



**ANALISIS TEMPERATUR CURIE DAN KURVA HISTERISIS
MATERIAL $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$
DENGAN SIMULASI MIKROMAGNETIK**

SKRIPSI

Oleh

**Muhamad Rony Febiantoro
NIM 161810201024**

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



**ANALISIS TEMPERATUR CURIE DAN KURVA HISTERISIS
MATERIAL $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$
DENGAN SIMULASI MIKROMAGNETIK**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan studi pada Program Studi Fisika (S1) dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh

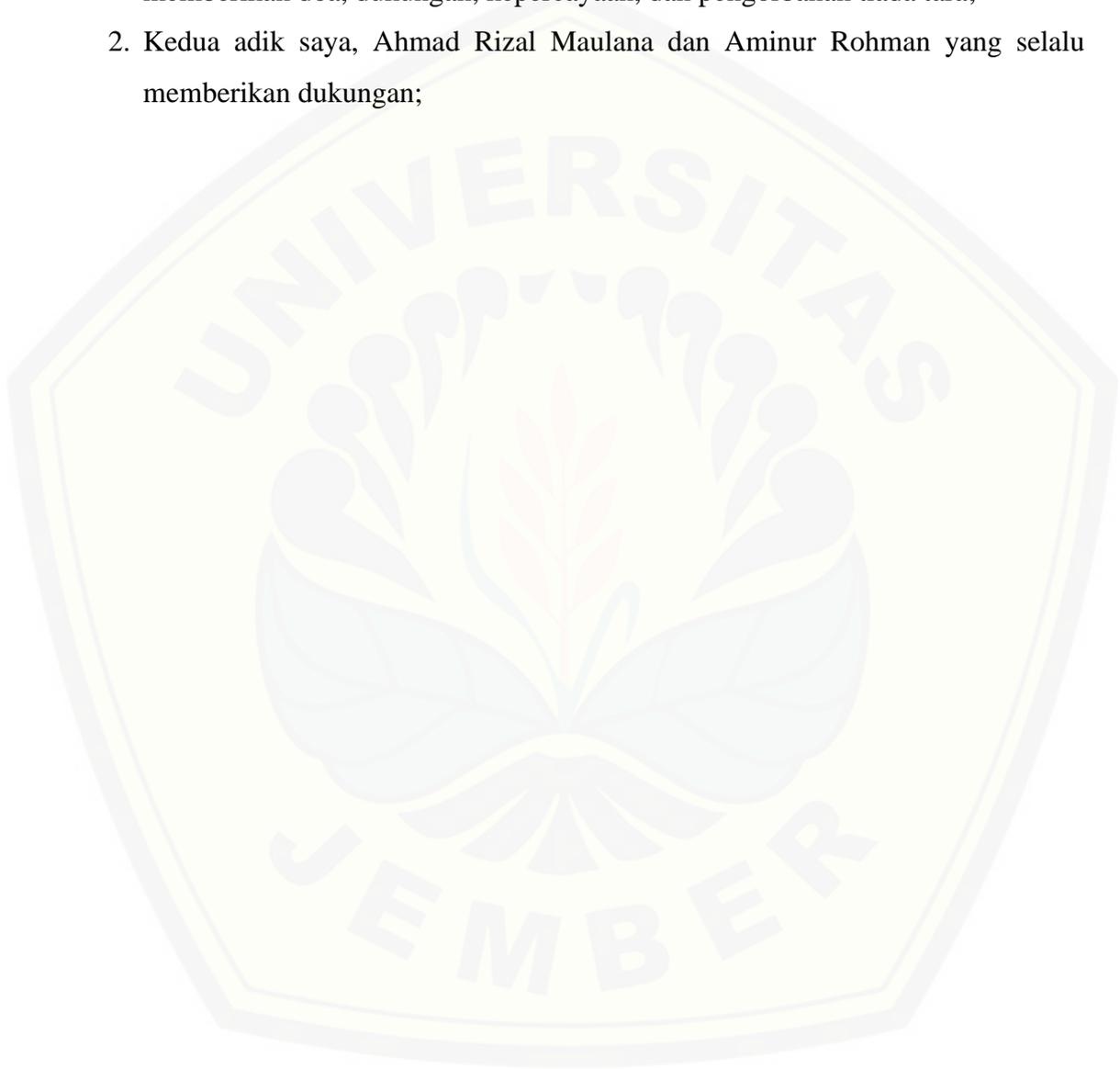
**Muhamad Rony Febiantoro
NIM 161810201024**

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

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan dengan penuh rasa sayang dan hormat kepada :

1. Kedua orang tua saya, Ibu Anik Mihartatik dan Bapak Ainur Rasyid yang selalu memberikan doa, dukungan, kepercayaan, dan pengorbanan tiada tara;
2. Kedua adik saya, Ahmad Rizal Maulana dan Aminur Rohman yang selalu memberikan dukungan;



MOTTO

“ I am still learning”



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Muhamad Rony Febiantoro

NIM : 161810201024

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Analisis Temperatur Curie dan Kurva Histerisis Material $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dengan 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 isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

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

Jember, 17 September 2020

Yang menyatakan,

Muhamad Rony Febiantoro

NIM 161810201024

SKRIPSI

**ANALISIS TEMPERATUR CURIE DAN KURVA HISTERISIS
MATERIAL $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$
DENGAN SIMULASI MIKROMAGNETIK**

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

Oleh

Muhamad Rony Febiantoro
NIM 161810201024

Pembimbing

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

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Sutisna S.Pd.,M.Si.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Analisis Temperatur Curie dan Kurva Histerisis Material $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dengan Simulasi Mikromagnetik” telah disetujui pada :

Hari, tanggal :

Tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas
Jember

Ketua,

Anggota I,

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

Dr. Sutisna, S.Pd., M.Si.
NIP 197301152000031001

Anggota II,

Anggota III,

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

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

Mengesahkan
Dekan,

Drs. Achmad Sjaifullah, M.Sc., Ph.D.
NIP 195910091986021001

RINGKASAN

Analisis Temperatur Curie dan Kurva Histerisis Material $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dengan Simulasi Mikromagnetik ; Muhamad Rony Febiantoro, 161810201024: 45 Halaman; Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember.

Hard Disk Drive (HDD) adalah perangkat penyimpanan data digital yang menggunakan *disk* (piringan) yang dilapisi dengan bahan magnetik. HDD mempunyai batas kemampuan dalam hal penyimpanan data, untuk menunjang spesifikasi dari sebuah komputer dengan cara meningkatkan kerapatan bit (*bit-areal-density*). Upaya meningkatkan kerapatan bit maka sama halnya dengan meningkatkan kapasitas data dari media perekam data tersebut. HDD dengan daya yang kuat dan tahan terhadap panas menghasilkan karakteristik magnetik yang baik pada temperatur tinggi. Material magnetik dibentuk dengan ukuran sangat kecil sehingga dapat meningkatkan kerapatan bit dari HDD. Pengetahuan terhadap karakteristik magnetik dan sifat bahan *Colossal Magnetoresistance* (CMR) berbasis manganit, khususnya oksida mangan dapat menawarkan harapan besar dalam teknologi HDD. Bahan CMR dapat menjadi solusi dengan kapasitas penyimpanan data yang semakin besar dan penggunaan daya rendah. Bahan magnetik CMR salah satunya adalah $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$.

Tujuan penelitian ini menganalisis nilai temperatur Curie dan kurva histerisis material $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dengan variasi ukuran 22 nm, 27 nm dan 32 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 yaitu 0 K, 100 K, 200 K, 300 K, dan 400 K.

Penelitian bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dilakukan secara simulasi mikromagnetik. Penelitian ini dilakukan untuk menginvestigasi sifat-sifat magnetiknya. Penentuan parameter dilakukan dengan mencari dari referensi serta menyesuaikan dengan

software yang digunakan. 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 $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ pada ukuran sisi kubus 22 nm menunjukkan nilai 335 K. Pada ukuran sisi kubus 27 nm dan 32 nm menunjukkan nilai 345 K. Karakteristik kurva histerisis pada material $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ menunjukkan adanya perubahan nilai medan saturasi dan medan koersivitas. Nilai medan saturasi dan medan koersivitas pada bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ saat ukuran sisi kubus 22 nm, 27 nm dan 32 nm semakin mengecil seiring meningkatnya variasi temperatur ketika bahan dinaikkan. Nilai medan saturasi dan koersivitas juga meningkat seiring bertambahnya ukuran sisi kubus bahan.

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Temperatur Curie dan Kurva Histerisis Material $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dengan 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. Sutisna 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 Nurul Priyantari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu dan pikiran untuk tambahan, kritik, dan saran yang 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;
6. Keluarga besar HIMAFI sebagai teman lebih dari saudara;
7. Semua pihak yang berjasa dan tidak dapat disebutkan satu per satu;

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, baik dari kesalahan pribadi maupun keterbatasan ilmu yang dimiliki. Oleh karena itu, penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat khususnya bagi almamater tercinta serta bagi setiap orang yang membacanya.

Jember, September 2020

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN.....	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN.....	iv
PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Material Magnetik	6
2.1.1 Paramagnetik.....	6
2.1.2 Diamagnetik	7
2.1.3 Feromagnetik.....	7
2.2 Struktur Kristal	8
2.2.1 <i>Simple Cubic Structure (SC)</i>	8
2.2.2 <i>Body Centered Cubic (BCC)</i>	9
2.2.3 <i>Face Centered Cubic (FCC)</i>	9
2.2.4 <i>Hexagonal Closed Packed (HCP)</i>	10
2.3 Material Perovskite.....	11
2.3.1 Bahan Magnetik Berbasis Manganit	11
2.3.2 Bahan $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$	12

2.4	Temperatur Curie	12
2.5	Kurva Histerisis	14
2.6	Diameter Kritis.....	15
2.7	Metode Monte Carlo.....	16
2.8	Simulasi Mikromagnetik	17
BAB 3.	METODE PENELITIAN.....	18
3.1	Rancangan Penelitian	18
3.2	Jenis dan Sumber Data.....	20
3.3	Variabel Penelitian.....	20
3.3.1	Variabel Bebas	21
3.3.2	Variabel Terikat	21
3.3.2	Variabel Kontrol.....	21
3.4	Kerangka Pemecahan Masalah	21
3.4.1	Diagram Penelitian.....	22
3.4.2	Simulasi Mikromagnetik.....	22
3.5	Prosedur Penelitian.....	23
3.5.1	Analisa grafik Hubungan Suseptibilitas Magnetik dengan Temperatur.....	23
3.5.2	Analisa Data Temperatur Curie Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$	24
3.5.3	Analisis Kurva Histerisis	25
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1	Penentuan Nilai Temperatur Curie bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$	32
4.2	Karakteristik Kurva Histerisis dari Material $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$	32
BAB 5.	PENUTUP.....	44
5.1	Kesimpulan	44
5.2	Saran	44
	DAFTAR PUSTAKA	46
	LAMPIRAN.....	50

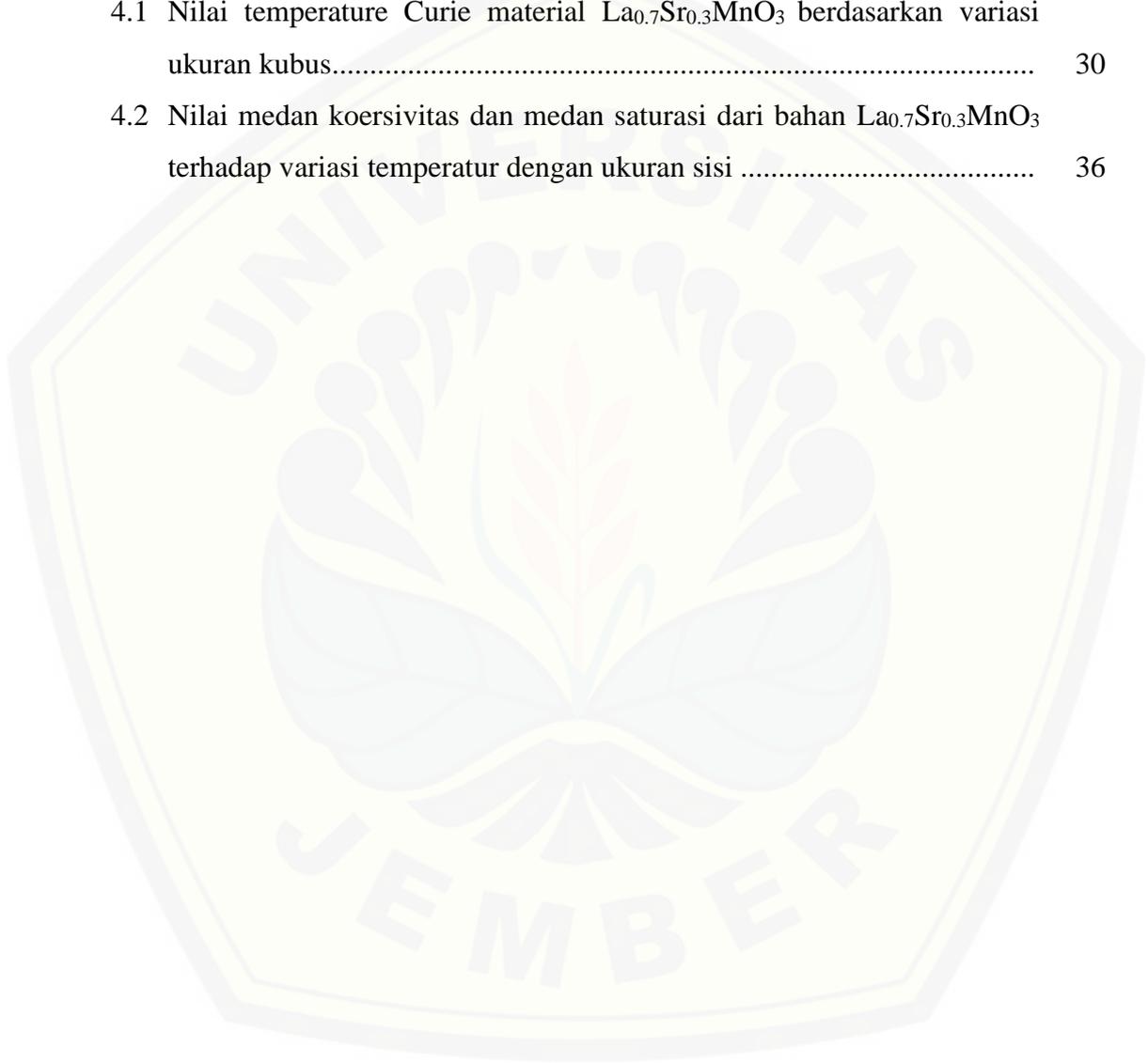
DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Momen magnetik material paramagnetik (a) tanpa pengaruh medan magnet luar ($H = 0$) dan (b) dengan adanya medan magnet luar (H)	7
2.2 Momen magnetik material diamagnetik (a) tanpa pengaruh medan magnet luar ($H = 0$) dan (b) dengan adanya medan magnet luar (H)	7
2.3 Momen magnetik material feromagnetik (a) tanpa pengaruh medan magnet luar ($H = 0$) dan (b) dengan adanya medan magnet luar (H)	8
2.4 Struktur Kristal <i>Simple Cubic</i>	9
2.5 Struktur Kristal <i>Body Center Cubic</i>	9
2.6 Struktur Kristal <i>Face Center Cubic</i>	9
2.7 Struktur Kristal <i>Hexagonal Close Packed</i>	10
2.8 Struktur Perovskite.....	12
2.9 Grafik temperatur Curie	12
2.10 Kurva magnetisasi bahan magnet lunak (<i>soft magnet</i>) dan permanen (<i>hard magnet</i>).....	15
3.1 Diagram alir rancangan penelitian	19
3.2 Kerangka Pemecahan Masalah	22
3.3 Grafik suseptibilitas magnetik.....	23
3.4 Contoh grafik penentuan temperatur Curie bahan $Co_{0,5}Pt_{0,5}$ berdasarkan perubahan magnetisasi dan tingkat suseptibilitas magnetik.....	24
3.5 Grafik penentuan temperatur Curie.....	25
3.6 Kurva Histerisis.....	25
4.1 Grafik magnetisasi dan suseptibilitas terhadap temperatur pada bahan $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$ berukuran sisi kubus 22 nm	28
4.2 Grafik magnetisasi dan suseptibilitas terhadap temperatur pada bahan $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$ berukuran sisi kubus 27 nm	29
4.3 Grafik magnetisasi dan suseptibilitas terhadap temperatur pada bahan $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$ berukuran sisi kubus 32 nm	29
4.4 Perubahan arah magnetisasi bahan $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$ ukuran 22 nm	31

4.5 Kurva histerisis dari bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ terhadap variasi temperatur dengan ukuran sisi kubus 22 nm	33
4.6 Kurva histerisis dari bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ temperatur 400 K dengan ukuran sisi kubus 22 nm.....	33
4.7 Kurva histerisis dari bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ terhadap variasi temperatur dengan ukuran sisi kubus 27 nm	34
4.8 Kurva histerisis dari bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ temperatur 400 K dengan ukuran sisi kubus 27 nm.....	34
4.9 Kurva histerisis dari bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ terhadap variasi temperatur dengan ukuran sisi kubus 32 nm	35
4.10 Kurva histerisis dari bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ temperatur 400 K dengan ukuran sisi kubus 32 nm.....	35
4.11 (a) Kurva histerisis dengan 10 titik magnetisasi untuk analisis spin domain temperatur 0 K pada komposisi $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ ukuran 22 nm (b) Proses perubahan magnetisasi komposisi $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ pada saat temperatur 0 K.....	38
4.12 (a) Kurva histerisis dengan 10 titik magnetisasi untuk analisis spin domain temperatur 100 K pada komposisi $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ ukuran 22 nm (b) Proses perubahan magnetisasi komposisi $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ pada saat temperatur 100 K.....	39
4.13 (a) Kurva histerisis dengan 10 titik magnetisasi untuk analisis spin domain temperatur 200 K pada komposisi $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ ukuran 32 nm (b) Proses perubahan magnetisasi komposisi $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ pada saat temperatur 200 K.....	41
4.14 (a) Kurva histerisis dengan 10 titik magnetisasi untuk analisis spin domain temperatur 300 K pada komposisi $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ ukuran 32 nm (b) Proses perubahan magnetisasi komposisi $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ pada saat temperatur 300 K.....	42

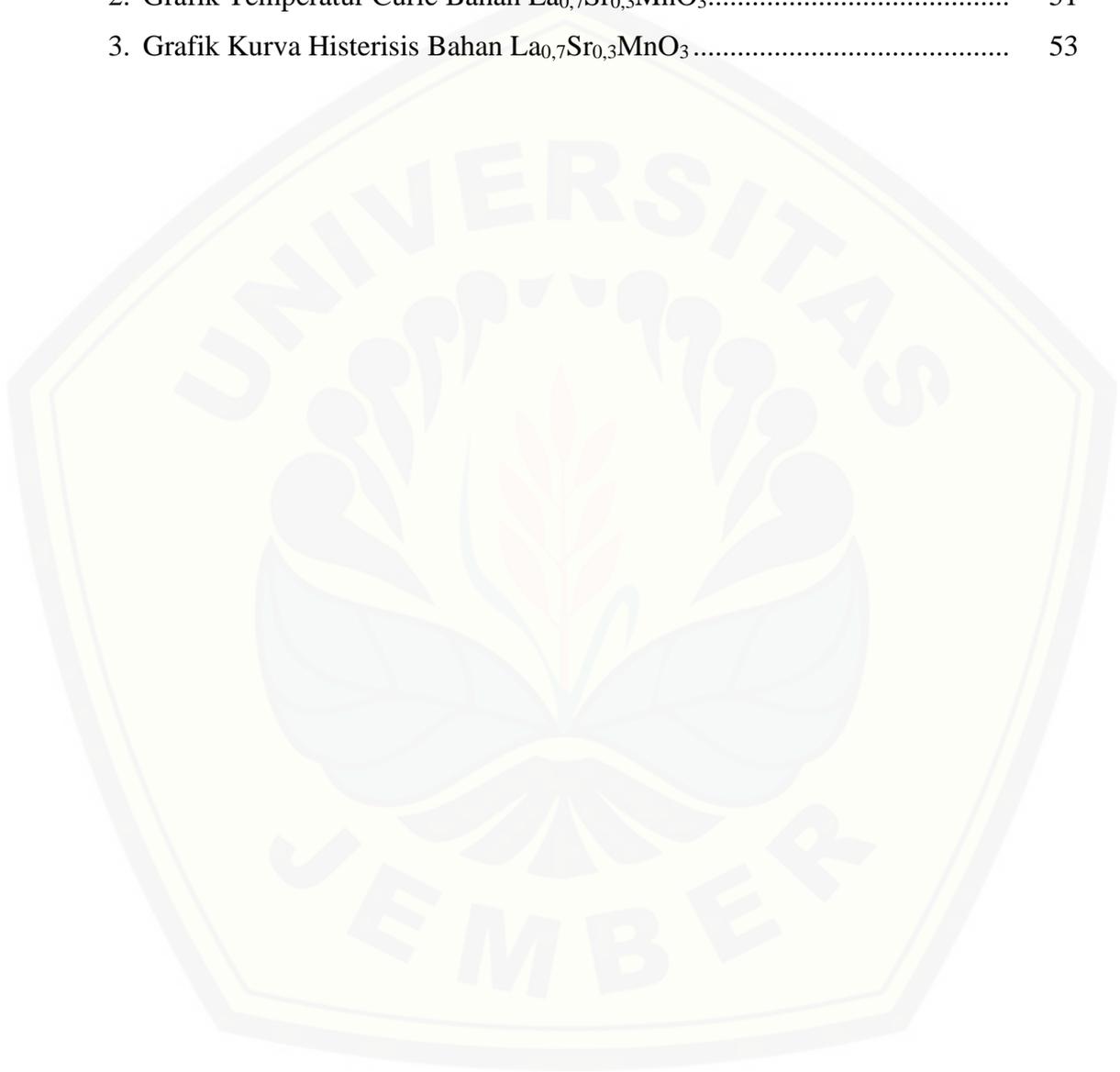
DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Jenis data yang digunakan dalam simulasi.....	20
3.2 Parameter material $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$	20
4.1 Nilai temperature Curie material $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ berdasarkan variasi ukuran kubus.....	30
4.2 Nilai medan koersivitas dan medan saturasi dari bahan $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ terhadap variasi temperatur dengan ukuran sisi	36



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
1. Perhitungan Ukuran Kritis Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$	50
2. Grafik Temperatur Curie Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$	51
3. Grafik Kurva Histerisis Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$	53



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi berakibat kebutuhan manusia akan penyimpanan data semakin tinggi. Semua penyimpanan dan pengambilan data dilakukan dengan menggunakan perangkat seperti laptop, komputer dan ponsel. Kegiatan ini disimpan dalam penyimpanan data digital. *Hard Disk Drive* (HDD) adalah perangkat penyimpanan data digital yang digunakan menggunakan *disk* (piringan) yang dilapisi dengan bahan magnetik (Chaudhary dan Kansal, 2015). HDD mempunyai batas kemampuan, untuk menunjang spesifikasi dari sebuah komputer yaitu dengan cara meningkatkan kerapatan bit (*bit-areal-density*). Upaya meningkatkan kerapatan bit maka sama halnya dengan meningkatkan kapasitas data dari media perekam data tersebut. Semakin kecil ukuran data maka kerapatan data akan semakin tinggi. Masalah yang terjadi pada kerapatan bit dengan ukuran yang terlalu kecil adalah penyimpanan data menjadi tidak stabil karena efek superparamagnetik atau ketidakstabilan termal yang menyebabkan media penyimpanan rusak. Efek superparamagnetik adalah sifat yang muncul pada nanomaterial feromagnetik, sehingga konsekuensinya partikel tersebut akan sangat reaktif terhadap medan luar (Sulanjari et. al., 2014). HDD menghasilkan energi panas saat melakukan proses penyimpanan data. Hal ini disebut efek superparamagnetik. Temperatur HDD ketika komputer hidup mencapai 30°C - 50°C, sedangkan ketika komputer bekerja atau memproses data maka temperatur HDD mencapai 50°C - 58°C (Asrofi dan Purnama, 2013). HDD yang bekerja terus-menerus akan mencapai temperatur maksimum yang disebut dengan temperatur *overheat*. Temperatur *overheat* dapat menyebabkan proses kinerja dari HDD menjadi lambat dan dapat membuat umur HDD menjadi lebih singkat. Temperatur *overheat* dari HDD sekitar 339 K atau 66°C (Sugiarto dan Iskandar, 2013).

HDD dengan daya yang kuat dan tahan terhadap panas menghasilkan karakteristik magnetik yang baik pada temperatur tinggi. Pendekatan yang dapat diajukan dalam kasus tersebut yaitu dengan membuat media perekam magnetik berbentuk *patterned media*. Material magnetik dibentuk dengan ukuran sangat kecil

sehingga dapat meningkatkan kerapatan bit dari media perekam magnetik (Alvarez, 2008). Pengetahuan terhadap karakteristik magnetik dan sifat bahan *Colossal Magnetoresistance* (CMR) berbasis manganit, khususnya oksida mangan dapat menawarkan harapan besar dalam teknologi HDD. Bahan CMR dapat menjadi solusi dengan kapasitas penyimpanan data yang semakin besar dan penggunaan daya rendah (Rohman, 2013).

William Thompson memulai penelitian pada tahun 1856 tentang bahan oksida mangan. Penelitian dilakukan untuk mengembangkan bahan oksida mangan CMR. William menemukan efek yang disebut *ordinary magnetoresistance*, karena penurunan rasio magnetoresisten tidak lebih dari 5 %. Pada tahun 1988 hasil penelitian menunjukkan teknologi film tipis dari bahan Fe/Cr, mendapatkan rasio magnetoresistan mencapai 80% (Baibich et. al., 1988). Efek ini dinamakan *Giant Magnetoresistance* (GMR). Penemuan CMR membuat minat banyak penelitian pada bahan oksida mangan dan sifatnya (Jin et. al., 1994). CMR muncul dari penurunan nilai resistivitas bahan La-Ca-Mn-O dekat dengan temperatur Curie, $T_c = 77$ K dalam medan magnet 6 Tesla dan menghasilkan rasio magnetoresisten sekitar 99% (Popescu, 2007). Bahan magnetik CMR berbasis manganite khususnya oksida mangan dengan rumus umum $A(MnO_3)$ dengan A merupakan ion logam dengan unsur bervalensi tiga, biasanya berupa unsur tanah jarang (ex : Nd, Pr, La, dan Sm) (Zeng et. al., 2007). Penambahan doping unsur bervalensi dua seperti unsur alkali tanah (ex: Ca, Sr, Ba, dan Pb) akan mengubah rumus umumnya menjadi $(A_{1-x}B_x)(MnO_3)$, dengan A merupakan ion-ion logam (logam tanah jarang dari deret lantanida dan aktanida) yang memiliki ukuran besar dan B merupakan ion-ion logam transisi. Rumus tersebut dapat menciptakan beberapa bahan magnetik seperti $PrMnO_3$, $LaMnO_3$, $La_{(1-x)}Sr_{(x)}MnO_3$, dan $La_{(1-x)}Ca_{(x)}MnO_3$. $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$ merupakan bagian dari bahan magnetik CMR. Bahan $LaMnO_3$ bersifat insulator tetapi dengan penambahan bahan ion divalen (ex: Ca, Sr) atau tetravalen (ex: Ce) dapat mengubah sifat dari bahan $LaMnO_3$. Penambahan Sr^{2+} (divalen) akan diikuti transisi ion Mn^{3+} menjadi ion Mn^{4+} . Perubahan ini menyebabkan bahan menjadi logam (Gor'kov dan Kresin, 2004). Bahan $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$ menunjukkan peningkatan *magnetoresistance* saat temperatur 200 K. Bahan $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$

termasuk dalam bahan insulator kompleks (Romero et. al., 2015). Menurut Djuhana et. al. (2017), Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) adalah bahan yang diprediksi mempunyai sifat *half-metalcity* (setengah logam) dengan suhu kritis yang tinggi. Hal ini menyebabkan bahan ini mempunyai potensi besar untuk teknologi. Bahan *half-metalcity* (setengah logam) adalah bahan yang mempunyai sifat pengantar dalam sebuah *channel spin* dan juga bersifat konduktor pada sisi lainnya.

Penelitian tentang sintesis $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ telah dilakukan selama beberapa tahun terakhir. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen dan simulasi komputasi. Struktur mikro dan sifat-sifat magnetik $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ telah diinvestigasi. Penelitian secara simulasi dilakukan guna mempelajari bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dengan lebih baik. Hasil penelitian secara simulasi diharapkan dapat digunakan untuk prediksi dan optimasi dalam penelitian secara eksperimen. Salah satu sifat magnetik bahan feromagnetik adalah temperatur Curie dan medan koersivitas. Menurut Huajun (2007), Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ mempunyai nilai temperatur Curie 350 K dilakukan dengan simulasi mikromagnetik. Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ mempunyai nilai temperatur Curie sekitar 360 K dilakukan dengan eksperimen (Romero et al., 2015). Penelitian eksperimen pada bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ yang stabil. Nilai temperatur Curie bahan ini mencapai $T_c \sim 370$ K (Urushibara et. al., 1995). Menurut Rahman et. al. (2013), Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ berbentuk *nanodisk* diameter 100 nm mempunyai nilai medan koersivitas 10,5 mT, 7,5 mT, dan 1,5 mT dengan ketebalan 5 nm, 10 nm, dan 15 nm.

Penelitian bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dilakukan secara simulasi mikromagnetik. Penelitian ini dilakukan untuk menginvestigasikan sifat-sifat magnetiknya. Penentuan parameter dilakukan dengan mencari dari referensi serta menyesuaikan dengan *software* yang digunakan. Penentuan sisi kubus dilakukan dengan mencari nilai diameter kritis dan menyesuaikannya. Penentuan diameter kritis dilakukan untuk menunjukkan perubahan sifat domain. Diameter kritis didapatkan sekitar 27 nm. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Monte Carlo. Metode ini digunakan karena aplikasinya lebih mudah untuk pengambilan data. Metode Monte Carlo adalah metode yang memanfaatkan bilangan acak untuk melakukan simulasi suatu sistem fisika yang dilakukan oleh komputasi. Metode ini terdiri dari algoritma

yang dapat digunakan untuk memvisualisasikan magnetisasi pada suatu bahan (Newman dan Barkema, 1999). Penelitian dilakukan dengan *software Vampire 4.0*. *Software* yang dapat dijalankan pada sistem *windows*. Penggunaan *vampire* dapat menunjukkan sifat magnetisasi pada beberapa keadaan temperatur sehingga dapat menjadi informasi baru dalam bahan ini. Penelitian ini menganalisis magnetisasi terhadap medan luar, hubungan suseptibilitas terhadap temperatur, hubungan magnetisasi terhadap temperatur terhadap temperatur dalam berbagai variasi komposisi ukuran. Analisis tersebut digunakan untuk penentuan temperatur Curie. Pada penentuan temperatur Curie dilakukan variasi ukuran sisi kubik 22 nm, 27 nm, dan 32 nm. Sedangkan penentuan nilai koersivitas dari kurva histeresis dilakukan pada variasi temperatur 0 K, 100 K, 200 K, 300 K dan 400 K. Hasil pengolahan *software Vampire 4.0* berupa file output. File output dianalisis dalam bentuk grafik melalui *software origin* sehingga mendapatkan grafik temperatur Curie dan medan koersivitas. File output juga dapat divisualisasikan dengan *software POV-Ray*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi ukuran material bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dengan model *nanocube* yang dihasilkan melalui simulasi mikromagnetik terhadap temperatur Curie?
2. Bagaimana karakteristik material bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ variasi temperatur berdasarkan analisis kurva histeresis?

1.3 Tujuan

Tujuan yang digunakan dalam penelitian simulasi mikromagnetik antara lain yaitu:

1. Mengetahui pengaruh variasi ukuran material bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dengan model *nanocube* yang dihasilkan melalui simulasi mikromagnetik terhadap temperatur Curie

2. Mengetahui pengaruh variasi karakteristik material bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ variasi temperatur berdasarkan analisis kurva histerisis.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan pandangan baru mengenai simulasi bahan mikromagnetik pada bidang ilmu fisika komputasi. Penelitian ini akan memberikan gambaran yang luas bahwa ilmu fisika dapat mengkaji bahan yang sangat kecil berukuran skala mikro, bahkan skala nano khususnya bidang komputasi. Penelitian ini juga diharapkan dapat digunakan sebagai acuan bahan dasar dari pembuatan media penyimpanan data berbasis magnetik seperti HDD dengan menggunakan bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$, yang mempunyai peluang untuk meningkatkan kapasitas yang cukup besar serta tahan terhadap panas.

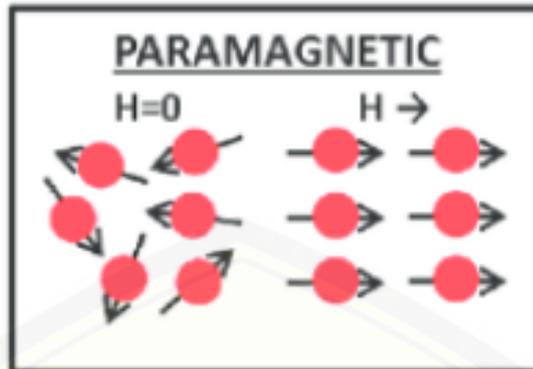
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Magnetik

Material magnetik adalah material yang memiliki sifat magnetik. Sifat magnetik merupakan sebuah kemampuan suatu material untuk menarik atau menolak material lain yang berada di sekitarnya. Contoh material magnetik adalah besi, baja, nikel, kobalt serta paduannya (Callister, 2009). Suatu material bersifat magnet jika momen magnet memiliki arah yang searah. Logam yang bersifat selain magnet dapat dilihat momen magnetnya memiliki arah yang tidak teratur sehingga efeknya saling meniadakan yang mengakibatkan tidak adanya kutub-kutub magnet pada ujung logam. Material magnet memiliki dua kutub magnet, yaitu kutub utara dan kutub selatan. Kutub magnet merupakan daerah yang berada pada ujung-ujung magnet dan memiliki energi yang dapat menarik benda logam. Material magnetik memiliki sifat kemagnetan berdasarkan komponen pembentuknya. Nilai suseptibilitas adalah tingkat kemagnetan suatu benda untuk termagnetisasi. (Warsiti, 2005). Menurut Jiles (2015), Material magnet dapat diklasifikasikan dengan nilai suseptibilitas yaitu paramagnetik, diamagnetik dan feromagnetik.

2.1.1 Paramagnetik

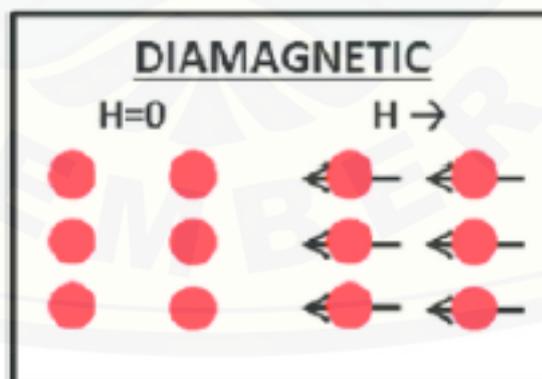
Material paramagnetik adalah material yang mempunyai nilai suseptibilitas positif dan kecil ($\chi \approx 10^{-3}$ - 10^{-5}). Magnetisasi bahan paramagnetik lemah tapi arah magnetisasi searah dengan medan magnet (Jiles, 2015). Suseptibilitas magnetik material pada bahan paramagnetik akan mengalami penurunan ketika temperatur yang diterima oleh material semakin tinggi (Triyanto, 2004). *Paramagnetisme* terjadi pada atom-atom, ion dan molekul yang memiliki momen magnetik permanen yang berinteraksi satu sama lain dengan sangat lemah. Material paramagnetik sebelum diberikan medan magnet dari luar, maka momen magnetik akan berorientasi secara acak. Bahan paramagnetik ketika medan magnet luar diterapkan, maka momen magnetik akan mensejajarkan diri searah dengan medan magnet luar tersebut (Halliday dan Resnick., 1978). Contoh material yang memiliki sifat paramagnetik adalah Sn, W, Al, Pt, Mn (Jiles, 2015).



Gambar 2.1 Momen magnetik material Paramagnetik (a) tanpa pengaruh medan magnet luar ($H = 0$) dan (b) dengan adanya medan magnet luar (H) (Veronica dan Lacovaci, 2016).

2.1.2 Diamagnetik

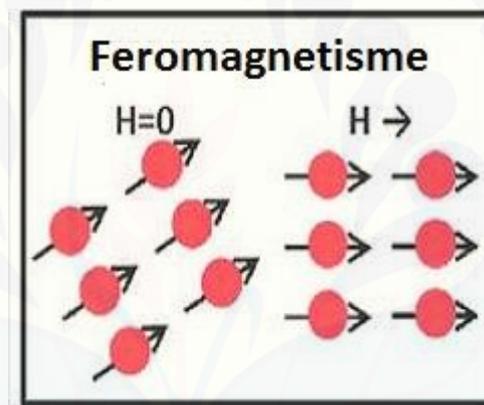
Material diamagnetik adalah material yang memiliki suseptibilitas yang negatif yang sangat kecil ($\chi \approx -10^{-5}$). Material diamagnetik mempunyai arah yang berlawanan dengan medan magnet luar (Jiles, 2015). *Diamagnetisme* adalah sifat suatu benda untuk menciptakan medan magnet yang bersifat non permanen dan memiliki efek yang lemah. Pada Gambar 2.2 ketika material diamagnetik diberi medan magnet luar, maka elektron-elektron dalam atom akan mengubah gerakannya, sehingga menghasilkan momen magnet orbital yang arahnya berlawanan dengan medan magnet luar tersebut (Halliday dan Resnick., 1978). Contoh material diamagnetik adalah Au, Ag, Zn, Hg, dan Si (Callister, 2009).



Gambar 2.2 momen magnetik material diamagnetik (a) dengan tanpa medan luar ($H = 0$) dan (b) dengan adanya medan magnet luar (H) (Veronica dan Lacovaci, 2016)

2.1.3 Feromagnetik

Menurut Jiles (2015) Material feromagnetik merupakan material yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik positif dan sangat tinggi ($\chi \approx 50 - 10^4$). Pada Gambar 2.3 material feromagnetik mula-mula memiliki magnetisasi nol pada daerah bebas medan magnetik, apabila mendapat pengaruh medan magnetik yang lemah saja akan memperoleh magnetisasi yang besar. Magnetisasinya akan lebih besar apabila medan magnetnya lebih besar (Istiyono, 2009). Material Feromagnetik tetap memiliki medan magnet apabila medan magnet luar dihilangkan. Efek ini disebut sifat remanensi. Remanensi ini menyebabkan material feromagnetik sangat baik sebagai sumber magnet permanen. Material feromagnetik seperti besi, baja, kobalt serta paduannya (Callister, 2009).



Gambar 2.3 Struktur Domain pada bahan feromagnetik (a) tanpa diberi medan luar (b) diberi medan luar (Veronica dan Lacovaci, 2016).

2.2 Struktur Kristal

2.2.1 Simple Cubic (SC)

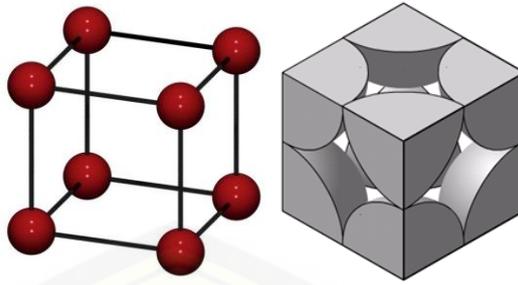
SC terdapat 8 sel satuan di tepi dan $1/8$ atom terdapat pada tiap – tiap sudut sel, dengan demikian satu sel satuan SC terdapat 1 atom. Jari – jari atom pada struktur SC dapat diketahui dengan persamaan

$$a = 2R \quad (2.1)$$

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

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

Nilai untuk APF kristal SC adalah 52% dan sisanya 48% adalah ruang kosong. Satu sel dari struktur SC diperlihatkan oleh Gambar 2.4

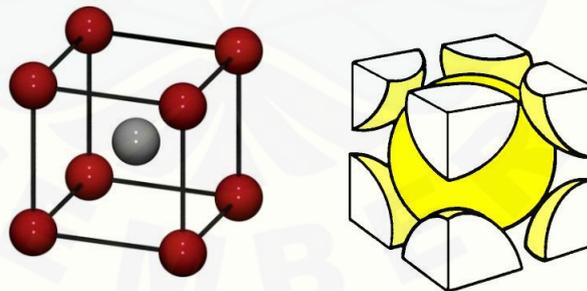
Gambar 2.4 Struktur Kristal *Simple Cubic* (Pahuja, 2005)

2.2.2 *Body Centered Cubic* (BCC)

BCC terlihat bahwa terdapat satu sel utuh di tengah dan 8 sel satuan di tepi. Nilai sel satuan pada tepi adalah $1/8$ atom yang terdapat pada tiap-tiap sudut sel satuan sehingga dalam satu sel satuan BCC terdapat 2 atom. Contoh logam BCC yaitu Na, K, Mo, W dan lain sebagainya. Berdasarkan Gambar 2.5 maka dapat diketahui jari-jari atomnya dengan persamaan

$$\sqrt{3} a = 4R \text{ atau } a = \frac{4R}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

Persamaan 2.3 juga dapat digunakan untuk mengetahui nilai APF pada kristal BCC. APF kristal BCC adalah 68% dan sisanya 32% adalah ruang kosong. Hal ini menunjukkan bahwa kristal BCC berstruktur padat. Satu sel dari struktur kristal BCC diperlihatkan pada Gambar 2.5

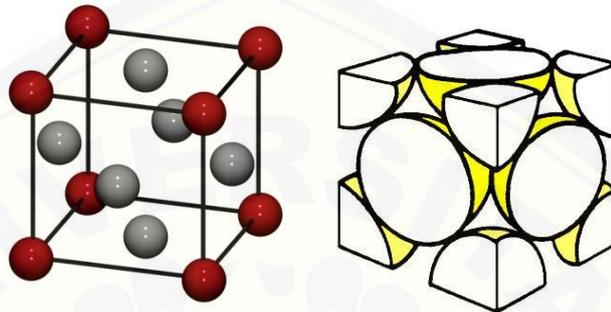
Gambar 2.5 Struktur kristal *Body Centered Cubic* (Puri dan Babbar, 2001)

2.2.3 *Face Centered Cubic* (FCC)

Struktur kristal FCC dikelilingi oleh 12 atom dengan bilangan koordinasi adalah 12. Contoh FCC yaitu Pt, Pb, Ni, Cu, Ag, Au, Al dan lain sebagainya. Jari-jari atom FCC dapat diketahui dengan persamaan

$$\sqrt{2} a = 4R \text{ atau } a = \frac{4R}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

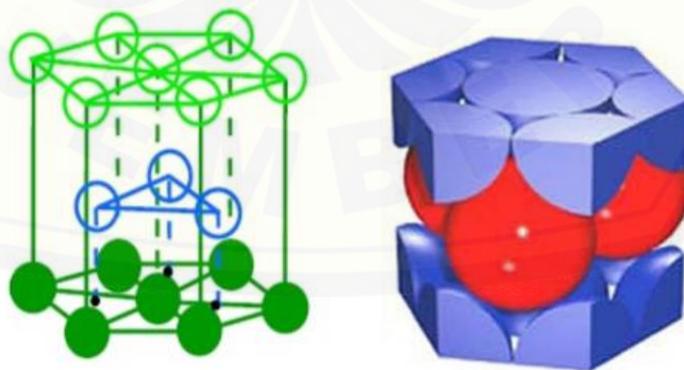
Persamaan 2.4 juga dapat digunakan untuk mengetahui nilai APF pada kristal FCC. APF sebesar 74% dan sisanya sebesar 26% merupakan ruang kosong. Hal ini menunjukkan bahwa kristal FCC berstruktur padat. Satu sel dari struktur kristal FCC dapat dilihat pada Gambar 2.6. Gambar ini menunjukkan bahwa terdapat satu titik *lattice* pada setiap sudut dan satu titik *lattice* pada setiap pusat sisi kubus.



Gambar 2.6 Struktur kristal *Face Centered Cubic* (Callister Jr dan Rethwisch, 2012)

2.2.4 *Hexagonal Closed Packed* (HCP)

Struktur kristal HCP dikelilingi oleh 12 atom dan bilangan koordinasi sebanyak 12. Hal ini menunjukkan bahwa kristal HCP berstruktur padat. Nilai APF sebesar 74% dan sisanya sebesar 26% adalah ruang kosong. Sel satuan HCP mempunyai 6 atom per sel satuan yaitu $2 \times 6 \times 1/6$ (pada sudut lapisan bawah dan atas) + $2 \times 1/2$ (pada pusat lapisan bawah dan atas) + 3 (lapisan tengah). Contoh logam HCP yaitu Co, Cd, Ti, Zn. Satu sel dari struktur kristal HCP dapat dilihat pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 Struktur kristal *Hexagonal Close Packed* (Callister Jr dan Rethwisch, 2012)

2.3 Material Perovskite

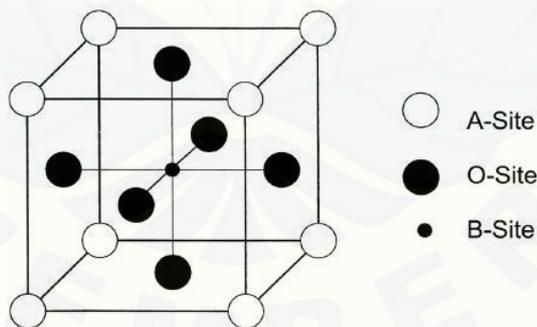
Material *Perovskite* adalah senyawa dengan rumus umum ABO_3 , A merupakan ion-ion logam (logam tanah jarang dari deret lantanida dan aktanida) yang memiliki ukuran besar dan B merupakan ion-ion logam transisi. (Pecchi et. al., 2008). Oksida-oksida *perovskite* dikenal sebagai bahan yang dapat mentransfer ion-ion oksigen pada penyusun strukturnya (oksigen kisi) tanpa mengalami perubahan strukturnya. Bahan *perovskite* mempunyai kelebihan yaitu ion-ion oksigen penyusun strukturnya dapat dilepaskan (mengalami reduksi) tanpa mengalami perubahan strukturnya. Material berstruktur *perovskite* memiliki sifat *colossal magnetoresistance*, *ferroelectricity*, *superconductivity*, *charge ordering*, *spin dependent transport*, dan sebagainya. CMR merupakan fenomena dimana suatu bahan akan berkurang hambatan listriknya dalam orde 10^4 sampai 10^6 ketika diberikan medan magnet sebesar beberapa tesla saja (Motome et. al., 2003). Bahan yang dapat menimbulkan suatu fenomena CMR adalah material *perovskite* oksida, dimana salah satunya adalah bahan manganit. Fenomena dalam CMR ini banyak digunakan dalam media penyimpanan data, seperti hardisk dan khususnya bahan pembuat *head* pembaca data (Myron, 2001).

2.3.1 Bahan Magnetik Berbasis Manganit

Bahan magnetik CMR yaitu bahan berbasis manganit khususnya oksida mangan yang memiliki rumus umum $A(MnO_3)$, dengan A adalah unsur bervalensi tiga dan berupa unsur tanah jarang (ex: La, Nd, Pr, dan Sm). Penambahan *doping* dengan unsur bervalensi dua seperti alkali tanah (ex : Sr, Ca, Ba, dan Pb), maka akan mengubah rumus umunya menjadi $(A_{1-x}B_x)(MnO_3)$. Rumus tersebut dikenal dengan bahan magnetik oksida mangan: $LaMnO_3$, $PrMnO_3$, $La_{1-x}Sr_xMnO_3$, dan $La_{1-x}Ca_xMnO_3$. Bahan $LaMnO_3$ merupakan bahan manganit kompleks yang terbentuk dari unsur logam dengan unsur transisi seperti lanthanum yang dikombinasikan dengan bahan manganit lain dan juga oksigen (Rahman et al., 2013).

2.3.2 Bahan $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (Lanthanum Strontium Manganese Oxide)

Bahan $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ merupakan bahan yang terbentuk dari bahan LaMnO_3 dengan penambahan dopan ion Sr (divalen) yang dapat mengubah sifat *transport* listrik bahan LaMnO_3 . Bahan LaMnO_3 yang didopan ion Sr^{2+} (divalen) akan diikuti oleh ion transisi Mn^{3+} menjadi ion Mn^{4+} . Pada ion Mn yang bervalensi empat terdapat satu elektron yang hilang. Elektron yang hilang akan menciptakan lubang (*hole*) dan memungkinkan terjadinya lompatan elektron, sehingga bahan tersebut bersifat logam (Gor'kov dan Kresin, 2004). Bahan $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ adalah bahan yang memiliki energi *bandwith* (W) besar dan lebar karena pengaruh doping ion Sr^{2+} dengan jari-jari atom yang besar serta memiliki fase feromagnetik yang stabil. Bahan ini memiliki temperatur Curie sebesar 97°C (Urushibara et al., 1995), sehingga memiliki peranan penting dalam berbagai aplikasi teknologi. Bahan $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ merupakan bahan campuran dari bahan feromagnetik yang berbentuk *perovskite*. Struktur kristal *perovskite* pada sistem kristal yaitu orthorombik dan formula umum bahan ini yaitu ABO_3 , dengan A dan B adalah kation yang ukurannya berbeda. Struktur kristal *perovskite* berbentuk oktahedral seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.8 (Gor'kov dan Kresin, 2004).

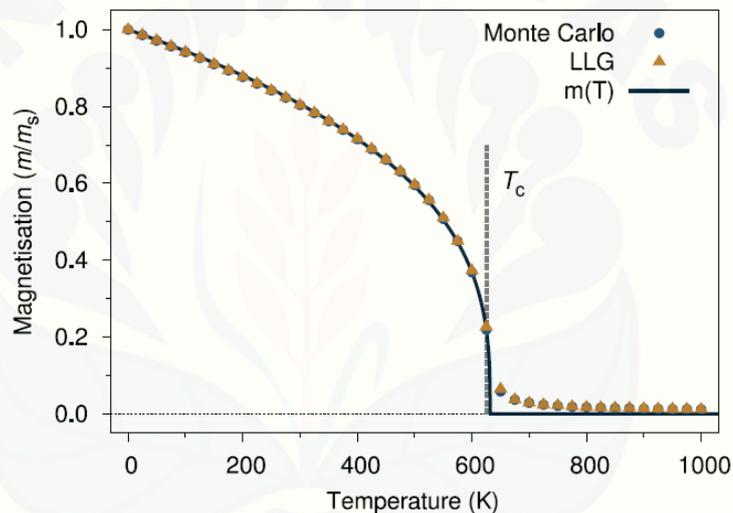


Gambar 2.8 Struktur *Perovskite* (Huajun, 2007)

2.4 Temperatur Curie

Temperatur Curie adalah titik temperatur yang menunjukkan material feromagnetik akan mengalami perubahan menjadi material paramagnetik. Fenomena yang terjadi saat nilai temperatur berada pada temperatur Curie-nya adalah material tersebut berubah menjadi paramagnetik (Okimustava dan Oktova, 2009). Temperatur Curie memisahkan fase feromagnetik dimana susunan momen

magnetiknya teratur atau ketika berada di bawah temperatur Curie-nya dengan fase paramagnetik yang susunan momen magnetiknya tidak teratur atau ketika berada di atas temperatur Curie-nya (Sudjatmoko, 2005). Bahan feromagnetik mengalami magnetisasi yang rendah saat temperatur mencapai temperatur Curie. Gambar 2.9 ketika magnetisasi maksimum dari material feromagnetik pada temperatur 0 K yang biasa disebut temperatur absolut. Nilai magnetisasi akan menurun searah dengan bertambahnya temperatur. Nilai magnetisasi menurun hingga mendekati nol pada saat temperturnya sama dengan temperatur Curie-nya. Keadaan material saat melewati temperatur Curie-nya akan berubah dari fase feromagnetik menjadi paramagnetik (Irayanti, 2016).



Gambar 2.9 Grafik temperatur Curie (Evans et. al., 2014)

Karakteristik magnetik suatu material dipengaruhi oleh temperatur. Ketika temperatur bertambah besar, terjadi peningkatan getaran termal dari atom-atomnya. Hal ini mengakibatkan momen-momen magnet yang telah searah akan berotasi menjadi acak. Momen magnet yang menjadi acak membuat nilai magnetisasi menjadi turun. Magnetisasi maksimum terjadi pada temperatur 0 K, dimana gerak termal minimum. Peningkatan temperatur mengakibatkan penurunan magnetisasi secara gradual hingga mencapai nol pada temperatur tertentu. Temperatur ini disebut dengan temperatur Curie. Material yang melebihi temperatur Curie-nya akan berubah dari material feromagnetik menjadi material paramagnetik (Callister, 2009).

2.5 Kurva Histerisis

Kurva histerisis adalah karakteristik material magnet yang menggambarkan material dapat dimagnetisasi atau didemagnetisasi. Histerisis menunjukkan bahwa sistem tidak secara cepat mengikuti gaya yang diberikan kepadanya, tetapi memberikan reaksi secara perlahan, atau bahkan sistem tidak kembali ke awalnya (Nursiyanto et. al., 2015). Kurva histerisis menunjukkan nilai magnetisasi dan demagnetisasi oleh suatu medan luar. Kurva histerisis dapat diperoleh dengan memetakan magnetisasi material M untuk kuat medan magnet eksternal H yang berbeda-beda. Cara yang paling umum untuk menyatakan magnetisasi *bulk* dari material feromagnetik adalah dengan memetakan induksi magnetik B untuk kuat medan magnet eksternal, H yang berbeda-beda (Widodo, 2013). Hubungan antara medan magnet luar, induksi magnet, dan magnetisasi dari suatu kurva histerisis material feromagnetik dapat dipresentasikan ke dalam persamaan (2.5) Kurva histerisis pada umumnya dibedakan menjadi dua berdasarkan nilai koersivitasnya yaitu kurva histerisis *soft magnet* dan *hard magnet*.

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.5)$$

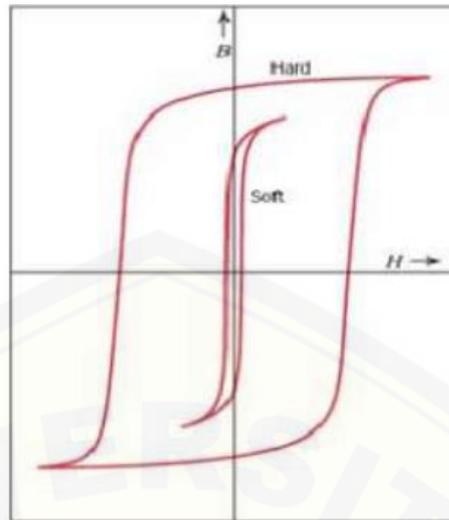
dimana B adalah induksi magnet, H medan magnet yang diberikan, M magnetisasi dan μ_0 permeabilitas ruang hampa. Diketahui bahwa :

$$J = \mu_0 M \quad (2.6)$$

dimana J merupakan polariansi, maka persamaan (2.7)

$$B = \mu_0 H + J \quad (2.7)$$

Pada *soft magnet* nilai koersivitas dan remanen yang cukup kecil ditunjukkan dengan bentuk *loop* kurva histerisis pipih dan ramping, sedangkan pada *hard magnet* nilai koersivitas dan remanen yang cukup besar ditunjukkan dengan bentuk *loop* kurva histerisisnya yang melebar besar seperti persegi panjang. Bentuk *loop* kurva yang dibutuhkan untuk aplikasi perekam magnetik yaitu memiliki magnetisasi remanen besar, koersivitas sedang, dan idealnya memiliki bentuk persegi (Widodo, 2013). Berdasarkan bentuk kurva histerisisnya, material magnetik diklasifikasikan menjadi *soft magnet* yang memiliki nilai koersivitas di bawah 1 kA/m (12,5 Oe), dan *hard magnet* yang memiliki nilai koersivitas di atas 10 kA/m (125 Oe) (Jiles, 2015).



Gambar 2.10 Kurva magnetisasi bahan magnet lunak (*soft magnet*) dan permanen (*hard magnet*) (Rohman, 2010).

Kurva histerisis pada Gambar 2.10 menunjukkan bahwa pada *hard magnet* dan *soft magnet* menunjukkan perbedaan pada bentuknya. Kurva histerisis menunjukkan bahwa pada material feromagnetik yang mulanya belum termagnetisasi ketika sebuah medan magnet H diberikan pada material tersebut akan menyebabkan magnetisasi meningkat sebanding dengan medan magnet H . Akibat pergerakan dari domain magnet menyebabkan bertambahnya nilai magnetisasi M . Jika medan magnet H yang diberikan meningkat terus-menerus maka magnetisasi akan mencapai keadaan jenuh atau saturasi. Besarnya nilai magnetisasi dalam keadaan saturasi disebut dengan magnetisasi saturasi (M_s). Sedangkan besar medan yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan saturasi disebut dengan medan saturasi (H_{sat}). Pada keadaan ini seluruh momen magnet membentuk domain tunggal yang terorientasi searah dengan medan magnet H yang diberikan (Widodo, 2013).

2.6 Diameter Kritis

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

$$DC = \left(\frac{9 \gamma_w}{2\pi M_s^2} \right) \quad (2.8)$$

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

$$DC = 7,221 \sqrt{\frac{2A}{\mu M_s^2}} = 7,221 I_{ex} \quad (2.9)$$

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

2.7 Metode Monte Carlo

Metode Monte Carlo merupakan metode yang memanfaatkan bilangan acak untuk melakukan simulasi suatu sistem fisika yang dilakukan secara komputasi. Pada metode ini terdiri dari algoritma-algoritma yang dapat digunakan untuk memvisualisasi magnetisasi pada suatu material (Newman dan Barkema, 1999). Algoritma Metropolis Monte Carlo adalah cara yang baik untuk mempelajari energi sistem fisik dalam kondisi *equilibrium*. Sifat-sifat *equilibrium* pada material magnetik seperti magnetisasi 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 yang disebut dengan *trial move*. Perubahan energi dari arah awal ke arah *trial move* dinyatakan dalam persamaan (2.8)

$$\Delta E = E(S'_i) - E(S_i) \quad (2.10)$$

Probabilitas dari trial move dinyatakan dalam persamaan (2.9)

$$P = \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_b T}\right) \quad (2.11)$$

Dalam range 0 – 1 (Evans et al., 2014)

2.8 Simulasi Mikromagnetik

Simulasi mikromagnetik sangat dibutuhkan dalam perkembangan teknologi dan ilmu pengetahuan untuk kecepatan pemrosesan data. Hal ini yang digunakan untuk mendukung dari hasil secara eksperimen. Simulasi mikromagnetik merupakan suatu kegiatan mensimulasikan sifat-sifat material magnetik khususnya pada material feromagnetik yang memiliki skala mikro sampai dengan skala nanometer. Material magnetik banyak diaplikasikan sebagai alat penyimpan data (HDD, FD, RAM) berupa lapisan tipis pada plat *disk* dengan lithographi tertentu berukuran nanometer. Simulasi sangatlah penting sebagai bahan penting untuk mendukung eksperimen pembuatan lapisan tipis material feromagnetik untuk aplikasi perekam data. Penelitian ini menggunakan *software* simulasi mikromagnetik yaitu *Software Vampire 4.0*. *Vampire 4.0* merupakan salah satu aplikasi simulasi model atomistik untuk material magnetik berukuran nanometer (Evans et al., 2014). *Software Vampire* merupakan simulator atomistik material magnetik yang tersedia secara *open source*. Penelitian ini menggunakan *Vampire* untuk mensimulasikan temperatur Curie dan kurva histerisis yang nantinya akan dianalisis untuk mengetahui karakteristik dari material magnetik tersebut.

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Februari hingga bulan Juni tahun 2020, bertempat Laboratorium Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika & Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah 1 set perangkat komputer dengan spesifikasi sebagai berikut:

Prosesor : Intel (R) Core (TM) i5-8250U CPU @ 1.8 GHz

Sistem tipe : 64 bit

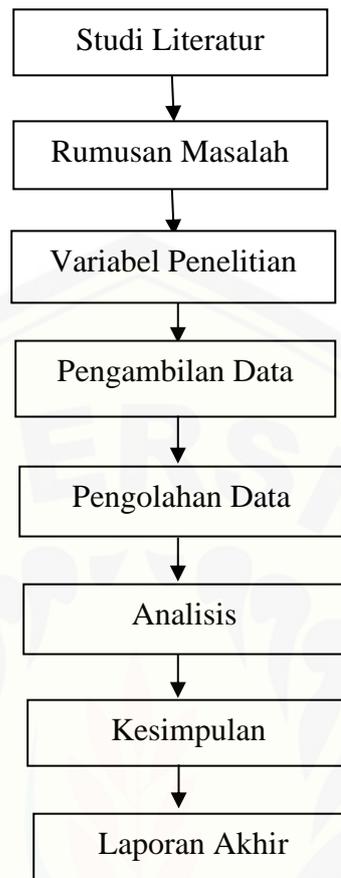
RAM : 4.096 GB

Sistem operasi : *Windows 10*

Program aplikasi yang digunakan dalam simulasi ini adalah sebagai berikut:

- a) *Vampire 4.0* digunakan untuk simulasi mikromagnetik berbasis *atomistic model*.
- b) *Origin Pro 8* digunakan untuk membuat grafik dari hasil pengolahan data simulasi.
- c) *Terminal Linux* digunakan untuk mengkonversi bentuk file *cfg* menjadi file *Povray*.
- d) *Povray* digunakan untuk membuat visualisasi struktur domain dalam 3 dimensi.
- e) *Notepad++* digunakan untuk mengubah *script*.

Penelitian simulasi mikromagnetik ini diawali dengan studi pustaka dari beberapa sumber berupa buku, jurnal ilmiah, skripsi, dan tesis. Hal ini dilakukan untuk observasi terhadap topik penelitian. Kemudian dilakukan penginstallan *software* pada komputer. Berikut adalah skema rancangan penelitian yang ditampilkan dalam bentuk *flow chart* pada Gambar 3.1 :



Gambar 3.1 Diagram alir rancangan penelitian

Penelitian mengenai “Analisis Temperatur Curie dan Kurva Histerisis Material $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dengan Simulasi Mikromagnetik” diawali dengan mengumpulkan sumber-sumber data dari buku, skripsi, jurnal, tesis dan internet guna memperoleh parameter input material yang akan disimulasikan. Bahan yang dipilih dalam penelitian ini yaitu bahan magnetik $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$. Setelah simulasi selesai, diperoleh angka-angka yang divisualisasi dalam bentuk grafik dan struktur domain dalam 3 dimensi. Hasil yang diperoleh dianalisis berupa besaran magnetik dengan menggunakan *software*. Hasil tersebut kemudian dianalisis dan disimpulkan sesuai rumusan masalah yang ada pada penelitian ini. Proses rancangan penelitian tersebut kemudian dikemas dalam sebuah karya tulis yang menjadi tugas akhir peneliti dalam menyelesaikan studi S1.

3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis data yang terdapat dalam penelitian ini yakni berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif didapatkan dari hasil running simulasi dan data kualitatif didapatkan dari analisis visualisasi gambar. Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data input yang digunakan didapatkan dari hasil penelitian yang sudah ada sebelumnya. Data yang digunakan untuk input simulasi mikromagnetik pada $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ ditentukan berdasarkan kebutuhan simulasi. Data yang digunakan sebagai berikut:

Tabel 3.1 Jenis data yang digunakan dalam simulasi

Besaran	Nilai	Satuan
Sistem size	25, 27, 32	Nm
Temperatur	0, 100, 200, 300, 400	K

Tabel 3.2 Parameter Material $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ untuk input data simulasi mikromagnetik.

Besaran	Nilai
Struktur Kristal	<i>Simple Cube</i>
<i>Atomic Spin Moment</i> (μS)	^{1), 4)} 3,6 μB
Energi Anisotropi (ku)	-3.38 x 10 ⁻²⁵ J/link
<i>Unit cell lattice vector</i> (a)	^{1), 4)} 3,9 Å
Energi exchange (J_{ij})	3.45 x 10 ⁻²¹ J/K
Konstanta Anisotropi (Ku)	³⁾ -0,3 x 10 ³ J/m ³
<i>Hard axis</i>	¹⁾ 1,1,0
Angka koordinat (Z)	¹⁾ 6
Angka Spin (s)	¹⁾ 3/2
<i>Spin wafe correction</i> (ϵ)	²⁾ 0.751

Sumber: ¹⁾(Huajun, 2007), ²⁾(Garanin, 1996), ³⁾(Rohman et. al., 2013), ⁴⁾(Steenbeck dan Hiergeist, 1999).

Data penelitian pada penelitian ini merupakan data sintetik, dimana data tersebut merupakan data yang diperoleh dari simulasi. Dalam hal ini, yang merupakan data sintetik adalah magnetisasi, suseptibilitas dan energi-energi dalam feromagnetik. Kemudian data-data hasil yang didapat tersebut digunakan untuk menarik kesimpulan.

3.3 Definisi Operasional Variabel

Variabel penelitian adalah sesuatu yang memiliki variabel nilai atau memiliki nilai yang berbeda dan dapat diukur. Variabel adalah objek yang menjadi fokus di

dalam suatu penelitian, yang nilainya berubah-ubah. Variabel yang digunakan pada penelitian ini ada tiga, yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol.

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang dapat mempengaruhi variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah:

- a) Temperatur pada penentuan temperatur Curie, yang mana dalam penelitian ini nilainya 0 K – 500 K dengan interval 10 K.
- b) Medan magnet eksternal pada penentuan kurva histerisis, yang mana dalam penelitian ini nilainya ditentukan dari -2 T sampai 2 T dengan interval 0,1 T.

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang mengalami perubahan akibat dari variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah:

- a) Suseptibilitas magnetik (χ), merupakan tingkat kerentanan magnet suatu bahan untuk termagnetisasi.
- b) Magnetisasi, merupakan sebuah proses ketika sebuah materi yang di tempatkan dalam suatu bidang magnetik akan menjadi magnet.
- c) Medan koersivitas (H_c), merupakan medan yang dibutuhkan untuk membuat magnetisasi remanen bernilai nol.
- d) Medan saturasi (H_s), merupakan keadaan ketika medan magnet (H) dan magnetisasi meningkat hingga keadaan jenuh.

3.3.3 Variabel Kontrol

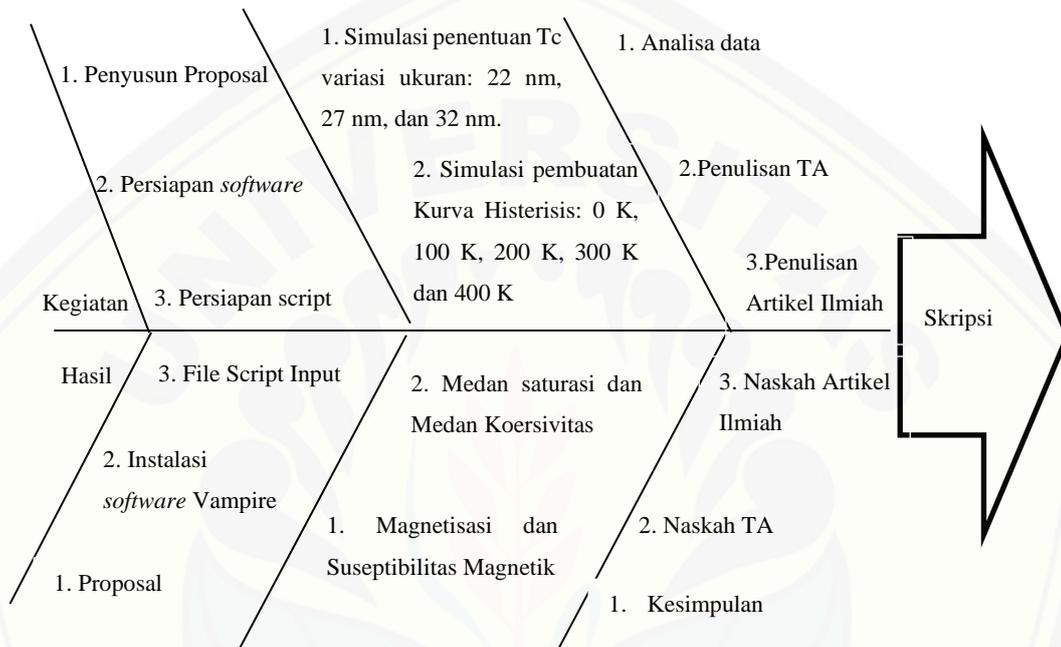
Variabel kontrol merupakan variabel yang dikendalikan sehingga hubungan variabel bebas dan terikat tidak dipengaruhi oleh faktor luar yang tidak ikut diteliti. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah:

- a) Bentuk bahan yang digunakan pada penentuan temperatur Curie dan kurva histerisis yaitu *nanocube*, dengan memvariasikan ukuran sisi 22 nm, 27 nm, dan 32 nm.
- b) Temperatur yang digunakan pada pembuatan kurva histerisis adalah 0 K, 100 K, 200 K, 300 K dan 400 K.

3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

3.4.1 Diagram Penelitian

Penelitian yang dilakukan secara umum digambarkan dalam diagram alir penelitian seperti pada Gambar 3.2 yakni:



Gambar 3.2 Kerangka Pemecahan Masalah

3.4.2 Simulasi Mikromagnetik

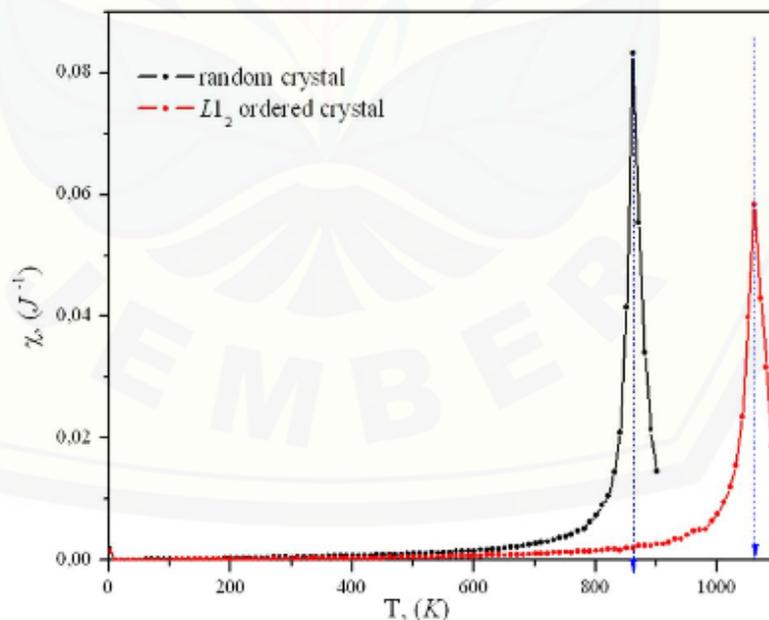
Simulasi mikromagnetik dilakukan untuk menentukan temperatur Curie, suseptibilitas magnetik dan kurva histerisis dari bahan magnetik LaSrMnO_3 . Simulasi dilakukan dengan membuat *file script* input dan *file script* bahan. *file script input* berisi struktur bahan, unit sel, dan ukuran bahan. *file script* bahan berisi tentang parameter bahan seperti konstanta *exchange*, momen spin atom, dan energi *exchange*, konstanta anisotropi dan konstanta uniaksial anisotropi. File bahan dan file input dibuat dalam satu folder dengan *software* Vampire. Simulasi dilakukan dengan unit sel 22 nm, 27 nm, dan 32 nm untuk menentukan temperatur Curie dan pembuatan kurva histerisis. Output yang diperoleh berupa data magnetik yang dapat diolah menggunakan *Software Origin*. Temperatur Curie didapatkan dari analisa grafik suseptibilitas dengan temperatur dan grafik magnetisasi dengan temperatur. Grafik kurva histerisis diperlukan grafik magnetisasi material dengan besar medan

magnetnya. Penentuan analisis arah spin domain bahan dan visualisasi bentuk bahan maka menggunakan *software Povray* dengan merubah file output yang berupa *cfg* menjadi file *povray*. File output *cfg* diubah dengan menggunakan *software Terminal Linux*.

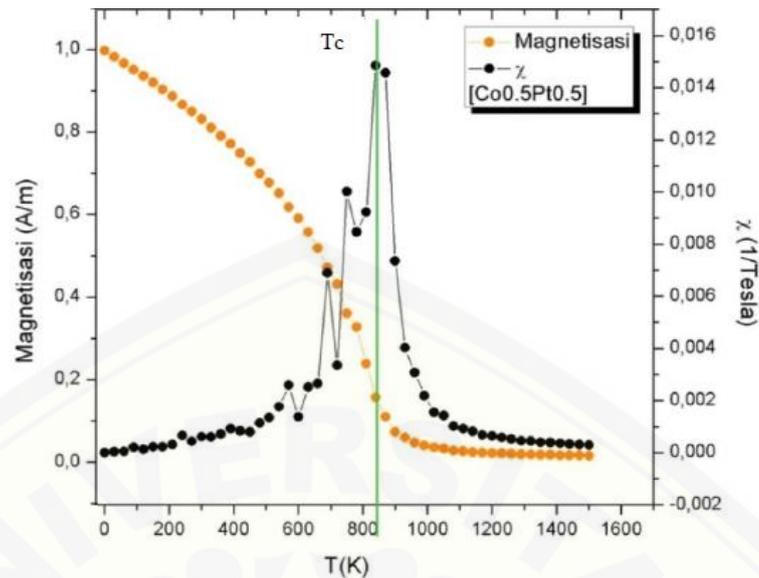
3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Analisa grafik Hubungan Suseptibilitas Magnetik dengan Temperatur

Hasil suseptibilitas magnetik diolah dengan menggunakan Origin. Analisis dilakukan dengan membuat grafik hubungan antara susptibilitas magnetik dengan temperatur. Gambar 3.3 mengilustrasikan grafik suseptibilitas magnetik terhadap temperatur. Hasil grafik dapat menunjukkan informasi tentang nilai suseptibilitas magnetik pada bahan. Grafik suseptibilitas magnetik menjadikan temperatur Curie lebih spesifik dari penggabungan antara kurva temperatur terhadap magnetisasi dengan kurva temperatur terhadap suseptibilitas, suseptibilitas tertinggi suatu bahan terletak pada temperatur Curie-nya. Gambar 3.4 merupakan contoh grafik penentuan temperatur Curie material berdasarkan perubahan magnetisasi magnetik.



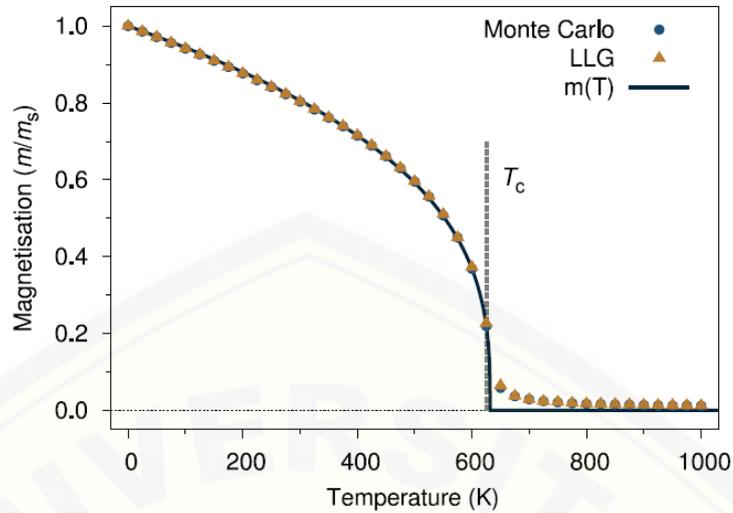
Gambar 3.3 Grafik suseptibilitas magnetik (Vernyhora, 2009)



Gambar 3.4 Contoh grafik penentuan temperatur Curie bahan $\text{Co}_{0.5}\text{Pt}_{0.5}$ berdasarkan perubahan magnetisasi dan tingkat suseptibilitas magnetik (Nazah, 2017).

3.5.2 Analisa Data Temperatur Curie Bahan $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$

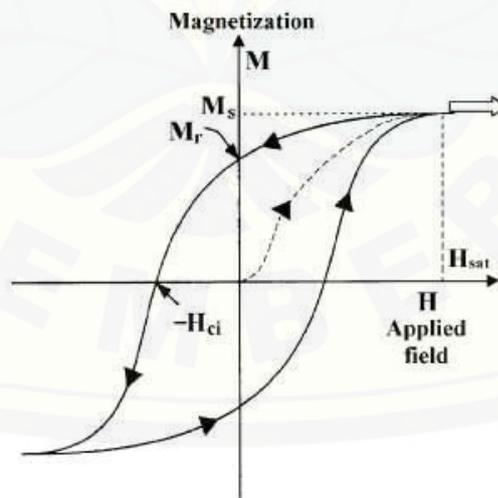
Hasil simulasi berupa magnetisasi dianalisis menggunakan *software origin* untuk menentukan temperatur Curie. Analisis dilakukan dengan menggunakan grafik magnetisasi terhadap temperatur. Gambar 3.5 mengilustrasikan grafik magnetisasi terhadap temperatur. Hal ini dilakukan untuk melihat perubahan magnetisasi terhadap perubahan suhu dari bahan $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ berdasarkan variasi ukuran sisi kubus. Gambar 3.5 merupakan contoh grafik penentuan temperatur Curie material berdasarkan perubahan magnetisasi dan tingkat suseptibilitas magnetik. Cara menentukan temperatur Curie melalui grafik yaitu dengan meninjau titik antara kurva temperatur terhadap magnetisasi dengan kurva temperatur terhadap suseptibilitas. Ketika titik tersebut mendekati nol pada sumbu magnetisasi, dan nilai suseptibilitas magnetik tertinggi pada titik tersebut dapat dikatakan sebagai titik temperatur Curie dari material feromagnetik. Menurut Huajun (2007), Bahan $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ menghasilkan temperatur Curie sebesar 350 K secara simulasi.



Gambar 3.5 Grafik penentuan temperatur Curie (Evans et al., 2014)

3.5.3 Analisis Kurva Histerisis

Hasil Simulasi untuk pembuatan kurva histerisis dianalisis menggunakan *software origin*. Analisis dilakukan dengan membuat kurva antara magnetisasi dan medan magnetisasi. Hal ini dilakukan untuk melihat sifat sifat dan besaran seperti medan saturasi dan medan koersivitas yang berbentuk dari bahan $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ Gambar 3.6 merupakan kurva histerisis untuk material feromagnetik M terhadap H.



Gambar 3.6 Kurva Histerisis (Craik, 2003)

Karakteristik material feromagnetik juga dapat dilihat dari bentuk *loop* kurva histerisisnya. Jika kurva histerisis material feromagnetik berbentuk pipih atau tipis dengan medan koersivitas (H_c) lebih kecil dari 125 Oe ($H_c = 0,002 - 125$ Oe)

(Coey, 2010), maka tergolong ke dalam *soft magnet*. Sedangkan material feromagnetik tergolong *hard magnet* jika *loop* kurva histerisis yang terbentuk lebar atau tebal dengan medan koersivitas (H_c) lebih besar dari 125 Oe (Furlani, 2001).



BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ dalam berbagai variasi ukuran sisi kubus maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh variasi ukuran sisi kubus pada material bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ berdasarkan hasil simulasi, variasi ukuran sisi kubus mempengaruhi nilai temperatur Curie. Pada ukuran 22 nm pada material $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ diperoleh nilai temperatur Curie 335 K, dan untuk ukuran 27 nm dan 32 nm diperoleh nilai temperatur Curie 345 K. Pada ukuran 27 nm nilai temperatur Curie sudah mencapai nilai temperatur Curie tertinggi, yang diduga sudah mencapai nilai ukuran kritis. Hal ini membuat nilai efisiensi dari sebuah bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ bentuk *nanocube* sebesar 27 nm.
2. Karakteristik kurva histerisis dari material bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ berdasarkan hasil simulasi diperoleh perubahan nilai medan saturasi dan medan koersivitas pada ukuran sisi kubus bahan dan variasi yang diberikan. Pada material $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ nilai medan koersivitas dan medan saturasi tertinggi terdapat pada ukuran sisi kubus 32 nm. Nilai ini dapat digunakan sebagai informasi karakteristik bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian kali ini, diketahui nilai temperatur Curie dan karakteristik kurva histerisis. Saran untuk penelitian selanjutnya dilakukan pengembangan simulasi tentang bahan ini dengan berbagai bentuk dan ukuran. Namun terdapat beberapa hal yang perlu dilakukan, diantaranya memvariasikan bentuk lain misalnya *nanosphere* dan lain-lain. Hal ini dilakukan agar dapat mengetahui perbedaan atau perbandingan karakteristik dari setiap bahan magnetik. Hal ini digunakan untuk mengetahui nilai temperatur Curie maksimum dan sifat magnetik pada kurva histerisis (medan saturasi dan medan koersivitas) berdasarkan variasi bentuk. Selain itu juga perlu memvariasikan ukuran sisi bahan lebih banyak untuk mengetahui

sifat-sifat magnetik yang dihasilkan dari beberapa variasi ukuran bahan.



DAFTAR PUSTAKA

- Alvarez, G. S. 2008. Cubic versus spherical magnetic nanoparticles: the role of surface anisotropy. *J. Am. Chem. Soc.* 130.
- Asrofi, dan B. E. Purnama. 2013. Rancang Bangun Alat Kontrol Otomatis Pendingin Komputer Berbasis Mikrokontroler ATMEGA8L. *Indonesian Journal on Networking and Security (IJNS)* 2.
- Baibich, M. N., J. M. Broto, A. Fert, F. N. Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, dan J. Chazelas. 1988. Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices. *Physical review letters* 61 (21): 2472.
- Callister Jr, W. D., dan D. G. Rethwisch. 2012. *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. John Wiley & Sons:
- Callister, W. D., dan D. G. Rethwisch. . 2009. *Materials Science and Engineering An Introduction. Eighth Edition* New York: 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.
- Coey, J. M. 2010. *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge university press:
- Craik, D. J. 2003. Magnetism: principles and applications. *Magnetism: Principles and Applications, by Derek J. Craik, pp. 468. ISBN 0-471-95417-9. Wiley-VCH, September 2003.:* 468.
- Djuhana, D., L. Rohman, dan D. Kim. 2017. Micromagnetic Calculation of the Dynamic Susceptibility Spectra in LSMO (La 0.7 Sr 0.3 MnO₃) Ferromagnetic Nanopillars. *Journal of Magnetism* 22 (3): 364-368.
- Evans, R. F., W. J. Fan, P. Chureemart, T. A. Ostler, M. O. Ellis, dan R. W. Chantrell. 2014. Atomistic spin model simulations of magnetic nanomaterials. *Journal of Physics: Condensed Matter* 26 (10): 103202.
- Furlani, E. P. 2001. *Permanent magnet and electromechanical devices: materials, analysis, and applications*. Academic press:
- Garanin, D. 1996. Self-consistent Gaussian approximation for classical spin systems: Thermodynamics. *Physical Review B* 53 (17): 11593.
- Gor'kov, L. P., dan V. Z. Kresin. 2004. Mixed-valence manganites: fundamentals and main properties. *Physics reports* 400 (3): 149-208.

- Halliday, D., dan R. Resnick. 1978. *Fisika 2*. Surabaya: Erlangga, *Edisi Ketiga*:
- Huajun, L. 2007. MAGNETOTRANSPORT PROPERTIES OF STRONTIUM DOPED LANTHANUM MANGANITE NANOCONSTRUCTION ARRAY
- Irayanti, E. 2016. Investigasi Sifat-Sifat Magnetik Material Alloy Feromagnetik Fe_{1-x}Ptx menggunakan Simulasi Mikromagnetik dengan Model Atomistik., Jember, FMIPA UNEJ, UNEJ.
- Istiyono, E. 2009. *Analisis Sifat Magnetik Bahan yang Mengalami Proses Annealing dan Quenching*. Yogyakarta Universitas Negeri Yogyakarta:
- Jiles, D. 2015. *Introduction to magnetism and magnetic materials*. CRC press:
- Jin, S., M. McCormack, T. Tiefel, dan R. Ramesh. 1994. Colossal magnetoresistance in La-Ca-Mn-O ferromagnetic thin films. *Journal of Applied Physics* 76 (10): 6929-6933.
- Motome, Y., N. Furukawa, dan N. Nagaosa. 2003. Competing orders and disorder-induced insulator to metal transition in manganites. *Physical review letters* 91 (16): 167204.
- Myron, B. 2001. Salamon The physics of manganites: Structure and transport/Salamon Myron B., Jaime Marcelo. *Reviews of Modern Physics* 73: 583.
- Nazah. 2017. Investigasi Sifat-Sifat Magnetik Alloy Co_{1-x}Ptx dan Penentuan Temperatur Curie Berdasarkan Simulasi Mikromagnetik, Fmipa Fisika, Universitas Jember.
- Newman, M., dan G. Barkema. 1999. *Monte carlo methods in statistical physics chapter 1-4*. New York: Oxford University Press: :
- Nurhayati, A. 2008. EFEKTIVITAS PENYIRAMAN EKSTRAK KULIT KACANG HIJAU DAN AIR CUCIAN BERAS (LERI) TERHADAP PERTUMBUHAN *Sansevieria trifasciata*, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Nursiyanto, W., B. Soegijono, dan E. Djatmiko. 2015. Pengaruh Bentuk Notch terhadap Kurva Histerisis Bahan Feromagnetik Nanowire, *Proceedings of Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal)*, 4: SNF2015-VI-1-4.
- Okimustava, dan R. Oktova. 2009. *Penentuan Suhu Curie Besi dengan Metode Kawat Berarus Listrik*. Yogyakarta: Universitas Ahmad Dahlan. Diedit oleh P. S. F. d. Aplikasinya:

- Pahuja, O. p. 2005. *Solid State Physics*. New Delhi Ajit Printer Maujpur:
- Pecchi, G., C. Campos, O. Peña, dan L. E. Cadus. 2008. Structural, magnetic and catalytic properties of perovskite-type mixed oxides $\text{LaMn}_{1-y}\text{Co}_y\text{O}_3$ ($y=0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0$). *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 282 (1-2): 158-166.
- Popescu, F. 2007. Multiband models for colossal magnetoresistance materials and diluted magnetic semiconductors.
- Puri, R. K., dan V. K. Babbar. 2001. *Solid State Physics and Electronics*. New Delhi: S. Chand and Company LTD.:
- Rahman, L., I. Sugihartono, W. Nusiyanto, D. Djuhana, dan B. Soegijono. 2013. Micromagnetic Simulation of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) Nano Disk by Finite Element Methods, *Proceedings of PROSIDING SEMINAR NASIONAL FISIKA (E-JOURNAL)*, 2: 94-101.
- 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., D. Djuhana, B. Soegijono, dan W. Nursiyanto. 2013. Dynamics Micromagnetic Simulation of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) Disk Array Patterned Ferromagnetic. *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS* 13 (03): 17-20.
- Rohman, L. H. K. 2010. Fabrikasi dan Karakterisasi Sifat Mekanik Kaca Magnetik Berbasis Barium Ferit, Universitas Negeri Semarang.
- Romero, M., H. Pardo, R. Faccio, M. A. Tumelero, C. C. P. Cid, J. Castiglioni, A. A. Pasa, dan Á. W. Mombrú. 2015. Interphase and magnetotransport of LSMO-PMMA nanocomposites obtained by a sonochemical method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 382: 342-348.
- Steenbeck, K., dan R. Hiergeist. 1999. Magnetic anisotropy of ferromagnetic $\text{La}_{0.7}(\text{Sr}, \text{Ca})_{0.3}\text{MnO}_3$ epitaxial films. *Applied physics letters* 75 (12): 1778-1780.
- Sudjatmoko. 2005. *Kajian Sifat Bahan Lapisan Tipisferomagnetik $\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$ Hasil Deposisi Dengan Teknik Evaporasi Hampa*. Yogyakarta: Puslitbang Teknologi Maju:
- Sugiarto, T. D., I. P. Handayani,, dan R. F. Iskandar. 2013. Analisis dan Simulasi Distribusi Panas pada Heat Sink Processor CPU dengan Comsol Multiphysics, Fakultas Teknik Elektro, Teknik Fisika, Universitas Telkom.

- Sulanjari, W. N., A. A. Santi, E. Artanti, Suharyadi, T. Kato, dan S. Iwata. 2014. Kajian Sifat Kemagnetan pada Nanopartikel Cobalt Ferrit (CoFeO) yang di coating dengan Polyethylene Glyko. (PEG-4000) dan Silika. *Jurnal Fisika Indonesia* 18(54).
- Triyanto, Y. 2004. *Pemetaan Nilai Suseptibilitas Magnetik Tanah Lapisan Atas di Kodya Surakarta Menggunakan Bartington MS2 Sebagai Indikator Pendekatan Sebaran Logam*. Surakarta Universitas Sebelas Maret.:
- Urushibara, A., Y. Moritomo, T. Arima, A. Asamitsu, G. Kido, dan Y. Tokura. 1995. Insulator-metal transition and giant magnetoresistance in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$. *Physical Review B* 51 (20): 14103.
- Vernyhora, I. 2009. Modélisation à l'échelle atomique de l'évolution microstructurale dans les alliages Ni-Fe: Corrélation entre les propriétés magnétiques et structurales.
- Veronica, dan Lacovaci. 2016. *Magnetic Field-Based Technologies For Lab-On-a-Chip Application*. Italy: Intech:
- Warsiti. 2005. *Studi Pengaruh Suhu Annealing Terhadap Struktur Kristal Dan Magnetoresistansi Permalloy NiFe Hasil Elektrodeposisi*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.:
- Widodo, A. T. 2013. Studi mikromagnetik dinamika struktur domain pada material feromagnetik Py, Ni, Fe dan Co model nanosphere= Micromagnetic study of dynamic domain structure in ferromagnetic Py, Ni, Fe and Co nanospheres model.
- Zeng, P., Z. Chen, W. Zhou, H. Gu, Z. Shao, dan S. Liu. 2007. Re-evaluation of $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ perovskite as oxygen semi-permeable membrane. *Journal of Membrane Science* 291 (1-2): 148-156.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Ukuran Kritis bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$

Menggunakan Rumus Brown :

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

Diperoleh diameter kritis bentuk bola bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ sebesar $D_c = 34,5$ nm, lalu dibandingkan antara bentuk bola dengan kubus.

$$\begin{aligned} \text{Bola} &= DC_r \\ &= VC_r = \frac{4}{3}\pi DC_r^3 \end{aligned}$$

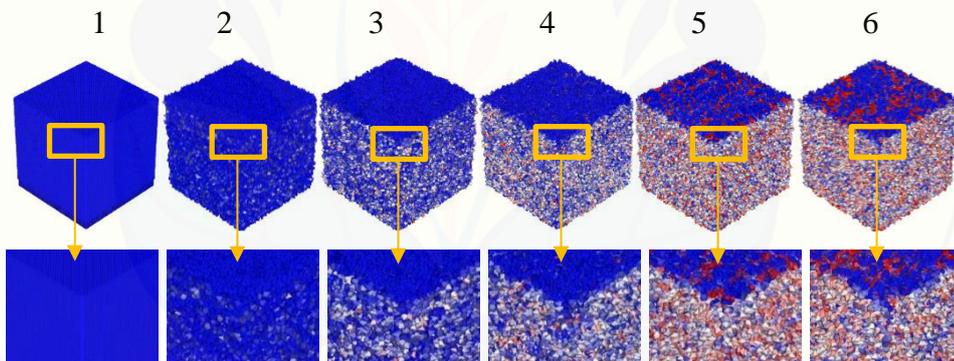
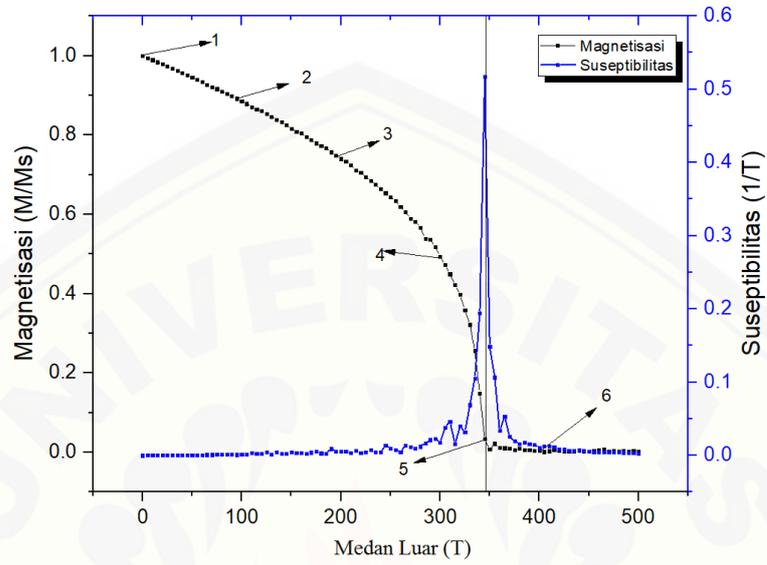
$$\begin{aligned} \text{Kubus} &= SC_r \\ &= VC_r = SC_r^3 \end{aligned}$$

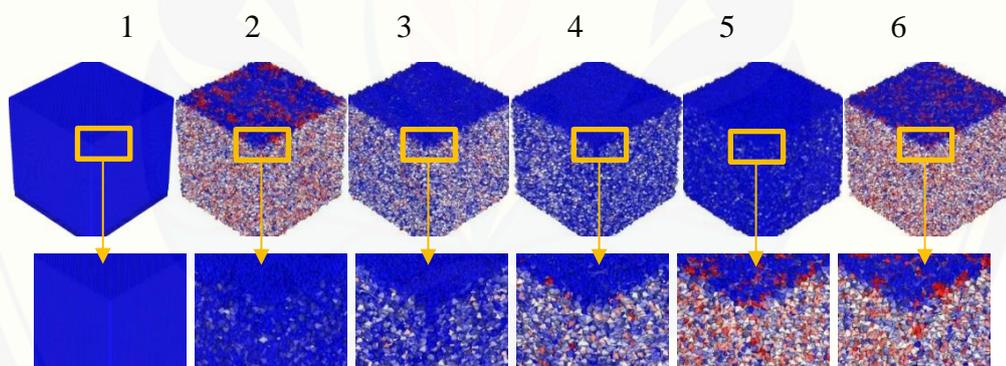
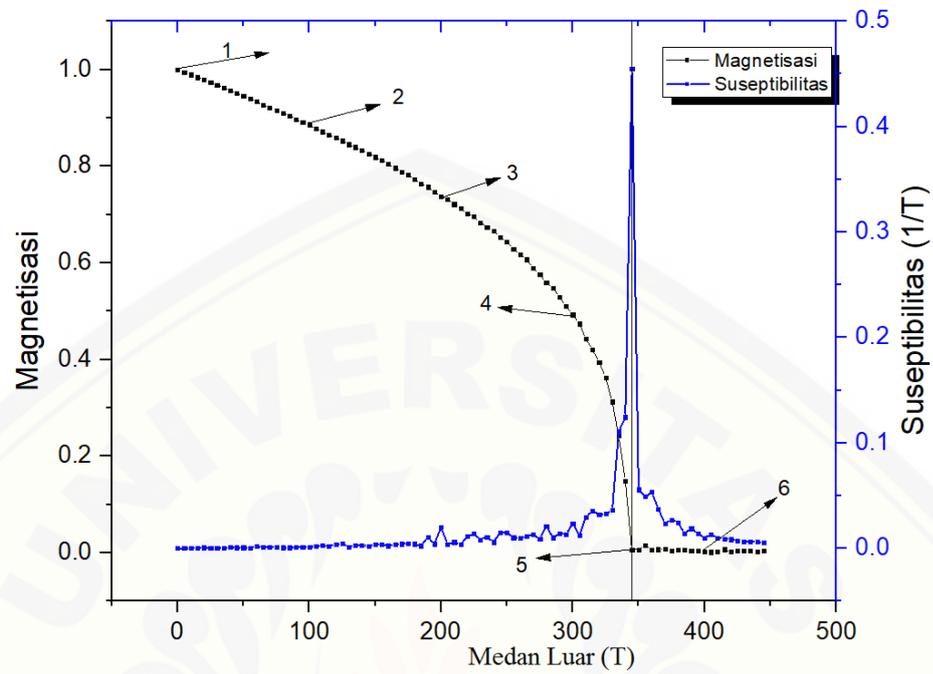
$$\begin{aligned} V_{\text{bola}} &= \frac{4}{3}\pi DR^3 = SC_r^3 \\ &= \frac{4}{3}\pi D\left(\frac{1}{2}DC_r\right)^3 = SC_r^3 \\ &= \frac{4}{3}\frac{1}{8}\pi DC_r^3 = SC_r^3 \\ &= \frac{1}{6}\pi DC_r^3 = SC_r^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jadi, } SC_r^3 &= \sqrt[3]{\frac{1}{6}\pi DC_r^3} \\ &= DC_r \sqrt[3]{\frac{1}{6}\pi} \\ &= 34,5 \times \sqrt[3]{\frac{1}{6} \cdot 3,14} \\ &= 34,5 \times 0,806 \\ &= 27,8 \text{ nm} \end{aligned}$$

Lampiran 2 Visualisasi Bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ Berdasarkan Perubahan Temperatur pada Analisis Temperatur Curie

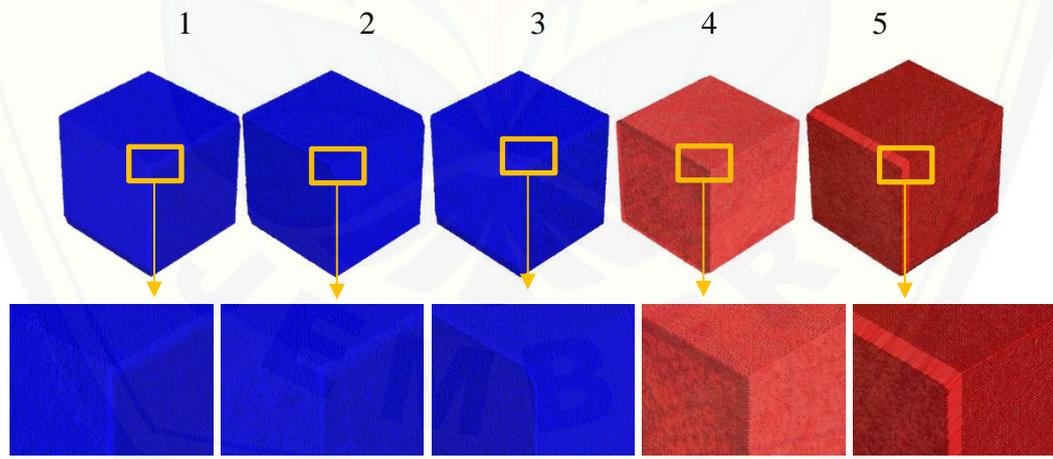
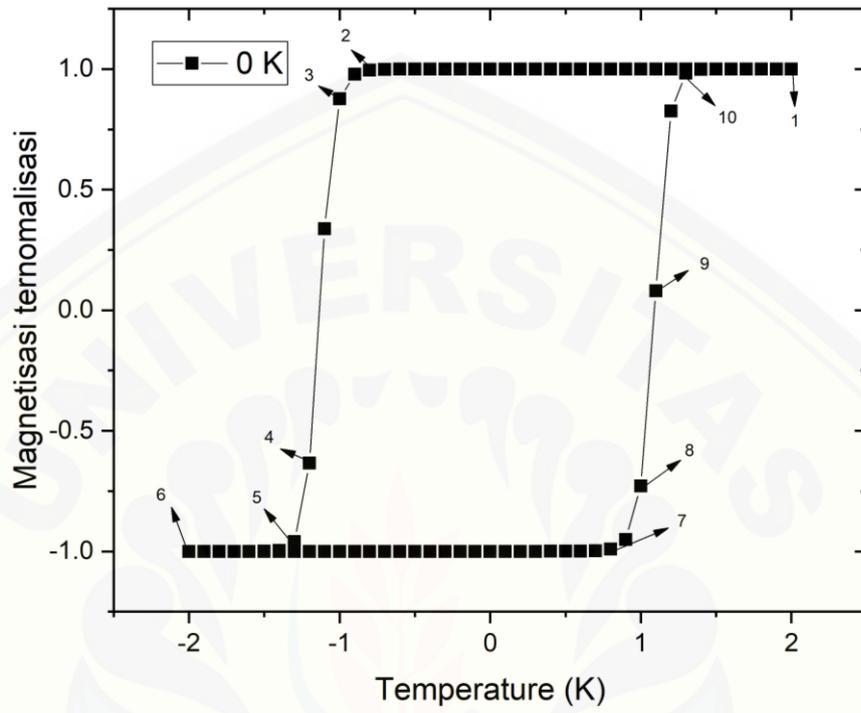
1. Grafik temperatur Curie bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ berukuran sisi kubus 27 nm

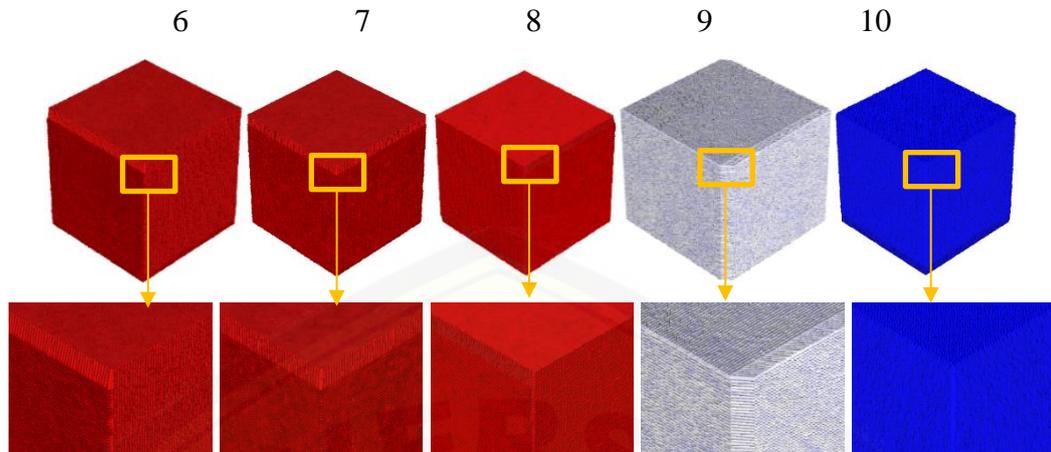


2. Grafik temperatur Curie bahan $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ berukuran sisi kubus 32 nm

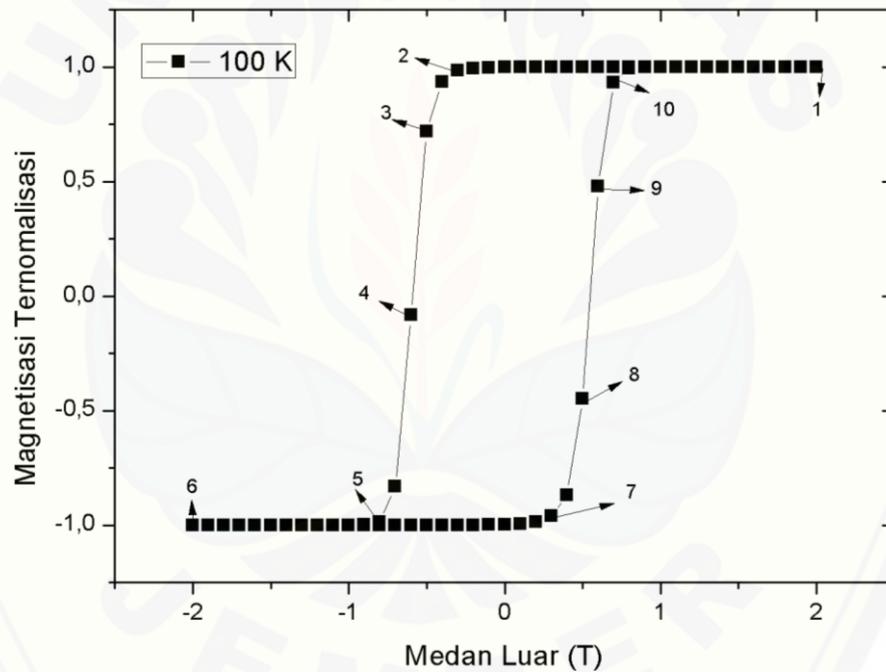
Lampiran 3 Grafik Kurva Histerisis bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$

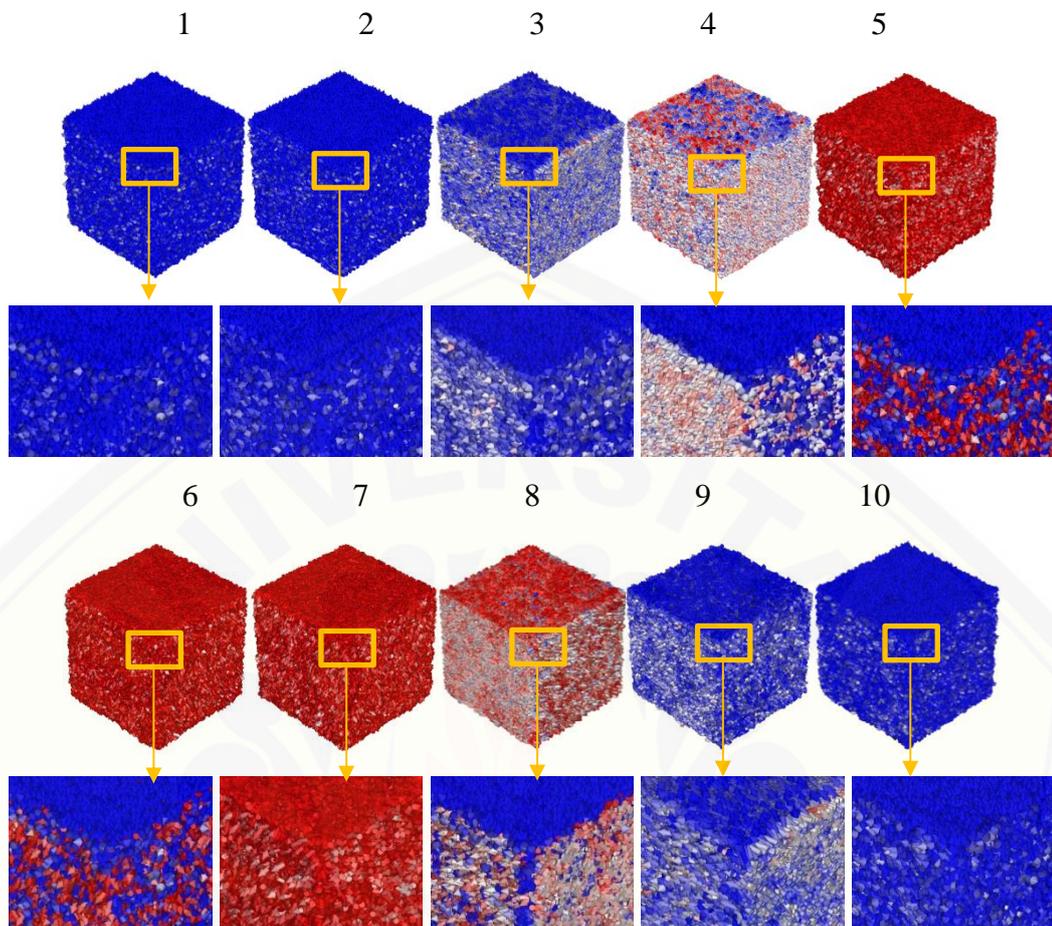
1. Grafik Kurva Histerisis bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ berukuran sisi kubus 27 nm temperatur 0 K



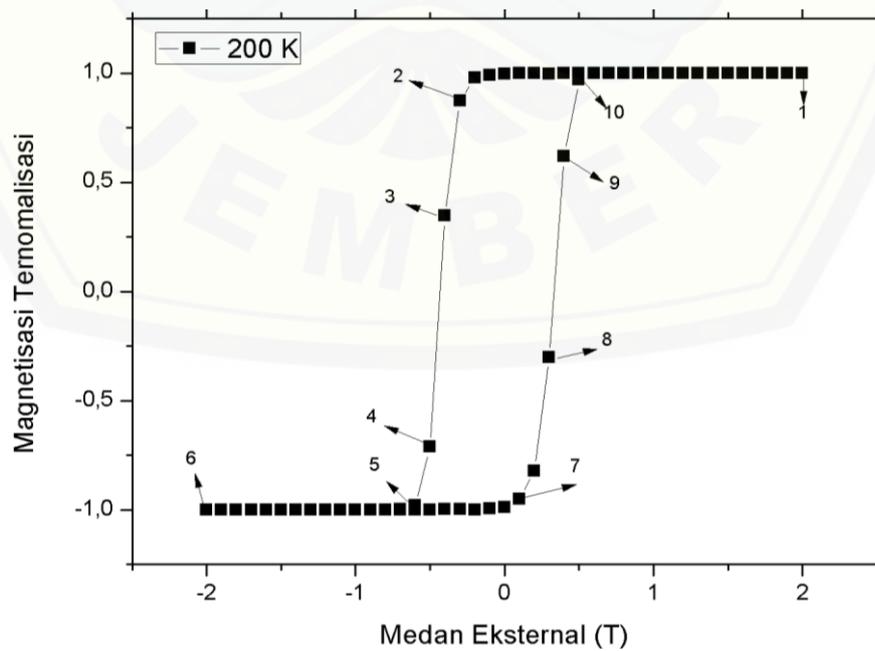


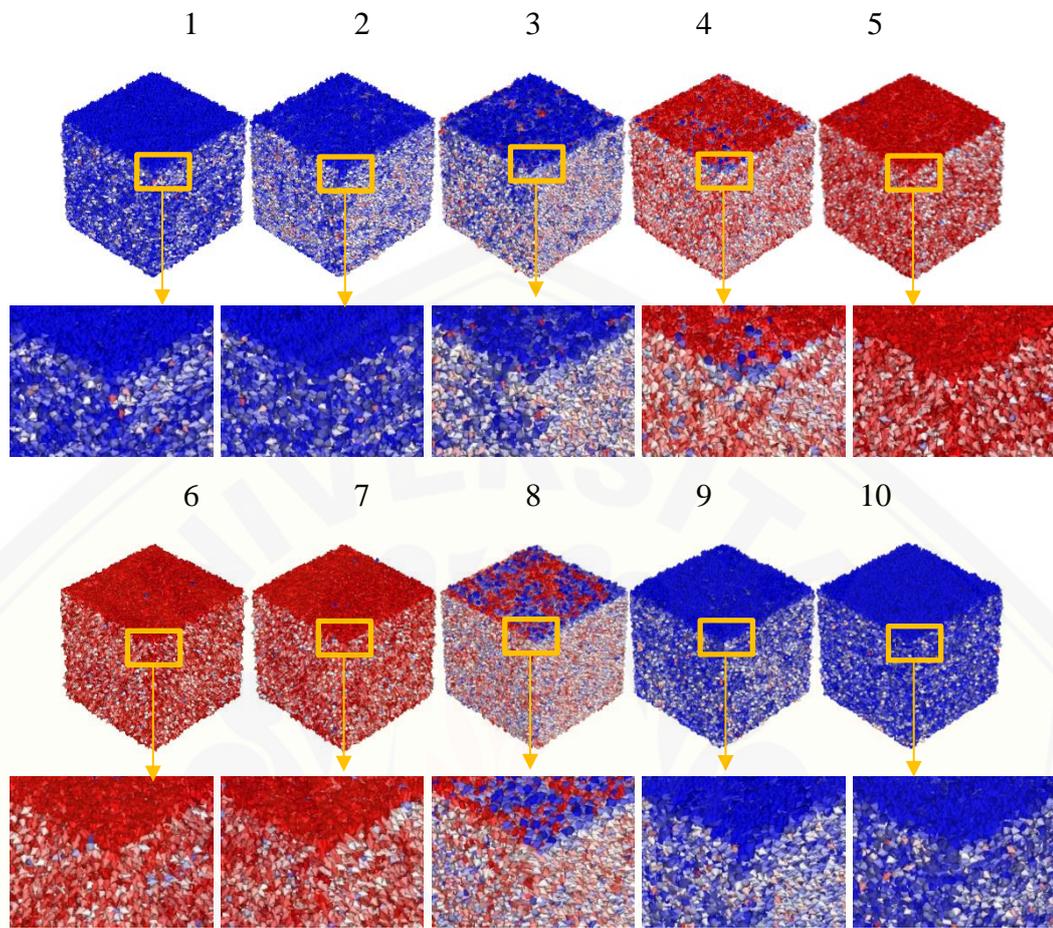
2. Grafik Kurva Histerisis bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ berukuran sisi kubus 27 nm temperatur 100 K



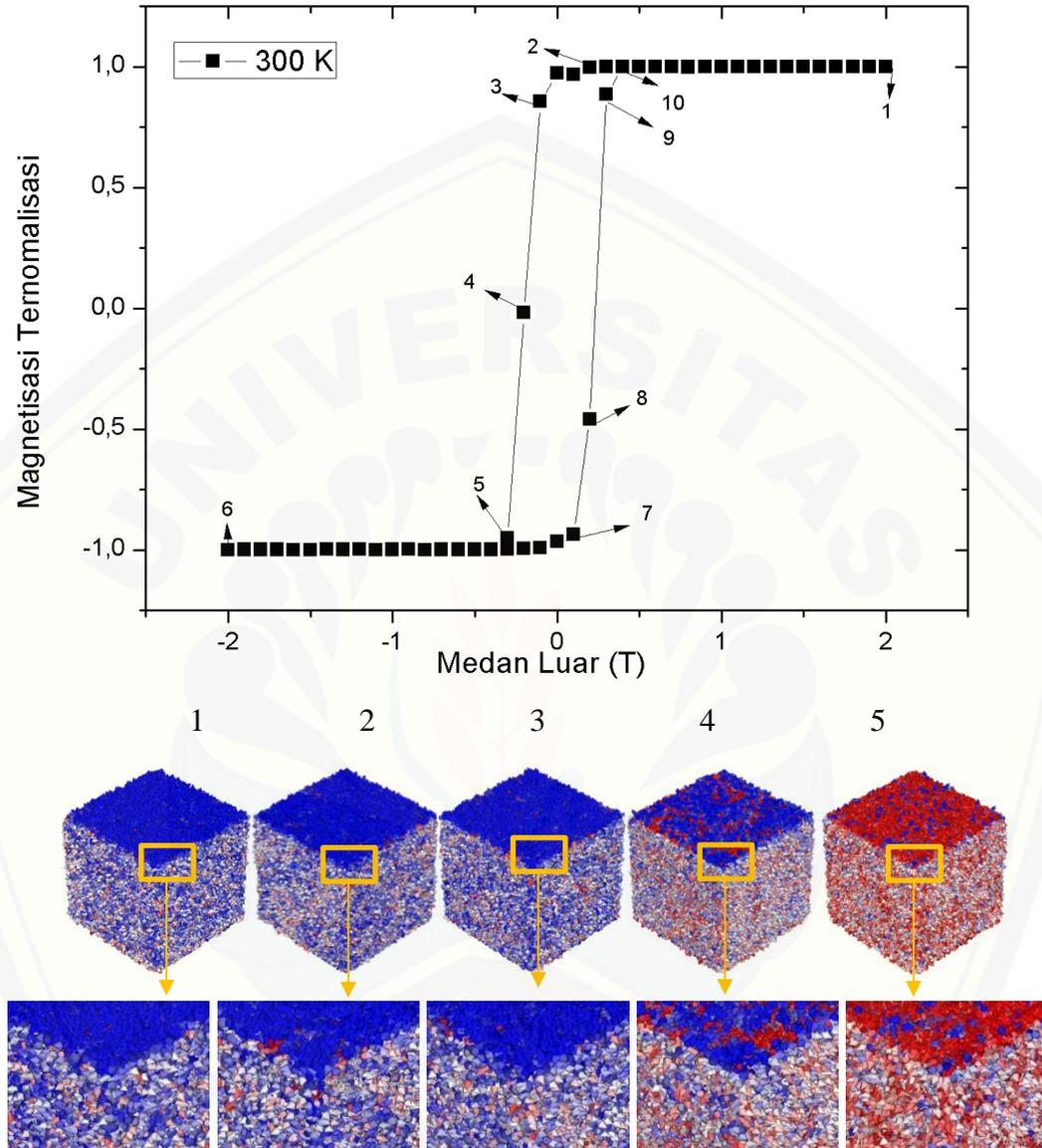


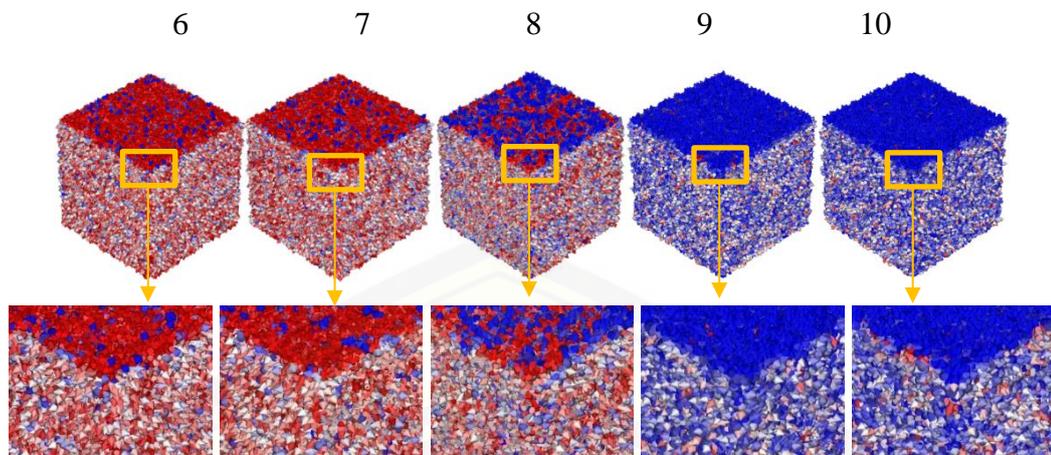
3. Grafik Kurva Histeresis bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ berukuran sisi kubus 27 nm temperatur 200 K



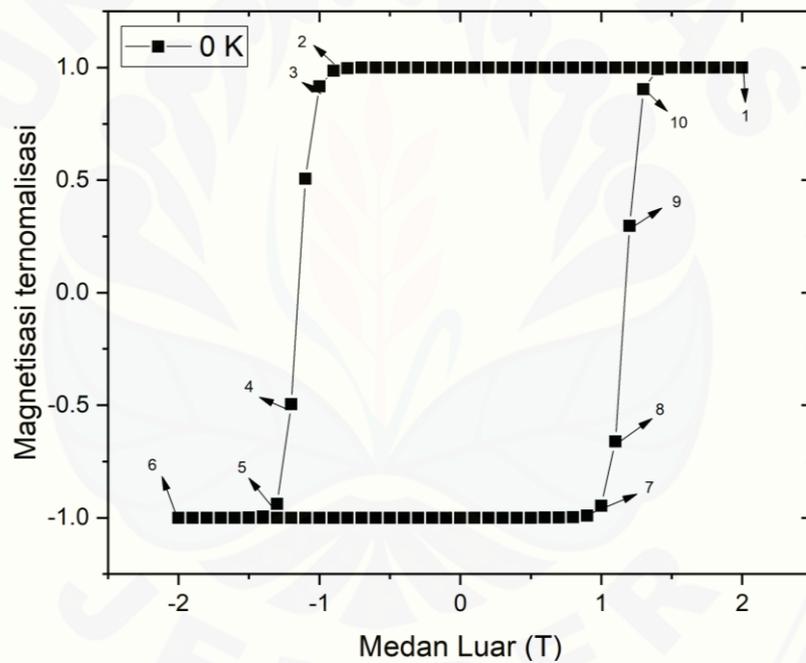


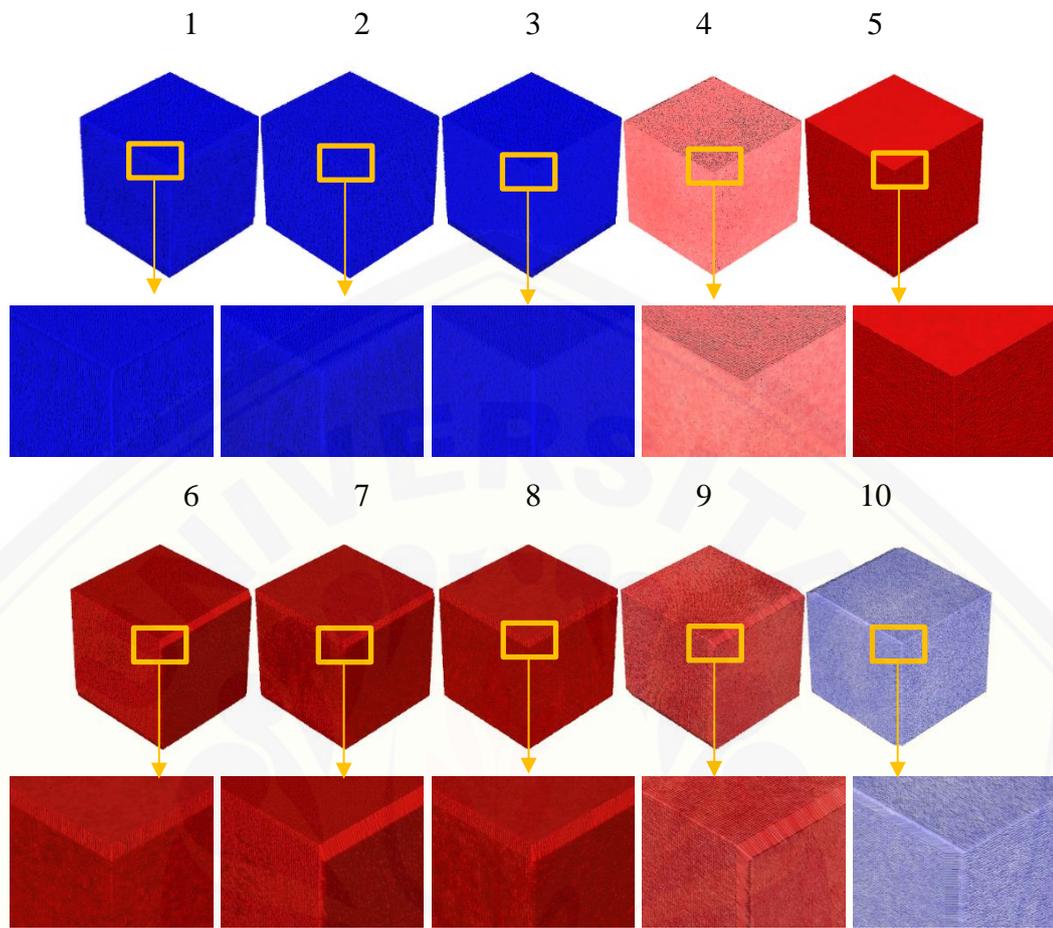
4. Grafik Kurva Histerisis bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ berukuran sisi kubus 27 nm temperatur 300 K



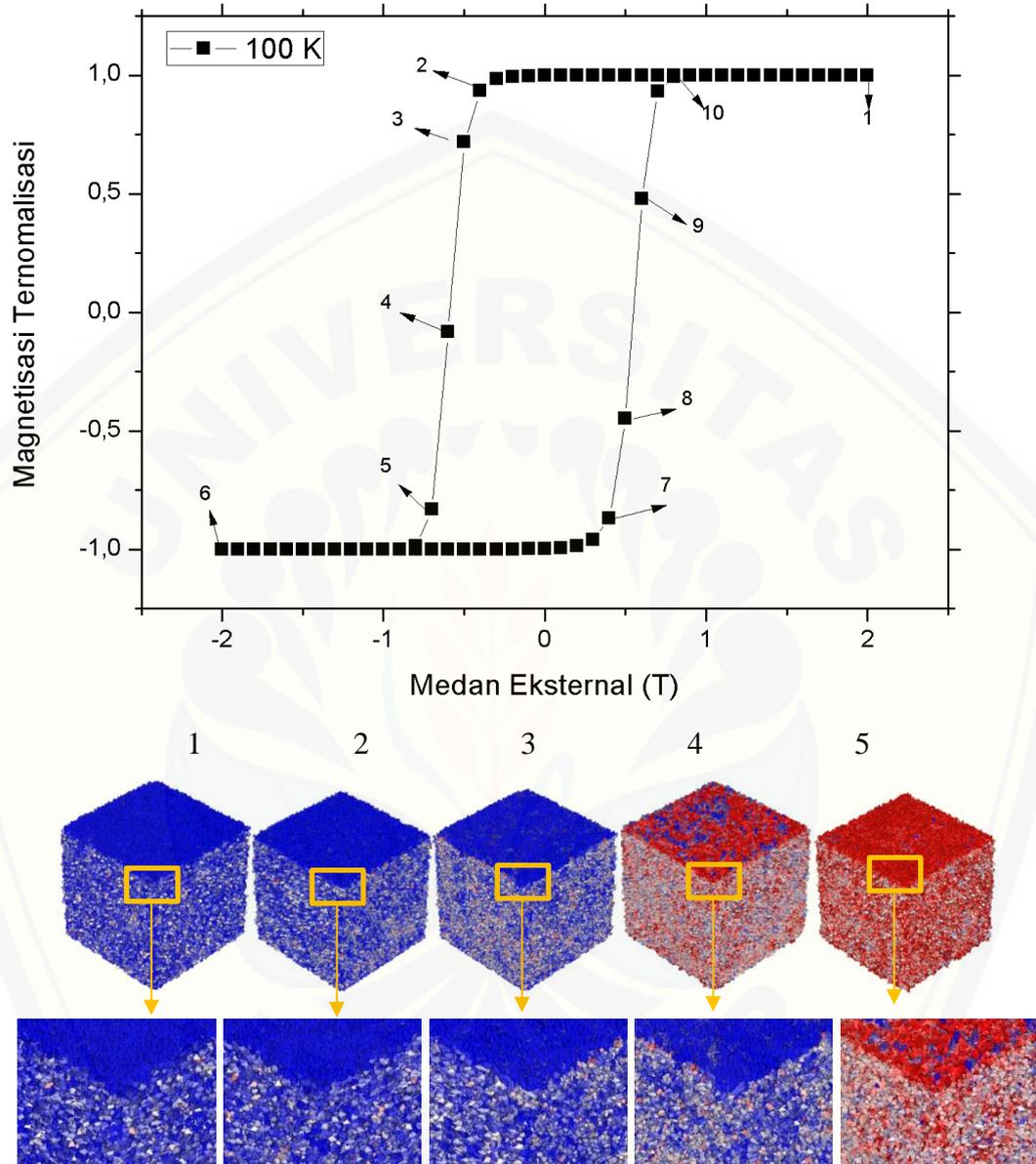


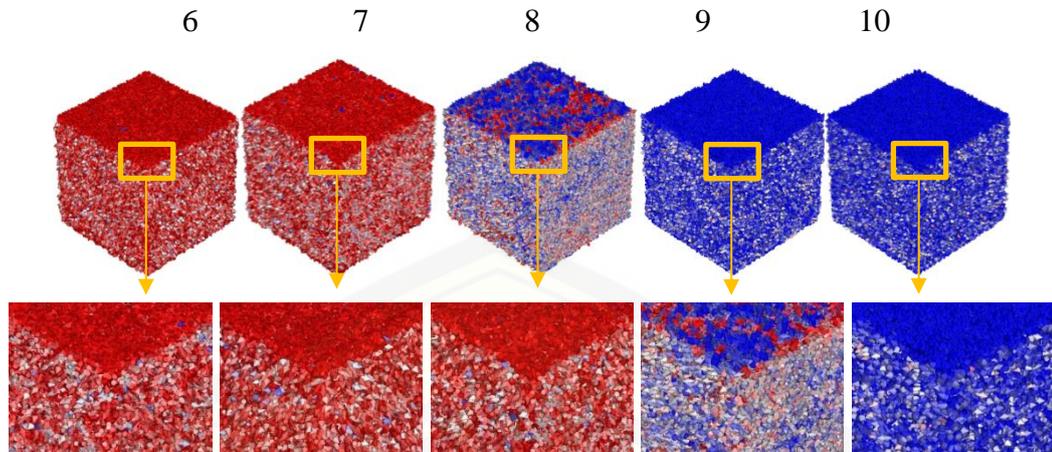
5. Grafik Kurva Histerisis bahan $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ berukuran sisi kubus 32 nm temperatur 0 K



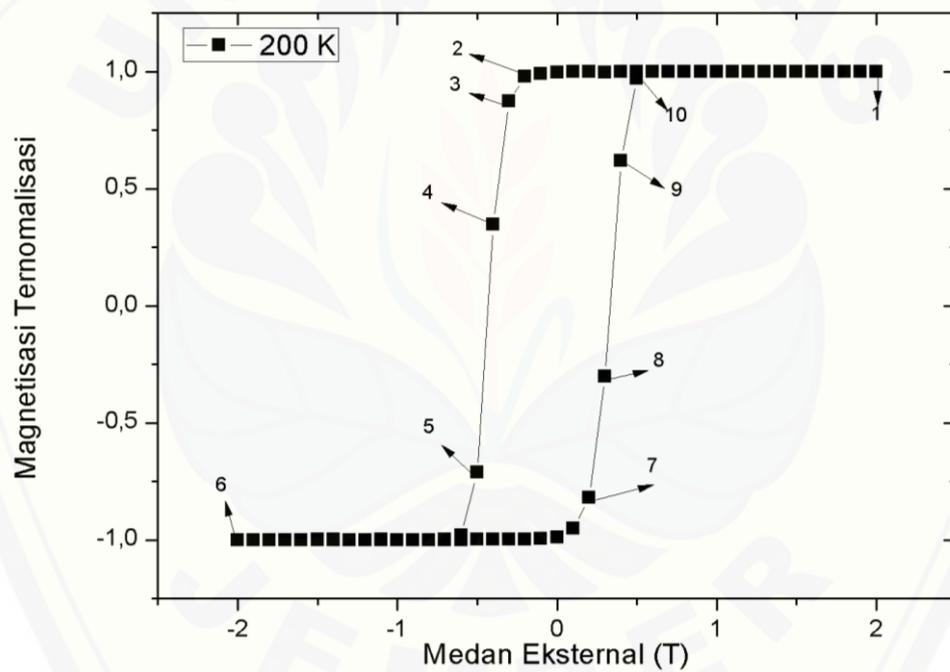


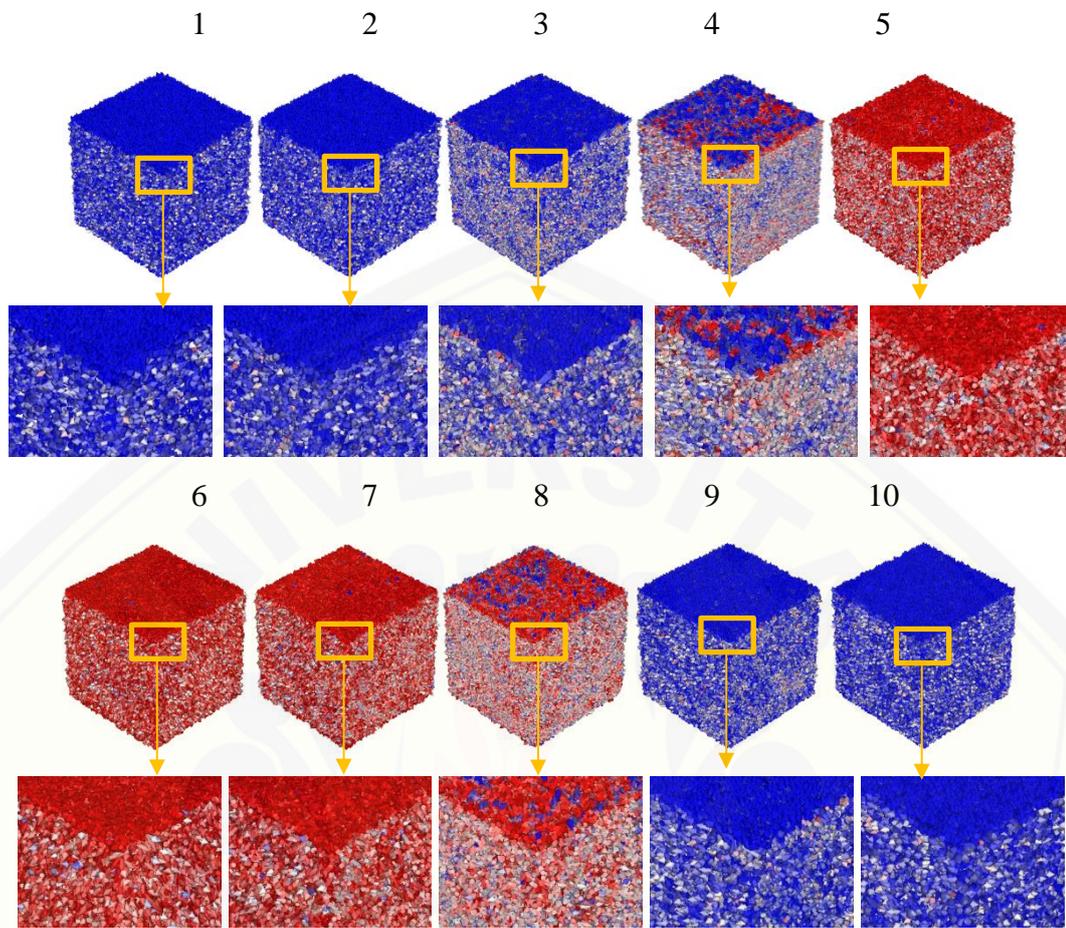
6. Grafik Kurva Histerisis bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ berukuran sisi kubus 32 nm temperatur 100 K





7. Grafik Kurva Histerisis bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ berukuran sisi kubus 32 nm temperatur 200 K





8. Grafik Kurva Histerisis bahan $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ berukuran sisi kubus 32 nm temperatur 300 K

