

MAGNET PERMANEN NANOKOMPOSIT Nd-Fe-B/ α -Fe

Azwar Manaf

Program Studi Ilmu Material (Materials Science) - PPS FMIPA UI
Kampus UI, Depok 16424

ABSTRAK

MAGNET PERMANEN NANOKOMPOSIT Nd-Fe-B/ α -Fe. Magnet nanokomposit adalah magnet multi-fasa campuran antara fasa magnet keras dengan koersivitas yang tinggi dan magnet lunak dengan magnetisasi total yang tinggi. Kedua fasa magnetik ini memiliki ukuran fasa magnet dalam skala nanometer sehingga berlangsungnya efek antar fasa menimbulkan sifat kemagnetan yang menarik. Kekuatan magnet permanen nanokomposit Nd-Fe-B/ α -Fe terletak pada fasa magnetik utama Nd₂Fe₁₄B yang memiliki *anisotropy constant* sangat tinggi ($4,5 \times 10^6 \text{ J.m}^{-3}$) dan nano kristal α -Fe yang memiliki magnetisasi total tertinggi (2,16 T). Fenomena yang menarik dari campuran kedua jenis fasa magnetik ini dalam struktur nanokomposit adalah *loop* histeresis yang dihasilkan merupakan *loop* histeresis layaknya suatu magnet permanen meskipun di dalam material magnet terdapat fasa magnet lunak (α -Fe). Disamping itu, magnetisasi remanen dari magnet nanokomposit memiliki nilai di atas nilai teoritik fasa utama meskipun magnet bersifat isotropi. Dengan demikian implikasi dari struktur nanokomposit material magnet dari pandangan ilmiah, mengundang suatu perbaikan pemahaman terhadap perilaku magnetisasi magnet permanen selama ini. Dari sudut teknologi, diperlukan inovasi dalam proses preparasi untuk menghasilkan magnet nanokomposit. Dalam paper ini dibicarakan hasil penelitian terhadap magnet nanokomposit Nd-Fe-B/ α -Fe yang dipersiapkan melalui teknologi proses *rapid solidification* dan *mechanical alloying*. Hasil tinjauan model *micromagnetic* terhadap magnet nanokomposit dari beberapa kelompok peneliti juga disampaikan pintas.

Kata kunci : Magnet permanen, nanokristalin, nanokomposit, Nd-Fe-B

ABSTRACT

MAGNET PERMANEN NANOKOMPOSIT Nd-Fe-B/ α -Fe. Nanocomposite permanent magnet is a multi-phase magnet consisting of a mixture between hard magnetic phase of high coercivity and soft magnetic phase of high total magnetisation. Both magnetic phases in magnets are nanometer in size so as to allow the grain exchange interaction leads to attractive properties. The strength of nanocomposite permanent magnets of Nd-Fe-B/ α -Fe system is determined by the main hard magnetic phase of Nd₂Fe₁₄B having a very high anisotropy constant ($4,5 \times 10^6 \text{ J.m}^{-3}$) and nanophases of α -Fe having the highest total magnetisation (2.16 T). An interesting feature of a mixture for the two magnetic phases in a nanocomposite structure is that the hysteresis loop representing hard magnetic behaviour despite the present of soft magnetic α -Fe. In addition, remanent magnetisation for the nanocomposite permanent magnets is above theoretical value of the main phase and material is isotropically magnetic. In this respect, the nanocomposite structure has brought some implications in which from scientific point of view it is required improvement in understanding to permanent magnetisms. From a technological point of view, the technological processing is being challenged to be able to produce permanent magnets with nanocomposite structure. In this paper, results of investigation to nanocomposite permanent magnets of Nd-Fe-B/ α -Fe system prepared by rapid solidification and mechanical alloying routes are discussed. Results of calculation employing a micromagnetic model in nanocomposite permanent magnets by some research groups are also briefly reviewed.

Key words : Permanent magnets, nanocrystalline, nanocomposites, Nd-Fe-B

PENDAHULUAN

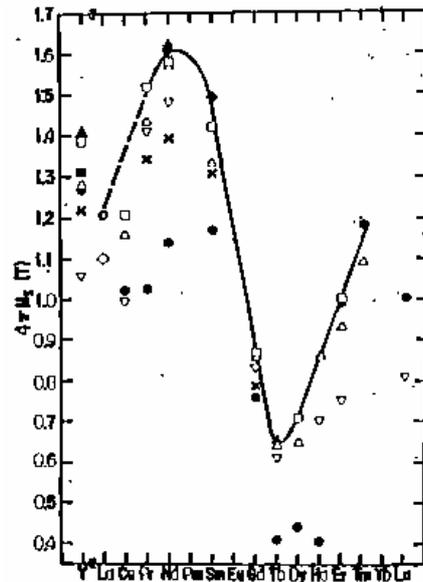
Arah penelitian terhadap magnet permanen pada akhir-akhir ini masih banyak terfokus pada magnet permanen logam tanah jarang terutama jenis baru magnet permanen yang dikenal sebagai *nanocomposite* magnet [1-4]. Magnet permanen jenis ini menjadi perhatian banyak kalangan karena disamping komposisi material menggunakan logam tanah jarang dengan fraksi yang relatif rendah

terutama bila dibandingkan dengan komposisi *Sumitomo* [5.] sehingga biaya produksi cenderung murah tetapi juga berpotensi untuk memperoleh magnet permanen dengan produk energi maksimum dengan energi ultra tinggi yaitu $\sim 1 \text{ MJ.m}^{-3}$ [6]. Secara teori, nilai energi setinggi itu bisa diperoleh dari magnet nanokomposit Nd-Fe-B multi fasa dengan disain struktur yang ideal.

Magnet permanen nanokomposit Nd-Fe-B/ α -Fe dapat diperoleh dari komposisi *off-stoichiometric* [1], sebenarnya merupakan derivasi dari magnet Nd-Fe-B yang memiliki ukuran kristal dalam skala nanometer dapat diproduksi melalui teknik pembekuan cepat atau *rapid solidification* [7] dan *mechanical alloying*[8]. Sebelum pengembangan magnet nanokomposit, magnet jenis semacam nanokomposit, pertama sekali diperkenalkan oleh Coehorn dkk [9] di tahun 1989 yang mempelajari *alloy* Nd-Fe-B kandungan Nd rendah. Komposisi $Nd_{4,5}Fe_{77,5}B_{18}$ (at.%) menghasilkan material 3-fasa dimana Fe_3B sebagai fasa utama (*major phase*) dan $Nd_2Fe_{14}B$ (sekitar 15 %) sebagai fasa kedua ditambah dengan fasa *minor* terdiri dari α -Fe. Magnet tersebut memiliki remanen $\sim 1,2$ T yaitu tertinggi pada masa itu (bandingkan dengan 0,8 T sebagai nilai eksperimental tertinggi yang diperoleh dari magnet permanen Nd-Fe-B) [10]. Nilai remanen, J_r sebesar 1,2 T yang diperoleh oleh Coehorn dkk tersebut juga ternyata jauh diatas nilai yang diprediksi oleh teori Stoner dan Wohlfarth untuk magnet Nd-Fe-B yaitu 0,8 T, tetapi dengan koersivitas yang relatif rendah ~ 240 kA.m⁻¹. Meskipun nilai J_r magnet jenis tersebut sangat tinggi namun dengan nilai koersivitas yang sangat rendah ini membatasi material magnet untuk mencapai nilai $(BH)_{max}$ yang tinggi. Sebagai konsekuensi dari kenyataan ini, pengembangan lanjut untuk eksploitasi komersil magnet jenis ini mendapat banyak hambatan. Namun demikian, hasil penelitian tersebut telah membuka suatu wawasan baru terhadap pengembangan magnet Nd-Fe-B yang mengarah kepada magnet nanokomposit. Dalam paper ini dipaparkan beberapa hasil penelitian magnet permanen sistem Nd-Fe-B terutama kandungan Nd rendah dengan teknik *melt spinning* menghasilkan struktur nanokomposit.

FASA MAGNETIK $Nd_2Fe_{14}B$

Sebagai fasa magnet keras, $Nd_2Fe_{14}B$ memiliki polarisasi total J_s atau magnetisasi total, M_s yang relatif tinggi. Struktur kristal fasa $Nd_2Fe_{14}B$ adalah simetri tetragonal tersusun oleh 4 buah sel unit $Nd_2Fe_{14}B$ dengan jumlah atom total pada sel sebanyak 68 dengan distribusi masing-masing 8 buah atom Nd, 56 buah atom Fe dan 4 buah atom B. Berdasarkan analisis struktur kristal fasa tersebut dengan XRD dan difraksi neutron oleh *Herbst* dan *Yelon* [11] diketahui bahwa konstanta kisi kristal fasa adalah $a = 8,803$ Å dan $c = 12,196$ atau volume sel sebesar $945,2$ Å³. Hasil analisis neutron menunjukkan bahwa jumlah total momen magnet atom fasa $Nd_2Fe_{14}B$ adalah $32,1 \mu_B$. Besaran-besaran intrinsik yang diperoleh dari analisis XRD dan difraksi neutron tersebut memungkinkan penentuan magnetisasi total, M_s fasa $Nd_2Fe_{14}B$ yaitu sebesar 1,583 T. Hasil pengukuran polarisasi total dari kristal tunggal fasa $Nd_2Fe_{14}B$ yang dilakukan oleh *Livingston* [12] ternyata sangat sesuai dengan nilai teoritik ini sebagaimana terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Nilai polarisasi total fasa $RE_2Fe_{14}B$ (RE=Rare Earth) [12]

Disamping memiliki magnetisasi total yang tinggi, fasa $Nd_2Fe_{14}B$ juga memiliki konstanta *magnetocrystalline anisotropy* yang tinggi. Konstanta anisotropi orde 1 atau K_1 dan orde 2 atau K_2 bersamaan dengan magnetisasi total menentukan medan anisotropi, H_A fasa sesuai dengan persamaan (1) [13]:

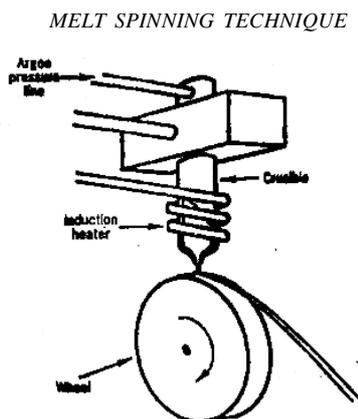
$$H_A = \frac{2K_1 + 4K_2}{J_s} \dots\dots\dots (1)$$

J_s adalah magnetisasi atau polarisasi total. Secara fisis, medan anisotropi menunjukkan besarnya medan magnet luar H yang diperlukan untuk mengarahkan vektor magnetisasi kristal searah dengan arah sumbu keras. Untuk kasus partikel magnetik berdomain tunggal, nilai H_A tersebut merupakan batas atas koersivitas karena pada medan $H = -H_A$ pembalikan vektor magnetisasi baru bisa terjadi. Dengan perkataan lain, makin besar nilai H_A dari suatu fasa magnetik, makin besar koersivitas dari magnet. Asti dkk [14] dan *Grossinger* dkk [15] telah mengembangkan teknik *Single Point Detection (SPD)* menggunakan medan magnet pulsa untuk menghasilkan medan magnet yang sangat tinggi dalam proses magnetisasi. Besaran yang dijadikan sebagai indikator adalah d^2M/d^2H yang diplot sebagai fungsi H . Singularitas akan terlihat pada waktu medan magnetisasi H sama dengan medan anisotropi. Berdasarkan teknik tersebut diketahui bahwa konstanta *magnetocrystalline anisotropy* orde 1 dan orde 2 untuk fasa $Nd_2Fe_{14}B$ masing-masing adalah $K_1 = 4,5$ MJ.m⁻³ dan $K_2 = 0,66$ MJ.m⁻³. Jadi berdasarkan persamaan 1 tersebut, besarnya nilai H_A untuk fasa $Nd_2Fe_{14}B$ adalah 6520 kA.m⁻¹ atau $8,2$ T yaitu suatu nilai yang sangat tinggi. Hal inilah yang menjadikan fasa magnetik $Nd_2Fe_{14}B$ potensial menjadi magnet permanen.

TEKNIK PEMBEKUAN CEPAT

Sejak ditemukan fasa magnetik Nd₂Fe₁₄B pada tahun 1983, telah banyak penelitian yang dilakukan untuk mengeksplorasi nilai intrinsik dari material sistem Nd-Fe-B. Berbagai usaha teknik preparasi telah dikembangkan dan disain strukturmikro dioptimalkan. Namun nilai (BH)_{max} dari magnet permanen Nd-Fe-B tertinggi yang pernah dicapai pada skala laboratorium baru mencapai ~ 400 kJ.m⁻³ [16] yaitu kira-kira 78 % dari nilai intrinsiknya yaitu sebesar 512 kJ.m⁻³. Jelaslah, penelitian tentang magnet Nd-Fe-B masih terus berlanjut meskipun pada saat ini magnet permanen kelas ini telah diproduksi secara komersial.

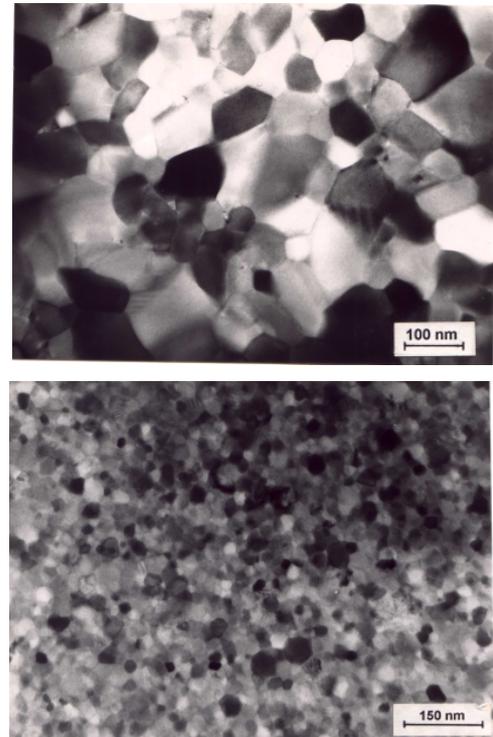
Salah satu teknik proses yang digunakan untuk mencapai nilai optimum dari fasa Nd₂Fe₁₄B adalah *melt spinning* yang telah digunakan secara komersial. Secara skematik teknik ini ditunjukkan pada Gambar 2. Pada dasarnya, teknik ini terdiri dari suatu roda terbuat dari logam dapat diputar dengan kecepatan putar yang dapat diatur. Variasi kecepatan roda dimaksud untuk memperoleh laju pendinginan (*cooling rate*) berbeda dapat mencapai laju pendinginan sangat tinggi sehingga memungkinkan logam cair membeku seketika. Alloy pada fasa cair diinjeksikan melalui suatu *nozzle* berukuran diameter ~ 0,5-0,7 mm oleh suatu tekanan gas argon ~35 kN.m⁻² ke permukaan roda yang berputar sehingga dihasilkan pita *alloy* (*melt spun ribbon*). Melalui teknik ini dapat diproduksi pita *alloy* dengan struktur amorf atau kristal penuh atau campuran antara amorf dan kristal. Melalui teknik ini pula dapat diperoleh pita *alloy* poli kristal dengan ukuran kristal dari nanometer sampai dengan mikrometer.



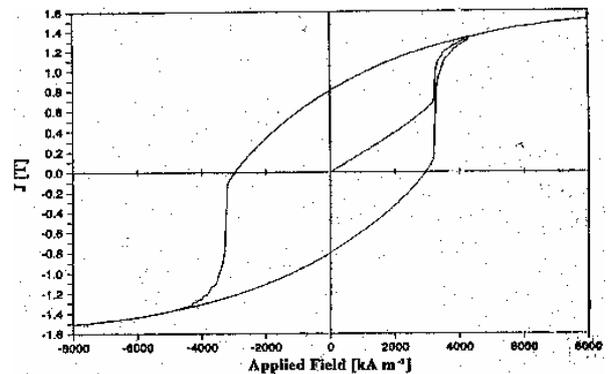
Gambar 2. Skema proses *rapid solidification* dengan teknik *melt spinning*

Pada Gambar 3 dapat dilihat struktur dalam pita *alloy* yang diambil dengan Mikroskop Elektron Transmisi untuk material mikrokristalin dan nanokristalin. Karena strukturnya yang demikian homogen maka nilai optimum (remanen $J_r = 0.8$ T) dari fasa Nd₂Fe₁₄B dengan mudah diperoleh dan bahkan pada struktur material Nd-Fe-B dengan ukuran kristal dalam skala nanometer,

nilai J_r yang diperoleh berada di atas nilai teoritik berdasarkan konfigurasi random model teori *Stoner* dan *Wohlfarth* [17] (lihat Gambar 4).



Gambar 3. Foto TEM dari pita *alloy* hasil teknik *melt spinning* menunjukkan : a) kristal-kristal berukuran mikrometer dan b) berukuran nanometer.

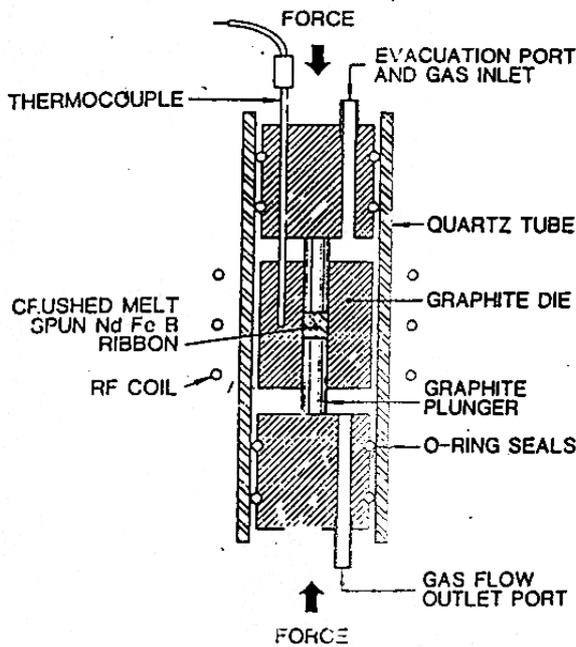


Gambar 4. Loop histeresis Nd-Fe-B berdasarkan teori *Stoner-Wohlfarth*.

Teknik *melt spinning* yang menghasilkan pita *alloy* dengan distribusi random fasa utama berukuran halus ini menawarkan beberapa fleksibilitas dalam proses lanjut seperti pembuatan magnet berpelekat polimer (*bonded magnet*) [18], *hot press magnets* dan *die upset forged magnets*[19]. Magnet berpelekat polimer diperoleh dengan mencampurkan fragment halus pita *alloy* Nd-Fe-B dengan bahan polimer seperti resin, nilon dan teflon dan lain sebagainya. Oleh karena adanya material perekat di dalam magnet berpelekat,

konsekuensinya adalah fraksi fasa magnetik dalam magnet tersebut di dalam magnet kurang dari 100 %. Dengan demikian sifat kemagnetan dari magnet berpelekat terutama remanen dan produk energi maksimum, $(BH)_{\max}$ magnet berpelekat lebih rendah dibandingkan dengan magnet Nd-Fe-B *hot press*. Pada penelitian kami terdahulu [20] telah berhasil dibuat magnet berpelekat dengan nilai $(BH)_{\max} \sim 93 \text{ kJ.m}^{-3}$.

Hot press magnets dapat diperoleh melalui proses lanjut fragmen pita *alloy* dalam suatu cetakan pada suhu $\sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ sampai dengan $800 \text{ }^\circ\text{C}$ dibawah pengaruh tekanan 90 N mm^{-2} sampai dengan 120 N mm^{-2} . Proses ini ditunjukkan pada Gambar 5.



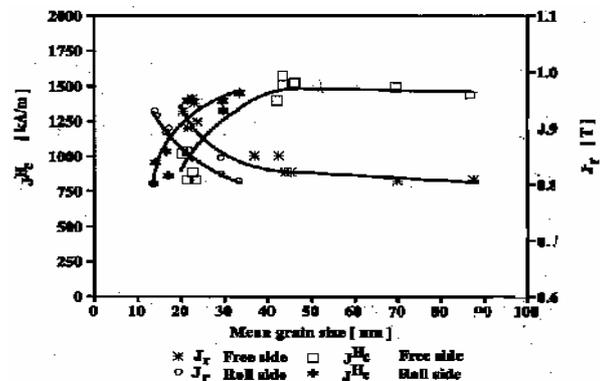
Gambar 5. Perangkat *hot press* untuk pembuatan magnet Nd-Fe-B [ref].

Pada penekanan disekitar suhu tersebut terjadi *hot deformation* sehingga fragmen pita *alloy* Nd-Fe-B menjadi bertambah padat dengan densitas mendekati nilai $\sim 7,6 \text{ g.cc}^{-1}$. Magnet *hot press* Nd-Fe-B yang pertama diperkenalkan oleh kelompok peneliti General Motors. Nilai $(BH)_{\max}$ yang diperoleh dengan cara ini $\sim 105 \text{ kJ.m}^{-3}$ yaitu hampir sama dengan nilai teori *Stoner-Wohlfarth* yaitu $\sim 112 \text{ kJ.m}^{-3}$. Baik magnet berpelekat maupun magnet *hot press* dua-duanya bersifat isotropi karena orientasi random dari fasa magnetik $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ didalam fragmen pita *alloy* Nd-Fe-B. Namun Bila magnet Nd-Fe-B *hot press* menjalani proses ulang pada cetakan dengan ukuran diameter 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 $(BH)_{\max} \sim 320 \text{ kJ.m}^{-3}$ [18]. Nilai ini sama dengan magnet yang dimiliki oleh magnet *sinter* Nd-Fe-B.

MAGNET PERMANEN SISTEM Nd-Fe-B BERBASIS NANOKRISTAL

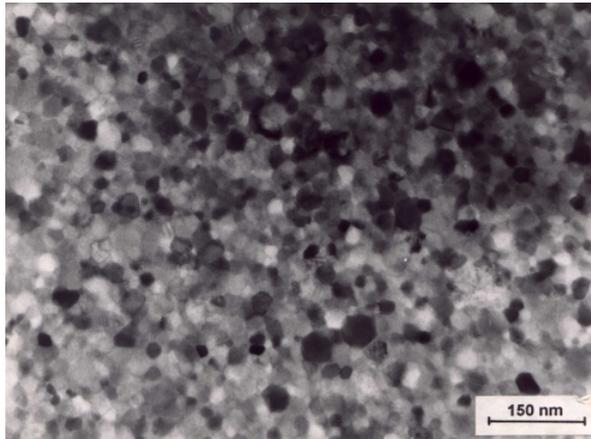
Beberapa hasil penelitian terdahulu [10] terhadap sistem Nd-Fe-B yang diproses dengan teknik *melt spinning* menunjukkan tidak saja nilai optimum fasa magnetik $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ untuk orientasi random dengan mudah dapat dicapai bahkan pada beberapa kasus diperoleh nilai remanen di atas nilai prediksi teori. Dengan perkataan lain telah diamati adanya peningkatan nilai remanen di atas nilai teori dari sampel yang dipersiapkan dengan cara ini. Investigasi sistematis terhadap fakta ini melalui studi *alloy* Nd-Fe-B dengan komposisi $\text{Nd}_{13.2}\text{Fe}_{79.6}\text{B}_6\text{Si}_{1.2}$ (at.%) [21-23] menunjukkan adanya korelasi antara peningkatan nilai remanen dengan ukuran rata-rata butir (*grain*) fasa magnetik utama di dalam pita *alloy*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 6 yang menyajikan hasil pengukuran nilai J_r dan $(BH)_{\max}$ beberapa sampel pita *alloy* Nd-Fe-B terhadap ukuran rata-rata butir (*average grain size*). Peningkatan nilai remanen ini mulai efektif pada sampel dengan ukuran rata-rata $< 30\text{-}35 \text{ nm}$ dan bertambah besar dengan menurunnya nilai ukuran rata-rata butir.



Gambar 6. Korelasi antara nilai J_r dan $(BH)_{\max}$ pita *alloy* Nd-Fe-B terhadap nilai rata-rata ukuran butir.

Fakta peningkatan nilai remanen di atas nilai teori pertama sekali dilaporkan oleh Bergeron dkk [24] yang dikonfirmasi berturut-turut oleh Davies [25] dan Matsumoto dkk [26] bahwa peningkatan nilai remanen ini memerlukan strukturmikro yang spesifik dapat diperoleh melalui kontrol proses yang akurat. Berdasarkan hasil investigasi diperlukan strukturmikro yang halus dengan ukuran fasa berskala nanometer serta bebas fasa batas butir untuk mendapatkan fakta nilai remanen di atas nilai teori S-W. Hal ini dikarenakan, peningkatan nilai remanen tersebut hanya dapat dicapai melalui efek interaksi antar butir (*grains exchange interaction*) pada sistem nanokristal. Dalam sistem ini,

tingkat peningkatan nilai remanen ditentukan oleh ratio total permukaan butir dan volume sistem (*surface to volume ratio*). Jelaslah makin kecilnya nilai rata-rata ukuran butir dalam regim nanostruktur, makin besar peningkatan nilai remanen. Pada Gambar 7 diperlihatkan foto TEM dari pita *alloy* Nd_{13,2}Fe_{79,6}B₆Si_{1,2} (at.%) dengan ukuran kristal ~ 20-30 nm. Sampel ini memiliki remanen sebesar 0,93 T yaitu 16 % lebih tinggi dari nilai teori (0,8 T).



Gambar 7. Fotomikro sampel *alloy* Nd_{13,2}Fe_{79,6}B₆Si_{1,2} (at.%) yang Memiliki nilai remanen $J_r = 0,93$ T.

Beberapa kelompok teoritik [27,28], telah mengusulkan model mikromagnetik dan menghitung dengan metode *finite element* untuk memahami fenomena peningkatan remanen pada sistem nanokristal. Fukunaga dan Inoue [29], melakukan studi numerik tentang efek interaksi butir terhadap sifat kemagnetan dari material Nd-Fe-B yang memiliki distribusi random fasa magnetik Nd₂Fe₁₄B. Studi ini memperlihatkan peningkatan remanen meningkat dengan mengecilnya ukuran rata-rata butir disertai dengan penurunan koersivitas sebagai konsekuensi interaksi. Kelompok teoritik lain [30] melakukan kajian yang sama terhadap sistem fasa tunggal Pr₂Fe₁₄B dan memperlihatkan bahwa kajian ini memastikan adanya peningkatan remanen di atas nilai teori terkait dengan ukuran *grain* yang homogen dengan nilai rata-rata 20 nm dapat menghasilkan remanen dengan ratio 0,58 dan $(BH)_{max} \sim 172$ kJ.m⁻³. Sifat kemagnetan ini telah diluar nilai teoritik ($J_r/J_s = 0,5$ dan $(BH)_{max} = 112$ kJ.m⁻³). Hasil-hasil ini memperlihatkan bahwa sistem nanokristal telah membuka peluang baru untuk memahami lebih tepat magnetisme material selain berdasarkan teori konvensional Stoner dan Wohlfarth.

MAGNET NANOKOMPOSIT SISTEM Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe

Magnet nanokomposit sistem Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe dapat dikembangkan dari *alloy* magnetik Nd-Fe-B

kandungan Nd rendah. Pita-pita *alloy* yang dihasilkan dari teknik *melt spinning* menunjukkan nilai remanen > 1.0 T [1]. Material memiliki fasa kedua (diamati sebagai partikel α -Fe). Menarik untuk diperhatikan dari hasil penelitian ini adalah partikel α -Fe merupakan fasa magnet lunak namun *loop* histeresis material ini menunjukkan jenis *loop* histeresis magnet keras (Gambar 8). Hal ini dapat terjadi oleh karena interaksi antar fasa utama Nd₂Fe₁₄B berlangsung melalui media fasa kedua magnet lunak α -Fe yang berukuran butir ultra halus ~8-10 nm sebagaimana yang diperlihatkan pada Gambar 9, yaitu jauh lebih kecil dibandingkan dengan panjang interaksi fasa lunak tersebut (*exchange length* ~ 40 nm). Koersivitas magnet permanen Nd-Fe-B kandungan Nd rendah ini berkisar ~500 kA.m⁻¹ sampai dengan 1000 kA.m⁻¹ jauh lebih besar dari nilai minimum ($J_s/2$) untuk mempertahankan $(BH)_{max}$. Dengan demikian nilai $(BH)_{max} > 160$ kJ.m⁻³ mudah dicapai. Nilai ini adalah 50 % lebih besar dari nilai $(BH)_{max}$ magnet permanen Nd-Fe-B konvensional.

Teknik lain yang dapat menghasilkan nanokomposit adalah *mechanical alloying* [3] disamping *melt spinning*. Studi teoritik tentang magnet nanokomposit juga gencar dilakukan tercatat seperti simulasi 3-dimensi nanokomposit Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe untuk berbagai komposisi fraksi volume [31,32]. Kajian numerik tentang magnet nanokomposit juga telah dilakukan oleh Fukunaga dkk[33] khususnya melihat efek penurunan koersivitas oleh interaksi antar butir pada sistem nanokomposit Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe. Penurunan koersivitas ini menjadi penting karena meskipun nilai remanen material tinggi, namun bila koersivitas terlalu rendah, material tidak dapat memiliki $(BH)_{max}$ yang tinggi. Berdasarkan kajian numerik tersebut.

Secara eksperimental, hasil pengukuran *loop* histeresis dari sederetan sampel baik nanokristal maupun nanokomposit memang telah memperlihatkan peningkatan nilai remanen disertai dengan penurunan koersivitas sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 10. Berdasarkan data eksperimental ini dapat diperoleh suatu hubungan empirik antara remanen dan koersivitas sebagaimana diberikan oleh persamaan 2 :

$$J_r = 1,1715 + 0,00024 J_s H_c \quad J_s H_c < 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Berdasarkan persamaan empirik ini, dapat dihitung besarnya $(BH)_{max}$ yang dievaluasi dari persamaan (3):

$$(BH) = (\mu_0 H + J) H \text{ dan } J = J_r + \frac{J_s - J_r}{H_A} \mu_0 H \quad \dots\dots\dots (3)$$

yaitu dengan menganggap magnetisasi berubah secara linier dari nilai totalnya dengan menurunnya medan magnet luar H dan berubah tanda pada $H = J_s H_c$ melalui suatu fungsi tangga (*step function*). Nilai $(BH)_{max}$ yang dihitung dengan persamaan (2) tersebut dapat dilihat pada Gambar 10. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai

$(BH)_{\max}$ sekitar $\sim 240 \text{ kJ.m}^{-3}$ memungkinkan dapat diperoleh dari magnet nanokomposit sistem $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$. Perlu diperhatikan bahwa nilai ini $\sim 114\%$ lebih tinggi dari nilai konvensional untuk sistem Nd-Fe-B (112 kJ.m^{-3}), bila saja dapat didisain komposisi material yang tepat dengan struktur nanokomposit.

Menarik untuk diperhatikan ide Coey dkk [6] yang memperkenalkan magnet nanokomposit $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B/Fe-Co}$ hipotetik. Berdasarkan kajian teoritik mereka, bila saja dapat dibuat magnet nanokomposit tersebut dengan struktur yang ideal memungkinkan dicapainya magnet permanen dengan nilai $(BH)_{\max}$ menuju $\sim 1 \text{ MJ.m}^{-3}$. Dengan adanya nilai $(BH)_{\max}$ baru dari prediksi teori magnet nanokomposit yaitu sebesar 1 MJ.m^{-3} maka itu berarti nilai tertinggi $(BH)_{\max}$ tertinggi pada saat ini yaitu sebesar 400 kJ.m^{-3} dari magnet permanen berbasis Nd-Fe-B baru mencapai $\sim 25\%$ nilai ekspektasi. Jelaslah dipahami dari kenyataan ini bahwa penelitian dibidang magnet permanen terutama kelas Nd-Fe-B masih harus menempuh jalan yang sangat panjang. Mungkin nilai $(BH)_{\max}$ sasaran baru sebagai konsekuensi dari berkembangnya magnet nanokomposit dapat diperpendek melalui pemahaman lebih baik pada bidang magnetisme terutama nanomagnetism dan perbaikan pada proses preparasi material.

KESIMPULAN

Sebagai penutup, tulisan ini telah memperkenalkan perkembangan penelitian pada bidang magnet permanen khususnya sistem *alloy* Nd-Fe-B yang diproses melalui *rute* pembekuan cepat melalui teknik *melt spinning*. Telah ditunjukkan bahwa fasa magnetik $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ memiliki banyak keunggulan ditinjau dari sifat kemagnetan intrinsiknya sehingga menjadi fasa magnetik yang sangat potensial sebagai magnet permanen. Disisi lain, telah ditunjukkan bahwa teknik *melt spinning* merupakan teknik yang menawarkan beberapa fleksibilitas dalam proses lanjut untuk produksi magnet permanen. Salah satu implikasi yang cukup menarik dari material Nd-Fe-B yang diproses melalui teknik ini adalah diperolehnya material dengan ukuran kristal dalam skala nanometer (*nanocrystalline materials*) baik berfasa tunggal maupun multi-fasa (*nanocomposite*). Fakta adanya peningkatan remanen dari material ini di atas nilai teoritiknya telah mengundang suatu pemahaman baru tentang magnetisme. Sebagai implikasi lain dari magnet nanokomposit adalah bergesernya nilai teoritik $(BH)_{\max}$ dari 512 kJ.m^{-3} menjadi $\sim 1000 \text{ kJ.m}^{-3}$ yang harus dicapai melalui disain komposisi dan struktur yang tepat.

DAFTARACUAN

[1]. A. MANAF, R.A. BUCKLEY, H.A. DAVIES and M. LEONOWICZ, *J. Magn. Magn. Mat.*, 128 (1993)
[2]. J.M. YAO, T.S. CHIN and S.K. CHEN, *J. Appl. Phys.*, 76 (1994) 7071

[3]. J.DING, P.G. MCCORMICK and R. STREET, *J. Magn. Magn. Mater.*, 124 (1993)
[4]. L. Withanawasan, A.S. Murphy and G.C. Hadjipanayis, *J. Appl. Phys.*, 76 (1994) 7065
[5]. M. SAGAWA, S. FUJIMURA, N. TOGAWA, H. YAMAMOTO and Y. MATSUURA, *J. Appl. Phys.* 55 (1984) 2083-2087
[6]. R. SKOMSKI and J.M.D. COEY, *IEEE Trans. Magn.*, 29 (1993) 2860
[7]. H.A.DAVIES, In *Rapily Quenched Metals III*, ed. B.Cantor, 1, The Chameleon Press Ltd, London (1988) 8-14
[8]. L.SCHULTZ, J.WECKER and E.HELLSTERN, *J.Appl.Phys.*, 61, (1987), 3583. L.SCHULTZ, K.SCHOITZKE, J.WECKER and C.KURT, *J.Appl.Phts.* 70 (1991) 6339-6344
[9]. R. COEHOORN and C. DE WAARD, *J. Magn. Magn. Mat.*, 83 (1990) 228
[10]. J.J.CROAT, J.F. HERBST, R.W.LEE and F.E.PINKERTON, *Appl. Phys. Lett.* 44 (1984) 148
[11]. J.F. HERBST and W.B. YELON, *J. Appl. Phys.* 60 (1986) 4224-4229
[12]. J.D. LIVINGSTONE, in *Proc. Eight. Int. Workshop on Rare Earth Magnets and Their Applicarions*, ed. K.J. Strnat, Dayton, Ohio, USA, (May 1985), 423
[13]. K.H.J. BUSCHOW, *Mat. Sci. Reports*, 1 (1986) 1-64
[14]. G. ASTI and S. RINALDI, *J. Appl. Phys.*, 45 (1974) 3600
[15]. R. GROSSINGER, P. OBITCH, X.K. SUN, R. EIBLER, H.P. KIRCMAYR, F. ROTHWARF and H. SASSIK, *Mat. Lett.*, 2 (1984) 539
[16]. UK Magnetics Society, *Magnews*, Winter (1998)
[17]. E.C. STONER and E.P. WOHLFARTH, *Phil. Trans. Soc.*, A-240 (1948) 599
[18]. R.W.LEE, E.G.BREWER and N.A.SCHAFFEL, *General Motor Research Publication*, April 10, 1985, Waren, Michigan
[19]. H.A. DAVIES, *Proc. ERA Seminar on Modern Magn.Mater.*, London (1989)
[20]. A. MANAF dan J.T. NUGROHO, in *Proceeding Pertemuan Ilmiah Ilmu Pengetahuan dan Teknologi bahan 99*, Serpong, (1999)
[21]. A. MANAF, M. LEONOWICZ, H.A. DAVIES and R.A. BUCKLEY, *Materials Letters*, 13, (1992) 194-198
[22]. A. MANAF, M. LEONOWICZ, H.A. DAVIES and R.A. BUCKLEY, *Opening Paper Proc. 12th Intl. Workshop on Rare Earth Magnets*, Publ. Univ. West Australia (1992) 1-11
[23]. A. MANAF, M. LEONOWICZ, H.A. DAVIES and R.A. BUCKLEY, *J. Appl. Physics*, 73 (1993)
[24]. R. BERGERON, E.W.MCCALLUM, K. KANAVAN and J.E.KEEM, European Patent Application No. 0-195, 219ECD Devices Inc., filed Sept. 24 (1986)
[25]. H.A. DAVIES, K.H.J. MAWELLA, R.A. BUCKLEY, G.E.CARR, A.MANAF and A.JHA, in *concerted*

- European Action on Magnetisms, ed. I.V.Mitchell,
Elsevier Appl. Science, London (1989)
- [26]. F.MATSUMOTO, H.SAKAMOTO, M.KOMIYA
and F. FUJIKURA, *J.Appl.Phys.*, **63** (1988)
- [27]. R. FISHER, T. SCHREFL, H. KRONMULLER AND
J. FIDLER, *J. Magn. Mater.*, 153 (1996)
- [28]. THOMAS SCHREFL AND J.FIDLER, *J.Appl.Phys.*,
83 (11) (1998)
- [29]. H.FUKUNAGA AND H.INOUE, *Jpn. J.Appl.Phys.*,
31 (1992)
- [30]. CHUAN BING RONG ET AL, *J. Magn.Mag.Mat.*,
277 (2004)
- [31]. E.F.KNELLER, *IEEE Trans. Magn.*, **27** (1991)
- [32]. R.FISCHER, H.KRONMULLER, *J. Magn. Mag.
Mat.*, **184** (1988)
- [33]. H.FUKUNAGA, J.KUMA AND Y.KANAI, *IEEE
Trans.Mag.*, **35** (1999)