

Optimalisasi Sistem Panel Surya dengan MPPT dan Protokol *Modbus* untuk Pengisian Baterai pada Sistem Pemanas Air di Kapal

I Made Darma Setiawan^{1*}, Henna Nurdiansari², Ariyono Setiawan³

¹⁻³ Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal, Politeknik Pelayaran Surabaya, Indonesia

*Korespondensi Penulis: madedarma1402@gmail.com

Abstract. *Enhancing the efficiency of renewable energy on ships is crucial for reducing dependency on fossil fuels. This research employs the Research and Development (R&D) method, aiming to design and implement a solar panel optimization system for battery charging, with a focus on increasing power efficiency and providing real-time performance monitoring. The system is designed using Maximum Power Point Tracking (MPPT) technology to maximize the solar panel's power output. A 200Wp solar panel with dimensions of 1290 x 760 x 30 mm was utilized. Static testing results show that the deployed sensors possess a high degree of accuracy, with an average error of 0.71% for the temperature sensor and only 1.81% for the light sensor used to monitor environmental conditions. Dynamic and system integration tests prove that the MPPT implementation significantly increases power output efficiency by 30.83% compared to a system without MPPT. Furthermore, the system with MPPT charges the battery approximately 27% faster. Additionally, the developed Modbus protocol-based monitoring system enables comprehensive and remote monitoring of key parameters such as voltage, current, temperature, and light intensity via a cloud database. Data communication reliability tests confirmed the system's capability to transmit entire data packets to a Google Sheets database at a periodic interval of 15 seconds without failure. Based on these results, the developed solar panel optimization system is feasible for implementation in maritime environments to enhance the utilization efficiency of renewable energy and the operational reliability of onboard systems.*

Keywords: *Battery Charging; Modbus Protocol; MPPT; Renewable Energy; Solar Panel.*

Abstrak. Peningkatan efisiensi energi terbarukan di kapal menjadi krusial untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Metode penelitian yang digunakan adalah *Research and Development (R&D)*, bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem optimalisasi panel surya untuk pengisian baterai, dengan fokus pada peningkatan efisiensi daya dan penyediaan monitoring performa secara *real-time*. Sistem dirancang menggunakan teknologi *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* untuk memaksimalkan daya keluaran panel surya. Panel surya yang digunakan 200Wp dengan dimensi 1290 x 760 x 30 mm. Hasil pengujian statis menunjukkan bahwa sensor-sensor yang digunakan memiliki tingkat akurasi tinggi dengan rata-rata *error* sensor suhu sebesar 0,71% dan *error* sensor cahaya hanya 1,81% untuk memantau kondisi lingkungan. Pengujian dinamis dan integrasi sistem membuktikan bahwa implementasi MPPT mampu meningkatkan efisiensi daya keluaran secara signifikan sebesar 30,83% dibandingkan sistem tanpa MPPT. Sistem dengan MPPT juga mampu mengisi daya baterai sekitar 27% lebih cepat. Selain itu, sistem monitoring berbasis protokol *Modbus* yang dikembangkan memungkinkan pemantauan parameter kunci seperti tegangan, arus, suhu, dan intensitas cahaya secara komprehensif dan jarak jauh melalui *database cloud*. Pengujian keandalan komunikasi data membuktikan bahwa sistem mampu mengirimkan seluruh paket data ke *database Google Sheets* dengan interval periodik setiap 15 detik tanpa kegagalan. Berdasarkan hasil tersebut, sistem optimalisasi panel surya yang dikembangkan ini layak diterapkan pada lingkungan maritim untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi terbarukan dan keandalan operasional sistem di atas kapal.

Kata Kunci: Energi Terbarukan; MPPT; Panel Surya; Pengisian Baterai; Protokol *Modbus*.

1. PENDAHULUAN

Energi surya adalah salah satu sumber energi terbarukan yang tersedia secara luas dan dikenal ramah terhadap lingkungan. Di bidang maritim, pemanfaatan energi surya dinilai sebagai alternatif yang prospektif guna menekan pemakaian bahan bakar fosil. Berdasarkan hasil beberapa studi, optimalisasi penggunaan energi surya pada kapal dapat dicapai melalui rancangan sistem panel surya yang efisien serta manajemen daya listrik yang tepat sesuai kebutuhan operasional kapal. Dengan pendekatan tersebut, pemanfaatan energi surya menjadi lebih maksimal, tidak hanya memenuhi kebutuhan utama operasional kapal, namun juga mendukung sistem pendukung lainnya (Supari et al., 2024).

Salah satu teknologi yang dinilai efektif dalam meningkatkan efisiensi panel surya adalah *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Teknologi MPPT bekerja dengan mempertahankan titik operasi panel surya pada kondisi daya maksimum meskipun terjadi variasi intensitas radiasi matahari maupun suhu lingkungan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa implementasi MPPT secara nyata dapat meningkatkan tegangan keluaran panel surya. Oleh karena itu, teknologi ini dianggap sangat relevan untuk optimalisasi kinerja panel surya pada berbagai aplikasi, termasuk dalam pengisian baterai pada sistem kelautan (Faizal & Setyaji, 2016).

Selain MPPT, penggunaan sistem monitoring berbasis protokol *Modbus RTU* juga telah terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi operasional pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Protokol ini memberikan kemudahan dalam pemantauan data secara *real-time* dan akurat, bahkan dari lokasi yang jauh dari pusat pengendalian utama. Dengan pemanfaatan protokol *Modbus*, data produksi energi dapat dengan mudah diakses melalui integrasi perangkat RS-485 ke jaringan *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP), sehingga manajemen energi menjadi lebih efektif, terutama dalam aplikasi jarak jauh (Ariwibisono & Muljanto, 2023).

Fokus utama penelitian ini adalah optimalisasi kinerja panel surya, aplikasi energi terbarukan juga telah meluas ke penggunaan dalam sistem pemanas air tenaga surya. Salah satu inovasi dalam sistem ini adalah penggunaan material penyimpan panas laten berbasis *parafin wax* yang diperkaya dengan aditif pasir silika guna meningkatkan konduktivitas termalnya. Studi menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi bahan ini mampu meningkatkan efisiensi sistem pemanas air tenaga surya dibandingkan sistem yang tidak menggunakan aditif tersebut. Hal ini memperlihatkan potensi energi terbarukan yang cukup besar untuk mendukung beragam kebutuhan energi di sektor kelautan (Numa & Azisah, 2019).

2. TINJAUAN PUSTAKA

Panel Surya

Panel surya *monocrystalline* bekerja dengan memanfaatkan efek fotovoltaiik untuk mengubah energi matahari menjadi listrik melalui proses fisika semikonduktor, prosesnya ketika foton atau partikel cahaya matahari menyentuh permukaan panel, energi ini melepaskan elektron dari atom silikon dalam sel surya sehingga menghasilkan aliran listrik arus searah atau *Direct Curent* (DC). Jenis panel surya *monocrystalline* memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan panel surya *polycrystalline*. Panel ini terbuat dari kristal silikon tunggal, yang memberikan struktur fisik lebih seragam dan warna hitam gelap. Sehingga jenis panel surya *monocrystalline* mampu meningkatkan efisiensi daya output lebih tinggi dibandingkan panel surya *polycrystalline*, ini menghasilkan performa panel surya *monocrystalline* lebih optimal (Atikah et al., 2020).

Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) bekerja dengan prinsip algoritma yang digunakan untuk MPPT adalah *Perturb and Observe* (P&O), yang bekerja dengan cara tegangan sedikit diubah pada panel surya kemudian diamati perubahan daya keluarnya. Jika perubahan tegangan tersebut menyebabkan daya meningkat, algoritma akan terus mengubah tegangan ke arah yang sama. Jika daya menurun, algoritma akan membalik arah perubahan tegangan, proses ini diulangi secara terus-menerus hingga mencapai titik daya maksimum yaitu pada saat kondisi daya keluaran panel surya tidak lagi bertambah saat tegangan diubah. Metode ini sangat penting karena iradiasi matahari dan suhu yang berubah-ubah menyebabkan titik daya maksimum panel surya juga berubah. Penggunaan MPPT terbukti mampu meningkatkan efisiensi sistem panel surya dibandingkan dengan sistem tanpa MPPT (Fauzi et al., 2018).

Baterai Lead-Acid

Baterai adalah komponen penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), terutama pada sistem off-grid. Baterai berfungsi sebagai penyimpan energi yang dihasilkan oleh panel surya untuk digunakan saat malam hari atau ketika iradiasi matahari tidak mencukupi. Dua jenis baterai yang umum digunakan adalah *Lead-Acid* dan *Lithium-Ion*. Baterai *Lead-Acid* memiliki karakteristik tegangan konstan selama pengisian daya, tetapi siklus hidupnya lebih pendek dibandingkan *Lithium-Ion*. Di sisi lain, baterai *Lithium-Ion* menawarkan efisiensi yang lebih tinggi, siklus hidup lebih panjang, dan pengisian daya dengan arus konstan, sehingga lebih stabil dalam kondisi cuaca yang berubah-ubah. Pemilihan baterai yang tepat sangat bergantung pada kebutuhan kapasitas, tegangan, kedalaman pengosongan, dan tingkat pengisian untuk memastikan umur baterai yang optimal (Pambudi et al., 2023).

Konverter TTL to RS-485

Konverter *Transistor-Transistor Logic* TTL to RS-485 adalah perangkat yang digunakan untuk mengubah sinyal logika *Transistor-Transistor Logic* (TTL) menjadi sinyal diferensial RS-485. Perangkat ini memungkinkan komunikasi serial antara perangkat yang menggunakan level tegangan TTL dengan perangkat yang mendukung protokol RS-485. RS-485 memiliki keunggulan dalam transmisi data jarak jauh hingga 1,2 km dan kemampuan menghubungkan hingga 32 perangkat dalam satu jaringan menggunakan topologi *daisy chain*. Konverter ini bekerja dengan metode *balanced transmission*, yang mengubah tegangan TTL menjadi selisih tegangan antara output A dan B, sehingga meminimalkan gangguan noise pada transmisi data. Dalam implementasinya, konverter TTL ke RS-485 sering digunakan dalam sistem industri seperti protokol *Modbus RTU* untuk memastikan komunikasi data yang stabil dan efisien (Mulyana & Tosin, 2020).

ESP32

Mikrokontroler yang dilengkapi dengan modul *Wi-fi* dan *Bluetooth Low Energy* (BLE) yang terintegrasi, sehingga sangat cocok untuk aplikasi *Internet of Things* (IoT). ESP32 memiliki kemampuan pemrosesan yang tinggi, konsumsi daya yang rendah, serta mendukung berbagai protokol komunikasi seperti *Modbus TCP/IP*. Dalam dunia industri, ESP32 sering digunakan untuk menghubungkan perangkat seperti sensor dan aktuator ke sistem kontrol utama melalui jaringan nirkabel. Kelebihan ESP32 terletak pada fleksibilitasnya dalam pemrograman, yang dapat dilakukan melalui berbagai platform seperti Arduino IDE, serta harganya yang relatif ekonomis dibandingkan perangkat sejenis (Prastiwi et al., 2023).

Sensor Suhu DS18B20

Sensor DS18B20 adalah sensor yang digunakan untuk mendeteksi suhu tubuh seseorang dan tahan air. Output dari sensor DS18B20 berupa data digital. Karakteristik dari sensor ini antara lain, digunakan pada tegangan 3-5V, tingkat akurasi kesalahan yaitu $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dengan kisaran suhu antara -60°C sampai 85°C , kabel merah pada sensor DS18B20 untuk VCC, kabel hitam pada sensor DS18B20 untuk GND, kabel kuning pada sensor DS18B20 untuk data, diameter kabel yaitu 4mm dengan Panjang 90cm (Aritonang et al., 2021).

Sensor Cahaya BH1750

BH1750 adalah sensor cahaya digital dengan antarmuka bus I2C. IC ini paling cocok untuk mendapatkan data cahaya ambien. Sensor ini dapat mendeteksi dengan rentang lebar pada resolusi tinggi sekitar 16-bit. Sensor cahaya BH1750 ini menghasilkan pengukuran luminositas dalam lux yaitu satuan iluminasi turunan SI yang dapat mengukur minimal 1 lux dan maksimal 65535 lux. Lux adalah satuan yang tingkat kecerahan yang diterima atau terpapar akibat adanya sumber cahaya (Khuriati, 2022).

Liquid Crystal Display (LCD)

Untuk menyederhanakan perancangan perangkat keras dan mengoptimalkan penggunaan pin *I/O*, modul *Liquid Crystal Display* (LCD) yang terlihat diintegrasikan dengan konverter I2C. Antarmuka cerdas ini memfasilitasi transfer data secara serial dari mikrokontroler, yang secara fundamental berbeda dari metode komunikasi paralel yang boros pin. Proses komunikasinya hanya memerlukan dua jalur utama yang esensial yaitu *Serial Data* (SDA) untuk jalur transmisi data dua arah, dan *Serial Clock* (SCL) untuk sinkronisasi sinyal waktu. Dengan demikian, alokasi pin pada mikrokontroler untuk pengendalian layar menjadi jauh lebih efisien, membebaskan sumber daya sistem yang terbatas (Prasetyo et al., 2024).

Sensor Arus ACS712

Sensor arus ACS712 adalah sensor yang menggunakan efek *Hall* untuk mengukur arus listrik baik dalam bentuk arus searah (DC) maupun arus bolak-balik (AC). Sensor ini bekerja dengan mendeteksi medan magnet yang dihasilkan oleh aliran arus pada kawat tembaga di dalam sensor, kemudian mengonversinya menjadi tegangan analog yang proporsional dengan nilai arus. ACS712 memiliki tingkat linieritas tinggi, dengan akurasi rata-rata mencapai 97,18%, menjadikannya andal untuk berbagai aplikasi seperti sistem proteksi, monitoring konsumsi daya, dan alat ukur berbasis IoT. Sensor ini tersedia dalam beberapa varian sesuai dengan rentang pengukuran arus, seperti 5A, 20A, dan 30A, sehingga fleksibel untuk digunakan dalam berbagai kebutuhan (Alviero & Nugroho, 2023).

Relay

Relay adalah perangkat elektromekanis yang berfungsi sebagai saklar otomatis untuk mengontrol aliran listrik dalam suatu rangkaian. *Relay* bekerja dengan memanfaatkan medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik untuk membuka atau menutup kontak saklar. Dalam aplikasi modern, *relay* sering digunakan pada sistem otomasi dan pengendalian daya listrik, seperti pada smart meter berbasis *smart relay*. *Smart relay* memiliki keunggulan dibandingkan *relay* konvensional, termasuk fleksibilitas tinggi, kemudahan dalam pemrograman, dan kemampuan untuk dikendalikan dari jarak jauh melalui komunikasi *Ethernet* atau *wireless*. Dengan menggunakan *smart relay*, kontrol daya dapat dilakukan secara efisien melalui perangkat lunak tanpa memerlukan instalasi fisik yang kompleks (Pujianto et al., 2022).

MCB DC

Miniature Circuit Breaker (MCB) Direct Current (DC) adalah perangkat proteksi yang dirancang untuk memutus arus listrik secara otomatis ketika terjadi arus lebih atau hubung singkat pada sistem kelistrikan berbasis arus searah. Dalam sistem buck converter, MCB digunakan untuk melindungi komponen dari kerusakan akibat lonjakan arus yang tinggi, yang biasanya disebabkan oleh hubung singkat. Namun, MCB DC memerlukan pengaktifan ulang secara manual setelah melakukan proteksi. Oleh karena itu, dalam beberapa aplikasi, MCB sering dikombinasikan dengan relay untuk memberikan perlindungan tambahan dan otomatisasi pada sistem kelistrikan. Dalam penelitian, MCB DC digunakan untuk menjaga kestabilan dan keamanan pada sistem pengisian baterai berbasis panel surya dengan buck converter (Lestyanto et al., 2023).

Step Down Converter LM2596

Step-down converter LM2596 adalah jenis konverter daya yang dirancang untuk menurunkan tegangan input DC menjadi tegangan output DC yang lebih rendah. Salah satu implementasi *step down converter* adalah dengan menggunakan topologi *Single-Ended Primary Inductance Converter (SEPIC)*, yang mampu menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai kebutuhan. Dalam penelitian, *step down converter* sering digunakan pada sistem *photovoltaic* untuk menstabilkan tegangan keluaran dari panel surya yang cenderung fluktuatif akibat perubahan intensitas cahaya matahari. Dengan menggunakan metode kontrol seperti *fuzzy logic*, *step-down converter* dapat menghasilkan tegangan keluaran yang stabil, seperti pada kisaran *setpoint* 14 V untuk pengisian baterai. Sistem ini biasanya dikendalikan oleh mikrokontroler seperti Arduino Uno R3 (Putri et al., 2023).

Aplikasi Blynk

Blynk adalah aplikasi platform yang dirancang untuk mendukung pengembangan sistem berbasis IoT. Aplikasi ini memungkinkan pengguna untuk memantau dan mengontrol perangkat seperti ESP32 melalui koneksi internet. Dalam penelitian, *Blynk* digunakan sebagai antarmuka utama untuk menampilkan data sensor secara *real-time*, seperti suhu dan ketinggian air. Platform ini terdiri dari tiga komponen utama: *Blynk App*, yang berfungsi sebagai antarmuka pengguna; *Blynk Server*, yang mengelola komunikasi antara perangkat IoT dan aplikasi; serta *Blynk Library*, yang diintegrasikan ke dalam kode perangkat untuk memungkinkan konektivitas. Dengan fitur notifikasi, penyimpanan data, dan kontrol jarak jauh, *Blynk* memberikan solusi efektif untuk monitoring dan pengendalian perangkat IoT secara *real-time* (Reinanda et al., 2024).

Voltage Sensor Divider

Voltage sensor divider adalah sensor tegangan jenis B25 yaitu modul yang dirancang untuk mengukur tegangan baik AC maupun DC. Sensor ini menerima masukan berupa sinyal tegangan dan menghasilkan keluaran dalam bentuk sinyal tegangan atau arus analog. Sebagai sensor tegangan resistif, modul ini mampu mendeteksi tegangan sederhana dengan batas maksimum pengukuran hingga 25V. Prinsip kerjanya menggunakan konsep pembagi tegangan dengan memanfaatkan resistor sebagai komponen utamanya (Desmira et al., 2024).

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah *research and development* (R&D) sebagai pendekatan utama. Penelitian ini bertujuan untuk menciptakan atau mengembangkan produk yang sesuai dengan kebutuhan dan permasalahan yang ada. Penelitian ini merupakan gabungan dari proyek karya ilmiah terapan lainnya, fokus pada penelitian ini pada bagian yang diarsir garis merah yaitu bagaimana cara optimalisasi sistem panel surya hingga pada titik maksimal kinerjanya. Untuk menemukan permasalahan alat ini peneliti menggunakan metode pengujian yang diantaranya adalah metode pengujian statis dan pengujian dinamis.

4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian Statis

Pengujian Tegangan Panel Surya

Tabel 1. Uji Tegangan Panel Surya 200Wp.

No	Input Tegangan (V)	Intensitas Cahaya (Lux)
1	19.46	51069.43
2	19.34	49329.46
3	19.28	48621.87
4	19.16	48122.94
5	19.12	48532.12
6	19.08	48321.76

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pengujian statis pada panel surya 200Wp ini bertujuan untuk memverifikasi performa dan karakteristik tegangannya dalam kondisi operasional nyata. Berdasarkan spesifikasinya, panel ini memiliki potensi tegangan rangkaian terbuka hingga 21V saat tanpa beban. Hasil pengujian yang disajikan dalam tabel menunjukkan bahwa saat terhubung ke sistem dan di bawah paparan sinar matahari langsung, panel secara konsisten menghasilkan tegangan keluaran yang stabil di kisaran 19.08V hingga 19.46V. Nilai tegangan ini berbanding lurus dengan tingginya intensitas cahaya yang diterima, sehingga memvalidasi bahwa panel surya berfungsi dengan baik dan sesuai dengan karakteristik yang diharapkan.

MPPT

Tabel 2. Perbandingan Arus Input dan Output MPPT.

No	Tegangan Input Panel Surya (V)	Arus Input Panel Surya (A)	Arus Input ke Baterai (A)
1	14.93	6.41	6.99
2	15.42	5.68	6.25
3	16.21	4.87	5.63
4	16.91	4.58	5.36
5	17.12	3.63	4.43

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pada tabel 2 menunjukkan teknologi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) secara cerdas mengatur titik operasi panel untuk mengekstraksi daya maksimal sesuai kondisi lingkungan. Panel surya yang digunakan memiliki potensi tegangan rangkaian terbuka hingga 21V saat tanpa beban. MPPT kemudian mengonversi daya yang telah dipanen ini dengan cara menurunkan tegangan operasi panel seperti yang terukur pada tabel antara 14.93V hingga 17.12V ke level tegangan lebih rendah yang dibutuhkan oleh baterai. Sebagai konsekuensi dari proses penurunan tegangan ini, MPPT mampu memperkuat arus yang dialirkan. Hal ini terbukti pada data pengujian, di mana pada satu titik observasi, arus input dari panel surya tercatat sebesar 3.63 A, namun setelah diolah oleh MPPT, arus yang masuk ke baterai berhasil ditingkatkan secara signifikan menjadi 4.43 A. Ini menunjukkan efektivitas MPPT dalam mengoptimalkan efisiensi pengisian dengan mengubah kelebihan potensi tegangan menjadi arus pengisian yang lebih tinggi.

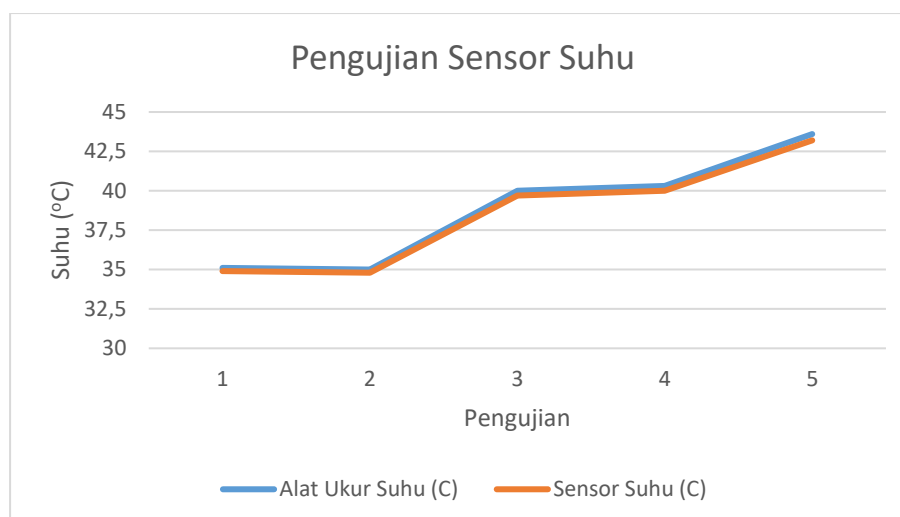
Pengujian Sensor Suhu DS18B20

Tabel 3. Perbandingan Sensor Suhu dengan *Thermogun*.

No	Alat Ukur Suhu (°C)	Sensor Suhu (°C)	Selisih	Error (%)
1	35.1	34.9	0.2	0.57%
2	35	34.8	0.2	0.57%
3	40	39.7	0.3	0.75%
4	40.3	40	0.3	0.74%
5	43.6	43.2	0.4	0.92%
Rata-rata error				0.71%

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pada tabel 3 menunjukkan hasil pengujian sensor suhu DS18B20 dilakukan dengan membandingkannya terhadap alat ukur termometer standar sebanyak lima kali percobaan. Nilai rata-rata *error* yang tercatat hanya sebesar 0.71%, dapat disimpulkan bahwa sensor DS18B20 memiliki tingkat akurasi yang baik, sehingga datanya valid untuk digunakan dalam monitoring suhu.



Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar 1. Grafik Pengujian Sensor Suhu.

Gambar 1 menunjukkan grafik bahwa sensor suhu mampu memberikan pembacaan yang cukup konsisten dan dekat dengan nilai sebenarnya, menjadikannya layak untuk digunakan dalam pengambilan data pada pengujian sistem secara keseluruhan.

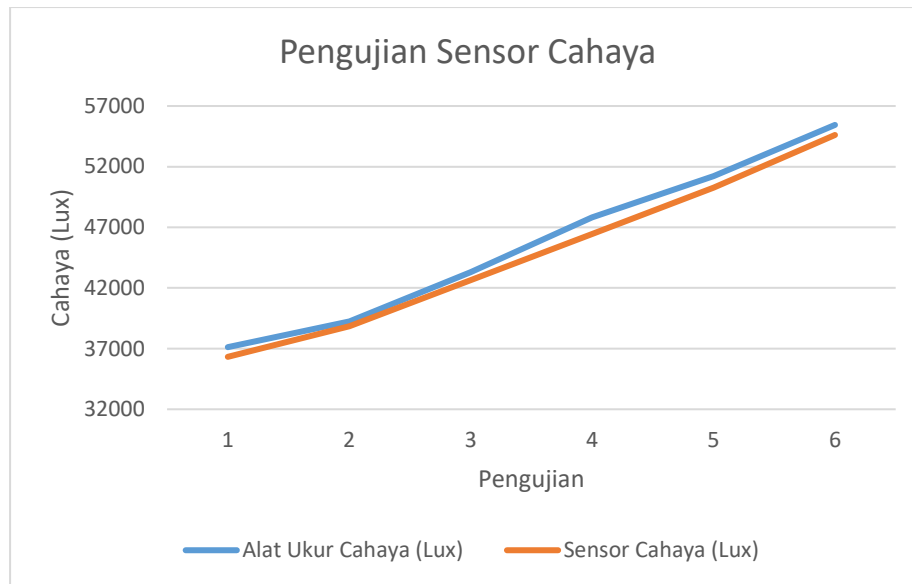
Pengujian Sensor Cahaya BH1750

Tabel 4. Uji Sensor Cahaya BH1750.

No	Alat Ukur Cahaya (Lux)	Sensor Cahaya (Lux)	Selisih	Error (%)
1	37122	36323	799	2.15%
2	39253	38849	404	1.03%
3	43298	42643	655	1.51%
4	47812	46457	1355	2.83%
5	51235	50279	956	1.87%
6	55440	54612	828	1.49%
Rata-rata Persentase Error				1.81%

Sumber : Dokumentasi Pribadi

Pada tabel 4 hasil pengujian validasi untuk sensor cahaya BH1750 yang dibandingkan dengan alat ukur digital lux meter. Pengujian yang dilakukan sebanyak enam kali pada tingkat intensitas cahaya yang tinggi dan bervariasi menunjukkan bahwa pembacaan sensor mampu mengikuti nilai acuan dengan baik. Rata-rata persentase *error* yang tercatat hanya sebesar 1.81%, dapat disimpulkan bahwa sensor BH1750 memiliki akurasi yang tinggi, sehingga bisa digunakan sebagai input data intensitas cahaya.

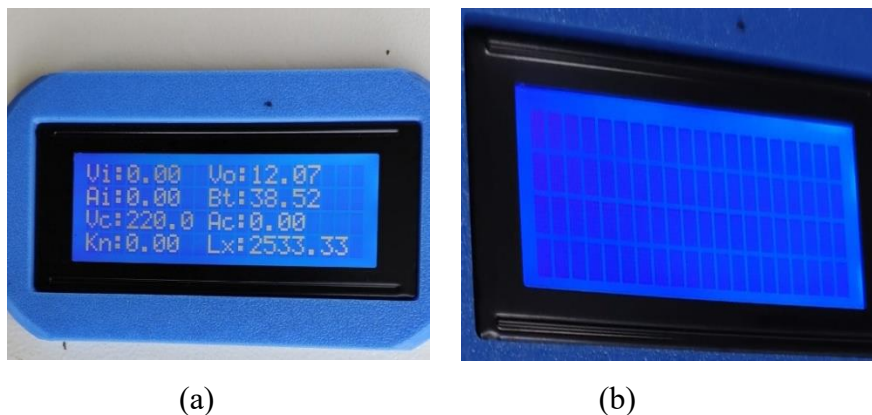


Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar 2. Grafik Pengujian Sensor Cahaya.

Pada gambar 2 menunjukkan grafik bahwa sensor cahaya mampu memberikan pembacaan yang konsisten dan dekat dengan nilai sebenarnya, sehingga pengambilan data pada pengujian sistem secara keseluruhan bisa dengan baik dilakukan.

Pengujian LCD



Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar 3. Pengujian LCD.

Pada gambar 3 (a) yaitu gambar LCD yang menampilkan hasil data dari setiap komponen, gambar 3 (b) yaitu gambar segmen atau setiap kotak pada LCD yang menampilkan hasil layar tidak ada *dead pixel* atau kerusakan pada layar. Berdasarkan hasil uji coba yang terlihat pada gambar, LCD berhasil menyala dan menampilkan pembacaan sensor. Hal ini menunjukkan bahwa LCD dalam kondisi baik dan siap digunakan.

Pengujian Konverter TTL to RS-485

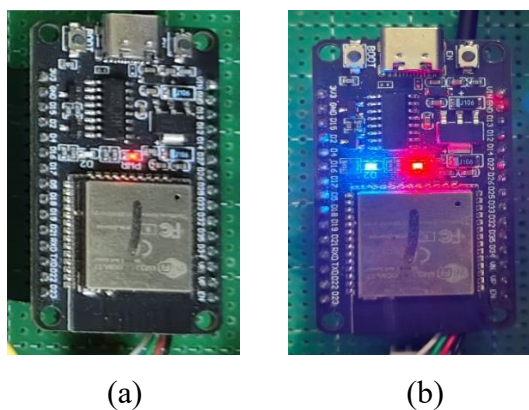
Tabel 4. Uji Keandalan Komunikasi Periodik via RS-485.

Waktu	Data Sensor Terkirim		Status	Status Penerimaan
	Sensor Suhu (°C)	Sensor Cahaya (Lux)	Pengiriman (TX)	(RX)
11:30:00	31.23	17287.5	Berhasil	Berhasil
11:30:15	31.35	17532.5	Berhasil	Berhasil
11:30:30	32.61	20012.5	Berhasil	Berhasil
11:30:45	32.85	23724.17	Berhasil	Berhasil
11:31:00	32.97	29148.33	Berhasil	Berhasil

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Tabel 5 menunjukkan hasil dari uji keandalan yang dilakukan konverter TTL to RS-485 untuk memvalidasi stabilitas dan konsistensi dari sistem komunikasi data periodik via RS-485. Pengujian ini secara sistematis mencatat setiap siklus transmisi yang terjadi pada interval waktu 15 detik, di mana setiap paket data yang dikirim berisi informasi *real-time* dari data tegangan, arus, sensor suhu dan sensor cahaya. Keberhasilan yang tercatat secara konsisten pada setiap timestamp, yang ditandai oleh status berhasil untuk proses pengiriman (TX) dan penerimaan (RX), ini membuktikan bahwa tidak ada kegagalan ataupun korupsi data selama periode pengujian. Hasil ini mengonfirmasi bahwa konverter TTL to RS-485 mampu memfasilitasi komunikasi yang andal dan stabil serta esensial untuk mendukung kebutuhan sistem dalam melakukan monitoring secara kontinu dan akurat.

Pengujian ESP32



Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar 4. Pengujian ESP32.

Pada gambar 4 (a) menunjukkan bahwa lampu indikator LED daya berwarna merah pada modul ESP32 menyala. Hal ini mengindikasikan bahwa mikrokontroler telah menerima suplai tegangan yang stabil dari sumber daya sistem, yaitu baterai 12V yang tegangannya diturunkan melalui modul *step-down* untuk pengoperasian ESP32 yang aman. Pengujian ini memvalidasi bahwa sirkuit daya internal pada ESP32 telah beroperasi sesuai spesifikasi dan siap untuk tahap fungsional.

Pada gambar 4 (b) bertujuan untuk memvalidasi fungsionalitas *Internet of Things* (IoT), indikator daya merah yang tetap aktif, teramati pula aktivasi LED *on-board* berwarna biru. Indikator LED biru tersebut diaktifkan secara nirkabel melalui perintah yang dikirimkan dari aplikasi *Blynk*. Keberhasilan aktivasi ini memverifikasi beberapa kapabilitas krusial secara simultan, yaitu operasionalitas modul *Wi-Fi*, keberhasilan konektivitas ke jaringan dan server, serta kemampuan mikrokontroler untuk menerima dan mengeksekusi perintah eksternal untuk mengendalikan pin *output*. Rangkaian pengujian ini secara komprehensif mengonfirmasi bahwa modul ESP32 berfungsi secara penuh sebagai unit kendali nirkabel yang reliabel bagi keseluruhan sistem.

Pengujian Dinamis

Pengujian Proteksi Baterai dengan MPPT

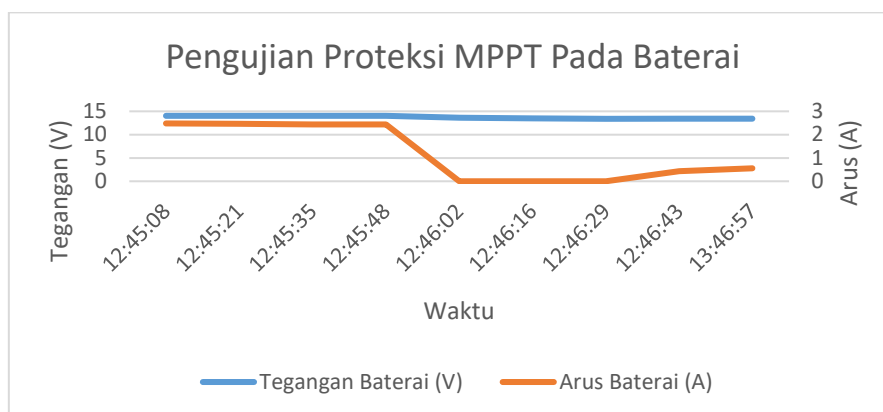
Tabel 6. Uji Proteksi Baterai pada Sistem MPPT .

Waktu	Tegangan Baterai (V)	Arus Baterai (A)	Tegangan Input (V)	Arus Input (A)
12:45:08	14.03	2.48	18.32	1.89
12:45:21	14.03	2.46	18.28	1.88
12:45:35	14.03	2.44	18.32	1.86
12:45:48	14.03	2.44	18.32	1.86
12:46:02	13.6	0	19.68	0
12:46:16	13.48	0	19.68	0
12:46:29	13.39	0	19.68	0
12:46:43	13.43	0.43	19.44	0.29
13:46:57	13.43	0.55	19.39	0.38

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pada tabel 6 pengujian sistem pengisian dilakukan pada baterai berkapasitas 50Ah, 0% adalah 11.8V dan 100% adalah 12.9V, kondisi awal baterai pada penelitian ini yang memiliki tegangan siaga 12.68V berada pada kapasitas sekitar 80%. Oleh karena itu, proses pengisian yang tercatat dalam pengujian ini hanya perlu menaikkan sisa kapasitas sebesar 20% untuk mencapai muatan penuh. Data *logger* menunjukkan puncak dari proses ini, di mana MPPT secara presisi menghentikan arus pengisian saat tegangan baterai menyentuh ambang batas proteksi 14.03 V lalu arus yang masuk ke baterai di stop masuk selama 27 detik. Setelah 27 detik berlalu sistem kembali memberikan arus kecil 0.43A ke baterai untuk masuk ke mode pemeliharaan atau *float*. Durasi pengisian yang terkesan lama, yaitu 2 jam 45 menit, disebabkan karena seluruh proses ini terjadi pada fase pengisian akhir. Pada tahap ini, MPPT secara sengaja menurunkan arus pengisian untuk melindungi sel baterai yang sudah hampir penuh, sehingga proses pengisian secara alami menjadi jauh lebih lambat dibandingkan jika dimulai dari kapasitas yang lebih rendah misalnya 50%, di mana baterai masih berada dalam fase pengisian cepat yang menerima arus maksimal. Proses pengisian dimulai pada pukul 10:00 pagi, dan

dalam kurun waktu 2 jam 45 menit, mengisi baterai hingga mencapai kondisi penuh pada pukul 12:45. Pemutusan arus otomatis ini merupakan bukti bahwa fungsi proteksi *overcharge* bekerja sesuai rancangan untuk mencegah kerusakan. Setelah proses pengisian dihentikan, tegangan baterai yang terukur sebesar 13.11V dan setelah ditunggu selama 12 jam baterai stabil di 12.9V mengonfirmasi bahwa baterai telah berhasil mencapai tingkat pengisian penuh secara aman dari sistem MPPT, ini membuktikan sistem dapat diandalkan dengan baik.



Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar 5. Grafik Pengujian Proteksi Baterai dengan MPPT

Pada gambar 5 grafik ini secara visual merangkum momen krusial saat sistem proteksi MPPT bekerja. Awalnya grafik menunjukkan fase pengisian aktif di mana tegangan baterai telah mencapai puncaknya di 14.03V, sementara arus masih mengalir deras. Tepat pada pukul 12:46:02, yang ditandai oleh garis bantu oranye, sistem secara instan memutus arus hingga menjadi nol, yang membuktikan bahwa proteksi *overcharge* telah aktif. Segera setelah arus dihentikan, tegangan baterai terlihat langsung turun, yang merupakan reaksi alami baterai, sebelum akhirnya sistem kembali memberikan arus kecil untuk masuk ke mode pemeliharaan atau *float*, ini mengonfirmasi siklus pengisian telah selesai dengan aman.

Charging Baterai

Tabel 5. Hasil Charging Baterai Tanpa MPPT.

Jam	Tegangan Baterai Standby (V)	Status Pengisian (%)	Tegangan Input Panel Surya (V)	Arus Input Panel Surya (A)	Intensitas Cahaya (Lux)
10:00	12.3	45.50%	14.01	3.55	48550.12
10:30	12.4	54.80%	13.98	3.82	51240.55
11:00	12.5	63.80%	13.95	4.4	54612.5
11:30	12.59	72.00%	13.91	4.11	54212.5
12:00	12.67	79.50%	13.87	3.3	53120.25
12:30	12.74	85.50%	13.84	3.27	53400.6
13:00	12.8	90.90%	13.8	3.1	50870.45
13:30	12.85	95.50%	13.77	2.7	46910.8
14:00	12.88	98.20%	13.73	2.5	42330.15
14:28	12.9	100.00%	13.7	2.25	39050.4

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pada tabel diatas untuk *charging* baterai tanpa menggunakan MPPT dari pengisian baterai 45% ke 100% yaitu hasilnya sekitar 4 jam 28 menit baterai dalam kondisi penuh, pengujian dilakukan dalam kondisi cuaca yang cerah. Kapasitas baterai yang gunakan yaitu 50Ah serta panel surya 200Wp.



Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar 6. Pengujian Charging Baterai Dengan MPPT.

Pada gambar 6 (a) yaitu kondisi awal baterai *standby* pada tegangan 12.29V sebelum *dicharging* yaitu sekitar 45%, pada gambar 6 (b) yaitu baterai *standby* pada tegangan 12.89V setelah *dicharging* ini adalah kondisi baterai penuh 100%, sedangkan pada tegangan 11.8V kondisi baterai adalah 0% dari kondisi baterai penuh.

Tabel 8. Hasil Charging Baterai dengan MPPT.

Jam	Tegangan Baterai Standby (V)	Status Pengisian (%)	Tegangan Input Panel Surya (V)	Arus Input Panel Surya (A)	Intensitas Cahaya (Lux)
10:00	12.3	45.50%	14.93	5.06	51142.22
10:30	12.44	58.30%	14.97	5.66	53242.09
11:00	12.55	68.20%	14.85	6.13	54612.5
11:30	12.65	77.20%	14.72	5.82	52550.75
12:00	12.73	84.40%	16.55	4.66	50100.4
12:30	12.8	90.90%	16.43	4.57	47830.15
13:00	12.87	97.00%	16.9	4.14	46120.9
13:16	12.9	100.00%	17.04	3.7	45500.25

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pada tabel diatas untuk *charging* baterai tanpa menggunakan MPPT dari pengisian baterai 45% ke 100% yaitu hasilnya sekitar 3 jam 16 menit baterai dalam kondisi penuh, pengujian dilakukan dalam kondisi cuaca yang cerah. Kapasitas baterai yang gunakan yaitu 50Ah serta panel surya 200Wp.

Pengujian Pengiriman Data Sensor ke Google Sheets**Tabel 6.** Hasil Pengiriman Data Sensor ke Google Sheets.

Waktu	Tegangan Input Panel Surya (V)	Arus Input Panel Surya (A)	Tegangan Baterai (V)	Arus Baterai (A)	Suhu Panel Surya (°C)	Sensor Cahaya (Lux)
10:18:13	17.91	2.63	14.01	3.35	40.72	50563.33
10:18:28	17.95	2.62	14.01	3.35	40.86	52198.33
10:18:43	17.95	2.61	14.01	3.33	40.88	52313.33
10:18:58	17.95	2.62	14.01	3.35	40.94	51629.16
10:19:13	17.95	2.61	14.01	3.33	40.98	52089.16
10:19:28	17.95	2.61	14.01	3.33	41.24	52969.16
10:19:43	17.95	2.62	14.01	3.35	41.5	53115.83
10:20:03	17.95	2.59	14.01	3.31	41.67	52601.66
10:20:18	17.91	2.63	14.01	3.35	41.8	52151.66
10:20:33	17.91	2.61	14.01	3.33	41.83	52613.33

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Tabel diatas secara rinci menampilkan parameter kunci sistem yang diakuisisi secara simultan, termasuk tegangan dan arus dari panel surya dan baterai, serta data kondisi lingkungan seperti suhu panel surya dan intensitas cahaya. Pengambilan data ini dilakukan secara otomatis dengan interval waktu sekitar 15 detik, yang menunjukkan kemampuan sistem untuk melakukan pencatatan secara berkelanjutan dan *real-time*. Keberhasilan perekaman data yang terstruktur dan konsisten ini membuktikan bahwa fungsionalitas data *logger* berbasis *cloud* bekerja sesuai rancangan, menyediakan arsip data yang komprehensif untuk analisis kinerja jangka panjang dan pemantauan jarak jauh.

Pengujian Data Tanpa MPPT**Tabel 7.** Hasil Data Tanpa MPPT.

Jam	Tegangan Input Panel Surya (V)	Arus Input Panel Surya (A)	Suhu Panel Surya (°C)	Intensitas Cahaya (Lux)	Daya Tanpa MPPT (W)
10:00	13.91	3.91	34.08	54212.5	54.39
10:30	13.95	4.32	47.1	54612.5	60.26
11:00	14.01	4.83	47.84	48550.12	67.67
11:30	13.98	4.98	51.42	51240.55	69.62
12:00	13.87	4.63	50.86	53120.25	64.22
12:30	13.84	4.12	47.9	53400.6	57.02
13:00	13.8	3.94	47.3	50870.45	54.37
Daya rata-rata					61.08

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pada tabel 10 berdasarkan hasil pengujian pada sistem yang menggunakan *Solar Charge Controller* (SCC) tipe PWM sebagai pembanding dari teknologi MPPT. Kontroler PWM berfungsi dengan cara menghubungkan panel surya ke baterai dan secara esensial menarik tegangan panel surya turun agar setara dengan level tegangan baterai. Akibatnya, panel surya tidak dapat beroperasi pada titik daya maksimum yang seharusnya, sehingga efisiensi konversi daya menjadi lebih rendah. Diperoleh data kinerja yang menjadi dasar perbandingan

dengan serangkaian pengukuran, daya keluaran rata-rata yang berhasil dicatatkan oleh sistem tanpa MPPT ini adalah sebesar 61.08W. Nilai ini merepresentasikan efektivitas konversi daya dalam kondisi di mana panel surya tidak beroperasi pada titik optimalnya. Oleh karena itu, angka 61.08W ini akan dijadikan sebagai nilai acuan utama untuk mengevaluasi dan mengukur sejauh mana peningkatan efisiensi yang mampu diberikan oleh sistem yang menggunakan teknologi MPPT dalam kondisi pengujian yang identik.

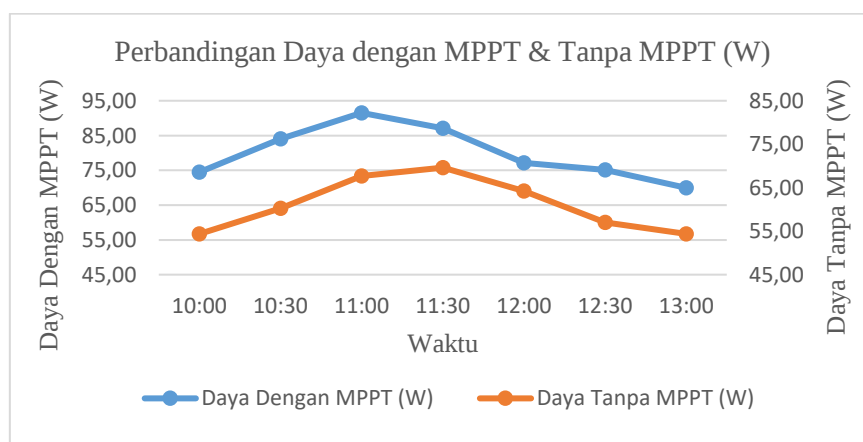
Pengujian Data Dengan MPPT

Tabel 8. Uji Data dengan MPPT.

Jam	Tegangan Input Panel Surya (V)	Arus Input Panel Surya (A)	Suhu Panel Surya (°C)	Intensitas Cahaya (Lux)	Daya Dengan MPPT (W)
10:00	14.72	5.06	34.05	52550.75	74.48
10:30	14.85	5.66	46.98	54612.5	84.05
11:00	14.93	6.13	47.35	51142.22	91.52
11:30	14.97	5.82	50.86	53242.09	87.13
12:00	16.55	4.66	50.55	50100.4	77.12
12:30	16.43	4.57	46.53	47830.15	75.09
13:00	16.9	4.14	46.4	46120.9	69.97
Daya rata-rata					79.91

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pada tabel 11 *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) aktif untuk merekam parameter esensial yang mencakup data input dari panel surya yaitu tegangan dan arus, data output ke baterai serta data kondisi lingkungan yang memengaruhinya seperti suhu dan intensitas cahaya. Data ini secara krusial mendemonstrasikan fungsi inti MPPT dalam mengonversi daya yaitu mengubah tegangan panel surya yang lebih tinggi menjadi arus pengisian ke baterai yang lebih tinggi untuk memaksimalkan efisiensi pengisian. Dari hasil pengujian ini, didapatkan daya keluaran rata-rata sebesar 79,91W, yang menjadi nilai acuan utama untuk dibandingkan dengan sistem tanpa MPPT untuk mengukur peningkatan efisiensi.



Sumber: Dokumentasi Pribadi

Gambar 7. Grafik Daya dengan MPPT Dibandingkan Tanpa MPPT.

Rumus Efisiensi :

$$Efisiensi = \frac{(Daya_{MPPT} - Daya_{Tanpa MPPT})}{Daya_{Tanpa MPPT}} \times 100\% \dots \dots \dots (4.1)$$

Langkah-langkah Perhitungan:

Daya Rata-rata dengan MPPT (P_{MPPT}) = 79.91 W

Daya Rata-rata Tanpa MPPT ($P_{Tanpa MPPT}$) = 61.08 W

Perhitungannya :

$$Efisiensi = \frac{(79.91 - 61.08)}{61.08} \times 100\% = 30.83\%$$

Hasil perhitungan persamaan diatas menunjukkan berdasarkan perbandingan daya rata-rata, penggunaan MPPT menghasilkan peningkatan efisiensi daya keluaran panel surya sebesar 30,83% dibandingkan dengan sistem yang tidak menggunakan MPPT.

Analisis Data

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, baik secara statis pada tiap komponen maupun pengujian dinamis pada sistem yang terintegrasi, dapat ditarik analisis sebagai berikut:

a. Akurasi Sensor dan Keandalan Monitoring

Hasil pengujian menunjukkan bahwa komponen sensor yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan dapat diandalkan untuk monitoring sistem secara *real-time*. Sensor suhu DS18B20 memiliki rata-rata *error* sebesar 0.71% dibandingkan dengan *thermogun* standar. Sensor cahaya BH1750 menunjukkan rata-rata *error* sebesar 1.81% saat diuji dengan *digital lux meter*. Tingkat akurasi ini menegaskan bahwa seluruh data yang menjadi dasar analisis kinerja sistem adalah valid dan presisi.

b. Peningkatan Efisiensi Daya Melalui MPPT

Hasil pengujian membuktikan bahwa MPPT bekerja secara cerdas dengan mengonversi kelebihan tegangan dari panel surya menjadi arus pengisian yang lebih besar untuk baterai. Sebagai contoh, data pengujian menunjukkan pada satu titik observasi, arus input panel sebesar 3.63A berhasil ditingkatkan oleh MPPT menjadi arus keluaran ke baterai sebesar 4.43A. Melalui mekanisme inilah teknologi MPPT secara signifikan mengoptimalkan daya keluaran panel surya. Bukti optimalisasi ini sangat jelas yaitu sistem dengan MPPT mampu menghasilkan daya keluaran rata-rata sebesar 79.91W, yang merupakan peningkatan efisiensi daya sebesar 30.83% dibandingkan daya rata-rata sistem tanpa MPPT yang hanya mencapai 61.08W.

c. Keandalan Komunikasi Protokol *Modbus*

Implementasi protokol *Modbus* terbukti sangat andal dan stabil untuk menjembatani komunikasi data antara mikrokontroler ESP32 dan MPPT. Keandalan ini divalidasi melalui beberapa tahap pengujian. Secara visual, lampu indikator TX atau kirim dan RX atau terima pada konverter RS-485 yang menyala secara bergantian mengonfirmasi adanya siklus permintaan dan respons data yang berhasil antara kedua perangkat. Lebih dari itu, data yang dikirimkan oleh MPPT berhasil diterima dan ditampilkan secara akurat pada layar LCD, membuktikan integritas informasi yang ditransmisikan. Puncak dari pengujian keandalan ini adalah kemampuan sistem untuk secara konsisten mengirimkan seluruh paket data tegangan, arus, suhu, dan cahaya ke *Google Sheets* setiap 15 detik tanpa kegagalan, yang membuktikan komunikasi tidak hanya berfungsi sesaat tetapi juga stabil untuk pencatatan data jangka panjang.

d. Kinerja Sistem Terintegrasi

Mikrokontroler ESP32 berhasil berfungsi sebagai pusat kendali yang mengintegrasikan seluruh komponen sistem. ESP32 mampu menjalankan tugas-tugas secara simultan, mulai dengan akuisisi data dari semua sensor, komunikasi dua arah dengan MPPT melalui *Modbus*, hingga menampilkan data secara lokal pada LCD dan mengirimkannya ke aplikasi *Blynk* untuk pemantauan jarak jauh. Uji coba jangka panjang menunjukkan sistem berjalan dengan stabil tanpa kendala, yang membuktikan keandalan sistem untuk operasi berkelanjutan.

e. Uji *Charging* Baterai

Hasil uji pengisian baterai menunjukkan keunggulan signifikan dari sistem yang menggunakan MPPT, baik dari aspek kecepatan maupun keamanan. Dalam mengisi baterai dari kapasitas 45.5% hingga 100%, sistem dengan MPPT hanya memerlukan waktu 3 jam 16 menit, atau sekitar 27% lebih cepat dibandingkan sistem tanpa MPPT yang membutuhkan waktu 4 jam 28 menit. Selain unggul dalam kecepatan, sistem MPPT juga terbukti lebih aman karena dilengkapi fitur proteksi otomatis yang krusial. Fitur ini berhasil melindungi baterai dari kondisi *overcharge* dengan memutus arus secara presisi ketika tegangan mencapai ambang batas 14.03V, kemudian beralih ke mode *float charging* untuk mempertahankan daya baterai agar tetap 100%. Proses ini melawan untuk efek *self-discharge* yaitu kecenderungan alami baterai untuk kehilangan sedikit dayanya seiring waktu, bahkan saat tidak digunakan ini bertujuan agar menjaga kesehatan dan memperpanjang siklus hidup baterai. Dengan demikian, pengujian ini mengonfirmasi bahwa penggunaan MPPT tidak hanya mengakselerasi proses pengisian, tetapi juga meningkatkan keamanan dan keandalan sistem secara keseluruhan.

Kajian Produk Akhir

Produk akhir dari penelitian ini adalah sebuah prototipe sistem optimalisasi panel surya yang terintegrasi dengan teknologi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dan protokol komunikasi *Modbus* untuk pengisian baterai pada sistem pemanas air di kapal. Sistem ini dirancang untuk memaksimalkan penyerapan energi terbarukan dan menyediakan monitoring kinerja yang akurat secara *real-time*. Sistem terdiri dari beberapa komponen utama:

- a. Panel Surya 200Wp sebagai sumber energi utama yang mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik.
- b. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) berfungsi untuk melacak dan mempertahankan titik daya maksimum dari panel surya untuk meningkatkan efisiensi pengisian baterai.
- c. *Mikrokontroler* ESP32 sebagai unit pemrosesan pusat yang mengelola akuisisi data, komunikasi, dan kontrol sistem.
- d. Konverter TTL to RS-485 memfasilitasi komunikasi data antara MPPT dan ESP32 menggunakan protokol *Modbus*
- e. Sensor pendukung termasuk sensor suhu DS18B20 untuk memonitor suhu panel dan sensor cahaya BH1750 untuk mengukur intensitas cahaya
- f. Media monitoring terdiri dari LCD I2C untuk pemantauan lokal dan aplikasi *Blynk* untuk pemantauan jarak jauh.

Hasil Pengujian Produk:

- a. Teknologi MPPT bekerja dengan cara mengonversi tegangan panel surya yang lebih tinggi menjadi arus pengisian yang lebih besar untuk baterai. Hal ini terbukti dalam pengujian, di mana pada satu titik observasi, arus input dari panel sebesar 3.63 A berhasil ditingkatkan secara signifikan oleh MPPT menjadi arus keluaran ke baterai sebesar 4.43 A. Mekanisme konversi daya yang efisien inilah yang menghasilkan peningkatan performa secara keseluruhan.
- b. Akurasi sensor dan keandalan *monitoring* menunjukkan bahwa komponen sensor memiliki akurasi yang tinggi dan andal. Sensor suhu DS18B20 menunjukkan tingkat *error* rata-rata hanya 0.71% bila dibandingkan dengan termometer standar, sementara sensor cahaya BH1750 mencatatkan *error* rata-rata sebesar 1.81% saat divalidasi dengan *lux meter* digital. Akurasi ini memastikan bahwa data monitoring yang ditampilkan sistem adalah valid dan dapat dipercaya untuk analisis kinerja.
- c. Proteksi baterai otomatis sistem MPPT berhasil melindungi baterai dari *overcharge* dengan menghentikan pengisian secara presisi saat tegangan mencapai ambang batas aman 14.03V dan beralih ke mode pemeliharaan atau *float charging*

- d. Monitoring komprehensif sistem mampu menyajikan data kinerja secara lengkap dan *real-time*, baik secara lokal melalui LCD maupun jarak jauh melalui aplikasi *Blynk*, sehingga memudahkan analisis dan manajemen energi.
- e. *Charging* Baterai. Hasil uji perbandingan kecepatan pengisian menunjukkan keunggulan signifikan dari sistem yang menggunakan MPPT. Untuk mengisi baterai dari kapasitas 45.5% hingga 100%, sistem dengan MPPT hanya memerlukan waktu 3 jam 16 menit. Ini terbukti sekitar 27% lebih cepat dibandingkan sistem tanpa MPPT yang membutuhkan waktu 4 jam 28 menit dengan kondisi baterai dan cuaca cerah yang sama.

Produk akhir berhasil memenuhi tujuan yang ditetapkan, yakni menciptakan sebuah sistem optimalisasi panel surya yang efisien, andal, dan dapat dimonitor secara efektif. Sistem ini menawarkan solusi inovatif untuk meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan di kapal, khususnya untuk mendukung sistem pendukung seperti pemanas air.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan keseluruhan rangkaian penelitian yang telah dilaksanakan, yaitu tahap perancangan sistem, pembuatan dan pengujian perangkat, serta analisis data performa, maka pada bab ini dapat ditarik beberapa kesimpulan utama yang secara langsung menjawab rumusan masalah penelitian:

Pada sistem yang telah tervalidasi ini, efektivitas MPPT ditunjukkan melalui mekanisme kerjanya yang fundamental, yaitu mengonversi tegangan panel surya yang lebih tinggi menjadi arus pengisian yang lebih besar ke baterai, sehingga memaksimalkan energi yang dipanen untuk proses pengisian baterai. Panel surya yang digunakan 200Wp dengan ukuran 1290 x 760 x 30 mm. Akurasi monitoring dipastikan oleh sensor suhu DS18B20 memiliki rata-rata *error* sebesar 0.71% dibandingkan dengan *thermogun* standar. Sensor cahaya BH1750 menunjukkan rata-rata *error* hanya sebesar 1.81% saat diuji dengan *lux meter* digital.

Implementasi protokol *Modbus* melalui konverter RS-485 terbukti menjadi solusi yang andal dan efektif untuk monitoring dan analisis performa sistem panel surya secara *real-time*. Keandalan sistem komunikasi ini divalidasi melalui kemampuannya untuk secara konsisten mengirimkan seluruh paket data mencakup tegangan, arus, suhu, dan intensitas cahaya ke *database Google Sheets* dengan interval periodik setiap 15 detik tanpa kegagalan. Fungsionalitas ini menyediakan *data logger* berbasis *cloud* yang akurat dan komprehensif untuk pemantauan jarak jauh.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian selama pengembangan sistem, terdapat beberapa potensi pengembangan di masa depan agar sistem ini menjadi lebih optimal dan andal. Dua saran utama yang paling relevan untuk pengembangan selanjutnya adalah:

Penambahan fitur pencatatan data lokal karena sistem monitoring saat ini bergantung pada koneksi internet untuk menyimpan data ke *Google Sheets*. Ketergantungan ini menjadi kelemahan di lingkungan maritim di mana konektivitas bisa tidak stabil atau tidak tersedia. Disarankan untuk mengintegrasikan modul kartu *MicroSD* ke dalam sistem yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32. Fitur ini akan memastikan semua data kinerja seperti tegangan, arus, daya, dan suhu tetap terekam secara kontinu, menyediakan data yang lengkap dan andal untuk analisis bahkan saat kapal berada di luar jangkauan internet, sehingga meningkatkan redundansi dan integritas data secara signifikan.

Disarankan untuk menambahkan modul *relay* yang dikontrol oleh ESP32 pada jalur keluaran beban. Dengan logika pemrograman yang tepat, sistem dapat secara otomatis memutus daya ke beban-beban non-esensial ketika mendeteksi tegangan baterai rendah dan menyambungkannya kembali saat level baterai sudah aman.

DAFTAR PUSTAKA

- Alviero, A. L., & Nugroho, D. S. (2023). Pengaplikasian Sensor Arus ACS712 Sebagai Sistem Proteksi Pada Alat Penghitung Kertas Otomatis Berbasis IoT. *METROTECH: Journal of Mechanical and Electrical Technology*, 15(1), 45-60. <https://doi.org/10.33379/metrotech.v2i1.2067>
- Aritonang, W., Bangsa, I. A., & Rahmadewi, R. (2021). Implementasi sensor suhu DS18B20 dan sensor tekanan MPX5700AP menggunakan mikrokontroller Arduino pada alat pendeteksi tingkat stress. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 7(1), 153-160.
- Ariwibisono, F. X., & Muljanto, W. P. (2023). Implementasi Sistem Monitoring Produksi Energi PLTS Berbasis Protokol Modbus RTU dan Modbus TCP. *Nuansa Informatika*, 17(2), 67-74. <https://doi.org/10.25134/ilkom.v17i2.28>
- Atikah, N., Jati, B. P., & Nugroho, D. (2020). Analisis Pengaruh Suhu Terhadap Daya Output pada Panel Surya Monocrystalline dan Polycrystalline 50 Wp. *Jurnal Teknik Elektro*, 10(2), 15-22.
- Desmira, Mubarak, M. A. N., & Juniwan. (2024). Penerapan Smart Sensor Tegangan B25 Dan Sensor Arus Wcs1800 Pada Kursi Roda Cerdas. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa*, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. <https://doi.org/10.31294/insantek.v5i1.3305>
- Faizal, A., & Setyaji, B. (2016). Desain Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Panel Surya Menggunakan Metode Sliding Mode Control. *Jurnal Teknik Elektro*, 15(2), 45-60.

- Fauzi, A., Facta, M., & Sudjadi. (2018). Perencanaan Maximum Power Point Tracking (MPPT) dengan Metode Perturb and Observe pada Panel Surya. *Jurnal Teknik Elektro*, 10(2), 15-22.
- Khuriati, A. (2022). Sistem Pemantau Intensitas Cahaya Ambien dengan Sensor BH1750 Berbasis Mikrokontroler Arduino Nano. *Berkala Fisika*, 25(13), 105-110.
- Lestyanto, D. S. N., Sutedjo, N. A. W., & Adila, A. F. (2023). Sistem Proteksi Arus Lebih pada Proses Pengisian Baterai Menggunakan Buck Converter Metode Constant Voltage. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, 5(2), 181-190. <https://doi.org/10.32528/elkom.v5i2.10143>
- Mulyana, A., & Tosin. (2020). Perancangan dan Implementasi Komunikasi RS-485 Menggunakan Protokol Modbus RTU dan Modbus TCP pada Sistem Pick-by-Light. *Jurnal Teknik Komputer*, 10(2), 15-28. <https://doi.org/10.34010/komputika.v10i1.3557>
- Pambudi, W. S., Firmansyah, R. A., Suheta, T., & Wicaksono, N. K. (2023). Analisis Penggunaan Baterai Lead Acid dan Lithium Ion dengan Sumber Solar Panel. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 11(1), 15-28. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v11i2.392>
- Prasetyo, M. A., Nurdiansari, H., & Ajie, K. B. (2024). Rancang bangun alat pemilah ikan berbasis Internet of Things (IoT). *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika (JTMEI)*, 3(2), 35-52. <https://doi.org/10.55606/jtmei.v3i2.3768>
- Prastiwi, A. S., Munadhif, I., Rachman, I., Adhitya, R. Y., & Indarti, R. (2023). Integrasi Sistem Komunikasi Modbus TCP/IP pada PLC Siemens S7-1200, ESP32, dan HMI. *Jurnal Teknik Otomasi*, 15(2), 45-52.
- Pujianto, M. C., Winarno, I., & Rahmatullah, D. (2022). Smart Meter dan Pengontrol Penggunaan Energi Listrik Berdasarkan Smart Relay dengan Komunikasi Ethernet dan Wireless. *Jurnal Teknik Elektro*, 14(1), 45-60. <https://doi.org/10.26714/me.v14i2.7047>
- Reinanda, M. A., Sulu, V. N., Alfredo, R. B., & Rochadiani, T. H. (2024). Implementasi Internet of Things (IoT) dengan Sensor DS18B20 dan Float Sensor untuk Monitoring Suhu dan Ketinggian Air pada Proses Memandikan Bayi. *Jurnal Informatika*, 15(1), 1-10.
- Supari, D., Pinandita, S., Pratama, S. Y., & Abimanyu, L. B. (2024). OPTIMALISASI LISTRIK TENAGA SURYA DALAM MOBILITAS PERAHU Metode dan Analisnya. PT. Literasi Nusantara Abadi Grup.