**PENINGKATAN KOERSIVITAS DAN REMANEN PADA MAGNET PERMANEN
Nd-Fe-B DENGAN PROSES DIFUSI BATAS BUTIR**

***COERCIVITY AND REMANENCE ENHANCEMENT OF Nd-Fe-B PERMANENT
MAGNET BY GRAIN BOUNDARY DIFFUSION PROCESS***

Martin Doloksairbu*¹, Shinta Virdhian*, Dagus Resmana Djuanda* dan Eva Afrilinda*

Balai Besar Logam dan Mesin, Jalan Sangkuriang Nomor 12 Bandung 40135, Jawa Barat, Indonesia

Email¹: martin-d@kemenperin.go.id

*Kontributor Utama

Abstrak

Salah satu karakteristik magnet permanen tipe NdFeB adalah rentan terhadap kenaikan temperatur, seperti halnya yang terjadi pada aplikasi motor listrik. Penambahan unsur Dy pada tipe ini menjadi penting dalam usaha meningkatkan koersivitas dan temperatur curie. Akan tetapi, penambahan unsur Dy secara konvensional memerlukan biaya tinggi serta terjadinya penurunan nilai sifat remanen. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan menambahkan unsur Dy untuk meningkatkan koersivitas magnet permanen dengan cara difusi batas butir dengan biaya yang lebih rendah dari pada cara konvensional dan tidak menurunkan sifat remanen secara signifikan. Penelitian ini dimulai dengan mengkarakterisasi dan mengamati struktur mikro awal dari magnet permanen tipe NdFeB dengan alat SEM-BSE dan VSM. Kemudian dilakukan proses difusi Dy dengan cara melapisi permukaan magnet dengan campuran DyF₃-LiF dengan variasi perbandingan 0%-0% (tanpa lapisan); 44%-56% dan 100%-0%. Setelah itu, pada setiap variasi lapisan dilakukan perlakuan panas anil 750°C dengan variasi waktu penahanan selama 2,5; 5; 7,5 dan 10 jam yang diikuti dengan *post anil* 550°C selama 1 jam. Hasilnya, nilai koersivitas magnet meningkat dari 10,7 kOe menjadi 13,5 kOe pada sampel yang dianil pada variasi waktu penahanan 5 dan 7,5 jam. Sedangkan nilai remanen juga terjadi peningkatan dari 13,2 kG menjadi 14,7 kG pada sampel yang di anil dengan waktu penahanan selama 10 jam. Energi maksimum produk magnet pada sampel yang mengalami proses difusi (43,6 MGOe) lebih tinggi dari sampel yang tidak dilakukan difusi batas butir (43,1 MGOe).

Kata kunci : difusi batas butir, dysprosium (Dy), koersivitas, magnet NdFeB, remanen

Abstract

One of the characteristics of the NdFeB type permanent magnet was susceptible against the increase of temperature such as in electric motor applications. It is important to add Dy elements to increase coercivity and temperature curie. However, the addition of Dy elements conventionally requires high costs and reduces remanent significantly. The purpose of this study was to improve coercivity without a significant decrease in remanence by adding Dy elements with grain boundary diffusion. The microstructure of the NdFeB type permanent magnet was characterized and observed with SEM-BSE and VSM. Then, the surface of NdFeB type permanent magnet was coated with DyF₃-LiF with variation ratio of 0%-0% (without coating); 44%-56% and 100%-0%. After that, each variation was annealed at 750°C for holding time of 2.5; 5; 7.5 and 10 hours followed by post-annealing 550°C for 1 hour. As a result, the magnetic coercivity increase from 10.7 kOe (initial magnet) to 13.5 kOe at variation of holding time of 5 and 7.5 hours. While the remanence also increased from 13.2 kG

(initial magnet) to 14.7 kG at 10 hours time. The maximum energy products was increase from 43.1 at sample without coating to 43.6 MGOe at sampel with 100%DyF₃.

Keywords : grain boundary diffusion, dysprosium (Dy), coercivity, Nd-Fe-B magnet, remanence

PENDAHULUAN

Saat ini kendaraan listrik dan kendaraan hibrid mendapatkan banyak perhatian terkait dengan pengurangan penggunaan bahan bakar fosil. Tenaga penggerak kendaraan listrik dihasilkan akibat interaksi antara arus listrik dan medan magnet. Sifat magnet permanen pada mesin memberikan pengaruh terhadap besar tenaga penggerak yang dihasilkan

Magnet Permanen berbasis Logam Tanah Jarang (LTJ) memiliki sifat magnet lebih baik dibandingkan Magnet Permanen yang terbuat dari besi, baja dan keramik. Magnet Permanen berbasis LTJ memiliki nilai (BH)_{max} magnet mencapai 30~35 MGOe atau 240~280 kJ.m⁻³ (Idayanti, Manaf, and Dedi 2018). Dengan nilai BH_(max) tersebut, magnet permanen berbasis LTJ mampu memenuhi tuntutan produk yang mengutamakan miniaturisasi ruang.

Magnet Permanen NdFeB menjadi komponen yang penting pada motor listrik dan *power generator*. Magnet permanen Nd-Fe-B memiliki koersivitas sebesar 20 kOe, magnet remanen 1,2 T dan energi maksimum produk mencapai 34~40,7 MGOe (Jin et al. 2016). Namun magnet permanen berbasis NdFeB tergantung terhadap temperatur tinggi. Nilai BH_{max} magnet NdFeB akan menurun drastis saat temperatur mencapai 99,85°C (373 K) (Cui et al. 2018). Nilai BH_{max} NdFeB perlu ditingkatkan agar nilai magnet yang tersedia masih mencukupi ketika temperatur operasi mencapai 373 K.

Sifat magnet NdFeB dapat ditingkatkan dengan menggunakan unsur LTJ seperti Dy dan Pr. Namun kelangkaan Dy dan Pr menyebabkan harga LTJ tersebut sangat mahal (Sheridan et al. 2014; Pavel et al. 2017). Alternatifnya adalah dengan menggunakan metode difusi batas butir sehingga Dy yang digunakan lebih sedikit.

Proses difusi batas butir dapat mensubsitusikan sebagian Nd dengan unsur Dy. Penelitian Liu et al. telah meningkatkan koersivitas magnet Dy free Nd-Fe-B *hot deformed*. Koersivitas ditingkatkan dengan mendifusikan paduan Nd-Ga-Cu dan Nd-Fe-Ga-Cu pada temperatur 600°C selama 3 jam. Magnet NdFeB menghasilkan koersivitas sebesar 2,2 T dan magnet remanen sekitar 1,3~1,08 T dari

koersivitas sekitar 1,8 T (18 kOe) pada temperatur ruang (Liu et al. 2018). Sedangkan pada aplikasi *traction motors* pada kendaraan elektrik atau *hybrid* diperlukan koertivitas di atas 0,8 T pada temperatur 180°C. Oleh karena itu dibutuhkan sekitar 3 T pada temperatur ruang.

Struktur mikro mempengaruhi koersivitas dan remanen magnet permanen. Formasi fasa intergranular non ferromagnetik kaya Nd pada struktur mikro meningkatkan koersivitas namun menurunkan remanen. Penggunaan unsur yang berbeda dapat menimbulkan efek yang berbeda.

Temperatur *annealing* dan waktu tahan merupakan parameter yang penting untuk mencapai penyisipan yang optimal pada batas butir. Pratomo et al. melakukan proses GBD dengan unsur Dy dan Tb pada temperatur *annealing* 800~1050°C dengan waktu tahan 2 jam. Liu et al. menggunakan paduan Nd-Ga-Cu dan Nd-Fe-Ga-Cu pada temperatur 600°C dengan waktu tahan 3 jam. Penggunaan unsur paduan dapat memberikan alternatif temperatur *annealing* yang lebih rendah.

Post-sinter annealing memberikan efek peningkatan yang berbeda. Lit et al. menyebutkan bahwa koersivitas dapat ditingkatkan dari 1 T menjadi 1,8 T dengan *post-sinter annealing* di atas 480°C. Hasil tersebut lebih besar dari magnet yang disinter secara standar.

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan sifat magnet komersil Nd-Fe-B dengan metode difusi batas butir menggunakan paduan DyF₃-LiF. Metode ini menggunakan sedikit paduan DyF₃-LiF sehingga biaya yang diperlukan lebih sedikit. Melalui penelitian ini dapat mengetahui pengaruh paduan DyF₃-LiF dengan metode difusi batas butir terhadap peningkatan koersivitas, magnet remanen dan energi produk maksimum magnet Nd-Fe-B dengan metode difusi batas butir.

METODOLOGI

Substitusi Nd dilakukan pada Nd yang berada pada batas butir. Pratomo et al. telah melakukan metode GBD dengan menggunakan unsur Dy dan Tb (Pratomo, Oktadinata, and Pawawoi 2017). Pada penelitian ini menggunakan paduan DyF₃-LiF.

Sampel dipotong sebesar 3x3x2 mm. Magnet awal dikarakterisasi dengan alat Vibrating Sample Magnetometer (VSM) untuk mengetahui nilai koersivitas (iH_c), medan magnet (M_r) dan energi produk maksimum (BH Max). Magnet awal dianalisa struktur mikro dan kandungan unsur dengan alat Scanning Electron Microscopy-Back Scattered Electron (SEM BSE) Image Hitachi SU 3500 dan X-Ray Diffraction (XRD). Sampel magnet diberikan lapisan dengan variasi DyF₃-LiF: 0%-0% (tidak dilapisi); 44%-56% dan 100%-0%. Sampel yang telah dilapisi diberikan perlakuan panas *annealing* pada temperatur 750°C pada waktu tahan 2,5 jam; 5 jam; 7,5 jam dan 10 jam dalam keadaan vakum pada alat Tungku Perlakuan Panas MTI Corporation GSL 1500X. Setelah *annealing*, sampel diberikan perlakuan panas *post annealing* pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 1 jam pada keadaan vakum. Magnet yang telah diberikan perlakuan panas dikarakterisasi sifat magnetnya dengan alat VSM. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

Gambar 1. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Magnet komersil sebagai bahan magnet awal dikarakterisasi dengan VSM. Hasil karakterisasi dengan VSM ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakterisasi sifat magnet awal menggunakan VSM

M_{15}	14.4 kG
M_r	13.2 kG
iH_c	10.7 kOe
M_r correction	13.8 kG
N_D	0.33
$(BH)_{max}$	43.6 MGOe

Keterangan: M_{15} : nilai medan magnet pada *applied field* 15 kOe; M_r : medan magnet remanen; N_D : faktor demagnetisasi

Sumber: dokumentasi penelitian

Magnet awal memiliki medan magnet sebesar 14,4 kG pada *applied field* 15 kOe. Nilai remanen dan koersivitas magnet awal sebesar 13,2 kG dan 10,7 kOe.

Magnet awal dianalisa struktur mikro dan komposisi unsur menggunakan BSE Image dan XRD. Hasil analisa ditunjukkan Gambar 2, Gambar 3 dan Tabel 2.

Gambar 2. Electron Image magnet awal menggunakan SEM

Sumber: dokumentasi penelitian

Gambar 3. Hasil pengamatan dengan XRD
Sumber: dokumentasi penelitian

Tabel 2. Kandungan unsur magnet awal

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%
O	K series	0.41	0.00137	0.20
Al	K series	0.13	0.00092	0.16
Fe	K series	54.76	0.54757	69.60
Pr	L series	5.07	0.05075	7.11
Nd	L series	16.40	0.16404	22.92
Total				100.00

Sumber: dokumentasi penelitian

Magnet awal mengandung unsur tanah jarang 7,11% wt Praseodimium (Pr) dan 22,92% wt Neodimium (Nd). Bahan magnet permanen dengan kandungan Nd dan Pr merupakan magnet permanen dengan energi produk yang tinggi (Havwini, Humaidi, and Muljadi 2013).

Magnet dipotong dengan dimensi 3x3x2 mm. Kode sampel magnet dan perlakuan panas *annealing* yang diberikan ditunjukkan pada Tabel 3. Magnet awal (*as sintered*) diberikan temperatur *annealing* pada waktu tahan 7,5 jam. Sampel A, B dan C diberikan temperatur *annealing* pada waktu tahan 2,5; 5; 7,5 dan 10 jam.

Tabel 3. Kode sampel, komposisi lapisan dan waktu tahan pada annealing 750oC

Kode Sampel	Komposisi % mol		Waktu Annealing (jam)			
	DyF ₃	LiF	2,5	5	7,5	10
A	0	0	○	○	○	○
B	44	56	○	○	○	○
C	100	0	○	○	○	○
As Sintered					○	

Sumber: dokumentasi penelitian

Hasil karakterisasi sampel *as sintered* ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Karakterisasi sifat magnet as sintered

Sampel	Waktu Tahan	iHc	Mr	BH max
	Jam	kOe	kG	MGOe
As Sintered	7.5	10.5	13.7	41.2

Sumber: dokumentasi penelitian

Magnet *as sintered* memiliki koersivitas sebesar 10,5 kOe dan magnet remanen sebesar 13,7 kG pada waktu tahan 7,5 jam.

Hasil karakterisasi sampel A (tanpa pelapisan) dapat dilihat pada Tabel 5 di bawah ini.

Tabel 5. Hasil karakterisasi sampel A (tanpa pelapisan)

Sampel	Waktu Tahan	iHc	Mr	BH max
	Jam	kOe	kG	MGOe
No Coating	2.5	12.2	14.2	42.7
	5.0	13.3	13.6	39.7
	7.5	13.5	13.0	41.6
	10.0	13.0	14.5	43.1

Sumber: dokumentasi penelitian

Koersivitas magnet permanen tanpa pelapisan meningkat dari waktu tahan 2,5 jam s/d 7,5 jam yaitu 12,2; 13,3 dan 13,5 kOe. Koersivitas kemudian menurun pada waktu tahan 10 jam yaitu 13 kOe. Tren magnet remanen (M_r) berbeda dengan tren koersivitas. M_r menurun dari waktu tahan 2,5 jam s/d 7,5 jam yaitu 14,2; 13,6 dan 13,0 kG kemudian meningkat pada waktu tahan 10 jam yaitu 14,5 kG. Energi produk maksimum terdapat pada waktu tahan 10 jam yaitu 43,1 MGOe.

Hasil karakterisasi magnet permanen sampel B dapat dilihat pada Tabel 6 di bawah ini.

Tabel 6. Hasil karakterisasi sampel B pelapisan 44%DyF₃-56%LiF

Sampel	Waktu Tahan	iHc	Mr	BH max
	Jam	kOe	kG	MGOe
44%DyF ₃ -56%LiF	2.5	10.7	13.3	26.8
Eutectic 50% Liquid	5.0	13.5	13.8	40.1
	7.5	13.5	13.6	38.6
	10.0	12.8	14.2	40.0

Sumber: dokumentasi penelitian

Tren koersivitas magnet permanen Sampel B meningkat dari waktu tahan 2,5 jam s/d 7,5 jam yaitu 10,7; 13,5 dan 13,5 kOe. Koersivitas mengalami penurunan pada waktu tahan 10 jam menjadi 12,8 kOe. Koersivitas tertinggi adalah 13,5 kOe pada waktu tahan 5 dan 7,5 jam. Nilai koersivitas tertinggi sampel B sama dengan nilai koersivitas tertinggi pada

sampel A (tanpa pelapisan) yaitu 13,5 kOe. Penambahan kandungan DyF₃ pada bahan lapisan tidak meningkatkan nilai koersivitas di atas 13,5 kOe.

Magnet remanen Sampel B meningkat dari waktu tahan 2,5 jam s/d 5 jam lalu menurun dari waktu tahan 5 jam s/d 7,5 jam kemudian meningkat lagi dari waktu tahan 7,5 jam s/d 10 jam. Nilai M_r tertinggi yaitu 14,2 kG pada waktu tahan 10 jam. Nilai tersebut lebih kecil dari nilai M_r tertinggi sampel A. Penggunaan lapisan 44%DyF₃-56%LiF mampu menurunkan lama waktu tahan untuk mencapai nilai koersivitas sebesar 13,5 kOe walaupun tidak dapat meningkatkan magnet remanen lebih besar dari 14,5 kG (sampel A). Energi produk maksimum paling tinggi dicapai pada waktu tahan 5 jam yaitu 40,1 MGOe. Waktu tersebut lebih cepat dibandingkan pada sampel A.

Penggunaan lapisan 44%DyF₃-56%LiF pada magnet permanen mampu mencapai koersivitas 13,5 kOe dengan waktu yang lebih singkat. Unsur Dy dapat lebih cepat terdifusi ke matriks Nd-Fe-B dan menggantikan fasa kaya Nd. Penelitian Pratomo et al. menunjukkan bahwa fasa kaya Nd semakin menghilang pada struktur mikro setelah proses difusi batas butir (Pratomo, Oktadinata, and Pawawoi 2017).

Hasil karakterisasi sampel C dapat dilihat pada Tabel 7 di bawah ini.

Tabel 7. Hasil karakterisasi sampel C pelapisan 100%DyF₃

Sampel	Waktu Tahan Jam	iHc kOe	Mr kG	BH max MGOe
Non Eutectic	2,5	13,3	13,1	35,9
DyF ₃	5,0	13,5	14,1	42,6
	7,5	13,4	14,1	42,3
	10,0	12,2	14,7	43,6

Sumber: dokumentasi penelitian

Koersivitas sampel C meningkat lalu menurun dengan bertambah waktu tahan yaitu 13,3; 13,5; 13,4 dan 12,2 kOe. Pada waktu tahan 5 jam, sampel C menghasilkan koersivitas paling tinggi yaitu 13,5 kOe. Nilai tersebut juga dapat dihasilkan oleh sampel A dan sampel B namun dengan waktu tahan yang berbeda. Pada sampel A (tidak ada pelapisan) koersivitas 13,5 kOe dicapai pada waktu tahan 7,5 jam. Pada sampel B (44%DyF₃-56%LiF) koersivitas 13,5 kOe dicapai pada waktu tahan 5 dan 7,5 jam. Penambahan persentase DyF₃ mampu mempertahankan waktu tahan 5 jam untuk menghasilkan koersivitas 13,5 kOe.

Tren magnet remanen sampel C meningkat dengan peningkatan waktu tahan yaitu 13,1; 14,1; 14,1 dan 14,7 kG. Nilai magnet remanen yang dihasilkan sampel C merupakan nilai magnet remanen paling tinggi dibandingkan sampel A dan sampel B yaitu 14,7 kG dibandingkan dengan 14,5 (Sampel A) dan 14,2 kG (Sampel B). Energi produk maksimum Sampel C mencapai 43,6 MGOe. Nilai tersebut lebih besar daripada sampel A dan B.

Proses difusi batas butir menggunakan lapisan DyF₃-LiF mampu meningkatkan koersivitas dari koersivitas magnet *as sintered* sebesar 10,7 kOe (Gambar 4). Magnet permanen Nd-Fe-B *as sintered* memiliki koersivitas sebesar 1,1~1,2 T atau 11~12 kOe (Hono and Sepehri-Amin 2018). Koersivitas dapat ditingkatkan sampai dengan 13,5 kOe. Nilai tersebut dapat dicapai pada waktu tahan 5 jam dengan lapisan 100%DyF₃ (sampel C). Namun koersivitas menurun dengan waktu tahan 10 jam.

Gambar 4. Grafik koersivitas dan waktu tahan
Sumber: dokumentasi penelitian

Beberapa nilai magnet remanen (M_r) sampel A, B dan C berada di bawah nilai magnet remanen magnet *as sintered* (Gambar 5). Magnet remanen *as sintered* umumnya memiliki M_r sebesar 1,4 T atau 14 kOe (Hono and Sepehri-Amin 2018). Magnet remanen dapat ditingkatkan sampai dengan 14,7 kG. Berbeda dengan koersivitas, magnet remanen pada waktu tahan 10 jam memberikan hasil yang lebih besar dari magnet remanen *as sintered*.

Gambar 5. Grafik magnet remanen terhadap waktu tahan

Sumber: dokumentasi penelitian

Koersivitas dan magnet remanen memiliki hubungan yang saling mempengaruhi. Magnet remanen dapat menurun dengan meningkatnya koersivitas. Semakin rendah magnet remanen maka semakin mudah arah medan magnet berganti arah pada temperatur tinggi. Pada penelitian ini magnet remanen dapat ditingkatkan sampai 14,7 kG pada sampel C dengan waktu tahan 10 jam. Namun koersivitas sampel C pada waktu tahan 10 hanya sebesar 12,2 kOe.

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa beberapa nilai energi produk maksimum sampel berada di bawah nilai energi produk maksimum *as sintered* dan beberapa nilai energi produk maksimum sampel berada di atas energi produk maksimum *as sintered*. Namun difusi batas butir unsur Dy mampu meningkatkan energi produk maksimum dari 43,1 MGOe pada sampel tanpa lapisan menjadi 43,6 MGOe pada sampel dengan 100% DyF₃.

Gambar 6. Grafik energi produk maksimum terhadap waktu tahan

Sumber: dokumentasi penelitian

KESIMPULAN

Proses difusi batas butir dengan lapisan DyF₃-LiF dapat meningkatkan sifat magnet komersial *as sintered*. Koersivitas dapat ditingkatkan dari 10,5 kOe pada sampel *as sintered* (1,05 T) menjadi 13,5 kOe (1,35 T) pada sampel tanpa lapisan DyF₃-LiF dengan waktu tahan 7,5 jam; pada sampel dengan 44%DyF₃-56%LiF dengan waktu tahan 5 dan 7,5 jam; dan pada 100%DyF₃ dengan waktu tahan 5 jam. Remanen dapat ditingkatkan dari 13,2 kG (magnet awal) menjadi 14,7 kG pada lapisan 100%DyF₃ dengan waktu tahan 10 jam. Penambahan unsur Dy dengan difusi batas butir dapat meningkatkan energi produk maksimum dari 43,1 MGOe pada sampel tanpa lapisan menjadi 43,6 MGOe pada lapisan 100%DyF₃ dengan waktu tahan 10 jam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Balai Besar Logam dan Mesin atas bantuan yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Cui, Jun, Matthew Kramer, Lin Zhou, Fei Liu, Alexander Gabay, George Hadjipanayis, Balamurugan Balasubramanian, and David Sellmyer. 2018. "Current Progress and Future Challenges in Rare-Earth-Free Permanent Magnets." *Acta Materialia* 158. Elsevier Ltd: 118–37. doi:10.1016/j.actamat.2018.07.049.
- Havwini, Tian, Syahrul Humaidi, and Muljadi. 2013. "Analisis Sifat Magnet Dan Mekanik Pada Permanent Bonded Magnet Pr-Fe-B Dengan Matriks Bakelit." *Jurnal Saintia Fisika* 5 (1). Medan, Indonesia: Universitas Sumatera Utara: 1–6. <https://jurnal.usu.ac.id/index.php/sfisika/article/view/5232/2323>.
- Hono, K, and H. Sepehri-Amin. 2018. "Prospect for HRE-Free High Coercivity Nd-Fe-B Permanent Magnets." *Scripta Materialia* 151 (July). Acta Materialia Inc.: 6–13. doi:10.1016/j.scriptamat.2018.03.012.
- Idayanti, Novrita, Azwar Manaf, and Dedi. 2018. "Magnet Nanokomposit Sebagai Magnet Permanen Masa Depan." *Metalurgi* 33 (1). Depok, Indonesia: Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI: 1–18. doi:10.14203/metalurgi.v33i1.433.
- Jin, Hongyue, Peter Afiuny, Timothy McIntyre, Yuehwern Yih, and John W. Sutherland.

2016. "Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling." *Procedia CIRP* 48. Elsevier B.V.: 45–50. doi:10.1016/j.procir.2016.03.013.
- Liu, Lihua, H. Sepehri-Amin, T. T. Sasaki, T. Ohkubo, M. Yano, N. Sakuma, A. Kato, T. Shoji, and K. Hono. 2018. "Coercivity Enhancement of Nd-Fe-B Hot-Deformed Magnets by the Eutectic Grain Boundary Diffusion Process Using Nd-Ga-Cu and Nd-Fe-Ga-Cu Alloys." *AIP Advances* 8 (5): 1–8. doi:10.1063/1.5006575.
- Pavel, Claudiu C, Roberto Lacal-arántegui, Alain Marmier, Doris Schüller, Evangelos Tzimas, Matthias Buchert, Wolfgang Jenseit, and Darina Blagoeva. 2017. "Substitution Strategies for Reducing the Use of Rare Earths in Wind Turbines." *Resources Policy* 52 (April). Elsevier Ltd: 349–57. doi:10.1016/j.resourpol.2017.04.010.
- Pratomo, Sri Bimo, Herry Oktadinata, and Pawawoi. 2017. "Effect of DyF₃ and TbF₃ Additions on the Coercivity Enhancement in Grain Boundary Diffusion Processed Nd-Fe-B Permanent Magnets." In *Proceedings of the International Seminar on Metallurgy and Materials (ISSM2017)*, 020019:1–8. American Institute of Physics. doi:10.1063/1.5038301.
- Sheridan, R S, A J Williams, I R Harris, and A Walton. 2014. "Improved HDDR Processing Route for Production of Anisotropic Powder from Sintered NdFeB Type Magnets." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 350. Elsevier: 114–18. doi:10.1016/j.jmmm.2013.09.042.