

Sistem Monitoring PLTS pada Miniatur PLTH berbasis Mikrokontroler

Bharata Sena Indra Permana^{a)}, Anicetus Damar Aji^{a)}, Muchlishah^{*a)}, Dezetty Monika^{a)}

(Received 06 September 2024 || Revised 07 Juni 2025 || Published 30 Juni 2025)

Abstract: *This study focused on the development of a monitoring system for a solar power plant within a miniature hybrid power system, utilizing the ESP32 microcontroller. The system was designed to enhance the efficiency and reliability of solar power monitoring by integrating sensors for light intensity, temperature, and humidity. Sensor data were analyzed and displayed in real time through the Blynk application, enabling practical remote monitoring via mobile devices. The results indicated a significant positive correlation between light intensity and temperature with the electrical power output. The system recorded a maximum voltage of 21,42 V, a maximum current of 1,95 A, and a peak power of 27,2 W from a 50 Wp solar panel measuring 40 cm × 62,5 cm × 2,5 cm, under peak light intensity and temperature conditions. Furthermore, the system effectively identified daily patterns in output power variability. In conclusion, the microcontroller-based monitoring system developed in this study offered an efficient and cost-effective solution for solar power plant management, significantly improving data acquisition and system performance monitoring. These findings contributed meaningfully to the advancement of more efficient and reliable photovoltaic (PV) technology.*

Keywords: *Solar power, ESP32, hybrid system, remote monitoring, photovoltaic performance*

1. Pendahuluan

Energi Baru dan Terbarukan (EBT) merupakan solusi penting dalam menghadapi tantangan krisis energi global dan dampak negatif dari penggunaan bahan bakar fosil [1]. Penggunaan EBT tidak hanya mengurangi emisi gas rumah kaca, tetapi juga menjamin ketersediaan energi yang berkelanjutan di masa depan. Menurut laporan dari *International Energy Agency* transisi ke energi terbarukan adalah kunci untuk mencapai target emisi nol bersih global [2].

Dua sumber EBT yang semakin populer adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). PLTS adalah sistem yang memanfaatkan energi matahari untuk menghasilkan listrik melalui panel surya yang mengubah sinar matahari menjadi energi listrik menggunakan efek fotovoltai. PLTS merupakan pilihan yang efektif karena energi matahari bersifat melimpah dan dapat diperbarui. Selain itu, PLTS tidak menghasilkan emisi karbon selama proses produksinya, sehingga ramah lingkungan [3] dan teknologi fotovoltai telah mencapai efisiensi yang lebih tinggi dan biaya produksi yang lebih rendah [4], membuatnya lebih kompetitif dibandingkan dengan sumber energi konvensional. Sementara itu, PLTB menggunakan tenaga angin untuk memutar turbin yang kemudian menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. PLTB sangat efektif di daerah dengan angin yang konsisten dan kuat. Sama seperti PLTS, PLTB juga tidak menghasilkan emisi karbon dan dapat diperbarui, menjadikannya solusi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. *Global Wind Energy Council* melaporkan bahwa kapasitas terpasang PLTB global terus meningkat setiap tahun, menunjukkan peningkatan kepercayaan dan investasi di sektor ini [5].

Kombinasi PLTS dan PLTB dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH) menawarkan keunggulan dari kedua sumber energi tersebut. Sistem hibrida ini meningkatkan stabilitas dan kontinuitas pasokan energi karena kedua sumber dapat saling melengkapi sesuai kondisi cuaca dan waktu. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem hibrida mampu meningkatkan efisiensi serta mengurangi biaya operasional dan ketergantungan pada sumber energi tunggal [6].

Dalam konteks optimalisasi sistem, monitoring menjadi elemen penting. Sistem monitoring yang efektif memungkinkan pemantauan kinerja secara real-time, deteksi dini kerusakan, dan pengambilan keputusan berbasis data. Namun, penelitian-penelitian sebelumnya pada sistem monitoring PLTS masih

memiliki keterbatasan, seperti hanya memantau parameter dasar berupa tegangan dan arus [7], atau hanya menggabungkan dua parameter lingkungan seperti suhu dan kelembapan [8]. Padahal, intensitas cahaya matahari merupakan faktor utama yang memengaruhi daya keluaran PLTS, dan mengabaikannya dapat mengurangi akurasi analisis performa sistem. Oleh karena itu, diperlukan sistem monitoring yang lebih komprehensif, yang tidak hanya memantau tegangan dan arus, tetapi juga memperhitungkan tiga parameter penting lingkungan: intensitas cahaya, suhu, dan kelembapan.

Menurut sebuah studi yang dilakukan oleh *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), monitoring yang efektif adalah kunci untuk memaksimalkan kinerja dan umur panjang sistem energi terbarukan [9]. Selain itu, kemajuan teknologi mikrokontroler seperti ESP32 memungkinkan pengembangan sistem monitoring yang murah, efisien, dan terhubung secara real-time melalui aplikasi *Internet of Things* (IoT). Studi oleh Andrew dan Duflo-López telah menunjukkan bahwa penggunaan mikrokontroler dapat meningkatkan efisiensi monitoring dan menurunkan biaya pemeliharaan [10]. Penelitian ini menyajikan integrasi sistem monitoring berbasis mikrokontroler pada miniatur PLTH dengan tiga parameter lingkungan sekaligus yang masih jarang dijumpai dalam literatur.

Penggunaan mikrokontroler dalam sistem monitoring PLTS dan PLTB menawarkan berbagai keuntungan. Mikrokontroler adalah perangkat yang efisien, dapat diprogram, dan relatif murah, yang mampu melakukan pemrosesan data dan pengendalian dalam waktu nyata. Dengan mikrokontroler, sistem monitoring dapat diintegrasikan dengan berbagai sensor dan perangkat komunikasi untuk memberikan informasi yang akurat dan responsif mengenai status operasional dari PLTS dan PLTB. Penelitian terbaru oleh Andrew menunjukkan bahwa penggunaan mikrokontroler dapat meningkatkan efisiensi sistem monitoring dan mengurangi biaya pemeliharaan [11]. Dan juga berfungsi dalam meningkatkan kecepatan respon dan akurasi monitoring [12].

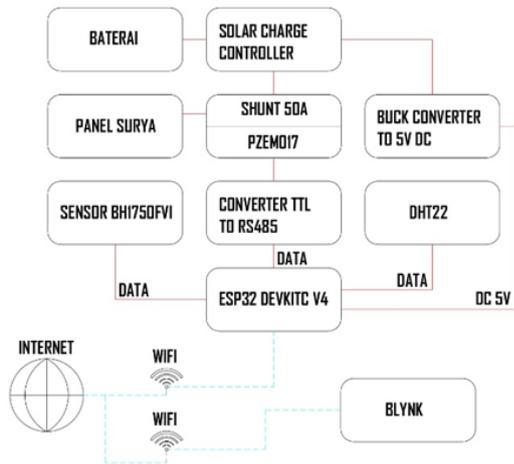
Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan mengembangkan sistem monitoring berbasis mikrokontroler ESP32 pada miniatur PLTH, yang mengintegrasikan sensor intensitas cahaya, suhu, dan kelembapan. Data dikirimkan secara *real-time* melalui aplikasi Blynk, sehingga dapat dipantau dari jarak jauh menggunakan perangkat *mobile*. Sistem ini tidak hanya menawarkan efisiensi biaya, tetapi juga meningkatkan keandalan dan efektivitas pemantauan sistem PLTS dalam konteks hibrida.

*Korespondensi: muchlishah@elektro.pnj.ac.id

a) Prodi Teknik Otomasi Listrik Industri, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. Dr. G.A Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425, Indonesia

2. Metode

Penelitian ini mengembangkan dan menguji sistem monitoring PLTS pada miniatur PLTH berbasis mikrokontroler. Sistem ini dirancang untuk memantau dan mencatat parameter-parameter penting seperti tegangan, arus, daya, energi, suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya secara *real-time* dengan komponen utama yang saling terintegrasi. Gambar 2.1 adalah blok diagram dari sistem yang dikembangkan.



GAMBAR 2.1 BLOK DIAGRAM SISTEM.

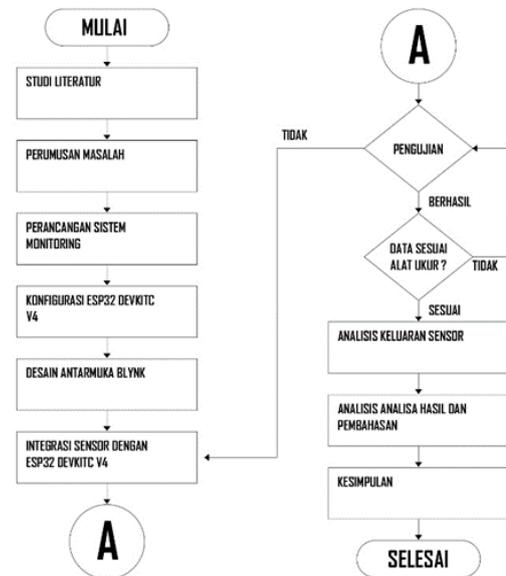
Berikut penjelasan fungsi komponen di penelitian ini dari blok diagram dari Gambar 2.1.

- Panel surya berfungsi mengkonversi energi matahari menjadi listrik.
- Baterai berfungsi menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya.
- *Solar Charge Controller* berfungsi mengatur proses pengisian baterai dan melindungi baterai dari *overcharging*.
- *Shunt 50A PZEM017* berfungsi mengukur tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan.
- *Converter TTL to RS485* berfungsi mengkonversi sinyal dari sensor ke format yang dapat dibaca oleh mikrokontroler.
- ESP32 DevKitC V4 merupakan mikrokontroler yang mengumpulkan data dari berbagai sensor dan mengirimkan data ke antarmuka pengguna melalui WiFi.
- Sensor BH1750FVI digunakan mengukur intensitas cahaya.
- DHT22 digunakan mengukur suhu dan kelembapan.
- *Buck Converter to 5V DC* untuk mengubah tegangan keluaran menjadi 5V DC yang stabil.
- Blynk merupakan aplikasi untuk memantau data secara *real-time* melalui internet.

Data dikumpulkan melalui berbagai sensor yang diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32. Sensor-sensor ini mengukur parameter seperti tegangan, arus, daya, suhu,

kelembapan, dan intensitas cahaya. Data dikirim secara *real-time* ke aplikasi Blynk untuk pemantauan jarak jauh.

Prosedur penelitian diilustrasikan dalam diagram alur pada Gambar 2.2.

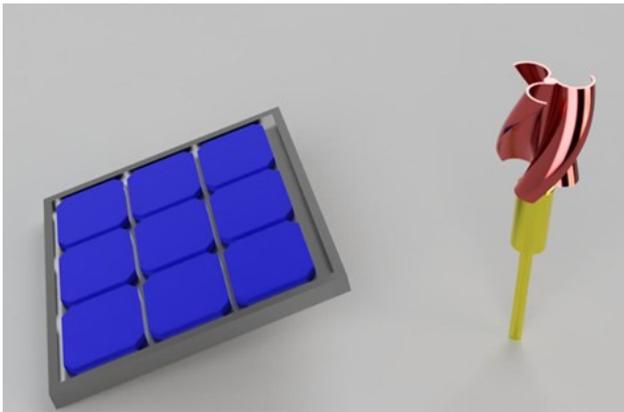


GAMBAR 2.2 DIAGRAM ALIR PERANCANGAN

Penjelasan dari setiap tahap dari diagram alir penelitian Gambar 2.2 adalah sebagai berikut.

1. Studi Literatur: mengumpulkan informasi dari berbagai sumber untuk memahami konsep dan teknologi yang terkait dengan PLTS dan sistem monitoring berbasis mikrokontroler.
2. Perumusan Masalah: mendefinisikan masalah yang akan diselesaikan oleh penelitian ini.
3. Perancangan Sistem Monitoring: merancang sistem monitoring dengan mempertimbangkan komponen-komponen yang akan digunakan.
4. Konfigurasi ESP32 DevKitC V4: mengatur mikrokontroler untuk mengumpulkan data dari sensor dan mengirimkannya ke aplikasi Blynk.
5. Desain Antarmuka Blynk: membuat antarmuka pengguna pada aplikasi Blynk untuk memantau data secara *real-time*.
6. Integrasi Sensor dengan ESP32 DevKitC V4: menghubungkan dan menguji sensor dengan mikrokontroler.
7. Pengujian Sistem: melakukan pengujian untuk memastikan sistem berfungsi dengan baik.
8. Analisis Data: menganalisis data yang dikumpulkan untuk mengevaluasi kinerja sistem.
9. Kesimpulan: menyimpulkan temuan dari penelitian ini dan memberikan rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut.

Gambar 2.3 merupakan desain 3D dari perancangan sistem monitoring PLTS pada miniatur PLTH, terdapat dua komponen utama pada desain perancangan ini yaitu *PV Module monocrystalline* dengan dimensi 40 cm x 62,5 cm x 2,5 cm dan motor generator dc magnet tetap dengan spesifikasi maksimal tegangan yang dihasilkan 12 V, motor generator ini dipasangkan dengan *blade vertical* dengan skala 1:15 dari aslinya.



GAMBAR 2.3 DESAIN 3D PERANCANGAN SISTEM

Gambar 2.4 merupakan *layout* sistem monitoring atau desain antarmuka pengguna saat mengakses aplikasi blynk, pembacaan data berubah setiap dua detik dalam satu waktu, pembacaan dapat diakses oleh siapapun dan dimanapun dengan internet dan akses dari pemilik *blynk host*.



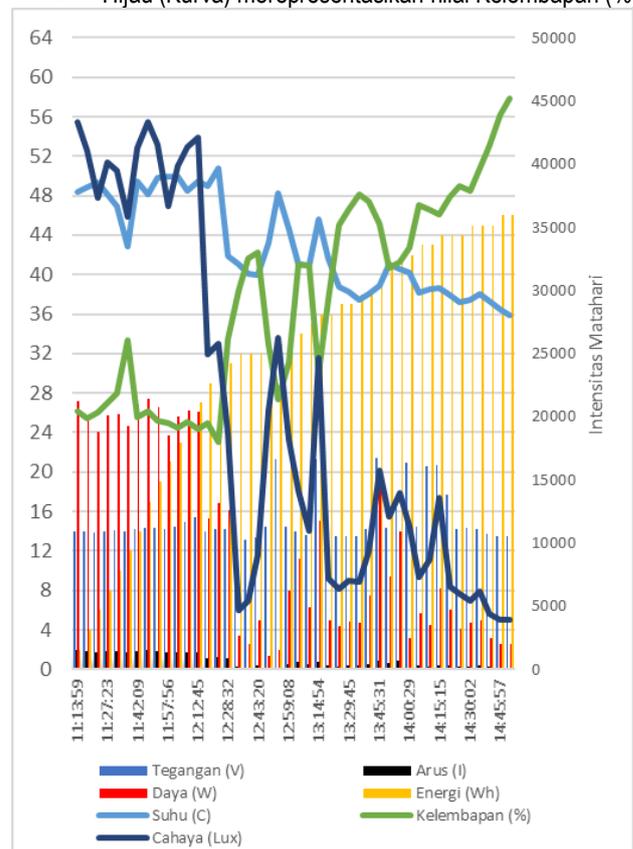
GAMBAR 2.4 LAY OUT SISTEM MONITORING

Ada 3 metode analisis data yang diterapkan pada penelitian ini. Metode pertama yaitu Statistik Deskriptif atau menghitung rata-rata, maksimum, dan minimum untuk setiap parameter yang diukur, selanjutnya Analisis Korelasi Menilai hubungan antara parameter lingkungan dan output daya untuk memahami faktor-faktor yang mempengaruhi performa PLTS, terakhir menggunakan metode Visualisasi Data Membuat grafik untuk menunjukkan tren perubahan parameter yang diukur selama periode pengujian.

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan Gambar 3.1 yang merupakan grafik hasil pengujian, data pengujian sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berbasis mikrokontroler memperlihatkan hasil monitoring terhadap tujuh parameter, yaitu:

- biru muda (Bar) merepresentasikan nilai tegangan (V);
- merah (Bar) merepresentasikan nilai daya (W);
- hitam (Bar) merepresentasikan nilai Arus (I);
- oranye (Bar) merepresentasikan nilai Energi (Wh);
- Biru muda (Kurva) merepresentasikan nilai suhu (C);
- Biru tua (Kurva) merepresentasikan nilai Cahaya (Lux); dan
- Hijau (Kurva) merepresentasikan nilai Kelembapan (%);



GAMBAR 3.1 GRAFIK HASIL PENGUJIAN

Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel surya 50 Wp mampu menghasilkan tegangan antara 13,14 V hingga 21,42 V dan arus antara 0,1 A hingga 1,95 A. Daya maksimum yang dicapai adalah 27,2 W. Terlihat bahwa daya tertinggi dihasilkan pada pukul 12:00 hingga 13:00, saat intensitas cahaya dan suhu berada pada titik maksimum serta kelembapan relatif rendah. Hal ini mencerminkan posisi matahari yang optimal dan paparan radiasi maksimal terhadap panel surya. Temuan ini sejalan dengan hasil

penelitian dalam [13], yang menunjukkan bahwa peningkatan intensitas cahaya secara signifikan meningkatkan tegangan rangkaian terbuka, arus hubung singkat, dan daya keluaran maksimum dari sel surya. Ini menunjukkan bahwa semakin tinggi intensitas cahaya, semakin baik performa sistem PLTS.

Selain itu, suhu menunjukkan korelasi positif terhadap intensitas cahaya, meskipun peningkatan suhu berpotensi menurunkan efisiensi sistem surya. Dalam penelitian [14], penggunaan machine learning terbukti meningkatkan akurasi prediksi terhadap suhu dan iradiasi matahari, yang penting untuk mengoptimalkan integrasi daya ke jaringan listrik dan meningkatkan estimasi output dari sistem PLTS.

Kelembapan menunjukkan tren sebaliknya terhadap suhu dan intensitas cahaya. Dalam pengujian ini, kelembapan berkisar antara 23% hingga 57,9%. Penurunan daya terjadi saat kelembapan meningkat, mendukung temuan pada [16], yang menunjukkan bahwa kombinasi kelembapan tinggi dan akumulasi debu pada permukaan panel secara signifikan meningkatkan arus bocor dan menyebabkan potential-induced degradation (PID). Arus bocor meningkat secara eksponensial saat kelembapan melebihi 45% RH, yang pada akhirnya mempercepat penurunan output daya.

Lebih lanjut, kestabilan performa modul fotovoltaik juga dipengaruhi oleh suhu lingkungan. Dalam studi sebelumnya [15], dijelaskan bahwa suhu tinggi dapat berdampak pada efisiensi dan stabilitas, khususnya pada solid-state dye-sensitized solar cells (ss-DSSCs). Meskipun jenis modul yang digunakan berbeda, prinsip degradasi efisiensi akibat suhu tinggi juga relevan dalam konteks panel konvensional seperti yang digunakan dalam penelitian ini.

Dengan demikian, sistem monitoring PLTS berbasis mikrokontroler ini terbukti efektif dalam mendeteksi pengaruh berbagai parameter lingkungan terhadap kinerja sistem. Dibandingkan dengan literatur, data yang diperoleh telah sesuai dengan hasil dan prinsip ilmiah sebelumnya. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan dengan integrasi algoritma prediksi berbasis machine learning untuk meningkatkan keakuratan dan efisiensi sistem secara real-time [14].

4. Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan beberapa kesimpulan penting terkait sistem monitoring PLTS berbasis mikrokontroler yang dikembangkan dan diuji pada miniatur PLTH. Data yang dikumpulkan menunjukkan bahwa antara pukul 12:00 hingga 13:00 menghasilkan tegangan terbesar adalah 21,42 V arus terbesar 1,95 A dan daya terbesar 27,2 W pada panel surya berkapasitas 50 Wp. Hal ini dikarenakan posisi matahari yang berada di puncaknya, sehingga intensitas cahaya matahari mencapai nilai tertinggi dan diserap secara optimal oleh panel surya. Intensitas cahaya yang tinggi menghasilkan radiasi matahari maksimum yang diterima oleh panel, mengakibatkan peningkatan daya yang dihasilkan. Implementasi mikrokontroler ESP32 DevKitC V4 dalam sistem monitoring ini terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi pemantauan dan pengumpulan data. Mikrokontroler tersebut mampu memproses dan mengirim data secara real-time ke aplikasi Blynk melalui koneksi WiFi, memungkinkan pemantauan jarak jauh dan integrasi dengan platform IoT. Sistem monitoring yang dirancang ini memberikan data yang lumayan konsisten dan stabil dimana dalam program di tetapkan waktu pengiriman data adalah 60 detik pada realita nya 63 detik. Sensor-sensor yang digunakan,

seperti sensor intensitas cahaya BH1750FVI, sensor suhu dan kelembapan DHT22, serta modul sensor daya PZEM017, memberikan pengukuran yang akurat dan dapat diandalkan. Analisis data memperlihatkan bahwa intensitas cahaya dan suhu memiliki korelasi positif terhadap daya yang dihasilkan, sementara kelembapan menunjukkan hubungan negatif. Hal ini menguatkan pentingnya memasukkan intensitas cahaya sebagai parameter utama dalam sistem monitoring PLTS, yang sebelumnya sering diabaikan dalam beberapa penelitian terdahulu yang hanya menggunakan satu atau dua parameter pendukung. Sistem ini memberikan informasi yang lebih komprehensif, yang membantu dalam mendeteksi anomali sejak dini dan mempercepat proses pemeliharaan jika terjadi gangguan. Desain sistem monitoring yang melibatkan integrasi beberapa sensor dengan mikrokontroler ESP32 serta platform Blynk juga terbukti mudah dikonfigurasi dan user-friendly. Antarmuka Blynk memungkinkan pengguna untuk memantau performa PLTS dengan nyaman melalui perangkat mobile. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan mikrokontroler dalam sistem monitoring PLTS dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi biaya operasional, sekaligus menjadi solusi monitoring yang hemat biaya dan fleksibel. Sebagai rekomendasi pengembangan ke depan, terdapat beberapa strategi yang dapat dilakukan untuk memperluas penerapan sistem monitoring berbasis IoT ini dalam konteks energi terbarukan yang lebih luas. Pertama, sistem dapat dikembangkan ke skala yang lebih besar dan multienergi (seperti PLTS-PLTB-PLTMH) dengan pendekatan arsitektur modular yang mendukung integrasi berbagai sensor tambahan. Kedua, integrasi sistem monitoring dengan platform cloud dan big data seperti ThingsBoard atau Google Cloud akan membuka peluang analisis data secara lebih mendalam serta pelaporan otomatis berbasis waktu nyata. Ketiga, aspek keamanan siber dalam sistem IoT perlu diperkuat dengan implementasi protokol enkripsi dan otentikasi perangkat untuk melindungi data dan mencegah manipulasi eksternal. Keempat, sistem ini juga berpotensi besar untuk digunakan sebagai media edukasi atau alat bantu teknis di daerah off-grid dan komunitas berbasis energi terbarukan. Terakhir, pengembangan dokumentasi teknis dan standarisasi desain sangat penting agar sistem ini dapat direplikasi, diadaptasi, dan dimanfaatkan secara luas oleh peneliti, praktisi, maupun komunitas. Dengan strategi tersebut, sistem monitoring berbasis IoT yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki potensi besar untuk berkontribusi dalam akselerasi transisi energi menuju sistem yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Referensi

- [1] I. Renewable and E. Agency, "Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050, Executive Summary," 2018.
- [2] I. E. A. International and E. Agency, "Renewable Energy Market Update," 2024.
- [3] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, and R. Gorini, "The role of renewable energy in the global energy transformation," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 24, no. June 2018, pp. 38–50, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.01.006.
- [4] F. Ise and P. S. E. Projects, "Photovoltaics Report," no. May, 2024.
- [5] G. Wind and E. Council, "GWEC | GLOBAL WIND

- REPORT 2022," 2022.
- [6] J. Lian, Y. Zhang, C. Ma, Y. Yang, and E. Chaima, "A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 199, no. September, p. 112027, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112027.
- [7] I. Dwi, W. Hermanto, and B. Suprianto, "Sistem Monitoring dan Pengukuran Pembangkit Listrik Surya dan Angin Berbasis Internet of Things (IoT)," 2022.
- [8] M. F. Pratama, "Sistem Monitoring Dan Kontrol Daya Plts Menggunakan Iot Berbasis Fuzzy Logic," pp. 1–81, 2021, [Online]. Available: [http://repository.unissula.ac.id/22976/12/Magister Teknik Elektro_20601700007_fullpdf.pdf](http://repository.unissula.ac.id/22976/12/Magister_Teknik_Elektro_20601700007_fullpdf.pdf)
- [9] N. Renewable, S. Alliance, and S. National, "Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems ; 3rd Edition Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems ; 3rd Edition," no. December, 2018.
- [10] I. H. Microgrids, R. E. Based, and B. Models, "Optimization of Isolated Hybrid Microgrids with Renewable Energy Based on Different Battery Models," 2020.
- [11] G. Boubakr, F. Gu, L. Farhan, and A. Ball, "Enhancing Virtual Real-Time Monitoring of Photovoltaic Power Systems Based on the Internet of Things," pp. 1–16, 2022.
- [12] M. Z. Haq, "Pemanfaatan IoT (Internet of Things) Dalam Monitoring Kadar Kepekatan Asap dan Kendali Camera Tracking," vol. 5, no. 1, pp. 86–92, 2021.
- [13] Z. Li, J. Yang, and P. A. N. Dezfuli, "Study on the Influence of Light Intensity on the Performance of Solar Cell," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6648739.
- [14] W. Tercha, S. A. Tadjer, F. Chekired, and L. Canale, "Machine Learning-Based Forecasting of Temperature and Solar Irradiance for Photovoltaic Systems," *Energies*, vol. 17, no. 5, 2024, doi: 10.3390/en17051124.
- [15] U. Mehmood, A. Al-Ahmed, F. A. Al-Sulaiman, M. I. Malik, F. Shehzad, and A. U. H. Khan, "Effect of temperature on the photovoltaic performance and stability of solid-state dye-sensitized solar cells: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. March 2016, pp. 946–959, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.114.
- [16] Y. Gao, M. Xue, H. Tian, F. Guo, Y. Jin, and B. Wang, "Investigating the Impact of Humidity on Potential-Induced Degradation (PID) in Photovoltaic Modules with Ash Accumulation," *IEICE Electron. Express*, vol. 21, no. 16, pp. 1–6, 2024, doi: 10.1587/elex.21.20240357.