



SUSEPTIBILITAS MAGNETIK DAN TEMPERATUR *CURIE*
MATERIAL *ALLOY* FEROMAGNETIK $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$
MODEL *NANOCUBE* DAN *NANOSPHERE*

SKRIPSI

Oleh

Imam Wahyudi
NIM 121810201067

JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2018

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan teknologi magnetik yang berkembang pesat saat ini telah menjadi sorotan utama dalam dunia industri. Kebutuhan teknologi magnetik dengan biaya dan kemampuan yang beragam menjadi alasan utama untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas produk khususnya dalam media penyimpanan. Salah satu cara guna meningkatkan kemampuan dan kapasitas penyimpanan yaitu dengan memanfaatkan bahan magnetik dengan energi anisotropi yang tinggi. Salah satu contoh media penyimpanan yaitu HDD (*Hard Disk Drive*) yang berfungsi menyimpan data dengan menempatkan sebuah medan magnetik melalui sebuah disk berlapis bahan magnetik (Wahyudi, 2005). Karakteristik bahan magnetik juga tidak terpisahkan oleh energi-energi magnetisasi yang berkontribusi terhadap sifat-sifat kemagnetan bahan itu sendiri.

Karakteristik bahan magnetik yang stabil terhadap panas telah memperluas pemanfaatannya sebagai penyimpan memori pada teknologi perekam media. Artinya, bahan magnet dengan anisotropi tinggi ini tidak akan kehilangan energi magnet saat diberi efek panas (Purnama *et al.*, 2013). Sifat magnetik pada lapisan tipis berbahan feromagnetik dimanfaatkan sebagai karakteristik dasar dari media penyimpan data dan sensor magnetik, dengan memanfaatkan spin magnet dalam domain magnet dan *domain wall* magnet. Sebagai sensor magnetik, bahan magnetik harus mempunyai kepekaan terhadap perubahan medan magnet. Medan magnet dari masing-masing atom dalam bahan feromagnetik sangat kuat, sehingga interaksi di antara atom-atom tetangganya menyebabkan sebagian besar atom akan mensejajarkan diri membentuk kelompok-kelompok, yang dikenal dengan *domain*. Secara umum penelitian domain magnet terbagi menjadi dua yaitu penelitian yang berhubungan dengan struktur *domain* magnet pada bahan feromagnetik berbentuk elemen dan penelitian yang berkaitan dengan dinamika *domain wall* pada bahan feromagnetik berbentuk *nanowire*. Keduanya dilakukan dengan mengaplikasikan medan luar (Ismail, 2013). Untuk menunjang kemajuan

nanowire berbahan feromagnetik juga digunakan divais *spintronic*. *Spintronic* merupakan pemanfaatan arah spin elektron sebagai sumber informasi digital dibandingkan dengan muatan elektron itu sendiri (Maradona, 2012).

Bahan feromagnetik memiliki kriteria yang dibutuhkan untuk memperoleh kuantitas penyimpan data yang diinginkan. Bahan feromagnetik diantaranya Co, Ni, Fe, Gd dan *alloy* (paduan), dimana bahan tersebut memiliki temperatur *Curie* yang tinggi, sifat kemagnetan yang kuat, memiliki orientasi momen magnetik hampir searah meski tanpa medan eksternal, dan nilai suseptibilitas magnetik yang baik (Puri dan Babbar, 2001). Sebagai upaya untuk mengurangi eksplorasi terhadap bahan murni feromagnetik yang berlebihan, maka bahan paduan menjadi alternatif dalam pengembangan teknologi bahan. Di samping itu, teknologi paduan memungkinkan untuk diperolehnya bahan dengan sifat kemagnetan yang tinggi, yang salah satunya ditinjau berdasarkan suseptibilitas magnetik dan temperatur *Curie* yang dimiliki.

Bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ merupakan paduan logam yang memiliki karakteristik kemagnetan cukup baik. Pada penelitian sebelumnya, penelitian mengenai sifat kemagnetan bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ model *nanocube* telah diamati nilai temperatur *Curie* (T_c) dengan memvariasi komposisi bahan pada bentuk *random alloy* dan *double layers*. Pada *random alloy* dengan komposisi $\text{Co}_{0,2}\text{Ni}_{0,8}$, $\text{Co}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}$ dan $\text{Co}_{0,8}\text{Ni}_{0,2}$ dengan nilai T_c masing-masing 800 K, 1000 K dan 1250 K. Pada *double layer* dengan komposisi $\text{Co}_{0,2}\text{Ni}_{0,8}$, $\text{Co}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}$ dan $\text{Co}_{0,8}\text{Ni}_{0,2}$ dengan nilai T_c masing-masing 1200 K, 1325 K dan 1385 K. Variasi komposisi Co dan Ni berpengaruh pada besar kecilnya nilai temperatur *Curie* $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$. Temperatur *Curie* akan meningkat seiring meningkatnya komposisi bahan Co. Hal ini disebabkan karena bahan Co memiliki nilai medan saturasi yang lebih besar daripada bahan Ni (Arifin, 2016). Temperatur *Curie* untuk bahan murni Co dan Ni masing-masing adalah 1388 K dan 631 K (Evans *et al*, 2013). Selain temperatur *Curie* bahan, nilai suseptibilitas magnetik juga sangat mempengaruhi besar kecilnya sifat kemagnetan suatu bahan. Semakin rendah nilai suseptibilitas magnetik suatu bahan maka akan mempunyai sifat kemagnetan yang semakin lemah dan semakin tinggi nilai suseptibilitas magnetik suatu bahan maka akan semakin tinggi pula

sifat kemagnetannya. Oleh karena itu, di dalam penelitian ini nantinya akan dikaji karakteristik suseptibilitas magnetik bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ beserta temperatur *Curie* bahan pada berbagai komposisi.

Faktor lain yang sangat mempengaruhi sifat kemagnetan dari bahan adalah struktur kristal dan bentuk geometri dari bahan itu sendiri. Pengaruh bentuk geometri bahan terhadap sifat kemagnetan pada bahan kobalt (Co) sebelumnya telah diteliti. Karakteristik magnetik pada bahan berbentuk *sphere* menunjukkan perilaku feromagnetik yang lebih kuat dibandingkan dengan bahan berbentuk *cube*. Dimana, besar nilai magnetisasi saturasi pada bahan berbentuk *sphere* dan *cube* masing - masing sebesar 84.6 A/m dan 54.6 A/m (Srikala *et al.*, 2009).

Penelitian di bidang mikromagnetik saat ini bisa dilakukan secara eksperimen dan komputasi. Dalam bidang komputasi sendiri, penelitian dapat dilakukan dengan menggunakan simulasi mikromagnetik. Program simulasi yang digunakan saat ini sangat beragam, salah satu program simulasi mikromagnetik yang digunakan yaitu *Vampire*. Simulasi pada program tersebut bisa mensimulasikan sifat magnetik suatu sistem bahan feromagnetik. Selain menggunakan program *Vampire*, untuk dapat mengamati sifat kemagnetan bahan dilakukan dengan menggunakan *software Origin*. *Origin* berfungsi sebagai program yang mengolah data hasil *output* dari *Vampire*, yang mana dapat menampilkan *output* dalam bentuk diagram maupun grafik.

Dalam rangka memperoleh karakteristik bahan paduan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ dengan sifat kemagnetan yang baik, akan dilakukan kegiatan penelitian menggunakan simulasi mikromagnetik untuk mendapatkan nilai dari suseptibilitas magnetik dan temperatur *Curie* bahan. Karena bentuk geometri bahan mempengaruhi sifat kemagnetan bahan, maka kegiatan simulasi akan dianalisis pada dua bentuk geometri utama, yakni dengan bentuk geometri *nanocube* dan *nanosphere*. Berdasarkan alasan tersebut, hasil simulasi akan memberikan informasi mengenai perbedaan sifat kemagnetan yang akan dihasilkan, dari kedua struktur kristal tersebut. Dalam hal ini, karakteristik nilai suseptibilitas magnetik dan temperatur *Curie* bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ akan diamati pada berbagai komposisi Ni(x) dari unsur penyusun bahan, sehingga dapat diketahui informasi yang berkaitan dengan

komposisi yang paling sesuai untuk mendapatkan sifat kemagnetan yang baik. Disamping itu, tiga parameter bahan yang berhubungan dengan sifat magnetik bahan akan diamati pula, untuk menjelaskan fenomena suseptibilitas magnetik dan temperatur *Curie* bahan, berdasarkan variasi komposisi yang ditetapkan. Ketiga parameter tersebut adalah energi demagnetisasi, energi *exchange* dan energi anisotropi bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang mendasari penelitian ini, yaitu :

- Bagaimana pengaruh variasi komposisi Ni(x) terhadap suseptibilitas magnetik (χ) bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$, dengan geometri bahan berbentuk *nanocube* dan *nanosphere*?
- Bagaimana pengaruh variasi komposisi Ni(x) terhadap temperatur *Curie* (T_c) bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$, dengan geometri bahan berbentuk *nanocube* dan *nanosphere*?
- Bagaimana pengaruh variasi komposisi Ni(x) terhadap energi-energi magnetisasi bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$, dengan geometri bahan berbentuk *nanocube* dan *nanosphere*?

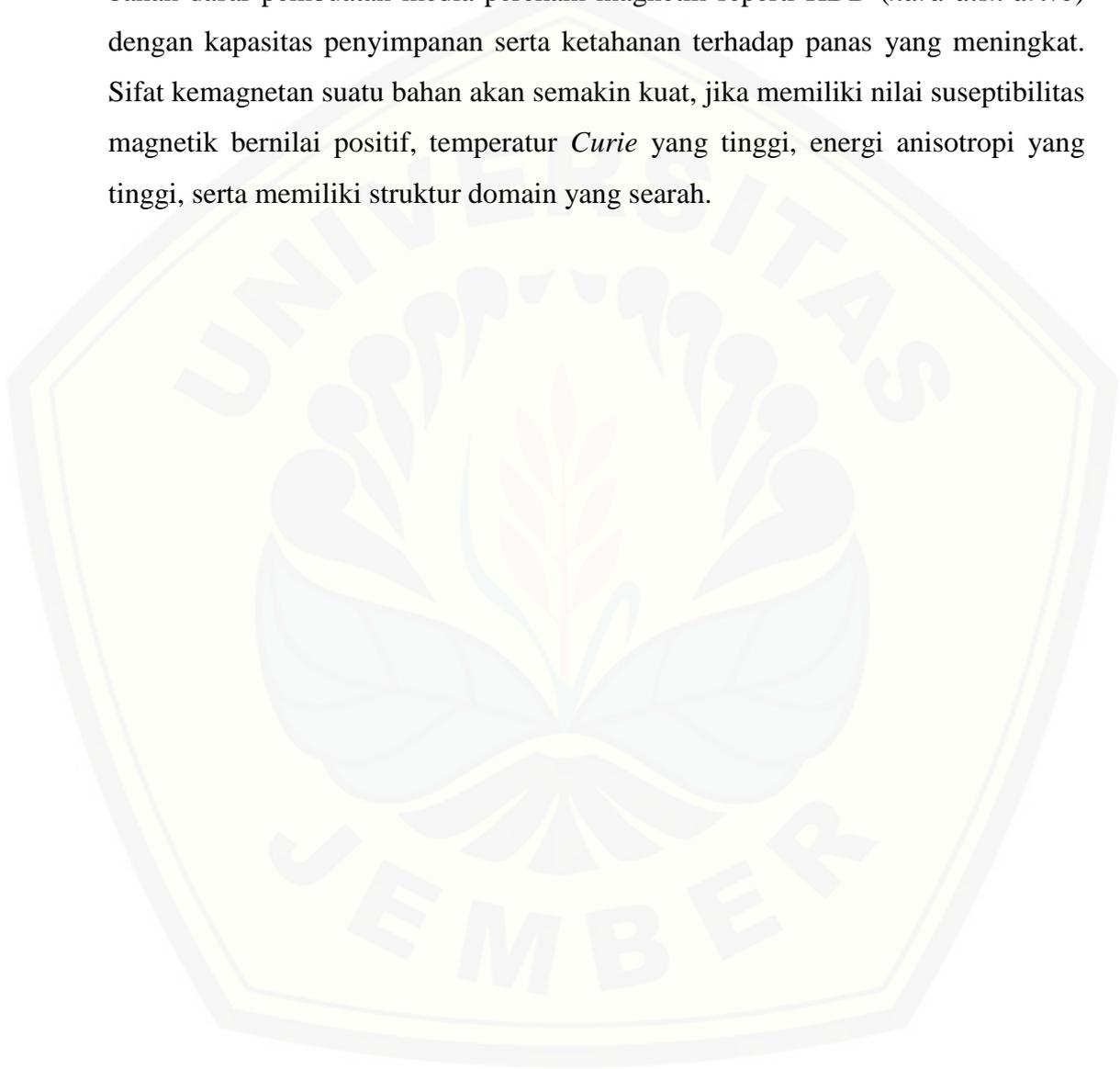
1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu :

- Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi Ni(x) terhadap suseptibilitas magnetik (χ) bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$, dengan geometri bahan berbentuk *nanocube* dan *nanosphere*.
- Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi Ni(x) terhadap temperatur *Curie* (T_c) bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$, dengan geometri bahan berbentuk *nanocube* dan *nanosphere*.
- Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi Ni(x) terhadap energi-energi magnetisasi bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$, dengan geometri bahan berbentuk *nanocube* dan *nanosphere*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari kegiatan penelitian ini adalah bahwa hasil penelitian ini dapat digunakan untuk menentukan sifat magnetik terbaik pada bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ dengan komposisi tertentu, sehingga bisa digunakan sebagai acuan bahan dasar pembuatan media perekam magnetik seperti HDD (*hard disk drive*) dengan kapasitas penyimpanan serta ketahanan terhadap panas yang meningkat. Sifat kemagnetan suatu bahan akan semakin kuat, jika memiliki nilai suseptibilitas magnetik bernilai positif, temperatur *Curie* yang tinggi, energi anisotropi yang tinggi, serta memiliki struktur domain yang searah.



BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bahan Magnetik

Gerak sebuah elektron dalam orbitnya serupa dengan sebuah arus kecil (arusnya berlawanan dengan arah gerak elektron) dan dapat mengalami torka dalam medan magnet eksternal. Torka ini cenderung untuk mensejajarkan medan magnetik yang ditimbulkan oleh elektron dalam kulit yang tidak lengkap (Sundoro, 2012). Setiap magnet memiliki kutub utara dan selatan pada ujung magnet, dimana pada ujung magnet memiliki kekuatan magnet yang paling besar. Bahan magnet merupakan suatu bahan yang memiliki sifat kemagnetan dan juga memiliki momen magnet dengan arah yang teratur, dimana sifat magnetik bisa diamati dari nilai suseptibilitas magnetiknya. Pada bahan non magnetik, momen magnet memiliki arah yang tidak teratur dan mengakibatkan tidak adanya dipol (kutub utara dan selatan) pada magnet (Siregar, 2002).

Bahan magnetik berdasarkan nilai suseptibilitas magnetiknya terbagi menjadi tiga golongan, yaitu bahan diamagnetik, paramagnetik dan feromagnetik. Suseptibilitas magnetik yaitu besarnya kontribusi yang diberikan suatu bahan yang berada dalam pengaruh medan magnet terhadap seluruh rapat fluks yang ada (Omar, 1975). Medan magnet merupakan daerah di sekitar yang masih merasakan adanya gaya magnet. Jika sebatang magnet diletakkan dalam suatu ruang, maka terjadi perubahan dalam ruang ini yaitu dalam setiap titik dalam ruang akan terdapat medan magnetik (Subekti, 2010).

Nilai terpenting dalam fenomena magnetik yaitu medan elektrik E dalam volt/meter, fluks magnetik B dalam tesla, medan magnetik H dalam ampere/meter dan dipol magnetik atau magnetisasi M dalam ampere/meter. Magnetisasi M dan medan H dihubungkan melalui suseptibilitas magnetik χ_m sebagai berikut,

$$M = \chi_m H, \quad (2.1)$$

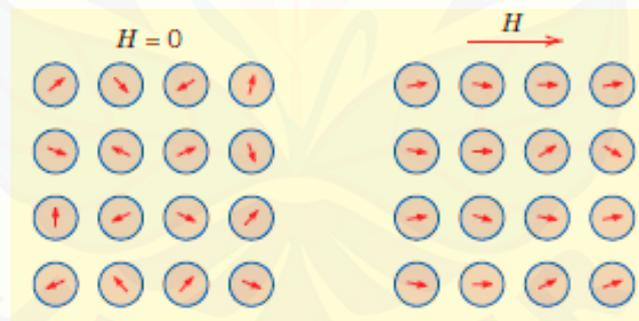
Fluks magnetik B menghubungkan M dan H melalui permeabilitas ruang hampa μ_0 melalui persamaan:

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(H + \chi_m H) = \mu_0(1 + \chi_m)H \quad (2.2)$$

dengan permeabilitas ruang hampa $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ henry/meter (Mennerich, 2013).

2.1.1 Paramagnetik

Bahan paramagnetik merupakan bahan yang sedikit dapat ditarik oleh medan magnet dan mempunyai nilai suseptibilitas magnetik positif yang sangat kecil. Suseptibilitas magnetik pada bahan paramagnetik akan mengalami penurunan jika suhu yang diterima oleh bahan semakin tinggi. Bahan ini mempunyai dipol magnet permanen, sehingga momen magnetnya acak bila tidak dipengaruhi medan luar. Akan tetapi, jika dikenai medan eksternal, sebagian momen magnet akan menjadi searah dengan medan magnet eksternal tersebut. Contoh bahan ini adalah oksigen, sodium, aluminium, tungsten, gadolinium, platinum dan titanium (Smith, 1993).

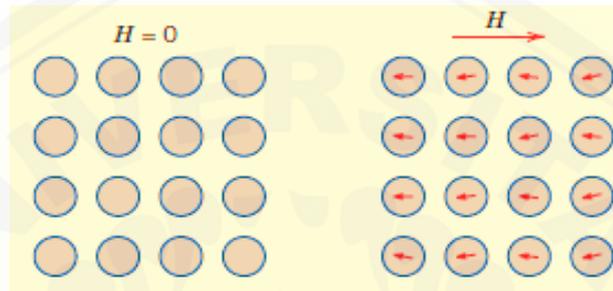


Gambar 2.1 Momen magnetik bahan paramagnetik tanpa medan eksternal ($H = 0$) dan dengan medan eksternal (H) (Sumber: Callister dan Rethwisch, 2009)

2.1.2 Diamagnetik

Bahan diamagnetik adalah bahan yang terdiri dari atom yang memiliki total momen magnetik permanen sama dengan nol. Bahan diamagnetik mempunyai kepekaan yang negatif dan lemah terhadap medan magnet. Setiap atom mempunyai elektron orbital dan hampir semua spin elektron berpasangan, sehingga bahan ini tidak menarik garis gaya. Dengan demikian, bahan

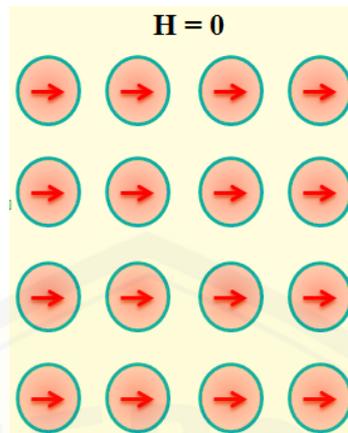
diamagnetik memiliki permeabilitas $\mu < \mu_0$ (Puryanti, 2013). Bahan diamagnetik memiliki nilai suseptibilitas magnetik yang negatif sangat kecil. Apabila dikenai medan magnet luar akan mengalami induksi magnetik yang lemah dan arahnya berlawanan dengan medan magnet luar. Bahan yang termasuk dalam diamagnetik diantaranya: *bismuth*, *gold*, *silver*, *water*, *hydrogen*, *copper*, dan *carbondioxide* (Griffith, 1989).



Gambar 2.2 Momen magnetik bahan diamagnetik tanpa medan eksternal ($H = 0$) dan dengan medan eksternal (H) (Sumber: Callister dan Rethwisch, 2009)

2.1.3 Feromagnetik

Bahan feromagnetik merupakan bahan yang mengalami gejala magnetisasi spontan tanpa pengaruh medan magnet eksternal. Bahan ini memiliki nilai suseptibilitas magnetik yang positif dan besar terhadap medan magnet eksternal. Selain itu, bahan feromagnetik memiliki momen dipol yang relatif kuat. Gaya antar atom menyebabkan momen ini memiliki arah yang sejajar dalam suatu daerah yang terdiri dari banyak atom, daerah ini disebut sebagai *domain*.



Gambar 2.3 Momen magnetik bahan feromagnetik tanpa medan eksternal (H)
(Sumber: Callister dan Rethwisch, 2009)

Bahan yang termasuk dalam golongan feromagnetik adalah logam transisi seperti besi (Fe), kobalt (Co) nikel (Ni) dan paduan dari beberapa logam. Gejala magnetisasi terjadi hanya di bawah temperatur tertentu yaitu temperatur transisi feromagnetik, yang biasa disebut dengan temperatur *Curie*. Temperatur tersebut tergantung pada bahan, tetapi nilainya berorde sekitar 1000 K (Kittel, 1996). Saat di atas temperatur *Curie*, gerak termal acak sudah cukup besar untuk merusak keteraturan penyearahan bahan ini dan akan mengubahnya menjadi bahan paramagnetik (Tipler, 2001).

2.2 Struktur Kristal

Struktur dasar yang berulang pada padatan kristal disebut sel satuan (*unit cell*). Setiap bola memiliki satu atom, ion, atau molekul yang disebut titik kisi (*lattice point*). Dalam banyak kristal, titik kisi hanya mengandung beberapa atom, ion atau molekul yang secara identik tersusun di sekitar titik kisi. Tetapi, dapat dianggap bahwa setiap titik kisi ditempati oleh satu atom. Secara khusus bentuk sel satuan kubus adalah sederhana karena semua sisi dan semua sudutnya adalah sama. Setiap sel satuan yang berulang dalam seluruh ruang tiga dimensi, membentuk struktur kisi yang mencirikan suatu padatan kristal (Chang, 2004).

2.2.1 *Body Centered Cubic* (BCC)

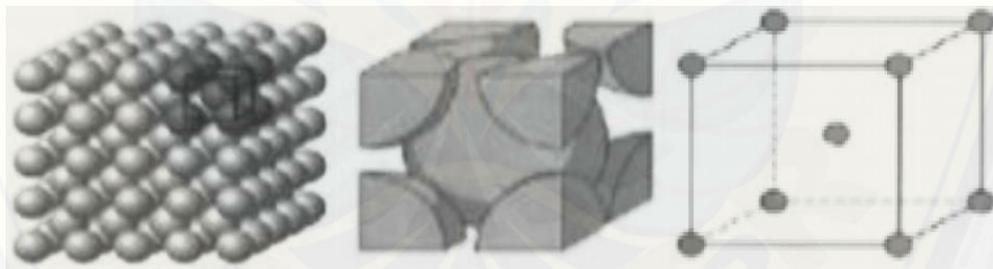
Menurut Puri dan Babbar (2001), struktur kristal BCC diperlihatkan pada gambar 2.4, dimana gambar tersebut menunjukkan bahwa terdapat satu sel utuh di tengah 8 sel satuan di tepi dan 1/8 atom terdapat pada tiap-tiap sudut sel satuan sehingga dalam satu sel satuan BCC terdapat 2 atom. Contoh logam BCC yaitu Na, K, Mo, dan W. Dari gambar 2.4 dapat diketahui jari-jari atomnya dengan persamaan

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

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

$$\text{APF} = \frac{\text{Volume atom-atom dalam sel satuan}}{\text{Volume sel satuan}} \quad (2.4)$$

Nilai APF pada kristal BCC diperoleh menggunakan persamaan (2.4) yaitu dengan nilai APF sebesar 68% dan sisanya 32% ruang kosong. Hal tersebut menunjukkan bahwa kristal BCC berstruktur padat.



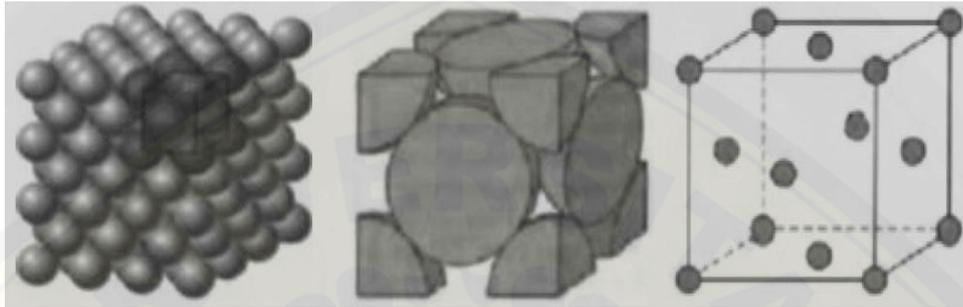
Gambar 2.4 Struktur *Kristal Body Centered Cubic* (BCC) (Sumber: Mangonon, 1999)

2.2.2 *Face Centered Cubic* (FCC)

Menurut Callister dan Rethwisch (2009), gambar 2.5 menunjukkan satu sel dari struktur kristal FCC yang dikelilingi oleh 12 atom dengan bilangan koordinasi sebesar 12. Jari-jari atom FCC pada setiap sudut dan satu titik *lattice* pada setiap pusat sisi kubus sehingga dapat diketahui melalui persamaan

$$\sqrt{2} a = 4R \text{ atau } a = \frac{4R}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

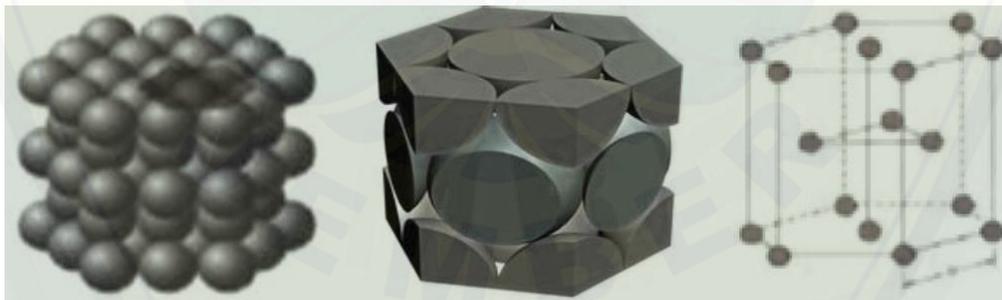
Berdasarkan persamaan (2.4) nilai APF pada kristal FCC diperoleh sebesar 74% dan sisanya 26% ruang kosong. Hal ini menunjukkan bahwa kristal FCC berstruktur padat. Contoh bahan berbentuk FCC yaitu Pt, Pb, Ni, Cu, Ag, Au, dan Al.



Gambar 2.5 Struktur Kristal *Face Centered Cubic (FCC)* (Sumber: Mangonon, 1999)

2.2.3 *Hexagonal Closed Packed (HCP)*

Menurut Callister dan Rethwisch (2009), struktur kristal HCP dapat dilihat pada gambar 2.6. Kristal HCP berstruktur padat, dimana setiap logam struktur kristal HCP dikelilingi oleh 12 atom dan bilangan koordinasi sebanyak 12.



Gambar 2.6 Struktur Kristal *Hexagonal Closed Packed* (Sumber: Mangonon, 1999)

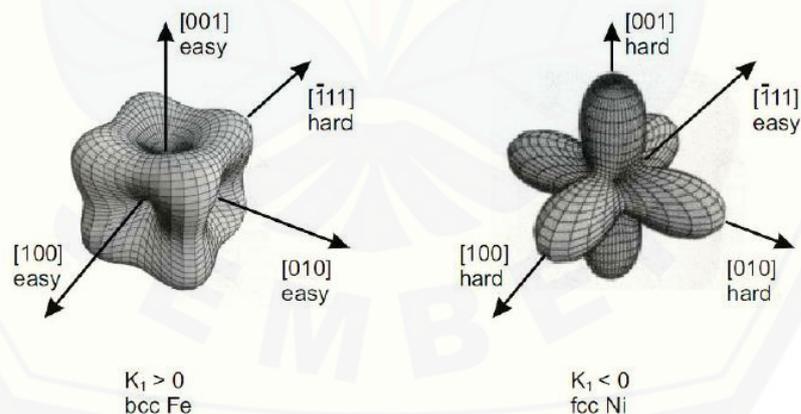
Berdasarkan persamaan (2.4) nilai APF dari struktur kristal HCP diperoleh sebesar 74% dan sisanya sebesar 26% ruang kosong. Sel satuan HCP mempunyai 6 atom per sel satuan, yaitu $2 \times 6 \times \frac{1}{6}$ (pada sudut lapisan bawah dan atas) + $2 \times \frac{1}{2}$ (pada pusat lapisan bawah dan atas) + 3 (lapisan tengah). Contoh logam HCP yaitu Co, Cd, Ti, dan Zn.

2.3 Energi – Energi Magnetisasi Bahan Feromagnetik

Energi magnetisasi merupakan bagian yang berpengaruh dalam proses kemagnetan suatu bahan magnetik. Energi yang ada pada bahan feromagnetik antara lain:

2.3.1 Energi Anisotropi

Energi anisotropi yaitu energi yang bergantung pada arah magnetisasi dan sumbu kristalografi. Energi tersebut berasal dari interaksi spin orbit dan bergantung pada arah magnetisasi terhadap arah kristalografi. Anisotropi kristal banyak dimiliki oleh bahan feromagnetik yang disebut sebagai *magnetocrystalline anisotropy*. Dalam banyak kasus, orientasi magnetisasi lebih cenderung sejajar sepanjang arah *easy axis*. Sumbu yang sejajar dengan sumbu simetris disebut *easy axis* dimana pada arah sumbu ini bahan magnet mudah dimagnetisasi. Selain itu, ada juga yang disebut *hard axis* yaitu sumbu dimana bahan magnet susah untuk dimagnetisasi, seringkali diperlukan suatu energi untuk merubah vektor dari *easy axis* ke *hard axis*. Energi yang dibutuhkan untuk mengarahkan arah momen magnet menjauhi *easy axis* disebut *magnetocrystalline energy* atau energi anisotropi.



Gambar 2.7 Ilustrasi arah magnetisasi dari Fe (kiri) dan Ni (kanan)
(Sumber: Maradona, 2012)

Sebagai contoh, besi (Fe) dengan struktur kristal kubik mempunyai *easy axis* sepanjang (100) dengan konstanta anisotropi $K > 0$ dan nikel (Ni) mempunyai *easy axis* sepanjang (111) dengan konstanta anisotropi $K < 0$. Kontribusi energi anisotropi yang lain adalah energi anisotropi dari pengaruh bentuk (*shape*

anisotropy energy). Anisotropi *shape* berasal dari interaksi magnetostatik yang tergantung pada sampel (bentuk bola, elips, dan persegi) (Mardona, 2012).

Energi anisotropi k_u dalam simulasi mikromagnetik berasal dari konstanta anisotropi K_u diekspresikan dengan persamaan berikut:

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

dengan K_u dalam J/m^3 . Saat energi anisotropi menyisakan sebuah temperatur, energi bebas dalam *easy/hard direction* akan bertambah/berkurang seiring dengan naik turunnya magnetisasi (Evans *et al.*, 2013).

2.3.2 Energi Exchange

Energi *exchange* merupakan energi yang disebabkan oleh interaksi spin dengan spin tetangganya melalui *exchange coupling*, dimana dua atom magnetik dalam satu bahan berinteraksi satu sama lain (Ismail, 2012). Energi tersebut akan menurun ketika interaksi antar spin semakin berkurang dan saat bertambahnya medan luar. Energi exchange dapat ditulis melalui persamaan

$$J_{ij} = \frac{3k_B T_c}{\epsilon z} \quad (2.7)$$

dimana k_B = Konstanta Boltzman ($1,3807 \times 10^{-23}$ J/K), T_c = Temperatur Curie (K), ϵ = Faktor koreksi yang tergantung dari struktur kristal dan z = jumlah atom tetangga. Persamaan diatas juga disebut dengan *Heisenberg model*. Untuk kobalt (Co) dengan struktur kristal *hcp* dengan nilai $z = 12$ dan temperatur Curie 1388K, maka diperoleh energi *exchange* sebesar 6.064×10^{-21} J/link (Evans *et al.*, 2013).

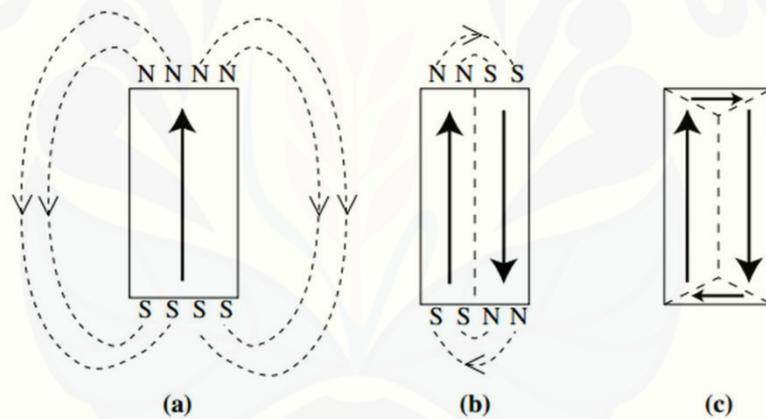
2.3.3 Energi Magnetostatik

Energi magnetostatik disebut juga dengan energi demagnetisasi, dimana energi tersebut berasal dari interaksi muatan antar dipol seperti muatan positif dan negatif yang berasal dari muatan itu sendiri. Seiring bertambahnya *volume* akan menambah energi magnetostatik, yang mana kerapatan energi anisotropi dalam keadaan tetap. Ketika dipol pada bahan magnet memiliki orientasi arah yang sama

satu dengan yang lainnya, maka energi magnetostatiknya akan lebih besar. Energi magnetostatik E_d per unit volume adalah

$$E_d = -\frac{1}{2} \mu_0 \int H_d \cdot M_s dV = \frac{1}{2} \mu_0 \int H_d^2 dV \quad (2.8)$$

dimana H_d adalah medan demagnetisasi dan M_s adalah saturasi magnetik dan μ_0 adalah permeabilitas ruang hampa (Maradona, 2012). Jumlah energi magnetostatik bergantung pada jumlah serta arah orientasi antar dipol. Saat dipol memiliki orientasi arah yang sama satu dengan yang lainnya energi magnetostatiknya besar (Gambar 2.8(a)), dibandingkan dengan bahan magnet dengan dipol antiparalel satu sama lainnya (Gambar 2.8(b)). Keadaan dipol pada Gambar 2.8(c) menyebabkan energi magnetostatik menjadi minimum.



Gambar 2.8 Pengurangan energi demagnetisasi akibat orientasi arah dipol (Sumber: Jiles, 1998)

2.3.4 Atomik Spin Momen

Terdapat keterkaitan antara momen spin atom dengan saturasi magnetisasi yang dapat ditulis dengan persamaan :

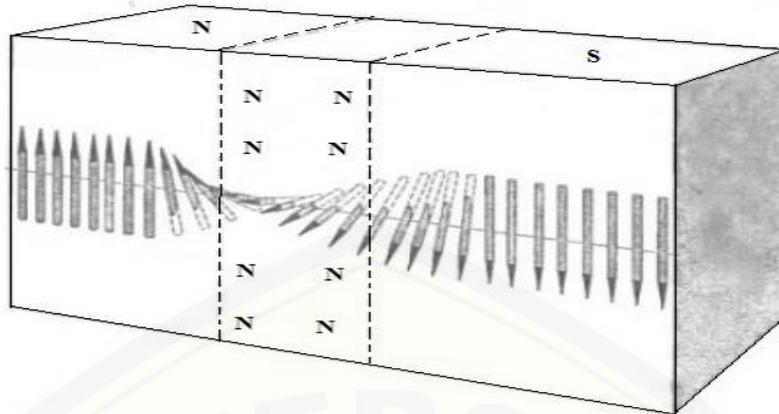
$$\mu_s = \frac{M_s a^3}{n_{at}} \quad (2.9)$$

Dimana M_s merupakan saturasi magnetisasi dengan satuan $JT^{-1}m^{-3}$, a merupakan parameter kisi sistem kubik unit *cell* (m), dan n_{at} nomor atom per unit sel (Evans *et al*, 2013).

2.4 Domain Magnet dan *Domain Wall*

Domain adalah daerah di dalam kristal dimana semua sel satuan pada daerah tersebut memiliki orientasi magnetik yang sama. Pada suhu tinggi dipol magnetik dari atom individual terorientasi secara acak. Selama pendinginan dibawah temperatur *Curie*, terjadi hubungan antara dipol magnetik dari atom yang berdekatan. Hal ini menghasilkan orientasi magnetik yang sama pada banyak sel satuan sehingga terbentuk suatu *domain*. Pada daerah domain seluruh spin magnetik mempunyai arah yang sama. Domain magnet ini terbentuk untuk mengurangi energi sistem yang terpisah dengan yang lain oleh domain atau *bloch wall*, yaitu suatu area dengan energi sistem yang tinggi karena memiliki arah medan yang berlawanan (Rohman, 2013).

Domain wall yaitu daerah transisi yang membatasi antara domain magnet dalam bahan feromagnetik. Seorang ilmuwan bernama Bloch pada tahun 1932 mengamati konfigurasi spin dalam *domain wall* berubah secara perlahan-lahan pada bidang kristal dan dikenal sebagai *Bloch wall*. Ketika spin berorientasi pada bidang yang sejajar dengan *domain wall* pada bahan feromagnetik berbentuk lapisan tipis, orientasi spin berada di sepanjang lapisan tipis.



Gambar 2.9 Konfigurasi momen magnet dalam *domain wall* berubah secara perlahan-lahan membentuk struktur *domain wall* 180° dikenal dengan *Bloch wall* (Sumber: Mardona, 2012)

Domain wall magnet yang terbentuk pada material feromagnetik merupakan kompetisi antara energi *exchange* dan energi anisotropi. Energi *exchange* cenderung untuk mempertebal *domain wall*, namun karena transisi arah spin menyebabkan efek anisotropi meningkat yang cenderung untuk membuat *domain wall* menipis. Pada kondisi kesetimbangan, energi dan lebar *domain wall* dapat ditentukan dari energi *exchange* dan energi anisotropi (Widodo, 2013).

2.5 Struktur Domain

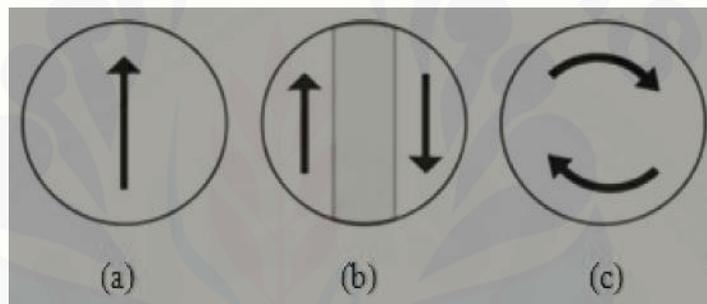
2.5.1 Single Domain

Model yang menggambarkan fenomena magnetik pada partikel kecil menganggap bahwa partikel magnetik memiliki domain yang homogen (domain tunggal) dengan bentuk *elipsoid*. Pada keadaan tersebut magnetisasi dihasilkan oleh dipol-dipol yang searah. Magnetisasi total dari sistem merupakan penjumlahan vektor dipol individu yang terkandung di dalam sistem. Model tersebut menganggap spin-spin dalam sistem berinteraksi sangat lemah, dalam arti lain, model ini mengabaikan interaksi *exchange* yang terjadi dalam sistem. Berdasarkan pendekatan mikromagnetik, pada saat *single-domain*, dimana keseluruhan momen magnet sejajar sumbu anisotropinya, maka kontribusi energi *exchange* dan energi anisotropi dari total energi sistem adalah nol. Satu-satunya energi yang relevan adalah energi

magnetostatik (Mardona, 2012).

2.5.2 *Two Domain* dan *Vorteks-state*

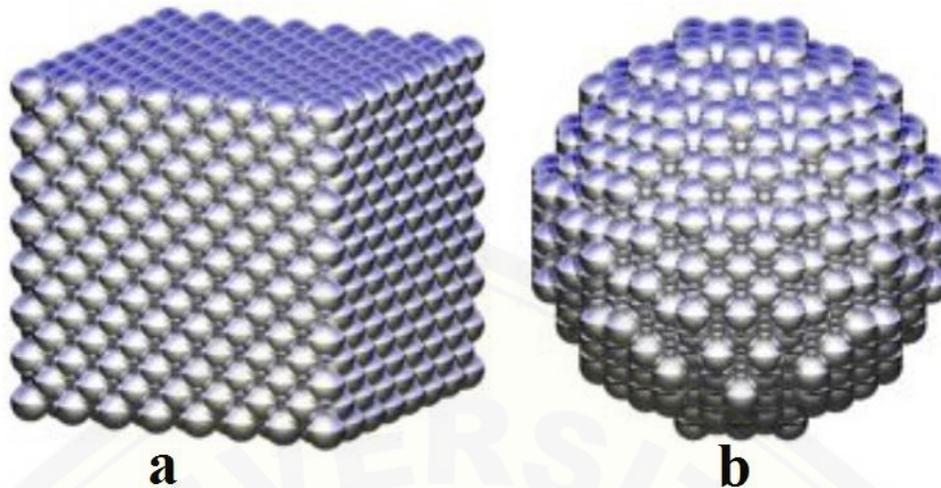
Partikel magnetik berbentuk bola, setelah melewati daerah diameter tertentu yang dikenal sebagai diameter kritis (*critical diameter*), umumnya struktur domainnya berubah dari keadaan *single-domain* menjadi *two-domain* atau *vorteks*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 (b) dan (c). Pada keadaan ini, energi magnetostatik akan minimum, meskipun semua spin tidak sejajar, namun perubahan arah secara bertahap cukup kecil sehingga pengurangan dari energi magnetostatiknya itu lebih besar dibandingkan kenaikan energi *exchange*.



Gambar 2.10 Kemungkinan konfigurasi domain magnet saat energi minimum (*groundstate*) dari partikel magnet bola (*spherical magnetic particle*), (a) *single-domain*, (b) *two-domain* dan (c) *vortek-state* (Sumber: Guimaraes, 2009)

2.6 Bentuk Geometri Bahan

Kasus yang paling sederhana yang perlu diperhatikan yaitu pengaruh dari bentuk geometri partikel yang berbeda pada *energy barrier*. Biasanya pengaruh ini tidak terlalu berpengaruh besar, tapi untuk nilai konstanta anisotropi yang kuat maka perlu dipertimbangkan. Dalam rangka untuk menyelidiki pengaruh dari perubahan bentuk partikel, partikel berukuran sekitar 2000 atom dibuat menggunakan bentuk struktur kristal *fcc* yang sama. Sebagai perbandingan, partikel dalam bentuk *nanocube* dan *nanosphere* telah dihasilkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Visualisasi partikel berbentuk a) *nanocube* dan b) *nanosphere* dengan struktur kristal *fcc*. Masing-masing bentuk menunjukkan permukaan yang sangat berbeda, yang mempengaruhi efek anisotropi permukaan pada *energy barrier* (Sumber: Evans, 2008)

Sebuah uniaksial anisotropi diasumsikan untuk atom *nonsurface*, yaitu atom dengan 12 tetangga terdekat, guna untuk memastikan pengaruh permukaan anisotropi pada *energy barrier* yang sudah ada. Sebagian besar uniaksial *easy axis* di semua kasus dipilih sepanjang sumbu z . Permukaan energi diplot untuk sumbu z , sehingga sudut *easy axis* adalah sudut dari arah z , sedangkan Sudut rotasi diambil dari sumbu x . Karena partikel berukuran kecil, sekitar 40% dari atom pada permukaan yang berarti bahwa efek permukaan cukup signifikan (Evans, 2008).

2.7 Simulasi Mikromagnetik

Teori *continuum* menjelaskan fenomena medan elektromagnetik secara makroskopik dan teori kuantum yang mendeskripsikan sifat magnetik pada tingkat atomik. Konsep dasar mikromagnetik adalah menggunakan konsep *continuum* yang mana pendekatan mekanika klasik dengan fungsi energi sistem yang bersifat kontinu pada kondisi setimbang. Saat sifat-sifat elektron pada sistem setimbang, maka sifat mekanika kuantum dapat dibentuk ke dalam inti atom pada kondisi yang sama terhadap dinamika molekul. Kelebihan dari atomistik spin model yaitu berhubungan dengan susunan atom dan berbagai sifat dari bahan

seperti permukaan, kerusakan dan kekerasan dari bahan. Selain dapat mensimulasikan bahan di bawah temperatur kritis, juga dapat mensimulasikan bahan pada temperatur tinggi yaitu di atas temperatur kritis yang biasanya akan merusak bahan tersebut (Evans dan Biternas, 2014).

Program simulasi *Vampire* merupakan simulasi atomistik untuk nanomaterial magnetik. Program tersebut berfungsi untuk membuat simulasi atomistik dari bahan magnetik yang tersedia secara *open source* dan dirancang dengan kemudahan dalam penggunaannya, termasuk serangkaian parameter masukan yang luas untuk mengontrol simulasi melalui file *input*. Program simulasi *Vampire* dapat digunakan untuk menentukan temperatur *Curie* pada suatu bahan. Beberapa keuntungan penting dari *Vampire* adalah didasarkan pada metode elemen hingga, yang cocok untuk komputasi struktur non-kubus. Visualisasi dari file *output*, yang meliputi data magnetisasi, dapat diolah menggunakan program Pov-Ray (Evans *et al.*, 2013).

Penentuan temperatur *Curie* pada simulasi *Vampire* yaitu dengan menggunakan metode Monte Carlo. Metode tersebut digunakan untuk mensimulasikan proses penyearahan momen magnet oleh medan magnet eksternal pada temperatur tertentu. Algoritma yang digunakan pada metode Monte Carlo yaitu algoritma Metropolis, yaitu algoritma yang berfungsi untuk mengetahui simulasi sebuah sistem dari partikel-partikel yang ada dalam suatu volume yang dipengaruhi oleh suhu (Merdiansyah, 2013).

2.8 Temperatur *Curie* (T_c)

Menurut Okimustava dan Oktova (2009), temperatur *Curie* adalah temperatur kritis dimana fase magnetik bertransisi dari konfigurasi struktur magnetik yang teratur menjadi tidak teratur. Takanori, pada tahun 2011 menganalisa sifat magnet dan pengaruhnya terhadap temperatur *Curie* dengan substitusi ion Ti dan Co. Hasil yang diperoleh saat komposisi $x = 2,5$, sifat ferrimagnetik berubah menjadi paramagnetik dan temperatur *Curie* (T_c) naik seiring naiknya komposisi substitusi Ti dan Co. Dimana untuk $x = 2,5$ dengan temperatur *Curie* 965 K dan saat komposisi $x = 5$ temperatur *Curie* menjadi

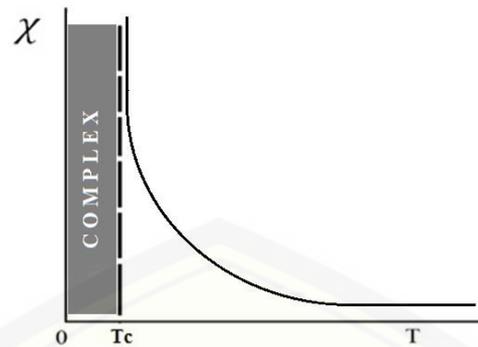
1003K (Babalola, 2010). Temperatur *Curie* yaitu temperatur dimana magnetisasi spontan lenyap, dan memisahkan fase paramagnetik (keadaan tidak teratur atau *disordered*) pada temperatur tinggi $T > T_c$, dari fase feromagnetik (keadaan teratur atau *ordered*) pada suhu rendah $T < T_c$. Menurut Sujatmoko (2005), magnetisasi spontan bahan feromagnetik akan hilang jika dipanaskan di atas suhu karakteristik T_c yang dinamakan temperatur *Curie*. Dimana temperatur *Curie* memisahkan fase feromagnetik yang susunan momen magnetiknya teratur pada suhu di bawah T_c dengan fase paramagnetik yang susunan momen magnetiknya tidak teratur pada suhu di atas T_c .

2.9 Suseptibilitas Magnetik

Suseptibilitas magnetik adalah ukuran dasar bagaimana sifat kemagnetan suatu bahan. Dengan diketahui nilai suseptibilitas magnetik maka dapat diketahui sifat-sifat magnetik suatu bahan. Bahan feromagnetik memiliki nilai suseptibilitas magnetik (χ) yang dipengaruhi oleh temperatur dan diasumsikan oleh temperatur *Curie*, saat bahan feromagnetik diatas temperatur *Curie* maka akan berubah menjadi bahan paramagnetik. Dimana, orientasi momen magnetik akan menjadi acak dan suseptibilitas magnetiknya diekspresikan kedalam persamaan:

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (2.10)$$

dimana T adalah temperatur absolut, T_c adalah temperatur *Curie* dan C adalah konstanta *Curie*. Pada suhu ruang, energi termal cenderung mengacak arah domain daripada menyearahkan momen-momen magnetiknya. Pada bahan feromagnetik biasanya mudah mencapai keadaan saturasi, dimana seluruh momen-momen atomiknya searah. Pada beberapa kasus, keadaan saturasi tersebut dapat terjadi pada medan yang berada pada skala rendah (Sunaryo dan Widayawidara, 2010). Suseptibilitas magnetik dapat digunakan untuk menentukan temperatur *Curie* suatu bahan yaitu dengan meninjau suseptibilitas magnetik tertinggi yang dihasilkan seperti gambar 2.12 (Evans dan Biternas, 2014)



Gambar 2.12 Grafik hubungan suseptibilitas magnetik (χ) terhadap temperatur (T) bahan feromagnetik (Sumber: Anwar, 2011)

Berdasarkan persamaan (2.10), berdasarkan relasi *Curie-Weiss* diperoleh nilai tetapan *Curie* (C) sebesar

$$C = \frac{T_c}{\lambda} \quad (2.11)$$

$$C = \frac{\mu_0 N (g \mu_B)^2}{k_B} \quad (2.12)$$

dimana λ adalah konstanta Weiss yang bernilai

$$\lambda = -\frac{k_B T_c}{\mu_0 N (g \mu_B)^2} \quad (2.13)$$

Dengan μ_0 adalah permeabilitas ruang hampa, g adalah faktor *lande* ($g \approx 2$), k_B adalah konstanta Boltzman (1.3807×10^{-23} J/K) dan μ_B adalah konstanta Bohr Magneton (9.2740×10^{-24} J/T) (Anwar, 2011).

2.10 Bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$

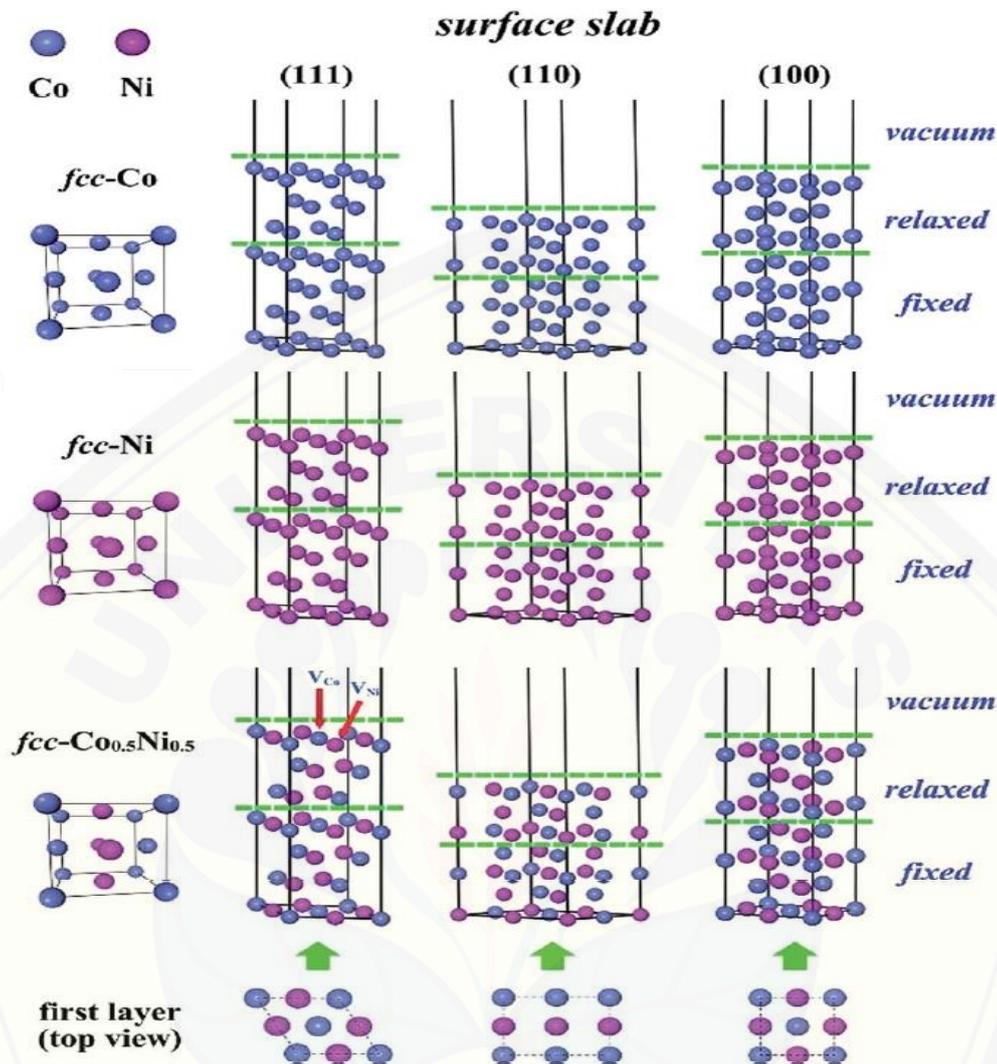
Kobalt (Co) merupakan bahan feromagnetik yang mempunyai nilai anisotropi yang tinggi, nilai koersivitas magnetik yang tinggi, temperatur *Curie* yang tinggi dan mempunyai struktur kristal HCP. Sedangkan nikel (Ni) merupakan bahan feromagnetik yang memiliki kriteria yang menyerupai bahan Kobalt (Co) tetapi memiliki struktur kristal FCC, selain itu nikel merupakan bahan feromagnetik yang tahan korosi.

Tabel 2.1 Konstanta dari material feromagnetik Fe, Co, Ni dan Gd

| | Fe | Co | Ni | Gd | Unit |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------|
| Crystal structure | Bcc | Hcp | fcc | hcp | - |
| Unit cell size a | 2.866 | 2.507 | 3.524 | 3.636 | Å |
| Coordinat Number z | 8 | 12 | 12 | 12 | - |
| Curie Temperature T_c | 1043 | 1388 | 631 | 293 | K |
| Atomic spin Moment μ_s | 2.22 | 1.72 | 0.606 | 7.63 | μ_B |
| Exchange energy J_{ij} | 7.050×10^{-21} | 6.064×10^{-21} | 2.757×10^{-21} | 1.280×10^{-21} | J/link |
| Anisotropy energy k | 5.65×10^{-25} | 6.69×10^{-24} | 5.47×10^{-26} | 5.93×10^{-24} | J/atom |

(Sumber: Evans *et al.*, 2013)

Dari tabel 2.1 diketahui bahwa parameter parameter bahan kobalt (Co) yaitu *atomic spin moment* (μ_s) $1.72 \mu_B$, energi *exchange* (J_{ij}) 6.064×10^{-21} J/link serta energi anisotropi (K) 6.69×10^{-24} J/atom. Parameter bahan nikel (Ni) dengan *atomic spin moment* (μ_s) $0.606 \mu_B$, energi *exchange* (J_{ij}) 2.757×10^{-21} J/link serta energi anisotropi (K) 5.47×10^{-26} J/atom.



Gambar 2.13 Baris pertama: model bulk fcc-Co (Co (111), Co (110) dan Co (100)). Baris kedua: model bulk fcc-Ni (Ni (111), Ni (110) dan Ni (100)). Baris ketiga: model bulk Co_{0.5}Ni_{0.5} (Co_{0.5}Ni_{0.5} (111), Co_{0.5}Ni_{0.5} (110) dan Co_{0.5}Ni_{0.5} (100)). Baris terakhir: gambaran utama lapisan pertama secara bersamaan untuk tiga permukaan pada sistem Co_{0.5}Ni_{0.5} (Sumber: Sun *et al.*, 2016)

Paduan bahan Co_{1-x}Ni_x model *nanocube* berbentuk *double layers* memiliki nilai temperatur *Curie* lebih tinggi dibandingkan dengan bahan Co_{1-x}Ni_x berbentuk *random alloy*, dimana paduan Co_{1-x}Ni_x berbentuk *random alloy* dengan komposisi Co_{0.2}Ni_{0.8}, Co_{0.5}Ni_{0.5} dan Co_{0.7}Ni_{0.3} masing-masing menghasilkan temperatur *Curie* sebesar 800 K, 1000 K dan 1150 K, sedangkan temperatur *Curie* bahan Co_{1-x}Ni_x berbentuk *double layers* dengan komposisi Co_{0.2}Ni_{0.8}, Co_{0.5}Ni_{0.5} dan Co_{0.7}Ni_{0.3} masing-masing menghasilkan temperatur *Curie* sebesar 1200 K,

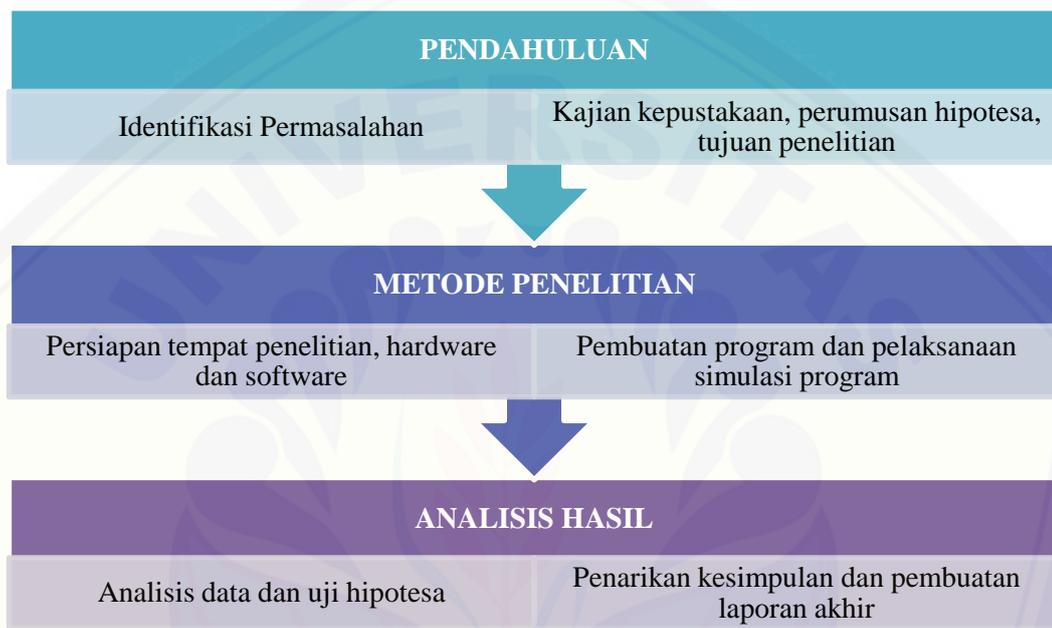
1325 K dan 1375 K. Variasi komposisi Co dan Ni berpengaruh pada fluktuasi temperatur *Curie* $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$. Temperatur *Curie* akan meningkat seiring meningkatnya komposisi bahan Co. Hal ini disebabkan karena bahan kobalt (Co) memiliki nilai medan saturasi dan medan koersivitas yang lebih besar daripada bahan nikel (Ni) (Arifin, 2016). Bahan paduan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ berstruktur kristal fcc dan mempunyai sumbu *easy axis* pada arah (111) (Tang *et al.*, 2006).



BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Tahapan dari kegiatan penelitian yang dilakukan, disusun secara skematis menurut diagram pada gambar 3.1. Tahapan penelitian sekaligus dapat menunjukkan rancangan penelitian, yang dilakukan guna menyelesaikan permasalahan yang telah ditentukan.



Gambar 3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian diawali dengan melakukan identifikasi terhadap permasalahan yang akan diselesaikan. Berdasarkan permasalahan tersebut, penulis melakukan kajian kepustakaan, melalui buku, jurnal, skripsi, tesis dan internet. Kegiatan ini dilakukan untuk memperoleh informasi tentang karakteristik bahan feromagnetik. Tahap ini juga dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai parameter-parameter bahan feromagnetik yang dijadikan sebagai *input* data simulasi. Terdapat tiga hal yang menjadi permasalahan utama dalam penelitian, yakni bagaimana pengaruh variasi komposisi dari bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ terhadap nilai suseptibilitas magnetik, temperatur Curie dan energi-energi magnetisasi pada bahan tersebut, yang diamati pada bentuk geometri *nanocube* dan *nanosphere*.

Tahap berikutnya, dipersiapkan prosedur umum di dalam melaksanakan kegiatan penelitian, yang terangkum dalam metode penelitian. Kegiatan penelitian dimulai pada bulan Mei 2017 sampai dengan bulan Agustus 2017. Namun demikian, beberapa observasi berkenaan dengan penyiapan data *input* beserta kajian kepustakaan telah dilakukan pada bulan Januari hingga April 2017. Kegiatan penelitian yang dilakukan dalam hal ini adalah proses simulasi dari program yang telah dipersiapkan.

Pada tahap berikutnya, hasil simulasi dianalisis untuk kemudian dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan permasalahan yang diangkat. Secara keseluruhan, kegiatan penelitian yang telah dilakukan akan disusun secara sistematis dalam sebuah laporan kegiatan penelitian.

3.2 Jenis dan Sumber Data

Penelitian yang dilakukan berupa kegiatan simulasi mikromagnetik untuk menentukan nilai suseptibilitas magnetik dan temperatur *Curie* pada material ferromagnetik dengan model *nanocube* dan *nanosphere*. Penelitian bersifat kuantitatif, karena grafik diperoleh dari hasil perhitungan numerik.

Data yang digunakan untuk menentukan nilai suseptibilitas magnetik dan temperatur *Curie* pada bahan paduan ferromagnetik dengan bentuk geometri *nanocube* dan *nanosphere* adalah data sekunder. Data yang digunakan diperoleh dari hasil penelitian yang sudah ada. Rincian data yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ pada simulasi mikromagnetik

| Bahan | μ_s (μ_B) | J (J/link) | K (J/atom) |
|------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Co | 1.72 | 6.064×10^{-21} | 6.69×10^{-24} |
| Ni | 0.606 | 2.757×10^{-21} | 5.47×10^{-26} |
| $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ | | 4.164×10^{-21} | 8.12×10^{-25} |

(Sumber: Evans *et al.*, 2013, Broeder, 1992, Vivas *et al.*, 2012)

3.3 Definisi Operasional Variabel dan Skala Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini ada tiga yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol.

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini berupa variabel-variabel *input* pada simulasi. Variabel-variabel tersebut yaitu komposisi bahan Ni(x), dan merupakan nilai yang dimasukkan dalam bahan paduan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$. Skala komposisi bahan Ni(x) yang digunakan yaitu 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 dan bentuk geometri yang digunakan yaitu *nanocube* dan *nanosphere*. Kemudian variabel lain yang digunakan adalah ukuran bahan sebesar 5 nm, momen spin atomik masing-masing bahan adalah sebesar $1.72\mu_B$ untuk bahan Co dan $0.606\mu_B$ untuk Ni. Temperatur observasi untuk seluruh variasi komposisi dibuat sama, yakni mulai dari temperatur 0 K sampai dengan 2000 K, dengan kenaikan pengukuran 25 K.

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 kemagnetan suatu benda untuk termagnetisasi.
- b) Temperatur *Curie* (T_c), merupakan suatu temperatur dimana suatu bahan feromagnetik akan mengalami perubahan menjadi bahan paramagnetik. Temperatur *Curie* dihasilkan dari grafik hubungan temperatur dengan magnetisasi.
- c) Energi demagnetisasi bahan magnet berasal dari interaksi muatan antar kutub yang berasal dari material itu sendiri.
- d) Energi anisotropi (k_u), merupakan energi yang tergantung pada orientasi arah magnetisasi dan sumbu kristalografi. Pada banyak kasus, orientasi magnetisasi

lebih cenderung sejajar sepanjang arah sumbu kristal mudah (*easy axis direction*).

- e) Energi *exchange* (J_{ij}), merupakan energi yang timbul dari interaksi spin dengan spin tetangganya melalui *exchange coupling*.

3.3.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol yang digunakan yaitu nilai temperatur *Curie* dari hasil penelitian sebelumnya. Komposisi bahan dan temperatur *Curie* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Pengaruh komposisi Ni(x) bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ berbentuk *nanocube* terhadap temperatur *Curie* (T_c)

| Komposisi Ni(x) | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 |
|-----------------------------|------|------|------|------|-----|-----|
| Temperatur <i>Curie</i> (K) | 1250 | 1150 | 1050 | 1000 | 950 | 800 |

(sumber: Arifin, 2016)

3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

Berdasarkan permasalahan-permasalahan yang ada, penelitian ini dilaksanakan secara komputasi. Pelaksanaan penelitian secara komputasi membutuhkan media yang sangat mendukung. Dengan menggunakan perangkat yang sangat memadai diharapkan mempermudah dan mempercepat jalannya proses penelitian.

Penelitian dilakukan di Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Pelaksanaan kegiatan penelitian dimulai dari bulan Mei 2017 sampai dengan bulan Agustus 2017. Perangkat yang dipersiapkan meliputi komponen *hardware* berupa komputer dengan spesifikasi intel (R) core (TM) i3-4170 CPU 3.70GHz, RAM 2.00 GB dan tipe sistem 64-bit dengan OS Windows. Selain itu, dipersiapkan pula komponen *software* yakni beberapa program yang digunakan pada simulasi mikromagnetik, yaitu:

- 1) *Vampire* digunakan untuk *running* simulasi mikromagnetik berbasis *atomistic model*.

- 2) *Origin* digunakan untuk membuat grafik dari pengolahan data simulasi.
- 3) *Povray* digunakan untuk membuat visualisasi struktur domain dalam 3 dimensi.
- 4) *Cygwin* digunakan untuk mengkonversi bentuk *file cfg* menjadi *file povray*.

Kegiatan penelitian diawali dengan kajian pustaka terhadap berbagai literatur untuk mendapatkan informasi yang berhubungan dengan sifat-sifat kemagnetan bahan maupun energi-energi magnetisasi bahan feromagnetik yang diteliti. Sifat kemagnetan dan energi magnetisasi bahan feromagnetik diantaranya berupa suseptibilitas magnetik, temperatur *Curie*, energi anisotropi, energi exchange, dan energi demagnetisasi. Beberapa perbedaan dan kesamaan dianalisis untuk menentukan karakteristik dari bahan yang menarik untuk diteliti. Bahan yang menjadi pilihan untuk diteliti adalah bahan paduan feromagnetik $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$.

Tahap berikutnya adalah melaksanakan kegiatan simulasi. Kegiatan simulasi dilakukan untuk mendapatkan pola grafik dan gambaran visual yang menunjukkan adanya sifat kemagnetan bahan feromagnetik. Langkah-langkah untuk mendapatkan hasil pengamatan adalah sebagai berikut, yaitu:

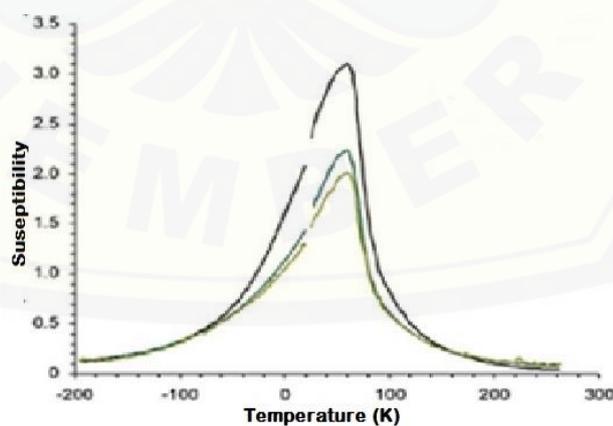
- 1) Simulasi untuk memperoleh hubungan suseptibilitas magnetik dengan temperatur bahan *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$
Program untuk menghitung nilai suseptibilitas magnetik sebagai fungsi dari temperatur dibuat dan disimpan dalam sebuah *file script* di dalam *notepad++*. Seperti halnya pada simulasi sebelumnya, *running* program dijalankan dengan menggunakan program *Vampire* dan analisis dilakukan menggunakan program *Origin*.
- 2) Simulasi untuk mencari temperatur *Curie* pada bahan *alloy* $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$
Simulasi penentuan temperatur *Curie* bahan dilakukan dengan membuat *file script input* dan *file script material* pada *notepad++*. *File* ini disimpan bersama dengan program *Vampire* dalam satu *folder*. Untuk keperluan analisis, hasil simulasi selanjutnya ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan magnetisasi terhadap perubahan temperatur menggunakan program *Origin*.

- 3) Simulasi pembuatan grafik energi-energi magnetisasi terhadap temperatur Terdapat tiga macam energi magnetisasi yang disimulasikan. Ketiga bentuk energi tersebut adalah energi *exchange*, energi demagnetisasi dan energi anisotropi. *File script* perhitungan energi magnetisasi yang dibuat dijalankan pada program *Vampire* dan dianalisis dengan menggunakan program *Origin*.

3.5 Metode Analisis Data dan Pengujian Hipotesis

3.5.1 Analisis Data untuk Pengamatan Suseptibilitas Magnetik terhadap Temperatur

Hasil *output* simulasi diolah menggunakan program *Origin* dengan membuat kurva antara *output* suseptibilitas magnetik (χ) dengan *output* temperatur. Contoh grafik antara suseptibilitas magnetik terhadap temperatur dapat dilihat pada Gambar 3.2, dimana gambar tersebut menunjukkan bahwa nilai suseptibilitas magnetik tertinggi terletak pada temperatur *Curie* bahan. Nilai suseptibilitas magnetik dari hasil penelitian diamati berdasarkan pengaruh perubahan temperatur yaitu antara 0 K sampai 2000 K dengan kenaikan temperatur 25 K. Kemudian dianalisis menurut bentuk geometri bahan dengan variasi komposisi yang telah ditetapkan.

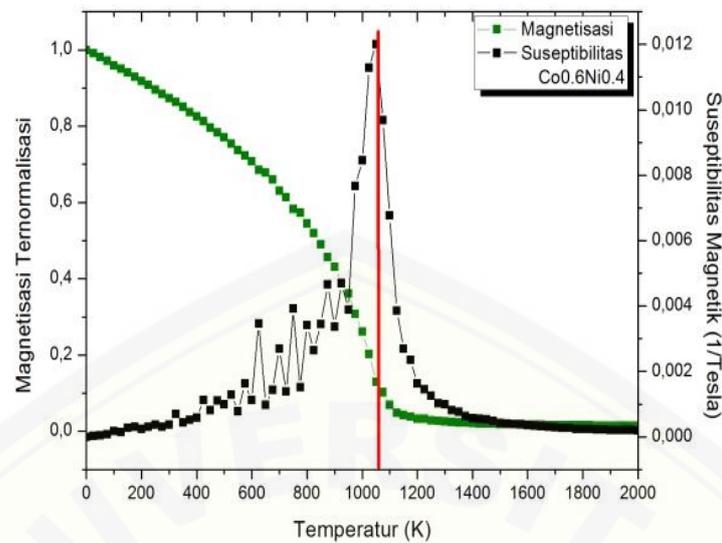


Gambar 3.2 Grafik suseptibilitas magnetik terhadap temperatur (Sumber: Vahle and Kontny, 2005)

Pengamatan juga dilakukan dengan mengamati nilai suseptibilitas magnetik maksimum yaitu pada saat temperatur *Curie*. Suseptibilitas magnetik maksimum dianalisis berdasarkan variasi komposisi $Ni(x)$ pada bentuk *nanocube* dan *nanosphere*. Dengan mengamati profil suseptibilitas magnetik diharapkan dapat diketahui pengaruh adanya variasi bentuk geometri berdasarkan variasi komposisi $Ni(x)$ terhadap sifat kemagnetan bahan. Dengan demikian, akan diperoleh informasi tentang nilai suseptibilitas magnetik pada masing-masing bentuk bahan $Co_{(1-x)}Ni_x$.

3.5.2 Analisis Data untuk Menentukan Temperatur *Curie* (T_c)

Hasil simulasi berupa magnetisasi dan suseptibilitas magnetik dianalisis menggunakan program *Origin* untuk menentukan temperatur *Curie* bahan. Analisis dilakukan dengan membuat grafik hubungan antara suseptibilitas magnetik dan magnetisasi terhadap temperatur seperti pada Gambar 3.3. Nilai temperatur *Curie* terletak pada nilai magnetisasi terendah, akan tetapi akan sulit untuk menentukan nilai pastinya, karena hanya memprediksi titik terendahnya. Untuk mempermudah menentukan nilai temperatur *Curie*, peneliti menggunakan grafik suseptibilitas magnetik dengan nilai temperatur *Curie* terletak pada suseptibilitas tertinggi. Profil grafik temperatur *Curie* yang dihasilkan dianalisis berdasarkan perbedaan bentuk geometri bahan dengan masing-masing variasi komposisi $Ni(x)$. Dengan demikian, akan diperoleh informasi tentang nilai temperatur *Curie* pada masing-masing bentuk bahan $Co_{1-x}Ni_x$.



Gambar 3.3 Grafik magnetisasi dan suseptibilitas magnetik terhadap temperatur

Temperatur *Curie* yang dihasilkan antara data simulasi dengan data kontrol dibandingkan untuk ketepatan simulasi, yakni bahan berbentuk *nanocube* dengan komposisi Ni(x) sebesar 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, dan 0.8 dari penelitian yang dilakukan oleh Arifin (2016) dengan penelitian saat ini. Tingkat keakurasian data dihitung dengan menggunakan persamaan,

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

3.5.3 Analisis Uji Statistik melalui Uji *t* Dua Kelompok Sampel Berpasangan (*Paired Sample t-Test*)

Paired Sample t-Test merupakan uji statistik yang digunakan untuk menguji hipotesis komparatif (uji beda) (Ruohonen, 2011). Uji statistik ini digunakan untuk menganalisis perbedaan hasil penelitian temperatur *Curie* dari bentuk geometri *nanocube* dengan *nanosphere*. Sebelum melakukan pengujian, hipotesa awal (H_0) perlu dirumuskan.

Hipotesa awal (H_0) : bentuk geometri bahan tidak mempengaruhi temperatur *Curie* secara signifikan

Hipotesa ahir (H_1) : bentuk geometri bahan mempengaruhi temperatur *Curie* secara signifikan

Hipotesa ini juga didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Evans (2008), yang menyatakan bahwa pada unsur cobalt (Co) bentuk geometri bahan tidak mempengaruhi temperatur *Curie* secara signifikan. Uji statistik menggunakan Microsoft Excel dengan penarikan kesimpulan sebagai berikut:

Jika, $P \text{ value} < \text{alfa } (\alpha)$ maka H_0 diterima

$P \text{ value} > \text{alfa } (\alpha)$ maka H_0 ditolak

3.5.4 Analisis Data Energi-Energi Magnetisasi

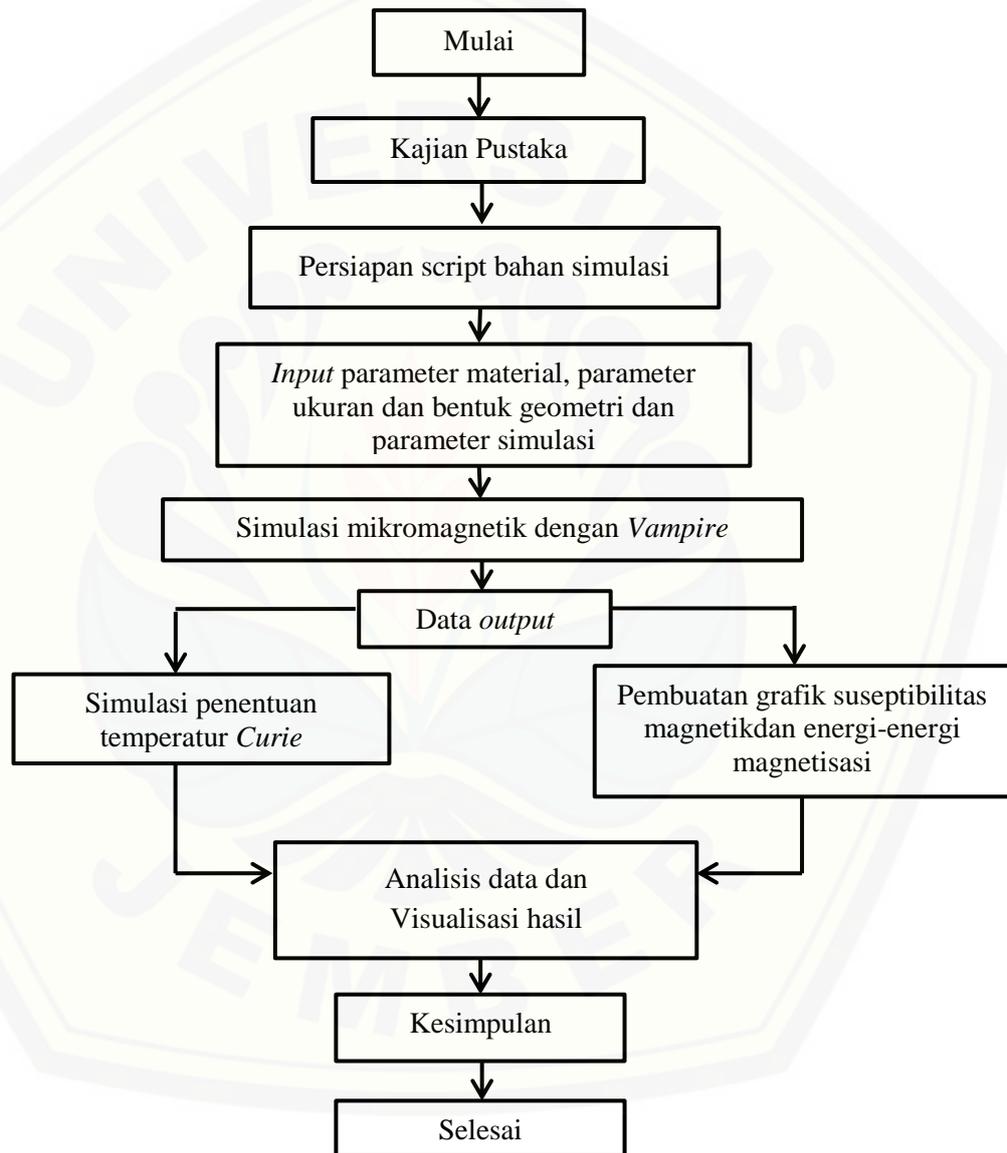
Hasil simulasi energi-energi magnetik seperti energi *exchange*, energi demagnetisasi dan energi anisotropi yang diperoleh diolah menggunakan program *Origin*. Analisis dilakukan dengan membuat grafik hubungan dari masing-masing energi terhadap perubahan temperatur. Masing-masing energi diamati berdasarkan profil grafiknya, yaitu bagaimana keadaan energi-energinya saat bahan berada pada temperatur *Curie* dan di atas temperatur *Curie*. Analisa dilakukan pada bentuk *nanocube* dan *nanosphere* berdasarkan variasi komposisi Ni(x), sehingga dapat dianalisis pengaruh variasi komposisi Ni(x) pada bentuk *nanocube* dan *nanosphere* terhadap sifat kemagnetan bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$.

3.5.5 Analisis Hasil Visualisasi Struktur Domain Bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$

Hasil simulasi dari data berformat *cfg* pada *folder* simulasi dianalisis dengan membuat visualisasi bentuk bahan menggunakan program *Povray*. *File output cfg* dikonversi terlebih dahulu kedalam bentuk *file povray*. Visualisasi dibuat dengan mengambil beberapa contoh data dalam tiap komposisi dengan keadaan sebelum mencapai temperatur *Curie*, saat temperatur *Curie* dan sesudah temperatur *Curie* guna mengamati pengaruh perubahan temperatur terhadap struktur domain bahan. Setelah itu dianalisis sifat bahan berdasarkan orientasi struktur domain pada bentuk *nanocube* dan *nanosphere*, yang kemudian dapat diketahui bagaimana

struktur domain dari bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ berdasarkan variasi komposisi $\text{Ni}(x)$ pada bentuk *nanocube* dan *nanosphere*.

Secara umum, prosedur dari kegiatan penelitian yang akan dilakukan digambarkan dengan diagram penelitian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram alir penelitian

BAB 5. PENUTUP

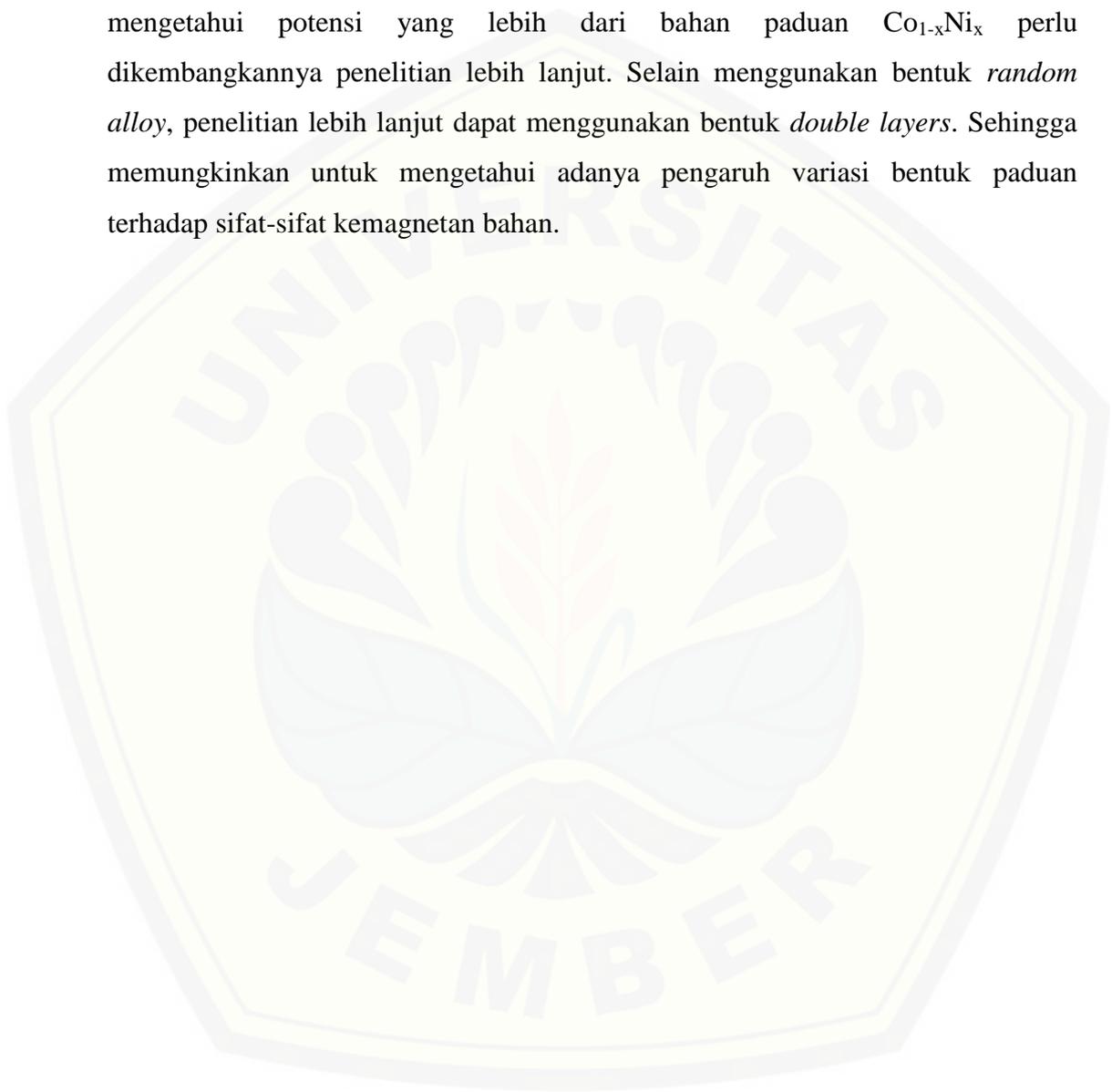
5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa:

- 1) Bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ memiliki nilai suseptibilitas magnetik maksimum pada saat mencapai temperatur *Curie*. Suseptibilitas magnetik bahan meningkat secara fluktuatif dengan bertambahnya temperatur hingga mencapai suseptibilitas magnetik tertinggi. Setelah melewati temperatur *Curie* suseptibilitas magnetik bahan akan menurun dan menjadi konstan seiring bertambahnya temperatur. Variasi komposisi Ni(x) menghasilkan suseptibilitas magnetik yang fluktuatif pada masing-masing bentuk geometri bahan. Dan bahan berbentuk *nanocube* cenderung memiliki nilai suseptibilitas magnetik yang lebih besar daripada bahan berbentuk *nanosphere*.
- 2) Variasi komposisi Ni(x) dan bentuk geometri mempengaruhi nilai temperatur *Curie* bahan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$. Temperatur *Curie* bahan paduan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ berbentuk *nanocube* cenderung lebih besar dibandingkan dengan bahan berbentuk *nanosphere*. Temperatur *Curie* tertinggi diperoleh pada bahan paduan $\text{Co}_{0,9}\text{Ni}_{0,1}$ dengan temperatur *Curie* sebesar 1275 K untuk bentuk *nanocube* dan 1250 K untuk bentuk *nanosphere*.
- 3) Variasi komposisi Ni(x) mempengaruhi spektrum grafik energi-energi magnetisasi terhadap temperatur, ditinjau dari besar kecilnya temperatur *Curie* bahan paduan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$. Ketika komposisi Ni(x) semakin kecil, maka temperatur *Curie* yang dihasilkan semakin besar. Sebaliknya ketika komposisi Ni(x) semakin besar maka temperatur *Curie* yang dihasilkan semakin mengecil. Energi-energi akan cenderung konstan setelah melewati titik temperatur *Curie*. Selain itu, bentuk geometri ditinjau dari masing-masing variasi komposisi Ni(x) tidak berpengaruh besar terhadap profil grafik energi-energi magnetisasi bahan.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh profil nilai suseptibilitas magnetik, temperatur *Curie* dan energi-energi magnetisasi bahan paduan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ dari bentuk *nanocube* dan *nanosphere*. Namun untuk dapat mengetahui potensi yang lebih dari bahan paduan $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x$ perlu dikembangkannya penelitian lebih lanjut. Selain menggunakan bentuk *random alloy*, penelitian lebih lanjut dapat menggunakan bentuk *double layers*. Sehingga memungkinkan untuk mengetahui adanya pengaruh variasi bentuk paduan terhadap sifat-sifat kemagnetan bahan.



DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, Nurul. 2011. Pembuatan Magnet Permanen Nd₂FeB Melalui Metode Mechanical Alloy. *Skripsi*. Jakarta: Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Arifin, Samsul. 2016. Studi Sifat-Sifat Magnetik Material Ferromagnetik Co_{1-x}Ni_x Random Alloy dan Double Layer Dalam Berbagai Komposisi Bahan Co dan Ni. *Skripsi*. Jember: Universitas Negeri Jember.
- Babalola, O.A., Alabi, A.B. dan Akomolafe, T. 2010. Mikrostruktural Analysis of Zinc-Clay Cermet Resistor. *Researcher*. 2(3): 48-55.
- Broeder, F.J.A. 1992. Co/Ni Multilayer with Perpendicular Magnetic Anisotropy: Kerr Effect and Thermomagnetic Writing. *Appl. Physic Lett*. 61 (12): 1468-1470.
- Callister, W. D. dan Rethwisch, D. G. 2009. *Materials Science and Engineering An Introduction*. Eighth Edition. New York: John Wiley and Sons.
- Chang, Raymond. 2004. *Kimia Dasar Konsep-Konsep Inti Edisi Ketiga Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Evans, F.L. dan Andreas Biternas. 2014. *Vampire User Manual: Software Version 4.0*. New York: The University of New York.
- Evans, F. L. 2008. Atomistic Modelling of Nanogranular Magnetic Materials. *Tesis*. New York: The University of York
- Evans, F. L., W. J. Fan, P. Churemart, T. A. Ostler, M. O. A. Ellis & R. W. Chantrell. 2013. Atomistic Spin Model Simulations of Magnetic Nanomaterials. *Tesis*. New York: The University of York.
- Griffith, David J. 1989. Introduction to Electrodynamics. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliff's.
- Guimaraes, A.P. 2009. *Principle of Nanomagnetism*. Rio de Janeiro: Springer.
- Ismail. 2013. Studi Mikromagnetik Proses Magnetisasi Dan Spektrum Suseptibilitas Ferromagnetik Elemen Diamond Shaped. *Tesis*. Jakarta: Universitas Jakarta.
- Jiles, David. 1998. *Introduction To Magnetism and Magnetic Materials Second Edition*. London: Chapman & Hall.

- Kittel, Charles. 1996. *Introduction To Solid State Physics Seventh Edition*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Mangonon, P.L. 1999. *The Principle of Materials Selection for Engineering Design*. New Jersey: Prentice Hall.
- Mardona. 2012. Dinamika Domain Wall dan Efek Anisotropi Pada Material Feromagnet Co Dan Ni Berbentuk Nanowire. *Tesis*. Jakarta: Universitas Jakarta.
- Mennerich, Christian. 2013. Phase-Field Modeling of Multi-Domain Evolution in Ferromagnetic Shape Memory Alloys and of Polycrystalline Thin Film Growth. *Tesis*. Germany: Karlsruhe Institute of Technology.
- Merdiansyah, Dedi. 2013. Analisa Sifat Ferromagnetik Material Menggunakan Metode Monte Carlo. *Jurnal Ilmiah Edu Research*. 2 (2): 65-74.
- Okimustava dan Oktova, Raden. 2009. Penentuan Suhu Curie Besi dengan Metode Kawat Berarus Listrik. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. 5(1): 1-6.
- Omar, M.A. 1975. *Elementary Solid State Physics*. Boston: Addison Wesley Publishing Company.
- Puri, R. K dan V. K. Babbar. 2001. *Solid State Physics and Electronics*. New Delhi: S. Chand & Company LTD.
- Purnama, Budi, Ismail dan Suharyana. 2013. Kajian Simulasi Mikromagnetik: Ketergantungan Medan Koersif dengan Besaran Intrinsik Nano-Dot Magnetik dengan Anisotropi Tegak Lurus. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. 9 (1): 30-33.
- Puryanti, Dwi. 2013. Identifikasi Pencemaran Air Permukaan Sungai By Pass Kota Padang Dengan Metode Suseptibilitas Magnet. *Jurnal Ilmu Fisika*. 5 (2): 65-71.
- Ruohonen, Keijo. *Statistic 1*. Tampere: Tampere University of Technology.
- Rohman, Lutfi. 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. *Disertasi*. Jember: Universitas Jember.
- Siregar, Harrys. 2002. *Metode Pemisahan Secara Magnetik: Aplikasi Fisika Magnet dalam Alat Proses Teknik Kimia*. Sumatra: Universitas Sumatera Utara.

- Smith, William F. 1993. *Foundations of Material Science and Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Srikala, D., Singh, V.N, Banerjee, A., Mehta, B.R., dan Patnaik, S. 2009. Syntesis and Characterization of Ferromagnetic Cobalt Nanospheres, Nanodiscs and Nanocube. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 9(9): 5627-5632.
- Subekti. 2010. Pengukuran Anisotropi Suseptibilitas Magnetik. *Skripsi*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Sudjatmoko. 2005. Kajian Sifat Bahan Lapisan Tipis Feromagnetik NiFe Hasil Deposisi Dengan Teknik Evaporasi Hampa. *Jurnal Ganendra*. 8 (2): 37-43.
- Sun, H., Yang Xijia, Zhao Lijun, Li Yue, Zhang Jiamu, Tang Lu, Zou Yining, Dong Cong, Lian, J. dan Jiang, Q. 2016. Nanostructured $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}$ Bimetallic Alloys for High Efficient and Ultrafast Absorbtion: Experiments and First-Principle Calculation. *The Royal Society of Chemistry*. 6 (11): 1-5.
- Sunaryo dan Widyawidura, W. 2010. Metode Pembelajaran Bahan Magnet dan Identifikasi Kandungan Senyawa Pasir Alam Menggunakan Prinsip Dasar Fisika. *Jurnal Cakrawala Pendidikan*. 29(1): 67-79.
- Sundoro, Gunawan A. 2012. Penumbuhan Lapisan Tipis NiFe dengan Menggunakan Metode Elektrodeposisi. *Skripsi*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Tang, X.T., Wang, G.C. dan Mutsuhiro. 2006. Magnetic Layer Thicness Dependence of Magnerization reversal in Electrodeposited CoNi/Cu Multilayer Nanowires. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 309(2): 188-196.
- Takanori, Tsutaoka. 2011. Irreversible magnetovolume Effect in Nd7Rh3 Single Crystale. *Journal of Magnetism*. 323(23): 3147-3150.
- Tipler, Paul A. 2001. *Fisika Untuk Sains dan Tehnik Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Vahle, C. dan Kontny, A. 2005. The Use of Field Dependence of AC Susceptibility for The Interpretation of Magnetic Mineralogy and Magnetic Fabrics in The HSDP-2 Basalt, Hawai. *Earth and Planetary Science Letters*. 238(1-2): 110-129.

Vivas, L.G., Varquez, M., Escrig, J., Allande, S., Altbir, D., Leitao, D.C. dan Araujo, J.P. 2012. Magnetic Anisotropy in CoNi Nanowire Arrays: Analytical Calculations and Experiments. *PHYSIC Review*.85 (3): 3-15.

Wahyudi, E.N. 2005. Mengenal Harddisk Lebih Dekat. *Jurnal Teknologi Informasi DINAMIK*. 10(3): 168-177.

Widodo, Agus Tri. 2013. Studi Mikromagnetik Dinamika Struktur Domain Pada Material Feromagnetik Py, Ni, Fe Dan Co Model Nanosphere. *Tesis*. Jakarta: Universitas Jakarta.

Witthauer, L. dan Diterle, M. 2007. The Phase Transition of The 2D-Ising Model. *Summer Term*. 7 (1): 1-5.

