



Rancang Bangun Generator Axial *Flux* Magnet Permanen 1 Fasa Sistem 12v pada Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro

Design and Construction of Permanent Magnet Axial Flux Generator 1 Phase 12v System in Pico Hydro Power Plant

Isra' Nuur Darmawan^{1,a)}, Kholistianingsih¹, Aldora Apriliantomo Saputra¹, Asroful Abidin²

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Wijayakusuma Purwokerto

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember

^{a)}Corresponding author: isra.nuur.darmawan@unwiku.ac.id

Abstrak

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat dapat dipenuhi melalui sumber energi terbarukan seperti air. Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) memanfaatkan aliran air untuk menggerakkan turbin dan generator, cocok untuk daerah terpencil. Penelitian ini bertujuan merancang bangun generator axial *flux* magnet permanen 1 fasa sistem 12V dan menganalisis performa input-output serta pengaruh torsi terhadap daya. Perancangan dilakukan menggunakan perangkat lunak MagNet Infolytica dengan konfigurasi 12 slot, 10 pole, dan magnet NdFeB. Hasil simulasi menunjukkan daya keluaran rata-rata sebesar 282,2 W pada kecepatan 1000 rpm. Pengujian selama dua hari menunjukkan efisiensi tinggi. Hari pertama daya input 10,238 W dan output 10,235 W, hari kedua input 11,127 W dan output 11,113 W. Torsi meningkat dari 0,24515 Nm (12,67 W) menjadi 0,34707 Nm (18 W). Hasil menunjukkan desain berhasil direalisasikan dan peningkatan torsi serta kecepatan air meningkatkan efisiensi sistem.

Kata Kunci: energi terbarukan; PLTPH; generator; daya; efisiensi; torsi

Abstract

The increasing demand for electricity can be met through renewable energy sources such as water. PLTPH utilize water flow to drive turbines and generators, making them suitable for remote areas. This study aims to design a 12V single-phase axial flux permanent magnet generator and analyze its input-output performance and the effect of torque on power. The design was carried out using MagNet Infolytica software with a 12-slot, 10-pole configuration and NdFeB magnets. Simulation results showed an average output power of 282.2 W at 1000 rpm. Two days of testing demonstrated high efficiency. On the first day, the input was 10.238 W with 10.235 W output; on the second day, the input increased to 11.127 W with 11.113 W output. Torque increased from 0.24515 Nm (12.67 W) to 0.34707 Nm (18 W). The results indicate successful implementation and that higher torque and water velocity improve system efficiency.

Keywords: renewable energi; PLTPH; generator; power; efficiency; torque

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat di berbagai sektor. Saat ini, sebagian besar pasokan listrik masih berasal dari energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam [1], [2], [3]. Di Indonesia, cadangan energi fosil mencapai 3,7 miliar barel minyak bumi, 100,3 TSCF gas alam, dan 32,27 miliar ton batu bara. Ketergantungan terhadap sumber ini menimbulkan masalah keterbatasan cadangan dan dampak lingkungan seperti emisi karbon dan pemanasan global [4], [5].

Energi terbarukan menjadi solusi untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil. Salah satu sumber yang potensial adalah energi hidro [6], [7]. Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) cocok diterapkan di daerah terpencil karena dapat memanfaatkan aliran air berkecepatan rendah [10]. Dalam sistem ini, generator berfungsi mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik.

Generator axial *flux* magnet permanen 1 fasa sistem 12V dipilih karena efisien, ringkas, stabil, dan mudah diintegrasikan dengan sistem penyimpanan energi berbasis baterai. Dibandingkan radial *flux*, tipe axial memiliki

kepadatan daya lebih tinggi dan desain yang lebih sederhana [11], [12].

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang dan membangun generator axial flux magnet permanen 1 fasa sistem 12V untuk PLTPH.
2. Mengkaji pengaruh kecepatan air terhadap daya input dan output.
3. Menganalisis hubungan torsi terhadap daya keluaran generator.

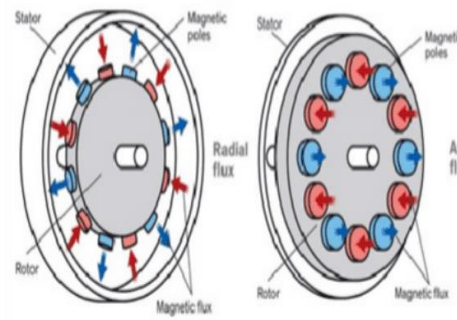
Generator

Generator merupakan perangkat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dan memiliki peran penting dalam sistem pembangkitan daya listrik. Perangkat ini umumnya terdiri dari dua komponen utama yaitu stator sebagai bagian diam dan rotor sebagai bagian yang berputar yang bersama-sama menghasilkan tegangan keluaran tiga fase. Dalam penggunaannya generator biasanya dihubungkan langsung dengan turbin sehingga ketika turbin berputar akibat aliran energi seperti air maka rotor generator ikut berputar dan menghasilkan listrik

Prinsip kerja generator didasarkan pada induksi elektromagnetik yaitu ketika kumparan kawat bergerak dalam medan magnet atau sebaliknya akan timbul gaya gerak listrik atau GGL yang menginduksi tegangan listrik dalam kumparan. Proses ini sesuai dengan hukum Faraday yang menyatakan bahwa perubahan medan magnet dalam kumparan akan menghasilkan tegangan listrik dengan besar tegangan yang sebanding terhadap laju perubahan fluks magnetik [13], [14].

Generator Permanen Magnet

Generator magnet permanen adalah jenis generator sinkron yang menggunakan magnet permanen pada rotor sebagai sumber medan magnet, sehingga tidak memerlukan arus eksitasi eksternal [15]. Desain ini lebih efisien, andal, dan minim perawatan dibandingkan generator konvensional, serta banyak digunakan pada sistem arus searah seperti turbin air, angin, uap, dan kendaraan listrik. Berdasarkan arah aliran fluks magnetiknya, terdapat dua tipe utama yaitu radial dan aksial [17], [18]. Perbedaannya ditunjukkan **Error! Reference source not found. Gambar 1** di mana fluks radial mengalir tegak lurus terhadap poros, sedangkan fluks aksial sejajar dengan poros. Tipe aksial unggul karena desainnya yang ringkas, efisien, dan memiliki kepadatan daya tinggi, sehingga cocok untuk sistem pembangkit skala kecil.



Gambar 1. Perbedaan radial flux dan aksial flux

Rotor

Rotor merupakan komponen utama generator yang berputar dan berada di tengah stator. Pada generator magnet permanen, rotor dilengkapi magnet-magnet permanen yang terpasang pada poros untuk menghasilkan medan magnet yang dibutuhkan dalam proses pembangkitan tegangan [19].

Susunan dan posisi magnet pada rotor dapat dilihat pada **Gambar 2**. Saat rotor berputar, medan magnet dari magnet permanen memotong kumparan pada stator dan menghasilkan tegangan listrik. Efektivitas proses ini sangat dipengaruhi oleh desain rotor dan konfigurasi magnet yang digunakan, sehingga penempatan dan orientasi magnet menjadi faktor penting dalam meningkatkan kinerja dan efisiensi generator.



Gambar 2. Rotor

Stator

Stator merupakan bagian tetap dari generator yang menjadi tempat lilitan kawat konduktor dan berperan penting dalam menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) induksi [20]. Struktur stator biasanya berbentuk silinder dengan susunan lilitan kawat email yang diatur dalam pola tertentu untuk menciptakan medan listrik secara efisien. Lilitan ini dilindungi oleh rumah generator untuk mencegah kerusakan akibat getaran rotor.

Kinerja generator sangat dipengaruhi oleh kualitas kawat tembaga serta daya tahan isolasinya terhadap panas selama operasi. Inti stator dibuat dari material dengan permeabilitas magnetik tinggi dan terdiri atas lapisan plat tipis yang terlaminsi guna mengurangi rugi histerisis dan arus eddy. Struktur laminasi ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi dan mencegah panas berlebih.

Gambar 3 memperlihatkan bentuk umum stator pada generator magnet permanen.



Gambar 3. Stator

Magnet

Magnet adalah objek yang mampu menarik benda logam melalui gaya tarik dari medan magnet yang dihasilkannya. Istilah “magnet” berasal dari bahasa Yunani *magnĭtis lithos*, yang berarti batu magnesium dan pertama kali ditemukan di wilayah Magnesia. Magnet selalu memiliki dua kutub, yaitu utara dan selatan, yang tetap ada meskipun magnet dipotong. Berdasarkan responsnya terhadap medan magnet, benda diklasifikasikan menjadi feromagnetik, paramagnetik, dan diamagnetik.

Dalam teknologi, magnet permanen sangat penting karena mampu mempertahankan sifat kemagnetannya tanpa suplai arus listrik. Salah satu jenis paling kuat adalah Neodymium Iron Boron (NdFeB), yang memiliki kepadatan energi magnetik tinggi hingga mencapai 400 kJ/m³, menjadikannya sangat efisien untuk digunakan dalam berbagai perangkat seperti generator angin, motor listrik, dan alat elektronik presisi [21], [22]. NdFeB tersedia dalam berbagai bentuk seperti balok, cakram, dan silinder, sesuai kebutuhan desain perangkat, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Jenis-jenis Magnet

Kawat Email

Kawat email tembaga merupakan salah satu komponen penting dalam sistem kelistrikan, terutama pada perangkat seperti transformator, motor listrik, dan generator. Kawat ini dilapisi bahan isolasi berupa enamel yang berfungsi untuk mencegah hubungan pendek antar lilitan sehingga arus listrik dapat mengalir secara aman dan terarah.

Di pasaran, kawat email tersedia dalam berbagai tipe yang dibedakan berdasarkan bahan pelapisnya. Salah satu jenis yang umum digunakan adalah tipe UEW

(Polyurethane), yang dikenal memiliki fleksibilitas tinggi serta mudah dikupas, sehingga memudahkan proses perakitan. Meski demikian, tipe UEW memiliki kelemahan dalam ketahanan terhadap suhu yang relatif rendah, yaitu hanya sekitar 80° hingga 120°C. Selain UEW, terdapat juga tipe PEW (Polyester) dan EIW/AIW (Polyester-Imide/Amide-Imide). Kawat PEW memiliki ketahanan panas lebih tinggi, mencapai 155°C (kelas F), dan umum digunakan dalam belitan motor listrik seperti kompresor, pompa air, dan kipas angin, dengan rentang diameter 0,08 hingga 2 mm.

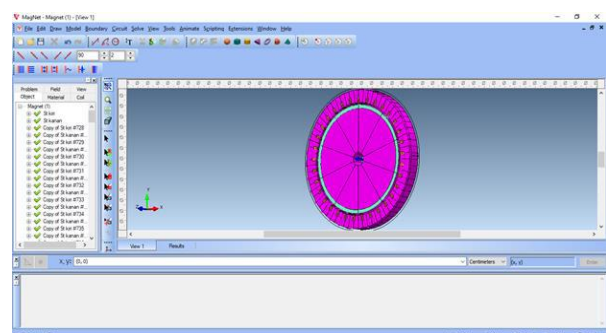
Sementara itu, tipe EIW/AIW dirancang untuk aplikasi pada suhu ekstrem dengan ketahanan hingga 250°C dan diameter antara 0,30 hingga 4 mm, serta banyak digunakan pada dinamo dan sistem kelistrikan berat. Perbedaan karakteristik bahan pelapis ini memberikan fleksibilitas dalam pemilihan kawat email (**Gambar 5**) sesuai kebutuhan dan kondisi kerja di lapangan.



Gambar 5. Kawat Email

Perangkat Lunak MagNet Infolytica

MagNet Infolytica adalah perangkat lunak simulasi elektromagnetik berbasis metode elemen hingga (finite element method) yang digunakan untuk merancang dan menganalisis perangkat seperti motor, generator, dan transformator. Perangkat ini memungkinkan pengguna membuat model dua atau tiga dimensi, memilih material, serta mensimulasikan medan magnet dan arus induksi secara akurat. Keunggulannya terletak pada kemampuannya dalam memvisualisasikan distribusi medan dan menghitung kinerja komponen elektromagnetik[23]. Tampilan antarmuka utama MagNet ditunjukkan pada **Gambar 6**



Gambar 6. Tampilan Perangkat Lunak MagNet Infolytica

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan eksperimen rekayasa yang bertujuan untuk merancang dan menganalisis kinerja generator axial *flux* magnet permanen 1 fasa sistem 12V untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga pikohidro (PLTPH). Tahapan meliputi studi literatur, pemodelan 3D, simulasi dengan *MagNet Infolytica*, perakitan fisik, dan uji performa di lapangan. Objek yang dikembangkan adalah generator dengan konfigurasi 12 slot dan 10 pole untuk mengubah energi aliran air menjadi energi listrik melalui induksi elektromagnetik.

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Saluran Sekunder Onggok Bawah, Kecamatan Bukateja, Kabupaten Purbalingga, serta di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Wijayakusuma Purwokerto. Lokasi saluran dipilih karena mudah diakses dan memungkinkan untuk dilakukan pengujian sistem pembangkit listrik tenaga air berskala kecil secara langsung di lapangan.

Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan alat, bahan, dan perangkat lunak yang rinciannya beserta fungsinya disajikan pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3.

Tabel 1. Daftar Perangkat Lunak

No	Nama	Fungsi
1.	MagNetInfolytica	Mendesain dan mensimulasikan gambar generator yang akan dibuat sebelum pengujian

Tabel 2. Daftar Bahan

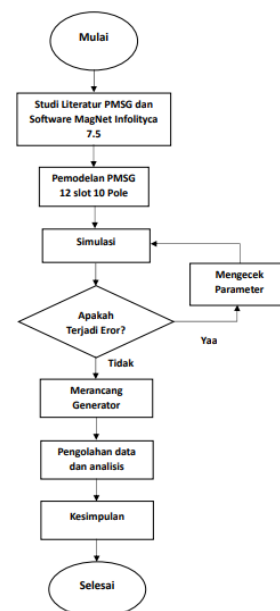
No	Nama	Fungsi
1.	Pipa besi	Membuat casing dan tutup untuk generator
2.	Magent Neodymium iron boron (NdFeb)	Menghasilkan medan magnet yang diperlukan untuk menginduksi arus listrik dalam kumparan kawat
3.	Kawat email	Mengantarkan arus listrik
4.	Bearing 2 buah	Menjaga posisi rotor tetap stabil dan memaksimalkan putaran rotor
5.	Mur 8mm	Untuk mengencangkan tutup dan casing
6.	Generator bekas	Mengambil bagian – bagian yang masih fungsi untuk diaplikasikan ke generator yang baru
7.	Pita dinamo	Meningkatkan keamanan agar tidak mudah terjadi sort antar lilitan

Tabel 3. Daftar Alat

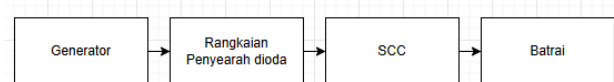
No	Nama	Fungsi
1.	Obeng	Untuk mengencangkan mur
2.	Gerinda	Memotong bahan – bahan Untuk casing dan tutupnya
3.	Las	Menyatukan rumah bearing dan senokan tutup casing
4.	Laptop	Menjalankan software dan menulis laporan
5.	Tachometer	Mengukur kecepatan putaran pada generator

Flowchart Sistem dan Blok Sistem

Metodologi penelitian ini mencakup tahapan mulai dari studi literatur, pemodelan, simulasi, hingga analisis hasil. **Gambar 7** menyajikan alur proses penelitian secara keseluruhan, sedangkan **Gambar 8** menunjukkan diagram blok sistem pembangkit. Proses diawali dengan kajian literatur terkait PMSG dan perangkat lunak MagNet Infolytica, dilanjutkan pemodelan generator 12 slot 10 pole, serta simulasi kinerja. Jika terdapat kesalahan dalam simulasi, dilakukan perbaikan hingga model sesuai. Setelah itu, dilakukan perancangan sistem, pengolahan data, dan penarikan kesimpulan. Diagram blok menjelaskan aliran daya dalam sistem, mulai dari generator, penyearah dioda, solar charge controller (SCC), hingga penyimpanan energi pada baterai..



Gambar 7. Flowchart Penelitian



Gambar 8. Diagram Blok

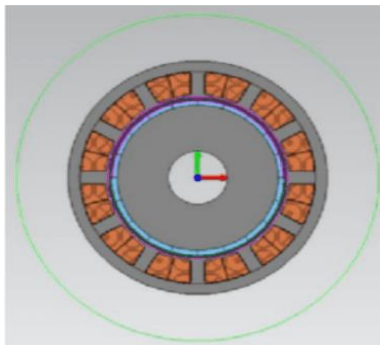
Perancangan dan Simulasi Generator

Perancangan diawali dengan studi literatur mengenai prinsip kerja PMSG dan penggunaan perangkat lunak MagNet Infolytica, termasuk referensi desain serupa serta data karakteristik material stator, rotor, kumparan, dan magnet. Selanjutnya dilakukan pemodelan generator axial flux satu fasa dengan konfigurasi 12 slot 10 pole menggunakan MagNet Infolytica. Gambar 9 menunjukkan desain 3D hasil pemodelan. Pemilihan material ditampilkan pada Tabel 4 dan disesuaikan dengan sifat elektromagnetik serta konduktivitas masing-masing komponen.

Tabel 4. Komponen dan Material Generator

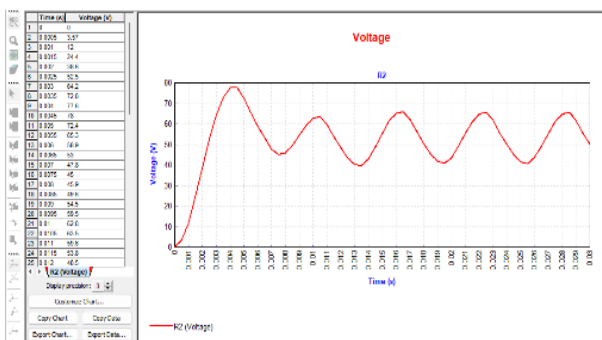
No	Komponen	Material
1.	Stator	M330-35A
2.	Rotor	M330-35A
3.	Coil	Copper: 577e7 Siemens//meter
4.	Magnet	Neodymium Iron Boron (NdFeb)
5.	Aibox	Air

Simulasi dilakukan setelah geometri dan material dimasukkan, dengan pengaturan kecepatan rotor sebesar 1000 rpm melalui fitur *motion component*. Beban disimulasikan menggunakan resistor 25 ohm dan penyearah dioda untuk menghasilkan output tegangan DC.

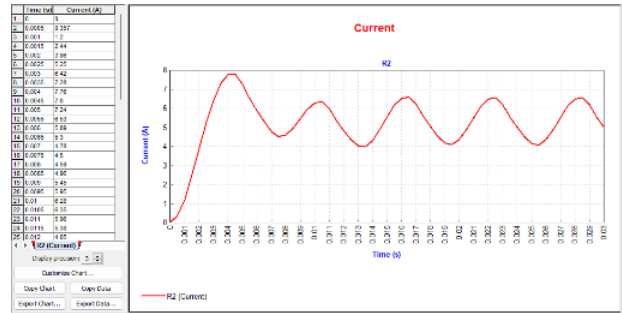


Gambar 9. Hasil Pemodelan dan Simulasi Generator

Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk grafik tegangan pada Gambar 10 dan arus pada Gambar 11 untuk memudahkan proses analisis.



Gambar 10. Nilai Tegangan Pada Simulasi



Gambar 11. Nilai Arus Pada Simulasi

Perakitan Generator

Perakitan generator dilakukan berdasarkan hasil desain dan simulasi. Casing dibuat dari pipa besi bekas yang dipotong sesuai dimensi stator, dipilih karena kuat secara mekanis dan tahan getaran. Proses pemotongan ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Pemotongan Pipa Besi untuk Casing Generator

Setelah casing selesai, dilakukan pemeriksaan lilitan stator. Jika ditemukan kerusakan seperti hubung singkat, stator dibongkar dan dililit ulang menggunakan kawat email sebanyak 44 lilitan per kumparan. Pelilitan dilakukan rapi dan sesuai standar untuk menjaga kestabilan tegangan. Stator kemudian dipasang ke dalam casing dengan presisi agar terlindung dari benturan dan lingkungan. Gambar 13 menunjukkan stator setelah terpasang.



Gambar 13. Pemasangan Stator

Tahap berikutnya adalah pemasangan rotor dan magnet permanen. Sebanyak 10 magnet Neodymium Iron Boron (NdFeB) dipasang merata membentuk 10 kutub magnet pada permukaan rotor. Penyusunan dilakukan secara presisi untuk menjaga keseimbangan dan kestabilan medan magnet saat rotor berputar. **Gambar 14** menunjukkan rotor dengan magnet yang telah terpasang.

Langkah akhir perakitan adalah pemasangan dua bearing untuk menjaga kestabilan putaran rotor di dalam stator. Bearing dipasang secara presisi guna mencegah gesekan yang dapat merusak magnet. **Gambar 15** menunjukkan salah satu bearing yang telah terpasang pada sistem.



Gambar 14. Pemasangan Rotor



Gambar 15. Pemasangan Bearing

Perakitan dilakukan secara manual dengan tetap memperhatikan ketelitian dan kesesuaian dimensi antar komponen untuk memastikan generator berfungsi optimal saat diuji di lapangan..

Pengambilan Data

Pengujian dilakukan selama dua hari pada generator axial flux 12V, dengan pengambilan data setiap 30 menit. Parameter yang diukur meliputi kecepatan aliran air, putaran rotor (RPM), tegangan, arus, dan torsi. Data digunakan untuk menghitung daya input, daya output, dan efisiensi sistem. Hasil pengujian dirangkum dalam **Tabel 5**

Tabel 5. Data Hasil Pengujian

Jam	Kecepatan Air (m/s)	Rpm	Tegangan (V)	Arus (A)	Torsi (Nm)
13:00	4,16	487	12,45	0,71	0,17341
13:30	4,22	490	12,5	0,89	0,21691
14:00	4,15	485	12,4	0,65	0,15877
14:30	4,3	494	12,55	1,01	0,24514
15:00	4,2	488	12,48	0,77	0,18813
15:30	4,25	490	12,55	0,96	0,23022
16:00	4,18	487	12,45	0,73	0,17506

Berdasarkan data pada **Tabel 5**, dilakukan perhitungan manual untuk mengetahui nilai daya masukan (P_{in}), daya keluaran (P_{out}), dan efisiensi (η). Perhitungan dilakukan dengan menggunakan rumus-rumus berikut:

1. Daya Masukan

$$\omega = \frac{n \cdot 2 \cdot \pi}{60} \quad (1)$$

$$K_e = \frac{V_{dc}}{\omega} \quad (2)$$

Dimana $K_t = K_e$

$$T = K_t \cdot I \quad (3)$$

Keterangan :

ω : Kecepatan sudut (rad/s)

n : Kecepatan (rpm)

K_e : Konstanta EMF

K_t : Konstanta Torsi

T : Torsi

I : Arus (ampere)

$$P_{in} = T \cdot \omega \quad (4)$$

Keterangan :

P_{in} : Daya masukan (W)

T : Torsi (Nm)

ω : Kecepatan (rpm)[7]

2. Daya Keluaran

$$P_{Out} = I \times V \quad (5)$$

Keterangan :

P_{out} : Daya keluar (W)

I : Arus (A)

V : Tegangan (V)[7]

3. Efisiensi

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

Keterangan:

η : Efisiensi (%)

P_{out} : Daya Keluaran (W)

P_{in} : Daya Masukan (W)[7]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi Generator

Simulasi dilakukan pada model generator axial flux satu fasa 12 slot 10 pole menggunakan MagNet Infolytica

dengan kecepatan rotor 1000 RPM dan tegangan sistem 12V. Hasil menunjukkan tegangan keluaran rata-rata sebesar 53,15 V, melebihi tegangan nominal akibat kondisi tanpa beban dan konfigurasi EMF yang optimal. Arus keluaran sebesar 5,31 A, mencerminkan kemampuan sistem dalam menyuplai beban menengah hingga tinggi, dipengaruhi oleh lilitan stator dan resistansi beban. Torsi yang dibutuhkan sebesar 2,68 Nm, tergolong sedang dan sesuai untuk aplikasi turbin air skala kecil. Daya masukan tercatat 283,2 W dan daya keluaran 282,2 W, menunjukkan konversi energi yang efisien. Efisiensi simulasi mencapai 99,65%, mencerminkan desain yang optimal, meskipun nilai ini tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi nyata yang melibatkan rugi mekanis dan termal.

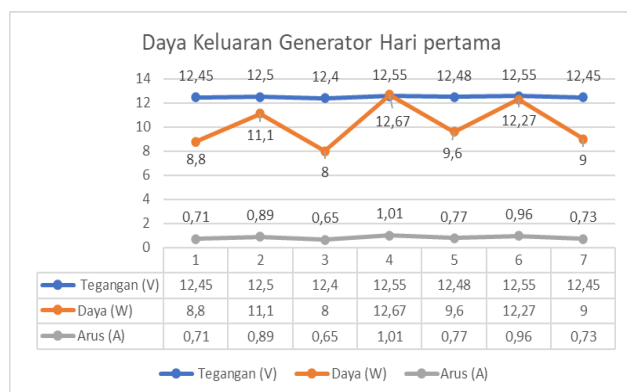
Hasil Pengujian Generator

Pengujian dilakukan selama dua hari di Saluran Sekunder Onggok Bawah, Bukateja, dengan pengambilan data setiap 30 menit pada sistem generator axial *flux* 12V. Parameter yang diamati meliputi tegangan, arus, torsi, daya masukan, daya keluaran, dan efisiensi. Grafik hasil pengujian ditampilkan pada **Gambar 16** dan **Gambar 17**.

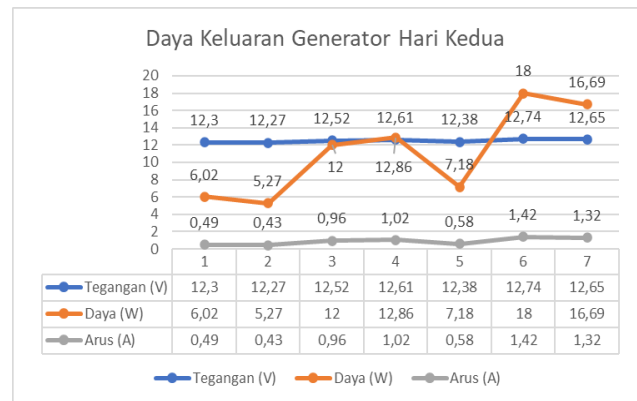
Hasil menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putar rotor diikuti oleh kenaikan tegangan dan arus. Hari pertama mencatat tegangan maksimum 12,55 V pada 494 RPM dan arus 1,01 A, sedangkan hari kedua mencapai 12,74 V pada 498 RPM dan arus 1,42 A. Dibanding studi sebelumnya (45 V pada 600 RPM [24]), nilai ini lebih rendah karena perbedaan konfigurasi lilitan, magnet, dan beban.

Torsi meningkat dari 0,24514 Nm menjadi 0,34707 Nm, sejalan dengan kenaikan daya keluaran dari 12,67 W ke 18 W. Daya masukan juga naik dari 10,149 W menjadi 11,162 W. Daya keluaran rata-rata meningkat dari 10,238 W ke 11,164 W. Meski lebih rendah dari studi pembandingan yang mencapai 400 W [25], sistem ini dirancang untuk stabilitas dan efisiensi pada skala kecil.

Efisiensi rata-rata sistem mencapai 99,58%, menunjukkan konversi energi yang sangat baik dan rendahnya rugi daya selama pengujian.



Gambar 16. Daya Keluaran Hari Pertama



Gambar 17. Daya Keluaran Hari Kedua

PENUTUP

Simpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan menganalisis generator axial *flux* 12V dengan konfigurasi 12 slot dan 10 pole berbasis simulasi dan uji lapangan. Simulasi menggunakan MagNet Infolytica menunjukkan daya keluaran rata-rata 282,2 W pada 1000 rpm. Pengujian selama dua hari menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan air dan torsi berbanding lurus dengan daya keluaran, dari 12,67 W menjadi 18 W. Hasil ini menegaskan bahwa kecepatan fluida dan torsi adalah faktor kunci dalam optimasi performa.

Saran

Sebagai tindak lanjut, disarankan:

1. Mengoptimalkan desain rotor dan stator, termasuk pemilihan material dan dimensi, untuk meningkatkan daya keluaran dan efisiensi.
2. Melakukan analisis dengan rentang variasi kecepatan aliran air yang lebih luas untuk memperoleh pemahaman komprehensif mengenai karakteristik sistem, sehingga dapat ditentukan titik operasi optimal yang seimbang terhadap torsi, daya keluaran, dan efisiensi keseluruhan, sekaligus memberikan dasar perancangan dan pengembangan sistem mikrohidro yang lebih handal dan berkelanjutan.
3. Mengintegrasikan sistem kontrol beban dan penyimpanan energi secara terpadu dan adaptif untuk meningkatkan stabilitas output daya, memperpanjang umur peralatan, serta memastikan kesiapan penerapan pada aplikasi nyata, khususnya pada skala mikrohidro yang menuntut keandalan tinggi, efisiensi operasional, dan keberlanjutan energi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] [1] L. Mustika, "Pengembangan Media Konversi Energi Angin Menjadi Energi Listrik," *Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains*, vol. 3, no. 2, p. 20, 2020, [Online]. Available:

<https://ejurnalunsam.id/index.php/JPFS>

- [2] I. N. Darmawan, Kholistianingsih, A. A. Burhan, and P. Yulianto, "Analysis of The Influence of Sun Intensity on Power on Coastal and High Lands Using Solar Tracker Based on Arduino Microcontroller," 2022 *International Conference on Informatics Electrical and Electronics (ICIEE)*, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1109/ICIEE55596.2022.10010309.
- [3] I. N. Darmawan, K. Kholistianingsih, S. A. Pramono, and A. Abidin, "Proyeksi Kebutuhan Energi Listrik Kabupaten Rembang Menggunakan Software LEAP," *J-Proteksion*, vol. 6, no. 2, pp. 56–61, 2022, doi: 10.32528/jp.v6i2.6823.
- [4] Y. Hakimah, "Analisis kebutuhan listrik dan penambahan pembangkit listrik," *J Chem Inf Model*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [5] S. T. Sarena, A. A. Purnawan, R. Y. Adhitya, B. N. Iqmalia, B. Herijono, and M. Syai'In, "Prototype of Practical Portable Floating Pico Hydropower in Ngadirono River," *Proceedings - 2020 International Conference on Pervasive Artificial Intelligence, ICPAI 2020*, pp. 240–242, 2020, doi: 10.1109/ICPAI51961.2020.00051.
- [6] W. Gul, Q. Gao, and W. Lenwari, "Optimal design of a 5- mw double-stator single-rotor pmsg for offshore direct drive wind turbines," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 56, no. 1, pp. 216–225, 2020, doi: 10.1109/TIA.2019.2949545.
- [7] I. Nuur Darmawan, M. Alif, and Kholistianingsih, "Rancang Bangun Generator Fluks Axial Magnet Permanen Satu Fasa Sistem 24 V dan 48 V pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu," *Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin*, vol. 8, no. 2, pp. 100–108, 2024, doi: 10.32528/jp.v8i2.1129.
- [8] I. N. Darmawan and G. A. Ramadani, "Experimental Testing of 48 V Hybrid System of Solar-Wind Power Modul at Baru Beach Pandansimo and Mount Buthak Bantul Special Region of Yogyakarta," 2024 *12th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, pp. 37–43, 2024, doi: 10.1109/EECCIS62037.2024.10840143.
- [9] S. K. Afridi et al., "Prototype Development of an Automatic and Floating Structured Hydropower Plant," *IEEE Access*, vol. 11, no. October, pp. 109189–109200, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3321710.
- [10] M. A. Wahid and Z. Erwanto, "Perencanaan Dan Penerapan Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro (Pltph) Dengan Turbin Tipe Undershoot," *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV) Ke-6ISAS Publishing Series: Engineering and Science*, vol. 6, no. 1, pp. 81–87, 2020.
- [11] R. MUTHIANI, "SKRIPSI DESAIN GENERATOR MAGNET PERMANEN BERKECEPATAN RENDAH 18 SLOT , 24 KUTUB DENGAN" *Skrripsi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya* ,” 2020.
- [12] R. R. Sattarov and T. Ziganshin, "Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator for Float Buoy Type Wave Energy Converters," 13th *International IEEE Scientific and Technical Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2019 - Proceedings*, no. November, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944704.
- [13] F. Muliawati and T. Ramadhan, "Rancang Bangun Generator Portable Fluks Aksial Magnet Permanen Jenis Neodymium (NdFeB)," *Bogor*, no. V, pp. 38–46, 2017.
- [14] I. N. Darmawan, A. Abidin, M. A. M. Ramadhan, and A. Rizki, "Effect of Magnet Thickness and Width Variation on Back EMF of 18-Slot 16-Pole Permanent Magnet Synchronous Generator," *Applied Engineering, Innovation, and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 39–46, 2024, doi: 10.62777/aeit.v1i1.11.
- [15] S. Rochman and budi prijo Sembodo, "Rancang Bangun Generator Turbin Angin Putaran Rendah," *Issn 0853 – 4403*, vol. 70, pp. 25–34, 2018.
- [16] I. N. Darmawan, B. Dzanazar, and P. Bakti, "Wave Height Monitoring and Security System on Oscillating Water Column Using ESP32 Microcontroller," 2024 *12th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, no. C, pp. 29–36, 2024, doi:10.1109/EECCIS62037.2024.10840039.
- [17] L. Söderlund, J. T. Eriksson, J. Salonen, H. Vihriälä, and R. Perälä, "A permanent-magnet generator for wind power applications," *IEEE Trans Magn*, vol. 32, no. 4 PART 2, pp.2389–2392, 1996, doi: 10.1109/20.511354.
- [18] T. Neodymium et al., "Desain Dan Uji Kinerja Generator Ac Fluks Radial," pp. 34–40, 2015.
- [19] A. Pradana, "Desain Jarak Stator Dengan Rotor Yang Paling Optimal Pada Generator Magnet Permanen," pp. 3–12, 2012.
- [20] A. Fajar, "Rancang Bangun Generator Sinkron Axial Flux Permanent Magnet 1500 Watt," *Jurnal Teknik Energi*, vol. 5, no. 33, pp. 18–36, 2017. S.
- [22] Djebbari, J. F. Charpentier, F. Scuiller, and M. Benbouzid, "Design and Performance Analysis of DoubleStator Axial Flux PM Generator for Rim Driven Marine Current Turbines," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 41, no. 1, pp. 50–66, 2016, doi: 10.1109/JOE.2015.2407691.
- [23] N. Sudrajat and T. Kristiantoro, "Fabrikasi Magnet Permanen Bonded NdFeB untuk Prototipe

Generator,” *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, vol. 9,
no. 1, p. 12, 2013, doi:
10.12962/j24604682.v9i1.831.

- [24] M.Nur Khoslis, “RANCANGAN PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR (PMSG) 12 SLOT 8 POLE DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE MAGNET INFOLYTICA 7.5,” 2020.