

ANALISIS FASA DAN SIFAT MAGNETIK PADA KOMPOSIT $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ HASIL *MECHANICAL MILLING*

Prijo Sardjono¹, Wisnu Ari Adi², Perdamaian Sebayang¹ dan Muljadi¹

¹Pusat Penelitian Fisika (P2F)-LIPI

Jl. Sangkuriang 154/D, Cisitu, Bandung 40132

²Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN)-BATAN

Kawasan Puspipstek Serpong 15314, Tangerang

ABSTRAK

ANALISIS FASA DAN SIFAT MAGNETIK PADA KOMPOSIT $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ HASIL *MECHANICAL MILLING*. Telah dilakukan analisis fasa dan uji sifat magnetik pada bahan komposit magnet $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ hasil *mechanical milling* menggunakan difraksi sinar-X dan *GmbH Permagraph*. Hasil *refinement* dari pola difraksi sinar-X menunjukkan bahwa sampel terdiri dari 2 fasa, yaitu fasa $BaFe_{12}O_{19}$ dan fasa $Nd_2Fe_{14}B$. Sedangkan fraksi massa dari fasa $BaFe_{12}O_{19}$ dan fasa $Nd_2Fe_{14}B$ berturut-turut sebesar 79,89 % dan 20,11 %. Sampel bahan magnet $BaFe_{12}O_{19}$ dengan struktur kristal heksagonal (*space group* P 63/m m c), parameter kisi $a = 5,9033(5) \text{ \AA}$, $b = 5,9033(5) \text{ \AA}$ dan $c = 23,239(2) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = 90^\circ$ dan $\gamma = 120^\circ$, $V = 701,3(1) \text{ \AA}^3$ dan $\rho = 5,7172 \text{ g.cm}^{-3}$. $Nd_2Fe_{14}B$ dengan struktur kristal simetri tetragonal (*space group* P 42/m n m (No. 136)) dengan parameter kisi sebesar $a = 8,865(8) \text{ \AA}$, $b = 8,865(8) \text{ \AA}$ dan $c = 12,269(1) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, $V = 964,3(1) \text{ \AA}^3$ dan $\rho = 7,7508 \text{ g.cm}^{-3}$. Hasil pengukuran sifat magnetik menunjukkan bahwa bahan magnet $Nd_2Fe_{14}B$ sebelum *dimilling* memiliki medan koersivitas dan medan magnet rimanen berturut-turut adalah 7984 Oe dan 5250 Gauss. Sedangkan untuk bahan magnet $BaFe_{12}O_{19}$ berturut-turut adalah 1625 Oe dan 1190 Gauss. Setelah *dimilling* selama 30 jam, medan koersivitas dan medan magnet rimanen meningkat di atas bahan magnet $BaFe_{12}O_{19}$ berturut-turut adalah 2650 Oe dan 1580 Gauss. Disimpulkan bahwa proses pencampuran ini tidak memberikan dampak rusaknya struktur fasa masing-masing. Partikel-partikel $BaFe_{12}O_{19}$ dapat dijadikan sebagai pelindung dari partikel-partikel $Nd_2Fe_{14}B$ yang memiliki sifat yang sangat korosif pada suhu kamar. Fasa $BaFe_{12}O_{19}$ ini relatif stabil pada suhu kamar sehingga partikel-partikel $BaFe_{12}O_{19}$ tidak mudah berubah setelah bercampur dengan partikel-partikel $Nd_2Fe_{14}B$.

Kata kunci: $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$, *Mechanical milling*, Struktur kristal, Sifat magnetik

ABSTRACT

PHASE ANALYSIS AND MAGNETIC PROPERTIES OF $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ COMPOSITE BY *MECHANICAL MILLING* PRODUCT. The synthesis and characterization of $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ composite by use *mechanical milling* has been performed. The result of refinement of X-ray diffractions showed that the sample consist of two phases namely $BaFe_{12}O_{19}$ and $Nd_2Fe_{14}B$ phase with fraction mass were 79.89 and 20.11 wt%, respectively. The $BaFe_{12}O_{19}$ system magnetic materials have been formed with the crystal structure of hexagonal (*space group* P 63/m m c), lattice parameter are $a = 5.9033(5) \text{ \AA}$, $b = 5.9033(5) \text{ \AA}$ and $c = 23.239(2) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = 90^\circ$ and $\gamma = 120^\circ$, $V = 701.3(1) \text{ \AA}^3$ and $\rho = 5.7172 \text{ g.cm}^{-3}$. The $Nd_2Fe_{14}B$ system magnetic materials have been formed with the crystal structure of tetragonal (*space group* P 42/m n m), lattice parameter are $a = 8.865(8) \text{ \AA}$, $b = 8.865(8) \text{ \AA}$ and $c = 12.269(1) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, $V = 964.3(1) \text{ \AA}^3$ and $\rho = 7.7508 \text{ g.cm}^{-3}$. The magnetic properties result of $Nd_2Fe_{14}B$ shown that the sample has the coercive field and remanence magnetization are 7984 Oe and 5250 Gauss, respectively. The $BaFe_{12}O_{19}$ are 1625 Oe and 1190 Gauss, respectively. And the $BaFe_{12}O_{19}-Nd_2Fe_{14}B$ composite increase to become 2650 Oe and 1580 Gauss, respectively. We conclude that the process of mixing between $BaFe_{12}O_{19}$ and $Nd_2Fe_{14}B$ is not affect the change of each phase. The $BaFe_{12}O_{19}$ particle can be use as the shielding of the $Nd_2Fe_{14}B$ particle from it's the corrosion properties. The $BaFe_{12}O_{19}$ magnetic material has a stable structure at room temperature, so that this structure was not easy of change after mix with the $Nd_2Fe_{14}B$ particles.

Keywords: $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$, *Mechanical milling*, Crystal structure, Magnetic properties

PENDAHULUAN

Bahan magnet permanen berbasis logam tanah jarang (*rare earth*) yang paling banyak digunakan di industry adalah Neodymium Iron Boron ($Nd_2Fe_{14}B$). Bahan magnet permanen $Nd_2Fe_{14}B$ ini cukup banyak, seperti pada peralatan elektronik, motor listrik/generator, sensor/transduser, industri otomotif, industri petrokimia dan produk peralatan kesehatan [1-2]. Keunggulan magnet permanen $Nd_2Fe_{14}B$ disamping memiliki medan anisotropi dan energi produk yang tinggi. Namun bahan ini juga memiliki kekurangan-kekurangan, yaitu harganya relatif lebih mahal dibandingkan dengan magnet permanen berbasis *ferrite*, dan suhu *Curie* relatif rendah sekitar 200 °C hingga 300 °C, sehingga sulit untuk diaplikasikan pada suhu tinggi. Disamping itu juga bahan ini juga memiliki ketahanan korosi yang relatif rendah sehingga dalam aplikasinya diperlukan *surface treatment* melalui *coating* atau pelapisan [3-5].

Disisi lain bahan magnet permanen berbasis *ferrite* yang juga cukup dikenal dan banyak digunakan terutama di industri elektronik adalah barium heksaferit ($BaFe_{12}O_{19}$). Bahan barium heksaferit ini memiliki beberapa keunggulan diantaranya adalah harganya yang murah, nilai koersivitas dan saturasi magnet yang tinggi, serta suhu transisi magnet T_c (suhu *Curie*) yang tinggi pula sehingga untuk aplikasi pada suhu relatif tinggi dapat digunakan dengan baik. Disamping itu juga bahan ini memiliki sifat kimia yang stabil, dan tahan korosi [6-8]. Namun kekurangan dari bahan magnet permanen berbasis *ferrite* ini adalah bahwa bahan ini memiliki nilai medan koersivitas dan medan saturasi yang relatif rendah dibandingkan dengan bahan magnet permanen berbasis $Nd_2Fe_{14}B$ [9-10]. Dengan demikian sifat-sifat makroskopik seperti sifat magnet dan mekanik bahan akan sangat bergantung pada struktur mikroskopiknya.

Kedua bahan magnet permanen tersebut baik yang berbasis $Nd_2Fe_{14}B$ dan Barium heksaferit, seolah-olah memiliki karakteristik yang saling berlawanan. Kelebihan yang dimiliki oleh bahan magnet permanen $Nd_2Fe_{14}B$ tidak dapat dimiliki oleh bahan magnet permanen berbasis Barium heksaferit. Kelebihan yang dimiliki oleh bahan magnet permanen berbasis Barium heksaferit juga tidak dapat dimiliki oleh bahan magnet permanen $Nd_2Fe_{14}B$. Begitu pula halnya dengan kekurangan-kekurangan pada masing-masing bahan magnet permanen tersebut.

Berdasarkan kajian sifat magnetik dari keduanya diharapkan bahwa segala kekurangan yang dimiliki dari bahan magnet $Nd_2Fe_{14}B$ ini dapat ditutup dengan kelebihan yang dimiliki oleh bahan magnet $BaFe_{12}O_{19}$. Segala kekurangan yang dimiliki oleh bahan magnet $BaFe_{12}O_{19}$ juga dapat ditutup oleh kelebihan dari bahan magnet $Nd_2Fe_{14}B$. Namun kendala utama adalah bahwa secara kimiawi elemen yang dimiliki oleh bahan magnet permanen $BaFe_{12}O_{19}$ merupakan bahan oksida keramik, sedangkan bahan magnet permanen $Nd_2Fe_{14}B$

merupakan bahan paduan logam yang bersifat mudah terkorosi sehingga tidak diharapkan mengandung adanya unsur oksigen. Studi pada penelitian ini, berpijak pada fenomena kestabilan persenyawaan suatu bahan. Hipotesis ini berasumsi bahwa bahan magnet permanen berbasis Barium heksaferit ini memiliki kestabilan fasa yang relatif baik pada suhu kamar, sehingga memungkinkan sekali apabila bahan ini difungsikan sebagai pelapis atau *coating* dari bahan magnet permanen berbasis $Nd_2Fe_{14}B$ yang relatif korosif pada suhu kamar. Dengan demikian apabila kedua bahan magnet permanen ini dapat disatukan diharapkan akan diperoleh bahan magnet permanen yang memiliki sifat magnetik yang unggul dan relatif murah.

Pada penelitian ini akan dilakukan pembuatan komposit bahan magnet sistem $BaFe_{12}O_{19}$ dan sistem $Nd_2Fe_{14}B$ menggunakan metode *mechanical milling*. Metode *mechanical milling* ini dipilih karena metode ini disamping memiliki beberapa keunggulan untuk skala komersial, diantaranya metode ini sangat sederhana, murah dan *loss* dari produk yang dihasilkan sangat kecil sehingga sangat efektif untuk kapasitas yang relatif besar, juga merupakan metode pencampuran yang dapat menghasilkan produk yang sangat homogen. Sedangkan pembahasan pada penelitian ini akan fokuskan pada tinjauan analisis fasa dari komposit tersebut dan perubahan sifat magnetik yang dihasilkan dari pencampuran kedua bahan tersebut. Jadi tujuan penelitian ini adalah untuk mensintesis komposit bahan magnet sistem $BaFe_{12}O_{19}$ dan $Nd_2Fe_{14}B$ yang sekaligus memahami parameter-parameter struktur yang dihasilkan dari kombinasi bahan ini berdasarkan sifat magnetiknya.

METODE PERCOBAAN

Sintesis bahan komposit $BaFe_{12}O_{19}$ dan $Nd_2Fe_{14}B$ dilakukan menggunakan metode reaksi padatan dari *single phase* serbuk $BaFeO$ dan *single phase* serbuk $Nd_2Fe_{14}B$ dengan perbandingan persen berat antara $BaFe_{12}O_{19} : Nd_2Fe_{14}B = 80 : 20$ %berat. Kedua bahan tersebut dicampur menggunakan alat *milling* yang berada di laboratorium Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN)-BATAN, dengan spesifikasi *normal speed = 1400 rpm, run time = 90 menit, of time = 30 menit* dan *on of cycle = 1 kali*. Dimensi *vial HEM*, panjang = 7,6 cm dan diameter = 5,1 cm. Sedangkan diameter *ball mill* sebesar 10 mm, terbuat dari bahan *stainless steel*. Proses *milling* ini bertujuan disamping akan diperoleh campuran yang homogen juga dapat diperoleh partikel campuran yang relatif kecil sehingga diharapkan dapat meningkatkan sifat magnetik dari komposit tersebut. Proses *milling* ini dilakukan dengan variasi waktu 0 jam, 10 jam, 20 jam, dan 30 jam.

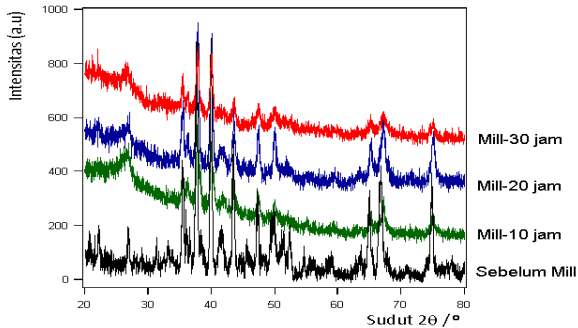
Campuran hasil proses *milling* kemudian dibuat sampel pelet yang dikompaksi dengan alat cetak yang memiliki diameter 2 cm dan ketebalan 2 mm. Setelah itu sampel pelet tersebut dikarakterisasi baik struktur kristal,

maupun sifat magnetiknya. Analisis kualitas dan kuantitas fasa-fasa yang ada di dalam sampel diukur menggunakan alat *X-Ray Diffractometer (XRD) Philip*. Pengukuran pola difraksi sampel dilakukan dengan berkas sinar-X dari *tube anode Co (cobalt)* dengan panjang gelombang, $\lambda = 1,7889 \text{ \AA}$, *mode = continuous-scan*, *step size = 0,02°* dan *time per step = 0,5 detik*. Profil difraksi sinar-X dianalisis menggunakan perangkat lunak *GSAS (Rietveld Analysis)* [11]. Karakterisasi tersebut dilakukan di laboratorium Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) =BATAN. Sedangkan karakterisasi sifat magnet dilakukan dengan menggunakan alat Magnet-Physik *Dr. Steingroever GmbH Permagraph C* yang berada di Laboratorium PPET-LIPI Bandung.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Gambar 1 diperlihatkan hasil pengukuran pola difraksi sinar-X gabungan sampel komposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ - $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ sebelum *dimilling* dan setelah *dimilling* selama 10 jam, 20 jam dan 30 jam.

Gambar 1 menunjukkan bahwa telah terbentuk puncak-puncak difraksi *Bragg* yang diduga memiliki 2 fasa yaitu fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dan fasa $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Identifikasi fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ merujuk pada hasil penelitian sebelumnya,



Gambar 1. Pola difraksi sinar-X gabungan sampel komposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ - $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$

Table 1. Parameter struktur dari fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (referensi Obradors [12])

Atom	neq	occ	n	x	y	z	viso
Ba2+	2	1	2	0,667	0,333	0,25	0,93
Fe3+ (1)	2	1	2	0	0	0	0,46
Fe3+ (2)	2	1	2	0	0	0,25	1,61
Fe3+ (3)	4	1	4	0,333	0,667	0,027	0,55
Fe3+ (4)	4	1	4	0,333	0,667	0,193	0,95
Fe3+ (5)	12	1	12	0,164	0,327	-0,108	0,32
O2- (1)	4	1	4	0	0	0,148	2,51
O2- (2)	4	1	4	0,333	0,667	-0,051	0,31
O2- (3)	6	1	6	0,191	0,381	0,25	0,071
O2- (4)	12	1	12	0,151	0,301	0,051	0,18
O2- (5)	12	1	12	-0,511	-0,002	0,149	22,22

Grup ruang (space group) : P 63/m m c (194)

Sistem kristal : Hexagonal

Parameter kisi :

$a = 5,9033 \text{ \AA}$, $b = 5,9033 \text{ \AA}$ dan $c = 23,239 \text{ \AA}$,

$\alpha = \beta = 90^\circ$ dan $\gamma = 120^\circ$

$V = 701,3 \text{ \AA}^3$ dan $\rho = 5,7172 \text{ gr.cm}^{-3}$

Table 2. Parameter struktur dari fasa $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (referensi Isnard [13])

Atom	neq	occ	n	x	y	z	viso
Nd1	4	1	4	0,150	0,14	0	0,22
Nd2	4	1	4	0,728	0,281	0	0,62
Fe1	4	1	4	0	0,5	0	0,82
Fe2	16	1	16	0,725	0,063	0,376	0,32
Fe3	16	1	16	0,468	0,135	0,321	0,83
Fe4	8	1	8	0,191	0,191	0,241	0,53
Fe5	8	1	8	0,402	0,402	0,288	3,35
Fe6	4	1	4	0	0	0,386	2,75
B	4	1	4	0,3	0,3	0	27,12

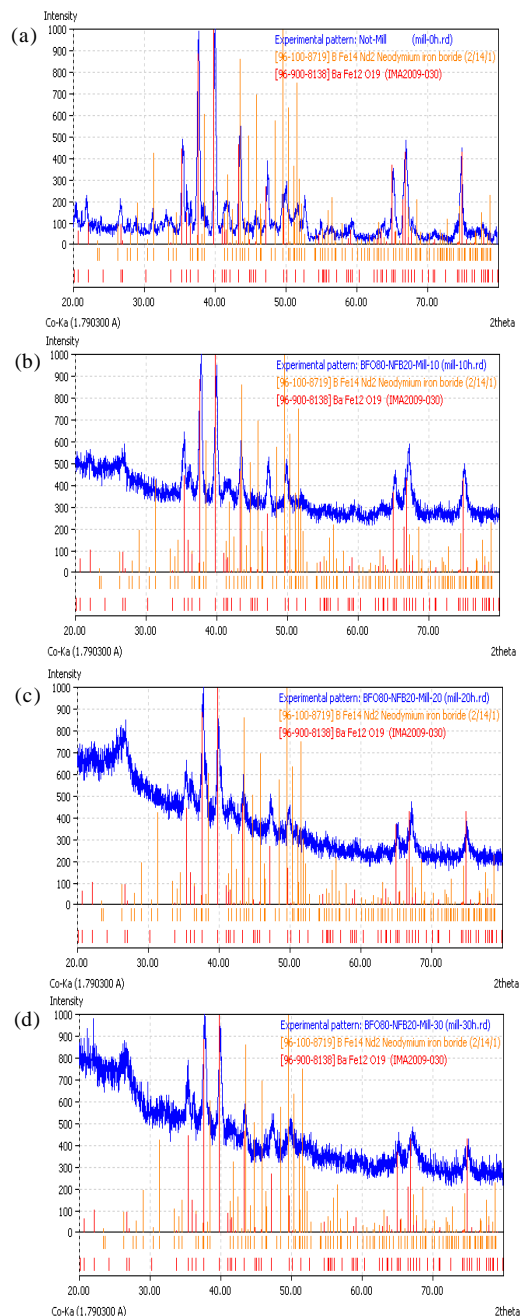
Grup ruang (space group) : P 42/m n m (136)

Sistem kristal : Tetragonal

Parameter kisi :

$a = 8,865 \text{ \AA}$, $b = 8,865 \text{ \AA}$ dan $c = 12,269 \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

$V = 964,3 \text{ \AA}^3$ dan $\rho = 7,7508 \text{ gr.cm}^{-3}$



Gambar 2. Identifikasi fasa pola difraksi sinar-X gabungan sampel komposit $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ / $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

ICDD 96-100-8842 [12], sedangkan identifikasi fasa $Nd_2Fe_{14}B$ merujuk pada hasil penelitian sebelumnya (ICDD96-100-8719) [13].

Berdasarkan Gambar 2 tersebut dapat diasumsikan bahwa hasil reaksi dari kedua campuran tersebut tidak menghadirkan fasa asing. Namun diperlukan data lain yang dapat mendukung kedua fasa ini masih terbentuk dengan baik setelah komposit tersebut *dimilling* selama 30 jam. Pada Tabel 1 diperlihatkan parameter struktur dari fasa $BaFe_{12}O_{19}$.

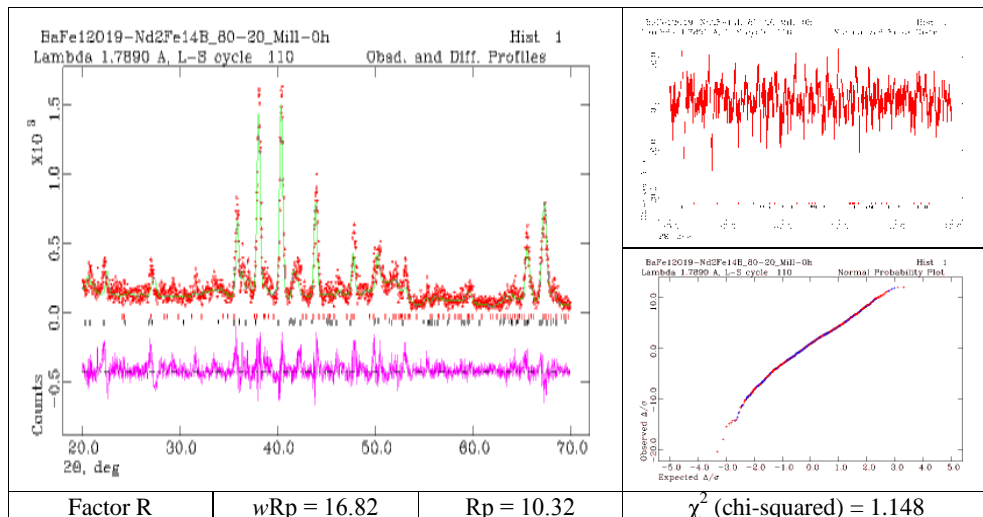
Sedangkan parameter struktur fasa $Nd_2Fe_{14}B$ ditunjukkan pada Tabel 2.

Pada Gambar 3 ditunjukkan hasil *refinement* pola difraksi sinar-X sampel $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ sebelum *dimilling*. Hasil *refinement* ini menghasilkan kualitas *fitting* sangat baik dengan faktor R yang sangat kecil juga. Faktor R merupakan *criteria of fit* dan faktor S adalah *goodness of fit* yang bernilai relatif kecil dan

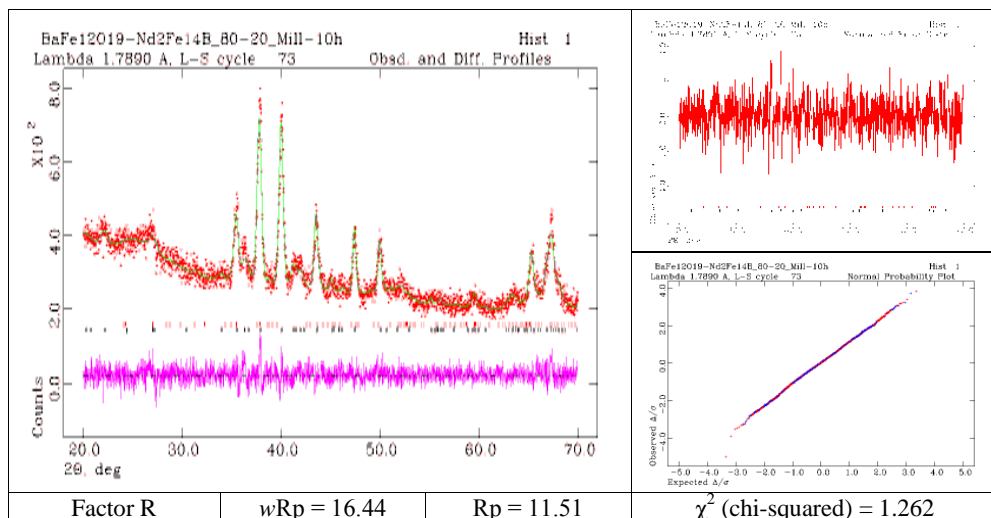
menurut Izumi nilai S yang diperkenankan maksimum 1,3 [11].

Hasil *refinement* tersebut menunjukkan bahwa sampel terdiri dari 2 fasa, yaitu fasa $BaFe_{12}O_{19}$ dan fasa $Nd_2Fe_{14}B$ dengan fraksi massa dari campuran tersebut berturut-turut sebesar 79,89 % dan 20,11 %.

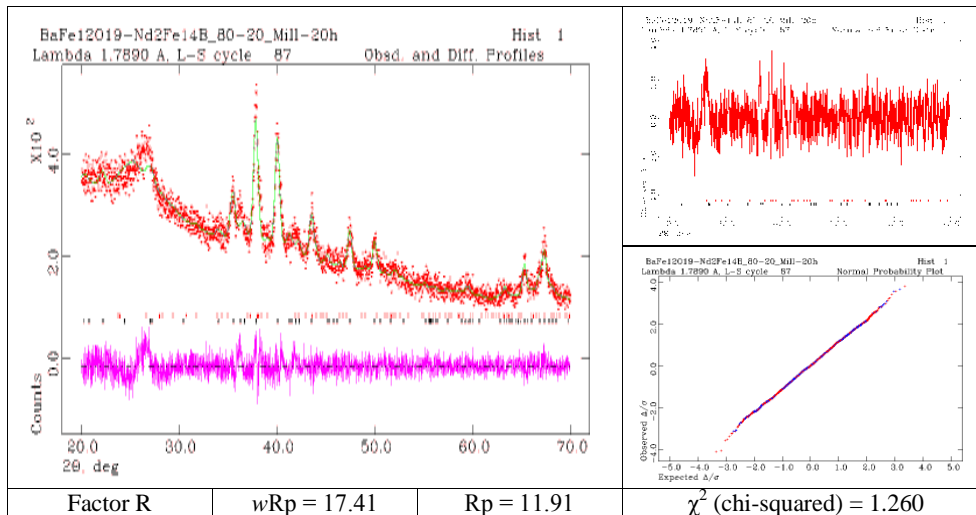
Pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6 diperlihatkan hasil *refinement* pola difraksi sinar-x komposit $BaFe_{12}O_{19}-Nd_2Fe_{14}B$ yang telah *dimilling* berturut-turut selama 10 jam, 20 jam, dan 30 jam. Berdasarkan hasil *refinement* menunjukkan bahwa komposit $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ yang *dimilling* selama 10 jam memiliki kandungan fraksi massa fasa $BaFe_{12}O_{19}$ dan fasa $Nd_2Fe_{14}B$ berturut-turut sebesar 80,34 % dan 19,66 %. Komposit $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ yang *dimilling* selama 20 jam berturut-turut sebesar 80,81 % dan 19,19 %. Sedangkan komposit $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ yang *dimilling* selama 30 jam berturut-turut sebesar 80,86 %



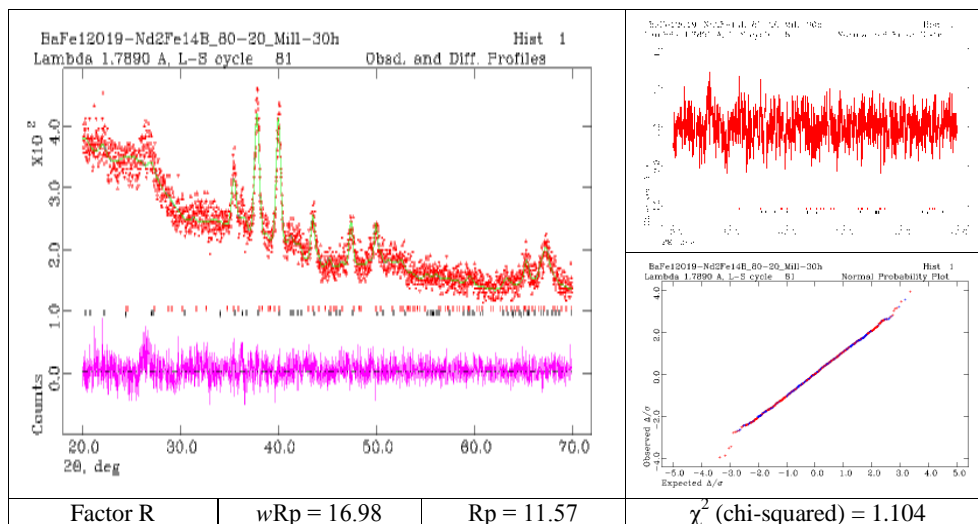
Gambar 3. Refinement pola difraksi sinar-X komposit $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ sebelum *milling*.



Gambar 5. Refinement pola difraksi sinar-X komposit $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ setelah *milling* 10 jam



Gambar 6. Refinement pola difraksi sinar-x komposit BaFe₁₂O₁₉-Nd₂Fe₁₄B setelah milling 20 jam



Gambar 7. Refinement pola difraksi sinar-X komposit BaFe₁₂O₁₉/Nd₂Fe₁₄B setelah milling 30 jam

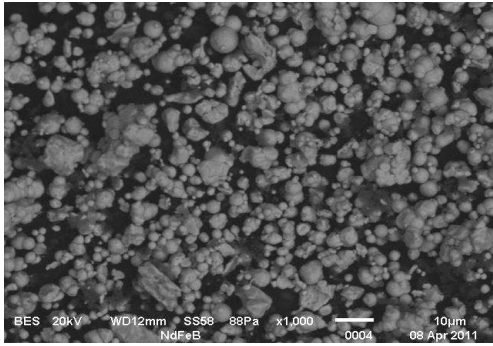
dan 19,14 %. Dengan demikian proses pencampuran ini tidak memberikan dampak rusaknya struktur fasa. Hal ini diduga memang partikel-partikel BaFe₁₂O₁₉ dapat dijadikan sebagai pelindung dari partikel-partikel Nd₂Fe₁₄B yang memiliki sifat yang sangat korosif pada suhu kamar. Fasa BaFe₁₂O₁₉ ini relatif stabil pada suhu kamar, maka partikel-partikel BaFe₁₂O₁₉ juga tidak mudah berubah setelah bercampur dengan partikel-partikel Nd₂Fe₁₄B. Dugaan ini didukung dengan hasil pengamatan morfologi sampel, yang mengindikasikan bahwa partikel-partikel BaFe₁₂O₁₉ dapat dijadikan sebagai pelindung dari partikel-partikel Nd₂Fe₁₄B yang memiliki sifat yang sangat korosif pada suhu kamar.

Gambar 6 merupakan hasil refinement pola difraksi sinar-x sampel komposit BaFe₁₂O₁₉-Nd₂Fe₁₄B yang telah dimilling selama 20 jam.

Gambar 7 merupakan hasil refinement pola difraksi sinar-X sampel komposit BaFe₁₂O₁₉/Nd₂Fe₁₄B yang telah dimilling selama 30 jam.

Berdasarkan hasil pengamatan morfologi sampel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8, tampak bahwa partikel Nd₂Fe₁₄B yang memiliki ukuran partikel sekitar 1 µm hingga 5 µm diduga terselubung oleh partikel BaFe₁₂O₁₉, yang memiliki ukuran partikel yang relatif jauh lebih kecil.

Bahan magnet adalah bahan yang mempunyai resultan medan atomik relatif besar yang disebabkan adanya momen magnetik *spin* elektron. Medan magnet dari masing-masing atom dalam bahan magnet sangat kuat, sehingga interaksi diantara atom-atom tetangganya menyebabkan sebagian besar atom akan berorientasi membentuk kelompok-kelompok. Kelompok atom yang terorientasi dalam suatu daerah dinamakan *domain*. Bahan ini apabila diberikan medan magnet luar, maka *domain-domain* ini akan terorientasi searah dengan medan magnet luar. Semakin kuat medan magnetnya semakin banyak *domain-domain* yang terorientasi. Akibatnya medan magnet dalam bahan feromagnetik



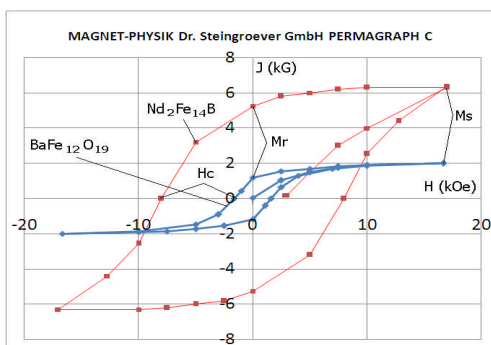
Gambar 8. Morofologi permukaan partikel komposit $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$

akan semakin kuat. Setelah seluruh domain terarahkan, penambahan medan magnet luar tidak memberi pengaruh karena tidak ada lagi domain yang disearahkan. Keadaan ini dinamakan jenuh atau keadaan saturasi [14].

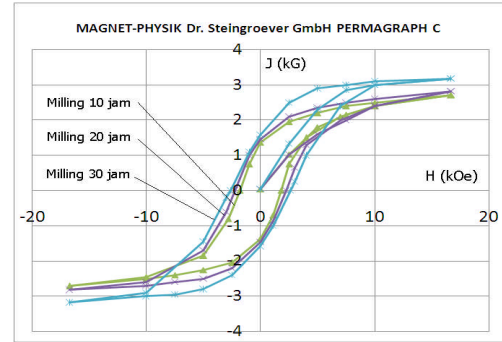
Pada Gambar 9 diperlihatkan kurva histeresis sampel $BaFe_{12}O_{19}$ dan sampel $Nd_2Fe_{14}B$ yang diukur pada medan magnet dari -10 kOe hingga 10 kOe.

Pada Gambar 9 tampak bahwa kedua kurva menunjukkan hubungan antara M dan H yang tidak linier. Dengan meningkatnya harga H, pada awalnya M meningkat secara drastis, kemudian M hampir mendekati konstan. Kondisi ini disebut dengan keadaan saturasi M_s , di mana magnetisasi M tidak banyak berubah. Dan ketika intensitas medan magnet H diturunkan hingga mencapai $H = 0$, maka nilai M tidak kembali melewati lintasan kurva semula. Pada harga $H = 0$ ini, magnetisasi M mempunyai harga tidak sama dengan nol yang berarti di dalam bahan masih tersimpan fluks induksi. Kondisi ini disebut dengan magnetisasi remanen M_r .

Selanjutnya harga intensitas medan magnet H diturunkan terus (berharga negatif), kurva M akan memotong sumbu pada medan magnet yang dinotasikan sebagai H_c . Intensitas H_c inilah yang diperlukan untuk membuat rapat fluks $B = 0$ atau menghilangkan fluks dalam bahan. Intensitas magnet H_c ini disebut koersivitas bahan atau medan koersivitas. Bila selanjutnya harga medan magnet H diturunkan terus akan mencapai nilai saturasi kembali dan begitu seterusnya. Kurva M akan membentuk satu lintasan tertutup yang disebut kurva histeresis.



Gambar 9. Morofologi permukaan partikel komposit $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$



Gambar 10. Kurva histeresis sampel komposit $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$

Tabel 3. Data hasil pengukuran sifat magnetic dengan MAGNET-PHYSIK Dr. Steingroever GmbH PERMAGRAPH C

Sample	Remanence, M_r (kG)	Saturation, M_s (kG)	Coercivity, H_c (Oe)
$BaFe_{12}O_{19}$	1,19	2,0	1625
$Nd_2Fe_{14}B$	5,25	6,4	7984

Tabel 4. Data hasil pengukuran sifat magnetic dengan MAGNET-PHYSIK Dr. Steingroever GmbH PERMAGRAPH C.

Sample	Remanence, M_r (kG)	Saturation, M_s (kG)	Coercivity, H_c (Oe)
Milling 10 jam	1,37	2,71	1810
Milling 20 jam	1,46	2,82	2250
Milling 30 jam	1,58	3,18	2650

Pada Gambar 9 juga ditunjukkan perbedaan nilai dari kurva *hysteresis loop* yang terdiri dari *intrinsic saturation* M_s , *remanence* M_r , dan *coercivity* H_c seperti yang disajikan pada Tabel 3.

Pada Gambar 10 diperlihatkan kurva histeresis sampel komposit $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ yang diukur pada medan magnet dari -10 kOe hingga 10 kOe. Pada Gambar 10 juga ditunjukkan perbedaan nilai dari kurva *hysteresis loop* yang terdiri dari *intrinsic saturation* M_s , *remanence* M_r , dan *coercivity* H_c seperti yang disajikan pada Tabel 4.

Berdasarkan hasil pengujian sifat magnet menunjukkan bahwa dengan pembuatan komposit ini diperoleh peningkatan sifat magnetik baik *intrinsic saturation* M_s , *remanence* M_r dan *coercivity* H_c . Peningkatan selanjutnya diduga disebabkan karena ukuran partikel keduanya semakin kecil.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah berhasil dilakukan pembuatan komposit bahan magnet $BaFe_{12}O_{19}/Nd_2Fe_{14}B$ dengan komposisi 80% : 20%. Hasil *refinement* dari pola difraksi sinar-X menunjukkan bahwa sampel terdiri dari 2 fasa, yaitu fasa $BaFe_{12}O_{19}$ dan fasa $Nd_2Fe_{14}B$. Sedangkan fraksi massa dari fasa $BaFe_{12}O_{19}$ dan fasa $Nd_2Fe_{14}B$ berturut-turut sebesar 79,89 % dan 20,11 %. Sampel bahan magnet $BaFe_{12}O_{19}$ dengan struktur kristal heksagonal (*space group* P 63/mmc), parameter kisi $a = 5,9033(5) \text{ \AA}$, $b = 5,9033(5) \text{ \AA}$ dan

$c = 23,239(2) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = 90^\circ$ dan $\gamma = 120^\circ$, $V = 701.3(1) \text{ \AA}^3$ dan $\rho = 5,7172 \text{ g.cm}^{-3}$. $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ dengan struktur kristal simetri tetragonal (*space group* P 42/m n m (No. 136)) dengan parameter kisi sebesar $a = 8,865(8) \text{ \AA}$, $b = 8,865(8) \text{ \AA}$ dan $c = 12,269(1) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, $V = 964,3(1) \text{ \AA}^3$ dan $\rho = 7,7508 \text{ g.cm}^{-3}$. Hasil pengukuran sifat magnetik menunjukkan bahwa bahan magnet $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ sebelum *dimilling* memiliki medan koersivitas, dan medan magnet remanen berturut-turut adalah 7984 Oe, dan 5250 Gauss. Sedangkan untuk bahan magnet $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ berturut-turut adalah 1625 Oe, dan 1190 Gauss. Setelah *dimilling* selama 30 jam, medan koersivitas dan medan magnet remanen meningkat di atas bahan magnet $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ berturut-turut adalah 2650 Oe, dan 1580 Gauss. Proses pencampuran ini tidak memberikan dampak rusaknya struktur fasa. Partikel-partikel $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dapat dijadikan sebagai pelindung dari partikel-partikel $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ yang memiliki sifat yang sangat korosif pada suhu kamar. Fasa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ini relative stabil pada suhu kamar, maka partikel-partikel $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ juga tidak mudah berubah setelah bercampur dengan partikel-partikel $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

DAFTAR ACUAN

- [1]. YU.D. YAGODKIN, A.S. LILEEV, YU.V. LIUBINA, V.A. GLEBOV, W. STEINER, *Abstracts of the Third National Conference on Using XRD, Synchrotron Radiation, Neutrons and Electrons for Materials Investigation*, Moscow, Russia, (2001) 301
- [2]. YU.D. YAGODKIN, A.S. LILEEV, V.P. MENSHENKOV, YU.A. SKAKOV, *Metalloved. Term. Obrab. Met.*, **8** (2000) 20
- [3]. P. THOMPSON, O. GUTFLEISCH, J.N. CHAPMAN, I.R. HARRIS, *J. Magn. Magn. Mater.*, **202** (1999) 53
- [4]. G. KIM, V.A. GLEBOV, B.V. SAFRONOV, E.N. SHINGAREV, *Abstracts of the XIIth International Conference on Permanent Magnets*, Suzdal, Russia, (1997) 94
- [5]. P.J. MCGUINNESS, C. SHORT, A.F. WILSON, I.R. HARRIS, *J. Alloys Compounds*, **184** (1992) 243
- [6]. ALEXANDRE R. BUENOA, MARIA L. GREGORIB, MARIA C.S. NO' BREGAC, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **320** (2008) 864-870
- [7]. BIN YU, LU QI, HUI SUN, JIAN-ZHONG YE, *J. Mater. Sci.*, **42** (2007) 3783-3788
- [8]. KOJIMA, H., *Fundamental Properties of Hexagonal Ferrites with Magnetoplumbite Structure*, Ed. E. P. WOHLFARTH, North Holland Publishing Company, Amsterdam, **3** (1982)
- [9]. ESTEVEZ RAMS, E., MARTINEZ GARCIA, R., REGUERA, E., MONTIEL, SANCHEZ, E., and MADEIRA, H. Y., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33** (2000) 2708-2715
- [10]. R. NOWOSIELSKI, R. BABILAS, G. DERCZ, L. PAJK, J. WRONA, *Archives of Materials Science and Engineering*, **28**(12) (2007) 735-742
- [11]. F. IZUMI, *A Rietveld-Refinement Program RIETAN-94 for Angle-Dispersive X-Ray and Neutron Powder Diffraction*, National Institute for Research in Inorganic Materials 1-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan, Revised on June 22, (1996)
- [12]. OBRADORS X, COLLOMB A, PERNET M, SAMARAS D, JOUBERT J C, *Journal of Solid State Chemistry*, **56** (1985) 171-181
- [13]. ISNARD O, YELON W B, MIRAGLIA S, FRUCHART D, *Journal of Applied Physics*, **78**(3) (1995) 1892-1898
- [14]. JOONGHOEDHO, E.K. LEE, J.Y. PARK, N.H. HUR, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **285** (2005) 164-168