



DESAIN DAN PERFORMA *AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET GENERATOR* (AFPMG) TIGA FASA UNTUK TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL TIPE UGRINSKY

Theo Joenathan Arung Laby¹, Achmad Kurniawan², Chaerul Qalbi Am³, Diniar Mungil Kurniawati^{4*}

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi Kalimantan

^{3,4} Pusat Studi dan Rekayasa Energi Terbarukan Berbasis Fluida (CFRESE) Institut Teknologi Kalimantan

Jl Soekarno Hatta Km. 15 Karang Joang, Balikpapan, Indonesia

Email : diniarmungil@lecturer.itk.ac.

Dikimkan: 10 Desember 2023

Direvisi: 9 Juli 2025

Diterima: 26 Juli 2025

Abstrak

Turbin angin sumbu vertikal (TASV) memiliki beberapa keunggulan, salah satunya adalah mampu menerima angin dari segala arah. Namun, TASV juga memiliki kelemahan, yaitu efisiensi konversi energinya yang rendah. Permasalahan yang umum terjadi pada teknologi turbin angin adalah sistem konversi energi listrik berupa jenis generator yang digunakan. Berdasarkan beberapa penelitian, jenis generator yang paling sesuai untuk turbin angin sumbu vertikal adalah axial flux permanent magnet generator (AFPMG). Penelitian ini bertujuan untuk merancang AFPMG berbasis model kumparan melingkar guna memperoleh kinerja turbin angin yang optimal. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah proses desain mekanik dengan menentukan rancangan dan kemampuan kerja dari turbin angin. AFPMG yang dirancang untuk dipasang pada turbin angin diuji pada kecepatan angin konstan guna mengatur putaran poros yang diukur. Berdasarkan hasil pengujian, semakin tinggi kecepatan putaran rotor, maka semakin tinggi tegangan yang dihasilkan. Pada kecepatan putaran 400 rpm, generator AFPM mampu menghasilkan tegangan AC rata-rata sebesar 1,055 Volt. Generator AFPM juga dilengkapi dengan penyearah (rectifier) untuk mengubah tegangan AC menjadi DC dan menghasilkan tegangan DC rata-rata pada kecepatan 400 rpm sebesar 1,193 Volt. Efisiensi yang dihasilkan oleh AFPMG juga cenderung rendah, yaitu sebesar 0,0006%.

Kata kunci: AFPMG, Generator, Turbin Angin, Ugrinsky

Abstract

Vertical axis wind turbines (VAWT) have advantages, one of which is that they can receive wind from all directions. However, it also has the disadvantage of having low energy conversion capability. The problem that usually occurs in the electrical energy conversion system in wind turbines is the type of generator used. Based on several studies, the type of generator that is suitable for vertical axis wind turbines is the axial flux permanent magnet generator (AFPMG). This research aims to design an AFPMG based on a circular coil model in order to obtain optimum wind turbine performance values. The method used in this research is a mechanical design process by determining the design and working capabilities of the wind turbine. The AFPMG designed to be installed with a wind turbine is tested at a constant wind speed in order to regulate the measured shaft rotation. Based on the test results, the higher the rotor rotation speed, the higher the voltage produced. At a rotational speed of 400 rpm, the AFPM generator can produce an average AC voltage of 1,055 Volts. The AFPM generator was also provided with a rectifier to convert AC voltage to DC and obtained an average DC voltage at a rotational speed of 400 rpm of 1.193 Volts. The efficiency produced by AFPMG also tends to be low at 0.0006%.

Keyword: AFPMG, Generator, Ugrinsky, Wind Turbin

PENDAHULUAN

Indonesia tidak memiliki kecepatan angin rata-rata yang tinggi seperti negara-negara empat musim. Kecepatan angin rata-rata di Indonesia tergolong rendah, yaitu berkisar antara 3 m/s hingga 5 m/s. Oleh karena itu, diperlukan turbin angin yang mampu berputar dalam kondisi kecepatan angin rendah. Turbin angin sumbu vertikal memiliki torsi yang tinggi sehingga dapat berputar pada kondisi kecepatan angin rendah [1]. Pada kecepatan angin yang relatif rendah, putaran yang dihasilkan oleh turbin angin sumbu vertikal juga cukup rendah, sehingga dibutuhkan generator yang mampu menghasilkan listrik pada putaran rendah.

Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) belakangan ini semakin menarik minat untuk keperluan pengumpulan energi, terutama di wilayah dengan kecepatan angin rendah. Turbin sumbu vertikal menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan dengan Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH), karena memiliki biaya pembuatan dan perawatan yang rendah, skalabilitas yang baik, daya tahan tinggi, serta tingkat kebisingan yang rendah [2].

TASV sering kali dirancang tanpa menggunakan gearbox, namun hal ini menyebabkan kecepatan turbin menjadi relatif rendah, terlebih lagi pada kecepatan angin yang juga rendah. Oleh karena itu, generator pada jenis turbin ini harus dirancang dengan nilai densitas torsi yang tinggi untuk mengurangi beban torsi. Dalam hal ini, mesin AFPMG menjadi alternatif yang potensial karena dapat membantu mencapai densitas torsi yang lebih tinggi dan mengurangi bobot tembaga dan inti, serta meningkatkan efisiensi dan pertukaran panas dibandingkan dengan mesin aliran radial [3].

AFPMG merupakan generator yang dapat menghasilkan listrik dalam kondisi kecepatan putaran rotor yang rendah [4]. Generator AFPM menggunakan magnet permanen pada bagian rotornya sehingga mampu menghasilkan energi listrik saat berputar. Dibandingkan dengan generator konvensional, desain AFPM lebih mudah diproduksi dan lebih sederhana dalam penggunaannya. Generator tipe aksial memiliki rotor dan stator yang diposisikan tegak lurus terhadap sumbu [5].

Sistem tradisional menggunakan gearbox untuk menghubungkan turbin angin dengan generator, sehingga menimbulkan banyak permasalahan seperti kompleksitas pengendalian, kelelahan material tinggi, kebisingan, dan kebutuhan perawatan yang besar. Oleh karena itu, pendekatan terbaru pada sistem energi angin adalah *direct drive* tanpa gearbox yang dikenal sebagai sistem kecepatan variabel. Sistem ini memiliki performa kecepatan rendah yang unggul dan kemampuan menangkap energi yang lebih besar, namun karena kecepatan operasinya rendah, diperlukan generator dengan jumlah kutub yang banyak [6].

Generator *Axial Flux Permanent Magnet* (AFPM) adalah generator sederhana yang mampu bekerja pada kecepatan putar rendah, cocok untuk aplikasi turbin angin yang beroperasi pada kecepatan angin yang relatif rendah. Teknologi ini sangat cocok diterapkan di Indonesia, yang memiliki rata-rata kecepatan angin antara 3 hingga 6 m/s [7]. Generator AFPM dapat menjadi solusi yang sangat berguna dalam penyediaan listrik ke daerah terpencil. Prinsip kerja generator AFPM adalah bahwa tegangan akan muncul pada kawat saat kawat tersebut bergerak dalam medan magnet, sehingga memotong garis-garis medan magnet [8].

Ukuran permukaan magnet permanen memiliki pengaruh yang signifikan; semakin besar luas permukaannya, maka semakin tinggi fluks magnetik yang dihasilkan oleh magnet permanen, sehingga gaya gerak listrik (EMF) yang diinduksi juga meningkat [9]. Stator merupakan bagian yang tidak berputar atau diam, pada generator, stator berisi kumparan kawat berlapis enamel yang disusun sedemikian rupa sesuai dengan jumlah lilitan, jarak antar lilitan (pitch factor), dan perbedaan sudut antar fase [10]. Dengan demikian, dapat dihasilkan tegangan 3 fase yang memiliki sudut 120 derajat antar fase [4].

Kumparan stator berfungsi untuk membentuk tegangan induksi pada generator dan dirancang untuk menghasilkan kutub elektromagnetik stator yang sejajar dengan kutub magnet rotor. Kumparan stator diletakkan mengelilingi poros stator. Besarnya daya yang dihasilkan oleh generator sangat dipengaruhi oleh jumlah lilitan pada stator. Tegangan induksi tergantung pada jumlah lilitan per kumparan, sedangkan jumlah fase yang dihasilkan oleh konfigurasi magnetik bergantung pada jumlah kumparan [10]. Rotor berfungsi menghasilkan medan magnet menggunakan magnet permanen. Pada rotor terdapat jumlah kutub magnet yang akan memengaruhi jumlah putaran per menit yang diperlukan untuk menghasilkan frekuensi yang diinginkan [4]. Magnet memiliki peran yang sangat penting dalam fungsi generator. Fungsinya adalah menciptakan fluks magnetik yang digunakan untuk menginduksi gaya gerak listrik (EMF) pada kumparan yang dipasang.

Namun, generator AFPMG kecepatan rendah masih jarang ditemukan di pasaran. Dengan dilakukannya penelitian ini, diharapkan dapat dirancang generator AFPMG yang efisien untuk mengevaluasi energi yang dihasilkan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan AFPMG di masa yang akan datang.

METODE PENELITIAN

Desain Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT)

Turbin angin sumbu vertikal (VAWT) digunakan untuk menghasilkan energi mekanik yang digunakan untuk memutar generator AFPM. Turbin angin vertikal yang digunakan adalah turbin angin Ugrinsky, yaitu hasil modifikasi dari turbin angin Savonius dan termasuk dalam jenis turbin angin tipe hambat (drag type). Turbin ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 di bawah. Beberapa parameter turbin angin Ugrinsky dalam penelitian ini antara lain luas sapuan sebesar 0,16 dengan rasio aspek sebesar 1.



Gambar 1. Turbin Angin Sumbu Vertikal Ugrinsky

Data dan Desain AFPMG

Kebutuhan desain AFPMG berdasarkan pada kebutuhan desain turbin angin (Tabel 1). Daya angin diperoleh dari kecepatan angin yang menggerakkan poros turbin sehingga turbin berputar dan menghasilkan torsi yang kemudian disebut sebagai daya mekanik. Total daya yang dapat ditransmisikan pada turbin angin bergantung pada nilai kecepatan angin dan ukuran turbin.

Tabel 1. Data yang dibutuhkan pada desain AFPMG

Kebutuhan Data	Nilai	Satuan
Kecepatan angin (v)	2.5	m/s
Kecepatan putar rotor (n)	103.98	rpm
Luas sapuan turbin (A_T)	0.16	m ²
Daya angin (P_{wind})	1.5	Watt

Kebutuhan Data	Nilai	Satuan
Kecepatan sudut (ω)	10.889	rad/s

Daya angin (P_{wind}) dapat ditentukan menggunakan Persamaan 1 sebagai fungsi dari densitas angin atau ρ (kg/m^3), A_T merupakan luas sapuan turbin (m^2) dan v adalah kecepatan angin (m/s) [12].

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A_T V^3 \quad (1)$$

Sebuah turbin angin dalam kondisi ideal dapat menghasilkan efisiensi sebesar 59.3% dari energi yang dimiliki oleh angin pada kecepatan tertentu. Turbin angin paling praktis dengan tiga bilah mencapai efisiensi keseluruhan sekitar 50% [12]. Daya mekanik turbin angin (P_T) dalam Persamaan 2 merupakan fungsi dari nilai torsi (Nm) dan ω atau kecepatan sudut (rad/s).

$$P_T = T \cdot \omega \quad (2)$$

Daya yang dihasilkan rotor bergantung pada kemampuan rotor untuk menerima dan mentransfer energi. Kinerja turbin angin ditunjukkan oleh nilai koefisien daya (C_p) dan koefisien torsi (C_T). C_p didefinisikan sebagai rasio antara daya aktual (daya mekanik atau daya listrik) yang dihasilkan rotor dengan daya angin yang tersedia. Oleh karena itu, C_p dapat dihitung menggunakan Persamaan 3 berikut ini [3].

$$C_p = \frac{P_T}{P_{wind}} = \frac{P_T}{\frac{1}{2} \rho A_T V^3} \quad (3)$$

C_T menunjukkan seberapa efisien turbin mengubah energi angin menjadi torsi mekanis pada poros rotornya. C_T dapat dihitung menggunakan Persamaan 4 berikut dimana T_{th} adalah torsi teoritis [13].

$$C_T = \frac{T}{T_{th}} = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A_T V^2 R} \quad (4)$$

Desain AFPMG dan Pengujian

Pada tahap ini dilakukan perancangan stator dan rotor. Stator menentukan jumlah magnet yang akan digunakan, ukuran magnet yang akan digunakan, bentuk magnet, dan diameter stator yang akan digunakan. Rotor menentukan jumlah kumparan yang akan digunakan, jumlah lilitan pada setiap kumparan, bentuk kumparan, dan diameter rotor yang akan digunakan. Medan magnet yang melewati medan stator akan membentuk fluks magnet (ϕ). Besarnya fluks magnet yang dihasilkan berbanding lurus dengan rapat fluks (B_{max}) pada inti dan luas penampang inti (A_{magn}), sehingga dinyatakan pada Persamaan 5 di bawah ini [13].

$$\phi = B_{max} \cdot A_{magn} \quad (5)$$

Sementara itu, kerapatan fluks (B_{max}) dapat ditentukan menggunakan Persamaan 6 berikut dengan ketebalan magnetik (lm) dan celah udara (δ) dalam satuan meter [14].

$$B_{max} = Br \frac{lm}{lm + \delta} \quad (6)$$

Untuk nilai A_{magn} diperoleh dengan menggunakan Persamaan 7 berikut dimana r_0 menunjukkan jari-jari luar magnet (m), r_i adalah diameter dalam magnet (m), jarak antara magnet (T_f) dan N_{magn} menunjukkan jumlah magnet [14].

$$A_{magn} = \frac{\pi \cdot (r_0^2 - r_i^2) - T_f (r_0 - r_i) \cdot N_m}{N_m} \quad (7)$$

Kemudian frekuensi (f) dalam Hz yang dihasilkan oleh generator dapat dihitung menggunakan Persamaan 8 berikut [15].

$$f = \frac{n \times N_m}{120} \quad (8)$$

Untuk menentukan jumlah kumparan (Q) yang digunakan dalam perancangan generator dapat menggunakan Persamaan 9 [16] berikut ini.

$$\frac{2Q}{3N_{magn}} = 0,5 \quad (9)$$

Tegangan induksi (E_{rms}) dalam Volt pada setiap fasa pada stator tiga fasa dapat ditentukan menggunakan Persamaan 10 dimana N_c adalah jumlah kumparan dan ϕ menunjukkan fluks magnet (W_b) [15].

$$E_{rms} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N_c \cdot \phi \cdot f \quad (10)$$

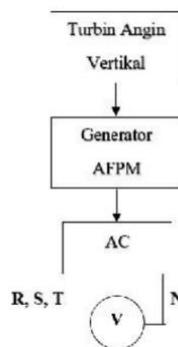
Daya listrik yang dihasilkan oleh generator dengan keluaran arus searahDC dapat dihitung menggunakan Persamaan 11 berikut [17].

$$P_G = V_t \times I \quad (11)$$

Kemudian efisiensi generator (η) dapat dihitung menggunakan Persamaan 12 di bawah ini dimana P_{out} atau daya keluaran (Watt) dan P_{in} adalah daya masukan (Watt) [15].

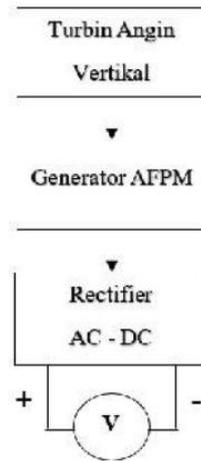
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (12)$$

Setelah perancangan, model 3D stator dan rotor dibuat menggunakan perangkat lunak CAD. Setelah itu, stator dan rotor dicetak menggunakan pencetakan 3D menggunakan material *Polylactic Acid* (PLA). Pencetakan setiap komponen generator dicetak secara terpisah. Setelah pencetakan, generator dirakit. Generator dipasang pada poros yang terhubung ke turbin angin. Kemudian, periksa menggunakan multimeter untuk mengetahui apakah ada arus dan tegangan yang dihasilkan oleh generator. Jika generator tidak menghasilkan arus dan tegangan, berarti generator tidak dapat beroperasi. Pengujian AFPMG dilakukan tanpa pembeban guna mendapatkan nilai tegangan dan arus AC dari output AFPMG terhadap kecepatan putar rata-rata turbin angin seperti pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2 Blok diagram pengambilan data arus dan tegangan AC

kemudia pengujian juga dilakukan pada AFPMG dengan penyearah untuk mendapatkan data tegangan DC dan arus DC rata-rata dari output AFPMG terhadap kecepatan putar rata-rata yang dihasilkan turbin angin vertikal. Adapun skema pengujian yang digunakan dapat ditunjukkan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3 Blok diagram pengambilan data data arus dan tegangan DC

Data tegangan rata-rata dan arus rata-rata baik AC maupun DC dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Data tegangan dan arus

Kecepatan Putar (rpm)	Tegangan DC (V)	Arus DC (mA)	Daya Listrik (Watt)
103,98	0,234	0,01	$2,430 \times 10^{-6}$
202,92	0,513	0,5	$2,547 \times 10^{-4}$
309,66	0,895	1,21	$1,078 \times 10^{-3}$
401,52	1,193	2,16	$2,573 \times 10^{-3}$

HASIL DAN PEMBAHASAN

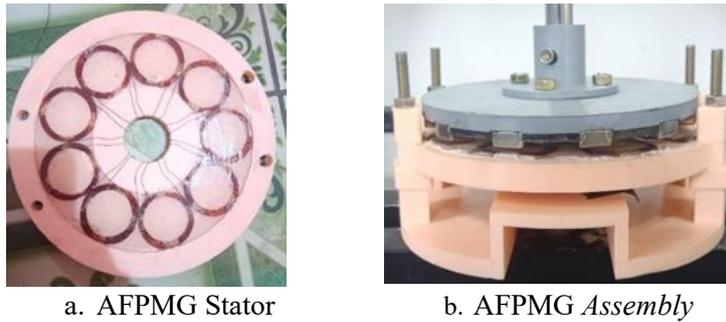
Desain rotor dibuat menggunakan perangkat lunak dan menyesuaikan dimensi serta jumlah magnet yang digunakan. Setelah desain rotor selesai, data diperoleh mengenai jarak antar magnet, jari-jari luar magnet, dan jari-jari dalam magnet yang akan digunakan untuk langkah selanjutnya. Jari-jari dalam magnet adalah jarak dari sumbu ke dasar magnet, sedangkan jari-jari luar magnet adalah jarak dari sumbu ke bagian luar magnet seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah ini. Data desain rotor dapat dilihat pada Tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3. Data desain rotor AFPMG

Data	Nilai	Satuan
Panjang magnet	5	cm
Lebar magnet	1.82	cm
Tebal magnet	1	cm
Jarak antar magnet	3	cm
Sudut antar magnet	30	°
Jari-jari dalam magnet	4.19	cm
Jari-jari luar magnet	9.19	cm
Diameter rotor	18.47	cm

Data	Nilai	Satuan
Jumlah magnet	12	-
Tipe magnet	<i>Neodymium</i>	-

Perakitan AFPMG dilakukan setelah komponen utamanya (rotor dan stator) telah selesai dibuat. Perakitan dilakukan dengan menempatkan rotor berhadapan dengan stator, dan memberikan celah udara 4 mm yang telah ditentukan sebelumnya untuk memaksimalkan efisiensi medan magnet. Setelah rotor dan stator dipasang berdampingan, keduanya kemudian dirakit ke dalam casing generator dengan tujuan melindunginya dari kerusakan fisik eksternal. Komponen dan perakitan generator ditunjukkan pada Gambar 5.



a. AFPMG Stator

b. AFPMG Assembly

Gambar 5. AFPM Generator

Jumlah kumparan yang ditentukan adalah 9 kumparan. Setiap kumparan akan dibagi menjadi tiga kelompok untuk tiga fasa, yaitu R, S, dan T. Setiap fasa akan terdiri dari 3 set kumparan di mana fasa R memiliki tiga set kumparan, fasa S memiliki tiga set kumparan, dan fasa T memiliki tiga set kumparan. Kemudian, setiap set kumparan tersebut diletakkan pada slot yang berbeda, di mana slot tersebut terdiri dari tiga bagian (A, B, dan C) dengan selisih 120 derajat. Lilitan kumparan harus sesuai dengan arah putaran rotor, di mana jika kumparan fasa R dililitkan searah jarum jam, maka kumparan fasa S dan T juga harus dililitkan searah jarum jam. Desain stator dibuat untuk memudahkan pemasangan kumparan dan pengolahan resin. Oleh karena itu, tempat untuk kumparan pada stator dibuat di dalam. Dari hasil perhitungan, didapatkan bahwa luas magnet permanen yang dihasilkan rotor AFPMG adalah 0,0002514 m². Kerapatan fluks maksimum yang dihasilkan oleh magnet permanen adalah 1,01429 T. Fluks maksimum yang dihasilkan oleh AFPMG adalah 0,000255 W_b. Tegangan keluaran yang dihasilkan oleh AFPMG adalah 0,340 V_{AC}.

Perbedaan antara tegangan AC hasil perhitungan teoritis dan tegangan AC hasil pengujian terjadi karena beberapa faktor. Keterbatasan dalam proses perhitungan teoritis tidak dapat memprediksi perubahan beberapa parameter. Kemudian, terdapat faktor peralatan yang kurang akurat dalam pengukuran. Kemudian, terdapat faktor-faktor selama proses pembuatan dan perakitan komponen AFPMG, serta faktor-faktor kondisi yang tidak ideal. Pengujian yang dilakukan dapat menunjukkan perbedaan keluaran AFPMG yang tidak terlihat dalam perhitungan teoritis. Data perbandingan nilai tegangan yang dibandingkan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan data teoritis dan aktual

Kecepatan putar (rpm)	Tegangan AC teoritis (V)	Tegangan AC aktual (V)		
		R	S	T
103,98	0,342	0,210	0,205	0,214
202,92	0,637	0,498	0,496	0,503
309,66	0,956	0,801	0,778	0,804
401,52	1,247	1,055	1,027	1,038

Tabel 5 menunjukkan karakteristik distribusi data arus DC terhadap kecepatan putar. Pada grafik di atas, terlihat bahwa arus DC relatif homogen pada semua kecepatan putar. Arus DC pada kecepatan putar 100 rpm sangat homogen tanpa variasi dengan nilai arus 0,01 mA. Hal ini terjadi karena kalibrasi alat ukur multimeter. Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa arus DC cukup homogen pada berbagai kecepatan putar dengan

variasi yang kecil, terutama pada kecepatan putar 100 rpm yang nilainya didasarkan pada kalibrasi alat ukur multimeter. Homogenitas ini berarti arus yang dihasilkan konsisten.

Table 5. Data arus DC

Kecepatan putar (rpm)	Min.	Q1	Q2	Q3	Max.
100	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
200	0,470	0,480	0,500	0,510	0,520
300	1,070	1,170	1,200	1,250	1,310
400	2,070	2,128	2,160	2,180	2,270

Data daya mekanik yang dihasilkan turbin angin vertikal dan daya listrik yang dihasilkan AFPMG diolah untuk mendapatkan nilai efisiensi. Nilai efisiensi yang diperoleh menunjukkan kinerja AFPMG. Nilai efisiensi AFPMG pada berbagai kecepatan putaran dapat dilihat pada Tabel 6 di bawah ini.

Tabel 6. Efisiensi AFPMG

Daya Mekanik (Watt)	Daya Listrik (Watt)	Efisiensi (%)
0,40	$2,430 \times 10^{-6}$	0,0006
6,93	$2,547 \times 10^{-4}$	0,0037
29,22	$1,078 \times 10^{-3}$	0,0037
61,32	$2,573 \times 10^{-3}$	0,0042

Nilai efisiensi yang dihasilkan oleh AFPMG berdasarkan hasil eksperimen diperoleh nilai sangat rendah karena nilai daya listrik yang dihasilkan oleh AFPMG rendah. Daya listrik merupakan nilai dari arus dan tegangan yang dihasilkan. Walaupun nilai tegangan listrik yang dihasilkan oleh AFPMG tidak jauh dari nilai tegangan teoritis, namun arus listrik yang dihasilkan sangat rendah, sehingga menyebabkan daya listrik yang dihasilkan rendah. Berdasarkan hasil identifikasi pada desain AFPMG, jumlah lilitan untuk setiap kumparan pada proses pembuatan stator adalah 30 lilitan per kumparan, sesuai dengan proses perancangan dan perhitungan awal. Nilai fluks maksimum dipengaruhi oleh luas medan magnet dan kerapatan fluks maksimum, sedangkan medan magnet dipengaruhi oleh jumlah magnet, jarak antar magnet, jari-jari dalam dan luar magnet. Kerapatan fluks maksimum dipengaruhi oleh ketebalan magnet, induksi magnetik sisa, dan celah udara. Apabila salah satu parameter yang mempengaruhi nilai fluks magnetik tidak optimal, maka fluks magnetik yang dihasilkan rendah, sehingga mengakibatkan tegangan dan arus listrik yang dihasilkan rendah.

Dalam penelitian ini, perhitungan teoritis mengasumsikan nilai residu magnet permanen dengan kekuatan optimal dan stabil sesuai dengan spesifikasi magnet. Magnet permanen juga dapat mengalami penurunan kekuatan magnetnya, yang disebut de-magnetisasi. Jika magnet mengalami penurunan kekuatan magnetnya, fluks magnet yang dihasilkan juga akan berkurang. Jika kumparan tidak dililit dengan rapat, fluks magnet tidak dapat didistribusikan secara merata ke seluruh kumparan. Fluks magnet yang tidak terinduksi secara optimal dalam kumparan akibat fluks magnet yang tidak merata menyebabkan arus listrik yang dihasilkan berfluktuasi dan cenderung rendah. Daya listrik dan efisiensi AFPMG dapat ditingkatkan dengan memperhatikan beberapa aspek dalam desain dan konstruksi generator yang harus dioptimalkan.

KESIMPULAN

Efisiensi keseluruhan AFPMG masih sangat rendah meskipun daya mekanik yang ditransmisikan pada rotor generator meningkat. Peningkatan daya listrik yang dihasilkan tidak sebanding dengan peningkatan daya mekanik yang ditransmisikan, sehingga menyebabkan efisiensi AFPMG rendah dan berdampak pada kinerja generator. Oleh karena itu, optimasi diperlukan dalam perancangan AFPMG untuk meningkatkan efisiensinya secara signifikan dengan memperhatikan beberapa parameter yang sangat memengaruhi nilai daya listrik yang dihasilkan AFPMG.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh BIMA Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Pendidikan Tinggi melalui hibah penelitian 2023 (111/E5/PG.02.00.PI/2023) dan makalah ini untuk mendukung pengembangan penelitian Pusat Studi dan Rekayasa Energi Terbarukan Berbasis Fluida (CFRESE) ITK.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] Nakhoda, Y.I., Saleh, C., 2015. Rancang Bangun Kincir Angin Sumbu Vertikal Pembangkit Pembangkit Tenaga Listrik Portabel. *Semin. Nas. Sains dan Teknol. Terap.* 3, 59–68.
- [2] Rezaeiha, A., Kalkman, I., dan Blocken, B. (2017). Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Applied Energy*, 197, 132–150. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.128>.
- [3] Ghaheri, A., Akbar, M. A., Torkaman, H., dan Afjei, E. (2019). *Design, modelling and optimisation of a slot-less axial flux permanent magnet generator for direct-drive wind turbine application* (pp. 1327–1338).
- [4] Soehada, A. M. S., dan Simbolon, S. (2020). Perancangan Generator Magnet Permanen Fluks Aksial pada Turbin Crossflow dengan Variasi Head dan Celah Udara. *Perancangan Generator Magnet Permanen Fluks Aksial Pada Turbin Crossflow Dengan Variasi Head Dan Celah Udara Achmad*, 3(2), 29–33.
- [5] Herudin, H., Prasetyo, W.D., 2016. Rancang Bangun Generator Sinkron 1 Fasa Magnet Permanen Kecepatan Rendah 750 RPM. *Setrum Sist. Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer* 5, 11. <https://doi.org/10.36055/setrum.v5i1.886>.
- [6] Laxminarayan, S.S., Singh, M., Saifee, A.H., Mittal, A., 2017. Design , modeling and simulation of variable speed Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator. *Sustain. Energy Technol. Assessments* 19, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.01.004>.
- [7] Fajar, A., 2017. Rancang Bangun Generator Sinkron Axial Flux Permanent Magnet 1500 Watt 18–36.
- [8] Syam, S., Kurniati, S., K.Y, F.A., 2021. Rancang Bangun Generator Aksial Dengan Menggunakan Magnet Permanen Ndfep Persegi Panjang. *J. Media Elektro X*, 57–64. <https://doi.org/10.35508/jme.v10i2.4753>.
- [9] Wirtayasa, K., Hsiao, C.Y., 2022. Performances comparison of axial-flux permanent-magnet generators for small-scale vertical-axis wind turbine. *Alexandria Eng. J.* 61, 1201–1215. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.074>
- [10] Rosa, M.K.A., Jonrinaldi, Sianipar, H.F., 2023. Rancang Bangun Generator Fluks Aksial Magnet Permanen Satu Fasa 12 Kutub Dengan Stator Ganda. *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.* 11, 869–876. <https://doi.org/10.23960/jitet.v11i3s1.3377>.
- [11] Bhatia, S.C., Gupta, R.K., 2018. *Textbook of Renewable Energy*, Woodhead Publishing India Pvt. Ltd. New Delhi.
- [12] Brondsted, P., Nijssen, R., Goutianos, S., 2023. *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*, Second Edi. ed. Charlotte Cockle.
- [13] Mathew, S., 2006. *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.
- [14] Prasetijo, H., Ropiudin, dan Dharmawan, B. (2012). Generator magnet permanen sebagai pembangkit listrik putaran rendah permanent magnet generator as lowSpeed electric power plant. *Dinamika Rekayasa*, 8(2), 70–77.
- [15] Chapman, S.J., 2012. *Electric Machinery Fundamentals Fifth Edition*, Book. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- [16] Latoufis, K.C., Messinis, G.M., Kotsampopoulos, P.C., Hatziargyriou, N.D., 2012. Axial flux permanent magnet generator design for low cost manufacturing of small wind turbines. *Wind Eng.* 36, 411–431. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.36.4.411>
- [17] Martua, M., Setiawan, D., Yuwendius, H., 2021. Studi Karakteristik Luar Dan Efisiensi Generator Dc Penguat Terpisah Terhadap Perubahan Beban Dengan Menggunakan Metode Fuzzy Logic. *J.*

Karya Ilm. Multidisiplin 1, 22–36. <https://doi.org/10.31849/jurkim.v1i1.7888>.