

PENGARUH UKURAN BUTIRAN *NdFeB* PADA SIFAT DENSITAS  
DAN KEMAGNETAN MAGNET KOMPOSIT *HYBRID*

*BaO.6(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/NdFeB*

*The Influence of NdFeB Particle Sizes on Density and Magnetic Properties  
of Hybrid Composite Magnet BaO.6(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/NdFeB*

Tita Oktavia C.R.<sup>1)</sup>, Handoko Setyo Kuncoro<sup>2)</sup>, Tony Kristiantoro<sup>3)</sup>

<sup>1</sup>Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

<sup>2</sup>Balai Besar Keramik, Jl. Jendral Ahmad Yani 392 Bandung 40272 Tlp: (022) 7206221

<sup>3</sup>Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia  
e-mail: titaoctaviacr@gmail.com

Naskah masuk: 21 Juni 2018, Revisi 1: 10 Juli 2018, Diterima: 11 September 2018

ABSTRAK

*T*

elah dilaksanakan studi tentang pengaruh ukuran butiran *NdFeB* pada sifat densitas dan kemagnetan bahan magnet komposit *hybrid BaO.6(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/NdFeB*. Kegiatan penelitian ini meliputi: proses sintesis bahan magnet komposit dalam matrik PVA, pengujian densitas *bulk* dan karakterisasi kurva *hysteresis* magnetisasi serta analisis hasil pengolahan data penelitian. Perbandingan komposisi massa *BaO.6(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):NdFeB* ditentukan 1:1. Adapun variasi penelitian diambil dari ukuran butiran *NdFeB* yang diperoleh berdasarkan standar mesh ayakan 60 (mewakili ukuran 250 $\mu$ m), 230 (63 $\mu$ m), 325 (44 $\mu$ m) dan 400 (37 $\mu$ m) yang mana ukuran butiran *BaFe* dibuat tetap pada mesh ayakan 325 (44 $\mu$ m). Keempat sampel variasi ini diberi label mesh 60, mesh 230, mesh 325, dan mesh 400. Hasil pengujian densitas *bulk* menunjukkan kepadatan terbaik untuk sampel mesh 60, hasil ini diikuti secara kuadratik oleh remanensi magnetiknya. Pengamatan parameter kuat medan maksimum dalam kurva *hysteresis* magnetisasi mengindikasikan estimasi temperatur Curie yang paling baik/tinggi untuk sampel mesh 60. Hasil pengujian nilai induksi remanen (*Br*) dan perhitungan total energi produk maksimum (*BH<sub>max</sub>*) menguatkan bukti hipotesis bahwa sampel mesh 60 (ukuran butiran terbesar) memiliki sifat kemagnetan yang lebih baik dari sampel lainnya.

**Kata Kunci:** magnet komposit, ukuran butiran, densitas, magnetisasi, koersifitas, remanensi

ABSTRACT

*A*

study has been conducted concerning the effect of *NdFeB* grain size on the density and magnetic properties of hybrid composite magnet material of *BaO.6(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/NdFeB*. The research activities include: composite magnet material synthesis process in PVA matrix, bulk density testing and characterization of magnetization *hysteresis* curves, and analysis of research data processing results. The ratio of mass composition of

*BaO.6(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):NdFeB has been determined by 1:1. While the variation of the study was taken from the NdFeB grain size obtained based on the standard mesh sieve 60 (representing the size of 250 $\mu$ m), 230 (63 $\mu$ m), 325 (44 $\mu$ m) and 400 (37 $\mu$ m) which BaFe grain size is made constant at sieve mesh 325 (44 $\mu$ m). The bulk density test results have shown that the best density is for mesh 60 sample, these results are followed as quadratic relation by its magnetic remanence. Observation of the maximum field strength parameters in the magnetization hysteresis curves has indicates that the best or highest Curie temperature estimation was obtained by the mesh sample of 60. The testing results of the value of remanence induction ( $B_r$ ) and the calculation of total maximum product energy ( $BH_{max}$ ) corroborates our hypothesis that the mesh sample of 60 (the largest grain size) has better magnetism properties than the other samples.*

**Keywords:** composite magnet, grain size, density, magnetization, coercivity, remanence

## I. PENDAHULUAN

Indonesia sangat potensial akan pasir besi dan limbah besi yang merupakan bahan baku untuk pembuatan magnet permanen berbasis ferit dengan aplikasi yang beragam [1][2][3][4]. Magnet jenis ferit [5] yang banyak dikembangkan dan diproduksi yaitu barium ferit dan stronsium ferit [6][7]. Magnet jenis ini memiliki beberapa keunggulan diantaranya tidak mudah terkorosi, bahan baku yang mudah didapatkan, dan sifat mekanik yang kuat [8][5][9][10]. Namun, magnet permanen jenis ini memiliki kelemahan diantaranya sifat mekanik yang *brittle* serta sifat magnetik yang lebih rendah dibandingkan magnet

permanen berbasis tanah jarang. Hal ini disebabkan magnet permanen berbasis ferit merupakan magnet keramik sehingga remanensi magnetiknya ( $B_r$ ) hanya 1/3 dari remanensi magnet logam, khususnya *NdFeB* [11]. Oleh karena itu, untuk memenuhi kebutuhan magnet dengan sifat magnetik yang besar maka pada penelitian ini dilakukan penggabungan (*hybrid*) antara barium ferit dengan *NdFeB* dengan metode *bonded* magnet atau menggunakan *matrix* termoplastik sebagai pengikat untuk mempermudah proses pembuatan.

Seperti pada penelitian sebelumnya, hasil yang diharapkan dari pembuatan magnet *bonded hybrid* ini adalah adanya estimasi peningkatan temperatur *Curie* ( $T_c$ ) dan

sifat magnetiknya. Sifat magnetik suatu bahan ditunjukkan oleh parameter-parameter magnetiknya, yaitu kekuatan magnetik yang diwakilkan oleh remanensi ( $B_r$ ) serta kepermanenan yang diwakilkan oleh koersifitas ( $H_c$ ) dan produk energi maksimum ( $BH_{max}$ ) [12]. Parameter tersebut terdapat pada kurva histerisis yang merupakan terusan dari kurva magnetisasinya.

Secara makroskopis, magnetisasi adalah respon bahan magnetik terhadap medan magnet luar [13] sedangkan secara mikroskopis, magnetisasi berasal dari momen magnetik spin yang dihasilkan dari gerakan spin pada bahan tersebut [14][15][16]. Oleh karena itu, jika ditinjau secara mikroskopis, sifat magnetik suatu bahan bergantung pada momen magnetiknya [17]. Hal ini dinyatakan dalam persamaan Langevin tentang pengaruh momen magnetik terhadap magnetisasi [18] yang dituliskan pada persamaan 1 berikut.

$$M = M_s \left( \coth \left( \frac{\mu H}{k_B T} \right) - \frac{k_B T}{\mu H} \right) \quad (1)$$

dengan  $M_s$ ,  $k_B$ ,  $H$ ,  $T$ , dan  $\mu$  berturut-turut mempresentasikan saturasi magnetik, konstanta Boltzman, medan magnet luar dan temperatur absolut

serta momen magnetik tiap partikel, dengan nilai momen magnetik.

$$\mu = M_s \pi D^3 / 6 \quad (2)$$

Pada persamaan ini,  $D$  merupakan ukuran-ukuran partikel bahan magnet. Berdasarkan persamaan tersebut, ukuran partikel ( $D$ ) berbanding lurus terhadap momen magnetik ( $\mu$ ) dan nilai magnetisasi ( $M$ ), sehingga dalam penelitian ini dibuat hipotesis jika ukuran partikel/butiran bahan yang semakin besar akan mempengaruhi sifat-sifat magnetik yang semakin besar juga, demikian pula sebaliknya.

Untuk membuktikan hipotesis tersebut,  $NdFeB$  sebagai bahan penguat pada magnet komposit *hybrid* yang disintesis divariasikan ukuran partikelnya untuk memperoleh tren sifat magnetiknya. Adapun ukuran partikel  $NdFeB$  yang divariasikan yaitu menggunakan ayakan mesh 60, 230, 325 dan 400, sedangkan ukuran partikel  $BaFe$  dibuat tetap menggunakan ayakan mesh 325. Dalam hal ini, semakin besar ukuran ayakan standar mesh, maka ukuran partikel semakin kecil [19][20].

## II. METODE PENELITIAN

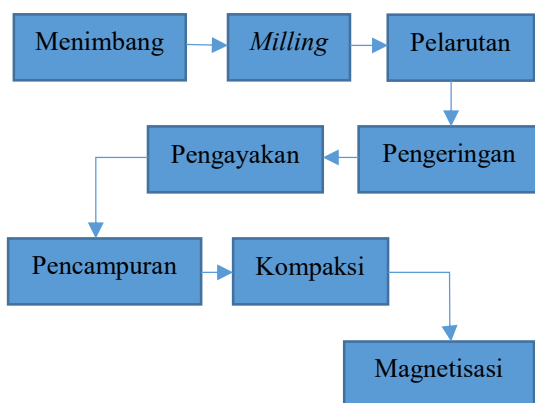
### Alat dan Bahan

Bahan utama yang digunakan pada penelitian ini meliputi serbuk

BaFe ukuran lolos mesh 325; serbuk NdFeB tipe MQP 16-7 ukuran lolos mesh 60, 230, 325 dan 400; matrik PVA. Peralatan penunjang penelitian yang digunakan diantaranya *beaker glass, magnetic stirrer, rotary ball mill, spatula, cetakan stainless steel, alat tekan selenoida, timbangan teknis, dan lainnya.*

**Metode Sintesis**

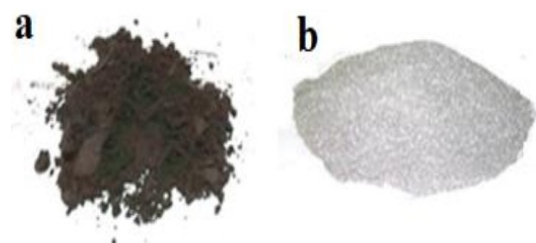
Alur proses sintesis magnet komposit secara umum dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Bahan magnet barium ferit dan NdFeB dengan massa 20 gram dihaluskan menggunakan *rotary ball mill* selama 60 menit menggunakan perbandingan bola besar: bola kecil adalah 1:4.



**Gambar 1.** Diagram alir proses sintesis magnet komposit *BaFe/NdFeB*

*BaFe* dihaluskan menggunakan metode *dry milling* karena *BaFe*

merupakan bahan magnet keramik sehingga tidak mudah teroksidasi. NdFeB, yang merupakan bahan magnet logam tanah jarang sehingga sangat mudah teroksidasi, dihaluskan menggunakan metode *wet milling*, yaitu dicampurkan dengan toluen sebanyak 60% (6 mL). Penambahan toluen dapat mengurangi oksidasi NdFeB akibat gesekan partikel dengan bola-bola baja dan dinding *ball mill*.



**Gambar 2.** a.Bahan *BaFe*; b.Bahan *NdFeB*

Serbuk *BaFe* dan *NdFeB* yang telah dihaluskan kemudian dikeringkan dan diayak menggunakan ayakan teknis. *BaFe* diayak hingga didapatkan ukuran 325 mesh, sedangkan *NdFeB* diayak pada ukuran 60, 230, 325 dan 400 mesh. Setelah didapatkan partikel dengan ukuran tersebut, selanjutnya dilakukan pembuatan empat magnet komposit *hybrid* dengan perbandingan massa *BaFe:NdFeB* 1:1 dari massa total 2.5 gram. Adapun keempat sampel

tersebut divariasikan ukuran partikel NdFeBnya seperti pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Variasi sampel penelitian

Kode (ayakan)	Estimasi ukuran partikel	
	BaFe	NdFeB
mesh 60	44µm	250µm
mesh 230	44µm	63µm
mesh 325	44µm	44µm
mesh 400	44µm	37µm

Magnet yang disintesis merupakan magnet berbasis *bonded* sehingga pada tiap variasi dicampurkan dengan 1% matrik PVA (1% = 1 gram/100mL air). Proses pencampuran menggunakan metode *wet mixing*, yaitu dengan mencampurkan variasi pada Tabel 1 dengan 0,1 gram PVA yang telah dilarutkan dalam 10 mL aquades. Sambal diaduk menggunakan spatula, campuran tersebut dipanaskan pada suhu 20 °C selama 10 menit hingga campuran mengering.



**Gambar 3.** Alat tekan solenoid [21]

Campuran bahan magnet yang telah kering kemudian dicetak

menggunakan cetakan magnet *stainless steel* dengan diameter dalam 12.1 mm dan ditekan menggunakan alat tekan solenoida pada tekanan 120 kg/cm<sup>2</sup> dengan penahanan selama 15 detik (seperti ditunjukkan Gambar 3). Sampel magnet yang telah dicetak kemudian didiamkan selama 24 jam untuk proses pematangan struktur ikatan (*age hardening*) sehingga magnet yang dihasilkan lebih keras dan terikat dengan baik yang ditunjukkan dengan tidak adanya bekas goresan pada permukaan bahan magnet tersebut.

Sebagai hasil analisis awal, citra sebaran partikel pada permukaan bahan-bahan uji telah diamati menggunakan *USB digital Cooling Tech Microscope* dengan jangkauan perbesaran 50 hingga 500 kali, seperti ditunjukkan Gambar 4. Dalam penelitian ini digunakan perbesaran maksimum sehingga ukuran dan kenampakan warna partikel-partikel di permukaan terlihat lebih jelas.



**Gambar 4.** *USB digital CoolingTech Microscope* [22]

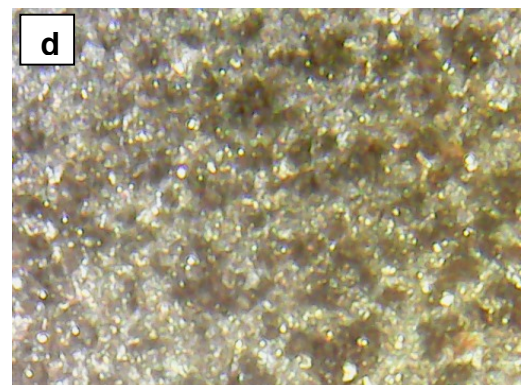
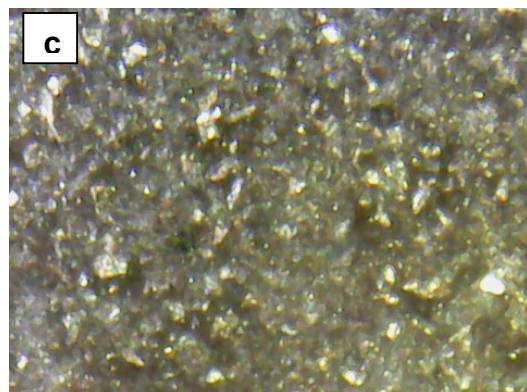
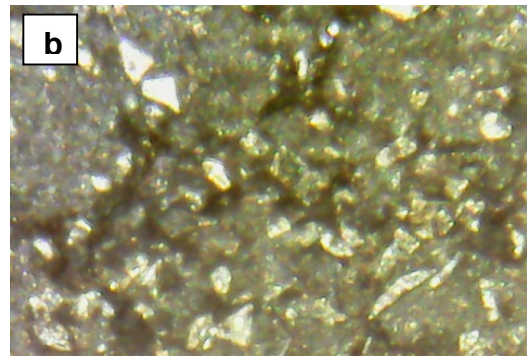
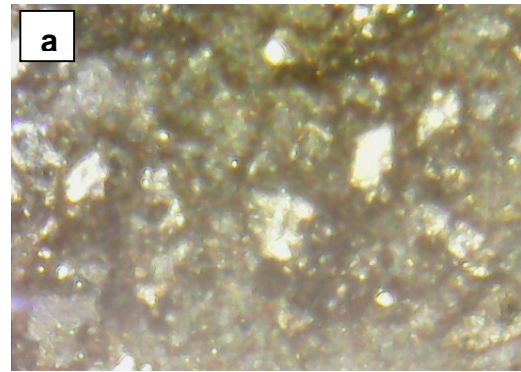
Selanjutnya, keempat sampel tersebut diukur nilai densitasnya menggunakan jangka sorong dan sifat magnetiknya diuji menggunakan permagraf di PPET LIPI Bandung. Pengukuran densitas dalam hal ini menggunakan persamaan densitas *bulk*

$$(D = \frac{m}{V}) \quad (3)$$

dengan massa ( $m$ ) bahan magnet komposit diukur menggunakan timbangan analitik.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan hasil – hasil penelitian ini dititikberatkan untuk memperoleh informasi tentang perilaku sebaran partikel permukaan, sifat densitas dan sifat kemagnetan bahan magnet komposit terhadap variasi besar butir bahan NdFeB melewati 4 sampel ayakan dari mesh 60 hingga 400. Partikel-partikel matrik dalam pengamatan mikroskop digital dengan skala 500 kali diindikasikan dengan citra partikulat putih, warna hitam pekat mengindikasikan rongga permukaan dan warna diantara keduanya merupakan bahan komposit BaFe/NdFeB.



**Gambar 5.** Citra miligraf, a. kode mesh 60; b. Kode mesh 230; c. Kode mesh 325; d. Kode mesh 400

Seperti terlihat pada Gambar 5, distribusi partikel matrik semakin menyebar merata mulai dari kode mesh 60 hingga kode mesh 400. Hal ini mengindikasikan bahwa matrik PVA mulai bekerja maksimal sebagai binder komposit pada kode mesh 400 dibandingkan variasi komposisi komposit yang lain. Rongga permukaan juga nampak mulai mengecil dari kode sampel mesh 60 hingga kode mesh 400 disebabkan terisi oleh bahan komposit yang makin mengecil dan bahan matrik PVA yang makin merata. Dalam hal ini, mengecilnya rongga tidak mempengaruhi peningkatan densitas bahan karena selain jumlah rongga juga meningkat akibat mengecilnya ukuran komposit, pun juga matrik PVA ikut mengembang seiring distribusinya yang merata.

**Tabel 2.** Hasil pengukuran densitas dan induksi remanen sampel

Kode ayakan (ukuran butir NdFeB)	Densitas (kg/cm <sup>3</sup> )	$B_r$ (kG)
Mesh 60 (250 $\mu$ m)	4.65	3.41
Mesh 230 (63 $\mu$ m)	4.63	3.35
Mesh 325 (44 $\mu$ m)	4.6	3.28
Mesh 400 (37 $\mu$ m)	4.49	3.18

Seperti dapat dilihat pada Tabel 2, ukuran butiran bahan NdFeB mempengaruhi baik sifat densitas maupun sifat remanensi bahan.

Semakin besar ukuran butiran NdFeB dalam bahan komposit, semakin tinggi densitas dan sifat kemagnetan remanensinya.

Analisis tren yang memberikan hubungan sifat densitas dan sifat remanensi bahan yang diteliti ditunjukkan oleh Gambar 6. Hasil analisis tersebut memberikan hubungan yang tidak linier (hubungan kuadrat) dengan tingkat kehandalan yang tinggi ( $R^2=0,9999$ ).

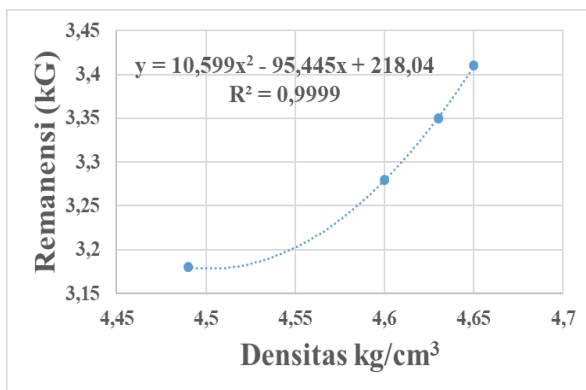
Karakterisasi sifat kemagnetan bahan magnet komposit lebih lengkap diperoleh dari alat permagraf yang menghasilkan kurva histeresis magnetisasi seperti ditunjukkan Gambar 7. Plot data Gambar 7 merupakan hasil pengukuran langsung tanpa diolah sehingga nampak bentuk kurvanya tidak halus (*smooth*). Namun demikian bentuk histeresisnya masih dapat diamati dengan jelas dan dapat dianalisis.

Beberapa parameter histeresis magnetisasi yang dapat diolah diantaranya adalah gaya koersifitas induksi, kuat medan remanen kiri, kuat medan produk energi maksimum, kuat medan maksimum dan fluks magnetik; seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.

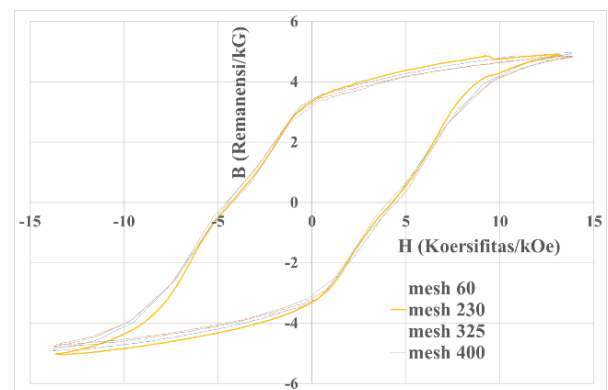
**Tabel 3.** Hasil pengukuran beberapa parameter kurva histeresis sifat kemagnetan

Kode	$H_{cB}$	$H_{knee}$	$H_a$	$H_{max}$	$B_a$
Mesh 60	1,81	0,49	0,65	13,62	2,53
Mesh 230	1,91	0,7	1,13	13,45	1,58
Mesh 325	0,45	0,93	0,92	13,46	2,01
Mesh 400	0,19	1,20	1,10	13,42	1,57

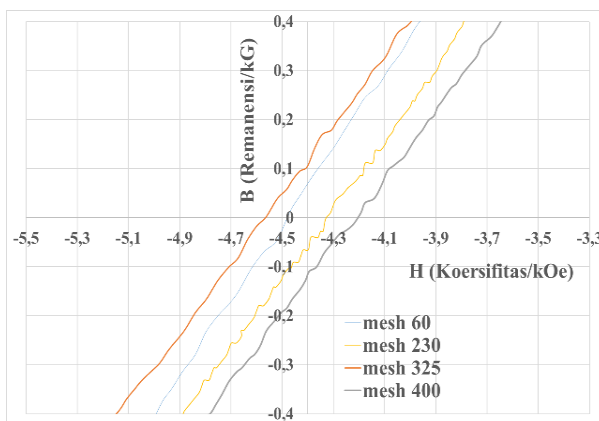
$H_{cB}$  : Gaya koersifitas induksi (kOe)  
 $H_{knee}$  : Kuat medan remanen kiri (kOe)  
 $H_a$  : Kuat medan produk energi maks. (kOe)  
 $H_{max}$  : Kuat medan maks./maksimum (kOe)  
 $B_a$  : Fluks magnetik (kG)



**Gambar 6.** Tren sifat remanensi kemagnetan terhadap densitas bahan magnet komposit



**Gambar 7.** Kurva histeresis magnetisasi



**Gambar 8.** Gaya koersifitas polarisasi ( $H_{cJ}$ ) untuk berbagai variasi penelitian pada  $B=0$ .

Nilai parameter  $H_{cB}$  dapat mempengaruhi sifat koersifitas kemagnetan bahan, sehingga dalam hal ini jatuhnya nilai  $H_{cB}$  dari mesh 230 ke mesh 325 akan menyebabkan berubahnya urutan koersifitas bahan magnet komposit dari urutan variasi penelitiannya. Tabel 3 juga memperlihatkan linier tren dari nilai-nilai  $H_{knee}$  terhadap variasi penelitian dengan nilai terendah pada mesh 60. Hasil produk  $H_a$  dan  $B_a$  nilainya saling

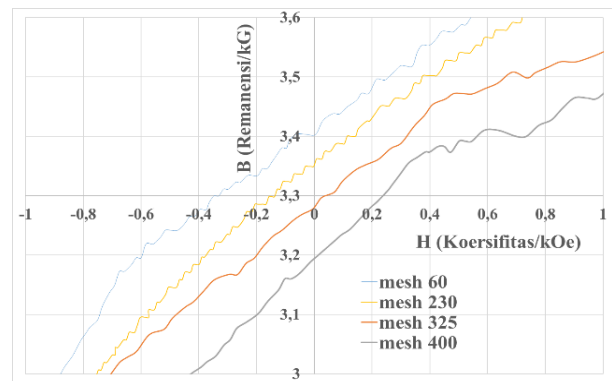


menyeimbangkan di sekitar 1,75 MGOe, hal ini memberikan keuntungan lebih tingginya remanensi sampel mesh 60 dibanding yang lain. Untuk parameter  $H_{max}$ , walaupun nilai-nilainya dalam Tabel 3 terlihat stabil di sekitar 13,5 kOe, namun sampel mesh 60 memiliki magnetisasi saturasi yang tertinggi dimana memberikan estimasi temperatur *Curie* yang lebih baik.

Selain temperatur *Curie* kestabilan magnet permanen juga dilihat dari gaya koersifitas polarisasinya ( $H_{cJ}$ ). Dalam kurva histeresis, sifat ini secara fisis dapat dipandang sebagai medan gaya (koersifitas) yang diperlukan untuk menghilangkan remanensi  $B_r$  ( $B=0$ ). Selain mesh 325, nilai  $H_{cJ}$  dari sampel mesh 60 hingga 400 mengikuti urutan variasi penelitiannya seperti terlihat pada Gambar 8. Pengecualian ini dapat dipengaruhi oleh perubahan parameter  $H_{cB}$  yang dijelaskan sebelumnya. Sifat kemagnetan lain yang penting adalah induksi remanen (remanensi  $B_r$ ). Besaran  $B_r$  dapat diukur sebagai induksi residu ketika proses demagnetisasi diawali ( $H=0$ ). Baik nilai  $H_{jc}$  maupun  $B_r$ , keduanya dapat diukur pada kuadran 2 dari

kurva histeresis saat proses demagnetisasi terjadi.

Selanjutnya transisi demagnetisasi diperjelas dalam Gambar 9. Kurva demagnetisasi terjadi disebelah kiri batas koordinat vertikal. Pada  $H=0$ , urutan nilai  $B_r$  mengikuti lawan urutan besar butir yakni 3,41 kG, 3,35 kG, 3,28 kG, dan 3,18 kG masing-masing untuk sampel mesh 60, 230, 325 dan 400 secara urut.



**Gambar 9.** Induksi remanen ( $B_r$ ) untuk berbagai variasi penelitian pada  $H=0$ .

Selain koersifitas dan remanensi magnetik, total energi produk maksimum juga digunakan sebagai mutu sifat magnet. Serupa dengan kedua sifat magnet sebelumnya, besaran ini energi ini juga diukur di kuadran 2 kurva histeresis. Nilainya diperoleh dari pengambilan nilai maksimum dari hasil perkalian produk antara harga koersifitas  $H_{(max)}$  dengan harga

remanensi  $B_{(max)}$  dalam kurva demagnetisasi.

**Tabel 4.** Hasil perhitungan  $BH_{max}$

Kode (ayakan)	$B_{(max)}$ (kG)	$H_{(max)}$ (kOe)	$BH_{max}$ (MGOe)
Mesh 60	1,91	2,10	4,02
Mesh 230	1,91	1,99	3,79
Mesh 325	1,86	2,16	4,01
Mesh 400	1,92	1,94	3,73

Seperti ditunjukkan pada Tabel 4, ukuran butir *NdFeB* terbesar (mesh 60) memiliki total energi produk maksimum yang paling besar dibandingkan sampel lainnya, yakni sekitar 4,02 MGOe.

Mengingat kembali hipotesis dan persamaan 2, karena saturasi magnetik  $M_s$  (dalam kurva histeresis diwakili parameter  $H_{max}$ ) dari keempat sampel tersebut hampir konstan, yaitu sekitar 13,5 kOe, maka momen magnetik ( $\mu$ ) sangat dipengaruhi oleh ukuran partikelnya. Dalam hal ini ukuran partikel ( $D$ ) akan berbanding lurus terhadap momen magnetiknya, sehingga hasil analisis data-data pada hasil dan pembahasan telah mengkonfirmasi hipotesis sebelumnya.

#### IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Secara umum hasil analisis densitas *bulk* dan karakterisasi sifat

magnetik menggunakan analisis kurva histeresis menunjukkan sifat densitas dan kemagnetan bahan magnet komposit *BaFe/NdFeB* yang hampir sama untuk bahan yang disintesis dengan variasi penelitian berupa ukuran butiran NdFeB dalam matrik PVA. Namun demikian, sampel dengan ukuran NdFeB yang lebih besar (kode mesh 60) nampak masih memiliki keunggulan kompetitif dalam skala kecil baik dari sifat densitas maupun sifat kemagnetannya dibandingkan sampel-sampel lainnya yang memiliki ukuran butiran relatif lebih kecil (kode mesh 230, 325 dan 400). Selain memiliki kestabilan magnetik yang baik, sampel kode mesh 60 juga memiliki remanensi dan total energi produk maksimum yang tertinggi yakni masing-masing 3,41 kG dan 4,02 MGOe secara urut. Sayangnya matrik PVA untuk kode mesh 60 belum bekerja secara maksimal sebagaimana ditunjukkan dalam analisis citra miligraf mikroskop digital.

Untuk penelitian selanjutnya disarankan menambahkan perlakuan panas saat penekanan kompaksi dengan solenoid dilakukan untuk membantu penyebaran partikel-partikel matrik PVA lebih merata

sehingga dapat memperbaiki sifat mekanik bahan magnet komposit.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Ismudiaty Puri Handayani Ketua KK Instrumentasi Energi dan Material dari Telkom University selaku pembimbing I, Ibu Ratih Resti Astari, S.T. peneliti dari Balai Besar Keramik atas pengarahannya dan Saudara Arighi Gustinova, S.T. staf magang dari PPET LIPI atas bantuannya selama penelitian.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Deswita, S. Sudirman, and I. Gunawan, "Pembuatan dan Karakterisasi Bonded Magnet Komposit Berbasis Polimer," *J. Fis. dan Apl.*, vol. 9, no. 1, pp. 5–8, 2013.
- [2] Astuti and A. P. I. Hasanah, "Pengaruh Waktu Pemanasan Terhadap Sintesis Nanopartikel  $Fe_3O_4$ ," *J. Ilmu Fis.*, 2012.
- [3] A. Septiani and N. Idayanti, "Fabrikasi Magnet MnZn Ferit dan Barium Ferit dari Limbah Pengelasan," *J. Elektron. dan Telekomun.*, 2016.
- [4] H. S. Kuncoro and A. Rahman, "Filter Keramik Terinduksi Dari Magnet Bekas Dan Serbuk Kalsit Untuk Pengadaan Air Bersih," *J. Keramik dan Gelas Indones.*, vol. 25, no. 2, pp. 9–17, 2016.
- [5] A. Yulianto, "Fasa Oksida Besi Untuk Sintesis Serbuk Magnet Ferit," *J. Sains Mater. Indones.*, 2007.
- [6] H. S. Kuncoro, N. Sulistarihani, R. J. Manullang, and R. R. Astari, "Density and Magnetic Properties of Barium Ferrite from  $BaFe_{12}O_{19}$  Nanoparticles Prepared by Microemulsion Method," *J. Keramik dan Gelas Indones.*, vol. 24, no. 2, pp. 61–71, 2015.
- [7] M. A. Bohlmann, "Permanent Magnet Materials," *JOM*, 1986.
- [8] Priyo S., "Inovasi Teknologi Pembuatan Magnet Permanen untuk Membangun Industri Magnet Nasional," *Pros. InsiNas*, 2012.
- [9] H. S. Kuncoro, R. R. Astari, and R. M. Dumilah, "Pengaruh Komposisi Bahan, Tekanan Kompaksi dan Suhu Sintering pada Struktur Mikro dan Sifat Magnetik Keramik Barium Ferit," *J. Keramik dan Gelas Indones.*, vol. 23, no. 1, pp. 13–25, 2014.

- [10] R. R. Astari, H. S. Kuncoro, D. N. Rahman, and T. Kristiantoro, "Characterization of Magnetic and Density Properties on Barium Ferrite with MnO<sub>2</sub> Addition," *J. Keramik dan Gelas Indones.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–11, 2017.
- [11] H. S. Kuncoro, R. R. Astari, and T. O. C. Rahayu, "Pengaruh Komposisi Bahan Barium Ferit dan NdFeB pada Sifat Kemagnetan Komposit BaFe/NdFeB," *J. Keramik dan Gelas Indones.*, vol. 25, no. 1, pp. 38–45, 2016.
- [12] A. Manaf, "Magnet Permanen Berbasis Nd-Fe-B," in *Prosiding Seminar Nasional Bahan Magnet 1*, 2000, pp. 5–12.
- [13] S. Sunaryo and S. Sunaryo, "Metode Pembelajaran Bahan Magnet Dan Identifikasi Kandungan Senyawa Pasir Alam Menggunakan Prinsip Dasar Fisika," *J. Cakrawala Pendidik.*, 2010.
- [14] Ismail, "Kajian Efek Magneto impedansi Frekuensi Rendah Pada Multi Lapisan [Ni<sub>80</sub> Fe<sub>20</sub> /Cu]N Kawat Cu Hasil Elektrodeposisi," Universitas Sebelas Maret, 2016.
- [15] P. W. Anderson, "Theory of localized magnetic states in metals," *J. Appl. Phys.*, 1966.
- [16] A. Manchon and S. Zhang, "Theory of nonequilibrium intrinsic spin torque in a single nanomagnet," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, 2008.
- [17] J. H. Van Vleck, "Quantum mechanics-The key to understanding magnetism," *Rev. Mod. Phys.*, 1978.
- [18] B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials (2nd Edition)*. 2009.
- [19] T. Allen, "4 - Particle size analysis by sieving," *Powder Sampl. Part. Size Determ.*, 2003.
- [20] S. Equivalent and T. Equivalent, "Particle Size – US Sieve Series and Tyler Mesh Size Equivalents," *Screen*, 2006.
- [21] Dexter, "Permanent Magnet," *Catalog*. Dexter Magnetic Technologies, 2001.
- [22] "USB digital CoolingTech Microscope." [Online]. Available: [https://www.cytron.io/index.php?route=product/product/getProductAttachmentFile&attachment\\_id=13600](https://www.cytron.io/index.php?route=product/product/getProductAttachmentFile&attachment_id=13600).