

PENGARUH DOPAN ZN PADA BAHAN BARIUM HEKSAFERIT TERHADAP UKURAN KRISTAL DAN SIFAT MAGNETIK

Ahmad Fauzi¹, Hernowo Widodo² dan Murwan Widyantoro³

1,2,3, Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Bhayangkara Jakarta Raya, Jl Raya Perjuangan,
Bekasi, 17121, Indonesia

E-mail: ahmad.fauzi@dsn.ubaharajaya.ac.id

Abstrak

Material barium heksaferit sebagai material magnetik dapat digunakan untuk aplikasi penyerapan gelombang. Namun, untuk membuat bahan penyerap, bahannya harus bahan softmagnetik. Untuk saat ini, masalah barium heksaferit masih merupakan material hardmagnetik. Untuk membentuk material softmagnetik yang dimodifikasi dengan doping logam Zn menjadi barium heksaferit. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh Doping Zn pada material barium heksaferit terhadap ukuran kristal dan sifat kemagnetan. Doping Zn ke dalam barium heksaferit ($BaFe_{12-x}Zn_xO_{19}$) variasi doping Zn dengan $x = 0, 0,4, 0,6, \text{ dan } 0,8$. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode mechanical milling, sedangkan pengujian ukuran kristal dan sifat kemagnetan menggunakan alat karakterisasi XRD dan Permagraph. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran kristal sebesar 151,509 nm jika diberikan doping Zn dengan variasi penambahan $x = 0,8$ dan hasil uji permagraph dari variasi doping Zn dengan $x = 0,8$ diperoleh sifat kemagnetan berupa nilai koersivitas sebesar 58,97 kA/m, nilai magnet remanen 0,083 Tesla, nilai saturasi magnetik 0,1402 Tesla dan energi produk 1,2 kJ/m². Hasil pengujian menyimpulkan bahwa ukuran kristal dan nilai koersivitas berkurang jika diberikan penambahan Zn berlebih. Hal ini menunjukkan bahwa doping Zn pada barium heksaferit mampu memperkecil ukuran kristal dan sifat kemagnetannya. Perubahan ukuran kristal dan nilai koersivitas menjadi lebih kecil menunjukkan bahwa bahan tersebut merupakan bahan softmagnetik.

Kata kunci: barium heksaferit; kristal; koersivitas; doping Zn; sifat magnetik

Abstract

[Effect of Zn dopant in Barium Hexaferrite Materials on Crystal Size and Magnetic Properties]
Barium hexaferrite material as magnetic material can be used for wave absorption applications. However, to make the absorber material, the material must be soft magnetic material. For now, the barium hexaferrite problem is still a hardmagnetic material. To form softmagnetic material modified by doping Zn metal into barium hexeferrite. The purpose of this study was to determine the Zn Doping effect in barium hexaferrite material on crystal size and magnetic properties. Zn doping into barium hexaferrite ($BaFe_{12-x}Zn_xO_{19}$) with doping variation of Zn $x = 0, 0.4, 0.6, \text{ and } 0.8$. The method used in this study is the mechanical milling method, while the crystal size test and magnetic properties use XRD characterization tools and Permagraph. The results showed that the smaller the crystal size of 151.509 nm if given Zn doping with variations in the addition of $x = 0.8$ and permagraph test results from doping variation Zn $x = 0.8$ obtained the magnetic properties in the form of coercivity values of 58.97 kA / m, the value magnetic remanent of 0.083 Tesla, magnetic saturation value of 0.1402 Tesla and the energy of the product is 1.2 kJ/m². The test results concluded that the size of the crystals and the coercivity values were reduced if given the addition of excess Zn. this shows that Zn doping on barium hexaferrite is able to reduce the size of the crystal and its magnetic properties. Changes in crystal size and coercivity values become smaller indicating that the material is soft magnetic material.

Keywords: barium hexaferrite; crystals; coercivity; Zn doping; magnetic properties

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi material khusus pada material maju menjadi pusat perhatian karena sifatnya yang unik, yaitu feromagnetik, paramagnetik, dan diamagnetik. Bahan feromagnetik antara lain Barium Heksaferit memiliki medan koersivitas 533169.059 A/m, temperature curie 450°C dan saturasi magnetik 72 emu/g [1]. Untuk merekayasa suatu bahan barium heksaferit sehingga memiliki sifat kemagnetan yang berubah maka salah satu caranya adalah dengan dilakukan doping. kondisi bahan yang digunakan sebagai doping harus memiliki jari-jari ion yang hampir sama dengan Fe. Material yang dapat menggantikan Fe pada struktur barium heksaferit yaitu oksida logam Zn memiliki sifat diamagnetik yang umumnya memiliki +2 oksidasi [2]. Jari-jari ionik Zn adalah 0,074 nm, sedangkan jari-jari ion Fe adalah 0,065 nm. Kemungkinan logam Zn oksida akan menggantikan Fe. Hal ini terlihat dari kesamaan dimensi ion Fe dan Zn. Doping Zn ini mengganggu kemagnetan barium heksaferit. Pada struktur barium heksaferit doping Zn yang menggantikan ion Fe tidak merubah struktur kristal yang ada. Doping Zn memberikan penurunan sifat kemagnetan barium heksaferit sehingga sifat kemagnetannya menjadi softmagnetik [3].

Barium heksaferit merupakan bahan magnet permanen yang memiliki permitivitas, permeabilitas dan magnetisasi yang relatif tinggi. Barium heksaneit terdiri dari komponen oksida sehingga memiliki resistivitas listrik yang tinggi atau isolator yang baik [4]. Bahan magnet permanen ini memiliki sifat intrinsik antara sifat listrik dan sifat magnetik, sehingga bahan magnet permanen ini dapat menjadi bahan penyerap gelombang mikro dalam frekuensi tinggi [5]. Barium heksaferit yang paling banyak dipelajari adalah barium heksaferit yang memiliki struktur kristal heksagonal dengan rumus kimia $BaFe_{12}O_{19}$.

Barium heksaferit memiliki kristal anisotropi uniaxial yang kuat, memiliki polarisasi magnet saturasi tinggi, medan koersivitas besar, curies suhu tinggi, stabilitas kimia yang sangat baik dan ketahanan korosi [6]. Barium heksaferit yang memiliki medan koersivitas yang sangat besar menyebabkan sifat anisotropik bahan meningkat sehingga sifat penyerapannya menjadi lemah. Untuk mengurangi sifat anisotropik, diperlukan oksida logam seperti Zn. Metal Oxide Zn merupakan

bahan semikonduktor yang relatif murah dan memiliki sifat magnetik yang lemah. Jika oksida logam Zn didoping ke dalam barium heksaferit [7], Barium heksaferit akan memiliki nilai koersivitas yang lebih kecil. nilai koersivitas akan dapat memperkuat sifat penyerapannya. Material barium heksaferit dapat dijadikan material yang berukuran nano, salah satu cara untuk membuat ukuran material tersebut menjadi ukuran yang lebih kecil dengan cara menggunakan metode sintesis mechanical milling [8]. Bahan prekursor dari barium karbonat $BaCO_3$, Fe_2O_3 Hematit dan Bahan Dopingnya, Metal Oxide Zn. Setelah itu bahan prekursor dengan bahan doping digiling selama 3 jam. Fokus penelitian ini adalah memberikan doping Zn dengan variasi doping $x = 0, 0,4, 0,6, 0,8$ ke dalam barium heksaferit $BaFe_{12-x}Zn_xO_{19}$. Kemudian material yang telah digiling kemudian dipress dengan diameter 22 mm dan dilakukan sintering pada suhu 1200°C. Kemudian material tersebut dilakukan karakterisasi uji difraksi sinar-x dan uji permagraf untuk melihat ukuran kristal dan sifat kemagnetannya.

METODE PENELITIAN

Material

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk barium karbonat sebagai bahan prekursor, serta ferit sebagai bahan dasar, serbuk seng oksida sebagai bahan dopingnya. Alat yang digunakan untuk milling digunakan untuk mencampur serbuk, hydraulic pressing digunakan untuk membuat sampel berbentuk koin, furnace digunakan untuk material sintering dan alat karakterisasi X-Ray Diffraction untuk melihat ukuran kristal dan permagrap digunakan untuk menentukan sifat kemagnetan dari suatu bahan

Tahapan Penelitian

Preparasi bahan dimulai dengan menimbang bahan prekursor yaitu barium karbonat ($BaCO_3$) dan hematit (Fe_2O_3) serta bahan dopingnya yaitu variasi doping Zn dengan nilai $x = 0, 0,4, 0,6, 0,8$ ke dalam $BaFe_{12-x}Zn_xO_{19}$. Setelah persiapan bahan dimulai dari perhitungan dan penimbangan jumlah berat masing-masing bahan selanjutnya dicampur dengan metode mechanical milling dengan high energy ball mill selama 4 jam. Proses penggilingan mekanis digunakan untuk mencampur bubuk menjadi bubuk yang

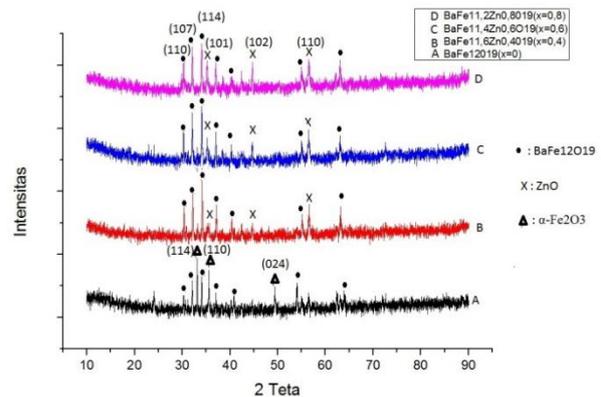
homogen. Hasil dari proses milling dibuat dengan cara pengepresan sampel dengan diameter 25 mm dengan tekanan 10 ton dengan alat press hydraulic. Proses pemadatan bahan ini untuk mempermudah proses pengujian sifat kemagnetan karena alat spesimen harus berbentuk lingkaran sehingga bahan harus menyesuaikan bentuk mata uang logam. Material yang telah dipadatkan dengan alat hydraulic press kemudian disinter pada suhu 1200°C selama 3 jam hingga terbentuk fasa $BaFe_{12-x}Zn_xO_{19}$ menggunakan tungku. Temperatur tersebut membuat barium heksaferit yang didoping oleh Zn menjadi satu fasa. Hasil sintesis material kemudian diuji XRD untuk melihat ukuran kristal. Hasil XRD pada sampel diperoleh puncak difraksi. Hasil puncak difraksi diplot ke dalam grafik XRD. Puncak difraksi pada grafik diperoleh dengan FWHM. Data FWHM ini dapat menentukan ukuran kristal. Untuk menentukan ukuran kristal Anda dapat menggunakan rumus Scherrer, dan setelah itu sifat magnet diuji dengan permagraph pada medan magnet 1,2 Tesla.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Barium heksaferit dengan formula $BaFe_{12-x}Zn_xO_{19}$ diberi doping serbuk seng ZnO dengan variasi $x = 0$, $x = 0,4$, $x = 0,6$ dan $x = 0,8$. Kemudian dibuat 4 sampel sebagai berikut, yaitu Sampel A $BaFe_{12}O_{19}$ dengan $x = 0$, Sampel B $BaFe_{11,6}Zn_{0,4}O_{19}$ dengan $x = 0,4$, Sampel C $BaFe_{11,4}Zn_{0,6}O_{19}$ dengan $x = 0,6$, Sampel D $BaFe_{11,2}Zn_{0,8}O_{19}$ dengan $x = 0,8$. Keempat sampel dikarakterisasi struktur kristalnya menggunakan alat X-Ray Diffraction (XRD) dilanjutkan dengan pencocokan dengan data ICDD-JCPDS dan penyempurnaan menggunakan software High Score dan analisis sifat magnetik menggunakan Permagraph.

a. Analisis struktur kristal

Untuk mengetahui fasa dan struktur kristal yang terbentuk pada sampel hasil sintesis dilakukan uji karakterisasi difraktometer sinar-X. Hasil analisis kualitatif dengan metode Rietveld untuk mendapatkan parameter kisi, ukuran kristal dan fasa yang timbul. Fase-fase yang timbul pada 6 sampel hasil sintesis terlihat pada grafik pola XRD. Pola difraksi dapat ditunjukkan pada Gambar 1 yang diperoleh dari hasil XRD dan setelah dicocokkan dengan pola untuk XRD $BaFe_{12}O_{19}$.



Gambar 1. Pola XRD dari 4 sampel $BaFe_{12}O_{19}$

Hasil pola XRD pada sampel A menunjukkan fasa dominan yaitu barium heksaferit dan pola XRD fasa minor adalah fasa ferit $-Fe_2O_3$ dengan bidang kisi (114) (110) dan (024). Pola barium heksaferit pada sampel A ditunjukkan sesuai dengan pola $BaFe_{12}O_{19}$ dan pencocokan data menggunakan data ICDD #43002. Ternyata fasa minor ferit yang muncul menunjukkan pola XRD Barium Hexaferit bukan fasa tunggal, hal ini dapat disebabkan ketika penggilingan sampel tidak homogen. Fasa tunggal terbentuk apabila bahan sampel memiliki serbuk yang homogen, untuk mendapatkan serbuk yang homogen dibutuhkan waktu dalam proses penggilingan waktu yang dibutuhkan untuk proses penggilingan dapat berdampak pada rusaknya struktur kristal yang menyebabkan terjadinya fasa tunggal [9]. Namun pada kenyataannya sampel A tidak bersifat single phase, artinya proses milling tidak cukup lama sehingga struktur kristal tidak rusak dan homogen. Hasil pola XRD pada sampel B yang diberi penambahan $x = 0,4$ ZnO ke dalam barium heksaferit yang diharapkan diperoleh rumus $BaFe_{11,6}Zn_{0,4}O_{19}$. Pola XRD menunjukkan adanya fasa minor yang muncul yang kita prediksi yaitu fasa ZnO yang mulai masuk ke dalam barium heksaferit, hal ini terlihat dari puncak fraksi yang muncul, terdapat fasa ZnO yang sesuai dengan fasanya. Pola ZnO XRD. Hasil XRD pada sampel C diberikan penambahan $x = 0,6$ pada barium heksaferit dengan rumus yang ingin dibentuk $BaFe_{11,4}Zn_{0,6}O_{19}$ terlihat pola XRD yang menunjukkan fasa dominan Barium heksaferit diikuti fasa minor yaitu fasa puncak terdifusi ZnO, hal ini dapat diprediksikan tersubstitusi doping ZnO menjadi prekursor barium heksaferit. Hasil karakterisasi XRD pada sampel D yang diberi penambahan $x = 0,8$ ZnO ke dalam prekursor barium heksaferit

menunjukkan bahwa fasa barium heksaferit tersubstitusi oleh ZnO, fasa barium heksaferit dapat dilihat pada bidang kisinya (110) (107) (114), ini terbukti menjadi pola Barium hexferite XRD cocok dengan pola BaFe₁₂O₁₉. Dan juga disertai dengan pola ZnO XRD yang secara jelas menunjukkan puncak difraksi ZnO dengan bidang kisi (101) (102) dan (110). Bidang kisi ini menunjukkan fasa wutzit pada ZnO, semakin besar nilai ZnO tersubstitusi dalam barium heksaferit, semakin tinggi puncak diparce yang muncul dan bidang kisi menjadi lebih jelas. Penambahan ZnO pada barium hexeferite ternyata memberikan perubahan fasa pada pola XRD barium hexaneferite, perubahan fasa ini disertai dengan perubahan parameter kisi, parameter kisi akan dapat melihat ukuran kristal pada material. Dengan menggunakan software origin untuk mendapatkan FWHM yang dibutuhkan untuk menghitung ukuran kristal dengan rumus scherrer dan untuk mendapatkan parameter lattice kita dapat menggunakan software Reitica untuk mendapatkan lattice constant a dan c. kisi paramater dan ukuran kristal dari 4 sampel dapat dilihat pada tabel 1 dan 2 diantaranya:

Tabel 1 Parameter kisi barium heksaferit dengan penambahan ZnO

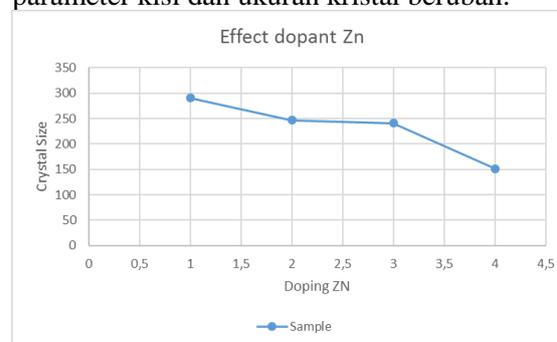
Sampel	Parameter kisi Refinement		Parameter kisi kalkulasi	
	a (Å)	c (Å)	a (Å)	c (Å)
A	5,892	23,214	5,916	23,273
B	5,891	23,205	5,89	23,181
C	5,891	23,198	5,879	23,16
D	5,890	23,150	5,856	23,059

Tabel 2 Ukuran kristal barium heksaferit dengan penambahan ZnO

Sampel	Ukuran Kristallite (nm)	Volume Unit Cell (Å ³)
A	289,996	697,920
B	246,635	697,413
C	241,129	697,203
D	151,509	695,524

Parameter kisi dan volume sel yang diperoleh dari proses refinement menggunakan software Reitica ternyata sampel yang diberi penambahan ZnO meningkatkan parameter kisi seperti konstanta c sedikit menurun sekitar 0,064 Ao. Perubahan parameter kisi pada konstanta c ini disebabkan oleh substitusi Zn

Ion dalam barium heksaferit. Perubahan konstanta kisi c ini menyebabkan perubahan ukuran kristal, dimana semakin banyak penambahan ZnO maka ukuran kristal semakin mengecil. Karena jari-jari ion Zn²⁺ yang menggantikan ion Fe³⁺, jarak antar kisi menjadi lebih kecil, hal ini menyebabkan ukuran kristal berubah menjadi kecil. Ukuran kristal pada sampel yang diberikan penambahan ZnO dengan nilai x = 0,8 ke dalam barium heksaferit ternyata ukuran kristalnya lebih kecil. Ukuran kristal mengecil, volume sel pada sampel D menurun dari prekursoranya sekitar 2,396 (Å³). perubahan volume sel ini akan mempengaruhi nilai annisotropi kristal. Perubahan volume sel ini dapat terjadi karena jari-jari atom Zn 1,34 Å lebih besar dari jari-jari Fe 1,24 Å sehingga menyebabkan volume sel mengecil [10]. Perubahan volume sel ini mempengaruhi perubahan ukuran kristal yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa ion Zn dalam barium heksaferit telah berhasil disubstitusi sehingga parameter kisi dan ukuran kristal berubah.



Gambar 2 hubungan penambahan Zn dengan ukuran kristal

Doping Zn ke dalam barium heksaferit menurunkan ukuran kristal. Hal ini ditunjukkan pada gambar 2. Doping Zn yang diberikan ke dalam buah heksaferit semakin meningkat, ion Zn dalam barium heksaferit tersebar merata ke seluruh permukaan sehingga partikel mendapat tekanan dari Ion Zn. ini membuat ukuran kristal lebih kecil karena tekanan ion Zn. Doping Zn dengan x = 0,8 ke dalam barium heksaneit memberikan penurunan yang signifikan sekitar 47% dari ukuran kristal sebelum doping Zn. Penurunan kristal sekitar 47% ini berpengaruh terhadap kinerja material magnetik, terutama nilai koersivitasnya.

b. Analisis sifat magnetik

Untuk mengetahui sifat kemagnetan sampel, sampel diuji dengan alat karakterisasi magnetik, permagraph. Sifat kemagnetan hasil

uji permagraph dapat dilihat dari kurva histeresis. Dari kurva histeresis diperoleh koersivitas (H_c), Energi Produk Maksimum (BH), Remanen Magnetik (Br) dan saturasi magnet (Ms). Secara kualitatif dan kualitas sifat kemagnetan masing-masing sampel disajikan pada Tabel 3a dan 3b.

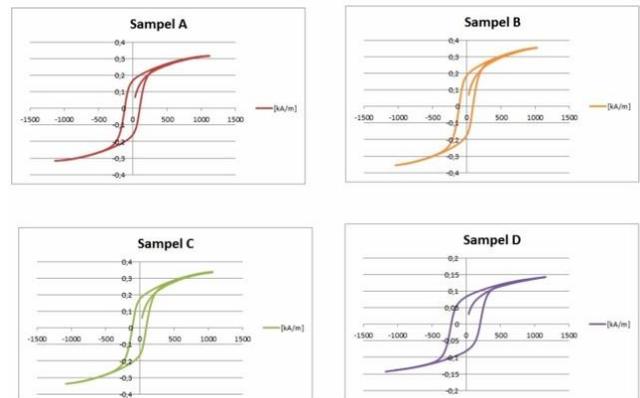
Tabel 3a, 3b. Sifat magnetik Barium Heksaferit yang didoping dengan ZnO

Sampel	Koersivity (H_c) (kA/m)	Energi produk (BH) (kJ/m^2)
A	75,69	4,0
B	74,21	3,6
C	71,28	3,6
D	58,97	1,2

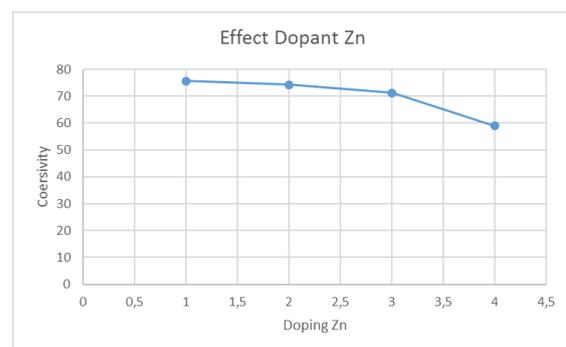
Sampel	Remanen magnetik (Br) (Tesla)	Saturasi magnetik (Ms) (Tesla)
A	0,184	0,3492
B	0,172	0,3314
C	0,166	0,3152
D	0,083	0,1402

Dari tabel 2 nilai koersivitas (H_c) dan remanen magnet pada sampel D yang diberi penambahan ZnO dengan nilai $x = 0,8$ ke dalam barium heksaferit cenderung lebih rendah dengan penurunan yang signifikan sebesar 16,72 kA/m. Koersivitas dan nilai remanen magnet berkurang secara sistematis dengan adanya atom Zn^{2+} . Hal ini juga terlihat dari hasil kurva histeresis pada Gambar 3 yang menunjukkan perbedaan kurva histeresis pada masing-masing sampel. Hal ini menunjukkan bahwa pada sampel D ini keberadaan ion Zn^{2+} lebih berkontribusi dalam memberikan perubahan saturasi magnetik dan energi produk. Dalam hal ini, dalam studi dengan javed, nilai koersivitas material tergantung pada ukuran partikel dan medan anistropisnya [11].

Pada kurva histeresis magnetik pada sampel A yang belum diberi penambahan ZnO, pola kurva masih menunjukkan magnet keras. Terlihat bahwa lebar pola histeresis masih lebar dan nilai saturasi magnetik serta nilai koersivitasnya masih tinggi. Sedangkan pada kurva histeresis pada sampel D terlihat pola histeresis menuju softmagnetik.

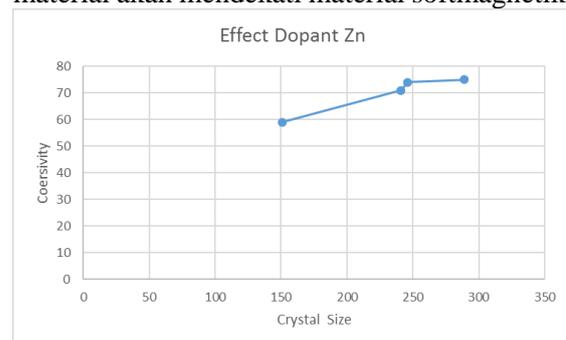


Gambar 3. Kurva hysteresis Barium Heksaferit yang didoping ZnO



Gambar 4. Hubungan doping Zn dengan nilai koersivitas

Penambahan Zn pada barium heksaferit menyebabkan pengaruh terhadap sifat kemagnetannya, terutama penurunan nilai koersivitasnya. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4. Semakin banyak doping Zn yang diberikan maka koersivitasnya semakin rendah, Doping dengan nilai $x = 0,8$ diberikan ke dalam barium hexeferite, terjadi penurunan koersivitas sekitar 22% dari sampel yang belum didoping Zn. Doping Zn yang berlebihan akan berpengaruh pada terbentuknya sampel softmagnetik. Hal ini disebabkan oleh penurunan koersivitas. Koersivitas menurun, material akan mendekati material softmagnetik.



Gambar 5. Hubungan nilai koersivitas dengan ukuran kristal

Sifat kemagnetan barium heksaferit yang telah didoping dengan Zn berpengaruh terhadap nilai koersivitasnya dan berhubungan dengan ukuran kristal. Ketika doping Zn disubstitusikan ke dalam barium heksaferit akan memberikan pergeseran nilai ukuran kristal yang kecil. Dengan adanya pergeseran ukuran kristal yang semakin kecil apabila diberikan doping Zn yang berlebihan akan memberikan pergeseran kinerja sifat kemagnetannya terutama pada saat koersivitas mengalami perubahan yang signifikan. Gambar 5 menunjukkan linearitas ukuran kristal dan koersivitas. Jika terjadi perubahan ukuran kristal, maka akan terjadi pula perubahan nilai koersivitas. Perubahan koersivitas yang lebih kecil akan membuat material menjadi magnetis lunak. Hal ini memberikan gambaran bahwa bahan softmagnetic memiliki ukuran kristal yang lebih kecil dan nilai koersivitasnya kecil, Terlihat bahwa lebar kurva histeresis berbeda dengan lebar kurva histeresis pada sampel A, B dan sampel C dan juga menunjukkan nilai saturasi magnetik yang lebih kecil dibandingkan sampel lainnya. Saturasi magnetik pada sampel D menurun, diikuti dengan perubahan nilai koersivitas. Hal ini terjadi untuk memberikan pergeseran di bidang korosi. Adanya kelebihan ion Zn^{2+} pada barium heksaferit akan memberikan nilai anisotropi magnetik dari arah planar ke arah aksial [12]. Dengan demikian semakin jelas keberadaan ion Zn^{2+} akan memberikan kontribusi terhadap perubahan sifat kemagnetan seperti koersivitas (H_c), saturasi magnet (M_s), remanen magnet (B_r) dan energi produk seperti terlihat pada tabel 2. perubahan anisotropi magnet yang dihasilkan dari Substitusi ion Zn^{2+} yang berlebihan akan berdampak pada perubahan karakteristik penunjuk. Akibat perubahan sifat kemagnetan dari magnet keras menjadi softmagnetik, maka perlu dipromosikan sebagai bahan penyerap gelombang mikro.

SIMPULAN DAN SARAN

Sintesis barium heksaferit yang diberi penambahan ZnO telah berhasil disintesis menggunakan metode mechanical milling kemudian dilakukan karakterisasi struktur kristal dan sifat kemagnetannya sehingga diperoleh kesimpulan sebagai berikut: Sintesis barium heksaferit diberikan penambahan ZnO yang menunjukkan perubahan parameter kisi yang berlebihan terutama konstanta kisi c yang

sedikit berubah. Terlihat konstanta kisi c pada sampel D sebesar 23.150 Å, perubahan konstanta kisi c yang menyebabkan ukuran kristal mengecil dengan ukuran kristal pada sampel D sebesar 151.509 nm. Ketika penambahan ZnO berlebih pada barium heksaferit nilai koersivitas (H_c) menurun, nilai saturasi magnetik dan kandungan magnetik juga turun dan energi produk memiliki nilai kecil sekitar 1,2. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan ZnO memberikan perubahan sifat kemagnetan material.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Pengabdian ke Masyarakat dan Publikasi Universitas Bhayangkara Jakarta Raya yang telah mendanai penelitian ini melalui Hibah Internal Universitas.

DAFTAR PUSTAKA

1. Awawdeh M, Bsoul I, Mahmood S. 2014. Magnetic properties and Mössbauer spectroscopy on Ga, Al, and Cr substituted hexaferrites. *Journal of Alloys and Compounds*. **585**: 465-473.
2. González-Angeles A, Mendoza-Suarez G, Gruskova A, Papanova M, Slama J. 2005. Magnetic studies of Zn–Ti-substituted barium hexaferrites prepared by mechanical milling. *Materials letters*. **59**(1): 26-31.
3. Topkaya, R. 2017. Effect of Zn substitution on temperature dependent magnetic properties of $BaFe_{12}O_{19}$ hexaferrites. *Journal of Alloys and Compounds*. **725**:1230-1237.
4. Auwal IA, Güner S, Güngüneş H, Baykal A. 2016. $Sr_{1-x}La_xFe_{12}O_{19}$ ($0.0 \leq x \leq 0.5$) hexaferrites: synthesis, characterizations, hyperfine interactions and magneto-optical properties. *Ceramics International*. **42**(11):12995-13003.
5. Stoner E, Wohlfarth E. 1991. A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys. *IEEE Transactions on Magnetics*. **127**(4): p. 3475-3518.
6. Vinnik DA, Semisalova AS, Mashkovtseva LS, Yakushechkina, A, Nemrava, S, Gudkova SA, Niewa R. 2015. Growth, structural and magnetic

- characterization of Zn-substituted barium hexaferrite single crystals. *Materials Chemistry and Physics*, **163**: p. 416-420.
7. Vinnik DA, Semisalova AS, Mashkovtseva L S, Yakushechkina AK, Nemrava S, Gudkova SA, Niewa R. 1998. *Journal of magnetism and magnetic materials*, **187**(1): 129-135.
 8. Han YB, Sha J, Sun LN, Tang Q, Lu Q, Jin HX, Wang XQ. 2012. Improved magnetic properties of Sm combining Co or/and Zn substituted barium m-type hexaferrites. *International Journal of Modern Physics B*. **26**(26): 1250141.
 9. Priyono P, Ahyani M. 2010. Sintesis Barium Hexaferrite yang Disubstitusi Ion Mn-Co Melalui Reaksi Padat dan Pengaruhnya Terhadap Perubahan Struktur dan Sifat Magnetik. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Xxiv Himpunan Fisika Indonesia Jateng & Diy* Pendidikan Dan Penelitian Fisika Dalam Mengantisipasi Fenomena Alam".146-150.
 10. Priyono K, Manaf A. 2019. Substitusi Mn Dan Ti Pada Struktur Fasa Magnetik Barium Hexaferrite Melalui Teknik Pemaduan Mekanik (Mechanical Alloying). *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 144-147.
 11. Iqbal MJ, Ashiq MN, Gomez PH. 2009. Effect of doping of Zr-Zn binary mixtures on structural, electrical and magnetic properties of Sr-hexaferrite nanoparticles. *Journal of alloys and compounds*. **478**(1-2): 736-740.
 12. Li Z, Guoqing W, Chen L, Yuping L, W, Ong CK. 2006. Co²⁺ Ti⁴⁺ substituted Z-type barium ferrite with enhanced imaginary permeability and resonance frequency. *Journal of applied Physics*, **99**(6): 063905.