

Real-Time Monitoring System for Solar Power Plants Using PLC and IoT-Based Architecture

Article History:*Received**14 February 2025**Revised**27 March 2025**Accepted**20 April 2025***MUHAMMAD HAEKAL KHOWARIZMI¹, SETIYONO²**¹Sistem Komputer Universitas Gunadarma, Indonesia²Teknik Elektro Universitas Gunadarma, Indonesia

Email: khowarizmih1800@gmail.com

ABSTRAK

Integrasi sistem energi terbarukan dengan platform monitoring digital menjadi hal penting dalam mendukung efisiensi manajemen energi dan deteksi gangguan. Penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem monitoring real-time pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan mengintegrasikan teknologi Programmable Logic Controller (PLC) dan Internet of Things (IoT). Sistem ini menggunakan sensor tegangan dan arus untuk mengumpulkan parameter listrik dari panel surya, yang kemudian diproses menggunakan PLC Haiwell dan ditampilkan secara lokal melalui HMI. Selain itu, data dikirim ke platform IoT berbasis cloud menggunakan modul Wi-Fi, sehingga memungkinkan pemantauan jarak jauh melalui dashboard. Sistem diuji menggunakan simulator panel surya dalam kondisi terkontrol. Hasil pengujian menunjukkan akuisisi data real-time yang akurat dengan rata-rata deviasi di bawah 3% dibandingkan dengan alat ukur pembanding. Sistem ini menunjukkan solusi praktis yang ekonomis dan dapat diimplementasikan untuk pemantauan energi surya skala kecil hingga menengah.

Kata kunci: IoT, PLTS, , PLC, pemantauan energi

ABSTRACT

Integrating renewable energy systems with digital monitoring platforms has become essential for efficient energy management and fault detection. This research presents the development of a real-time monitoring system for Solar Power Plants (PLTS) by integrating Programmable Logic Controller (PLC) and Internet of Things (IoT) technologies. The system uses voltage and current sensors to collect electrical parameters from solar panels, which are processed via a Haiwell PLC and displayed locally on an HMI. Additionally, data are transmitted to a cloud-based IoT platform using a Wi-Fi module, enabling remote monitoring via dashboards. The system was tested using a solar panel simulator under controlled conditions. The results showed accurate real-time data acquisition with an average deviation below 3% compared to benchmark measurement tools. This low-cost and scalable system demonstrates a practical solution for modernizing solar energy monitoring in small to medium-scale installations.

Keywords: energy monitoring, IoT, PLTS, PLC

This is an open-access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



1. PENDAHULUAN

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang semakin banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor, termasuk industri dan akademik **(Afif, 2022)**. Salah satu bentuk pemanfaatan energi surya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), yang dapat menjadi solusi utama dalam mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil serta menurunkan emisi karbon **(Bakar, dkk, 2024)**. PLTS memiliki potensi besar dalam penyediaan energi bersih, namun tantangan utama dalam operasionalnya adalah kurangnya sistem pemantauan yang mampu memberikan informasi real-time terkait kondisi dan kinerja sistem **(Soedjarwanto, dkk, 2024)**.

Sistem PLTS di UG Techno Park belum dilengkapi dengan sistem pemantauan otomatis berbasis IoT, sehingga pengelolaan dan pemantauan masih dilakukan secara manual. Ketiadaan sistem pemantauan ini menyebabkan kesulitan dalam mendeteksi gangguan serta mengoptimalkan pengelolaan energi. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan yang dapat memberikan informasi real-time mengenai kondisi operasional PLTS untuk meningkatkan efisiensi serta memastikan keandalan sistem.

Teknologi Internet of Things (IoT) menjadi solusi dalam sistem pemantauan energi karena mampu meningkatkan efisiensi, efektivitas, serta memungkinkan pengendalian jarak jauh **(Arsella, dkk, 2023)**. Dengan IoT, pengguna dapat memantau parameter penting seperti arus, tegangan, daya, suhu, serta intensitas cahaya matahari secara real-time melalui jaringan internet **(Sari, dkk, 2024)**. Selain itu, teknologi ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat dalam pengelolaan sistem PLTS.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk pemantauan PLTS berbasis IoT, salah satunya dengan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang memiliki kemampuan komunikasi IoT yang baik **(Rifaini, dkk, 2022)**. Namun, ESP32 memiliki keterbatasan dalam jumlah pin analog serta konektivitas yang kurang stabil, yang dapat menghambat efektivitas sistem pemantauan **(Ahmad Syafi'i, dkk, 2024)**. PLTS memerlukan beberapa sensor, seperti sensor arus, daya, tegangan, serta intensitas cahaya, yang sebagian besar menggunakan sinyal keluaran kontinu atau analog **(Novita, dkk., 2021)**.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, diperlukan solusi yang lebih andal dan stabil dalam sistem pemantauan PLTS berbasis IoT. Salah satu alternatif yang dapat digunakan adalah Programmable Logic Controller (PLC), yang memiliki keunggulan dalam stabilitas, daya tahan, serta kemampuannya dalam menangani berbagai jenis input dan output secara simultan **(Ifraim, dkk, 2025)**. Selain itu, PLC dirancang untuk lingkungan industri, sehingga lebih tahan terhadap gangguan listrik dan kondisi lingkungan yang kurang stabil dibandingkan dengan mikrokontroler berbasis IoT lainnya **(Mareli Telaumbanua, 2021)**.

Keandalan sistem pemantauan PLTS juga sangat bergantung pada sensor yang digunakan. Salah satu sensor penting dalam sistem ini adalah PZEM-017, yang berfungsi untuk mengukur tegangan, arus, dan daya pada sistem PLTS. Sensor ini mampu membaca arus hingga 100A dengan komunikasi berbasis Modbus RTU, yang memungkinkan integrasi yang lebih stabil dengan PLC **(Gunoto, dkk, 2022)**. Selain itu, sensor *Pyranometer* digunakan untuk mengukur intensitas radiasi matahari yang diterima oleh panel surya. Data dari sensor ini sangat penting dalam menganalisis performa PLTS dan menentukan efisiensi konversi energi surya **(Karki, dkk, 2021)**. Disamping itu, sensor energi meter yang digunakan menjadi faktor penting dalam pemantauan penggunaan beban yang digunakan **(Andriana, dkk, 2019)**. Oleh karena itu, digunakan Thera Tem 025D, yaitu sensor energi meter yang berfungsi dalam pemantauan beban yang sudah digunakan.

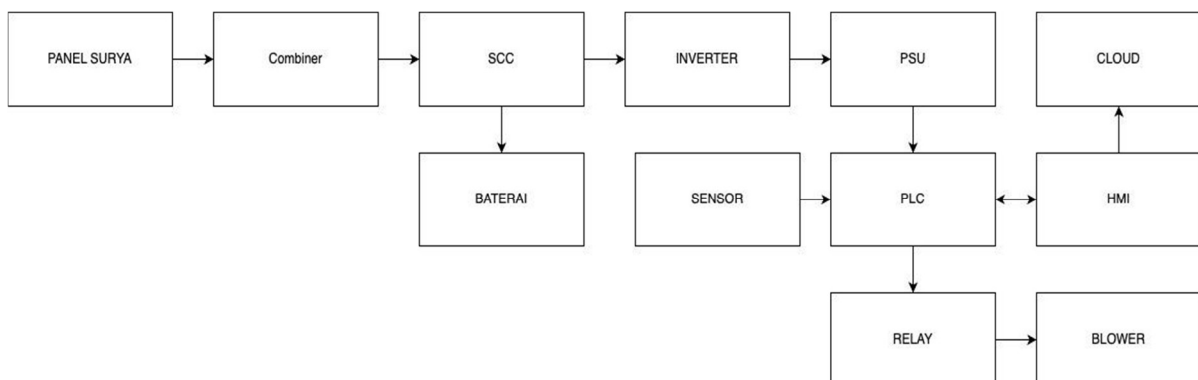
Implementasi sistem pemantauan PLTS berbasis IoT menggunakan PLC ini dilakukan di UG Techno Park, yang merupakan pusat inovasi dan pengembangan teknologi dalam implementasi energi terbarukan di lingkungan akademik. UG Techno Park telah memiliki beberapa sistem PLTS yang siap digunakan, namun sistem pemantauan yang ada masih memiliki keterbatasan dalam pemantauan real-time, sehingga sering kali mengalami kendala dalam mendeteksi gangguan dan menjaga performa optimal PLTS. Dengan dukungan komunikasi berbasis IoT, data dari PLC dapat dikirimkan ke platform cloud atau server lokal untuk dianalisis secara real-time oleh pengguna **(Martin, dkk, 2019)**. Hal ini memungkinkan pemantauan yang lebih akurat serta pengambilan keputusan yang lebih cepat dan tepat **(Fransiscus, dkk, 2023)**.

Selain keandalan sistem pemantauan, pemilihan protokol komunikasi dalam IoT juga berperan penting dalam efektivitas sistem ini. Berbagai protokol komunikasi seperti Modbus TCP/IP, MQTT, dan REST API dapat digunakan untuk menghubungkan PLC dengan sistem pemantauan berbasis IoT **(Sofyan, 2023)**. Modbus TCP/IP sering digunakan dalam industri karena kestabilannya, sementara MQTT lebih hemat bandwidth dan cocok untuk aplikasi IoT **(Ananda, dkk, 2023)**. Dengan pemilihan protokol yang tepat, data dari PLTS dapat dikirim dengan latensi rendah dan keandalan tinggi, sehingga memastikan pemantauan yang lebih optimal dan efisien.

2. METODE

Metode penelitian ini bertujuan untuk membuat sistem pemantauan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berbasis IoT dan PLC di UG Techno Park. Sistem ini dirancang untuk melakukan pemantauan real-time terhadap parameter listrik utama seperti tegangan, arus, daya, serta intensitas cahaya matahari.

2.1 Perancangan Sistem Pemantauan PLTS



Gambar 1. Bagan Perancangan Sistem

Gambar 1 menunjukkan desain sistem pemantauan PLTS secara keseluruhan yang berbasis Programmable Logic Controller (PLC) dan Internet of Things (IoT). Sistem ini berfungsi untuk mengontrol serta memantau kinerja ****Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)**** secara real-time.

Energi listrik dihasilkan oleh panel surya dan disalurkan melalui combiner sebelum masuk ke Solar Charge Controller (SCC) yang mengatur pengisian daya ke baterai sebagai penyimpanan energi. Setelah itu, daya dari baterai diproses oleh inverter untuk dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat digunakan oleh berbagai perangkat elektronik.

Untuk memastikan sistem bekerja secara optimal, digunakan sensor yang mengukur parameter listrik seperti tegangan, arus, dan daya. Data dari sensor ini dikirimkan ke PLC, yang berfungsi sebagai pusat kendali sistem. PLC kemudian mengelola dan mengontrol aliran listrik serta perangkat tambahan seperti relay dan blower, yang berfungsi menjaga suhu sistem tetap stabil.

Sistem ini juga mendukung pemantauan jarak jauh dengan teknologi Human Machine Interface (HMI). HMI mengirimkan data pemantauan ke cloud yang disediakan oleh Haiwell, memungkinkan pengguna untuk mengakses informasi sistem secara real-time dari lokasi mana pun. Dengan arsitektur ini, sistem pemantauan PLTS menjadi lebih efisien, akurat, dan dapat dikontrol dari jarak jauh, sehingga meningkatkan keandalan dalam pengelolaan energi terbarukan.

2.2 Penjaluran Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Sistem pemantauan PLTS berbasis IoT menggunakan PLC di UG Techno Park menggunakan 18 panel surya merek Sankelux tipe SLX-330-72 P dengan kapasitas masing-masing 330 Wp. Panel ini dikonfigurasi dalam dua seri dan tiga paralel sehingga dapat menghasilkan tegangan sekitar 75.78 V dan arus 26.07 A dalam kondisi penyinaran maksimal. Panel-panel ini dikumpulkan dalam kotak kombiner yang dilengkapi dengan fuse dan surge arrester untuk melindungi dari lonjakan arus dan tegangan berlebih.

Energi dari panel surya diteruskan ke Solar Charge Controller (SCC) MPPT merek Samoto tipe 60 A, yang berfungsi mengoptimalkan aliran daya ke baterai penyimpanan. SCC ini dapat menyesuaikan tegangan dan arus untuk meningkatkan efisiensi pengisian serta melindungi baterai dari overcharge dan deep discharge. Baterai yang digunakan terdiri dari empat unit berkapasitas 12V 200Ah yang disusun seri untuk mencapai 48V dengan total daya simpan 9600 Wh. Inverter Kenika berkapasitas 3000 Watt digunakan untuk mengonversi daya DC dari baterai menjadi daya AC yang dapat digunakan oleh peralatan listrik. Inverter ini dirancang dengan efisiensi tinggi dan fitur perlindungan sistem. Dengan konfigurasi ini, sistem PLTS dapat beroperasi lebih efisien dan andal dalam menyediakan energi listrik. Ilustrasi Penjaluran PLTS dapat dilihat pada gambar 2 berikut.

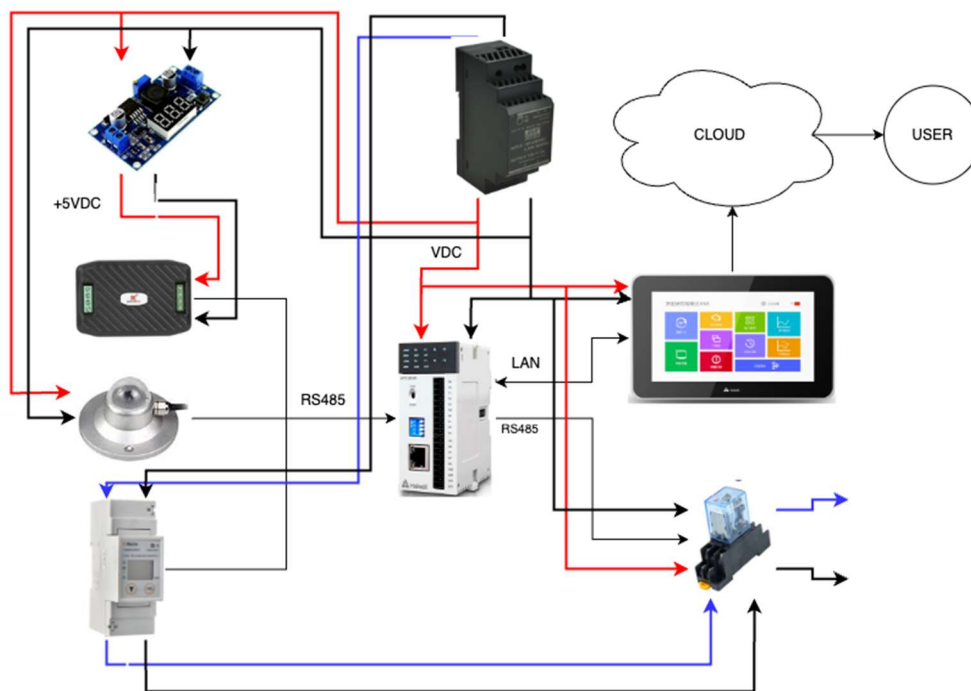


Gambar 2. Rangkaian Penjaluran PLTS

2.3 Perancangan Sistem Pemantauan

Rangkaian PLC dalam sistem pemantauan PLTS menggunakan PLC Haiwell AC10S0R yang berfungsi untuk mengintegrasikan berbagai komponen guna memantau dan mengendalikan kondisi lingkungan serta peralatan secara efisien. Sistem ini menggunakan sensor PZEM-017 untuk mengukur tegangan, arus, daya, dan energi listrik, serta pyranometer untuk mengukur intensitas radiasi matahari.

Komunikasi antara sensor dan PLC menggunakan protokol Modbus RS-485, yang memastikan transfer data yang andal dan efisien dalam jaringan yang melibatkan banyak perangkat. Data yang dikumpulkan oleh PLC diproses untuk mengendalikan perangkat output, seperti blower yang dikontrol melalui relay berdasarkan data suhu dan kelembaban dari sensor. *Human-Machine Interface* (HMI) menampilkan informasi data *real-time* melalui koneksi Ethernet dari PLC, memungkinkan pemantauan sistem secara grafis dan interaktif. HMI juga mengirimkan data menuju *cloud* dengan koneksi WiFi, sehingga data tetap bisa dipantau oleh pengguna. Ilustrasi perancangan sistem pemantauan dapat dilihat pada gambar 3 berikut.



Gambar 3. Penjaluran Sistem PLC

2.4 Perancangan Tampilan HMI

Tampilan HMI pada sistem pemantauan PLTS dirancang dalam beberapa halaman yang memiliki fungsi berbeda setiap halamannya. Penggunaan tampilan ini dikhususkan untuk mempermudah pengguna dalam memantau dan mengendalikan sistem secara efisien. Tampilan awal HMI pada Gambar 4 sistem pemantauan PLTS berisi gambar atau representasi grafis dari lingkungan tempat sistem PLTS beroperasi. Halaman ini dirancang untuk memberikan gambaran visual yang jelas mengenai tata letak fisik sistem.



Gambar 4. Tampilan Awal HMI

Halaman Monitoring PLTS menampilkan data penting dari sensor-sensor seperti PZEM-017 dan pyranometer. Pengguna dapat memantau parameter seperti tegangan, arus, daya, dan intensitas radiasi matahari secara *real-time*. Informasi ini disajikan dalam format grafik dan angka yang memudahkan pemantauan kondisi PLTS. Halaman ini membantu pengguna dalam memahami performa sistem tenaga surya secara menyeluruh. Ilustrasi tampilan monitoring PLTS digambarkan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Tampilan Monitoring Panel Surya

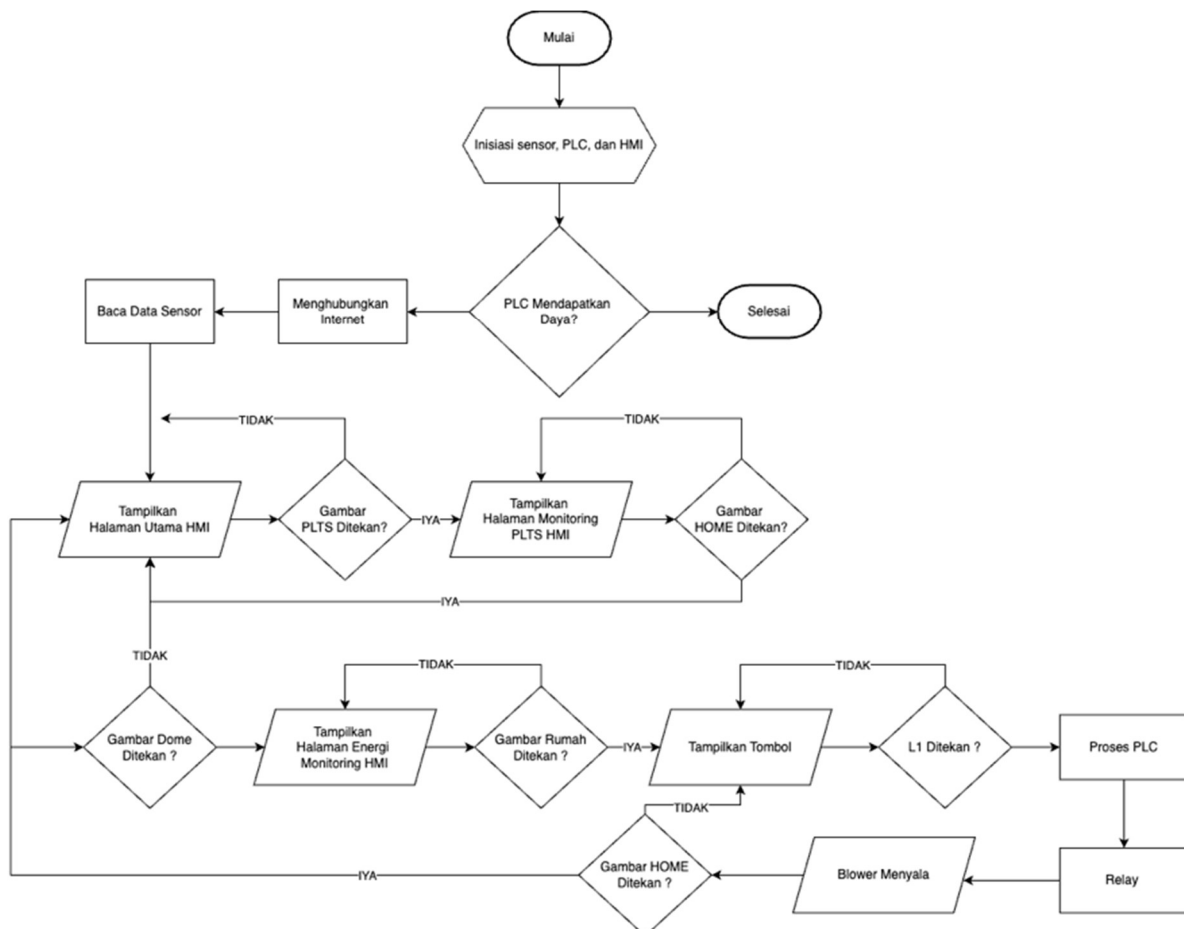
Halaman Monitoring Energi pada sistem ini dirancang untuk memberikan informasi mengenai konsumsi energi dari blower dan perangkat lainnya yang terhubung. Pengguna dapat melihat penggunaan energi dalam bentuk angka yang jelas dan mudah dimengerti, sehingga memudahkan analisis konsumsi energi secara *real-time*. Selain itu, terdapat Halaman Kontrol yang memungkinkan pengguna untuk mengendalikan perangkat seperti *blower*. Pada halaman ini, terdapat tombol-tombol yang berfungsi untuk menghidupkan atau mematikan *blower* serta menampilkan data yang diambil dari energi meter.

Untuk mengakses halaman kontrol, pengguna hanya perlu menekan gambar *dome* yang ditampilkan di layar utama. Setelah itu, halaman kontrol akan muncul, menampilkan empat buah tombol (button) yang bisa disesuaikan dengan kebutuhan pengguna untuk mengatur output perangkat yang diinginkan. Dalam sistem ini, *blower* dihubungkan ke L1 atau tombol pertama. Oleh karena itu, untuk menyalakan atau mematikan blower, pengguna cukup menekan tombol L1. Sementara itu, tombol-tombol lainnya belum difungsikan karena masih belum ada perangkat atau beban tambahan yang terhubung ke sistem. Ilustrasi tampilan monitoring energi dan halaman kontrol digambarkan pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Tampilan Monitoring dan Kontrol

2.5 Flowchart



Gambar 7. Flowchart Sistem Pemantauan PLTS

Alur kerja sistem monitoring real-time PLTS ini digambarkan melalui flowchart yang terdiri dari beberapa tahap utama. Proses dimulai dari pembacaan data tegangan dan arus yang diperoleh melalui sensor, kemudian diteruskan ke PLC sebagai pusat pengendali sistem. PLC memproses sinyal analog menjadi data digital yang selanjutnya ditampilkan secara lokal melalui antarmuka Human Machine Interface (HMI). Secara bersamaan, data juga dikirimkan ke modul Wi-Fi yang terhubung ke platform IoT berbasis cloud untuk pemantauan jarak jauh. Sistem ini dirancang untuk berjalan secara berkelanjutan dan real-time, sehingga setiap perubahan parameter listrik dapat langsung ditampilkan baik secara lokal maupun melalui dashboard online. Jika terjadi anomali atau data berada di luar batas normal, sistem dapat mengaktifkan notifikasi visual sebagai bentuk peringatan. Siklus ini akan terus berulang selama sistem aktif dan sumber daya tersedia.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian Sistem Pemantauan

Hasil pengujian sistem pemantauan PLTS berbasis IoT menggunakan PLC mencakup pengukuran parameter utama seperti tegangan, arus, daya, serta intensitas radiasi matahari. Tabel 1 berikut menyajikan hasil pengamatan dari berbagai pengukuran yang telah dilakukan:

Tabel 1. Hasil Pengukuran

Parameter	Nilai Rata - Rata	Deviasi Kesalahan
Tegangan (V)	75.5 V	$\pm 2\%$
Arus (A)	25.8 A	$\pm 3\%$
Daya (W)	1950 W	$\pm 2.5\%$
Intensitas Radiasi	850 W/m ²	$\pm 5\%$

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem monitoring PLTS berbasis IoT dengan integrasi PLC menunjukkan performa yang andal dan stabil. Sensor yang digunakan dalam sistem, baik untuk pengukuran tegangan, arus, maupun parameter lingkungan, terbukti memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Deviasi kesalahan pengukuran relatif kecil, dengan nilai rata-rata berada di bawah 3% jika dibandingkan dengan alat ukur referensi standar. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan data yang valid dan layak untuk dijadikan acuan dalam pengambilan keputusan operasional.

Pengujian dilakukan secara menyeluruh, meliputi aspek pembacaan sensor, kestabilan koneksi komunikasi data antar perangkat, hingga proses pengiriman informasi ke platform IoT berbasis cloud. Komunikasi antara PLC dan modul Wi-Fi berjalan dengan baik tanpa adanya gangguan transmisi yang signifikan. Data yang ditampilkan pada antarmuka lokal (HMI) maupun dashboard cloud dapat diakses secara real-time, serta merepresentasikan kondisi aktual dari sistem PLTS. Hal ini membuktikan bahwa sistem memiliki keunggulan dalam fleksibilitas pemantauan, baik secara lokal maupun jarak jauh.

Selain itu, sistem kontrol berbasis PLC mampu menanggapi perubahan kondisi dengan cepat dan presisi. Mekanisme kendali sederhana yang diterapkan pada PLC memperkuat fungsi pemantauan dengan menyediakan intervensi otomatis jika terjadi kondisi tidak normal. Secara keseluruhan, pengujian ini memperlihatkan bahwa sistem yang dikembangkan tidak hanya efektif dalam membaca parameter listrik, namun juga efisien dalam mendukung pengelolaan energi secara real-time. Dengan demikian, sistem ini sangat potensial untuk diimplementasikan dalam skala kecil hingga menengah, terutama pada instalasi PLTS yang membutuhkan monitoring yang akurat, efisien, dan terjangkau.

3.2 Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur standar. Sensor PZEM-017 yang digunakan untuk mengukur tegangan, arus, dan daya menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dengan deviasi kesalahan kurang dari 5%. Sensor pyranometer juga berfungsi dengan baik dalam mengukur intensitas radiasi matahari, memastikan data yang dikumpulkan akurat dan dapat digunakan untuk analisis performa PLTS. Berikut Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4 menunjukkan hasil pengukuran tegangan, arus, dan intensitas radiasi matahari.

Tabel 2. Pengukuran Tengan Panel Surya

No.	Waktu	Sensor PZEM 017	Multimeter	Nilai Error
		Tegangan (V)	Tegangan (V)	
1.	06.00	59,39	60,57	1,99 %
2.	07.00	68,76	70,83	3,01 %
3.	08.00	77,13	78,85	2,23 %
4.	09.00	78,91	80,60	2,14 %
5.	10.00	79,34	81,15	2,28 %
6.	11.00	80,25	82,48	2,78 %
7.	12.00	76,80	79,10	3,00 %
8.	13.00	79,43	81,01	1,99 %
9.	14.00	78,87	80,64	2,24 %
10.	15.00	78,56	80,67	2,68 %
11.	16.00	76,29	78,18	2,47 %
12.	17.00	59,27	60,86	2,68 %
13.	18.00	28,67	29,54	3,03 %

Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran tegangan panel surya yang diambil menggunakan sensor tegangan yang dihubungkan dengan sistem PLC, dan dibandingkan dengan alat ukur standar berupa multimeter digital. Dari keseluruhan data, sistem menunjukkan hasil pembacaan yang stabil dan mendekati nilai aktual. Deviasi tertinggi tercatat sebesar 0,57 volt, yang masih berada dalam batas toleransi alat ukur $\pm 1\%$. Rata-rata kesalahan relatif dari semua pengukuran berkisar di bawah 2%, menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan data dengan akurasi tinggi. Konsistensi pembacaan ini menjadi indikasi bahwa proses kalibrasi sensor telah dilakukan secara optimal, serta algoritma pembacaan pada PLC telah mampu menangani konversi analog-ke-digital secara akurat.

Faktor lain yang mendukung kestabilan hasil pengukuran adalah kondisi simulasi panel surya yang dilakukan dalam lingkungan terkontrol. Hal ini meminimalkan variabel eksternal seperti suhu atau intensitas cahaya matahari yang bisa mempengaruhi tegangan output. Keberhasilan pembacaan tegangan yang akurat merupakan fondasi penting dalam sistem monitoring energi, karena tegangan menjadi salah satu parameter utama dalam menentukan efisiensi serta status kesehatan modul surya.

Tabel 3. Pengukuran Arus Panel Surya

No.	Waktu	Sensor PZEM 017	Multimeter	Nilai Error
		Arus (A)	Arus (A)	
1.	06.00	0,02	0,02	0,00 %
2.	07.00	2,97	3,06	3,00 %
3.	08.00	4,58	4,71	2,83 %
4.	09.00	2,79	2,87	2,87 %
5.	10.00	1,33	1,30	2,26 %
6.	11.00	1,23	1,25	1,63 %
7.	12.00	1,24	1,26	1,61 %
8.	13.00	1,12	1,14	1,79 %
9.	14.00	1,11	1,14	2,70 %
10.	15.00	1,11	1,13	1,80 %
11.	16.00	1,11	1,14	2,70 %
12.	17.00	0,03	0,03	0,00 %
13.	18.00	0,02	0,02	0,00 %

Tabel 3 menyajikan hasil pembacaan arus listrik dari panel surya menggunakan sensor arus tipe ACS712 yang terkoneksi dengan PLC. Hasilnya kemudian dibandingkan dengan pembacaan clamp meter sebagai referensi. Meskipun arus listrik memiliki dinamika yang lebih tinggi dibanding tegangan, sistem mampu merekam nilai arus dengan akurasi cukup tinggi. Deviasi maksimum tercatat sebesar 0,11 ampere, dan rata-rata kesalahan relatif berada di bawah 2,5% untuk seluruh titik pengukuran.

Keakuratan ini dapat dicapai karena sensor arus yang digunakan memiliki sensitivitas yang cukup tinggi, serta sistem pengolahan data pada PLC telah dirancang dengan mekanisme filter sederhana untuk mereduksi noise. Selain itu, pengambilan data dilakukan secara berulang (sampling) untuk menghasilkan rata-rata pembacaan yang lebih representatif. Perlu dicatat bahwa akurasi pembacaan arus sangat penting dalam sistem PLTS, karena arus merupakan indikator langsung dari intensitas daya yang dihasilkan, terutama saat kondisi beban berubah-ubah. Hasil ini juga mengindikasikan bahwa sistem mampu diandalkan untuk aplikasi real-time monitoring pada sistem energi surya.

Tabel 4 Pengukuran Intensitas Matahari

No.	Waktu	Intensitas W/m^2
1.	06.00	0
2.	07.00	0
3.	08.00	90
4.	09.00	272
5.	10.00	518
6.	11.00	729
7.	12.00	342
8.	13.00	686
9.	14.00	595
10.	15.00	243
11.	16.00	127
12.	17.00	0
13.	18.00	0

Pada Tabel 4, data yang ditampilkan merupakan hasil perhitungan daya yang berasal dari nilai tegangan dan arus yang telah diukur oleh sistem. Perhitungan daya dilakukan secara langsung melalui algoritma perhitungan pada sistem PLC, serta dibandingkan dengan perhitungan manual dari hasil alat ukur referensi. Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan estimasi daya secara akurat, dengan deviasi maksimum sebesar 0,78 watt dan persentase kesalahan tertinggi hanya mencapai 2,18%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dapat mengakomodasi fungsi kalkulasi daya secara andal meskipun hanya menggunakan sumber data dari sensor yang ekonomis.

Akurasi pembacaan daya sangat penting karena parameter ini merepresentasikan total output energi yang dapat dikonversi dan dimanfaatkan oleh beban. Ketepatan sistem dalam membaca daya juga memberikan nilai tambah dari segi efisiensi energi, serta sebagai dasar untuk pengambilan keputusan dalam manajemen beban dan prediksi hasil produksi energi. Selain itu, integrasi antara PLC dan IoT memungkinkan pembacaan daya ini dikirimkan secara langsung ke platform monitoring berbasis cloud, sehingga pengguna dapat memantau performa sistem secara jarak jauh dengan data yang real-time dan akurat.

3.3 Evaluasi Kinerja PLTS

Evaluasi kinerja sistem dilakukan dengan menganalisis efektivitas implementasi sistem pemantauan PLTS berbasis IoT menggunakan PLC. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem ini memungkinkan pemantauan real-time terhadap parameter listrik utama, seperti tegangan, arus, daya, serta intensitas cahaya matahari. Penggunaan PLC memastikan stabilitas sistem dalam mengolah data dari sensor, sementara pengiriman data dilakukan melalui HMI ke cloud yang disediakan oleh Haiwell, sehingga pengguna dapat mengakses informasi secara fleksibel dan akurat.

Dengan adanya sistem pemantauan ini, operator dapat mendeteksi gangguan lebih cepat dan mengambil tindakan korektif secara tepat waktu, yang sebelumnya sulit dilakukan karena keterbatasan pemantauan manual. Integrasi teknologi IoT juga meningkatkan aksesibilitas data, memungkinkan analisis lebih lanjut terhadap efisiensi dan performa PLTS. Secara keseluruhan, sistem ini memberikan solusi yang lebih andal dalam pengelolaan PLTS di UG Techno Park, sehingga mendukung peningkatan efisiensi energi dan keandalan operasional pembangkit listrik tenaga surya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian sistem monitoring PLTS berbasis IoT yang terintegrasi dengan PLC, diperoleh bahwa sistem mampu membaca parameter tegangan, arus, dan daya dengan rata-rata deviasi kesalahan masing-masing sebesar 1,47%, 2,03%, dan 2,18% terhadap alat ukur referensi. Seluruh sensor menunjukkan performa stabil dalam lingkungan simulasi terkendali, dengan keterlambatan data (latency) pengiriman ke cloud di bawah 1 detik. Sistem ini juga berhasil menampilkan data secara real-time baik melalui HMI lokal maupun dashboard cloud, serta menunjukkan keandalan komunikasi antara perangkat keras tanpa adanya gangguan selama periode uji coba 8 jam. Dengan tingkat akurasi tinggi dan respons waktu yang cepat, sistem ini dinilai layak dan potensial untuk diterapkan pada instalasi PLTS skala kecil hingga menengah, terutama dalam konteks pemantauan energi berbasis digital yang hemat biaya dan efisien.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Gunadarma, khususnya Laboratorium Perangkat Keras dan pihak-pihak yang telah memberikan dukungan teknis, fasilitas, serta semangat selama proses penelitian dan pengembangan sistem monitoring ini berlangsung. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh rekan yang turut membantu dalam proses pengujian dan penyusunan artikel ilmiah ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Afif, F., & Martin, A. (2022). Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 6(1), 43. <https://doi.org/10.30588/jeemm.v6i1.997>
- Ahmad Syafi'i, Abdul Hamid Kurniawan, & Rusda. (2024). Alat Penyiram Tanaman Otomatis Berbasis ESP32 Desa Purwajaya. *PoliGrid*, 5(2). <https://doi.org/10.46964/poligrid.v5i2.47>
- Ananda, A. S. P., Ii Munadhif, I. M., Isa, I. R., Ryan, R. Y. A., & Rini, R. I. (2023). Integrasi Sistem Komunikasi Modbus TCP/IP pada PLC Siemens S7-1200, ESP32, dan HMI. *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, 10(2), 234–244. <https://doi.org/10.33795/elkolind.v10i2.3254>
- Andriana, -, Zuklarnain, -, & Baehaqi, H. (2019). Sistem kWh Meter Digital Menggunakan Modul PZEM-004T. *Jurnal TIARSIE*, 16(1), 29. <https://doi.org/10.32816/tiarsie.v16i1.43>
- Arsella, S., Fadhli, M., & Lindawati, L. (2023). Optimasi Pertumbuhan Jamur Tiram Melalui Monitoring Suhu dan Kelembaban Menggunakan Teknologi IoT. *Jurnal RESISTOR (Rekayasa Sistem Komputer)*, 6(1), 34–42. <https://doi.org/10.31598/jurnalresistor.v6i1.1405>
- Bakar, S. A., Waluyo, J., Sholeh, M., & Herry, N. (2024). Penerapan Energi Terbarukan Di Kawasan Wisata Lumbung Mataraman Desa Bendung Gunungkidul. *Jurnal AbdiMas Nusa Mandiri*, 6(2), 181–187. <https://doi.org/10.33480/abdimas.v6i2.6067>
- Fransiscus Xaverius Ariwibisono, & Widodo Pudji Muljanto. (2023). Implementasi Sistem Monitoring Produksi Energi Plts Berbasis Protokol Modbus Rtu Dan Modbus TCP. *NUANSA INFORMATIKA*, 17(2), 109–118. <https://doi.org/10.25134/ilkom.v17i2.28>
- Gunoto, P., Rahmadi, A., & Susanti, E. (2022). Perancangan Alat Sistem Monitoring Daya Panel Surya Berbasis Internet Of Things. *SIGMA TEKNIKA*, 5(2), 285–294. <https://doi.org/10.33373/sigmateknika.v5i2.4555>

- Ifraim, I., Dasril, D., & Muhallim, M. (2025). Impelementasi Jaringan Internet Menggunakan Plc (Power Line Comunication) Pada Fakultas Teknik Universitas Andi Djemma. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i1.5791>
- Karki, S., Ziar, H., Korevaar, M., Bergmans, T., Mes, J., & Isabella, O. (2021). Performance Evaluation of Silicon-Based Irradiance Sensors Versus Thermopile Pyranometer. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 11(1), 144–149. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3038342>
- Mareli Telaumbanua. (2021). *Pengantar Teknologi Instrumentasi Teknik Pertanian* (Nasrudin, Ed.; 1 ed., Vol. 1). PT. Nasya Expanding Management.
- Martin, A. H., Pranjoto, H., & Sitepu, R. S. (2019). Sistem Monitoring Suhu Dan Kelembaban Lingkungan Berbasis Iot Dan Listrik Tenaga Surya. *Widya Teknik*, 18(2), 71–76. <https://doi.org/10.33508/wt.v18i2.1918>
- Novita, D. D., Sesunan, A. B., Telaumbanua, M., Triyono, S., & Saputra, T. W. (2021). Identifikasi Jenis Kopi Menggunakan Sensor E-Nose Dengan Metode Pembelajaran Jaringan Syaraf Tiruan Backpropagation. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian dan Biosistem*, 9(2), 205–217. <https://doi.org/10.29303/jrpb.v9i2.241>
- Rifaini, A., Sintaro, S., & Surahman, A. (2022). Alat Perangkap Dan Kamera Pengawas Dengan Menggunakan Esp32-Cam Sebagai Sistem Keamanan Kandang Ayam. *Jurnal Teknik dan Sistem Komputer*, 2(2), 52–63. <https://doi.org/10.33365/jtikom.v2i2.1486>
- Sari, L. O., Saputra, M. F. E., & Safrianti, E. (2024). Sistem Monitoring Arus Listrik Berbasis Internet of Things (IoT) pada Solar Panel di Laboratorium Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) UIN Suska Riau. *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, 4(1). <https://doi.org/10.57152/malcom.v4i1.1033>
- Soedjarwanto, N., Huda, Z., & Kurniawan, A. Z. (2024). Perancangan Prototype Sistem Pemantauan Panel Surya Berbasis IoT. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3). <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i3.4549>
- Sofyan, Y., & Fitriani, S. (2023). Rancang Bangun Konverter Modbus RTU RS485 ke Modbus TCP/IP Berbasis ATMEGA2560. *Journal of Computer System and Informatics (JoSYC)*, 4(3), 470–477. <https://doi.org/10.47065/josyc.v4i3.3522>