

Efek Air Gap pada Rancang Bangun dan Uji Performa Generator Listrik Fluks Aksial Berbasis Magnet Permanen NdFeB

Achmad Maulana Soehada S.¹, Candra Kurniawan^{1,2}, dan
Perdamean Sebayang^{1,2,a)}

¹Program Studi Teknik Mesin, Fak. Teknik, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No. 1, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia

²Pusat Penelitian Fisika – LIPI, Kawasan Puspitpek Serpong, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia

E-mail: ^{a)}sebayang.perdamean@gmail.com

Masuk : 7 Februari 2017 Direvisi : 28 Februari 2017 Disetujui : 21 Maret 2017

Abstrak: Dalam penelitian ini telah dianalisis efek *air gap* terhadap performa generator listrik tipe fluks aksial berbasis magnet permanen NdFeB. Analisis performa dilakukan dengan mengukur *output* tegangan generator listrik fluks aksial terhadap ukuran *air gap* dan kecepatan putar rotor. *Air gap* antara stator dan rotor divariasikan dari 7 sampai 20 mm. Dari hasil eksperimen, peningkatan remanensi magnet berbanding lurus terhadap peningkatan *output* tegangan. Sebaliknya, peningkatan ukuran *air gap* menurunkan tegangan *output* secara linier. Hal ini disebabkan oleh adanya penurunan magnetik flux density secara eksponensial. Pada ukuran *air gap* 7 mm dan kecepatan rotor 1500 rpm, dihasilkan *output* tegangan maksimal untuk $B_r = 0,2$ dan 1,3 Tesla berturut-turut sebesar 10,4 dan 67,7 volt.

Kata Kunci: *air gap*, generator listrik fluks aksial, *ouput* tegangan, magnet NdFeB

Abstract: In this paper, the effect of *air gap* to the performance of NdFeB based permanent magnet axial flux electrical generator have been analyzed. The performance analysis was performed by measuring the *ouput* potential of generator as the changing of *air gap* and rotational speed of rotor. The *air gap* was varied from 7 to 20 mm. Based on the experiment, the increasing of magnetic remanence of permanent magnets was linearly correlated to the increasing of *output* voltage. On the other hand, increasing of the *air gap* was linearly reduced the *ouput* voltage. This effect is caused by the decreasing of magnetic flux density exponentially. On the fixed *air gap* of 7 mm and rotational speed of 1500 rpm, the maximum *ouput* voltage is achieved for $B_r = 0.2$ and 1.3 Tesla with the value of 10.4 and 67.7 volt, respectively.

Keywords: *air gap*, axial flux electrical generator, *ouput* voltage, NdFeB magnets

PENDAHULUAN

Kebutuhan listrik Nasional terus meningkat setiap tahunnya dan tercatat masih banyak wilayah Indonesia yang belum teraliri listrik, terutama daerah terpencil, perbatasan dan pulau-pulau terluar [1]. Salah satu upaya mengatasi kelangkaan energi listrik adalah dengan cara menggunakan sistem pembangkit listrik skala kecil seperti mikrohidro [2]. Dengan demikian, dibutuhkan inovasi terhadap teknologi konversi energi utama sistem tersebut, yaitu komponen generator listrik magnet permanen tipe fluks radial dan aksial [3]. Generator listrik adalah sebuah divais yang dapat mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik [4, 5].

Generator komersial yang populer saat ini adalah jenis *high speed induction*, dimana sistem ini membutuhkan kecepatan putaran tinggi. Untuk menggerakkan generator biasanya membutuhkan sistem motor bakar yang menggunakan bahan bakar dari fosil (batubara, minyak bumi dan gas) untuk menghasilkan medan magnet induksi [6], telah membuktikan bahwa performa sistem energi turbin hidrokinetik dengan menggunakan generator magnet permanen fluks aksial pada putaran rendah 450 rpm dapat menghasilkan energi listrik 1 kW. Perbedaan desain generator tipe fluks radial dan aksial masing-masing ditunjukkan pada Gambar 1 [7, 8].

Pada generator fluks radial, fluks magnet yang dihasilkan mengarah secara radial (menyebar) dan tegak lurus terhadap poros (*shaft*). Fluks-fluks magnetik yang dihasilkan akan memotong kumparan stator yang disusun disisi luar rotor. Generator fluks aksial menghasilkan fluks magnetik yang arahnya sejajar (aksial) dengan poros.



Gambar 1. Generator magnet permanen tipe (a) fluks radial dan (b) fluks aksial [7,8].

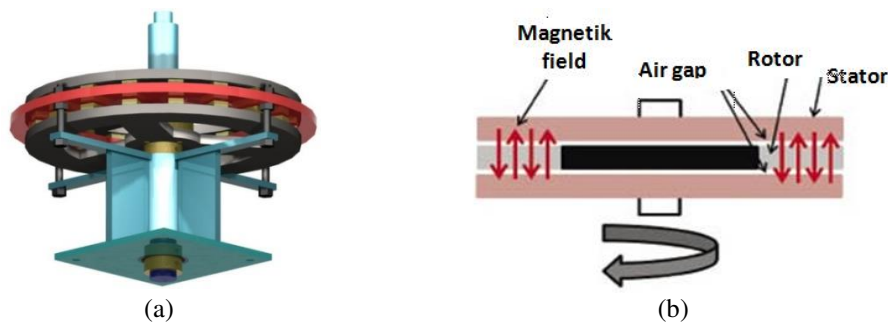
Kelebihan dari generator fluks aksial antara lain dapat didesain sehingga memiliki kutub-kutub magnet yang lebih banyak sehingga sesuai untuk aplikasi generator kecepatan rendah [9]. Selain itu, generator aksial memiliki konstruksi yang lebih pendek, kompak, strukturnya kuat, dan tingkat efisiensi tinggi karena tidak timbul rugi-rugi daya pada kumparan rotor. Aplikasi generator magnet permanen tipe aksial sangat tepat untuk pembangkit listrik skala kecil, seperti menggunakan tenaga angin atau air [10].

Di lain pihak, terdapat potensi penyediaan energi listrik yang berasal dari pembangkit listrik dengan daya putar rendah, seperti mikrohidro, tenaga geraknya bersumber pada aliran air, angin atau gelombang laut [11]. Performa komponen generator pada tipe pembangkit listrik ini sangat tergantung pada jumlah dan distribusi medan magnetik dari magnet permanen yang digunakan. Selain itu pengaruh parameter desain, seperti *air gap* dan kecepatan putar juga mempengaruhi unjuk kerja generator tersebut [12].

Dalam penelitian ini dilakukan proses rancang bangun dan uji performa generator listrik tipe fluks aksial tiga fasa menggunakan magnet permanen NdFeB [13]. Magnet permanen NdFeB digunakan karena merupakan jenis magnet permanen dengan remanensi medan magnetik tertinggi saat ini. Oleh karena itu pemilihan jenis magnet NdFeB dapat meningkatkan performa generator listrik dibandingkan jenis magnet permanen lainnya. Analisis performa generator dilakukan dengan variasi *air gap* dan kecepatan putar rotor. Generator listrik fluks aksial dirancang menggunakan satu buah stator dan dua buah rotor yang saling berpasangan. Pada bagian stator tersusun kumparan sebagai penghantar arus listrik, sedangkan pada bagian rotor masing-masing tersusun sebanyak 12 buah magnet permanen NdFeB [5].

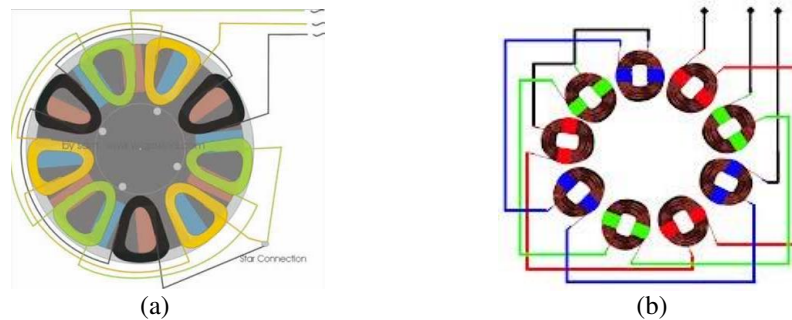
METODOLOGI

Desain generator listrik fluks aksial terdiri dari dua bagian, yaitu: satu stator dan dua rotor [12]. Jarak antara rotor dan stator didefinisikan sebagai *air gap* (celah udara). Pada generator aksial, *airgap* menentukan banyaknya fluks magnetik yang melewati kumparan stator, sehingga menentukan tingkat performa atau daya induksi yang dihasilkan generator tersebut. Konstruksi generator yang dibuat sedemikian rupa seperti ditunjukkan pada Gambar 2, dimana *air gap* tidak berubah atau konstan selama rotor berputar.



Gambar 2. Desain generator listrik fluks aksial, (a) konstruksi dan (b) skema [12].

Stator merupakan bagian yang tidak bergerak (statis). Komponen utamanya adalah kumparan, jumlah kumparan yang dipasang tergantung fasa dan daya yang ingin dihasilkan. Pada penelitian ini, konstruksi stator dibuat dengan menyusun 9 buah kumparan (N_s) yang dihubungkan secara seri dan tiap fasanya terpisah 120° . Setiap kumparan terdiri atas 70 lilitan (N) kawat tembaga dengan diameter kawat, $D_k = 0,5$ mm. Bentuk kumparan pada stator dan rangkaian elektronik 3 fasa dirancang seperti diperlihatkan pada Gambar 3 [14]. Kumparan tersebut kemudian ditanam dalam bahan epoxy resin sehingga rigid dan keras. Pemilihan bahan epoksi resin karena bersifat isolator listrik.



Gambar 3. Desain kumparan pada stator, (a) bentuk kumparan pada stator dan (b) sistem rangkaian kumparan 3 fasa [9,14].

Rotor merupakan bagian dari generator yang berputar, terdiri atas bagian penyangga (disebut yoke) dan magnet permanen sebagai penghasil fluks medan magnetik. Dudukan rotor juga dibuat dari bahan resin epoksi dan berfungsi sebagai penyangga (*holder*) magnet permanen NdFeB sebanyak 12 buah (N_m), seperti terlihat pada Gambar 4. Ukuran diameter rotor adalah sebesar 290 mm dan tebal 5 mm, disesuaikan dengan dimensi dan jumlah magnet permanen yang akan dipasang. Sedangkan magnet permanen NdFeB yang digunakan berdimensi $40 \times 17 \times 5$ mm³.



Gambar 4. Desain rotor.

Tabel 1. Parameter fisis rotor.

Parameter fisis	Nilai
Remanensi magnetik, B_r	0,2 dan 1,3 Tesla
Radius dalam rotor, R_i	80 mm
Radius luar rotor, R_o	120 mm
Jarak antar magnet, T_F	30 mm
Kecepatan putar, ω	900 – 1500 rpm
Air gap (celah udara), L_G	7, 10, 14, 18, dan 20 mm

Tahapan proses rancang bangun dan uji performa generator listrik fluks aksial disesuaikan dengan parameter fisis yang digunakan. Dengan memasukkan parameter-parameter proses (N , f , φ_{\max} , N_s dan N_{PH}), kemudian dibuat simulasinya dengan menggunakan program visual basic, matlab atau *finite element analysis* (FEA) [15, 16]. Selanjutnya Ajay Kumar, et. al. [17] telah membuat model simulasi secara teori dan praktek, generator magnet permanen dapat dioperasikan pada faktor daya tinggi dan efisien. Selain itu kapabilitas *overloading* dan kapabilitas torsi maksimum pada kecepatan putar sangat rendah. Besarnya *output* tegangan (E_{rms}) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [5]:

$$E_{rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N \cdot f \cdot \varphi_{\max} \left(\frac{N_s}{N_{PH}} \right) \quad (1)$$

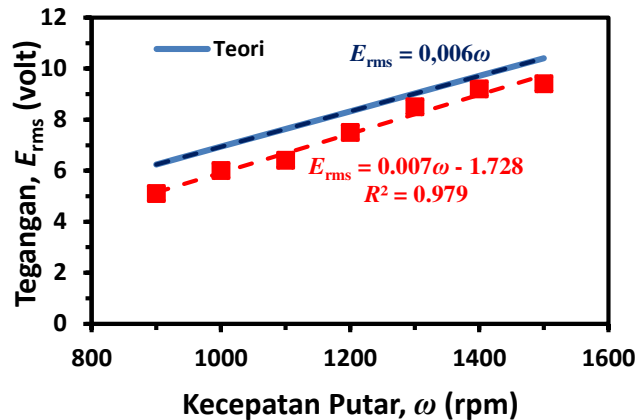
Untuk menentukan banyak lilitan (N) pada kumparan yang dibuat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$N = \frac{(P_o - P_{in}) \cdot T_k}{(2 \cdot D_k^2)} \tag{2}$$

dimana P_o adalah panjang kumparan luar, P_{in} adalah panjang kumparan dalam, T_k adalah tebal kumparan, dan D_k adalah diameter kawat [1].

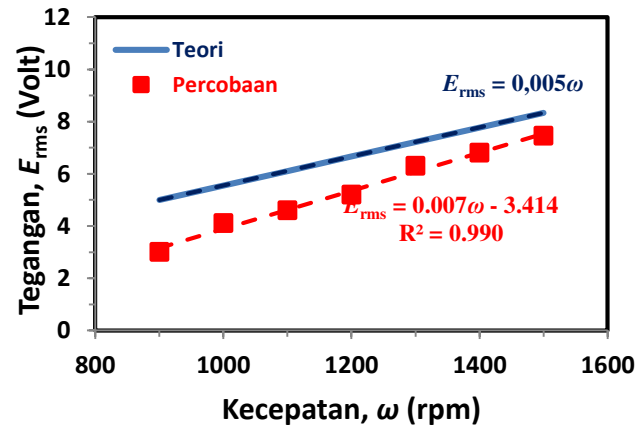
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hubungan antara *output* tegangan generator listrik fluks aksial terhadap kecepatan putar (ω) diperlihatkan pada Gambar 5. Magnet permanen yang digunakan dengan spesifikasi $B_r = 1,3$ T. Berdasarkan perhitungan teoritis diperoleh korelasi linier antara tegangan E_{rms} terhadap kecepatan putar, ω (rpm) adalah $E_{rms} = 0,006\omega$. Dari hasil eksperimen ditunjukkan juga bahwa terdapat korelasi linier antara tegangan induksi yang dihasilkan dengan variasi kecepatan putar generator. Secara umum hasil eksperimen memenuhi persamaan garis, $E_{rms} = 0,007\omega - 1,728$. Persamaan tersebut hanya berlaku untuk syarat batas kecepatan putar (ω): 900 - 1500 rpm.



Gambar 5. Grafik *output* tegangan (E_{rms}) generator fluks aksial terhadap kecepatan putar (ω), menggunakan remanensi magnet permanen NdFeB dengan $B_r = 1,3$ Tesla dengan air gap 7 mm.

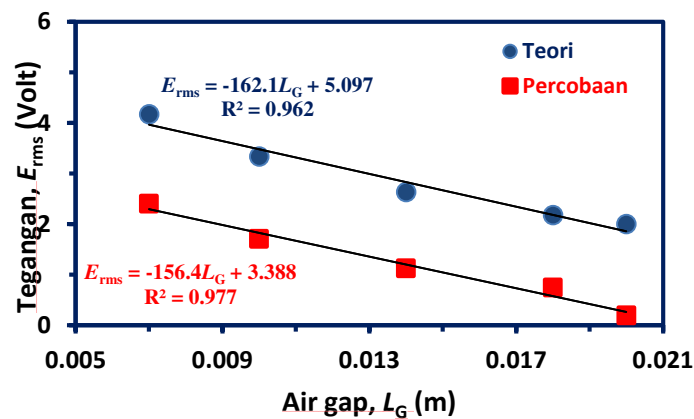
Sedangkan kurva *output* tegangan generator fluks aksial terhadap kecepatan putar (ω) yang dikonstruksi dengan menggunakan magnet NdFeB dengan remanensi, $B_r = 0,2$ Tesla ditunjukkan pada Gambar 6. Dibandingkan dengan Gambar 5, terlihat bahwa remanensi magnet permanen yang digunakan sebagai rotor berperan dalam meningkatkan *output* tegangan generator tersebut. Pada Gambar 6, korelasi antara *output* tegangan generator terhadap kecepatan putar masing-masing secara teoritis maupun eksperimen berturut-turut memenuhi persamaan garis $E_{rms} = 0,005\omega$ dan $E_{rms} = 0,007\omega - 3,414$. Persamaan ini hanya berlaku dengan syarat batas kecepatan putar (ω) sebesar: 900 – 1500 rpm.



Gambar 6. Hubungan antara *output* tegangan (E_{rms}) generator fluks aksial terhadap kecepatan putar(ω), menggunakan remanensi magnet permanen NdFeB dengan $B_r = 0,2$ Tesla dengan air gap 7 mm.

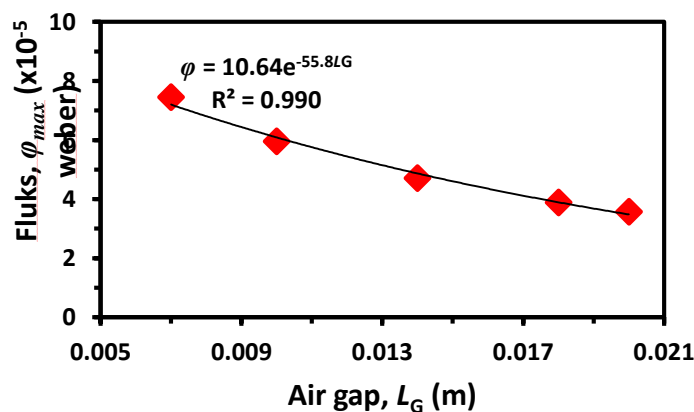
Sebagai pembanding [18] telah melakukan eksperimen pada generator magnet permanen fasa tunggal dengan kecepatan putar antara 100 – 500 rpm, diperoleh tegangan maksimal berkisar antara 8 – 37 volt. Kemudian setelah diberi beban pada putaran 300 – 500 rpm menghasilkan daya, P sebesar 47 – 95 watt dan torsi sekitar 32 mN.m. Kiartzis, et al. [19], melaporkan tentang pembuatan generator magnet permanen berbasis magnet ferrite dan neodymium alloy relatif menghasilkan daya cukup stabil sebesar 20 kW dengan menggunakan sistem tenaga angin. Sedangkan menurut Nisiri et.al. [16] pada tahun 2012 memberikan konsultasi penggunaan energi angin secara global dapat menghasilkan kapasitas daya listrik hingga mencapai 282.430 MW. Lain halnya dengan Sandra Erikson, et.al. [20] telah mengevaluasi dan optimasi disain generator magnet pemanen dipasang secara vertikal menggunakan tenaga angin dengan kecepatan 7m/s menghasilkan tegangan 334 volt.

Pada Gambar 7, diperlihatkan hubungan antara output tegangan (E_{rms}) generator terhadap air gap (L_G) menggunakan remanensi magnet permanen pada rotor, $B_r = 0,2$ Tesla. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa korelasi antara output tegangan dengan air gap (L_G) secara linier memenuhi persamaan $E_{rms} = -156,4L_G + 3,388$. Secara teoritis korelasi antara output tegangan terhadap air gap adalah $E_{rms} = -162,1L_G + 5,097$. Artinya nilai output tegangan, E_{rms} dari hasil eksperimen relatif lebih rendah dibanding dengan teoritis. Sejalan dengan hasil ini, Andrew S., et. al. [21] berhasil menggunakan sepotong soft magnet dengan output tegangan normalisasi sebesar 1 volt dengan air gap minimum sebesar 120 μ m atau ekuivalen dengan 0,12 mm. Lain halnya dengan micro-generatorplanar magnet pemanen yang dibuat oleh Hynek Raisigel et.al. [22]. Dimana output tegangan normalisasi terhadap kecepatan angular untuk air gap antara rotor – stator 50 μ m, hasil perhitungan dan eksperimen masing-masing adalah 16,7 dan 17,8 Vrms/rpm dengan estimasi error 10%.



Gambar 8. Hubungan antara output tegangan (E_{rms}) generator terhadap air gap (L_G) dan menggunakan remanensi magnet permanen pada rotor, $B_r = 0,2$ Tesla.

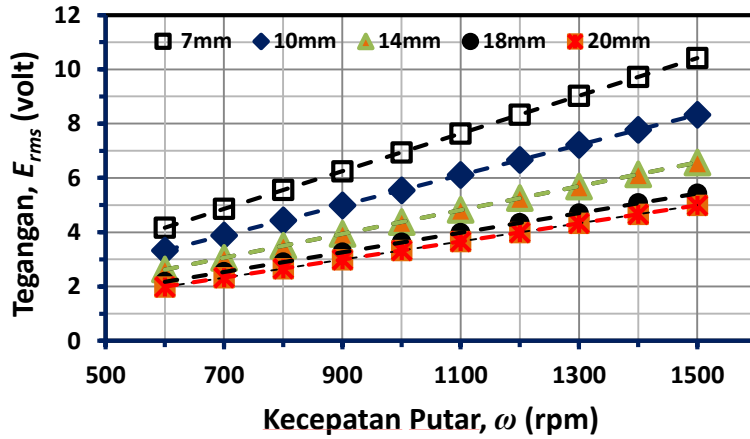
Pada Gambar 9, besarnya fluks magnetik maksimum, ϕ_{max} (weber) terhadap air gap, L_G (m) memenuhi persamaan: $\phi_{max} = 10,64e^{-55,8L_G}$. Artinya nilai ϕ_{max} cenderung turun secara eksponensial dengan bertambahnya air gap (L_G), atau berlaku juga untuk sebaliknya. Dapat dikatakan bahwa untuk menghasilkan fluks maksimum yang besar diperlukan air gap (L_G) sekecil mungkin. Dengan demikian, semakin kecilnya air gap (L_G) maka fluks magnetik menjadi lebih besar, tegangan induksi meningkat dan akibatnya daya listrik yang dihasilkan juga bertambah besar.



Gambar 9. Hubungan antara fluks magnetik (ϕ_{max}) terhadap air gap (L_G) dengan menggunakan remanensi magnet permanen pada rotor, $B_r = 0,2$ Tesla.

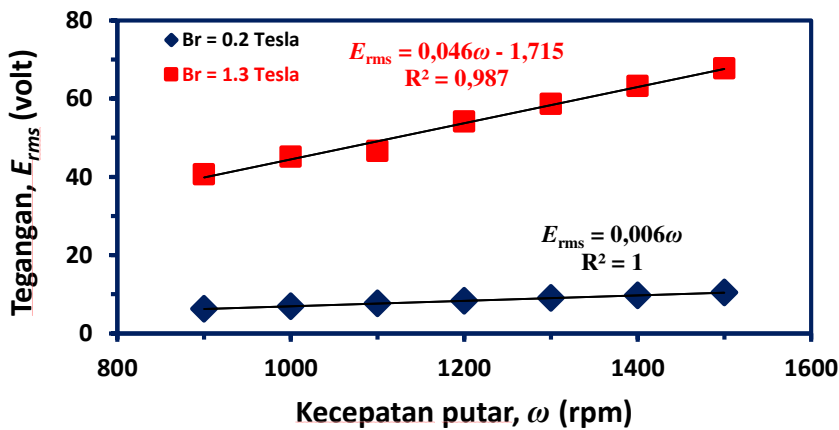
Pada Gambar 10, menunjukkan hasil simulasi antara *output* tegangan generator (E_{rms}) terhadap kecepatan putar (ω), dengan variasi *air gap* (L_G) = 7 – 20 mm dan $B_r = 0,2$ Tesla. Secara umum, hasil eksperimen menunjukkan bahwa *output* tegangan (E_{rms}) generator listrik yang dirancang dipengaruhi oleh kecepatan putar rotor (ω), *air gap* (L_G) dan nilai remanensi magnet permanen (B_r) pada rotor. Dengan kata lain, bahwa semakin besar kecepatan putar generator (ω) dan semakin kecil *air gap* (L_G) maka *output* tegangan (E_{rms}) yang dihasilkan juga akan bertambah besar.

Selain *air gap*/celah udara (L_G), perbandingan performa generator dengan remanensi magnet permanen NdFeB untuk rotor yang berbeda ditunjukkan seperti pada Gambar 11. Pada pengukuran tersebut lebar *air gap* (L_G) dibuat tetap sebesar 7 mm.



Gambar 10. Hubungan antara *output* tegangan (E_{rms}) generator terhadap kecepatan putar (ω), dan menggunakan remanensi magnet permanen pada rotor, $B_r = 0,2$ Tesla.

Dari gambar tersebut tampak bahwa generator dengan remanensi magnet permanen (B_r) pada rotor 1,3 T menghasilkan gradien *output* tegangan yang lebih besar. Efek kecepatan putar rotor (ω) menjadi signifikan dan memenuhi persamaan $E_{rms} = 0,046\omega - 1,715$. Sedangkan untuk remanensi magnet permanen (B_r) pada rotor 0,2 T dihasilkan *output* tegangan dengan korelasi linier memenuhi persamaan $E_{rms} = 0,006\omega$.



Gambar 11. Hubungan antara *output* tegangan (E_{rms}) generator terhadap kecepatan putar (ω), pada *air gap* (L_G) = 7 mm, dan remanensi, $B_r = 0,2$ dan 1,3 Tesla.

KESIMPULAN

Rancang bangun generator listrik fluks aksial berbasis magnet permanen NdFeB telah berhasil dibuat. Efek variasi *air gap* (L_G) terhadap uji performa pada *output* tegangan generator fluks aksial adalah berbanding terbalik secara linier. Besarnya remanensi (B_r) magnet permanen NdFeB yang digunakan pada rotor generator listrik fluks aksial berbanding lurus terhadap *output* tegangan (E_{rms}). Peningkatan *air gap* (L_G) berkorelasi secara eksponensial terhadap fluks magnetik yang dihasilkan pada kumparan stator generator listrik fluks aksial. Pada *air gap* (L_G) 7 mm (terkecil), kecepatan putar (ω) maksimum 1500 rpm, dan remanensi magnet permanen NdFeB sebesar $B_r = 0,2$ dan 1,3 Tesla, berturut-turut dihasilkan *output* tegangan (E_{rms}) = 10,4 dan 67,7 volt.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Fisika LIPI yang telah memberikan fasilitas penelitian hingga selesainya tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Muljadi, P. Sardjono, dan Suprapedi, "Preparation and characterization of 5 wt. persen epoxy resin bonded magnet NdFeB for micro generator application," *Energy Procedia*, vol. 68, hal.282-287, 2015.
- [2]. Irasari, Pudji, dan N. Idayanti, "Aplikasi Magnet Permanen BaFe₁₂O₁₉ dan NdFeB Pada Generator Magnet Permanen Kecepatan Rendah Skala Kecil," *Jurnal Sains Materi Indonesia*, vol.11, no. 1, hal. 38-41, 2009.
- [3]. A. Parviainen, "Design of Axial Flux Permanent Magnet Low Speed Machines and Performance Comparison between Radial-Flux and Axial-Flux Machines," Thesis for the degree of Doctor of Science (Technology), University of Technology, Lappeenranta, Finland, hal. 1-153, 2005.
- [4]. N. A. Spaldin, *Magnetic Materials Fundamentals and Applications* Second edition, New York:Cambridge University Press, 2011.
- [5]. Y. Yanti, L. F. Nurdiyansah, A. P. Tetuko, M. R.T. Siregar, dan P.Sebayang, "Rancang Bangun Generator Mini Tipe Aksial Dengan Menggunakan Magnet Permanen NdFeB dan Kajiannya," *Seminar dan Focus Group Discussion (FGD) Material Maju: Magnet dan Aplikasinya*, 2013.
- [6]. Davila-Vilchis J.M. dan R.S. Mishr, "Performance of a hydrokinetic energy system using an axial-flux permanent magnet generator," *Energy*, vol.65,hal. 631-638, 2014.
- [7]. A. Parviainen, M. Niemela, J. Pyrhonen, J. Mantere, "Performance comparison between low-speed axial-flux and radial-flux permanent magnet machines including mechanical constraints," *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, hal. 1695-1702, 2005.
- [8]. Akatsu K. Dan Wakui S., "A comparison between axial and radial flux PM motor by optimum design method from the required output NT characteristics," *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 25, hal. 496-509, 2006.
- [9]. M. Pinilla dan S. Martinez, "Optimal design of permanent-magnet direct drive generator for wind energy considering the cost uncertainty in raw materials," *Renewable Energy*, vol. 41, hal. 267-276, 2012.
- [10]. Gargov N.P., A.F. Zobaa, dan I. Pisica, "Separated magnet yoke for permanent magnet linear generator for marine wave energy converters," *Electric Power Systems Research*, vol. 109, hal. 63-70, 2014.
- [11]. Ahmed D. Dan A. Ahmad, "An optimal design of coreless direct-drive axial flux permanent magnet generator for wind turbine," *Journal of Physics: Conference Series*, 439, 012039, 2013.
- [12]. G. F. Price, T. D. Batzel, M. Comanescu, dan B. A. Muller, "Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator," *Proc. The 2008 IAJC-IJME International Conference*, 2008.
- [13]. Parlikar V.V., P.M. Kurulkar, K.P. Rathod, dan P. Kumari, "A Axial-Flux Permanent Magnet (AFPM) Generator for Defence Applications - Paradigm Shift in Electrical Machine," *ACEEE Int. J. on Electrical and Power Engineering*, vol. 03, no. 01, hal. 33-37, 2012.
- [14]. L. Petru dan G. Mazen, "Experimental Stand for the Study of a Three-Phase Synchronous Generator with Permanent Super Magnets," *Procedia Engineering*, vol. 69, hal. 231-236, 2014.
- [15]. Z. Zhang, S. M. Mueen, A. Al-Durra, R. Nilssen, dan A. Nysveen, "Multiphysics 3D modelling of ironless permanent magnet generators," *Energy Procedia*, vol. 53, hal. 34-43, 2014.
- [16]. M. Nasiri, J. Milimonfared, dan S.H. Fathi, "Modeling, analysis and comparison of TSR and OTC methods for MPPT and power smoothing in permanent magnet synchronous generator-based wind turbines," *Energy Conversion and Management*, vol. 86, hal. 892-900, 2014.
- [17]. A. Kumar, S. Marwaha, A. Singh, A. Marwaha, "Simulation Modelling Practice and Theory," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, hal. 1548-1554, 2009.
- [18]. E. Kurt, H. Gör, M. Demirtas, "Theoretical and experimental analyses of a single phase permanent magnet generator (PMG) with multiple cores having axial and radial directed fluxes," *Energy Conversion and Management*, vol. 77, hal. 163-172, 2014.
- [19]. S. Kiartzis dan A. Kladas, "Deterministic and artificial intelligence approaches in optimizing permanent magnet generators for wind power applications," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 108, hal. 232-236, 2001.
- [20]. S. Eriksson, H. Bernhoff, "Loss evaluation and design optimisation for direct driven permanent magnet synchronous generators for wind power," *Applied Energy*, vol. 88, hal. 265-271, 2011.
- [21]. A. S. Holmes, G. Hong, dan K. R. Pullen, "Axial-Flux Permanent Magnet Machines for Micropower Generation," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 14, no. 1, hal. 54-62, 2005.
- [22]. H. Raisigel, O. Cugat, dan J. Delamare, "Permanent magnet planar micro-generators," *Sensors and Actuators A*, vol. 130-131, hal 438-444, 2006.