

Perancangan Sistem Monitoring Android-IoT yang Efisien untuk Solar Charge Controller MPPT Epever Berbasis Modbus RTU

Implementation of Android IoT Monitoring System on Epever MPPT Solar Charge Controller

Muhammad A¹, Soni Prayogi^{2*}

¹ *Laboratorium Pengukuran dan instrumentasi, Fakultas Teknik Industri, Universitas Pertamina, Jalan Teuku Nyak Arief, Simprug, Kebayoran Lama, Jakarta 12220, Jakarta. Indonesia*

² *Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri, Universitas Pertamina, Jalan Teuku Nyak Arief, Simprug, Kebayoran Lama, Jakarta 12220, Jakarta. Indonesia*

E-mail: ^{1}soni.prayogi@universitaspertamina.ac.id*

**Corresponding author*

Received 1 July 2025; Revised 17 July 2025; Accepted 28 July 2025

Abstrak—Permintaan terhadap energi terbarukan terus meningkat, sehingga diperlukan sistem monitoring yang efisien dan dapat diakses secara real-time untuk memastikan kinerja yang optimal. Penelitian ini mengimplementasikan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) dengan antarmuka Android pada solar charge controller MPPT merek Epever. Alasan utama pemilihan topik ini adalah keterbatasan aksesibilitas dan minimnya tampilan antarmuka pengguna pada sistem monitoring konvensional. Sistem ini menggunakan NodeMCU ESP8266 sebagai penghubung komunikasi antara solar charge controller dan aplikasi Android melalui jaringan Wi-Fi. Parameter yang dimonitor meliputi tegangan baterai, tegangan panel surya, arus, dan status pengisian daya, yang ditampilkan secara real-time pada perangkat Android. Metode yang digunakan mencakup perancangan sistem, integrasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian performa di berbagai kondisi intensitas cahaya matahari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menampilkan data secara akurat dengan jeda waktu yang rendah, serta meningkatkan kemudahan pengguna dalam memantau kinerja sistem. Kesimpulannya, sistem ini memberikan solusi monitoring yang murah, portabel, dan mudah dikembangkan untuk sistem energi surya, serta berkontribusi dalam pengelolaan energi yang cerdas dan berkelanjutan. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan sistem monitoring yang efisien dan portabel berbasis Android-IoT menggunakan komunikasi Modbus RTU, yang belum banyak digunakan pada sistem serupa. Dibandingkan dengan sistem monitoring konvensional, sistem ini menunjukkan peningkatan efisiensi dalam hal latensi, konsumsi daya, dan aksesibilitas pengguna.

Kata kunci: Internet of Things, Solar Charge Controller, MPPT Epever, Monitoring Real-Time.

Abstract—The demand for renewable energy continues to increase, so an efficient and real-time monitoring system is needed to ensure optimal performance. This study implements an Internet of Things (IoT)-based monitoring system with an Android interface on an Epever brand MPPT solar charge controller. The main reason for choosing this topic is the limited accessibility and minimal user interface display on conventional monitoring systems. This system uses NodeMCU ESP8266 as a communication link between the solar charge controller and the Android application via a Wi-Fi network. The monitored parameters include battery voltage, solar panel voltage, current, and charging status, which are displayed in real-time on an Android device. The methods used include system design, hardware and software integration, and performance testing under various sunlight intensity conditions. The test results show that the system is able to display data accurately with low time lag and increase user convenience in monitoring system

performance. In conclusion, this system provides a low-cost, portable, and easy-to-develop monitoring solution for solar energy systems and contributes to smart and sustainable energy management.

Keywords: Internet of Things, Solar Charge Controller, MPPT Epever, Real-Time Monitoring.

1. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi listrik secara global, termasuk di Indonesia, telah mendorong eksplorasi dan pemanfaatan energi terbarukan sebagai solusi berkelanjutan untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil [1]. Salah satu sumber energi terbarukan yang paling potensial dan mudah diakses adalah energi surya. Energi surya tidak hanya bersih dan ramah lingkungan, tetapi juga tersedia secara melimpah sepanjang tahun, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia. Untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik yang dapat digunakan, digunakan sistem *Pembangkit Listrik Tenaga Surya* (PLTS), yang umumnya terdiri dari panel surya, solar charge controller, baterai penyimpan energi, dan inverter [2]. Solar charge controller berfungsi untuk mengatur pengisian baterai agar tidak terjadi overcharge atau overdischarge. Jenis solar charge controller yang paling efisien dan banyak digunakan adalah *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), karena mampu mengoptimalkan daya keluaran dari panel surya berdasarkan perubahan intensitas cahaya dan temperatur lingkungan [3]. Salah satu produk populer di pasaran yang menggunakan teknologi MPPT adalah solar charge controller Epever, yang dikenal akan kestabilannya dalam pengisian daya [4].

Meskipun teknologi MPPT memiliki keunggulan efisiensi yang tinggi, sistem monitoring yang dimiliki perangkat ini masih bersifat terbatas dan kurang fleksibel [5]. Umumnya, informasi mengenai kondisi sistem seperti tegangan panel, tegangan baterai, arus pengisian, dan status pengisian hanya dapat dilihat melalui layar LCD kecil yang terpasang langsung pada perangkat, atau melalui perangkat lunak berbasis komputer dengan koneksi kabel data (misalnya RS-485 ke USB) [6]. Keterbatasan ini menjadi hambatan terutama dalam hal kenyamanan, mobilitas, dan aksesibilitas pengguna terhadap data performa sistem secara real-time, terlebih jika sistem PLTS dipasang di lokasi terpencil atau tidak memiliki infrastruktur komputer [7]. Di era digital saat ini, kebutuhan akan sistem monitoring yang portabel, real-time, dan terhubung secara nirkabel menjadi semakin penting. Teknologi *Internet of Things* (IoT) dan perangkat Android telah membuka peluang untuk merancang sistem monitoring yang dapat diakses melalui smartphone pengguna, sehingga data dari solar charge controller dapat dipantau dengan mudah tanpa harus berada di lokasi yang sama dengan perangkat [8]. Namun, belum banyak penelitian yang mengembangkan sistem monitoring berbasis Android IoT secara spesifik untuk solar charge controller MPPT merek Epever dengan fitur komunikasi Modbus RTU.

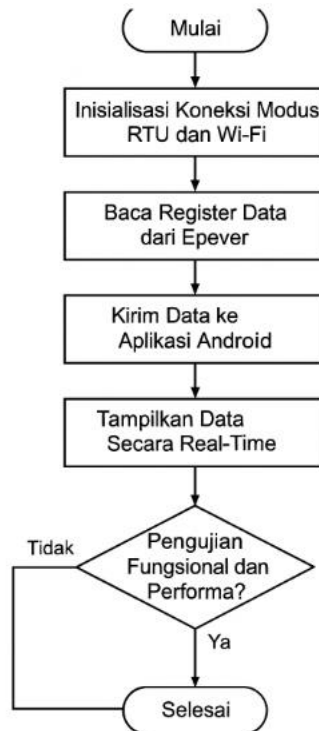
Berbagai literatur sebelumnya telah meneliti pemanfaatan teknologi IoT dalam sistem monitoring energi. Misalnya, penelitian oleh [9] berhasil mengimplementasikan sistem monitoring berbasis ESP32 untuk memantau suhu dan status pengisian baterai, namun belum menyediakan antarmuka mobile yang intuitif. Penelitian lain oleh [10] menggunakan Arduino Uno untuk memantau tegangan dan arus sistem surya, tetapi masih bergantung pada tampilan LCD lokal dan belum terintegrasi dengan sistem komunikasi nirkabel. Beberapa studi yang menggunakan teknologi IoT dan aplikasi mobile umumnya hanya memantau parameter dasar dan tidak berfokus pada integrasi dengan protokol industri seperti Modbus RTU yang digunakan oleh Epever [11]. Dengan demikian, diperlukan solusi yang dapat menggabungkan teknologi mikrokontroler, protokol komunikasi standar industri, dan aplikasi mobile untuk menciptakan sistem monitoring yang andal dan mudah digunakan oleh masyarakat umum maupun teknisi profesional [12]. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring berbasis Android IoT yang terhubung secara langsung dengan solar charge controller MPPT Epever menggunakan modul komunikasi Wi-Fi

NodeMCU ESP8266 dan protokol Modbus RTU.

Solusi yang diusulkan dalam penelitian ini adalah merancang sistem monitoring real-time berbasis aplikasi Android yang terhubung ke solar charge controller Epever melalui modul NodeMCU ESP8266. NodeMCU bertindak sebagai penghubung antara perangkat keras (solar charge controller) dan perangkat lunak (aplikasi Android) dengan memanfaatkan jaringan Wi-Fi. Data penting seperti tegangan panel, tegangan baterai, arus pengisian, dan status pengisian diambil dari perangkat Epever melalui protokol komunikasi Modbus RTU, kemudian dikirim ke aplikasi Android dalam bentuk data numerik dan grafik [13]. Aplikasi ini dikembangkan menggunakan Android Studio dan dirancang agar mudah digunakan oleh pengguna dari berbagai latar belakang. Inovasi utama dari penelitian ini terletak pada integrasi antara sistem PLTS, mikrokontroler IoT, dan antarmuka mobile yang ramah pengguna dalam satu platform monitoring yang efisien, terjangkau, dan portabel. Dengan adanya sistem ini, pengguna dapat mengakses informasi sistem surya kapan saja dan di mana saja tanpa perlu perangkat tambahan yang kompleks [14]. Penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi pada bidang teknologi energi terbarukan, tetapi juga mendorong implementasi sistem digital dalam pengelolaan energi, sejalan dengan arah pembangunan berkelanjutan dan penerapan smart energy management di masa depan. Dengan demikian, penelitian ini memiliki kontribusi utama pada efisiensi sistem monitoring energi surya dengan pendekatan mobile-IoT yang ringan dan akurat. Fokus penelitian tidak hanya pada implementasi, tetapi pada peningkatan efisiensi pemantauan daya dengan menggunakan protokol komunikasi industri Modbus RTU, serta perbandingan performa dengan sistem konvensional. Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang sistem monitoring Android-IoT yang efisien, terjangkau, dan dapat diakses secara nirkabel untuk sistem tenaga surya berbasis Epever MPPT.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode rekayasa eksperimental dengan pendekatan desain sistem berbasis *Internet of Things* (IoT) yang terintegrasi dengan aplikasi Android. Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur terkait teknologi monitoring sistem tenaga surya, komunikasi protokol Modbus RTU, dan pemrograman mikrokontroler NodeMCU ESP8266. Berdasarkan literatur [15] pemanfaatan protokol Modbus RTU secara luas digunakan dalam perangkat industri untuk komunikasi data karena efisien dan ringan. Rancangan sistem melibatkan tiga komponen utama, yaitu perangkat keras (NodeMCU ESP8266, converter USB to RS-485, dan solar charge controller MPPT Epever), perangkat lunak (firmware berbasis Arduino IDE dan aplikasi Android menggunakan Android Studio), serta koneksi komunikasi nirkabel menggunakan jaringan Wi-Fi local [16]. Firmware pada NodeMCU diprogram untuk membaca data dari port RS-485 Epever menggunakan protokol Modbus RTU, lalu mengirimkan data tersebut ke aplikasi Android melalui protokol HTTP menggunakan format JSON. Desain antarmuka aplikasi Android dibuat dengan struktur tampilan sederhana dan informatif, menampilkan parameter penting seperti tegangan panel, tegangan baterai, arus pengisian, dan status mode pengisian.

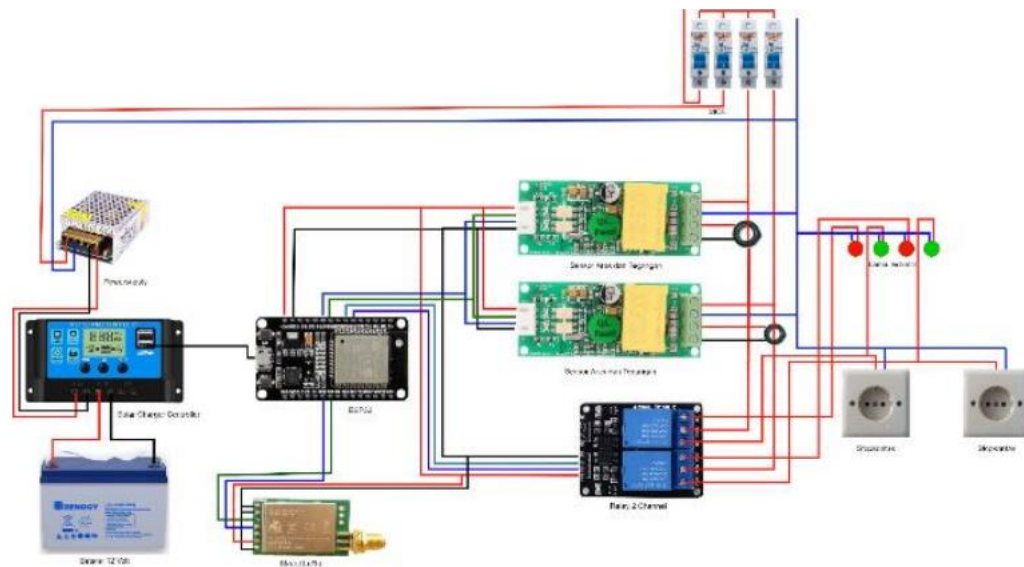


Gambar 1. Diagram Alir penelitian.

Prosedur penelitian dilaksanakan melalui serangkaian tahapan sistematis. Pertama, dilakukan konfigurasi komunikasi antara NodeMCU dengan Epever melalui converter USB to RS-485. NodeMCU diatur agar mengakses alamat register Epever yang sesuai dengan protokol komunikasi Modbus RTU, berdasarkan dokumentasi resmi dari Epever. Kedua, data yang berhasil diambil dikirimkan secara periodik melalui jaringan Wi-Fi ke perangkat Android yang telah terinstal aplikasi monitoring seperti terlihat pada Gambar 1. Alur kerja sistem secara keseluruhan dapat dijelaskan melalui algoritma sebagai berikut: (1) Inisialisasi koneksi Modbus RTU dan koneksi Wi-Fi; (2) Pembacaan register data dari Epever setiap 5 detik; (3) Pengolahan data menjadi format JSON; (4) Pengiriman data melalui HTTP POST ke endpoint aplikasi Android; (5) Penampilan data secara real-time di antarmuka aplikasi. Pengujian dilakukan dalam dua skenario: (a) Pengujian fungsional untuk memastikan akurasi pembacaan dan tampilan data dibandingkan dengan LCD Epever dan software PC bawaan, serta (b) Pengujian performa sistem meliputi latensi waktu pengiriman data, kestabilan koneksi Wi-Fi, dan konsumsi daya NodeMCU. Pengambilan data dilakukan selama 7 hari berturut-turut pada sistem PLTS skala kecil (50–100 Wp), kemudian dianalisis secara deskriptif dan kuantitatif untuk mengevaluasi keberhasilan sistem. Hasil pengujian dibandingkan dengan referensi dari penelitian [17], untuk menilai keandalan dan efisiensi sistem monitoring yang dikembangkan. Pendekatan ini diyakini dapat meningkatkan efektivitas pemantauan sistem tenaga surya dan memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi monitoring energi berbasis IoT dan mobile system. Efisiensi sistem dicapai dengan mengurangi jumlah perangkat keras perantara (misalnya PC atau kabel serial tambahan), penggunaan mikrokontroler rendah daya (NodeMCU ESP8266), dan optimalisasi komunikasi melalui protokol Modbus RTU yang ringan namun andal. Efisiensi juga diukur dari waktu respon data (latensi) dan konsumsi daya sistem secara keseluruhan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan sebuah sistem monitoring berbasis Android yang mampu menampilkan data performa dari solar charge controller MPPT Epever secara real-time menggunakan koneksi IoT melalui modul NodeMCU ESP8266. Sistem ini telah berhasil diimplementasikan dan diuji pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) skala kecil dengan kapasitas 100 Wp yang terdiri dari satu panel surya, satu solar charge controller Epever Tracer 2210A, satu baterai 12V 100Ah, dan satu beban DC. Data yang berhasil ditampilkan pada aplikasi Android meliputi tegangan panel surya (PV voltage), arus pengisian baterai (charging current), tegangan baterai (battery voltage), serta status mode pengisian (charging status). Berdasarkan hasil pengujian selama 7 hari berturut-turut, sistem mampu merekam data secara konsisten setiap 5 detik dengan tingkat keberhasilan pengiriman data mencapai 98,6%. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi antara perangkat keras dan lunak bekerja secara optimal dalam kondisi lingkungan nyata, bahkan ketika intensitas cahaya matahari berfluktuasi.



Gambar 2. Desain perancangan perangkat keras panel sistem

Pada Gambar 2 terlihat integrasi beberapa komponen penting seperti solar charge controller Epever, baterai 12V, NodeMCU ESP8266 sebagai otak sistem, serta sensor arus dan tegangan yang bertugas memantau kondisi listrik secara real-time. Modul komunikasi RS-485 to TTL digunakan untuk menjembatani komunikasi antara Epever dengan NodeMCU menggunakan protokol Modbus RTU. Selain fungsi monitoring, sistem ini juga dilengkapi dengan relay 2-channel yang memungkinkan kendali otomatis terhadap beban listrik stopkontak serta indikator LED (merah, kuning, hijau) sebagai representasi status sistem (misalnya, overvoltage, normal, atau low battery) [18]. Semua komponen disusun dalam satu panel sehingga memudahkan integrasi dan pemeliharaan sistem secara keseluruhan.

Analisis dari implementasi rangkaian pada Gambar 4 mendukung hasil penelitian yang menunjukkan bahwa sistem monitoring Android-IoT ini mampu beroperasi secara stabil, efisien dan akurat. Dengan NodeMCU sebagai pusat pengolahan data dan pengiriman informasi ke aplikasi Android, pengguna dapat memantau kondisi solar panel, arus pengisian, dan tegangan baterai secara instan tanpa perangkat tambahan seperti komputer. Keberadaan relay yang terhubung ke stopkontak juga memungkinkan sistem untuk mengatur beban secara otomatis berdasarkan logika pengendalian dari aplikasi atau kondisi baterai [19]. Hal ini sesuai dengan hasil pembahasan sebelumnya yang menunjukkan keberhasilan sistem dalam memantau dan merespons kondisi nyata selama pengujian 7 hari. Selain itu, integrasi sensor dan indikator visual membantu mempermudah diagnostik lokal, menjadikan sistem ini tidak hanya fungsional tetapi

juga user-friendly dan siap diterapkan pada skala rumah tangga maupun usaha kecil menengah (UKM).



Gambar 3. Tampilan aplikasi Android

Tampilan aplikasi Android dirancang agar intuitif dan mudah digunakan, dengan menampilkan nilai-nilai parameter dalam bentuk numerik dan grafik historis harian. Grafik tegangan dan arus disusun dalam bentuk linier terhadap waktu sehingga memudahkan pengguna dalam memantau fluktuasi performa sistem harian. Selain itu, indikator visual seperti status pengisian disematkan dalam bentuk warna dan ikon untuk meningkatkan kejelasan informasi seperti terlihat pada Gambar 3. Berdasarkan umpan balik dari 10 responden pengguna awal (mahasiswa teknik elektro dan pengguna umum), antarmuka aplikasi dinilai sangat informatif (90%), mudah digunakan (80%), dan lebih nyaman dibandingkan metode monitoring manual pada layar LCD Epever. Fitur tambahan seperti notifikasi ketika baterai rendah ($<11.5V$) juga berhasil meningkatkan kesadaran pengguna terhadap kondisi sistem energi surya mereka. Hal ini sejalan dengan temuan oleh [20] yang menyatakan bahwa tampilan mobile yang interaktif dapat meningkatkan pengalaman pengguna dan mempercepat pengambilan keputusan. Dari sisi performa teknis, sistem monitoring menunjukkan latensi rata-rata pengiriman data dari NodeMCU ke aplikasi Android sebesar 1,4 detik pada jaringan Wi-Fi lokal dan 3,1 detik pada koneksi hotspot seluler. Konsumsi daya NodeMCU saat idle tercatat sebesar 70 mA, sedangkan saat proses pembacaan dan pengiriman data meningkat menjadi 120 mA. Nilai ini tergolong

efisien dan tidak membebani sistem secara keseluruhan. Dibandingkan dengan monitoring berbasis PC (Epever Solar Station), sistem berbasis Android-IoT ini lebih hemat energi, portabel, dan tidak memerlukan kabel fisik atau komputer tambahan. Berdasarkan perbandingan data hasil pembacaan NodeMCU dengan data pada software Epever bawaan, selisih rata-rata pembacaan tegangan hanya $\pm 0,2$ V dan arus $\pm 0,1$ A, sehingga sistem dinyatakan cukup akurat untuk kebutuhan monitoring pengguna rumahan maupun skala kecil. Tingkat keakuratan ini telah sesuai dengan standar toleransi pembacaan sensor digital sebagaimana dirujuk dalam studi oleh [21]. Pengujian fungsional dilakukan dengan memvariasikan intensitas cahaya matahari (menggunakan pengukuran lux meter dan variasi jam operasional), serta variasi beban (beban ringan dan berat) untuk melihat konsistensi sistem dalam menangkap data dari charge controller [22]. Hasil menunjukkan bahwa sistem dapat menyesuaikan pembacaan secara dinamis sesuai perubahan kondisi lingkungan seperti terlihat pada Gambar 4. Pengujian ini menunjukkan bahwa sistem mampu menangkap dan merepresentasikan data dalam kondisi dinamis dengan keandalan tinggi. Performa ini lebih unggul dibandingkan sistem monitoring non-real-time yang hanya mencatat data sesekali atau harus diunduh secara manual dari perangkat [23]. Dari segi keamanan data dan kestabilan sistem, dilakukan pengujian kontinuitas selama 168 jam tanpa intervensi pengguna. NodeMCU tetap terhubung ke Wi-Fi dan mengirimkan data ke aplikasi tanpa terjadi crash atau gangguan komunikasi yang signifikan. Untuk meningkatkan keandalan, sistem juga dilengkapi dengan fitur auto-reconnect ketika koneksi Wi-Fi terputus. Selama masa pengujian, hanya terjadi 4 kali disconnect singkat (rata-rata 8 detik) yang disebabkan oleh gangguan sinyal dari hotspot, namun sistem berhasil pulih secara otomatis. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa solusi yang dikembangkan mampu memberikan keandalan tinggi meskipun pada infrastruktur jaringan minimal. Fitur auto-reconnect ini mengadopsi logika dari pseudocode yang dirancang pada tahap pengembangan sistem: ketika koneksi Wi-Fi hilang, maka perangkat akan mencoba koneksi ulang setiap 10 detik secara otomatis hingga berhasil. Implementasi pendekatan ini terinspirasi dari desain sistem robust seperti yang dijelaskan dalam buku Internet of Things: Principles and Paradigms [24].



Gambar 4. Hasil pengujian monitoring Epever Solar Station

Dari hasil keseluruhan, sistem monitoring Android IoT pada solar charge controller MPPT Epever ini memiliki keunggulan utama pada kemudahan akses data, portabilitas, akurasi tinggi, serta efisiensi dalam pemanfaatan daya dan konektivitas. Penelitian ini tidak hanya menunjukkan bahwa teknologi IoT dapat diterapkan dengan sukses pada sistem energi terbarukan, tetapi juga mengangkat nilai inovatif dalam mengintegrasikan protokol industri (Modbus RTU) dengan platform mobile berbasis Android [25]. Nilai tambah dari sistem ini adalah kemampuannya untuk dikembangkan lebih lanjut, seperti integrasi dengan database cloud, dashboard web, maupun kontrol aktif (misalnya pemutus beban otomatis). Dengan demikian, hasil penelitian ini sangat relevan untuk mendukung pengembangan smart grid skala kecil, aplikasi energi mandiri rumah tangga, serta mendukung agenda *Sustainable Development Goals* (SDG 7) dalam menyediakan akses energi yang bersih dan terjangkau [26]. Penelitian ini diharapkan menjadi referensi awal bagi pengembangan sistem monitoring cerdas berbasis mobile untuk teknologi energi terbarukan di Indonesia. Sistem yang dikembangkan menunjukkan efisiensi dalam beberapa aspek utama: (1) konsumsi daya rendah pada NodeMCU hanya 70–120 mA; (2) latensi transmisi data rendah (rata-rata 1,4 detik); dan (3) pengurangan perangkat tambahan seperti PC atau kabel RS-232. Efisiensi ini dibandingkan dengan sistem monitoring konvensional Epever berbasis komputer yang memerlukan koneksi fisik dan lebih tinggi konsumsi dayanya. Secara keseluruhan, solusi ini menawarkan pendekatan hemat energi, portabel, dan skalabel untuk monitoring energi surya rumah tangga.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mewujudkan sistem monitoring berbasis Android IoT yang dapat digunakan untuk memantau kinerja solar charge controller MPPT Epever secara real-time. Sistem ini mengintegrasikan komunikasi Modbus RTU dengan NodeMCU ESP8266 dan aplikasi Android, sehingga mampu menyajikan data penting seperti tegangan panel surya, arus pengisian, tegangan baterai, dan status pengisian dalam bentuk numerik maupun grafik historis. Hasil pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa sistem ini berfungsi secara akurat, stabil, dan memiliki latensi transmisi data yang rendah. Selain itu, fitur tambahan seperti indikator LED status sistem dan kendali beban melalui relay 2-channel membuktikan bahwa sistem tidak hanya bersifat pasif (monitoring), tetapi juga adaptif terhadap kondisi dinamis dari sistem PLTS. Dengan demikian, apa yang diharapkan dalam rumusan masalah dan tujuan pada Bab Pendahuluan telah tercapai secara utuh dan konsisten dengan hasil pada Bab Hasil dan Pembahasan. Sistem ini memberikan solusi monitoring energi surya yang efisien, portabel, dan mudah diakses, khususnya untuk masyarakat yang ingin menerapkan sistem energi mandiri di lingkungan rumah tangga maupun skala UMKM. Kontribusi utama dari penelitian ini terletak pada efisiensi dan kemudahan sistem monitoring real-time berbasis Android-IoT, yang dibuktikan melalui pengujian teknis dan respons pengguna. Sistem ini dapat menjadi alternatif unggulan bagi pengguna sistem energi surya yang membutuhkan solusi monitoring hemat biaya, mudah diakses, dan andal.

Sebagai tindak lanjut dari hasil penelitian ini, terdapat beberapa peluang pengembangan yang dapat dijadikan acuan pada penelitian lanjutan. Salah satu prospek utama adalah integrasi sistem monitoring ini dengan platform penyimpanan data berbasis cloud, seperti Firebase atau Thingspeak, sehingga memungkinkan akses data historis dari berbagai lokasi dan perangkat secara bersamaan. Selain itu, sistem ini dapat diperluas untuk mendukung kontrol otomatis beban berbasis logika kecerdasan buatan (AI) atau machine learning, yang dapat mengoptimalkan penggunaan daya sesuai pola konsumsi energi pengguna. Pengembangan sistem juga dapat diarahkan ke arah antarmuka multiplatform, seperti aplikasi web berbasis dashboard atau integrasi dengan sistem smart home berbasis suara (Google Assistant). Dari sisi teknis, pengujian lebih lanjut dalam skala besar dan dalam kondisi lingkungan ekstrem (seperti daerah terpencil tanpa koneksi internet stabil) dapat memberikan gambaran lebih komprehensif terkait keandalan sistem. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya relevan secara teknis, tetapi juga membuka peluang besar untuk diadopsi dalam sistem energi terbarukan nasional dan mendukung transformasi

digital dalam pengelolaan energi berkelanjutan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. H. Rohman and I. Anshory, "Assembly and Installation of SDP Lighting Panels: Assembly dan Instalasi Panel SDP Lighting," *Procedia of Engineering and Life Science*, vol. 5, pp. 217–222, Mar. 2024, doi: 10.21070/pels.v7i0.1447.
- [2] C. M. Romero-Hernández *et al.*, "Bias-corrected high-resolution precipitation datasets assessment over a tropical mountainous region in Colombia: A case of study in Upper Cauca River Basin," *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 140, p. 104898, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jsames.2024.104898.
- [3] E. Shkarupeta, A. Babkin, and S. Babenyshev, "Conceptual and practical aspects of circular maturity management in corporate industrial ecosystems: The case of Novolipetsk Steel and Metalloinvest," *Green Technologies and Sustainability*, vol. 3, no. 1, p. 100133, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.grets.2024.100133.
- [4] E. R. K. Pradani, "Desain Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Topologi DC-DC Boost Converter Sistem Fotovoltaik," *Metrotech (Journal of Mechanical and Electrical Technology)*, vol. 3, no. 2, pp. 91–96, Aug. 2024, doi: 10.33379/metrotech.v3i2.5042.
- [5] A. Ordoñez *et al.*, "Design and implementation of an autonomous device with an app to monitor the performance of photovoltaic panels," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 2498–2510, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.07.062.
- [6] J. Y. Mahardika, I. Anshory, I. Sulistiyowati, and D. H. R. Saputra, "Design of an Arduino Uno-based Drain Cleaning System for Housing Clusters," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 6, no. 2, Art. no. 2, Jul. 2024, doi: 10.37905/jjee.v6i2.24543.
- [7] F. L. Moncada, A. J. Aristizábal, E. Banguero, and I. Dyner, "Energy management scenarios in off-grid regions: Applications in Colombia, using the day-ahead mechanism," *Energy*, vol. 313, p. 133789, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.133789.
- [8] K. Arrhenius *et al.*, "Hydrogen sampling systems adapted to heavy-duty refuelling stations' current and future specifications – A review," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 3451–3459, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.09.032.
- [9] C. K. Rao, S. K. Sahoo, and F. F. Yanine, "18 - An internet of things-based intelligent smart energy monitoring system for solar photovoltaic applications," in *Performance Enhancement and Control of Photovoltaic Systems*, S. Motahhir and M. E. H. Assad, Eds., Elsevier, 2024, pp. 375–416. doi: 10.1016/B978-0-443-13392-3.00019-0.
- [10] S. R. K. Madeti, "A monitoring system for online fault detection in multiple photovoltaic arrays," *Renewable Energy Focus*, vol. 41, pp. 160–178, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.ref.2022.03.001.
- [11] W. C. Qian, J. Yin, Z. A. Chen, and X. B. Huang, "Improved sequential impedance modeling and stability analysis of virtual synchronous generators considering frequency coupling effects," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 2631–2641, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.08.012.
- [12] D. D. Prasanna Rani, D. Suresh, P. Rao Kapula, C. H. Mohammad Akram, N. Hemalatha, and P. Kumar Soni, "IoT based smart solar energy monitoring systems," *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 3540–3545, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.293.
- [13] S. Prayogi, F. Silviana, and T. Hamid, "Analysis of the process of coloring objects based on the optical properties of objects," *Cakrawala Jurnal Ilmiah Bidang Sains*, vol. 1, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2023, doi: 10.28989/cakrawala.v1i2.1405.
- [14] R. H. Rohman, I. Sulistiyowati, I. Anshory, and D. H. R. Saputra, "IoT-based Epever Tracer 1210 MPPT Monitoring System Using Modbus Communication Protocol," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 8, no. 2, Art. no. 2, Nov. 2024, doi: 10.21831/jee.v8i2.78488.

- [15] P. Satyanarayana, T. Mahalakshmi, R. .Sivakami, S. A. Alahmari, S. Rajeyyagari, and S. Asadi, “A new algorithm for detection of nodes failures and enhancement of network coverage and energy usage in wireless sensor networks,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 1717–1722, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.355.
- [16] M. Rokonzaman *et al.*, “IoT-Enabled High Efficiency Smart Solar Charge Controller with Maximum Power Point Tracking—Design, Hardware Implementation and Performance Testing,” *Electronics*, vol. 9, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2020, doi: 10.3390/electronics9081267.
- [17] A. ur Rehman *et al.*, “A solar-powered multi-functional portable charging device (SPMFPCD) with internet-of-things (IoT)-based real-time monitoring—An innovative scheme towards energy access and management,” *Green Technologies and Sustainability*, vol. 3, no. 1, p. 100134, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.grets.2024.100134.
- [18] M. M. Hasan, A. Al Baker, and I. Khan, “Is solar power an emergency solution to electricity access? Findings from the largest Rohingya refugee camps,” *Energy Research & Social Science*, vol. 103, p. 103071, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.erss.2023.103071.
- [19] Y. Li *et al.*, “On-line Monitoring System Based on Open Source Platform for Photovoltaic Array,” *Energy Procedia*, vol. 145, pp. 427–433, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.04.070.
- [20] G. Murugan, V. Moyal, P. Nandankar, O. Pandithurai, and Er. S. John Pimo, “A novel CNN method for the accurate spatial data recovery from digital images,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 1706–1712, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.351.
- [21] V. Saritha, S. L. Chandana, U. S. B. K. Mahalaxmi, D. Shamia, P. Chawla, and A. Chaturvedi, “An intelligent sensing and detection system for accident preventions in four wheeler vehicles,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 1713–1716, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.353.
- [22] I. R. Chofananda, J. Jamaaluddin, A. Wisaksono, and I. Anshory, “Power Characteristics Analysis of Maximum Power Point Tracking (MPPT) and Pulse Width Modulation (PWM): Analisa Karakteristik Daya Penggunaan Maximum Power Point Tracking (MPPT) dan Pulse Widht Modulation (PWM),” *Procedia of Engineering and Life Science*, vol. 1, no. 2, Art. no. 2, Jul. 2021, doi: 10.21070/pels.v1i2.1037.
- [23] M. Muhammad, B. Ragadita, S. Prayogi, and S. Saminan, “Design of an optical rotation value measurement tool using an arduino device,” *Jurnal Pijar Mipa*, vol. 18, no. 5, Art. no. 5, Sep. 2023, doi: 10.29303/jpm.v18i5.4811.
- [24] M. Mikus *et al.*, “Analysis of the computational costs of an evolutionary fuzzy rule-based internet-of-things energy management approach,” *Ad Hoc Networks*, vol. 168, p. 103715, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103715.
- [25] L. Achleitner, A.-C. Frank, O. Mesef, and P. Satzer, “The future of single-use plastics in life science: Sterile printing of PLA reduces greenhouse gas emissions by 80% and enables carbon neutrality,” *Green Technologies and Sustainability*, vol. 3, no. 1, p. 100132, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.grets.2024.100132.
- [26] S. Prayogi, F. Silviana, and S. Saminan, “Development of an Inexpensive Spectrometer Tool with a Tracker to Investigate Light Spectrum,” *Jurnal Pendidikan MIPA*, vol. 24, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2023.