



**SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN FEROMAGNETIK $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$
DENGAN METODE SIMULASI MIKROMAGNETIK**

SKRIPSI

Oleh

**Irmawati Hasanah
NIM 151810201020**

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



**SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN FEROMAGNETIK $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$
DENGAN METODE 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

Irmawati Hasanah

NIM 151810201020

**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 Nurhasana dan Ayahanda Rahwa atas segala doa yang selalu dipanjatkan, motivasi, nasehat, kasih sayang serta pengorbanan yang tak terbatas;
2. Kakakku Dessy Fitriyana dan adikku Zainal Abidina Rahwa yang penulis cintai dan sayangi;
3. Guru-guru ngaji yang telah membimbing penulis dengan sabar dan memberikan ilmunya kepada penulis.
4. Guru-guru mulai SD hingga SMA dan dosen-dosen yang telah membimbing dan memberikan ilmunya kepada penulis;
5. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Jember.

MOTTO

“Life is like riding a bicycle. To keep your balance, you must keep moving”

(Albert Einstein)



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Irmawati Hasanah

NIM : 151810201020

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Sifat-Sifat Magnetik Bahan Feromagnetik $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$ Dengan Metode 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, September 2019

Yang menyatakan,

Irmawati Hasanah

NIM 151810201020

SKRIPSI

**SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN FEROMAGNETIK $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$
DENGAN METODE SIMULASI MIKROMAGNETIK**

Oleh

Irmawati Hasanah
NIM 151810201020

Pembimbing

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

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Edy Supriyanto, S.Si, M.Si.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Sifat-Sifat Magnetik Bahan Feromagnetik $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$ Dengan Metode Simulasi Mikromagnetik” karya Irmawati Hasanah 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

Dr. Edy Supriyanto, 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

Nurul Priyantari, S.Si M.Si
NIP 197003271997022001

Mengesahkan

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

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

RINGKASAN

Sifat-Sifat Magnetik Bahan Feromagnetik $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$ Dengan Metode Simulasi Mikromagnetik; Irmawati Hasanah, 151810201020; 2019: 44 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Material feromagnetik merupakan bahan yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik besar yang bernilai positif. Sifat feromagnetik muncul dalam bahan yang atom-atomnya memiliki momen magnetik permanen yang berinteraksi satu sama lainnya secara kuat dan mampu mempertahankan sifat-sifat magnetik setelah magnet luarnya dihilangkan. Bahan feromagnetik adalah bahan magnetik yang mempunyai kemampuan tinggi untuk membentuk medan magnet di dalam bahan tersebut, serta dapat digunakan sebagai media penyimpanan data dalam bidang teknologi. Media penyimpanan data di dalam bahan magnetik disebut penyimpanan magnetik. Media penyimpanan data yang biasa digunakan adalah media perekam magnetik *Hard Disk Drive* (HDD). HDD merupakan perangkat media perekam magnetik yang diciptakan pertama kali oleh IBM dengan nama RAMAC (*Random Acces Method of Accounting and Control*). Salah satu material magnetik yang dapat digunakan dalam pembuatan HDD adalah material magnetik *alloy* CoPt (*Cobalt-Platinum*), karena CoPt merupakan bahan yang mempunyai konstanta anisotropi dan tahanan korosi yang tinggi.

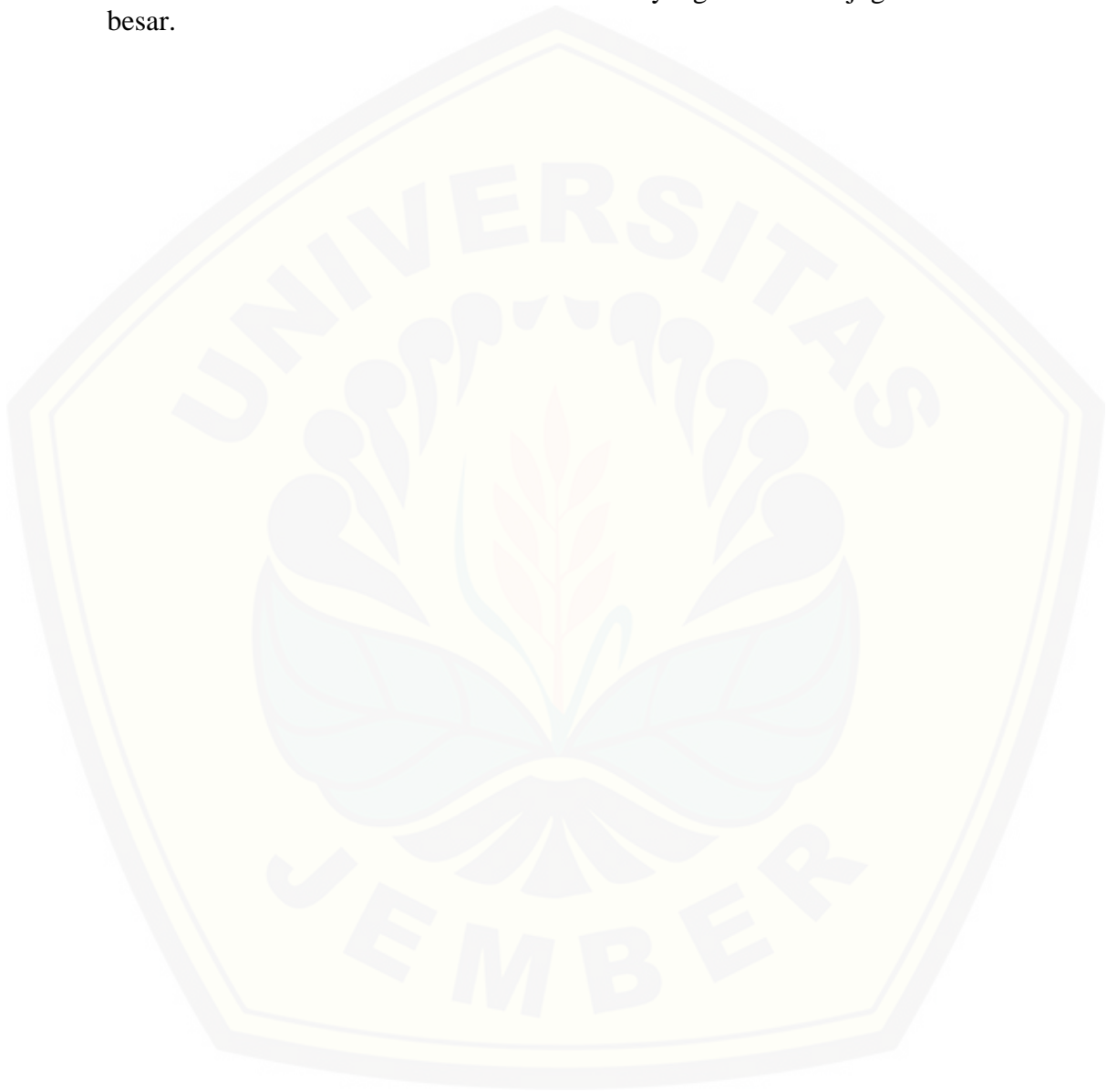
Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui sisi kritis dan sifat-sifat magnetik dari bahan CoPt berupa kurva histerisis. Sisi kritis dianalisis dengan grafik hubungan rapat energi dengan sisi. Rapat energi yang digunakan pada grafik yaitu energi *exchange*, energi demagnetisasi dan energi total. Adapun sifat-sifat magnetik bahan CoPt dijelaskan dengan mengidentifikasi medan koersivitas bahan menggunakan kurva histerisis yang dianalisis pada tiga zona domain magnetik yaitu *single domain*, transisi, dan *multi domain*.

Penelitian ini menggunakan *software* NMAG berbasis *finite element* dengan sistem operasi linux. Penelitian ini menggunakan variasi sisi kubus sebesar 8 nm-41 nm untuk $M_s=804 \times 10^3 \text{ A/m}$ dan $M_s= 810 \times 10^3 \text{ A/m}$ dengan interval 3 nm. Ukuran kritis dianalisis pada grafik hubungan rapat energi dengan ukuran sisi kubus. Rapat energi yang digunakan pada grafik yaitu energi *exchange*, energi demagnetisasi dan energi total. Kurva histerisis ini menganalisis tiga zona domain yaitu *single domain*, transisi, dan *multi domain*.

Hasil simulasi yang diperoleh dengan menganalisis grafik hubungan rapat energi dengan ukuran sisi kubus terdapat tiga zona yakni *single domain*, transisi, dan *multi domain* yang menunjukkan bahwa ukuran kritis pada $M_s = 804 \times 10^3 \text{ A/m}$ dan $M_s = 810 \times 10^3 \text{ A/m}$ sebesar 20 nm. Nilai tersebut didapatkan dari hasil titik terakhir dalam zona *single domain* yang akan menuju ke zona transisi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ukuran kritis sesuai dengan persamaan sisi kritis yang mengacu pada persamaan Brown. Persamaan diameter kritis Brown pada bola adalah $DC_r = 7,211l_{ex}$.

Analisis kurva histerisis pada tiga zona domain untuk menunjukkan sifat magnetiknya dengan $M_s = 804 \times 10^3 \text{ A/m}$ dan $M_s = 810 \times 10^3 \text{ A/m}$ zona *single*

domain dianalisis dengan ukuran 8 nm. Adapun zona transisi diwakilkan pada ukuran sisi kubus sebesar 20 nm untuk $M_s = 804 \times 10^3 \text{ A/m}$ dan $M_s = 810 \times 10^3 \text{ A/m}$. Kemudian pada zona *multi domain* diwakilkan pada ukuran sisi kubus sebesar 29 nm untuk $M_s = 804 \times 10^3 \text{ A/m}$ dan 32 nm untuk $M_s = 810 \times 10^3 \text{ A/m}$. 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 “Sifat-Sifat Magnetik Bahan Feromagnetik $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$ dengan Metode Simulasi Mikromagnetik”. Sholawat dan salam semoga senantiasa selalu menuntun dan mengiringi langkah dan aktivitas kita dalam melangkah menggapai ridho-Nya. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) Jurusan Fisika Fakultas Matematika 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 Bapak Dr. Edy Supriyanto, 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 Nurul Priyantari, S.Si, 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 Rahwa dan Ibunda Nurhasana tercinta yang telah memberikan semangat, doa, materi, kasih sayang dan dukungan yang tiada henti;
5. Kakakku Dessy Fitriyana dan adikku Zainal Abidina Rahwa yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama penulis menempuh pendidikan;
6. Sahabat-sahabat tercinta Dyanti Arumdari, Intan Romadhony, Dessy Putri Elok Susanti, Silmina Laili, Wiwik Nur Siscawati dan teman-teman tim komputasi

magnetik yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama perjalanan studi hingga penulis menyelesaikan jenjang studi ini;

7. Teman-teman seperjuangan angkatan 2015 (Ganesha Phi) yang telah memberikan bantuan dan dukungannya;
8. 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, September 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN DEPAN	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBING	vi
HALAMAN PENGESAHAN	vii
RINGKASAN	viii
PRAKATA	x
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xxvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sifat Kemagnetan Bahan	5
2.1.1 Feromagnetik	5
2.1.2 Paramagnetik	6
2.1.3 Diamagnetik.....	6
2.2 Medan Magnet	7
2.3 Energi Sistem Feromagnetik	8
2.3.1 Energi <i>Exchange</i>	8
2.3.2 Energi Magnetostatik.....	8
2.4 Persamaan Landau Lifshitz	9
2.5 Simulasi Mikromagnetik	10

2.6 Struktur Domain	11
2.6.1 Single Domain	11
2.6.2 Two Domain dan Vorteks State	12
2.7 Struktur Kristal	12
2.7.1 <i>Body Centered Cubic</i> (BCC)	12
2.7.2 <i>Face Centered Cubic</i>	13
2.7.3 <i>Hexagonal Closed Packed</i> (HCP)	14
2.8 Bahan Alloy Cobalt-Platinum (CoPt)	14
2.9 Kurva Histerisis	15
2.10 Diameter Kritis (<i>Critical Diameter</i>)	17
BAB 3 METODE PENELITIAN	19
3.1 Rancangan Penelitian	19
3.2 Jenis dan Sumber Data	20
3.3 Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukurannya	20
3.4 Kerangka Pemecahan Masalah	21
3.5 Langkah Kerja	21
3.6 Metode Analisis Data	22
3.6.1 Analisis data simulasi untuk menentukan zona konfigurasi spin magnetik berdasarkan ukuran sisi bahan $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$ berbentuk <i>nanocube</i>	22
3.6.2 Analisis Data Simulasi untuk Menentukan sifat-sifat magnetik bahan CoPt berdasarkan kurva histerisisnya pada setiap zona konfigurasi spin magnetik tersebut.	23
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	24
4.1 Zona Konfigurasi Spin Magnetik Berdasarkan Ukuran Sisi Bahan $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$ Berbentuk Nanocube	24
4.2 Sifat-Sifat Magnetik Bahan $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$ Berdasarkan Kurva Histeresisnya Pada Setiap Zona Konfigurasi Spin Magnetik	29
BAB 5 PENUTUP	40
5.1 Kesimpulan	40
5.2 Saran	40

DAFTAR PUSTAKA	42
LAMPIRAN	45



DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Parameter bahan <i>alloy</i> CoPt.....	20
4.1 Medan koersivitas dan medan saturasi terhadap perubahan ukuran sisi kubus	34
4.2 Medan koersivitas dan medan saturasi terhadap perubahan ukuran sisi kubus	39



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Skema bahan feromagnetik feromagnetik (a) Ketika tanpa medan luar (b) Dengan medan magnet luar.....	5
2.2 Momen magnetik bahan paramagnetik (a) Tanpa medan luar (b) Dengan adanya medan magnet luar.....	6
2.3 Momen magnetik bahan diamagnetik (a) Tanpa medan luar (b) Dengan medan magnet luar.....	7
2.4 Pengurangan Energi Demagnetisasi Akibat Orientasi Arah Dipol Magnet.....	9
2.5 (a) gerak presisi momen magnet terhadap medan efektif tanpa redaman (b) gerak presisi momen magnet terhadap medan efektif dengan redaman(damping)	10
2.6 Tiga kemungkinan keadaan konfigurasi domain magnet saat energi minimum (groundstate) dari partikel magnet bol (spiherical magnetik particle) (a) <i>single domain</i> (b) <i>two domain</i> (c) <i>vortek state</i>	12
2.7 Struktur Kristal Body Centered Cubic (BCC)	12
2.8 Struktur Kristal Face Centered Cubic (FCC)	13
2.9 Struktur Kristal Hexagonal Closed Packed (HCP)	14
2.10 (a) Kurva Histerisis (b) kurva histerisis <i>soft magnetic</i> (c) kurva histerisis <i>hard magnetic</i> bahan feromagnetik	16
2.11 Kurva Histerisis untuk Bahan Ferromagnetic (a) Hubungan Magnetisasi (M) terhadap Medan Magnet (H) dan (b) Hubungan Induksi Magnet (B) terhadap Medan Magnet (H)	17
3.1 Diagram <i>Fishbone</i>	21
3.2 Profil energi dari bahan Co nanosphere terhadap perubahan variasi diameter	22
3.3 Kurva Histerisis.....	23
4.1 Grafik Hubungan Rapat Energi dengan Sisi Kubus.....	26
4.2 Visualisasi stuktur domain bahan CoPt dengan bentuk <i>nanocube</i>	26
4.3 Grafik hubungan rapat energi dengan sisi kubus	28

4.4 Visualisasi stuktur domain bahan CoPt dengan bentuk <i>nanocube</i>	28
4.5 Kurva histerisis bahan CoPt dengan sisi kubus 8 nm (<i>single domain</i>)	30
4.6 Visualisasi arah pembalikan spin	30
4.7 Kurva histerisis bahan CoPt dengan sisi kubus 20 nm (transisi)	31
4.8 Visualisasi arah pembalikan spin	31
4.9 Kurva histerisis bahan CoPt dengan sisi kubus 29 nm (<i>multi domain</i>).....	32
4.10 Visualisasi arah pembalikan spin	33
4.11 Kurva histerisis bahan CoPt dengan sisi kubus 8 nm (<i>single domain</i>)	35
4.12 Visualisasi arah pembalikan spin	35
4.13 Kurva histerisis bahan CoPt dengan sisi kubus 20 nm (transisi)	36
4.14 Visualisasi arah pembalikan spin	36
4.15 Kurva histerisis bahan CoPt dengan sisi kubus 32 nm (<i>multi domain</i>).....	37
4.16 Visualisasi arah pembalikan spin	38

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi pembuatan material magnetik telah berkembang sampai upaya pembuatan piranti magnetik dalam ukuran mikro hingga berskala nanometer. Perkembangan teknologi tersebut ditandai dengan gencarnya penelitian material magnetik untuk mengetahui sifat-sifat dari bahan magnetik. Aplikasinya dalam bidang teknologi informasi yaitu pemakaian bahan feromagnetik berskala nanometer sebagai media penyimpan data (Piramanayagam, 2007). Media penyimpan data yang biasa digunakan adalah media perekam magnetik *Hard Disk Drive* (HDD). *Hard Disk Drive* (HDD) digunakan sebagai media penyimpanan data jangka panjang pada komputer modern. HDD merupakan perangkat media perekam magnetik yang diciptakan pertama kali oleh IBM dengan nama RAMAC (*Random Acces Method of Accounting and Control*) (Widodo, 2013).

Bahan feromagnetik adalah bahan yang mempunyai kemampuan tinggi untuk membentuk medan magnet di dalam bahan tersebut, dengan bentuk: partikel, *disk*, *wires* serta dapat digunakan sebagai media penyimpan data dengan cara memanfaatkan sifat domain magnet di dalam feromagnetik. Material feromagnetik merupakan bahan yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik besar yang bernilai positif. Sifat feromagnetik muncul dalam bahan yang atom-atomnya memiliki momen magnetik permanen yang berinteraksi satu sama lainnya secara kuat dan mampu mempertahankan sifat-sifat magnetik setelah magnet luarnya dihilangkan (Dedi, 2013). Selain itu, bahan feromagnetik merupakan bahan yang memiliki resultan medan atomik terbesar yang disebabkan oleh momen spin elektron. Spin elektron yang tidak berpasangan akan menimbulkan medan magnetik sehingga total medan magnetik yang dihasilkan oleh suatu atom menjadi lebih besar (Nazah, 2017). Spin elektron dan momen magnet bahan feromagnetik tersusun teratur karena adanya momen magnet spontan yang diberi medan magnet eksternal bernilai nol (Yani, *et al.*, 2014).

Bahan magnetik terus dikembangkan oleh para ilmuwan, baik penelitian secara eksperimen maupun secara teori komputasi. Penelitian secara teori komputasi

dilakukan untuk mempelajari sifat bahan magnetik melalui proses simulasi mikromagnetik yang menggunakan program dalam komputer. Penelitian ini dilakukan dengan merujuk pada penelitian sebelumnya yaitu tentang studi mikromagnetik dinamika struktur domain pada material feromagnetik Py, Ni, Fe dan Co model nanosphere (Widodo, 2013). Pada penelitian tersebut menunjukkan bahwa diameter kritis dari bahan Py, Ni, Fe, dan Co berturut-turut bernilai 37,5 nm, 57,5 nm, 25,0 nm, 50,0 nm. Selain itu pada penelitian ini tersebut diperoleh informasi bahwa medan saturasi yang dimiliki bahan Co lebih besar dibandingkan dengan bahan lainnya. Material CoPt juga telah diteliti secara eksperimen oleh Qunfeng (2003) dan Erkovan *et al.* (2014). Pada penelitian Qunfeng (2003) diamati temperatur curie *alloy* $\text{Co}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$ sebesar 789 K pada ukuran 4,3 nm, sedangkan Erkovan *et al.* (2014) diamati temperatur curie *alloy* $\text{Co}_{0.6}\text{Pt}_{0.4}$ sebesar 970 K. penelitian secara simulasi dengan metode Vampire telah dilakukan oleh Nazah (2017) dengan ukuran 5 nm model *nanocube* pada *alloy* $\text{Co}_{0.7}\text{Pt}_{0.3}$, *alloy* $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$, dan *alloy* $\text{Co}_{0.9}\text{Pt}_{0.1}$ masing-masing menghasilkan temperatur curie sebesar : 1050 K, 1180 K dan 1260 K. Menurut Nazah (2017) bahwa variasi komposisi mempengaruhi nilai dari temperatur curie, semakin besar komposisi Co yang diberikan maka temperatur curie yang dihasilkan semakin tinggi. Hal ini terjadi karena unsur Co merupakan material feromagnetik sedangkan unsur Pt merupakan material paramagnetik.

Selain itu bahan magnetik *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Pt}_x$ (*Cobalt-Platinum*) pada komposisi Pt sebesar 0,2 atau dapat dituliskan menjadi $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$, telah banyak mendapatkan perhatian oleh peneliti maupun ilmuwan fisika, karena CoPt merupakan bahan yang mempunyai konstanta anisotropi dan tahanan korosi yang tinggi (Hosoiri *et al.*, 2003). Menurut Kumar *et al.*, (2018), besar konstanta anisotropi CoPt yaitu $k_u = 5 \times 10^6 \text{ J/m}^3$. Menurut Sun, *et al.*, (2004) karena CoPt memiliki konstanta anisotropi dan tahan korosi yang tinggi maka bahan ini bisa dijadikan pembuatan hardisk dengan kapasitas penyimpanan yang besar pada ukuran nanometer. Sifat-sifat bahan yang dianalisis adalah suseptibilitas dan medan-medan yang terdapat dalam bahan tersebut yaitu medan koersivitas, medan magnet dan medan saturasi.

Berdasarkan uraian di atas maka pada penelitian ini akan diteliti sifat magnetik bahan feromagnetik CoPt dengan variasi ukuran sisi kubus, komposisi $\text{Co}_{1-x}\text{Pt}_x$ dibuat tetap pada $x=0,2$ dan berbentuk *nanocube*, serta dilakukan dengan metode simulasi mikromagnetik NMAG. Pada penelitian ini akan dianalisis zona konfigurasi spin magnetik berdasarkan ukuran sisi dalam bentuk *nanocube*. Setelah didapatkan zona konfigurasi spin magnetik maka akan diperoleh kurva histerisis bahan CoPt.

Penelitian simulasi mikromagnetik ini dengan bahan feromagnetik CoPt akan diaplikasikan sebagai penyimpan data menggunakan *software* NMAG yang hanya dapat dijalankan dalam sistem operasi *Linux*. NMAG berbasiskan Metode *Finite Element* (metode elemen hingga). Program tersebut memiliki skrip *Python* (.py) berupa parameter-parameter dari bahan CoPt yang akan dieksekusi pada terminal *Linux*. Parameter yang digunakan pada simulasi mikromagnetik ini adalah magnetisasi saturasi, konstanta anisotropi, konstanta *exchange*, konstanta damping dan *exchange length*. NMAG memiliki beberapa keuntungan yaitu dengan pemakaian metode elemen hingga dapat digunakan untuk komputasi struktur non-kubus, deskripsi yang ada pada *Python* mempunyai tingkat fleksibilitas yang tinggi, penyimpanan data efisien karena kompresi biner, dan peluang dikembangkannya file (.vtk) untuk visualisasi yang masih tinggi. Visualisasi dari file (.vtk) meliputi data magnetisasi dinamis yang akan diolah menggunakan program MayaVi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui zona konfigurasi spin magnetik dan sifat-sifat magnetik dari bahan CoPt berupa kurva histerisis, ukuran kritis dan magnetisasi dari bahan CoPt.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang mendasari dilakukan penelitian ini, antara lain :

1. Bagaimana zona konfigurasi spin magnetik berdasarkan ukuran sisi bahan $\text{Co}_{0,8}\text{Pt}_{0,2}$ berbentuk *nanocube* ?
2. Bagaimana sifat-sifat magnetik bahan $\text{Co}_{0,8}\text{Pt}_{0,2}$ berdasarkan kurva histerisisnya pada setiap zona konfigurasi spin magnetik tersebut ?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini, antara lain :

1. Mengetahui zona konfigurasi spin magnetik berdasarkan ukuran sisi bahan $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$ berbentuk *nanocube*.
2. Mengetahui sifat-sifat magnetik bahan $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$ berdasarkan kurva histerisisnya pada setiap zona konfigurasi spin magnetik tersebut.

1.4 Manfaat

Manfaat dari hasil penelitian sifat-sifat magnetik bahan feromagnetik CoPt dengan metode simulasi mikromagnetik diharapkan mampu memberikan informasi kepada peneliti fisika bahwa akan diperoleh sifat-sifat magnetik terbaik dari bahan CoPt pada komposisi dan bentuk geometri tertentu. Sifat terbaik dari bahan CoPt ditunjukkan adanya energi-energi yang ada. Sehingga penelitian ini menjadi suatu pembuktian bahwa pada hasil eksperimen maupun hasil simulasi mikromagnetik dapat digunakan sebagai acuan bahan dasar dari pembuatan media penyimpanan data berbasis magnetik atau yang biasa disebut *Hard Disk Drive* (HDD).

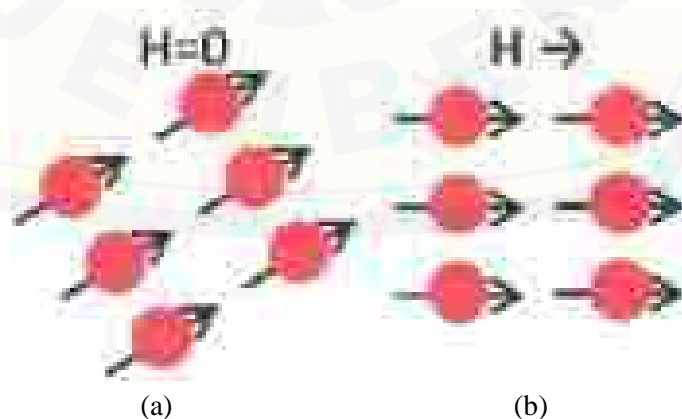
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sifat Kemagnetan Bahan

Bahan magnetik adalah bahan yang memiliki sifat kemagnetan yang bersifat tarik-menarik atau tolak-menolak dengan bahan lain yang ada di sekitarnya. Suatu bahan bersifat magnetik jika memiliki arah momen magnet yang sama (tersusun teratur). Setiap magnet memiliki dua kutub magnet, yaitu kutub utara dan kutub selatan. Kutub magnet sendiri adalah daerah yang berada di ujung magnet yang memiliki kekuatan terbesar. Bahan magnetik dibagi menjadi tiga kategori berdasarkan nilai suseptibilitas, yaitu feromagnetik, paramagnetik dan diamagnetik (Warsiti, 2005). Suseptibilitas magnetik adalah perbandingan antara vektor medan magnetik dan magnetisasi suatu bahan (Subekti, 2010). Bahan magnetik tersebut, yaitu :

2.1.1 Feromagnetik

Bahan feromagnetik merupakan bahan yang mempunyai nilai suseptibilitas magnetik besar yang bernilai positif dengan suseptibilitasnya lebih dari nol. Selain itu, bahan feromagnetik mempunyai resultan medan atomatis terbesar, hal ini disebabkan oleh momen spin elektron. Bahan feromagnetik terdapat banyak spin yang tidak berpasangan yang akan menimbulkan medan magnetik, sehingga total medan magnetik yang dihasilkan oleh suatu atom menjadi lebih besar (Nazah 2017).

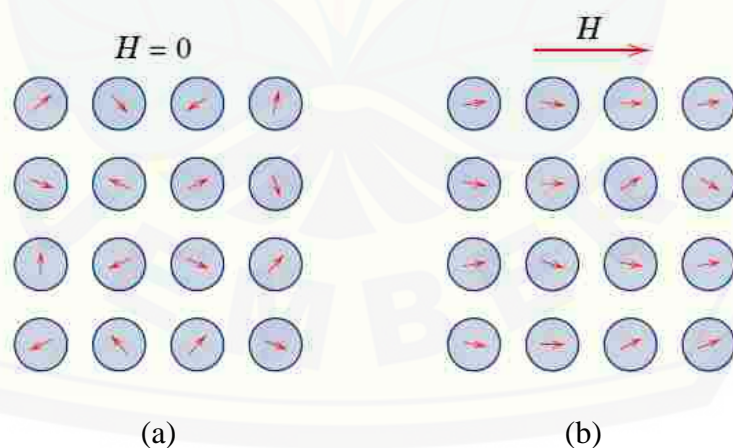


Gambar 2.1 Skema bahan feromagnetik (a) Ketika tanpa medan luar (b) Dengan medan magnet luar (Lacovacci *et al*, 2016)

Gambar 2.1 yaitu bahan feromagnetik yang mula-mula memiliki magnetisasi nol pada daerah bebas medan magnetik, apabila mendapat pengaruh medan magnetik yang lemah akan memperoleh magnetisasi yang besar. Jika medan magnetnya diperbesar maka magnetisasinya juga akan besar (Istiyono, 2009). Bahan feromagnetik mempunyai sifat remanensi, yaitu setelah medan magnet luar dihilangkan maka akan tetap memiliki medan magnet, karena itu bahan ini sangat baik sebagai sumber magnet permanen. Contoh bahan feromagnetik adalah besi, baja, kobalt serta paduannya (Callister dan Rethwich, 2009).

2.1.2 Paramagnetik

Bahan-bahan paramagnetik adalah bahan yang memiliki suseptibilitas magnetik yang kecil dan positif. Paramagnetik muncul dalam bahan yang atom-atomnya memiliki momen magnetik permanen yang berinteraksi satu sama lain secara lemah. Momen magnetik akan berorientasi acak apabila medan magnet luarnya tidak ada. Ketika medan magnet luarnya ada maka momen magnetik akan cenderung menyearahkan sejajar dengan medannya (Tipler, 2001). Menurut Callister dan Rethwisch (2009) contoh bahan yang memiliki sifat paramagnetik adalah Al, Cr, Pt, Mo, Na, Ti dan Zr.

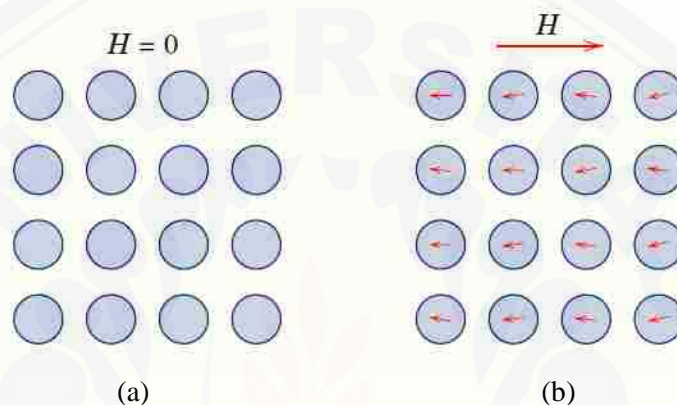


Gambar 2.2 Momen magnetik bahan paramagnetik (a) Tanpa medan luar (b) Dengan adanya medan magnet luar (Callister dan Rethwisch, 2009)

2.1.3 Diamagnetik

Bahan diamagnetik adalah bahan yang mempunyai nilai suseptibilitas negatif dan sangat kecil, dimana momen magnetik dari seluruh elektron setiap atom saling meniadakan yang akan membuat setiap atom memiliki momen magnetik nol tanpa

adanya medan luar. Momen magnetik yang sangat kecil dalam medan luar akan diinduksi dan akan cenderung memperlemah medan tersebut. Sifat diamagnetik ditemukan oleh Faraday pada tahun 1846 ketika sekeping bismuth ditolak oleh kedua kutub magnet, hal ini memperlihatkan bahwa medan induksi dari magnet tersebut menginduksi momen magnetik pada bismuth yang arahnya berlawanan dengan arah medan induksi (Tipler, 2001). Menurut Callister dan Rethwisch (2009) contoh bahan yang memiliki sifat diamagnetik adalah Au, Ag, Zn, Hg dan Si.



Gambar 2.3 Momen magnetik bahan diamagnetik (a) Tanpa medan luar (b) Dengan medan magnet luar (Callister dan Rethwisch, 2009)

2.2 Medan Magnet

Menurut Mardiansyah (2013) bahwa medan magnet adalah daerah di sekitar magnet dimana daerah tersebut dipengaruhi oleh gaya magnet, dimana medan magnet tersebut dapat digambarkan dengan garis-garis gaya magnet. Medan magnet merupakan vektor yang ditimbulkan karena di sekitar kutub-kutub magnet terdapat arus listrik. Medan magnet bersifat kuat atau lemah dapat ditunjukkan oleh kuat medan magnet (B) dan intensitas magnet (H). Hubungan antara B dan H adalah :

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

Keterangan :

B = Kuat Medan (Wb/m^2 atau T)

H = Intensitas magnet (A/m)

μ_0 = Permeabilitas ($4\pi \times 10^{-7} Wb/Am$)

2.3 Energi Sistem Feromagnetik

2.3.1 Energi Exchange

Menurut Getzlaff (2008) bahwa energi *exchange* adalah energi yang timbul dari interaksi spin dengan spin tetangganya melalui *exchange coupling*. Interaksi antara spin dalam material feromagnetik, energi *exchange* dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$E_{ex} = -2J\sum_{ij}\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \quad (2.2)$$

Persamaan (2.2) disebut dengan *Heisenberg model*, dimana \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 mengikuti prinsip larangan Pauli. Prinsip larangan Pauli adalah tidak diperkenankan ada dua elektron yang mempunyai bilangan kuantum yang sama pada tempat dan waktu yang sama.

2.3.2 Energi Magnetostatik

Interaksi muatan pada kutub-kutub seperti muatan positif dan muatan negatif (dipol-dipol) yang berasal dari bahan itu sendiri yang menghasilkan energi magnetostatik pada bahan magnetik, dimana energi tersebut juga disebut dengan energi demagnetisasi. Energi magnetostatik akan bertambah seiring bertambahnya *volume*, dimana kerapatan energi anisotropi dalam keadaan tetap. Energi magnetostatiknya akan lebih besar apabila dipol pada bahan magnet memiliki orientasi arah yang sama satu dengan lainnya (Mardona, 2012). Menurut Guimarães (2009), energi magnetostatik E_d , dianggap sebagai besarnya energi magnetisasi di dalam medan demagnetisasi yang dijelaskan oleh persamaan :

$$E_d = -\frac{1}{2}\mu_0\int_v \mathbf{H}_d \cdot \mathbf{M} dV \quad (2.3)$$

Energi magnetostatik E_d juga dapat ditulis sebagai :

$$E_d = \frac{1}{2}\mu_0\int_{allspace} \mathbf{H}_d^2 dV \quad (2.4)$$

dengan

$$\mathbf{H}_d = -N_d\mathbf{M} \quad (2.5)$$

Keterangan :

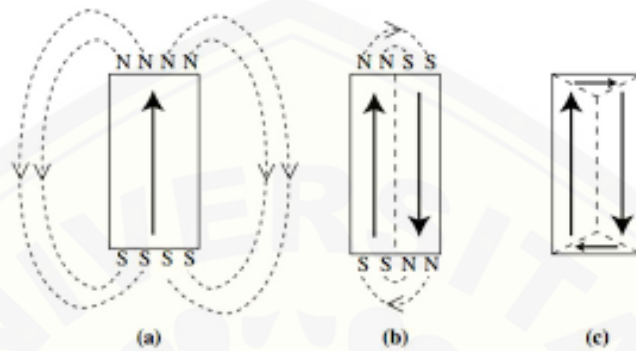
E_d = Energi magnetostatik

\mathbf{H}_d = Medan demagnetisasi

M = Magnetisasi

μ_0 = Permeabilitas magnetik

N = Faktor demagnetisasi yang bergantung pada bentuk bahan dan arah magnetisasi.

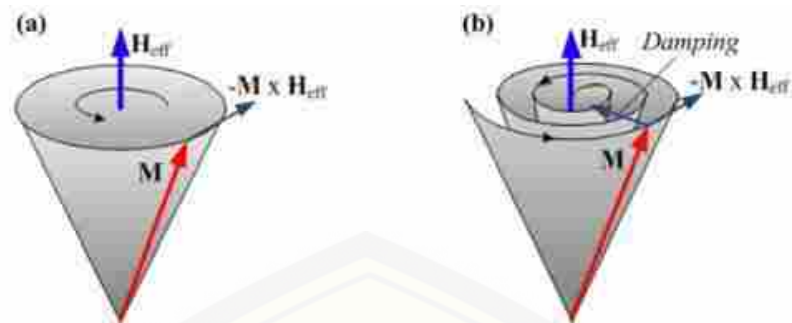


Gambar 2.4 Pengurangan Energi Demagnetisasi Akibat Orientasi Arah Dipol Magnet (Nicola, 2011)

Gambar 2.4 mengilustrasikan bahwa magnetisasi menyebabkan dipol-dipol yang berperilaku sebagai magnet dengan medan magnetik disekitarnya. Medan magnetik tersebut dikenal dengan medan demagnetisasi. Besarnya energi magnetostatik sangat bergantung pada jumlah dipol serta arah orientasi pada dipol-dipol. Gambar 2.4 (a) mengilustrasikan bahwa ketika dipol-dipol dari bahan magnet memiliki orientasi arah yang sama satu dengan lainnya, energi magnetostatiknya besar, dibandingkan pada gambar 2.4 (b) bahan magnet dengan dipol-dipol anti paralel satu dengan lainnya. Sedangkan pada gambar 2.4 (c) keadaan dipol-dipol menyebabkan energi magnetostatik pada keadaan ini adalah minimum (Guimarães, 2009).

2.4 Persamaan Landau Lifshitz

Model persamaan Landau Lifshitz merujuk pada dinamika gerak spin magnet yang digambarkan sebagai gerak rotasi dari momen magnet terhadap arah medan efektif H_{eff} pada kondisi kesetimbangan. Medan efektif ditambahkan untuk menganalogikan peredaman. Medan efektif mampu mengarahkan momen magnet secara perlahan untuk parallel terhadap medan efektif.



Gambar 2.5 (a) gerak presisi momen magnet terhadap medan efektif tanpa redaman (b) gerak presisi momen magnet terhadap medan efektif dengan redaman(damping) (Sumber : Gilbert, 2004)

Nilai H_{eff} diberikan melalui persamaan :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\gamma M \times H_{\text{eff}} \quad (2.6)$$

$\gamma = 2,11 \times 10^5 \text{ mA}^{-1}\text{s}^{-1}$ yaitu nilai absolut dari *gyromagnetic rasio*. Persamaan di atas menjelaskan bahwa tidak ada kecenderungan gerak dari spin magnet untuk menyearahkan diri terhadap H_{eff} seperti pada Gambar 2.5 (a), yang kemudian Landau Lifshitz menyempurnakan dengan memasukkan faktor redaman pada Gambar 2.5 (b) ke dalam persamaan sehingga :

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

$\lambda > 0$ merupakan faktor redaman Landau Lifshitz dan $|M| = M_s$. Persamaan (2.7) disebut sebagai persamaan Landau Lifshitz (Widodo, 2013)

Keterangan :

M adalah magnetisasi

γ adalah rasio giromagnetik

M_s adalah magnetisasi saturasi

H_{eff} adalah medan magnet efektif

2.5 Simulasi Mikromagnetik

Mikromagnetik adalah sifat-sifat bahan feromagnetik dalam skala mikrometer dan sub-mikrometer pada interaksi antara momen magnet, energi sistem saat perubahan magnetisasi dan konfigurasi momen magnet (Ismail, 2013). Konsep dasar simulasi mikromagnetik menggunakan konsep *continuum* untuk menjelaskan

sistem gerak benda dengan menggunakan pendekatan mekanika klasik. Konsep *continuum* untuk perhitungan distribusi magnetisasi pada sampel dengan bentuk acak (Donahue dan Miltat, 2007).

Simulasi ini dilakukan menggunakan *software* NMAG yang hanya dapat dijalankan dalam sistem operasi *Linux*. NMAG berbasiskan Metode *Finite Element* (metode elemen hingga) yang membagi ruang ke dalam banyak tetrahedral kecil yang memiliki keuntungan yaitu cocok untuk komputasi struktur non-kubus maupun kubus. Metode ini digunakan untuk mengacu pada persamaan LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert). Secara khas, geometri tetrahedral bertukar sepanjang daerah yang ditirukan (Rohman *et al.*, 2017). *Software* NMAG memiliki skrip *Python* (.py) yang berisi parameter-parameter bahan yang akan dirunning pada terminal *Linux*. Deskripsi yang ada pada skrip ini mempunyai tingkat fleksibilitas yang tinggi, penyimpanan data efisien karena kompresi biner, dan peluang dikembangkannya file .vtk meliputi data magnetisasi dinamis yang diolah menggunakan program MayaVi (Lefter dan Mihai, 2012).

2.6 Struktur Domain

Struktur material feromagnetik berbeda dengan struktur material magnetik lainnya, karena terdapat domain magnetik. Domain magnetik merupakan pembagian daerah-daerah yang ada pada bahan feromagnetik yang memiliki momen magnetik sejajar (Reitz, 1993). Struktur domain magnet pada bahan feromagnetik adalah *single domain* dan *multi domain*.

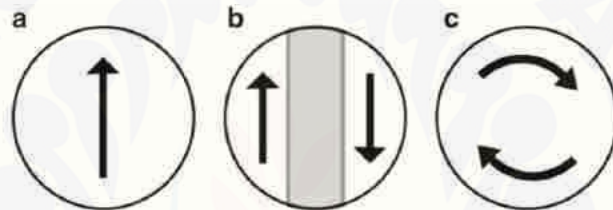
2.6.1 *Single Domain*

Stoner dan Wohlfarth tahun 1948 mengusulkan model yang menggambarkan fenomena magnetik ada partikel kecil yang menganggap bahwa partikel magnetik memiliki *domain homogeny* (domain tunggal) berbentuk *ellipsoid*. Sebuah partikel dengan struktur domain tunggal (*single domain*) sering disebut partikel Stoner Wohlfarth. Magnetisasi dihasilkan oleh dipol-dipol yang searah. Model ini menganggap spin-spin dalam sistem berinteraksi sangat lemah (mengabaikan interaksi *exchange* yang terjadi dalam sistem). Keseluruhan momen magnet berdasarkan pendekatan mikromagnetik saat *single domain* sejajar sumbu

anisotropinya sehingga kontribusi energi *exchange* dan energi anisotropinya dari total energi sistem adalah nol. Energi magnetostatik adalah energi yang relevan (Mardona, 2012).

2.6.2 *Two Domain* dan *Vorteks State*

Struktur domain yang berubah dari *single domain* menjadi *two domain* atau *vorteks state* yaitu partikel magnet bola yang telah melewati daerah diameter yang dikenal dengan diameter kritis yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 (b) dan (c). Semua spin tidak sejajar dengan energi magnetostatik akan minimum dan perubahan arah secara bertahap cukup kecil sehingga energi magnetostatik lebih besar dibandingkan dengan kenaikan energi *exchange*.



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)

2.7 Struktur Kristal

2.7.1 *Body Centered Cubic* (BCC)



Gambar 2.7 Struktur Kristal *Body Centered Cubic* (BCC) (Callister, 2000)

Body Centered Cubic (BCC) adalah struktur kristal yang atom-atomnya terletak di pojok-pojok kubus dan satu di tengah kubus yang dapat dilihat pada Gambar 2.7. Pada Gambar 2.7 dapat diketahui jari-jari atomnya dengan persamaan berikut :

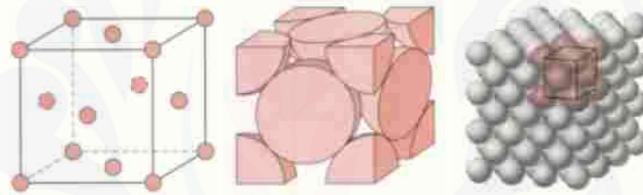
$$\sqrt{3} a = 4R$$

atau

$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

Persamaan (2.8) juga dapat digunakan untuk mengetahui nilai APF pada kristal BCC. Nilai APF kristal BCC sebesar 68% dan sisanya 32% ruang kosong. Hal ini menunjukkan bahwa kristal BCC berstruktur padat. Bilangan koordinasinya ada 8 dan jumlah tiap unit selnya $n = 2$ (Callister, 2000). Satu sel dari struktur BCC terlihat bahwa terdapat satu sel utuh di tengah 8 sel satuan di tepi dan $1/8$ atom terdapat pada tiap-tiap sudut sel satuan sehingga dalam satu sel satuan BCC terdapat 2 atom. Bahan magnetik yang memiliki struktur BCC adalah Na, K, Mo, W, Ba, Cr, Fe, Cs, dan Rb (Bahar, 2015).

2.7.2 Face Centered Cubic



Gambar 2.8 Struktur Kristal *Face Centered Cubic* (FCC) (Callister, 2000)

Face Centered Cubic (FCC) adalah struktur kristal yang masing-masing atomnya bersentuhan satu sama lain pada diagonal sisinya. Satu sel struktur kristal FCC dapat dilihat pada Gambar 2.8. Gambar tersebut menunjukkan bahwa terdapat satu titik *lattice* di setiap sudut dan titik *lattice* di setiap pusat sisi kubus. Struktur kristal FCC dikelilingi 12 atom dengan bilangan koordinasi sebesar 12. Jari-jari atom FCC dapat diketahui dengan persamaan (2.9) :

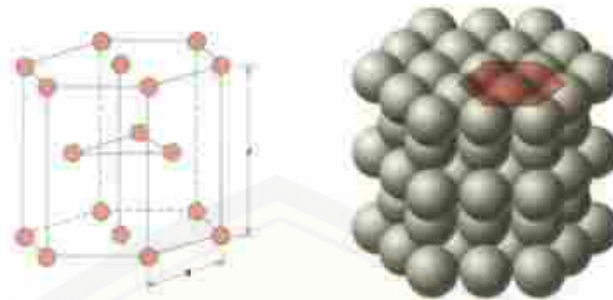
$$\sqrt{2} a = 4R$$

atau

$$a = \frac{4R}{\sqrt{2}} \quad (2.9)$$

Persamaan (2.9) juga dapat digunakan untuk mengetahui nilai APF pada Kristal FCC. Nilai APF Kristal FCC sebesar 74% dan sisanya 26% ruang kosong. Bahan magnetik yang memiliki struktur FCC adalah Pt, Al, Ca, Au Ni, Ag, Sr dan Kr (Bahar, 2015).

2.7.3 Hexagonal Closed Packed (HCP)



Gambar 2.9 Struktur Kristal *Hexagonal Closed Packed* (HCP) (Callister, 2000)

Sel satuan Kristal HCP dapat dilihat pada Gambar 2.9. Setiap logam struktur kristal HCP dikelilingi 12 atom dan bilangan koordinasinya sebanyak 12, hal ini mencirikan bahwa struktur kristal HCP berstruktur padat. Sel satuan HCP mempunyai 6 atom per sel satuan yaitu $(2 \times 6 \times \frac{1}{6})$ pada sudut lapisan bawah dan atas, sedangkan ada pusat lapisan bawah dan atas adalah $(+2 \times \frac{1}{2})$. Nilai APF dari struktur kristal HCP dapat diketahui berdasarkan persamaan (2.13) yaitu sebesar 74% dan sisanya 26% ruang kosong. Bahan magnetik yang memiliki struktur FCC adalah Co, Cd, Ti dan Zn (Callister, 2000).

2.8 Bahan Alloy *Cobalt-Platinum* (CoPt)

Cobalt (Co) merupakan bahan feromagnetik yang memiliki struktur Kristal *Hexagonal Closed Packed* (HCP). Bahan ini memiliki tekstur yang kuat. *Platinum* (Pt) merupakan logam transisi yang termasuk bahan paramagnetik yang memiliki struktur kristal *Face Centered Cubic* (FCC). Bahan CoPt sendiri memiliki struktur kristal *Hexagonal Closed Packed* (HCP).

Bahan *alloy* merupakan bahan paduan antara bahan yang memiliki unsur logam dengan logam. Salah satu lapisan magnetik yang sedang dikembangkan saat ini adalah lapisan tipis *alloy* CoPt. Bahan magnetik *alloy* CoPt merupakan campuran dari unsur Co dan Pt pada komposisi bahan Pt $(x) = 0,2$. Bahan $\text{Co}_{0,8}\text{Pt}_{0,2}$ mendapatkan banyak perhatian oleh peneliti maupun ilmuwan fisika, karena CoPt merupakan bahan yang mempunyai konstanta anisotropi dan tahanan korosi yang tinggi (Hosoiri *et al.*, 2003). Menurut Kumar *et al.*, (2018), besar konstanta

anisotropi CoPt yaitu $k_u = 5 \times 10^6 \text{ J/m}^3$. Karena CoPt memiliki konstanta anisotropi dan tahanan korosi yang tinggi maka bahan ini bisa dijadikan pembuatan hardisk dengan kapasitas penyimpanan yang besar pada ukuran nanometer (Sun *et al.*, 2004). Sifat-sifat bahan yang dianalisis adalah suseptibilitas dan medan-medan yang terdapat dalam bahan tersebut yaitu medan koersifitas, medan magnet dan medan saturasi.

Co_{0.8}Pt_{0.2} memiliki nilai temperatur curie yang tinggi. Karena bahan magnetik *alloy* Co_{0.8}Pt_{0.2} memiliki komposisi unsur Pt kecil dan komposisi Co yang diberikan besar. Hal ini terjadi karena unsur Co merupakan bahan feromagnetik sedangkan unsur Pt merupakan bahan paramagnetik. Dimana, temperatur curie merupakan sifat instrinsik yang hanya dimiliki oleh bahan feromagnetik.

2.9 Kurva Histerisis

Histerisis adalah suatu sifat yang dimiliki oleh sistem tidak secara cepat mengikuti gaya yang diberikan kepadanya, tetapi memberikan reaksi secara perlahan atau bahkan sistem tidak kembali lagi ke keadaan awalnya (Yani *et al.*, 2014). Kurva histerisis mempresentasikan magnetisasi dan demagnetisasi oleh suatu medan luar. Kurva histerisis dapat diperoleh dengan memetakan magnetisasi bahan M untuk kuat medan magnet eksternal H yang berbeda-beda. Cara yang paling umum untuk menyatakan magnetisasi *bulk* dari bahan feromagnetik adalah dengan memetakan induksi magnetik B untuk kuat medan magnet eksternal, H yang berbeda-beda (Widodo, 2013). Hubungan antara medan magnet luar, induksi magnet, dan magnetisasi dari suatu kurva histerisis bahan feromagnetic dapat dipresentasikan ke dalam persamaan (2.10)

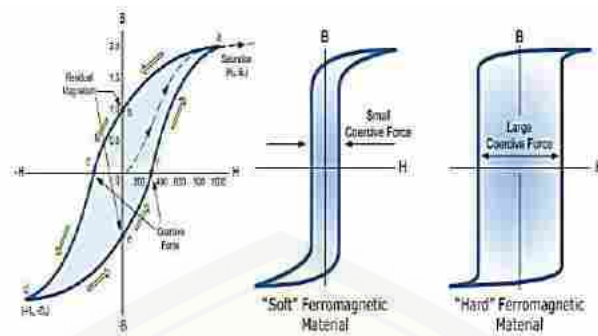
$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.10)$$

dimana B adalah induksi magnet, H medan magne yang diberikan, M magnetisasi, dan μ_0 permeabilitas ruang hampa. Diketahui bahwa :

$$J = \mu_0 M \quad (2.11)$$

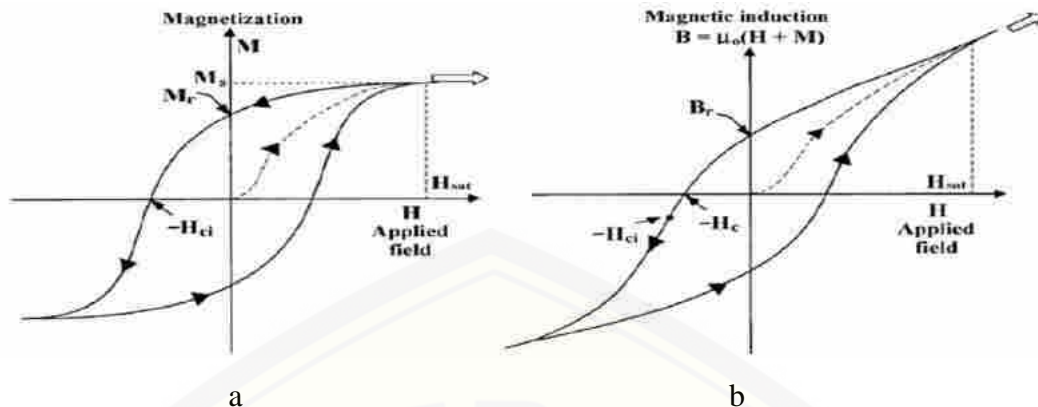
dimana J merupakan polarisasi, maka persamaan (2.12) menjadi :

$$B = \mu_0 H + J \quad (2.12)$$



Gambar 2.10 (a) Kurva Histerisis (b) kurva histerisis *soft magnetic* (c) kurva histerisis *hard magnetic* bahan feromagnetik (Nursiyanto et al., 2015)

Kurva histerisis pada umumnya dibedakan menjadi 2 yaitu kurva histerisis *soft magnet* dan *hard magnet*. Gambar 2.10 menunjukkan bahwa berdasarkan medan koersivitas dari kurva histerisnya dapat dibedakan menjadi *soft magnet* dan *hard magnet*. Nilai koersivitas dan remanen pada kurva histerisis *soft magnet* cukup kecil ditunjukkan dengan bentuk loop kurva histerisis pipih dan ramping, sedangkan pada kurva histerisis *hard magnet* nilai koersivitas dan remanen cukup besar ditunjukkan dengan bentuk kurva histerisnya yang melebar besar seperti persegi panjang. Bentuk loop kurva yang dibutuhkan untuk aplikasi perekam magnetik yaitu memiliki magnetisasi remanen besar, koersivitas sedang, dan idealnya memiliki bentuk persegi (Widodo, 2013). Berdasarkan bentuk kurva histerisnya, bahan magnetik diklasifikasikan menjadi magnet lunak yang memiliki nilai koersivitas dibawah 1 kA/m, dan magnet keras yang memiliki nilai koersivitas di atas 10 kA/m (Rohman, 2013).



Gambar 2.11 Kurva Histerisis untuk Bahan Ferromagnetic (a) Hubungan Magnetisasi (M) terhadap Medan Magnet (H) dan (b) Hubungan Induksi Magnet (B) terhadap Medan Magnet (H) (Widodo,2013)

Kurva histerisis pada gambar 2.11 menunjukkan bahwa pada bahan feromagnetik yang mulanya belum termagnetisasi ketika sebuah medan magnet H diberikan pada bahan tersebut akan menyebabkan magnetisasi meningkat sebanding dengan medan magnet H . Akibat pergerakan dari domain magnet menyebabkan bertambahnya nilai magnetisasi M . Jika medan magnet H yang diberikan meningkat terus-menerus maka magnetisasi akan mencapai keadaan jenuh atau saturasi. Besarnya nilai magnetisasi dalam keadaan saturasi disebut dengan magnetisasi saturasi M_s . Sedangkan besar medan yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan satuarsi disebut dengan medan saturasi H_{sat} . Pada keadaan ini seluruh momen magnet membentuk domain tunggal yang terorientasi searah dengan medan magnet H yang diberikan (Widodo, 2013).

2.10 Diameter Kritis (*Critical Diameter*)

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

$$DC_1 = \left(\frac{9\gamma_w}{2\pi M_s^2} \right) \quad (2.13)$$

Brown menghitung secara rinci batas ukuran diameter kritis pada keadaan *single domain* dengan meninjau energi minimumnya, yaitu :

$$DC_2 = 7,211 \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}} = 7,211 l_{ex} \quad (2.14)$$

Diameter kritis untuk single domain pada temperature ruang diprediksi oleh R Skomski, yaitu :

$$DC_3 = \frac{72\sqrt{AK}}{\mu_0 M_s^2} \quad (2.15)$$

Brown secara terperinci memprediksi energi transisi yang terjadi dari keadaan struktur *single domain* menjadi *multi domain* untuk bahan *soft magnet*, diberikan oleh :

$$DC_4 = \frac{9,0584 \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}}}{\left(1 - 2,8075 \frac{2K}{\mu_0 M_s^2}\right)} = \frac{9,0584}{1 - 2,8075k} l_{ex} \quad (2.16)$$

Sedangkan untuk *Hard magnet*, yaitu :

$$DC_5 = 9\pi \sqrt{\frac{2A(K_1 + 2\sigma\mu_0 M_s^2)}{\mu_0 M_s^2 (3\sigma - 2)}} = \frac{9\pi\sqrt{k+4\sigma}}{\sqrt{2(3\sigma-2)}} l_{ex} \quad (2.17)$$

Keterangan :

$\sigma = 0,785398$

k adalah *Hardness parameter*

l_{ex} adalah *exchange length*

M_s adalah magnetisasi saturasi

K adalah konstanta anisotropi

A adalah konstanta *exchange*

$\gamma_w = 2\sqrt{AK}$ adalah energi permukaan *Blochwall* dalam bahan.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Kegiatan penelitian dimulai dari bulan Februari 2019 sampai Agustus 2019. Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini berupa 1 set perangkat komputer yang terdiri atas layar monitor, keyboard, mouse dan CPU dengan spesifikasi adalah :

Prosesor	: Intel® Core™ i5-3470 CPU @ 3,20 GHz 3,60 GHz
Sistem Tipe	: 64 bit
RAM	: 4 GB (3,90 GB usable)
Sistem Operasi	: Linux

Program aplikasi yang digunakan pada simulasi adalah :

- NMAG (*Nano Magnetik*) berfungsi untuk running simulasi mikromagnetik berbasis *Finite Element*.
- MayaVi berfungsi untuk membuat visualisasi struktur domain dalam 3 dimensi dengan menggunakan hasil simulasi berupa file (.vtk).
- Origin berfungsi untuk pembentuk kurva histerisis dengan menggunakan nilai hasil running yang berupa file (.ndt).
- Netgen berfungsi untuk visualisasi bahan berbentuk *nanocube* dari output .geo.

Penelitian ini dilakukan menggunakan *software* NMAG yang hanya dapat dijalankan dalam sistem operasi *Linux*. NMAG berbasiskan Metode *Finite Element* (metode elemen hingga). Tahap awal yaitu meliputi studi pustaka sebagai dasar untuk kajian dalam penelitian ini. Selanjutnya yaitu *software* NMAG, netgen, origin dan mayaVi diinstal. Setelah semua *software* terinstal maka yang dilakukan berikutnya adalah kegiatan simulasi dengan menggunakan file *script* yang telah dibuat berupa parameter dari bahan CoPt. Simulasi ini dilakukan untuk menentukan ukuran kritis pada daerah domain diantaranya *single domain*, transisi serta *multi domain* dan untuk menganalisa kurva histerisis pada bahan CoPt. Setelah diproses hasil simulasi tersebut dilakukan analisa data, sehingga diperoleh kesimpulan.

3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis data dalam penelitian ini dilakukan dengan pengolahan data secara kuantitatif dan kualitatif. Data yang akan diambil berupa suatu angka kuantitatif yang dapat diukur dan memiliki besaran atau nilai dengan satuan tertentu. Sumber data dalam penelitian ini berupa data sekunder yang diperoleh dari kajian pustaka. Penelitian dilakukan dengan pengolahan data sekunder menjadi data akhir. Sumber data parameter yang digunakan dalam simulasi antara lain magnetisasi saturasi (Ms), konstanta *exchange* (A), *exchange length* (l_{ex}) dan konstanta anisotropi (K) dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Parameter bahan *alloy* CoPt

Parameter Bahan	Nilai
Magnetisasi (Ms) ¹	804×10^3 (A/m)
Magnetisasi (Ms) ²	810×10^3 (A/m)
Konstanta <i>Exchange</i> (A) ^{1,2}	1×10^{-11} (J/m)
<i>Exchange Length</i> (l_{ex}) ^{1,2}	3,5 nm
Konstanta Anisotropi (K) ^{1,2}	49×10^5 (J/m ³)

Sumber : ¹Exl (2017)

²Coey (2009)

3.3 Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukurannya

Pada penelitian ini, terdapat dua variable penelitian yang terdiri dari :

1. Variabel Bebas

Variabel bebas pada penelitian ini adalah variasi sisi pada bahan CoPt. Variasi panjang sisi yaitu 8 nm, 11 nm, 14 nm, 17 nm, 20 nm, 23 nm, 26 nm, 29 nm, 32 nm, 35 nm, 38 nm, dan 41 nm. Variasi ini dibuat untuk mendapatkan hasil yang akurat. Variabel bebas dapat mempengaruhi variabel terikat

2. Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah grafik hubungan volume dengan rapat energi dan hubungan sisi dengan rapat energi yang akan diamati tiga daerah yakni *single domain*, transisi, dan *multi domain*. Grafik yang dihasilkan akan diamati pada daerah domain yaitu single domain, transisi dan mult domain. Daerah

domain dianalisa pada sisi kritis pada hubungan grafik tersebut. Selain hubungan grafik, variabel terikatnya adalah menentukan kurva histeresis bahan CoPt pada medan koersifitas, medan magnet dan medan saturasi untuk diamati sifat magnetik dari bahan $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$.

3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

Penelitian yang akan dilakukan secara umum digambarkan dalam diagram *Fishbone* dengan melalui tahapan penelitian seperti Gambar 3.1 berikut ini :



Gambar 3.1 Diagram *Fishbone*

3.5 Langkah Kerja

Simulasi mikromagnetik pada penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan :

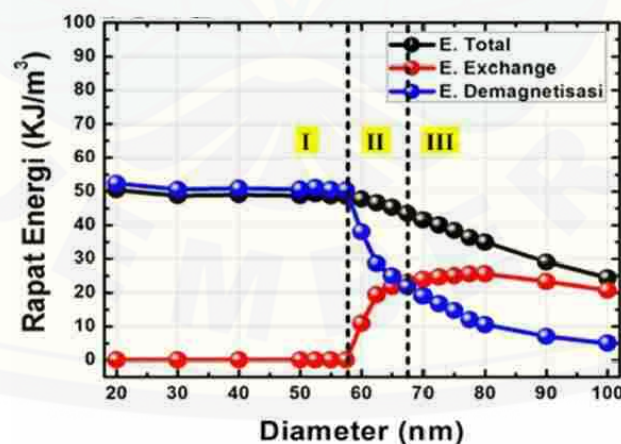
1. *Software* NMAG, MayaVi, netgen dan Origin diinstal terlebih dahulu pada sistem operasi *Linux*.
2. Gambar geometri kubus dibuat menggunakan *software* netgen dengan memasukkan file (.geo).
3. Parameter-parameter pada bahan CoPt dibuat dalam bentuk file (.py) dan data input dibuat meliputi file (.geo) yang di dalamnya berisi ukuran sisi *nanocube* pada bahan CoPt dengan nilai *maxh* tidak boleh lebih dari nilai *exchange length*.
4. Ukuran kritis ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.14.
5. *Script* di *running* pada terminal linux dan akan mendapatkan hasil berupa file (.vtk) dan (.ndt).

6. Langkah selanjutnya adalah visualisasi gambar dari file (.vtk) menggunakan *software* MayaVi.
7. Simulasi grafik dibuat menggunakan *software* Origin dengan memasukkan file (.ndt).
8. Grafik dianalisis zona konfigurasi spinnya.
9. Hasil simulasi yang berupa grafik dianalisis dalam bentuk kurva histerisisnya.
10. Hasil kurva histeris dan gambar dari MayaVi tersebut dianalisis dan akan diperoleh kesimpulan.

3.6 Metode Analisis Data

3.6.1 Analisis data simulasi untuk menentukan zona konfigurasi spin magnetik berdasarkan ukuran sisi bahan $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$ berbentuk *nanocube*.

Hasil simulasi untuk menentukan ukuran kritis pada bentuk *nanocube* dengan membuat grafik terlebih dahulu. Kemudian grafik tersebut dianalisa daerah domainnya atau zona konfigurasi spin magnetik. Menentukan rumus umum diameter kritis pada bentuk *nanocube*. Penelitian ini mengacu pada persamaan Brown yang menjelaskan tentang persamaan diameter kritis namun berbentuk bola.



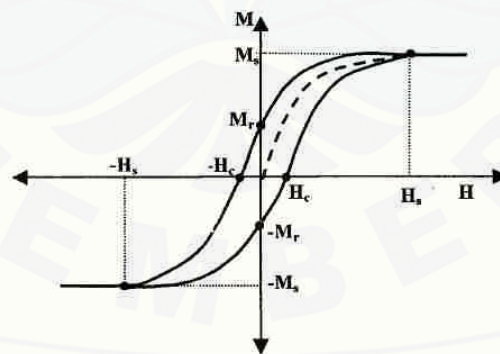
Gambar 3.2 Profil Grafik Rapat energi dengan diameter berbentuk nanosphere (Widodo, 2013)

Gambar 3.2 adalah grafik hubungan rapat energy dengan diameter yang dianalisa struktur domainnya pada bentuk bola. Penelitian ini menganalisis sisi kritis pada kubus. Sisi kritis didapatkan dengan membuat grafik seperti Gambar 3.2,

namun grafiknya adalah hubungan sisi dengan rapat energy (energi total, energi exchange, dan energi demagnetisasi) karena berbentuk kubus. Kemudian menganalisa grafik untuk memperoleh struktur domain yang dilihat dari energi exchange dan energi demagnetisasi. Setelah itu akan mendapatkan hasil single domain, transisi dan multi domain. Analisis ini sesuai dengan daerah domain yang dihasilkan pada penelitian ini.

3.6.2 Analisis Data Simulasi untuk Menentukan sifat-sifat magnetik bahan CoPt berdasarkan kurva histerisisnya pada setiap zona konfigurasi spin magnetik tersebut.

Hasil simulasi untuk menentukan pembuatan kurva histerisis berupa data output yang kemudian dianalisis menggunakan program Origin. Origin berfungsi untuk pembentuk kurva histerisis dengan menggunakan nilai hasil running yang berupa file .ndt. Analisis tersebut untuk membuat kurva antara magnetisasi terhadap medan magnet luar. Analisis ini untuk mengetahui medan koersivitas, medan magnet dan medan saturasi yang dapat menentukan bahan *alloy* CoPt tergolong kategori *hard* magnet atau *soft* magnet. Penentuan kurva histerisis bahan CoPt dilakukan dengan memvariasi sisi atau ukuran pada *nanocube*. Analisis dilakukan untuk mengetahui bahan ini bersifat feromagnetik atau bukan feromagnetik.



Gambar 3.3 Kurva Histerisis (Dunlop dan Ozdemir, 1997)

Hasil simulasi kurva histeresis akan menganalisis medan koersivitas dan medan saturasi. Medan koersivitas didapatkan dari mengukur H_c hingga batas garis vertikal yaitu M yang seperti Gambar 3.3. kurva histeresis dianalisis pada daerah domain yang telah diperoleh pada grafik hubungan rapat energi dengan sisi.

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada penelitian sifat-sifat magnetik bahan feromagnetik $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$ dengan metode simulasi mikromagnetik dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Bahan CoPt dengan $M_s = 804 \times 10^3$ A/m dan $M_s = 810 \times 10^3$ A/m memiliki sisi kritis 20 nm pada zona transisi. Struktur domain yang terbentuk adalah *single domain* dan *multi domain*. Pada zona *single domain* yaitu pada sisi 8 nm – 20 nm dengan energi demagnetisasi yang lebih mendominasi. Sedangkan pada zona *multi domain* pada $M_s = 804 \times 10^3$ A/m antara 29 nm – 41 nm dan $M_s = 810 \times 10^3$ A/m antara 32 nm – 41 nm dengan energi *exchange* yang lebih mendominasi. Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh untuk menentukan sisi kritis bahan CoPt sesuai dengan perhitungan secara teori yaitu menggunakan persamaan Brown.
2. Bahan CoPt dengan $M_s = 804 \times 10^3$ A/m memiliki medan koersivitas 0.275 A/m atau 3.46×10^{-7} T pada zona *single domain*. Zona transisi memiliki medan koersivitas sebesar 0.75 A/m atau 9.43×10^{-7} T. Zona *multi domain* memiliki medan koersivitas sebesar 1.5 A/m atau 2.4×10^{-6} T. Sedangkan dengan $M_s = 810 \times 10^3$ A/m memiliki medan koersivitas 0.25 A/m atau 3.14×10^{-7} T pada zona *single domain*. Pada zona transisi memiliki medan koersivitas 0.35 A/m atau 4.39×10^{-7} T. Zona *multi domain* memiliki medan koersivitas sebesar 0.55 A/m atau 6.91×10^{-7} T. Bahan CoPt tergolong dalam sifat *soft magnet* karena memiliki nilai medan koersivitas lebih kecil dari 1 T.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh energi *exchange*, dan energi demagnetisasi dari alloy $\text{Co}_{1-x}\text{Pt}_x$ berbagai variasi sisi kubus berdasarkan simulasi mikromagnetik. Namun penelitian pada bahan ini masih perlu dikembangkan lebih jauh lagi guna mengetahui potensi dari bahan ini. Selain penelitian pada pengaruh sisi kubus, penelitian lebih lanjut dapat menggunakan

pengaruh temperatur curie. Sehingga dengan adanya variasi tersebut, pengaruhnya pada sifat-sifat magnetik dapat diketahui.



DAFTAR PUSTAKA

- Bahar, A. 2015. Visualisasi dan Perhitungan Laju Difusi Atom Besi dalam Timbal Cair untuk Memahami Mekanisme Penghambatan Korosi Besi. Skripsi. Jember: FMIPA Universitas Jember.
- Callister, W. D. 2000. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. University Of Utah : John Willey and Sons, Inc.
- Callister, W.D. dan Rethwisch, D.G. 2009. *Materials Science and engineering An Introduction. Eighth Edition*. New York: John Wiley and Sons.
- Coey, J.M.D. 2009. *Magnetism and Magnetic Materials*. United States of America: Cambridge University Press.
- Dedi, M. 2013. *Analisa Sifat Feromagnetik Material Menggunakan Metode Monte Carlo*. *Jurnal Ilmiah Edu Research*, Vol. 2.
- Donahue, M. J. dan Miltat, J. E. 2007. *Numerical Micromagnetic: Finite difference methods*. Vol. 2, pp. 742-764. USA: NIST University.
- Dunlop, D. J. dan Ozdemir, O. 1997. *Rock Magnetism: Fundamental and Frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Erkovan, M., M. T. Öcal, dan O. Öztürk. 2014. *Tuning Magnetic Properties Polycrystalline of PtCo Alloys Films with Pt*: Cornell University Library.
- Exl, L. Suess, D dan Schrefl, T. 2017. *Micromagnetism*. Austria : University of Vienna.
- Getzlaff, M. 2008. *Fundamentals of Magnetism*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Gilbert, T. L. 2004. *Phenomenological Theory of Damping in Ferromagnetic Materials*. *IEEE Trans. Magn.* Vol. **40**, 3443.
- Guimarães, A. P. 2009. *Principles of Nanomagnetism*. Springer-Rio de Janeiro.
- Hosoiri, K., F. Wang, S. Doi, dan T. Watanabe. 2003. *Preparation and Characterization of Electrodeposited Co-Pt Binary Alloy Film*. *Materials Transactions*. 44(4): 653:656.
- Ismail. 2013. *Studi Mikromagnetik Proses Magnetisasi dan Spektrum Suseptibilitas Feromagnetik Elemen Diamond Shaped*. Skripsi. Jakarta : Universitas Jakarta.

- Istiyono, E. 2009. Analisis Sifat Magnetik Bahan yang Mengalami Proses *Annealing* dan *Quenching*. Yogyakarta : Universitas Negeri Yogyakarta.
- Kumar, D. Jin, T. Gupta, S. Asokan, K. Piramanayagam, S. N. dan Nongjai, R. 2018. *Modification of Structural and Magnetic Properties of Masked Co-Pt Films Induced by High-Energy Ion Implantation*. IEEE Magnetics Letters, Volume 9.
- Lacovacci, V., G. Lucarini, L. Ricotti, dan A. Menciassi. 2016. *Magnetic Field Based Technologies For Lab-On-a-Chip Application*. Italy : Intech.
- Lefter dan D. Mihai. 2012. Micromagnetic Analysis of Magnetization Behavior in permalloy Nanoparticles for Data Storage Applications. Jurnal of Physic. 6(1) : 1-6.
- Mardiansyah, D. 2013. Analisa Sifat Feromagnetik Material Menggunakan Metode Monte Carlo. *Jurnal Ilmiah Edu 2*.
- Mardona. 2012. Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi pada Material Ferromagnet Co dan Ni Berbentuk *Nanowire*. Tesis. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Nazah, S. F. 2017. *Investigasi Sifat-Sifat Magnetik Alloy Co_{1-x}Pt_x dan Penentuan Temperatur Curie Berdasarkan Simulasi Mikromagnetik*. Skripsi. Jember: FMIPA UNEJ.
- Nicola, A. S. 2011. *Magnetic Materials Fundamentals and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nursiyanto, W., B. Soegijono, dan E. Djatmoko. 2015. Pengaruh Bentuk *Notch* terhadap Kurva Histerisis Bahan Feromagnetik *Nanowire*. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF 2015-VI-1*. Jakarta: Universitas Negeri Jakarta.
- Piramanayagam, S. N. 2007. *Perpendicular Recording Media for Hard Disk Drive*. *J. appl. Phys.* Vol 102, 011301.
- Qunfeng, X. 2003. *Experimental Study of Nanoscale Exchange Coupling*. Tesis. China: Faculteit der Natuurwettenschappen, Wiskunde en Informatica.
- Reitz, J.R. 1993. *Foundations of Electromagnetic Theory*. Addison-wesley publishing company. New York.
- Rohman, L. 2013. *Investigasi Sifat-Sifat Magnetik Bahan LSMO (La_{1-x}Sr_xMnO₃) untuk Aplikasi Storage Device dengan Menggunakan Modelling Mikromagnetik*. Jember : Universitas Jember.

- Rohman, L., Musyarofah dan Purwandari, E.2017. *Study of A Phenomenon STT (Spin Transfer Torque) on the Material $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ Shaped Nanowire Using Micromagnetic Simulation*. Jurnal Ilmu Dasar, Vol.18 No. 2 : 133-138.
- Subekti. 2010. Pengukuran Anisotropi Suseptibilitas Magnetik. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Sun, X., Z. Y. Jia, Y. H. Huang, J. W. Harrell, dan D.E. Nikles. 2004. *Syntesis and Magnetic Properties of CoPt Nanoparticles*. *Journal Of Applied Physics*. 95(11):0021-8979.
- Tipler P., A. 2001. Fisika Untuk Sains dan Teknik, Edisi Ketiga. Jakarta: Erlangga.
- Wahyuningsih, A.E. 2018. Analisis Temperatur Curie Dan Kurva Histerisis Bahan Alloy Co(1-X)Pt(X) Model *Nanocube* dengan Simulasi Mikromagnetik. *Skripsi*. Jember : Universitas Jember.
- Warsiti. 2005. Studi Pengaruh Suhu Annealing Terhadap Struktur Kristal Dan Magnetoresistansi Permalloy NiFe Hasil Elektrodeposisi. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Widodo, A.T. 2013. *Studi Mikromagnetik Dinamika Struktur Domain pada Bahan 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

Lampiran 4.1 Perhitungan Ukuran Kritis Bahan Co_{0.8}Pt_{0.2} dengan Bentuk Nanocube

Menggunakan rumus Brown untuk memperoleh sisi kritis :

$$DC_r = 7,211 \sqrt{\frac{2A}{\mu M_s^2}} = 7,211 l_{ex}$$

$$DC_r = 7,211 \times 3.5$$

$$DC_r = 25,2385$$

Setelah diperoleh diameter kritis, lalu dibandingkan antara bentuk bola dengan kubus :

Bola

$$DC_r$$

$$V_{Cr} = \frac{4}{3} \pi DC_r^3$$

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

$$= \frac{4}{3} \pi \left(\frac{1}{2} DC_r \right)^3 = SC_r^3$$

$$= \frac{4}{3} \times \frac{1}{8} \pi DC_r^3 = SC_r^3$$

$$= \frac{4}{24} \pi DC_r^3 = SC_r^3$$

$$= \frac{1}{6} \pi DC_r^3 = SC_r^3$$

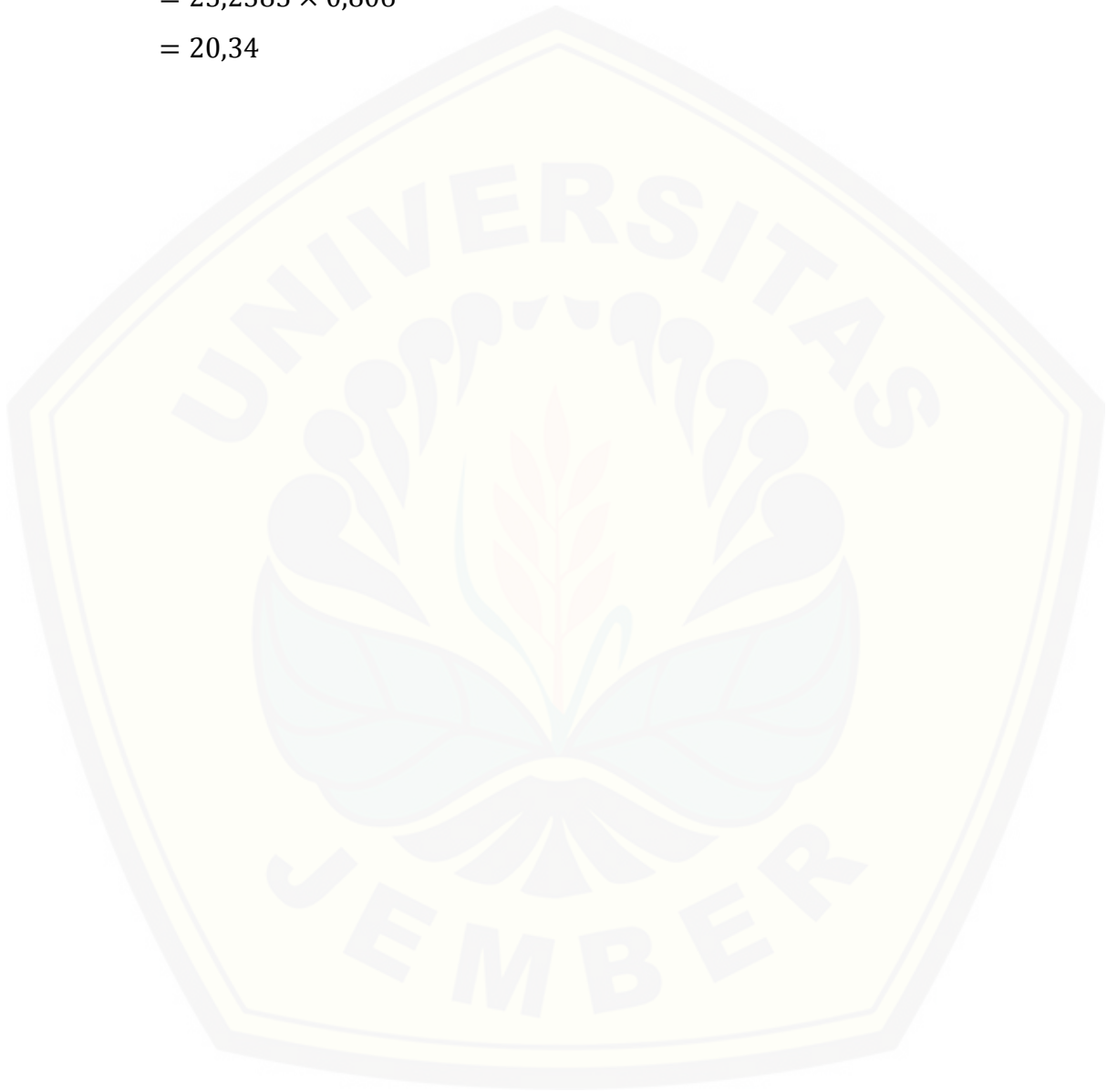
Jadi, Sisi kritisnya adalah :

$$SC_r^3 = \frac{1}{6} \pi DC_r^3$$

$$SC_r = \sqrt{\frac{1}{6} \pi DC_r^3}$$

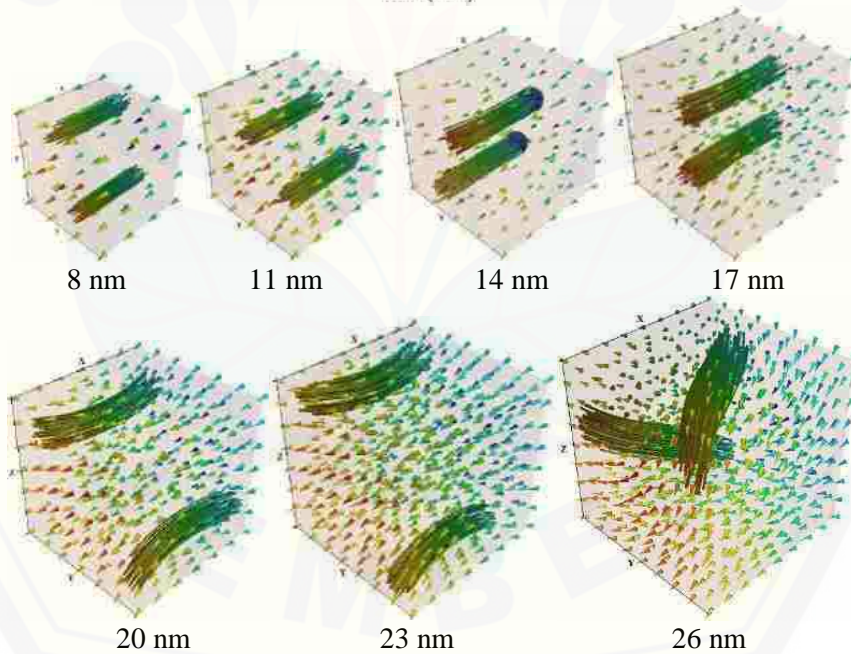
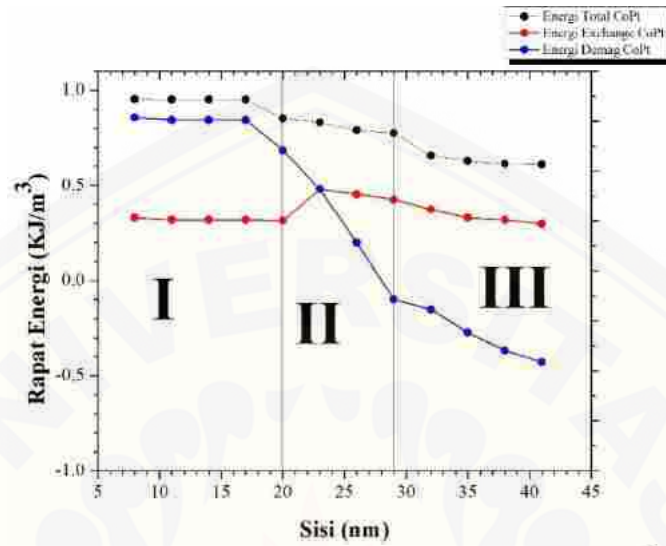
$$SC_r = DC_r \sqrt[3]{\frac{1}{6} \pi}$$

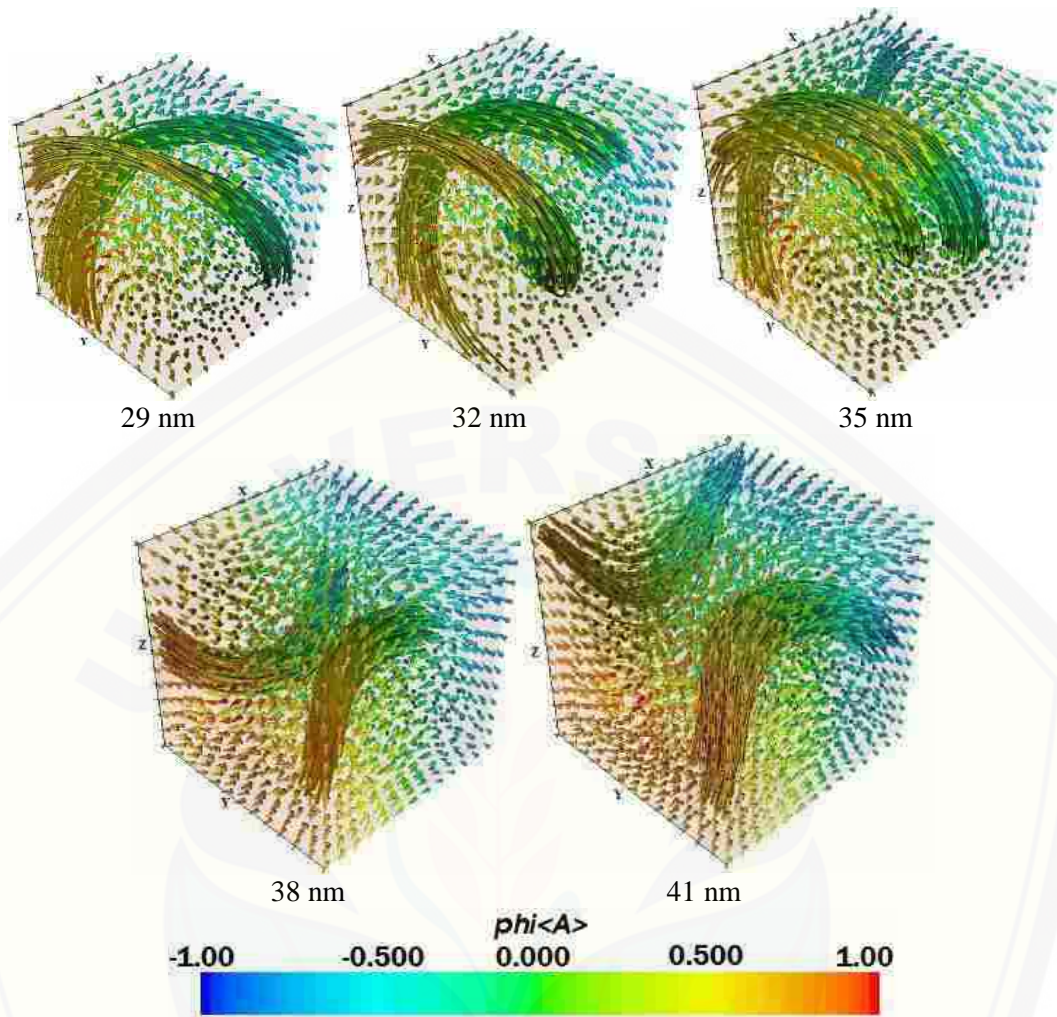
$$\begin{aligned} SC_r &= 25,2385 \sqrt[3]{0,167 \times 3,14} \\ &= 25,2385 \sqrt[3]{0,167 \times 3,14} \\ &= 25,2385 \sqrt[3]{0,524} \\ &= 25,2385 \times 0,806 \\ &= 20,34 \end{aligned}$$



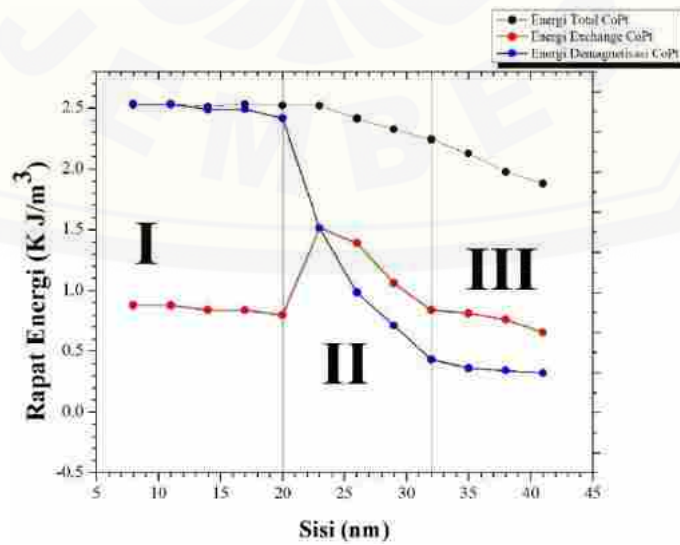
Lampiran 4.2 Grafik Hubungan Rapat Energi dengan Sisi Kubus

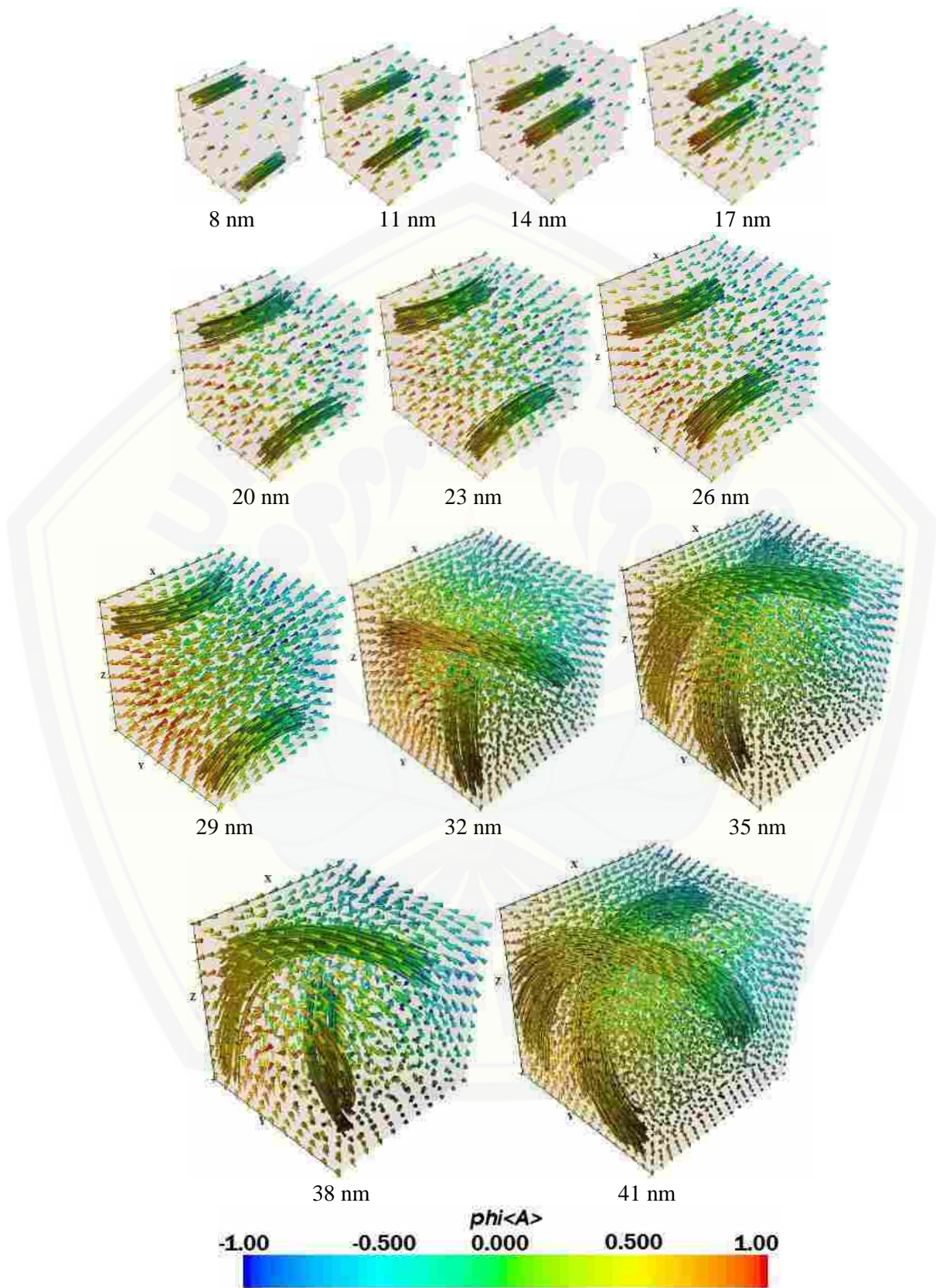
- Grafik Hubungan Rapat Energi (KJ/m^3) dengan Sisi (nm) untuk $M_s = 804 \times 10^3$ A/m





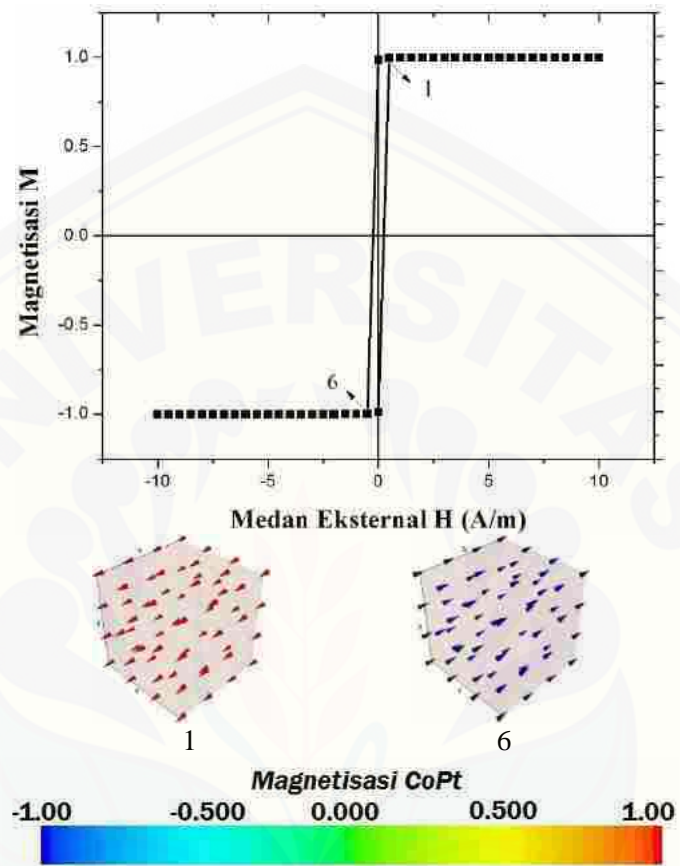
2. Grafik Hubungan Rapat Energi (KJ/m^3) dengan Sisi (nm) untuk $M_s = 810 \times 10^3$ A/m



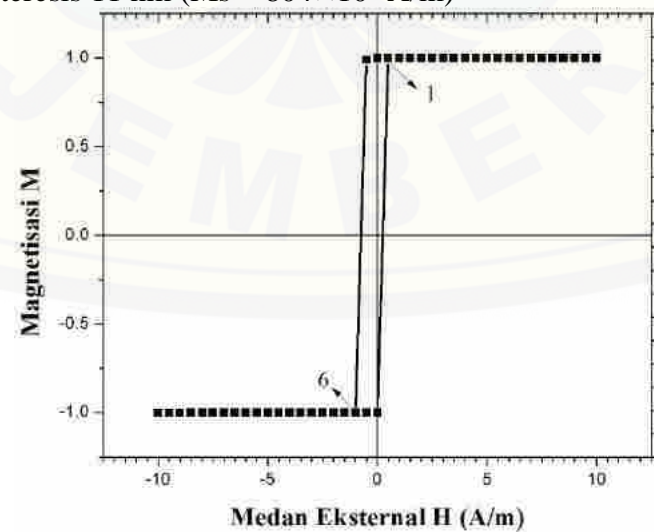


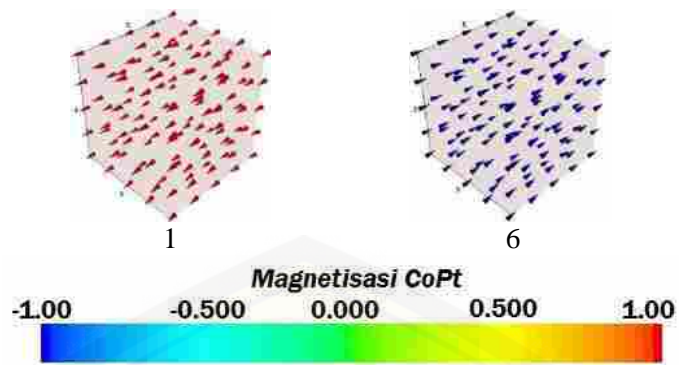
Lampiran 4.3 Kurva Histeresis Bahan $\text{Co}_{0.8}\text{Pt}_{0.2}$ terhadap variasi ukuran Sisi Kubus

1. Kurva Histeresis 8 nm ($M_s = 804 \times 10^3 \text{ A/m}$)

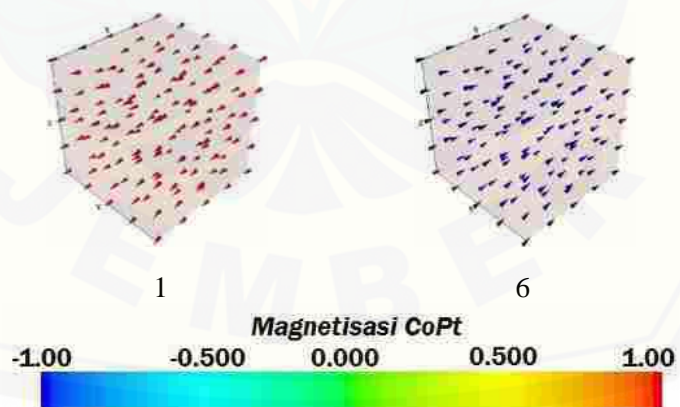
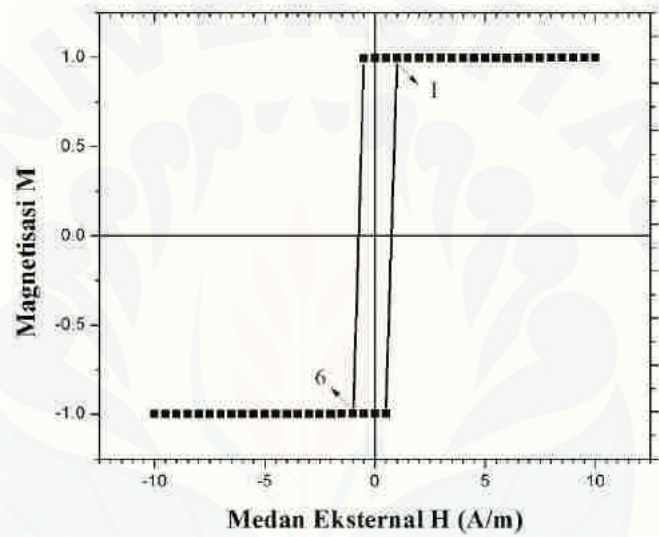


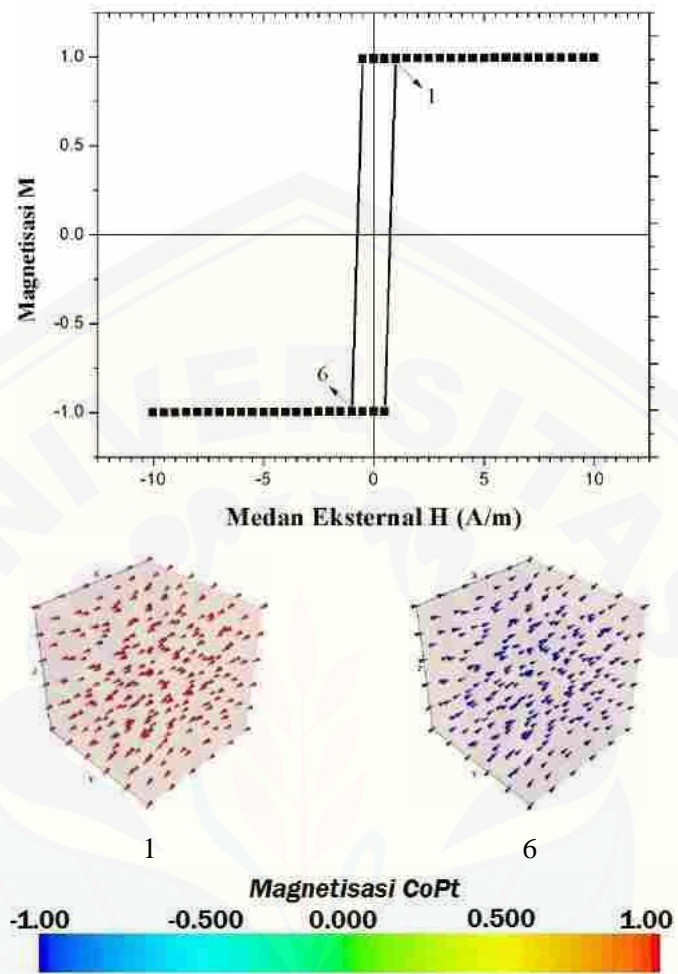
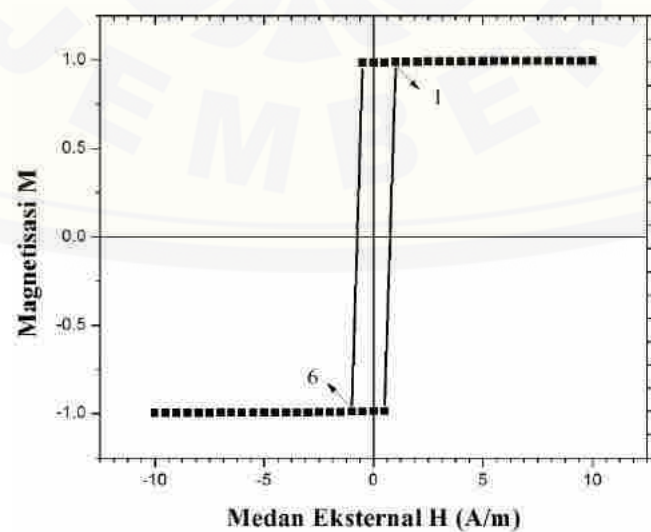
2. Kurva Histeresis 11 nm ($M_s = 804 \times 10^3 \text{ A/m}$)

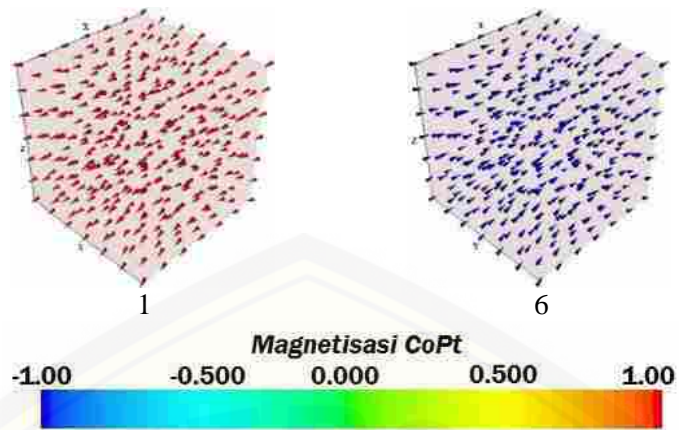




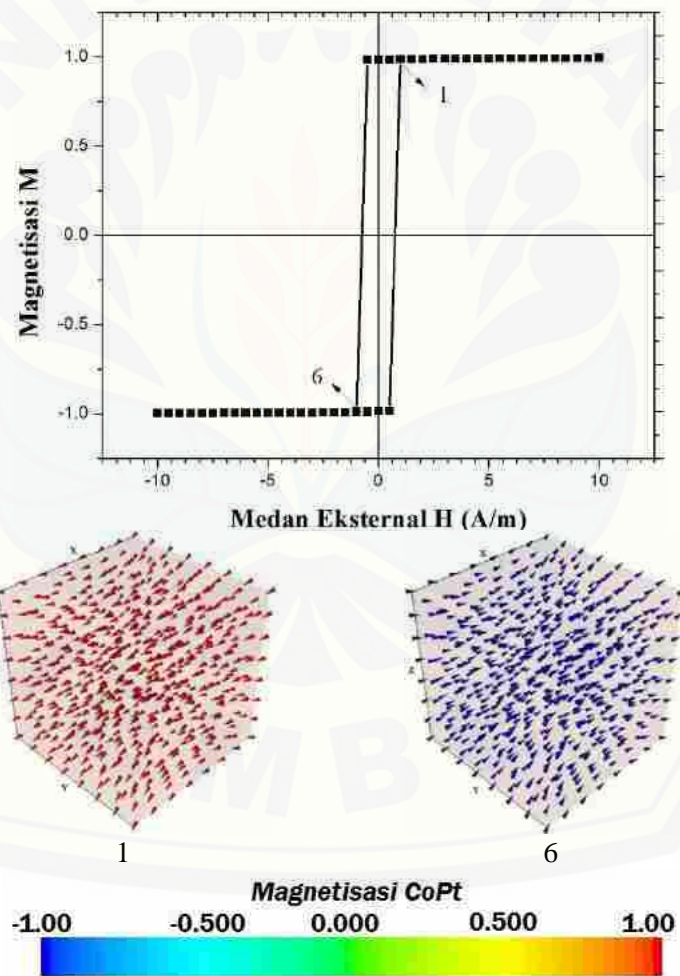
3. Kurva Histeresis 14 nm ($M_s = 804 \times 10^3$ A/m)

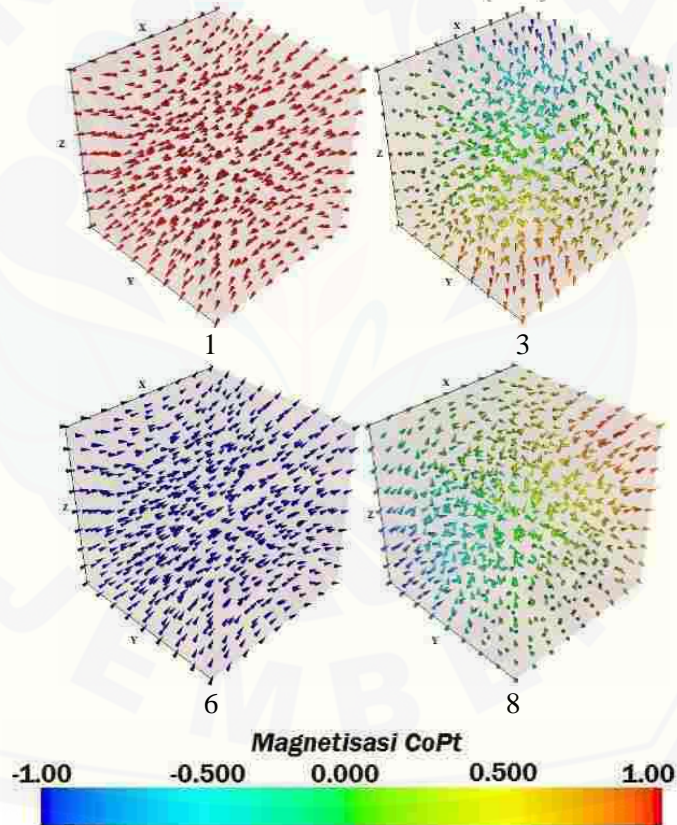
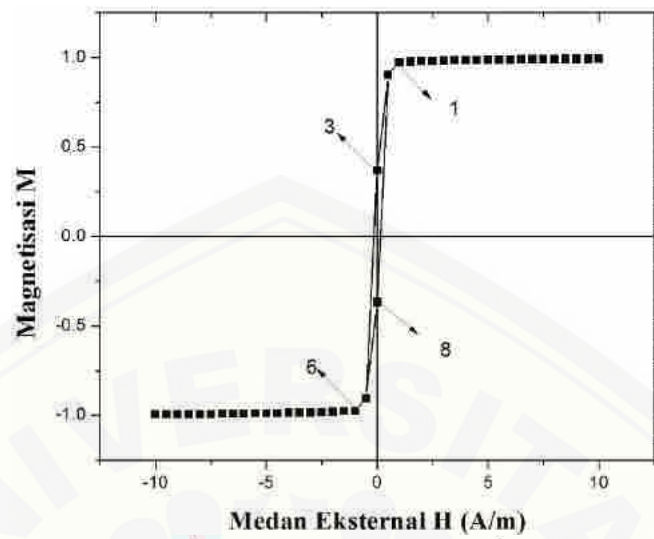


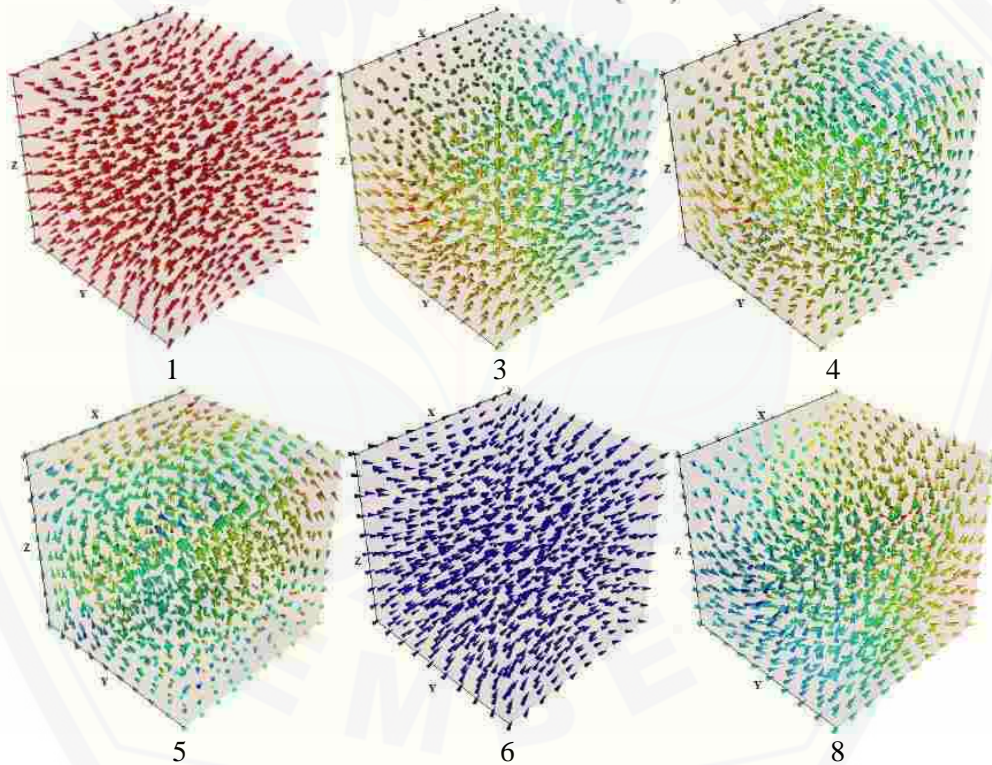
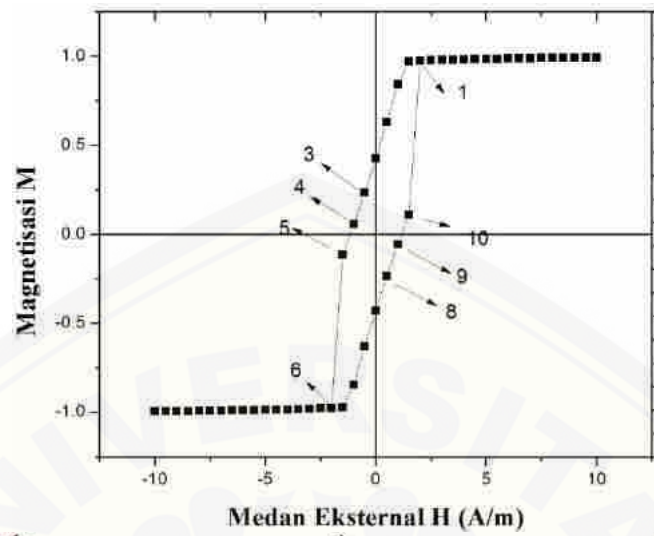
4. Kurva Histeresis 17 nm ($M_s = 804 \times 10^3$ A/m)5. Kurva Histeresis 20 nm ($M_s = 804 \times 10^3$ A/m)

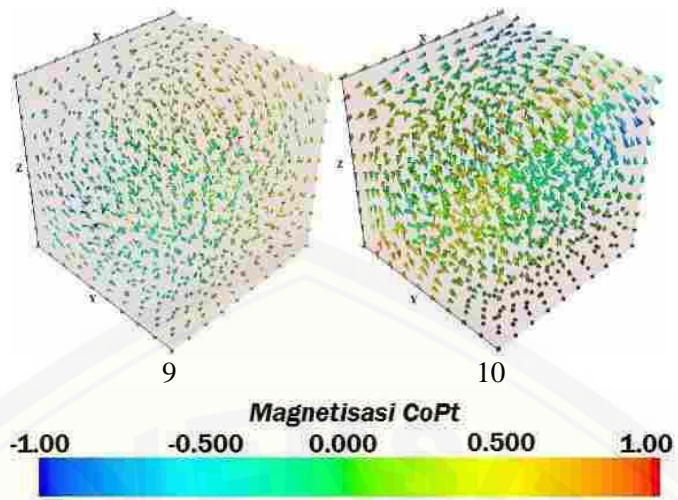


6. Kurva Histeresis 23 nm ($M_s = 804 \times 10^3$ A/m)

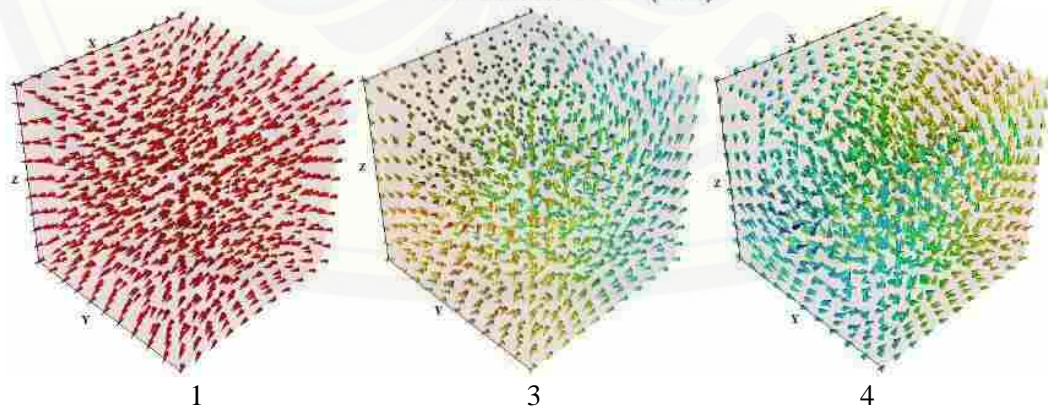
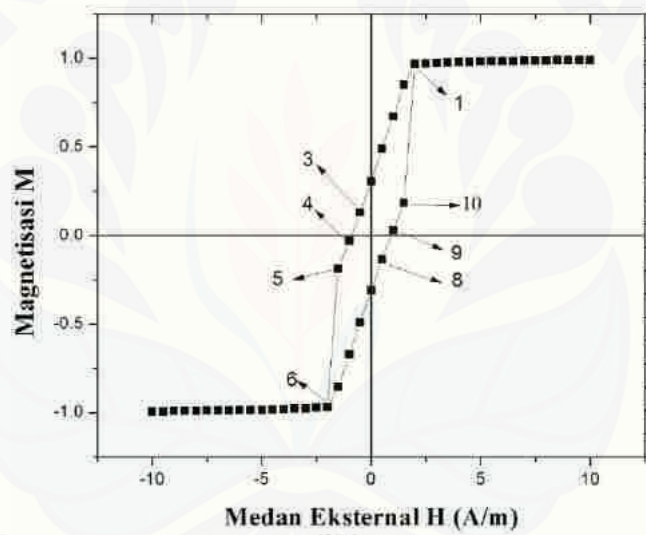


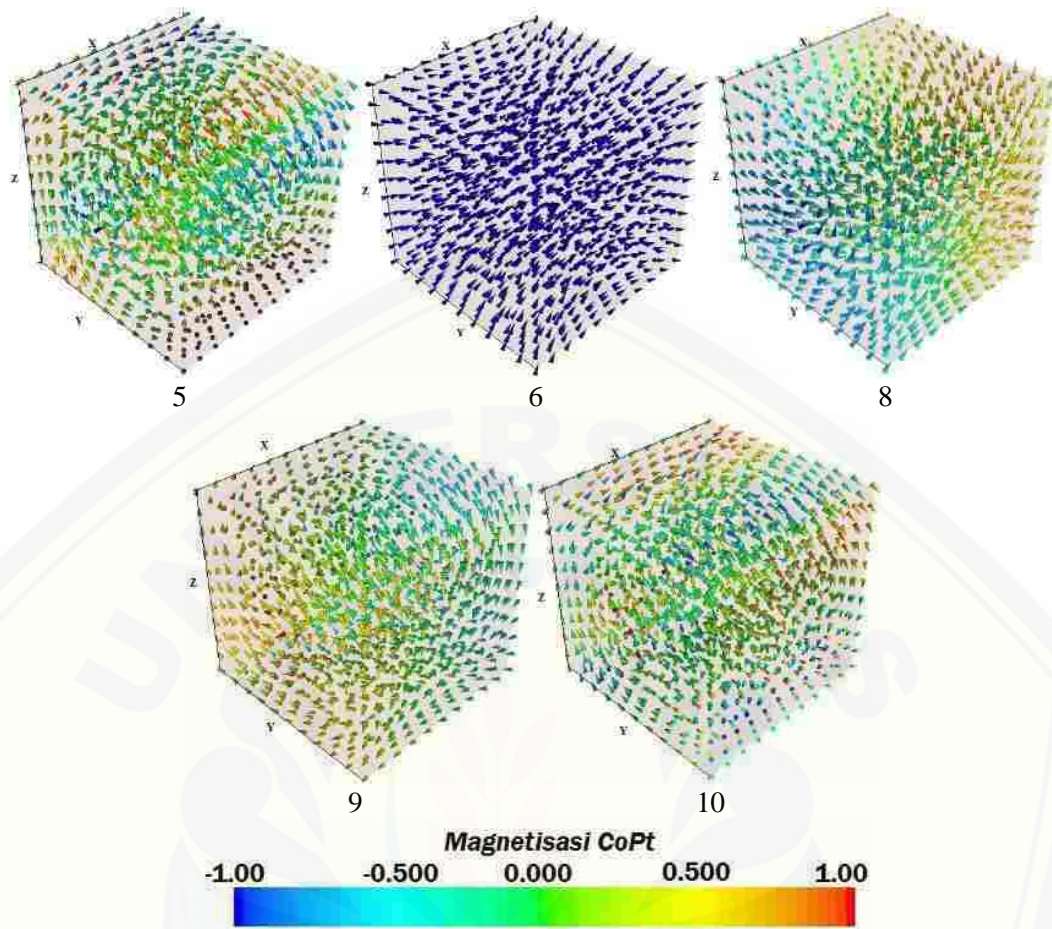
7. Kurva Histeresis 26 nm ($M_s = 804 \times 10^3$ A/m)

8. Kurva Histeresis 29 nm ($M_s = 804 \times 10^3$ A/m)

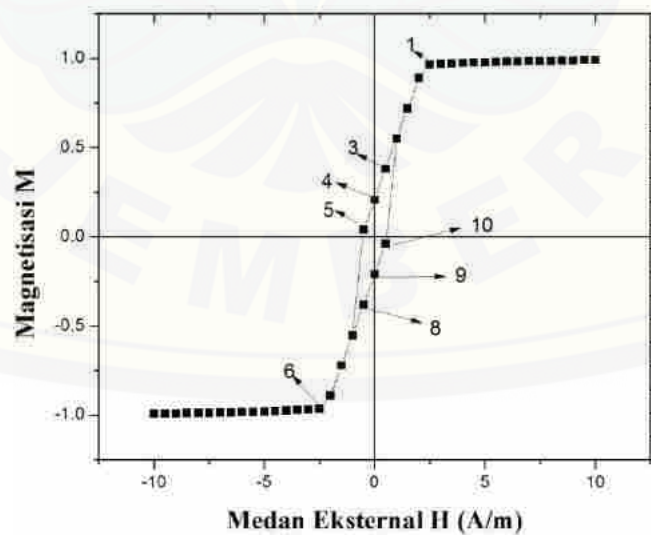


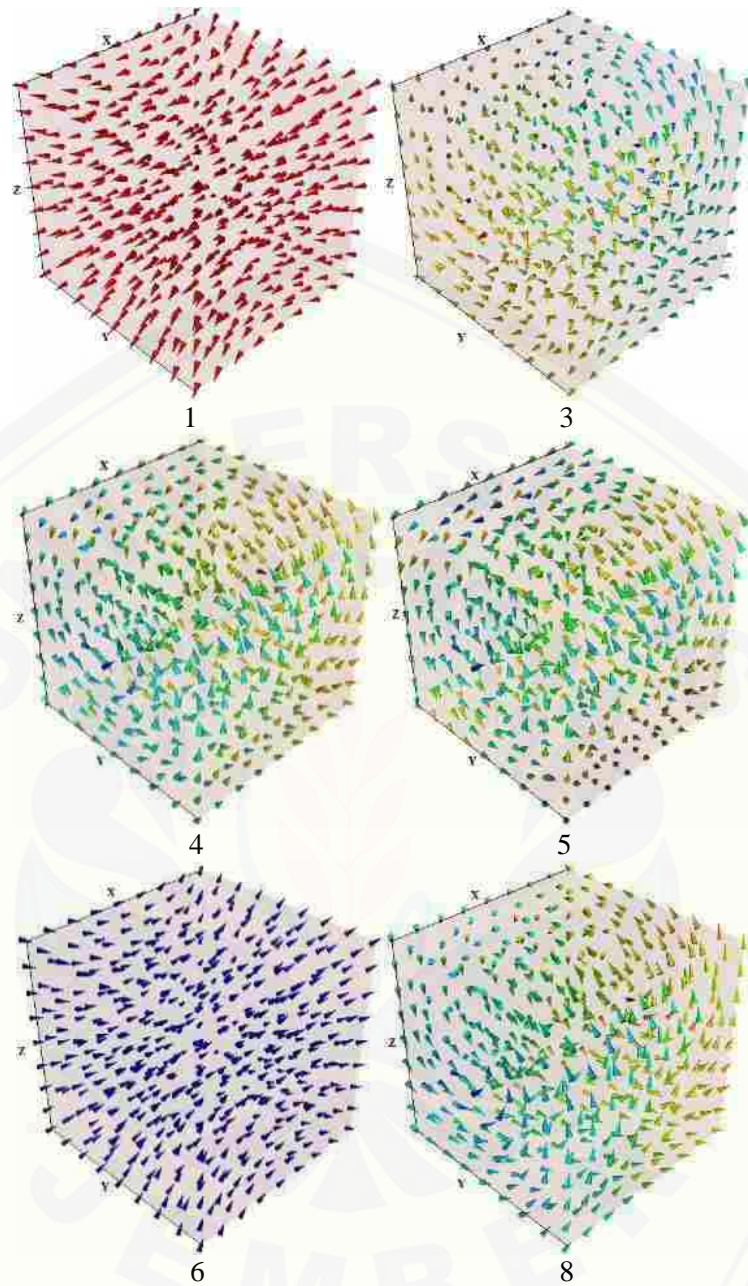
9. Kurva Histeresis 32 nm ($M_s = 804 \times 10^3$ A/m)

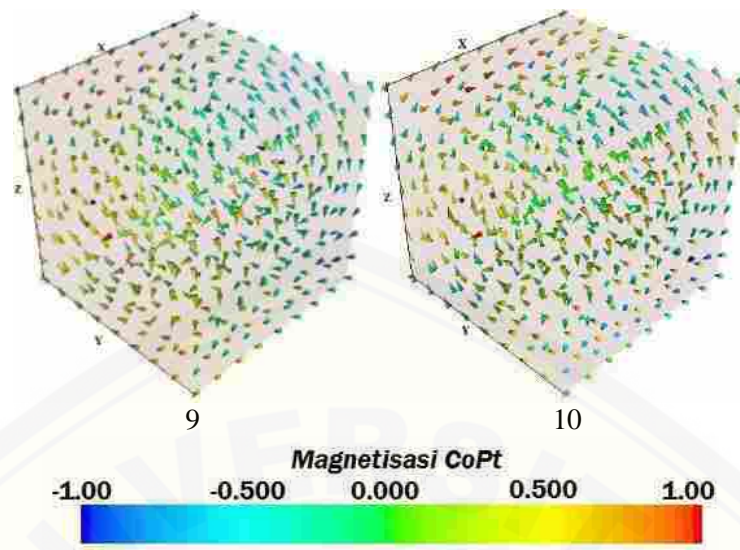




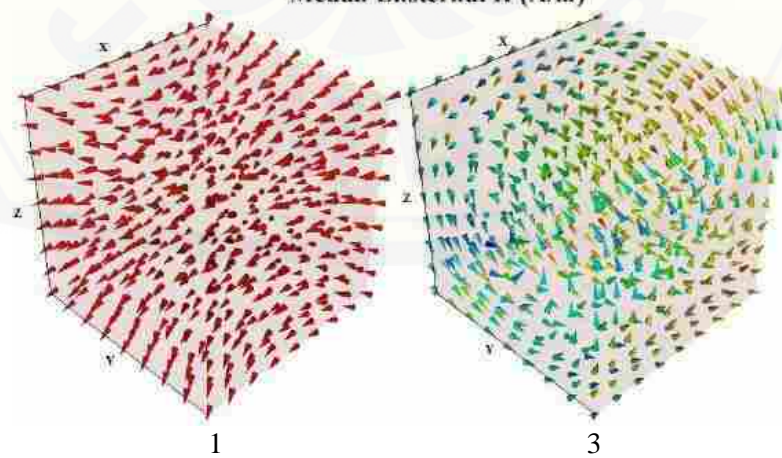
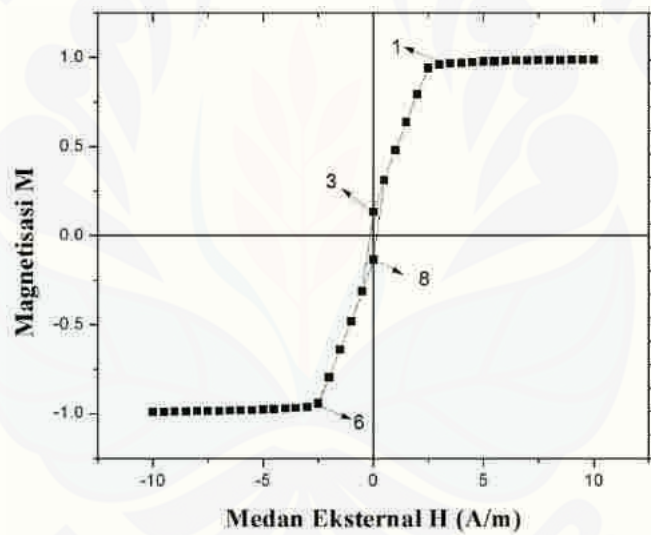
10. Kurva Histeresis 35 nm ($M_s = 804 \times 10^3$ A/m)

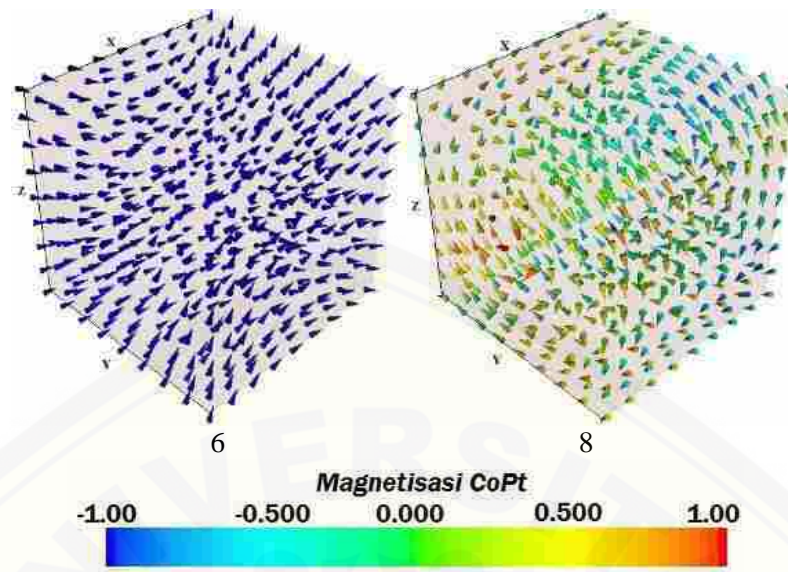




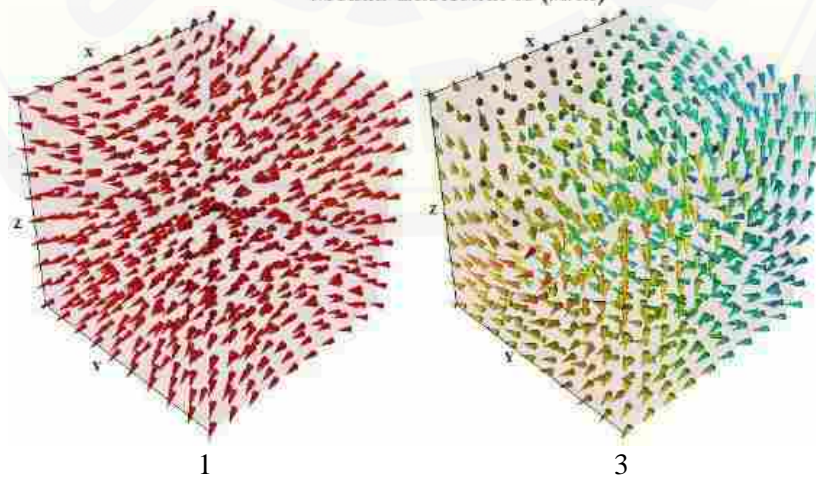
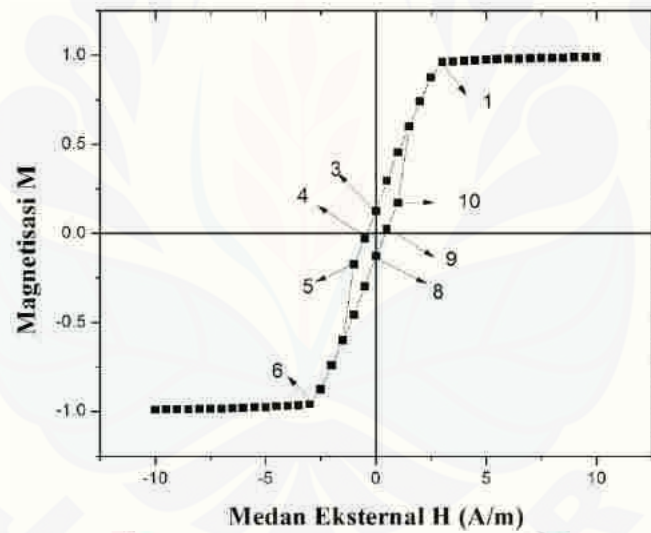


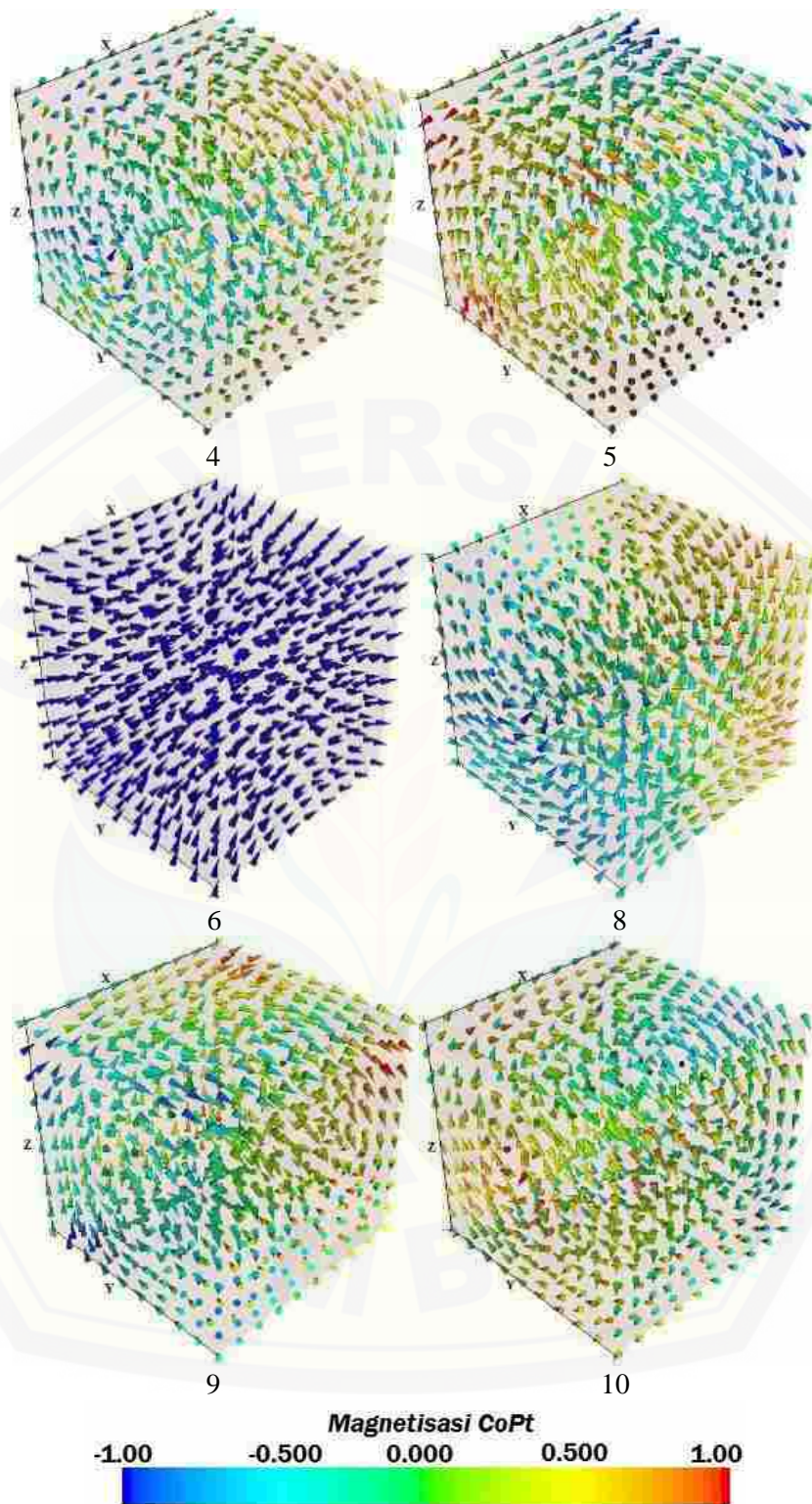
11. Kurva Histeresis 38 nm ($M_s = 804 \times 10^3$ A/m)

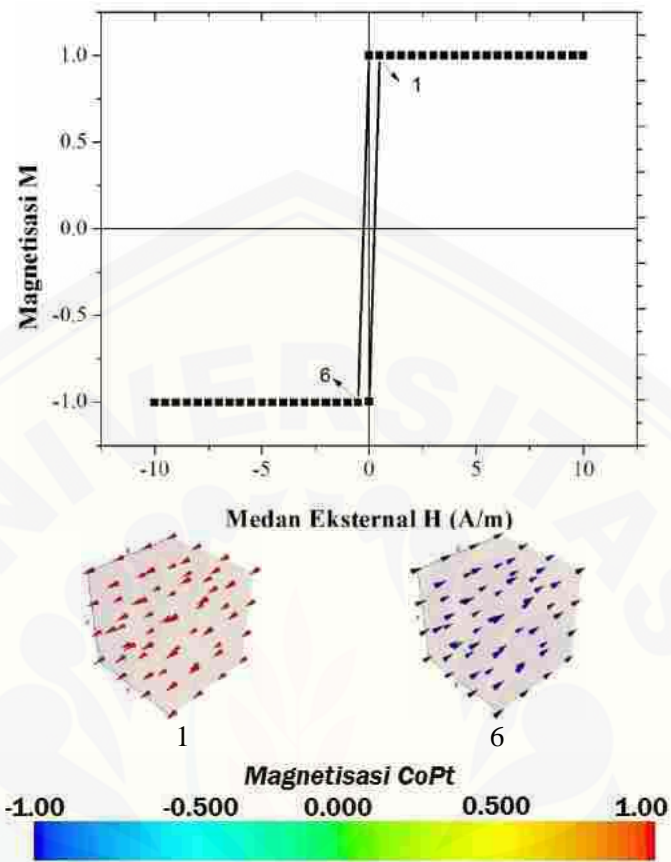
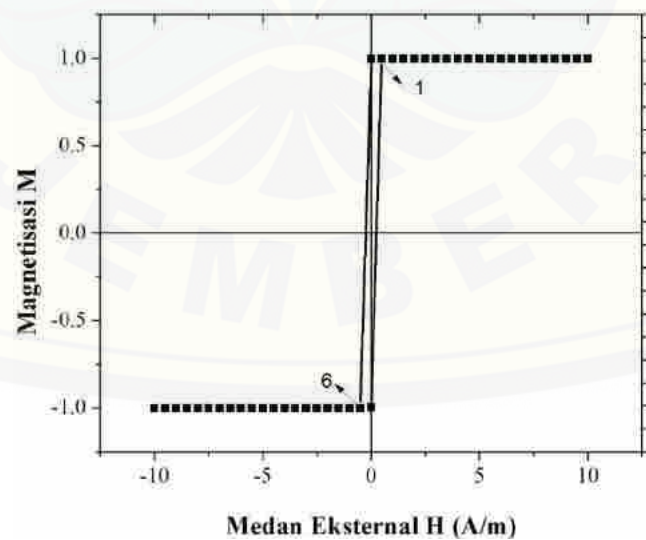


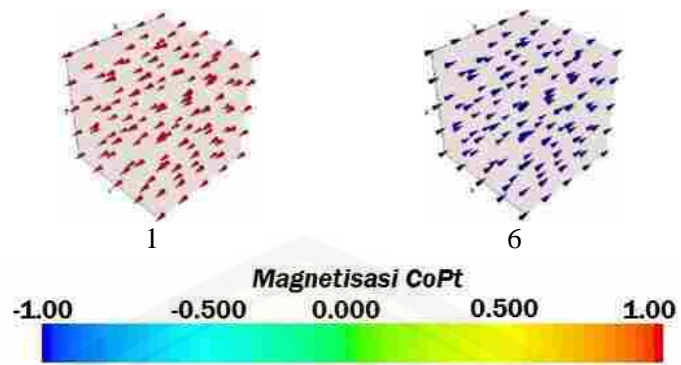
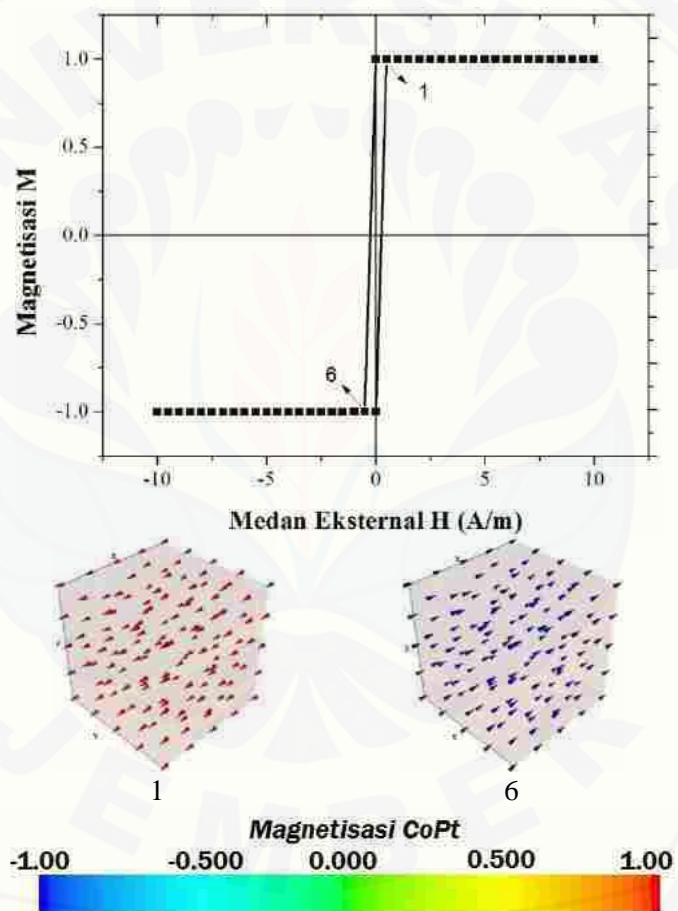


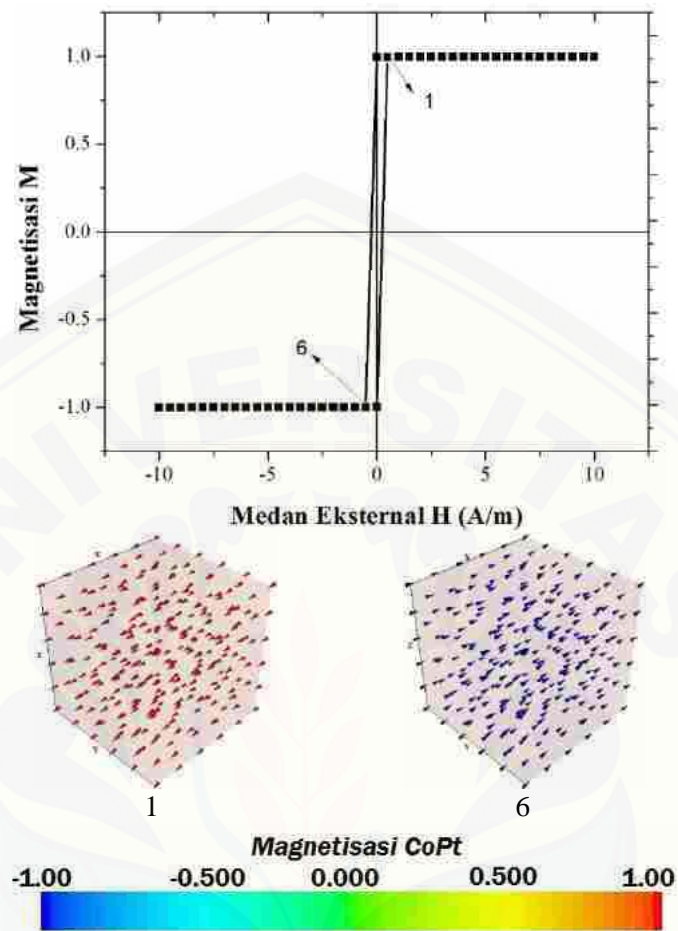
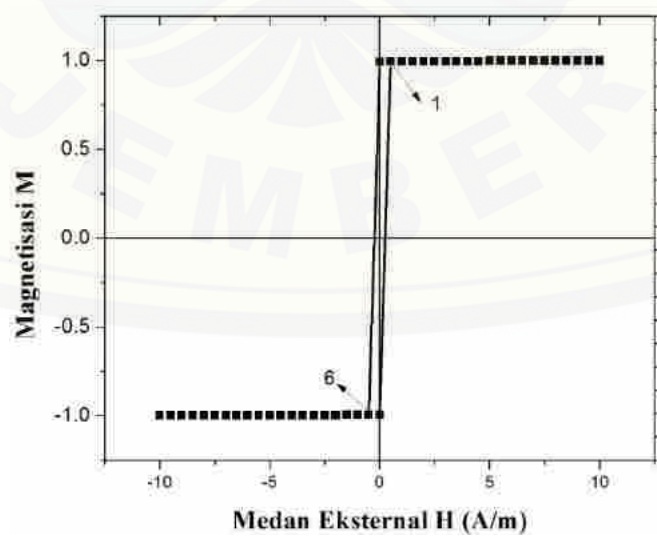
12. Kurva Histeresis 41 nm ($M_s = 804 \times 10^3$ A/m)

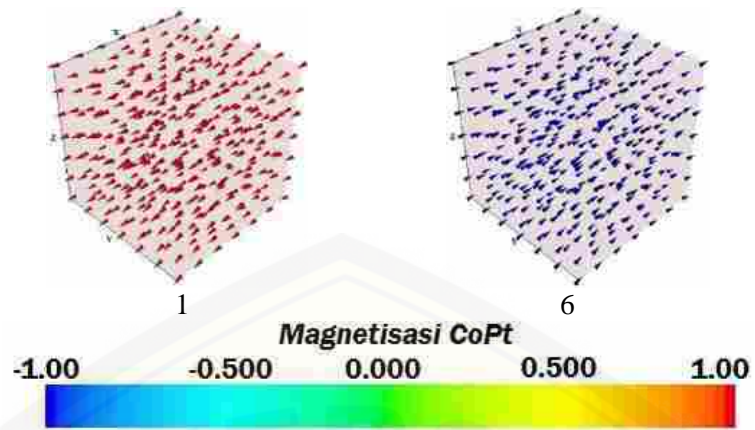




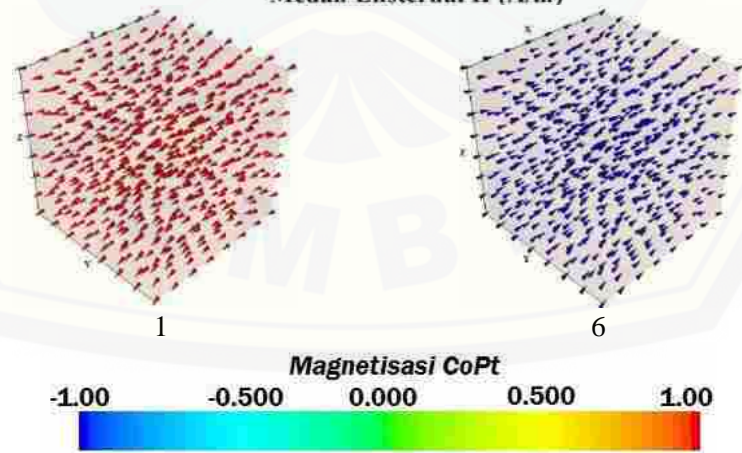
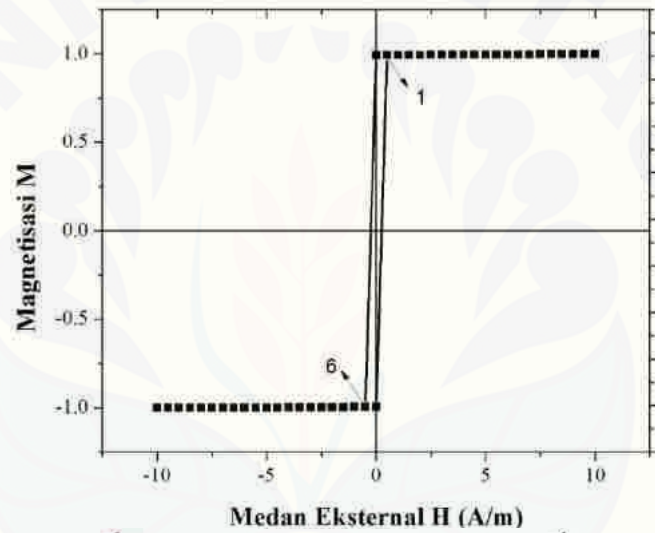
13. Kurva Histeresis 8 nm ($M_s = 810 \times 10^3$ A/m)14. Kurva Histeresis 11 nm ($M_s = 810 \times 10^3$ A/m)

15. Kurva Histeresis 14 nm ($M_s = 810 \times 10^3$ A/m)

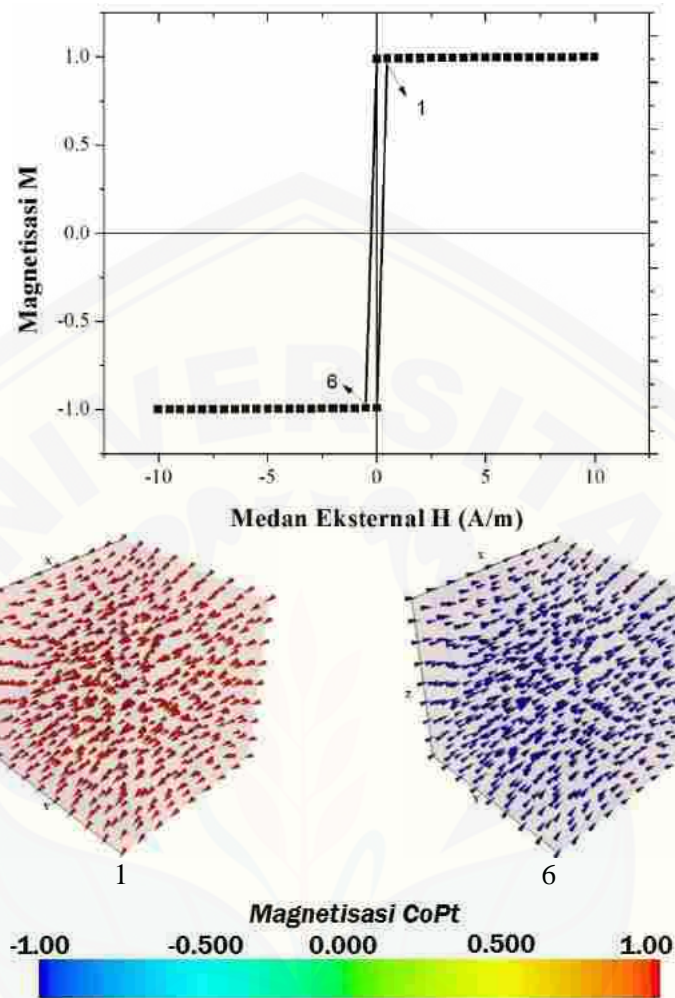
16. Kurva Histeresis 17 nm ($M_s = 810 \times 10^3$ A/m)17. Kurva Histeresis 20 nm ($M_s = 810 \times 10^3$ A/m)



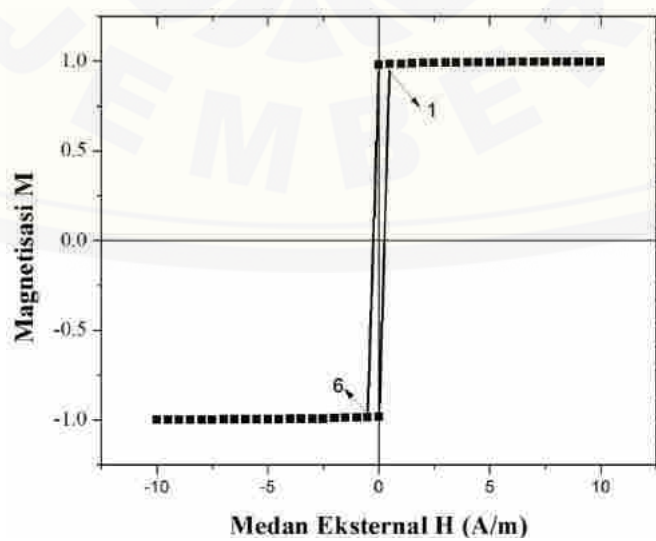
18. Kurva Histeresis 23 nm ($M_s = 810 \times 10^3$ A/m)

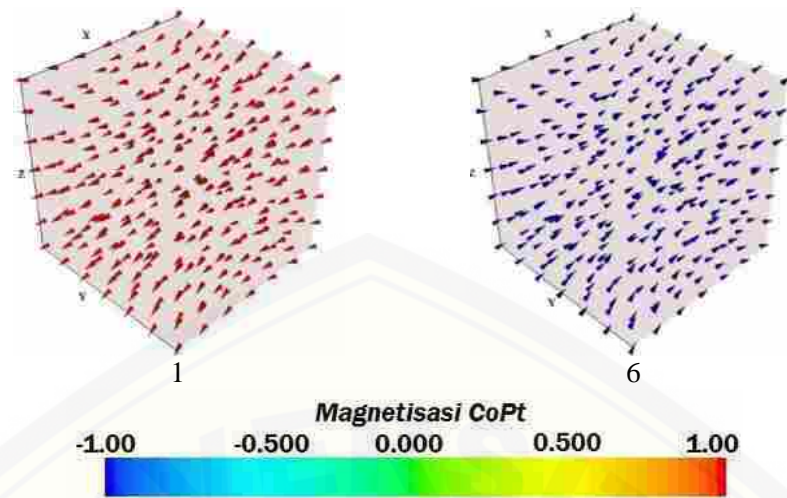


19. Kurva Histeresis 26 nm ($M_s = 810 \times 10^3$ A/m)

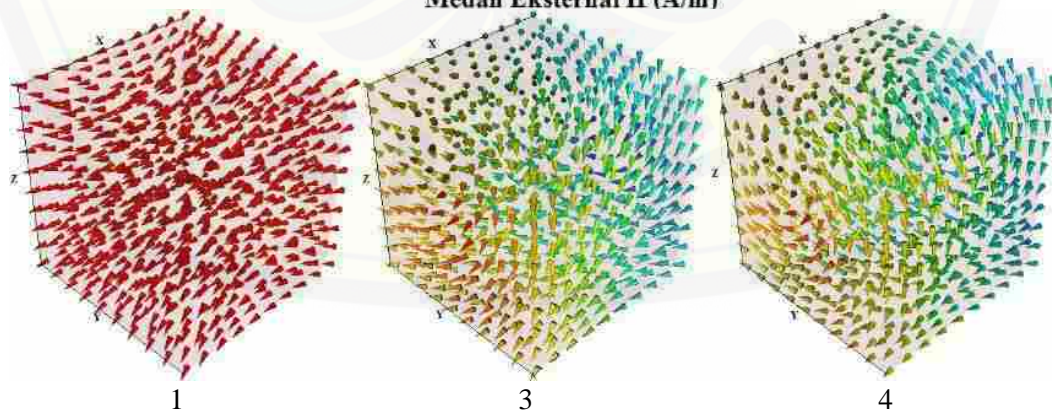
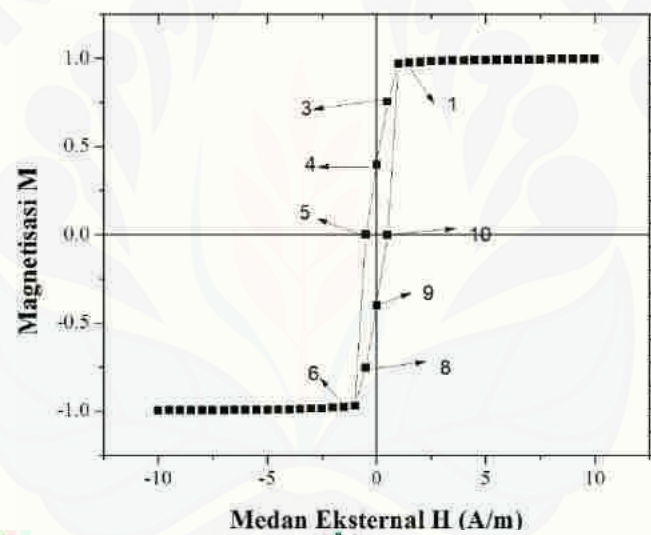


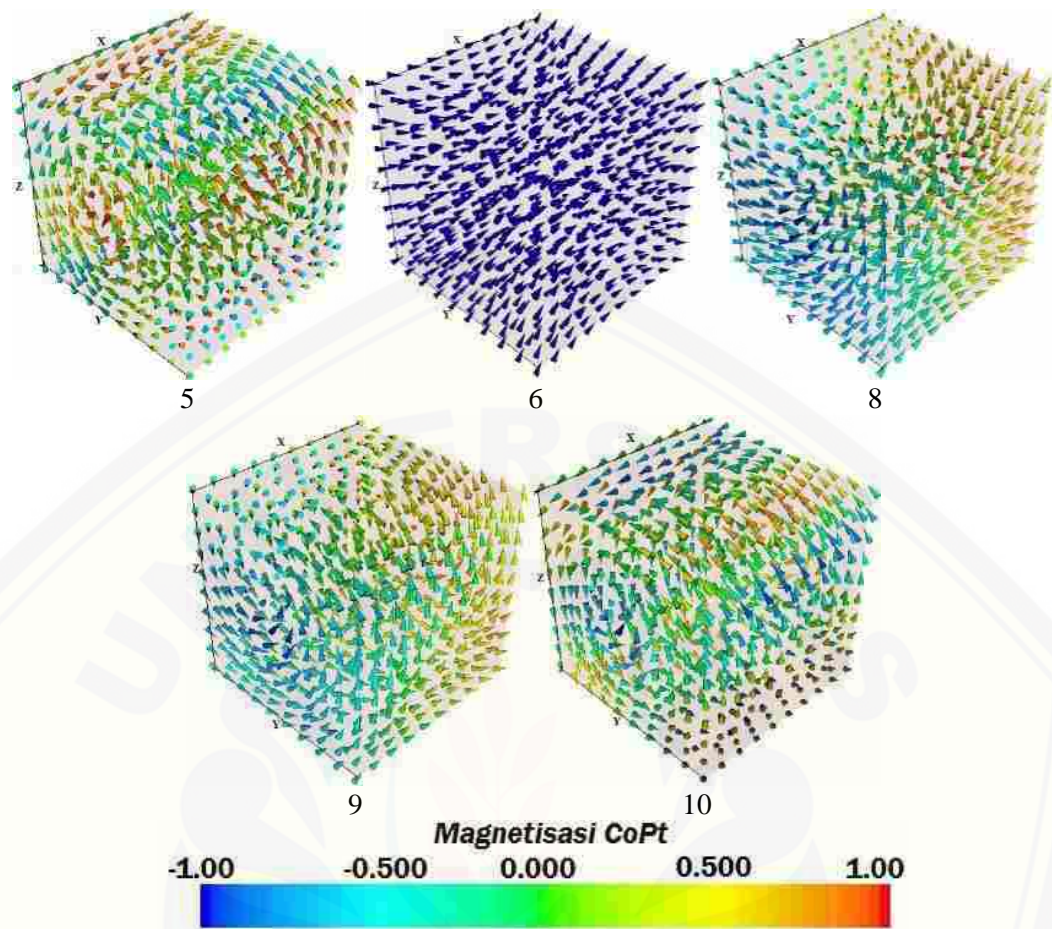
20. Kurva Histeresis 29 nm ($M_s = 810 \times 10^3$ A/m)



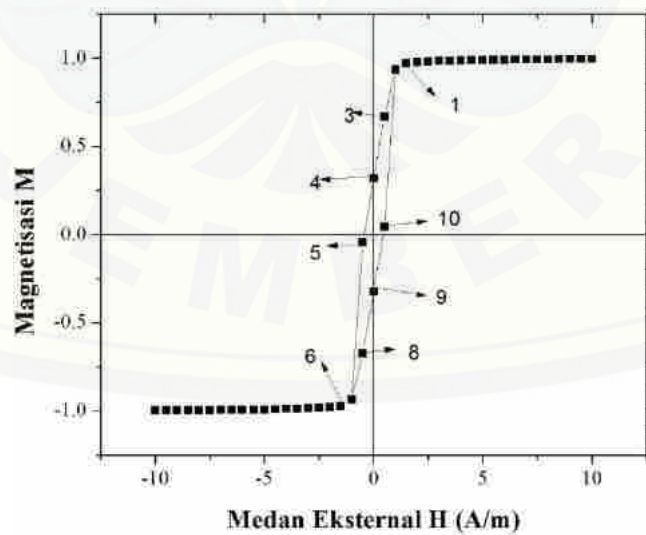


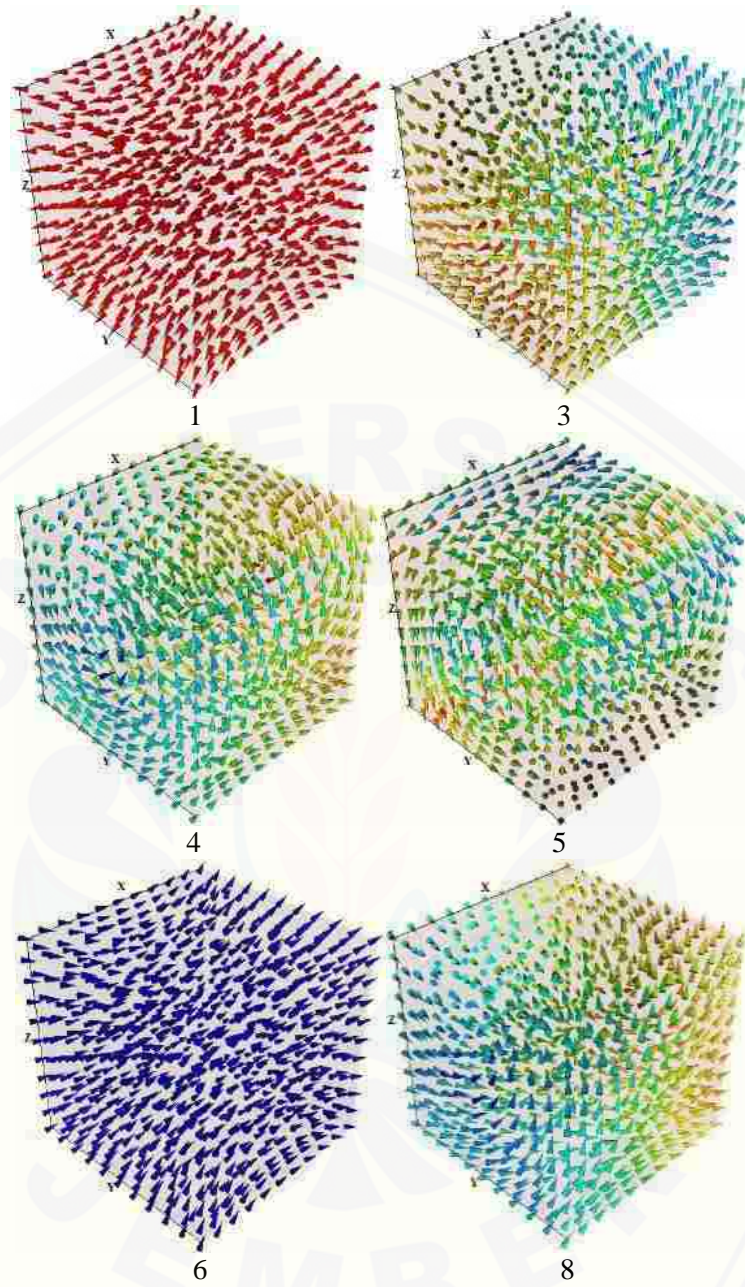
21. Kurva Histeresis 32 nm ($M_s = 810 \times 10^3$ A/m)

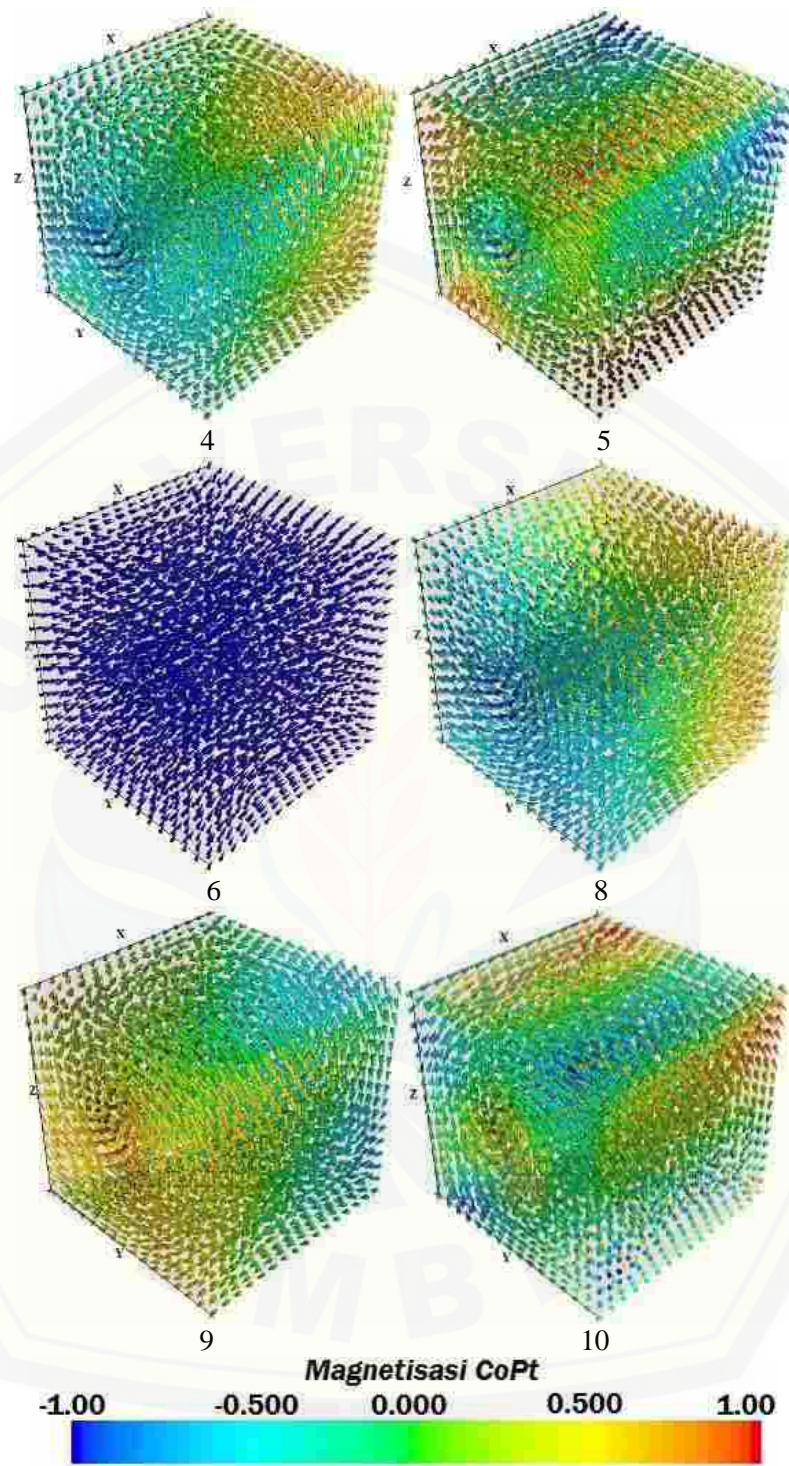




22. Kurva Histeresis 35 nm ($M_s = 810 \times 10^3$ A/m)







24. Kurva Histeresis 41 nm ($M_s = 810 \times 10^3 \text{ A/m}$)

