

# Analisis Bahan Magnet Nanokristalin Barium Heksaferit ( $\text{BaO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) dengan Menggunakan *High-Energy Milling*

AKMAL JOHAN

Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, Indonesia

**INTISARI:** Telah disintesis bahan magnet nanokristalin barium heksaferit dengan menggunakan *high-energy milling*. Secara sistematis waktu *milling* dilakukan selama 5, 10, 15, 20 dan 30 jam disertai dengan proses *annealing* dari temperatur ruang hingga temperatur  $400^\circ\text{C}$ ,  $600^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$  dan  $1000^\circ\text{C}$  selama 3 jam. Hasil pengukuran pola difraksi sinar-X sebelum dan setelah proses *milling* menunjukkan deformasi struktur kristal yang ditandai dengan tinggi puncak difraksi yang semakin menurun serta semakin melebar dan ditandai oleh penurunan sifat kemagnetan bahan. Dari pengukuran sifat kemagnetan sebelum dan sesudah proses *milling* selama 30 jam masing-masing nilai koersivitas intrinsik adalah 1,68 kOe dan 1,13 kOe, sedangkan nilai magnetisasi remanen diperoleh masing-masing 42,5 emu/gram dan 8,16 emu/gram. Proses pemanasan (*annealing*) pada temperatur  $1000^\circ\text{C}$  selama 3 jam terhadap bahan yang telah di *milling*, menunjukkan perbaikan sifat magnet bahan terutama nilai koersivitas intrinsik naik hingga 4,39 kOe, serta nilai magnetisasi remanen yang kembali seperti sebelum di *milling* sekitar 40,8 emu/gram. Terkait dengan peningkatan koersivitas magnet intrinsik dari 1,68 kOe (*origin*) menjadi 4,39 kOe setelah rekristalisasi dengan ukuran kristalit yang semakin halus, maka dapat disimpulkan bahwa peningkatan sifat magnet intrinsik ini akibat perubahan ukuran kristalit yang menurun dalam rentang nanometer yaitu sekitar ukuran 40-60 nm dibandingkan sebelum proses *milling* sekitar  $1\ \mu\text{m}$  (1 mikron).

**KATA KUNCI:** annealing, barium heksaferit, koersivitas, nanokristalin, remanen

**ABSTRACT:** Magnetic materials have been synthesized nanocrystalline barium hexaferrite by using high-energy milling. Milling time systematically carried out for 5, 10, 15, 20 and 30 hours which accompanied by a process of annealing temperature from room temperature up to  $400^\circ\text{C}$ ,  $600^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$ , and  $1000^\circ\text{C}$  for 3 hours. The measurement results of X-ray diffraction patterns before and after process of milling seen has shown a marked deformation of the crystal structure with high diffraction peaks of diminishing and increasingly widened and marked by a decrease in magnetic properties of materials. From the measurement of magnetic properties before and after the milling process for 30 hours each intrinsic coercivity values were 1.68 and 1.13 kOe, while the remanent magnetization values obtained respectively 42.5 and 8.16 emu/g. Annealing process at  $1000^\circ\text{C}$  temperature for 3 hours of material that has been in the milling, showing improving the magnetic properties of materials, especially the value of intrinsic coercivity increased up to 4.39 kOe, and remanent magnetization values are returned as it was before the milling around 40.8 emu/g. Associated with an increased intrinsic magnetic coercivity of 1.68 kOe (origin) to 4.39 kOe after recrystallization with increasingly fine crystallite size, it can be concluded that increasing the intrinsic magnetic properties are due to changes that reduced the size of crystallites in nanometer range which is about the size of 40 - 60 nm compared to before the milling process is about  $1\ \mu\text{m}$  (1 micron).

**KEYWORDS:** annealing, barium hexaferrite, coercivity, nanocrystalline, remanence

E-MAIL: akmal.johan@yahoo.com

Januari 2010

## 1 PENDAHULUAN

**B**ahan magnet permanen barium heksaferit ( $\text{BaO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) telah sangat dikenal dan banyak digunakan di industri maupun pada peralatan rumah tangga. Pemanfaatan bahan barium heksaferit ini secara luas, didukung oleh harganya yang murah, nilai koersivitas dan magnetisasi saturasi yang tinggi, serta temperatur transisi magnet (temperatur Curie,

$T_c$ ) yang tinggi sekitar  $750^\circ\text{C}$  juga sifat kimia yang stabil dan ketahanan terhadap korosi sangat baik<sup>[1]</sup>. Perkembangan teknologi terakhir saat ini memungkinkan untuk diperoleh bahan barium heksaferit dengan ukuran kristalit yang sangat halus berukuran sekitar nanometer ( $10^{-9}$  meter). Bahan barium heksaferit dengan ukuran kristalit yang sangat halus dapat diperoleh di antaranya melalui proses *mechanical alloy-*

ing<sup>[2]</sup>. Metode sintesa bahan barium heksaferit dengan teknik *mechanical alloying* adalah metode yang sudah biasa digunakan seperti halnya untuk bahan-bahan keramik pada umumnya. Mengingat bahan barium heksaferit merupakan suatu senyawa oksida, maka proses *mechanical alloying* menjadi sederhana, media gas inert tidak dibutuhkan seperti biasanya digunakan untuk senyawa intermetalik. Apabila proses kristalisasi bahan barium heksaferit dapat terjadi pada temperatur rendah, maka diharapkan pertumbuhan kristalit yang besar dapat dihindari. Ukuran kristalit ini akan sangat berpengaruh terhadap sifat magnetik bahan. Nilai koersivitas magnet bahan cenderung meningkat seiring dengan ukuran kristalit atau partikel yang semakin halus (*nano crystalline effect*). Yang berkaitan dengan anisotropi magnetokristalin seperti ditemui pada bahan magnet permanen berbasis tanah-jarang<sup>[3]</sup>. Koersivitas magnet merupakan suatu besaran yang sangat penting, karena semakin tinggi harga koersivitas maka sifat magnetik bahan akan semakin sulit berubah akibat medan magnet luar.

Bahan tipe M-heksaferit,  $MO \cdot 6Fe_2O_3$  (M=Ba, Pb, Sr) telah dikenal mempunyai sifat magnet yang sangat baik sehingga banyak digunakan sebagai magnet permanen bagian komponen dari peralatan frekuensi tinggi atau sebagai media penyimpanan data<sup>[4,5]</sup>. Untuk media penyimpanan data, M-heksaferit yang digunakan mempunyai ukuran kristalit sangat halus, dalam skala nanometer<sup>[6]</sup>. Bahan barium heksaferit termasuk bahan magnet keras (*hard magnetic*) merupakan salah satu bahan baik dari segi keilmuan maupun teknologi sangat penting. Bahan dengan anisotropi kristalin yang besar dengan koersivitas magnet yang cukup tinggi serta secara kimiawi stabil, menyebabkan bahan ini sangat banyak digunakan sebagai komponen magnet permanen seperti ditemui dalam peralatan *microwaves*<sup>[4]</sup>. Serbuk halus barium heksaferit dalam ukuran nano-meter saat ini berperan penting dalam pembuatan sistem penyimpanan data berkapasitas tinggi. Untuk itu beberapa usaha telah dilakukan guna memperoleh bahan ini dalam sistem struktur nanokristalin.

Teknologi pemrosesan untuk mendapatkan suatu bahan dalam skala nanometer secara umum dapat dibagi menjadi dua bagian<sup>[7]</sup>:

1. Proses *top down* yakni bahan dasar awal yang pada mula berukuran beberapa millimeter dihaluskan dalam suatu proses *milling* yang panjang sehingga diperoleh bahan serbuk yang sangat halus. Proses *milling* ini dapat menyebabkan rusaknya sistem struktur bahan sehingga dapat menurunkan sifat fisis bahan, dalam hal ini sifat kemagnetan bahan. Oleh sebab itu suatu pemrosesan lebih lanjut seperti perlakuan panas yang sistematis akan sangat menentukan agar diperoleh sifat magnetik bahan yang baik dengan uku-

ran kristalit yang kecil (berskala nanometer).

2. Proses *bottom up*, yakni proses pembentukan paduan dengan jalan mereaksikan beberapa bahan baik secara padatan maupun cairan. Namun untuk mendapatkan ukuran partikel yang sangat halus proses yang banyak digunakan adalah dengan melalui proses kimia basah (*wet chemistry*), seperti proses pengendapan, ataupun gel. Namun demikian dalam beberapa hal gabungan kedua metoda di atas sangat mungkin memberikan solusi guna memperoleh suatu bahan nano-magnet yang baik.

Dalam kegiatan penelitian ini, ditujukan pada pemahaman perubahan sifat magnetik bahan dikaitkan dengan ukuran kristalnya. Disini akan dilihat pengaruh waktu *milling* terhadap kerusakan sistem kristalit yang akhirnya berdampak pada sifat kemagnetan bahan. Tinjauan mengenai proses rekristalisasi dikaitkan dengan sistematisa perlakuan panas (*annealing*) terhadap serbuk magnet hasil *milling*, yang dapat memberikan gambaran secara rinci hubungan antara sifat magnet dengan ukuran kristalitnya.

Koersivitas magnet (Hc) bahan M-heksaferit sangat bergantung pada ukuran partikel. Semakin halus ukuran partikel bahan, maka koersivitas magnet yang diperoleh akan semakin tinggi<sup>[8,9,10]</sup>. Berbagai teknik telah dilakukan untuk mendapatkan partikel halus M-heksaferit ini; misalnya metoda kopresipitasi kimia<sup>[11]</sup>, metode kristalisasi glass<sup>[12]</sup>, metoda *sonochemical*<sup>[12]</sup>, sol-gel<sup>[8,11,12,13,14]</sup>, maupun metode *high-energy milling*<sup>[2,9,15]</sup>. Semua metoda yang telah disebutkan, kecuali metode *high-energy milling* untuk mendapatkan partikel dalam ukuran skala nanometer disebut dengan pendekatan *bottom-up* sedangkan yang terakhir disebut dengan *top-down*<sup>[7]</sup>.

Pendekatan *top-down* untuk mendapatkan partikel dalam ukuran nanometer dengan metode *high-energy milling*, dipandang lebih praktis dibandingkan dengan metoda lainnya, dan mempunyai prospek untuk dikembangkan dalam skala besar. Hampir semua paduan yang terbuat dari metal maupun keramik dapat dihaluskan dengan metoda *high-energy milling* ini<sup>[9,16]</sup>. Problem utama yang sering dihadapi dalam proses *milling* ini adalah terjadinya kerusakan struktur kristal (*crystallographic damage*), serta adanya unsur pengotor yang berasal dari wadah yang digunakan pada waktu proses *milling*. Namun demikian uji coba yang telah dilakukan terhadap beberapa cuplikan yang dihaluskan dengan *high-energy milling*, menunjukkan kontaminasi dari *vial* ataupun bola-bola yang digunakan sangat kecil. Identifikasi menggunakan difraksi sinar-X terhadap beberapa hasil *milling* tidak menunjukkan adanya fasa asing yang muncul<sup>[9,10]</sup>, sehingga dapat diabaikan.

## 2 METODE PENELITIAN

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, kegiatan penelitian dimulai dengan proses sintesis bahan barium heksaferit nanokristalin secara *top down*. Disini serbuk bahan barium heksaferit yang terdapat secara komersial di *milling* menggunakan fasilitas *high-energy milling*.

Dalam kegiatan penelitian ini proses *milling* dilakukan terhadap bahan barium heksaferit ( $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) berbentuk serbuk halus dengan ukuran awal sekitar  $1 \mu\text{m}$  ( $10^{-6}\text{m}$ ) dan dengan selang waktu proses *milling* yang divariasikan, terutama untuk melihat perubahan ukuran partikel akibat proses mekanik. Lama untuk satu siklus proses *milling* adalah sekitar 90 menit, dan waktu jeda antara dua proses *milling* sekitar 30-60 menit. Ini dilakukan terutama untuk pendinginan sistem motor.

Proses pencuplikan dilakukan untuk setiap selang waktu 5, 10, 15, 20 dan 30 jam setelah proses *milling*. Sistem fasa dari serbuk hasil *milling* kemudian diidentifikasi dengan menggunakan teknik difraksi sinar-X. Identifikasi fasa ini penting untuk melihat seberapa jauh proses *milling* telah berpengaruh terhadap sistem struktur kristal bahan, untuk melihat apakah proses *milling* telah menyebabkan proses abrasi dari sistem *vial* sehingga menambah unsur pengotor. Selain itu berdasarkan data difraksi sinar-X ini juga dapat ditentukan ukuran kristal sebagai fungsi lama waktu *milling*, dengan menggunakan formula Scherer<sup>[10,17]</sup>, yaitu

$$D = \frac{0,9\lambda}{W \cos \theta}$$

dengan  $D$  adalah ukuran kristalit,  $\lambda_{\text{Cu-K}\alpha}$  adalah panjang gelombang target sinar-X ( $1,5406 \text{ \AA} = 0,15406 \text{ nm}$ ),  $W$  adalah lebar setengah puncak (*full width at half maximum*, FWHM) dan adalah menyatakan sudut difraksi sinar-X (Bragg).

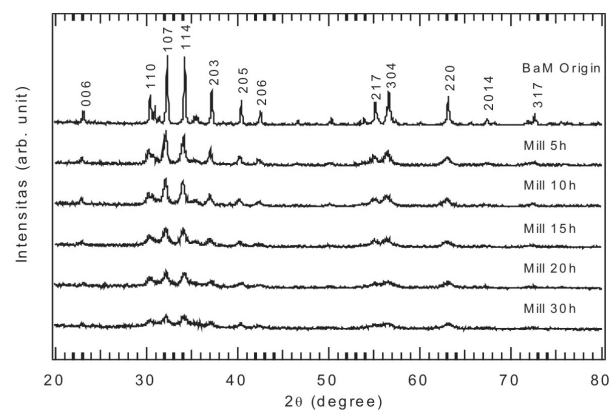
Untuk melihat kaitan antara kerusakan sistem struktur kristal bahan akibat proses *milling* dengan sifat kemagnetan bahan, maka akan dilakukan pengukuran kurva histeresis dengan peralatan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM). Berdasarkan data hasil pengukuran kurva histeresis ini, dapat dilakukan analisis kualitatif kaitan antara perubahan sifat magnet dengan sistem kristal.

Selain itu untuk melihat ukuran partikel sebagai efek proses *milling*, maka pengambilan data SEM (*Scanning Electron Microscope*) akan memberikan gambaran yang lengkap mengenai morfologi bahan. Kombinasi data-data hasil pengukuran yang dilakukan memberikan gambaran yang lengkap mengenai mekanisme perubahan sistem struktur nanokristalin dengan metoda *top down* yang dikaitkan dengan perubahan sifat magnetik bahan.

## 3 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### Data dari proses *High-Energy Milling*

Gambar 1 memperlihatkan pola difraksi sinar-x sebelum dan setelah proses *milling* selama selang waktu 5, 10, 15, 20 dan 30 jam. Dari gambar terlihat bahwa secara sistematis semakin lama proses *milling* maka puncak difraksi cenderung semakin menurun dan melebar, namun tidak terbentuk fasa amorf hingga proses *milling* 30 jam. Selain itu tidak terdapat puncak-puncak baru melainkan hanya fasa barium heksaferit yang berfasa tunggal dan hal ini hanya dikarenakan kerusakan struktur kristalit akibat proses *milling*.

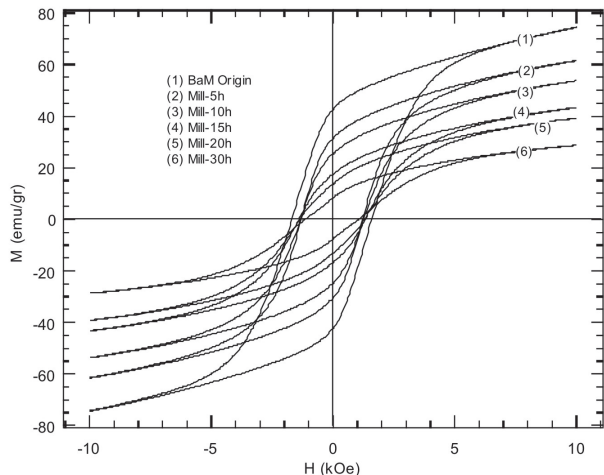


GAMBAR 1: Pola difraksi sinar-x bahan serbuk barium heksaferit sebelum dan setelah proses *milling* 5, 10, 15, 20 dan 30 jam

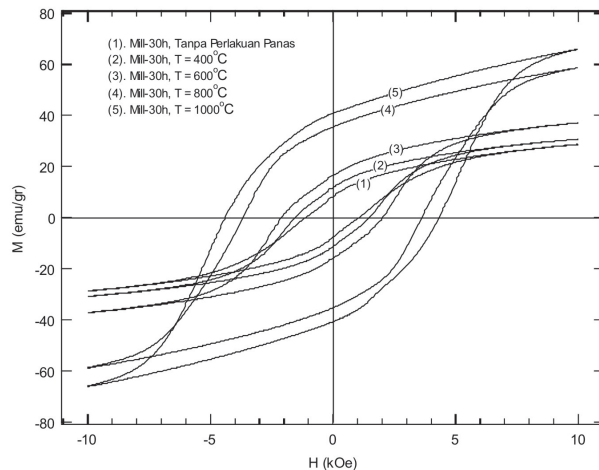
Gambar 2 memperlihatkan kurva histeresis sebelum dan setelah proses *milling* selama selang waktu 5, 10, 15, 20 dan 30 jam. Dari gambar terlihat bahwa semakin lama proses *milling* maka nilai magnetisasi remanen dan koersivitas intrinsik cenderung semakin menurun (Tabel 1). Hal ini menunjukkan pengaruh waktu proses *milling* terhadap kerusakan sistem kristal yang akhirnya berdampak pada penurunan sifat kemagnetan bahan.

### Data proses *milling* disertai *annealing* pada temperatur 400°C, 600°C, 800°C dan 1000°C selama 3 jam

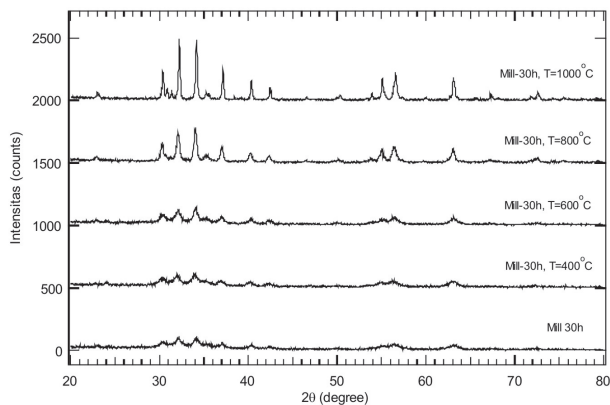
Gambar 3 memperlihatkan pola difraksi sinar-X dari hasil proses *milling* selama 30 jam selanjutnya diberikan proses *annealing* pada temperatur 400°C, 600°C, 800°C, dan 1000°C selama 3 jam dan disertai proses pendinginan di dalam *furnace* hingga temperatur ruang. Dari gambar terlihat bahwa puncak-puncak difraksi cenderung naik hingga menyerupai sebelum dilakukan proses *milling*, ini terkait dengan perbaikan struktur kristal bahan yang terdeformasi akibat proses *milling*.



GAMBAR 2: Kurva histeresis bahan serbuk barium heksaferit sebelum dan setelah proses *milling* 5, 10, 15, 20 dan 30 jam



GAMBAR 4: Kurva histeresis bahan serbuk barium heksaferit hasil dari proses *milling* selama 30 jam disertai proses *annealing* pada temperatur 400°C, 600°C, 800°C, dan 1000°C selama 3 jam



GAMBAR 3: Pola difraksi sinar-X bahan serbuk barium heksaferit dari hasil proses *milling* selama 30 jam disertai proses *annealing* pada temperatur 400°C, 600°C, 800°C, dan 1000°C selama 3 jam

Gambar 4 memperlihatkan kurva histeresis dari hasil proses *milling* selama 30 jam disertai proses *annealing* pada temperatur 400°C, 600°C, 800°C, dan 1000°C selama 3 jam dan disertai proses pendinginan di dalam *furnace* hingga temperatur ruang. Dari gambar terlihat bahwa semakin tinggi temperatur *annealing* hingga 1000°C maka nilai koersivitas intrinsik dan nilai magnetisasi remanen cenderung semakin meningkat (Tabel 2), hal ini terkait dengan perbaikan sistem kristal (rekristalisasi) berdampak pada peningkatan sifat kemagnetan bahan.

**Hubungan proses *milling* disertai proses *annealing* terhadap sifat magnetik bahan**

Kurva histeresis pada Gambar 2 dan 4 memperlihatkan bahwa secara sistematis semakin lama proses *milling* maka magnetisasi remanen dan koersivitas

magnet cenderung menurun, mengindikasikan bahwa proses *milling* dapat berdampak pada kerusakan struktur kristal serta meningkatnya *strain* internal yang dapat menyebabkan perubahan sifat kemagnetan suatu bahan. Hal ini dapat dimengerti, karena cacat kristal menyebabkan mekanisme interaksi antar momen spin magnet atom di dalam krsital terganggu. Tabel 1 memperlihatkan hubungan proses *milling* terhadap sifat magnetik suatu bahan berupa nilai magnetisasi remanen ( $M_r$ ) dan nilai koersivitas intrinsik ( $H_c$ ). Pada Tabel 1 ini terlihat bahwa semakin lama proses *milling* secara sistematis maka magnetisasi remanen dan koersivitas intrinsik cenderung turun. Nilai magnetisasi remanen sekitar 42,5 emu/gram sebelum proses *milling* dan 8,16 emu/gram setelah proses *milling* 30 jam dan nilai koersivitas intrinsik sekitar 1,68 kOe sebelum proses *milling* dan 1,13 kOe setelah proses *milling* 30 jam. Penurunan sifat magnetik ini diperkirakan akibat mekanisme interaksi spin momen magnet atom di dalam kristal terganggu akibat cacat kristal yang terbentuk selama proses *milling*.

TABEL 1: Hubungan proses *milling* selama 5, 10, 15, 20 dan 30 jam sebelum diberikan proses *annealing* terhadap sifat magnetik bahan

Milling (jam)	Sifat Magnetik Bahan	
	Mr (emu/gr)	Hc (kOe)
0	42,5	1,68
5	31,3	1,29
10	25,2	1,33
15	17,2	1,38
20	13,7	1,34
30	8,16	1,13

Untuk memperbaiki struktur kristal dan rekonstruksi bahan akibat proses *milling*, dapat dilakukan melalui proses *annealing*<sup>[7,9,10]</sup>. Dari Gambar 4 menunjukkan hasil proses *milling* selama 30 jam selanjutnya diberikan proses *annealing* pada temperatur 400°C, 600°C, 800°C dan 1000°C selama 3 jam, maka terlihat adanya kecenderungan peningkatan sifat magnetik bahan secara signifikan dimana magnetisasi remanen meningkat dari sekitar 8,16 emu/gram sebelum diberikan proses *annealing* dan setelah diberikan proses *annealing* hingga temperatur 1000°C selama 3 jam hingga mencapai 40,8 emu/gram dan nilai koersivitas intrinsik sekitar 1,13 kOe sebelum diberikan proses *annealing* dan setelah diberikan proses *annealing* hingga temperatur 1000°C selama 3 jam hingga mencapai 4,39 kOe dan hasil secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 2. Hal ini menunjukkan bahwa proses *annealing* telah membentuk kembali sistem fasa barium heksaferit yang terdeformasi akibat proses *milling* namun dengan ukuran kristalin yang tetap halus<sup>[9,10]</sup> seperti terlihat dari hasil identifikasi foto mikrostruktur bahan dengan menggunakan peralatan SEM yang ditunjukkan pada Gambar 5c.

TABEL 2: Hubungan hasil proses *milling* 30 jam setelah di proses *annealing* pada temperatur 400°C, 600°C, 800°C dan 1000°C selama 3 jam terhadap sifat magnetik bahan

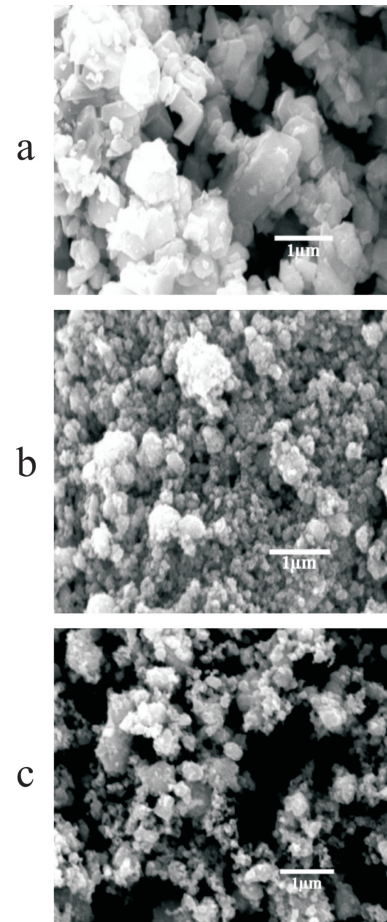
<i>Annealing</i> (°C)	Sifat Magnetik Bahan	
	Mr (emu/gr)	Hc (kOe)
-	8,16	1,13
400	11,7	1,56
600	16,4	2,07
800	35,4	3,66
1000	40,8	4,39

Gambar 5a, 5b dan 5c memperlihatkan hasil foto mikrostruktur dengan peralatan SEM terhadap bahan serbuk barium heksaferit sebelum dan setelah proses *milling* selama 30 jam. Dari gambar ini terlihat bahwa semakin lama proses *milling* maka ukuran kristalit cenderung semakin halus dan cenderung teraglomerasi akibat interaksi gaya elektrostatis yang cukup kuat pada partikel tersebut.

#### 4 KESIMPULAN

Dari analisa hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan:

1. Proses *milling* tanpa disertai proses *annealing* dapat menurunkan sifat magnetik bahan barium heksaferit yang ditunjukkan dari nilai koersivitas intrinsik 1,68 kOe sebelum proses *milling* dan 1,13 kOe setelah proses *milling* 30 jam serta nilai magnetisasi remanen 42,5 emu/gram sebelum proses



GAMBAR 5: a) Foto SEM barium heksaferit (original), b) Foto SEM setelah proses *milling* 30 jam, dan c) Foto SEM setelah proses *milling* 30 jam dan *annealing* pada temperatur 1000°C selama 3 jam

*milling* dan 8,16 emu/gram setelah proses *milling* 30 jam.

2. Proses *milling* selama 30 jam yang disertai proses *annealing* hingga temperatur 1000°C ditahan selama 3 jam, dapat memperbaiki sifat magnetik bahan barium heksaferit dengan semakin meningkatnya nilai koersivitas intrinsik bahan hingga sekitar 4,39 kOe dan nilai magnetisasi remanen cenderung kembali seperti harga sebelum dilakukan proses *milling* yaitu sekitar 40,8 emu/gram ini menunjukkan bahwa kerusakan sistem fasa ataupun struktur kristal akibat proses *milling* tidak ada lagi.
3. Terkait dengan peningkatan koersivitas magnet intrinsik dari 1,68 kOe (origin) menjadi 4,39 kOe setelah rekristalisasi dengan ukuran kristalit yang semakin kecil, maka dapat disimpulkan bahwa peningkatan sifat intrinsik ini akibat perubahan ukuran kristalit yang menurun dalam rentang nanometer ( $10^{-9}$ m).

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kersch, P., R. Grssinger, C. Kussbach, R. Sato-Turtelli, K.H. Mller, and L. Schultz, 2001, Magnetic Properties of Nanocrystalline Barium Ferrite at High Temperature, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*
- [2] Mendoza-Suarez, G., J.A. Matutes-Aquino, J.I. Escalante Garcia, H. Mancha Molinar, D. Rios Jara, K.K. Johal, 2001, *J. Magn. Magn. Mater.*, 223,55-62
- [3] Ridwan, Grace Tj. Sulungbudi, dan Mujamilah, 2005, High Energy Milling Dalam Metalurgi Serbuk, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, vol. 6, No.2, Februari 2005, 6-10
- [4] Kaczmarek, W. A., B. Idzikowski, K.H. Muller, 1998, *J. Magn. Magn. Mater.*, 177-181, p.921
- [5] Mitsunori Matsumoto, Akimitsu Morisako, Shigeto Takei, (2001), *Journal of Alloys and Comopounds* 236, 215-220
- [6] Hernandez, P., C. De Francisco, J.M. Munoz, J. Iniguez, L. Torres, M. Zazo, 1996, *J. Magn. Magn. Mater.*, 123, 157-158
- [7] Guozhong Cao, 2003, *Nanostructures & Nanomaterials, Synthesis, Properties & Application*, Imperial College Press, University of Washington, USA
- [8] Sort, J., J. Nogues, S. Surinach, J.S. Munoz, and M.D. Baro., 2003, *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, Vols. 15-16, pp. 599-606
- [9] Johan, A., Ridwan, Mujamilah, Ramlan, 2007, Magnetik Nanokristalin Barium Heksiferit ( $\text{BaO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) Hasil Proses Teknologi High-Energy Milling, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, hal 120-125, ISSN : 1411-1098, Akreditasi Nomor : 39/DIKTI/Kep/2004 dan 89/Akred-LIPI/P2MBI/5/2007
- [10] Johan, A., Ridwan, M. Azwar, A.A. Wisnu, 2005, Pengaruh High-Energy Milling Terhadap Sifat Magnetik Bahan Barium Heksiferit ( $\text{BaO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), *Jurnal Sains Materi Indonesia*, Vol.7 No.1, hal 25-29, ISSN : 1411-1098, Akreditasi Nomor: 39/DIKTI/Kep/2004
- [11] Janasi, S.R., M. Emura, F.J.G. Landgraf, D. Rodrigues, 2000, *J. Magn. Magn. Mater.*, 238, 168-172
- [12] Oda, K., T. Yoshio, K. O-Oka, and F. Kanamaru, 1984, *J. Mater. Sci. Lett.*, 3, 1007
- [13] Shafi, K.V.P. and A. Gedanke, 1999, *NanoStructured Materials*, Vol. 12, pp. 29-34
- [14] Estevez Rams, E., R. Martinez Garcia, E. Reguera, H. Montiel Sanchez, and H. Y. Madeira, 2000, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 33, 2708-2715
- [15] Zhiqiang Jin, Weitang, Jianrong Zhang, Hao Lin, and Youweidu, 1998, *J. Magn. Magn. Mater.*, 182, 231-237
- [16] Matteazzi, P., D. Basset, F. Miani, and G. Lecaer, 1997, *Mechanosynthesis of Nanophase Materials, Nano Structured Materials*, Pergamon Press Ltd., vol. 2, 217 - 229
- [17] Klug, H. P. and L.E. Alexander, 1962, *X-ray Diffraction Procedures*, John Wiley & Sons Inc., London