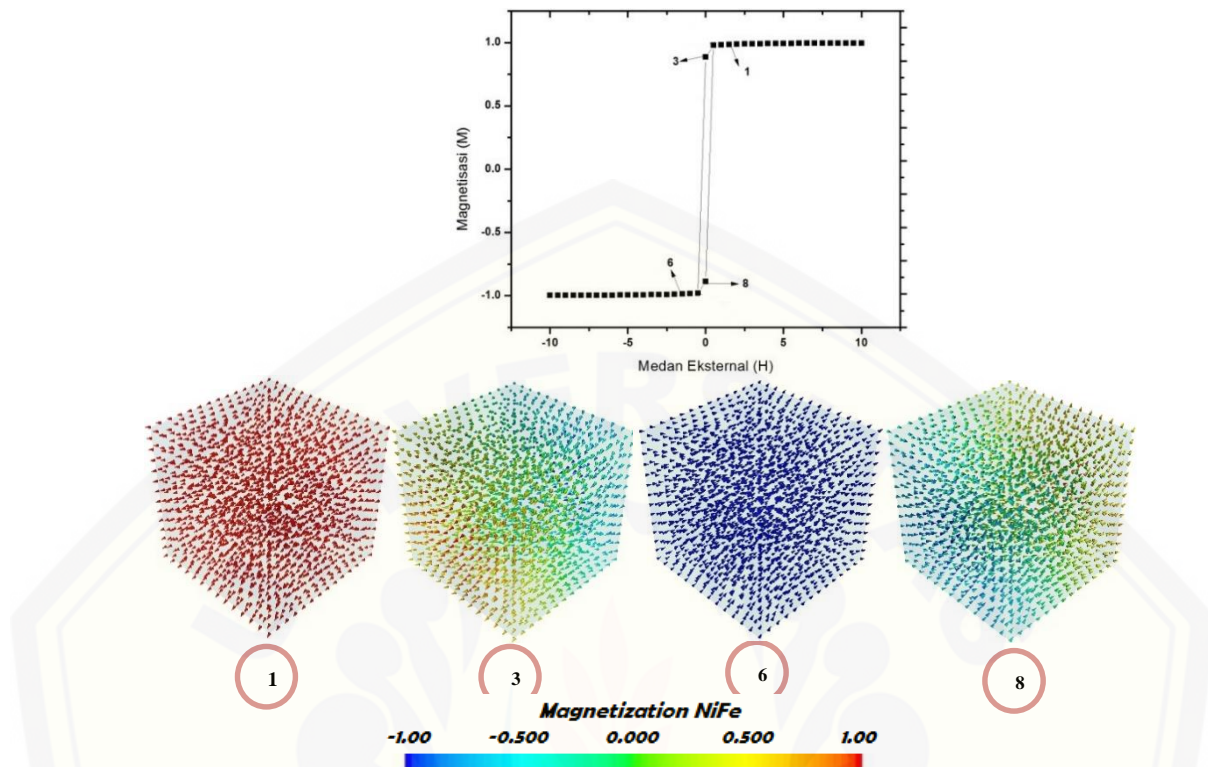


6. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 35 nm untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$

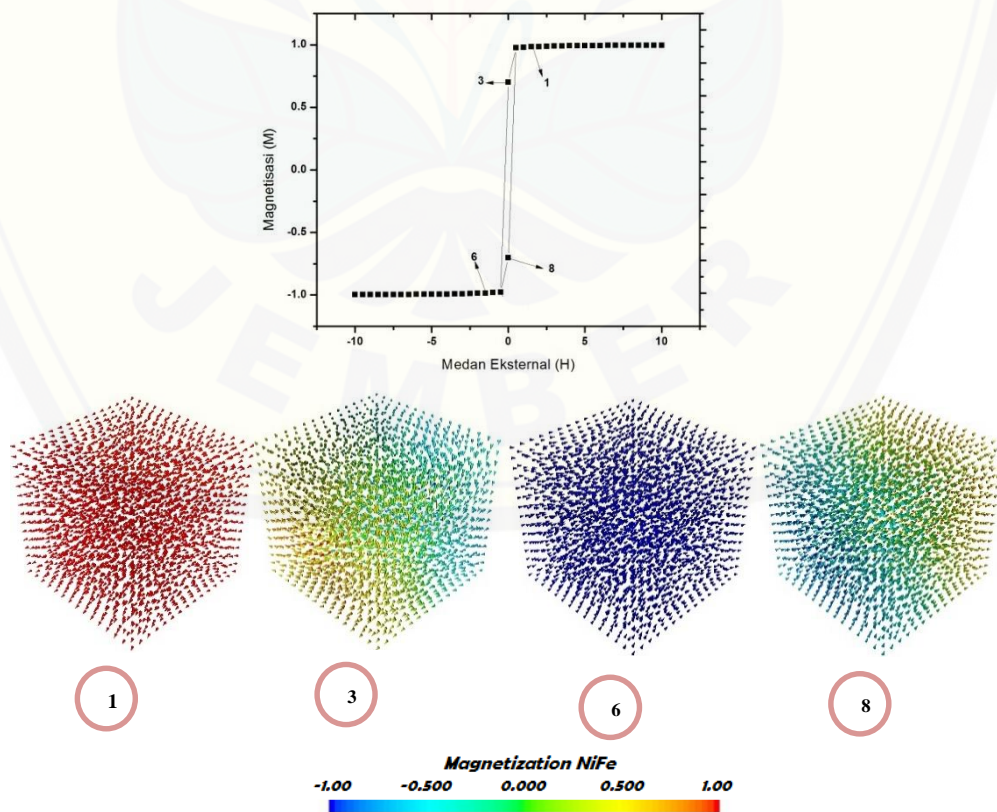




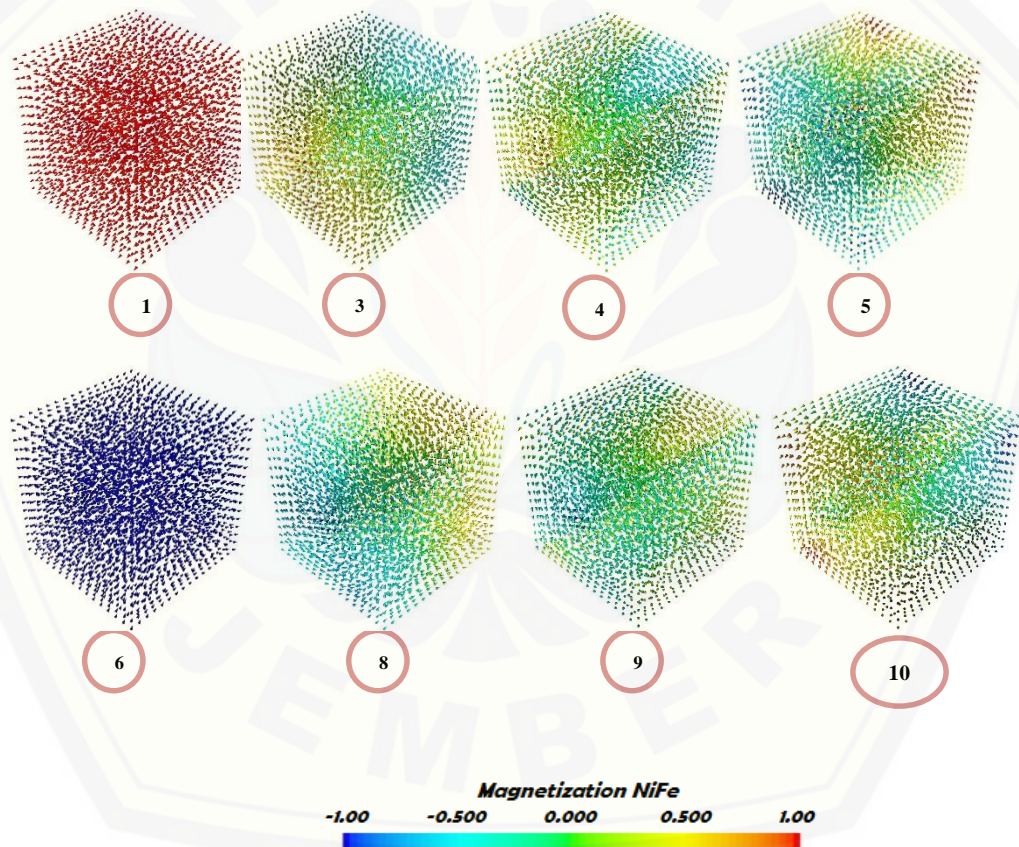
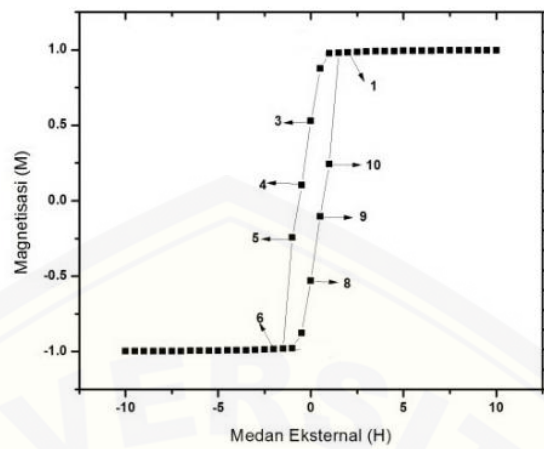
7. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 38 nm untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$



8. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 41 nm untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$

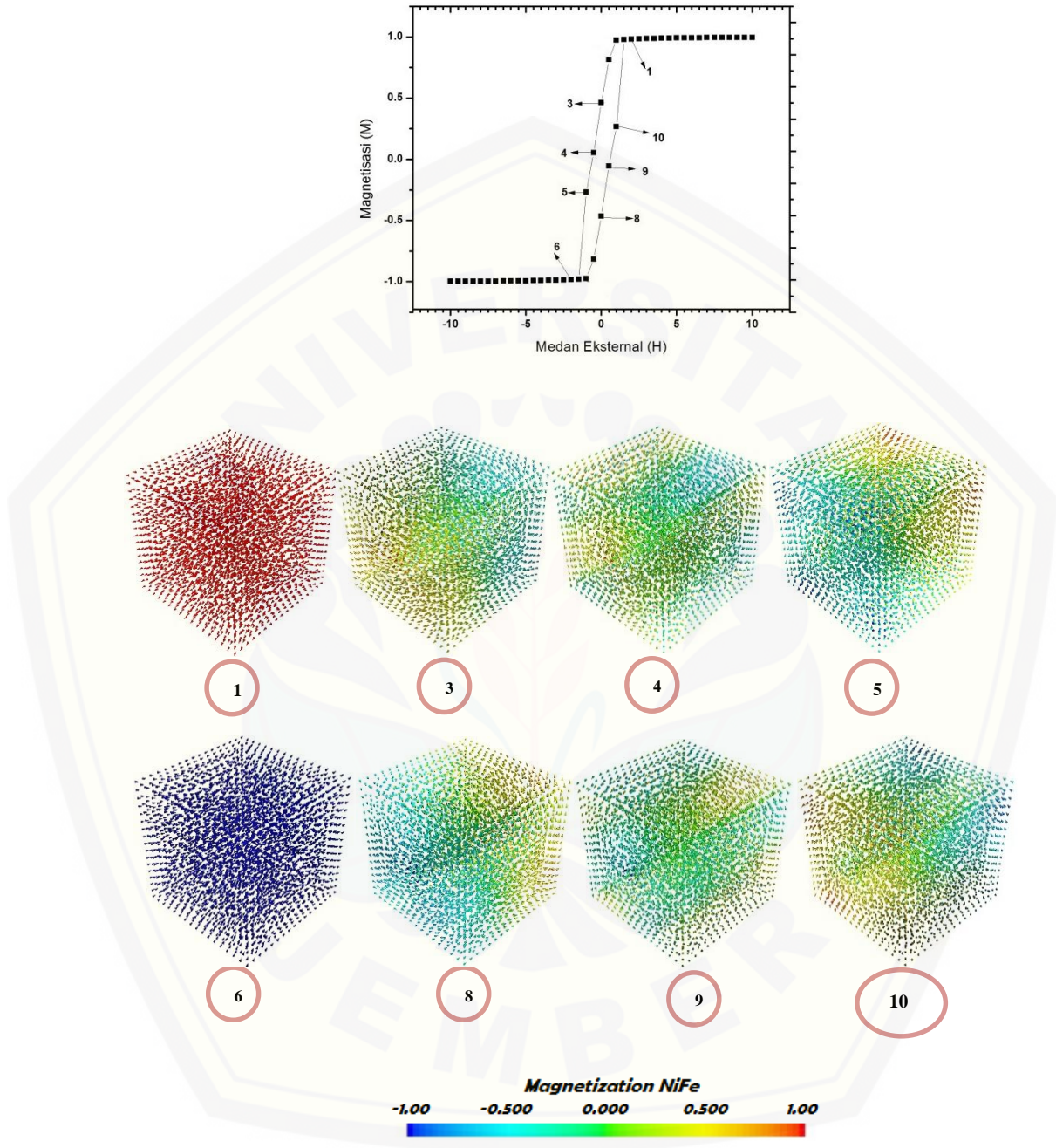


9. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 44 nm untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$

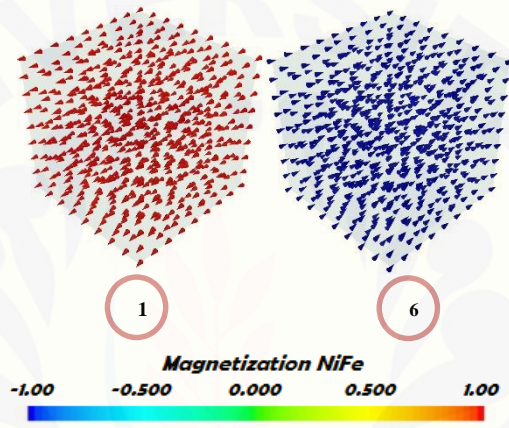
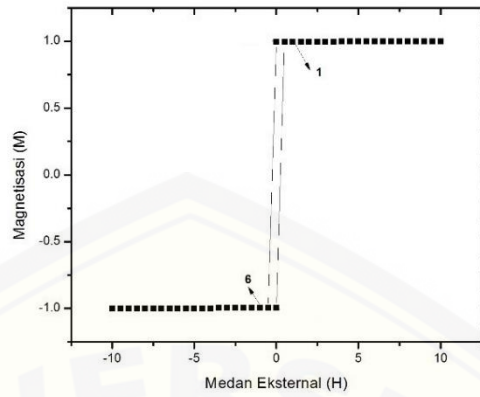




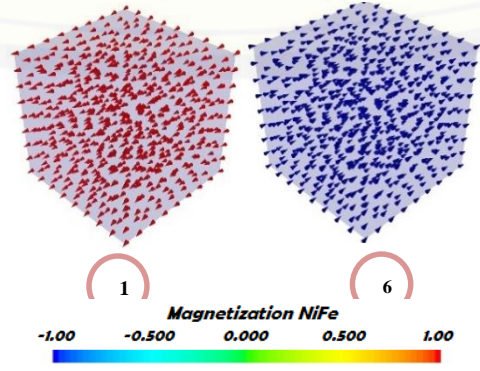
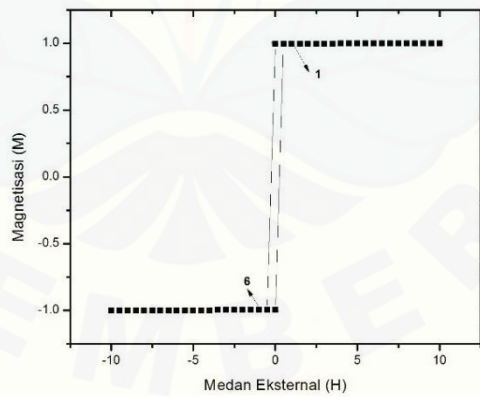
10. Kurva histeresis ukuran sisi kubus 47 nm untuk  $M_s = 860 \times 10^3 \text{ A/m}$



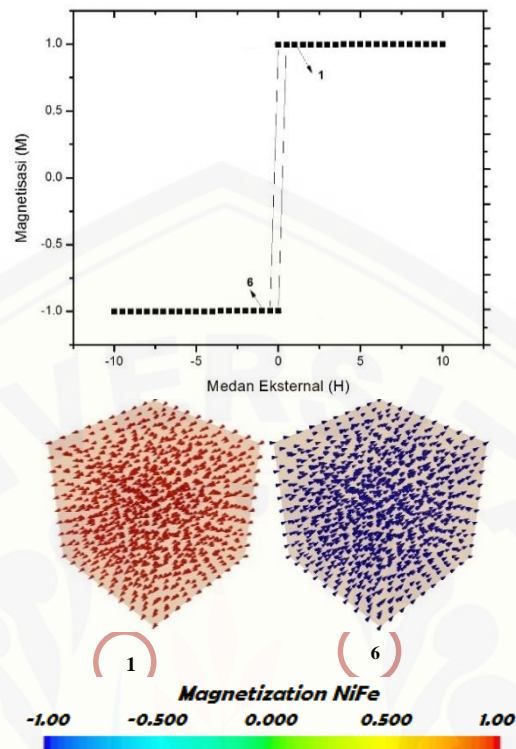
11. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 23 nm untuk  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$



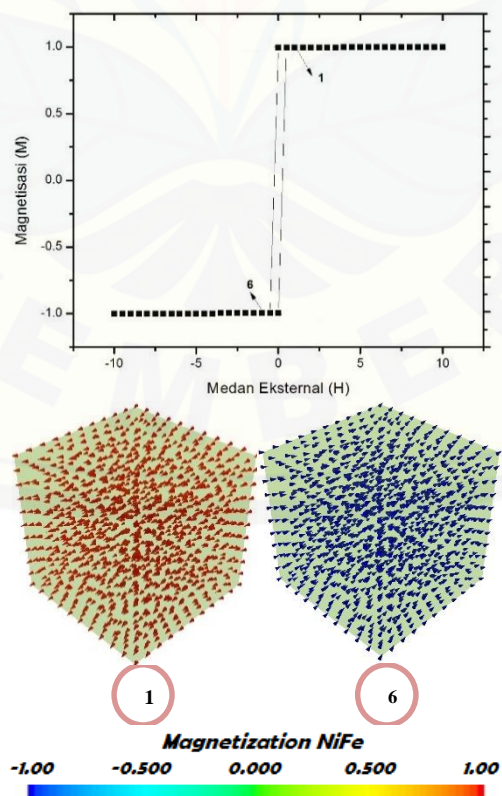
12. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 26 nm untuk  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$



13. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 29 nm untuk  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$

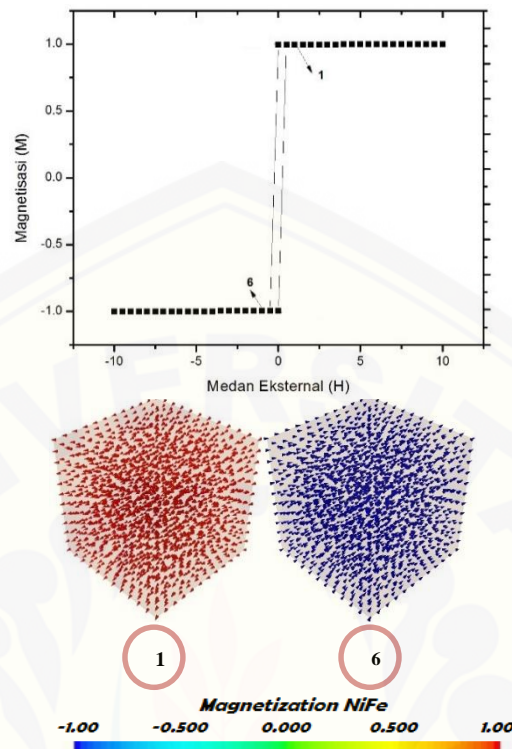


14. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 32 nm untuk  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$

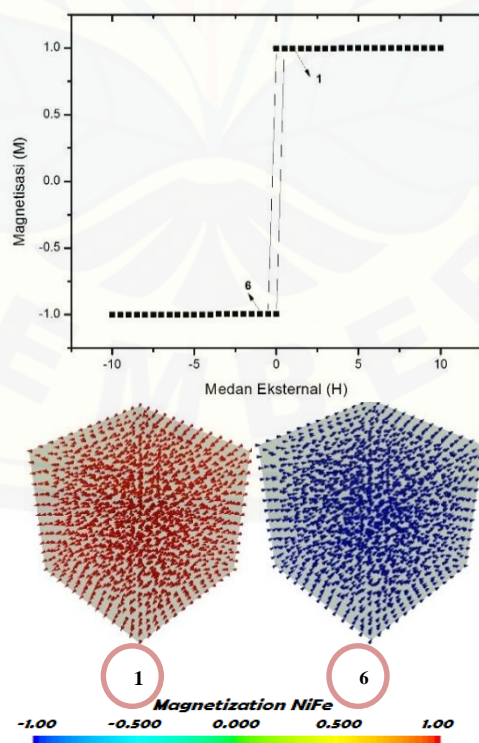




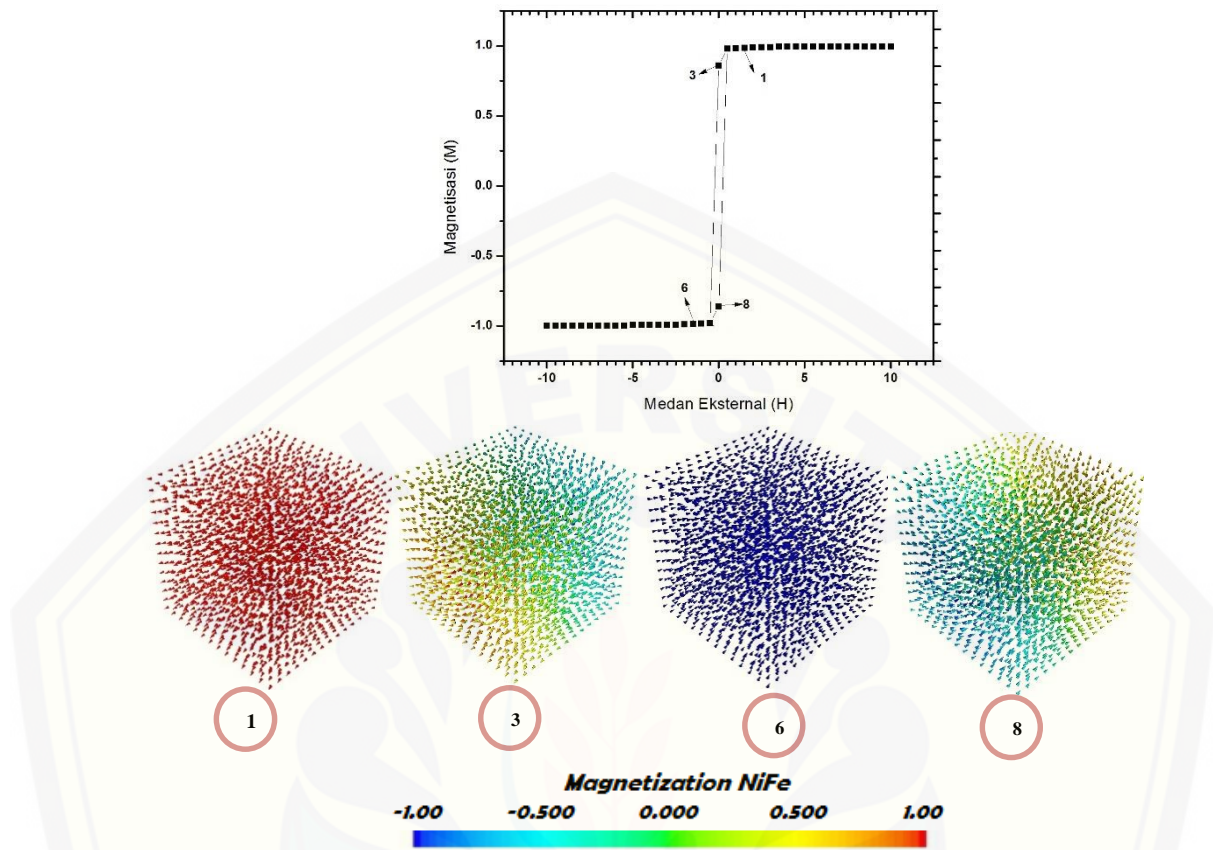
15. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 35 nm untuk  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$



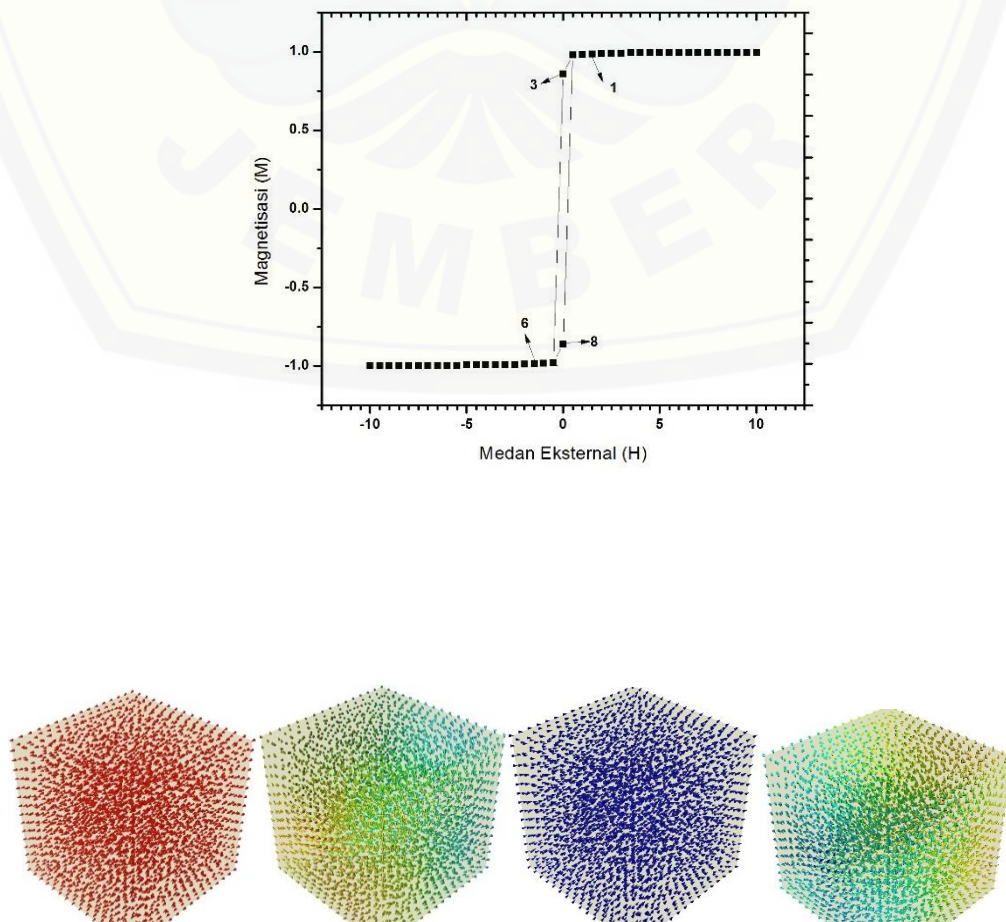
16. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 38 nm untuk  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$

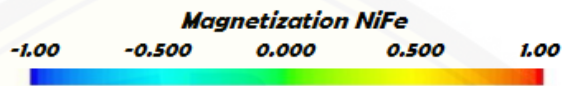


17. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 41 nm untuk  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$

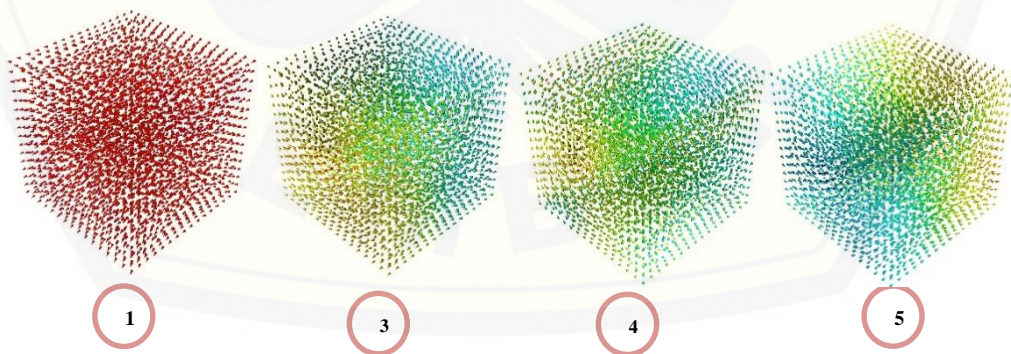
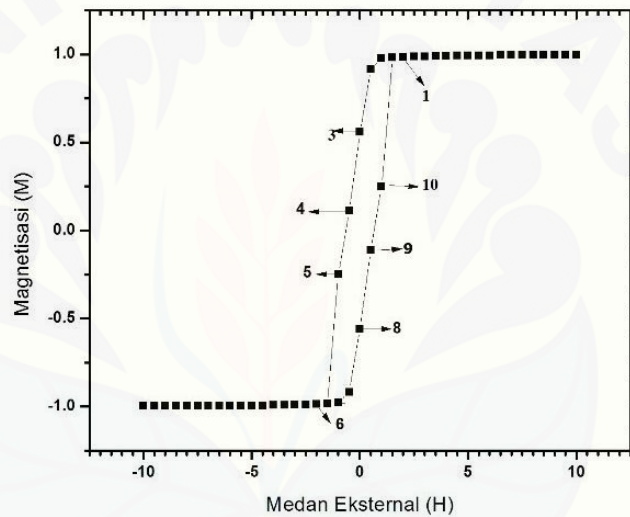


18. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 44 nm untuk  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$

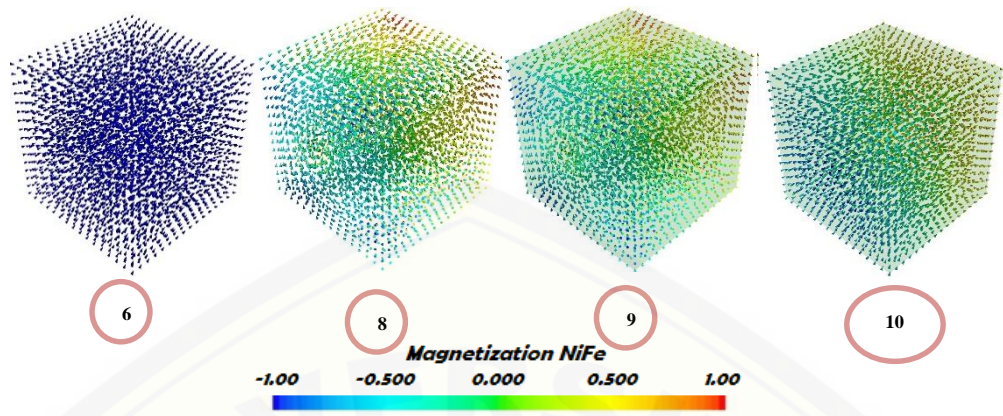




19. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 47 nm untuk  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$







20. Kurva histerisis ukuran sisi kubus 50 nm untuk  $M_s = 769 \times 10^3 \text{ A/m}$

