

RANCANG BANGUN GENERATOR AKSIAL DENGAN MENGGUNAKAN MAGNET PERMANEN NdFeB PERSEGI PANJANG

Sudirman Syam¹, Sri Kurniati², Fitrah Andika K.Y³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana

Jln. Adisucipto - Penfui, Telp. 0380-881597, Fax. 0380-881557

Email: sudirman_s@staf.undana.ac.id

Email: sri_kurniati@staf.undana.ac.id

Email: fitrahandikak.y@gmail.com

Info Artikel

Histori Artikel:

Diterima: 07 Sep 2021

Direvisi: 07 Okt 2021

Disetujui: 24 Okt 2021

ABSTRACT

Axial generators or Permanent Magnet Axial Flux (AFPM) are low-speed generators commonly used in Wind Power Plants (WPP). This generator has the rotor and stator position perpendicular to its axis. The rotor has permanent magnets, and the stator has copper wire coils. The purpose of this study was to analyse the output voltage characteristics of an axial generator using a permanent magnet of the Neodymium Ferrite Boron (NdFeB) type was arranged in layers. The method used is to design, manufacture, and measure the output of an axial generator with no load and load. Based on the research results, a no-load generator with a four-layer magnetic rotor produces the highest output voltage of 3.06 – 10.77 Volts at a rotor rotation speed of 360 rpm – 1328 rpm. Meanwhile, under conditions of 5 W DC lamp, the rotational speed of the rotor decreases between 355 – 1335 rpm, the output voltage is between 2.85 – 5.86 Volts.

Keywords: AFPM generator, Permanent Magnets, Magnet Flux.

ABSTRAK

Generator aksial atau Axial Flux Magnet Permanen (AFPM) termasuk generator kecepatan putaran rendah yang biasa digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Generator ini memiliki posisi rotor dan stator tegak lurus terhadap porosnya. Pada rotor terdapat magnet permanen dan bagian stator terdapat kumparan kawat tembaga. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis karakteristik tegangan keluaran generator aksial dengan menggunakan magnet permanen jenis Neodymium Ferit Boron (NdFeB) yang disusun secara berlapis. Metode yang digunakan adalah merancang, membuat, dan mengukur keluaran generator aksial tanpa beban dan berbeban. Berdasarkan hasil penelitian, generator tanpa beban dengan rotor empat lapisan magnet menghasilkan tegangan keluaran tertinggi sebesar 3,06 Volt – 10,77 Volt pada kecepatan putaran rotor 360 rpm – 1328 rpm. Sementara pada kondisi berbeban lampu DC 5 watt, kecepatan putaran rotor menurun antara 355 rpm – 1335 rpm tegangan output antara 2,85 Volt – 5,86 Volt.

Kata kunci: Generator AFPM, Magnet Permanen, Fluks Magnet.

Penulis Korespondensi:

Sudirman Syam

Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknik,

Universitas Nusa Cendana,

Jl. Adisucipto Penfui - Kupang.

Email: sudirman_s@staf.undana.ac.id

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (angin) (PLTB) memanfaatkan energi aliran air dan energi

angin sebagai sumber energi penggerak generator pembangkitnya. PLTB umumnya menggunakan generator kecepatan putaran rendah [1]. Digunakannya generator putaran rendah karena, meski energi angin selalu ada, namun kecepatannya tidak selalu tinggi setiap saat.

Kecepatan angin yang ada di Indonesia pada umumnya termasuk kedalam jenis angin dengan kecepatan rendah berkisar antara 3,5 sampai dengan 7 meter/detik. Oleh karena itu generator aksial magnet permanen sangat cocok untuk digunakan dalam aplikasi pembangkit energi listrik di Indonesia, karena generator ini mampu bekerja dengan kecepatan putaran rendah [2, 3]. Generator AFPM dengan menggunakan magnet permanen memiliki posisi rotor dan stator yang tegak lurus terhadap porosnya. Terdapat dua komponen utama pada generator aksial, yaitu rotor dan stator. Rotor merupakan bagian yang dapat bergerak dengan menggunakan magnet permanent, sedangkan stator yang berisi belitan kawat tembaga adalah bagian generator yang diam. Energi listrik generator diperoleh dari hasil fluks magnetik yang dihasilkan oleh putaran magnet pada rotor sehingga terjadi perubahan medan magnet pada kumparan dan menimbulkan induksi Gaya Gerak Listrik (GGL).

Saat ini, perancangan generator AFPM magnet permanen sudah banyak dikembangkan. Seperti perancangan generator turbin angin dalam skala kecil maupun besar. Beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, menggunakan variasi bentuk konstruksi yang berbeda-beda. Seperti memvariasikan jumlah kutub, kecepatan putaran serta bentuk dan ukuran magnet yang digunakan. Penelitian tentang generator sinkron magnet permanen yang merancang generator dengan 8 (delapan) kutub magnet, menggunakan magnet *NdFeB tipe Neoflux-30*. Generator dioperasikan pada kecepatan 750 rpm, sehingga dapat menghasilkan tegangan sebesar 7,91 Volt dalam keadaan tanpa beban. Sementara pada kondisi berbeban, generator dapat menghasilkan tegangan sebesar 6,11 Volt dengan efisiensi dari rancangan generator tersebut mencapai 32,84% [4].

Selanjutnya, kebanyakan generator yang tersedia di pasaran berupa generator konvensional kecepatan putaran tinggi, berkisar antara 1500 rpm hingga 3000 rpm [5]. Generator magnet permanen memiliki keunggulan yang memiliki konstruksi yang sederhana. Penggunaan generator AFPM ini lebih efisien dibanding mesin yang menggunakan lilitan pada rotornya, karena tidak memerlukan energi listrik untuk menghasilkan medan magnet, melainkan dihasilkan dari magnet itu sendiri. Selain lebih sederhana, generator AFPM juga lebih mudah dibuat dengan kapasitas daya dan tegangan output dengan mengubah

parameter seperti besarnya medan magnet, jumlah belitan, diameter magnet dan kawat belitan yang digunakan [6, 7]. Disisi lain menurut [8], magnet berbahan *NdFeB* termasuk jenis magnet permanen terkuat saat ini dan memiliki nilai kemagnetan (remanen) yang cukup besar sehingga fluks magnetik yang dihasilkan cukup besar pula.

Umumnya desain generator aksial yang telah dibuat oleh para peneliti menggunakan magnet *NdFeB* berbentuk sektoral, yaitu magnet batangan dengan bentuk khusus yang disesuaikan bentuk generator [9]. Penggunaan magnet jenis ini tentunya membutuhkan biaya yang mahal, karena pembuatan magnetnya harus didesain khusus terlebih dahulu di pabrik. Saat ini sudah banyak dijual jenis magnet *NdFeB* persegi panjang yang lebih murah di pasaran. Dibanding dengan magnet berbentuk sektoral, magnet persegi panjang memiliki beberapa keuntungan diantaranya, harga yang murah dan berbagai dimensi ukurannya banyak tersedia di pasaran. Dari sudut pandang bentuknya, magnet persegi panjang memiliki spesifikasi produk standar, biaya produksi murah dan magnetisasinya mudah [10].

Dalam penelitian ini digunakan magnet permanen *NdFeB* berbentuk persegi panjang pada rotornya dengan 8 (delapan) kutub. Generator akan dirancang dengan diberi variasi jumlah lapisan magnet permanen yang digunakan, mulai dari 1 (satu) lapis sampai dengan 4 (empat) lapis magnet. Divariasikannya lapisan magnet bertujuan untuk mengetahui daya keluaran dari generator jika magnet rotor dibuat secara berlapis. Dalam teori rangkaian magnet yang disusun secara berlapis sama dengan membuat susunan magnet secara paralel. Keuntungannya dapat menurunkan nilai reluktansi menjadi lebih kecil dan menghasilkan fluks magnet yang lebih besar [11]. Selain itu, konsep pembuatan generator aksial ini menggunakan piringan yang terbuat dari akrilik. Tujuannya adalah untuk menghilangkan pengaruh inti besi yang umumnya menggunakan material dari besi atau baja sehingga dapat menghilangkan gaya tarik menarik antara rotor dan stator. Tidak adanya gaya-gaya ini mengurangi beban struktural pada generator, berdampak pada peningkatan efisiensi. Artinya, dengan mengurangi beban struktural yang lebih rendah dan kurangnya inti besi, maka konfigurasi belitan tanpa inti besi dapat

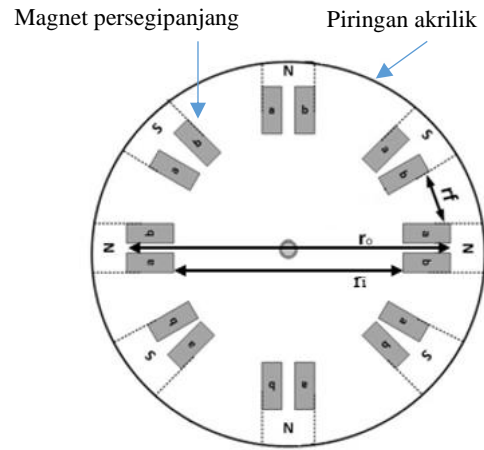
menghilangkan unsur bahan feromagnetik lapisan baja pada stator. Dengan demikian tidak menimbulkan rugi-rugi arus eddy atau histeresis yang biasa terjadi pada inti besi. Dengan membuat generator aksial tanpa inti besi, maka generator AFPM tanpa inti stator dapat beroperasi pada efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan mesin konvensional [12-14].

2. METODE PENELITIAN

Metode eksperimen dengan merancang dan membuat generator AFPM digunakan dalam penelitian ini. Kemudian hasil perancangan berupa prototype diuji dan dianalisa untuk mengetahui karakteristik keluaran tegangan generator tersebut. Sebelum generator dibuat, dilakukan perhitungan parameter generator, seperti jumlah kutub, ukuran rotor dan ukuran stator. Tabel 1 memperlihatkan spesifikasi dari generator aksial yang telah dibuat dalam penelitian ini.

2.1 Desain Rotor Generator

Rotor merupakan bagian generator yang berputar, terbuat dari papan akrilik berbentuk lingkaran seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 1. Rotor didesain secara berlapis, masing-masing dipasangkan magnet 1 lapis, 2 lapis, 3 lapis dan 4 lapis.



Gambar 1. Desain Rotor

2.2 Desain Stator Generator

Stator adalah bagian yang diam, stator dibuat menggunakan bahan akrilik. Pada stator dipasang lilitan kumparan yang diperoleh dengan berdasarkan perhitungan sebagai berikut:

- Fluks magnet rata-rata

$$B_{max} = 0,177 \frac{0,02}{0,02+0,005} = 0,1416 \text{ T}$$

- Luasan Magnet

$$A_m = \frac{3,14 (0,165^2 - 0,145^2) - 0,04 (0,165 - 0,145)8}{8} = 0,00163 \text{ m}^2$$

- Fluks magnet maksimal

$$\phi_{max} = 0,00163 \text{ m}^2 \times 0,1416 \text{ T} = 0,0002312 \text{ wb}$$

- Jumlah lilitan

- Menentukan banyak lilitan (E = 24 V):

$$N = \frac{24}{4,44 \times 50 \times 0,8 \times 0,0002312} = 584,495 \text{ belitan.}$$

Jumlah lilitan tiap kumparan:

$$= \frac{584,495}{8} = 73,061 \approx 73 \text{ lilitan perkumparan.}$$

- Menentukan banyak lilitan (E = 48 V):

$$N = \frac{48}{4,44 \times 50 \times 0,8 \times 0,0002312} = 1168,98 \text{ belitan}$$

Jumlah lilitan tiap kumparan:

$$= \frac{1168,98}{8} = 146,12 \approx 145 \text{ lilitan perkumparan.}$$

- Menentukan banyak lilitan (E = 96 V):

$$N = \frac{96}{4,44 \times 50 \times 0,8 \times 0,0002312} = 2337,97 \text{ belitan}$$

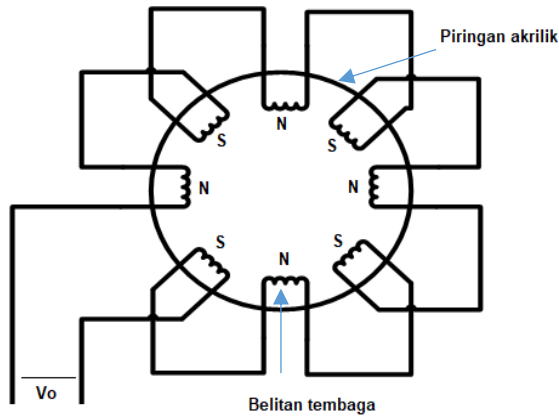
Jumlah lilitan tiap kumparan:

$$= \frac{2337,97}{8} = 292,24 \approx 292 \text{ lilitan perkumparan.}$$

Kumparan stator dibuat dalam tiga variasi, dengan komposisi 73 lilitan, 145 lilitan dan 292 lilitan.

Tabel 1. Spesifikasi Generator

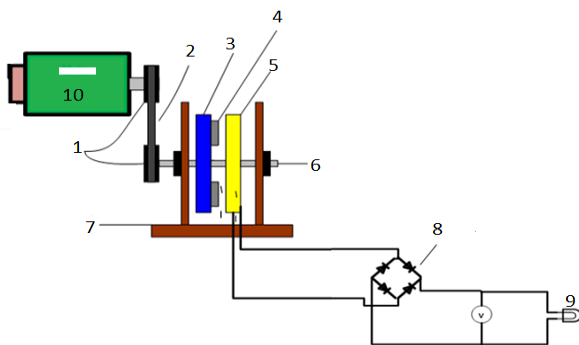
Parameter	Nilai	Simbol
Diameter	20 cm	D
	1 mm	$\delta 1$
	2 mm	$\delta 2$
	3 mm	$\delta 3$
Jarak Celah Udara	4 mm	$\delta 4$
Radius Luar Magnet	16,5 cm	R_o
Radius Dalam Magnet	14,5 cm	R_i
Jarak Antar Kutub	4 cm	R_f
Panjang magnet	2 cm	P
Lebar magnet	1 cm	L
Ketebalan magnet	1 mm	T
Kerapatan fluks	0.177 T	Br
Jumlah Kutub Magnet	8 kutub	Nm
Jumlah kumparan	8 kutub	Ns
	73 lilitan	N1
	145 lilitan	N2
Jumlah lilitan/kumparan	292 lilitan	N3
Jumlah Fasa	1 fasa	Nph



Gambar 2. Desain Stator

2.3 Desain Eksperimen

Gambar 3 memperlihatkan skema rangkaian pengujian generator aksial dengan menggunakan rangkaian penggerak motor DC tipe shunt.



Gambar 3. Skema Pengujian

Keterangan:

1. Pulley
2. Sabuk transmisi
3. Rotor
4. Magnet permanen
5. Stator
6. As (Poros)
7. Rangka
8. Rangkaian penyearah
9. Beban (Lampu DC)
10. Motor penggerak



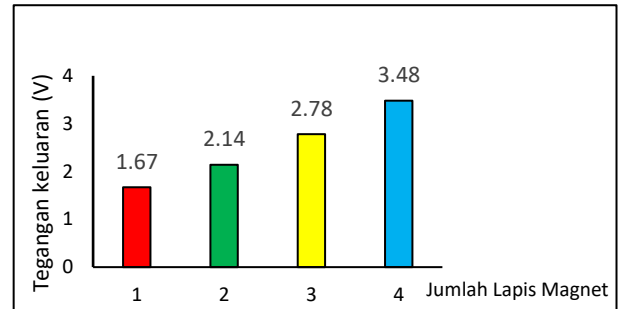
Gambar 4. Generator Aksial Magnet Permanen

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian

3.1.1 Pengujian Generator berdasarkan Variasi Lapisan Magnet pada Rotor

Gambar 5 memperlihatkan pengujian generator dengan variasi lapisan magnet pada rotor.



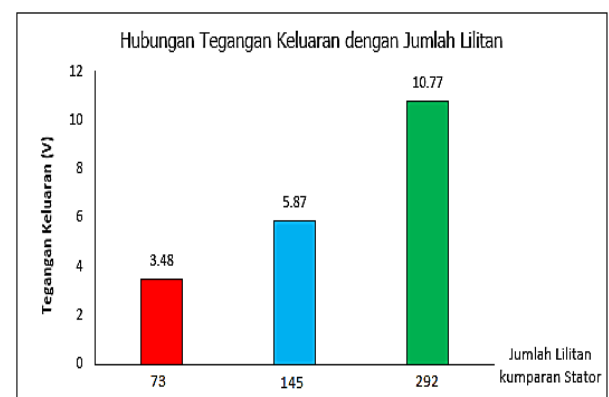
Gambar 5. Hasil Pengujian Generator berdasarkan Variasi Jumlah Lapisan Magnet Pada Rotor

Berdasarkan Gambar 5 terlihat bahwa semakin banyak jumlah lapisan magnet pada rotor semakin besar tegangan keluaran generator. Hasil pengujiannya adalah:

- Tegangan keluaran = 3,48 V (4 lapis magnet)
- Tegangan keluaran = 2,78 V (3 lapis magnet)
- Tegangan keluaran = 2,14 V (2 lapis magnet)
- Tegangan keluaran = 1,67 V (1 lapis magnet)

3.1.2 Pengujian Generator berdasarkan Variasi Jumlah Lilitan Kumputan pada Stator

Pengujian dilakukan dengan memberi variasi pada jumlah lilitan kumputan stator, diantaranya adalah 73 lilitan kumputan, 145 lilitan kumputan dan 292 lilitan kumputan. Gambar 6 memperlihatkan hasil pengujian tegangan keluaran generator dengan jumlah belitan stator yang bervariasi.



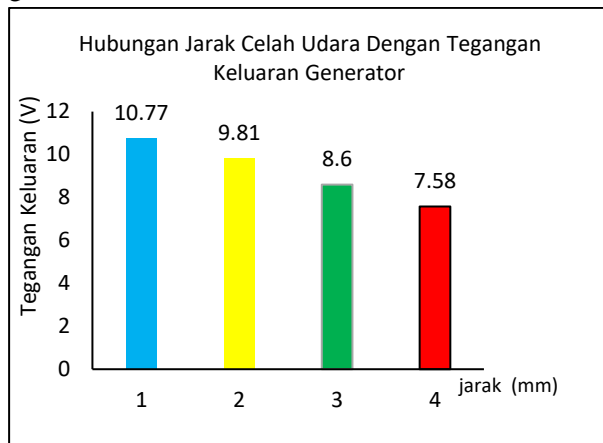
Gambar 6. Perbandingan Tegangan Keluaran Generator dengan Jumlah Lilitan pada Kumputan Stator

Berdasarkan Gambar 6 menunjukkan bahwa hasil pengujian generator tanpa beban terlihat bahwa keluaran generator akan meningkat dengan adanya penambahan jumlah belitan kumparan pada stator. Besar tegangan yang dihasilkan adalah:

- Tegangan keluaran = 3,48 V (73 lilitan)
- Tegangan keluaran = 5,87 V (154 lilitan)
- Tegangan keluaran = 10,77 V (292 lilitan)

3.1.3 Pengujian Generator berdasarkan Jarak Celah Udara antara Rotor dengan Stator

Pengujian generator berdasarkan jarak celah udara antara rotor dengan stator ini dilakukan sebanyak empat kali. Gambar 7 memperlihatkan hubungan antara jarak celah udara dengan tegangan keluaran generator.



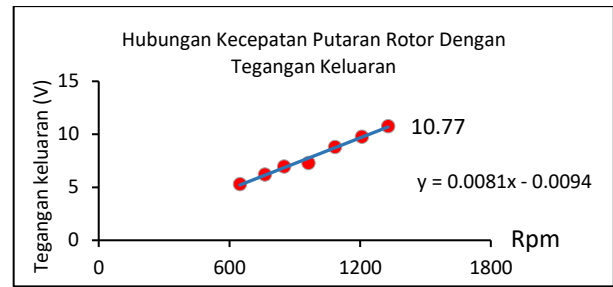
Gambar 7. Pengaruh Jarak Celah Udara dengan Tegangan Keluaran Generator

Berdasarkan Gambar 7 terlihat hubungan antara jarak celah udara dengan tegangan keluaran generator adalah berbanding lurus. Hasil pengukuran tegangan keluaran diperoleh:

- Tegangan keluaran = 10,77 V (jarak 1 mm)
- Tegangan keluaran = 9,81 V (jarak 2 mm)
- Tegangan keluaran = 8,6 V (jarak 3 mm)
- Tegangan keluaran = 7,58 V (4 mm)

3.1.4 Hasil Pengujian Generator berdasarkan Kecepatan Putaran Generator

Hubungan antara kecepatan putaran rotor pada generator dengan tegangan keluarannya ditunjukkan seperti dalam Gambar 8.



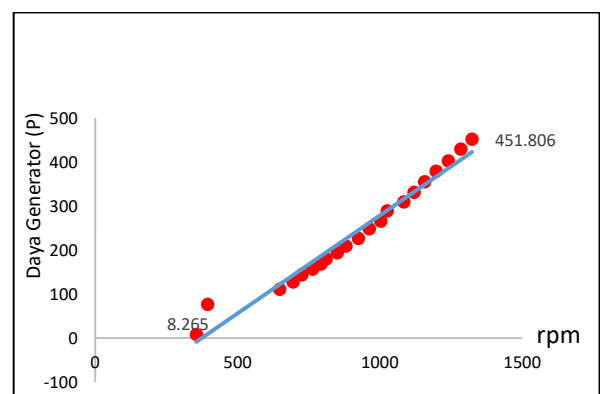
Gambar 8. Hubungan Kecepatan Putaran Generator dengan Tegangan Keluaran

Berdasarkan Gambar 8 diperoleh hasil pengukuran tegangan keluaran generator sebagai berikut:

- Tegangan keluaran = 5,3 V (648 Rpm)
- Tegangan keluaran = 6,19 (763 Rpm)
- Tegangan keluaran = 6,96 V (850 Rpm)
- Tegangan keluaran = 7,28 V (962 Rpm)
- Tegangan keluaran = 8,81 V (1084 Rpm)
- Tegangan keluaran = 9,77 V (1207 Rpm)
- Tegangan keluaran = 10,77 V (1328 Rpm)

3.1.5 Pengukuran Daya Generator

Pengukuran daya generator dilakukan pada pengujian generator dengan beban sebuah lampu DC 5 Watt. Gambar 9 menunjukkan hubungan antara kecepatan putaran dengan daya keluaran yang dibangkitkan oleh generator. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa besarnya daya keluaran yang dihasilkan oleh generator dan bergantung pada kecepatan putaran generator. Artinya kecepatan generator berbanding lurus dengan tegangan dan daya output generator.



Gambar 9 Hubungan Kecepatan Putaran dengan Daya Generator

3.2 Pembahasan Hasil Penelitian

3.2.1 Pengaruh Variasi Lapisan Magnet Pada Rotor

Sesuai hasil penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 6, rotor dengan 4 lapisan magnet memiliki nilai tegangan keluaran terukur tertinggi sebesar 10,77 V. Ini menunjukkan hubungan tegangan keluaran berbanding lurus terhadap jumlah lapisan magnet pada rotor. Saat rotor berputar, maka medan magnet pada rotor akan menginduksi kumparan pada stator dan pada ujung-ujung kawat kumparan akan timbul tegangan listrik. Semakin banyak jumlah lapisan, semakin kecil nilai reluktansi sehingga fluks magnet semakin besar dan berpengaruh terhadap tegangan output yang dihasilkan. Hal ini sudah dikemukakan oleh [11], bahwa dengan mengatur lapisan magnet secara berlapis sama dengan membuat rangkaian magnet menjadi rangkaian paralel atau sejajar. Mengacu pada teori magnetisme yang menyatakan, jika beberapa magnet disusun secara paralel nilai reluktansinya (hambatan terhadap fluks magnet) akan semakin kecil, sehingga nilai fluks magnet yang menginduksi kumparan kawat stator akan semakin besar. Sebagai tambahan, menurut [15] untuk melakukan analisis sirkuit magnetik, pendekatan rangkaian listrik dapat digunakan. Resistansi (R) dan reluktansi (\mathcal{R}) berbanding terbalik sebanding dengan luas penampang. Artinya bahwa peningkatan luas permukaan akan menghasilkan pengurangan nilai reluktansi magnet dan akan meningkatkan hasil yang diinginkan dalam bentuk arus dan fluks.

3.2.2 Pengaruh Variasi Jumlah Lilitan pada Kumparan Stator

Hasil pengujian generator dengan memberi variasi pada jumlah lilitan kumparan stator ditunjukkan dalam Gambar 7. Terlihat bahwa hubungan antara jumlah lilitan terhadap nilai tegangan keluaran adalah berbanding lurus. Pada saat rotor berputar, medan magnet dari rotor yang berubah-ubah akan menginduksi kumparan stator, sehingga muncul Gaya Gerak Listrik (GGL) induksi pada kumparan stator. Besarnya GGL yang diinduksi sebanding dengan laju perubahan jumlah garis gaya yang melewati kumparan. Semakin banyak jumlah lilitan pada kumparan atau semakin panjang kawat yang digunakan pada lilitan kumparan, maka garis gaya yang melewati kumparan akan semakin besar pula. Artinya semakin banyak lilitan pada kumparan, semakin banyak atau besar nilai tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator.

3.2.3 Pengaruh Celah Udara Terhadap Tegangan Keluaran

Setelah dilakukan pengujian, dapat diketahui hubungan antara jarak celah udara dengan tegangan keluaran generator adalah berbanding lurus. Semakin kecil celah udara atau jarak antara kumparan (stator) dengan magnet (rotor), maka fluks magnet yang menginduksi kumparan stator akan semakin besar. Pengaruhnya, tegangan keluaran yang dihasilkan generator akan semakin besar pula. Rotor dengan jarak celah udara 1 mm menghasilkan tegangan yang paling besar, yaitu 10,77 V. Menurut [23], semakin kecil celah udara antara rotor dan stator semakin besar flux magnet yang terjadi. Sebaliknya, semakin besar jarak celah udara akan menurunkan fluks magnet yang berpengaruh pada tegangan output (V_o) generator.

3.2.4 Pengaruh Kecepatan Putaran Rotor Terhadap Tegangan Keluaran

Dari hasil pengukuran yang ditunjukkan pada Gambar 8, diketahui bahwa hubungan antara kecepatan putaran generator dengan tegangan keluarannya adalah linier. Saat rotor berputar, magnet pada rotor akan menginduksi kumparan stator karena medan magnet dari rotor yang berubah-ubah, maka akan timbul tegangan induksi pada kumparan stator. Semakin cepat putaran rotor pada generator, maka semakin besar pula tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator. Hal ini terjadi karena jika rotor berputar lebih cepat, maka semakin cepat pula magnet menginduksi kumparan stator, sehingga GGL yang ditimbulkan akan semakin besar dan menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar pula.

3.2.5 Pengaruh Beban pada Generator

Pada hasil pengujian tanpa beban, tegangan keluaran tertinggi yang dibangkitkan oleh generator sebesar 10,77 Volt. Sebaliknya, pada pengujian berbeban, tegangan keluaran turun menjadi 5,86 Volt. Arus keluaran yang terukur mencapai 77,1 mA dengan daya sebesar 451,806 mW. Penurunan tegangan disebabkan adanya penurunan kecepatan pada saat generator dibebani. Dalam penelitian ini, tidak dilakukan pengaturan kecepatan, tetapi hanya menganalisis pengaruh beban terhadap putaran penggerak generator. Semakin besar beban yang diberikan pada generator menyebabkan penurunan putaran sehingga tegangan output generator ikut mengalami penurunan. Dalam hal ini, sesuai dengan karakteristik dari generator magnet permanen. Oleh karena itu, dalam melakukan pembebanan sebuah generator harus dilakukan

pengaturan kecepatan penggerak agar diperoleh kecepatan yang konstan agar tidak menurunkan tegangan output.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dari penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan susunan magnet berlapis dapat meningkatkan nilai fluks magnet sehingga berpengaruh terhadap keluaran tegangan generator. Adanya penambahan magnet dari 1 lapis (117, mT) dengan tegangan keluaran 1,67 Volt menjadi 4 lapis magnet (202,54 mT) diperoleh tegangan keluaran 3,48 Volt.
2. Hasil pengujian yang telah dilakukan, diperoleh pengaruh jumlah lilitan pada kumparan stator terhadap nilai tegangan keluaran generator. Semakin banyak jumlah lilitan stator semakin tinggi keluaran tegangan yang dihasilkan oleh generator AFPM.
3. Semakin jauh jarak celah udara antara rotor dan stator semakin kecil tegangan dari generator. Artinya, pengaruh jarak celah udara antara stator dengan rotor terhadap tegangan keluaran generator berpengaruh secara signifikan. Jarak celah udara 1 mm adalah merupakan titik optimum untuk mendapatkan tegangan keluaran generator maksimal sebesar 10,77 Volt.
4. Hubungan antara kecepatan putaran generator dengan tegangan keluarannya adalah linier. Semakin cepat putaran rotor pada generator, maka semakin besar pula tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator. Pada pengujian dengan kecepatan terendah 648 rpm, diperoleh tegangan keluaran generator sebesar 5,3 Volt, sedangkan untuk kecepatan tertinggi 1328 rpm diperoleh tegangan generator sebesar 10,77 Volt.
5. Daya keluaran generator juga dipengaruhi oleh komposisi magnet yang disusun secara berlapis. Adanya peningkatan tegangan keluaran generator juga mempengaruhi daya keluaran generator.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Nurtjahjomulyo, "Rancang Bangun Generator Turbin Angin Tipe Aksial Kapasitas 200 W," *Lapan*, pp. 96–101.
- [2] D. Susanto, M. Mulyadi, N. 'Atifah, and P. Sebayang, "Rancang Bangun dan Analisa Kinerja Generator Fluks Aksial Magnet Permanen Putaran Rendah untuk Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Savonius," *Pist. J. Tech. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 12–17, 2019, doi: 10.32493/pjte.v2i1.3222.
- [3] B. M.NILENDRA, "Analisa Perbandingan Desain dan Simulasi Generator Fluks Aksial Magnet Permanen 3 Fasa untuk Aplikasi Generator Angin Kecepatan Rendah," *Skripsi , Progr. Stud. Tek. Elektro,Fakultas Tek. Univ. Indones.*, 2012.
- [4] W. D. P. Herudin, "Rancang Bangun Generator Sinkron 1 Fasa Magnet Permanen Kecepatan Rendah 750 RPM," *J. Ilm. SETRUM*, vol. 5, no. 1, pp. 11–15, 2016.
- [5] A. A. Hasyim Asy'ari, Jatmiko, "Desain Generator Magnet Permanen Kecepatan Rendah Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin Atau Bayu (PLTB)," *Tek. Elektro*, vol. 12, no. 01, pp. 59–67, 2012.
- [6] F. D. Wijaya, Y. S. W, and R. A. Nugroho, "Perancangan Generator Magnet Permanen Fluks Aksial Putaran Rendah," *Annu. Eng. Semin. 2014*, pp. B21–B26, 2014.
- [7] A. Fajar, "Rancang Bangun Generator Sinkron Axial Flux Permanent Magnet Axial Flux Permanent Magnet 1500 Watt," no. December, 2017.
- [8] M. F. Alqodri, C. E. Rustana, and H. Nasbey, "Rancang Bangun Generator Fluks Aksial Putaran Rendah Magnet Permanen Jenis Neodymium (NdFeB) Untuk Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Double-Stage Savionus," *Semin. Nas. Fis. SNF 2015*, vol. IV, pp. 135–142, 2015.
- [9] Y. C. Wu and C. W. Wang, "Transmitted torque analysis of a magnetic gear mechanism with rectangular magnets," *Appl. Math. Inf. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 1059–1065,2015,doi:10.12785/amis/0902 57.
- [10] Y. C. Wu and H. Sen Yan, "Design of surface-mounted permanent - magnet brushless DC motors combined with gear mechanisms," *Trans. Can. Soc. Mech.*

- Eng.*, vol. 37, no. 3, pp. 439–448, 2013, doi: 10.1139/tcsme-2013-0033.
- [11] S. Syam, S. Soeparman, D. Widhiyanuriawan, and S. Wahyudi, “Comparison of axial magnetic gears based on magnetic composition topology differences,” *Energies*, vol. 11, no. 5, pp. 1–15, 2018, doi: 10.3390/en11051153.
- [12] N. F. Lombard and M. J. Kamper, “Analysis and performance of an ironless stator axial flux PM machine,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14, no. 4, pp. 1051–1056, 1999, doi: 10.1109/60.815027.
- [13] D. W. Chung and Y. M. You, “Design and performance analysis of coreless axial-flux permanent-magnet generator for small wind turbines,” *J. Magn.*, vol. 19, no. 3, pp. 273–281, 2014, doi: 10.4283/JMAG. 2014. 19.3.273.
- [14] U. K. Madawala and J. T. Boys, “Magnetic field analysis of an ironless brushless dc machine,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 8, pp. 2384–2390, 2005, doi: 10.1109 / TMAG.2005.852952.
- [15] S. Syam, S. Kurniati, and R. Ramang, “Design and characteristics of axial magnetic gear using rectangular magnet,” *J. Eur. des Syst. Autom.*, vol. 53, no. 2, pp. 167–175, 2020, doi: 10.18280 / jesa.530202.