

RANCANG BANGUN GENERATOR FLUKS AKSIAL MAGNET PERMANEN SATU FASA 12 KUTUB DENGAN STATOR GANDA

Muhammad Khairul Amri Rosa^{1*}, Jorinaldi², Humiras Feryanson Sianipar³

^{1,2}Program Profesi Insinyur Sekolah Pascasarjana Universitas Andalas; Kampus Limau Manis, Padang, Sumatera Barat

³Program Studi Teknik Elektro Universitas Bengkulu

Riwayat artikel:

Received: 20 Juli 2023

Accepted: 12 Agustus 2023

Published: 11 September 2023

Keywords:

generator fluks aksial, satator ganda, variasi celah udara.

Correspondent Email:

amri@unib.ac.id

Abstrak. Pada penelitian ini dikembangkan desain generator magnet permanen satu fasa fluks aksial dengan stator ganda untuk meningkatkan daya yang dibangkitkan oleh generator. Generator didesain menggunakan 12 kutub sehingga dapat digunakan pada putaran rendah yang biasanya dapat dihasilkan oleh sumber-sumber energi terbarukan. Desain generator yang dikembangkan pada penelitian ini terdiri dari 2 piringan cakram berbahan besi (Fe) sebagai rangka stator sekaligus inti jangkar dan piringan rotor berbahan besi dengan magnet 12 permanen jenis *neodymium* (NdFeb) dengan susunan U-S yang ditanamkan pada slot yang dicetak pada inti ditempatkan diantara dua jangkar. Pada tiap inti jangkar masing-masing dipasangkan 12 kumparan kumparan. Dari hasil pengujian tanpa beban, tegangan output generator generator berubah secara linier dengan perubahan lebar celah udara. Dari hasil pengujian pada putaran 160 rpm, dihasilkan tegangan output tanpa beban sebesar 35,73 volt dan menurun secara linier dengan penambahan lebar celah udara. Pada putaran 500 rpm, generator membangkitkan tegangan sebesar 87,6 volt pada frekuensi 50 Hz. Dari hasil pengujian, daya maksimum yang dihasilkan oleh generator berbanding lurus dengan penambahan kecepatan.

Abstract. In this research, the design of a single-phase axial flux permanent magnet generator with double stator was developed to increase the power produced by the generator. The generator is designed using 12 poles that can be used at low speed which can usually be produced by renewable energy sources. The design of the generator developed in this study consists of 2 discs made of iron (Fe) as the stator frame as well as the anchor core and a rotor disk made of iron with 12 permanent magnets of the neodymium (NdFeb) type with a U-S arrangement implanted in a slot printed on the core placed between the two anchors. At each anchor core each 12 coils are paired. From the no-load test results, the generator output voltage changes linearly with changes in the width of the air gap. From the test results at 160 rpm, the no-load output voltage is 35.73 volts and decreases linearly with the increase in the width of the air gap. At 500 rpm, the generator generates a voltage of 87.6 volts at a frequency of 50 Hz. From the test results, the maximum power generated by the generator is directly proportional to the increase in speed.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan energi listrik global meningkat tajam dalam beberapa dekade terakhir seiring dengan perkembangan dunia

industri dan bertambahnya jumlah penduduk dunia. Ketergantungan terhadap sumber energi fosil masih sangat tinggi namun cadangannya semakin berkurang dari waktu ke waktu, selain

itu, gas buang hasil pembakaran juga dapat mencemari lingkungan [1].

Secara global, penggunaan sumber energi fosil secara intensif mulai dialihkan kepada sumber-sumber energi terbarukan. Sumber energi terbarukan adalah sumber energi ramah lingkungan yang tidak mencemari lingkungan dan tidak memberikan kontribusi terhadap perubahan iklim dan pemanasan global seperti pada sumber-sumber tradisional lain [2].

Kendala dalam pemanfaatan sumber-sumber energi terbarukan adalah kontinuitas dan kestabilan suplai yang tidak konstan dan kecepatan yang rendah. Kestabilan putaran dapat dicapai dengan penggunaan sistem transmisi mekanik menggunakan *gearbox* [3] atau *belt* dan *pulley*, namun penggunaan transmisi ini dapat menyebabkan losses dan menurunkan efisiensi generator. Hal ini karena penggunaan system transmisi seperti *belt* dan *pulley* akan menimbulkan slip yang menyebabkan penurunan daya atau putaran sehingga hasil yang diproduksi akan menurun, akibatnya terjadi kerugian produksi dan pemeliharaan akan bertambah [4].

Pada penelitian sebelumnya telah diteliti pengaruh kecepatan rotor terhadap arus pada tegangan konstan pada generator axial flux satu fasa yang didesain dengan konfigurasi magnet *neodymium* dengan kutub searah (U-U) [5]. Hasil simulasi pemodelan variasi celah udara pada generator fluks aksial memperlihatkan bahwa lebar celah udara yang rapat meningkatkan daya output generator [6]. Tetapi, dibutuhkan teknologi manufaktur yang tinggi untuk menghasilkan lebar celah udara yang kecil. Pada penelitian ini output terbesar dihasilkan dengan kumparan tanpa inti.

Penelitian lainnya mengembangkan generator axial 1 fasa rotor ganda dengan 16 magnet pada masing-masing rotor. Menggunakan 9 kumparan dengan 220 lilitan per kumparan, dihasilkan pengaturan tegangan yang besar generator ketika dibebani mencapai lebih dari 50% [7].

Merujuk kepada beberapa penelitian sebelumnya, pada penelitian ini dikembangkan desain dan manufaktur generator magnet permanen fluks aksial 1 fasa dengan stator ganda dan magnet permanen yang ditanam dalam inti rotor dengan susunan U-S. Proses manufaktur generator dilakukan secara sederhana menggunakan plasma cutting.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Ggl induksi dibangkitkan ketika kumparan generator dipotong fluks magnet yang berubah waktu, dan besarnya ggl dipengaruhi oleh laju perubahan fluks per satuan waktu yang mana dapat diperoleh dengan mengatur putaran rotor [8]. Selain putaran, ggl induksi juga ditentukan magnitud fluks magnetik yang menginduksi kumparan rotor. Magnitud fluks magnetik dapat diatur dengan kuat arus yang diberikan kepada kumparan [9]. Prinsip kerja generator ini didasarkan pada hukum Faraday.

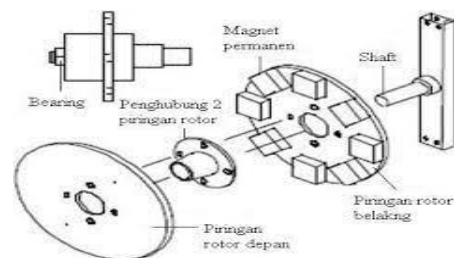
Generator magnet permanen fluks aksial atau axial flux permanent magnet generator (AFPMG) membangkitkan energi listrik dengan arah aliran fluks secara tegak lurus. Generator fluks aksial telah dikembangkan dalam berbagai variasi desain diantaranya stator dengan inti besi berbentuk torus, stator tanpa inti besi, dan jumlah gulungan. Sedangkan rotor terdiri dari tatakan penyanggah magnet permanen yang direkatkan atau ditanamkan pada piringan plat. Nilai-nilai parameter pemagnetan pada generator dapat dihitung menggunakan persamaan-persamaan berikut [10].

$$\Phi_{\max} = A_{\text{magn}} \times B_{\max} \quad (1)$$

$$A_{\text{magn}} = \frac{\pi(r_o^2 - r_i^2) - \tau f(r_o - r_i) N_m}{N_m} \quad (2)$$

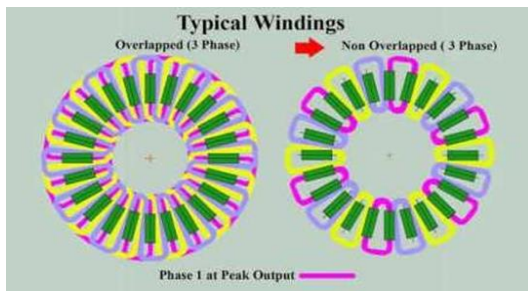
$$B_{\max} = B_r \frac{I_m}{I_m + \delta} \quad (3)$$

Prinsip kerja AFPMG hampir sama dengan generator pada umumnya. Perbedaan utamanya terdapat pada arah medan magnetiknya. Tegangan akan terinduksi pada konduktor, apabila konduktor tersebut bergerak relatif pada medan magnet sehingga memotong garis-garis gaya magnet. Konstruksi generator diperlihatkan pada Gambar 1 [11].



Gambar 1. Konstruksi AFPMG

Stator pada AFPMG ada yang menggunakan inti besi dan ada yang tanpa inti besi. Stator tanpa inti besi biasanya digunakan untuk putaran rendah dan torsi beban yang rendah. Ketiadaan inti besi bertujuan untuk meminimalisir karena efek coging torque, yakni efek tarik menarik antara inti besi dan magnet permanen pada generator [6, 12]. Terdapat 2 susunan kumparan stator yaitu *overlapping* dan *non-overlapping* [13] seperti Gambar 2.



Gambar 2 Susunan kumparan Stator AFPMG

Untuk menentukan parameter desain AFPMG, jarak magnet (Tf) dan keliling rotor (Kr) dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$Tf = \sin 30 \times b \tag{4}$$

$$Kr = (Tf \cdot p) + (a \cdot p) \tag{5}$$

dimana a adalah lebar magnet dan p jumlah magnet.

Tegangan yang terinduksi pada jangkar dapat dihitung menggunakan persamaan [10]

$$E_{ind} = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \phi_{max} \cdot N_s / N_{ph} \tag{6}$$

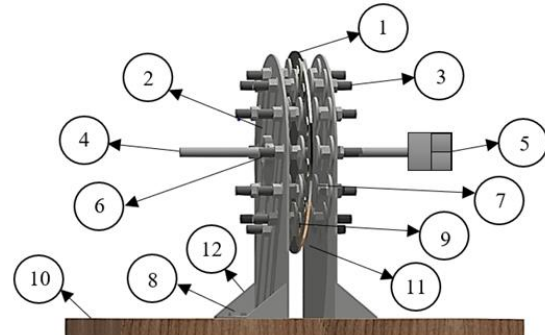
3. METODE PENELITIAN

3.1. Penentuan nilai parameter AFPMG

Penelitian ini dimulai dengan membuat desain AFPMG untuk menentukan parameter generator. Desain yang dibuat diperlihatkan Gambar 3.

Dengan menggunakan 12 magnet silinder diameter 3,9 cm berdasarkan Persamaan (4) dan (5) diperoleh keliling rotor sebesar 70,8 cm dan jarak magnet 2 cm. Dari Persamaan (1) sampai (3), diperoleh luas sapuan magnet sebesar $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ dan rapat fluks maksimum 0,56 T sehingga fluks magnetik adalah $9,023 \times 10^{-4} \text{ Wb}$.

Berdasarkan perhitungan parameter desain, didapatkan spesifikasi desain generator fluks aksial magnet permanen sebagaimana diberikan pada Tabel 1.



Keterangan:

- 1. Rotor
- 2. Stator
- 3. Baut Pengunci Kumparan
- 4. As besi
- 5. Kopling
- 6. Pillow Bearing
- 7. Dudukan Kumparan
- 8. Baut Pengunci Stator
- 9. Magnet Neodymium
- 10. Dudukan Rangka
- 11. Celah Udara (Air Gap)
- 12. Dudukan Stator

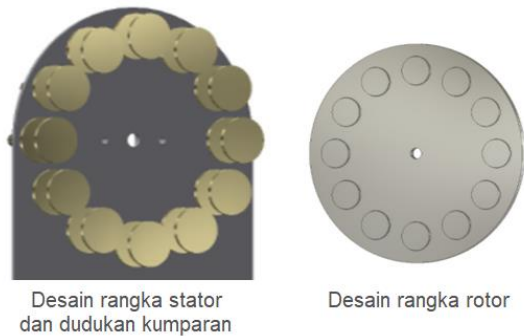
Gambar 3. Model desain generator

Tabel 1. Spesifikasi Desain Generator Magnet Permanen Fluks Aksial Satu Fasa

Parameter	Satuan	Nilai
Spesifikasi Mekanik		
Diameter stator	cm	29
Diameter rotor	cm	30
Tebal piringan stator	mm	3
Tebal piringan rotor	mm	3
Keliling rotor	cm	70,8
Besi as	mm	15
Baut stator	mm	12
Lubang rotor	cm	4
Lubang baut stator	mm	12
Diameter kawat	mm	0,8
Jumlah magnet		12
Spesifikasi Elektrik		
Putaran	Rpm	100
Tegangan (no load)	volt	46,86
Frekuensi	Hertz	1,6
Jumlah dan panjang kumparan	buah / m	24/18,8
Jumlah lilitan	-	7200
Tahanan kumparan	Ohm	25
Jumlah magnet		12
Kerapatan fluks magnet	Wb/m ²	1,32
Fluks maksimum	Wb	$9,023 \cdot 10^{-4}$
Jarak magnet	cm	2
Radius dalam magnet	cm	9,5
Radius luar magnet	cm	13,5
Diameter magnet	cm	3,9
Tebal magnet	cm	0,37

3.2. Proses manufaktur generator

Dari parameter desain yang telah ditetapkan, proses pembuatan generator dilakukan dengan terlebih dahulu membuat model 3D dari bagian-bagian yang akan dibuat menggunakan *software* Inventor (Gambar 4). Selanjutnya dilakukan proses pembentukan rangka stator, dudukan kumparan dan rotor menggunakan plat besi 3 mm dengan *plasma cutting*.



Gambar 4. Desain 3D stator dan rotor

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pembentukan generator dilakukan dengan *plasma cutting* seperti terlihat pada Gambar 5 dan hasil rangka generator yang telah terbentuk dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 5 Proses pemotongan plat besi



Gambar 6 Rangka generator yang terbentuk

4.1. Pengujian tanpa beban

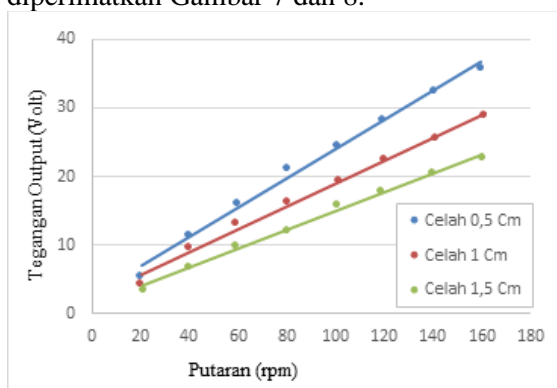
Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan besaran nilai tegangan keluaran generator pada saat tidak dibebani dengan menggunakan 12 kutub magnet yang terletak pada bagian rotor dan 24 kumparan pada kedua sisi stator generator yang dirancang. Pengujian dilakukan dengan memutar generator menggunakan motor DC sebagai penggerak mula (*prime mover*) dengan variasi kecepatan generator 20 sampai dengan 160 rpm dengan kelipatan 20 rpm dan variasi jarak celah udara yakni 0,5 cm, 1,0 cm, dan 1,5 cm. Hasil pengujian tegangan keluaran tanpa beban pada Tabel 2

Tabel 2 Data pengujian tanpa beban

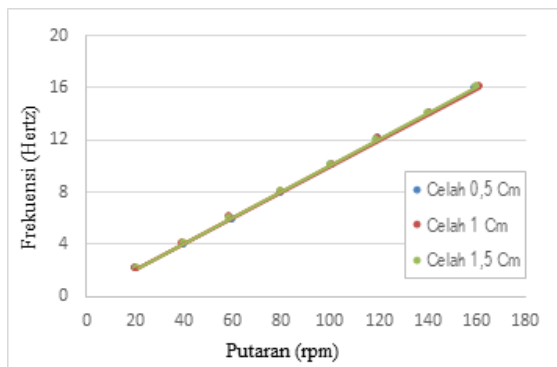
Celah Udara (cm)	Putaran (rpm)	Tegangan (V)	Frekuensi (Hz)
0,5	20	5,34	2,133
	40	11,45	3,926
	60	16,07	5,88
	80	21,02	7,92
	100	24,45	10,09
	120	28,26	12,05
	140	32,5	13,98
1	20	4,3	2,064
	40	9,48	4,051
	60	13,09	6,03
	80	16,15	8,02
	100	19,33	10,04
	120	22,42	12,03
	140	25,59	14,04
160	28,86	16,01	

1,5	20	3,43	2,075
	40	6,68	4,041
	60	9,76	5,9
	80	12,05	8,03
	100	15,77	10,07
	120	17,73	11,93
	140	20,46	14,03
	160	22,64	16,04

Berdasarkan data pada pengujian tanpa beban, dibentuk grafik karakteristik generator pada 3 variasi celah udara. Grafik pengujian generator pada keadaan tanpa beban diperlihatkan Gambar 7 dan 8.



Gambar 7 Grafik tegangan output pada pengujian tanpa beban



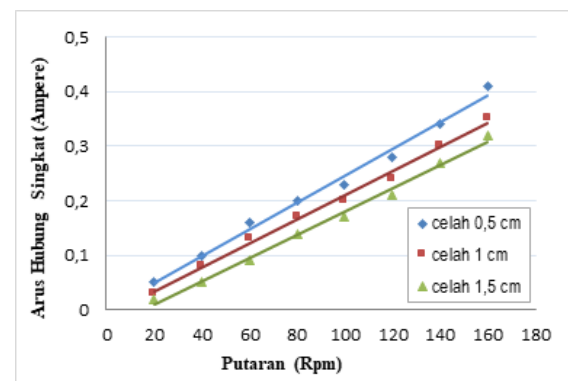
Gambar 8 Grafik hubungan putaran terhadap frekuensi

Dari Gambar 7, karakteristik tanpa beban terlihat bahwa tegangan output generator bertambah secara linier dengan perubahan kecepatan. Semakin rendah lebar celah udara, tegangan output juga menjadi semakin besar. Tegangan output paling besar dihasilkan ketika lebar celah udara 0,5 cm atau lebar celah udara terendah pada kecepatan aktual 159,7 rpm sebesar 35,73 Volt. Proses manufaktur yang masih sederhana menyebabkan lebar celah

udara sulit untuk dikurangi lagi. Dengan proses manufaktur yang lebih baik dan lebih presisi dimungkinkan pembangkitan tegangan yang lebih tinggi dengan lebar celah udara yang lebih kecil. Gambar 8 memperlihatkan frekuensi output generator berbanding lurus dengan putaran dan tidak dipengaruhi celah udara.

4.2. Pengujian Hubung Singkat

Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan rating nilai arus yang dapat dilalui oleh kumparan generator yang dirancang. Pengujian dilakukan dengan memutar generator dengan variasi kecepatan dan variasi lebar celah udara. Gambar 9 memperlihatkan grafik hasil pengujian hubung singkat.



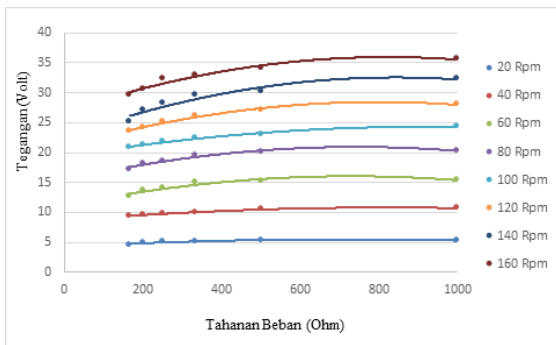
Gambar 9 Grafik arus hubung singkat

Gambar 9 menunjukkan arus hubung singkat yang dibangkitkan oleh generator pada variasi lebar celah udara 0,5 cm, 1 cm, dan 1,5 cm. Dari hasil pengujian hubung singkat arus tertinggi dihasilkan pada kecepatan 160 rpm dan celah udara sebesar 0,5 cm sebesar 0,41 A. Sementara arus hubung singkat terendah pada kecepatan 20 rpm dengan jarak celah udara 1,5 cm sebesar 0,02 A. Kenaikan kecepatan menyebabkan arus hubung singkat bertambah secara linier. Penampang kawat pada kumparan sebesar 0,8 mm mampu mengalirkan arus maksimum 1,588 A.

4.3. Pengujian berbeban

a. Pengujian dengan variasi tahanan beban

Pegujian ini pada lebar celah udara 0,5 cm dengan variasi kecepatan untuk mengetahui pengaruh pembebanan tahanan R terhadap keluaran generator. Grafik hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 10.



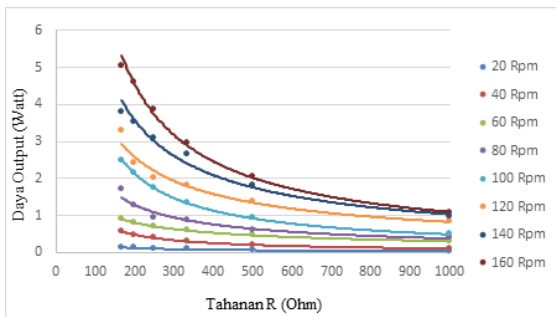
Gambar 10 Grafik Pengaruh Tahanan R terhadap Tegangan Terminal Generator

Dari Gambar 10 terlihat bahwa kenaikan beban menyebabkan tegangan terminal pada beban akan mengalami penurunan, atau terjadi *voltage drop*. Ini disebabkan arus yang bertambah sehingga drop tegangan ($V_{drop} = I.R$) akan bertambah sebagai akibat reaksi jangkar.

Dari data pengujian berbeban diperoleh daya yang dihasilkan generator pada berbagai nilai tahanan beban yang diberikan pada Tabel 3 dan ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 11.

Tabel 3. Daya yang dibangkitkan generator

Putaran (Rpm)	Daya Output (Watt)					
	R beban 1 kΩ	R beban 500 Ω	R beban 333 Ω	R beban 250 Ω	R beban 200 Ω	R beban 167 Ω
20	0,0371	0,06336	0,0832	0,102	0,1176	0,138
40	0,107	0,21	0,3	0,388	0,48	0,564
60	0,308	0,456	0,6	0,705	0,816	0,889
80	0,406	0,603	0,88	0,93	1,274	1,72
100	0,486	0,924	1,35	1,744	2,13	2,496
120	0,84	1,36	1,827	2,016	2,41	3,304
140	0,969	1,812	2,664	3,102	3,523	3,78
160	1,068	2,046	2,97	3,876	4,59	5,032



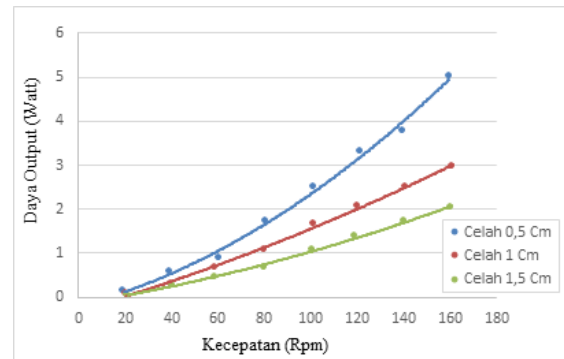
Gambar 11 Grafik kecepatan terhadap daya yang dibangkitkan

Berdasarkan Gambar 11 terlihat daya yang dihasilkan oleh generator bertambah secara kuadratis dengan penurunan tahanan beban.

Terlihat bahwa daya output sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran.

b. Pengujian dengan variasi celah udara

Pegujian ini dilakukan dengan variasi kecepatan dan lebar celah udara dengan tahanan beban 166,7 Ohm. Grafik hasil pengujian berbeban dengan variasi celah udara dapat dilihat pada Gambar 12.

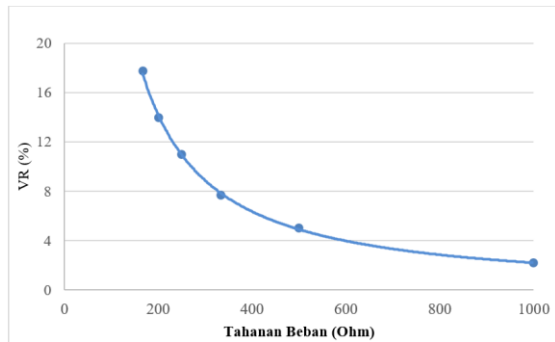


Gambar 12 Daya output sebagai fungsi kecepatan pada variasi celah udara

Dari grafik terlihat bahwa kenaikan daya output generator bertambah secara eksponensial dengan bertambahnya kecepatan putaran. Gnerator akan menghasilkan daya yang besar ketika penggerak mula mampu memberikan putaran yang cukup. Sedangkan jika putaran kurang, daya yang dihasilkan menurun secara eksponensial.

Selain faktor kecepatan putaran rotor, faktor penting lainnya adalah lebar celah udara. Peningkatan daya yang tinggi terjadi ketika lebar celah udara diperkecil dan menghasilkan kurva kecepatan – daya yang kenaikannya lebih tajam. Oleh karenanya, untuk menghasilkan daya output yang lebih besar diperlukan proses manufaktur yang lebih presisi sehingga memungkinkan celah udara yang sekecil mungkin sehingga efisiensi generator menjadi tinggi.

Regulasi Tegangan pada pengujian berbeban dengan perubahan tahanan beban diperlihatkan Gambar 13.

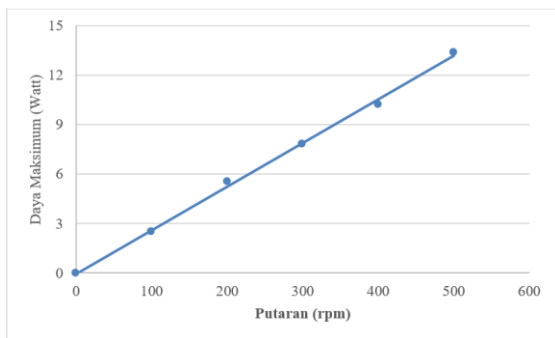


Gambar 13 Voltage Regulation sebagai fungsi tahanan beban

Dapat dilihat pada grafik bahwa regulasi tegangan memburuk dengan bertambahnya beban, sehingga ini menjadi limit beban yang dapat ditangani oleh generator. Jika beban terlalu besar, VR akan semakin besar sehingga tidak mampu memberikan tegangan yang cukup kepada beban.

4.4. Pengujian Daya Maksimum Generator

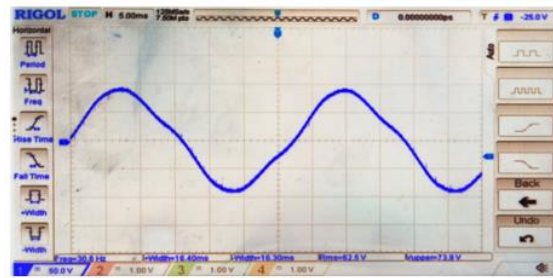
Untuk mendapatkan daya maksimum yang mampu dihasilkan generator, dilakukan pengujian pembebanan generator dengan tahanan beban yang rendah pada putaran lebih tinggi. Pengujian dilakukan dengan lebar celah udara 0,5 cm. Grafik hasil pengujian diperlihatkan Gambar 14.



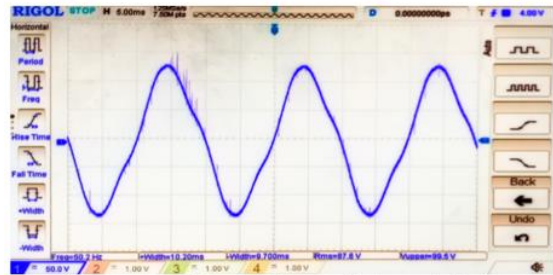
Gambar 14 Grafik karakteristik putaran terhadap daya maksimum generator

Dari hasil pengujian diperoleh bahwa daya output maksimum generator berbanding lurus dengan kecepatan.

Bentuk gelombang output generator pada beberapa variasi kecepatan diperlihatkan Gambar 15.



(a) Putaran 300 rpm dengan frekuensi 30 Hz



(b) Putaran 500 rpm dengan frekuensi 50 Hz

Gambar 4.15. Bentuk gelombang output generator

Bentuk gelombang output yang dihasilkan oleh generator pada berbagai putaran mendekati sinusoidal murni. Untuk menghasilkan bentuk gelombang yang murni sinusoidal dapat ditambahkan filter.

5. KESIMPULAN

- Generator fluks aksial magnet permanen 1 fasa yang dikembangkan telah mampu membangkitkan energi listrik dengan bentuk gelombang yang hampir mendekati sinusoidal murni. Generator menghasilkan frekuensi 50 Hz pada putaran 500 rpm.
- Tegangan output bertambah secara linier terhadap perubahan kecepatan dan meningkat secara eksponensial terhadap lebar celah udara. Lebar celah udara yang semakin kecil dapat meningkatkan daya output generator secara eksponensial, namun proses manufaktur sederhana yang dilakukan pada penelitian ini membatasi lebar celah udara yang dihasilkan.
- Pengujian daya maksimum generator menghasilkan hubungan yang linier antara kecepatan putaran dan daya maksimum yang dibangkitkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Febrianti, Isra. 2013. "Sepeda Pembangkit Listrik Sebagai Sumber Energy Storage". ETD Unsyiah.
- [2] Al Amin, M. 2017. "Sepeda Statis Sebagai Pembangkit Energi Listrik Alternatif dengan Pemanfaatan Alternator Bekas". Jurnal Edukasi Elektro 1.2.
- [3] Napitupulu Alfon, dkk. 2017. "Analisis Sistem Pembangkit Energi Listrik Pada Sepeda Statis". Jakarta: Universitas Pancasila.
- [4] Siburian, James Domu. 2019. "Analisa Slip Transmisi Pulley dan V-Belt pada Beban Tertentu dengan Menggunakan Motor Berdaya Seperempat HP". Riau: Universitas Islam Riau
- [5] Putri, Alysa Karisma Addina. 2019. "Rancang Bangun Generator Flux Satu Fasa Menggunakan Neodymium Iron Boron Magnet (NdFeB) Silinder dengan Kutub Searah (UU)". Jember: Universitas Jember.
- [6] Prasetijo, H., & Waluyo, S. 2015. "Optimasi Lebar Celah Udara Generator Axial Magnet Permanen Putaran Rendah 1 Fasa". Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI), 4(4), 258-262.
- [7] Prayogo, R. S. 2019. "Rancang Bangun Model Generator Aksial 1 Phasa". Palembang: Universitas Muhammadiyah Palembang.
- [8] Anonim. 2010. "Sistem Kelistrikan dan Elektronika pada Kendaraan". Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- [9] Zuriman, Anthony. 2010. "Mesin listrik Arus Bolak-Balik". Padang: Program Studi Teknik Elektro S1 Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi.
- [10] Nakhoda, Y. 2018. "Design And Implementation Of Ls-Pmsg For Small Scale Hydro Power Plant". Journal of Science and Applied Engineering (JSAE) 1(2), 96-104.
- [11] Rohmah, A. 2019. "Rancang Bangun Generator AC Konstruksi Axial Flux Satu Fasa Menggunakan Magnet Neodymium (NdFeB) Silinder Dengan Kutub Magnet Berlawanan". Jember: Universitas Negeri Jember.
- [12] Siburian, Relygius Roniasi. 2019. "Rancang Bangun Generator Magnet Permanen Fluks Axial 3 Fasa Untuk Penggerak Mula Kecepatan Rendah". Bengkulu: Universitas Negeri Bengkulu.
- [13] Rossouw F.G. 2009. "Analisis and Design of Axial Flux Permanent Wind Generator System for Direct Batteray Charging Application". Departement of Electrical and Electronic Engineering, Stellenbosch University, Matielend.