



**KAJIAN SIFAT-SIFAT MAGNETIK MATERIAL $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$
DOUBLE LAYERS MODEL *NANOCUBE* MENGGUNAKAN
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

SKRIPSI

Oleh

**Feri Yunika Sari
NIM 161810201030**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2020**



**KAJIAN SIFAT-SIFAT MAGNETIK MATERIAL $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$
DOUBLE LAYERS MODEL *NANOCUBE* MENGGUNAKAN
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Fisika (S-1) dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh

Feri Yunika Sari
NIM 161810201030

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2020**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan dengan penuh rasa sayang dan rasa syukur untuk:

1. Kedua orang tua saya yang selalu memberikan doa, dukungan, kepercayaan, dan pengorbanan tiada tara yang membuat hati merasakan kedamaian yang dipenuhi cinta kasih;
2. Seluruh dosen dan guru yang telah membagi ilmu dan pengalaman berharga dengan penuh rasa sayang dan tanggung jawab;
3. Seluruh sahabat saya yang telah dari kecil hingga saat ini;
4. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember;

MOTTO

“If you don’t go after what you want, you’ll never have it. And if you don’t ask, the answer is always no. also if you don’t step forward, you’re always in the same place” –Nora Roberts



PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Feri Yunika Sari

NIM : 161810201030

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Kajian Sifat-Sifat Magnetik Material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *Double Layers* Model *Nanocube* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada instansi 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 mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 10 September 2020

Yang menyatakan,

Feri Yunika Sari

NIM 161810201030

SKRIPSI

**KAJIAN SIFAT-SIFAT MAGNETIK MATERIAL $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$
DOUBLE LAYERS MODEL *NANOCUBE* MENGGUNAKAN
SIMULASI MIKROMAGNETIK**

Oleh:

Feri Yunika Sari
NIM 161810201030

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama
Dosen Pembimbing Anggota

: Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si
: Dr. Ratna Dewi Syarifah, S.Pd., M.Si

PENGESAHAN

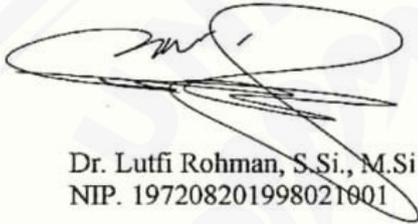
Skripsi berjudul “Kajian Sifat-Sifat Magnetik Material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ Double Layers Model Nanocube Menggunakan Simulasi Mikromagnetik” karya Feri Yunika Sari telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal : SELASA 03 NOV 2020

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

Tim Penguji:

Ketua,



Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si
NIP. 197208201998021001

Anggota I,



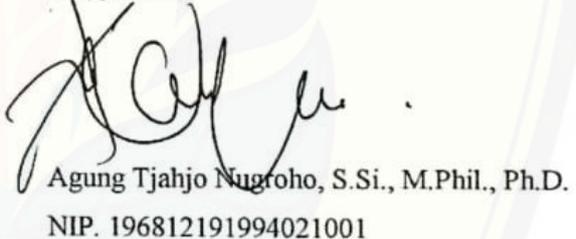
Dr. Ratna Dewi Syarifah, S.Pd., M.Si
NIP. 198803202019032011

Anggota II,



Dr. Anoto Arkundato, S.Si., M.Si
NIP. 196912251999031001

Anggota III,



Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D.
NIP. 196812191994021001

Mengesahkan

Dekan,



Drs. Achmad Saifullah, M.Sc., Ph.D.
NIP 19500091986021001

RINGKASAN

Kajian Sifat-Sifat Magnetik Material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ Double Layers Model Nanocube Menggunakan Simulasi Mikromagnetik; Feri Yunika Sari, 161810201030; 2020: 91 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Hard Disk Drive (HDD) merupakan salah satu perangkat untuk menyimpan data yang menggunakan *disk* (piringan) berlapis bahan magnetik. Kebutuhan HDD dengan kapasitas besar dapat diatasi dengan cara meningkatkan kerapatan *bit*, dimana dengan bertambahnya kerapatan *bit* maka sama halnya dengan meningkatkan kapasitas dari media penyimpanan data tersebut. Salah satu bahan magnetik yang memiliki potensi besar sebagai dasar pembuatan HDD adalah bahan feromagnetik. Bahan feromagnetik memiliki sifat kemagnetan yang kuat, memiliki temperatur Curie yang tinggi serta memiliki momen magnet yang cenderung searah meskipun tanpa medan luar. Beberapa contoh bahan feromagnetik yaitu besi (Fe), Nikel (Ni), Cobalt (Co) dan paduannya. Salah satu material magnetik yang dapat dijadikan sebagai pembuatan HDD adalah material CoFe. *Alloy* CoFe merupakan salah satu bahan magnetik terbaik, dikarenakan memiliki saturasi magnetisasi dan permeabilitas yang tinggi, koersivitas yang rendah, serta temperatur Curie yang tinggi. Oleh karena itu, bahan CoFe dengan komposisi $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* dipilih untuk dianalisis sifat kemagnetannya.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis nilai temperatur Curie dan kurva histerisis material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* dengan variasi ukuran sisi kubus 5 nm, 8 nm, 10 nm, 12 nm, dan 15 nm. Nilai temperatur Curie didapatkan dari hubungan magnetisasi dan suseptibilitas terhadap temperatur. Kurva histerisis didapatkan dari hubungan antara magnetisasi terhadap medan eksternal. Dalam penentuan nilai medan koersivitas dan medan saturasi pada kurva histerisis, digunakan variasi temperatur ketika bahan feromagnetik diaplikasikan pada HDD dengan keadaan sebelum bekerja, setelah bekerja, dan suhu diatas nilai temperatur Curie dari

material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$, pada setiap ukuran bahan yang diberikan yaitu 0 K, 328 K, dan 1600 K.

Pada penelitian ini menggunakan metode simulasi mikromagnetik berbasis *atomistic model* dengan program *Vampire*. Simulasi dilakukan dengan membuat file input dan file bahan. Pada file input berisi tentang struktur material, unit sel, ukuran material, temperatur minimum dan temperatur maksimum serta data output. File bahan berisi konstanta *exchange*, konstanta anisotropi, dan momen spin atom. File input dan file bahan diletakkan dalam satu folder, kemudian simulasi dijalankan dengan program *Vampire* untuk memperoleh data *output*. Data *output* digunakan untuk menganalisis nilai temperatur Curie yaitu dengan menggabungkan grafik magnetisasi dan suseptibilitas terhadap temperatur. Kemudian untuk menganalisis kurva histerisis yaitu dengan menggunakan data *output* magnetisasi terhadap medan eksternal.

Hasil penelitian menunjukkan nilai temperatur Curie pada material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* diperoleh variasi ukuran sisi kubus mempengaruhi nilai temperatur Curie. Nilai temperatur Curie saat ukuran sisi kubus 5 nm dan 8 nm yaitu 1350 K. Pada variasi ukuran sisi kubus 10 nm, 12 nm, dan 15 nm diperoleh nilai temperatur Curie yang konstan yaitu 1400 K. Berdasarkan hasil dari penentuan nilai temperatur Curie maka ukuran terbaik yaitu pada material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* dengan ukuran 10 nm yang mendukung untuk penyimpanan data dengan kapasitas besar.

Karakteristik kurva histerisis pada material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* berdasarkan simulasi menunjukkan bahwa terdapat perubahan nilai medan koersivitas dan medan saturasi terhadap variasi ukuran sisi kubus yang diberikan. Pada material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ nilai medan koersivitas dan medan saturasi tertinggi terletak pada ukuran 12 nm, hal ini menandakan bahwa ketika ukuran 12 nm pada material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* masih memiliki sifat kemagnetan yang kuat.

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Kajian Sifat-Sifat Magnetik Material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *Double Layers* Model *Nanocube* Menggunakan Simulasi Mikromagnetik”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, pengetahuan dan bimbingan berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Dr. Lutfi Rohman, S.Si. M.Si. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Dr. Ratna Dewi Syarifah S.Pd., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah memberikan ilmu, arahan, dan segala hal yang mendukung saya menyelesaikan skripsi ini;
2. Dr. Artoto Arkundato, S.Si. M.Si. selaku Dosen Penguji I dan Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D. selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan tambahan, kritik, dan saran membangun demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Ir. Misto, M.Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing dan memotivasi saya;
4. Segenap dosen dan karyawan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember yang telah membantu, mendukung, dan memotivasi penulis;
5. Teman-teman seperjuangan angkatan 2016 Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember yang telah memberikan semangat, do'a, dorongan, dan kasih sayang;
6. Tim komputasi, M. Rony Febiantoro, Monica Afcarina, Syefira Salsabila dan Violita Riyanda Safitri yang telah memberikan bantuan dan semangat;

7. Sahabat-sahabat saya Octavia Rosalina Trisna Dewi, Kurnia Oktavia, Nisa'ur Rizqi, dan Nur Wachid yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama perjalanan studi hingga penulis menyelesaikan jenjang studi ini;
8. Semua pihak yang berjasa dan tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh sebab itu, segala kritik dan saran yang membangun dari pembaca sangat diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta perkembangan ilmu pengetahuan alam dan teknologi di bidang fisika.

Jember, 10 September 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iv
HALAMAN PENGESAHAN.....	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Material Ferromagnetik	6
2.2 Struktur Kristal	8
2.2.1 <i>Body Centered Cubic</i> (BCC)	8
2.2.2 <i>Face Centered Cubic</i> (FCC).....	8
2.2.3 <i>Hexagonal Closed Packed</i> (HCP)	9
2.3 Parameter Atomistik	9
2.3.1 Atomik Spin Momen	10
2.3.2 Energi <i>Exchange</i>	10
2.3.3 Energi Anisotropi.....	11
2.4 Bahan Alloy CoFe.....	11
2.5 Temperatur Curie	12
2.6 Suseptibilitas Magnetik.....	13

2.7	Kurva Histerisis	15
2.8	Metode Heun	17
2.9	Simulasi Mikromagnetik.....	18
BAB 3.	METODE PENELITIAN.....	19
3.1	Rancangan Penelitian.....	19
3.2	Jenis dan Sumber Data	20
3.3	Definisi Operasional Variabel	22
3.3.1	Variabel Bebas.....	22
3.3.2	Variabel terikat	22
3.3.3	Variabel kontrol	23
3.4	Kerangka Pemecahan Masalah.....	24
3.4.1	Diagram Penelitian	24
3.4.2	Simulasi Mikromagnetik	24
3.5	Prosedur Penelitian	25
3.5.1	Pembuatan <i>Script</i> untuk Simulasi.....	25
3.5.2	Geometri dan Ukuran Material <i>Alloy Co₈₀Fe₂₀ Double Layers</i>	25
3.5.3	Analisis Data Temperatur Curie Material <i>Alloy Co₈₀Fe₂₀ Double Layers</i>	26
3.5.4	Analisis Grafik Hubungan Suseptibilitas dengan Temperatur.....	27
3.5.5	Analisis Kurva Histerisis	28
3.5.6	Analisis Hasil Visualisasi Struktur Domain Material <i>Alloy Co₈₀Fe₂₀ Double Layers</i>	29
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1	Penentuan Nilai Temperatur Curie pada Material <i>Co₈₀Fe₂₀ Double Layers</i>	30
4.2	Karakteristik Kurva Histerisis dari Material <i>Alloy Co₈₀Fe₂₀ Double Layers</i>	37
BAB 5.	PENUTUP.....	46
5.1	Kesimpulan	46

5.2	Saran.....	47
	DAFTAR PUSTAKA.....	48
	LAMPIRAN.....	53



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur Domain Material Feromagnetik.....	7
Gambar 2.2	Struktur kristal <i>Body Centered Cubic</i> (BCC)	8
Gambar 2.3	Struktur kristal <i>Face Centered Cubic</i> (FCC).....	9
Gambar 2.4	Struktur kristal <i>Hexagonal Closed Packed</i> (HCP)	9
Gambar 2.5	Grafik besar temperatur terhadap magnetisasi untuk menentukan temperatur Curie pada bahan kobalt nanopartikel oktahedral dengan ukuran yang berbeda	13
Gambar 2.6	Grafik hubungan antara suseptibilitas magnetik dan temperatur pada bahan paramagnetik dan ferromagnetik	14
Gambar 2.7	Grafik suseptibilitas magnetik terhadap temperatur	15
Gambar 2.8	Kurva histerisis untuk material feromagnetik.....	16
Gambar 3.1	Diagram alir rancangan penelitian.....	20
Gambar 3.2	Diagram <i>fishbone</i> penelitian	24
Gambar 3.3	Struktur material bentuk <i>double layers</i>	26
Gambar 3.4	Grafik hubungan antara magnetisasi dan temperatur material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$	27
Gambar 3.5	Grafik hubungan magnetisasi dan suseptibilitas terhadap temperatur material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$	28
Gambar 3.6	Grafik kurva histerisis material <i>alloy</i> $\text{Fe}_{85}\text{Pt}_{15}$ dengan variasi temperatur	29
Gambar 4.1	Grafik hubungan antara magnetisasi dengan temperatur dari material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ <i>double layers</i> dalam variasi ukuran sisi kubus model <i>nanocube</i>	31
Gambar 4.2	Grafik magnetisasi dan suseptibilitas terhadap temperatur pada material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ <i>double layers</i> ukuran sisi kubus 5 nm	32
Gambar 4.3	Grafik perubahan magnetisasi dan suseptibilitas terhadap temperatur pada material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ pada ukuran 10 nm	35
Gambar 4.4	Kurva histerisis dari material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ dengan variasi ukuran saat temperatur 328 K.....	37

Gambar 4.5 Kurva Histerisis material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ukuran 5 nm dengan variasi temperatur	38
Gambar 4.6 Kurva Histerisis material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ukuran 8 nm dengan variasi temperatur	38
Gambar 4.7 Kurva Histerisis material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ukuran 10 nm dengan variasi temperatur	39
Gambar 4.8 Kurva Histerisis material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ukuran 12 nm dengan variasi temperatur	39
Gambar 4.9 Kurva Histerisis material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ukuran 15 nm dengan variasi temperatur	40
Gambar 4.10 Proses perubahan magnetisasi material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ukuran 5 nm pada temperatur 0 K.....	43
Gambar 4.11 Proses perubahan magnetisasi material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ukuran 5 nm pada temperatur 328 K.....	45

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Jenis data yang digunakan untuk simulasi temperatur Curie	21
Tabel 3.2	Jenis data yang digunakan untuk simulasi kurva histerisis.....	21
Tabel 3.3	Parameter material CoFe untuk simulasi mikromagnetik	21
Tabel 4.1	Nilai temperatur Curie material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ <i>double layers</i> dengan variasi ukuran sisi kubus model <i>nanocube</i>	33
Tabel 4.2	Nilai medan koersivitas dan medan saturasi material <i>alloy</i> $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ <i>double layers</i> dengan variasi ukuran sisi kubus model <i>nanocube</i>	41

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 4.1	Perhitungan Keakurasian Penelitian Temperatur Curie Material <i>Alloy Co₈₀Fe₂₀ Double Layers</i> pada Ukuran Sisi Kubus 5 nm	53
Lampiran 4.2	Visualisasi Struktur Domain Material <i>Alloy Co₈₀Fe₂₀ Double Layers</i> Berdasarkan perubahan Temperatur pada Analisis Temperatur Curie	54
Lampiran 4.3	Visualisasi Struktur Domain Material <i>Alloy Co₈₀Fe₂₀ Double Layers</i> Berdasarkan perubahan Temperatur pada Analisis Kurva Histerisis.....	59

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bahan yang terdapat di alam semesta masing-masing memiliki karakteristik yang dapat dimanfaatkan untuk proses industri. Pemilihan bahan yang baik sangat dipengaruhi oleh struktur internal penyusun bahan tersebut karena menentukan proses dan hasil dari suatu industri. Salah satu bahan di alam yang dapat digunakan untuk proses industri adalah jenis bahan magnetik (Istiyono, 2009). Industri aplikasi magnetik dalam bidang teknologi *magnetic recording* telah mengalami perkembangan dengan begitu cepat. Perkembangan ini tidak lepas dari salah satu perkembangan ilmu magnetik yaitu spintronik.

Spintronik merupakan gabungan dari bahan semikonduktor yang didoping dengan bahan magnetik, dengan cara memanfaatkan muatan elektron dari bahan semikonduktor dan spin elektron dari bahan magnetik. Perubahan konfigurasi spin elektron dimanfaatkan sebagai sumber informasi digital (Baibich et. al., 1988). Perangkat atau media penyimpanan berbasis magnetik (*magnetic storage*) dan sensor berbasis magnetik (*magnetic sensor*) merupakan aplikasi dalam bidang spintronik yang berkembang cepat. Perkembangan teknologi, membutuhkan media penyimpanan data yang sangat besar, seperti *smartphone*, komputer dan lain-lain. *Smartphone* dan komputer yang semakin canggih memiliki aplikasi-aplikasi yang lebih kompleks sehingga dibutuhkan media penyimpanan dengan kapasitas yang cukup besar dengan dimensi yang kecil dan kecepatan yang tinggi.

Hard Disk Drive (HDD) merupakan salah satu perangkat untuk menyimpan data yang menggunakan *disk* (piringan) berlapis bahan magnetik (Chaudhary dan Kansal, 2015). Media penyimpanan dengan kemampuan penyimpanan yang besar, *non-volatile* (tidak mudah menguap atau data yang tersimpan tidak akan hilang ketika komputer dalam keadaan *off*), dan berharga murah, salah satunya yaitu media perekam magnetik *Hard Disk Drive* (HDD) (Nursiyanto dan Rohman, 2017). Kebutuhan HDD dengan kapasitas besar dapat diatasi dengan cara meningkatkan kerapatan *bit*, dimana dengan bertambahnya kerapatan *bit* maka sama halnya dengan meningkatkan kapasitas dari media penyimpanan data tersebut. Kerapatan

bit dapat dijadikan sebagai tolak ukur dalam perkembangan media perekam magnetik (Santi et. al., 2015). Namun, jika nilai kerapatan *bit* ditingkatkan, maka energi magnetisasi akan menurun. Saat keadaan energi magnetisasi menurun terjadi proses demagnetisasi dan perubahan orientasi magnetisasi yang disebabkan oleh perubahan temperatur tinggi (Dobisz et. al., 2008). Hal itu menyebabkan informasi data yang tersimpan dalam media penyimpanan menjadi tidak stabil dan kemungkinan terburuknya data yang terdapat dalam media penyimpanan tersebut akan rusak.

Salah satu bahan magnetik yang memiliki potensi besar sebagai dasar pembuatan HDD adalah bahan ferromagnetik. Bahan ferromagnetik merupakan bahan yang dapat ditarik kuat oleh magnet (Dini, 2013). Kriteria yang dimiliki oleh bahan ferromagnetik dengan temperatur Curie tinggi, sifat kemagnetan yang kuat dan nilai suseptibilitas yang tinggi sangat dibutuhkan untuk memperoleh kualitas penyimpanan yang baik (Puri dan Babbar, 2008). Beberapa bahan yang termasuk ferromagnetik yaitu *Cobalt* (Co), Nikel (Ni), Ferrit (Fe), Geolidium (Gd) dan paduannya (*alloy*) seperti NiFe dan CoFe (Sudjatmoko, 2005). Bahan *alloy* merupakan bahan alternatif sebagai upaya untuk mengurangi eksplorasi terhadap bahan murni ferromagnetik yang berlebihan. Disamping itu, teknologi paduan memungkinkan untuk memperoleh bahan dengan sifat kemagnetan yang tinggi, yang salah satunya ditinjau berdasarkan temperatur Curie dan suseptibilitas magnetik yang dimiliki oleh bahan tersebut (Tri, 2015). Dalam bahan ferromagnetik, terjadi proses magnetisasi spontan walaupun tanpa dipengaruhi oleh medan magnet luar. Magnetisasi spontan ini menandakan bahwa spin elektron dan momen magnetik bahan tersusun secara teratur (Yani et. al., 2019).

Material *Alloy* CoFe merupakan salah satu bahan magnetik terbaik, dikarenakan memiliki saturasi magnetisasi dan permeabilitas yang tinggi, koersivitas yang rendah, serta temperatur Curie yang tinggi. Beberapa tahun terakhir telah dilakukan penelitian tentang bahan ferromagnetik *alloy* CoFe dengan menggunakan *mechanical alloying* dan pengaruh lamanya milling. Pada penelitian tersebut diamati sifat-sifat magnetik berdasarkan variasi komposisi dari *alloy* Co_xFe_{100-x} ($x = 10, 45, 50, 77$ dan 90) berstruktur mikro (Jesús et. al., 2016).

Penelitian tentang *alloy* CoFe tidak hanya dilakukan secara eksperimen namun juga secara simulasi. Hasil penelitian secara simulasi diharapkan dapat digunakan sebagai prediksi dan optimasi penelitian secara eksperimen (Rohman, 2013). Penelitian sifat-sifat magnetik bahan ferromagnetik *alloy* CoFe secara simulasi telah dilakukan Mulyani (2017) geometri *nanocube* dan *nanosphere*, dengan mengamati nilai temperatur Curie (T_C) dan kurva histerisisnya menggunakan variasi komposisi bahan pada bentuk *random alloy*. Hasil yang diperoleh untuk bahan CoFe *random alloy* dengan variasi komposisi $Fe_{(x)}$ ($x = 10\%$) nilai temperatur Curie meningkat hingga $Fe_{(x)}$ ($x = 20\%$). Namun mengalami penurunan drastis pada komposisi $Fe_{(x)}$ ($x = 30\%$), kemudian peningkatan dan penurunan nilai temperatur Curie terjadi hingga komposisi $Fe_{(x)}$ ($x = 90\%$). Hasil yang tidak linier ini disebabkan karena perubahan struktur kristal dari FCC ke BCC. Hasil simulasi diperoleh temperatur Curie terbaik yaitu pada bahan dengan komposisi $Co_{80}Fe_{20}$ yaitu sebesar 1500 K pada geometri *nanocube* dan 1475 K pada geometri *nanosphere*. Ukuran panjang sisi bahan pada geometri *nanocube* yaitu 5 nm dan pada geometri *nanosphere* dengan ukuran diameter 5 nm.

Selain variasi komposisi, faktor lain yang dapat mempengaruhi nilai temperatur Curie suatu bahan adalah ukuran dari bahan tersebut. Hal ini dikarenakan masing-masing bahan memiliki ukuran kritis yang berbeda. Weller dan Doerner (2000) telah melakukan penelitian secara eksperimen, untuk bahan CoNi dan diperoleh ukuran kritis 10 nm hingga 12 nm. Sedangkan penelitian yang dilakukan Novitasari (2019) secara simulasi, mengenai pengaruh variasi ukuran sisi kubus pada bahan paduan $Co_{80}Ni_{20}$ *random alloy* dan *double layers*. Pada penelitian tersebut variasi ukuran sisi kubus yang digunakan yaitu 5 nm, 8 nm, 10 nm, 12 nm dan 15 nm. Berdasarkan hasil simulasi membuktikan bahwa variasi ukuran bahan sangat berpengaruh terhadap nilai temperatur Curie, medan saturasi dan medan koersitivitas.

Para ilmuwan terus mengembangkan material magnetik, baik secara eksperimen maupun secara teori komputasi. Penelitian secara teori komputasi dilakukan dengan cara simulasi mikromagnetik untuk mengetahui sifat-sifat yang

dimiliki oleh suatu bahan magnetik yang berukuran mikro hingga mencapai ukuran nanometer. Pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Mulyani (2017), bahan ferromagnetik CoFe dianalisis sifat kemagnetannya berdasarkan variasi komposisi dan didapatkan perolehan nilai temperatur Curie terbaik pada komposisi $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ yang bernilai 1500 K dalam bentuk *random alloy*. Selanjutnya pada kegiatan penelitian ini akan dilakukan analisis sifat kemagnetan material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ dengan struktur kristal FCC dan geometri *nanocube* dalam bentuk *double layers*. Karakteristik nilai temperatur Curie dan suseptibilitas magnetik material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ akan diamati pada berbagai variasi ukuran yang telah ditentukan, yaitu 5 nm, 8 nm, 10 nm, 12 nm, 15 nm.

Beberapa program simulasi mikromagnetik untuk mensimulasikan sifat magnetik suatu bahan yaitu OOMMF, NMAG dan *Vampire*. Pada penelitian ini program yang digunakan adalah program *Vampire* yang dijalankan pada sistem operasi *Windows* untuk mensimulasikan sifat magnetik suatu bahan ferromagnetik secara atomistik. Sebelum melakukan simulasi terlebih dahulu disiapkan *script input* yang berisi karakteristik bahan magnetik agar *running* program dapat dijalankan. Kemudian dari hasil simulasi diperoleh *file output* yang akan diolah dengan program *Origin*. *Origin* merupakan program yang digunakan untuk memploting *file output* sehingga diperoleh grafik temperatur *Curie*, suseptibilitas magnetik dan kurva histerisis bahan. Hasil simulasi akan memberikan informasi mengenai perbedaan sifat kemagnetan yang akan dihasilkan berdasarkan variasi ukuran material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ dalam bentuk *double layers*. Penentuan medan koersivitas menggunakan kurva histerisis, dilakukan dengan memvariasikan temperatur sebesar 0 K, 328 K, dan suhu diatas nilai temperatur Curie dari material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$, pada setiap ukuran bahan yang diberikan. Pemilihan temperatur 328 K didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Asrofi dan Purnama (2013), dimana suhu HDD saat komputer memproses data atau dalam kondisi bekerja yaitu sebesar 328 K atau sebesar 55°C. Kemudian bentuk bahan divisualisasi menggunakan program *Povray*, dan dianalisis sifat bahan berdasarkan struktur domainnya berdasarkan variasi ukuran bahan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi ukuran sisi kubus terhadap perbedaan sifat-sifat magnetik material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ dalam bentuk *double layers* berdasarkan analisis temperatur Curie dan kurva histerisisnya?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi ukuran sisi kubus terhadap perbedaan sifat-sifat magnetik material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ dalam bentuk *double layers* berdasarkan analisis temperatur Curie dan kurva histerisisnya.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian mengenai simulasi sifat-sifat magnetik material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* dalam berbagai variasi ukuran sisi kubus diharapkan mampu memberikan informasi baru terkait simulasi bahan mikromagnetik pada bidang ilmu fisika komputasi. Penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai acuan bahan dasar dari pembuatan media penyimpanan data berbasis magnetik seperti pada *Hard Disk Drive* (HDD), untuk meningkatkan kapasitas yang cukup besar serta tahan terhadap panas. Selain itu juga diharapkan dapat dijadikan pertimbangan dalam menentukan jenis bahan yang paling tepat dan efisien sebagai bahan dasar penyusun media penyimpanan berbasis magnetik.

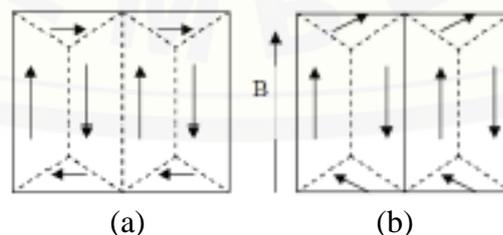
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Asal kata magnet berasal dari bahasa Yunani yaitu *magnitis lithos* yang berarti batu magnesian. *Magnesia* merupakan sebuah wilayah di Asia kecil (sebuah kawasan di Asia barat daya yang kini dinamakan dengan Turki) adalah tempat pertama kali ditemukan magnet yang di dalamnya terkandung batu magnet. Jenis batu inilah yang disebut magnet, dimana benda ini dapat menarik besi, baja atau campuran logam lainnya. Magnet atau magnit adalah logam yang dapat menarik besi ataupun baja dan mempunyai medan magnet. Satuan intensitas magnet menurut sistem metrik Satuan Internasional (SI) adalah Tesla dan SI unit untuk total fluks magnetik adalah weber ($1 \text{ weber/m}^2 = 1 \text{ Tesla}$) yang mempengaruhi luasan satu meter persegi (Afza, 2011). Apabila sebatang magnet diletakkan dalam suatu ruang, maka setiap titik dalam ruang itu akan terdapat medan magnetik. Arah medan magnetik di suatu titik didefinisikan sebagai arah yang ditunjukkan oleh kutub utara jarum kompas ketika ditempelkan pada titik tersebut (Astari, 2010). Setiap magnet memiliki dua kutub, kutub utara dan kutub selatan. Kutub magnet merupakan tempat kekuatan magnet yang terbesar yang terletak pada ujung-ujung magnet. Benda dapat dibedakan menjadi dua macam berdasarkan sifat kemagnetannya, yaitu benda magnetik dan benda non-magnetik. Benda magnetik adalah benda yang dapat ditarik oleh magnet, sedangkan benda non-magnetik adalah benda yang tidak dapat ditarik oleh magnet (Suryatin, 2008). Logam, besi dan baja merupakan materi yang mempunyai daya tarik tinggi oleh magnet. Namun tidak semua logam mempunyai daya tarik yang sama terhadap magnet. Contoh materi yang mempunyai daya tarik rendah oleh magnet yaitu oksigen cair (Julia, 2011).

2.1 Material Ferromagnetik

Material ferromagnetik adalah bahan yang memiliki resultan medan atomis besar. Hal ini disebabkan oleh momen magnetik spin elektron. Pada bahan ferromagnetik terdapat spin elektron tidak berpasangan, misalnya pada atom besi terdapat empat buah spin elektron yang tidak berpasangan. Masing-masing spin elektron yang tidak berpasangan ini akan memberikan sumbangan terhadap medan

magnetik, sehingga medan magnetisme yang dihasilkan oleh suatu atom lebih besar. Jika diperbesar medan magnetnya, maka akan semakin besar pula magnetisasinya. Medan magnet dari masing-masing atom dalam bahan ferromagnetik sangat kuat, sehingga interaksi antara atom tetangganya menyebabkan sebagian atom akan mensejajarkan diri (Halliday et. al., 2013). Bahan ferromagnetik memiliki magnetisasi spontan yang bergantung pada temperatur. Jika bahan ferromagnetik dipanaskan sampai di atas temperatur Curie maka magnetisasi spontan menghilang dan bahan menjadi bersifat paramagnetik karena momen magnetnya terorientasi secara acak (Norita, 2008). Sifat kemagnetan bahan ferromagnetik akan hilang pada temperatur kritis yang disebut temperatur Curie (Kraus, 1970). Permeabilitas bahan ferromagnetik adalah $\mu > \mu_0$ dan suseptibilitas magnetiknya $\chi_m > 0$. Bahan ferromagnetik mula-mula memiliki magnetisasi nol pada daerah bebas medan magnetik, jika diperbesar medan magnetnya maka nilai magnetisasinya akan semakin besar pula. Sedangkan apabila medan magnetik pada bahan ini dihilangkan, magnetisasi bahan ferromagnetik tidak kembali menjadi nol. Hal ini disebabkan karena bahan ferromagnetik memiliki magnetisasi spontan, dimana bahan ini tetap memiliki magnetisasi walaupun medan magnetik luarnya dihilangkan (Istiyono, 2009). Beberapa contoh material ferromagnetik yaitu unsur Fe (Ferrit), Ni (Nikel), Co (Cobalt) dan Gd (Gadolinium) (Billah, 2006). Gambar 2. 1 merupakan struktur domain material ferromagnetik, dimana tanda panah menunjukkan arah magnetisasi, Gambar 2.1 (a) magnetisasi adalah nol dan Gambar 2.1 (b) menunjukkan penerapan medan luar yang mengubah arah domain magnetik (Warsiti, 2005).



Gambar 2.1 Struktur Domain Material Ferromagnetik (Warsiti, 2005)

2.2 Struktur Kristal

2.2.1 *Body Centered Cubic* (BCC)

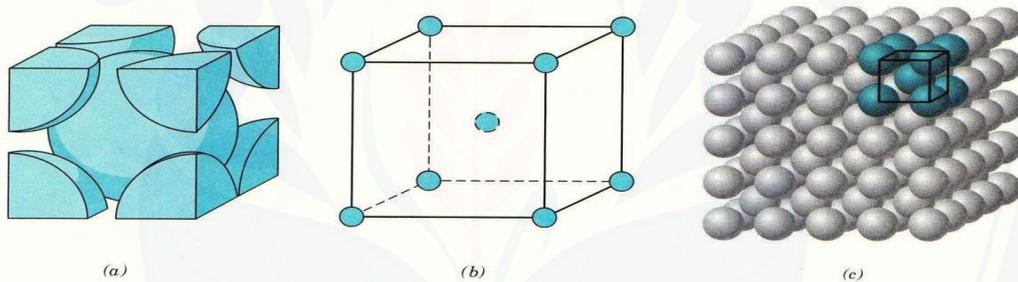
Satu sel dari struktur kristal BCC diperlihatkan pada Gambar 2.2. Pada Gambar 2.2 terlihat bahwa terdapat satu sel utuh di tengah 8 sel satuan di tepian $1/8$ atom terdapat pada tiap-tiap sudut sel satuan sehingga dalam satu sel satuan BCC terdapat 2 atom. Contoh logam BCC yaitu Fe, Cr, Li. Berdasarkan Gambar 2.2 maka dapat diketahui jari-jari atomnya dengan persamaan:

$$\sqrt{3}a = 4R \text{ atau } a = \frac{4R}{\sqrt{3}} \quad (2.1)$$

Untuk nilai *Atomic Packing Factor* (APF) dapat menggunakan persamaan:

$$APF = \frac{\text{volume atom-atom dalam sel satuan}}{\text{volume sel satuan}} \quad (2.2)$$

Dari hasil perhitungan harga untuk APF Kristal BCC adalah 68% dan sisanya 32% adalah ruang kosong. Hal ini menunjukkan bahwa Kristal BCC berstruktur padat.



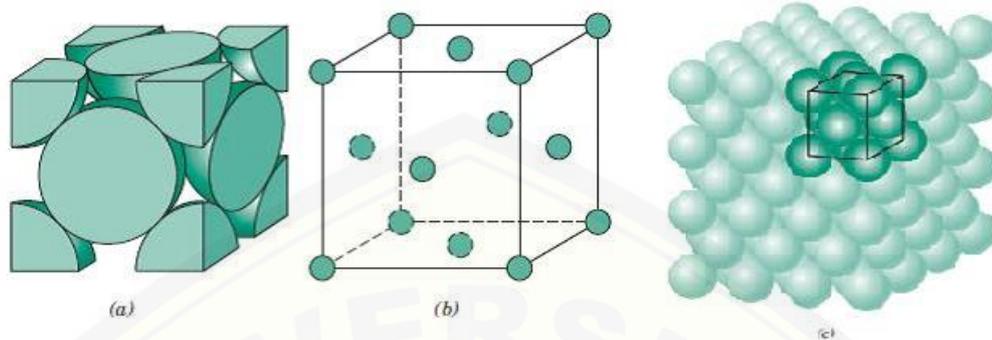
Gambar 2.2 Struktur kristal *Body Centered Cubic* (BCC) (Mangonon, 1999)

2.2.2 *Face Centered Cubic* (FCC)

Struktur kristal FCC dibentuk oleh satu per delapan ($1/8$) atom pada setiap sudut kubus dan setengah ($1/2$) atom pada setiap permukaan kubus (Chung, 2006). Pada kubus terdapat delapan sudut dan enam bidang permukaan, sehingga jumlah atom dari satu unit sel adalah empat atom. Struktur kristal FCC dapat dilihat pada Gambar 2.3, dimana struktur ini terdapat pada beberapa bahan, diantaranya yaitu: Ag, Al, Au, Cu, Ni dan Pt. Struktur Kristal FCC dikelilingi oleh 12 atom tetangga dengan bilangan koordinasi adalah 12. Jari-jari atom FCC dapat diketahui melalui persamaan 2.3.

$$\sqrt{2}a = 4R \text{ atau } a = \frac{4R}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

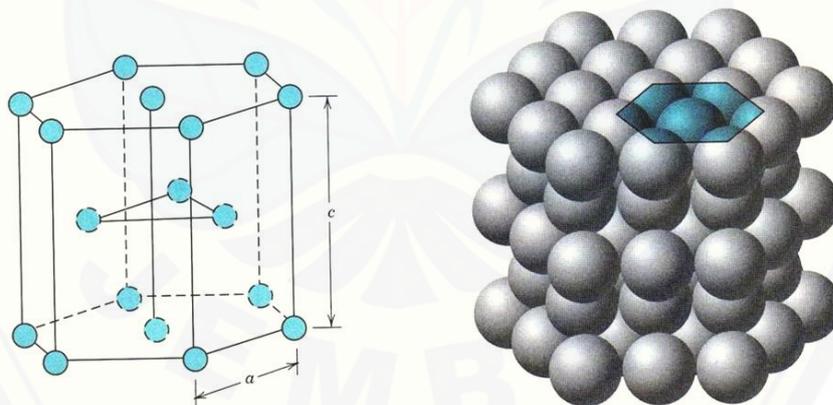
APF pada kristal FCC sebesar 74% dan sisanya 26% merupakan ruang kosong. Hal ini mencirikan bahwa Kristal FCC berstruktur padat (Borg dan Dienes, 1992).



Gambar 2.3 Struktur kristal *Face Centered Cubic* (FCC) (Mangonon, 1999)

2.2.3 *Hexagonal Closed Packed* (HCP)

Struktur kristal *Hexagonal Closed Packed* (HCP) ditunjukkan pada Gambar 2.4. Bilangan koordinasi pada struktur kristal HCP sebanyak 12 dan dalam satu unit sel terdapat 6 atom. Hal ini menunjukkan bahwa kristal HCP berstruktur padat, dengan dibuktikan nilai APF sebesar 74% dan 26% sisanya adalah ruang kosong. Contoh unsur yang berstruktur kristal HCP adalah Co, Mg dan Zn.



Gambar 2.4 Struktur kristal *Hexagonal Closed Packed* (HCP) (Mangonon, 1999)

2.3 Parameter Atomistik

Simulasi mikromagnetik model atomistik merupakan simulasi yang menggunakan pendekatan termodinamika dari model atomistik. Adapun beberapa parameter yang digunakan dalam simulasi mikromagnetik model atomistik antara lain sebagai berikut:

2.3.1 Atomik Spin Momen

Atomik spin momen (μ_s) yang berhubungan dengan magnetisasi saturasi, sebagaimana yang ditunjukkan dalam persamaan 2.4.

$$\mu_s = \frac{M_s a^3}{n_{at}} \quad (2.4)$$

keterangan:

M_s = magnetisasi saturasi pada temperatur 0 Kelvin dengan satuan $JT^{-1}m^{-3}$

a = ukuran unit sel, dengan satuan m

n_{at} = jumlah atom per unit sel

Salah satu contohnya yaitu Besi (Fe) dengan struktur kristal BCC, saat temperatur nol magnetisasi saturasi sebesar 1.75 MA/m, ukuran unit sel $a = 2.866 \text{ \AA}$, maka atomik spin momen yang diperoleh yaitu sebesar $2.22 \mu_s/atom$ (Evans et. al., 2013).

2.3.2 Energi *Exchange*

Energi *exchange* merupakan energi yang timbul dari interaksi spin dengan spin tetangganya melalui *exchange coupling* (Djuhana et. al., 2013). Energi *exchange* (J_{ij}) dari interaksi antara spin dalam material feromagnetik dapat dinyatakan dalam persamaan 2.5.

$$J_{ij} = \frac{3k_B T_C}{\epsilon_Z} \quad (2.5)$$

keterangan:

k_B = konstanta Boltzman ($1,3807 \times 10^{-23} JK^{-1}$)

T_C = temperatur *Curie* dalam satuan Kelvin (K)

Z = jumlah atom tetangga

ϵ = faktor koreksi

Nilai faktor koreksi ini tergantung dari struktur kristal dan nilai koordinasinya. Misalnya Cobalt (Co) dengan T_C 1288 K, memiliki struktur HCP dengan z bernilai 12, sehingga energi *exchange* dari Co sebesar $6.064 \times 10^{-21} \text{ J/link}$ (Evans et al., 2013)

2.3.3 Energi Anisotropi

Energi anisotropi merupakan energi yang mengacu pada arah magnetisasi dan sumbu kristalografi (*crystallographic axis*). Energi anisotropi atomistik k_u diturunkan dari anisotropi makroskopik K_u , yang ditunjukkan dengan persamaan 2.6.

$$k_u = \frac{K_u a^3}{n_{at}} \quad (2.6)$$

dimana satuan dari K_u yaitu J/m^3 dan n_{at} adalah jumlah atom per unit sel (Evans et al., 2013).

2.4 Bahan Alloy CoFe

Cobalt (Co) merupakan bahan ferromagnetik yang memiliki struktur kristal HCP (*Hexagonal Closed Packed*). Bahan ini memiliki tekstur kuat dengan nilai magnetik anisotropi, temperatur Curie, serta koersitivitas yang tinggi (Ballela, 2008). Parameter-parameter yang dimiliki oleh Cobalt (Co) yaitu *atomic spin moment* (μ_s) sebesar $1.72 \mu_B$, *energy exchange* (J_{ij}) sebesar 6.064×10^{-21} J/link, serta energi anisotropi (K) sebesar 6.69×10^{-24} J/atom. Sedangkan Ferit (Fe) merupakan bahan ferromagnetik yang memiliki struktur kristal BCC. Parameter-parameter yang dimiliki Ferit (Fe) yaitu *atomic spin moment* (μ_s) sebesar $2.22 \mu_B$, energi *exchange* (J_{ij}) sebesar 7.050×10^{-21} J/link, dan energi anisotropi sebesar 5.65×10^{-25} J/atom. Temperatur Curie Ferit (Fe) cukup tinggi yaitu sebesar 1043 K (Evans et al., 2013)

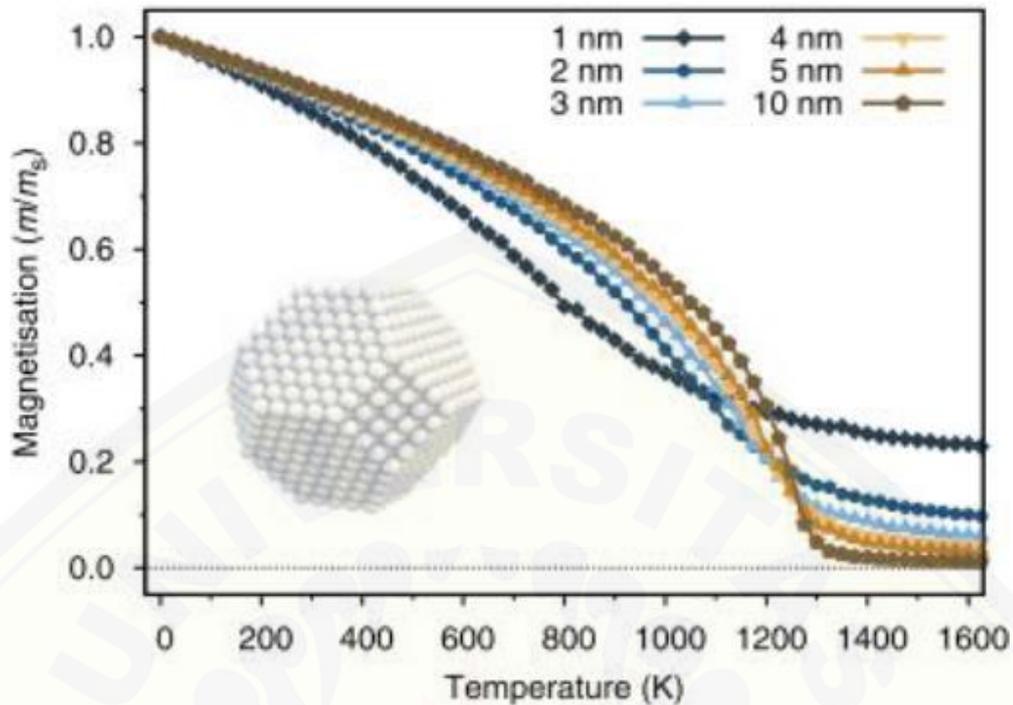
Alloy CoFe (Iron-Cobalt) merupakan salah satu bahan *alloy* magnetik dengan saturasi magnetisasi paling tinggi dan bersifat *soft magnetic* (Khadra, 2015). Hal ini disebabkan *alloy CoFe* mempunyai saturasi magnetisasi, permeabilitas, dan temperatur Curie yang tinggi, sedangkan koersivitasnya rendah. Namun dengan temperatur Curie yang tinggi menjadikan *alloy CoFe* kandidat kompetitif sebagai bahan magnetik (Jesús et al., 2016). Temperatur Curie bahan *alloy CoFe* sekitar 1250 K, di atas temperatur ini *alloy CoFe* menjadi bahan paramagnetik (MacLaren et al., 1999). Struktur kristal *alloy CoFe* dapat berbentuk BCC ataupun FCC. Bentuk kristal bahan ini dipengaruhi oleh komposisinya, dimana bentuk kristal BCC

diperoleh ketika komposisi Co kurang dari 75%, sedangkan bentuk kristal FCC diperoleh ketika komposisi Co lebih dari 75% (Popova et. al., 2012).

2.5 Temperatur Curie

Menurut (Okimustava dan Oktova, 2009), temperatur Curie merupakan temperatur kritis dimana fase magnetik bertransisi dari konfigurasi struktur magnetik yang teratur (fase ferromagnetik) pada temperatur rendah $T < T_C$ menjadi tidak teratur (fase paramagnetik) pada temperatur tinggi $T > T_C$. Magnetisasi spontan bahan ferromagnetik akan hilang jika dipanaskan di atas temperatur Curie (T_C). Spin atom terpolarisasi spontan tanpa adanya medan magnet dari luar yang mempengaruhi. Keadaan tersebut hanya terjadi pada saat temperatur tidak melebihi temperatur transisi (temperatur Curie) (Sudjatmoko, 2005). Ketika temperatur bertambah tinggi, maka terjadi peningkatan getaran termal dari atom-atom yang mengakibatkan momen-momen magnet yang searah dapat berotasi bebas sehingga arahnya acak. Hal ini dapat menyebabkan penurunan saturasi magnetisasi. Saturasi magnetisasi maksimum diperoleh pada temperatur 0 K, dimana gerak termal minimum. Peningkatan temperatur mengakibatkan saturasi magnetisasi menurun secara gradual hingga mencapai nol pada temperatur tertentu. Temperatur ini disebut dengan temperatur Curie, dimana bahan ferromagnetik akan berubah menjadi bahan paramagnetik pada temperatur di atas temperatur Curie (Callister Jr dan Rethwisch, 2009).

Beberapa contoh bahan yang termasuk bahan ferromagnetik yaitu Besi (Fe), Nikel (Ni), Cobalt (Co) dan paduannya (*alloy*). Pada tahun 2010 dianalisa sifat magnet dan pengaruhnya terhadap temperatur Curie dengan substitusi ion Ti dan Co. Hasil yang diperoleh saat komposisi x bernilai 2,5, sifat ferromagnetik berubah menjadi paramagnetik dan temperatur Curie (T_C) naik seiring naiknya komposisi substitusi Ti dan Co. Dimana untuk x bernilai 2,5 dengan temperatur Curie 965 K dan saat komposisi x bernilai 5 temperatur Curie menjadi 1003 K (Babalola et. al., 2010). Gambar 2.5 merupakan contoh grafik temperatur Curie pada bahan Cobalt dengan variasi berbagai ukuran bahan.



Gambar 2.5 Grafik besar temperatur terhadap magnetisasi untuk menentukan temperatur Curie pada bahan kobalt nanopartikel oktahedral dengan ukuran yang berbeda (Evans dan Biternas, 2014)

2.6 Suseptibilitas Magnetik

Nilai suseptibilitas magnetik dipengaruhi oleh kandungan sifat magnetik dari suatu bahan, dimana nilainya dapat bernilai positif ataupun negatif. Nilai positif menunjukkan intensitas magnetisasi M searah dengan medan magnet H , yang terdapat pada bahan paramagnetik dan ferromagnetik. Sedangkan untuk nilai negatif menunjukkan bahwa magnetisasi M berlawanan arah dengan medan H , yang merupakan sifat dari bahan diamagnetik (Mufit, 2013). Beberapa bahan magnetik dikelompokkan berdasarkan suseptibilitasnya yaitu bahan diamagnetik, paramagnetik dan ferromagnetik. Suseptibilitas bahan diamagnetik bernilai negatif yaitu $-10^{-5} T^{-1}$ hingga $-10^{-4} T^{-1}$. Suseptibilitas bahan paramagnetik dan ferromagnetik bernilai positif, untuk paramagnetik yaitu antara $10^{-7} T^{-1}$ hingga $10^{-3} T^{-1}$, sedangkan untuk bahan ferromagnetik jauh lebih besar dari satu (Ida, 2004). Suseptibilitas bahan ferromagnetik ditunjukkan dengan persamaan 2.8.

$$\chi = \frac{C}{T-T_C} \quad (2.8)$$

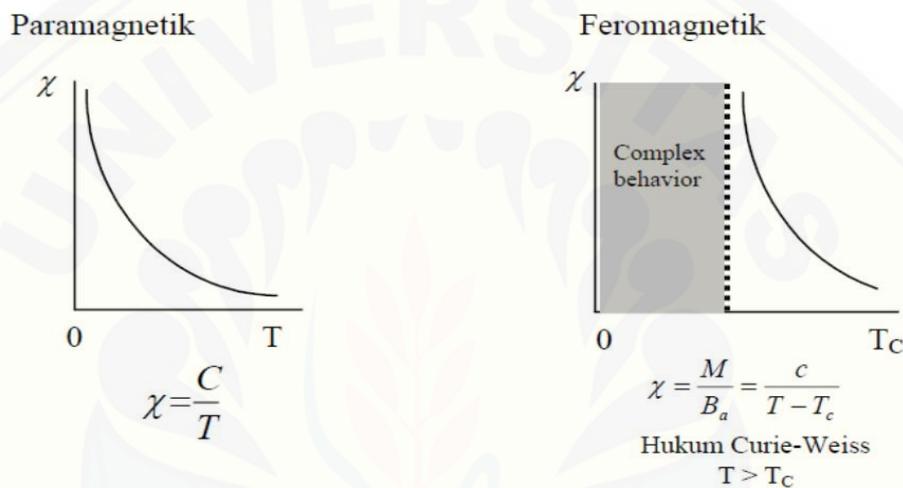
keterangan:

C = konstanta Curie

T = temperatur

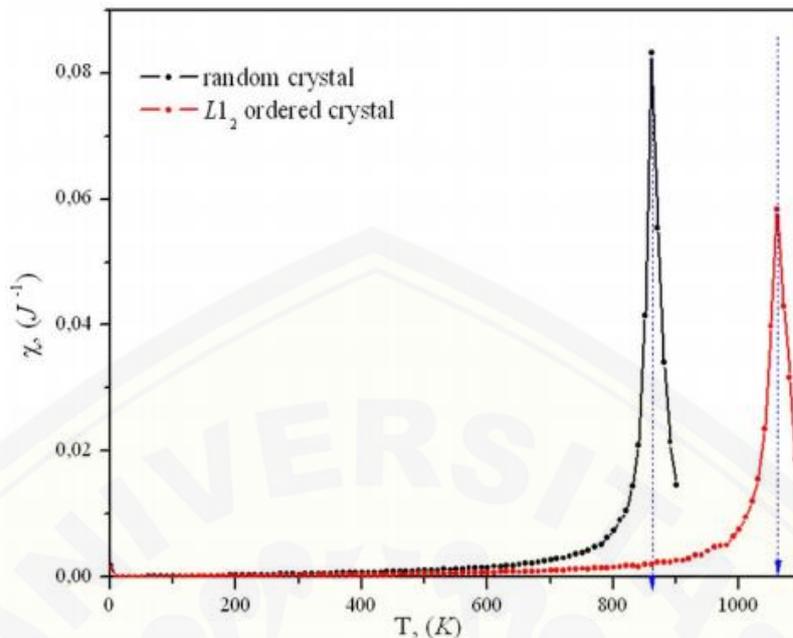
T_C = temperatur Curie dengan $T > T_C$

Persamaan ini disebut dengan *Curie-Weiss Law*. Temperatur sangat berpengaruh terhadap besarnya suseptibilitas. Grafik hubungan antara suseptibilitas magnetik dan temperatur pada bahan paramagnetik dan ferromagnetik ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Grafik hubungan antara suseptibilitas magnetik dan temperatur pada bahan paramagnetik dan ferromagnetik (Kittel, 2005)

Mardiansyah (2014), telah melakukan penelitian mengenai bahan ferromagnetik. Penelitian tersebut menghasilkan suseptibilitas magnetik bergantung pada temperatur. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.7, dimana semakin tinggi temperatur menyebabkan nilai suseptibilitas pada bahan ferromagnetik semakin mengecil. Hal ini dapat disebabkan oleh getaran termal yang dialami oleh atom-atom yang menyusun bahan ferromagnetik semakin cepat ketika temperatur yang diberikan semakin tinggi. Oleh karena itu, energi yang dibutuhkan semakin besar untuk mensejajarkan spin-spin setiap partikel. Ketika temperatur yang diberikan melampaui temperatur Curie, maka nilai suseptibilitas yang dimiliki oleh bahan tersebut lebih kecil dari satu.



Gambar 2.7 Grafik suseptibilitas magnetik terhadap temperatur (Vernyhora, 2009)

2.7 Kurva Histerisis

Kurva histerisis merupakan karakterisasi material magnetik yang menunjukkan material tersebut dapat dimagnetisasi ataupun didemagnetisasi oleh suatu medan luar (Nursiyanto dan Rohman, 2017). Kurva histerisis memberikan informasi mengenai sifat magnetik berupa magnetisasi jenuh, magnetisasi remanen, koersivitas dan permeabilitas atau suseptibilitas. Histerisis juga dapat diartikan sebagai suatu sifat yang dimiliki oleh sistem dimana sistem tidak secara cepat mengikuti gaya yang diberikan kepadanya, tetapi memberikan reaksi secara perlahan atau bahkan sistem tidak kembali lagi ke keadaan awalnya. Simulasi histerisis pada bahan ferromagnetik berperan penting dalam berbagai penerapan teknologi. Kualitas model histerisis diukur dari kesesuaian hasil eksperimen dengan simulasi. Bahan ferromagnetik memiliki momen magnetik spontan walaupun pada keadaan medan magnet eksternal nol. Keberadaan magnetisasi spontan ini menandakan bahwa spin elektron dan momen magnetik bahan ferromagnetik tersusun secara teratur (Yani et al., 2019). Gambar 2.8 (a) merupakan kurva histerisis intrinsik atau antara J ($J = \mu_0 M$) dan H disebut juga dengan kurva histerisis intrinsik. Sedangkan pada Gambar 2.8 (b) merupakan kurva histerisis

antara \mathbf{B} dan \mathbf{H} atau disebut sebagai kurva histerisis normal. Kedua cara tersebut memberikan informasi yang sama karena \mathbf{B} , \mathbf{M} dan \mathbf{H} memenuhi persamaan:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.9)$$

keterangan:

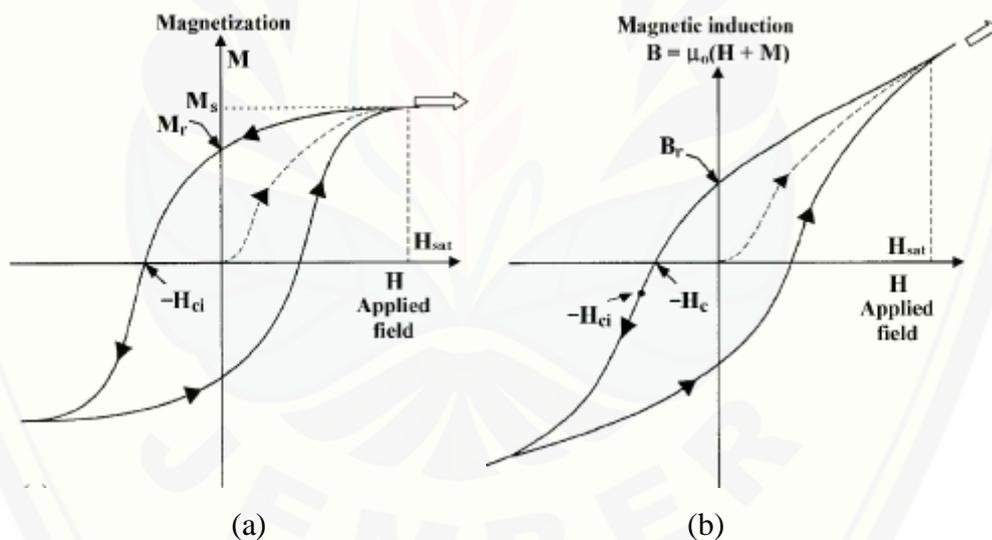
B = induksi magnetik (Wb/m^2 atau Tesla (T))

μ_0 = permeabilitas ruang hampa ($4 \times 10^{-7} \text{H/m}$)

H = medan magnet (A/m)

M = magnetisasi (A/m)

Berdasarkan *loop* kurva histerisis yang terbentuk dapat dilihat karakteristik dari suatu bahan ferromagnetik, dimana pada kurva tersebut menggambarkan magnetisasi material \mathbf{M} dan kuat medan \mathbf{H} . Selain itu cara lain yang digunakan yaitu dengan memberikan input induksi magnet \mathbf{B} pada bahan ferromagnetik terhadap nilai kuat medan magnet \mathbf{H} yang berbeda-beda (Widodo, 2013).



Gambar 2.8 Kurva histerisis untuk material ferromagnetik. (a) M terhadap H : M_r adalah magnetisasi remanen; H_{ci} adalah medan magnet koersivitas intrinsik; M_s adalah magnetisasi saturasi; (b) B terhadap H : B_r adalah induksi magnet remanen; H_c adalah medan magnet (Sung dan Rudowicz, 2003)

Kurva histerisis pada Gambar 2.8 (a) menggambarkan kondisi awal material ferromagnetik yang belum termagnetisasi, selanjutnya diberikan medan magnet \mathbf{H} yang mengakibatkan magnetisasi \mathbf{M} meningkat dikarenakan adanya pergerakan domain magnet. Medan magnet \mathbf{H} dan magnetisasi \mathbf{M} akan meningkat sampai

dengan keadaan jenuh (saturasi). Keadaan ini dikenal sebagai \mathbf{M}_s dan medan saturasi \mathbf{H}_{sat} . Seluruh momen magnet membentuk domain tunggal yang terorientasi searah dengan medan magnet \mathbf{H} . Medan magnet eksternal direduksi hingga mencapai keadaan yang disebut dengan medan magnet nukleasi (*nucleation field*). Medan nukleasi adalah medan awal yang membuat struktur domain tidak lagi sejajar satu dengan lainnya (saturasi) (Frei et. al., 1957). Medan \mathbf{H} direduksi hingga nol, namun kurva tidak kembali seperti semula tetapi memiliki magnetisasi yang tersisa. Nilai ini dinamakan magnetisasi remanen \mathbf{M}_r . Sebagian domain juga tidak kembali seperti orientasi sebelum diberikan medan magnet eksternal \mathbf{H} , sehingga sebagian material termagnetisasi. Proses diberikan pembalikan arah medan magnet \mathbf{H} , hingga magnetisasi $\mathbf{M} = 0$. Nilai arah medan balik \mathbf{H} saat $\mathbf{M} = 0$ disebut koersivitas, dimana orientasi domain magnet kembali acak.

2.8 Metode Heun

Metode Heun merupakan modifikasi dari metode Euler, dimana pada metode Heun solusi dari metode Euler dijadikan sebagai solusi perkiraan awal (*predictor*), selanjutnya solusi perkiraan awal diperbaiki dengan metode Heun (*corrector*). Penentuan arah spin S'_i dan medan efektif H'_{eff} dari arah spin S_i dari Δt sebagai perubahan waktu dalam metode Heun mengacu pada metode Euler dengan persamaan:

$$S'_i = S_i + \Delta S \Delta t \quad (2.10)$$

Persamaan 2.10 sebagai *predictor* dalam penentuan posisi arah spin, dimana ΔS sendiri adalah:

$$\Delta S = -\frac{\gamma}{(1+\lambda^2)} [S_i \times H_{eff}^i + \lambda S_i (S_i \times H_{eff}^i)] \quad (2.11)$$

Penentuan posisi spin yang diprediksi dengan perubahan medan efektif H'_{eff} dalam hal ini difungsikan sebagai *corrector*, maka digunakan persamaan:

$$S_i^{t+\Delta t} = S_i + \frac{1}{2} (\Delta S + \Delta S') \Delta t \quad (2.12)$$

dimana $\Delta S'$ adalah:

$$\Delta S' = -\frac{\gamma}{(1+\lambda^2)} [S'_i \times H'_{eff} + \lambda S'_i \times (S'_i \times H'_{eff})] \quad (2.13)$$

dalam hal ini γ didefinisikan sebagai *gyromagnetic ratio*, λ sebagai *microscopic damping* dan H'_{eff} sebagai total medan magnet. Dengan demikian *predictor* dari integrasi ini ditunjukkan pada setiap spin sebelum proses evaluasi dari *corrector* untuk setiap spin dengan pengulangan beberapa kali sehingga perubahan waktu dapat disimulasikan (Evans et al., 2013)

2.9 Simulasi Mikromagnetik

Perkembangan kecepatan pemrosesan data oleh komputer dengan keunggulan yang dimiliki melibatkan simulasi mikromagnetik untuk mendukung atau melengkapi hasil eksperimen. Simulasi mikromagnetik yaitu suatu kegiatan mensimulasikan sifat-sifat material feromagnetik yang memiliki skala mikro hingga skala nanometer. Konsep dasar dari mikromagnetik yaitu menggunakan konsep *continuum*, dimana konsep ini merupakan suatu konsep fisika yang digunakan untuk menjelaskan sifat-sifat material feromagnetik pada skala mikro dengan menggunakan mekanika klasik dimana fungsi energi sistem yang bersifat kontinu pada keadaan setimbang. Penggunaan konsep *continuum* ini memungkinkan untuk melakukan perhitungan distribusi magnetisasi pada material yang diteliti dengan bentuk acak. Perhitungannya yaitu berdasarkan prinsip minimalisasi pada fungsi energi sistem, sehingga perubahan energi dan profil energi dapat ditentukan (Ismail, 2013). Salah satu *software* yang digunakan untuk simulasi mikromagnetik yaitu program aplikasi *Vampire*. *Vampire* sebagai simulator atomistik material magnetik tersedia secara *open source* yang dapat dijalankan pada sistem operasi komputer *Linux* maupun *Windows*. Program ini dirancang dengan berbagai kemudahan dalam penggunaannya dalam proses simulasi, termasuk penentuan parameter magnetik suatu material untuk mengontrol simulasi melalui *file input*. Parameter yang diperlukan untuk simulasi menggunakan program tersebut adalah konstanta *exchange*, konstanta anisotropi, magnetisasi dan lain-lain. Program *Vampire* ini dapat digunakan untuk mensimulasikan temperatur *Curie*, Kurva Histerisis dan pengaruh *heat* (penaikan suhu) pada suatu bahan, yang nantinya akan dianalisis untuk mengetahui karakteristik dari suatu material magnetik tersebut (Evans dan Biternas, 2014).

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Kegiatan penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari hingga bulan Agustus tahun 2020, bertempat di Laboratorium Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Peralatan yang digunakan untuk simulasi mikromagnetik ini yaitu dengan menggunakan 1 set perangkat komputer dan beberapa program aplikasi. Perangkat komputer (*hardware*) yang terdiri dari keyboard, monitor, mouse serta CPU (*Control Processing Unit*) dengan spesifikasi sebagai berikut:

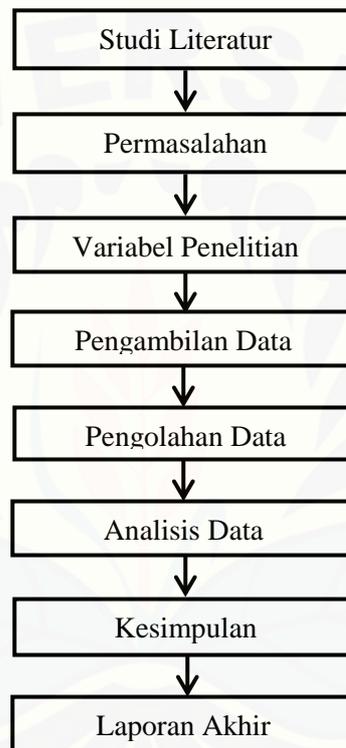
Prosesor	: Intel® Core™ i3-4170 CPU @ 3.70 GHz 3.70 GHz
OS Type	: 64 bit
RAM	: 2.00 GB (1.90 GB usable)
Operating System	: Windows 8

Beberapa program aplikasi (*software*) yang digunakan untuk mendukung proses pelaksanaan simulasi mikromagnetik meliputi:

1. *Vampire 4.0*, merupakan program aplikasi berbasis *atomistic model* yang digunakan untuk *running* data simulasi mikromagnetik
2. *Origin Pro*, digunakan untuk membuat grafik dari hasil pengolahan data simulasi sebagai pembentuk grafik dengan memplot nilai hasil *running* yang berupa file *output*
3. *Cygwin*, merupakan terminal *Linux* yang digunakan pada *Windows*
4. *Povray*, digunakan untuk membuat visualisasi struktur domain dalam bentuk 3 dimensi.
5. *Notepad++*, digunakan untuk mengedit penyusunan *script*

Langkah awal yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu melakukan kajian pustaka dengan mengumpulkan sumber-sumber data berupa buku, jurnal, skripsi, tesis dan internet untuk memperoleh parameter *input* material yang akan disimulasikan. Selanjutnya guna menunjang program simulasi mikromagnetik, maka dilakukan penentuan variabel-variabel yang digunakan untuk mengetahui sifat-sifat magnetik dari material tersebut. Material yang digunakan dalam

penelitian ini adalah material magnetik *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$. Setelah proses simulasi selesai, akan didapatkan hasil berupa angka-angka yang divisualisasi dalam bentuk grafik dan struktur domain dalam 3 dimensi. Hasil tersebut kemudian dianalisis dan disimpulkan sesuai rumusan masalah yang ada pada penelitian ini. Proses rancangan penelitian ini akan menjadi sebuah karya tulis yang menjadi tugas akhir peneliti dalam menyelesaikan studi S1. Berikut adalah skema rancangan penelitian yang ditampilkan dalam bentuk *flow chart*:



Gambar 3.1 Diagram alir rancangan penelitian

3.2 Jenis dan Sumber Data

Sumber data yang digunakan dalam penelitian kajian sifat-sifat magnetik material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* model *nanocube* adalah data sekunder, dimana data ini diperoleh dari hasil penelitian yang sudah dilakukan oleh ilmuwan sebelumnya. Data ini digunakan sebagai inputan pada simulasi mikromagnetik untuk menentukan nilai dari suseptibilitas dan temperatur Curie pada material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$. Penelitian ini bersifat kuantitatif, karena jenis data tersebut merupakan jenis data yang dapat diukur dan dihitung secara langsung, kemudian dapat

dinyatakan dengan angka-angka yang diperoleh dari perhitungan numerik. Jenis data ditentukan berdasarkan kebutuhan simulasi, yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 sebagai berikut:

Tabel 3.1 Jenis data yang digunakan untuk simulasi temperatur Curie

Atribut simulasi	Ukuran dan variasi	Satuan
Ukuran sisi kubus partikel	5, 8, 10, 12, 15	nm
Temperatur	0-2000 (interval 25 K)	K
Komposisi bahan	Co ₈₀ Fe ₂₀	-

Tabel 3.2 Jenis data yang digunakan untuk simulasi kurva histeresis

Atribut simulasi	Ukuran dan variasi	Satuan
Ukuran sisi kubus partikel	5, 8, 10, 12, 15	nm
Temperatur	0, 328, dan 1600 K	K
Komposisi bahan	Co ₈₀ Fe ₂₀	-

Sumber data dalam penelitian ini adalah data sekunder, dimana data diperoleh dari hasil penelitian yang sudah ada. Rincian parameter sumber data yang digunakan sebagai data input simulasi mikromagnetik material *alloy* CoFe dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut:

Tabel 3.3 Parameter material CoFe untuk simulasi mikromagnetik

	Cobalt (Co)	Ferrit (Fe)	Alloy CoFe	Satuan
Struktur Kristal	HCP	BCC	BCC/FCC ^(a)	-
Unit Sel a	2.507	2.866	2.886 ^(b)	Å
Atom spin momen μ_s	1.72	2.22	-	μ_B
Konstanta Exchange J_{ij}	6.064×10^{-21}	7.050×10^{-21}	7.836×10^{-21}	J/link
Energi Anisotropi k	6.69×10^{-24}	5.65×10^{-25}	1.35×10^{-24} ^(c)	J/atom

Sumber : (Evans dan Biternas, 2014), (a) (Popova et al., 2012), (b) (Peng et. al., 2015), (c) (Fukuma et. al., 2009)

3.3 Definisi Operasional Variabel

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu meliputi variabel bebas, variabel terikat dan variabel kontrol. Beberapa variabel tersebut didefinisikan sebagai berikut:

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas didefinisikan sebagai variabel yang dapat diubah nilainya dan menjadi sebab adanya variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

- a) Medan magnet eksternal yang digunakan yaitu -5 T sampai 5 T dengan interval 0,1 T
- b) Temperatur yang digunakan sebesar 0 K sampai dengan 2000K dengan kenaikan setiap 25 K pada penentuan temperatur Curie
- c) Ukuran bahan merupakan nilai ukuran sisi kubus yang di-*input* pada *file script*. Skala ukuran yang digunakan pada penelitian ini yaitu 5 nm, 8 nm, 10 nm, 12 nm, dan 15 nm untuk memperoleh nilai temperatur Curie dan kurva histerisis.

3.3.2 Variabel terikat

Variabel terikat yaitu variabel yang nilai perubahannya dipengaruhi oleh adanya variasi dari variabel bebas. Variabel terikat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu didefinisikan sebagai berikut:

- a) Temperatur Curie (T_C), yaitu temperatur transisi dari bahan yang bersifat feromagnetik menjadi bahan paramagnetik yang dapat diperoleh dari grafik hubungan antara temperatur dan magnetisasi.
- b) Suseptibilitas (χ), yaitu tingkat kerentanan magnet suatu bahan yang dapat termagnetisasi.
- c) Magnetisasi, yaitu proses dimana sebuah material yang ditempatkan pada suatu bidang magnetik akan menjadi magnet.
- d) Medan koersitivitas (H_C), yaitu besarnya arah medan balik H saat $M = 0$
- e) Medan saturasi (H_S), yaitu suatu keadaan dimana medan magnet (H) dan magnetisasi (M) pada keadaan jenuh (saturasi).

3.3.3 Variabel kontrol

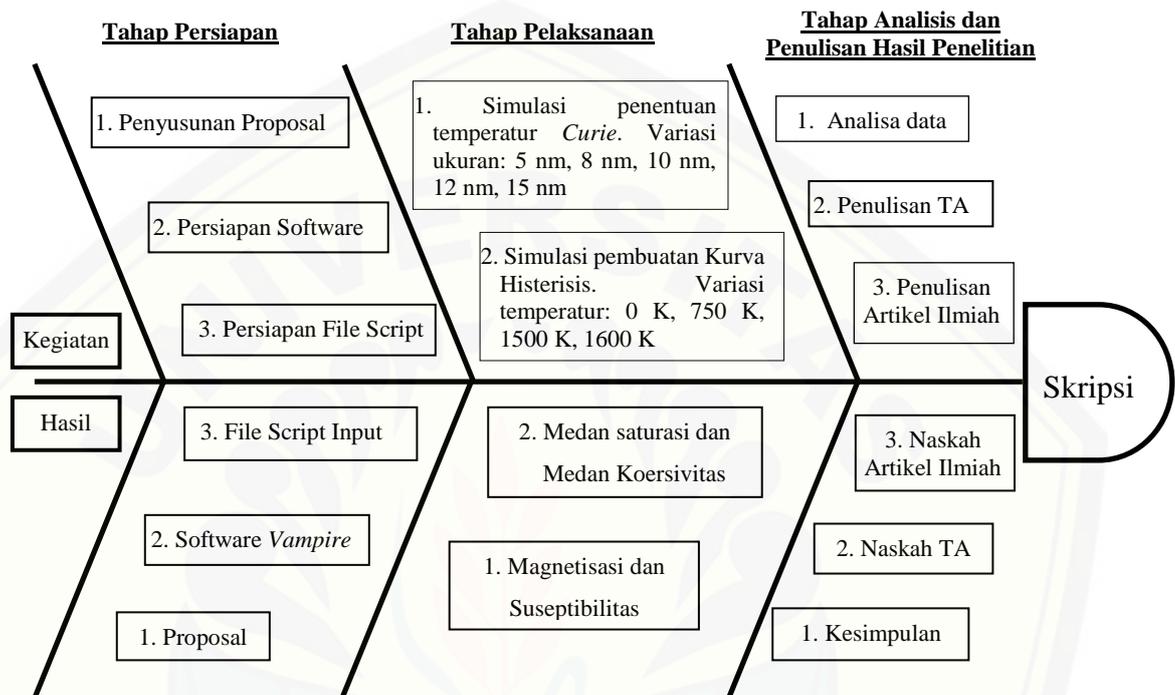
Variabel kontrol yaitu variabel yang diperoleh dari penelitian sebelumnya sebagai acuan dari penelitian yang saat ini dilakukan. Variabel kontrol dalam penelitian ini merupakan parameter yang digunakan untuk data input simulasi mikromagnetik pada *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$. Data parameter *input* ini dapat dilihat pada Tabel 3.3. Variabel kontrol pada penelitian ini didefinisikan sebagai berikut:

- a) Bentuk bahan yang digunakan yaitu kubus (*cube*), dengan memvariasikan ukuran sisi dari kubus tersebut.
- b) Unit sel, merupakan bagian terkecil dari *lattice* (susunan tiga dimensi dari titik *lattice* yang identik dengan sekelilingnya). Unit sel dideskripsikan sebagai tiga vector *a*, *b*, dan *c*, dimana unit sel CoFe adalah 2.886 \AA (Evans et al., 2013).
- c) Struktur kristal bahan yang digunakan yaitu FCC
- d) Komposisi bahan yang digunakan yaitu $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$
- e) Temperatur kontrol yang digunakan adalah 0 K, 328 K dan 1600 K (temperatur diatas nilai temperatur Curie) yang digunakan untuk pembuatan kurva histerisis.

3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

3.4.1 Diagram Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan secara umum digambarkan dalam diagram *fishbone* penelitian sebagai berikut:



Gambar 3.2 Diagram *fishbone* penelitian

3.4.2 Simulasi Mikromagnetik

Simulasi mikromagnetik dilakukan untuk menentukan temperatur *Curie*, suseptibilitas magnetik dan kurva histerisis pada bahan $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers*. Diperlukan parameter input yang berupa *file script input* dan *file script* bahan, dimana pada *file script input* berisi struktur bahan, unit sel, dan ukuran bahan. Sedangkan pada *file script* bahan berisi konstanta *exchange*, konstanta anisotropi, momen spin atom, serta konstanta uniaksial anisotropi. Simulasi mikromagnetik dapat dijalankan dengan memasukkan kedua parameter *input* tersebut dalam satu folder beserta program *Vampire*. Simulasi ini dilakukan dengan memvariasikan ukuran sisi kubus sebesar 5 nm, 8 nm, 10 nm, 12 nm, 15 nm. Kemudian untuk menentukan temperatur *Curie*, suseptibilitas magnetik dan kurva histerisis maka perlu melakukan plotting grafik menggunakan program *Origin*. Penentuan

temperatur *Curie* diperlukan penggabungan grafik antara grafik magnetisasi dengan temperatur dan grafik suseptibilitas dengan temperatur, seperti pada Gambar 3.5. Sedangkan untuk menentukan kurva histerisisnya diperlukan plotting grafik pemetaan magnetisasi material dengan besar medan magnetnya. Analisis arah spin domain bahan ditentukan dengan menggunakan *software Povray*, dengan mengubah terlebih dahulu *file output* yang dihasilkan dari bentuk *file .cfg* ke dalam bentuk *file povray* menggunakan *software Cygwin*. Setelah semua hasil diinterpretasikan, ditariklah suatu kesimpulan.

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Pembuatan *Script* untuk Simulasi

Simulasi dilakukan dengan membuat *file script input* dan *file script* bahan. *File script input* berisi struktur kristal, unit sel, ukuran bahan dan perintah simulasi. Temperatur kontrol yang digunakan adalah 0 K hingga 2000 K. Sedangkan pada *file script* bahan berisi parameter-parameter bahan CoFe, sebagaimana dapat dilihat pada tabel 3.3, dengan arah uniaxial anisotropi pada (1 1 0), faktor redaman $\alpha = 0.1$. Kedua file tersebut kemudian diletakkan dalam satu folder beserta *software Vampire 4.0* untuk melakukan *running* simulasi.

3.5.2 Geometri dan Ukuran Material Alloy $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *Double Layers*

Simulasi mikromagnetik dijalankan setelah membuat *file script input* dan *file script* material dan diletakkan pada satu folder beserta *software Vampire*. Pada simulasi ini menggunakan bentuk *double layers* (susunan atomnya berlapis), model *nanocube* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Komposisi bahan *alloy* CoFe yaitu Co sebesar 80% dan Fe sebesar 20 %, dengan memvariasikan ukuran bahan sebesar 5 nm, 8 nm, 10 nm, 12 nm, dan 15 nm. Data *output* digunakan untuk analisis data. Kemudian dari analisis tersebut ditentukan besarnya temperatur *Curie* yang menjadi dasar membuat kesimpulan.

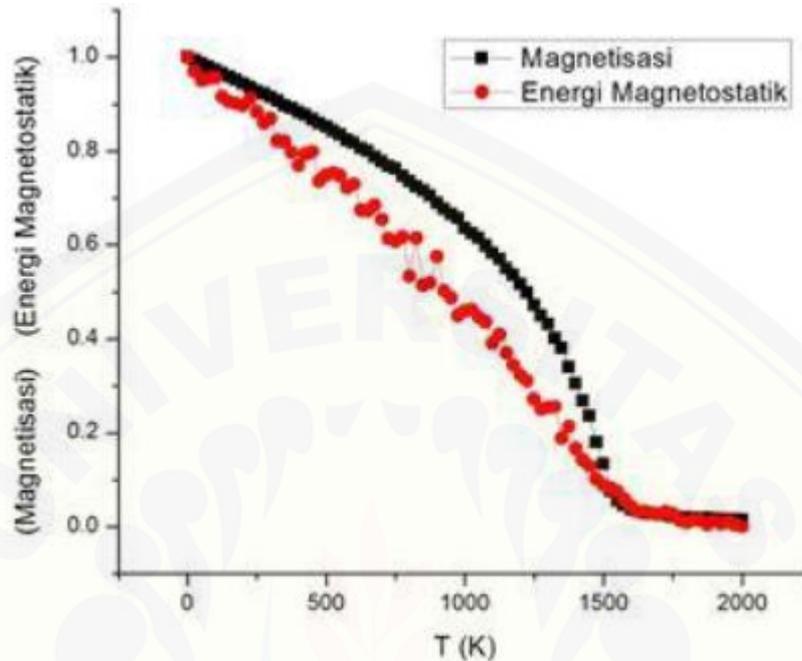


Gambar 3.3 Struktur material bentuk *double layers*

3.5.3 Analisis Data Temperatur Curie Material Alloy $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *Double Layers*

Simulasi mikromagnetik yang telah dilakukan menghasilkan file *output*, kemudian *output* dari program *Vampire* tersebut akan dianalisis menggunakan program origin untuk menentukan temperatur Curie. Analisis akan dilakukan dengan cara mengolah data *output* tersebut menjadi sebuah grafik yang menggambarkan hubungan antara magnetisasi dan temperatur. Hal ini dilakukan untuk melihat adanya perubahan nilai magnetisasi dari bahan $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ terhadap meningkatnya temperatur. Contoh grafik hubungan antara magnetisasi terhadap perubahan temperatur ditunjukkan pada Gambar 3.4. Cara untuk menentukan temperatur Curie yaitu dengan cara mengamati titik-titik antara kurva magnetisasi dan suseptibilitas terhadap temperatur. Ketika titik tersebut mendekati nol pada sumbu magnetisasi dengan nilai suseptibilitas magnetik tertinggi, dapat dikatakan titik tersebut merupakan nilai dari temperatur Curie bahan tersebut. Pada saat di atas temperatur Curie, maka material feromagnetik tersebut akan berubah menjadi material paramagnetik (Callister Jr dan Rethwisch, 2009). Penelitian mengenai bahan $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *random alloy* pernah dilakukan oleh Mulyani (2017) secara simulasi yang menghasilkan temperatur Curie sebesar 1500 K. Hasil dari simulasi nilai temperatur Curie tersebut akan dijadikan pembandingan untuk ketepatan simulasi pada penelitian ini. Untuk mengetahui keakurasian hasil penelitian, dapat digunakan persamaan 3.1.

$$\text{keakurasian} = \left(1 - \left(\frac{T_{C(\text{ref})} - T_{C(\text{exp})}}{T_{C(\text{ref})}} \right) \right) \times 100\% \quad (3.1)$$

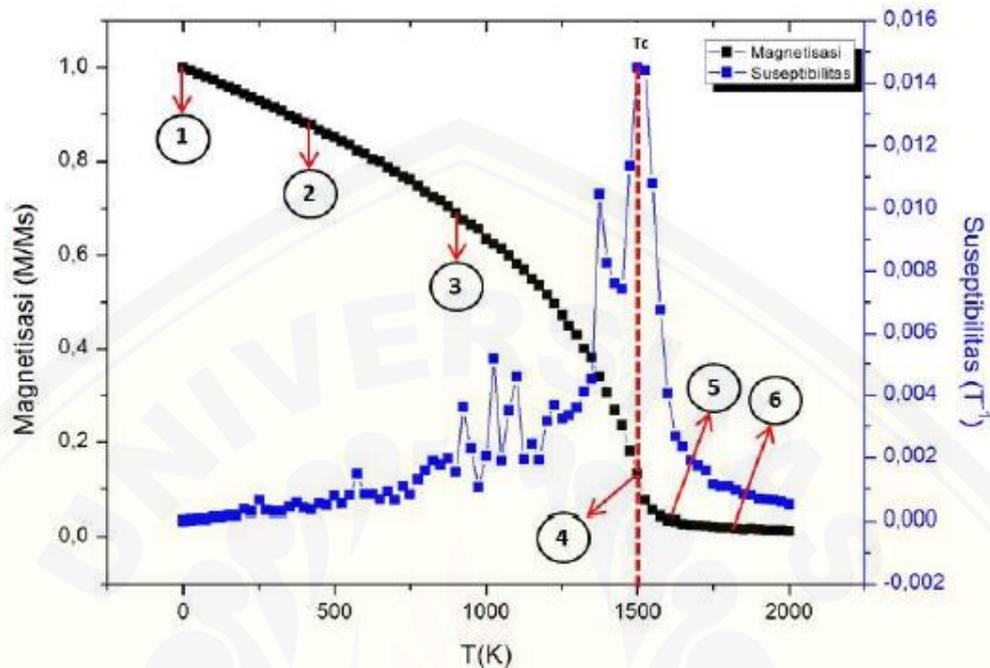


Gambar 3.4 Grafik hubungan antara magnetisasi dan temperatur material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ (Mulyani, 2017)

3.5.4 Analisis Grafik Hubungan Suseptibilitas dengan Temperatur

Simulasi mikromagnetik yang telah dilakukan menggunakan program *Vampire* akan menghasilkan *file output* yang kemudian akan dianalisa menggunakan program origin. Analisa dilakukan dengan cara membuat grafik hubungan antara suseptibilitas terhadap perubahan temperatur. Nilai suseptibilitas magnetik dari hasil penelitian, diamati berdasarkan perubahan temperatur, yaitu temperatur 0 K hingga 2000 K dengan kenaikan temperatur 25 K. Selanjutnya dari grafik tersebut akan diketahui pengaruh ukuran sisi kubus terhadap sifat magnetik material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ yang berbentuk *double layers*. Grafik suseptibilitas magnetik digunakan untuk menentukan nilai temperatur *Curie* lebih spesifik. Penggabungan antara kurva magnetisasi dan suseptibilitas terhadap temperatur, dimana nantinya nilai tertinggi terletak pada temperatur *Curie*-nya. Contoh grafik penentuan temperatur *Curie* material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *random alloy* berdasarkan

perubahan magnetisasi dan tingkat suseptibilitas magnetik dapat dilihat pada Gambar 3.5.

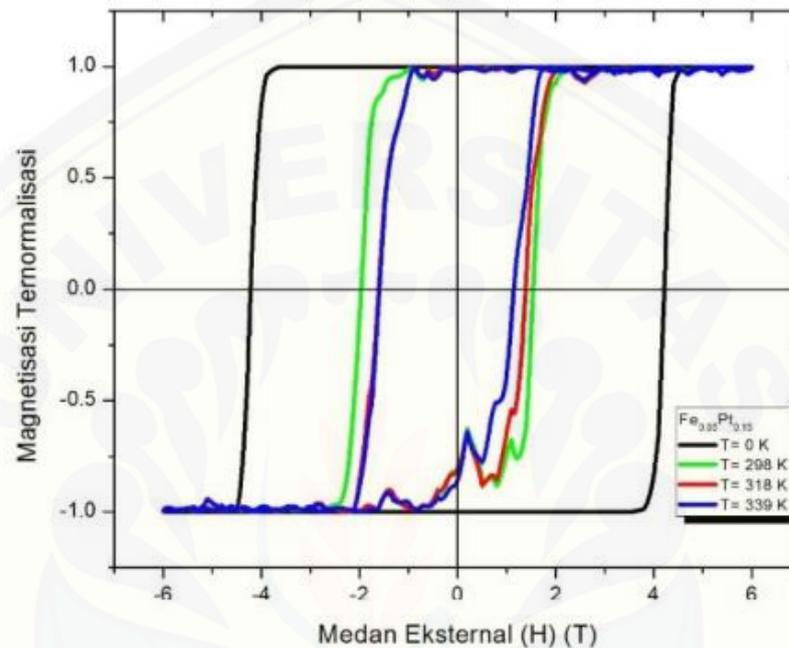


Gambar 3.5 Grafik hubungan magnetisasi dan suseptibilitas terhadap temperatur material alloy $Co_{80}Fe_{20}$ (Mulyani, 2017)

3.5.5 Analisis Kurva Histerisis

Kurva histerisis dibentuk menggunakan program origin, dimana program ini menganalisa data *output* berdasarkan karakteristik magnetik M dengan besar kuat medan eksternal yang diberikan terhadap material *alloy* $Co_{80}Fe_{20}$. Pada kurva histerisis dapat ditinjau sifat-sifat magnetik, nilai dari medan saturasi dan koersitivitas yang terbentuk dari bahan $Co_{80}Fe_{20}$. Besarnya nilai koersitivitas yang terbentuk pada kurva histerisis dapat dijadikan dasar untuk mengklarifikasi bahan $Co_{80}Fe_{20}$ tersebut bersifat *soft magnetic* atau *hard magnetic*. Apabila kurva histerisis tersebut berbentuk pipih atau tipis dan nilainya kurang dari 1 kA/m atau setara dengan 0,001254 T (Coey, 2010), maka bahan tersebut dapat digolongkan menjadi bahan *soft magnetic*. Sedangkan, bahan yang tergolong dalam bahan *hard magnetic* memiliki bentuk yang lebih lebar atau tebal dengan nilai koersitivitasnya lebih dari 10 kA/m atau setara dengan 0,0125 T (Furlani, 2001). Hubungan antara magnetisasi dengan medan luar secara simulasi ditunjukkan pada Gambar 3.6.

Apabila medan magnetik luar diberikan secara kontinu, maka harga magnetisasi yang dialami material akan membentuk lengkungan magnetisasi hingga mencapai titik saturasi. Kemudian jika nilai medan magnetik luar diperkecil, maka nilai magnetisasi yang dialami material tidak mengikuti lengkungan magnetisasi semula, melainkan membentuk garis berbeda (Mardiansyah, 2014).



Gambar 3.6 Grafik kurva histeresis material $Fe_{85}Pt_{15}$ dengan variasi temperatur (Rohman et. al., 2020)

3.5.6 Analisis Hasil Visualisasi Struktur Domain Material Alloy $Co_{80}Fe_{20}$ Double Layers

Analisa hasil simulasi (*output*) berformat *.cfg* pada folder simulasi yaitu dengan cara memvisualisasikan bentuk bahan menggunakan program *Povray*. *File output* yang berupa *.cfg* dikonversikan ke dalam bentuk *file Povray* menggunakan program *Cygwin*. Kemudian diambil beberapa sampel data dalam tiap komposisi untuk divisualisasi dengan keadaan dibawah temperatur Curie (0 K dan 328 K) dan diatas nilai temperatur Curie dari material alloy $Co_{80}Fe_{20}$ (1600K). Beberapa sampel tersebut digunakan untuk mengamati pengaruh perubahan temperatur terhadap struktur domain bahan. Kemudian dianalisis sifat bahan berdasarkan orientasi struktur domain material alloy $Co_{80}Fe_{20}$ double layers berdasarkan variasi ukuran yang diberikan.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian simulasi sifat-sifat magnetik material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* model *nanocube* dalam berbagai variasi ukuran sisi kubus maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh variasi ukuran sisi kubus pada material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* berdasarkan hasil simulasi, variasi ukuran sisi kubus mempengaruhi nilai temperatur Curie. Nilai temperatur Curie bahan $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran 5 nm dan 8 nm yaitu sebesar 1350 K. Pada ukuran di atas 10 nm sampai dengan 15 nm menghasilkan nilai temperatur Curie yang konstan yaitu bernilai 1400 K. Berdasarkan hasil dari penentuan nilai temperatur Curie maka ukuran terbaik yaitu pada material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ dengan ukuran 10 nm yang mendukung untuk penyimpanan data dengan kapasitas besar.
2. Karakteristik kurva histerisis dari material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* berdasarkan simulasi menunjukkan bahwa terdapat perubahan nilai medan koersivitas dan medan saturasi terhadap variasi ukuran sisi kubus yang diberikan. Semakin meningkatnya ukuran sisi kubus maka medan koersivitas dan medan saturasi yang dihasilkan semakin meningkat pula. Pada pola pertama (0 K) dan pola kedua (328 K) diperoleh nilai medan koersivitas dan medan saturasi dari kurva histerisis. Sedangkan pada pola ketiga ketika temperatur di atas nilai temperatur Curie dari material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$, maka kurva histerisis mengalami kerusakan. Pada material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ nilai medan koersivitas dan medan saturasi tertinggi terletak pada ukuran sisi kubus sebesar 12 nm. Material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* termasuk *hard magnetic*, karena medan koersivitas hasil simulasi lebih dari 10 kA/m atau setara dengan 0,0125 T.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diketahui nilai temperatur Curie, karakteristik kurva histerisis dan juga struktur domain dari material $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* berbentuk kubus dengan menggunakan simulasi mikromagnetik. Namun terdapat beberapa hal yang masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut, diantaranya dengan melakukan penentuan nilai temperatur Curie dengan penggabungan grafik yang berbeda agar diperoleh nilai temperatur Curie yang lebih akurat. Penggabungan grafik lain yaitu, grafik hubungan antara magnetisasi terhadap temperatur dan grafik hubungan antara energi anisotropi ternormalisasi terhadap temperatur, grafik hubungan antara magnetisasi terhadap temperatur dan grafik antara energi *exchange* ternormalisasi terhadap temperatur, dan grafik hubungan antara magnetisasi terhadap temperatur dan grafik antara energi magnetostatik ternormalisasi terhadap temperatur. Selain itu juga dapat dilakukan penelitian lebih lanjut dengan bentuk yang berbeda seperti *nanosphere*.

DAFTAR PUSTAKA

- Afza, E. 2011. Pembuatan Magnet Permanent Ba-Hexa Ferrite (Ba_{0.6}Fe_{2.0}O₃) Dengan Metode Koopresipitasi Dan Karakterisasinya. *Skripsi*.
- Arifin, S. 2016. Studi Sifat–Sifat Magnetik Material Feromagnetik Co (1-X) Ni (X) Random Alloy dan Double Layers dalam Berbagai Komposisi Bahan Co dan Ni.
- Asrofi, dan B. E. Purnama. 2013. Rancang Bangun Alat Kontrol Otomatis Pendingin Komputer Berbasis Mikrokontroler ATMEGA8L. 2.
- Astari, R. R. 2010. Pengaruh Variasi Komposisi dan Proses Pendinginan Terhadap Karakteristik Magnet Barrium Ferrite. *Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Babalola, O. A., A. B. Alabi, dan T. Akomolafe. 2010. Microstructural Analysis of Zinc-Clay Cermet Resistors. *Research* 2(3): 48-55.
- Baibich, M. N., J. M. Broto, A. Fert, F. N. Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, dan J. J. P. r. I. Chazelas. 1988. Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices. 61 (21): 2472.
- Billah, A. 2006. Pembuatan dan Karakterisasi Magnet Stronsium Ferit dengan Bahan Dasar Pasir Besi, Universitas Negeri Semarang.
- Borg, R. J., dan G. J. Dienes. 1992. *The physical chemistry of solids*. Academic Press:
- Callister Jr, W. D., dan D. G. Rethwisch. 2009. *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. John Wiley & Sons:
- Chaudhary, R., dan A. Kansal. 2015. A perspective on the future of the magnetic hard disk drive (HDD) technology. *International Journal of Technical Research and Applications* 3 (3): 63-74.
- Chung, Y.-W. 2006. *Introduction to Materials Science and Engineering*. 1st Ed.: CRC Press:
- Coey, J. M. 2010. *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge university press:
- Dini, A. A. 2013. Pngukuran Medan Magnetik Batuan Menggunakan Sensor Fluxgate. *Pillar of Physics* 2 (1).
- Djuhana, D., N. W, dan O. D. K. H. 2013. Analisis Spektrum Suseptibilitas dan Struktur Domain Magnet dengan Modeling Time Resolved Imaging

Mikromagnetik dan Pengukuran Absorpsi Gelombang Mikro Menggunakan Vector Network Analyzer (VNA) pada Material Nanoferromagnet.

Dobisz, E. A., Z. Z. Bandic, T.-W. Wu, dan T. Albrecht. 2008. Patterned media: nanofabrication challenges of future disk drives. *Proceedings of the IEEE* 96 (11): 1836-1846.

Evans, R. F. L., dan A. Biternas. 2014. *Vampire User manual : Software Version 4.0*. York: The University of York, York, YO10 5DD:

Evans, R. F. L., P. C. W. J. Fan, T. A. Ostler, M. O. A. Ellis, dan R. W. Chantrell. 2013. *Atomistic Spin Model Simulations of Magnetic Nanomaterials*, York, Department of Physics, The University of York.

Frei, E., S. Shtrikman, dan D. Treves. 1957. Critical size and nucleation field of ideal ferromagnetic particles. *Physical Review* 106 (3): 446.

Fukuma, Y., Z. Lu, H. Fujiwara, G. Mankey, W. Butler, dan S. Matsunuma. 2009. Strong uniaxial magnetic anisotropy in CoFe films on obliquely sputtered Ru underlayer. *American Institute of Physics*.

Furlani, E. P. 2001. *Permanent magnet and electromechanical devices: materials, analysis, and applications*. Academic press:

Halliday, D., R. Resnick, dan J. Walker. 2013. *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons:

Ida, N. 2004. *Engineering Electromagnetics*. USA: Springer:

Ismail. 2013. *Studi Micromagnetik Proses Magnetisasi dan Spektrum Suseptibilitas Ferromagnetik Elemen Diamond-Shaped*, Depok, Universitas Indonesia.

Istiyono, E. 2009. *Analisis Sifat Magnetik Bahan Yang Mengalami Proses Annealing dan Quenching*.

Jesús, S.-D., A. Bolarín-Miró, C. Cortés Escobedo, G. Torres-Villaseñor, dan P. Vera-Serna. 2016. Structural analysis and magnetic properties of FeCo alloys obtained by mechanical alloying. *Journal of Metallurgy* 2016.

Julia, F. 2011. *Pengaruh Waktu Sonikasi Terhadap Ukuran Partikel dan Sifat Magnet pada Pembuatan Bonded Magnet NdFeB*. *Skripsi*.

Khadra, G. 2015. *Magnetic and structural properties of size-selected FeCo nanoparticle assemblies*.

Kittel, C. 2005. *Introduction to solid state physics, eight editions, library of congress cataloging*. USA.

- Kraus, B. S. 1970. Obituary. *American Journal of Physisc Anthropology*: 1-8.
- MacLaren, J., T. Schulthess, W. Butler, R. Sutton, dan M. McHenry. 1999. Electronic structure, exchange interactions, and Curie temperature of FeCo. *Journal of applied physics* 85 (8): 4833-4835.
- Mangonon, P. L. 1999. *The principles of materials selection for engineering design*. Prentice Hall:
- Mardiansyah, D. 2014. Analisa Sifat Ferromagnetik Material Menggunakan Metode Monte Carlo. *Edu Research* 2 (2): 65-74.
- Mufit, F. 2013. Kaitan Sifat Magnetik Dengan Tingkat Kehitaman (Darkness) Pasir Besi di Pantai Masang Sumatera Barat. *EKSAKTA* 2.
- Mulyani, Y. T. 2017. Investigasi Sifat-Sifat Mganetik Alloy Co (1-x) Fex Nanocube dan Nanosphere dalam Variasi Komposisi Fe (x). *Skripsi*.
- Norita. 2008. Studi Sifat-Sifat Listrik Bahan Magnetik FeSi, Depok, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.
- Novitasari, S. 2019. Simulasi Sifat-Sifat Magnetik Material Co 0.81 Ni 0.2 Random Alloy dan Double Layers dalam Berbagai Variasi Ukuran Sisi Kubus. *Skripsi*.
- Nursiyanto, W., dan L. Rohman. 2017. Analisis Diameter Kritis dan Suhu Curie Bahan Parmalloy Fecob Berbentuk Bola-Nano serta Pengaruh Temperatur (Heat Assisted) dengan Menggunakan Program Simulasi Mikromagnetik Nmag dan Vampire. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya* 2 (3): 187-194.
- Okimustava, dan R. Oktova. 2009. Penentuan Suhu Curie Besi dengan Menggunakan Kawat Berarus Listrik. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya* 5: 1-6.
- Peng, S., M. Wang, H. Yang, L. Zeng, J. Nan, J. Zhou, Y. Zhang, A. Hallal, M. Chshiev, dan K. L. Wang. 2015. Origin of interfacial perpendicular magnetic anisotropy in MgO/CoFe/metallic capping layer structures. *Scientific reports* 5: 18173.
- Popova, A. N., Y. A. Zaharov, dan V. M. Pugachev. 2012. Chemical synthesis, structure and magnetic properties of nanocrystalline Fe-Co alloys. *Materials Letters* 74: 173-175.
- Puri, R., dan V. Babbar. 2008. *Solid state physics and electronics*. S. Chand Publishing:
- Rodríguez, A. F., A. Kleibert, J. Bansmann, A. Voitekans, L. Heyderman, dan F. J. P. r. l. Nolting. 2010. Size-dependent spin structures in iron nanoparticles. *104* (12): 127201.

- Rohman, L. 2013. Investigasi Sifat-sifat Magnetik Bahan LSMO ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$) untuk Aplikasi Storage Device dengan Menggunakan Modeling Mikromagnetik.
- Rohman, L., E. Purwandari, I. Romadhony, dan D. Djuhana. 2020. Magnetic Properties of FePt Material Influenced by Heat-Assisted Using Micromagnetic Simulation, *Proceedings of Journal of Physics: Conference Series*, 1491 (1). IOP Publishing: 012013.
- Santi, W. N., A. A. Artanti, E. Suharyadi, T. Kato, dan S. Iwata. 2015. Kajian Sifat Kemagnetan pada Nanopartikel Cobalt Ferrite (CoFe_2O_4) yang dicoating dengan Polyethylene Glykol (PEG-4000) dan Silika (Halaman 103 sd 107). *Jurnal Fisika Indonesia* 18 (54).
- Sudjatmoko. 2005. Kajian Sifat Bahan Lapisan Tipis Feromagnetik NiFe_{1-x} Hasil Deposisi Dengan Teknik Evaporasi Hampa. *GANENDRA Majalah IPTEK Nuklir* 8 (2).
- Sun, S., C. B. Murray, D. Weller, L. Folks, dan A. J. s. Moser. 2000. Monodisperse FePt nanoparticles and ferromagnetic FePt nanocrystal superlattices. 287 (5460): 1989-1992.
- Sung, H., dan C. Rudowicz. 2003. Physics behind the magnetic hysteresis loop—a survey of misconceptions in magnetism literature. *Journal of magnetism and magnetic materials* 260 (1-2): 250-260.
- Suryatin, B. 2008. *Fisika IX*. Jakarta: PT Grafindo:
- Tri, M. A. 2015. Preparation and measurement of hysteresis curve FeCoNi thin film for the application of electromagnet design.
- Vernyhora, I. 2009. Modélisation à l'échelle atomique de l'évolution microstructurale dans les alliages Ni-Fe: Corrélation entre les propriétés magnétiques et structurales.
- Wahyuningsih, A. E. 2018. Analisis Temperatur Curie Dan Kurva Histerisis Material Alloy Co (1-X) Pt (X) Model Nanocube Dengan Simulasi Mikromagnetik.
- Warsiti. 2005. Studi Pengaruh suhu *Annealing* terhadap Struktur Kristal dan Magnetoresistansi *Permalloy* NiFe Hasil Elektrodeposisi. *Skripsi*.
- Weller, D., dan M. F. Doerner. 2000. Extremely high-density longitudinal magnetic recording media. *Annual review of materials science* 30 (1): 611-644.
- Widodo, A. T. 2013. Studi Mikromagnetik Dinamika Struktur Domain pada Material Feromagnetik Py, Ni, Fe, dan Co Model Nanosphere, Jakarta, Universitas Jakarta.

Yani, A., R. Ridwan, dan M. Mujamilah. 2019. Simulasi Histerisis pada Bahan Feromagnetik dengan Model JILES-ATHERTON. *Jurnal Sains Materi Indonesia*: 85-90.



LAMPIRAN

Lampiran 4.1 Perhitungan Keakurasian Penelitian Temperatur Curie Material Alloy $Co_{80}Fe_{20}$ Double Layers pada Ukuran Sisi Kubus 5 nm

$$keakurasian = \left(1 - \left(\frac{T_{C(ref)} - T_{C(exp)}}{T_{C(ref)}} \right) \right) \times 100\%$$

$$keakurasian = \left(1 - \left(\frac{1500 K - 1350 K}{1500 K} \right) \right) \times 100\%$$

$$keakurasian = \left(1 - \left(\frac{150 K}{1500 K} \right) \right) \times 100\%$$

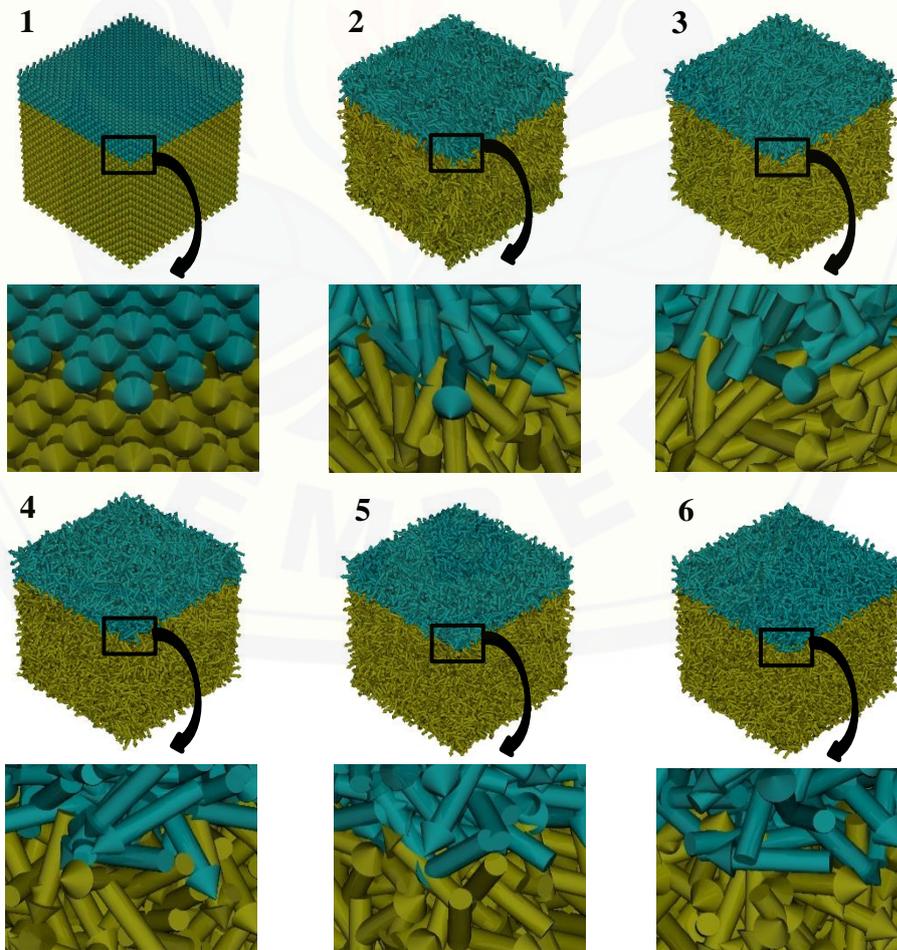
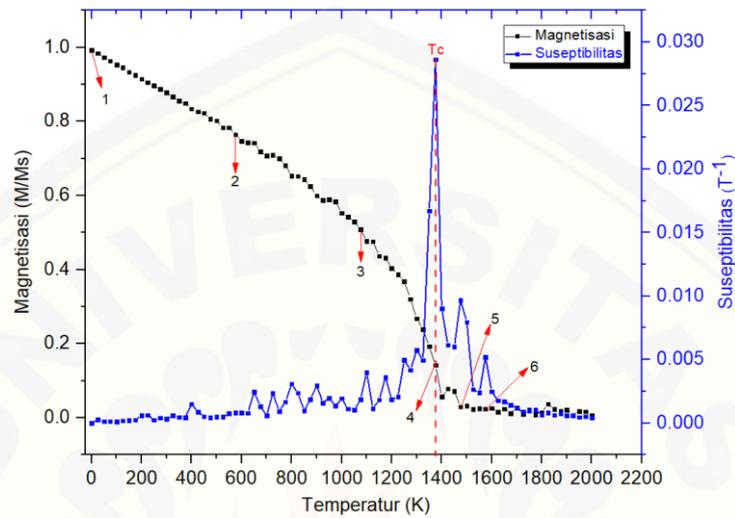
$$keakurasian = \left(1 - \left(\frac{150 K}{1500 K} \right) \right) \times 100\%$$

$$keakurasian = (1 - 0,1) \times 100\%$$

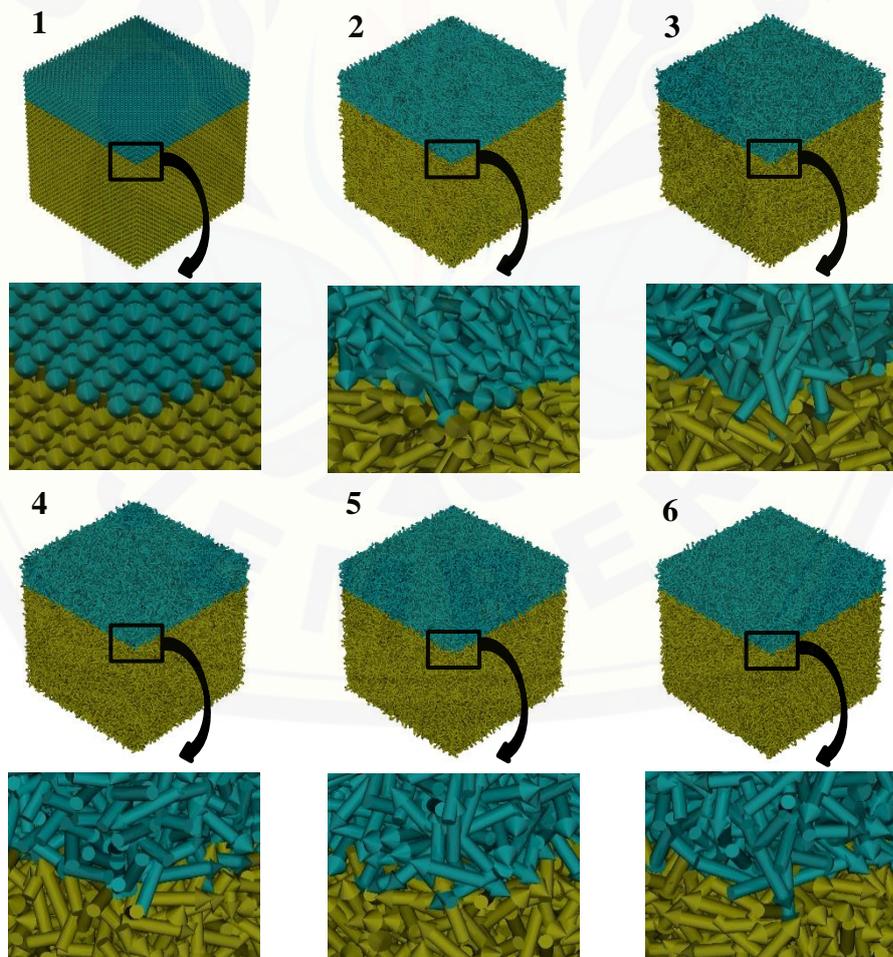
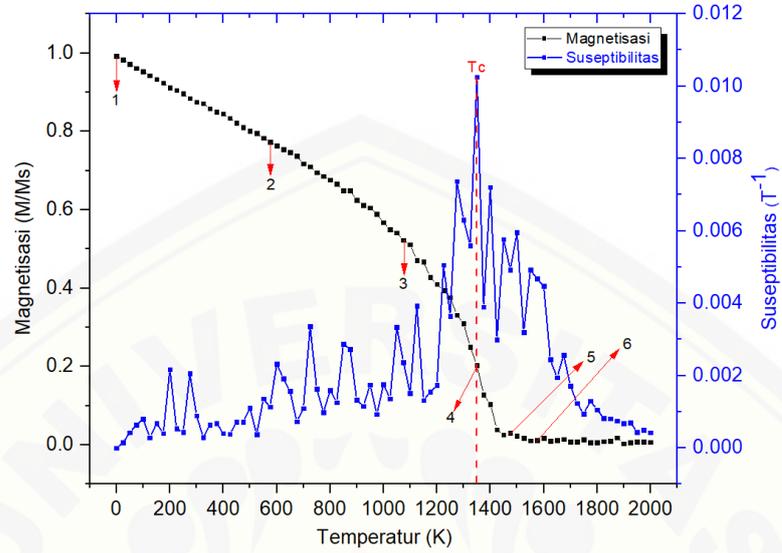
$$keakurasian = 90 \%$$

Lampiran 4.2 Visualisasi Struktur Domain Material Alloy $Co_{80}Fe_{20}$ Double Layers Berdasarkan perubahan Temperatur pada Analisis Temperatur Curie

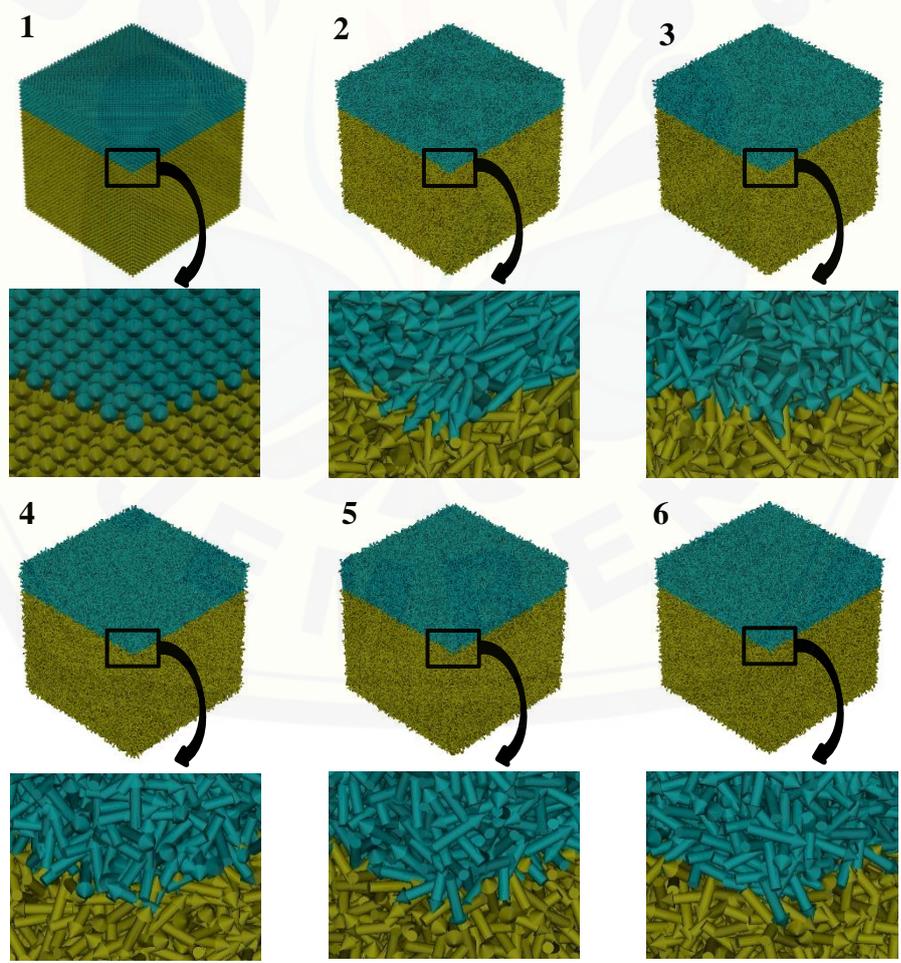
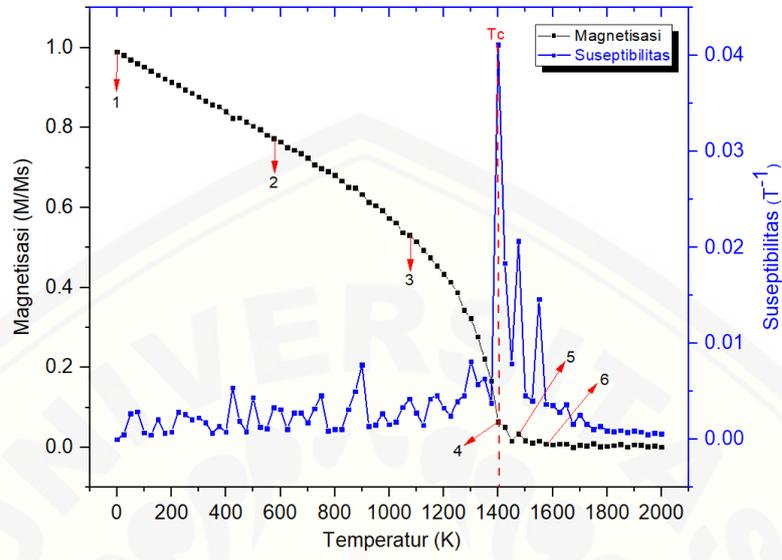
1. Struktur Domain material alloy $Co_{80}Fe_{20}$ double layers pada ukuran sisi kubus 5 nm



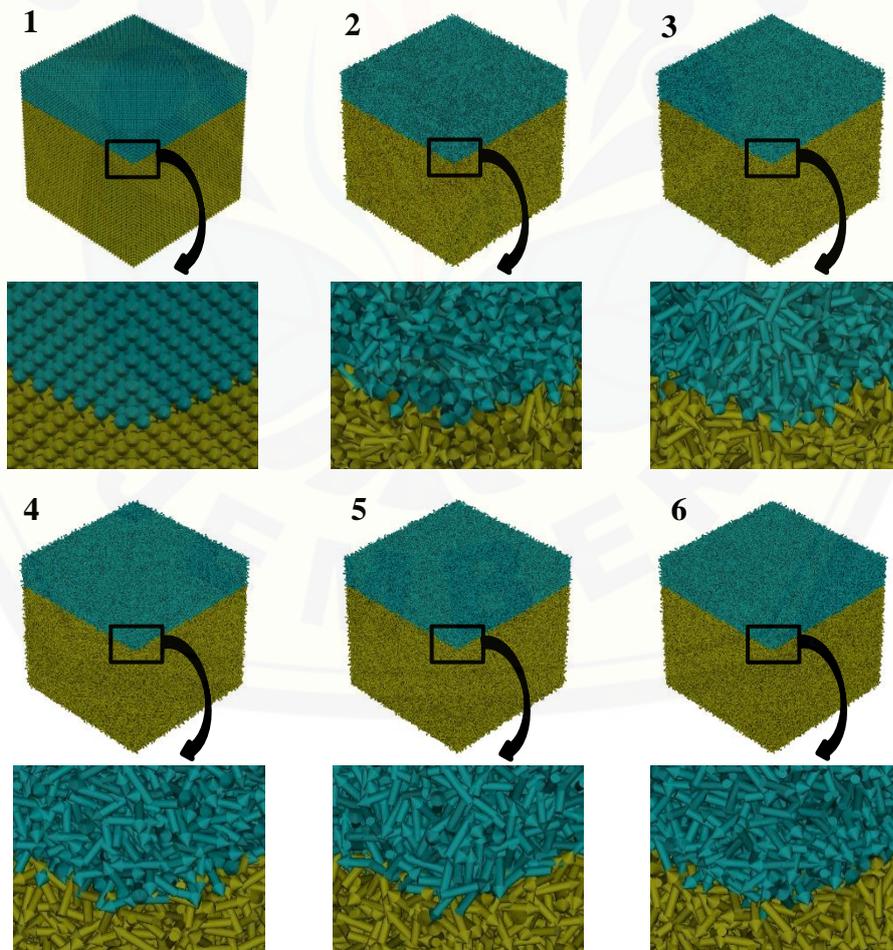
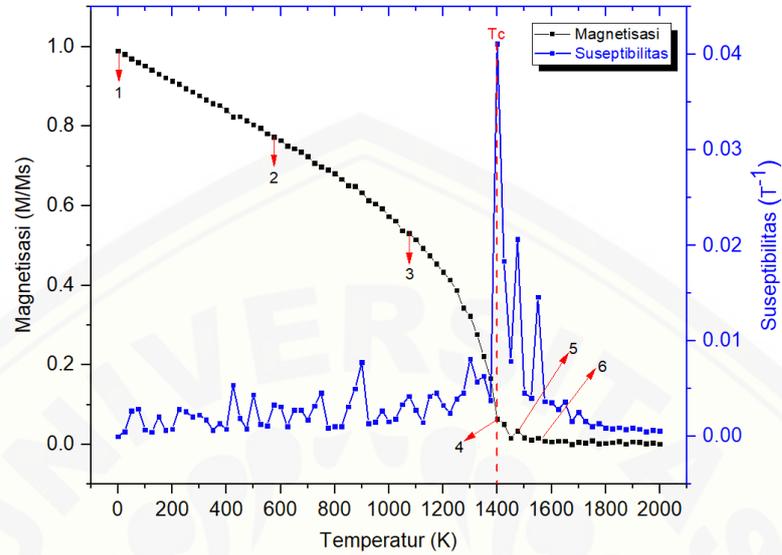
2. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 8 nm



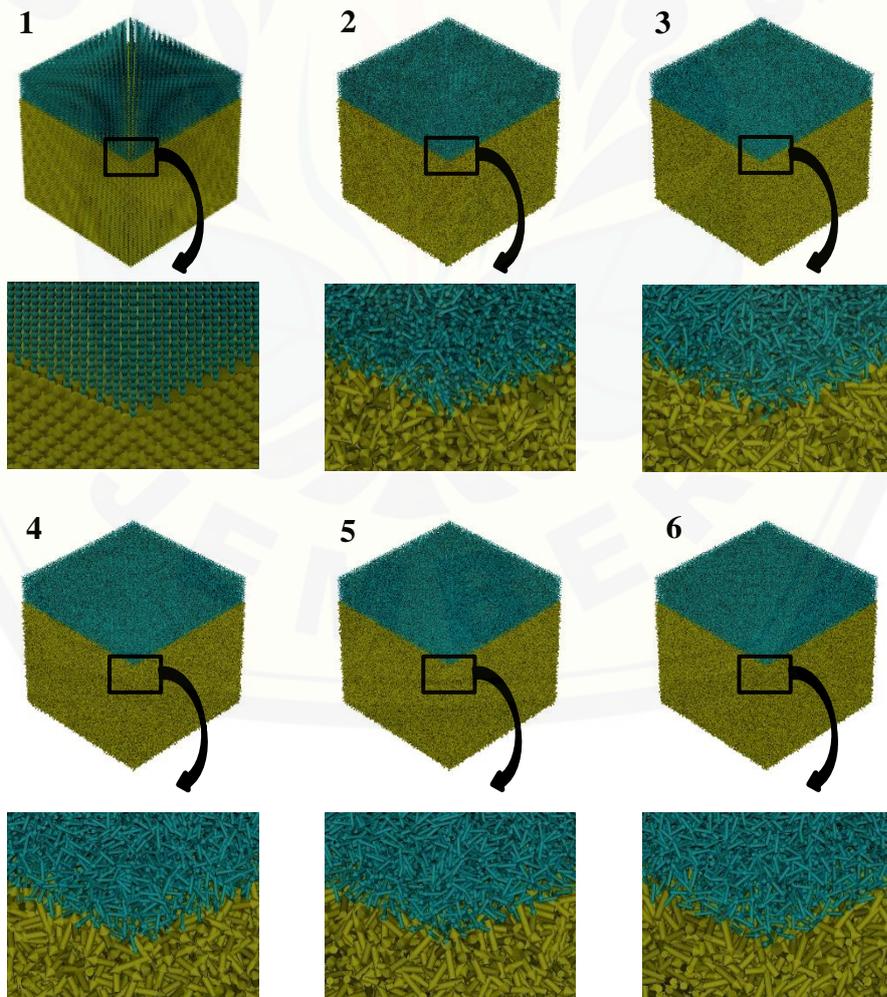
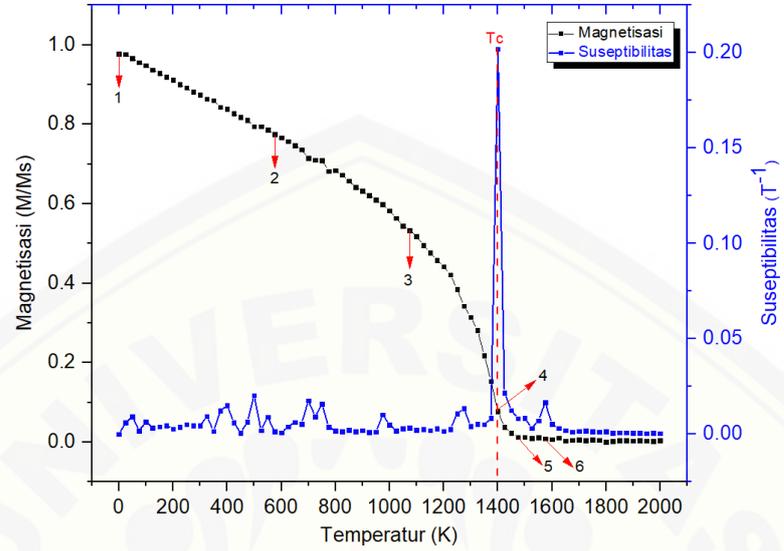
3. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 10 nm



4. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 12 nm

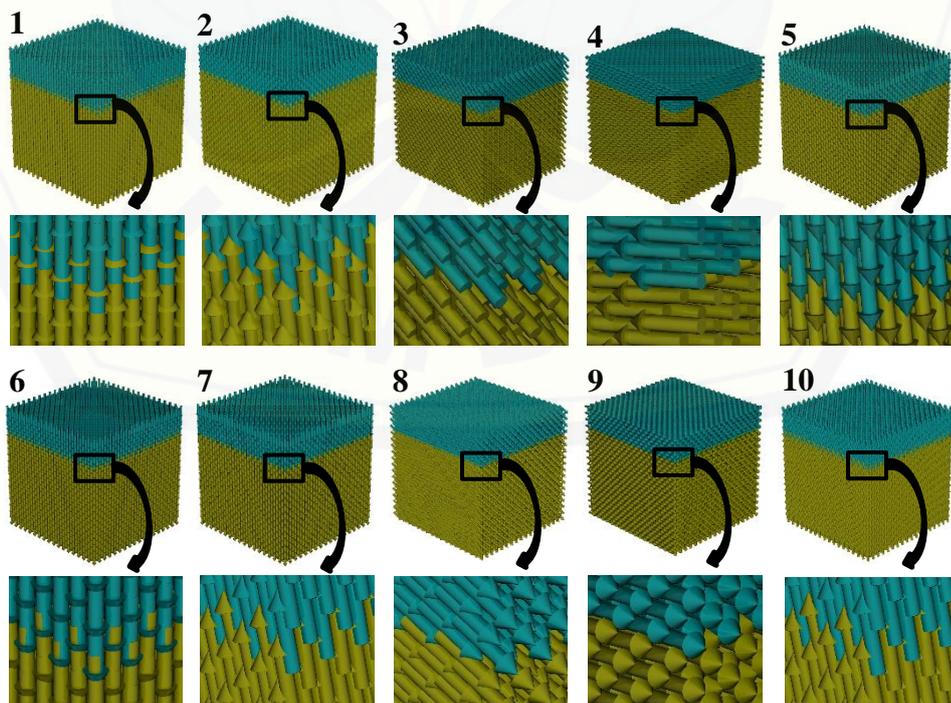
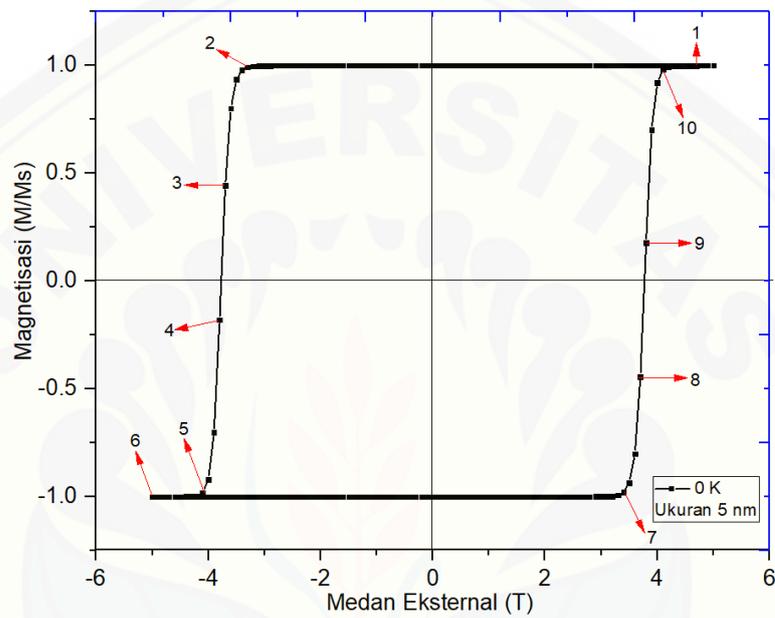


5. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 15 nm

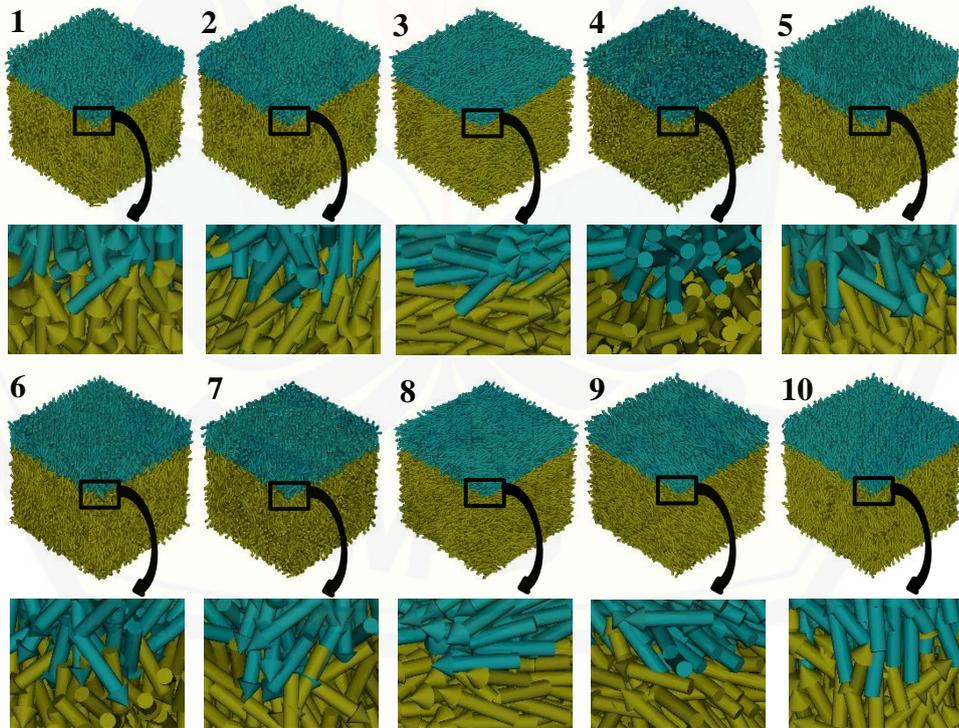
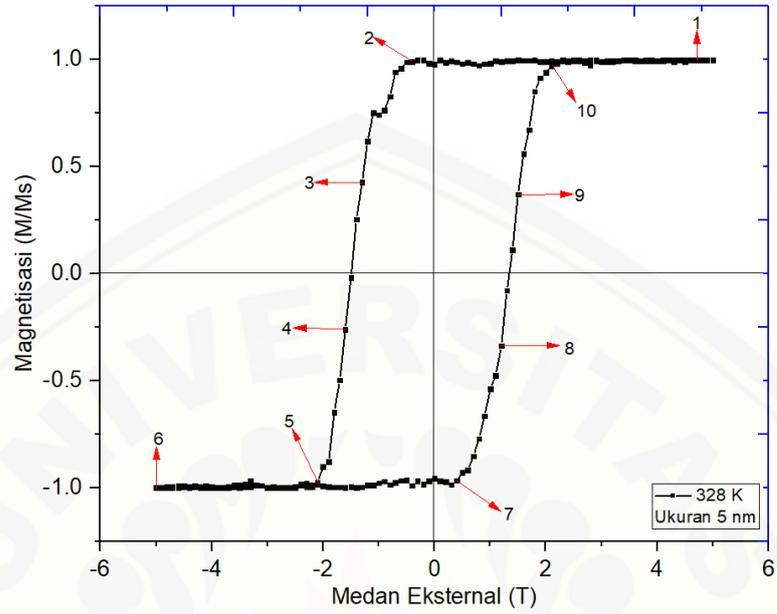


Lampiran 4.3 Visualisasi Struktur Domain Material Alloy $Co_{80}Fe_{20}$ Double Layers Berdasarkan perubahan Temperatur pada Analisis Kurva Histerisis

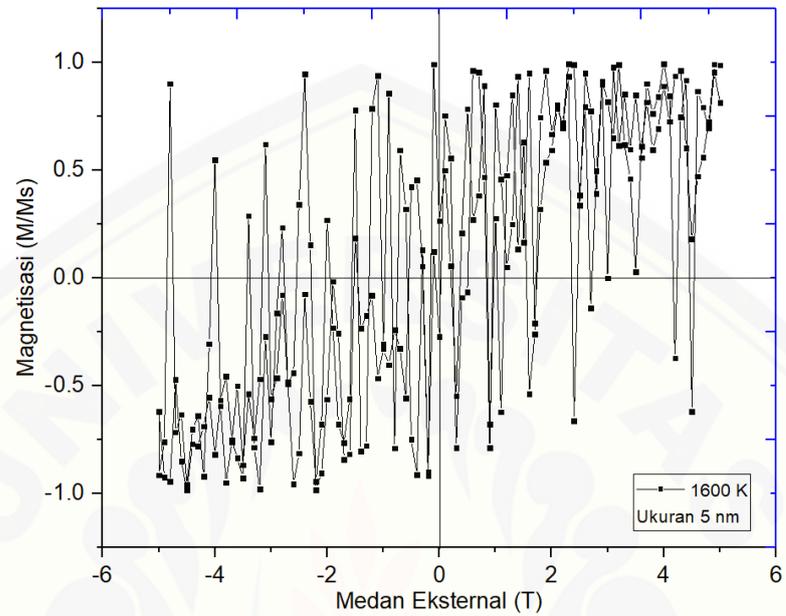
1. Struktur Domain material alloy $Co_{80}Fe_{20}$ double layers pada ukuran sisi kubus 5 nm
 - a. Struktur Domain material alloy $Co_{80}Fe_{20}$ double layers pada ukuran sisi kubus 5 nm dengan temperatur 0 Kelvin



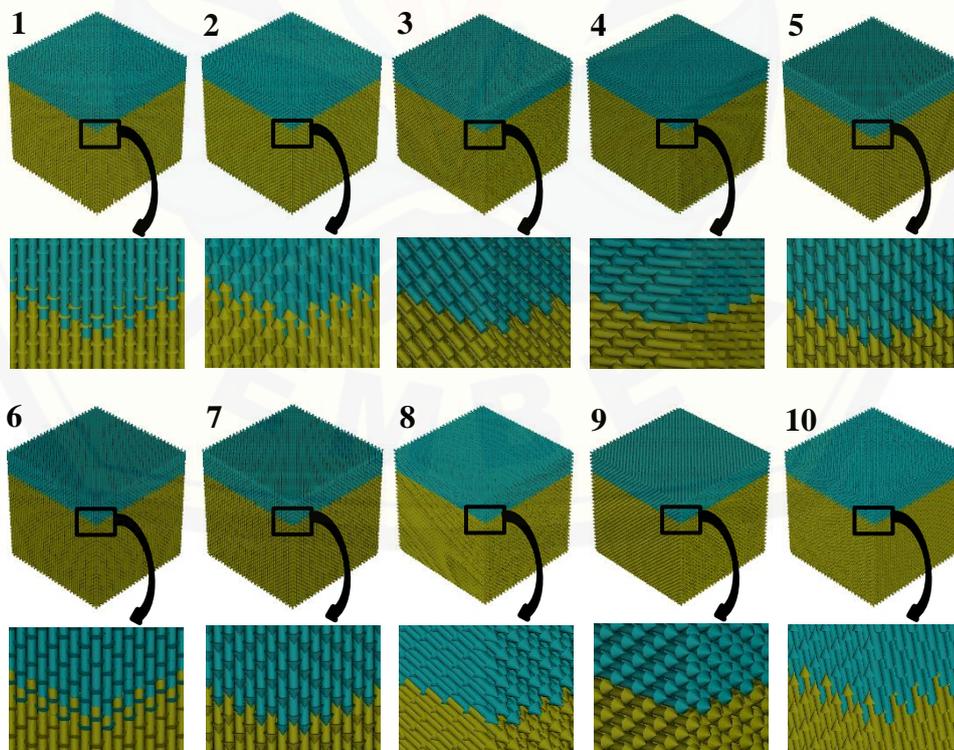
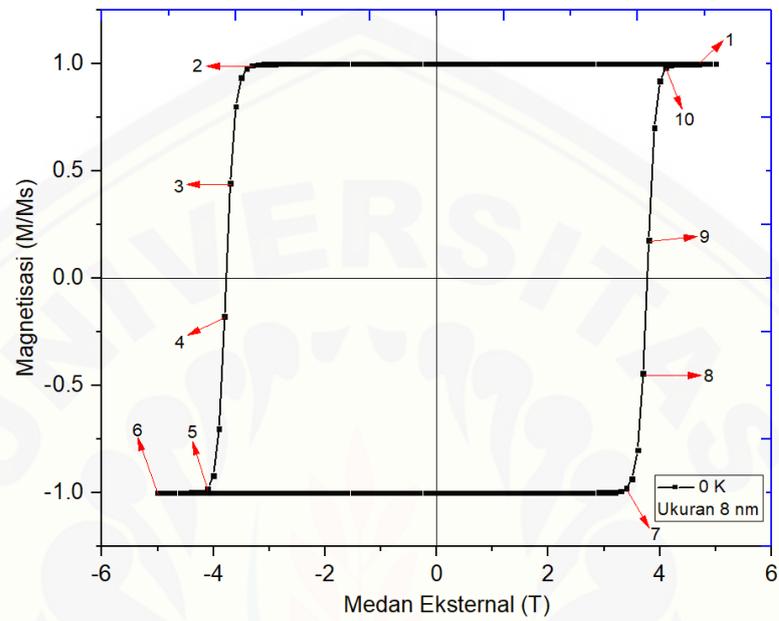
b. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 5 nm dengan temperatur 328 Kelvin



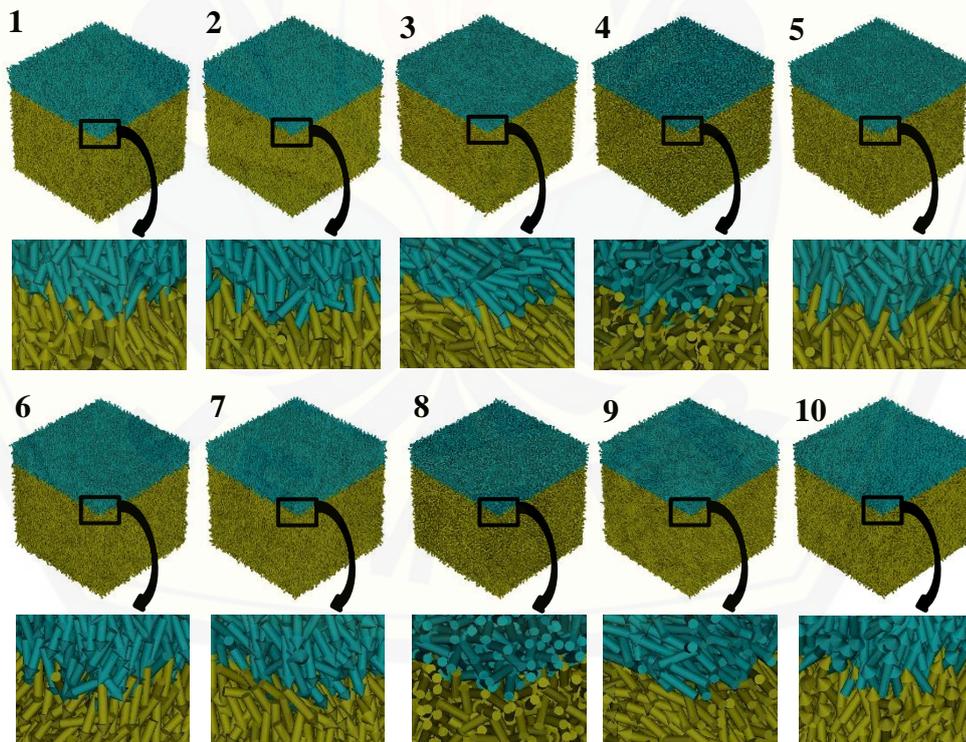
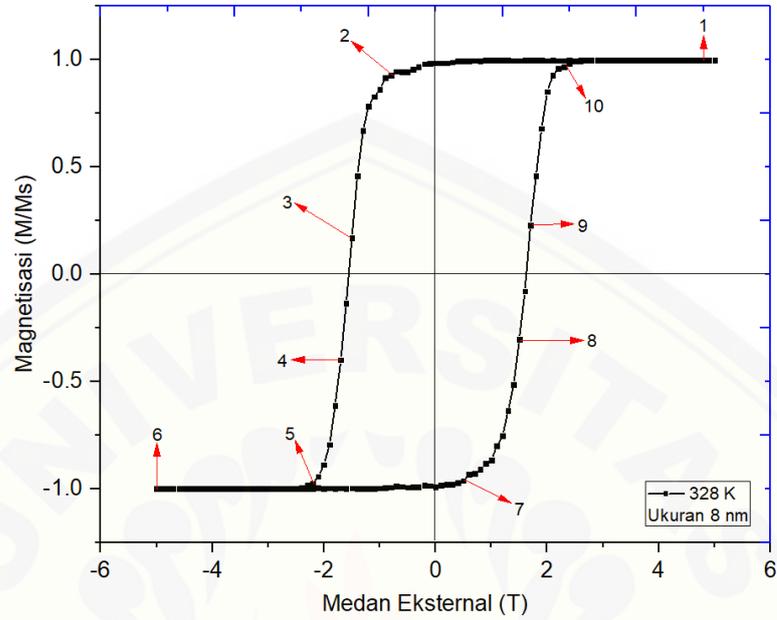
- c. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 5 nm dengan temperatur 1600 Kelvin



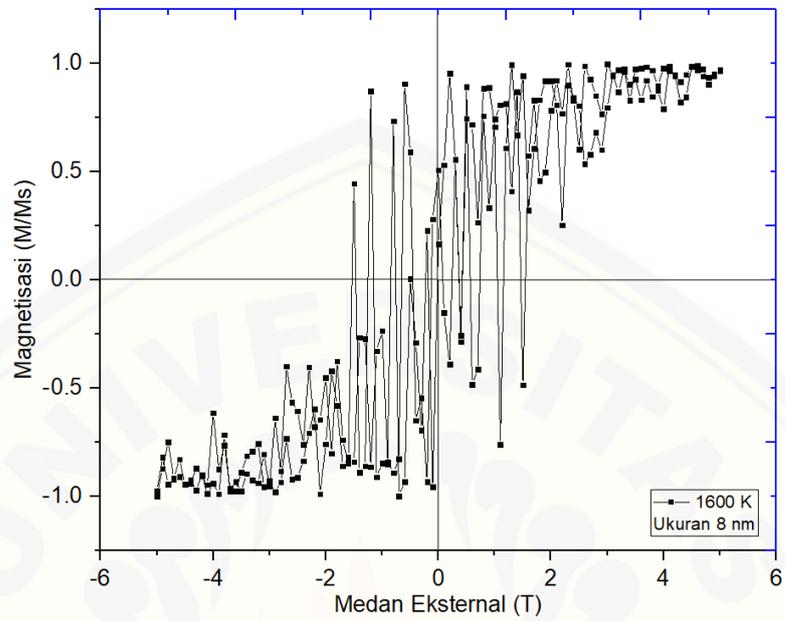
2. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 8 nm
 - a. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 8 nm dengan temperatur 0 Kelvin



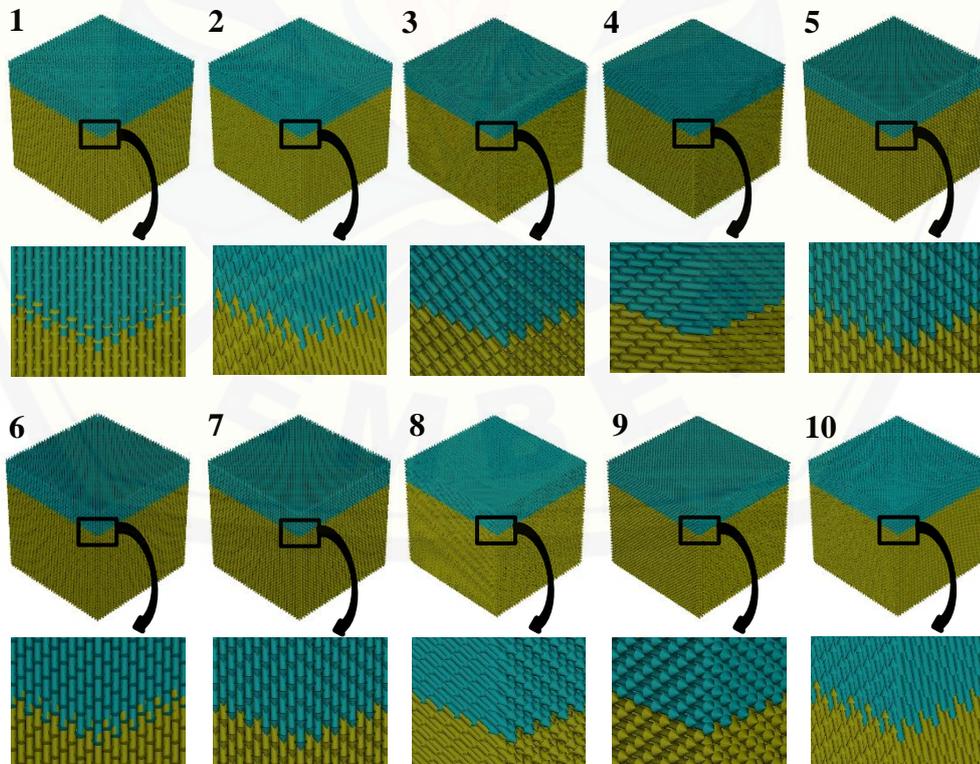
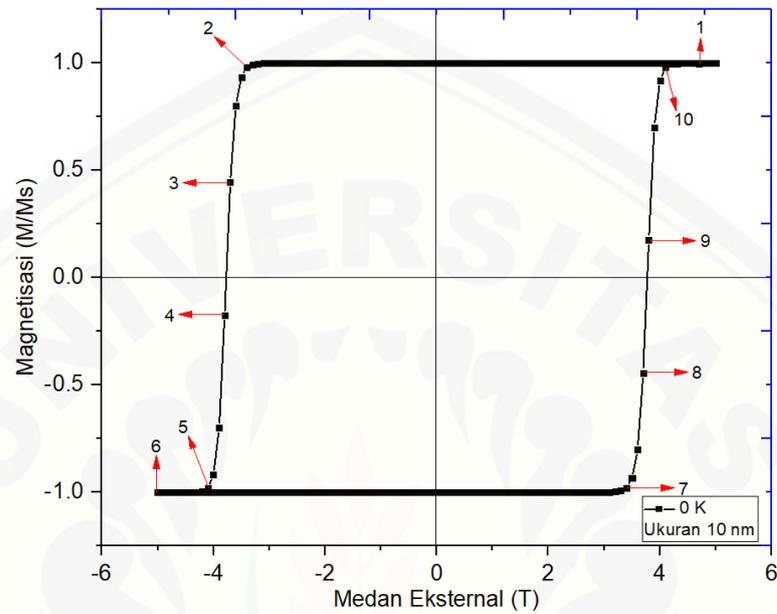
b. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 8 nm dengan temperatur 328 Kelvin



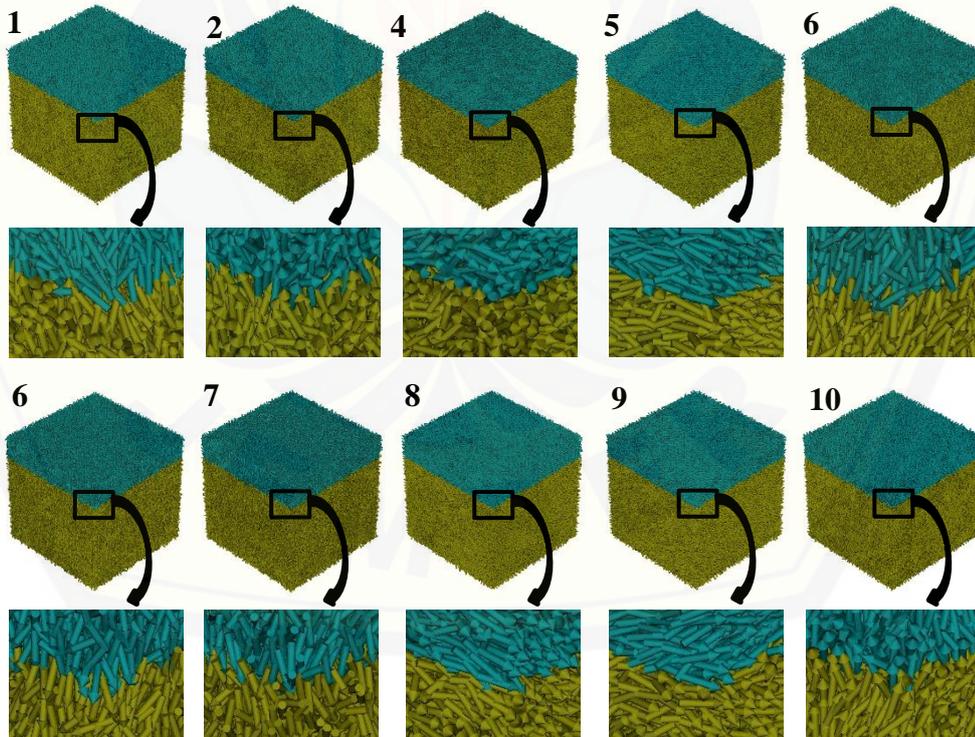
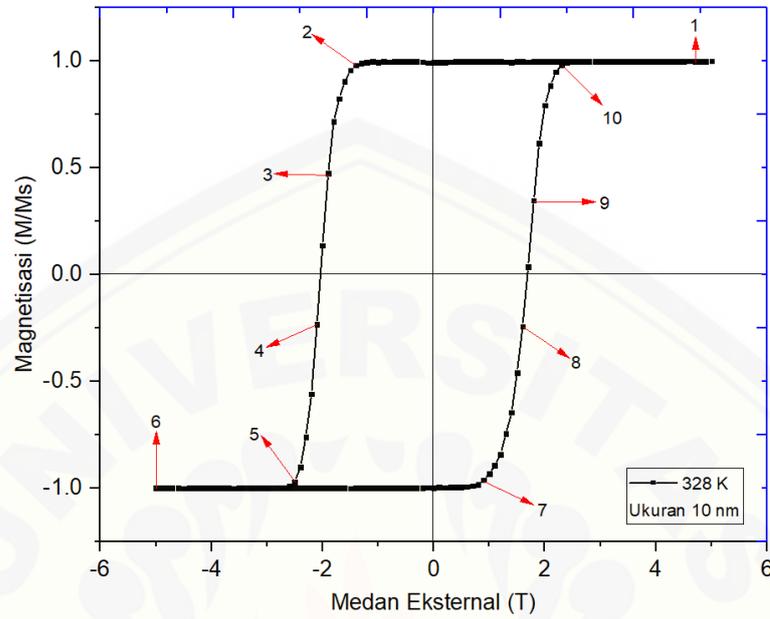
- c. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 8 nm dengan temperatur 1600 Kelvin



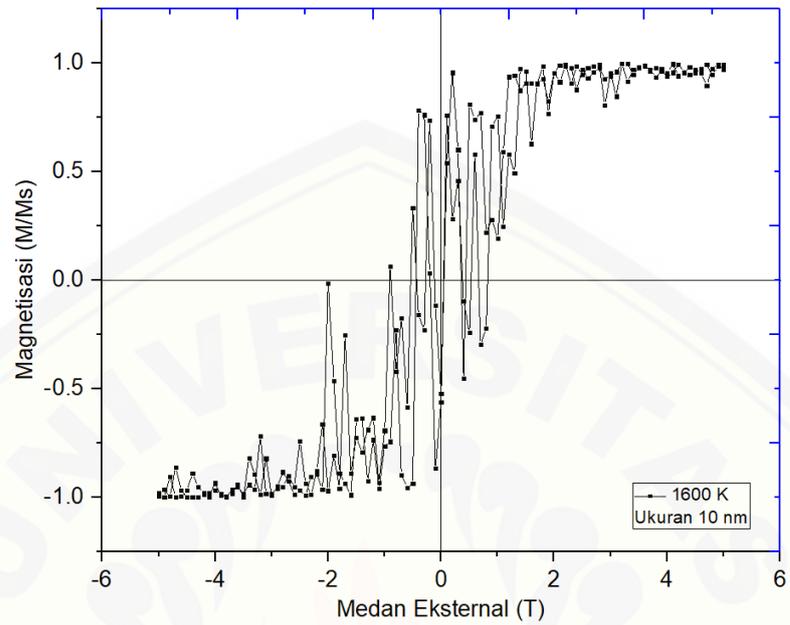
3. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 10 nm
 - a. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 10 nm dengan temperatur 0 Kelvin



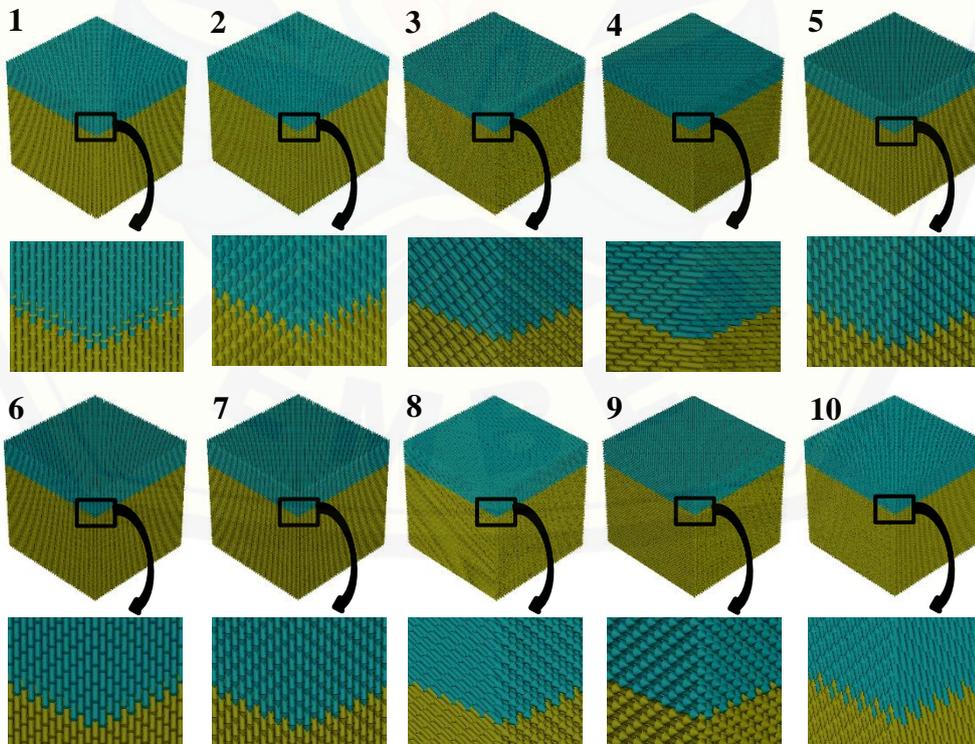
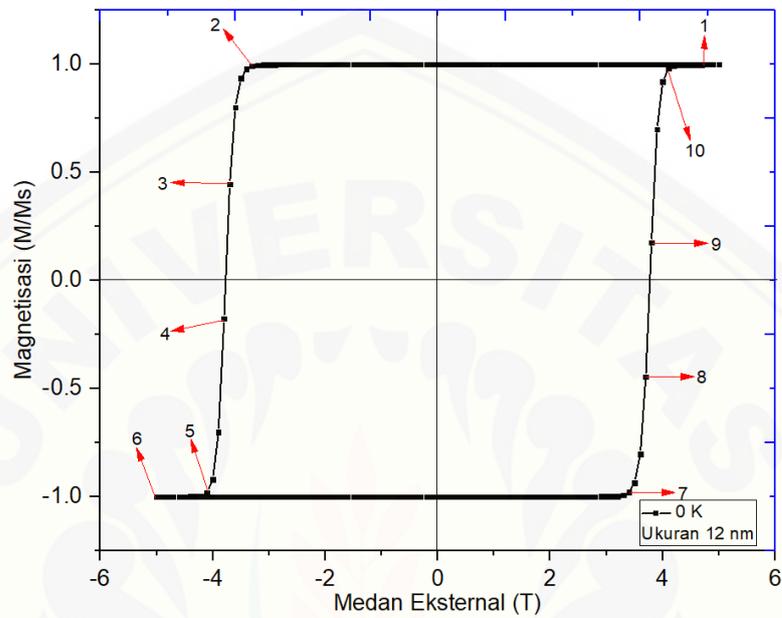
b. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 10 nm dengan temperatur 328 Kelvin



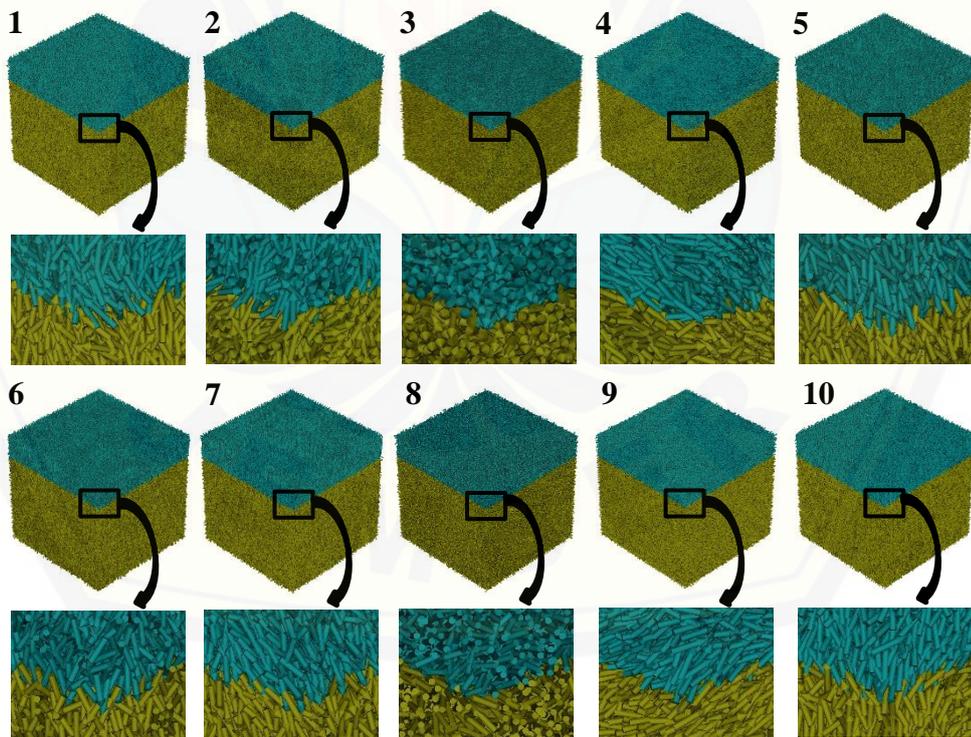
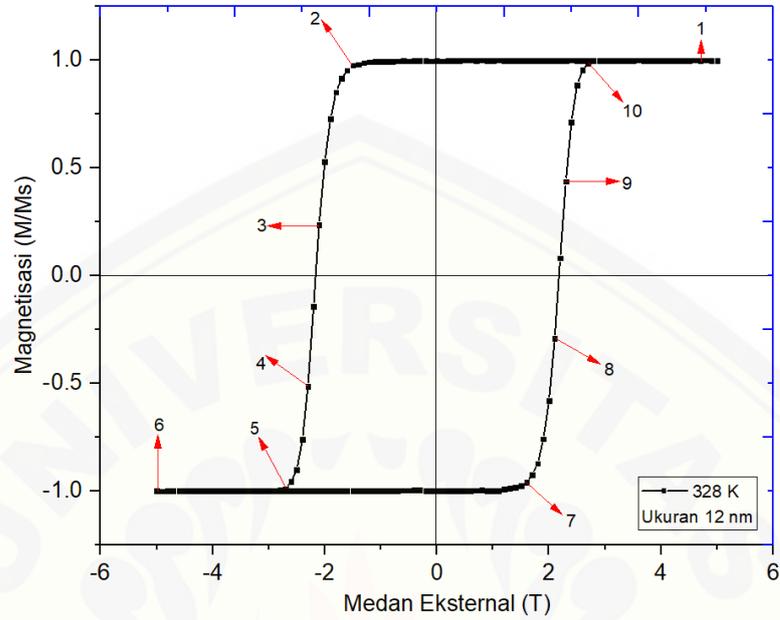
- c. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 10 nm dengan temperatur 1600 Kelvin



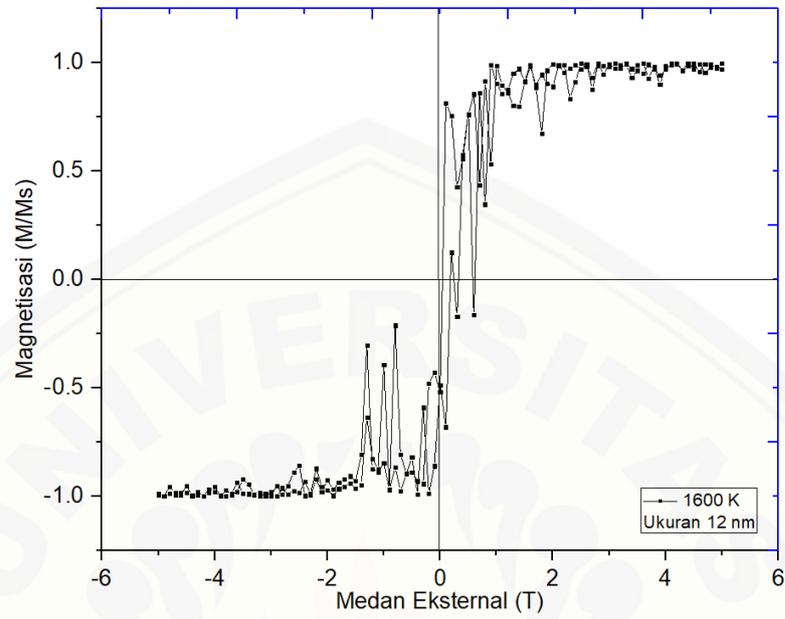
4. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 12 nm
 - a. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 12 nm dengan temperatur 0 Kelvin



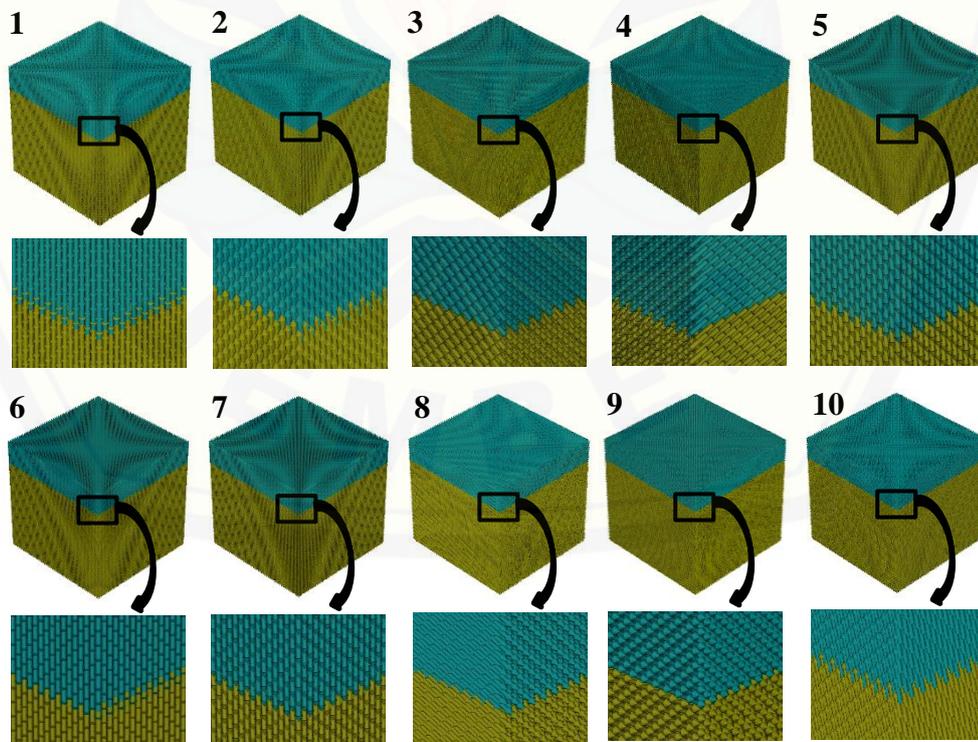
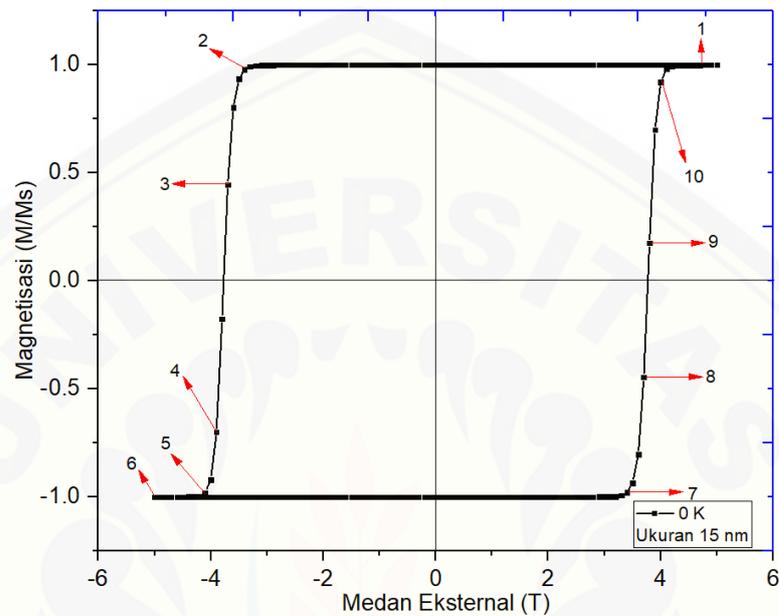
b. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 12 nm dengan temperatur 328 Kelvin



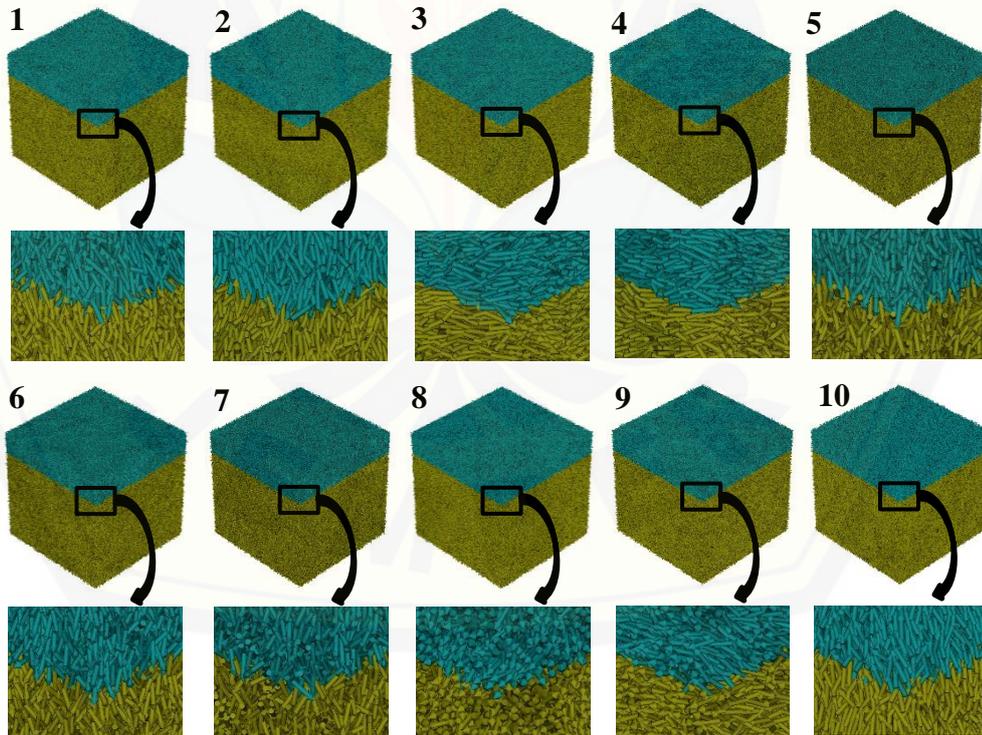
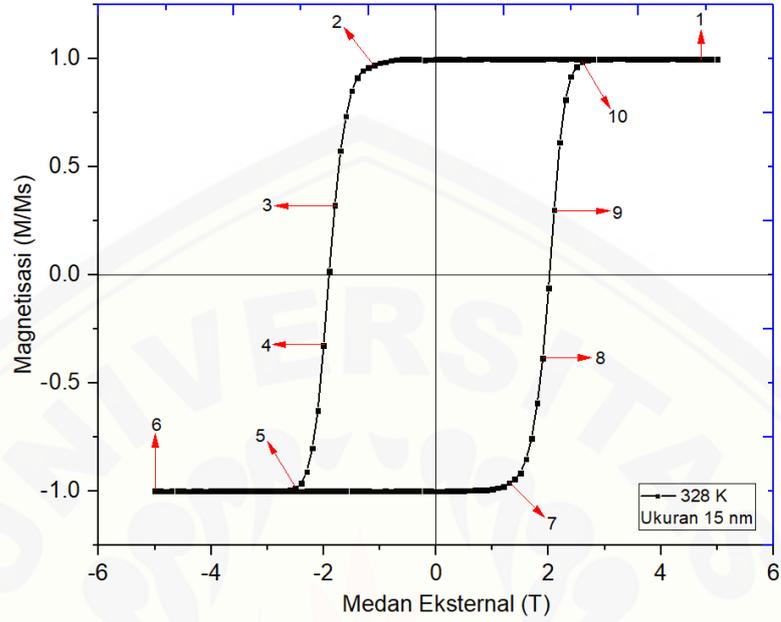
- c. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 12 nm dengan temperatur 1600 Kelvin



5. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 15 nm
 - a. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 15 nm dengan temperatur 0 Kelvin



b. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 15 nm dengan temperatur 328 Kelvin



- c. Struktur Domain material *alloy* $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ *double layers* pada ukuran sisi kubus 15 nm dengan temperatur 1600 Kelvin

