

Optimalisasi Desain PLTS Hybrid Untuk Efisiensi Energi Pada Gedung Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan

Muhammad Ruswandi Djalal^{1*}, Marhatang², Akzar Dwi Syahimullah³, Vito Ardiansya Syamsul⁴

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia

*E-mail korespondensi: wandi@poliupg.ac.id

Abstract: The increasing demand for electrical energy necessitates the implementation of sustainable and efficient renewable energy technologies. This study aims to design and evaluate the performance of a Hybrid Solar Photovoltaic (PV) System integrated with the Internet of Things (IoT) at the Renewable Energy Engineering Technology (TRET) Building of Politeknik Negeri Ujung Pandang. The system combines energy from solar panels, batteries, and the utility grid, supported by an IoT-based monitoring platform for real-time observation of electrical parameters. The research methodology includes hardware configuration using PV modules, a hybrid inverter, battery storage, PZEM-004T and PZEM-017 sensors, and an ESP32 microcontroller connected to the Blynk application. Performance testing was conducted by measuring voltage, current, power, energy, and solar irradiation, as well as calculating daily irradiation, specific yield (Yf), performance ratio (PR), panel efficiency, and overall system efficiency. The experimental results indicate that the hybrid PV system operates efficiently and reliably, achieving a daily solar irradiation of 6.37 kWh/m², a specific yield of 7.92 kWh/kWp, and a performance ratio of 124.3%. The average panel efficiency reached 12.1%, while the system efficiency was 23.5%. Meanwhile, the on-grid system achieved a panel efficiency of 27.9%, system efficiency of 27.7%, and a PR of 146.5%, whereas the off-grid configuration yielded a panel efficiency of 13.6%, system efficiency of 14.6%, and a PR of 77.3%. These findings demonstrate that the hybrid configuration effectively integrates the strengths of both on-grid and off-grid systems, resulting in optimal performance. Additionally, IoT integration enhances monitoring and control capabilities, supporting efficient energy usage and enabling smart renewable energy management. Thus, the IoT-enabled hybrid PV system proves effective in promoting energy efficiency and serves as a model for sustainable renewable energy implementation.

Keywords: Hybrid Solar PV System, Internet of Things (IoT), energy efficiency, performance ratio, specific yield, smart monitoring, renewable energy system.

Abstrak: Peningkatan kebutuhan energi listrik mendorong perlunya penerapan teknologi energi terbarukan yang efektif dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Hybrid berbasis Internet of Things (IoT) pada Gedung Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan (TRET) Politeknik Negeri Ujung Pandang. Sistem ini memadukan suplai energi dari panel surya, baterai, dan jaringan PLN, serta dilengkapi sistem monitoring IoT untuk memantau parameter operasional secara real-time. Metode penelitian meliputi perancangan hardware menggunakan panel surya, inverter hybrid, baterai, sensor PZEM-004T dan PZEM-017, serta mikrokontroler ESP32 yang terhubung ke platform Blynk. Pengujian dilakukan dengan mengukur tegangan, arus, daya, energi, iradiasi, serta menghitung nilai iradiasi harian, specific yield (Yf), performance ratio (PR), efisiensi panel, dan efisiensi sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem PLTS hybrid beroperasi cukup baik dan stabil dengan iradiasi harian sebesar 6,37 kWh/m², Specific Yield (Yf) sebesar 7,92 kWh/kWp dan Performance Ratio (PR) mencapai 124,3%. Nilai rata-rata efisiensi panel surya sebesar 12,1% dan nilai efisiensi sistem PLTS sebesar 23,5%. Sementara itu, sistem PLTS on grid memiliki rata-rata efisiensi panel 27,9%, efisiensi sistem PLTS 27,7%, dan PR 146,5%, sedangkan sistem off grid menunjukkan rata-rata efisiensi panel 13,6%, efisiensi sistem 14,6%, dan PR 77,3%. Hasil ini membuktikan bahwa sistem hybrid memiliki kinerja yang optimal karena mampu menggabungkan keunggulan sistem on grid dan off grid. Implementasi IoT juga meningkatkan efektivitas pemantauan dan pengendalian sistem PLTS secara daring (online). Dengan demikian, sistem PLTS hybrid berbasis IoT ini efektif dalam mendukung efisiensi energi sekaligus menjadi model penerapan energi terbarukan yang berkelanjutan.

Kata kunci : PLTS hybrid, Internet of Things (IoT), efisiensi energi, performance ratio, specific yield, energi terbarukan.

I. PENDAHULUAN

Ketersediaan energi merupakan faktor fundamental dalam mendukung aktivitas manusia, pertumbuhan ekonomi, serta pembangunan nasional yang berkelanjutan. Hingga saat ini, kebutuhan

energi global masih didominasi oleh sumber energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Ketergantungan terhadap energi fosil tidak hanya menyebabkan keterbatasan cadangan energi di masa depan, tetapi juga meningkatkan emisi karbon yang berdampak terhadap pemanasan global, perubahan iklim, serta penurunan kualitas lingkungan dan kesehatan manusia [1–3]. Oleh karena itu, berbagai negara di dunia mulai mendorong transisi energi menuju pemanfaatan sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan [4].

Indonesia sebagai negara berkembang dengan pertumbuhan konsumsi energi yang tinggi juga menghadapi tantangan dalam menjaga keberlanjutan pasokan energi nasional. Peningkatan jumlah penduduk, aktivitas industri, serta pembangunan infrastruktur menyebabkan kebutuhan energi listrik terus meningkat setiap tahunnya. Jika ketergantungan terhadap energi fosil terus berlangsung tanpa pengembangan energi terbarukan, Indonesia berpotensi mengalami krisis energi pada masa mendatang [5]. Untuk mengantisipasi hal tersebut, pemerintah telah menetapkan kebijakan melalui Kebijakan Energi Nasional (KEN) dan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) yang menargetkan bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) sebesar 23% pada tahun 2025 dan meningkat hingga sekitar 31% pada tahun 2050 [6–7].

Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia adalah energi surya. Letak geografis Indonesia yang berada di wilayah khatulistiwa menyebabkan intensitas radiasi matahari relatif tinggi sepanjang tahun, sehingga sangat potensial untuk dikembangkan sebagai sumber energi listrik melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) [8–9]. Selain ramah lingkungan, teknologi PLTS juga memiliki keunggulan berupa kemudahan instalasi, biaya operasional yang relatif rendah, serta fleksibilitas penerapan baik pada skala rumah tangga, industri, maupun bangunan pendidikan [10].

Salah satu konsep pemanfaatan PLTS yang banyak diterapkan adalah sistem PLTS hybrid, yaitu sistem pembangkit yang mengombinasikan sumber energi surya dengan jaringan listrik konvensional seperti PLN serta didukung oleh sistem penyimpanan energi berupa baterai. Sistem hybrid memungkinkan pemanfaatan energi surya secara optimal karena beban listrik akan diprioritaskan menggunakan energi dari panel surya terlebih dahulu, sedangkan jaringan PLN berfungsi sebagai sumber cadangan ketika produksi energi surya tidak mencukupi [11–12]. Dengan demikian, sistem ini mampu meningkatkan keandalan pasokan listrik sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap energi dari jaringan konvensional.

Seiring dengan perkembangan teknologi digital, penerapan Internet of Things (IoT) juga mulai diintegrasikan dalam sistem PLTS untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan energi. Teknologi IoT memungkinkan proses pemantauan dan pengendalian sistem energi dilakukan secara real-time melalui perangkat jaringan internet. Parameter seperti intensitas radiasi matahari, tegangan dan arus panel surya, kapasitas baterai, serta konsumsi energi listrik dapat dimonitor secara langsung sehingga mempermudah analisis performa sistem dan pengambilan keputusan dalam pengelolaan energi [13–14]. Integrasi teknologi ini dapat meningkatkan efisiensi operasional, keandalan sistem, serta efektivitas pemanfaatan energi terbarukan pada bangunan [15].

Politeknik Negeri Ujung Pandang (PNUP) telah memiliki instalasi PLTS berkapasitas 9 kWp yang terpasang pada Gedung Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan (TRET). Namun, pemanfaatan sistem tersebut masih belum optimal dalam mendukung kebutuhan energi listrik bangunan secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan upaya optimalisasi desain dan pengelolaan sistem PLTS hybrid agar pemanfaatan energi surya dapat lebih maksimal serta mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada bangunan tersebut.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimalisasi desain sistem PLTS hybrid berbasis IoT pada Gedung Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan PNUP, serta menganalisis performa sistem dalam meningkatkan efisiensi energi dan pemanfaatan energi surya pada bangunan.

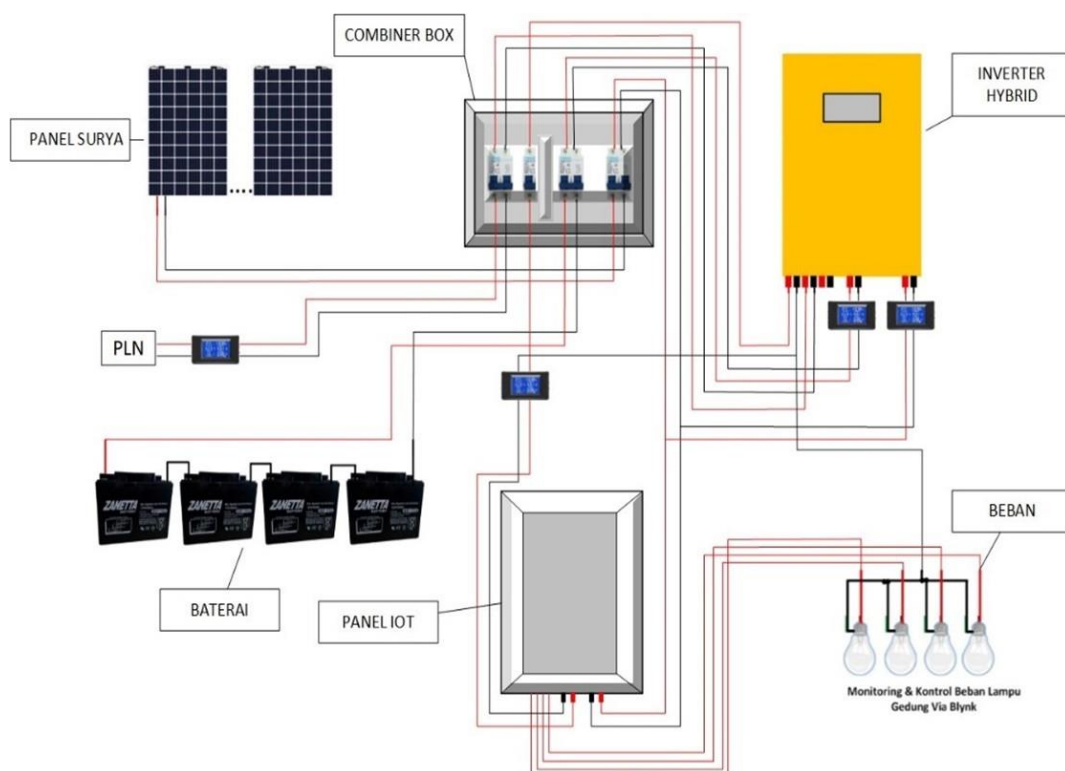
II. METODE PENELITIAN

A. Pengumpulan Data

- Observasi; merupakan metode pengumpulan data yang dilakukan melalui pengamatan langsung terhadap objek studi untuk memperoleh data yang akurat dan relevan. Observasi dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi eksisting di lapangan serta faktor – faktor yang mempengaruhi proses perencanaan desain.
- Studi Beban; Pengumpulan data melalui studi beban listrik dilakukan dengan cara mengumpulkan informasi terkait pola penggunaan serta besaran daya konsumsi energi listrik yang digunakan pada gedung yang menjadi objek. Tujuan dari studi ini adalah memperoleh profil beban harian dan guna memahami karakteristik penggunaan energi listrik secara menyeluruh, sehingga optimalisasi desain PLTS *hybrid* dapat dirancang sesuai kebutuhan energi di lokasi tersebut.
- Studi dokumentasi digunakan sebagai pendekatan untuk mengumpulkan data sekunder yang relevan dengan optimalisasi desain PLTS *hybrid*. Data yang didapatkan berasal dari berbagai sumber tertulis, gambar, serta dokumen elektronik.

B. Perencanaan Desain

Desain PLTS *Hybrid* yang akan digunakan pada gedung Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan (TRET). Tahapan ini dilakukan dengan tujuan sebagai acuan dalam melakukan desain PLTS Hybrid pada gedung TRET.



Gambar 1. Skema Rangkaian Desain PLTS

- *Reference Yield (Y_r)*

Reference Yield (Y_r) adalah jumlah energi surya yang diterima modul PV dibagi irradiansi standar 1 kW/m².

$$Y_r = \frac{H_t}{G_{STC}}$$

Keterangan :

Y_r = *Reference Yield* (kWh/kWp)

H_t = Total iradiasi harian (W/m²) atau (kW/m²)

G_{STC} = Iradiasi Standar Uji (1 kWh/m²)

- *Performance Ratio (PR)*

Performance Ratio (PR) adalah perbandingan antara Specific Yield (Y_f) dengan Reference Yield (Y_r) yang menunjukkan efisiensi sistem PLTS terhadap potensi energi surya yang tersedia, yang menggambarkan seberapa baik sistem mengonversi energi matahari yang diterima menjadi energi listrik.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r}$$

Keterangan :

PR = *Performance Ratio*

Y_f = *Spefisifc Yield* (kWh/kWp)

Y_r = *Reference Yield* (kWh/m²)

- Efisiensi Panel Surya

$$\eta_{pv \text{ rata-rata}} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

Keterangan :

η_{pv} = Efisiensi Panel

P_{out} = Daya yang dihasilkan (Watt)

P_{in} = Daya yang diterima (Watt)

- Efisiensi Sistem PLTS

$$\eta_{sistem} = \frac{Energi}{H_t \times A} \times 100\%$$

Keterangan :

η_{sistem} = Efisiensi Sistem PLTS

H_t = Total iradiasi harian (W/m²) atau (kW/m²)

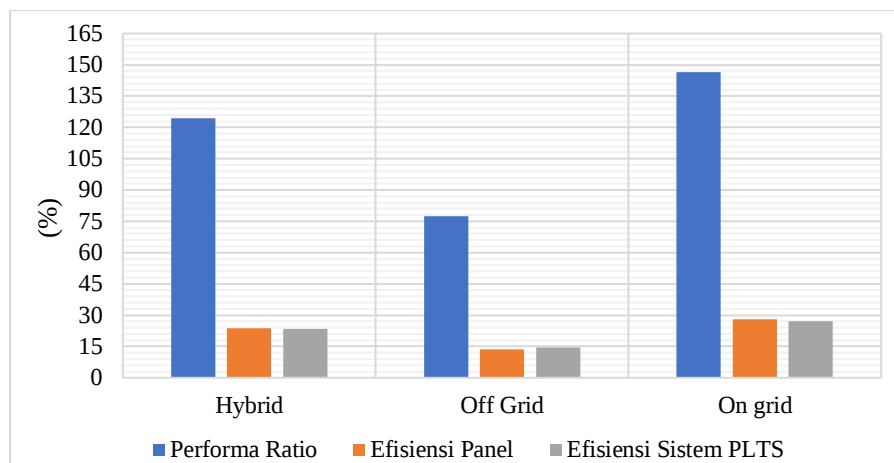
A = Luas modul surya (m²)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan dan Implementasi sistem PLTS hybrid berbasis IoT pada Gedung Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan (TRET) Politeknik Negeri Ujung Pandang berhasil dilakukan dengan mengintegrasikan panel surya, inverter hybrid, baterai, dan jaringan PLN, serta sistem monitoring berbasis *Internet Of Things (IoT)*. Sistem diuji pada tiga mode operasi: *hybrid*, *on grid*, dan *off grid*. Pengujian dilakukan dengan merekam besaran tegangan, arus, daya, energi, serta parameter iradiasi harian untuk menganalisis performa, efisiensi panel, dan efisiensi sistem. Adapun hasil analisis yang telah dilakukan yang dapat dilihat pada Tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1. Hasil Analisis Kinerja PLTS

Mode	Performa Ratio (%)	Efisiensi Panel (%)	Efisiensi Sistem PLTS (%)
Hybrid	124,3	23,7	23,5
Off Grid	77,3	13,6	14,6
On Grid	146,5	27,9	27,7



Gambar 2. Grafik Perbandingan antara *Performa Ratio*, Efisiensi Panel, Efisiensi Sistem PLTS pada Setiap Mode

Grafik memperlihatkan perbandingan kinerja PLTS *hybrid*, *off grid*, dan *on grid* berdasarkan parameter performance ratio (PR), efisiensi panel, serta efisiensi sistem. Sistem *hybrid* menunjukkan performa stabil dengan nilai PR 124,3%, efisiensi panel 23,7%, dan efisiensi sistem 23,5%, yang mencerminkan kemampuan kombinasi panel surya, baterai, dan PLN dalam menjaga pasokan daya yang reliabel dan efisien. Sementara sistem *on grid* menunjukkan nilai PR yang mencapai 146,5%, efisiensi panel 27,9%, dan efisiensi sistem 27,7%. Hal tersebut terjadi karena pemanfaatan energi langsung disalurkan ke jaringan PLN tanpa rugi penyimpanan. Sementara itu, sistem *off grid* menghasilkan performa terendah dengan PR 77,3%, efisiensi panel 13,6%, serta efisiensi sistem 14,6%, dipengaruhi oleh kehilangan energi pada baterai dan ketergantungan penuh pada intensitas matahari. Secara keseluruhan, sistem *hybrid* menjadi opsi paling seimbang untuk penggunaan energi terbarukan di bangunan, karena menawarkan kontinuitas suplai daya dengan tingkat efisiensi yang baik.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, serta pengujian sistem monitoring *IoT* pada PLTS *hybrid*, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Sistem yang telah dirancang dan berfungsi dengan baik dalam melakukan monitoring serta pengontrolan secara real-time. Sistem ini mampu menampilkan parameter seperti tegangan, arus, daya, dan energi melalui *Platform IoT* yang terhubung dengan jaringan internet. Kombinasi antara mikrokontroler NodeMCU, sensor PZEM, dan aplikasi *Blynk* memungkinkan pengguna memonitor serta mengontrol beban secara efektif dan akurat.
2. Hasil analisis performansi menunjukkan bahwa sistem PLTS *hybrid* memiliki nilai iradiasi harian mencapai 6,37 kWh/m²/hari, *Specific Yield (Y_f)* sebesar 7,92 kWh/kWp dan nilai *Performance Ratio (PR)* mencapai 124,3% dengan efisiensi rata – rata panel surya sebesar 23,7% dan efisiensi sistem PLTS sekitar 23,5%, menandakan performa konversi energi yang optimal.. Sementara itu, sistem PLTS *on grid* memiliki efisiensi panel sebesar 27,9% dan efisiensi sistem PLTS 27,7%, dengan PR sebesar 146,5%, menunjukkan kinerja efisien dalam pemanfaatan energi karena energi langsung disalurkan ke jaringan PLN tanpa rugi penyimpanan. Adapun sistem *off grid* memiliki efisiensi panel 13,6%, efisiensi sistem PLTS 14,6%, dan PR sebesar 77,3%, yang menunjukkan adanya kehilangan energi akibat proses pengisian dan pelepasan baterai. Secara keseluruhan, sistem *hybrid* mampu menggabungkan keunggulan kedua sistem lainnya, menghasilkan performa yang stabil, efisien, efektif, dan juga menyediakan pemantauan dan pengendalian berbasis *IoT* yang dapat dipantau melalui platfrom *Blynk* secara *real – time*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEA, *World Energy Outlook 2023*. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [2] BP Statistical Review, *Statistical Review of World Energy 2023*. London: BP plc, 2023.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [4] REN21, *Renewables 2023 Global Status Report*. Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2023.
- [5] Dewan Energi Nasional, *Outlook Energi Indonesia 2023*. Jakarta: DEN, 2023.
- [6] Pemerintah Republik Indonesia, *Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional*. Jakarta, 2014.
- [7] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, *Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)*. Jakarta: KESDM, 2017.
- [8] A. Mellit and S. A. Kalogirou, "Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, no. 5, pp. 574–632, 2018.
- [9] T. Markvart and L. Castañer, *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Oxford: Elsevier, 2019.
- [10] H. Patel, *Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage*. New York: McGraw-Hill, 2018.
- [11] M. H. Albadi and E. F. El-Saadany, "Overview of hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 8, pp. 1813–1824, 2019.
- [12] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, P. J. Ker, et al., "A review of hybrid renewable energy systems and their applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 124, 2020.
- [13] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of Things for smart cities," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2019.
- [14] S. Madakam, R. Ramaswamy, and S. Tripathi, "Internet of Things (IoT): A literature review," *Journal of Computer and Communications*, vol. 3, no. 5, pp. 164–173, 2019.
- [15] M. M. Rahman, M. A. Mahmud, and H. R. Pota, "Energy management of hybrid renewable energy system using IoT monitoring," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 330–340, 2021.