



## MAGNET NANOKOMPOSIT SEBAGAI MAGNET PERMANEN MASA DEPAN

Novrita Idayanti<sup>a,b</sup>, Azwar Manaf<sup>a\*</sup>, Dedi<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Program Studi Ilmu Bahan, Fakultas MIPA, Universitas Indonesia  
Departemen Fisika Gedung F, Kampus UI Depok, Indonesia 16424

<sup>b</sup> Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi - LIPI  
Jl. Sangkuriang Kampus Gedung 20 Bandung, Indonesia 40135

E-mail: \*azwar@ui.ac.id

Masuk Tanggal : 14-05-2018, revisi tanggal : 22-05-2018, diterima untuk diterbitkan tanggal 21-06-2018

### Intisari

Naskah ini dibuat berdasarkan kajian literatur tentang penelitian dan pengembangan material magnet permanen terutama pengembangan yang dilakukan oleh para peneliti dalam lebih 100 tahun kebelakang. Diketahui bahwa, era magnet permanen modern dimulai pada awal abad ke 19 berlangsung kurang lebih 100 tahun. Dalam 100 tahun ke belakang, ternyata fokus penelitian para peneliti adalah pencarian senyawa magnetik yang potensial. Tidak mengherankan bila dalam periode 100 tahun tersebut berbagai jenis senyawa magnetik berhasil ditemukan. Diawali dengan baja sebagai magnet permanen telah digunakan pada awal abad 19, menyusul kelas-kelas magnetik lainnya seperti *alnico*, magnet keramik, magnet logam tanah jarang Sm-Co dan terakhir magnet-magnet logam tanah jarang Nd-Fe-B dan Sm-Fe-N. Magnet logam tanah jarang Nd-Fe-B ditemukan di ujung abad 19 dengan nilai produk energi maksimum atau  $(BH)_{\max}$  sebesar 56 MGOe ( $448 \text{ kJ.m}^{-3}$ ) telah berhasil diperoleh. Nilai tersebut adalah nilai tertinggi yang pernah dicapai oleh para peneliti sampai saat ini. Namun, penulis mengamati bahwa sejak awal abad 20, ternyata telah terjadi perubahan pada fokus pengembangan penelitian yaitu saat ini tidak lagi berfokus pada pencarian dan penemuan fasa magnetik baru, akan tetapi lebih kepada merekayasa struktur material magnetik melalui penggabungan fasa magnetik keras yang memiliki konstanta *magnetocrystalline* tinggi dengan fasa magnetik lunak yang memiliki nilai magnetisasi jenuh yang tinggi dalam sebuah struktur komposit sehingga menjadi magnet nanokomposit. Magnet nanokomposit adalah magnet permanen dengan sifat kemagnetan yang lebih unggul dibandingkan dengan magnet konvensional. Keunggulan dimaksud adalah pada nilai magnetisasi remanen ( $M_r$ ) dan nilai produk energi maksimum  $(BH)_{\max}$  yang tinggi disebabkan terjadinya efek *exchange coupled spring* antara fasa magnetik keras dan lunak sehingga mensejajarkan arah magnetisasi kedua fasa magnetik di bawah pengaruh interaksi pertukaran. Para peneliti teoritik pun telah menggali potensi magnet permanen nanokomposit dan menetapkan nilai  $(BH)_{\max}$  sebesar  $1 \text{ MJ.m}^{-3}$  sebagai nilai *ultimate* yang harus dapat dicapai secara eksperimental. Nilai *ultimate* tersebut telah membuka tantangan yang besar dan menjadi destinasi baru bagi para peneliti eksperimental. Dalam makalah *review* ini, disampaikan pengetahuan, penelitian, dan metoda tentang peningkatan sifat kemagnetan material ferit, tanah jarang, dan logam paduan berdasarkan *exchange interaction mechanism* pada saat terjadinya *exchange spring magnet* antara fasa keras dan fasa lunak.

**Kata Kunci:** Magnet nanokomposit, magnet permanen, perkembangan magnet permanen

### Abstract

*This paper reviews research and development of permanent magnet materials based on study literatures that have been conducted by researchers in more than 100 years. It is known that the era of modern permanent magnets began in the early 19th century and lasted for approximately 100 years. In the past 100 years, it turned out the research focus of the researchers was to look for potential magnetic compounds. Not surprisingly, in a period of 100 years that various types of magnetic compounds were found. The rare earth metal magnet Nd-Fe-B was found at the end of the 19th century with a maximum energy product value or  $(BH)_{\max}$  of 56 MGOe ( $448 \text{ kJ.m}^{-3}$ ) obtained. The value is the highest value ever achieved by researchers to date. However, the authors observe that since the early 20th century, there has been a change in the focus of research development that is currently not focus on the search and discovery of new magnetic phases, but rather to develop the magnetic material structure through the incorporation of hard magnetic phases with high magnetocrystalline value with a soft magnetic phase that has a high saturated magnetization value in a composite structure to become a nanocomposite magnets. The nanocomposite magnets are permanent magnets with superior magnetism properties compared to conventional magnets. The excellence magnetic properties are the value of remanent magnetization ( $M_r$ ) and the maximum*

---

energy product  $(BH)_{max}$  due to the effect of exchange coupled spring between the hard and soft magnetic phases so as to align the magnetic orientation of the two magnetic phases under the influence of exchange interaction. The theoretical researchers have also explored the potential of a nanocomposite permanent magnet and assigned  $(BH)_{max}$  value of  $1 \text{ MJ.m}^{-3}$  as the ultimate value that must be achieved experimentally. The ultimate value has opened big challenges and become a new destination for experimental researchers. In this review paper, we present knowledge, research, and methods on improving the magnetism properties of ferrite, rare earth, and alloy metals based on exchange interaction mechanisms during the exchange spring magnet between hard and soft phases.

**Keywords:** Magnet nanocomposite, permanent magnets, development of permanent magnets

---

## 1. PENDAHULUAN

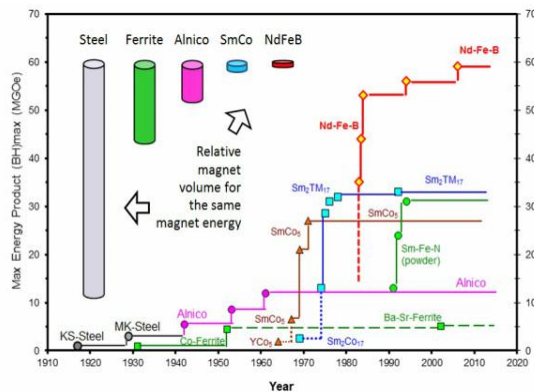
Sejarah magnet permanen dimulai sejak abad ke-6 SM, namun pemahaman modern tentang magnetisme dimulai oleh ilmuwan Inggris, William Gilbert pada tahun 1600 dengan mempublikasikan percobaan spektakuler pertama tentang magnetisme yaitu "De Magnete" [1]. William mengkonfirmasi penelitian sebelumnya tentang kutub magnet dan menyimpulkan bahwa bumi adalah magnet [2]. Pada tahun 1820 H.C. Oersted [3], ilmuwan Belanda menemukan adanya korelasi antara listrik dan magnet, dimana konduktor dialiri arus dapat membelokkan jarum kompas. Selanjutnya korelasi listrik-magnet tersebut dipelajari dan dikembangkan secara teoritik oleh fisikawan Prancis Andre Ampere pada tahun 1821 [4]. Baru pada awal tahun 1900, Langevin [5] memperkenalkan teori diamagnetisasi dan paramagnetisasi dan Weiss [6] memperkenalkan penjelasan teori feromagnetik. Pada tahun 1920, era mekanika kuantum dimulai dan fisika kemagnetan juga telah dikembangkan dengan teori yang melibatkan interaksi elektron dan interaksi pertukaran. Selanjutnya para ilmuwan mulai mempelajari bahan magnetik tidak hanya berdasarkan besi dan baja saja, tapi juga bahan magnetik lainnya seperti, keramik magnetik *hard ferrite*, paduan AlNiCo, Sm-Co, *rare earth-transition metals* seperti Nd-Fe-B dan Sm-Fe-N sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1 tentang sejarah perkembangan magnet permanen dalam 100 tahun terakhir. Di awal tahun 1900, magnet permanen pertama menggunakan baja. Kemudian pada tahun 1930 diperkenalkan jenis magnet permanen alnico. Alnico terbuat dari paduan feromagnetik Fe-Co

dalam matriks non-magnetik Al-Ni. Magnet ini memiliki sifat magnetik yang lebih tinggi daripada baja dengan produk energi maksimum,  $(BH)_{max}$  hampir lima kali lebih besar dibandingkan baja magnet.

Pada tahun 1950, magnet *platinum-cobalt* (PtCo) ditemukan dengan ketahanan korosi yang lebih baik daripada AlNiCo, sehingga menjadikannya ideal untuk aplikasi biomedis. Di era yang sama, ditemukan juga magnet permanen kelas keramik, memiliki dua senyawa penting masing-masing *barium hexaferrite* ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) dan *strontium hexaferrite* ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ). Kedua jenis magnet keramik tersebut terbuat dari bahan yang melimpah seperti  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sehingga menjadi magnet permanen yang dapat diproduksi dengan biaya produksi yang murah. Tidak mengherankan bila magnet permanen kelas keramik masih menjadi magnet permanen yang sangat populer dan menjadi magnet komersial terpenting selama beberapa dekade hingga sampai saat ini. Magnet permanen kelas keramik memiliki nilai *coercivity* ( $H_c$ ) yang relatif tinggi, namun nilai  $(BH)_{max}$  tidak setinggi AlNiCo tetapi lebih tinggi dari baja magnet. Meskipun demikian, magnet keramik sudah menemukan aplikasi yang luas pada berbagai produk teknologi, terutama produk yang memerlukan magnet permanen seperti otomotif, motor dan generator listrik, *loudspeaker*, dll. Hal ini karena ketersediaan bahan bakunya yang berlimpah dan dapat diproduksi dengan biaya produksi rendah. Magnet keramik *hexaferrite* dibuat melalui teknologi pemaduan mekanik atau *mechanical alloying* [7] yaitu pemaduan secara penghalusan mekanik *precursors* dan

dilanjutkan dengan perlakuan *sintering* untuk melangsungkan reaksi *solid state*. Bentuk akhir produk yang kompleks diperoleh melalui proses pencetakan dan *grinding*.

Pada tahun 1970, magnet permanen kelas baru diperkenalkan yaitu penggunaan logam tanah jarang atau *rare earth* untuk pembuatan senyawa magnetik sistem SmCo sebagai kelas magnet permanen logam tanah jarang. Terdapat dua fasa magnetik penting masing-masing



Gambar 1. Perkembangan magnet permanen sejak tahun 1900 [4]

SmCo<sub>5</sub> dan Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> [8]. Magnet permanen logam tanah jarang memiliki sifat magnetik yang jauh lebih tinggi dari jenis magnet permanen sebelumnya, dimana nilai (BH)<sub>max</sub> magnet jenis ini mencapai 30-35 MGOe atau 240 – 280 kJ.m<sup>-3</sup>. Sebagai magnet permanen yang memiliki densitas energi yang tinggi diindikasikan oleh besarnya nilai (BH)<sub>max</sub>, maka jenis magnet permanen ini menjadi magnet permanen yang mampu memenuhi tuntutan produk teknologi masa kini, yaitu produk yang mengutamakan miniaturisasi ruang. Pada Gambar 1, diilustrasikan bagaimana dengan semakin meningkatnya nilai (BH)<sub>max</sub> terjadi reduksi volume magnet yang cukup signifikan dengan diperkenalkannya jenis magnet logam tanah jarang. Namun masih ada keterbatasan dari magnet Sm-Co yaitu harga produksinya yang relatif mahal karena terbuat dari logam Co yang kesediaannya terbatas dan mengalami gangguan. Oleh karenanya diperlukan magnet permanen kelas logam tanah jarang dengan harga produksi yang lebih murah. Fakta ini menjadi tantangan baru para peneliti magnet permanen untuk mencari senyawa magnetik baru dengan bahan yang mudah diperoleh serta biaya produksi yang relatif murah. Berdasarkan tantangan ini maka akhirnya, dua grup peneliti terpisah masing-masing grup GM (*general motors*) dan SSM (*sumitomo special metals*) secara bersamaan

mengumumkan penemuan fasa magnetik baru *neodymium iron boron* atau Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B pada tahun 1984 [9]-[10].

Menarik untuk diperhatikan bahwa kedua grup peneliti terpisah tersebut menggunakan dua teknologi proses yang berbeda untuk memproduksi magnet permanen dengan fasa magnetik baru tersebut. Grup GM menggunakan teknologi *rapid solidification* dengan teknik *melt spinning* [11] untuk menghasilkan serbuk isotropik terdiri dari polikristalit dengan ukuran rata-rata beberapa puluh nanometer sampai beberapa ratus nanometer, tergantung *roll speed* yang digunakan. Dari serbuk ini pula dapat dibuat magnet isotropik berpekat polimer (*polymer bonded magnets*) [12], *hot pressed magnets* [13] serta magnet anisotropik atau *die upset forged magnets* [14]. Karena ukuran kristalitnya yang demikian halus serta komposisi yang digunakan adalah komposisi stoikiometri, maka sifat kemagnetan yang diperoleh terutama magnetisasi remanen dan (BH)<sub>max</sub> sama dengan nilai teoritikal masing-masing ~ 0,81 T dan 112 kJ.m<sup>-3</sup> [15]. Sedangkan untuk magnet anisotropik diperoleh melalui *die upset forging* magnet *hot press* dalam cetakan dengan ruang dalam cetakan yang lebih besar dibandingkan dengan dimensi magnet itu sendiri. Dalam hal ini, *forging* dilaksanakan pada temperatur tinggi sekitar 700 °C sampai terjadi perubahan ketebalan sampel *hot press* dan pengarahan orientasi kital untuk menimbulkan sifat anisotropiknya [16].

Berbeda dengan grup GM, grup SSM menerapkan teknologi PM (*powder metallurgy*) untuk pembuatan magnet permanen [17]. Komposisi yang digunakan adalah komposisi *off stoichiometry* dengan logam Nd berlebih yaitu Nd<sub>15</sub>Fe<sub>77</sub>B<sub>8</sub> (*at.%*). Kehadiran unsur Nd berlebih dimaksudkan agar terbentuk fasa kaya dengan Nd (*Nd-rich phase*) [18] pada batas butir dan bekerja sebagai *decoupling agent* bagi antar fasa magnetik utama Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B agar diperoleh sifat koersivitas yang tinggi.

Melihat kembali perkembangan hasil penelitian pada bidang magnet permanen sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1, dapat disimpulkan bahwa telah banyak kemajuan yang diperoleh dalam kurun waktu satu abad ke belakang dari sejak penggunaan baja sebagai magnet permanen dengan nilai (BH)<sub>max</sub> yang masih sangat rendah sehingga selalu memerlukan baja magnet dengan dimensi yang relatif besar (*less volume effective*). Berbagai jenis fasa magnetik baru ditemukan dengan berjalannya waktu dan

perbaikan nilai  $(BH)_{\max}$  dari serendah 3 MGOe dari magnet keramik *hard ferrite* hingga setinggi 56 MGOe ( $448 \text{ kJ.m}^{-3}$ ) diperoleh dari magnet logam tanah jarang jenis NdFeB sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1. Seiring dengan nilai  $(BH)_{\max}$  yang semakin tinggi, dimensi dan volume magnet semakin berkurang dapat memenuhi tuntutan masa kini yang memerlukan miniaturisasi produk.

Penelitian terhadap magnet permanen tidak pernah berhenti meskipun setelah penemuan fasa magnetik  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ . Pesatnya pertumbuhan aplikasi magnet permanen di berbagai produk modern masa kini, menuntut perbaikan pada sifat magnetik magnet permanen yang pernah ditemukan agar bisa memenuhi tuntutan *volume effective* dan *cost effective*. Para peneliti bidang magnet permanen terus melakukan penelitian magnet permanen dengan karakteristik magnet yang dapat memenuhi tuntutan tersebut. Namun, upaya pengembangan pada penelitian tidak lagi pada pencarian material baru tetapi lebih kepada rekayasa struktur material untuk mendapatkan sifat unggul. Kecenderungan penelitian memperlihatkan fokus penelitian mengarah kepada rekayasa struktur dari struktur fasa tunggal sebagaimana banyak dijumpai pada magnet permanen konvensional menjadi magnet dengan struktur komposit yaitu *nanocomposite magnets* [19]-[21].

Dalam makalah ini dibicarakan berbagai jenis magnet nanokomposit dengan perbaikan sifat kemagnetan yang diperoleh berdasarkan rekayasa struktur. Penjelasan tentang mekanisme peningkatan sifat kemagnetan seperti mekanisme *exchange spring magnets* juga dibicarakan. Dalam paper ini juga disampaikan beberapa hasil prediksi teori terhadap magnet nanokomposit masa datang yang meninggalkan pekerjaan rumah yang besar bagi para peneliti eksperimental.

## 2. MAGNET NANOKOMPOSIT

Magnet nanokomposit adalah material magnetik multi-fasa dengan ukuran rata-rata kristalit dalam orde nanometer. Pada sistem magnet permanen, magnet nanokomposit terdiri dari fasa magnetik keras dan fasa magnetik lunak dimana pada kedua fasa magnetik terjadi *grain exchange interaction* atau efek interaksi pertukaran antar butir menghasilkan magnet permanen dengan nilai remanen dan  $(BH)_{\max}$  yang tinggi [22]-[23]. Struktur komposit bertujuan untuk menimbulkan efek interaksi antar kristalit fasa magnetik yang memiliki nilai

magnetisasi saturasi yang tinggi sehingga menghasilkan magnet permanen komposit yang memiliki karakteristik yang baru. Karakteristik magnet nanokomposit adalah memiliki nilai saturasi dan  $(BH)_{\max}$  yang lebih tinggi dibandingkan dengan magnet permanen konvensional selama efek negatif terhadap nilai koersivitas dari *grain exchange interaction effect* dapat dikompensasi [24]-[25].

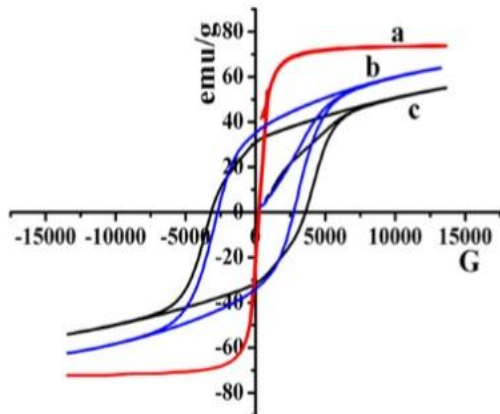
Selama 15 tahun terakhir, penelitian dan pengembangan di bidang bahan magnetik berstruktur nano telah menarik perhatian dan meningkat dengan pesat. Dilihat dari sudut pandang teknologi, struktur nanokomposit menunjukkan sifat fisika dan kimia yang unik dan menarik sehingga sifat kemagnetan meningkat secara signifikan [26]-[27]. Bahan nanokomposit dapat diaplikasikan pada banyak bidang seperti; sensor [28], peralatan biomedik [29], *magnetic optical storage* [30], *ferrofluid* [31], *magnetic recording media* [32], *microwave absorber* [33].

Sifat kemagnetan nanokomposit sangat ditentukan oleh ukuran kristalit atau butir, bentuk dan distribusi kristalit, serta jenis fasa magnetik penyusun struktur komposit. Interaksi pertukaran antar butir serta interaksi dipolar memainkan peran penting dalam menentukan sifat kemagnetan dari magnet nanokomposit. Efek interaksi pertukaran dua fasa magnet yaitu menggabungkan *coercivity* yang tinggi ( $H_c$ ) dari fasa keras dan magnetisasi ( $M_s$ ) yang tinggi dari fasa lunak sehingga terjadi *exchange spring magnet* [34] dimana ketika medan magnet yang diterapkan cukup besar pada proses demagnetisasi untuk membalikkan arah magnetisasi fasa magnetik keras, arah magnetisasi fasa magnetik lunak dapat dipertahankan untuk tidak segera mengalami pembalikan arah mengikuti arah medan demagnetisasi [34].

Banyak penelitian tentang fabrikasi magnet nanokomposit yang telah dilakukan para peneliti dengan memvariasikan beberapa faktor yang dapat mempengaruhi sifat magnetik yang dihasilkan. Fasa magnetik yang dikompositkan dapat berupa sistem paduan (*alloy*) [35], fasa magnetik keras pada sistem keramik seperti barium dan heksaferit (BHF) dikompositkan dengan fasa magnetik lunak seperti NiZn ferit, Co-ferit, dan Mn-ferit [36]-[38]. Pada sistem *alloy*, fasa magnetik logam tanah jarang seperti  $\text{SmCo}_5$ ,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ,  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  dikompositkan dengan fasa magnetik lunak seperti  $\alpha\text{-Fe}$ ,  $\text{Fe}_3\text{B}$ , dan  $\text{FeCo}$  [39]-[41].

Beberapa peneliti melaporkan hasil investigasinya tentang sifat kemagnetan magnet

nanokomposit yang dipersiapkan dengan berbagai metode. Y. Wang, dkk. [42] membuat magnet nanokomposit antara fasa magnetik  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  (BHF) dan fasa magnetik lunak  $\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$  menggunakan metoda *sol gel*. Kurva nanokomposit hasil percobaan dapat dilihat pada Gambar 2.

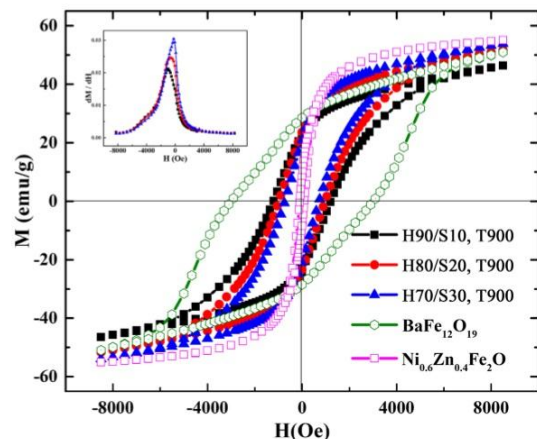


Gambar 2. Kurva hysteresis: (a)  $\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ , (b)  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ , dan (c)  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  [42]

Loop hysteresis ketiga sampel magnet nanokomposit tersebut dibandingkan dengan magnet fasa tunggal BHF dan  $\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ . Hasil yang diperoleh adalah terjadi peningkatan nilai magnetisasi saturasi ( $M_s$ ) dan magnetisasi remanen ( $M_r$ ), akan tetapi nilai *coercivity* ( $H_c$ ) magnet nanokomposit mengalami penurunan signifikan dibandingkan dengan nilai koersivitas BHF. Sebaliknya, nilai koersivitas magnet nanokomposit meningkat secara signifikan dibandingkan dengan koersivitas magnet  $\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ . Jadi, dapat disimpulkan bahwa efek interaksi pertukaran antar fasa magnetik penyusun komposit memberikan dua efek bertentangan yaitu meningkatkan nilai remanen dan menurunkan nilai koersivitas. Dengan demikian, terdapat tantangan pengembangan untuk tetap memperoleh magnet nanokomposit dengan magnetisasi remanen dan koersivitas yang cukup agar dapat diperoleh magnet permanen nanokomposit dengan nilai  $(\text{BH})_{\text{max}}$  yang ditingkatkan.

H. Nikmanesh [43] membuat magnet nanokomposit yang sama dengan metoda *mechanical alloying* tetapi tidak mendapatkan peningkatan yang signifikan untuk nilai  $M_s$  dan  $M_r$ . Akan tetapi hasil SEM (*scanning electron microscopy*), TEM (*transmission electron microscopy*) dan FTIR (*fourier transform infrared spectroscopy*) menunjukkan bahwa fasa  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  dan  $\text{Ni}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Fe}_2\text{O}_4$  dapat terdistribusi secara seragam. Dipelajari 3

magnet nanokomposit yang memiliki 3 komposisi berbeda dengan kode designasi H90/S10, H80/S20 dan H70/S30 sebagaimana yang tercantum pada Gambar 3.

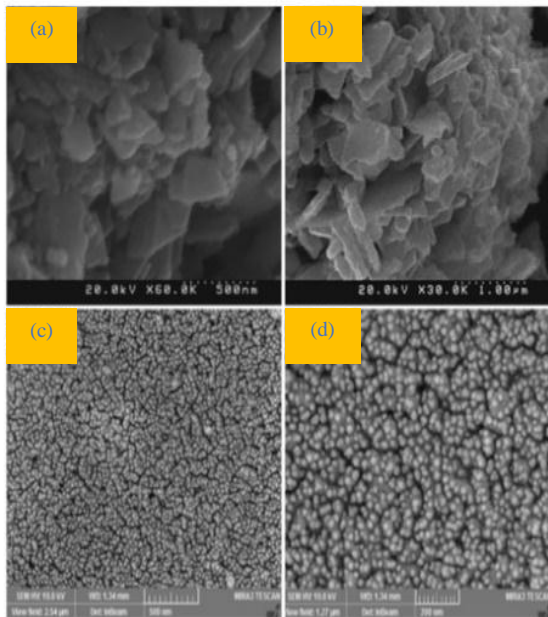


Gambar 3. Kurva hysteresis untuk H90/S10, H80/S20, H70/S30, magnet nanokomposit  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  dan  $\text{Ni}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Fe}_2\text{O}_4$  [43]

F. Yakuphanoglu [44] memperkenalkan pembuatan komposit magnet terdiri dari bahan perekat dari karet alam atau *natural rubber* (NR) sebagai matrik dan bahan magnetik berfasa utama BHF sebagai *filler*. Fasa magnetik BHF dipersiapkan dengan metoda penghalusan mekanik konvensional memiliki ukuran kristalit rata-rata 46 nm. Komposit magnet ini dimaksudkan untuk diaplikasikan pada perangkat elektronik sebagai bahan penyerap gelombang elektromagnetik. Hasil observasi struktur komposit magnet menunjukkan bahwa serbuk *filler* berfasa BHF tersebar secara merata menjadikan sistem komposit magnet BHF/NR sangat baik. Hasil pengujian resistivitas listrik komposit magnet memperlihatkan nilai yang terus menurun seiring dengan bertambahnya fraksi volume fasa magnetik BHF. Penurunan resistivitas volume komposit magnet BHF/NR telah mampu meningkatkan nilai *insertion loss* komposit [44]-[45].

Nanokomposit BHF juga dapat digabungkan dengan ZnO dengan metoda hidrotermal dan ultrasonik sederhana [46]-[47]. Diketahui bahwa ZnO adalah oksida logam semikonduktor yang baik untuk fotokatalis dan penyerap bahan kimia beracun. Penggabungan kedua material tersebut sangat baik untuk aplikasi fotokatalitik. Surfaktan juga sangat diperlukan untuk meningkatkan sifat feromagnetik dan katalitiknya. Pengaruh penambahan surfaktan pada mikrostruktur magnet nanokomposit tersebut dapat dilihat pada foto SEM dalam Gambar 4. Dapat

disimpulkan bahwa surfaktan sangat mempengaruhi morfologi butir yang terbentuk, sehingga berpengaruh lanjut terhadap sifat kemagnetan.



Gambar 4. Hasil SEM  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  (a, b) tanpa surfaktan, (c, d) dengan surfaktan *citric acid* [47]

Magnet nanokomposit BHF juga merupakan material yang cocok untuk diaplikasikan sebagai material penyerap gelombang mikro atau *microwave absorbing materials* [48]-[50]. Rekayasa material yang diperlukan adalah mengkompositkan fasa magnetik keras BHF dengan fasa magnetik lunak seperti *CoFe*, *novolac phenolic resin*, *polyaniline*,  $\text{Y}_3\text{Fe}_2\text{O}_5$ , dan aditif *graphene* [51]-[54]. Telah umum diketahui bahwa *M-type* BHF digunakan sebagai magnet permanen karena fasa magnetik BHF memiliki medan anisotropi kristal yang besar ( $\sim 150 \text{ kA/m}$ ), memiliki temperatur curie yang tinggi ( $\sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$ ) dan nilai magnetisasi jenuh sebesar  $0,39 \text{ T}$  [55]. Disamping itu, BHF tergolong ke dalam jenis material keramik dengan senyawa dasar besi oksida atau  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tersedia melimpah dan mudah didapat. BHF memiliki ketahanan korosi dan kestabilan kimia yang baik.

Penelitian magnet nanokomposit berbasis fasa logam tanah jarang seperti  $\text{NdFeB}$  dan  $\text{SmCo}$  sebagai fasa magnet keras dikompositkan dengan fasa magnet lunak telah diperkenalkan sebagai salah satu solusi mengurangi penggunaan logam tanah jarang karena terbatasnya ketersediaan unsur tanah jarang tersebut serta harganya yang mahal. Dengan demikian, magnet nanokomposit sistem  $\text{NdFeB}/\alpha\text{-Fe}$  adalah magnet yang

menjanjikan untuk menggantikan magnet konvensional  $\text{NdFeB}$ . Banyak hasil penelitian menunjukkan bahwa magnet nanokomposit sistem  $\text{NdFeB}/\alpha\text{-Fe}$  memiliki nilai magnetisasi remanen dan produk energi maksimum yang lebih tinggi [56]. Namun, beberapa hasil penelitian juga memperlihatkan sifat magnetik dari magnet nanokomposit sistem  $\text{NdFeB}/\alpha\text{-Fe}$  belum sepenuhnya memuaskan karena *coercivity* yang dihasilkan masih relatif lebih rendah [57]. Beberapa usaha perbaikan untuk meningkatkan nilai *coercivity* magnet nanokomposit telah dilakukan melalui penambahan unsur  $\text{Cr}$  dan  $\text{Co}$  terhadap fasa magnetik  $\text{NdFeB}$  [58]. Penambahan paduan seperti  $\text{Nd-Cu}$  dan  $\text{Nd-Al}$  juga telah diterapkan untuk meningkatkan *coercivity* magnet [59].

Penambahan  $\alpha\text{-Fe}$  pada  $\text{NdFeB}$  melalui proses penggilingan dan diikuti dengan perlakuan anil pada temperatur  $700\text{-}800 \text{ }^\circ\text{C}$  telah diperoleh material komposit dengan *internal stress* dan kerapatan cacat kristal yang minimum serta terjadi kenaikan tingkat kristalinitas kedua fasa [60]. Hal ini berdampak positif kepada koefisien kopling antar kedua fasa pada sistem komposit yaitu setelah perlakuan panas terjadi peningkatan nilai konstanta anisotropi kristal. Dampak negatifnya adalah terjadi pertumbuhan ukuran kristalit kedua fasa magnetik yang menyebabkan penurunan kekuatan interaksi pertukaran antar fasa sehingga menurunkan nilai magnetisasi remanen magnet komposit [60].

Magnet logam tanah jarang  $\text{SmCo}$  yang digabung dengan  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  dengan metoda *mechanical milling* juga menunjukkan hasil yang bagus dengan menghasilkan magnet nanokomposit [61]. Ketebalan senyawa nanokomposit pada lapis tipis magnet nanokomposit diperlihatkan juga mempengaruhi *exchange spring effect*. Chowdhury dan M. Krishnan [62] telah mengamati perubahan struktur dan sifat magnetik magnet nanokomposit lapisan tipis  $\text{SmCo}_5/\text{Co}$ . Dalam prosesnya,  $\text{Co}$  didepositkan secara *multilayer* pada  $\text{SmCo}_5$  dengan hasil yang baik karena reaktifitas  $\text{Sm}$  dan  $\text{Co}$  yang tinggi dan dalam bentuk nanokomposit. Rasio volume lapisan fasa keras/lunak dikontrol dengan memvariasikan ketebalan  $\text{Sm}$  ( $t_{\text{Sm}}$ ) dan ketebalan  $\text{Co}$  ( $t_{\text{Co}}$ ). Nilai  $(\text{BH})_{\text{max}}$  tertinggi dicapai pada magnet nanokomposit lapis dengan  $t_{\text{Sm}}$  yang rendah dan  $t_{\text{Co}}$  yang tinggi. Metoda ini merupakan penemuan baru pada magnet nanokomposit lapis tipis dan ketebalan yang dibuat sangat tergantung dengan aplikasi yang akan diterapkan. Pengaruh ketebalan  $t_{\text{Sm}}$

dan tCo terhadap sifat kemagnetan magnet lapis tipis yang ditumbuhkan pada substrat Si dan MgO dapat dilihat pada Tabel 1. Bila diinspeksi data pada tabel tersebut terlihat nilai magnetisasi jenuh ( $M_{sat}$ ) magnet nanokomposit lapis tipis meningkat dari 757,8 emu/cc ketika tSm = 4,8 nm dan tCo = 11,4 nm menjadi 975 emu/cc ketika tSm dan tCo masing-masing adalah 3,2 nm dan 11,4 nm, menghasilkan magnet dengan nilai  $(BH)_{max}$  sebesar 12,4 MGOe. Namun, nilai  $(BH)_{max}$  tertinggi yang diperoleh dari seri magnet nanokomposit lapis tipis bersubstrat Si adalah sebesar 14,9 MGOe dicapai pada magnet nanokomposit lapis tipis dengan tSm dan tCo masing-masing adalah 2,4 nm dan 9,5 nm. Nilai  $(BH)_{max}$  terbaik ternyata diperoleh dari magnet lapis tipis yang ditumbuhkan di atas substrat MgO mencapai 20,1 MGOe pada ketebalan tSm dan tCo masing-masing 3,2 nm dan 11,4 nm.

magnetik keras dan fraksi fasa magnetik lunak. Jadi jelaslah untuk bisa menghasilkan magnet nanokomposit dengan nilai  $M_s$  yang tinggi diperlukan fasa magnetik keras dan lunak yang juga tinggi. Dengan demikian, nilai  $M_s$  komposit akan terletak diantara kedua nilai  $M_s$  fasa magnetik keras dan lunak. Namun, agar sistem komposit berperilaku seperti magnet keras, maka efek interaksi pertukaran antar butir fasa magnetik harus aktif. Hal ini dapat dicapai pada sistem nanokomposit.

### 3. MODEL FENOMENALOGIK *EXCHANGE SPRING MAGNET*

Konsep *exchange spring magnet* ini diusulkan pertama kali pada awal 1990 oleh Kneller dan Hawig [64] dengan memperkenalkan suatu model simulasi efek *exchange coupled* antara fasa magnetik keras dan lunak dalam sistem nanokomposit. Magnet nanokomposit ini kemudian diperkenalkan

Tabel 1. Sifat magnet nanokomposit tSm/tCo yang ditumbuhkan pada substrat Si dan MgO [62]

Substrate	t <sub>Sm</sub> (nm)	t <sub>Co</sub> (nm)	H <sub>c</sub> (kOe)	M <sub>sat</sub> (emu/ cc)	S (=M <sub>rem</sub> /M <sub>sat</sub> )	(BH) <sub>max</sub> (MGOe)
Si	4,8	11,4	3,7	757,8	0,84	9,3
	4,8	9,5	5,0	707,7	0,83	9,2
	4,8	7,6	7,0	716,7	0,81	9,7
	3,2	11,4	3,0	975,0	0,84	12,4
	3,2	9,5	4,3	829,2	0,81	9,8
	3,2	7,6	5,5	766,9	0,82	9,9
	3,2	5,7	5,1	663,4	0,80	7,5
	2,4	11,4	2,1	1093,4	0,80	10,6
	2,4	9,5	2,5	1012,4	0,86	14,9
	2,4	7,6	3,1	995,01	0,82	14,4
MgO	2,4	5,7	4,2	779,2	0,89	12,9
	3,2	11,4	3,2	997,90	0,94	20,1

Nilai magnetisasi saturasi magnet nanokomposit dapat dihitung menggunakan *rule of mixture* suatu komposit dengan persamaan 1 [63].

$$M_{sat} = \frac{(M_h V_h + M_s V_s)}{(V_h + V_s)} \quad (1)$$

Dimana  $V_h$  and  $V_s$  masing-masing adalah fraksi volum fasa magnetik keras dan fasa magnetik lunak. Sedangkan  $M_h$  dan  $M_s$  masing-masing adalah nilai magnetisasi jenuh fasa

sebagai *exchange-spring magnets*. Efek *exchange coupled* pada *exchange spring magnets* memperlihatkan peningkatan nilai magnetisasi remanen dan produk energi maksimum. Namun sebelumnya Coehorn, dkk. pada tahun 1989 [65] telah mengamati lebih dahulu adanya peningkatan nilai magnetisasi remanen pada komposit sistem NdFeB/Fe<sub>3</sub>B. Dalam hal ini, fasa magnetik lunak Fe<sub>3</sub>B berperan sebagai matrik dan fasa magnetik keras NdFeB mengendap disepanjang batas butir fasa magnetik lunak. Peningkatan nilai

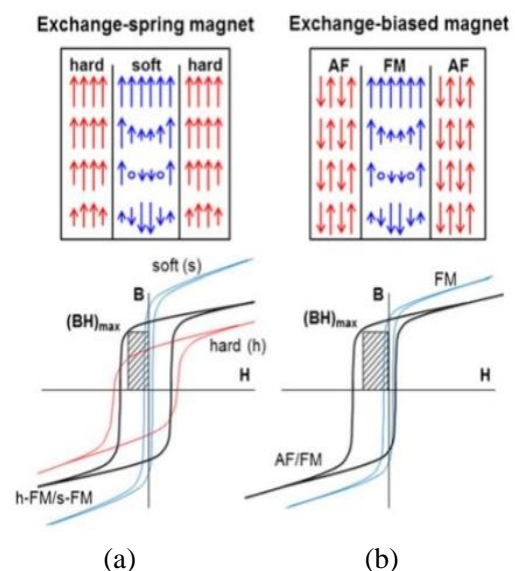
magnetisasi remanen magnet nanokomposit ini terjadi karena adanya efek *exchange coupling* antar kristalit kedua fasa tersebut. Fakta ini menjelaskan bahwa efek *exchange coupling* akan terjadi secara langsung pada dua fasa magnetik yang berdekatan dalam *exchange spring magnet*. Fasa magnetik keras lebih berkontribusi terhadap nilai koersivitas magnet karena medan anisotropinya yang relatif tinggi, fasa magnetik lunak berkontribusi menyumbangkan magnetisasi saturasi yang besar. Dari penggabungan kedua fasa magnetik berbeda tersebut, maka energi produk maksimum,  $(BH)_{max}$  meningkat secara signifikan karena efek interaksi antar kristalit dibandingkan dengan magnet konvensional [66]-[68].

Pada tahun 1993, Skomski dan Coey [69] menunjukkan secara teoritik bahwa magnet dengan nilai  $(BH)_{max}$  sebesar  $1 \text{ MJ/m}^3$  bisa diperoleh dari magnet nanokomposit terdiri dari dua fasa magnetik dengan orientasi kristalit searah. Nilai teoritik ini adalah lebih dari dua kali nilai  $(BH)_{max}$  tertinggi dari magnet NdFeB terbaik saat ini yaitu sebesar  $431,4 \text{ kJ/m}^3$  [70]. Meskipun beberapa hasil penelitian terkini tentang magnet nanokomposit masih menghasilkan nilai  $(BH)_{max}$  jauh lebih rendah dari nilai teoritik tersebut, namun pengembangan magnet nanokomposit melalui rekayasa struktur agar sesuai dengan model teoritik masih terus berjalan sampai struktur magnet nanokomposit sesuai dengan asumsi teoritik dicapai secara eksperimental.

Magnet yang masuk dalam kategori magnet nanokomposit haruslah memiliki ukuran kristalit fasa magnetik keras dan lunak dalam rentang nanometer agar efek *exchange coupling* pada permukaan kristalit antar kedua fasa magnetik memberikan kontribusi terhadap sifat magnetik magnet secara keseluruhan. Bila ukuran kristalit fasa magnetik magnet permanen relatif besar, maka nilai rasio antara luasan total terjadinya efek *exchange coupling* dan volume total magnet nanokomposit terlalu kecil sehingga kontribusi peningkatan sifat magnetik dari efek *exchange coupling* tidak signifikan. Hasil observasi beberapa peneliti terhadap mikrostruktur magnet nanokomposit memastikan bahwa ukuran rata-rata kristalit fasa magnetik dalam struktur komposit haruslah kurang dari 30 nm untuk memberikan efek *exchange spring coupling* secara optimal [71]. Selain itu, ukuran kristalit fasa magnetik lunak haruslah tidak melampaui dua kali nilai ukuran kristalit fasa magnetik keras. Fraksi volume fasa magnetik lunak juga tidak boleh

terlalu besar agar tidak melemahkan efek *exchange spring coupling*. Konstanta *magnetocrystalline anisotropy* yang besar pada fasa magnetik keras memegang peran kontrol terhadap rotasi koheren magnetisasi fasa magnetik lunak ketika diaplikasikan medan magnet eksternal balik. Meskipun fasa magnetik lunak memiliki nilai konstanta *magnetocrystalline anisotropy* yang relatif rendah, arah magnetisasi fasa magnetik lunak hanya berbalik arah bersamaan dengan magnetisasi fasa magnetik keras ketika medan magnet eksternal diaplikasikan pada arah yang berlawanan dengan arah awal.

Berdasarkan hasil riset dari berbagai negara, pengembangan magnet permanen komposit terbagi menjadi dua kategori yaitu; pengembangan berdasarkan struktur nano dan struktur magnetik. Karakteristik magnet yang baik akan didapat, dengan menerapkan kedua kategori tersebut dalam suatu penelitian. Pengembangan kategori pertama yaitu struktur nano adalah dengan cara memfasilitasi efek interaksi pertukaran (*exchange interaction*) yang digambarkan sebagai nilai energi yang diharapkan dari dua atau lebih elektron permukaan ketika fungsi gelombang keduanya saling tumpang tindih atau *overlap*. Magnet dengan sifat unggul yang diperoleh dari efek interaksi pertukaran ini disebut sebagai “*exchange-spring*” magnets atau “*exchange-bias*” magnets. Mekanisme efek interaksi pertukaran ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Ilustrasi (a) *exchange spring magnet*, dan (b) *exchange biased magnet* [47]

Gambar 5(a) tersebut memperlihatkan struktur magnetik pada fasa magnet keras yang memiliki loop histeresis dengan koersivitas



yang lebih besar (berwarna merah) tetapi nilai magnetisasi jenuh yang lebih rendah dibandingkan dengan loop histeresis fasa magnet lunak (warna biru muda). Struktur magnetik demikian menghasilkan loop histeresis *exchange spring magnet* (warna hitam) dengan nilai  $(BH)_{\max}$  yang lebih tinggi dari kedua fasa magnetik tersebut. Sedangkan Gambar 5(b) adalah ilustrasi efek loop histeresis yang dihasilkan karena terjadi interaksi pertukaran antara fasa antiferomagnetik dan feromagnetik (*exchange-biased magnets*). Efek interaksi pertukaran yang dihasilkan dari kopling antara fasa feromagnetik dan antiferomagnetik memberikan efek terhadap nilai meningkatnya nilai konstanta anisotropi kristal sehingga dapat mengatasi efek superparamagnetic [72]-[73].

*Exchange spring magnet* terjadi pada fasa magnetik keras/lunak dimana interaksi pertukaran tersebut terjadi pada daerah antar muka. Disebut *exchange spring* karena bersifat *reversible*, dimana terjadi interaksi magnetik antara komponen magnet di bawah penghilangan medan magnet yang diterapkan. *Magnetic exchange coupling* dapat menghasilkan sistem komposit yang didapat dari fasa terbaik dari kedua fasa penyusun. Secara teoritis dapat ditunjukkan bahwa nilai  $(BH)_{\max}$  dapat melampaui nilai  $(BH)_{\max}$  magnet permanen konvensional [67]. Beberapa publikasi telah melaporkan hasil percobaan yang mengkonfirmasi nilai  $(BH)_{\max}$  meningkat signifikan [73]-[74]. Namun demikian, sampai saat ini sifat magnetik teknis dari produk yang dihasilkan belum dapat menyamai nilai teoritis. Hal ini disebabkan beberapa faktor antara lain belum terpenuhinya secara eksperimental asumsi yang berlaku dalam kalkulasi teoritik tersebut [47].

Sifat kemagnetan seperti magnet nanokomposit juga dapat terjadi pada dua fasa magnet yang berbeda, yang disebut *exchange bias magnet* atau pertukaran anisotropi. Pada kondisi ini, terjadi *exchange coupled* antara fasa feromagnetik (FM) dan antiferomagnetik (AF) yang menghasilkan pelebaran kurva histeresis disepanjang sumbu medan magnet luar yang diaplikasikan pada proses magnetisasi dan demagnetisasi. Fenomena ini berasal dari interaksi pertukaran magnetisasi pada daerah antar muka FM/AF yang menghubungkan magnetisasi FM selama proses pembalikan atau demagnetisasi, sehingga terjadi peningkatan nilai  $H_c$ ,  $M_r$ , dan  $(BH)_{\max}$ . Peneliti yang pertama kali mengusulkan *exchange bias magnet* untuk meningkatkan

$(BH)_{\max}$  dan mendapatkan magnet permanen superior adalah Meiklejohn dan Bean [75], yaitu pada material Co dan CoO. Namun sampai saat ini, penerapan *exchange bias magnet* baru dapat direalisasikan pada magnet dalam bentuk film tipis untuk aplikasi perancangan *magnetic recording media* dan *magnetoresistive devices* untuk teknologi informasi. *Interphase exchange coupling* yang ada pada sistem bias pertukaran AF/FM dapat dianalisis untuk mendapatkan respon magnet permanen potensial dengan cara yang serupa dengan sistem *exchange spring magnet* [76].

Beberapa peneliti telah melakukan kajian intensif terhadap mekanisme dasar *exchange coupled magnet* pada proses magnetisasi dan demagnetisasi baik itu pada sistem fasa tunggal berstruktur nano [77] maupun sistem magnet nanokomposit [78]. Beberapa laporan menunjukkan telah berhasil mendapatkan efek *exchange spring* yang sangat baik dalam bentuk peningkatan nilai magnetisasi remanen. Sementara yang lain menunjukkan peningkatan *coercivity* dengan penurunan nilai magnetisasi saturasi [79].

Chavi Pahwa, dkk. [80] telah menyelidiki *exchange coupled* dan *non-exchange coupled* senyawa nanokomposit  $BaFe_{12}O_{19}/NiFe_2O_4$  (BHF/NIF) yang dipersiapkan dengan dua metoda berbeda yaitu *sol gel* dan *mechanical alloying*. Hasil karakteristik magnet dan kurva histeresis menunjukkan bahwa terjadinya *exchange coupled* antara fasa keras/lunak yang disiapkan dengan metoda *sol gel*, dimana terjadi peningkatan nilai  $M_s$  dan  $T_c$ . Hasil SEM juga memperlihatkan batas butir yang berbeda antara batas butir lunak NiF dan BHF. Selanjutnya Song, dkk. [81] membandingkan sifat kemagnetan magnet nanokomposit sistem  $SrFe_{12}O_{19} / Ni_{0,7}Zn_{0,3}Fe_2O_4$  yang dipersiapkan melalui metode *sol gel* dan *mechanical milling*. Hasilnya menunjukkan metoda *sol gel* menghasilkan efek *exchange-coupled* yang lebih baik. Mereka melaporkan sulit untuk mendapatkan efek *exchange-coupling magnet* dengan metoda *mechanical milling*.

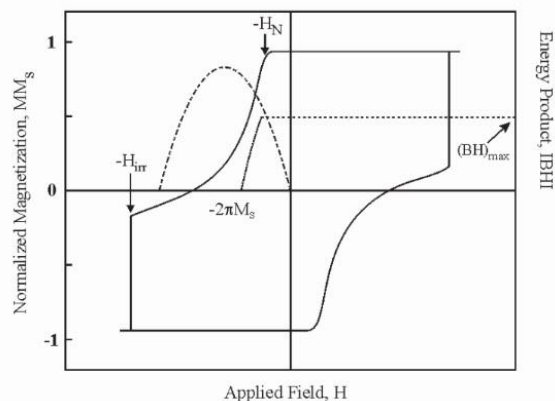
D. Primca dan D. Makoveca [82] membuat komposit *nanoplatelet* yang mengkombinasikan magnet keras BHF dan magnet lunak spinel oksida besi *maghemite* ( $\gamma$ - $Fe_2O_3$ ) dengan metoda sederhana. Metode ini didasarkan pada pengendapan lapisan tipis *maghemite* oksida besi dengan presipitasi bersama ion  $Fe_3+/Fe_2+$  dalam suspensi berair koloid dari nanopartikel. Penumbuhan struktur spinel pada permukaan heksagonal ferit menampilkan struktur tipe *sandwich*. *Exchange*

*spring coupled* magnet antara kedua fasa tersebut menghasilkan peningkatan nilai  $(BH)_{\max}$  lebih dari dua kali lipat. Selain itu, sifat magnetik yang dihasilkan sangat baik dan dengan nilai koersifitas besar, resistifitas tinggi, kestabilan kimia yang baik sehingga dapat diaplikasikan pada *high-density recording media* atau dalam bidang kedokteran, sebagai mediator untuk *hipertermia* magnetik. Radmanesh dan Seyyed Ebrahimi [83] mengamati pengaruh ukuran butir pada *exchange coupling* senyawa komposit  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Ni}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ . Yang, dkk. [84] melaporkan sintesis magnet nanokomposit sistem  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{CaFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$  dengan hasil adanya peningkatan nilai  $(BH)_{\max}$  dan magnetisasi remanen. Semua laporan dan hasil penelitian tersebut memastikan bahwa perilaku *exchange spring magnet* sangat bergantung pada mikrostruktur, termasuk ukuran butir, bentuk partikel, metoda sintesis, dan distribusi fasa magnetis keras dan lunak [83]-[84].

Namun, tidak semua hasil penelitian tentang penggabungan fasa magnet keras/lunak dapat menghasilkan peningkatan sifat kemagnetan. Disamping ukuran kristalit fasa magnet keras dan lunak, bentuk kristalit yang tidak seragam dan tidak merata menentukan sifat kemagnetan magnet nanokomposit. Adanya lapisan transisi (batas antar kristalit fasa) akan mengurangi efek kopling.

Nilai  $(BH)_{\max}$  *exchange spring* magnet tergantung kepada geometri struktur dalam magnet dan menentukan kuadran kedua dari loop histeresisnya. Hal ini telah didemonstrasikan oleh beberapa peneliti yang melakukan investigasi baik secara teoritik [85], maupun melalui percobaan pada magnet terdiri dari material multi lapisan [86] sebagai material 2-dimensi serta menghitung secara numerik model struktur dengan fasa magnetik lunak berupa bola yang tertanam dalam fasa magnetik keras berbentuk kubus sebagai material 3-dimensi [87]. Gambar 6 memperlihatkan loop histeresis teoretikal dari *exchange-spring magnet* dimana terlihat pada kurva di kuadran kedua, magnetisasi fasa magnetik lunak dan fasa magnetik keras berbalik arah masing-masing pada medan nukleasi  $H_N$  dan  $H_{\text{irr}}$ . Kurva fungsi parabola menunjukkan nilai produk energi (BH). Sebagaimana terlihat pada kurva (BH) tersebut, nilai  $(BH)_{\max}$  yang diperoleh ditentukan oleh medan nukleasi  $H_N$ . Bila nilai  $H_N$  lebih kecil dari nilai  $2\pi M_S$  maka nilai  $(BH)_{\max}$  magnet tidak optimal. Nilai  $(BH)_{\max}$  menjadi optimal apabila  $H_N$  lebih besar dari nilai  $2\pi M_S$ .

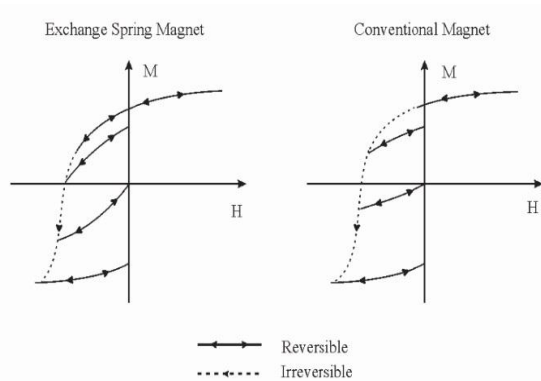
Perbandingan antara kurva histeresis *exchange spring magnet* dan magnet konvensional dapat dilihat pada Gambar 7. Kurva histeresis *exchange spring magnet* cenderung dapat kembali yaitu bila medan magnet eksternal dihilangkan, magnetisasi remanen akan kembali ke nilai yang mendekati aslinya.



Gambar 6. Proses magnetisasi saat *exchange spring magnet* [88]

Oleh sebab itu nama "*exchange spring magnet*" berasal dari kata "*reversibility of magnetization*" [88]. Hal ini berbeda dengan kurva histeresis magnet konvensional dimana pada umumnya kurva magnetisasinya tidak dapat balik atau *irreversible*.

Ukuran fasa magnet lunak dalam sistem *exchange spring magnet* haruslah dalam skala beberapa puluh nanometer agar arah magnetisasinya tidak segera berbalik mengikuti medan magnet luar balik karena efek interaksi pertukaran antar fasa berdekatan. Selain itu, fraksi volume fasa lunak perlu sebesar mungkin untuk mencapai magnetisasi jenuh yang tinggi. Struktur yang baik adalah dengan menempatkan fasa magnetik keras di dalam matriks fasa magnetik lunak. Dengan cara itu, matriks fasa magnetik lunak menempati fraksi volume terbesar dalam sistem struktur nanokomposit. Ukuran kristalit dan jarak antar kristalit fasa magnetik dalam struktur komposit haruslah dalam skala nanometer. Komposisi fraksi volum kedua fasa magnetik dalam struktur komposit harus diatur sedemikian sehingga memberikan nilai magnetisasi jenuh mendekati nilai magnetisasi jenuh fasa magnetik lunak.

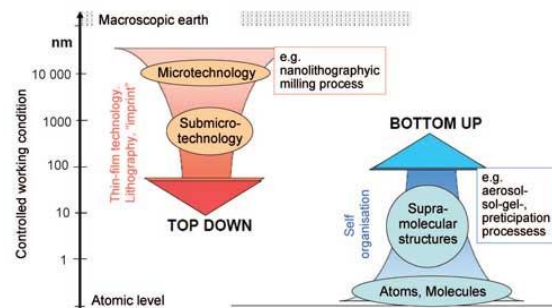


Gambar 7. Perbandingan kurva magnet *exchange spring* dan konvensional [88]

#### 4. METODE PEMBUATAN MAGNET NANOKOMPOSIT

Proses pembuatan magnet nanokomposit dipilih berdasarkan jenis material yang akan dibuat seperti apakah kelas magnet keramik, magnet logam tanah jarang, dan magnet paduan [89]. Teknik yang sering digunakan dalam menyiapkan magnet keramik adalah; *sol gel/wet chemical* [80], *combustion method* [90], *ultrasonic dispersion* [91], *hydrothermal technique* [44], *ball milling/mechanical alloying* [92], *chemical method* [93], *co-precipitation* [94], *deoxidation technique* [95], dan *microwave sintering* [96]. Untuk pembuatan magnet kelas logam tanah jarang diperlukan teknik dengan kondisi yang *innert* seperti *high energy milling* dengan kondisi atmosfer yang terkontrol [97], *sputtering* [62], dan *electron beam* [98], *vacuum arc melting* [99] dan teknik *melt spinning* [100]. Setiap metode memiliki kelebihan dan kekurangan untuk dapat menghasilkan ukuran butir, distribusi ukuran butir serta morfologi yang semuanya menentukan karakteristik *exchange spring magnet*.

Untuk pembuatan material magnetik dengan struktur nano dapat digunakan metoda *bottom-up* dan/atau *top-down* [101]. Pada metode *bottom-up*, struktur nano dibuat melalui proses kimia atau pepaduan mekanik unsur kimia penyusun material. Sedangkan proses *top-down* dilakukan dengan cara penghancuran material secara mekanik dengan menggunakan proses penggilingan. Perbandingan kedua metoda tersebut dalam pembuatan material nano dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Metoda pembuatan material nano dengan metoda *top-down* dan *bottom-up* [102]

Metode *top-down* pada dasarnya melibatkan penghalusan ukuran serbuk material kristalin secara mekanik melalui penggunaan bola-bola yang terbuat dari baja atau *tungsten carbide* yang berada dalam suatu wadah berisikan serbuk material kristalin tersebut dan bola-bola. Perangkat ini dikenal sebagai perangkat *ball mill* [103]. Metode ini digunakan untuk menghasilkan serbuk halus material kristalin. Kelemahan dari metoda *top-down* adalah material kristalin yang ukuran serbuknya diperhalus dapat terkontaminasi. Ukuran serbuk terkecilnya juga terbatas tidak bisa mencapai ukuran nanometer. Namun, serbuk material kristalin yang dihasilkan dari metode *top-down* bisa dikonsolidasi ke dalam berbagai bentuk seperti segi empat, pelet, cincin, silinder, dll [104].

Metoda *bottom-up* adalah metoda yang menyiapkan magnet nanopartikel dengan cara membuat partikel nano dari material awal melalui proses fisika kimia. Metoda *bottom-up* terbagi dua, yaitu fasa cair dan fasa gas. Fasa cair meliputi proses; presipitasi, *sol gel*, dan hidrotermal. Sedangkan fasa gas adalah aerosol proses berupa *flame hydrolysis* dan *spray hydrolysis*.

#### 5. RISET NANOKOMPOSIT KE DEPAN

Pencarian magnet permanen baru telah menjadi topik penelitian selama beberapa dekade. Akan tetapi sulit untuk mendapatkan pengganti magnet NdFeB di masa mendatang. Peningkatan karakteristik magnet, suhu *curie*, ketahanan korosi, anisotropi adalah tantangan yang masih mungkin dapat ditingkatkan. Metode eksperimental, teknik pembuatan, komputasional, dan analitis semuanya memainkan peran penting dalam pencarian material baru.

Pembuatan magnet berstruktur nano akan memberikan banyak keuntungan karena nilai produk energi berpotensi tinggi, peningkatan ketahanan korosi, berkurangnya kehilangan

arus eddy, struktur yang baik, dan biaya rendah. Lebih penting lagi, magnet nanokomposit memiliki aplikasi yang luas di banyak sektor seperti untuk perangkat elektronik, *microwave absorber*, kesehatan, obat-obatan, energi, dan lingkungan.

Pengembangan metoda penelitian terus dikembangkan untuk mendapatkan magnet nanokomposit anisotropik dan nanokomposit lapis tipis dengan penyesuaian fasa keras/lunak. Penelitian dapat lebih difokuskan pada kontrol struktur mikro dan karakterisasi hubungan antar struktur. Tekstur kristal fasa keras dan anisotropi magnetik tetap harus direalisasikan. Penghalang teknis ini akan dapat diatasi melalui pengembangan strategi dan teknologi baru untuk merancang keselarasan butir pada skala nano. Meskipun Pendekatan *bottom-up* yang baru dikembangkan masih pada tahap awal, perkembangan lebih lanjut termasuk pembuatan *nanoflakes* fasa keras anisotropik dan nanopartikel fasa lunak, serta penggabungan yang tepat dari dua fasa ke dalam serbuk komposit, telah menunjukkan harapan dan kelayakan persiapan magnet permanen anisotropik berstruktur nano di masa depan.

## 6. KESIMPULAN

Magnet nanokomposit adalah magnet yang memiliki sifat kemagnetan yang lebih unggul dibandingkan dengan magnet permanen konvensional berfasa magnetik tunggal. Sifat unggul tersebut antara lain nilai magnetisasi remanen dan  $(BH)_{max}$  yang lebih tinggi. Peningkatan kedua karakter magnet tersebut berasal dari efek *exchange spring magnet* antara fasa magnetik keras dan lunak. Efek *exchange coupling* terjadi secara langsung pada permukaan kedua fasa magnetik yang berdekatan meskipun kedua fasa magnetik tersebut hadir dalam formasi dengan orientasi kristal yang random. Fasa magnetik keras berperan mempertahankan magnet komposit tetap memiliki nilai *coercivity* yang relatif tinggi. Sedangkan fasa magnetik lunak berkontribusi terhadap nilai magnetisasi saturasi yang besar dari magnet nanokomposit. Struktur mikroskopis yang ideal dari magnet nanokomposit berkinerja tinggi adalah ukuran kristalit magnetik keras dan lunak harus relatif seragam. Ukuran kristalit magnetik keras dan lunak masing-masing berada pada kisaran 5-10 nm dan 10-20 nm yang harus terdistribusi secara merata antara satu sama lain sehingga terjadi *exchange spring coupling* secara

optimal. Struktur komposit dengan suatu orientasi dapat memberikan efek anisotropi sehingga lebih besar lagi peningkatan sifat magnetiknya bisa diperoleh.

Kini, penelitian tentang magnet nanokomposit masih terus dilakukan para peneliti, baik itu magnet nanokomposit dari jenis magnet ferit, logam tanah jarang, maupun paduan logam dengan teknik dan metoda yang beragam. Struktur komposit baik itu orientasi kristalit fasa magnetik, bentuk kristalitnya, ukuran dan distribusi ukuran kristalit fasa magnetik serta komposisi fasa magnetik dalam struktur nanokomposit menentukan sifat kemagnetan magnet nanokomposit. Para peneliti teoritik pun telah mengusulkan suatu magnet nanokomposit dengan struktur ideal antara fasa magnetik keras dan fasa magnetik lunak, bila saja struktur tersebut dapat direalisasikan secara eksperimental, magnet permanen dengan nilai  $(BH)_{max}$  sebesar  $1 \text{ MJ.m}^{-3}$  harus dapat dicapai. Kini, magnet nanokomposit terbaik baru menghasilkan nilai  $(BH)_{max}$  sebesar  $448 \text{ kJ.m}^{-3}$  yaitu kurang dari separuh nilai teoritik. Dengan demikian, kesempatan dan peluang melakukan pengembangan riset secara eksperimental dalam bidang magnet nanokomposit masih terbuka sangat luas dan penuh tantangan karena nilai destinasi  $(BH)_{max}$  sebesar  $1 \text{ MJ.m}^{-3}$  masih harus akan dicapai melalui perjalanan riset yang panjang.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ristekdikti melalui program Insinas Riset Pratama Individu 2018 atas pendanaan studi literatur dan kegiatan penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] J.D. Livingston, "The history of permanent-magnet materials," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society.*, vol. 42, issue 2, pp. 30-34, 1990.
- [2] Magnetic Magnets. A Brief History. [Online]. Available: <http://www.magneticmagnets.co.nz/technical/A-Brief-History.html>, 2017. [Accessed: 04, Jan, 2018].
- [3] APS News, "Oersted and electromagnetism," *American Physical Society*, vol.17, no.7. [Online]. Available: <https://www.aps.org/publicatio>

- ns/apsnews/200807/physicshistory.cfm. [Accessed: 04, Jan, 2018].
- [4] First4magnets, "a history of electrocity and magnetism," *Magnet Expert Ltd.* 2018. [Online] Available: <https://www.first4magnets.com/techcentre-i61/information-and-articles-i70/a-history-of-electricity-and-magnetism-i80>. [Accessed: 04, Jan, 2018].
- [5] B. D. Cullity, dan C. D. Graham, "Introduction to magnetic materials, chapter 11," *John Wiley & Sons*, pp. 87-114, 2011.
- [6] L. Pauling, "A theory of ferromagnetism," *Physic*, vol. 39, pp. 551-559, 1953.
- [7] J. Ding, H. Yang, W. F. Miao, P. G. McCormick, dan R. Street, "High coercivity Ba hexaferrite prepared by mechanical alloying," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 221, issues 1-2, pp. 70-73, 1995.
- [8] Magnetstek, "SmCo rare earth magnets," [Online] Available: [http://www.magnetstek.com/smco\\_rare\\_earth\\_magnets.html](http://www.magnetstek.com/smco_rare_earth_magnets.html), 2009. [Accessed: 04, Jan, 2018].
- [9] J. J. Croat, J. F. Herbst, R. W. Lee, dan F. E. Pinkerton, "Pr-Fe and Nd-Fe-based materials: A new class of high-performance permanent magnets (invited)," *J. Appl. Phys.*, vol. 55, pp. 2078-2082, 1984.
- [10] Sagawa, M. Fujijamura, S. Tagawa, M. Yamamoto, dan Y. Matsuura, "New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe (invited)," *J. Appl. Phys.*, vol. 55, pp. 2083-2087, 1984.
- [11] Chamberod, dan F. Vanoni, "NdFeB magnets by melt spinning," I. V. Mitchell et al. (eds.), *Concerted European Action on Magnets (CEAM) © ECSC, EEC, EAEC, Brussels and Luxembourg*, pp. 436-448, 1989.
- [12] A. Z. Liu, I. Z. Rahman, M. A. Rahman, dan E. R. Petty, "Fabrication and measurements on polymer bonded NdFeB magnets," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 56, issues 1-4, pp. 571-580, 1996.
- [13] S. Lieserta, A. Kirchnera, W. Grunbergera. A. Handsteina, P. De Rangob, D. Fruchartb, L. Schultza, dan K. H. Müllera, "Preparation of anisotropic NdFeB magnets with different Nd contents by hot deformation (die-upsetting) using hot-pressed HDDR powders," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 266, issues 1-2, pp. 260-265, 1998.
- [14] Z. Rui, W. Hui Jie, L. Jia Jie, Z. Wen Chen, L. Bin, Z. Ming Gang, dan P. Wei, "Simulation of hot deformation process for die-upset Nd-Fe-B magnets," *Journal of Functional Materials*, vol. 3, pp. 273-280, 2011.
- [15] R. W. Lee, E. G. Brewer, dan N. A. Schafel, "Processing of neodymium-iron-boron melt spun ribbons to fully dense magnets," *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-21, pp. 1958, 1985.
- [16] S. Rivoirard, P. de Rango, D. Fruchart, Y. Chastel, dan C. L. Martin. "Rheological study of hot-forged NdFeB and related permanent magnet properties," *Materials Science and Engineering A311*, pp. 121-127, 2001.
- [17] M. Sagawa, S. Hirosawa, H. Yamamoto, S. Fujimura dan Y. Matsuura, "Nd-Fe-B permanent magnet materials," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 26, no. 6, pp. 785-800, 1987.
- [18] W. Moa, L. Zhang, Q. Zhen Liu, A. Shan, J. Wua, dan M. Komuro," Dependence of the crystal structure of the Nd-rich phase on oxygen content in an Nd-Fe-B sintered magnet," *Scripta Materialia*, vol. 59, issue 2, pp. 179-182, 2008.
- [19] A. Rezaei, G. Nabiyouni, dan D. Ghanbari, "Photo-catalyst and magnetic investigation of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>-ZnO nanoparticles and nanocomposites," *J Mater Sci: Mater Electron*, vol. 27, pp. 11339-11352, 2016.
- [20] S. N. Ezzati Mirhashemi, M. Rabbani, S. M. H. Ezzati Mirhashemi, R. Rahimi, E. Asadi, dan S. Azodi-Deilami, "Conducting, magnetic polyaniline/Ba<sub>0.25</sub>Sr<sub>0.75</sub>Fe<sub>11</sub>(Ni<sub>0.5</sub>Mn<sub>0.5</sub>)O<sub>19</sub> nanocomposite: fabrication, characterization and application," *Journal of Alloys and*

- Compounds*, vol. 646, pp. 1157-1164, 2015.
- [21] T. Saito, S. Nozaki, dan D. N. Hamane, "Improvement of coercivity in Nd-Fe-B nanocomposite magnets," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 445, pp. 49-52, 2018.
- [22] S. Behrens, dan I. Appel, "Magnetic nanocomposites," *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 39, pp. 89-96, 2016.
- [23] S. Behren, "Mini review: preparation of functional magnetic nano composites and hybrid materials: recent progress and future directions," *Nanoscale*, issue 3, pp. 877-892, 2011.
- [24] Y. Lin, H. Yang, dan Z. Zhu, "Impedance spectroscopy analysis of 0.7BiFeO<sub>3</sub>-0.3BaTiO<sub>3</sub>/BiY<sub>2</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> composites with simultaneously improved magnetization and remnant polarization," *Mater Chem and Phys.*, vol.136, issues 2-3, pp. 286-291, 2012.
- [25] H. Yang, T. Ye, Y. Lin, M. Liu, G. Zhang, dan P. Kang, "Giant enhancement of (BH)<sub>max</sub> in BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>/Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> nanocomposite powders," *Mater. Lett.*, vol. 145, pp. 19-22, 2015.
- [26] A. Manaf, R. A. Buckley, dan H. A. Davies, "New nanocrystalline high remanence Fe-Nd-B alloys by rapid solidification," *J. Magn. Magn. Mate.*, vol. 128, pp. 302-306, 1993.
- [27] D. D. Majumder, dan S. Karan, "Magnetic properties of ceramic nanocomposites, ceramic nanocomposites," *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, pp. 51-91, 2013.
- [28] D. M. Bruls, dan T. H. Evers, "Rapid integrated biosensor for multiplexed immunoassays based on actuated magnetic nanoparticles," *Lab on Chip*, vol. 9, pp. 3504, 2009.
- [29] R. Chen, M. G. Christianse, dan P. Anikeeva, "Maximizing hysteretic losses in magnetic ferrite nanoparticles via model-driven synthesis and materials optimization," *ACS Nano* 7, vol. 10, pp. 8990, 2013.
- [30] F. Choueikani, dan F. Royer, "Magneto-optical waveguides made of cobalt ferrite nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, pp. 051113-051119, 2009.
- [31] S. Varshney, A. Ohlan, dan V. K. Jain, "Synthesis of ferro fluid based nano architected polypyrrole composites and its application for electromagnetic shielding," *Mate. Chem. Phys.*, vol. 143, issue 2, pp. 806-813, 2014.
- [32] R. C. Pullar, "Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 57, pp. 1191, 2012.
- [33] H. Nikmanesh, dan M. Moradi, "Effect of multi dopant barium hexaferrite nanoparticles on the structural, magnetic, and X-Ku bands microwave absorption properties," *J. Alloys Compd.*, vol. 708, pp. 99, 2017.
- [34] E.F. Kneller, dan R. Hawig, "The exchange-spring magnet: A new material principle for permanent magnets," *IEEE Trans. Magn*, vol.27, pp. 3588-3601, 1991.
- [35] S. Pan, "Rare earth permanent magnet alloys high temperature phase transformation," Springer Heidelberg Dordrecht London New York, ISBN 978-3-642-36388-7 (eBook), *Metallurgical Industry Press*, pp. 27-93, 2013.
- [36] I. Sobhani, A. Athaie, M. Ijafi, dan Z. Sadighi, "Synthesis of nickel/Ba-hexaferrite magnetic nano-composite via mechanical alloying route," *Advanced Materials Research*, vol. 829, pp. 520-524, 2014.
- [37] H. Yang, T. Ye, Y. Lin, dan M. Liu, "Preparation and microwave absorption property of graphene/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite," *Applied Surface Science*, vol. 357, pp. 1289-1293, 2015.
- [38] Susilawati, A. Doyan, dan Khalilurrahman, "Synthesis and characterization of barium hexaferrite with manganese (Mn) doping material as anti-radar," *AIP Conference Proceedings* 1801, 2017, pp. 040007-0400012.
- [39] H. Tian, Y. Zhang, J. Han, Z. Xu, X. Zhang, S. Liu, C. Wang, Y. Yang, L. Han, dan J. Yang, "Synergetic crystallization in a Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B/ $\alpha$ -Fe nanocomposite under electron beam

- exposure conditions,” *Nanoscale*, vol. 8, issue 42, pp. 18221-18227, 2016.
- [40] Y. P. Jin, M. Hu, dan J. Gao, “Preparation and crystallization of  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$  permanent magnetic nanomaterial by mechanical milling,” *Advanced Materials Research*, vol. 486, pp. 70-74, 2012.
- [41] G. Sreenivasulu, R. Gopalan, V. Chandrasekaran, dan B. S. Murty, “Spark plasma sintered  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}\text{-FeCo}$  nanocomposite permanent magnets synthesized by high energy ball milling,” *IOP Publishing, Nanotechnology*, vol. 19, no. 33, 2008, pp. 1-7.
- [42] Y. Wang, Y. Huang, dan Q. Wang, “Preparation and magnetic properties of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$  nanocomposite ferrite,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 324, pp. 3024-3028, 2012.
- [43] H. Nikmanesh, M. Moradi, dan P. Kameli, “Effects of annealing temperature on exchange spring behavior of barium hexaferrite/nickel zinc ferrite nanocomposites,” *J. Elec. Mater.*, vol. 46, issue 10, pp. 5933-5941, 2017.
- [44] F. Yakuphanoglu, A. Ghamdi, dan F. Tantawy, “Electromagnetic interference shielding properties of nanocomposites for commercial electronic devices,” *Microsyst Technol*, vol. 21, pp. 2397-2405, 2015.
- [45] M. H. Nazari, “Effects of processing conditions on the characteristics of nanocrystalline barium hexaferrite prepared by mechanical alloying method,” *International Journal of Modern Physics B*, vol. 22, no. 18 & 19, pp. 3127-3132, 2008.
- [46] G. C. Hadjipanayis, “Nanophase hard magnets,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 200, pp. 373-91, 1999.
- [47] L. H. Lewis, J. Felix, dan Villacorta, “Perspectives on permanent magnetic materials for energy conversion and power generation,” *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 44, pp. 2-20, 2012.
- [48] V. Skumryev, S. Stoyanov, Y. Zhang, dan G. Hadjipanayis, “Beating the superparamagnetic limit with exchange bias,” *Nature*, vol. 423, pp. 850-853, 2003.
- [49] T. X. Nguyen, dan O. K. Vuong, “Preparation and magnetic properties of  $\text{MnBi/Co}$  nanocomposite magnets,” *J. Elec. Mater.*, vol. 46, issue 6, pp. 3359-3366, 2017.
- [50] X. Rui, Z. Sun, L. Yue, Y. Xu, D. J. Sellmyer, Z. Liu, dan D. J. Miller, “High energy product exchange-spring  $\text{FePt/Fe}$  cluster nanocomposite permanent magnets,” *J. Magn. Magn. Mater, and J.E. Shield: J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 305, pp. 76- 82, 2006.
- [51] H. Feng, D. Bai, L. Tan, N. Chen, dan Y. Wang, “Preparation and microwave-absorbing property of  $\text{EP/BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{PANI}$  composites,” *J. Magn. Magn. Mater*, vol. 433, pp. 1-7, 2012.
- [52] H. Yang, T. Ye, dan Y. Lin, “Microwave absorbing properties of the ferrite composites based on graphene,” *J. Alloys Compd.*, vol. 683, pp. 567-574, 2016.
- [53] H. Yang, M. Liu, Y. Lin dan Y. Yang, “Simultaneous enhancements of remanence and  $(\text{BH})_{\text{max}}$  in  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanocomposite powders,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 631, pp. 335-339, 2015.
- [54] H. Yang, T. Ye, Y. Lin, dan M. Liu, “Exchange coupling behavior and microwave absorbing property of the hard/soft ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ) ferrites based on polyaniline,” *Synthetic Metals* vol. 210, pp. 245-250, 2015.
- [55] Magnetic materials producer association, “Standard specifications for permanent magnet materials,” *mmpa standard No. 0100-00*, pp. 1-28, 2017.
- [56] F. Choueikani, dan F. Royer, “Magneto-optical waveguides made of cobalt ferrite nanoparticles,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, pp. 051113, 2009.
- [57] S. Varshney, A. Ohlan, dan V. K. Jain, “Synthesis of ferrofluid based nanoarchitected polypyrrole composites and its application for electromagnetic shielding,” *Mate. Chem. Phys*, vol. 143, issue 2, pp. 806-813, 2014.
- [58] R. C. Pullar, “Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics,”

- Prog. Mater. Sci.*, vol. 57, pp. 1191, 2012.
- [59] H. Nikmanesh, dan M. Moradi, "Effect of multi dopant barium hexaferrite nanoparticles on the structural, magnetic, and X-Ku bands microwave absorption properties," *J. Alloys Compd.*, vol. 708, pp. 99, 2017.
- [60] V. Pop, "The influence of milling and annealing on the structural and magnetic behavior of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B/ $\alpha$ -Fe magnetic nanocomposite," *J Alloys Compd.*, vol. 581, pp. 821-827, 2013.
- [61] Y. Su, "Effects of magnetic field heat treatment on Sm-Co/ $\alpha$ -Fe nanocomposite permanent magnetic materials prepared by high energy ball milling," *J Alloys Compd.*, vol. 647, pp. 375-379, 2015.
- [62] P. Chowdhury, "Structural and magnetic properties of SmCo<sub>5</sub>/Co exchange coupled nanocomposite thin films," *J. Magn Magn. Mater.*, vol. 342, pp. 74-79, 2013.
- [63] E. E. Fullerton, J. S. Jiang, dan S. D. Bader, "Hard/soft magnetic heterostructures: model exchange-spring magnets," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* vol. 200, issue 1-3, pp. 392-404, 1999.
- [64] E. F. Kneller, dan Reinkeras Hawig, "The exchange-spring magnet: a new material principle for permanent magnets," *IEEE Trans Magn.*, vol. 27, no. 4, pp. 3588-3600, 1991.
- [65] R. Coehoorn, D. B. de Mooij dan C. de Waard, "Meltspun permanent magnet materials containing Fe<sub>3</sub>B as the main phase," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 80, issue 1, pp. 101-104, 1989.
- [66] F. Choueikani, dan F. Royer, "Magneto-optical waveguides made of cobalt ferrite nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, pp. 051113, 2009.
- [67] S. Varshney, A. Ohlan, dan V. K. Jain, "Synthesis of ferrofluid based nanoarchitected polypyrrole composites and its application for electromagnetic shielding," *Mate. Chem. Phys.*, vol. 143, issue 2, pp. 806-813, 2014.
- [68] R. C. Pullar, "Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 57, pp. 1191, 2012.
- [69] R. Skomski dan J. M. D. Coey, "Giant energy product in nanostructured two-phase magnets," *Phys.Rev. B*, vol. 48, pp. 15812-16, 1993.
- [70] Young magnet, "Neodymium magnets," Shanghai Young Magnet Co., Ltd. [Online] Available: <http://www.ndfebmagnet.net/ndfeb-magnets/sintered-ndfeb-magnets/neodymium-magnets.html>, 2017. [Accessed: 05, Jan, 2018].
- [71] Y. Wang, Y. Huang, dan Q. Wang, "Preparation and magnetic properties of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>/Ni<sub>0.8</sub>Zn<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite ferrite," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 324, pp. 3024-3028, 2012.
- [72] V. Skumryev, S. Stoyanov, Y. Zhang, dan G. Hadjipanayis, "Beating the superparamagnetic limit with exchange bias," *Nature*, vol. 423, pp. 850-853, 2003.
- [73] T. X. Nguyen, dan O. K. Vuong, "Preparation and magnetic properties of MnBi/Co nanocomposite magnets," *J. Elec. Mater.*, vol. 46, issue 6, pp. 3359-3366, 2017.
- [74] X. Rui, Z. Sun, L. Yue, Y. Xu, D. J. Sellmyer, Z. Liu, dan D. J. Miller, "High energy product exchange-spring FePt/Fe cluster nanocomposite permanent magnets," *J. Magn. Magn. Mater.*, and J.E. Shield: *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 305, pp. 76-82, 2006.
- [75] W. H. Meiklejohn, dan C. P. Bean, "New magnetic anisotropy," *Phys. Rev.*, vol. 105, pp. 1413-1414, 1957.
- [76] J. S. Jiang, dan A. Inomata, "Magnetic stability in exchange-spring and exchange-bias systems after multiple switching cycles," *J. Appl. Phys.*, vol. 89, pp. 6817-6819, 2001.
- [77] A. Manaf, M. Leonowicz, H. A. Davies dan R. A. Buckley, "Nanocrystalline Fe-Nd-B type permanent magnet materials with enhanced remanence," *Materials Letters*, vol. 13, pp. 194-198, 1992.
- [78] A. Manaf, R. A. Buckley dan H. A. Davies, "New nanocrystalline high remanence Fe-Nd-B Alloys by rapid



- solidification,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 128, pp. 307-312, 1993.
- [79] A. Quesada, F. Rubio-Marcos, J. F. Marco, F. J. Mompean, M. García-Hernández, dan J. F. Fernández, “On the origin of remanence enhancement in exchange-uncoupled  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ -based composites,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, pp. 2024051-2024055, 2014.
- [80] C. Pahwa, S. K. Mahadevan, dan S. B. Narang, “Structural, magnetic and microwave properties of exchange coupled and nonexchange coupled  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{NiFe}_2\text{O}_4$  nanocomposites,” *J. Alloys Compd.*, vol. 725, pp. 1175-1181, 2017.
- [81] F. Song, X. Shen, dan M. Liu, “Microstructure, magnetic properties and exchange-coupling interactions for one-dimensional soft/hard ferrite nanofibers,” *J. Solid State Chem.*, vol. 185, pp. 31-36, 2012.
- [82] D. Primca, dan D. Makoveca, “Composite nanoplatelets combining soft-magnetic iron oxide with hard-magnetic barium hexaferrite,” *Nanoscale*, vol. 7, pp. 2688-2697, 2015.
- [83] S. M. Radmanes dan S. A. Seyyed Ebrahimi, “Examination the grain size dependence of exchange coupling in oxide-based  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_9/\text{Ni}_{0.7}\text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$  nanocomposites,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 26, pp. 2411, 2013.
- [84] H. Yang, T. Y. Ying, L. Miao, dan L. P. Kang, “Enhancements of  $(\text{BH})_{\text{max}}$  and remanence in  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{CaFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanocomposite powders by exchange-coupling mechanism,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 171, pp. 27-32, 2016.
- [85] G. J. Long, dan F. Grandjean, “Supermagnets, Hard Magnetic Materials,” *Springer*, vol. 331, pp. 1-844, 1991.
- [86] E. E. Fullerton, J. S. Jiang, dan M. Grimsditch, “Exchange-spring behavior in epitaxial hard/soft magnetic bilayers,” *Phys. Rev. B*, vol. 58, pp. 193-200, 1998.
- [87] R. Fischer, T. Leineweber, dan H. Kronmüller, “Fundamental magnetization processes in nanoscaled composite permanent magnets,” *Phys. Rev. B*, vol. 57, pp. 723-732, 1998.
- [88] J. S. Jiang dan S. D. Bader, “Rational design of the exchange-spring permanent magnet,” *J. Phys.: Condens. Matter.*, vol. 26, pp.1-9, 2014.
- [89] P. Gubin, *Magnetic Nanoparticles*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, pp.1-23, 2009.
- [90] A. Shanmugavani, R. Kalai, dan S. S. Layek, “Influence of pH and fuels on the combustion synthesis, structural, morphological, electrical and magnetic properties of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles,” *Materials Research Bulletin*, vol. 71, pp. 122-132, 2015.
- [91] H. Y. Zhou, dan W. Yu, “Preparation and enhanced thermoelectric properties of p-Type  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{CeFe}_3\text{CoSb}_{12}$  magnetic nanocomposite materials,” *J. Elec. Mate.*, vol. 43, issue. 6, pp. 1498-1504, 2014.
- [92] H. Yang, T. Ye, Y. Lin, M. Liu, P. Kang dan G. Zhang, “Enhancements of  $(\text{BH})_{\text{max}}$  and remanence in  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{CaFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanocomposite powders by exchange-coupling mechanism,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 171, pp.27-32, 2016.
- [93] A. Rezaei, J. Saffari, G. Nabiyouni, dan D. Ghanbari, “Magnetic and photocatalyst  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}\text{-ZnO}$ : Hydrothermal preparation of barium ferrite nanoparticles and hexagonal zinc oxide nanostructures,” *J Mater Sci: Mater. Electron*, vol. 28, issue 9, pp. 6607-6618, 2017.
- [94] N. Shiri, A. Amirabadizadeh, dan A. Ghasemi, “Influence of carbon nanotubes on structural, magnetic and electromagnetic characteristics of Mn-Mg-Ti-Zr substituted barium hexaferrite nanoparticles,” *J. Alloys Compd.*, vol. 690, pp. 759-764, 2016.
- [95] H. Yang, “Preparations and microwave absorption property of graphene/ $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanocomposite,” *Applied Surface Scien.*, vol. 357, pp. 1289-1293, 2015.
- [96] A. Grabias, dan M. Kopcewicz, “Influence of cobalt content on the structure and keras magnetic properties

- of nanocomposite (Fe,Co)-Pt-B alloys,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 434, pp. 126-134, 2017.
- [97] Y. Su, H. Su, dan Y. Zhu, ”Effects of magnetic field heat treatment on Sm-Co/ $\alpha$ -Fe nanocomposite permanent magnetic materials prepared by high energy ball milling,” *J Alloys Compd.*, vol. 647, pp. 375-379, 2015.
- [98] H. Tian, dan Y. Zhang, “Synergetic crystallization in a Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B/ $\alpha$ -Fe nanocomposite under electron beam exposure conditions,” *Nanoscale*, vol. 8, issue 42, pp. 18221-18227, 2016.
- [99] T. X. Nguyen, dan O. K. Vuong, “Preparation and magnetic properties of MnBi/Co nanocomposite magnets,” *J. Elec. Mater.*, vol. 46, issue 6, pp. 3359-3366, 2017.
- [100] Q. Ma, “Phase composition and magnetic properties in nanocrystalline permanent magnets based on misch metal,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 438, pp. 181-184, 2017.
- [101] J. Chen, dan H. Javaheri, “Synthesis, characterization and applications of nanoparticles,” *Fabrication and Self-Assembly of Nanobiomaterials*, vol. 1, pp. 1-27, 2016.
- [102] C. Raab, M. Simkó, U. Fiedeler, M. Nentwich, dan A. Gzásó., “Production of nanoparticles and nanomaterials,” *ITA Nanotrust Dossiers*, vol. 6, pp. 1-4, 2011.
- [103] Azo Materials, “Using the high energy ball mill emax to test a new ppproach to mechanical alloying,” *RETSCHE GmbH*. [Online] Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=14342>, 2017. [Accessed: 10, Jan, 2018].
- [104] J. A. Blackman, “Metallic nanoparticles,” *Handbook of Metal Physics*, vol. 5, pp. 1-385, 2008.