

POTENSI BAHAN LOKAL DALAM PENGEMBANGAN MATERIAL MAGNET UNTUK INDUSTRI DI INDONESIA

Azwar Manaf

*Departemen Fisika FMIPA, Universitas Indonesia
Kampus UI, Depok 16424*

ABSTRAK

POTENSI BAHAN LOKAL DALAM PENGEMBANGAN MATERIAL MAGNET UNTUK INDUSTRI DI INDONESIA. Besi, *cobalt*, Nikel dan *rare earth* antara lain adalah bahan yang berperan penting dalam industri logam, listrik, elektronik, keramik termasuk industri magnet. Logam-logam ini tersedia luas di tanah air dalam bentuk mineral. Sebagian besar dari sumber ini belum mendapatkan sentuhan eksplorasi yang komprehensif sehingga kurang memiliki nilai tambah dan cenderung di eksploitasi apa adanya. Sebenarnya, besi, kobalt, nikel dan logam tanah jarang adalah material utama dalam industri material magnet. Besi misalnya, baik dalam bentuk senyawa oksidanya maupun dalam bentuk logam murni dapat digunakan untuk pembuatan magnet keramik yang aplikasinya masih mendominasi produk-produk berbagai industri. Demikian juga logam tanah jarang seperti Sm, Nd, Dy dan Pr bersama dengan besi dan *cobalt* dapat digunakan untuk pembuatan magnet permanen yang memiliki energi ultra tinggi. Dalam makalah ini dibicarakan tentang proses teknologi penggunaan bahan lokal yang berpotensi untuk aplikasi material magnetik. Dua proses utama masing-masing proses konvensional *powder metallurgy* dan *rapid solidification* yang kini masih menjadi dominasi proses dalam industri magnet dibicarakan detail. Sifat sifat kemagnetan yang diperoleh dari kedua proses dibicarakan dalam kaitan perbandingan nilai plus dan minusnya. Teknologi proses perolehan material untuk industri magnet dari mineral alam juga dibicarakan.

Kata kunci : *magnetic materials, rare earth, powder metallurgy, rapid solidification, mineral ores, recovery procesing.*

ABSTRACT

THE POTENTIAL OF LOCAL MATERIALS IN THE DEVELOPMENT OF MAGNETIC MATERIALS FOR INDUSTRY IN INDONESIA. Iron, cobalt, nickel and rare earth are material of primary important in metals, electric, electronic, ceramic industries including magnets. These materials are largely available in form of mineral ores in the country. Unfortunately, the resources are not yet explored comprehensively and tend to be exploited as it is. Thus, less added values may be gained. In the magnet industry, the above mentioned materials are the main constitute components. For instance, Iron either in form of oxides or pure metals may be employed for ceramic magnets production in which the applications can be found in many products of various industry. On the other hand, rare earth metals like Sm, Nd, Dy and Pr along with iron and cobalt can be used for the production of ultra high energy permanent magnets. In this paper, technology processing for magnets fabrication is discussed. Especially, two main processes respectively conventional powder metallurgy and rapid solidification which are currently employed in the production discussed in detail. Magnetic properties gained from respective technology are compared. Recovery processing technology of natural minerals for magnet industries feedstock is also briefly discussed.

Key words : *magnetic materials, rare earth, powder metallurgy, rapid solidification, mineral ores, recovery procesing.*

PENDAHULUAN

Material magnetik termasuk material yang penting dalam aplikasi pada banyak industri dan keteknikan. Bersama dengan material teknik lainnya, material magnetik diperlukan didalam produk-produk industri terutama yang memerlukan efek interaksi listrik-magnet. Pada dasarnya material magnetik dikelompokkan ke dalam dua kelompok aplikasi besar

masing-masing sebagai magnet permanen (*hard permanent magnets*) dan magnet tidak permanen (*soft permanent magnets*). Magnet permanen sesuai dengan namanya, sifat kemagnetan tetap melekat pada material sekalipun proses magnetisasi telah selesai. Sedangkan magnet tidak permanen bersifat sebaliknya yaitu sifat kemagnetan hilang setelah proses

magnetisasi dihentikan. Jelaslah dua karakteristik berbeda ini membedakan kedua kelompok material magnetik ini dalam aplikasinya. Magnet tidak permanen digunakan pada produk-produk tertentu yang memerlukan perubahan nilai magnetisasi atau magnetisasi yang periodik seperti *cores* untuk *power transformers*, stator dan rotor pada generator-generator dan motor-motor listrik. Magnet permanen pada dasarnya digunakan pada produk-produk teknologi yang memerlukan medan magnet yang tetap.

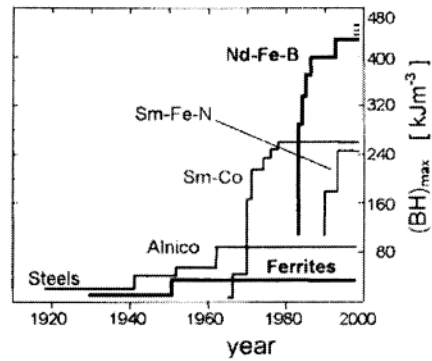
Bahan dasar untuk membangkitkan medan magnet yang tinggi adalah berasal dari logam-logam transisi seperti Fe, Ni dan Co karena atom-atom logam transisi memiliki momen magnet persatuan volume sel unit yang relatif tinggi. Misalnya α -Fe memiliki magnetisasi total tertinggi yaitu $1,71 \text{ MA}\cdot\text{m}^{-1}$ ($\sim 2,2 \text{ T}$) bersifat feromagnet[1]. Demikian juga dengan Co, magnetisasi totalnya mencapai $1,42 \text{ MA}\cdot\text{m}^{-1}$ ($\sim 1,8 \text{ T}$) [1]. Sifat feromagnet dan nilai magnetisasi total yang tinggi ini menjadikan logam-logam transisi seperti ini potensial untuk aplikasi magnet.

Namun demikian, untuk memperoleh sifat kemagnetan yang optimal dan sesuai dengan aplikasinya baik sebagai *soft magnets* maupun *hard magnets* diperlukan perbaikan sifat-sifat fisika lainnya seperti konstanta anisotropi kristal (*magnetocrystalline anisotropy constant*).

Nilai konstanta yang tinggi memberikan peluang untuk mendapatkan medan anisotropi dan koersifitas yang tinggi dan tepat untuk aplikasi magnet permanen. Sebaliknya, nilai konstanta anisotropi yang rendah memberikan peluang untuk mendapatkan koersivitas dan rugi histeresis yang rendah dan tepat untuk aplikasi magnet tidak permanen. Dengan perkataan lain, logam-logam transisi perlu bersenyawa dengan unsur-unsur yang lain sehingga membentuk senyawa yang potensial sebagai material magnetik.

MATERIAL MAGNET PERMANEN

Dalam 100 tahun belakangan, berbagai kelas magnet permanen telah dikembangkan oleh para peneliti (Gambar 1)[1]. Di awal abad 19 baja martensit digunakan sebagai magnet permanen. Magnet baja martensit dengan kandungan *cobalt* ini merupakan magnet terbaik pada masa tersebut [2]. Namun dalam beberapa puluh tahun belakangan, telah terjadi perkembangan yang pesat dalam penelitian dibidang magnet permanen sehingga sejumlah fasa magnetik baru dengan energi yang lebih tinggi telah ditemukan. Magnet Alnico misalnya, pertama sekali diperkenalkan pada tahun 1930-an, terdiri dari sejumlah elemen logam transisi (Fe, Co, Ni) memiliki nilai $(BH)_{\text{max}}$ dua puluh kali lipat magnet baja. Pada tahun 1950-an, dikembangkan magnet permanen kelas keramik dengan formula $\text{MO}(\text{Fe}_2\text{O}_3)_6$ dimana M adalah Barium atau Stronsium yang kemudian



Gambar 1. Material magnet dalam 100 tahun terakhir[1]

dikenal sebagai magnet ferite. Bila dibandingkan dengan magnet Alnico, magnet ferite memiliki energi dan remanen yang lebih rendah tetapi memiliki koersivitas yang jauh lebih tinggi.

Perkembangan dramatis dibidang magnet permanen terjadi pada tahun 1970-an. Untuk pertama sekali ditemukan magnet kelas logam tanah jarang (*rare earth permanent magnets*). Fasa magnetik SmCo_5 dan $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ merupakan fasa magnetik yang penting dari fasa-fasa RE-Co (*RE = rare earth elements*) yang mungkin. Kedua fasa magnetik tersebut memiliki polarisasi total, J_s dan medan anisotropi, H_A yang sangat tinggi sehingga berpotensi memiliki remanen dan

Tabel 1. Sifat kemagnetan intrinsik fasa magnetik beberapa magnet permanen[3]

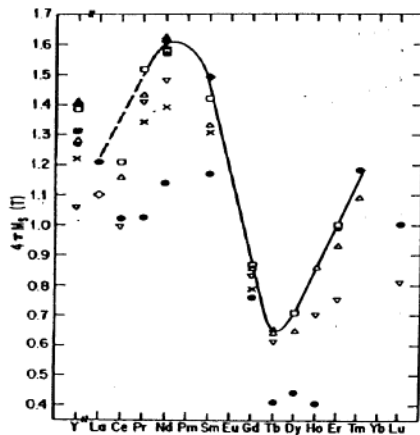
FASA	T_C (°C)	J_s (T)	K_1 (MJ·m ⁻³)	$(BH)_{\text{max}}$ (kJ·m ⁻³)
Steel	770	2,15	0,046	2
AlNiCo	860	1,20	0,04	45
Ba Fe ₁₂ O ₁₉	450	0,47	0,30	23
SrFe ₁₂ O ₁₉	450	0,48	-	46
SmCo ₅	727	1,06	17	180
Sm ₂ Co ₁₇	916	1,25	3,90	260
Nd ₂ Fe ₁₄ B	312	1,61	4,3	512
Sm ₂ Fe ₁₇ N ₃	477	1,53	8,9	250

K_1 : konstanta anisotropi. J_s : Magnetisasi total. T_C : temperatur Curie

koersivitas yang tinggi, sebagai keharusan untuk mendapatkan magnet permanen dengan nilai $(BH)_{\text{max}}$ yang tinggi (lihat Tabel 1 tentang sifat kemagnetan intrinsik fasa-fasa magnetik magnet permanen).

Eksplorasi magnet kelas ini mengalami keterbatasan dikarenakan harga Co yang sangat mahal serta ketersediaan unsur Sm yang terbatas di bumi sehingga popularitas magnet ini pada kalangan industri pemakai menjadi menurun. Namun ditahun 1980-an, ditemukan magnet permanen logam tanah jarang baru berbasis fasa magnetik $\text{RE}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ yang ditemukan oleh dua kelompok peneliti berbeda masing-masing kelompok peneliti dari Sumitomo Special Metals [4] dan General Motors [5].

Hasil observasi kritis yang dilakukan oleh Livingston [6] sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 2 bahwa semua unsur RE dapat membentuk fasa



Gambar 2. Magnetisasi total fasa RE₂Fe₁₄B [6]

RE₂Fe₁₄B tetapi dari sederetan fasa magnetik yang mungkin dari kelas ini, fasa Nd₂Fe₁₄B yang sangat berpeluang untuk memiliki energi yang paling tinggi.

PERKEMBANGAN ARAH PENELITIAN MATERIAL MAGNET PERMANEN

Pengembangan material magnet permanen yang berbasis logam tanah jarang (*rare earth*) terutama kaya dengan unsur Fe (*Fe-rich*) dan memiliki sifat kemagnetan unggul masih terus dilakukan oleh banyak peneliti bahan magnet [7-9]. Demikian juga dengan alloy magnetik berbasis logam tanah jarang (*Rare earth*) sistem RE-TM-B; Sm-Co [10] dan tidak terkecuali sistem keramik MO.6 Fe₂O₃ (M=Ba atau Sr) [11,12]. Supremasi rekayasa proses preparasi baik itu teknik konvensional seperti *Powder Metallurgy* [5] maupun teknik modern seperti *Rapid Solidification* telah mampu menghasilkan sifat kemagnetan ekstrinsik yang mencapai 90 % hingga 100 % nilai intrinsiknya. Hal ini menunjukkan bahwa seolah-olah jenis-jenis senyawa magnetik baru menjadi sangat mendesak untuk dikembangkan.

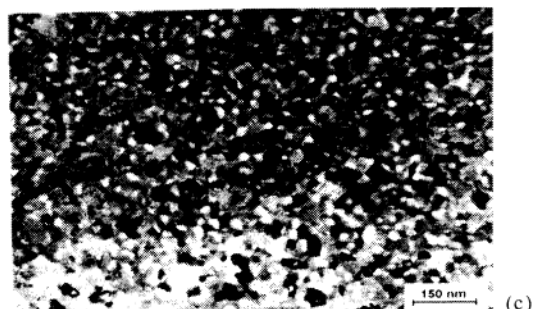
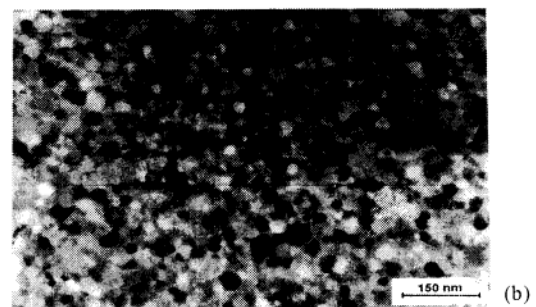
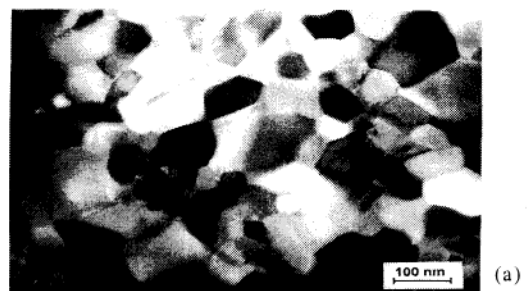
Namun, penulis mengamati bahwa berbeda dengan kegiatan penelitian pada era milenium ke dua dimana sebagaimana diuraikan di atas bahwa arah pengembangan penelitian pada lebih dari 100 tahun di belakang adalah terfokus pada penemuan senyawa-senyawa baru. Ternyata tidak demikian halnya pada awal milenium ke tiga dimana berdasarkan pengamatan melalui berbagai publikasi [13-16], arah pengembangan penelitian bahan magnet lebih terfokus pada rekayasa struktur dari material magnetik yang pernah dikembangkan sebelumnya yaitu penerapan *nanotechnology* dalam preparasi material magnetik.

Pada Gambar 3 diperlihatkan contoh fotomikro hasil rekayasa struktur dari sistem material yang sama (Nd-Fe-B) dimana teknologi maju telah mampu menghasilkan material dengan kristal mikro menjadi kristal nano (*nanocrystalline*) dan kristal nano dengan struktur komposit (*nanocomposite*). Sebagai penerapan

dari teknik rekayasa moderen ini telah membuka peluang baru untuk memperoleh magnet dengan sifat yang sangat unggul misalnya saja fasa magnetik Nd₂Fe₁₄B yang memiliki nilai *maximum energy product*, (BH)_{max} sebesar 512 kJ.m⁻³ berpeluang di rekayasa untuk menghasilkan magnet dengan nilai (BH)_{max} sebesar ~ 1 MJ.m⁻³ [17]. Implikasi lain dari penerapan teknologi tersebut adalah diperlukannya pemahaman baru tentang fenomena *nanomagnetism* material yang kini telah menarik banyak perhatian para peneliti teori.

PROSES POWDER METALLURGY

Proses *Powder Metallurgy* (PM) merupakan proses konvensional yang utama digunakan dalam pembuatan magnet permanen pada skala industri. Baik magnet keramik ferite maupun logam tanah jarang dapat buat dengan proses ini. Secara umum, tahapan proses PM terdiri dari tahapan preparasi *alloy* dengan komposisi nominal yang direncanakan. Bongkahan *alloy* dipecah menjadi ukuran beberapa millimeter dalam tahapan *pre-milling* dan dilanjutkan dengan penghalusan menjadi serbuk berukuran *single domain particle* pada tahapan *milling*.



Gambar 3. Fotomikro dari material dengan (a) kristal skala mikro, (b) nanokristal dan (c) struktur nanokomposit

Setiap serbuk dengan demikian adalah sebuah kristal tunggal. Serbuk halus ini kemudian dipadatkan didalam suatu cetakan pada tahapan *compaction* untuk menghasilkan bakalan dengan densitas ~ 75 % hingga 80 % densitas penuh. Untuk membangkitkan sifat anisotropi magnet permanen, maka proses pemadatan pada tahapan ini harus dilakukan dibawah pengaruh medan magnet. Sampel magnet dengan densitas penuh dapat dicapai dengan proses *sintering* dan dilanjutkan dengan proses *annealing* untuk menghasilkan strukturmikro yang tepat. Tahapan proses berikutnya adalah *machining* agar dicapai bentuk magnet permanen dengan dimensi yang akurat. Sifat permanen kemagnetan magnet permanen diperoleh dalam tahapan akhir yaitu *magnetizing*. Magnet permanen yang dipersiapkan dengan teknik ini kemudian juga dikenal sebagai magnet *sinter* (*sintered permanent magnets*).

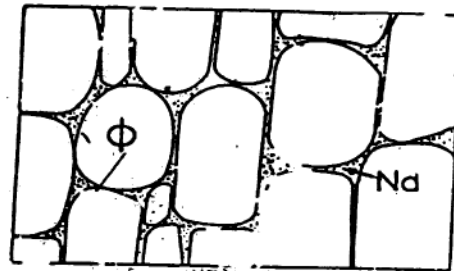
Magnet *sinter* Nd-Fe-B pertama dibuat oleh Sumitomo Special Metals (SSM) pada tahun 1984. SSM menggunakan komposisi kaya dengan Nd yaitu $Nd_{15}Fe_{77}B_8$ (at.%) dan menghasilkan magnet permanen dengan energi tertinggi pada saat itu yaitu ~ 320 kJ.m^{-3} dengan remanen dan koersivitas masing-masing sebesar 1,23 T dan 960 kA.m^{-1} [4]. Melalui penelitian lanjut, besarnya $(BH)_{\text{max}}$ yang berhasil dikembangkan telah mencapai ~ 400 kJ.m^{-3} melalui perbaikan derajat pengarahan selama penekanan di bawah medan magnet [18]. Untuk memperoleh magnet dengan energi yang ditingkatkan tersebut memerlukan perbaikan proses preparasi seperti misalnya pengarahan sumbu mudah (*easy axes*) kristal $Nd_2Fe_{14}B$ pada tahapan *compaction* maupun perbaikan komposisi *alloy* serta strukturmikro.

Idealnya strukturmikro magnet *sinter* Nd-Fe-B diharapkan seperti terlihat pada Gambar 3, dengan fraksi fasa utama yang optimal dan fasa batas butir *Nd-rich* yang berperan sebagai isolator untuk menghindari interaksi antar butir (*grain exchange interaction*). Fasa utama diharapkan berukuran sama dengan ukuran *single domain particle* yaitu untuk fasa $Nd_2Fe_{14}B$ sekitar 0,3 μm [19] maka dengan strukturmikro yang demikian magnetisasi balik secara teori terjadi dengan rotasi koheren pada medan magnet yang sama dengan medan anisotropi fasa utama. Dengan perkataan lain, koersivitas magnet yang dihasilkan secara prinsip sangat tinggi. Kelemahan dari magnet *sinter* yang dipersiapkan melalui proses ini adalah mengingat tingginya kandungan Nd sehingga menghasilkan fasa kaya Nd, maka magnet ini mudah terserang korosi.

PROSES RAPID SOLIDIFICATION

Salah satu teknologi proses *rapid solidification* untuk memproduksi material magnet permanen logam tanah jarang adalah *melt spinning* yang pertama sekali diperkenalkan oleh Croat et.al. [1] Secara skematik, proses *melt spinning* ini diberikan pada Gambar 4. Proses ini menghasilkan pita-pita *alloy* dengan butir-butir kristal

magnetik yang sangat halus mencapai ukuran kristal partikel berdomain tunggal (*single domain particle*). Teknik ini juga mampu menghasilkan pita *alloy* dengan struktur amorf sehingga dengan proses pengelasan dapat dihasilkan strukturmikro yang direncanakan dari ukuran berskala nanometer (*nanostructure*) sampai skala mikrometer (lihat Gambar 3). Struktur ini sangat mempengaruhi sifat-sifat kemagnetan dan bahkan memberikan efek diluar prediksi teori klasik magnet permanen Stoner-Wohlfarth [19] dimana interaksi antar butir sangat halus meningkatkan remanen magnetisasi pita *alloy* diatas nilai teori baik untuk material Nd-Fe-B dengan fasa tunggal maupun material Nd-Fe-B multi-fasa.



Gambar 4. Skematik mikrostruktur ideal magnet berbasis fasa $Nd_2Fe_{14}B$

Secara kristalograpi, pita *alloy* Nd-Fe-B terorientasi random sehingga secara magnetik pita *alloy* bersifat isotrop. Namun dari pita *alloy* Nd-Fe-B dapat dihasilkan baik magnet isotrop maupun anisotrop. Magnet permanen Nd-Fe-B isotrop diperoleh melalui proses lanjut *hot press* fragmen pita *alloy* dalam suatu cetakan pada suhu ~ 700 °C. Pada penekanan disekitar suhu tersebut terjadi deformasi panas sehingga meningkatkan densitas magnet menuju kepada densitas penuh (~ 7,6 gr.cc). Magnet Nd-Fe-B yang dipersiapkan pertama sekali oleh kelompok peneliti General Motors dengan cara ini dilaporkan memiliki $(BH)_{\text{max}} \sim 105 \text{ kJ.m}^{-3}$ yaitu hampir sama dengan nilai teori Stoner-Wohlfarth [20] yaitu ~ 112 kJ.m^{-3} .

Bila fragment pita-pita *alloy* Nd-Fe-B tersebut dicampurkan dengan material perekat seperti polimer maka dihasilkan magnet berperekat polimer. Magnet berperekat pada umumnya bersifat isotrop dan karena penggunaan bahan non magnetik didalam magnet menyebabkan fraksi material magnet didalam magnet berperekat kurang dari 100 % maka sifat kemagnetan dari magnet berperekat lebih rendah dibandingkan dengan magnet Nd-Fe-B *hot press*. Namun magnet memiliki sifat mekanik yang lebih mudah dibentuk sehingga dapat mengakomodasi bentuk-bentuk akhir magnet yang rumit.

Bila magnet Nd-Fe-B *hot press* menjalani proses ulang pada cetakan dengan ukuran yang lebih besar dari ukuran magnet tersebut maka magnet mengalami deformasi pada arah lateral ditandai dengan berkurangnya dimensi panjang dari magnet. Proses ini dikenal sebagai *Die Upset Forging (DUF)*. Proses *DUF*

ini membangkitkan sifat anisotropi karena adanya orientasi arah sumbu mudah fasa $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ sejajar dengan arah penekanan. Magnet Nd-Fe-B dari proses DUF yang pertama dibuat pada tahun 1984 dengan $(\text{BH})_{\text{max}} \sim 320 \text{ kJ.m}^{-3}$ [21]. Nilai ini sama dengan magnet yang dimiliki oleh magnet sinter Nd-Fe-B. Informasi terbaru menunjukkan kelompok peneliti yang sama telah berhasil meningkatkan $(\text{BH})_{\text{max}}$ magnet Nd-Fe-B dari proses DUF menjadi $\sim 400 \text{ kJ.m}^{-3}$ pada skala laboratorium.

MATERIAL MAGNET TIDAK PERMANEN

Sebagaimana yang disinggung terdahulu, material yang sesuai untuk aplikasi magnet tidak permanen adalah terletak pada nilai koersivitasnya yang rendah dan magnetisasi totalnya yang tinggi terutama bila magnet tidak permanen diaplikasikan pada proses magnetisasi berulang seperti *core transformer*. Tentu dalam proses berulang tersebut, tidak diharapkan adanya rugi histeresis yang besar. Magnetisasi total yang tinggi diperlukan agar material dapat menginduksi medan magnet yang tinggi ketika proses magnetisasi berjalan. Aplikasi dari magnet tidak permanen cukup luas terutama terkait dengan aplikasi berbasis induksi seperti pembangkitan tenaga listrik, penerima signal radio, gelombang mikro, sebagai induktor, relay dan elektromagnet.

Magnetisasi total tertinggi yang mungkin diperoleh dari material magnet tidak permanen berasal dari *alloy Fe-Co (Permendur)* suatu larutan padat (*solid solution*) dengan kandungan Co sebesar 35 % hingga 50 % bisa mencapai 2,40 T dan banyak digunakan sebagai *core* untuk elektromagnet. Dengan demikian banyak pengembangan material untuk magnet tidak permanen berbasis Fe dan Co. Misalnya *alloy Fe-Si* sebagai material utama untuk *core transformer* disamping magnetisasinya yang relatif tinggi ($\sim 2,0 \text{ T}$ hingga $2,1 \text{ T}$) juga memiliki rugi listrik total yang relatif rendah ($\sim 0,3 \text{ W.kg}^{-1}$ hingga 3 W.kg^{-1}) [22]. Koersivitas yang relatif rendah untuk mengurangi rugi histeresis bisa diperoleh dari *alloy Fe-Ni (Permalloy)* atau *Fe-Ni-Mo (Supermalloy)*. Koersivitas dari *permalloy* bisa mencapai $0,16 \text{ A.m}^{-1}$ dengan sedikit pengorbanan pada magnetisasi total ($\sim 0,79 \text{ T}$). Berbagai kelas material untuk aplikasi magnet tidak permanen telah dikembangkan termasuk *alloy Metglas*, suatu *alloy* berbasis (Fe,Co,Ni)-(Si,B) dengan struktur mikro berbentuk amorf atau nanokristal. Sifat kemagnetan dari *alloy soft magnet* masih terus dikembangkan agar diperoleh sifat ekstrinsik yang optimal. Berbagai jenis kelas magnet tidak permanen yang telah berhasil dikembangkan adalah antara lain Fe-Si [2], *Permalloy* ($\text{Fe}_{22}\text{Ni}_{78}$), *Supermalloy* ($\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{80}\text{Mo}_5$), *Permendur* ($\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$), *Metglass* ($\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$, $\text{Fe}_{80}\text{P}_{16}\text{C}_3\text{B}$) [22], Finemet

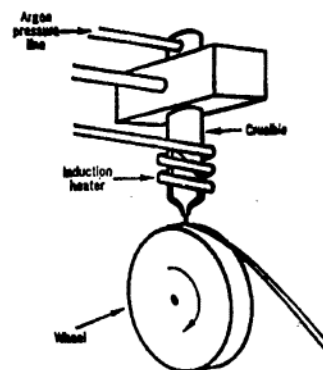
($\text{Fe}_{73}\text{Si}_{13.5}\text{Nb}_3\text{B}_9\text{Cu}$) [23]. Kelas terakhir yang disebutkan adalah material magnetik modern berbasis nanokristal dalam matriks amorf.

BAHAN BAKU LOKAL DAN TEKNOLOGI PROSES

Sumber Fe, Co, Ni, *rare earth* di alam dapat berupa *iron ore*, pasir mineral maupun mineral lainnya yang memerlukan proses lanjut seperti separasi, ekstraksi dan purifikasi. *Iron ore* adalah mineral yang kaya dengan unsur Fe merupakan suatu campuran senyawa oksida besi *magnetite* (Fe_3O_4) dan *hematite* (Fe_2O_3) serta senyawa oksida pengotor lainnya. *Iron ore* digunakan sebagai bahan baku untuk produksi *pig iron* atau *pellet* yang diperlukan sebagai bahan utama untuk pembuatan baja. Dengan demikian *pig iron* dapat diproses lanjut melalui tahapan purifikasi untuk perolehan besi murni.

Sedikit berbeda dengan *iron ore*, *laterite* misalnya, disamping mengandung Fe, juga mengandung Ni disamping senyawa kimia lainnya. Namun karena kandungan Fe pada *laterite* umumnya relatif rendah (38 % hingga 59 %) maka tidak efektif untuk dijadikan *feedstock* untuk pembuatan *pig iron* di *Blast Furnace*. Namun *laterite* di Indonesia telah digunakan sebagai *feedstock* untuk pembuatan ingot Fe-Ni dan menjadi komoditas ekspor pertambangan oleh PT ANTAM dan PT INCO. Hal ini dikarenakan Indonesia termasuk salah satu negara yang memiliki cadangan *laterite* terbesar di dunia. PT Krakatau Steel sedang dalam tahapan *pilot project* untuk memanfaatkan *laterite* dari P. Sebuku (Kalimantan Selatan) sebagai bahan baku untuk pembuatan baja yang lebih tahan terhadap cuaca.

MELT SPINNING TECHNIQUE

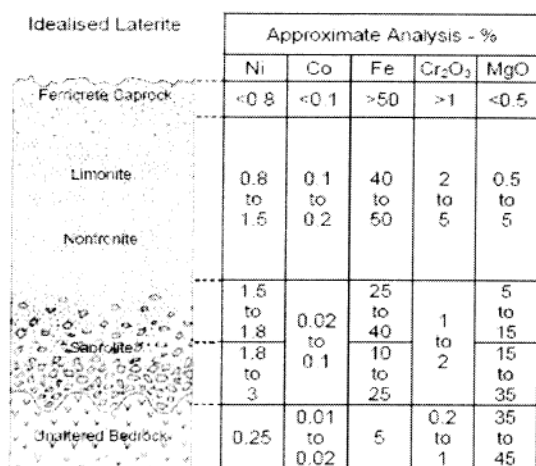


Gambar 5. Proses rapid solidification dengan teknik melt spinning

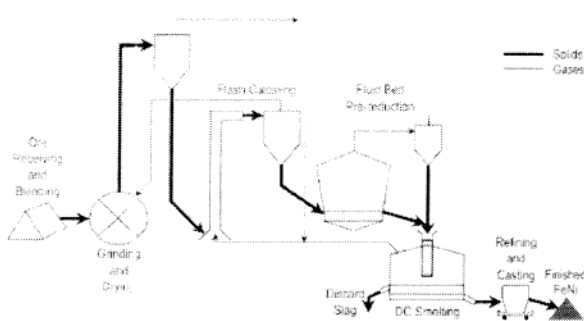
Deposit *laterite* umumnya terdiri dari dua lapisan masing-masing *limonite* dan *Saprolite* dengan ratio Ni-Fe dalam *laterite* meningkat pada lapisan yang lebih dalam (lihat Gambar 5). Kandungan Ni pada *limonite* adalah 0,8 hingga 1,5 (wt.%) sedangkan pada lapisan *saprolite* dapat mencapai 3 wt.%. Karena kandungan Ni yang variatif maka proses ekstraksi Ni dari *laterite* juga

harus selektif agar masih memperoleh nilai tambah. Teknologi proses yang umum diterapkan adalah proses ekstraksi *pyrometallurgy* dan *hidrometallurgy*. Proses pertama tepat untuk *saprolite* yang memiliki ratio Fe/Ni yang rendah. Sedangkan untuk ratio Fe/Ni yang tinggi digunakan proses *hidrometallurgy*. Ekstraksi *pyrometallurgy* melibatkan tahapan pengeringan, reduksi dan peleburan. Produk akhir dari proses perolehan Ni ini adalah berupa ingot Fe-Ni dengan kandungan Ni mencapai 20-50 %.

Pada Gambar 6 diperlihatkan diagram alir proses produksi Fe-Ni melalui metode *pyrometallurgy*. Proses *hidrometallurgy* umumnya melibatkan bahan kimia seperti misalnya *acid leaching*. Meskipun menggunakan energi yang relatif jauh lebih rendah dibanding proses *pyrometallurgy*, namun teknologi ini cenderung meninggalkan limbah sehingga merusak lingkungan. Jadi biaya tambahan diperlukan untuk pengolahan limbah ikutan.



Gambar 6. Deposit laterit di alam dan lapisan limonite dan saprolite



Gambar 7. Proses smelting untuk produksi Fe-Ni[24]

Mineral alam lainnya sebagai sumber untuk perolehan bahan yang diperlukan untuk industri magnet adalah pasir mineral. Pasir besi misalnya disamping memiliki senyawa besi oksida juga terkandung di dalamnya *ilmenite* (FeTiO₃), *titanomagnetite* (Fe₂TiO₄) dan senyawa minoritas lainnya. Di beberapa tempat di Indonesia, pasir mineralnya juga mengandung *xenotime* dan *monazite*, suatu *ore* yang mengandung *rare earth*.

Proses separasi diperlukan untuk memisahkan komponen-komponen yang menyusun pasir mineral. Pemisahan dapat dilaksanakan secara bertahap baik secara fisik, magnetik maupun elektrik. Tahapan lanjut adalah berupa suatu langkah ekstraksi dan purifikasi untuk perolehan unsur atau senyawa dengan tingkat kemurnian yang diperlukan bagi proses pembuatan produk magnet. Jelaslah bahwa dengan cadangan bahan baku lokal yang tersedia sangat memungkinkan untuk dikembangkan lanjut menjadi bahan-bahan yang diperlukan untuk proses pembuatan material magnet dan industri magnet di Indonesia.

KESIMPULAN

Pembahasan yang telah dibicarakan pada tulisan ini diasumsikan telah memberikan gambaran bagi para pembaca didalam mengenal material yang diperlukan untuk pengembangan material magnetik untuk aplikasi magnet permanen dan magnet tidak permanen. Beberapa kelas material magnetik telah diperkenalkan berikut proses teknologi terutama proses konvensional *powder metallurgy* dan *rapid solidification*, serta sifat kemagnetan yang diperoleh sebagai penerapan teknologi tersebut. Telah diperlihatkan bahwa pengembangan riset bidang material magnetik dewasa ini telah bergeser dari pencarian senyawa baru menjadi rekayasa struktur material melalui penerapan nanoteknologi untuk memperoleh sifat-sifat yang unggul. Pada tulisan ini pula ditunjukkan bahwa mineral alam yang tersedia berpotensi untuk dikembangkan menjadi material yang diperlukan untuk pembuatan material magnetik untuk industri magnet terutama bila pengelolaan sumber daya alam mendapatkan proses lanjut berupa kajian komprehensif untuk perolehan nilai tambah dari mineral yang ada.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Panitia Seminar Nasional Bahan Magnet V 2007 yang telah memberikan kesempatan penulis sebagai pembicara panel. Ucapan terimakasih juga ditujukan kepada Departemen Fisika FMIPA-UI atas segala fasilitas yang diberikan sehingga penulisan ini dapat diselesaikan.

DAFTAR ACUAN

- [1]. K.H.MULLER, G.KRABBES, J.FINK, S.GGRUB, A.KIRCHNER, G. FUCH and L.SCHULTZ, *J. Magn. Magn. Mater.*, **226-230** (2001) 1370-1376
- [2]. B.D. CULLITY, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley, Reading-Messachussets (1972)
- [3]. D.GOLL and H.KRONMULLER, *Naturwissenschaften*, **87** (2000) 423-438

- [4]. M. SAGAWA, S. FUJIMURA, N. TOGAWA, H. YAMAMOTO and Y. MATSUURA, *J. Appl. Phys.*, **55** (1984) 2083-2087
- [5]. J.J. CROAT, J.F. HERBST, R.W. LEE and F.E. PINKERTON, *Appl. Phys. Lett.*, **55** (1984) 148
- [6]. J.D. LIVINGSTONE, in Proc. Eight. Int. Workshop on Rare Earth Magnets and Their Applications, ed. K.J. Strnat, Dayton, Ohio, USA, (May 1985), 423
- [7]. A. MANAF, M. LEONOWICZ, H.A. DAVIES and R.A. BUCKLEY, *Materials Letters*, **13** (1992) 194-198
- [8]. J.DING, P.G. MCCORMICK and R. STREET, *J. Magn. Magn. Mater.*, 124 (1993)
- [9]. D.H.PING, K.HONO, T.HIDAKA, T.YAMAMOTO and A.FUKUNO, *J. Magn. Magn. Mater.*, **277** (2004) 337-343
- [10]. K.J. STRNAT, *Ferro Magnetic Materials*, Ed. E.P. WOHLFARTH and K.H.J. BUSCHOW, North-Holland, vol.4, Amsterdam (1988), 131-210
- [11]. Y.S.HONG, C.M.HO, H.Y.HSU and C.T.LIU, *J. Magn. Magn. Mater.*, **279** (2004) 401-410
- [12]. Q.Q.FANG, H.W. BAO, D.M.FANG, J.Z.WANG and X.G.LI, *J. Magn. Magn. Mater.*, **278** (2004) 122-126
- [13]. R. COEHOORN and C. DE WAARD, *J. Magn. Magn. Mat.*, **83** (1990) 228
- [14]. A.MANAF, R.A. BUCKLEY, H.A. DAVIES and M. LEONOWICZ, *J. Magn. Magn. Mat.*, **128** (1993)
- [15]. L. WITHANAWASAN, A.S. MURPHY and G.C. HADJIPANAYIS, *J. Appl. Phys.*, **76** (1994) 7065
- [16]. J.M. YAO, T.S. CHIN and S.K. CHEN, *J. Appl. Phys.*, **76** (1994) 7071
- [17]. R. SKOMSKI and J.M.D. COEY, *IEEE Trans. Magn.*, **29** (1993) 2860
- [18]. Y.KANEKO, *Proc. Of the 16th Int. Workshop on Rareearth Magnets and their Applications*, Sendai, Japan (2000), 83
- [19]. K.H.J. BUSCHOW, *Mat. Sci. Reports*, **1** (1986) 1-64
- [20]. E.C. STONER and E.P. WOHLFARTH, *Phil. Trans. Soc.*, **A-240** (1948) 599
- [21]. R.W. LEE, E.G. BREWER and N.A. SCHAFFEL, *General Motors Research Publication*, April 10 (1985), Warren, Michigan
- [22]. D. JILES, *Intr. To Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman & Hall, London (1991)
- [23]. G.HERZER, *J. Magn. Magn. Mater.*, **294** (2005) 99-106
- [24]. M.G.KING, Nickel Laterite Technology Finally a New Dawn, TMS in JOM July (2005), 35-39