

Aplikasi Magnet Berpengikat (*Bonded*) NdFeB untuk *S-band Circulator* pada Rentang Frekuensi 2,00-4,00 GHz

Application of NdFeB Bonded Magnet for S-band Circulator at Frequency Range of 2.00-4.00 GHz

Tony Kristiantoro* dan Novrita Idayanti

Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia,
Komp LIPI Gd 20, Jl Sangkuriang 21/54D, Bandung 40135, Indonesia

Abstrak

Circulator merupakan perangkat elektronik yang memiliki fungsi penting pada suatu sistem pemancar dan penerima gelombang frekuensi radio (RF), di mana magnet permanen dapat berfungsi sebagai pengarah gelombang (*waveguide*). Penelitian ini bertujuan untuk menggantikan magnet permanen barium ferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) yang umumnya digunakan pada *circulator* dengan magnet permanen berpengikat (*bonded*) neodimium besi boron (NdFeB). Bahan baku yang digunakan adalah serbuk *NdFeB crashed ribbon* dengan menggunakan metode pengepresan *green-compact* yang divariasikan pada tekanan 25, 50, 75, dan 100 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ dan dilanjutkan proses pemanasan pada temperatur 200 °C selama 60 menit. Karakterisasi sifat magnet dilakukan dengan Permagraph, diperoleh nilai intrinsik optimum dari sampel 100 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$, induksi remanen (B_r) = 5,37 kG, koersifitas (H_{c1}) = 4,74 kOe, produk energi maksimum (BH_{max}) = 2,39 MGOe, dan densitas (ρ) = 4,89 $\text{gr}\cdot\text{cm}^{-3}$. Hasil pengukuran kuat medan permukaan (B) dengan Gauss-meter menunjukkan nilai 800 G. Magnet dengan karakteristik optimum diterapkan pada *circulator* kemudian dikarakterisasi dengan *Vector Network Analyzer* dan menghasilkan *voltage standing wave ratio* (VSWR) = 1,354, isolasi = -17,165 dB dan kerugian penyisipan = -0,200 dB pada titik kerja 3,00 GHz, sehingga magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB ini dapat diterapkan pada *S-band circulator* yang bekerja pada rentang frekuensi 2,00-4,00 GHz.

Kata kunci: magnet berpengikat (*bonded*), NdFeB, *circulator*, magnet barium ferit.

Abstract

Research to apply the NdFeB-bonded magnets as a permanent magnet at S-band circulator has been done. Circulator is an electronic device that has an important function in a RF transmitter - receiver (transceiver) system, in which a permanent magnet can serve as waveguide. This study aims to substitute the barium ferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) permanent magnets on the circulator with neodimium iron boron (NdFeB)-bonded permanent magnets. The raw material used was NdFeB powder crashed ribbon by using the pressed green compact method with pressure varied at 25, 50, 75, and 100 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$. The next process was heating at temperature 200 °C for 60 minutes. Characterization of magnetic properties was carried out by using Permagraph. The best magnetic characteristics were obtained with a value of remanent induction (B_r) = 5.37 kG, coercivity (H_{c1}) = 4.74 kOe, the Maximum field strength (BH_{max}) = 2.39 MGOe, and density (ρ) = 4.89 $\text{gr}\cdot\text{cm}^{-3}$. Measurement of the surface field strength was carried out by using Gauss-meter = 800 G. The optimum value of magnet characteristics in this research applied to the circulator then characterized by Vector Network Analyzer, the obtained value of voltage standing wave ratio (VSWR) = 1.354, Isolation = -17.165 dB and insertion loss = -0.200 dB at working point of 3.00 GHz. The obtained NdFeB-bonded permanent magnet in this research is good enough to be applied in S-band circulator at frequency range of 2.00-4.00 GHz.

Keywords: bonded magnet, NdFeB, circulator, barium ferrite magnet.

I. PENDAHULUAN

Magnet sudah menjadi bagian yang penting dalam kehidupan sehari-hari. Aplikasi magnet pada skala pemakaian rumah tangga banyak diaplikasikan pada berbagai peralatan seperti motor listrik, *loud speaker*, CD *player*, oven gelombang mikro, dan lain-lain. Aplikasi lain dari komponen magnet juga banyak

dijumpai pada peralatan instrumentasi, peralatan produksi, dan pada laboratorium penelitian. Akan tetapi kontribusi magnet sering diabaikan karena komponen ini sudah tertanam di dalam suatu perangkat dan tidak terlihat. Pada kenyataannya kebutuhan akan komponen ini menjadi sangat beragam bergantung pada kegunaan dan fungsi suatu perangkat. Secara umum, kebutuhan akan komponen magnet dibedakan berdasarkan bentuk, dimensi dan kuat medannya [1]. Kebutuhan komponen magnet permanen untuk bidang telekomunikasi cukup tinggi, salah satunya adalah sebagai komponen *circulator* frekuensi radio (RF). *Circulator* merupakan sebuah komponen pasif gelombang mikro yang berguna untuk meredam koefisien pantul yang tidak diinginkan

* Corresponding Author.

Email: tony001@lipi.go.id

Received: October 5, 2014; Revised: October 20, 2014

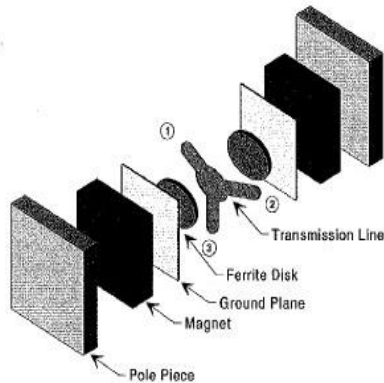
Accepted: November 14, 2014

Published: December 30, 2014

© 2014 PPET - LIPI

doi : 10.14203/jet.v14.51-55

pada media transmisi [2]. *Circulator* terdiri dari beberapa bagian seperti diperlihatkan pada Gambar 1, yaitu: penutup (*circulator body*), magnet permanen, *ground plane*, magnet lunak (*ferrite disk*) dan *stripline* (*transmission line*). Letak atau posisi magnet permanen yaitu di antara bagian *ground plane* dan penutup (*circulator body*).



Gambar 1. Susunan Komponen pada *Circulator*.

Magnet permanen pada *circulator* berfungsi untuk meredam agar sinyal elektromagnetik tidak keluar dan tetap merambat pada media transmisi (*stripline*) *circulator*. Sampai saat ini kebutuhan komponen *circulator* RF selalu dipenuhi produk dari manca negara.

Material magnet barium heksaferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) seperti yang digunakan pada *circulator* telah banyak digunakan sebagai magnet permanen karena beberapa kelebihan yang dimilikinya, di antaranya adalah koersifitas dan magnetisasi yang tinggi serta stabilitas kimia yang baik [3], [4]. Sifat magnetik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ditentukan oleh sifat intrinsik magnet tersebut. Sifat intrinsik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ menjadi lebih baik secara signifikan dengan *doping* pada sisi Ba atau Fe atau keduanya. Perbaikan sifat intrinsik magnetik tersebut terkait dengan perbaikan koersifitas dan anisotropi kristal magnet (*magneto-crystalline anisotropy*) [5]. Berbagai sintesa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dilakukan untuk mendapatkan nilai intrinsik dan sifat fisis yang lebih baik, hal ini dilakukan karena kebutuhan aplikasi magnet permanen yang semakin beragam. Untuk keperluan dalam hal aplikasi, selain nilai intrinsik, ada sifat lain yang menjadi perhatian yaitu kuat medan permukaan yang ditentukan oleh besaran rapat fluks magnetik (B). Rapat fluks magnetik sangat berhubungan dengan desain dan metode pabrikasi. Walaupun menggunakan bahan baku hasil proses kalsinasi yang sama, apabila dilakukan proses pabrikasi yang berbeda maka akan dihasilkan magnet permanen yang memiliki rapat fluks magnetik atau kuat medan permukaan yang berbeda [6]. Magnet permanen $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan kuat medan permukaan yang tinggi memiliki densitas yang tinggi dapat diperoleh dengan memberikan tekanan yang tinggi pada tahap pengepresan.

Untuk aplikasi tertentu magnet permanen $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ dapat disubstitusi menggunakan magnet permanen berpengikat (*bonded*) neodmium besi boron (NdFeB), di mana proses pabrikasi lebih efisien, tidak mengalami perubahan dimensi karena magnet berpengikat (*bonded*) diproduksi menggunakan

teknologi *compacting* yaitu *hot press* maupun *green compact*, berbeda dengan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ yang menggunakan proses *sintering* dalam pabrikasinya [7], [8]. NdFeB dikenal sebagai magnet tanah jarang karena komposisi materialnya tersusun dari unsur-unsur tanah jarang (*rare earth magnets*). Magnet NdFeB berstruktur kristal tetragonal dan dapat memiliki energi produk maksimum yang besar ($\text{BH}_{\text{max}} \sim 512 \text{ kJ/m}^3$ atau 64 MGOe), walaupun sedikit lebih mudah terkorosi pada pemakaian yang terbuka. Apabila diperlukan dapat dilapis logam Ni atau Cr untuk meningkatkan ketahanan korosinya.

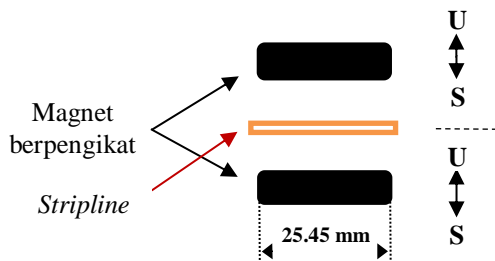
Telah dilakukan penelitian pembuatan magnet permanen berpengikat (*bonded*) dengan jenis NdFeB *crashed ribbon*, bertujuan untuk meningkatkan karakteristik magnet yang dihasilkan, sehingga dapat diaplikasikan pada *S-band circulator* pada rentang frekuensi 2,00-4,00 GHz.

II. METODOLOGI

Bahan baku magnet permanen berpengikat (*bonded*) NdFeB adalah serbuk magnet produksi Magnequench dengan kode produksi MQEP 16-7. Serbuk magnet ini berupa magnet *crashed-ribbon* yang sudah dicampur dengan bahan pengikat (*binder*) polimer, sehingga pada penelitian ini tidak perlu ditambahkan material *binder* lainnya. Serbuk magnet di cetak menggunakan *die* dengan diameter 25,45 mm dan dikompaksi menggunakan metode *green-compact* untuk mendapatkan magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB dengan sifat magnet terbaik. Langkah pertama pada eksperimen ini adalah melakukan penimbangan serbuk magnet seberat 6,50 gr sebanyak delapan kali penimbangan. Sampel dibuat berjumlah delapan, agar diperoleh empat pasang magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB yang masing-masing akan diaplikasikan pada *circulator*. Selanjutnya, sampel dikompaksi dengan variasi tekanan yang berbeda untuk mendapatkan sampel dengan densitas (ρ) terbaik. Pada eksperimen ini tekanan/kompaksi yang diberikan adalah 25, 50, 75 dan 100 kg.cm^{-2} . Sampel hasil kompaksi dipanaskan pada temperatur $200 \text{ }^\circ\text{C}$ dan ditahan selama 60 menit. Perlakuan ini diberikan untuk memastikan bahwa pengikatan serbuk magnet oleh polimer sebagai *binder* terjadi secara optimal. Perlakuan panas pada temperatur $200 \text{ }^\circ\text{C}$ tidak akan merubah material serbuk magnet MQEP 16-7 karena perlakuan panasnya masih di bawah temperatur Curiannya ($T_c = 291 \text{ }^\circ\text{C}$) [9]. Sampel hasil kompaksi diukur dimensi fisik dan massanya untuk menghitung nilai ρ -nya dengan menggunakan metode Archimedes, nilai ρ dan tingkat porositas suatu material memiliki hubungan berbanding terbalik. Sampel kemudian dimagnetisasi dengan memberikan energi maksimal sampai sampel mencapai titik jenuh dan dikarakterisasi menggunakan Permagraph Magnet-Physik E2 untuk mendapatkan kurva histerisis magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB dan didapatkan nilai-nilai intrinsiknya, seperti, induksi remanen (B_r), koersifitas (H_c), dan produk energi maksimum (BH_{max}). Pengukuran yang lain adalah pengukuran kuat medan magnet permukaan B (rapat fluks magnetik) menggunakan Gauss-meter.

Magnet permanen berpengikat (*bonded*) yang telah dipabrikasi kemudian diterapkan pada sebuah *circulator*

dan dikarakterisasi menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) R3770 untuk mengetahui unjuk kerja *circulator*. Spesifikasi kerja yang dikarakterisasi adalah besaran *voltage standing wave ratio* (VSWR) yang menunjukkan *matching* dari *circulator* (S_{11}); VSWR adalah perbandingan antara amplitudo gelombang berdiri (*standing wave*) maksimum ($|V|_{max}$) dengan nilai minimumnya ($|V|_{min}$) [10], besaran kerugian penyisipan [*insertion loss* (dB)] yang menunjukkan keadaan daya pada sisi *input* (S_{12}), dan besaran isolasi (*isolation* (dB)) yang menunjukkan keadaan daya pada sisi *output* (S_{21}). Aplikasi sepasang magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB dalam *circulator* dilakukan sedemikian rupa sehingga tidak ada kebocoran medan elektromagnetik. Pemasangan magnet permanen pada *circulator* diperlihatkan pada Gambar 2.

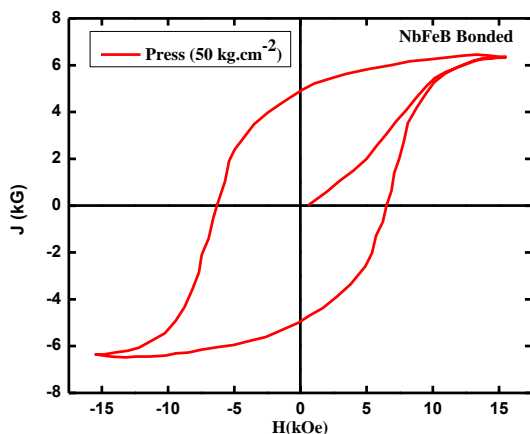


Gambar 2. Pemasangan Magnet Permanen pada *Circulator*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1 memperlihatkan nilai intrinsik magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB yang diperoleh dari penerapan variasi tekanan, menunjukkan hasil eksperimen magnet berpengikat (*bonded*) dengan ρ sebesar $4,89 \text{ gr.cm}^{-3}$ akibat dari tekanan kompaksi 100 kg.cm^{-2} adalah lebih baik daripada hasil penelitian pembuatan magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB sebelumnya sebesar $4,47 \text{ gr.cm}^{-3}$ akibat dari pemberian tekanan kompaksi 45 kg.cm^{-2} dan temperatur pemanasan $150 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan *holding time* 30 menit [8]. Nilai densitas magnet permanen ini akan berpengaruh terhadap spesifikasi kerja dari sebuah *circulator*.

Gambar 3 menunjukkan contoh kurva histerisis magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB dari hasil kompaksi 50 kg.cm^{-2} yang menghasilkan induksi remanen (B_r) $\sim 4,94 \text{ kG}$, koersifitas (H_{cJ}) $\sim 6,37 \text{ kOe}$, dan produk energi maksimum (BH_{max}) $\sim 4,41 \text{ MGOe}$.

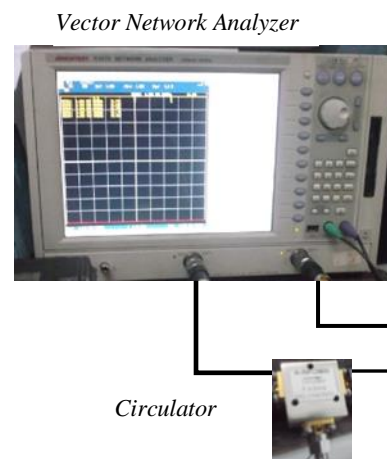


Gambar 3. Kurva Histerisis dari Magnet Berpengikat (*Bonded*) NdFeB Hasil Kompaksi 50 Kg.Cm^{-3} .

Dari Tabel 1 terlihat nilai intrinsik magnet berpengikat (*bonded*) untuk B_r cenderung mengalami kenaikan mengikuti kenaikan perlakuan tekanan saat *green-compact*, demikian juga nilai ρ -nya. Proses berpengikat (*bonded*) dimulai dari pemberian tekanan *green-compact*. Material yang terdiri dari serbuk NdFeB dan *binder* akan semakin padat seiring dengan kenaikan tekanan. Sampel kemudian dipanaskan pada temperatur $200 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 60 menit, menyebabkan sampel akan semakin padat ketika material *binder* terbakar karena perlakuan panas, jarak butiran NdFeB akan semakin rapat dan porositas semakin mengecil. Dari proses ini, maka nilai intrinsik magnet berpengikat (*bonded*) mengalami kenaikan berbanding lurus dengan kenaikan tekanan. Kenaikan nilai ρ juga mengakibatkan kenaikan pada rapat B-nya. Pada penelitian ini diperoleh nilai B (rapat fluks magnetik) terbesar 800 G pada pemberian tekanan 100 kg.cm^{-2} . Magnet berpengikat (*bonded*) selanjutnya diterapkan pada sebuah *circulator* yang dapat dioperasikan pada frekuensi kerja *S band* ($2,00\text{-}4,00 \text{ GHz}$). Gambar 4 memperlihatkan diagram pengukuran spesifikasi kerja *circulator*. Pengukuran dilakukan dengan memasang *circulator* pada VNA, memberikan sinyal *input* 1 mA pada *port* 1 dan mengukur sinyal *output* pada *port* 2. Pada *port* 3 dipasang *terminator* 50 ohm untuk pembebanan. Pengukuran VSWR *circulator* dilakukan dalam rentang frekuensi $2,00\text{-}4,00 \text{ GHz}$.

TABEL 1
NILAI INTRINSIK DAN KUAT MEDAN PERMUKAAN DARI MAGNET BERPENGIKAT (*BONDED*) NdFeB

No. Sampel	Tekanan Kompaksi (kg.cm^{-2})	Sifat Magnet				
		B_r (kG)	H_{cJ} (kOe)	BH_{max} (MGOe)	ρ (g.cm^{-3})	B (Gauss)
1	25	4,84	4,43	3,65	4,43	620
2	50	4,94	6,37	4,41	4,51	680
3	75	5,11	4,64	3,64	4,76	700
4	100	5,37	4,74	2,39	4,89	800



Gambar 4. Diagram Pengukuran *Circulator*.

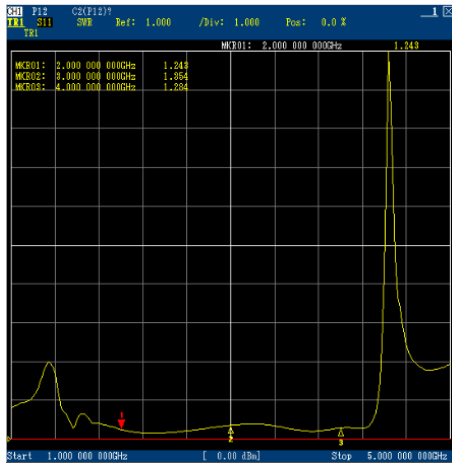
Tabel 2 memperlihatkan data pengukuran VSWR, *isolation* dan *insertion loss* dari *circulator* dengan penerapan magnet permanen berpengikat (*bonded*) NdFeB dan dibandingkan hasil pengukuran *circulator* komersial. Pada saluran transmisi ada dua komponen

gelombang tegangan, yaitu tegangan yang dikirimkan ($V_0 +$) dan tegangan yang direfleksikan ($V_0 -$). Nilai VSWR yang diperbolehkan adalah ≤ 2 [11], [12].

TABEL 2
PERBANDINGAN KINERJA *CIRCULATOR* DENGAN MAGNET
BERPENGIKAT (*BONDED*) NdFeB DAN *CIRCULATOR* KOMERSIL

Vector Network Analyzer	Circulator Komersil (Ferit)	Circulator (NdFeB-bonded magnet)
VSWR	1,266	1,354
Insertion Loss (dB)	-0,343	-0,200
Isolation (dB)	-21,054	-17,165

Nilai VSWR pada titik kerja 3,00 GHz terukur sebesar 1,354, untuk frekuensi di atas dan di bawah nilai VSWR terukur sekitar 1,2, ini memperlihatkan bahwa setelah magnet permanen berpengikat (*bonded*) diterapkan pada *circulator*, sinyal yang direfleksikan masih memenuhi spesifikasi yaitu ≤ 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

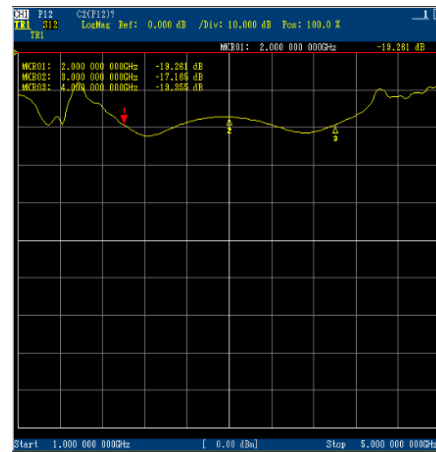


Gambar 5. Hasil Pengukuran VSWR *Circulator*.

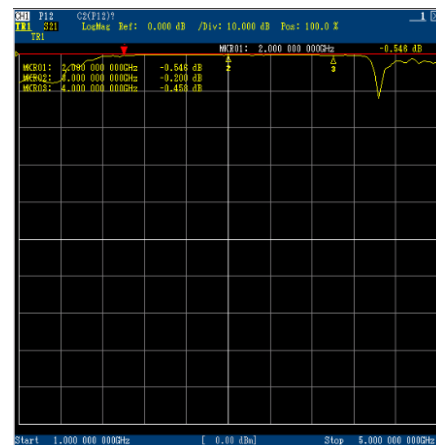
Pengukuran isolasi *circulator* dilakukan pada rentang frekuensi 2,00-4,00 GHz, pada titik kerja 3,00 GHz diperoleh nilai -17,165 dB, ini menunjukkan bahwa *circulator* masih bisa menangani level daya yang cukup tinggi. Apabila dibandingkan dengan nilai isolasi *circulator* komersil maka nilai ini masih lebih kecil. Akan tetapi untuk frekuensi di atas dan di bawah diperoleh nilai sekitar -19 dB. Pengukuran isolasi *circulator* ditunjukkan pada Gambar 6.

Gambar 7 menunjukkan pengukuran *insertion loss* dari aplikasi magnet berpengikat (*bonded*) pada *circulator* pada rentang frekuensi 2,00-4,00 GHz, untuk titik kerja 3,00 GHz diperoleh nilai -0,200 dB, *insertion loss* pada *circulator* yang sudah terapkan magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB memiliki nilai yang masih sesuai dengan spesifikasi *circulator* komersil, ini berarti sinyal yang dikirimkan mengalami pengurangan daya yang kecil.

Dari karakterisasi unjuk kerja *circulator* dengan magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB, maka semua spesifikasi yang dimiliki oleh *circulator* komersil *S-band* dengan magnet permanen BaFe₁₂O₁₉ dapat terpenuhi [12].



Gambar 6. Hasil Pengukuran *Isolation* pada *Circulator*.



Gambar 7. Hasil Pengukuran *Insertion Loss* pada *Circulator*.

Penggunaan magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB sebagai magnet permanen *circulator* memiliki kelebihan dibandingkan dengan penggunaan BaFe₁₂O₁₉, yaitu dalam proses pembuatannya; magnet BaFe₁₂O₁₉ memiliki temperatur *sintering* yang tinggi 1250 °C, sedangkan ketersediaan *high temperatur furnace* merupakan kendala tersendiri. Pada pembuatan magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB, serbuk NdFeB *crash-ribbon* cukup mendapat perlakuan pemanasan pada temperatur 200 °C. Kelebihan yang lain adalah kepresisian ukuran produk akhir magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB lebih tinggi dari BaFe₁₂O₁₉, karena hasil proses *sintering* mengalami penyusutan 13-15%. Hal ini menjadi kendala tersendiri apabila kita mendesain dimensi produk akhir magnet BaFe₁₂O₁₉ yang presisi. Magnet permanen berpengikat (*bonded*) NdFeB tidak mengalami penyusutan yang berarti pada saat mendapat perlakuan *burn-compact*, sehingga memiliki dimensi fisik yang sesuai dengan perancangannya.

KESIMPULAN

Penelitian telah berhasil membuat dan menerapkan magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB pada *S-band circulator* pada titik kerja 3,00 GHz diperoleh nilai VSWR sebesar 1,354, nilai isolasi sebesar -17,165 dB dan nilai kerugian penyisipan sebesar -0,200 dB dari magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB berdensitas sebesar 4,89 gr.cm⁻³ yang memiliki nilai intrinsik; induksi remanen (B_r) ~ 5,37 kG, koersifitas (H_c) ~ 4,74 kOe, produk energi maksimum (BH_{max}) ~ 2,39 MGOe

dan kuat medan permukaan 800 G. oleh karena itu magnet berpengikat (*bonded*) NdFeB dapat digunakan sebagai magnet alternatif pengganti magnet ferit dalam *circulator*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dilakukan dalam Program Tematik Tahun 2014, sehingga kami mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi – LIPI yang telah memfasilitasi penelitian ini dapat terlaksana.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. J. Strnat, "Modern permanent magnets for applications in electro-technology", *Proceedings of the IEEE* vol. 78, issue 6, 1990, pp. 923-946.
- [2] R. Munarkhi, Soetamso, dan Suwandi, "Rancang bangun sirkulator variabel 1500 MHz - 2500 MHz menggunakan pasir feromagnetik", *Jurnal PA*, hal. 13-20, 2008.
- [3] H. Sözeri, "Simple recipe to synthesize single-domain BaFe₁₂O₁₉ with high saturation magnetization", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 321, pp. 2717-2722, 2009.
- [4] J. Lee, M. Fuger, J. Fidler, D. Suess, T. Schrefl, and O. Shimizu, "Modeling of the write and read back performances of hexagonal Ba-ferrite particulate media for high density tape recording", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 322, pp. 3869-3875, 2010.
- [5] H. Mocuta, L. Lechevallier, J. M. Le Breton, J. F. Wang, and I. R. Harris, "Structural and magnetic properties of hydrothermally synthesised Sr_{1-x}Nd_xFe₁₂O₁₉ hexagonal ferrites", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 364, pp. 48-52, 2004.
- [6] S. R. Truuth, "Magnetic testing of bonded magnets", *For the NATO/ARW Conference on Bonded Magnets*, Newark, DE, USA, August 22 and 23, 2002, pp. 1-8.
- [7] N. Idayanti, P. Irasari, L. Muliani, N. Sudrajat, T. Kristiantoro, "Pembuatan magnet bonded hybrid untuk aplikasi generator kecepatan rendah", *Jurnal Sains Materi Indonesia*, Edisi Desember 2009.
- [8] T. Kristiantoro, N. Sudrajat, W. Budiawan, "Pembuatan dan karakterisasi magnet bonded NdFeB dengan teknologi green compact", *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, vol. 9 no.1, hal. 9-11, 2013.
- [9] (2010). The magnequench website. [Online]. Available: <http://www.Mqitechnology.com>.
- [10] T. Kristiantoro dan N. Sudrajat, "Magnet permanen bonded untuk komponen circulator pada frekuensi kerja L band", *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 2013, pp. 724-727.
- [11] T. Kristiantoro dan N. Sudrajat, "Karakterisasi magnet permanen untuk komponen circulator pada frekuensi kerja L band", *Seminar dan Focus Group Discussion (FGD) Material Maju, Magnet dan Aplikasinya*, 2013, hal. 143-147.
- [12] T. Kristiantoro, N. Sudrajat, N. Idayanti, A. Y. Hercuadi, "Characterization of barrium ferrite permanent magnet for circulator components working at S band (2.45 GHz – 4.00 GHz)", *Proceeding The 3rd International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications (ICRAMET)*, 2014, p. 94-97.