



**INVESTIGASI SIFAT-SIFAT MAGNETIK
ALLOY $\text{Co}_{(1-x)}\text{Fe}_x$ NANOCUBE DAN NANOSPHERE
DALAM VARIASI KOMPOSISI Fe (x)**

SKRIPSI

Oleh

Yuyun Tri Mulyani

NIM 131810201062

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

2017



**INVESTIGASI SIFAT-SIFAT MAGNETIK
ALLOY $\text{Co}_{(1-x)}\text{Fe}_x$ NANOCUBE DAN NANOSPHERE
DALAM VARIASI KOMPOSISI Fe (x)**

SKRIPSI

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

Oleh

Yuyun Tri Mulyani

NIM 131810201062

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

2017

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Ibunda Sumiatun dan ayahanda Mariyo yang tercinta;
2. Saudara-saudariku Herman Supriyanto, Suminto, Eka Wijayanti, dan Endang Pipit Widayanah, yang tercinta;
3. Adik-adikku Gagah Cunda Saputra, Fabian Hoki Perdana, dan Gusti Bagus Prayoga;
4. Teman-temanku sekolah menengah Ayu Indah, Elok Lutfi, Heni Wulandari, dan Vinchen Adi Bagaskara;
5. Teman-temanku Amalia, Fitri Khoiriyah, Gutaminingsih, Imroatus Soleha, Ingkan Nurma, Ismia Khilmi, Kholifatus Sa'diyah, Lailatul Badriyah, Lilis Fitria, Lintang Chandra, Nik Ulil, Ririn Yulia, Septia Listiani, Silviana Sari, Siti Mutmainah, Tri Oktafiani, Ummu Salamah, Yulia Kusuma, dan Yuningtias Nely;
6. Teman-temanku mahasiswa Fisika angkatan 2013;
7. Angkatan Anggada dan keluarga Besar UKMS TITIK;
8. Guru-guru sejak taman kanak-kanak sampai perguruan tinggi;
9. Almamater Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

MOTO

Hidup itu ibarat naik sepeda, untuk menjaga keseimbangan, kau harus tetap bergerak
(Albert Einstein)



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Yuyun Tri Mulyani

NIM : 131810201062

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Investigasi Sifat-Sifat Magnetik *Alloy* $\text{Co}_{(1-x)}\text{Fe}_x$ *Nanocube* dan *Nanosphere* dalam Variasi Komposisi Fe (x)” 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.

Dengan demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, September 2017

Yang menyatakan,

Yuyun Tri Mulyani

NIM 131810201062

SKRIPSI

**INVESTIGASI SIFAT-SIFAT MAGNETIK
ALLOY $\text{Co}_{(1-x)}\text{Fe}_x$ NANOCUBE DAN NANOSPHERE
DALAM VARIASI KOMPOSISI Fe (x)**

Oleh

Yuyun Tri Mulyani

NIM 131810201062

Pembimbing

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

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

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul “Investigasi Sifat-Sifat Magnetik *Alloy* $\text{Co}_{(1-x)}\text{Fe}_x$ *Nanocube* dan *Nanosphere* dalam Variasi Komposisi Fe (x)” karya Yuyun Tri Mulyani telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas
Jember

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I

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

Dr. Edy Supriyanto, S.Si., M.Si.
NIP 196712151998021001

Anggota II

Anggota III

Bowo Eko Cahyono, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP. 197202101998021001

Nurul Priyantari, S.Si., M.Si
NIP. 197003271997022001

Mengesahkan

Dekan,

Drs. Sujito, Ph.D.

NIP 196102041987111001

RINGKASAN

Investigasi Sifat-Sifat Magnetik Alloy $\text{Co}_{(1-x)}\text{Fe}_x$ Nanocube dan Nanosphere dalam Variasi Komposisi Fe (x); Yuyun Tri Mulyani, 131810201062: 41 halaman; Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember.

Hard Disk Drive (HDD) merupakan perangkat penyimpan data yang digunakan untuk menyimpan dan mengambil informasi digital menggunakan *disk* (piringan) yang dilapisi dengan bahan magnetik. Salah satu bahan magnetik yang digunakan untuk melapisi piringan *Hard Disk Drive* adalah bahan feromagnetik. Bahan feromagnetik diantaranya adalah: besi (Fe), Nikel (Ni), Cobalt (Co) dan *alloy*, seperti NiFe dan CoFe. *Alloy* CoFe merupakan kandidat kompetitif dalam bahan magnetik. Hal ini disebabkan *alloy* CoFe mempunyai temperatur Curie yang tinggi.

Penelitian ini diawali dengan studi pustaka dari berbagai sumber berupa buku, jurnal ilmiah, skripsi dan tesis. Selanjutnya dilakukan penginstalan *software* pada komputer. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *software Vampire, Origin, Povray* dan *Cygwin*. Simulasi dilakukan dengan membuat file bahan yang berisi parameter-parameter bahan CoFe yaitu konstanta *exchange*, momen spin atom dan energi anisotropi. Selain itu juga membuat file *input* yang berisi bentuk kristal, struktur kristal, dan perintah simulasi. Kedua file tersebut diletakkan dalam satu folder. Kemudian dilakukan *running* simulasi. Simulasi mikromagnetik dijalankan dengan memvariasikan komposisi Fe (x) yaitu 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, dan 90% serta variasi geometri yaitu *nanocube* dan *nanosphere*. Data output yang digunakan untuk analisis data adalah magnetisasi pada berbagai temperatur, susceptibilitas pada berbagai temperatur serta energi demagnetisasi, energi anisotropi, dan energi *exchange* pada berbagai temperatur. Kemudian dari analisis tersebut ditentukan nilai temperatur Curie.

Perubahan magnetisasi terhadap temperatur dipengaruhi oleh komposisi Fe (x) pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$. Magnetisasi maksimum terjadi pada temperatur 0 K. Kemudian nilai magnetisasi akan menurun hingga mendekati nol pada temperatur tertentu yang disebut dengan temperatur Curie. Hal ini disebabkan oleh arah orientasi spin yang berubah menjadi acak sehingga resultan magnetisasinya mendekati nol. Dari komposisi Fe (x) sebesar 10% hingga 90% dihasilkan perubahan magnetisasi terhadap temperatur yang berbeda-beda sehingga diperoleh nilai temperatur Curie yang berbeda-beda pula. Perubahan nilai susceptibilitas terhadap temperatur dipengaruhi oleh komposisi Fe (x) pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$. Ketika temperatur meningkat, nilai susceptibilitas mengalami fluktuasi (*complex behavior*) dan mencapai suatu nilai maksimum. Nilai maksimum tersebut berada pada temperatur tertentu yang disebut dengan temperatur Curie. Setelah susceptibilitas mencapai nilai maksimum, kemudian susceptibilitas mengalami penurunan secara bertahap. Dari komposisi Fe (x) sebesar 10% hingga 90% dihasilkan perubahan susceptibilitas terhadap temperatur yang berbeda-beda

sehingga diperoleh nilai temperatur Curie yang berbeda-beda pula. Nilai temperatur Curie dipengaruhi oleh komposisi Fe (x) pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$. Nilai temperatur Curie meningkat dari komposisi Fe (x) 10% hingga komposisi Fe (x) 20%. Namun mengalami penurunan drastis pada komposisi Fe (x) 30%. Kemudian terjadi peningkatan dan penurunan nilai temperatur Curie hingga komposisi Fe (x) 90%. Hasil yang tidak linear ini disebabkan oleh perubahan struktur kristal pada *alloy* CoFe dari FCC ke BCC. Bahan magnetik dengan struktur kristal FCC mempunyai nilai temperatur Curie yang lebih tinggi daripada bahan magnetik dengan struktur kristal BCC. Keadaan ini disebabkan jumlah atom pada struktur kristal FCC adalah 4 atom. Sedangkan jumlah atom pada struktur kristal BCC adalah 2 atom. Semakin banyak jumlah atom per unit sel, maka jarak antar atom semakin kecil dan interaksi antar atomnya semakin kuat, sehingga membutuhkan temperatur yang lebih besar untuk mengubah arah momen magnetik atom-atom tersebut menjadi acak. Bahan *alloy* CoFe mempunyai nilai temperatur Curie tertinggi pada komposisi $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ yaitu 1500 K pada geometri *nanocube* dan 1475 K pada geometri *nanosphere*. Sedangkan untuk variasi bentuk, temperatur Curie memiliki nilai yang tidak jauh berbeda antara geometri *nanocube* dan geometri *nanosphere*.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Investigasi Sifat-Sifat Magnetik *Alloy* $\text{Co}_{(1-x)}\text{Fe}_x$ *Nanocube* dan *Nanosphere* dalam Variasi Komposisi Fe (x)”. 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 lepas dari bimbingan dan pengarahan berbagai pihak. Karena itu, penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Dr. Edy Supriyanto, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota, yang telah meluangkan waktu untuk bimbingan skripsi;
2. Bowo Eko Cahyono, S.Si., M.Si., Ph.D, selaku Dosen Penguji I dan Nurul Priyantari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktunya untuk memberi kritik dan saran skripsi ini;
3. Puguh Hiskiawan, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;
4. Segenap Dosen dan karyawan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.;
5. Ibunda Sumiatun dan ayahanda Mariyo yang tercinta;
6. Teman-temanku angkatan 2013.

. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta perkembangan ilmu pengetahuan di bidang Fisika.

Jember, September 2017

Penulis

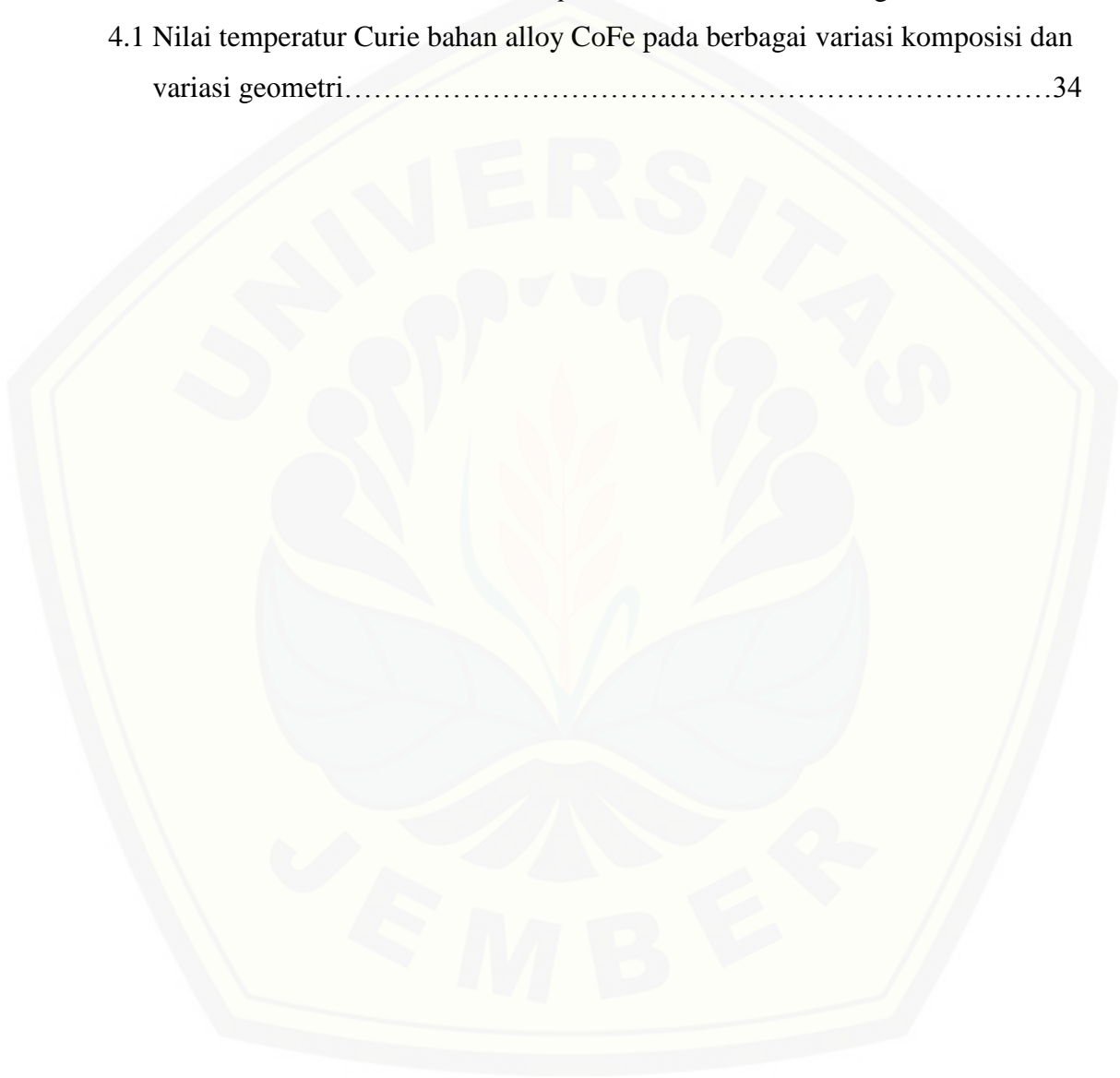
DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Struktur Kristal	5
2.1.1 <i>Body Centered Cubic</i> (BCC)	5
2.1.2 <i>Face Centered Cubic</i> (FCC)	5
2.1.3 <i>Hexagonal Close Pack</i> (HCP)	6
2.2 Klasifikasi Bahan	7
2.2.1 Diamagnetik	7
2.2.2 Paramagnetik.....	7
2.2.3 Feromagnetik	8
2.3 Suseptibilitas Magnetik	10
2.4 Temperatur Curie	12
2.5 Konsep Mikromagnetik	13
2.6 Metode Monte Carlo	14

2.7	Parameter Atomistik dari Sifat Makroskopik	15
	2.7.1 Momen Spin Atom.....	15
	2.7.2 Konstanta <i>Exchange</i>	15
	2.7.3 Anisotropi <i>Magnetocrystalline</i>	15
2.8	Bahan CoFe	16
BAB 3.	METODE PENELITIAN	17
3.1	Rancangan Penelitian	17
3.2	Jenis dan Sumber Data	18
3.3	Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukurannya	18
3.4	Metode Analisis Data	19
	3.4.1 Analisis data simulasi untuk menentukan grafik magnetisasi terhadap temperatur pada <i>alloy</i> $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$	19
	3.4.2 Analisis data simulasi untuk menentukan grafik suseptibilitas terhadap temperatur pada pada <i>alloy</i> $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$	20
	3.4.3 Analisis data simulasi untuk menentukan grafik energi demagnetisasi, energi anisotropi, dan energi <i>exchange</i> terhadap temperatur pada pada <i>alloy</i> $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$	21
3.5	Kerangka Pemecahan Masalah	23
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	24
4.1	Penentuan nilai temperatur Curie pada bahan <i>alloy</i> CoFe	24
4.2	Pengaruh Variasi Komposisi dan Variasi Bentuk	31
BAB 5.	KESIMPULAN DAN SARAN	36
5.1	Kesimpulan	36
5.2	Saran	37
	DAFTAR PUSTAKA	38
	LAMPIRAN	41

DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Parameter bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ untuk <i>input</i> data simulasi mikromagnetik.....	18
4.1 Nilai temperatur Curie bahan alloy CoFe pada berbagai variasi komposisi dan variasi geometri.....	34



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Struktur kristal BCC (<i>Body Centered Cubic</i>).....	5
2.2 Struktur kristal FCC (<i>Face-Centered Cubic</i>)	6
2.3 Kristal HCP (<i>Hexagonal Close-packed</i>).....	6
2.4 Momen magnetik bahan diamagnetik.....	7
2.5 Momen magnetik bahan paramagnetik.....	8
2.6 Struktur domain dalam bahan feromagnetik.....	8
2.7 Perubahan arah momen magnet pada <i>Bloch Wall</i>	9
2.8 Perubahan arah momen magnet pada <i>Neel Wall</i>	9
2.9 Grafik hubungan antara suseptibilitas dan temperatur pada bahan paramagnetik dan feromagnetik.....	11
2.10 Grafik hubungan antara suseptibilitas dan temperatur pada bahan feromagnetik.....	11
2.11 Grafik besar temperatur terhadap magnetisasi untuk menentukan temperatur Curie pada bahan kobalt nanopartikel octahedral dengan ukuran yang berbeda.....	12
2.12 Struktur Kristal <i>alloy</i> CoFe BCC.....	16
3.1 Grafik hubungan antara magnetisasi terhadap perubahan temperatur.....	20
3.2 Grafik hubungan antara perubahan temperatur terhadap suseptibilitas.....	21
3.3 Grafik hubungan antara variasi komposisi (x) pada <i>alloy</i> $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ terhadap temperatur Curie.....	22
3.4 Diagram alir penelitian.....	23
4.1 Grafik magnetisasi dan suseptibilitas terhadap temperatur pada <i>alloy</i> $\text{Co}_{10}\text{Fe}_{90}$ geometri <i>nanocube</i>	25
4.2 Perubahan arah magnetisasi pada bahan <i>alloy</i> $\text{Co}_{10}\text{Fe}_{90}$ geometri <i>nanocube</i>	26
4.3 Perubahan arah magnetisasi pada <i>alloy</i> $\text{Co}_{10}\text{Fe}_{90}$ geometri <i>nanosphere</i> ...	27
4.4 Grafik magnetisasi dan energi anisotropi pada berbagai temperatur	

bahan <i>alloy</i> $\text{Co}_{10}\text{Fe}_{90}$ geometri <i>nanocube</i>	28
4.5 Grafik magnetisasi dan energi <i>exchange</i> pada bahan <i>alloy</i> $\text{Co}_{10}\text{Fe}_{90}$ geometri <i>nanocube</i>	29
4.6 Grafik magnetisasi dan energi magnetostatik pada <i>alloy</i> $\text{Co}_{10}\text{Fe}_{90}$ geometri <i>nanocube</i>	30
4.7 Grafik magnetisasi terhadap temperatur bahan <i>alloy</i> CoFe geometri <i>nanosphere</i> pada berbagai variasi komposisi.....	31
4.8 Grafik magnetisasi terhadap temperatur bahan <i>alloy</i> CoFe geometri <i>nanocube</i> pada berbagai variasi komposisi.....	31
4.9 Grafik suseptibilitas terhadap temperatur bahan <i>alloy</i> CoFe geometri <i>nanosphere</i> pada berbagai variasi komposisi.....	32
4.10 Grafik suseptibilitas terhadap temperatur bahan <i>alloy</i> CoFe geometri <i>nanocube</i> pada berbagai variasi komposisi.....	33
4.11 Grafik Pengaruh variasi komposisi (x) pada geometri <i>nanocube</i> dan <i>nanosphere</i> terhadap nilai temperatur Curie.....	35

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Perhitungan Nilai Keakurasian.....	42
B. Analisis Temperatur Curie pada Berbagai Variasi Komposisi dan Variasi Geometri.....	43
1. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{10}\text{Fe}_{90}$ geometri <i>nanosphere</i>	43
2. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{80}$ geometri <i>nanosphere</i>	44
3. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ geometri <i>nanosphere</i>	45
4. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{60}$ geometri <i>nanosphere</i>	46
5. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ geometri <i>nanosphere</i>	47
6. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40}$ geometri <i>nanosphere</i>	48
7. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ geometri <i>nanosphere</i>	49
8. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ geometri <i>nanosphere</i>	50

9. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ geometri <i>nanosphere</i>	51
10. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{10}\text{Fe}_{90}$ geometri <i>nanocube</i>	52
11. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{80}$ geometri <i>nanocube</i>	53
12. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ geometri <i>nanocube</i>	54
13. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{60}$ geometri <i>nanocube</i>	55
14. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ geometri <i>nanocube</i>	56
15. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40}$ geometri <i>nanocube</i>	57
16. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ geometri <i>nanocube</i>	58
17. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ geometri <i>nanocube</i>	59
18. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi <i>exchange</i> dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ geometri <i>nanocube</i>	60

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi berakibat data yang disimpan secara manual akan semakin menurun. Semua penyimpanan dan pengambilan data dilakukan menggunakan perangkat seperti laptop, komputer dan ponsel, akan disimpan dalam penyimpanan data digital. *Hard Disk Drive* (HDD) merupakan perangkat penyimpan data yang digunakan untuk menyimpan dan mengambil informasi digital menggunakan *disk* (piringan) yang dilapisi dengan bahan magnetik (Chaudary dan Kansal, 2015). IBM (*International Business Machines Corporation*) merupakan perusahaan Amerika Serikat yang bergerak dalam produksi dan penjualan perangkat keras dan perangkat lunak komputer. Pada tahun 1956, 305 RAMAC (*Random Access Method of Accounting and Control*) diciptakan oleh IBM. RAMAC merupakan media penyimpanan sekunder yang pertama berupa sebuah *Hard Disk* dengan fisik yang sangat besar dengan kapasitas data yang mampu disimpan sebesar 5 MB. Kemudian *Hard Disk* ini terus dikembangkan dengan kapasitas yang semakin besar, akses semakin cepat, namun dengan ukuran yang semakin kecil dan harga yang lebih murah (Wahyudi, 2005).

Salah satu bahan magnetik yang digunakan untuk melapisi piringan *Hard Disk Drive* adalah bahan feromagnetik (Chaudary dan Kansal, 2015). Bahan feromagnetik sendiri merupakan bahan magnetik yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik besar dan bernilai positif (Mardiansyah, 2013). Struktur bahan feromagnetik berbeda dengan struktur bahan magnetik lainnya. Perbedaan tersebut terletak pada terdapatnya domain magnetik. Domain magnetik adalah pembagian daerah-daerah yang terdapat dalam bahan feromagnetik yang memiliki momen magnetik sejajar. Jika diberikan medan magnet luar, maka momen magnetik setiap atom akan mensejajarkan diri terhadap medan luar secara berangsur-angsur. Daerah antara dua domain disebut *domain wall* (Reitz, 1993). Bahan feromagnetik diantaranya adalah: besi (Fe), Nikel (Ni), Cobalt (Co) dan

alloy, seperti NiFe dan CoFe (Sudjatmoko, 2005). *Alloy* CoFe merupakan kandidat kompetitif dalam bahan magnetik. Hal ini disebabkan *alloy* CoFe mempunyai saturasi magnetisasi yang tinggi, koersivitas yang rendah, permeabilitas yang tinggi dan temperatur Curie yang tinggi. Sifat-sifat tersebut membuat *alloy* CoFe sangat potensial digunakan walaupun pada temperatur yang tinggi (Sánchez-De Jesús *et al.*, 2016).

Beberapa studi tentang sintesis *alloy* CoFe dengan *mechanical alloying* telah dilakukan selama beberapa tahun terakhir (Sánchez-De Jesús *et al.*, 2016). Struktur mikro dan sifat-sifat magnetik dari *alloy* $\text{Co}_x\text{Fe}_{100-x}$ ($x = 10, 45, 50, 77$ dan 90) telah diinvestigasi melalui pengamatan pada proses *mechanical alloying* dan pengaruh lamanya milling (Chermahini *et al.*, 2009; Sánchez-De Jesús *et al.*, 2016). Sedangkan Bergheul *et al.* (2012) telah melakukan penelitian tentang sintesis *alloy* $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{60}$ yang dihasilkan dengan metode *mechanosynthesis*. Bahan tersebut diaplikasikan sebagai divais penyerap gelombang mikro. Penelitian tentang *alloy* CoFe tidak hanya dilakukan secara eksperimen, tetapi juga secara simulasi. Penelitian secara simulasi dilakukan guna mempelajari bahan *alloy* feromagnetik dengan lebih baik. Hasil penelitian secara simulasi diharapkan dapat digunakan untuk prediksi dan optimasi dalam penelitian secara eksperimen (Rohman, 2013). Penelitian tentang sifat-sifat magnetik bahan feromagnetik *alloy* CoFe secara simulasi telah dilakukan oleh Ni'mah (2016). Salah satu sifat magnetik bahan feromagnetik adalah temperatur Curie. Fenomena perbedaan nilai temperatur Curie ini sangat dipengaruhi oleh komposisi dari bahan CoFe. Keadaan ini dibuktikan dengan hasil eksperimen untuk $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ mempunyai temperatur Curie sebesar 1193 K, sedangkan untuk $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ temperatur Curie sebesar 1253 K (Sundar dan Deevi, 2005).

Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi mikromagnetik *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ untuk menginvestigasi sifat-sifat magnetiknya. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode Monte Carlo. Metode Monte Carlo adalah metode yang memanfaatkan bilangan acak untuk melakukan simulasi suatu sistem fisika yang dilakukan oleh komputasi yang sulit diselesaikan secara analitik. Metode ini terdiri dari algoritma-algoritma yang dapat digunakan untuk memvisualisasikan

magnetisasi pada suatu bahan (Newmann, 1999). Sebelumnya, Mardiansyah (2013) telah melakukan penelitian tentang sifat bahan feromagnetik dengan Metode Monte Carlo. Pada penelitian tersebut dianalisis magnetisasi terhadap pengaruh medan luar, hubungan suseptibilitas terhadap temperatur, dan hubungan magnetisasi terhadap temperatur pada bahan feromagnetik. Sedangkan pada penelitian ini dianalisis tentang hubungan magnetisasi terhadap temperatur, hubungan suseptibilitas terhadap temperatur, dan hubungan energi demagnetisasi, energi anisotropi, serta energi *exchange* terhadap temperatur dalam berbagai variasi komposisi dengan geometri *nanocube* dan *nanosphere*. Analisis tersebut digunakan untuk penentuan temperatur Curie. *Software* yang digunakan untuk simulasi mikromagnetik adalah *software Vampire*. Hasilnya berupa *file output* yang dianalisis dalam bentuk grafik dengan *software Origin* dan divisualisasikan dengan *software POV-Ray*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi komposisi Fe (x) pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ geometri *nanocube* dan *nanosphere* terhadap magnetisasi pada berbagai temperatur?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi Fe (x) pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ geometri *nanocube* dan *nanosphere* terhadap suseptibilitas pada berbagai temperatur?
3. Bagaimana temperatur Curie *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ yang dihasilkan terhadap variasi komposisi Fe (x) pada geometri *nanocube* dan *nanosphere* melalui analisis data magnetisasi dan suseptibilitas?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh variasi komposisi Fe (x) pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ geometri *nanocube* dan *nanosphere* terhadap magnetisasi pada berbagai temperatur.

2. Mengetahui pengaruh variasi komposisi Fe (x) pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ geometri *nanocube* dan *nanosphere* terhadap suseptibilitas pada berbagai temperatur.
3. Mengetahui temperatur Curie *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ yang dihasilkan terhadap variasi komposisi Fe (x) pada geometri *nanocube* dan *nanosphere* melalui analisis data magnetisasi dan suseptibilitas.

1.4 Manfaat Penelitian

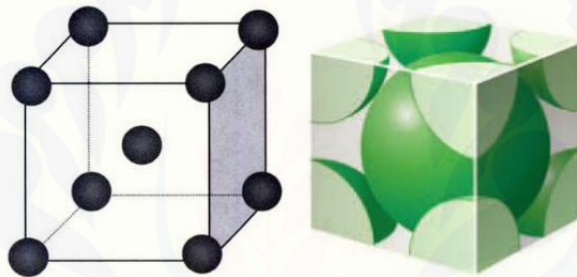
Manfaat penelitian yang diharapkan pada penelitian ini yaitu dapat memberikan informasi adanya pengaruh variasi komposisi material terhadap sifat magnetik material *alloy* CoFe geometri *nanocube* dan *nanosphere*, sehingga diperoleh sifat magnetik terbaik dari *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ dengan komposisi tertentu dan geometri tertentu yang dapat dijadikan sebagai prediksi atau acuan penelitian *alloy* CoFe secara eksperimen untuk diterapkan dalam pembuatan *Hard Disk Drive*.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Struktur Kristal

2.1.1 *Body Centered Cubic (BCC)*

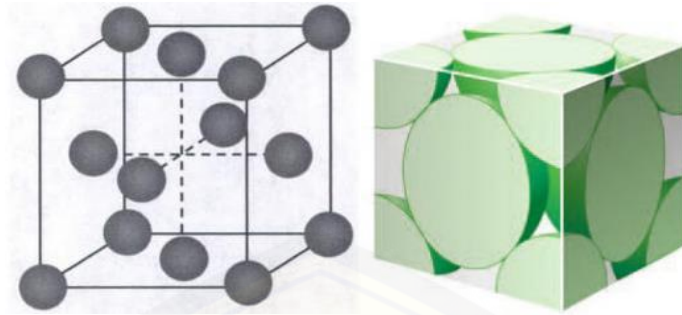
Kristal BCC dibentuk oleh satu pada pusat kubus dan satu per delapan atom pada setiap sudut kubus (Chung, 2007). Pada kubus terdapat delapan sudut, sehingga jumlah atom dalam satu unit sel adalah dua atom. Struktur kristal BCC ditunjukkan pada Gambar 2.1. Struktur Kristal BCC banyak dijumpai pada elemen transisi seperti Fe (Borg, 1992).



Gambar 2.1 Struktur kristal BCC (*Body Centered Cubic*) (Sumber: Chung, 2007; Ebbing dan Gammon, 2017)

2.1.2 *Face Centered Cubic (FCC)*

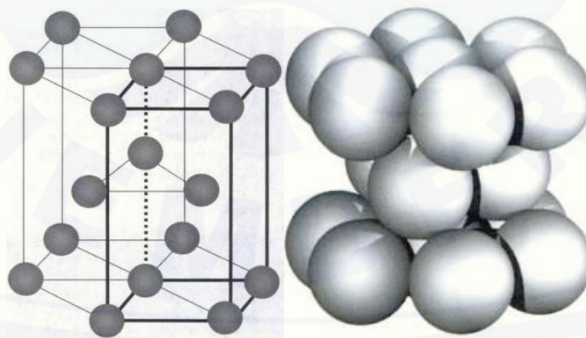
Kristal FCC dibentuk oleh satu per delapan atom pada setiap sudut kubus dan setengah atom pada setiap permukaan kubus (Chung, 2007). Pada kubus terdapat delapan sudut dan enam bidang permukaan, sehingga jumlah atom dari satu unit sel adalah empat atom. Struktur kristal FCC ditunjukkan pada Gambar 2.2. Struktur ini terdapat pada beberapa bahan contohnya: Ag, Al, Au, Cu, Ni dan Pt (Borg, 1992).



Gambar 2.2 Struktur kristal FCC (*Face-Centered Cubic*) (Sumber: Chung, 2007; Ebbing dan Gammon, 2017)

2.1.3 *Hexagonal Close Pack (HCP)*

Struktur kristal HCP dibentuk oleh dua bidang heksagonal. Struktur ini mirip dengan prisma segienam. Pada kristal ini terdapat satu atom pada setiap sudut bidang heksagonal, satu atom pada permukaan bidang heksagonal dan tiga atom di tengah ruang heksagonal (Chung, 2007). Pada kristal HCP terdapat dua belas sudut dan dua bidang permukaan heksagonal, sehingga jumlah atom dalam satu unit sel adalah tujuh belas atom. Struktur kristal HCP ditunjukkan pada Gambar 2.3. Contoh bahan dengan struktur HCP adalah Be, Cd, Mg (Borg, 1992).

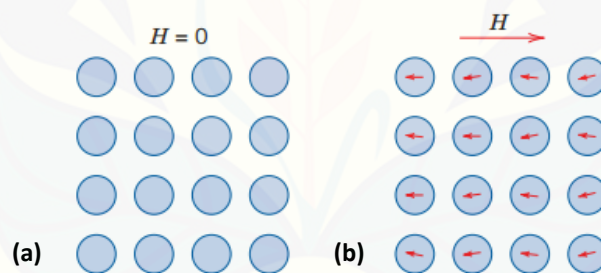


Gambar 2.3 Kristal HCP (*Hexagonal Close-packed*) (Sumber: Tisza, 2001; Chung, 2007)

2.2 Klasifikasi Bahan

2.2.1 Diamagnetik

Bahan diamagnetik merupakan bahan yang permeabilitas relatifnya lebih kecil dari satu dan suseptibilitasnya bernilai negatif yaitu antara -10^{-5} hingga -10^{-4} . Momen magnetik pada bahan diamagnetik disebabkan adanya gerak orbital elektron. Momen magnetik ini saling meniadakan satu dengan yang lain, sehingga momen magnetik dalam bahan diamagnetik adalah nol tanpa adanya medan magnet luar. Ketika bahan diamagnetik diberi medan magnet luar, maka terjadi magnetisasi. Momen magnet yang terbentuk adalah momen magnet yang saling sejajar satu dengan yang lain tetapi berlawanan arah dengan medan magnet luar yang diberikan. Momen magnet pada bahan diamagnetik tanpa diberi medan magnet luar dan diberi medan magnet luar ditunjukkan pada Gambar 2.4. Bahan yang termasuk dalam bahan diamagnetik adalah merkuri, emas, perak, dan silikon (Ida, 2004).

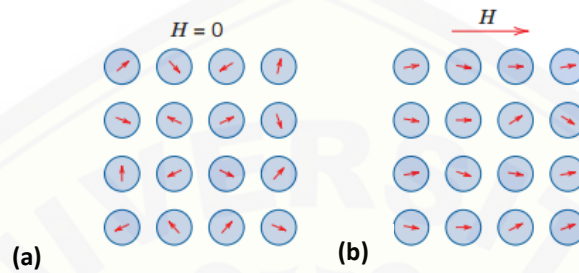


Gambar 2.4 Momen magnetik bahan diamagnetik (a) tanpa diberi medan magnet luar, (b) diberi medan magnet luar (Sumber: Callister dan Rethwisch, 2009)

2.2.2 Paramagnetik

Bahan paramagnetik adalah bahan yang permeabilitas relatifnya lebih besar dari satu dan suseptibilitasnya bernilai positif yaitu antara 10^{-7} hingga 10^{-3} . Pada bahan paramagnetik terdapat momen magnetik tanpa adanya medan magnet luar. Tetapi, momen magnet tersebut terorientasi secara acak sehingga momen magnet totalnya mendekati nol. Ketika bahan paramagnetik diberi medan magnet luar, maka momen-momen magnetik dalam bahan paramagnetik akan

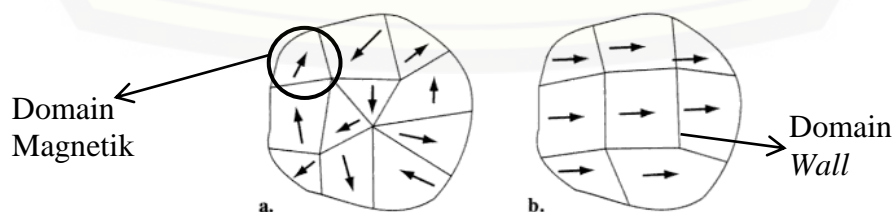
searah dengan arah medan magnet luar. Akibatnya, terjadi peningkatan momen magnet total. Momen magnet pada bahan paramagnetik tanpa diberi medan magnet luar dan diberi medan magnet luar ditunjukkan pada Gambar 2.5. Bahan yang termasuk dalam bahan paramagnetik adalah aluminium, palladium dan tungsten (Ida, 2004).



Gambar 2.5 Momen magnetik bahan paramagnetik (a) tanpa diberi medan magnet luar (b) diberi medan magnet luar (Sumber: Callister dan Rethwisch, 2009)

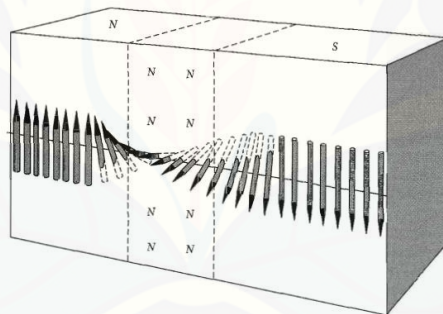
2.2.3 Feromagnetik

Bahan feromagnetik adalah bahan yang permeabilitasnya jauh lebih besar dari satu dan susceptibilitasnya bernilai positif. Ketika bahan feromagnetik diberi medan magnet luar, maka momen magnet dalam domain magnet akan searah dengan arah medan magnet luar tersebut. Momen-momen magnet ini akan tetap searah walaupun medan magnet luar dihilangkan, sehingga bahan ini dapat dijadikan magnet permanen. Domain magnet pada bahan feromagnetik tanpa diberi medan magnet luar dan diberi medan magnet luar ditunjukkan pada Gambar 2.6. Bahan yang termasuk dalam bahan feromagnetik adalah besi, kobalt dan nikel. (Ida, 2004).

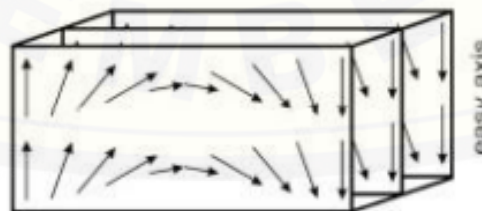


Gambar 2.6 Struktur domain dalam bahan feromagnetik (a) tanpa diberi medan magnet luar (b) diberi medan magnet luar (Sumber: Ida, 2004)

Bahan feromagnetik terbentuk dari daerah-daerah mikroskopis yang termagnetisasi pada arah yang berbeda. Daerah-daerah tersebut disebut dengan domain magnetik. Di dalam satu domain terdapat momen-momen magnetik dengan arah yang sama. Antara satu domain dengan domain yang lain dipisahkan oleh sebuah dinding yang disebut *domain wall* (Aharoni, 1996). Dalam *domain wall* terjadi perubahan arah momen magnet secara perlahan (Callister dan Rethwisch, 2009). Pada bahan feromagnetik berbentuk *bulk*, dinding ini disebut dengan *Bloch Wall*, dimana momen magnet berotasi pada bidang yang sejajar dengan *Domain Wall*. Perubahan arah momen magnet pada *Bloch Wall* dapat dilihat pada Gambar 2.7. Sedangkan pada bahan feromagnetik berbentuk lapisan tipis, dinding ini disebut dengan *Neel Wall*, dimana orientasi spin sepanjang bidang lapisan tipis. Perubahan arah momen magnet pada *Neel Wall* dapat dilihat pada Gambar 2.8 (Widodo, 2013).



Gambar 2.7 Perubahan arah momen magnet pada *Bloch Wall* (Sumber: Kittel, 2005)



Gambar 2.8 Perubahan arah momen magnet pada *Neel Wall* (Sumber: Widodo, 2013)

Pembentukan *Domain Wall* magnet dalam bahan feromagnetik merupakan kompetisi antara energi *exchange* dan energi anisotropi. Energi *exchange* cenderung mempertebal *Domain Wall*, namun karena transisi arah spin menyebabkan efek anisotropi meningkat maka cenderung membuat tipis *Domain Wall*. Pada kondisi setimbang, energi dan lebar *Domain Wall* dapat ditentukan dari energi *exchange* dan energi anisotropi (Mardona, 2012).

2.3 Suseptibilitas Magnetik

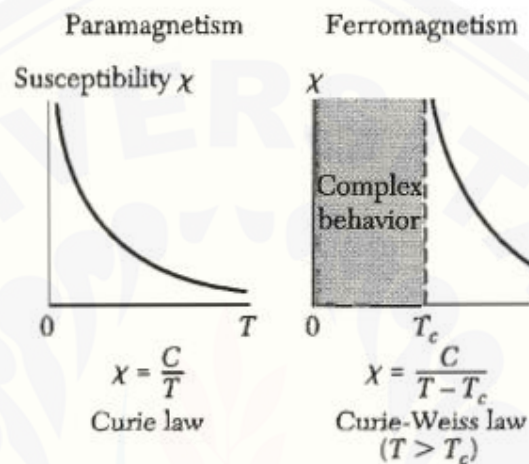
Suseptibilitas magnetik didefinisikan sebagai perbandingan antara magnetisasi M dengan intensitas magnet H , dimana suseptibilitas merupakan besaran skalar yang sangat berperan dalam pengelompokan bahan magnetik (Reitz, 1993). Berdasarkan suseptibilitasnya, bahan dikelompokkan menjadi bahan diamagnetik, paramagnetik dan feromagnetik. Suseptibilitas bahan diamagnetik bernilai negatif yaitu antara -10^{-5} hingga -10^{-4} . Suseptibilitas bahan paramagnetik bernilai positif yaitu antara 10^{-7} hingga 10^{-3} . Sedangkan suseptibilitas bahan feromagnetik bernilai positif dan jauh lebih besar dari satu (Ida, 2004). Menurut Kittel (2005) suseptibilitas bahan feromagnetik dapat diekspresikan dengan persamaan (2.1).

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (2.1)$$

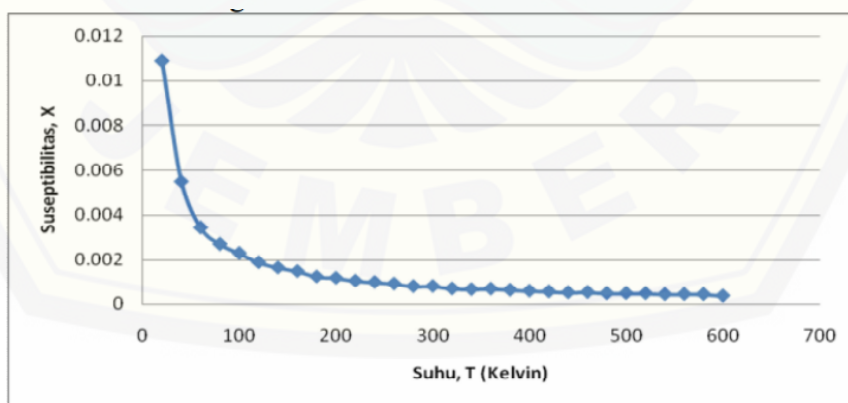
dimana C adalah konstanta Curie, T adalah temperatur dan T_c adalah temperatur Curie dengan $T > T_c$. Persamaan ini disebut dengan *Curie-Weiss Law*. Besarnya suseptibilitas dipengaruhi oleh temperatur. Grafik hubungan antara suseptibilitas dan temperatur pada bahan paramagnetik dan feromagnetik dapat dilihat pada Gambar 2.9.

Penelitian tentang analisis sifat-sifat bahan feromagnetik telah dilakukan oleh Mardiansyah pada tahun 2013. Dari penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa suseptibilitas bahan feromagnetik bergantung pada temperatur. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.10. Semakin tinggi temperatur yang diberikan pada bahan feromagnetik menyebabkan nilai suseptibilitas bahan tersebut semakin

kecil. Hal ini disebabkan getaran termal yang dialami oleh atom-atom yang menyusun bahan feromagnetik akan semakin cepat ketika temperatur yang diberikan pada bahan tersebut semakin tinggi, sehingga energi yang dibutuhkan untuk mensejajarkan spin-spin setiap partikel semakin besar. Ketika temperatur yang diberikan melampaui temperatur Curie, nilai suseptibilitas yang dimiliki oleh bahan tersebut lebih kecil dari satu (Mardiansyah, 2013).



Gambar 2.9 Grafik hubungan antara suseptibilitas dan temperatur pada bahan paramagnetik dan feromagnetik (Sumber: Kittel, 2005)

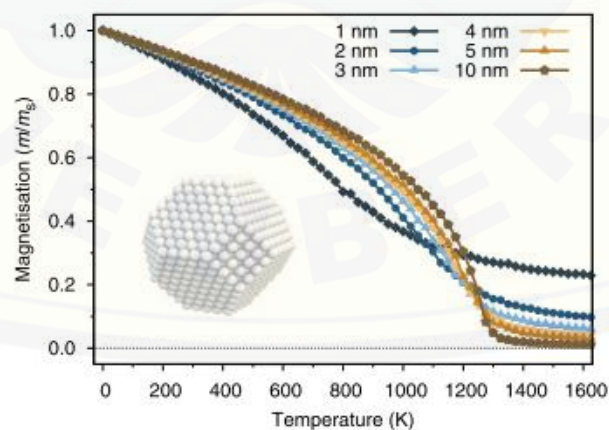


Gambar 2.10. Grafik hubungan antara suseptibilitas dan temperatur pada bahan feromagnetik (Sumber: Mardiansyah, 2013)

2.4 Temperatur Curie

Karakteristik magnetik suatu bahan dipengaruhi oleh temperatur. Ketika temperatur bertambah besar, terjadi peningkatan getaran termal dari atom-atom. Akibatnya, momen-momen magnet yang telah searah dapat berotasi bebas sehingga arahnya acak. Hal ini berakibat penurunan saturasi magnetisasi. Saturasi magnetisasi maksimum pada suhu 0 K, dimana gerak termal minimum. Dengan adanya peningkatan temperatur, saturasi magnetisasi akan menurun secara gradual hingga mencapai nol pada temperatur tertentu. Temperatur ini disebut dengan temperatur Curie. Pada temperatur di atas temperatur Curie, bahan feromagnetik berubah menjadi bahan paramagnetik (Callister dan Rethwisch, 2009).

Besi (Fe), Nikel (Ni), Kobalt (Co) dan paduannya (*alloy*) merupakan contoh bahan feromagnetik. Spin atomnya terpolarisasi secara spontan tanpa adanya medan magnet luar. Keadaan tersebut terjadi hanya saat temperatur tidak melebihi suatu temperatur transisi. Ketika temperatur di atas temperatur transisi, spin-spin pada bahan menjadi *random* dan mengakibatkan keadaannya berubah menjadi fase paramagnetik. Fase ini disebut fase transisi dan temperatur transisi tersebut disebut temperatur Curie (Sudjatmoko, 2007). Grafik temperatur Curie pada bahan kobalt dengan berbagai ukuran ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Grafik besar temperatur terhadap magnetisasi untuk menentukan temperatur Curie pada bahan kobalt nanopartikel oktahedral dengan ukuran yang berbeda (Sumber: Evans *et al*, 2014)

2.5 Konsep Mikromagnetik

Mikromagnetik digunakan untuk perhitungan distribusi magnetisasi pada bahan feromagnetik dan ferimagnetik (Miltat dan Donahue, 2007). Dengan mikromagnetik dapat dijelaskan sifat-sifat pada bahan feromagnetik dalam skala mikrometer dan sub-mikrometer, terutama interaksi antara momen magnet, konfigurasi momen magnet dan energi sistem pada proses magnetisasi. Konsep dasar dari mikromagnetik dapat dijelaskan dengan teori *continuum*, yaitu suatu konsep fisika yang digunakan untuk menjelaskan sistem gerak benda dengan menggunakan pendekatan mekanika klasik dengan sistem energi bersifat kontinu pada kondisi setimbang. (Brown, 1963).

Konsep fisika bahan magnetik pada tingkat atomik dapat dijelaskan dengan model spin atomistik atau model spin Heisenberg. Dasar dari model spin atomistik yaitu lokalisasi dari elektron yang tidak berpasangan dalam atom, yang mengarah pada momen magnetik atomistik lokal. Pada model spin atomistik, energetika sistem berinteraksi dengan momen atomik yang disebut spin Hamiltonian. Persamaan spin Hamiltonian diekspresikan dalam persamaan (2.2).

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_{exc} + \mathcal{H}_{ani} + \mathcal{H}_{app} \quad (2.2)$$

dimana \mathcal{H}_{exc} adalah energi *exchange*, \mathcal{H}_{ani} adalah energi karena anisotropi magnetik dan \mathcal{H}_{app} adalah energi akibat medan magnet luar yang diaplikasikan. Energi *exchange* adalah energi yang berasal dari interaksi momen-momen atom. Besarnya energi *exchange* diekspresikan dalam persamaan (2.3).

$$\mathcal{H}_{exc} = -\sum_{i \neq j} J_{ij} S_i \cdot S_j \quad (2.3)$$

dimana J_{ij} adalah interaksi *exchange*, S_i adalah vektor yang menunjukkan arah momen spin lokal dan S_j adalah vektor yang menunjukkan arah momen spin tetangga terdekat atom. Selain itu, terdapat energi anisotropi. Energi anisotropi yang paling penting adalah anisotropi *magnetocrystalline*. Energi ini berasal dari interaksi orbital elektron dengan kristalografi (spin-orbit) dan terbagi menjadi dua jenis yaitu energi anisotropi uniaksial dan energi anisotropi kubik. Energi anisotropi uniaksial dinyatakan dalam persamaan (2.4).

$$\mathcal{H}_{ani}^{uni} = -k_u \sum_i (S_i \cdot e)^2 \quad (2.4)$$

dimana k_u adalah energi anisotropi per atom, dan besar energi anisotropi kubik dapat dinyatakan dalam persamaan (2.5).

$$\mathcal{H}_{ani}^{cub} = \frac{k_c}{2} \sum_i (S_x^4 + S_y^4 + S_z^4) \quad (2.5)$$

dimana k_u adalah energi anisotropi kubik per atom dan S_x, S_y, S_z adalah komponen x, y dan z dari momen spin S (Evans *et al.*, 2014).

2.6 Metode Monte Carlo

Metode Monte Carlo adalah metode yang memanfaatkan bilangan acak untuk melakukan simulasi suatu sistem fisika yang dilakukan oleh komputasi yang sulit diselesaikan secara analitik. Metode ini terdiri dari algoritma-algoritma yang dapat digunakan untuk memvisualisasikan magnetisasi pada suatu bahan (Newmann, 1999).

Algoritma Metropolis Monte Carlo adalah cara yang baik untuk mempelajari energi sistem fisik dalam kondisi *equilibrium*. Sifat-sifat *equilibrium* pada bahan magnetik contohnya adalah magnetisasi yang dipengaruhi oleh temperatur. Metode Monte Carlo dapat digunakan untuk mensimulasikan efek temperatur dimana dinamika tidak dibutuhkan pada *equilibrium* dan implementasinya relatif mudah. Dalam metode ini, suatu spin i yang memiliki arah S_i mengganti arahnya secara acak pada arah baru S'_i yang disebut dengan *trial move*. Perubahan energi dari arah awal ke arah *trial move* dinyatakan dalam persamaan (2.6).

$$\Delta E = E(S'_i) - E(S_i) \quad (2.6)$$

Sehingga probabilitas dari *trial move* dituliskan pada persamaan (2.7).

$$P = \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (2.7)$$

dalam *range* 0 sampai 1 (Evans *et al.*, 2014).

2.7 Parameter Atomistik dari Sifat Makroskopik

Menurut Evans *et al* (2014), parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi mikromagnetik adalah momen spin atom, konstanta *exchange* dan anisotropi.

2.7.1 Momen Spin Atom

Besarnya momen spin atom dipengaruhi oleh magnetisasi saturasi. Besar momen spin atom dapat diekspresikan melalui persamaan (2.8).

$$\mu_s = \frac{M_s a^3}{n_{at}} \quad (2.8)$$

dimana M_s adalah magnetisasi saturasi pada suhu 0 K dalam $\text{JT}^{-1}\text{M}^{-3}$, a adalah ukuran sel dalam m dan n_{at} adalah jumlah atom per unit sel.

2.7.2 Konstanta *Exchange*

Besar konstanta *exchange* dinyatakan dalam persamaan (2.9).

$$J_{ij} = \frac{3k_B T_c}{\epsilon z} \quad (2.9)$$

dimana k_B adalah konstanta Boltzmann, T_c adalah temperatur Curie dalam K, z adalah jumlah atom tetangga dan ϵ adalah faktor koreksi yang bergantung struktur kristalnya.

2.7.3 Anisotropi *Magnetocrystalline*

Anisotropi *magnetocrystalline* atomistik berasal dari konstanta anisotropi makroskopik K_u . Persamaan untuk Anisotropi *magnetocrystalline* dituliskan dalam persamaan (2.10).

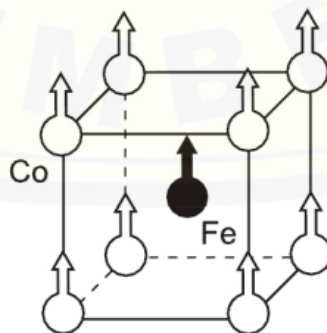
$$k_u = \frac{K_u a^3}{n_{at}} \quad (2.10)$$

dimana K_u dalam Jm^{-3} dan n_{at} adalah jumlah atom per unit sel.

2.8 Bahan CoFe

Alloy CoFe atau *Iron-cobalt* merupakan bahan *alloy* magnetik dengan saturasi magnetisasi paling tinggi. *Alloy* tersebut bersifat *soft* magnetik (Khadra, 2015). Bahan *soft* magnetik adalah bahan magnetik yang dapat termagnetisasi dengan mudah dalam pengaruh medan luar yang kecil. Secara umum, koersivitas bahan *soft* magnetik rendah yaitu antara 0.4 sampai 1000 Am⁻¹ (Sundar dan Deevi, 2005).

Alloy CoFe merupakan kandidat kompetitif dalam bahan magnetik. Hal ini disebabkan *alloy* CoFe mempunyai saturasi magnetisasi yang tinggi, koersivitas yang rendah, permeabilitas yang tinggi dan temperatur Curie yang tinggi. Sifat-sifat tersebut membuat *alloy* CoFe sangat potensial digunakan walaupun pada temperatur yang tinggi (Sánchez-De Jesús *et al.*, 2016). Besar temperatur Curie dipengaruhi oleh komposisi bahan yang menyusun *alloy* CoFe. Besarnya temperatur Curie untuk Co₇₀Fe₃₀ adalah 1193 K, sedangkan untuk Co₅₀Fe₅₀ adalah 1253 K (Sundar dan Deevi, 2005). Temperatur Curie *alloy* CoFe sekitar 1250 K, di atas temperatur ini *alloy* CoFe menjadi bahan paramagnetik (Maclaren, 1999). Struktur kristal *alloy* CoFe dapat dibedakan yaitu berbentuk BCC atau FCC, tergantung pada presentase komposisinya. Ketika presentase Co kurang dari 75% struktur kristalnya berbentuk BCC. Sedangkan ketika presentase Co lebih dari 75% struktur kristalnya adalah FCC (Popova *et al.*, 2012). Struktur kristal *alloy* CoFe BCC ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Struktur Kristal *alloy* CoFe BCC (Sumber : Kopský, 2015)

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini telah dilakukan di Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Pelaksanaan kegiatan penelitian dimulai dari bulan April 2017 sampai dengan bulan Juli 2017. Penelitian yang dilakukan meliputi investigasi sifat-sifat magnetik *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ dalam berbagai variasi komposisi Fe (x) pada geometri *nanocube* dan *nanosphere* melalui simulasi mikromagnetik. Sifat-sifat magnetik yang diamati adalah magnetisasi, susceptibilitas dan temperatur Curie. Metode simulasi yang digunakan adalah metode Monte Carlo. Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu satu set perangkat komputer dengan spesifikasi processor Intel (R) Core (TM) i3-4170 CPU @3.70GHz, RAM 2.00 GB, tipe sistem 64-bit, OS *Windows*.

Penelitian ini diawali dengan studi pustaka dari berbagai sumber berupa buku, jurnal ilmiah, skripsi dan tesis. Hal ini dilakukan untuk observasi terhadap topik penelitian. Kemudian dilanjutkan dengan melakukan penginstalan *software* pada komputer. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *software Vampire*, *Origin*, *Povray* dan *Cygwin*. *Vampire* digunakan untuk running simulasi mikromagnetik. *Origin* digunakan untuk membuat grafik dari data hasil simulasi. *Povray* digunakan untuk membuat visualisasi struktur domain dalam 3 dimensi. *Cygwin* digunakan untuk mengkonversi bentuk *file cfg* menjadi *file povray*. Setelah *software* terinstal dan siap digunakan maka dilakukan kegiatan simulasi. Simulasi dilakukan dengan membuat file bahan yang berisi parameter-parameter bahan CoFe yaitu konstanta *exchange*, momen spin atom dan energi anisotropi. Selain itu juga membuat file *input* yang berisi bentuk kristal, struktur kristal, dan perintah simulasi. Kedua file tersebut diletakkan dalam satu folder. Kemudian dilakukan *running* simulasi. Simulasi mikromagnetik dijalankan dengan memvariasikan komposisi Fe (x) yaitu $x = 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80,$ dan 0.90 serta variasi geometri yaitu *nanocube* dan *nanosphere*. Data output

yang digunakan untuk analisis data adalah magnetisasi pada berbagai temperatur, suseptibilitas pada berbagai temperatur serta energi demagnetisasi, energi anisotropi, dan energi *exchange* pada berbagai temperatur. Kemudian dari analisis tersebut ditentukan besarnya temperatur Curie. Hasil analisis ini menjadi dasar untuk membuat kesimpulan.

3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis dan sumber data input yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data yang digunakan didapatkan dari hasil penelitian yang sudah ada. Data atau parameter yang digunakan untuk *input* simulasi mikromagnetik pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ untuk *input* data simulasi mikromagnetik

	Iron (Fe)	Cobalt (Co)	Alloy CoFe	Satuan
Struktur Kristal	BCC	HCP	BCC/FCC ^(a)	-
Unit Sel α	2.866	2.507	2.83 ^(b)	Å
Atom spin momen μ_s	2.22	1.72	-	μ_B
Konstanta <i>Exchange</i> J_{ij}	7.050×10^{-21}	6.064×10^{-21}	7.836×10^{-21}	J/link
Energi Anisotropi k	5.65×10^{-25}	6.69×10^{-24}	1.35×10^{-24} ^(c)	J/atom

Sumber : Evans *et al.*, (2014), (a) Popova *et al.*, (2012) (b) Shouzhong *et al.*, (2015), (c) Fukuma (2009).

3.3 Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukurannya

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu variabel bebas, variabel terikat dan variabel kontrol. Variabel bebas didefinisikan sebagai variabel yang mempengaruhi atau yang menyebabkan timbulnya variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah komposisi Fe (x) pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ dan geometri. Variasi komposisi yang digunakan untuk simulasi mikromagnetik *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ yaitu $x = 10\%$, 20% , 30% , 40% , 50% , 60% , 70% , 80% , dan 90% . Sedangkan variasi geometri yang digunakan yaitu *nanocube* dan *nanosphere*. Variabel terikat didefinisikan sebagai variabel yang mengalami perubahan karena perlakuan variabel bebas. Variabel terikat dalam

penelitian ini adalah magnetisasi pada berbagai temperatur, susceptibilitas pada berbagai temperatur, serta energi demagnetisasi, energi anisotropi, dan energi *exchange* pada berbagai temperatur yang kemudian digunakan untuk menentukan besar temperatur Curie dari bahan CoFe. Besarnya temperatur Curie untuk $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ adalah 1193 K, sedangkan untuk $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ adalah 1253 K (Sundar dan Deevi, 2005). Temperatur Curie *alloy* CoFe sekitar 1250 K, di atas temperatur ini *alloy* CoFe menjadi bahan paramagnetik (Maclaren, 1999). Sedangkan variabel kontrol didefinisikan sebagai variabel yang dibuat sama atau faktor lain diluar perlakuan yang dikenakan pada objek penelitian. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah parameter yang digunakan untuk *input* simulasi mikromagnetik pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ yang ditunjukkan pada tabel 1. Struktur kristal yang digunakan adalah BCC ketika presentase Co kurang dari 75% dan FCC ketika presentase Co lebih dari 75% dengan arah uniaxial anisotropi pada (1 1 0) dan faktor redaman $\alpha = 0.1$. Temperatur kontrol yang digunakan adalah 0 K sampai 1500 K. Selain itu bahan magnetik yang digunakan adalah bahan *alloy* CoFe geometri *nanocube* dengan ukuran panjang sisi 5 nm dan *alloy* CoFe geometri *nanosphere* dengan ukuran diameter 5 nm.

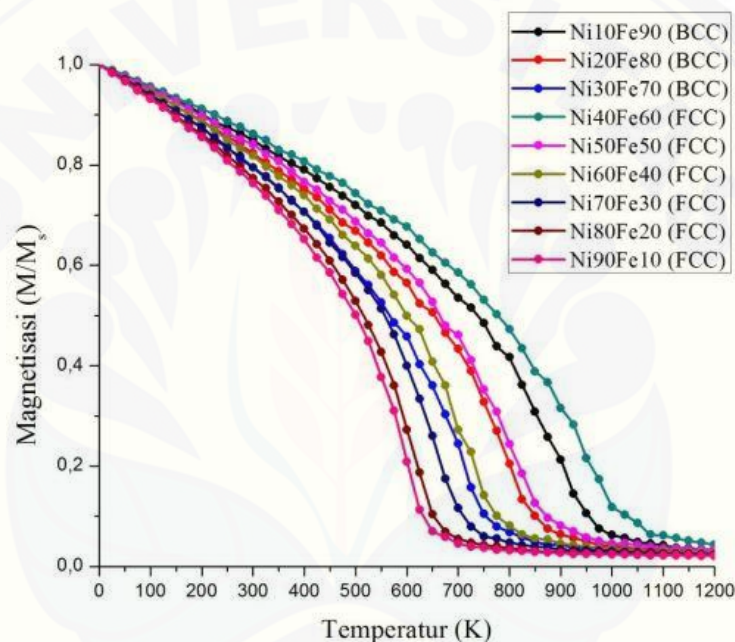
3.4 Metode Analisis Data

3.4.1 Analisis data simulasi untuk menentukan grafik magnetisasi terhadap temperatur pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$

Simulasi mikromagnetik yang telah dilakukan dengan program *Vampire* menghasilkan *file output*. *File* ini kemudian dianalisis menggunakan *software Origin*. Analisis dilakukan dengan membuat grafik hubungan antara magnetisasi terhadap perubahan temperatur berdasarkan variasi komposisi (x) dari bahan *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ untuk masing-masing geometri *nanocube* dan *nanosphere*. Dari grafik ini dapat ditentukan temperatur Curie. Contoh grafik hubungan antara magnetisasi terhadap perubahan temperatur ditunjukkan pada Gambar 3.1.

Penelitian ini mengacu pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sundar dan Deevi (2005) yang menunjukkan bahwa temperatur Curie dari $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ geometri *nanocube* adalah 1193 K, sedangkan untuk $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ geometri *nanocube* adalah 1253 K. Hasil simulasi temperatur Curie untuk $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ dan $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ telah dibandingkan dengan referensi. Keakurasian diketahui dengan persamaan (3.1).

$$\text{Keakurasian} = \left(1 - \left(\frac{T_{C(\text{referensi})} - T_{C(\text{eksperimen})}}{T_{C(\text{referensi})}} \right) \right) \times 100\% \quad (3.1)$$

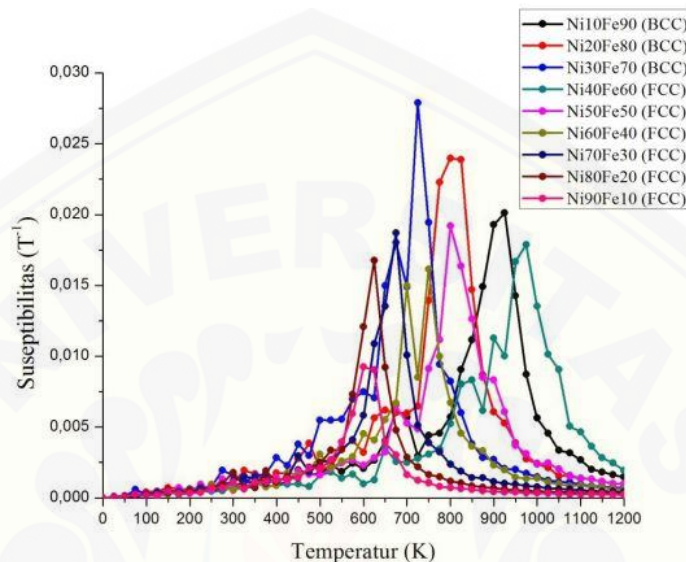


Gambar 3.1 Grafik hubungan antara magnetisasi terhadap perubahan temperatur bahan NiFe pada berbagai komposisi (Sumber: Badriyah, 2017)

3.4.2 Analisis data simulasi untuk menentukan grafik suseptibilitas terhadap temperatur pada $\text{alloy Co}_{1-x}\text{Fe}_x$

Simulasi mikromagnetik yang telah dilakukan dengan program *Vampire* menghasilkan *file output*. *File* ini kemudian dianalisis menggunakan *software Origin*. Analisis dilakukan dengan membuat grafik hubungan antara suseptibilitas terhadap perubahan temperatur berdasarkan variasi komposisi (x) dari bahan *alloy*

$\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ untuk masing-masing geometri *nanocube* dan *nanosphere*. Dari grafik ini dapat ditentukan temperatur Curie. Contoh grafik hubungan antara perubahan temperatur terhadap susceptibilitas ditunjukkan pada Gambar 3.2.



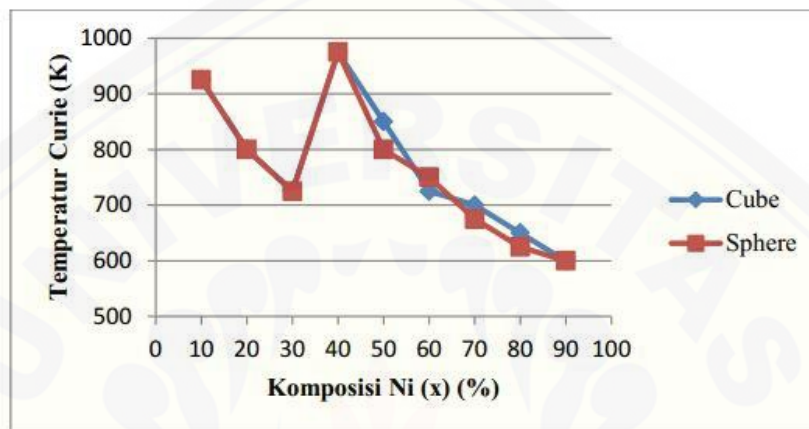
Gambar 3.2 Grafik hubungan antara perubahan temperatur terhadap susceptibilitas bahan NiFe pada berbagai komposisi (Sumber: Badriyah, 2017)

3.4.3 Analisis data simulasi untuk menentukan grafik energi demagnetisasi, energi anisotropi, dan energi *exchange* terhadap temperatur pada pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$

Simulasi mikromagnetik yang telah dilakukan dengan program *Vampire* menghasilkan *file output*. *File* ini kemudian dianalisis menggunakan *software Origin*. Analisis dilakukan dengan membuat grafik hubungan antara energi demagnetisasi terhadap perubahan temperatur, grafik hubungan energi anisotropi terhadap perubahan temperatur, dan grafik hubungan energi *exchange* terhadap perubahan temperatur berdasarkan variasi komposisi (x) dari bahan *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ untuk masing-masing geometri *nanocube* dan *nanosphere*.

Berdasarkan analisis dari grafik magnetisasi terhadap perubahan temperatur, grafik susceptibilitas terhadap perubahan temperatur, grafik energi

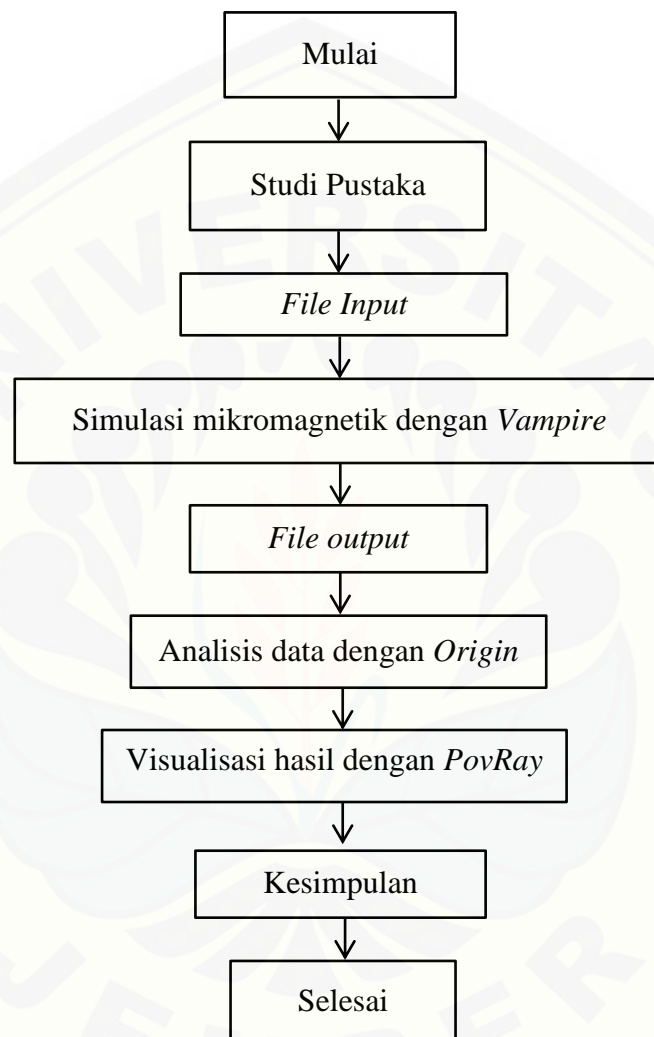
demagnetisasi terhadap perubahan temperatur, energi anisotropi terhadap perubahan temperatur, dan energi *exchange* terhadap perubahan temperatur maka dapat ditentukan besar temperatur Curie pada berbagai variasi komposisi dan variasi geometri *nanocube* dan *nanosphere*. Contoh grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Grafik hubungan antara variasi komposisi Ni (x) terhadap temperatur Curie pada bahan $alloy Ni_xFe_{1-x}$ (Sumber: Badriyah, 2017).

3.5 Kerangka Pemecahan Masalah

Penelitian yang telah dilakukan secara umum digambarkan dalam diagram alir penelitian seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram alir penelitian

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

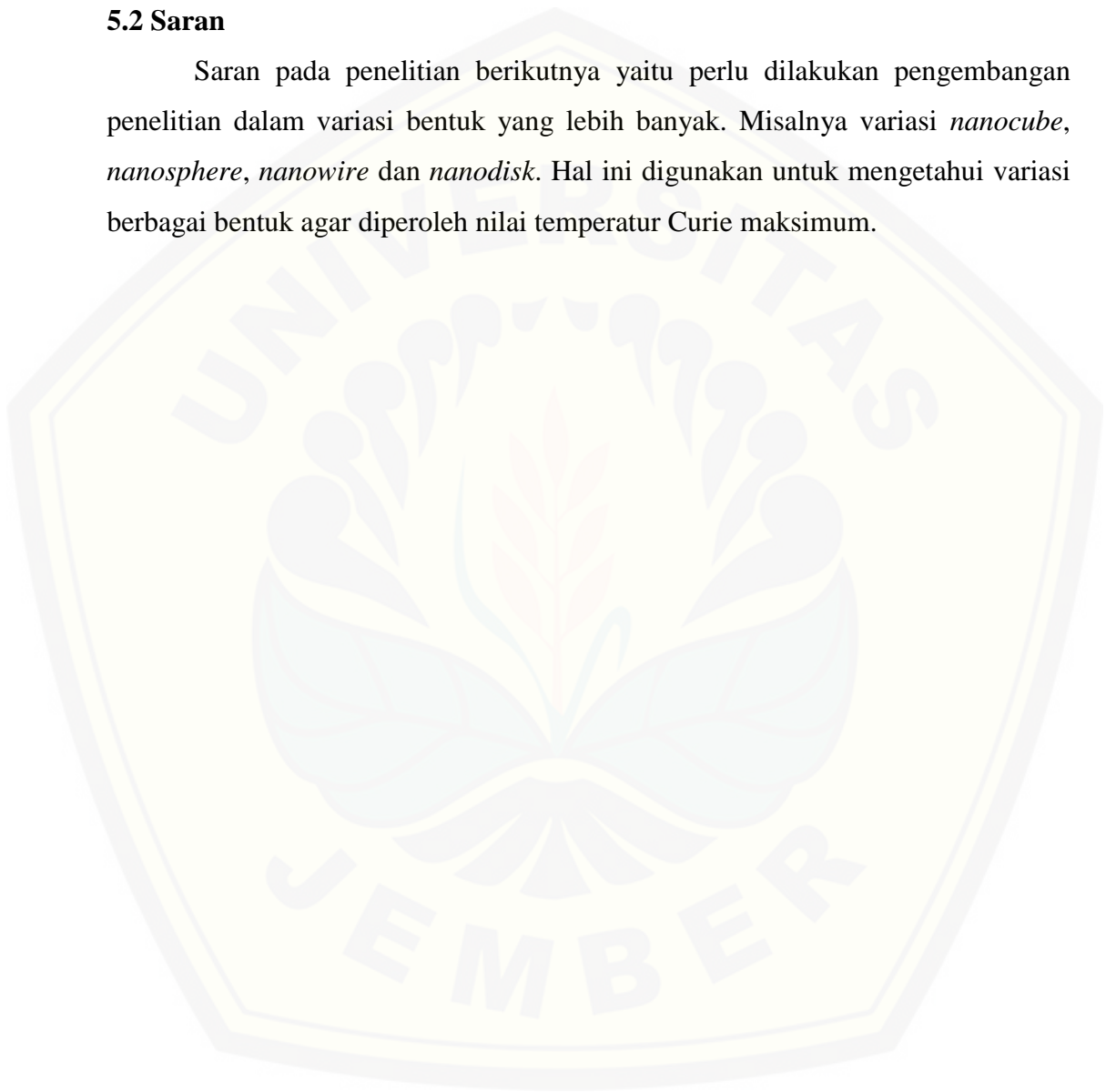
Berdasarkan pada penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Perubahan magnetisasi terhadap temperatur dipengaruhi oleh komposisi Fe (x) pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$. Magnetisasi maksimum terjadi pada temperatur 0 K. Kemudian nilai magnetisasi akan menurun hingga mendekati nol pada temperatur tertentu yang disebut dengan temperatur Curie. Hal ini disebabkan oleh arah orientasi spin yang berubah menjadi acak sehingga resultan magnetisasinya mendekati nol. Dari komposisi Fe (x) sebesar 10% hingga 90% dihasilkan perubahan magnetisasi terhadap temperatur yang berbeda-beda sehingga diperoleh nilai temperatur Curie yang berbeda-beda pula.
2. Perubahan nilai suseptibilitas terhadap temperatur dipengaruhi oleh komposisi Fe (x) pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$. Ketika temperatur meningkat, nilai suseptibilitas mengalami fluktuasi (*complex behavior*) dan mencapai suatu nilai maksimum. Nilai maksimum tersebut berada pada temperatur tertentu yang disebut dengan temperatur Curie. Setelah suseptibilitas mencapai nilai maksimum, kemudian suseptibilitas mengalami penurunan secara bertahap. Dari komposisi Fe (x) sebesar 10% hingga 90% dihasilkan perubahan suseptibilitas terhadap temperatur yang berbeda-beda sehingga diperoleh nilai temperatur Curie yang berbeda-beda pula.
3. Nilai temperatur Curie dipengaruhi oleh komposisi Fe (x) pada *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$. Nilai temperatur Curie meningkat dari komposisi Fe (x) 10% hingga komposisi Fe (x) 20%. Namun mengalami penurunan drastis pada komposisi Fe (x) 30%. Kemudian terjadi peningkatan dan penurunan nilai temperatur Curie hingga komposisi Fe (x) 90%. Hasil yang tidak linear ini disebabkan oleh perubahan struktur kristal pada *alloy* CoFe dari FCC ke BCC. Bahan *alloy* CoFe mempunyai nilai temperatur Curie tertinggi pada komposisi $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ yaitu 1500 K pada geometri *nanocube* dan 1475 K pada geometri

nanosphere. Sedangkan untuk variasi bentuk, temperatur Curie memiliki nilai yang tidak jauh berbeda antara geometri *nanocube* dan geometri *nanosphere*.

5.2 Saran

Saran pada penelitian berikutnya yaitu perlu dilakukan pengembangan penelitian dalam variasi bentuk yang lebih banyak. Misalnya variasi *nanocube*, *nanosphere*, *nanowire* dan *nanodisk*. Hal ini digunakan untuk mengetahui variasi berbagai bentuk agar diperoleh nilai temperatur Curie maksimum.



DAFTAR PUSTAKA

- Aharoni, A. 1996. *Introduction to The Theory of Ferromagnetism*. New York: Oxford Science Publication.
- Badriyah, L. 2017. Kajian Sifat-Sifat Magnetik Alloy $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}$ Berdasarkan Variasi Komposisi Ni(x) Menggunakan Metode Simulasi Mikromagnetik. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Bergheul, S., F. Otmane, dan M. Azzaz. 2012. Structural and microwave absorption properties of nanostructured Fe-Co alloys. *Advanced Powder Technology*. 23(5): 580-582.
- Borg, R. J. 1992. *The Physical Chemistry of Solids*. USA: Academic Press, Inc.
- Brown, W. F. 1963. *Micromagnetism*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Callister, W. D. dan D.G. Rethwisch. 2009. *Material Science and Engineering An Introduction Eight Edition*. New York: Oxford University Press Inc.
- 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.
- Chermaini, M.D., Zandrahimi, H. Shokrollahi, dan S.Sharafi. 2009. The effect of milling time and composition on microstructural and magnetic properties of nanostructured Fe-Co alloys. *Journal of Alloy and Compound*. 477(1-2): 45-50.
- Chung, Y. 2007. *Introduction to Material Science and Engineering*. USA: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Ebbing, D. D. dan S. D. Gammon. 2017. *General Chemistry Eleventh Edition*. USA: Cengage Learning.

- Evans, R. F. L., W. J. Fan, P. Chureemart, T. A. Ostler, M. O. A. Ellis, dan R. W. Chantrell. 2014. Atomistic spin model simulations of magnetic nanomaterials. *Journal of Physics: Condensed Matter* 26: 103202 (23pp).
- Fukuma, Y., Z. Lu, H. Fujiwara, G. J. Mankey, W. H. Butter, dan S. Matsunuma, 2009. Strong uniaxial magnetic anisotropy in CoFe films on obliquely sputtered underlayer. *Journal Of Applied Physics* 106. 076101.
- Ida, N. 2004. *Engineering Electromagnetics Second Edition*. USA: Springer.
- Khadra, G. 2015. *Magnetic and Structural Properties of Size-Selected FeCo Nanoparticle Assemblies*. French: Claude Bernard University.
- Kittel, C. 2005. *Introduction to Solid State Physics Eighth Edition*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Kopský, V. 2015. Crystallography and magnetic phenomena. *Symmetry* 7: 125-145.
- Maclaren, J. M., T. C. Schulthess, W. H. Butler, R. Sutton, dan M. McHenry. 1999. Electronic structure, exchange interaction and Curie temperature of FeCo. *Journal of Applied Physics*. 85(8): 4833(4pp).
- Mardiansyah, D. 2013. Analisa sifat feromagnetik material menggunakan metode monte carlo. *Jurnal Ilmiah Edu Research* 2.
- Mardona. 2012. Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi pada Material Feromagnet Co dan Ni Berbentuk Nanowire. *Tesis*. Jakarta: Universitas Jakarta.
- Miltat, J. E. dan M. J. Donahue. 2007. *Numerical Micromagnetism: Finite Difference Method*. USA: NIST University.
- Newmman, M. 1999. *Monte Carlo Mehoden In Statistical Physics*. New York: Oxford University Press.

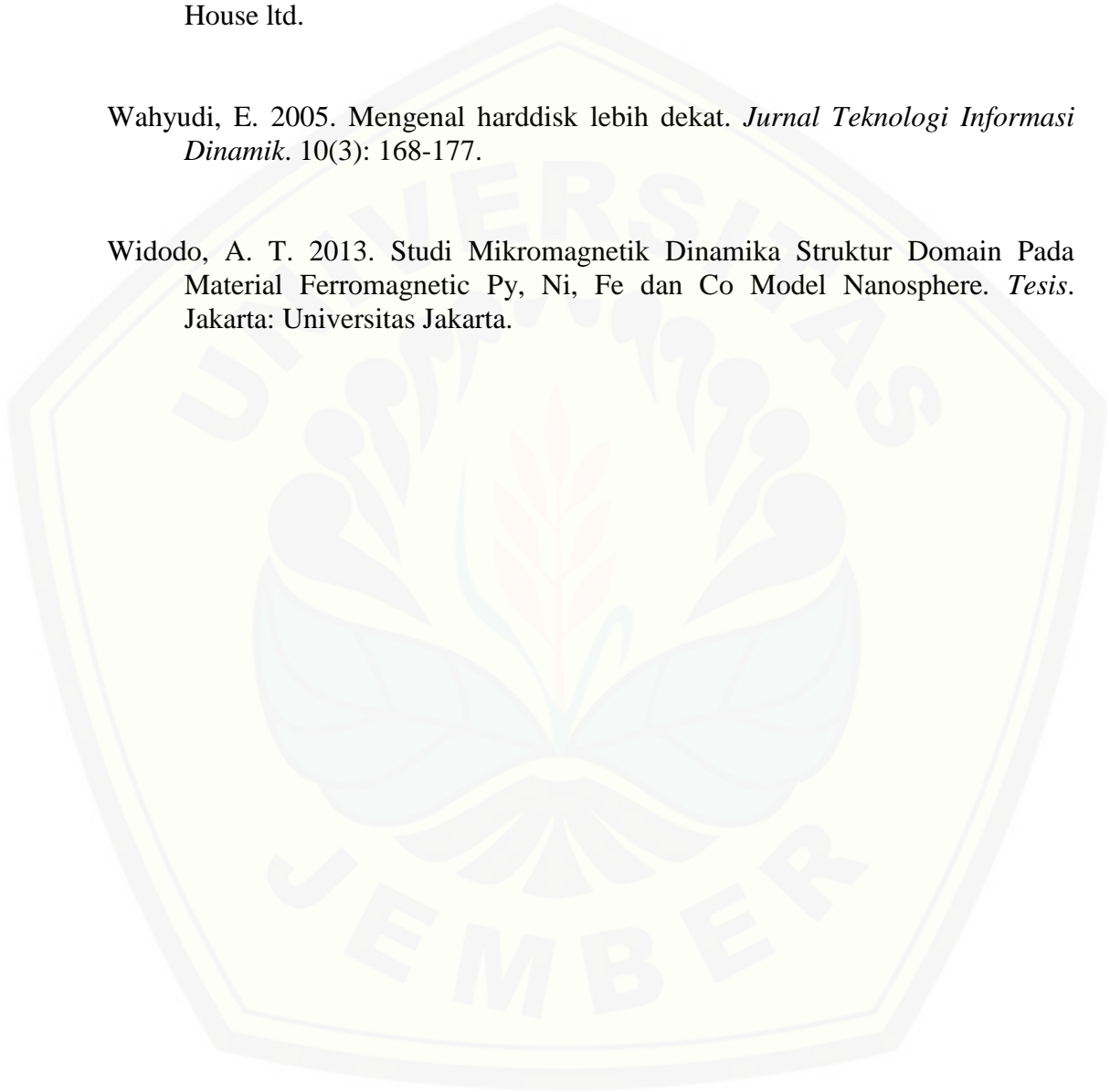
- Ni'mah, M. A. 2016. Studi Material Alloy Feromagnetik $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ Model Nanocube Menggunakan Simulasi Mikromagnetik Model Atomistik. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Popova, A. N., Y. A. Zaharov, dan V. M. Pugachev. 2012. Chemical synthesis, structure and magnetic properties of nanocrystalline Fe-Co alloys. *Material letter* 74: 173-175.
- Reitz, J. 1993. *Fundations of Electromagnetic Theory*. New York: Addison-Wesley Publishing Company.
- 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. *Executive Summary Disertasi*. Jember: Universitas Jember.
- Sánchez-De Jesús, F., A. M. Bolarín-Miró, C. A. C. Escobedo, G. Torres-Villaseñor, dan P. Vera-Serna. 2016. Structural analysis and magnetic properties of FeCo alloys obtained by mechanical alloying. Hindawi Publishing Corporation. *Journal of Metallurgy* 2016: ID 8347063(8 pages).
- Shouzhong, P., W. Mengxing, Y. Hongxin, Z. Lang, N. Jiang, J. Zhou, Z. Youguang, A. Hallal, M. Chshiev, L. Kang, Z. Wang, dan Z. Weisheng. 2015. Origin of interfacial perpendicular magnetic anisotropy in MgO/CoFe/ metallic capping layer structures. *Scientific Reports* 5: 18173.
- Sudjatmoko, 2005. Kajian Sifat Bahan Lapisan Tipis Feromagnetik $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}$ Hasil Deposisi dengan Teknik Evaporasi Hampa. *Prosiding*. Yogyakarta: Puslitbang Teknologi Maju. ISSN 0216 – 3128.
- Sudjatmoko. 2007. Kajian Transisi Fase Lapisan Tipis Feromagnetik Melalui Pengamatan Nilai Resistivitas Listrik Sebagai Fungsi Suhu. *Prosiding PPI-PDIPTN*. Yogyakarta: Pusat teknologi akselerator dan proses bahan-BATAN. ISSN: 0216-3128.

Sundar, R. S., dan S. C. Deevi. 2005. Soft magnetic FeCo alloys: alloy development, processing, and properties. USA: Maney for the institute and ASM International. *International Materials Reviews*. 50(3): 157-192.

Tisza, M. 2001. *Physical Metallurgy for Engineers*. London: Freund Publishing House ltd.

Wahyudi, E. 2005. Mengenal harddisk lebih dekat. *Jurnal Teknologi Informasi Dinamik*. 10(3): 168-177.

Widodo, A. T. 2013. Studi Mikromagnetik Dinamika Struktur Domain Pada Material Ferromagnetic Py, Ni, Fe dan Co Model Nanosphere. *Tesis*. Jakarta: Universitas Jakarta.



LAMPIRAN**Lampiran A. Perhitungan Nilai Keakurasian**

$$1. \left[1 - \left(\frac{T_{CReference} - T_{CExperiment}}{T_{CReference}} \right) \right] \times 100\%$$

$$\left[1 - \left(\frac{1193 K - 1000}{1193} \right) \right] \times 100\%$$

$$= 83.8223 \%$$

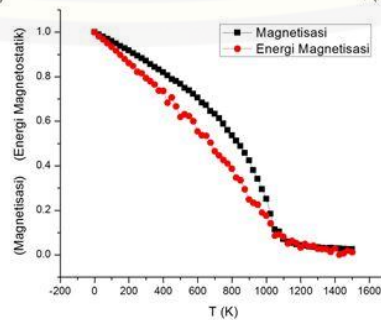
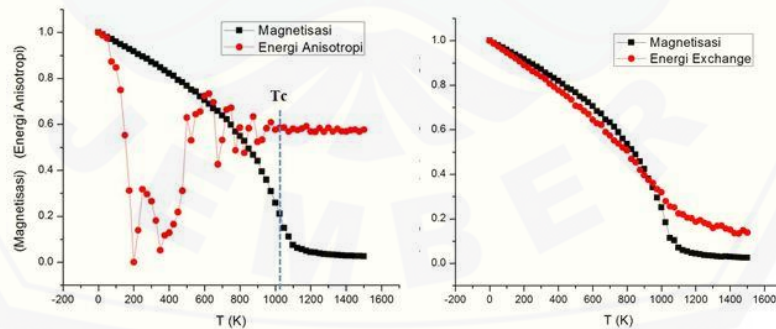
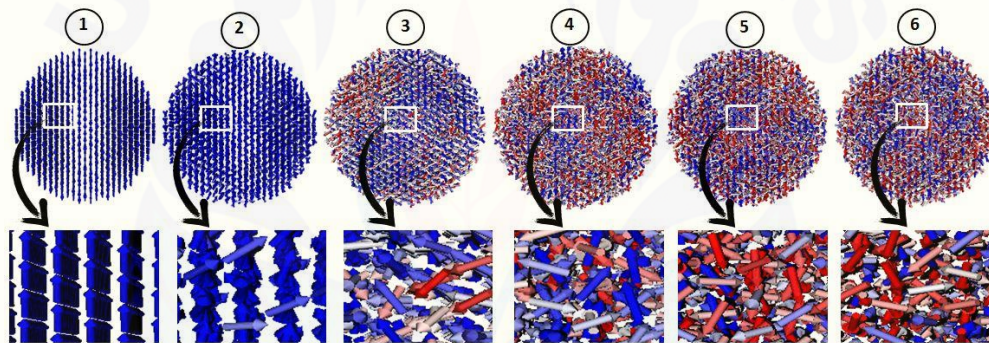
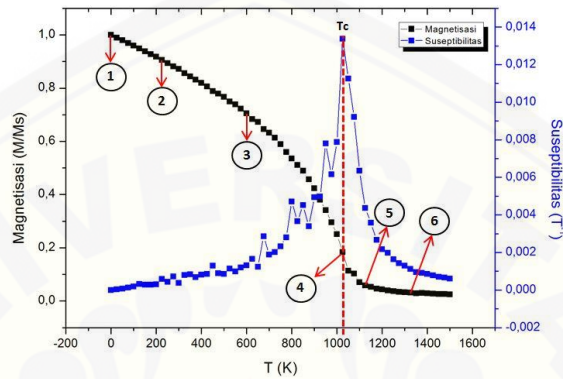
$$2. \left[1 - \left(\frac{T_{CReference} - T_{CExperiment}}{T_{CReference}} \right) \right] \times 100\%$$

$$\left[1 - \left(\frac{1253 K - 1025}{1253} \right) \right] \times 100\%$$

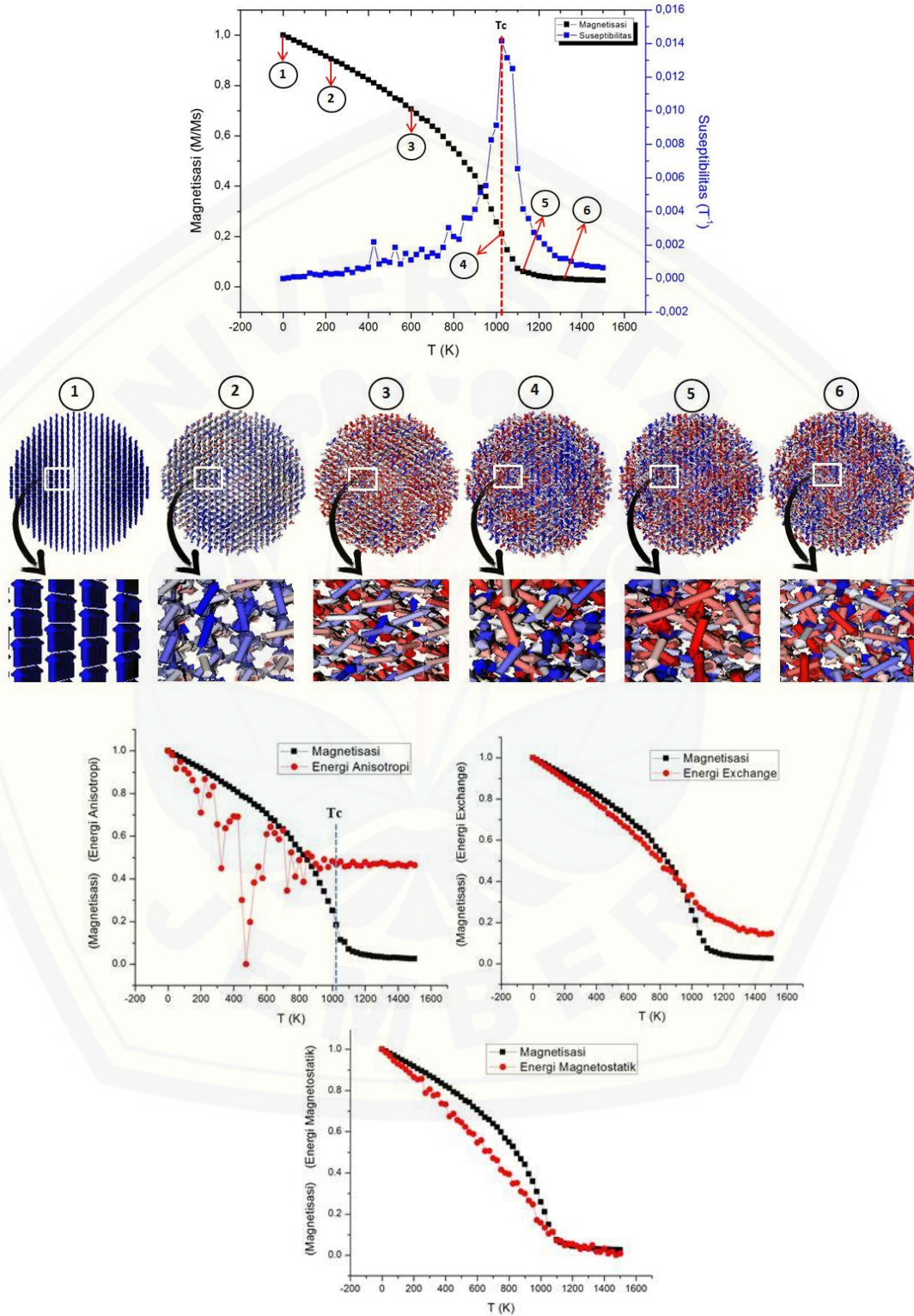
$$= 81.80367 \%$$

Lampiran B. Analisis Temperatur Curie pada Berbagai Variasi Komposisi dan Variasi Geometri

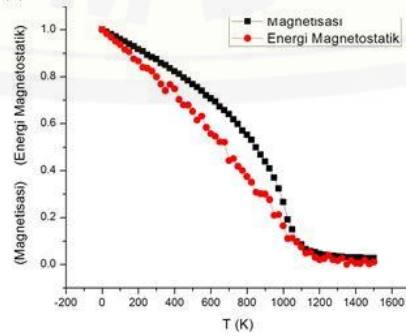
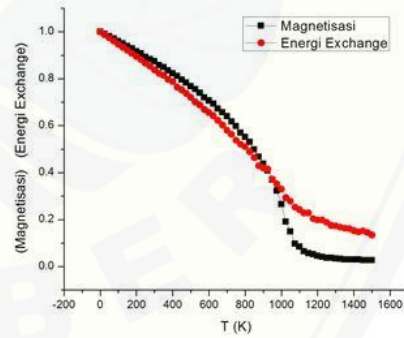
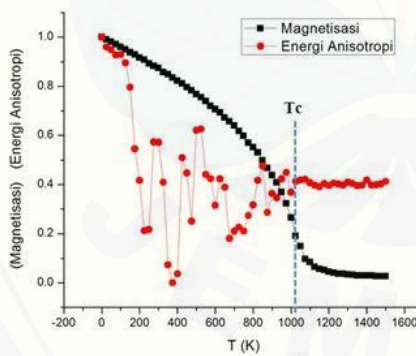
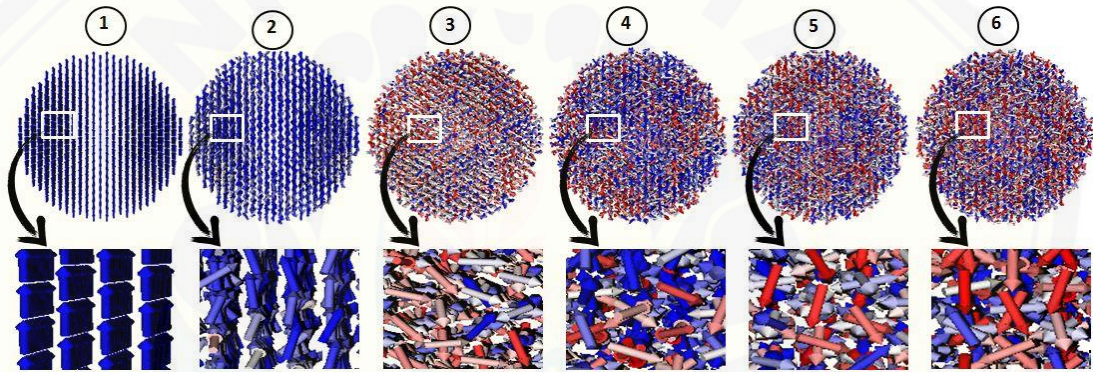
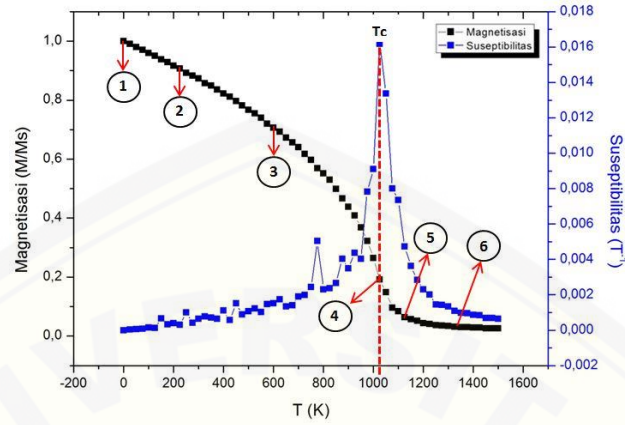
1. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{10}\text{Fe}_{90}$ geometri *nanosphere*.



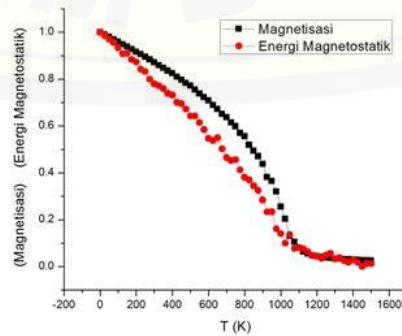
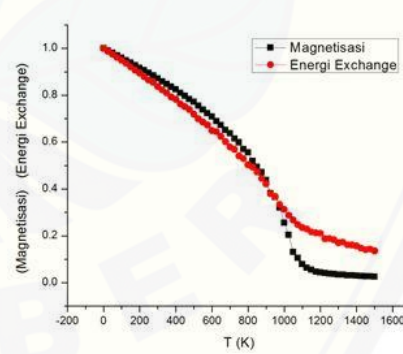
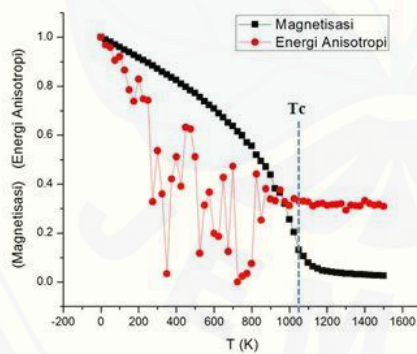
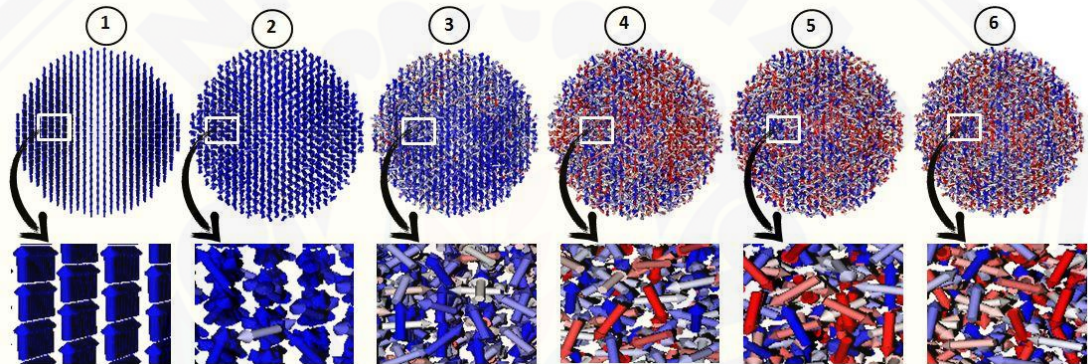
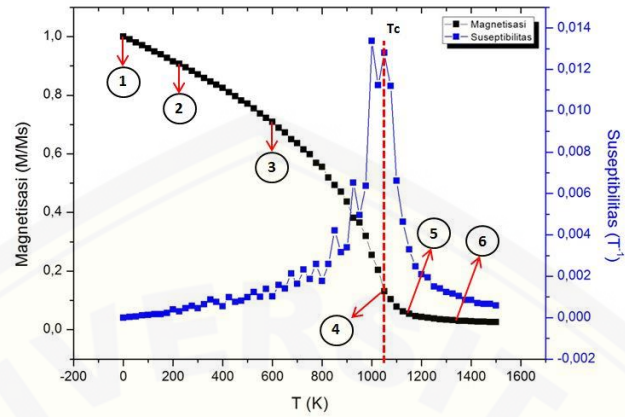
2. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{80}$ geometri *nanosphere*.



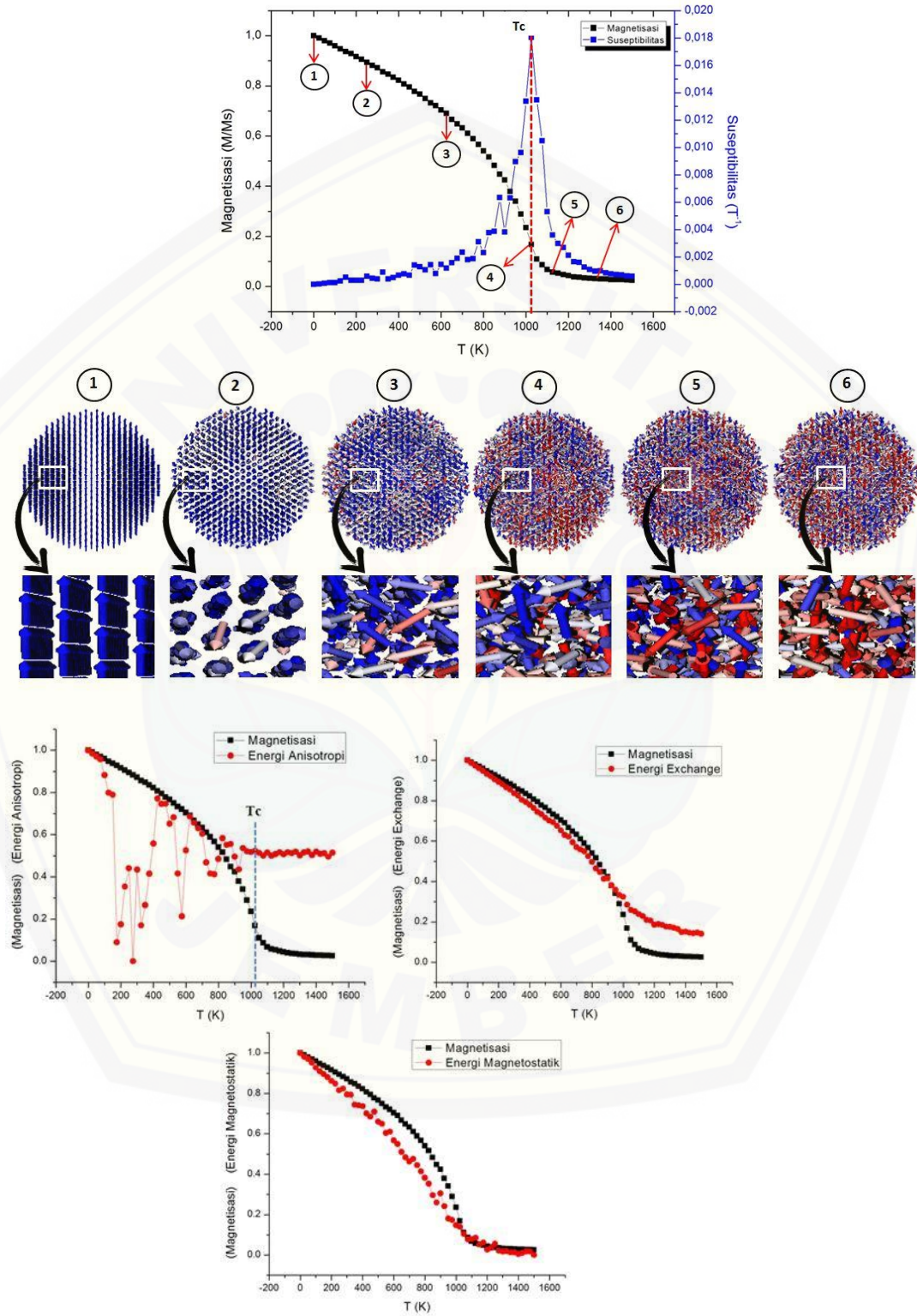
3. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ geometri *nanosphere*.



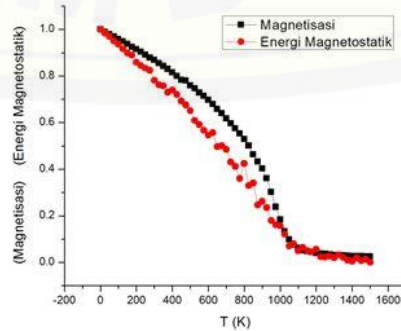
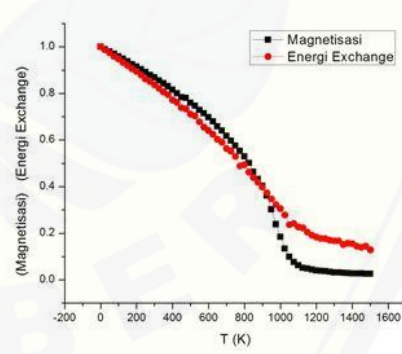
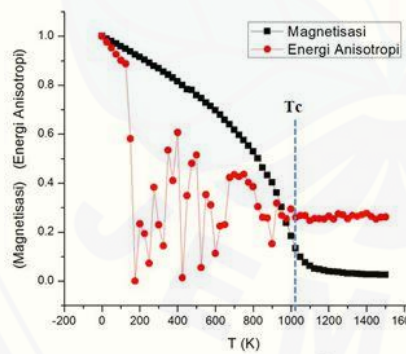
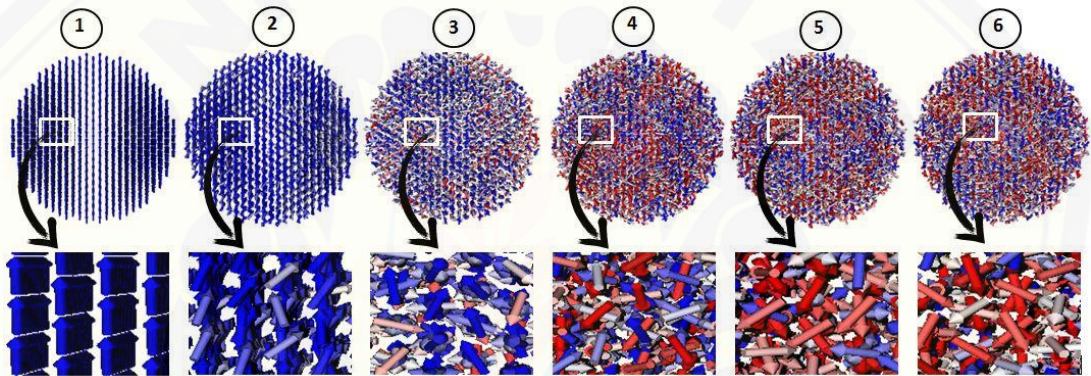
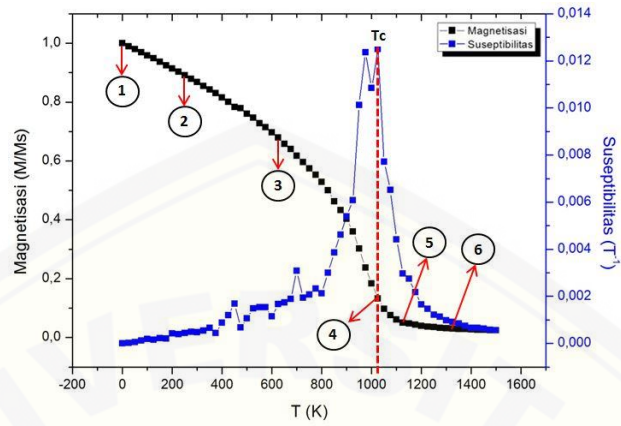
4. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{60}$ geometri *nanosphere*.



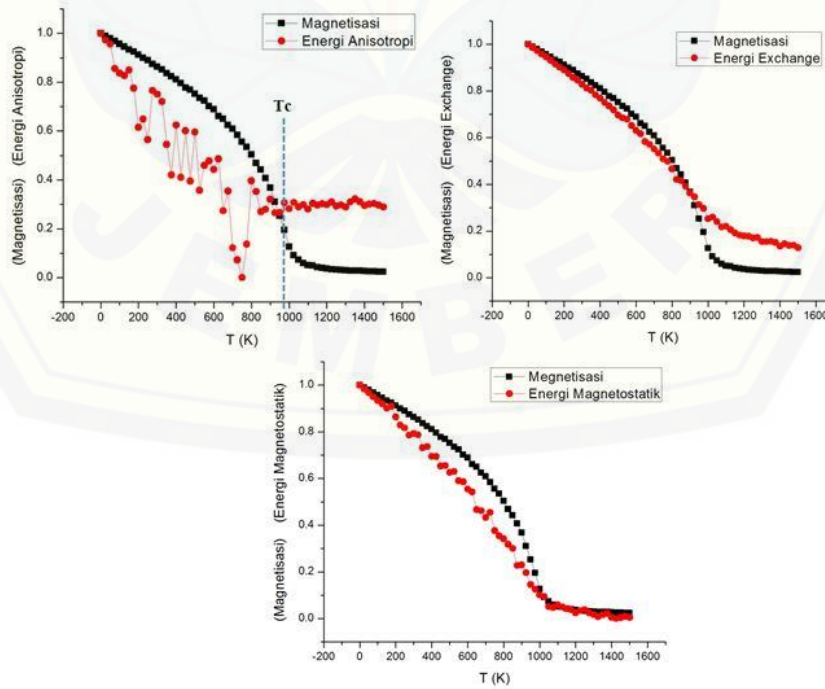
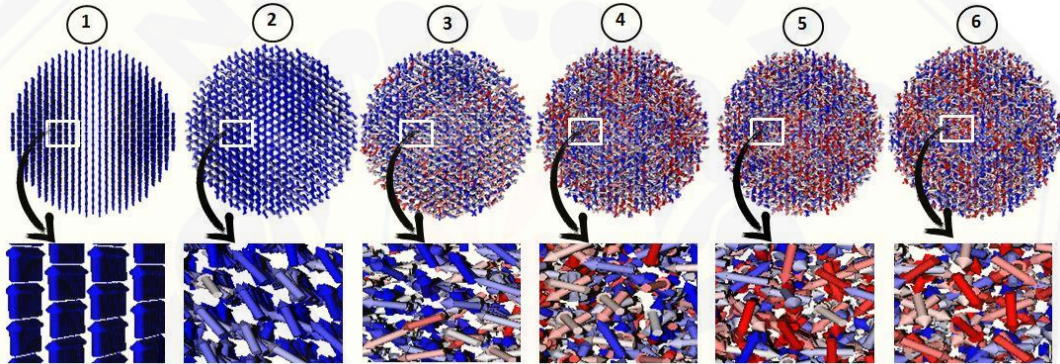
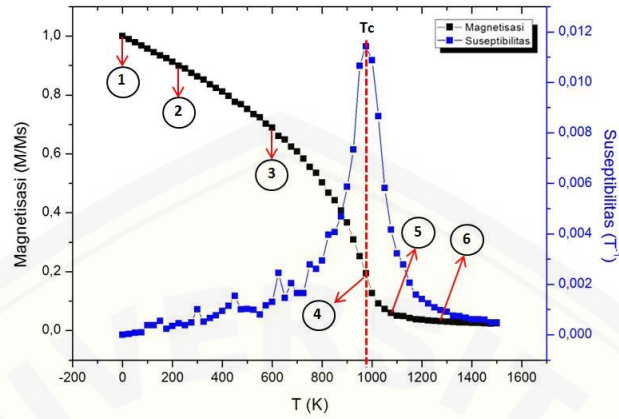
5. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ geometri *nanosphere*.



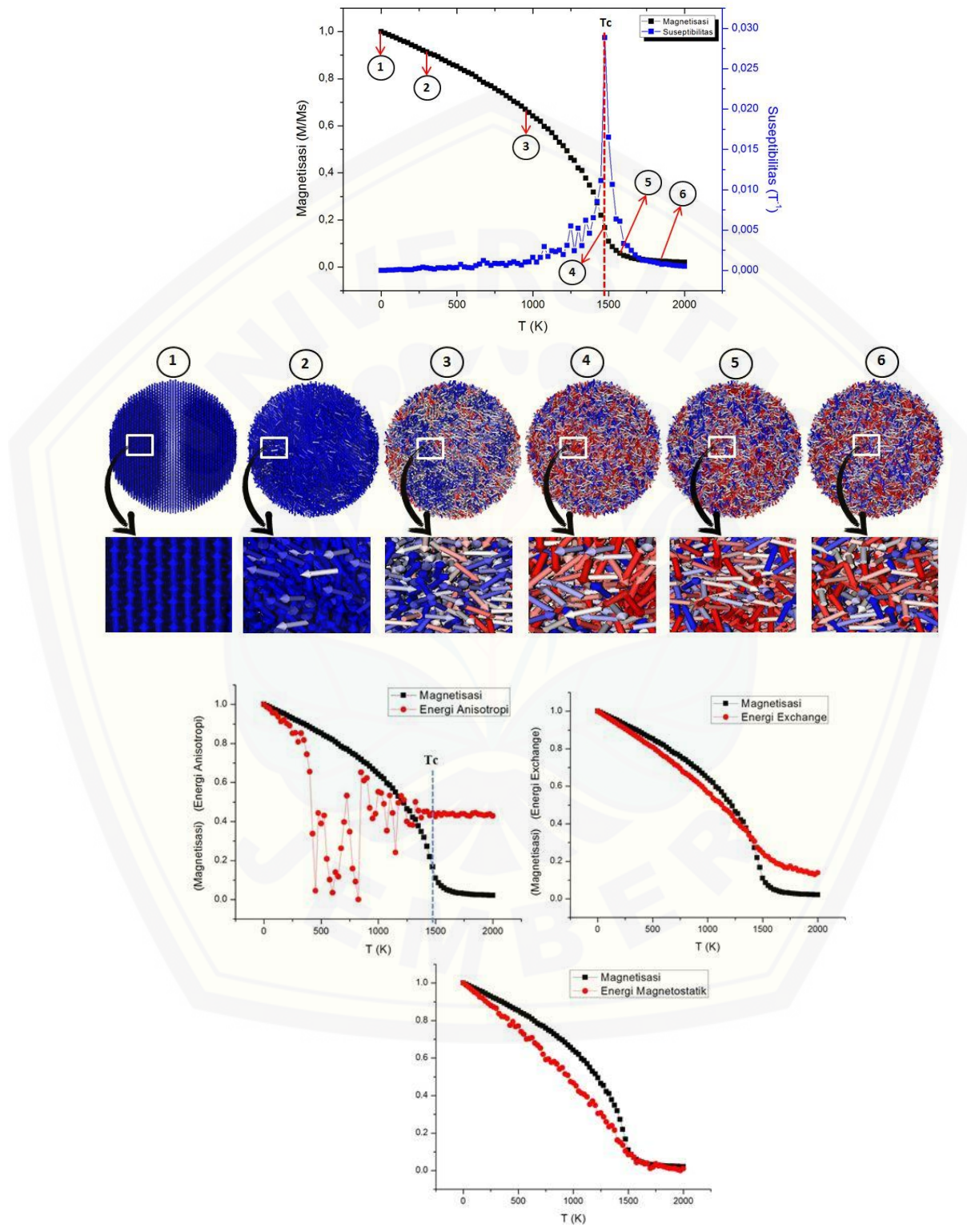
6. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40}$ geometri *nanosphere*.



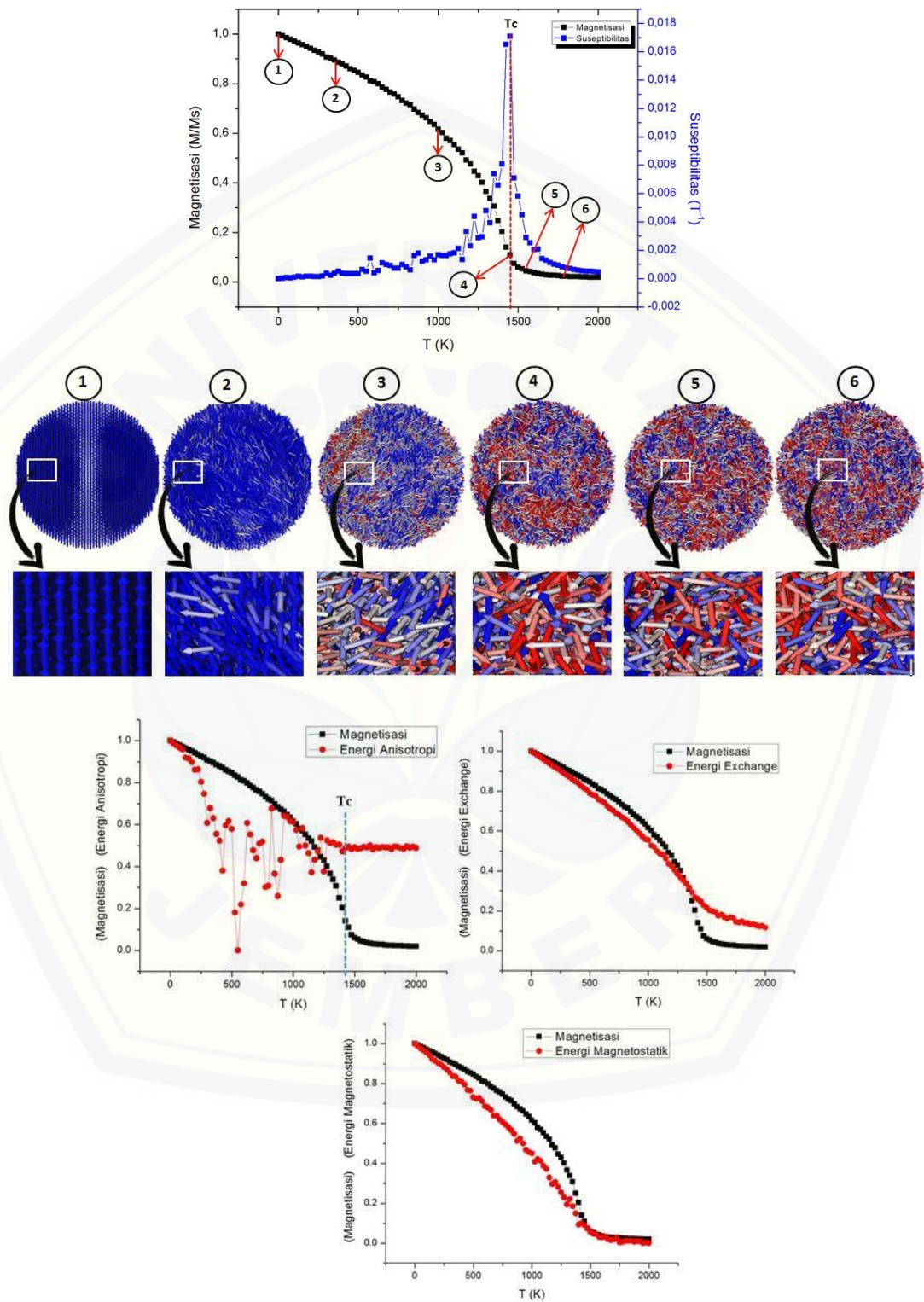
7. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ geometri *nanosphere*.



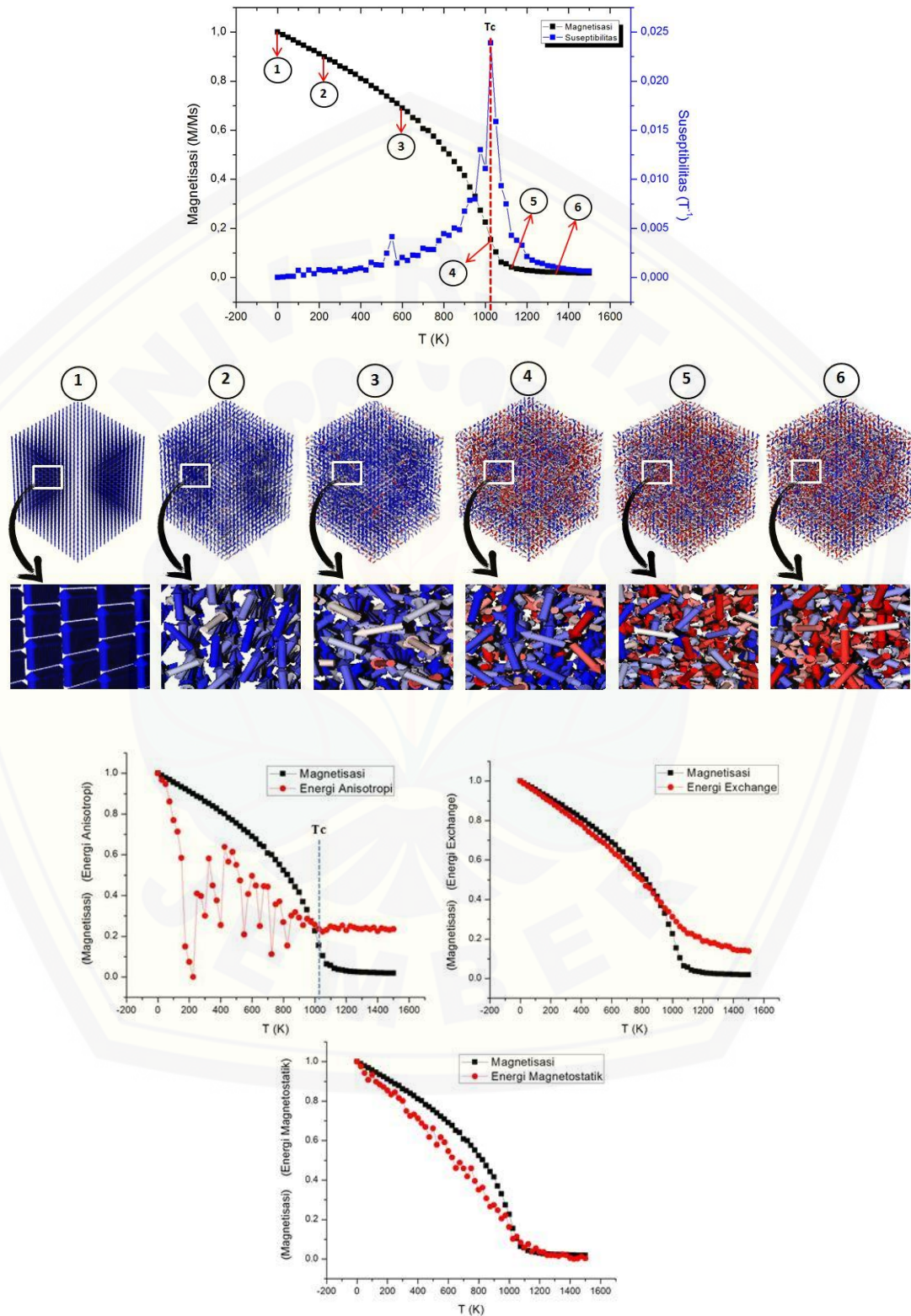
8. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ geometri *nanosphere*.



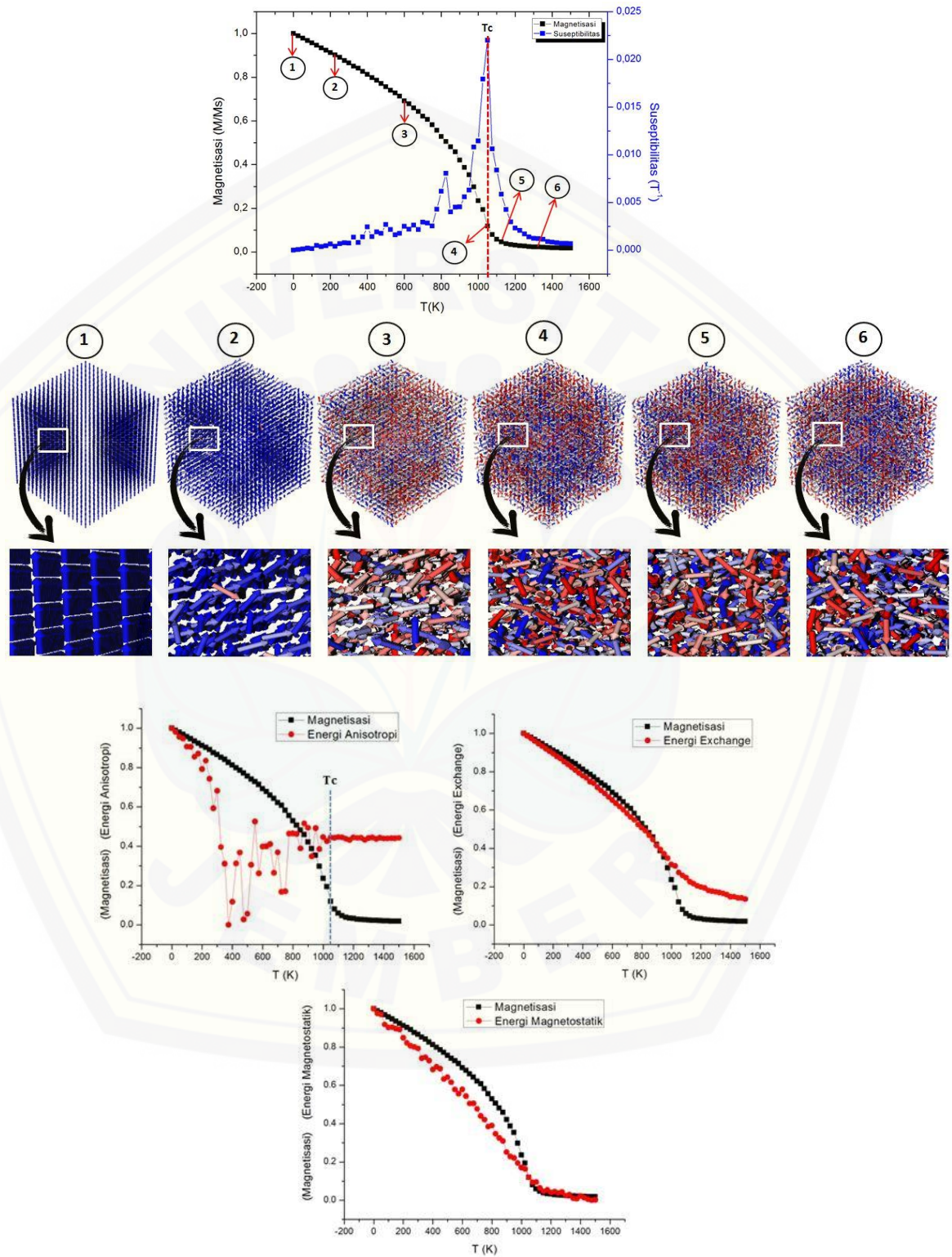
9. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ geometri *nanosphere*.



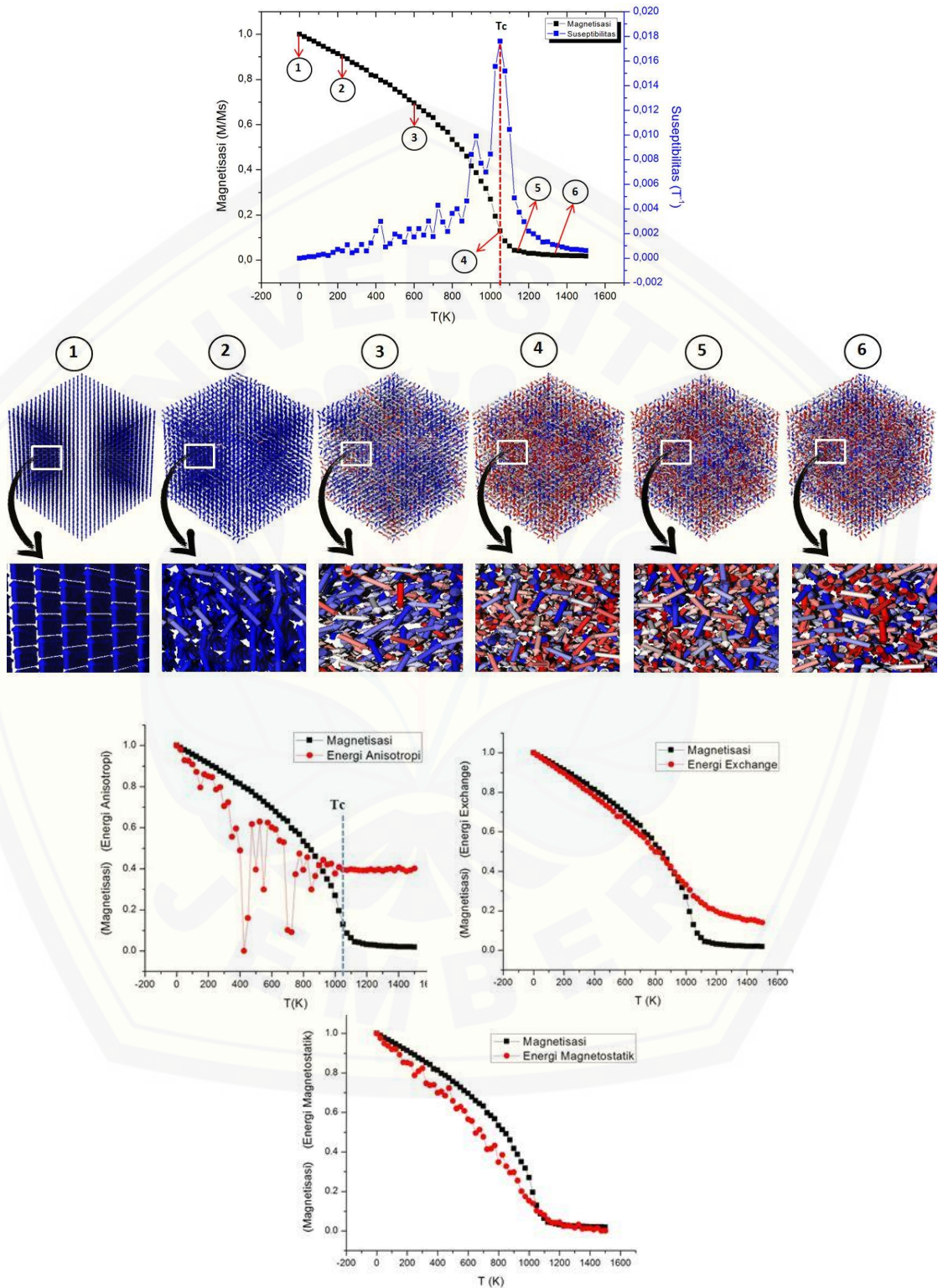
10. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{10}\text{Fe}_{90}$ geometri *nanocube*.



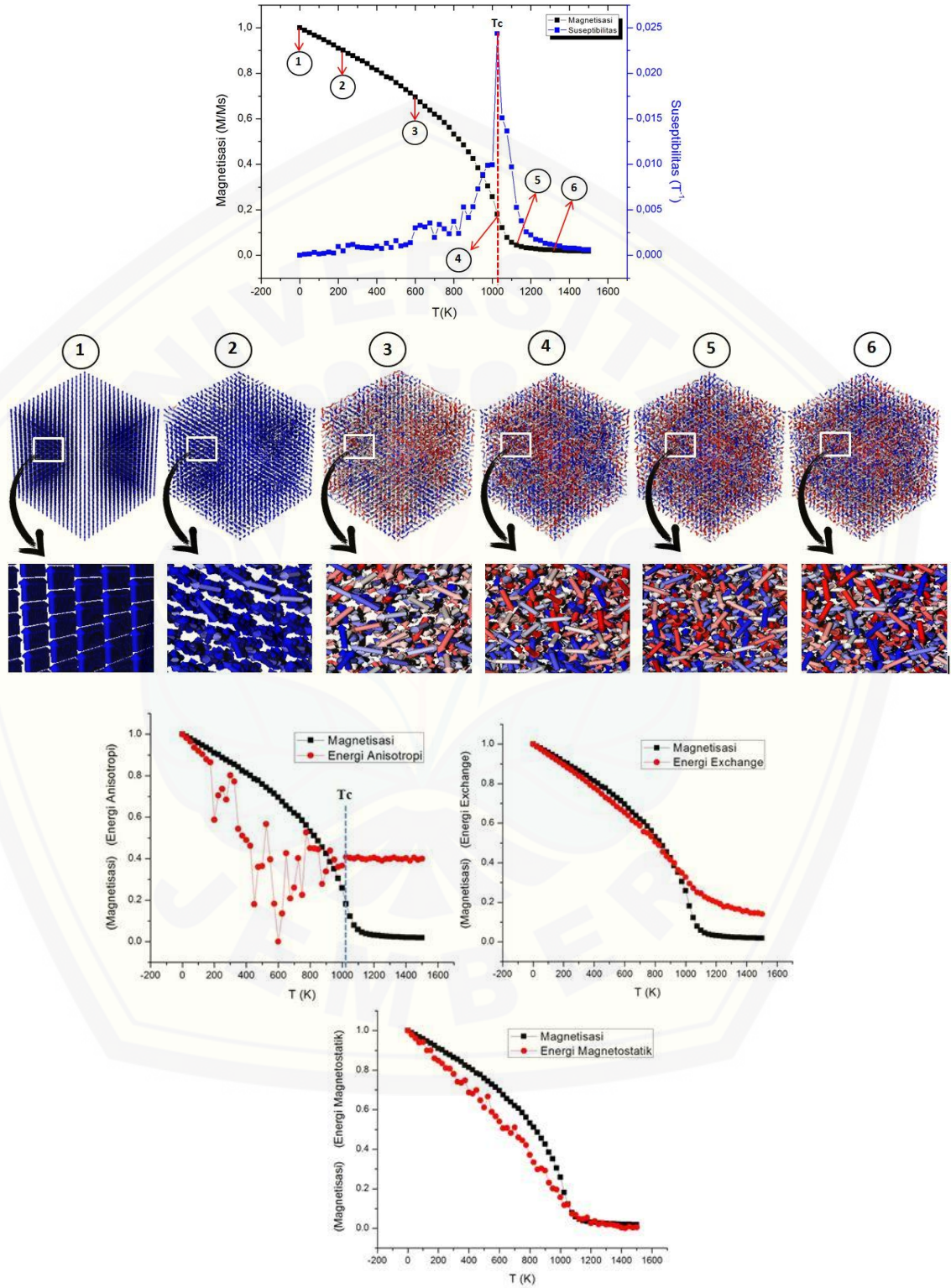
11. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi *exchange* dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{80}$ geometri *nanocube*.



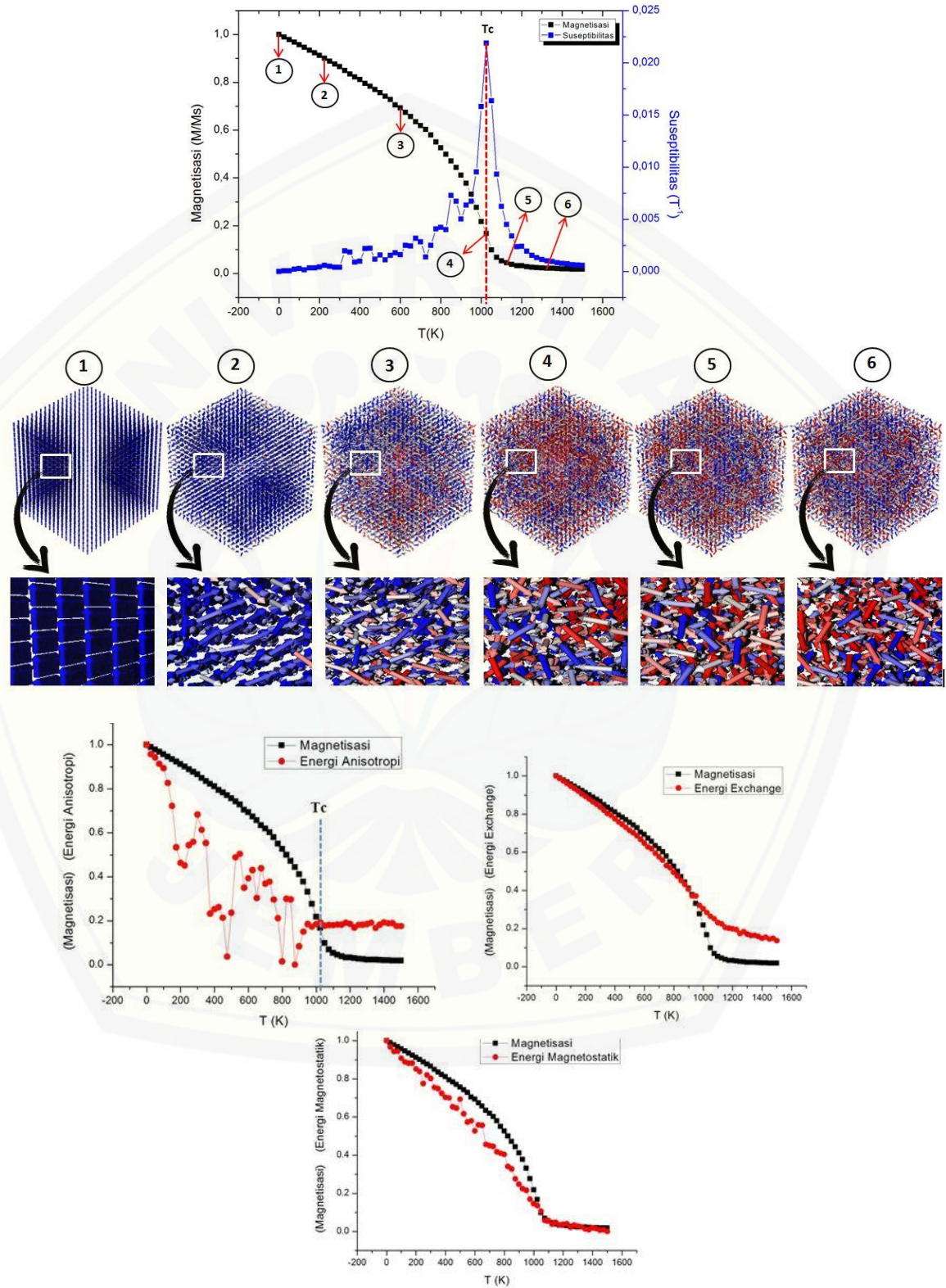
12. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ geometri *nanocube*.



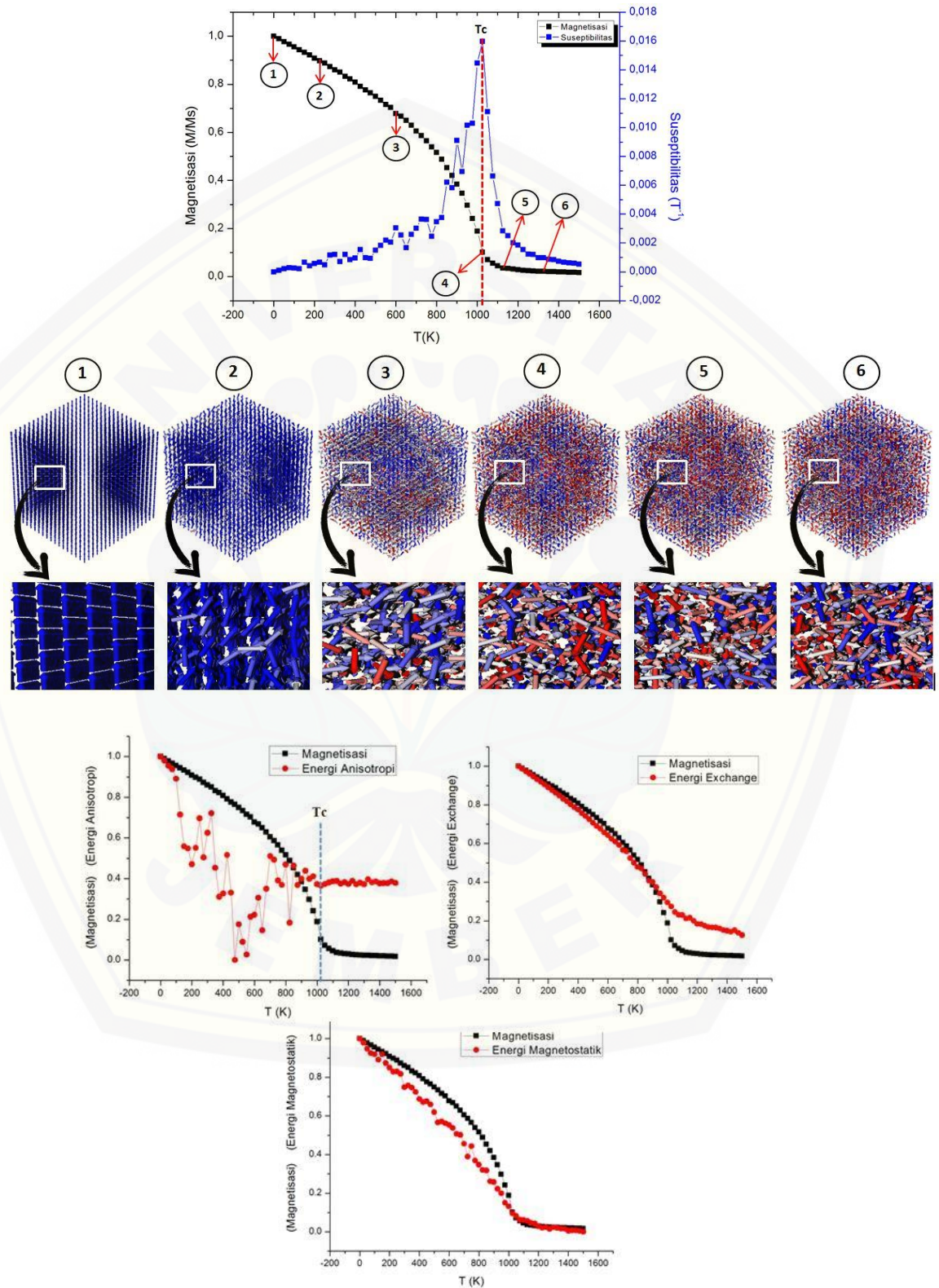
13. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{60}$ geometri *nanocube*.



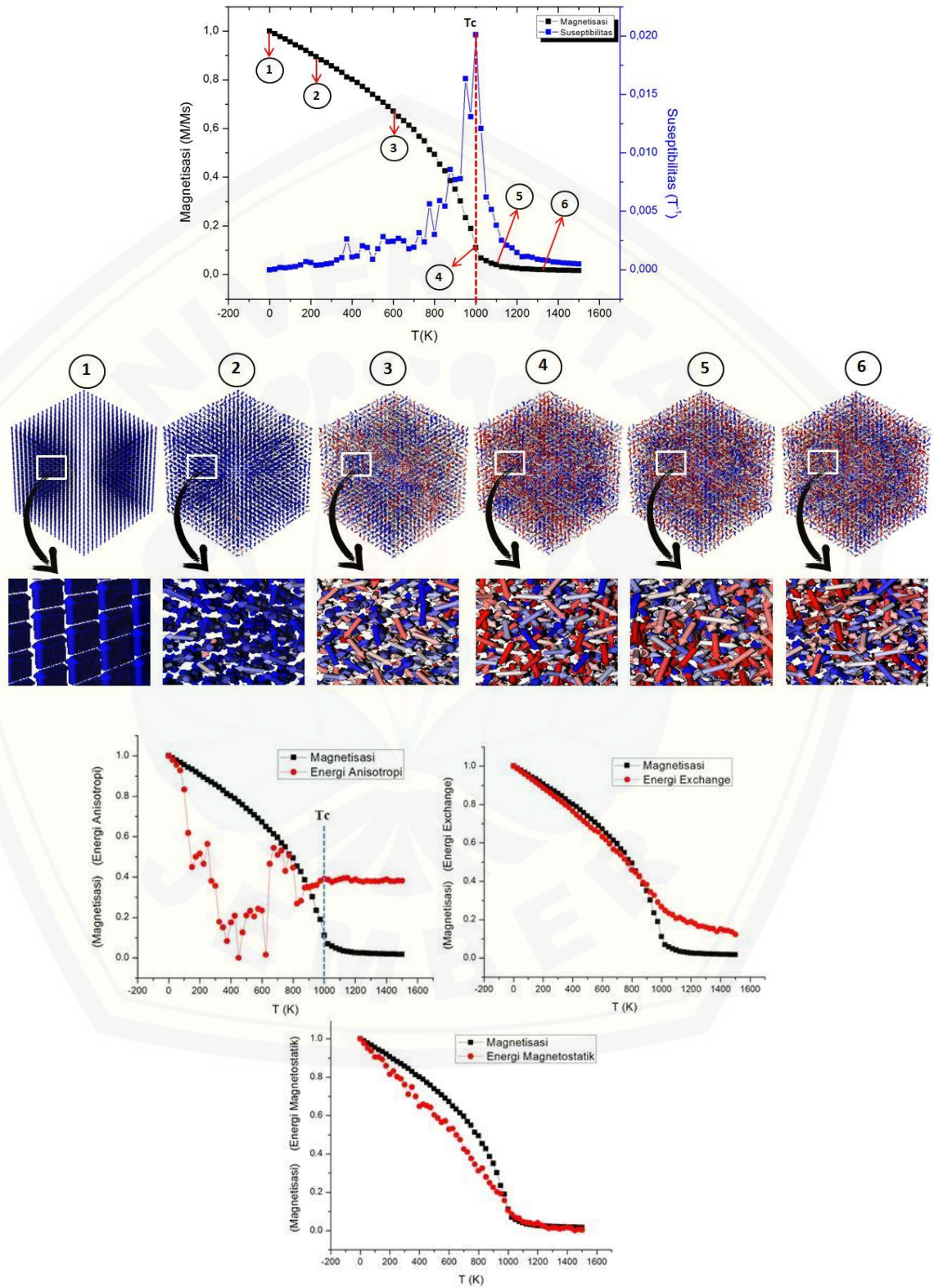
14. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ geometri *nanocube*.



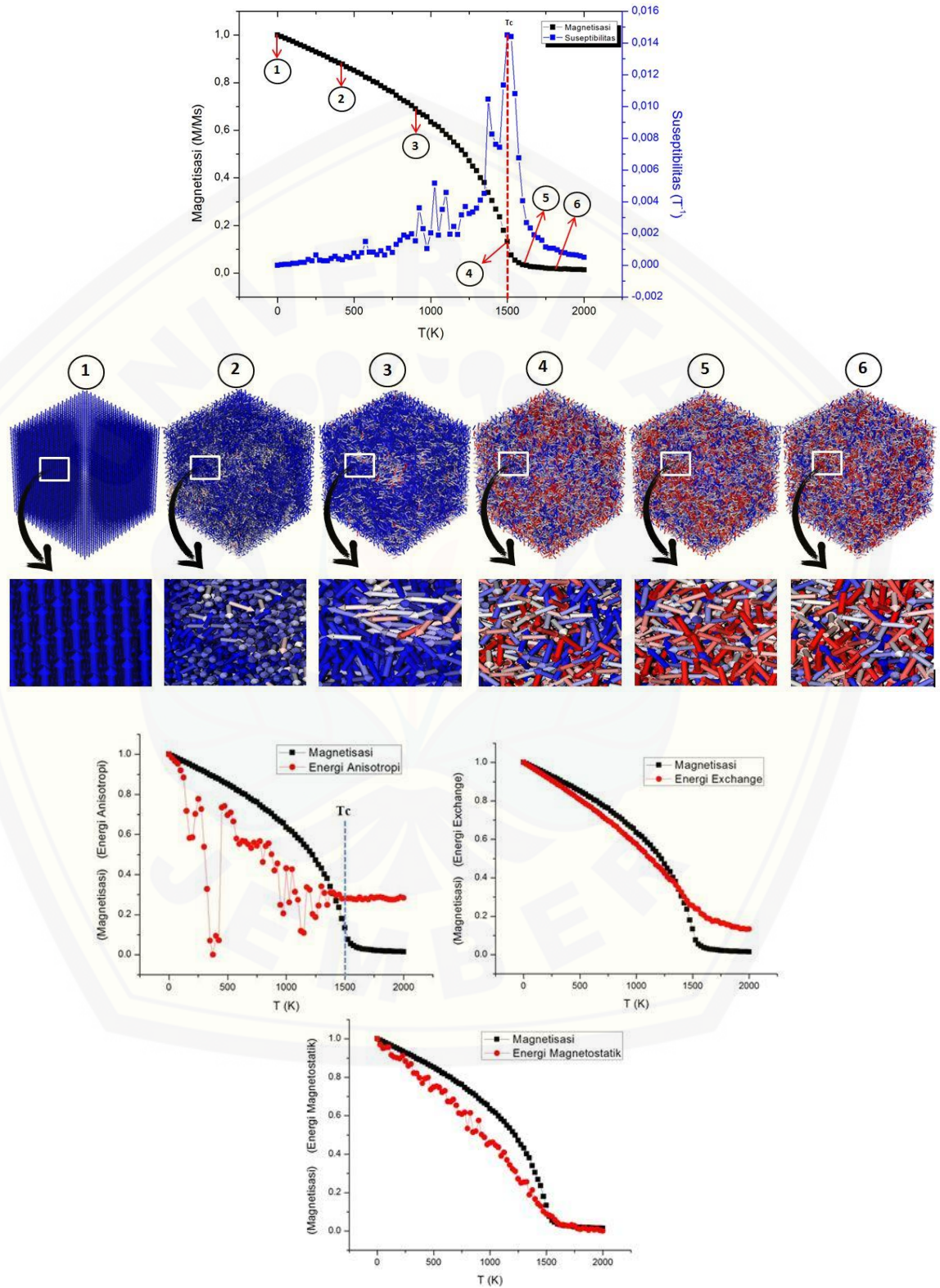
15. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40}$ geometri *nanocube*.



16. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ geometri *nanocube*.



17. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ geometri *nanocube*.



18. Perubahan magnetisasi, grafik suseptibilitas, grafik energi anisotropi, energi exchange dan energi magnetostatik pada alloy $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ geometri *nanocube*.

