

Perancangan dan Pengujian Turbin Angin Sumbu Horizontal Kapasitas 600 Watt sebagai Sistem Penerangan Mandiri

¹Ana Nuril Achadiyah, ²Mokh. Suseno Aji Sari, ³Wildan Yoga Ariftama,

1,2,3 Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Unisma Malang, Malang

¹ananuril@polisma.ac.id, ²seno@polisma.ac.id, ³yogawildan5@gmail.com

Abstract - Electricity is essential to daily life particularly for lighting, yet many remote areas in Indonesia remain unreached by the national grid (PLN). This study designs and tests a 600-watt horizontal axis wind turbine (HAWT) as a stand-alone lighting power source. The turbine uses three nylon-fiber blades with a 1.75 m rotor diameter coupled directly, without a gearbox, to a three-phase permanent-magnet synchronous generator (PMG). The three-phase AC output is regulated by an MPPT and a charge controller before being stored in a battery and converted to 220 V AC through an inverter, so the whole system works off-grid. Field tests were carried out for six hours in Cileungsi, Bogor, under two conditions, without load and with a 45-watt lamp load, at wind speeds of 3-6 m/s. Results show the line-to-line output voltage stayed below 16 V and the actual power ranged from 0.38 to 0.55 W, giving a conversion efficiency of only 0.35%-3.46% because the tested wind speeds were below the turbine's 2.5 m/s cut-in and 10 m/s rated speed. Even so, the inverter kept a stable 220 V AC output able to light a small lamp, showing the system's potential for small-scale off-grid lighting in wind-rich remote regions of Indonesia.

Keywords — PLTB; Horizontal Axis Wind Turbine; PMG Generator; Wind Speed; Off-grid System

Abstrak—Energi listrik menjadi kebutuhan utama dalam kehidupan sehari-hari terutama untuk penerangan, namun masih banyak wilayah terpencil di Indonesia yang belum terjangkau jaringan PLN. Penelitian ini merancang dan menguji turbin angin sumbu horizontal (TASH) berkapasitas 600 watt sebagai sumber penerangan mandiri. Turbin menggunakan tiga bilah berbahan serat nilon dengan diameter rotor 1,75 meter yang dikopel langsung tanpa gearbox ke generator sinkron magnet permanen (PMG) tiga fasa. Keluaran AC tiga fasa diatur oleh MPPT dan charge controller sebelum disimpan pada baterai, kemudian diubah menjadi tegangan AC 220 volt melalui inverter sehingga sistem bekerja secara off-grid. Pengujian lapangan dilakukan selama enam jam di Cileungsi, Bogor, pada dua kondisi yaitu tanpa beban dan dengan beban lampu 45 watt, pada kecepatan angin 3-6 m/s. Hasil pengujian menunjukkan tegangan antar fasa keluaran generator tidak melebihi 16 volt, dengan daya eksperimen yang dihasilkan berkisar 0,38-0,55 watt, sehingga efisiensi konversi sistem hanya berkisar 0,35%-3,46% karena kecepatan angin pengujian masih di bawah kecepatan start-up (2,5 m/s) dan kecepatan angin nominal (10 m/s) turbin. Meskipun efisiensinya rendah, inverter tetap mampu menjaga tegangan keluaran AC 220 volt secara stabil untuk menyalakan lampu, sehingga sistem ini berpotensi diterapkan sebagai penerangan skala kecil berbasis energi angin di wilayah terpencil Indonesia.

Kata Kunci—PLTB; Turbin Angin Sumbu Horizontal; Generator PMG; Kecepatan Angin; Sistem Off-Grid

I. PENDAHULUAN (FONT 12, BOLD)

Energi listrik merupakan kebutuhan pokok dalam kehidupan modern yang menopang hampir seluruh aktivitas manusia, mulai dari rumah tangga, industri, hingga fasilitas publik, dengan penerangan sebagai salah satu kebutuhan paling mendasar dan langsung dirasakan masyarakat sehari-hari. Selama ini, sebagian besar pasokan energi listrik nasional masih bergantung pada sumber energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Ketergantungan yang tinggi terhadap energi fosil ini menimbulkan berbagai persoalan struktural, di antaranya keterbatasan cadangan sumber daya yang bersifat tidak terbarukan sehingga suatu saat akan habis, fluktuasi harga bahan bakar di pasar global yang berdampak langsung pada biaya produksi listrik, serta dampak lingkungan yang merugikan berupa emisi gas rumah kaca dan pencemaran udara yang berkontribusi terhadap perubahan iklim.[1].

Berbagai persoalan tersebut mendorong perlunya diversifikasi sumber energi menuju energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi besar untuk dikembangkan di Indonesia adalah energi bayu atau energi angin, mengingat kondisi geografis Indonesia sebagai negara kepulauan

tropis dengan garis pantai yang panjang serta wilayah dataran tinggi yang memiliki kecepatan angin cukup untuk dimanfaatkan, terutama di wilayah pesisir dan pedesaan yang belum seluruhnya terjangkau jaringan listrik PLN. Potensi ini dimanfaatkan melalui teknologi turbin angin pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), yaitu sistem pembangkit yang mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik melalui putaran rotor turbin, yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik oleh generator[2].

Turbin angin bekerja dengan mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik melalui tekanan dan gaya dorong angin yang bertiup pada permukaan bilah (blade) turbin, sehingga menimbulkan gaya angkat aerodinamis yang memutar rotor pada porosnya. Semakin tinggi kecepatan angin yang diterima, semakin besar pula energi kinetik yang dapat ditangkap dan dikonversi menjadi putaran mekanik, meskipun besarnya konversi ini tetap dibatasi oleh efisiensi aerodinamis bilah serta batas teoretis Betz sebesar 59,3%. Putaran mekanik pada poros rotor tersebut selanjutnya diteruskan, baik secara langsung (direct drive) maupun melalui sistem transmisi seperti gearbox, untuk memutar generator. Di dalam generator, putaran mekanik ini diubah menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik, yaitu ketika medan magnet pada rotor generator berputar dan memotong kumparan pada stator, sehingga timbul tegangan induksi yang menghasilkan arus listrik sebagai keluaran akhir dari sistem turbin angin [3]. Di antara berbagai konfigurasi, turbin angin sumbu horizontal (TASH) dikenal memiliki efisiensi tangkapan energi yang tinggi, khususnya pada lokasi dengan kecepatan angin yang relatif stabil[4]. Pemanfaatan TASH sebagai sistem penerangan mandiri menjadi solusi yang relevan bagi wilayah pedesaan dan kepulauan Indonesia yang hingga kini belum terjangkau jaringan listrik PLN[5].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan menguji kinerja turbin angin sumbu horizontal berkapasitas 600 watt sebagai sistem penerangan berbasis energi terbarukan yang bekerja secara off-grid. Aspek yang dikaji meliputi perancangan sistem kontrol listrik, besarnya daya listrik yang dihasilkan pada berbagai kondisi kecepatan angin, serta efisiensi konversi energi dari sistem yang dirancang, dengan lokasi pengujian di Cileungsi, Kabupaten Bogor, Jawa Barat.

II. METODE PENELITIAN

A. Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan *design and build* (rancang bangun), yaitu melalui tahapan perancangan, pembuatan, dan pengujian sistem secara langsung untuk mengevaluasi kinerja turbin angin sumbu horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*–HAWT) berkapasitas 600 W pada kondisi operasi nyata. Pendekatan ini memungkinkan pengujian dilakukan secara menyeluruh mulai dari proses perakitan hingga analisis performa sistem berdasarkan hasil pengukuran yang diperoleh selama pengujian.

B. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT Power System Indonesia yang berlokasi di Cileungsi, Kabupaten Bogor, Jawa Barat. Lokasi tersebut dipilih karena memiliki karakteristik yang mendukung pelaksanaan pengujian turbin angin skala kecil. Pertama, wilayah ini memiliki potensi kecepatan angin yang cukup untuk mengoperasikan turbin secara optimal. Kedua, area pengujian merupakan ruang terbuka yang relatif bebas dari hambatan bangunan tinggi sehingga gangguan terhadap aliran angin dapat diminimalkan. Kondisi tersebut memungkinkan diperolehnya data pengujian yang lebih representatif terhadap kondisi operasi sebenarnya.

C. Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi multimeter digital, tang ampere, obeng, tang potong, tang kombinasi, dan tang skun sebagai alat bantu instalasi serta pengukuran parameter kelistrikan. Sementara itu, bahan utama yang digunakan terdiri atas generator sinkron *Permanent Magnet Generator* (PMG) tiga fasa tanpa konduktor netral, *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) yang berfungsi

mengubah keluaran tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan DC 12 V, *charge controller* untuk mengendalikan proses pengisian baterai sekaligus melindungi baterai dari kondisi *overcharge* dan *overdischarge*, serta inverter yang mengonversi tegangan DC 12 V menjadi tegangan AC 220 V sebagai sumber daya bagi beban.

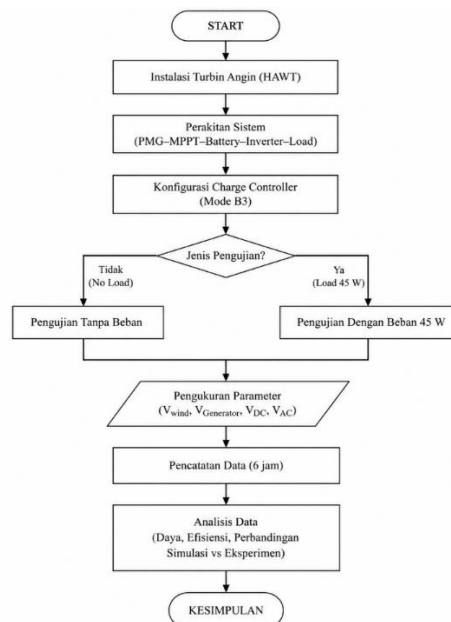
Komponen pendukung lainnya meliputi panel box berukuran 50×40 cm sebagai tempat instalasi perangkat kontrol, kabel NYM $3 \times 1,5$ mm² sebagai penghantar listrik, MCB tiga fasa 10 A dan MCB satu fasa 10 A sebagai sistem proteksi, relay AC 220 V untuk pengendalian rangkaian, serta stop kontak panel sebagai terminal keluaran daya. Seluruh komponen tersebut dirangkai menjadi sistem konversi energi angin yang digunakan sebagai objek pengujian pada penelitian ini.

D. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian diawali dengan proses instalasi turbin angin sumbu horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine–HAWT*) pada tiang penyangga dengan posisi menghadap arah angin dominan untuk memperoleh energi angin secara optimal. Selanjutnya, generator *Permanent Magnet Generator* (PMG) tiga fasa dihubungkan ke panel kontrol yang terdiri atas *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), *charge controller*, baterai, dan inverter sehingga membentuk sistem konversi energi listrik yang terintegrasi. Pada tahap ini, *charge controller* dikonfigurasi menggunakan mode B3 (operasi selama 24 jam) dengan batas tegangan pengisian dan pelepasan baterai yang telah ditentukan untuk mencegah terjadinya kondisi *overcharge* maupun *overdischarge*.

Setelah sistem selesai dirakit dan dikonfigurasi, dilakukan pengujian pada dua kondisi operasi, yaitu tanpa beban (*no-load*) dan dengan beban lampu AC sebesar 45 W. Selama pengujian, parameter kelistrikan yang diamati meliputi tegangan keluaran generator tiga fasa, tegangan DC setelah proses penyearahan oleh MPPT, serta tegangan AC keluaran inverter menuju beban. Selain itu, kecepatan angin juga diukur sebagai parameter masukan yang memengaruhi performa sistem konversi energi.

Seluruh parameter pengujian, yang meliputi kecepatan angin, tegangan generator, tegangan DC, tegangan AC, serta kondisi operasi beban, dicatat secara berkala selama enam jam pengamatan. Data hasil eksperimen kemudian dianalisis dengan membandingkan daya keluaran aktual terhadap daya teoritis yang dihitung berdasarkan kondisi pengujian. Hasil perbandingan tersebut digunakan untuk menentukan efisiensi konversi energi dari sistem pembangkit listrik tenaga angin yang dikembangkan. Rangkaian tahapan penelitian secara keseluruhan disajikan dalam bentuk flowchart pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchat Penelitian

E. Spesifikasi Peralatan

Turbin dirancang dengan tiga bilah berbahan serat nilon berdiameter rotor 1,75 meter yang dikopel langsung (direct drive) ke generator sinkron magnet permanen (PMG) 3 fasa tanpa fasa netral. Aliran daya sistem secara berurutan adalah sebagai berikut: generator 3 fasa menghasilkan arus AC yang dialirkan melalui MCB 3 fasa untuk proteksi awal, kemudian masuk ke MPPT untuk mengoptimalkan titik daya maksimum, diteruskan ke charge controller untuk mengisi baterai 12/24 V, dan selanjutnya dikonversi oleh inverter menjadi tegangan AC 220 volt yang disalurkan melalui MCB 1 fasa menuju beban penerangan. Spesifikasi lengkap peralatan Turbin Angin yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

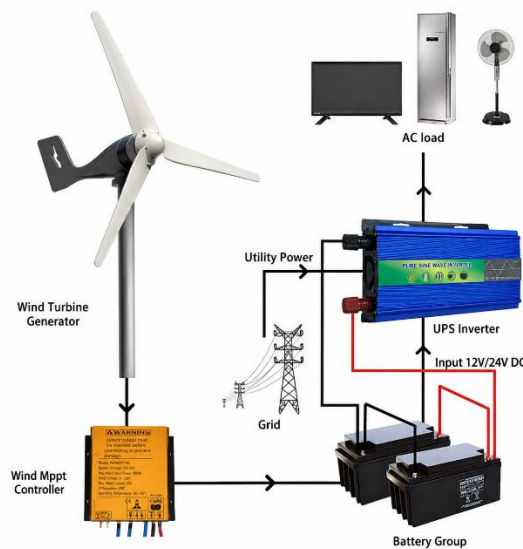
Tabel 1. Spesifikasi Peralatan Turbin Angin

No	Parameter	Nilai
1	Nilai Daya	600 W
2	Maximum Power	680 W
3	Nilai Tegangan	12 / 24 V
4	Start-up Kecepatan Angin	2,5 m/s
5	Nilai Kecepatan Angin	10 m/s
6	Kelangsungan Hidup Angin	55 m/s
7	Diameter Rotor	1,75 m
8	Jumlah Bilah	3
9	Bahan Bilah	Serat Nilon
10	Tipe Generator	3 fasa, PMG Sinkron
11	Generator Case	Alumunium alloy
12	Sistem Kontrol	Elektromagnet/yaw
13	Pengaturan Kecepatan	Otomatis (yaw)
14	Suhu Kerja	-40°C s/d 80°C
15	Sertifikat	CE, ISO14001/9001, TU

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Optimalisasi sistem mekanik turbin dilakukan melalui penggunaan konfigurasi tiga bilah berbahan serat nilon dengan diameter rotor 1,75 meter, mengadopsi kurva airfoil NACA untuk memaksimalkan koefisien daya (C_p) hingga mendekati 0,4 pada kondisi ideal. Sumbu horizontal dipilih karena mampu mengarahkan rotor menghadap arah angin dominan dengan bantuan sistem yaw otomatis berbasis elektromagnet. Generator PMG 3 fasa yang terhubung langsung tanpa gearbox (direct drive) mengurangi rugi mekanik dan meningkatkan keandalan sistem, dengan kecepatan start-up rendah pada 2,5 m/s sehingga turbin dapat mulai berputar bahkan pada kondisi angin lemah.

Sistem kontrol listrik dirancang untuk mendukung operasi off-grid yang andal dan aman. Arus AC 3 fasa dari generator diproteksi oleh MCB 3 fasa sebelum masuk ke MPPT yang mengoptimalkan titik daya maksimum dari input angin. Keluaran MPPT diteruskan ke charge controller untuk mengisi baterai 12/24 V DC, kemudian dikonversi oleh inverter menjadi tegangan AC 220 volt yang disalurkan ke beban penerangan melalui MCB 1 fasa. Seluruh rangkaian panel kontrol ditempatkan dalam enclosure tahan cuaca (IP65) sehingga sistem dapat dioperasikan pada rentang suhu lingkungan -40°C hingga 80°C. Arsitektur diagram ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 2. Arsitektur Diagram Turbin Angin Sumbu Horizontal

Daya mekanik teoritis yang dapat diekstrak turbin dari energi angin diturunkan dari energi kinetik massa udara yang bergerak, dimodifikasi dengan koefisien daya aerodinamis. P_w adalah daya angin yang mengalir pada v_w dan dapat dinyatakan dengan persamaan 1.[6]

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times C_p \quad (1)$$

$$\text{Dengan } C_p = \frac{(\tau \cdot \omega)}{\frac{1}{2} \rho A v w^3} \quad (2)$$

Dimana : ρ adalah massa jenis udara ($1,225 \text{ kg/m}^3$),
 A adalah luas sapuan rotor (m^2),
 v adalah kecepatan angin (m/s),
 C_p adalah koefisien daya,

Untuk memvalidasi hasil simulasi terhadap hasil eksperimen, kami menghitung kesalahan relatif, yang menyatakan perbedaan sebagai persentase dari nilai eksperimen, membantu mengukur signifikansi kesalahan dalam kaitannya dengan daya listrik yang diukur dengan persamaan 3 [7].

$$\text{Error} = \frac{P_{\text{eksperimen}} - P_{\text{simulasi}}}{P_{\text{eksperimen}}} \times 100 \% \quad (3)$$

Dengan menggunakan persamaan perhitungan dari data eksperimen serta data simulasi, sebuah tabel dikembangkan untuk menekankan perbedaan yang mencolok antara nilai-nilai yang bersesuaian kami sajikan di tabel 2.

Tabel 2. Hasil Eksperimen dan Simulasi

Kecepatan Angin (m/s)	Daya Simulasi (W)	Daya Ekseperime (W)	Error (%)
3	15,91	0,55	3,46
3	15,91	0,49	3,08
5	73,63	0,54	0,73
5	73,63	0,55	0,75
3	15,91	0,49	3,08

3	15,91	0,38	2,39
6	126,63	0,44	0,35

Berdasarkan Tabel 2, kesalahan (error) sistem berada pada rentang 0,35%–3,46%, hal ini terutama disebabkan karena seluruh pengujian dilakukan pada kecepatan angin 3–6 m/s, yang meskipun sudah melampaui kecepatan start-up (2,5 m/s), masih jauh di bawah kecepatan angin nominal turbin (10 m/s) sehingga daya eksperimen yang terukur (0,38–0,55 W) jauh lebih kecil dibandingkan daya simulasi (15,91–126,63 W). Meskipun demikian, tegangan keluaran AC dari inverter tetap stabil pada kisaran 226–229 volt karena inverter bekerja secara otomatis menjaga tegangan keluaran meskipun tegangan input DC dan daya berfluktuasi mengikuti kecepatan angin. Semakin tinggi kecepatan angin, semakin terang pula nyala lampu beban 45 watt yang diuji, menunjukkan bahwa sistem tetap dapat berfungsi sebagai sumber penerangan skala kecil meski pada kondisi angin yang belum optimal.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem kontrol listrik turbin angin sumbu horizontal yang terdiri atas MPPT, charge controller, dan inverter berhasil mengatur aliran daya secara otomatis dan stabil dalam kondisi off-grid, serta mampu menjaga nyala beban penerangan dengan baik selama pengujian. Daya listrik yang dihasilkan turbin bervariasi mengikuti kecepatan angin, dengan daya eksperimen terukur antara 0,38 dan 0,55 watt pada kecepatan angin 3–6 m/s, sedangkan efisiensi konversi sistem terhadap daya angin simulasi berkisar 0,35%–3,46%. Nilai efisiensi yang rendah ini disebabkan pengujian dilakukan pada kecepatan angin yang masih di bawah kecepatan angin nominal turbin (10 m/s), meskipun demikian sistem tetap mampu menyalakan beban lampu 45 watt secara stabil pada tegangan AC 220 volt. Optimalisasi mekanik melalui penggunaan tiga bilah serat nilon berdiameter 1,75 meter dan generator PMG direct drive terbukti cukup efektif menangkap energi angin pada kecepatan rendah hingga sedang, namun performanya masih dapat ditingkatkan untuk penyerapan daya yang lebih maksimal pada kecepatan angin tinggi. Secara keseluruhan, turbin angin sumbu horizontal 600 watt ini berpotensi diterapkan sebagai sistem penerangan mandiri berbasis energi terbarukan di wilayah terpencil Indonesia dengan kecepatan angin rata-rata memadai, dan disarankan agar penelitian selanjutnya menyempurnakan desain bilah serta melakukan pengujian di lokasi dengan potensi angin yang lebih stabil, seperti daerah pantai atau dataran tinggi.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Anjum and J. Chauhan, “LONG-TERM ENERGY SUSTAINABILITY OF INDIA,” vol. 14, pp. 71–77, 2024.
- [2] N. A. Pambudi *et al.*, “The Future of Wind Power Plants in Indonesia : Potential , Challenges , and Policies,” 2025.
- [3] M. A. Hannan *et al.*, “Wind Energy Conversions , Controls , and Applications: A Review for Sustainable Technologies and Directions,” 2023.
- [4] M. A. Al-rawajfeh and M. R. Gomaa, “Comparison between horizontal and vertical axis wind turbine,” vol. 12, no. 1, pp. 13–23, 2023, doi: 10.11591/ijape.v12.i1.pp13-23.
- [5] D. Arkka, G. Andre, and S. Rudy, “Efektivitas Penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Wilayah Pesisir Pantai Sebagai Pendukung Kebutuhan Energi dalam Pertahanan Negara,” vol. 3, no. 1, pp. 121–128, 2024.
- [6] S. Pramanik, “Energy Conversion Strategies for Wind Energy System : Electrical , Mechanical and Material Aspects,” pp. 1–34, 2022.
- [7] C. Popa, N. Popa, F. Deliu, O. Cristea, and I. Ciocoi, “ANALYSIS OF WIND TURBINE POWER OUTPUT VIA MODELING , SIMULATION , AND VALIDATION,” vol. 70, pp. 175–180, 2025, doi: 10.59277/RRST-EE.2025.2.4.