

Perancangan *Axial Flux Generator* Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin Turbin Vertikal

Design of Axial Flux Generator for Vertical Wind Turbine Power Plant

Adi Kurniawan Saputro
Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
adi.kurniawan@trunojoyo.ac.id

Riza Alfita
Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
riza.alfita@trunojoyo.ac.id

Oryza Sativa Nugroho
Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
210431100006@student.trunojoyo.ac.id

Achmad Fiqhi Ibadillah
Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
fiqhi.ibadillah@trunojoyo.ac.id

Kunto Aji Wibisono
Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
kunto.ajiw@trunojoyo.ac.id

Diterima : Agustus 2025
Disetujui : April 2026
Dipublikasi : Juli 2026

Abstrak— Penelitian ini membahas tentang merancang dan menguji generator axial flux yang menggunakan magnet permanen neodymium iron boron (NdFeB) untuk digunakan pada turbin angin vertikal dengan kecepatan angin rendah. Tujuan utama penelitian adalah membuat desain generator yang kompak, efisien, serta dapat bekerja dengan baik dalam kondisi kecepatan angin yang rendah. Metode pengembangan dimulai dengan perhitungan jumlah kutub, kumparan, lilitan, dan medan magnet maksimum. Selanjutnya dibuat desain 2D dan 3D dari rotor dan stator dengan konfigurasi 6 pasang kutub atau 12 buah magnet dan 9 kumparan tiga fasa dengan kapasitas perancangan 100 watt. Setelah desain selesai, dilakukan pengujian dengan menggunakan beban resistor dan variasi lampu untuk mengukur kinerja generator.. Hasil pengujian menunjukkan bahwa generator mampu menghasilkan efisiensi yang berbeda-beda tergantung pada beban dan kecepatan putar. Dalam pengujian menggunakan resistor, efisiensi tertinggi dicapai sebesar 89,5% pada kecepatan 402,8 RPM, sedangkan dalam pengujian dengan beban lampu, efisiensi elektrik mencapai 98,46% pada beban 1,5 watt dengan kecepatan 1501 RPM. Namun, efisiensi cenderung menurun pada beban yang lebih besar akibat meningkatnya kerugian tembaga yang terjadi dalam lilitan. Kesimpulannya, generator axial flux yang dirancang ini efektif digunakan pada turbin angin vertikal dengan kecepatan rendah, meskipun masih membutuhkan perbaikan desain agar kinerjanya tetap stabil saat beban tinggi.

Kata Kunci— *Axial Flux Generator; Turbin Angin Vertikal; Magnet NdFeB; Efisiensi; Energi Terbarukan;*

Abstract— *This research discusses the design and testing of an axial flux generator using neodymium iron boron (NdFeB) permanent magnets for use in vertical wind turbines at low wind speeds. The main objective of the research is to create a generator design that is compact, efficient, and can work well in*

low wind speed conditions. The development method begins with calculating the number of poles, coils, windings, and the maximum magnetic field. Next, 2D and 3D designs of the rotor and stator are made with a configuration of 6 pairs of poles or 12 magnets and 9 three-phase coils with a design capacity of 100 watts. After the design is completed, tests are carried out using resistor loads and various lamps to measure the generator's performance. The test results show that the generator is able to produce different efficiencies depending on the load and rotational speed. In the test using a resistor, the highest efficiency was achieved at 89.5% at a speed of 402.8 RPM, while in the test with a lamp load, the electrical efficiency reached 98.46% at a load of 1.5 watts at a speed of 1501 RPM. However, efficiency tends to decrease at higher loads due to increased copper losses in the windings. In conclusion, the designed axial flux generator is effective for use in vertical wind turbines at low speeds, although it still requires design improvements to maintain stable performance at high loads.

Keywords— *Axial Flux Generator; Vertical Wind Turbine; NdFeB Magnet; Efficiency; Renewable Energy;*

I. PENDAHULUAN

Beberapa negara memanfaatkan angin sebagai sumber energi terbarukan yang melimpah dan dapat diperoleh secara alami, khususnya di kawasan pesisir maupun dataran tinggi dengan hembusan angin yang stabil [1]. Indonesia melakukan pengembangan energi terbarukan tidak hanya ditujukan untuk memenuhi kebutuhan energi nasional, tetapi juga sebagai upaya mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yang semakin menipis serta menimbulkan dampak buruk bagi lingkungan [2]. Salah satu teknologi pembangkit listrik yang berkembang adalah *axial flux generator*, yang menawarkan

desain lebih ringkas dan mampu menghasilkan energi dengan tingkat efisiensi tinggi. Keunggulan utamanya terletak pada efisiensi yang optimal [3]. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan kumparan trapesium atau lingkaran standar, penelitian ini mengusulkan desain kumparan berbentuk segitiga dengan ujung tumpul untuk mengoptimalkan penempatan pada stator berdiameter kecil.

Perkembangan teknologi turbin angin dipicu oleh tuntutan global untuk menekan emisi karbon sekaligus menghadapi tantangan perubahan iklim. Di berbagai negara, terutama kawasan Eropa, Amerika Serikat, dan Asia, turbin angin telah berperan penting dalam bauran energi, sehingga mendukung pencapaian target keberlanjutan [4]. Penggunaan energi fosil seperti minyak bumi, gas alam, dan batu bara menghasilkan emisi gas rumah kaca yang berdampak buruk pada lingkungan serta mempercepat pemanasan global. Selain itu, ketergantungan pada sumber energi tersebut juga memicu ketidakstabilan ekonomi akibat keterbatasan pasokan dan perubahan harga yang tidak menentu [5].

Penelitian yang telah dilakukan adalah rancang bangun *axial flux permanent magnet* dengan kutub berlawanan arah menggunakan magnet permanen jenis *neodymium iron boron* (NdFeB). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bila sebuah generator fluks aksial yang menggunakan permanent magnet dengan tipe *neodymium iron boron* dan dengan posisi kutub berlawanan yang berhadapan bisa menghasilkan output generator yang diinginkan [6].

Penelitian ini menganalisis perancangan jarak celah udara pada *axial flux generator*. Tujuannya adalah untuk mengetahui celah udara yang dibutuhkan agar generator dapat menghasilkan daya yang diinginkan. Celah udara pada *generator axial* adalah jarak yang memisahkan rotor dan stator [7]. Selanjutnya, penelitian yang berjudul 'Overview of Axial Flux Permanent Magnet Generator for Small-Scale Industry' membahas jenis konstruksi *axial flux generator*. Konstruksi ini diberi nama *sandwiched construction*, dimana tidak ada tarikan magnet langsung antara *stator* dan *rotor*, yang dapat mengurangi kerugian gesekan [8].

Riset tentang *axial flux generator* menggunakan turbin angin mikro yang dimanfaatkan untuk pertanian skala kecil. Hasil analisis prototipe menunjukkan keseimbangan yang baik antara karakteristik kinerja dan kelayakan konstruksi [3].

Penelitian tentang pengaruh inti stator terhadap performa generator bertujuan untuk menganalisa dan mengamati parameter rapat fluks magnet (B_r) dan fluks magnet (Φ) pada celah udara, dan kapasitas daya nyata (S) pada generator tanpa inti (*coreless stator*) [9].

II. METODE

A. Axial Flux Generator

Salah satu solusi yang paling umum untuk generator turbin angin skala kecil adalah generator fluks aksial. Pada jenis generator ini, komponen normal vektor kerapatan fluks celah udara sejajar dengan sumbu rotasi rotor. Sedangkan pada generator biasa, komponen tersebut tegak lurus dengan sumbu rotasi rotor [10].

Axial flux generator memiliki keuntungan dalam efisiensi dan kepadatan daya, terutama untuk aplikasi turbin angin skala kecil. Desainnya yang lebih ringkas memungkinkan penggunaan yang optimal di ruang terbatas dan mendukung performa tinggi. Oleh karena itu dapat menjadi pilihan yang efisien untuk pembangkit daya berukuran kecil. Prinsip kerja generator fluks aksial sebenarnya mirip dengan generator konvensional yang memiliki fluks radial. Perbedaananya, pada generator fluks aksial terdapat medan magnet tetap yang dihasilkan oleh magnet permanen pada *rotor*, sehingga tidak memerlukan suplai arus searah ke *rotor* [7].

Konstruksi generator memiliki beberapa jenis konstruksi diantaranya adalah *single rotor – single stator*. Konfigurasi jenis ini paling sederhana dan memiliki konstruksi generator yang ringan. Kemudian konstruksi *double rotor – single stator*, Konfigurasi ini memiliki konstruksi dua rotor yang mengapit satu stator.

B. Neodymium Magnet (NdFeB)

Magnet neodymium adalah salah satu jenis *magnet* yang sering digunakan pada perancangan generator. *Magnet neodymium* merupakan jenis *magnet* permanen yang terdiri dari campuran logam *neodymium*, besi, dan boron (NdFeB). *Magnet* tipe ini banyak digunakan karena medan magnet yang sangat kuat dalam ukuran yang kecil. *Magnet* berbahan NdFeB merupakan salah satu jenis *magnet* permanen terkuat saat ini dan memiliki nilai kemagnetan (*remanensi*) yang tinggi, sehingga menghasilkan fluks magnetik yang cukup besar [11].

C. Perhitungan Perancangan Generator

Hal pertama yang dilakukan dalam menentukan konstruksi atau perancangan *axial flux generator* dimulai dengan menentukan jumlah kutub. Menentukan jumlah kutub ini dapat menggunakan persamaan sebagai berikut [6]:

$$p = \frac{120 \times f}{n} \quad (1)$$

dimana:

p : jumlah kutub magnet (pole)

f : frekuensi

n : kecepatan putar (RPM)

Perlu dicatat bahwa pada turbin angin skala kecil (tanpa gearbox/inverter grid-tie), frekuensi akan berubah-ubah sesuai kecepatan angin. Jelaskan bahwa perhitungan ini adalah untuk kondisi nominal/rated, bukan kondisi statis.

Kemudian langkah selanjutnya adalah menghitung medan magnet maksimum menggunakan persamaan berikut ini [6]:

$$B_{max} = B_r \frac{lm}{lm + \delta} \quad (2)$$

dimana:

B_{max} : Kerapatan medan magnet maksimum (T)

B_r : Densitas fluks magnet (T)

δ : Celah udara (m)

lm : Tinggi magnet (m)

Setelah didapatkan jumlah kutub dan medan magnet maksimum, selanjutnya adalah menghitung luas medan magnet. Jika magnet berbentuk persegi panjang maka dapat menggunakan persamaan berikut:

$$A_{magnet} = \text{panjang magnet} \times \text{lebar magnet} \quad (3)$$

Jika magnet berbentuk lingkaran, maka bisa menggunakan persamaan berikut ini [12]:

$$A_{magnet} = \pi \times r^2 \quad (4)$$

dimana:

π : keliling lingkaran

r^2 : jari – jari

Jika terdapat lubang pada magnet, maka dapat menggunakan persamaan berikut ini:

$$A_{magnet} = \frac{\pi(ro^2 - ri^2) - Tf(ro - ri).Nm}{Nm} \quad (5)$$

dimana:

A_{magnet} : Luasan medan magnet (m^2)

π : Keliling lingkaran

ro : Radius luar magnet

ri : Radius dalam magnet

Tf : Jarak antar magnet

Nm : Jumlah magnet

Selanjutnya adalah menghitung nilai fluks maksimal magnet menggunakan persamaan berikut ini [6]:

$$\Phi_{max} = A_{magnet} \times B_{max} \quad (6)$$

dimana:

Φ_{max} : fluks maksimum magnet (Wb)

A_{magnet} : Luasan medan magnet (m^2)

B_{max} : Kerapatan medan magnet maksimum (T)

Setelah didapatkan nilai fluks maksimal magnet, selanjutnya adalah menghitung jumlah kumparan. Perhitungan dapat dilakukan menggunakan persamaan berikut [6]:

$$N_s = p \frac{N_{ph}}{2} \quad (7)$$

dimana:

N_s : Jumlah kumparan

p : Jumlah pole

N_{ph} : Jumlah fasa

Hal terakhir yang dilakukan adalah menentukan tegangan referensi dan juga menghitung jumlah lilitan pada kumparan generator. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$E_A = 4,44 \times N \times f \times \Phi_{max} \times \frac{N_s}{N_{ph}} \quad (8)$$

Untuk menghitung lilitan maka persamaan menjadi [13]:

$$N = \frac{E_A}{4,44 \times f \times \Phi_{max} \times \frac{N_s}{N_{ph}}} \quad (9)$$

dimana:

N : Jumlah lilitan

E_A : Tegangan efektif (V)

N_s : Jumlah kumparan

N_{ph} : Jumlah fasa

f : frekuensi

Φ_{max} : fluks maksimum magnet (Wb)

D. Efisiensi dan Rugi - rugi Daya Generator

Mengetahui rugi - rugi daya serta tingkat efisiensi pada generator sangat penting karena menjadi tolak ukur utama dalam menilai kemampuan generator mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Efisiensi menggambarkan seberapa besar porsi energi mekanik yang berhasil diubah menjadi energi listrik. Semakin tinggi nilai efisiensi, semakin optimal pula kinerja generator tersebut.

Untuk menentukan rugi - rugi daya dari sebuah generator adalah dengan menghitung tahanan belitan. Untuk mengetahui tahanan belitan tersebut hal pertama yang harus diketahui adalah panjang kawat stator, jumlah kawat paralel, konduktifitas listrik dari tembaga, dan luas penampang konduktor. Untuk mengetahui tahanan belitan dapat menggunakan persamaan berikut ini [14]:

$$R_1 = \frac{N_1 \times L_{1av}}{a_w \times \sigma \times S_a} \quad (10)$$

dimana:

R_1 : Hambatan belitan stator (Ohm)

N_1 : Jumlah lilitan

L_{1av} : Panjang kawat stator (meter)

a_w : Jumlah kawat paralel

σ : Konduktifitas listrik tembaga

S_a : Luas penampang konduktor

Setelah didapatkan nilai hambatan belitan pada stator generator, hal selanjutnya yang dilakukan adalah menghitung rugi - rugi pada tembaga stator. Rugi tembaga atau rugi belitan stator, kerugian ini merupakan kerugian ohm yang terjadi dalam belitan stator, dan dapat dihitung dengan rumus berikut [14]:

$$\Delta P_{1w} = m_1 \times I_a^2 \times R_1 \quad (11)$$

dimana:

ΔP_{1w} : kerugian belitan Stator (watt)

m_1 : Arus belitan stator (Ampere)

I_a^2 : Jumlah fasa

R_1 : Hambatan belitan stator (Ohm)

Selanjutnya adalah mencari rugi rugi lain dari generator flux axial. Rugi lain-lain adalah 20% dari total rugi tembaga [14]:

$$\Delta P_{stray} = 20\% \times \Delta P_{1w} \quad (12)$$

dimana:

ΔP_{stray} : Rugi rugi lainnya (watt)

ΔP_{1w} : kerugian belitan Stator (watt)

Selanjutnya adalah menghitung efisiensi dari generator. Effisiensi merupakan suatu ukuran dimana suatu perbandingan rencana penggunaan keluaran dengan hasil penggunaannya. Persamaan rumus effisiensi Adalah [14]:

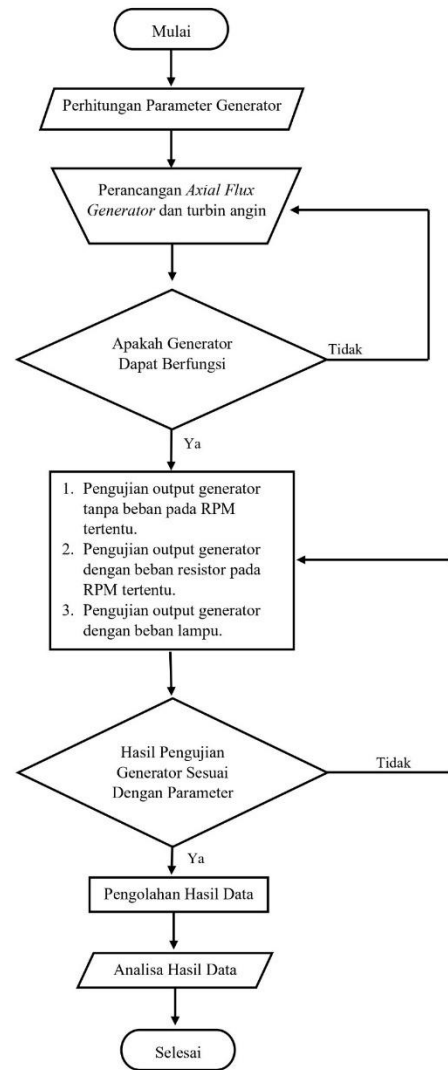
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (13)$$

dimana,

$$P_{in} = P_{out} + \Delta P_{1w} + \Delta P_{stray} \quad (14)$$

E. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan yang disusun dengan sistematis. Proses penelitian ini dimulai dari perhitungan parameter generator. Setelah parameter diperoleh, langkah berikutnya adalah merancang axial flux generator beserta turbin angin. Selanjutnya dilakukan pengujian awal untuk memastikan apakah generator dapat berfungsi dengan baik. Jika generator tidak berfungsi, maka proses kembali pada tahap perancangan. Apabila generator dapat berfungsi, dilanjutkan dengan serangkaian pengujian, yaitu pengujian output generator tanpa beban pada RPM tertentu, pengujian dengan beban resistor pada RPM tertentu, serta pengujian menggunakan beban lampu. Hasil pengujian ini kemudian dibandingkan dengan parameter yang telah ditentukan sebelumnya untuk mengevaluasi kinerja generator.. Jika hasil pengujian tidak sesuai, maka dilakukan evaluasi kembali dengan mengulangi tahap sebelumnya. Namun, jika hasil pengujian sesuai, data yang diperoleh diolah lebih lanjut untuk kemudian dianalisis sehingga dapat ditarik kesimpulan dari seluruh rangkaian proses tersebut. Proses dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan Sistem

Desain axial flux generator ini menggunakan 12 kutub magnet, 9 kumparan dan dengan 3 fasa yang didapatkan dari perhitungan yang telah ditentukan. Hal pertama yang dilakukan adalah menentukan jumlah kutub dengan menggunakan persamaan (1):

$$p = \frac{120 \times f}{n}$$

$$p = \frac{120 \times 50}{1000}$$

$$p = \frac{6000}{1000} = 6 \text{ kutub magnet}$$

Setelah didapatkan jumlah kutub magnet yang diperlukan, selanjutnya adalah menghitung medan magnet. Menurut penelitian Hideo Takeuchi, dkk. yang berjudul *Enhancement Effects of a Neodymium Magnet Mount on Terahertz Electromagnetic Waves from an Ultrafast Photocurrent and Coherent LO Phonons in a GaAs-based epilayer*. Magnet neodymium dengan diameter 25 mm dan tebal 5 mm memiliki densitas magnet sebesar 300mT [15].

$$B_{max} = B_r \frac{lm}{lm + \delta}$$

$$B_{max} = 0,3 \frac{0,005}{0,005 + 0,002}$$

$$B_{max} = \frac{0,0015}{0,007} = 0,214T$$

Selanjutnya adalah menghitung luas medan magnet menggunakan persamaan (4):

$$A_{magnet} = \pi \times r^2$$

$$A_{magnet} = 3,14 \times 0,0125^2$$

$$A_{magnet} = 3,14 \times 0,00015625$$

$$A_{magnet} = 0,000490625 \text{ m}^2$$

Setelah didapatkan nilai medan magnet dan luas magnet, selanjutnya adalah menghitung nilai fluks magnet menggunakan persamaan (6) didapatkan nilai fluks magnet 0.00010499375 Wb.

Langkah selanjutnya adalah menghitung jumlah kumparan menggunakan persamaan (7):

$$N_s = p \frac{N_{ph}}{2}$$

$$N_s = 6 \frac{3}{2} = 9 \text{ kumparan}$$

Setelah didapat semua nilai, selanjutnya adalah menghitung jumlah lilitan yang akan digunakan dalam perancangan generator menggunakan persamaan (9):

$$N = \frac{E_A}{4,44 \times f \times \Phi_{max} \times \frac{N_s}{N_{ph}}}$$

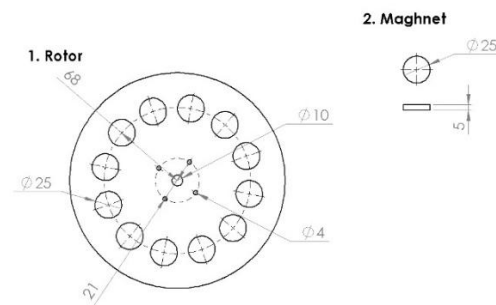
$$N = \frac{20}{4,44 \times 50 \times 0,00010499375 \times \frac{9}{3}}$$

$$N = \frac{20}{0,0699258375} = 286 \text{ lilitan}$$

Setelah menyelesaikan perhitungan perancangan generator, hal selanjutnya yang dilakukan adalah menentukan distribusi kumparan. Pada perhitungan didapatkan jumlah kumparan adalah 9 dan menggunakan sistem 3 fasa, maka jumlah kumparan per fasanya adalah 3. Untuk pola distribusi per fasanya adalah sebagai berikut: fasa R adalah kumparan 1, 4, dan 7, sedangkan fasa S adalah kumparan 2, 5, 8, dan fasa T adalah kumparan 3, 6, 9.

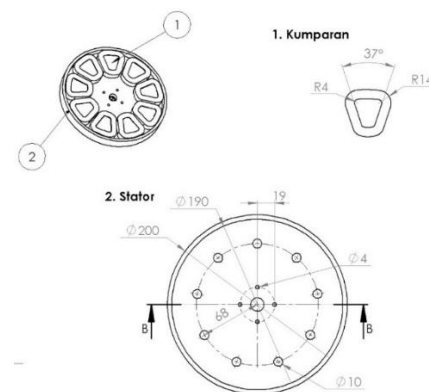
B. Gambar 2D Axial Flux Generator

Pada perancangan desain 2D ini software CAD. Rotor didesain berbentuk lingkaran dengan diameter 21 cm. Kemudian lingkaran tersebut dibagi menjadi 12 titik untuk menentukan penempatan magnet. Penentuan titik tersebut dilakukan dengan cara membagi sudut 360° menjadi 12 bagian. Pembagian tersebut mendapatkan sudut 30° pada setiap titik. Setelah ditentukan titik-titik tersebut maka diberikan gambar berbentuk lingkaran dengan diameter 25 mm. Lingkaran ini bertujuan sebagai tempat magnet pada rotor.



Gambar 2. Desain 2D Rotor Axial Flux Generator

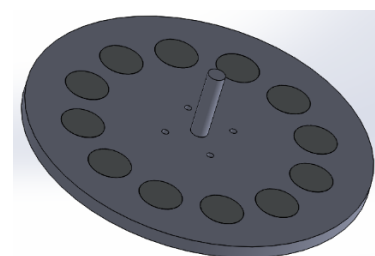
Dapat dilihat pada gambar 2 berikut merupakan desain 2D stator pada axial flux generator. Pada desain ini stator berbentuk lingkaran dengan diameter 21 cm. Bagian sudut 360° stator dibagi dengan 9 titik untuk penempatan lilitan. Pada setiap titik tersebut didapatkan sudut sebesar 40°. Kemudian untuk desain dari lilitannya berbentuk segitiga tumpul dengan bagian alas yang sedikit cembung. Lilitan memiliki ukuran dalam yaitu panjang alas 32 mm, panjang ujung 14 mm, dan tinggi 27 mm. Sedangkan pada area luar memiliki panjang alas 52 mm, panjang ujung 34 mm, dan tinggi 47 mm, dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain 2D Stator Axial Flux Generator

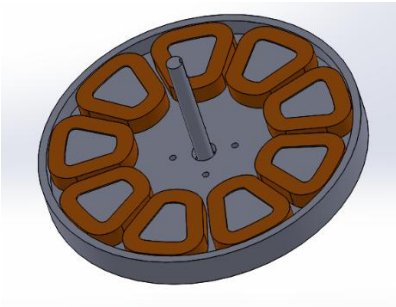
C. Gambar 3D Axial Flux Generator

Desain 3D Rotor Axial Flux Generator ini berbentuk lingkaran dengan diameter 21 cm dan tinggi 8 mm, dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi dalam konversi energi. Pada permukaan rotor terdapat 12 titik tempat magnet yang tersusun melingkar secara merata di sepanjang tepi luar. Hal ini bertujuan untuk menciptakan distribusi medan magnet yang seragam untuk memaksimalkan aliran fluks magnetik dalam sistem generator. Dengan penempatan magnet yang simetris, rotor ini mampu menghasilkan medan magnet yang konsisten dan stabil, sehingga mampu mempertahankan daya keluaran.



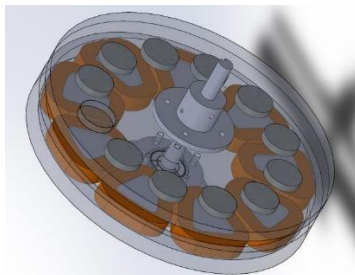
Gambar 4. Desain 3D Rotor Axial Flux Generator

Desain 3D *stator* pada *axial flux generator* dibawah ini berbentuk lingkaran dengan diameter 21 cm dan tinggi 20 mm dapat dilihat pada Gambar 5. Di permukaan *stator* terdapat beberapa slot yang berbentuk segitiga dengan sudut yang tumpul, tersebar secara melingkar pada bagian tepi dalam *stator*. Slot-slot ini dirancang untuk menempatkan kumparan kawat tembaga yang diperlukan untuk menghasilkan fluks magnetik ketika berinteraksi dengan *rotor*. Pola yang merata dan simetris pada slot-slot ini memungkinkan distribusi medan magnet yang efisien dan konsisten di seluruh permukaan *stator*. Sehingga mendukung kestabilan dan efisiensi generator secara keseluruhan.



Gambar 5. Desain 3D *Stator Axial Flux Generator*

Berikut ini untuk desain 3D tampak perspektif dari *axial flux generator* yang dirancang dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Desain 3D *Axial Flux Generator* Tampak Perspektif

D. Hasil Pengukuran Rugi – Rugi Daya Generator

Pengujian generator dilakukan dengan dua jenis beban, yaitu beban resistor, dan variasi lampu. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui rugi – rugi daya yang dihasilkan dari perputaran *axial flux generator*. Tujuan lain dari pengujian ini juga untuk mengetahui apakah perancangan generator ini sudah berjalan optimal.

Untuk mengetahui rugi – rugi daya pada generator yang dilakukan pertama adalah menghitung rugi – rugi tembaga. Pada pengujian ini nilai hambatan belitan *stator* sudah diketahui melalui pengukuran secara langsung menggunakan multimeter dan didapatkan tahanan sebesar 3,3 ohm. Untuk mengetahui rugi rugi daya dari tembaga dapat dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (11):

$$\Delta P_{1w} = m_1 \times I a^2 \times R_1$$

$$\Delta P_{1w} = 3 \times (0,04)^2 \times 3,3$$

$$\Delta P_{1w} = 3 \times 0,0016 \times 3,3$$

$$\Delta P_{1w} = 0,01584 \text{ watt}$$

Setelah mengetahui besarnya rugi – rugi tembaga, selanjutnya adalah menghitung rugi – rugi lainnya. Untuk mengetahui rugi – rugi lainnya dapat menggunakan persamaan (12) sebagai berikut:

$$\Delta P_{stray} = 20\% \times \Delta P_{1w}$$

$$\Delta P_{stray} = 20\% \times 0,01584$$

$$\Delta P_{stray} = 0,003168 \text{ watt}$$

Berikut ini untuk hasil perhitungan rugi rugi daya *axial flux generator* dari pengujian menggunakan resistor 20 ohm 20 wat, dapat dilihat pada Tabel 1.

TABEL 1. RUGI – RUGI DAYA GENERATOR PADA BEBAN RESISTOR

RPM	Tegangan (volt)	Arus (ampere)	Rugi Tembaga (watt)	Rugi Lain (watt)
54.1	0.006	0.17	0.28611	0.057222
106.6	0.133	0.17	0.28611	0.057222
151.4	0.58	0.18	0.32076	0.064152
201.1	1.09	0.15	0.22275	0.04455
253	1.523	0.12	0.14256	0.028512
303.1	1.972	0.08	0.06336	0.012672
352.2	2.48	0.03	0.00891	0.001782
402.8	3.048	0.03	0.00891	0.001782
450.1	3.984	0.04	0.01584	0.003168
504.6	4.09	0.05	0.02475	0.00495
552.9	4.52	0.09	0.08019	0.016038
602.1	4.99	0.15	0.22275	0.04455
649.3	5.28	0.17	0.28611	0.057222
706.4	5.99	0.21	0.43659	0.087318
755.8	6.28	0.27	0.72171	0.144342
800.9	6.89	0.3	0.891	0.1782
850.3	7.23	0.33	1.07811	0.215622
904.6	7.65	0.38	1.42956	0.285912
952.2	8.16	0.42	1.74636	0.349272
1005	8.56	0.45	2.00475	0.40095
1050	8.97	0.47	2.18691	0.437382
1101	9.39	0.5	2.475	0.495
1152	9.82	0.57	3.21651	0.643302
1205	10.29	0.59	3.44619	0.689238
1251	10.68	0.62	3.80556	0.761112
1306	11.18	0.64	4.05504	0.811008
1346	11.91	0.66	4.31244	0.862488
1403	11.86	0.71	4.99059	0.998118
1454	12.31	0.74	5.42124	1.084248
1509	12.89	0.76	5.71824	1.143648

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, terlihat bahwa nilai rugi tembaga dan rugi lain memiliki pola yang cukup berbeda seiring kenaikan putaran (RPM). Rugi tembaga meningkat signifikan seiring dengan kenaikan arus, hingga mencapai 5,71 W pada 1509 RPM dengan arus 0,76A. Sehingga pada kondisi arus besar, kerugian energi akibat resistansi lilitan menjadi dominan. Sementara itu, rugi lain yang mencakup rugi mekanis yaitu gesekan dan udara, juga mengalami kenaikan secara bertahap terhadap RPM. ada kecepatan rendah, rugi lain masih relatif kecil, misalnya 0,057 W pada 54,1 RPM. Nilainya kemudian bertambah seiring bertambahnya putaran, hingga mencapai 1,14 W pada 1509 RPM.

Pada tahap selanjutnya adalah pengujian *axial flux generator* dengan menggunakan beban variasi lampu. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui apakah keluaran dari generator dapat menyuplai kebutuhan berbagai lampu yang ada. Berikut ini untuk hasil perhitungan rugi rugi daya *axial flux generator* dari

pengujian menggunakan beban varian lampu, dapat dilihat pada Tabel 2.

TABEL 2. RUGI – RUGI DAYA GENERATOR PADA BEBAN VARIAN LAMPU

RPM	Beban Lampu	Tegangan (volt)	Arus (ampere)	Rugi Tembaga (watt)	Rugi Lain (watt)
252.1	1,5 watt	3.246	0.16	0.2534	0.0507
504.7		7.29	0.2	0.396	0.0792
752.6		10.9	0.16	0.2534	0.0507
1008		15.04	0.11	0.1198	0.024
1252		18.89	0.07	0.0485	0.0097
1501	3 watt	22.85	0.03	0.0089	0.0018
251.7		2.665	0.2	0.396	0.0792
502.3		2.888	0.13	0.1673	0.0335
750.8		2.996	0.54	2.8868	0.5774
1016		3.789	0.9	8.019	1.6038
1253	5 watt	3.86	1.2	14.256	2.8512
1510		27.96	0.24	0.5702	0.114
253.1		2.619	0.15	0.2228	0.0446
509.1		2.942	0.13	0.1673	0.0335
753.8		3.216	0.54	2.8868	0.5774
1043	10 watt	3.419	0.94	8.7476	1.7495
1253		3.585	1.22	14.735	2.947
1504		3.766	1.49	21.979	4.3958
254.9		4.12	0.2	0.396	0.0792
507.4		7.38	0.18	0.3208	0.0642
753.9	Bohlam Paralel	8.89	0.03	0.0089	0.0018
1020		9.69	0.33	1.0781	0.2156
1260		10.45	0.62	3.8056	0.7611
1503		27.28	0.23	0.5237	0.1047
250.2		0.594	0.08	0.0634	0.0127
508.4		0.978	0.41	1.6642	0.3328
752.3		1.935	0.72	5.1322	1.0264
1018		3.192	0.98	9.508	1.9016
1256		4.25	1.23	14.978	2.9955
1509		5.36	1.42	19.962	3.9925

Pada beban lampu 1,5 watt, arus yang relatif kecil menghasilkan rugi tembaga yang juga kecil, contohnya pada 252,1 RPM arus 0,16 A menghasilkan rugi tembaga 0,253 W, dan semakin menurun ketika arus mengecil di RPM lebih tinggi. Pada beban lampu 3 watt dan 5 watt, ini terjadi karena resistansi internal kawat (3.3 Ohm) terlalu besar relatif terhadap beban, sehingga terjadi *voltage drop* besar. Ini indikasi kawat kumparan terlalu kecil atau lilitan terlalu banyak. Pada beban lampu 10 watt dan lampu paralel, rugi tembaga menjadi semakin dominan, seperti di 1509 RPM dengan arus 1,42 A yang menghasilkan rugi tembaga 19,96 Watt.

Pada rugi lain lebih dipengaruhi oleh kecepatan putar (RPM) dibanding arus. Pada beban 1,5 watt, rugi lain relatif kecil, misalnya 0,0507 W di 252,1 RPM hingga 0,018 W pada 1501 RPM. Pada beban yang lebih besar, rugi lain meningkat, misalnya pada beban 5 watt di 1504 RPM, rugi lain mencapai 4,395 W. Pada lampu paralel di 1509 RPM, rugi lain mencapai 3,992 W.

E. Hasil Perhitungan Efisiensi Generator

Setelah menghitung hasil rugi – rugi daya dari pengujian generator, selanjutnya adalah menghitung efisiensi dari *axial flux generator*. Perhitungan efisiensi ini didasarkan pada efisiensi elektrik (mengabaikan rugi-rugi gesekan mekanik rotor dan bearing), sehingga nilai efisiensi sistem keseluruhan secara riil akan lebih rendah. Efisiensi elektrik dari generator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (13) sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

dimana, harus mencari daya input dengan menggunakan persamaan (14) berikut ini:

$$P_{in} = P_{out} + \Delta P_{1w} + \Delta P_{stray}$$

Untuk perhitungan efisiensi adalah sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P_{1w} + \Delta P_{stray}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{0,15936}{0,15936 + 0,01584 + 0,003168} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{0,15936}{0,178368} \times 100\% = 89,34\%$$

Berikut ini untuk hasil perhitungan efisiensi generator, dapat dilihat pada Tabel 3.

TABEL 3. EFISIENSI ELEKTRIK PADA BEBAN RESISTOR

RPM	Tegangan (volt)	Arus (Ampere)	Daya Output (watt)	Efisiensi (%)
54.1	0.006	0.17	0.00102	0.3
106.6	0.133	0.17	0.02261	6.18
151.4	0.58	0.18	0.1044	21.3
201.1	1.09	0.15	0.1635	38
253	1.523	0.12	0.18276	51.7
303.1	1.972	0.08	0.15776	67.5
352.2	2.48	0.03	0.0744	87.4
402.8	3.048	0.03	0.09144	89.5
450.1	3.984	0.04	0.15936	89.3
504.6	4.09	0.05	0.2045	87.3
552.9	4.52	0.09	0.4068	80.9
602.1	4.99	0.15	0.7485	73.7
649.3	5.28	0.17	0.8976	72.3
706.4	5.99	0.21	1.2579	70.6
755.8	6.28	0.27	1.6956	66.2
800.9	6.89	0.3	2.067	65.9
850.3	7.23	0.33	2.3859	64.8
904.6	7.65	0.38	2.907	62.9
952.2	8.16	0.42	3.4272	62.1
1005	8.56	0.45	3.852	61.6
1050	8.97	0.47	4.2159	61.6
1101	9.39	0.5	4.695	61.3
1152	9.82	0.57	5.5974	59.2
1205	10.29	0.59	6.0711	59.5
1251	10.68	0.62	6.6216	59.2
1306	11.18	0.64	7.1552	59.5
1346	11.91	0.66	7.8606	60.3
1403	11.86	0.71	8.4206	58.4
1454	12.31	0.74	9.1094	58.3
1509	12.89	0.76	9.7964	58.8

Berdasarkan tabel efisiensi generator pada beban resistor, dapat dilihat bahwa kinerja generator sangat dipengaruhi oleh kecepatan putarannya. Pada 54,1 RPM efisiensi hanya mencapai 0,3% dan baru meningkat menjadi 21,3% pada 151,4 RPM. Peningkatan signifikan mulai terlihat pada kisaran 253 RPM dengan efisiensi 51,7%. Generator menunjukkan performa paling optimal pada RPM menengah, yaitu antara 352,2 hingga 552,9 RPM, di mana efisiensi mampu mencapai nilai tertinggi 89,5% pada 402,8 RPM.

Pada tahap selanjutnya adalah pengujian *axial flux generator* dengan menggunakan beban variasi lampu. Berikut ini untuk hasil perhitungan efisiensi generator, dapat dilihat pada Tabel 4.

TABEL 4. EFISIENSI ELEKTRIK PADA BEBAN VARIASI LAMPU

RPM	Beban Lampu	Tegangan (volt)	Arus (ampere)	Daya Output (watt)	Efisiensi (%)
252.1	1,5 watt	3.246	0.16	0.51936	63.07
504.7		7.29	0.2	1.458	75.42
752.6		10.9	0.16	1.744	85.15
1008		15.04	0.11	1.6544	92.01
1252		18.89	0.07	1.3223	95.78
1501		22.85	0.03	0.6855	98.46
251.7	3 watt	2.665	0.2	0.533	52.87
502.3		2.888	0.13	0.37544	65.16
750.8		2.996	0.54	1.61784	31.83
1016		3.789	0.9	3.4101	26.17
1253		3.86	1.2	4.632	21.31
1510		27.96	0.24	6.7104	90.75
253.1	5 watt	2.619	0.15	0.39285	59.51
509.1		2.942	0.13	0.38246	65.58
753.8		3.216	0.54	1.73664	33.39
1043		3.419	0.94	3.21386	23.44
1253		3.585	1.22	4.3737	19.83
1504		3.766	1.49	5.61134	17.54
254.9	10 watt	4.12	0.2	0.824	63.42
507.4		7.38	0.18	1.3284	77.53
753.9		8.89	0.03	0.2667	96.15
1020		9.69	0.33	3.1977	71.2
1260		10.45	0.62	6.479	58.66
1503		27.28	0.23	6.2744	90.9
250.2	Bohlam Paralel	0.594	0.08	0.04752	38.46
508.4		0.978	0.41	0.40098	16.72
752.3		1.935	0.72	1.3932	18.45
1018		3.192	0.98	3.12816	21.52
1256		4.25	1.23	5.2275	22.53
1509		5.36	1.42	7.6112	24.11

Berdasarkan tabel efisiensi generator pada beban variasi lampu, terlihat bahwa performa generator sangat dipengaruhi oleh jenis beban dan besar arus yang ditarik. Pada beban lampu 1,5 watt, efisiensi mencapai nilai tinggi, bahkan hingga 98,46% pada 1501 RPM, menunjukkan bahwa generator bekerja optimal pada beban kecil. Namun, pada beban 3 watt dan 5 watt, efisiensi cenderung menurun drastis ketika arus meningkat, misalnya hanya 17,54% pada 1504 RPM dengan beban 5 watt. Untuk beban 10 watt, efisiensi bervariasi antara 38% hingga 96%, tetapi umumnya lebih rendah dibandingkan beban ringan. Sementara itu, pada beban lampu paralel, efisiensi relatif rendah dengan kisaran 18–24%, akibat arus yang besar sehingga rugi tembaga mendominasi. Secara umum, generator paling efisien bekerja pada beban ringan, sedangkan pada beban lebih besar efisiensi menurun karena meningkatnya rugi daya.

IV. KESIMPULAN

Generator fluks aksial dengan konfigurasi 12 kutub dan 9 kumparan *segitiga tumpul* berhasil dirancang. Sebagai upaya inovasi dalam menciptakan bentuk kumparan baru. Generator yang dirancang memiliki diameter 21 cm, dengan frame stator berbahan akrilik bening setebal 2 cm dan frame rotor setebal 0,8 cm. Di dalam stator dipasang 9 kumparan dengan jarak sudut 40° antar kumparan. Konfigurasi kumparan dibuat 3 fasa dan dirangkai menggunakan sistem star pada ujung awalnya untuk menyediakan titik netral. Pada bagian rotor digunakan 12

buah magnet permanen yang membentuk 6 kutub utara-selatan. Pada beberapa pengujian menunjukan generator ini masih membutuhkan optimalisasi. enerator bekerja optimal pada beban ringan namun mengalami penurunan tegangan signifikan pada beban di atas 10 Watt akibat impedansi stator. Dari hasil pengujian dengan beban resistor nilai efisiensi yang didapatkan berfluktuasi yaitu terendah pada nilai normal 6,18% dan tertinggi adalah 89,5%. Sedangkan pada beban lampu juga nilai efisensi cenderung berfluktuasi sesuai dengan beban yang digunakan. Diperlukan penggunaan diameter kawat yang lebih besar untuk mengurangi rugi tembaga.

REFERENSI

- [1] A. A. Saleh, M. Ammar, And R. Andriyani, "Transformasi Sosial Dan Lingkungan Melalui Energi Terbarukan: Studi Dampak Pltb Sidrap Di Sulawesi Selatan," *Journalish Soc. Gov.*, Vol. 4, No. 5, Pp. 263–274, 2023, [Online]. Available: [Http://Thejournalish.Com/Ojs/Index.Php/Thejournalish/](http://Thejournalish.Com/Ojs/Index.Php/Thejournalish/)
- [2] Kadek Rio Teguh Adnyana, "Jurnal Pacta Sunt Servanda," *J. Pacta Sunt Servanda*, Vol. 3 Nomor 2, No. September, Pp. 32–41, 2022.
- [3] F. Boubakar And A. Aissa, "An Axial Flux Generator For Wind Turbine In Autonomous Low-Power Production," No. August, 2024, Doi: 10.57647/J.Mjee.2024.1802.39.
- [4] M. Rifa'i And E. Herraprastanti, "Rancang Bangun Turbin Angin Archimedes," *Repos. Sttr*, Vol. 4, No. 2, Pp. 1–5, 2021, [Online]. Available: <https://www.sttrcepu.ac.id/jurnal/index.php/jtm/article/view/203%0ahttps://www.sttrcepu.ac.id/jurnal/index.php/jtme/article/download/203/132>
- [5] K. N. Asean, S. Yana, A. Yulisma, And T. M. Zulfikar, "Manfaat Sosial Ekonomi Energi Terbarukan :," Vol. Vii, No. 1, Pp. 2587–2600, 2022.
- [6] P. P. Pratama, W. Hadi, And W. Cahyadi, "Rancang Bangun Generator Axial Flux Permanent Magnet (Afpm) Multicakram 1 Fasa Dengan Kutub Berlawanan (N-S) Menggunakan Magnet Permanen Neodymium Iron Boron (Ndfeb)," *Transmisi*, Vol. 23, No. 2, Pp. 58–67, 2021, Doi: 10.14710/Transmisi.23.2.58-67.
- [7] S. Syafriyudin And M. Suyanto, "Analisis Perencanaan Jarak Celah Udara Pada Generator Axial," *J. Electr. Power Control Autom.*, Vol. 4, No. 1, P. 22, 2021, Doi: 10.33087/Jepca.V4i1.48.
- [8] N. A. Mostaman, E. Sulaiman, And M. Jenal, "Overview Of Axial Flux Permanent Magnet Generator For Small-Scale Industry," *Iop Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, Vol. 1261, No. 1, 2023, Doi: 10.1088/1755-1315/1261/1/012004.
- [9] H. Prasetyo, "Pengaruh Inti Stator Terhadap Performa Generator Magnet Permanen Fluks Aksial Satu Fasa," *Jrst (Jurnal Ris. Sains Dan Teknol.)*, Vol. 6, No. 2, P. 165, 2022, Doi: 10.30595/Jrst.V6i2.13668.
- [10] F. Kutt, K. Blecharz, And D. Karkosinski, "Axial-Flux Permanent-Magnet Dual-Rotor Generator For

A Counter-Rotating Wind Turbine,” *Energies*, Vol. 13, No. 11, Pp. 1–15, 2020, Doi: 10.3390/En13112833.

- [11] S. Syam, “Rancang Bangun Generator Aksial Dengan Menggunakan Magnet Permanen Ndfeb Persegi Panjang,” *J. Media Elektro*, Vol. X, No. 2, Pp. 57–64, 2021, Doi: 10.35508/Jme.V10i2.4753.
- [12] F. N. Qomariyah, W. Hadi, And W. Cahyadi, “Analisis Pengaruh Perbedaan Aluminium Dan Akrilik Sebagai Kerangka Penyusun Generator Axial Flux 12 Slot 8 Pole,” *J. Arus Elektro Indones.*, Vol. 8, No. 1, P. 8, 2022, Doi: 10.19184/Jaei.V8i1.28476.
- [13] N. Normansyah, “Rancang Bangun Generator Magnet Permanen 16 Kutub Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin,” *Electr. Netw. Syst. Sources*, Vol. 1, No. 2, Pp. 21–26, 2022, Doi: 10.58466/Entries.V1i2.1120.
- [14] A. Fajar, “Rancang Bangun Generator Sinkron Axial Flux Permanent Magnet 1500 Watt,” 2017, *J. Tek. Energi*, 5 (33).
- [15] H. Takeuchi, Y. Sengi, S. Matsuoka, And K. Matunaga, “Enhancement Effects Of A Neodymium Magnet Mount On Terahertz Electromagnetic Waves From An Ultrafast Photocurrent And Coherent Lo Phonons In A Gaas-Based Epilayer,” *Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, Irmmw-Thz*, No. 001, Pp. 1–2, 2023, Doi: 10.1109/Irmmw-Thz57677.2023.10299046.