

Pengembangan Sistem PLTB Dengan Penambahan PLTS Sebagai Pembangkit Hybrid Skala Mikro Di Desa Garassikang KAB Jeneponto

Dwiky Admansyah M¹, Wahyu Kaisar Darmawan B², Suryanto³ dan Chandra Bhuana⁴

^{1,2} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia

*E-mail korespondensi: dhikystl@gmail.com

Abstract: This research is motivated by the suboptimal operation of the Wind Power Plant (PLTB) in Garassikang Village, Jeneponto Regency, due to an mismatch in the generator's rotation (RPM). This issue resulted in insufficient voltage for battery charging and low power efficiency. The objective of this study is to improve system reliability by integrating a hybrid system with a Solar Power Plant (PLTS) and designing an Internet of Things (IoT)-based monitoring system using the ThingSpeak platform. The research method involved mechanical modification by adding a 1:3 ratio gearbox transmission system to the turbine shaft to increase generator rotation. Additionally, an Arduino Uno and NodeMCU ESP8366 microcontroller were utilized along with ACS712 current sensors and voltage sensors to monitor electrical parameters in real-time. Testing was conducted by recording data every 20 seconds, which was then transmitted to cloud storage via the internet. The results showed that the addition of the gearbox increased the generator's output voltage from 3.40 V to 7.01 V at a wind speed of 6.65 m/s, although a DC-DC Step Up module is still required to stabilize battery charging during low wind conditions. The PLTS integration proved effective in maintaining power supply continuity, with a peak efficiency of 21.67% when solar radiation intensity reached 874.1 W/m². Overall, the hybrid system and IoT monitoring technology facilitate easier data management and enhance the reliability of micro-scale electricity supply at the research site.

Keywords: PLTB, PLTS, Hybrid, IoT, Gearbox, Monitoring.

Abstrak: Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kondisi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Desa Garassikang, Kabupaten Jeneponto, yang tidak beroperasi secara optimal akibat ketidaksesuaian putaran (RPM) generator. Hal tersebut menyebabkan tegangan yang dihasilkan tidak mencukupi untuk pengisian baterai dan berdampak pada rendahnya efisiensi daya. Tujuan dari penelitian ini adalah meningkatkan keandalan sistem melalui penggabungan sistem hybrid dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) serta merancang sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan platform ThingSpeak. Metode penelitian yang digunakan meliputi modifikasi mekanis dengan penambahan sistem transmisi gearbox 1:3 pada poros turbin untuk meningkatkan putaran generator. Selain itu, digunakan mikrokontroler Arduino Uno dan NodeMCU ESP8366 serta sensor arus ACS712 dan sensor tegangan untuk memantau parameter kelistrikan secara real-time. Pengujian dilakukan dengan mencatat data setiap 20 detik yang kemudian dikirimkan ke cloud storage melalui jaringan internet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan gearbox mampu meningkatkan tegangan keluaran generator dari 3,40 V menjadi 7,01 V pada kecepatan angin 6,65 m/s, meskipun masih memerlukan modul DC-DC Step Up untuk stabilisasi pengisian baterai pada kondisi angin rendah. Integrasi PLTS terbukti efektif menjaga kontinuitas pasokan energi dengan efisiensi tertinggi mencapai 21,67% pada saat intensitas radiasi matahari mencapai 874,1 W/m². Secara keseluruhan, sistem hybrid dan teknologi monitoring IoT ini memberikan kemudahan dalam pengelolaan data serta meningkatkan keandalan suplai energi listrik skala mikro di lokasi penelitian.

Kata Kunci: PLTB, PLTS, Hybrid, IoT, Gearbox, Monitoring.

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan utama dalam mendukung keberlangsungan proses produksi dan operasional industri. Peningkatan kebutuhan energi serta tuntutan pengurangan emisi mendorong sektor industri untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan sebagai bagian dari strategi efisiensi energi dan keberlanjutan. Secara global, energi surya fotovoltaik (PV) menjadi salah satu teknologi energi terbarukan yang mengalami pertumbuhan sangat pesat. Penambahan kapasitas energi terbarukan global pada tahun 2024 mencapai sekitar 700 GW, dengan tenaga surya PV menyumbang lebih dari tiga perempat kapasitas baru tersebut [1]. Perkembangan tersebut menunjukkan

bahwa teknologi PV semakin kompetitif dan dapat diterapkan pada berbagai skala, termasuk fasilitas komersial dan industri.

Indonesia memiliki potensi energi surya yang besar karena berada di wilayah tropis dengan ketersediaan radiasi matahari sepanjang tahun. Kajian mengenai pemanfaatan energi surya di Indonesia menunjukkan bahwa sistem PV memiliki prospek teknis dan ekonomis yang baik, terutama pada wilayah dengan tingkat radiasi matahari yang relatif tinggi [2]. Pemanfaatan energi surya melalui PLTS atap menjadi semakin menarik karena dapat menggunakan area atap bangunan yang sebelumnya tidak dimanfaatkan untuk pembangkitan energi. Pada sektor komersial dan industri, PLTS atap dapat mengurangi konsumsi energi dari jaringan sekaligus meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan secara langsung pada sisi beban [3], [4].

Pengembangan PLTS atap di Indonesia juga didukung oleh kebijakan pemerintah melalui Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 2 Tahun 2024 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang IUPTLU. Regulasi tersebut mengatur pemasangan PLTS atap berdasarkan kuota yang tersedia serta mengubah mekanisme pemanfaatan energi listrik dari sistem jaringan [5]. Kondisi tersebut menjadikan kesesuaian antara profil pembangkitan PLTS dan profil konsumsi beban semakin penting dalam perencanaan, khususnya bagi pelanggan industri yang memiliki konsumsi listrik dominan pada siang hari. Oleh karena itu, perencanaan PLTS perlu mempertimbangkan kapasitas pembangkitan, karakteristik beban, luas area atap, konfigurasi sistem, serta tingkat pemanfaatan energi yang dihasilkan di sisi pelanggan.

Selain penghematan energi, kontinuitas pasokan listrik merupakan faktor penting bagi fasilitas industri. Gangguan pasokan listrik dapat menyebabkan penghentian proses produksi, kehilangan produktivitas, dan peningkatan biaya operasional. Penggunaan sistem hybrid yang menggabungkan PLTS dengan jaringan listrik dan sumber pembangkit cadangan dapat menjadi salah satu alternatif untuk meningkatkan keandalan pasokan. Penelitian mengenai sistem hybrid PV–diesel–grid menunjukkan bahwa integrasi beberapa sumber energi dapat memberikan alternatif konfigurasi yang lebih optimal berdasarkan aspek teknis dan ekonomi [6]. Penelitian lain mengenai sistem hybrid berbasis PV juga menunjukkan bahwa penggunaan perangkat lunak HOMER dapat digunakan untuk mengevaluasi konfigurasi sistem, biaya energi, serta parameter ekonomi dan lingkungan dari berbagai skenario pembangkitan [7].

Sejumlah penelitian telah membahas kelayakan PLTS atap pada sektor komersial dan industri. Asrori et al. [3] melakukan kajian PLTS atap on-grid dan menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja teknis dan kelayakan ekonomi yang baik. Sementara itu, penelitian terbaru pada sektor industri di Indonesia menunjukkan bahwa evaluasi PLTS atap perlu mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, kondisi struktur atap, dan keselamatan instalasi secara terpadu [4]. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa karakteristik beban, kapasitas sistem, kondisi atap, serta skenario pemanfaatan energi berpengaruh terhadap kelayakan implementasi PLTS pada fasilitas industri.

PVsyst dan HOMER Pro merupakan perangkat lunak yang dapat digunakan secara komplementer dalam analisis sistem energi. PVsyst banyak digunakan untuk perancangan dan simulasi kinerja sistem PV, termasuk estimasi produksi energi, Performance Ratio (PR), konfigurasi modul, serta analisis rugi-rugi sistem. Sementara itu, HOMER Pro dapat digunakan untuk pemodelan dan optimasi konfigurasi sistem energi berdasarkan profil beban, sumber energi, biaya investasi, biaya operasi, dan parameter ekonomi. Studi terbaru juga menunjukkan bahwa kombinasi evaluasi teknis menggunakan PVsyst dan analisis sistem menggunakan HOMER Pro dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap kinerja dan kelayakan ekonomi sistem PV [8].

Berdasarkan kajian tersebut, masih terdapat kebutuhan untuk melakukan perencanaan PLTS atap yang secara khusus mengintegrasikan sumber energi surya dengan jaringan PLN dan generator cadangan pada fasilitas manufaktur di Kota Makassar. Berbeda dengan sistem PLTS on-grid yang terutama berorientasi pada pengurangan konsumsi energi jaringan, konfigurasi yang direncanakan dalam penelitian ini mempertimbangkan pula kebutuhan kontinuitas pasokan listrik melalui integrasi genset sebagai sumber cadangan. Selain itu, analisis dilakukan menggunakan tiga pendekatan, yaitu

perhitungan numerik, simulasi PVsyst, dan simulasi HOMER Pro, sehingga hasil perencanaan dapat dibandingkan dari sisi kapasitas pembangkitan, produksi energi, kinerja sistem, dan kelayakan investasi.

CV. Iklan Waranie Perkasa merupakan industri manufaktur kosmetik di Kota Makassar dengan daya listrik terpasang sebesar 66 kW dan proses produksi yang bergantung pada kontinuitas pasokan listrik. Berdasarkan observasi awal, gangguan pasokan listrik berpotensi menghentikan peralatan produksi seperti mixer, kompresor, mesin press, dan sistem tata udara. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya alternatif sumber energi yang mampu mengurangi ketergantungan terhadap jaringan PLN sekaligus mempertahankan keandalan pasokan. Di sisi lain, perusahaan memiliki area atap seluas sekitar 825 m² yang berpotensi dimanfaatkan sebagai lokasi pemasangan PLTS tanpa memerlukan tambahan lahan.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merencanakan dan menganalisis kelayakan teknis serta ekonomis PLTS atap sistem hybrid pada CV. Iklan Waranie Perkasa Makassar. Sistem dirancang dengan PLTS sebagai sumber energi utama, PLN sebagai sumber pendukung, dan genset sebagai sumber cadangan tanpa menggunakan baterai. Perencanaan dilakukan berdasarkan karakteristik beban aktual, potensi radiasi matahari, luas area atap, konfigurasi modul dan inverter, serta kebutuhan keandalan sistem. Evaluasi teknis dilakukan menggunakan perhitungan numerik dan simulasi PVsyst, sedangkan analisis konfigurasi dan kelayakan ekonomi dilakukan menggunakan HOMER Pro. Parameter ekonomi yang digunakan meliputi Net Present Value (NPV), Profitability Index (PI), Internal Rate of Return (IRR), Discounted Payback Period (DPP), dan Cost of Energy (COE).

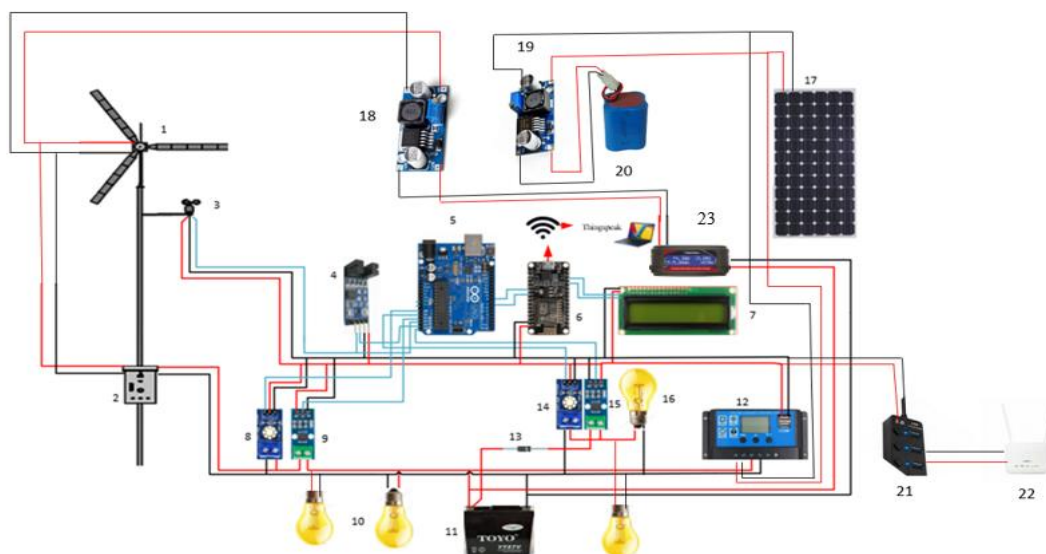
II. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Desa Garassikang, Kabupaten Jeneponto. Pengambilan data dilakukan pada bulan Januari 2026 untuk mendapatkan kecepatan angin dan intensitas matahari yang representatif.

B. Perancangan Sistem

Sistem terdiri dari turbin angin, panel surya, hybrid controller, dan baterai. Monitoring dilakukan menggunakan sensor yang terhubung ke mikrokontroler untuk mengirimkan data ke platform monitoring (seperti Excel atau IoT). Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem yang dirancang.



Gambar 1. Skema rangkaian sistem monitoring PLTS hybrid PLTS

(1) Generator berfungsi sebagai penghasil energi listrik dari turbin angin. Energi yang dihasilkan kemudian dialirkan menuju (2) panel box yang berfungsi sebagai pusat distribusi sebagai pusat distribusi dan proteksi rangkaian. Untuk mengetahui kondisi angin digunakan (3) sensor kecepatan angin (anemometer) yang mengukur kecepatan angin sebagai parameter utama kinerja turbin. Selain itu, (4) sensor kecepatan putar digunakan untuk mengukur putaran rotor turbin (RPM), sehingga dapat diketahui performa mekanik turbin. Pengelolaan data dilakukan oleh (5) arduino uno sebagai mikrokontroler utama yang membaca data dari berbagai sensor. Data tersebut kemudian dikirim untuk diintegrasikan dengan (6) nodeMCU ESP 8266 yang berfungsi sebagai modul komunikasi berbasis WIFI untuk monitoring jarak jauh (IoT) hasil pembacaan data ditampilkan secara lokal melalui (7) LCD I2C 20X4 sehingga memudahkan penggunaan dalam memantau parameter sistem secara langsung. Untuk parameter listrik, digunakan (8) sensor tegangan DC untuk mengukur tegangan generator, serta (9) sensor arus ACS 712 untuk mengukur arus dari generator. Data tegangan dan arus ini digunakan untuk mengetahui daya yang dihasilkan serta konsumsi beban. Beban yang digunakan dalam sistem ini adalah (10) beban lampu DC 5 watt sebagai simulasi penggunaan energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan disimpan dalam (11) baterai 12 V 18Ah yang berfungsi sebagai penyimpanan energi agar sistem tetap dapat menyuplai beban saat sumber energi utama tidak tersedia. (12) SCC(Solar Charge Control) berfungsi untuk mengatur arus dan tegangan yang masuk ke baterai sehingga tidak terjadi overcharge. (13) dioda untuk membatasi arus dan tegangan, sehingga sensor tidak membaca tegangan dari baterai. (14) sensor arus ACS 712 dan (15) sensor tegangan DC untuk mengukur arus dan tegangan pada (17) panel surya. (16) Beban lampu DC 10 watt digunakan, sehingga arus panel surya dapat di ukur. Tegangan yang dihasilkan oleh generator terkadang kurang untuk mengisi baterai 12 volt sehingga dibutuhkan (18) modul xl6009 untuk menaikkan tegangan, dan (19) modul LM2596 untuk menurunkan tegangan yang dihasilkan oleh panel surya dapat disimpan pada (20) baterai 6 volt 22 Ah. Untuk menjaga kontinuitas pengiriman data dilengkapi dengan (22) modem yang disuplai melalui (21) USB hub. (23) Wattmeter digunakan untuk mengukur total penggunaan daya pada beban.

Secara keseluruhan, sistem ini bekerja dengan mengintegrasikan dua sumber energi terbarukan (angin dan matahari), kemudian melakukan monitoring terhadap parameter penting seperti kecepatan angin, putaran turbin, tegangan, dan arus. Dengan adanya sistem monitoring berbasis IoT, pengguna dapat melakukan pengawasan secara efisiensi sistem pembangkit hybrid.

C. Sistem transmisi

Sistem transmisi pada PLTB untuk mengevaluasi perubahan dan peningkatan sistem PLTB yang sudah ada. Tujuan dari modifikasi ini adalah meningkatkan efisiensi serta menyesuaikan dengan kondisi angin. Perancangan ini terbagi menjadi dua yaitu:

1. Gearbox

Penambahan gearbox untuk menyesuaikan kecepatan putar turbin angin untuk memutar generator, dikarenakan kecepatan putar turbin angin tidak sesuai yang dibutuhkan oleh generator, untuk menghasilkan listrik secara efisien.

2. Pengereman Putaran *Yaw Drive*

Yaw Drive sendiri berfungsi untuk memutar *nacelle* yang berisi generator agar bilah turbin selalu menghadap ke arah angin. Pengereman pada sistem PLTB bertujuan untuk meningkatkan pengendalian dan mengurangi potensi kerusakan yang terjadi akibat gerakan *yaw* yang tidak terkontrol.

D. Teknik Analisis Data

Setelah melakukan proses perancangan dan perakitan. Maka diperoleh data yang akan dianalisa secara deskriptif, dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut:

1. Menghitung daya angin

$$p = \frac{1}{2} \rho A V^3 \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

P adalah daya angin (watt), ρ adalah massa jenis angin (kg/m^3), A adalah luas penampang melintang aliran (m^2) dan v adalah kecepatan angin (m/s)

2. Daya keluaran Generator

$$P_{\text{out}} = V \cdot I \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

P_{out} adalah daya yang dihasilkan generator (Watt), V adalah tegangan (Volt) dan I adalah arus yang mengalir pada beban (A)

3. Efisiensi PLTB

$$\eta_{\text{pltb}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

η_{pltb} adalah efisiensi sistem(%), P_{out} adalah daya yang dihasilkan generator (watt) dan P_{in} adalah daya angin (watt).

4. Menghitung daya Input PLTS

$$P_{\text{in}} = I_r \times A \text{ (Watt)} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

P_{in} adalah daya input panel surya (Watt), I_r adalah intensitas radiasi matahari (Watt/m^2) dan A adalah luas panel surya (m^2)

5. Menghitung daya keluaran PLTS

$$P_{\text{out}} = V \times I \text{ (Watt)} \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

P_{out} adalah daya output panel surya (Watt), V adalah tegangan (Volt) dan I adalah arus (Ampere)

6. Efisiensi PLTS

$$\eta_{\text{PLTS}} = \frac{P_{\text{out panel surya}}}{P_{\text{in panel surya}}} \times 100\% \dots\dots\dots(6)$$

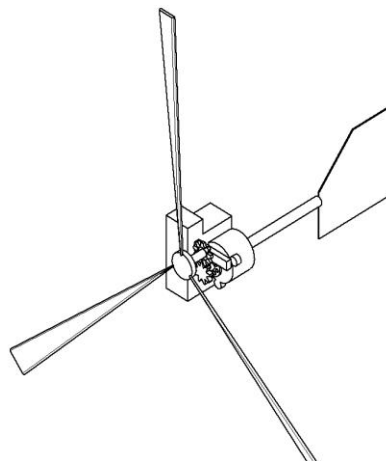
Keterangan:

$\eta_{\text{panel surya}}$ adalah efisiensi panel surya (%), P_{in} adalah daya input panel surya (Watt) dan P_{out} adalah daya output panel surya (Watt)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan Modifikasi

1. Transmisi gearbox pada generator



Gambar 1. Desain transmisi gearbox

Sistem transmisi gearbox pada generator bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB), khususnya pada kondisi kecepatan angin rendah. Sistem transmisi yang digunakan dalam penelitian ini berupa Gearbox mekanik, yang berfungsi untuk meningkatkan kecepatan putaran poros generator terhadap putaran poros turbin angin. Gearbox yang digunakan yaitu skala 1:3 antara putaran turbin dengan putaran generator.

2. Pengereman Putaran Yaw Drive



Gambar 2. Komponen Tambahan Pengereman Yaw Drive

Penambahan Yaw Drive dilakukan karena pada kondisi sebelumnya sistem mengalami kendala operasional. Tanpa mekanisme yaw, arah turbin tidak dapat menyesuaikan perubahan arah angin, sehingga menyebabkan terjadinya puntiran berlebih pada kabel yang berujung pada resiko kabel terputus.

B. Tabel Hasil Pengujian

Bagian ini menyajikan data hasil pengujian lapangan pada sistem hybrid PLTB dan PLTS skala mikro yang telah diimplementasikan. Data yang diperoleh meliputi parameter elektrik dan mekanik yang di catat oleh sistem monitoring.

1. Hasil pengujian sistem monitoring PLTB

Tabel 1. Hasil pengujian sistem monitoring PLTB

No	Waktu	Tegangan	Arus	Kecepatan	Kecepatan
		Generator (V)	Generator (A)	Putar (RPM)	Angin (m/s)
1	10:15	4,02	1,18	1260	6,9
2	11:00	2,22	1,15	480	9
3	11:30	1,97	1,17	720	6,6
4	12:00	2,37	1,17	1080	6,6
5	12:30	3,81	1,17	960	6,6
6	13:00	1,97	1,16	1140	5,4
7	13:30	4,03	1,17	900	7,8
8	14:00	3,03	1,17	1020	5,4
9	14:30	1,66	1,16	540	6,6
10	15:00	2,32	1,17	780	7,8

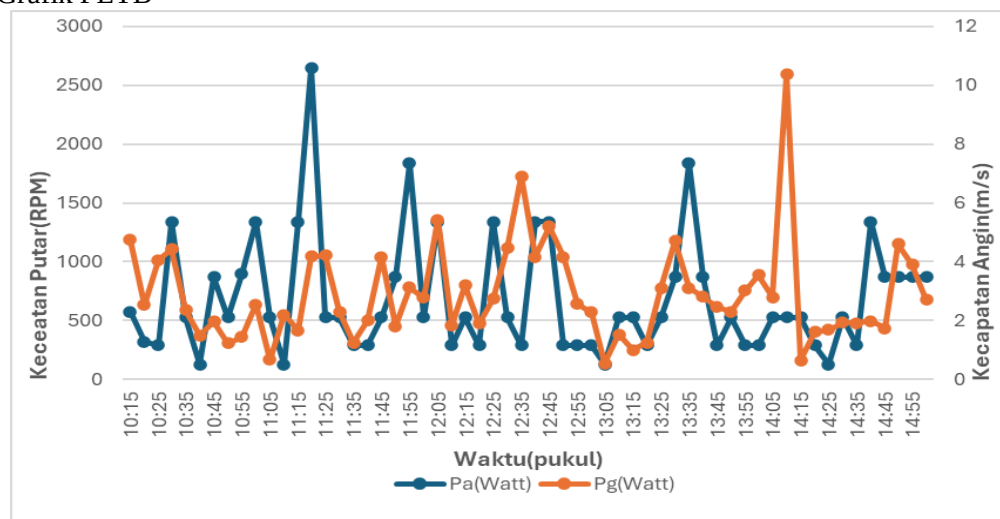
2. Hasil pengujian sistem monitoring PLTS

Tabel 2. Hasil pengujian sistem monitoring PLTS

No	Waktu	Tegangan	Arus	Intensitas
		Panel surya (V)	Panel Surya (A)	Matahari (W/m ²)
1	10:15	12,95	0,38	374,8
2	11:00	13,12	0,34	775,2
3	11:30	13,04	0,33	934,6
4	12:00	13,02	0,34	885,1
5	12:30	13,12	0,34	883,1
6	13:00	13,26	0,32	1021
7	13:30	13,26	1,28	1029
8	14:00	13,58	1,40	872,1
9	14:30	13,7	1,45	751,2
10	15:00	13,75	1,52	592,1

C. Pembahasan

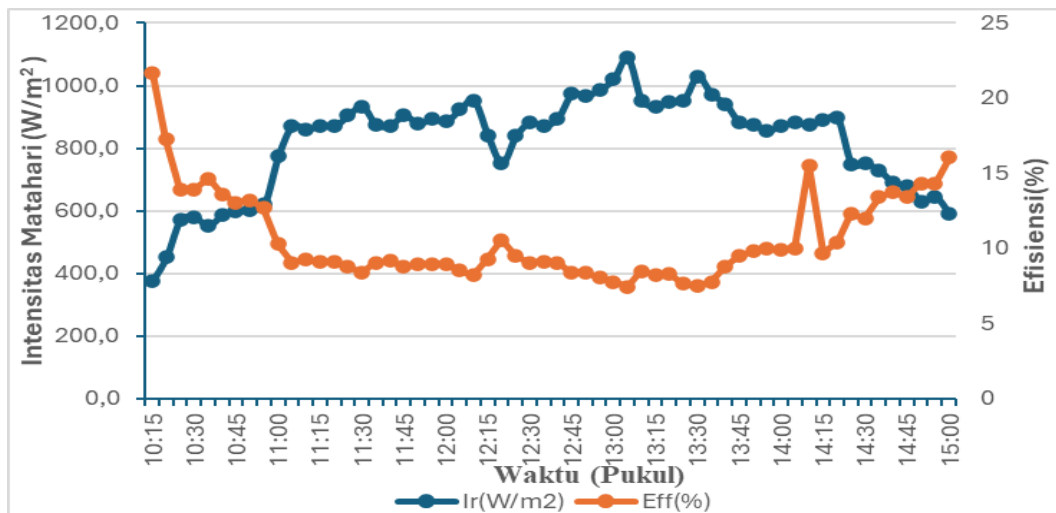
1. Grafik PLTB



Gambar 1. Grafik hubungan antara daya angin dan daya generator terhadap waktu

Pada gambar 1 dapat diketahui bahwa hubungan antara daya angin dan daya generator terhadap waktu bersifat fluktuatif. Hal ini dikarenakan waktu untuk pencatatan data dipengaruhi oleh cuaca, kecepatan angin di sekitar sisi turbin. Dimana dapat dilihat ketika daya angin meningkat atau bernilai besar maka daya generator yang dapat dihasilkan akan meningkat mencapai batas maksimal dan begitupun sebaliknya. Jika kecepatan angin menurun atau bernilai kecil maka daya generator juga akan menurun sesuai daya angin.

2. Grafik PLTS



Gambar 2. Grafik hubungan antara Intensitas Radiasi Matahari (W/m^2) Efisiensi (%) dan waktu (jam)

Berdasarkan gambar 2 Pengukuran diambil selama 6 jam mulai pukul 10:15 sampai dengan pukul 15:00 pada hari Kamis 11 Desember 2025 didapatkan input panel surya yang besar dengan nilai intensitas radiasi matahari yaitu $874,1 \text{ W/m}^2$ dan nilai daya yaitu 19,3824 watt. Dari grafik di atas dapat diketahui bahwa puncak intensitas radiasi matahari terjadi pada siang hari pada pukul 14:30 saat cahaya matahari langsung mengenai panel surya. Dan efisiensi tertinggi pada kondisi cuaca cerah yaitu 21,67% dan efisiensi terendah yaitu 7,49%

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari hasil penelitian dijelaskan pada bagian ini

- Penambahan sistem transmisi gearbox dengan rasio 1:3 pada poros turbin angin terbukti dapat meningkatkan putaran generator secara signifikan. Hal ini berdampak pada kenaikan tegangan keluaran generator dari rata-rata 3,40 V menjadi 7,01 V pada kecepatan angin rata-rata 6,65 m/s. Meskipun demikian, penggunaan modul DC-DC Step Up tetap diperlukan untuk menstabilkan tegangan agar mencapai ambang batas pengisian baterai (minimal 12,6 V) saat kecepatan angin rendah..
- Integrasi PLTS sebagai pendukung PLTB sangat efektif dalam menjaga kontinuitas suplai energi listrik. PLTS mampu menghasilkan daya yang stabil pada siang hari dengan efisiensi panel surya tertinggi mencapai 21,67% pada intensitas radiasi matahari $874,1 \text{ W/m}^2$. Sistem hybrid ini menutupi kelemahan PLTB yang sangat bergantung pada fluktuasi kecepatan angin. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan sistem hybrid mampu menjaga stabilitas dan kontinuitas suplai daya ke beban.

- c. Implementasi sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP8366 dan platform ThingSpeak berjalan dengan baik. Sistem mampu mengirimkan data parameter arus, tegangan, dan daya setiap 20 detik secara real-time. Hal ini memudahkan proses pemantauan jarak jauh dan pendokumentasian data kinerja pembangkit secara akurat dan otomatis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency (IEA), *Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030*. Paris, France: IEA, 2024.
- [2] A. M. Fathoni, N. A. Utama, and M. Kristianto, "A technical and economic potential of solar energy application with feed-in tariff policy in Indonesia," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 20, pp. 89–96, 2014, doi: 10.1016/j.proenv.2014.03.013.
- [3] Asrori, A. F. Ramdhani, P. W. Nugroho, and I. H. Eryk, "Kajian kelayakan solar rooftop on-grid untuk kebutuhan listrik bengkel mesin di Polinema," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 10, no. 4, pp. 830–845, 2022, doi: 10.26760/elkomika.v10i4.830.
- [4] A. P. Galevien, M. K. Ridwan, and A. N. I. Wardana, "Assessing the viability of rooftop solar PV in energy-intensive industries: A techno-economic and safety framework for the Indonesian FMCG sector," *Energies*, vol. 18, no. 21, p. 5859, 2025, doi: 10.3390/en18215859.
- [5] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 2 Tahun 2024 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum*, Jakarta, 2024.
- [6] M. Usman, M. T. Khan, A. S. Rana, and S. Ali, "Techno-economic analysis of hybrid solar-diesel-grid connected power generation system," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 653–662, 2018, doi: 10.1016/j.jesit.2017.06.002.
- [7] S. Yadav, P. Kumar, and A. Kumar, "Techno-economic assessment of hybrid renewable energy system with multi energy storage system using HOMER," *Energy*, vol. 297, p. 131231, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131231.
- [8] "A case study of techno-economic and environmental analysis of college rooftop for grid-connected PV power generation: Net zero 2050 pathway," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 56, p. 104272, 2024.