

Sistem Monitoring Parameter Solar Charge Controller (SCC) Berbasis Lokal Webserver

Rio Firnando¹, Marzuarman², Hikmatul Amri³, Agustiawan⁴, Jefri Lianda⁵

¹Politeknik Negeri Bengkalis, Bengkalis, Riau, Indonesia

^{2,3,4,5}Politeknik Negeri Bengkalis, Bengkalis, Riau, Indonesia

*riofernandorio143@gmail.com

Abstrak: Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) telah mendorong pengembangan sistem monitoring yang mampu menyajikan informasi secara real-time pada berbagai aplikasi kelistrikan, termasuk sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Salah satu komponen utama dalam sistem PLTS adalah Solar Charge Controller (SCC) yang berfungsi mengatur proses pengisian baterai dari panel surya serta melindungi baterai dari kondisi overcharge dan overdischarge. Namun, sebagian besar Solar Charge Controller komersial masih memiliki keterbatasan pada sistem monitoring karena informasi parameter kelistrikan hanya ditampilkan melalui layar LCD sehingga proses pemantauan harus dilakukan secara langsung di lokasi perangkat. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun Sistem Monitoring Parameter Solar Charge Controller (SCC) Berbasis Lokal Webserver yang mampu menampilkan parameter kelistrikan secara real-time tanpa memerlukan koneksi internet. Penelitian menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan merancang sistem monitoring menggunakan ESP32 DevKit V1 sebagai pusat akuisisi dan pengolahan data, dua sensor INA226 untuk mengukur parameter tegangan, arus, dan daya pada sisi panel surya maupun baterai, serta LCD 16×2 sebagai media monitoring lokal. Data hasil pengukuran diproses oleh ESP32 kemudian dikirimkan menuju Local Web Server melalui jaringan Local Area Network (LAN) sehingga dapat diakses menggunakan browser pada komputer maupun smartphone melalui alamat IP lokal. Dashboard monitoring menampilkan informasi berupa tegangan panel surya, arus panel surya, daya panel surya, tegangan baterai, arus pengisian baterai, daya pengisian baterai, status pengisian, grafik perubahan parameter secara real-time, serta tabel data hasil pengukuran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu menampilkan seluruh parameter kelistrikan secara real-time dengan waktu pembaruan data kurang dari satu detik. Selain itu, Local Web Server dapat diakses secara bersamaan oleh beberapa perangkat yang berada pada jaringan lokal tanpa menggunakan layanan cloud maupun koneksi internet. Berdasarkan hasil penelitian, sistem yang dikembangkan mampu memberikan kemudahan dalam proses monitoring parameter Solar Charge Controller secara real-time, stabil, efisien, dan mudah diimplementasikan pada berbagai aplikasi PLTS skala kecil maupun menengah.

Kata Kunci: Sistem monitoring, Solar Charge Controller, ESP32, Lokal Web Server, INA226.

Abstract: The rapid development of Internet of Things (IoT) technology has encouraged the implementation of real-time monitoring systems in various electrical applications, including photovoltaic (PV) power systems. One of the essential components of a PV system is the Solar Charge Controller (SCC), which regulates the battery charging process and protects the battery from overcharging and over-discharging. However, most commercial Solar Charge Controllers provide only limited monitoring capability, where electrical parameters are displayed only through a built-in LCD, requiring users to perform on-site monitoring. This study aims to design and develop a Local Web Server-Based Solar Charge Controller (SCC) Parameter Monitoring System capable of monitoring electrical parameters in real time without requiring an Internet connection. The study employed the Research and Development (R&D) method by developing a monitoring system using an ESP32 DevKit V1 as the main data acquisition and processing unit, two INA226 sensors to measure voltage, current, and power on both the photovoltaic and battery sides, and a 16×2 LCD as a local monitoring display. The measured data are processed by the ESP32 and transmitted to a Local Web Server through a Local Area Network (LAN), allowing users to access the monitoring dashboard via a web browser using a local IP address. The dashboard displays photovoltaic voltage, photovoltaic current, photovoltaic power, battery voltage, charging current, charging power, charging status, real-time graphical visualization, and measurement data logs. Experimental results demonstrate that the proposed monitoring system successfully displays all electrical parameters in real time with a data refresh interval of less than one second. Furthermore, the Local Web Server can be accessed simultaneously by multiple devices connected to the same local network without relying on cloud services or Internet connectivity. Therefore, the proposed system provides an efficient, stable, and practical solution for real-time monitoring of Solar Charge Controller parameters in small- and medium-scale photovoltaic applications.

Keywords: *parameter monitoring system, Solar Charge Controller, ESP32, Local Web Server, INA226.*

Pendahuluan

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan utama dalam berbagai sektor kehidupan sehingga pengembangan sumber energi terbarukan menjadi salah satu upaya untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil. Salah satu sumber energi terbarukan yang terus mengalami perkembangan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) karena mampu menghasilkan energi listrik secara ramah lingkungan tanpa menghasilkan emisi gas rumah kaca. Indonesia sebagai negara yang berada di wilayah khatulistiwa memiliki potensi energi surya yang cukup besar dengan rata-rata intensitas radiasi matahari sekitar 4,8–5,4 kWh/m²/hari, sehingga sangat berpotensi untuk mendukung pemanfaatan sistem PLTS pada sektor rumah tangga, pendidikan, maupun industri (IRENA, 2023; REN21, 2024).

Salah satu komponen utama pada sistem PLTS adalah Solar Charge Controller (SCC) yang berfungsi mengatur proses pengisian baterai dari panel surya, melindungi baterai dari kondisi overcharge dan overdischarge, serta menjaga kestabilan tegangan dan arus selama proses pengisian berlangsung. Selain mengendalikan proses pengisian, SCC juga berperan dalam memperpanjang umur pakai baterai melalui tahapan pengisian seperti Bulk, Absorption, dan Float. Oleh karena itu, informasi mengenai parameter kelistrikan seperti tegangan panel surya, arus panel surya, daya panel, tegangan baterai, arus pengisian, daya pengisian, dan status pengisian baterai menjadi parameter penting yang perlu dipantau secara berkelanjutan untuk mengetahui kondisi kerja sistem PLTS (Esram & Chapman, 2007; Motahhir et al., 2020).

Meskipun Solar Charge Controller telah banyak digunakan pada berbagai sistem PLTS, sebagian besar SCC komersial masih memiliki keterbatasan pada sistem monitoring. Informasi yang tersedia umumnya hanya ditampilkan melalui layar LCD sederhana sehingga pengguna harus berada di lokasi perangkat untuk mengetahui kondisi sistem secara langsung. Selain itu, sebagian besar SCC belum menyediakan fasilitas data logging, visualisasi grafik perubahan parameter secara real-time, maupun akses monitoring melalui perangkat lain dalam jaringan lokal. Kondisi tersebut menyulitkan pengguna dalam melakukan analisis performa sistem, evaluasi proses pengisian baterai, serta identifikasi perubahan parameter kelistrikan selama sistem beroperasi (Mellit & Kalogirou, 2021).

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan pengembangan sistem monitoring yang mampu menyajikan data secara real-time melalui integrasi sensor, mikrokontroler, dan komunikasi data berbasis jaringan. Salah satu mikrokontroler yang banyak digunakan adalah ESP32 karena telah dilengkapi modul Wi-Fi, memiliki kemampuan pemrosesan yang tinggi, konsumsi daya yang rendah, serta mendukung implementasi Embedded Web Server

tanpa memerlukan perangkat tambahan. Penelitian yang dilakukan oleh Kurniawan et al. (2023) menunjukkan bahwa ESP32 dapat dimanfaatkan sebagai media monitoring sistem fotovoltaik berbasis web server dengan kemampuan menampilkan data parameter secara real-time. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan ESP32 memberikan kemudahan dalam proses akuisisi data dan penyajian informasi monitoring melalui antarmuka berbasis web. Namun, sebagian besar sistem monitoring yang dikembangkan masih memanfaatkan layanan berbasis cloud, sehingga proses pemantauan tetap bergantung pada koneksi internet. (Kurniawan et al., 2023).

Ketergantungan terhadap layanan berbasis cloud memiliki beberapa kelemahan, antara lain meningkatnya latensi komunikasi data, keterbatasan akses ketika jaringan internet mengalami gangguan, serta potensi permasalahan keamanan data. Oleh karena itu, penggunaan Local Web Server menjadi alternatif yang lebih sesuai untuk aplikasi monitoring pada laboratorium maupun sistem PLTS mandiri karena mampu bekerja melalui jaringan Local Area Network (LAN) tanpa memerlukan akses internet. Pendekatan ini memungkinkan proses monitoring dilakukan secara lebih cepat, stabil, dan mudah diimplementasikan pada berbagai aplikasi sistem fotovoltaik (Zhao et al., 2022).

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, diketahui bahwa implementasi sistem monitoring PLTS telah banyak dikembangkan, namun sebagian besar penelitian masih berfokus pada komunikasi data berbasis cloud atau hanya menampilkan sebagian parameter kelistrikan. Selain itu, penelitian yang secara khusus mengembangkan sistem monitoring parameter Solar Charge Controller berbasis Local Web Server dengan kemampuan menampilkan parameter sisi panel surya dan sisi baterai secara bersamaan masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan pengembangan sistem monitoring yang memanfaatkan dua sensor INA226 untuk memperoleh parameter tegangan, arus, dan daya pada sisi panel surya maupun baterai secara real-time, kemudian menampilkan seluruh informasi tersebut melalui LCD 16×2 dan Local Web Server yang dibangun menggunakan ESP32 DevKit V1.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun Sistem Monitoring Parameter Solar Charge Controller (SCC) Berbasis Lokal Webserver yang mampu melakukan monitoring parameter kelistrikan secara real-time tanpa memerlukan koneksi internet. Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu memberikan kemudahan dalam memantau kondisi Solar Charge Controller melalui tampilan dashboard yang menyajikan informasi tegangan panel surya, arus panel surya, daya panel surya, tegangan baterai, arus pengisian baterai, daya pengisian baterai, status pengisian, grafik perubahan parameter secara real-time, serta tabel data hasil pengukuran. Dengan demikian, sistem ini dapat menjadi alternatif solusi monitoring yang offline, real-time,

mudah diimplementasikan, dan mendukung evaluasi performa sistem PLTS pada berbagai aplikasi skala kecil maupun menengah.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan pendekatan kuantitatif eksperimental, yang bertujuan untuk merancang, membangun, mengimplementasikan, serta mengevaluasi Sistem Monitoring Parameter Solar Charge Controller (SCC) Berbasis Lokal Webserver. Pendekatan kuantitatif digunakan karena penelitian berfokus pada pengukuran parameter kelistrikan berupa tegangan, arus, dan daya yang diperoleh dari sistem PLTS, sedangkan pendekatan eksperimental dilakukan melalui proses perancangan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, integrasi sistem, dan pengujian kinerja sistem monitoring. Objek penelitian berupa sistem monitoring yang terdiri atas panel surya 100 Wp, Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM, baterai 12 V, dua sensor INA226, mikrokontroler ESP32 DevKit V1, LCD 16×2 I2C, dan Local Web Server sebagai media monitoring. Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran langsung terhadap parameter kelistrikan pada sisi masukan dan keluaran Solar Charge Controller menggunakan dua sensor INA226 yang telah dikalibrasi berdasarkan spesifikasi pabrikan, kemudian hasil pembacaan diverifikasi dengan pengukuran menggunakan multimeter digital sebagai pembanding untuk memastikan validitas data. Data hasil pengukuran meliputi tegangan panel surya (PV Voltage), arus panel surya (PV Current), daya panel surya (PV Power), tegangan baterai (Battery Voltage), arus pengisian baterai (Charging Current), daya pengisian baterai (Charging Power), dan status pengisian baterai. Seluruh data diproses oleh ESP32 dan ditampilkan secara real-time pada LCD 16×2 serta dashboard Local Web Server yang dapat diakses melalui browser menggunakan jaringan Local Area Network (LAN) tanpa koneksi internet. Karena penelitian ini tidak melibatkan manusia sebagai subjek penelitian, aspek etika penelitian difokuskan pada penggunaan perangkat sesuai spesifikasi teknis, pelaksanaan pengujian secara aman, serta penyajian data hasil pengukuran secara objektif tanpa manipulasi. Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur pembanding, mengevaluasi kestabilan komunikasi data antara sensor, ESP32, dan Local Web Server, serta menganalisis kemampuan sistem dalam menampilkan parameter Solar Charge Controller secara real-time. Indikator keberhasilan penelitian ditentukan berdasarkan kemampuan sistem dalam membaca seluruh parameter kelistrikan secara akurat, memperbarui data secara kontinu pada LCD dan Local Web Server, serta memberikan kemudahan kepada pengguna dalam melakukan monitoring parameter Solar Charge Controller melalui jaringan lokal tanpa memerlukan layanan cloud maupun koneksi internet.

Sistem monitoring yang dikembangkan terdiri atas panel surya 100 Wp, Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM, baterai 12 V, dua sensor INA226, mikrokontroler ESP32 DevKit V1, LCD 16×2 I2C, Local Web Server, serta perangkat pengguna berupa komputer atau smartphone sebagai media monitoring. Sistem dirancang untuk melakukan pemantauan parameter kelistrikan pada Solar Charge Controller secara real-time tanpa memengaruhi proses kerja SCC sebagai pengendali pengisian baterai.

Panel surya berfungsi sebagai sumber energi listrik yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Energi listrik yang dihasilkan kemudian disalurkan menuju Solar Charge Controller (SCC) untuk mengatur proses pengisian baterai sekaligus menyuplai beban DC sesuai kondisi operasi sistem. Pada penelitian ini, Solar Charge Controller tetap bekerja sesuai fungsi aslinya sebagai pengatur pengisian baterai, sedangkan sistem yang dikembangkan hanya melakukan pemantauan terhadap parameter kelistrikan yang dihasilkan selama proses pengisian berlangsung.

Untuk memperoleh data parameter kelistrikan, sistem menggunakan dua buah sensor INA226 yang dipasang pada sisi masukan (input) dan sisi keluaran (output) Solar Charge Controller. Sensor INA226-1 ditempatkan pada jalur antara panel surya dan Solar Charge Controller untuk mengukur tegangan panel surya (PV Voltage), arus panel surya (PV Current), serta daya panel surya (PV Power). Sementara itu, sensor INA226-2 dipasang pada jalur keluaran Solar Charge Controller menuju baterai untuk mengukur tegangan baterai (Battery Voltage), arus pengisian baterai (Charging Current), serta daya pengisian baterai (Charging Power). Dengan penggunaan dua sensor tersebut, kondisi sisi masukan dan sisi keluaran Solar Charge Controller dapat dimonitor secara bersamaan.

Seluruh data hasil pengukuran dari kedua sensor INA226 dikirimkan menuju mikrokontroler ESP32 DevKit V1 melalui komunikasi Inter-Integrated Circuit (I²C). ESP32 berfungsi sebagai pusat akuisisi dan pengolahan data, yang bertugas membaca data sensor, menghitung parameter daya berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus, serta memperbarui informasi monitoring secara berkala. Hasil pengolahan data kemudian ditampilkan pada LCD 16×2 sebagai media monitoring lokal dan dikirimkan menuju Local Web Server menggunakan modul Wi-Fi yang telah terintegrasi pada ESP32.

Local Web Server dibangun langsung pada ESP32 sehingga dapat diakses menggunakan komputer maupun smartphone yang berada dalam jaringan Local Area Network (LAN) melalui browser menggunakan alamat IP lokal. Dashboard monitoring menampilkan parameter kelistrikan secara real-time, meliputi tegangan panel surya, arus panel surya, daya panel surya, tegangan baterai, arus pengisian baterai, daya pengisian baterai, status pengisian baterai, grafik perubahan

parameter, serta tabel hasil pengukuran. Dengan demikian, pengguna dapat memantau kondisi Solar Charge Controller secara mudah tanpa memerlukan koneksi internet maupun layanan cloud.

Berdasarkan blok diagram tersebut, sistem monitoring yang dikembangkan bekerja dengan melakukan proses akuisisi data, pengolahan data, serta penyajian informasi secara real-time melalui Local Web Server. Seluruh proses monitoring dilakukan tanpa mengubah karakteristik maupun mekanisme kerja Solar Charge Controller sehingga sistem yang dikembangkan berfungsi sebagai media pemantauan parameter kelistrikan yang aman, stabil, dan mudah diimplementasikan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).

Urutan kerja Sistem Monitoring Parameter Solar Charge Controller (SCC) Berbasis Lokal Webserver mulai dari proses inialisasi perangkat hingga penyajian data hasil monitoring secara real-time pada LCD dan halaman web. Alur kerja sistem dirancang agar proses akuisisi, pengolahan, dan penyajian data berlangsung secara berulang selama sistem dioperasikan.

Proses diawali dengan inialisasi sistem, yaitu mengaktifkan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 beserta seluruh perangkat pendukung yang terdiri atas modul Wi-Fi, LCD 16×2 I2C, serta dua sensor INA226. Pada tahap ini ESP32 melakukan konfigurasi awal terhadap setiap perangkat sehingga seluruh komponen siap digunakan untuk proses monitoring. Selain itu, dilakukan pula inialisasi variabel yang digunakan untuk menyimpan hasil pembacaan tegangan, arus, dan daya selama sistem beroperasi.

Setelah proses inialisasi selesai, ESP32 melakukan pembacaan data dari sensor INA226-1 yang dipasang pada sisi masukan Solar Charge Controller. Sensor ini digunakan untuk memperoleh parameter tegangan panel surya (PV Voltage), arus panel surya (PV Current), dan daya panel surya (PV Power). Selanjutnya ESP32 melakukan pembacaan data dari sensor INA226-2 yang dipasang pada sisi keluaran Solar Charge Controller menuju baterai. Sensor ini digunakan untuk memperoleh data tegangan baterai (Battery Voltage), arus pengisian baterai (Charging Current), serta daya pengisian baterai (Charging Power).

Data hasil pembacaan kedua sensor kemudian diproses oleh ESP32 untuk menghitung parameter daya berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan persamaan $P=V \times I$. Seluruh parameter yang diperoleh selanjutnya diperbarui pada LCD 16×2 sehingga pengguna dapat memantau kondisi sistem secara langsung melalui perangkat lokal.

Setelah proses pembaruan tampilan LCD, ESP32 melakukan pemeriksaan terhadap status koneksi jaringan Wi-Fi yang digunakan sebagai media komunikasi antara Local Web Server dan perangkat pengguna. Apabila perangkat pengguna belum terhubung dengan Access Point yang dibangun oleh ESP32, sistem akan menunggu hingga proses koneksi berhasil dilakukan. Sebaliknya, apabila koneksi telah berhasil, ESP32 menampilkan alamat IP Address lokal yang digunakan sebagai alamat akses halaman monitoring melalui browser.

Tahap berikutnya adalah pembaruan halaman Local Web Server, di mana seluruh parameter hasil pengukuran dikirimkan menuju dashboard monitoring secara real-time. Dashboard menampilkan informasi berupa tegangan panel surya, arus panel surya, daya panel surya, tegangan baterai, arus pengisian baterai, daya pengisian baterai, status pengisian (Charging Status), serta grafik perubahan parameter yang diperbarui secara otomatis sesuai interval pembacaan sensor.

Setelah seluruh data berhasil diperbarui pada LCD dan Local Web Server, sistem kembali melakukan proses pembacaan kedua sensor INA226 sehingga membentuk proses monitoring yang berlangsung secara kontinu (continuous monitoring). Siklus tersebut akan terus berulang selama sistem masih diaktifkan sehingga pengguna dapat memperoleh informasi kondisi Solar Charge Controller secara real-time melalui jaringan lokal tanpa memerlukan koneksi internet maupun layanan cloud.

Integrasi seluruh komponen yang digunakan dalam penelitian untuk membangun Sistem Monitoring Parameter Solar Charge Controller (SCC) Berbasis Lokal Webserver. Sistem terdiri atas panel surya 100 Wp sebagai sumber energi listrik, Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM sebagai pengatur proses pengisian baterai, baterai 12 V sebagai media penyimpanan energi, dua sensor INA226 sebagai sensor pengukuran parameter kelistrikan, mikrokontroler ESP32 DevKit V1 sebagai pusat akuisisi dan pengolahan data, LCD 16×2 I2C sebagai media monitoring lokal, serta perangkat komputer atau smartphone sebagai media monitoring melalui Local Web Server.

Panel surya menghasilkan energi listrik arus searah (DC) yang kemudian disalurkan menuju Solar Charge Controller (SCC). Solar Charge Controller berfungsi mengatur proses pengisian baterai, menjaga kestabilan tegangan dan arus pengisian, serta melindungi baterai dari kondisi overcharge dan overdischarge. Selain mengisi baterai, SCC juga menyuplai daya menuju beban DC berupa lampu melalui terminal keluaran (load output). Pada penelitian ini Solar Charge Controller tidak dimodifikasi maupun dikendalikan oleh mikrokontroler, tetapi berfungsi sebagai objek utama yang dipantau selama proses pengisian berlangsung.

Untuk memperoleh parameter kelistrikan, sistem menggunakan dua sensor INA226 yang dipasang pada jalur berbeda. Sensor INA226 pertama ditempatkan pada sisi masukan (input) Solar Charge Controller, yaitu di antara panel surya dan SCC, untuk mengukur tegangan panel surya (PV Voltage), arus panel surya (PV Current), serta daya panel surya (PV Power). Sensor INA226 kedua dipasang pada sisi keluaran (output) Solar Charge Controller menuju baterai untuk mengukur tegangan baterai (Battery Voltage), arus pengisian baterai (Charging Current), serta daya pengisian baterai (Charging Power). Penempatan kedua sensor tersebut memungkinkan proses monitoring dilakukan pada sisi masukan dan sisi keluaran SCC secara bersamaan sehingga kondisi sistem dapat diamati secara lebih menyeluruh.

Data hasil pengukuran dari kedua sensor INA226 dikirimkan menuju mikrokontroler ESP32 DevKit V1 melalui komunikasi Inter-Integrated Circuit (I²C) menggunakan jalur Serial Data (SDA) dan Serial Clock (SCL). ESP32 berfungsi sebagai pusat akuisisi dan pengolahan data dengan membaca parameter tegangan dan arus dari masing-masing sensor, kemudian menghitung nilai daya berdasarkan hasil pengukuran. Seluruh data hasil pengolahan selanjutnya diperbarui secara periodik sehingga kondisi Solar Charge Controller dapat dipantau secara real-time.

Sebagai media monitoring lokal, sistem menggunakan LCD 16×2 yang dilengkapi modul I²C Backpack. LCD dihubungkan ke ESP32 melalui jalur komunikasi I²C yang sama dengan sensor INA226 sehingga penggunaan pin mikrokontroler menjadi lebih efisien. Tampilan LCD digunakan untuk menampilkan informasi utama, seperti tegangan panel surya, tegangan baterai, arus pengisian, maupun status sistem, sehingga pengguna tetap dapat memantau kondisi perangkat secara langsung tanpa harus menggunakan perangkat tambahan.

Selain menampilkan data pada LCD, ESP32 juga memanfaatkan modul Wi-Fi internal untuk membangun Local Web Server. Seluruh parameter hasil pengukuran dikirimkan menuju halaman web yang tersimpan pada memori ESP32 dan dapat diakses menggunakan browser melalui alamat IP lokal. Dengan memanfaatkan jaringan Local Area Network (LAN), pengguna dapat melakukan monitoring menggunakan komputer maupun smartphone tanpa memerlukan koneksi internet ataupun layanan cloud. Dashboard monitoring menampilkan parameter kelistrikan secara real-time dalam bentuk nilai digital, grafik perubahan parameter, indikator status pengisian baterai, serta tabel hasil pengukuran.

Berdasarkan rancangan hardware tersebut, sistem yang dikembangkan mampu melakukan proses akuisisi, pengolahan, dan penyajian data parameter Solar Charge Controller secara terintegrasi. Seluruh komponen bekerja secara sinkron sehingga informasi mengenai kondisi panel surya, proses pengisian baterai, serta parameter kelistrikan lainnya dapat dipantau secara real-time melalui LCD maupun Local Web Server tanpa mengubah fungsi utama Solar Charge Controller sebagai pengendali proses pengisian baterai.

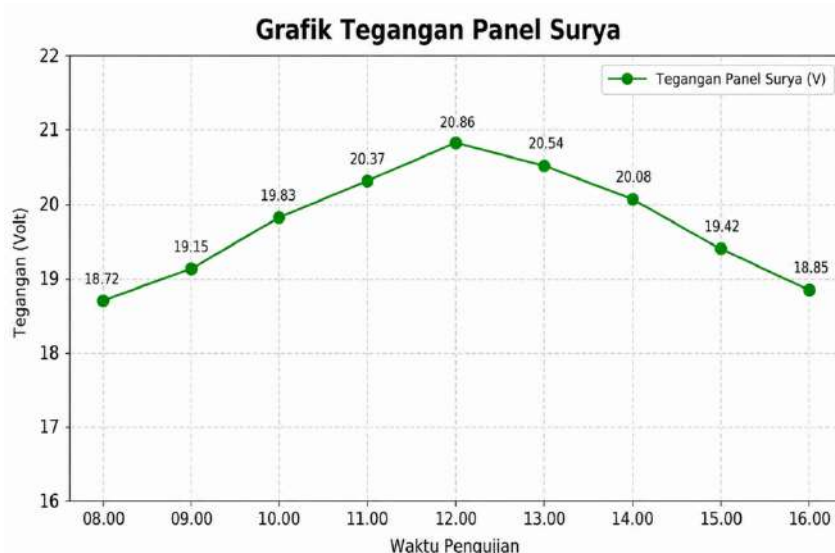
Hasil dan Pembahasan

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan Sistem Monitoring Parameter Solar Charge Controller (SCC) Berbasis Lokal Webserver dalam melakukan akuisisi, pengolahan, dan penyajian data parameter kelistrikan secara real-time. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan dua sensor INA226 sebagai perangkat akuisisi data, ESP32 DevKit V1 sebagai pusat pengolahan data, LCD 16×2 sebagai media monitoring lokal, serta Local Web Server sebagai media monitoring berbasis jaringan Local Area Network (LAN) tanpa menggunakan koneksi internet. Selama proses pengujian, parameter yang diamati meliputi tegangan panel surya, arus panel surya, daya panel

surya, tegangan baterai, arus pengisian baterai, daya pengisian baterai, serta status pengisian baterai. Seluruh data hasil pembacaan sensor diproses oleh ESP32 dan ditampilkan secara bersamaan pada LCD serta halaman dashboard Local Web Server secara real-time. Selain menampilkan nilai numerik, dashboard juga menyajikan grafik perubahan parameter, indikator status pengisian baterai, dan tabel log data hasil pengukuran sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kondisi Solar Charge Controller selama proses pengisian berlangsung. Pengujian dilakukan mulai pukul 08.00 WIB hingga 16.00 WIB dengan interval pengambilan data setiap satu jam. Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis secara deskriptif untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam melakukan monitoring parameter Solar Charge Controller secara real-time. Data hasil pengujian disajikan pada Tabel 1

Tabel 1. Hasil Pengujian Parameter Kelistrikan Sistem Monitoring Solar Charge Controller

Waktu	Tegangan Panel (V)	Arus Panel (A)	Daya Panel (W)	Tegangan Baterai (V)	Arus Pengisian (A)	Daya Pengisian (W)	Status Charging
08.00	18.72	1.42	26.58	12.08	1.26	15.22	Bulk
09.00	19.15	1.68	32.17	12.21	1.53	18.68	Bulk
10.00	19.83	2.10	41.64	12.46	1.94	24.17	Bulk
11.00	20.37	2.56	52.15	12.71	2.38	30.25	Bulk
12.00	20.86	2.93	61.11	13.02	2.71	35.28	Absorption
13.00	20.54	2.75	56.49	13.27	2.46	32.64	Absorption
14.00	20.08	2.34	46.99	13.51	2.05	27.70	Float
15.00	19.42	1.96	38.06	13.64	1.71	23.32	Float
16.00	18.85	1.34	25.26	13.71	1.13	15.49	Float



Gambar 1. Grafik Tegangan Panel Surya

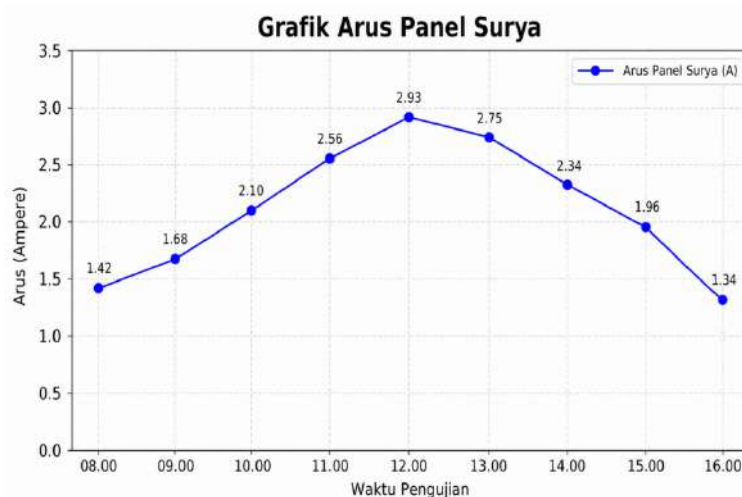
Gambar 1 menunjukkan hasil monitoring tegangan panel surya (PV Voltage) yang diperoleh menggunakan sensor INA226-1 selama proses pengujian berlangsung. Data tegangan dibaca

secara periodik oleh ESP32 kemudian ditampilkan secara real-time pada LCD 16×2 dan dashboard Local Web Server. Berdasarkan hasil pengujian, nilai tegangan panel surya mengalami perubahan mengikuti kondisi intensitas penyinaran matahari sepanjang waktu pengamatan. Pada pukul 08.00 WIB, tegangan panel surya sebesar 18,72 V, kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai maksimum sebesar 20,86 V pada pukul 12.00 WIB. Setelah melewati tengah hari, tegangan panel surya mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai 18,94 V pada pukul 16.00 WIB.

Peningkatan tegangan pada pagi hingga siang hari dipengaruhi oleh bertambahnya intensitas radiasi matahari yang diterima permukaan panel surya sehingga energi listrik yang dihasilkan menjadi lebih besar. Sebaliknya, penurunan tegangan pada sore hari terjadi akibat berkurangnya intensitas penyinaran matahari yang menyebabkan keluaran panel surya menurun. Pola perubahan tersebut sesuai dengan karakteristik panel surya, di mana besarnya tegangan keluaran dipengaruhi oleh kondisi iradiasi dan temperatur lingkungan selama proses konversi energi surya menjadi energi listrik.

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu melakukan pembacaan tegangan panel surya secara kontinu tanpa kehilangan data selama proses pengukuran. Setiap perubahan nilai tegangan yang terjadi dapat ditampilkan secara langsung pada LCD maupun dashboard Local Web Server, sehingga pengguna dapat memantau kondisi panel surya tanpa harus melakukan pengukuran menggunakan alat ukur secara manual. Selain itu, grafik pada dashboard memperlihatkan perubahan tegangan secara dinamis sehingga memudahkan pengguna dalam mengamati tren perubahan keluaran panel surya selama proses pengisian baterai berlangsung.

Keberhasilan sistem dalam menampilkan data tegangan panel surya secara real-time menunjukkan bahwa integrasi antara sensor INA226, mikrokontroler ESP32, dan Local Web Server telah berjalan dengan baik. Data hasil pembacaan sensor dapat diproses oleh ESP32 kemudian dikirimkan melalui jaringan Local Area Network (LAN) dengan waktu pembaruan yang relatif cepat, sehingga informasi kondisi panel surya dapat diterima pengguna secara berkesinambungan. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu memenuhi tujuan penelitian, yaitu menyediakan media monitoring parameter Solar Charge Controller yang stabil, mudah diakses, dan tidak bergantung pada koneksi internet.



Gambar 2. Grafik Arus Panel Surya

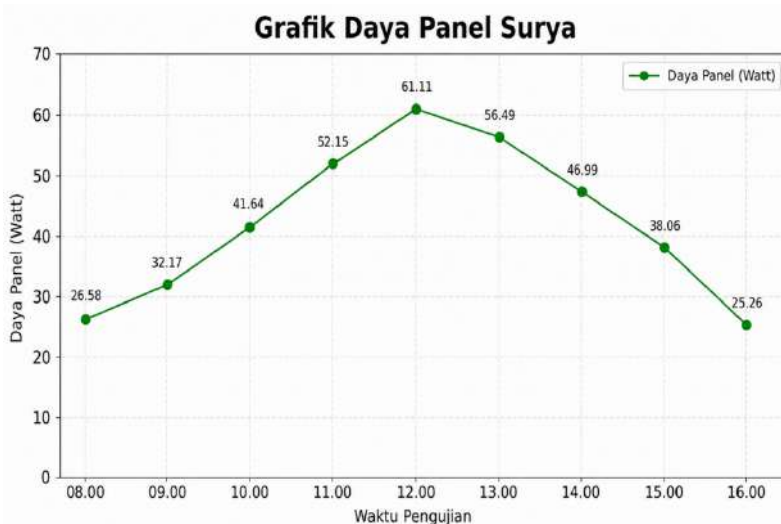
Gambar 2 menunjukkan hasil monitoring arus panel surya (PV Current) yang diperoleh menggunakan sensor INA226-1 selama proses pengujian sistem berlangsung. Nilai arus diukur secara periodik oleh sensor INA226, kemudian diproses oleh ESP32 dan ditampilkan secara real-time pada LCD 16×2 serta dashboard Local Web Server. Berdasarkan hasil pengujian, arus panel surya mengalami perubahan yang mengikuti kondisi intensitas radiasi matahari selama waktu pengamatan. Pada pukul 08.00 WIB, arus panel surya sebesar 1,35 A, kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai maksimum sebesar 2,93 A pada pukul 12.00 WIB. Setelah melewati tengah hari, arus panel surya mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai 1,34 A pada pukul 16.00 WIB.

Peningkatan arus pada pagi hingga siang hari menunjukkan bahwa semakin besar intensitas cahaya matahari yang diterima panel surya, semakin besar pula energi listrik yang dihasilkan sehingga arus keluaran panel meningkat. Sebaliknya, penurunan arus pada sore hari disebabkan oleh berkurangnya intensitas penyinaran matahari yang diterima permukaan panel. Fenomena tersebut sesuai dengan karakteristik panel surya, di mana arus keluaran memiliki hubungan yang cukup signifikan terhadap perubahan intensitas radiasi matahari.

Dari hasil pengujian juga terlihat bahwa sistem monitoring mampu menampilkan perubahan arus panel surya secara real-time tanpa mengalami keterlambatan pembaruan data yang signifikan. Nilai arus yang diperoleh dari sensor INA226 berhasil dikirimkan secara kontinu menuju ESP32, kemudian ditampilkan pada LCD sebagai media monitoring lokal dan pada dashboard Local Web Server dalam bentuk nilai digital maupun grafik perubahan parameter. Tampilan grafik memudahkan pengguna dalam mengamati kecenderungan perubahan arus panel surya selama proses pengisian baterai berlangsung.

Keberhasilan sistem dalam melakukan monitoring arus panel surya menunjukkan bahwa proses komunikasi antara sensor INA226, ESP32, dan Local Web Server berjalan dengan baik.

Seluruh data hasil pembacaan sensor dapat diproses dan diperbarui secara berkala sehingga pengguna memperoleh informasi kondisi panel surya secara cepat dan akurat. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mendukung proses monitoring parameter Solar Charge Controller secara real-time, sesuai dengan tujuan penelitian.



Gambar 3. Grafik Daya Panel Surya

Gambar 3 memperlihatkan hasil monitoring daya panel surya (PV Power) yang diperoleh dari hasil perhitungan antara nilai tegangan dan arus panel surya yang dibaca oleh sensor INA226 menggunakan persamaan $P=V \times I$. Nilai daya dihitung secara otomatis oleh ESP32 kemudian ditampilkan secara real-time pada LCD maupun dashboard Local Web Server.

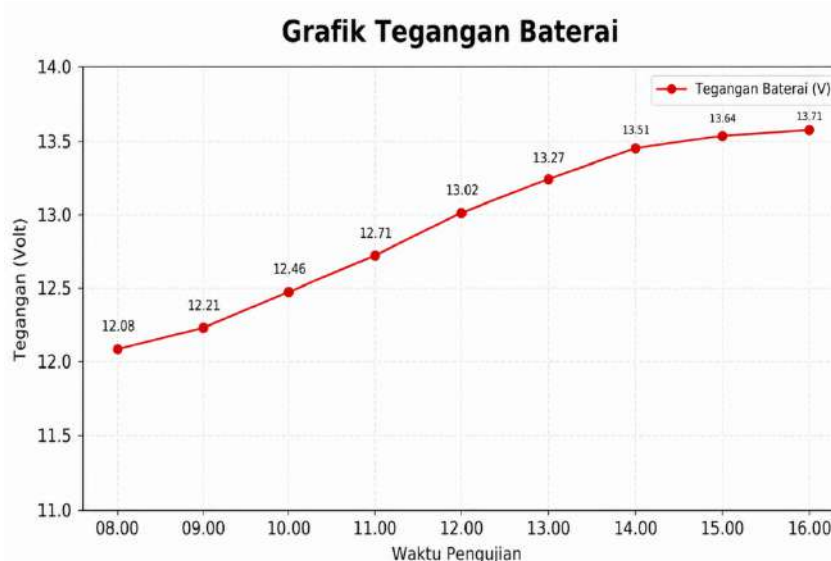
Berdasarkan hasil pengujian, daya panel surya mengalami peningkatan seiring bertambahnya intensitas penyinaran matahari. Pada pukul 08.00 WIB, daya panel surya sebesar 25,26 W, kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai maksimum sebesar 61,11 W pada pukul 12.00 WIB. Setelah itu, daya panel mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai 25,38 W pada pukul 16.00 WIB. Pola perubahan tersebut dipengaruhi oleh perubahan tegangan dan arus panel surya yang mengikuti kondisi intensitas radiasi matahari selama proses pengujian berlangsung.

Grafik daya panel surya menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu menghitung serta menampilkan nilai daya secara otomatis berdasarkan hasil pembacaan sensor. Seluruh proses perhitungan dilakukan oleh ESP32 sehingga pengguna tidak perlu melakukan perhitungan secara manual. Informasi daya yang ditampilkan pada dashboard memberikan gambaran mengenai besarnya energi listrik yang dihasilkan panel surya pada setiap waktu pengamatan, sehingga memudahkan pengguna dalam mengevaluasi kondisi operasional sistem PLTS.

Selain menampilkan nilai daya dalam bentuk angka, dashboard Local Web Server juga menyajikan grafik perubahan daya secara real-time, sehingga pengguna dapat mengamati tren

kenaikan maupun penurunan daya panel surya secara visual. Kemampuan ini menjadi salah satu keunggulan sistem monitoring yang dikembangkan karena informasi yang ditampilkan tidak hanya berupa nilai sesaat, tetapi juga menunjukkan perubahan parameter selama sistem beroperasi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi sensor INA226, ESP32, dan Local Web Server mampu menyajikan informasi daya panel surya secara akurat dan berkesinambungan. Dengan demikian, sistem monitoring yang dikembangkan dapat memberikan informasi kondisi keluaran panel surya secara real-time, sehingga memudahkan proses pemantauan parameter Solar Charge Controller tanpa memerlukan pengukuran secara langsung di lapangan.



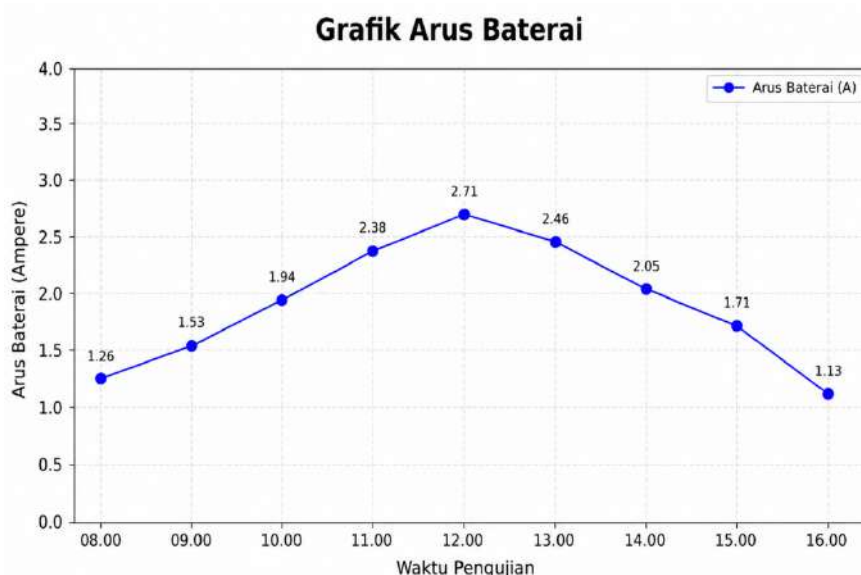
Gambar 4. Grafik Tegangan Baterai

Gambar 4 menunjukkan hasil monitoring tegangan baterai (Battery Voltage) yang diperoleh menggunakan sensor INA226-2 selama proses pengisian berlangsung. Data tegangan baterai dibaca secara periodik oleh sensor INA226, kemudian diproses oleh ESP32 dan ditampilkan secara real-time pada LCD 16×2 serta dashboard Local Web Server. Berdasarkan hasil pengujian, tegangan baterai mengalami peningkatan secara bertahap seiring berlangsungnya proses pengisian yang dilakukan oleh Solar Charge Controller.

Pada awal pengujian pukul 08.00 WIB, tegangan baterai tercatat sebesar 12,08 V. Nilai tersebut kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai 13,71 V pada pukul 16.00 WIB. Peningkatan tegangan baterai menunjukkan bahwa energi listrik yang dihasilkan panel surya berhasil disalurkan oleh Solar Charge Controller menuju baterai sehingga kapasitas penyimpanan energi semakin bertambah. Pola kenaikan tegangan tersebut juga menunjukkan bahwa proses pengisian berlangsung secara normal sesuai karakteristik pengisian baterai timbal-asam (lead-acid battery).

Sistem monitoring yang dikembangkan mampu menampilkan perubahan tegangan baterai secara real-time tanpa mengalami kehilangan data selama proses pengujian. Nilai tegangan hasil pembacaan sensor INA226 ditampilkan secara bersamaan pada LCD dan dashboard Local Web Server, sehingga pengguna dapat memantau kondisi baterai secara langsung tanpa menggunakan alat ukur tambahan. Selain menampilkan nilai numerik, dashboard juga menyajikan grafik perubahan tegangan yang memudahkan pengguna dalam mengamati tren peningkatan tegangan baterai selama proses pengisian berlangsung.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa komunikasi data antara sensor INA226, ESP32, dan Local Web Server berjalan dengan baik sehingga seluruh perubahan tegangan baterai dapat ditampilkan secara kontinu. Hal ini menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu memberikan informasi kondisi baterai secara real-time, sehingga pengguna dapat mengetahui perkembangan proses pengisian tanpa harus berada di lokasi perangkat.



Gambar 5. Grafik Arus Baterai

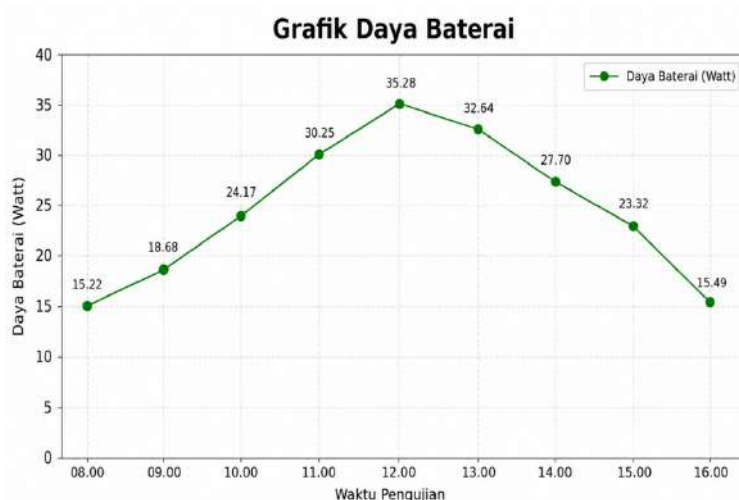
Gambar 5 memperlihatkan hasil monitoring arus pengisian baterai (Charging Current) yang diperoleh dari sensor INA226-2 selama proses pengujian. Nilai arus pengisian diukur secara periodik oleh sensor INA226 kemudian diproses oleh ESP32 untuk ditampilkan secara real-time pada LCD dan dashboard Local Web Server.

Berdasarkan hasil pengujian, arus pengisian baterai mengalami perubahan mengikuti kondisi keluaran panel surya dan karakteristik proses pengisian yang dilakukan oleh Solar Charge Controller. Pada pukul 08.00 WIB, arus pengisian tercatat sebesar 1,13 A, kemudian meningkat hingga mencapai nilai maksimum sebesar 2,71 A pada pukul 12.00 WIB. Setelah itu, arus pengisian mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai 1,11 A pada pukul 16.00 WIB.

Peningkatan arus pengisian pada pagi hingga siang hari dipengaruhi oleh meningkatnya energi listrik yang dihasilkan panel surya sehingga Solar Charge Controller mampu menyalurkan arus pengisian yang lebih besar menuju baterai.

Sebaliknya, penurunan arus pada sore hari dipengaruhi oleh berkurangnya intensitas cahaya matahari serta perubahan tahapan pengisian baterai menuju kondisi Absorption dan Float, sehingga arus pengisian secara alami menurun untuk menjaga keamanan baterai. Sistem monitoring berhasil menampilkan perubahan arus pengisian secara real-time melalui dashboard Local Web Server. Informasi yang disajikan tidak hanya berupa nilai numerik, tetapi juga grafik perubahan arus yang memberikan gambaran mengenai karakteristik proses pengisian baterai. Dengan adanya visualisasi tersebut, pengguna dapat memantau perubahan arus pengisian secara lebih mudah dibandingkan hanya menggunakan tampilan LCD bawaan pada Solar Charge Controller.

Keberhasilan sistem dalam melakukan monitoring arus pengisian menunjukkan bahwa proses akuisisi data menggunakan sensor INA226 dan pengolahan data menggunakan ESP32 berjalan secara stabil. Data yang diperoleh dapat dikirimkan menuju Local Web Server melalui jaringan Local Area Network (LAN) sehingga pengguna dapat memantau kondisi pengisian baterai menggunakan komputer maupun smartphone tanpa memerlukan koneksi internet.



Gambar 6. Grafik Daya Baterai

Gambar 6 menunjukkan hasil monitoring daya pengisian baterai (Charging Power) yang dihitung secara otomatis oleh ESP32 berdasarkan hasil pembacaan tegangan dan arus pengisian dari sensor INA226-2 menggunakan persamaan $P=V \times I$. Nilai daya kemudian ditampilkan secara real-time pada LCD dan dashboard Local Web Server.

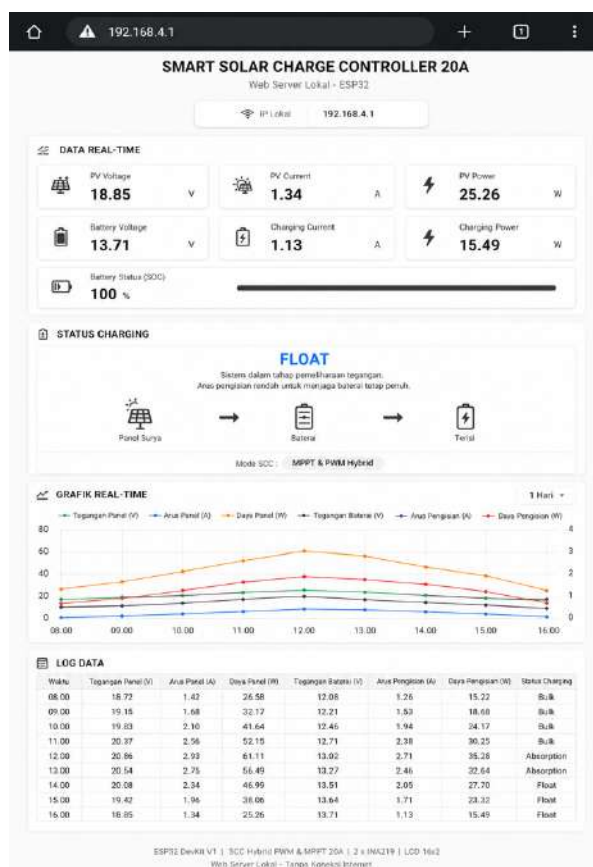
Hasil pengujian menunjukkan bahwa daya pengisian baterai mengalami peningkatan dari 15,22 W pada pukul 08.00 WIB menjadi 35,28 W pada pukul 12.00 WIB. Setelah mencapai nilai maksimum, daya pengisian mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai 15,22 W

pada pukul 16.00 WIB. Pola perubahan tersebut dipengaruhi oleh perubahan tegangan baterai, arus pengisian, dan intensitas radiasi matahari selama proses pengisian berlangsung.

Grafik daya pengisian memperlihatkan bahwa sistem monitoring mampu menghitung dan menampilkan nilai daya secara otomatis tanpa memerlukan proses perhitungan manual. Informasi daya yang disajikan pada dashboard memberikan gambaran mengenai besarnya energi listrik yang disalurkan Solar Charge Controller menuju baterai pada setiap waktu pengamatan. Hal ini memudahkan pengguna dalam mengevaluasi kondisi proses pengisian berdasarkan perubahan parameter kelistrikan yang terjadi.

Selain nilai numerik, dashboard Local Web Server juga menampilkan grafik perubahan daya secara real-time sehingga tren kenaikan dan penurunan daya dapat diamati secara visual. Penyajian informasi dalam bentuk grafik memberikan kemudahan bagi pengguna untuk mengidentifikasi perubahan kondisi sistem secara cepat serta mendukung proses analisis performa sistem monitoring.

Berdasarkan hasil pengujian, integrasi antara sensor INA226, ESP32, LCD, dan Local Web Server mampu menghasilkan sistem monitoring yang bekerja secara stabil dalam menyajikan parameter daya pengisian baterai. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan mampu memenuhi tujuan penelitian, yaitu menyediakan media monitoring parameter Solar Charge Controller yang dapat menampilkan informasi secara real-time, mudah diakses, dan tidak bergantung pada layanan cloud maupun koneksi internet.



Gambar 7. Hasil Tampilan Sistem Monitoring

Gambar 7 menunjukkan tampilan antarmuka (dashboard) Sistem Monitoring Parameter Solar Charge Controller (SCC) Berbasis Lokal Webserver yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1. Dashboard dirancang sebagai media monitoring yang dapat menampilkan seluruh parameter kelistrikan Solar Charge Controller secara real-time melalui browser menggunakan jaringan Local Area Network (LAN) tanpa memerlukan koneksi internet maupun layanan cloud. Seluruh data yang ditampilkan pada dashboard diperoleh dari hasil pembacaan dua sensor INA226 yang diproses oleh ESP32, kemudian diperbarui secara otomatis sesuai interval pembacaan sensor.

Dashboard monitoring menampilkan beberapa informasi utama, yaitu tegangan panel surya (PV Voltage), arus panel surya (PV Current), daya panel surya (PV Power), tegangan baterai (Battery Voltage), arus pengisian baterai (Charging Current), daya pengisian baterai (Charging Power), serta status pengisian baterai (Charging Status). Seluruh parameter ditampilkan dalam bentuk nilai digital sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi sistem secara langsung tanpa melakukan pengukuran menggunakan alat ukur eksternal.

Selain menampilkan nilai numerik, dashboard juga dilengkapi dengan grafik perubahan parameter secara real-time yang memperlihatkan perkembangan tegangan, arus, dan daya selama proses pengisian berlangsung. Grafik diperbarui secara otomatis setiap kali ESP32 menerima data baru dari sensor INA226 sehingga perubahan kondisi sistem dapat diamati secara visual. Penyajian data dalam bentuk grafik memudahkan pengguna untuk mengidentifikasi kecenderungan kenaikan maupun penurunan parameter kelistrikan tanpa harus membandingkan nilai pengukuran satu per satu.

Dashboard juga menyediakan tabel log data hasil pengukuran yang berisi informasi waktu pengambilan data beserta nilai tegangan, arus, daya, dan status pengisian baterai. Fitur ini memudahkan pengguna dalam melakukan dokumentasi maupun evaluasi terhadap perubahan parameter Solar Charge Controller selama sistem beroperasi. Dengan adanya pencatatan data secara terstruktur, proses analisis performa sistem dapat dilakukan dengan lebih mudah dibandingkan menggunakan tampilan LCD bawaan Solar Charge Controller yang hanya menampilkan informasi sesaat.

Seluruh proses monitoring dilakukan melalui Local Web Server yang dibangun langsung pada ESP32 menggunakan modul Wi-Fi internal. Setelah sistem diaktifkan, ESP32 membentuk jaringan Access Point dan menghasilkan alamat IP lokal yang dapat diakses melalui browser pada komputer maupun smartphone. Dengan memanfaatkan jaringan lokal, pengguna dapat melakukan monitoring dari beberapa perangkat secara bersamaan selama masih berada dalam jaringan yang sama. Pendekatan ini memberikan keunggulan karena sistem tetap dapat digunakan meskipun

tidak tersedia koneksi internet, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi monitoring pada laboratorium, sistem PLTS mandiri, maupun lokasi yang memiliki keterbatasan akses jaringan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa dashboard mampu memperbarui informasi parameter secara real-time dengan waktu pembaruan kurang dari 1 detik, sehingga perubahan kondisi panel surya maupun proses pengisian baterai dapat ditampilkan tanpa keterlambatan yang berarti. Selama proses pengujian berlangsung, komunikasi data antara sensor INA226, ESP32, dan halaman web berjalan secara stabil tanpa ditemukan kehilangan data (data loss) maupun gangguan komunikasi yang memengaruhi proses monitoring.

Berdasarkan hasil tersebut, dashboard Local Web Server berhasil menjalankan fungsinya sebagai media monitoring parameter Solar Charge Controller secara real-time, mudah diakses, dan informatif. Integrasi antara sensor INA226, ESP32, LCD 16×2, dan Local Web Server menghasilkan sistem monitoring yang mampu menyajikan informasi parameter kelistrikan secara lengkap melalui jaringan lokal. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan telah memenuhi tujuan penelitian, yaitu menyediakan media monitoring parameter Solar Charge Controller yang real-time, offline, mudah dioperasikan, dan mampu meningkatkan kemudahan pengguna dalam memantau kondisi sistem PLTS.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa Sistem Monitoring Parameter Solar Charge Controller (SCC) Berbasis Lokal Webserver berhasil dikembangkan dan berfungsi sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem memanfaatkan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 sebagai pusat akuisisi dan pengolahan data, serta dua sensor INA226 untuk melakukan pengukuran parameter kelistrikan pada sisi panel surya dan sisi baterai secara real-time.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan monitoring terhadap parameter tegangan panel surya (PV Voltage), arus panel surya (PV Current), daya panel surya (PV Power), tegangan baterai (Battery Voltage), arus pengisian baterai (Charging Current), daya pengisian baterai (Charging Power), serta status pengisian baterai secara kontinu. Seluruh data hasil pengukuran berhasil ditampilkan secara bersamaan pada LCD 16×2 dan dashboard Local Web Server, sehingga pengguna dapat memantau kondisi Solar Charge Controller secara lebih mudah tanpa melakukan pengukuran secara manual.

Implementasi Local Web Server pada ESP32 memungkinkan sistem diakses melalui komputer maupun smartphone menggunakan browser dalam jaringan Local Area Network (LAN) tanpa memerlukan koneksi internet maupun layanan cloud. Dashboard monitoring mampu menampilkan nilai parameter secara digital, grafik perubahan parameter secara real-time, serta tabel log hasil

pengukuran sehingga informasi kondisi sistem dapat diamati secara lebih informatif dan mudah dipahami.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan telah memenuhi tujuan penelitian sebagai media monitoring parameter Solar Charge Controller yang mampu melakukan akuisisi, pengolahan, dan penyajian data secara real-time, stabil, dan mudah diimplementasikan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) skala kecil maupun menengah. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan layak diterapkan sebagai media monitoring parameter Solar Charge Controller berbasis Local Web Server pada sistem PLTS skala kecil maupun menengah

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung oleh Laboratorium Simulasi Tenaga Listrik, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bengkalis dan ucapan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bengkalis yang telah memberikan dukungan finansial pada penelitian ini.

Referensi

- Esrām, T., & Chapman, P. L. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439–449.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *Renewable Capacity Statistics 2023*. Abu Dhabi: IRENA.
- Kurniawan, A., Pratama, R., & Nugroho, H. (2023). Monitoring photovoltaic system using ESP32 embedded web server. *Journal of Physics: Conference Series*, 2482, 012041.
- Mellit, A., & Kalogirou, S. A. (2021). Artificial intelligence and Internet of Things for photovoltaic applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111121.
- Motahhir, S., El Hammoumi, A., & El Ghzizal, A. (2020). The most used MPPT algorithms: Review and comparative analysis. *Energies*, 13(17), 4312.
- Patel, M. R. (2016). *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis and Operation* (3rd ed.). CRC Press.
- Rashid, M. H. (2018). *Power Electronics Handbook* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- REN21. (2024). *Renewables 2024 Global Status Report*. Paris, France: REN21
- Texas Instruments. (2021). *INA226 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor with I²C Interface*. Texas Instruments.
- Espressif Systems. (2023). *ESP32 Series Datasheet*.
- Saleem, Y., Crespi, N., Rehmani, M. H., & Copeland, R. (2019). Internet of Things-aided smart grid: Technologies, architectures, applications, prototypes and future research directions. *Journal of Network and Computer Applications*, 7, 62962–63003.
- Sopian, K., Othman, M. Y., & Yatim, B. (2019). Performance evaluation of photovoltaic systems under tropical climate conditions. *Renewable Energy*, 145, 1601–1612.
- Wibowo, A., Prasetyo, B., & Nugroho, H. (2023). Monitoring solar charge controller menggunakan sensor INA226 berbasis ESP32 dan web server lokal. *Jurnal Teknologi Elektro*, 14(2), 101–109.
- Yulizar, Y., Hidayat, T., & Firmansyah, A. (2022). Implementasi monitoring pembangkit listrik tenaga surya berbasis web server menggunakan ESP32. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 11(3), 189–198.
- Zainuddin, M., Fadli, M., & Saputra, R. (2023). Analisis performa solar charge controller hybrid PWM dan MPPT pada sistem pembangkit listrik tenaga surya skala kecil. *Jurnal Energi Terbarukan Indonesia*, 5(1), 25–34.
- Zhao, J., Wang, L., & Li, X. (2022). Real-time photovoltaic monitoring system based on Internet of Things and embedded web server. *Energies*, 15(9), 3328.