

Rancang Bangun Sistem Pengisian Daya Nirkabel Portabel Tenaga Surya dengan Monitoring Berbasis IoT (*Blynk*)

Bima Taruna Praja¹, Mahendra Widyartono², Widi Aribowo³, Fithrotul Irda Amaliah²

^{1,2,3,4}Sarjana Terapan Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya

Article Info

Article history:

Diterima 24 Juli 2026

Direvisi 28 Juli 2026

Diterbitkan 30 Juli 2026

Keywords:

Panel Surya

Wireless Charging

ESP32

Internet of Things (IoT)

Coulomb Counting.

ABSTRAK

Perkembangan penggunaan *smartphone* meningkatkan kebutuhan akan sistem pengisian daya yang praktis, portabel, dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem pengisian daya nirkabel portabel berbasis tenaga surya yang dilengkapi *monitoring* berbasis *Internet of Things* (IoT). Metode penelitian yang digunakan adalah *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan *prototyping*. Sistem terdiri atas dua panel surya monokristalin 20 Wp, *Solar Charge Controller* (SCC), baterai LiFePO₄ 12 V 20 Ah, modul USB *charging*, modul *wireless charging* Qi 15 W, ESP32, dua sensor INA226, layar OLED, dan aplikasi Blynk. Sensor INA226 digunakan untuk mengukur tegangan, arus, daya, energi, serta menghitung *State of Charge* (SoC) menggunakan metode *Coulomb Counting*. Pengujian meliputi USB *charging*, *wireless charging*, ketahanan baterai, pengisian baterai menggunakan panel surya, dan akurasi sensor INA226. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengisi daya *smartphone* melalui USB dengan durasi rata-rata 1 jam 45 menit dan *energy out* 16,06 Wh, sedangkan melalui *wireless charging* diperoleh durasi rata-rata 3 jam 14 menit dengan *energy out* 21,22 Wh. Pengujian ketahanan baterai menunjukkan sistem mampu menyuplai beban selama 13 jam 16 menit dengan total *energy out* 238,88 Wh, sedangkan pengisian menggunakan panel surya berhasil mengisi baterai hingga penuh dengan durasi 17 jam 54 menit dan total *energy in* 256,28 Wh. Hasil pengujian akurasi INA226 menunjukkan rata-rata *error* tegangan dan arus masing-masing sebesar 0,42% dan 1,29% pada sisi pengisian panel surya serta 0,32% dan 0,67% pada sisi beban. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem bekerja sesuai perancangan dan mampu melakukan *monitoring* parameter kelistrikan secara *real-time* dengan tingkat akurasi yang baik.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Bima Taruna Praja

Program Studi Sarjana Terapan Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia.

Email: bima.22045@mhs.unesa.ac.id

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi telah menjadikan *smartphone* sebagai perangkat yang tidak terpisahkan dari aktivitas sehari-hari. Sebagai perangkat elektronik portabel, *smartphone* memerlukan suplai energi listrik yang tersimpan dalam baterai agar dapat beroperasi secara optimal. Pengisian daya umumnya masih dilakukan menggunakan kabel (*wired charging*) yang terhubung ke sumber listrik. Namun, metode ini memiliki beberapa keterbatasan, seperti kerusakan konektor atau kabel pengisi daya, mobilitas yang rendah,

serta ketergantungan terhadap ketersediaan sumber listrik, sehingga dapat mengurangi kenyamanan pengguna [1].

Salah satu solusi yang berkembang untuk mengatasi keterbatasan tersebut adalah teknologi pengisian daya nirkabel (*wireless charging*), metode transfer energi listrik tanpa menggunakan kabel sebagai media penghantar. Teknologi ini menawarkan kemudahan penggunaan, meningkatkan fleksibilitas, serta mengurangi risiko kerusakan konektor maupun hubungan arus pendek (*short circuit*).

Perkembangan teknologi *wireless charging* juga telah diadopsi oleh berbagai produsen *smartphone*, seperti Samsung dan Apple, sehingga menjadi salah satu fitur yang semakin umum digunakan pada perangkat bergerak [4]. Namun demikian, sebagian besar perangkat *wireless charger* yang tersedia masih bergantung pada sumber listrik PLN, sehingga kurang sesuai digunakan pada kondisi luar ruangan atau daerah yang belum memiliki akses listrik.

Pemanfaatan energi terbarukan energi surya, menjadi salah satu alternatif untuk mendukung sistem pengisian daya yang lebih mandiri dan ramah lingkungan. Panel surya (*photovoltaic*) mampu mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik tanpa menghasilkan emisi gas rumah kaca selama proses konversi. Selain ramah lingkungan, energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang melimpah dan saat ini menempati peringkat ketiga sebagai sumber energi terbarukan yang paling banyak dimanfaatkan di dunia setelah tenaga air dan tenaga angin [5] [6] [7] [8] [9] [10]. Oleh karena itu, panel surya memiliki potensi besar untuk diterapkan sebagai sumber energi utama pada sistem pengisian daya portabel.

Sistem pengisian daya berbasis tenaga surya dapat beroperasi secara optimal dengan melakukan pemantauan terhadap parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya, energi, dan kapasitas baterai SoC. *Monitoring* secara *real-time* berperan penting dalam menjaga stabilitas sistem, mencegah *over-discharge*, *overload*, serta memperpanjang umur pakai baterai. Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan proses *monitoring* dilakukan secara jarak jauh melalui jaringan internet. Dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32 yang telah dilengkapi modul Wi-Fi, data hasil pengukuran dapat dikirimkan dan ditampilkan secara *real-time* melalui aplikasi pada *smartphone* maupun komputer [11], [12], [13].

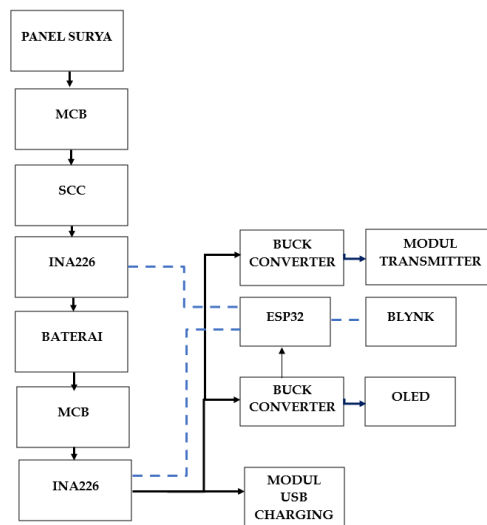
Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem pengisian daya berbasis panel surya, sistem *wireless charging*, maupun sistem *monitoring* berbasis IoT. Namun, penelitian yang mengintegrasikan ketiga teknologi tersebut ke dalam satu sistem pengisian daya portabel yang dilengkapi pemantauan parameter kelistrikan serta estimasi SoC secara *real-time* masih terbatas. Selain itu, pengujian yang mencakup kinerja pengisian daya melalui port USB dan *wireless charging*, ketahanan baterai, proses pengisian ulang menggunakan panel surya, serta evaluasi akurasi sistem *monitoring* masih belum banyak dilakukan secara komprehensif.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini merancang dan membangun sistem pengisian daya nirkabel portabel berbasis tenaga surya yang dilengkapi dengan *monitoring* berbasis *Internet of Things* menggunakan platform Blynk. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini merancang dan membangun sistem pengisian daya nirkabel portabel berbasis tenaga surya yang dilengkapi dengan *monitoring* berbasis *Internet of Things* menggunakan platform Blynk. Sistem ini mampu mengukur parameter daya serta memperkirakan kapasitas baterai (SoC) melalui metode *Coulomb Counting*. Alat yang dikembangkan bersifat mudah dibawa, ramah lingkungan, efisien, dan aman, serta dapat diawasi secara langsung melalui tampilan OLED dan aplikasi Blynk. Dengan demikian, sistem ini diharapkan dapat mendukung kebutuhan pengisian daya *smartphone* yang portabel, cerdas, dan informatif.

2. METODA

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *Research and Development* (R&D) [14] dengan pendekatan *prototyping* untuk merancang dan mengembangkan sistem pengisian daya nirkabel portabel berbasis tenaga surya yang dilengkapi *monitoring* berbasis *Internet of Things* (IoT) melalui proses yang terstruktur. Pendekatan *prototyping* tidak hanya menekankan pada kajian teoritis, tetapi secara esensial melibatkan serangkaian kegiatan perancangan, implementasi, pengujian, dan evaluasi langsung hingga terbentuknya *prototype* sistem yang kinerjanya dapat diukur dan dianalisis secara empiris.

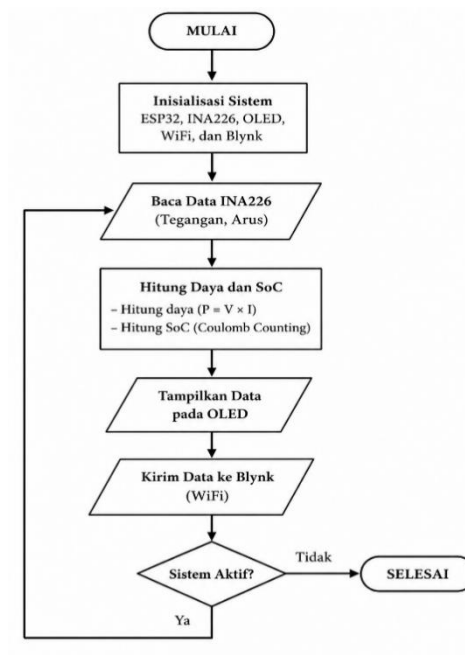
2.1 Perancangan sistem



Gambar 1 Diagram Blok Sistem

Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem pengisian daya nirkabel portabel tenaga surya. Energi listrik dari panel surya dialirkan melalui MCB sebagai pengaman menuju *Solar Charge Controller* (SCC) untuk mengatur proses pengisian baterai LiFePO₄. Selanjutnya, sensor INA226 pada sisi pengisian digunakan untuk mengukur tegangan, arus, dan daya selama proses pengisian baterai. Energi yang tersimpan pada baterai kemudian disalurkan melalui MCB dan sensor INA226 pada sisi beban untuk memantau parameter kelistrikan saat proses pengosongan baterai. Keluaran baterai didistribusikan ke modul USB *charging*, *buck converter* sebagai penurun tegangan, serta modul transmitter untuk pengisian daya nirkabel. Data hasil pengukuran dari kedua sensor INA226 diproses oleh ESP32, kemudian ditampilkan secara *real-time* pada aplikasi Blynk dan OLED.

2.2 Flowchart sistem



Gambar 2 Flowchart Sistem

Gambar 1.2 menunjukkan flowchart sistem *monitoring* yang dijalankan oleh ESP32. Proses diawali dengan inisialisasi perangkat, meliputi ESP32, sensor INA226, OLED, koneksi Wi-Fi, dan aplikasi Blynk. Setelah inisialisasi berhasil, ESP32 membaca data tegangan dan arus dari sensor INA226, kemudian menghitung nilai daya menggunakan persamaan $P = V \times I$. Selanjutnya untuk menghitung SoC menggunakan metode *Coulomb Counting*. Hasil perhitungan ditampilkan pada OLED dan dikirim ke aplikasi Blynk melalui jaringan Wi-Fi untuk pemantauan secara *real-time*. Selama sistem masih aktif, proses pembacaan sensor, perhitungan, dan pengiriman data dilakukan secara berulang, sedangkan apabila sistem tidak aktif maka proses berakhir.

2.3 Perancangan komponen

Tahap awal perancangan adalah menghitung kebutuhan energi beban berdasarkan jumlah peralatan, daya masing-masing peralatan, dan lama waktu penggunaannya. Perhitungan ini menghasilkan total kebutuhan energi dalam satuan *Watt-hour* (Wh), yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan kapasitas panel surya dan baterai [15]. Persamaan kebutuhan energi beban ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$\text{Beban pemakaian} = (\text{jumlah beban} \times \text{daya beban}) \times \text{lama pemakaian beban} \quad (1)$$

Setelah kebutuhan energi harian diperoleh, kapasitas panel surya ditentukan berdasarkan nilai *Peak Sun Hour* (PSH). Pada penelitian ini digunakan nilai PSH sebesar 5 jam per hari, sehingga kapasitas panel surya ditentukan berdasarkan perbandingan antara kebutuhan energi beban dengan lama penyinaran efektif matahari (PSH) [16]. Perhitungan kapasitas panel surya ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$\text{Panel surya (Wp)} = \text{watt hour} : 5 \text{ jam} \quad (2)$$

Kapasitas baterai ditentukan berdasarkan kebutuhan energi harian dengan mempertimbangkan faktor keamanan (*safety factor*) sebesar 1,5 untuk menjaga umur pakai baterai dan mengantisipasi rugi-rugi sistem [17]. Perhitungan kapasitas baterai ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$\text{Faktor keamanan} = \frac{\text{faktor keamanan} \times \text{daya total sistem}}{\text{tegangan nominal baterai}} \quad (3)$$

Kapasitas SCC ditentukan berdasarkan arus hubung singkat (*short-circuit current*, I_{sc}) panel surya. Nilai tersebut digunakan untuk menentukan rating arus minimum SCC sesuai jumlah panel yang digunakan dalam sistem [18]. Perhitungan kapasitas SCC ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$\text{SCC (A)} = I_{sc} \times \text{jumlah panel surya} \quad (4)$$

Untuk memantau kapasitas baterai secara *real-time*, penelitian ini menerapkan metode *Coulomb Counting* dalam perhitungan *State of Charge* (SoC). Metode ini dipilih karena memiliki implementasi yang sederhana dan mampu memperkirakan SoC berdasarkan akumulasi arus pengisian maupun pengosongan baterai terhadap waktu [19]. Penelitian ini menggunakan baterai LiFePO4 dengan kapasitas 20 Ah. Nilai SoC awal ditetapkan sebesar 100% sebelum pengujian. Metode *Coulomb counting* bekerja dengan menghitung nilai arus listrik yang mengalir dari atau ke baterai dalam jangka waktu tertentu, kemudian menjumlahkannya melalui proses integrasi. Perhitungan SoC ditunjukkan pada Persamaan (5).

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t_0) + \frac{1}{Ah} \int_{t_0}^t I dt \times 100 \quad (5)$$

dengan:

- $\text{SOC}(t)$ = nilai *State of Charge* pada waktu t (%);
- $\text{SOC}(t_0)$ = nilai SoC awal (%);
- Ah = kapasitas nominal baterai (20 Ah);
- I = arus baterai (A);
- t = waktu pengukuran (jam).

Pada penelitian ini digunakan baterai LiFePO₄ 12,8 V berkapasitas nominal 20 Ah, sehingga nilai kapasitas baterai pada perhitungan Coulomb Counting ditetapkan sebesar 20 Ah. Nilai *State of Charge* (SoC) awal diperoleh dari kondisi baterai sebelum sistem dioperasikan dan digunakan sebagai kondisi awal dalam proses estimasi SoC.

Pembacaan data tegangan dan arus dilakukan secara kontinu menggunakan sensor INA226 yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32. Sensor dibaca setiap 1 detik sehingga perubahan arus pengisian maupun arus beban dapat dipantau secara berkala. Setiap hasil pembacaan sensor langsung diproses oleh ESP32 untuk menghitung perubahan kapasitas baterai menggunakan metode Coulomb Counting.

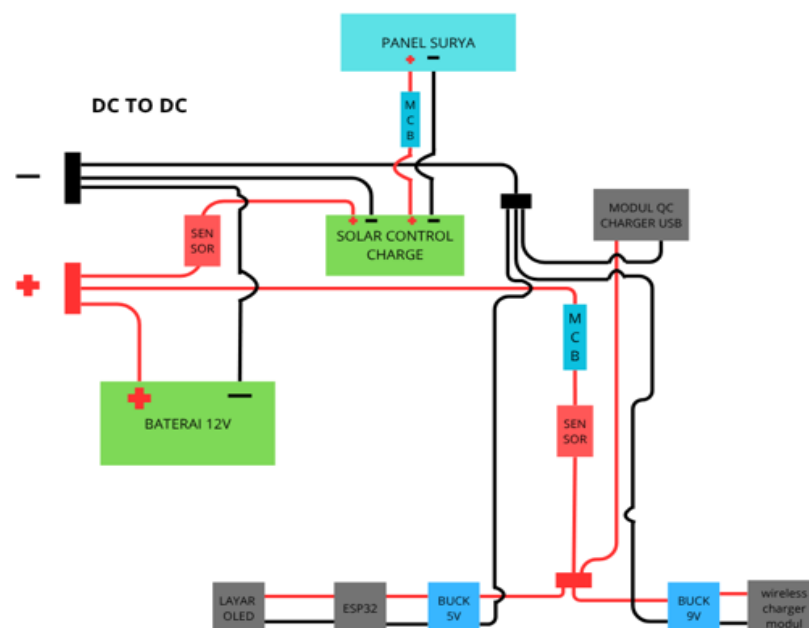
Pada penelitian ini, proses estimasi SoC dilakukan dengan mengasumsikan efisiensi Coulomb baterai sebesar 100% ($\eta = 1$), sehingga seluruh arus hasil pengukuran sensor INA226 dianggap berkontribusi terhadap perubahan kapasitas baterai. Asumsi ini digunakan karena penelitian berfokus pada implementasi sistem monitoring berbasis ESP32 dan evaluasi kinerja perangkat, sehingga rugi-rugi internal baterai tidak dimasukkan ke dalam model perhitungan.

Implementasi metode Coulomb Counting pada ESP32 dilakukan dengan menghitung perubahan kapasitas baterai berdasarkan arus pengisian dan arus beban yang dibaca oleh sensor INA226. Nilai kapasitas baterai yang telah digunakan (*usedAh*) akan bertambah ketika baterai menyuplai beban dan berkurang ketika baterai menerima arus pengisian. Selanjutnya, ESP32 memperbarui nilai SoC berdasarkan kapasitas baterai yang tersisa. Untuk menjaga kontinuitas data, nilai SoC dan *usedAh* disimpan ke memori *Preferences* (*Non-Volatile Storage/NVS*) apabila terjadi perubahan nilai SoC.

Data hasil pembacaan sensor yang digunakan sebagai data penelitian direkam menggunakan interval pengambilan data yang disesuaikan dengan karakteristik masing-masing skenario pengujian. Pada pengujian charging panel surya, data direkam setiap 10 detik untuk memperoleh perubahan parameter pengisian yang dipengaruhi oleh fluktuasi intensitas radiasi matahari. Sementara itu, pada pengujian jalur beban (*discharging*), data direkam setiap 60 detik karena perubahan kondisi baterai berlangsung lebih lambat dibandingkan proses pengisian. Data yang telah direkam pada interval tersebut digunakan sebagai dasar analisis kinerja sistem, sedangkan proses perhitungan SoC tetap dilakukan secara kontinu oleh ESP32 berdasarkan hasil pembacaan sensor setiap 1 detik.

Dengan mekanisme tersebut, nilai SoC tetap tersimpan meskipun sistem mengalami *restart* atau kehilangan catu daya. Saat sistem dihidupkan kembali, ESP32 membaca kembali nilai SoC dan *usedAh* dari memori *Preferences* sebagai kondisi awal sebelum melanjutkan proses perhitungan berikutnya. Setelah diperbarui, nilai SoC ditampilkan pada OLED dan dikirimkan ke aplikasi Blynk untuk pemantauan secara *real-time*.

2.4 Skema Hardware Sistem



Gambar 3. Skema Hardware Sistem

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perancangan Hardware

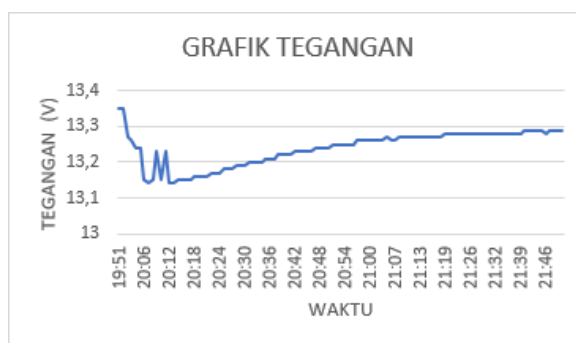
Gambar 44 merupakan hasil hardware sistem. Box dirancang untuk menempatkan panel surya pada bagian atas, sedangkan komponen seperti SCC, baterai LiFePO₄, ESP32, sensor INA226, *buck converter*, modul *wireless charging*, serta komponen pendukung lainnya ditempatkan pada bagian dalam box. Tata letak komponen disusun agar memudahkan proses instalasi, perawatan, dan meminimalkan panjang jalur kabel sehingga rugi-rugi daya dapat dikurangi.



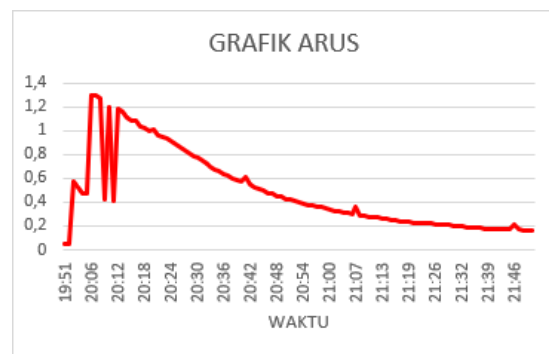
Gambar 4 Box dan Panel Surya

3.2 Pengujian USB Charging

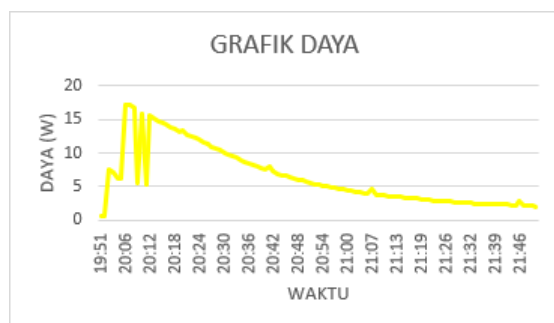
Pengujian USB *Charging* dilakukan untuk mengetahui performa sistem dalam menyalurkan energi dari baterai LiFePO₄ ke *smartphone*. Parameter yang diamati meliputi tegangan, arus, daya, dan energi keluar selama proses pengisian.



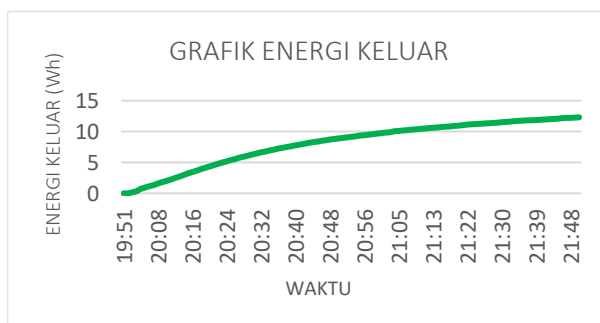
Gambar 5 Grafik Tegangan terhadap Waktu



Gambar 6 Grafik Arus terhadap Waktu



Gambar 7 Grafik Daya terhadap Waktu



Gambar 8 Grafik Energi terhadap Waktu

Berdasarkan Gambar 5 grafik tegangan terhadap waktu menunjukkan tegangan baterai LiFePO₄ selama proses USB *Charging* relatif stabil pada rentang 13,14–13,35 V. Sementara itu, Gambar 6 dan Gambar 7

menunjukkan bahwa arus dan daya pengisian cenderung menurun seiring meningkatnya kapasitas baterai *smartphone*. Pola tersebut sesuai dengan karakteristik pengisian *Current–Constant Voltage (CC–CV)*, pada tahap awal pengisian, baterai *smartphone* menyerap arus yang relatif besar (*Constant Current*) untuk mempercepat proses pengisian. Setelah kapasitas baterai meningkat dan tegangan mendekati batas pengisian, proses beralih ke tahap *Constant Voltage (CV)*, yaitu tegangan dipertahankan relatif konstan sementara arus pengisian menurun secara bertahap untuk menjaga keamanan baterai dan mencegah terjadinya *overcharging*. Selanjutnya, Gambar 8 grafik energi keluaran menunjukkan nilai energi keluar meningkat secara kontinu hingga mencapai 12,35 Wh yang menunjukkan baterai mampu menyalurkan energi secara berkelanjutan selama proses pengisian. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem USB *Charging* bekerja dengan stabil dan mampu memenuhi kebutuhan daya *smartphone* selama pengujian.

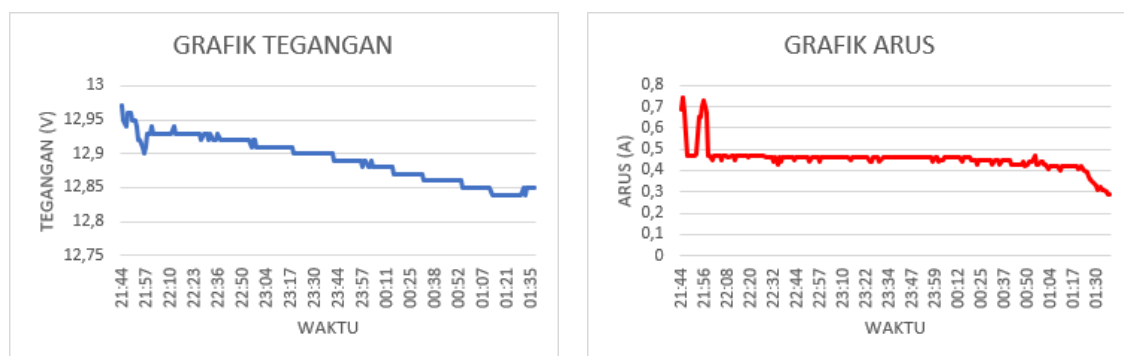
Tabel 1.1 Rekapitulasi 7 Kali Percobaan Pengujian USB Charging

<i>Smartphone</i>	Kapasitas Baterai (mAh)	Tegangan Rata Rata (V)	Arus Rata-Rata (A)	Daya Rata Rata (W)	Energi Keluar (Wh)	Durasi
Redmi Note 8	4000 mAh	13,24	0,48	6,4	12,35	1, 59 jam
Redmi Note 5	4000 mAh	13,15	0,85	11,2	18,23	1,40 jam
Redmi Note 8	4000 mAh	13,12	0,55	7,16	12,01	1,42 jam
Redmi Note 5	4000 mAh	13,02	0,85	10,98	18,19	1,38 jam
Redmi Note 8	4000 mAh	13,02	0,54	7,04	13,91	1,55 jam
Redmi Note 5	4000 mAh	12,98	0,84	10,91	18,4	1,39 jam
Redmi Note 5	4000 mAh	12,99	0,84	10,94	19,31	1,44 jam

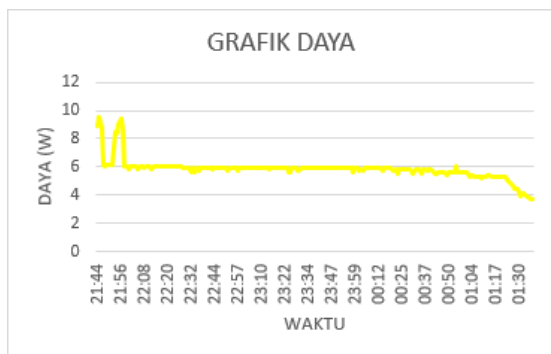
Berdasarkan Tabel 1.1, sistem USB Charging berhasil mengisi daya pada Redmi Note 8 dan Redmi Note 5 dengan baik. Tegangan baterai LiFePO₄ tetap stabil pada rentang 12,98–13,24 V selama pengujian. Redmi Note 5 memiliki arus 0,84–0,85 A, daya 10,91–11,20 W, dan energi keluar 18,19–19,31 Wh yang lebih tinggi dibandingkan Redmi Note 8 dengan arus 0,48–0,55 A, daya 6,40–7,16 W, dan energi keluar 12,01–13,91 Wh. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan daya dipengaruhi oleh karakteristik sistem manajemen baterai (*Battery Management System/BMS*) masing-masing *smartphone*, sementara sistem USB Charging yang dirancang mampu bekerja secara stabil pada kedua perangkat. Selama proses pengisian, karakteristik kerja sistem mengikuti metode *Constant Current–Constant Voltage (CC–CV)*. Pada tahap awal, arus pengisian dipertahankan relatif konstan sesuai kebutuhan perangkat, sedangkan ketika baterai mendekati kondisi penuh, arus pengisian akan berkurang secara bertahap untuk mempertahankan tegangan pengisian yang aman. Karakteristik tersebut mendukung proses pengisian yang stabil serta membantu mencegah terjadinya *overcharging* pada baterai.

3.3 Pengujian *Wireless Charging*

Pengujian *wireless charging* dilakukan untuk mengetahui performa sistem dalam menyalurkan energi dari baterai LiFePO₄ ke *smartphone*. Parameter yang diamati meliputi tegangan, arus, daya, dan energi keluar selama proses pengisian.

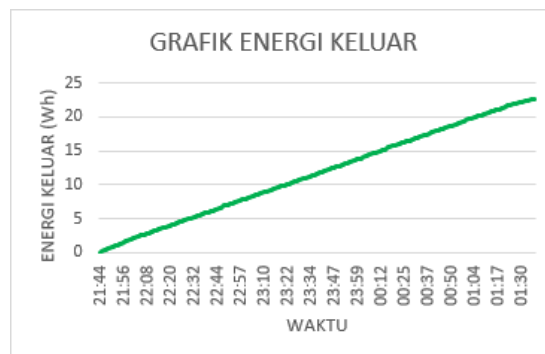


Gambar 9 Grafik Tegangan terhadap Waktu



Gambar 11 Grafik Daya terhadap Waktu

Gambar 10 Grafik Arus terhadap Waktu



Gambar 12 Grafik Energi terhadap Waktu

Berdasarkan Gambar 9 grafik tegangan terhadap waktu menunjukkan tegangan baterai LiFePO_4 selama proses *wireless charging* berada pada kisaran 12,89–12,97 V dan menurun secara bertahap akibat energi baterai digunakan untuk menyuplai *smartphone*. Sementara itu, Gambar 10 dan Gambar 11 grafik arus dan daya terhadap waktu menunjukkan arus dan daya pengisian juga mengalami penurunan seiring meningkatnya kapasitas baterai *smartphone*, yang menunjukkan karakteristik normal pengisian baterai lithium. Sementara itu, Gambar 12 grafik energi keluaran menunjukkan nilai energi keluar meningkat secara kontinu hingga mencapai sekitar 23 Wh pada akhir pengujian tanpa mengalami penurunan maupun *reset*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem *wireless charging* mampu bekerja secara stabil dan menyalurkan energi secara berkelanjutan selama proses pengisian.

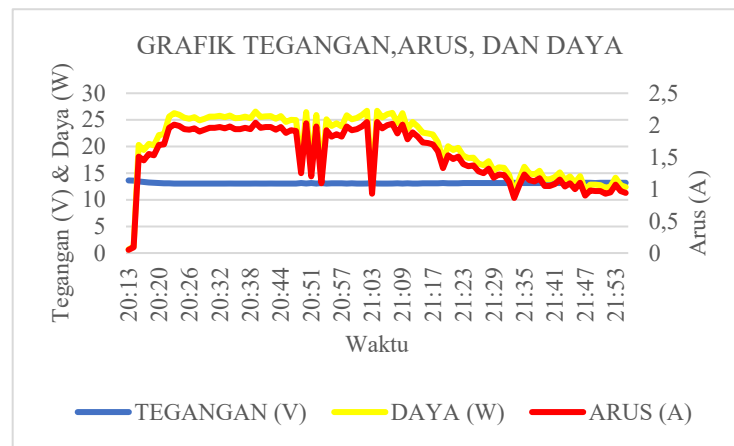
Tabel 1.2 Rekapitulasi 7 Kali Percobaan Wireless Charging

Smartphone	Kapasitas Baterai (mAh)	Tegangan Rata Rata (V)	Arus Rata-Rata (A)	Daya Rata Rata (W)	Energi Keluar (Wh)	Durasi
Redmi Note 5	4000 mAh	12,89	0,48	6,11	22,66	3h,53m
Redmi Note 8	4000 mAh	13,13	0,57	7,45	16,89	2h 22m
Redmi Note 5	4000 mAh	13,36	0,46	6,41	26,84	4h 6m
Redmi Note 8	4000 mAh	13,15	0,52	6,81	19,22	2h 45m
Redmi Note 5	4000 mAh	13,08	0,50	6,52	26	4h 3m
Redmi Note 8	4000 mAh	13,05	0,57	7,45	18,32	2h 32m
Redmi Note 8	4000 mAh	13,05	0,52	6,72	18,64	2h 59m
Redmi Note 5	4000 mAh	12,89	0,48	6,11	22,66	3h,53m

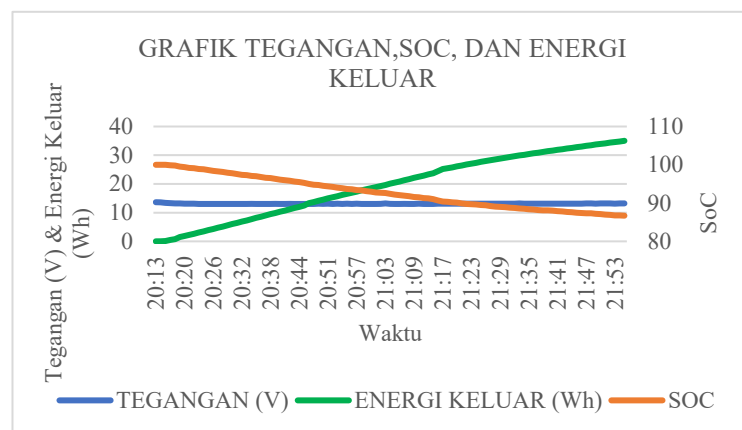
Berdasarkan Tabel 1.2, sistem *wireless charging* berhasil mengisi daya pada Redmi Note 5 dan Redmi Note 8 dengan baik. Tegangan baterai LiFePO_4 selama pengujian berada pada rentang 12,89–13,36 V, menunjukkan kestabilan daya selama proses pengisian. Arus rata-rata yang mengalir selama pengujian berada pada kisaran 0,46–0,57 A, sedangkan daya rata-rata berada pada rentang 6,11–7,45 W. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses transfer daya pada *wireless charging* lebih rendah dibandingkan pengisian menggunakan kabel USB. Hal ini disebabkan oleh rugi-rugi pada proses kopling induktif, di mana tidak seluruh energi yang dipancarkan oleh kumparan pemancar (*transmitter coil*) dapat diterima oleh kumparan penerima (*receiver coil*). Selain itu, rugi-rugi juga dipengaruhi oleh resistansi kumparan, fluks bocor (*leakage flux*), serta rangkaian penyearah di sisi penerima. Efisiensi transfer daya dipengaruhi oleh keselarasan posisi (*alignment*) dan jarak antar kumparan. Ketidak sejajaran kedua kumparan menyebabkan koefisien kopling menurun sehingga arus pengisian berkurang dan waktu pengisian menjadi lebih lama. Nilai *Energy Out* berkisar 16,89–26,84 Wh dengan durasi pengisian 2 jam 22 menit hingga 4 jam 6 menit, yang dipengaruhi oleh kondisi awal baterai, lama pengisian, dan karakteristik *Battery Management System* (BMS) masing-masing *smartphone*. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem *wireless charging* mampu bekerja secara stabil pada kedua perangkat, meskipun efisiensi transfer dayanya lebih rendah dibandingkan pengisian menggunakan kabel akibat karakteristik rugi-rugi pada proses kopling induktif.

3.4 Pengujian Ketahanan Baterai

Pengujian ketahanan baterai dilakukan dengan membebani sistem secara terus-menerus hingga baterai mencapai kondisi *BMS cut-off*. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik tegangan, arus, daya, SoC, dan energi keluar untuk menggambarkan karakteristik pelepasan energi baterai selama proses pengujian.



Gambar 13 Grafik Tegangan, Arus, dan Daya Terhadap Waktu



Gambar 14 Grafik Tegangan, Soc Dan Energi Keluar Terhadap Waktu

Berdasarkan Gambar 13 dan Gambar 14 menunjukkan tegangan baterai menurun secara bertahap dari sekitar 13,63 V menjadi 13,05 V selama proses pengujian, menunjukkan bahwa baterai mengalami proses *discharge* secara normal. Dapat dilihat pada gambar grafik tegangan menurun relatif kecil dan nilai SoC terus berkurang menunjukkan bahwa baterai masih mampu mempertahankan tegangan keluarannya secara stabil selama rentang pengujian. Karakteristik ini konsisten dengan sifat umum baterai LiFePO_4 yang memiliki kurva pelepasan tegangan (*flat discharge curve*), sehingga tegangan tidak mengalami penurunan yang signifikan pada tahap awal hingga pertengahan proses pelepasan. Arus beban berada pada kisaran 1,5–2,0 A dengan fluktuasi kecil akibat penyesuaian kebutuhan daya *smartphone*, kemudian menurun menjelang akhir pengujian. Pola daya mengikuti perubahan arus, dengan nilai maksimum sekitar 26 W pada awal pengujian dan menurun secara bertahap seiring meningkatnya kapasitas baterai *smartphone*. Sementara itu, nilai SoC menurun secara konsisten dari 100% menjadi sekitar 86,7%, sedangkan energi keluar terus meningkat hingga mencapai sekitar 35,02 Wh tanpa mengalami penurunan maupun *reset*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa semakin lama baterai menyuplai daya ke beban, kapasitas yang tersisa semakin berkurang, sedangkan energi yang telah disalurkan terus terakumulasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menyuplai energi secara stabil, sementara metode *Coulomb counting* yang digunakan dapat merepresentasikan penurunan kapasitas baterai secara konsisten selama proses pengujian.

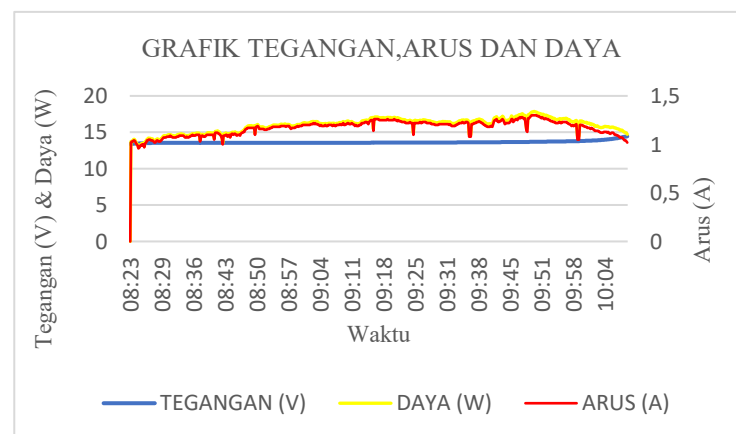
Tabel 1.3 Rekapitulasi 8 Sesi Pengujian Ketahanan Baterai

Sesi	Tegangan Rata Rata (V)	Arus Rata Rata (A)	Daya Rata Rata (W)	Energi Keluar (Wh)	Soc (%)	Durasi
1	13,14	1,34	17,58	30,21	96-84%	1h,44m
2	13,10	1,30	16,96	30,49	84-72%	1h,41m
3	13,01	1,38	17,88	30,25	72-61%	1h,38m
4	12,98	1,26	16,33	30,04	61-49%	1h,38m
5	12,94	1,34	17,32	29,88	49-37%	1h,44m
6	12,89	1,12	14,42	26,58	37-27%	1h,41m
7	12,72	1,24	15,78	30,04	27-15%	1h,43m
8	12,26	1,43	17,55	27,65	15-4%	1h,31m

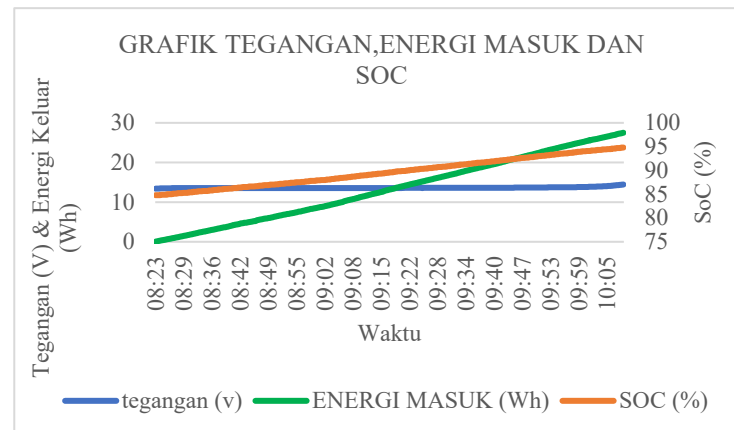
Berdasarkan Tabel 1.3, pengujian ketahanan baterai menghasilkan total energi keluar sebesar 239,16 Wh dengan durasi operasi 13 jam 27 menit hingga mencapai kondisi BMS cut-off. Selama pengujian, tegangan baterai menurun secara bertahap dari 13,14 V menjadi 12,26 V, sedangkan arus dan daya rata-rata berada pada kisaran 1,12–1,43 A dan 14,42–17,88 W. Variasi energi keluar pada setiap sesi dipengaruhi oleh perbedaan kondisi awal SoC dan konsumsi daya beban selama pengujian. Pola penurunan tegangan yang terjadi menunjukkan karakteristik pelepasan baterai LiFePO₄, yaitu mampu mempertahankan tegangan keluaran yang relatif stabil pada sebagian besar rentang SoC meskipun energi baterai terus berkurang. Penurunan tegangan yang lebih nyata terjadi ketika kapasitas baterai mendekati batas BMS cut-off, yang menandakan baterai telah memasuki tahap akhir proses pelepasan. Karakteristik ini menunjukkan bahwa baterai LiFePO₄ memiliki kestabilan tegangan yang baik selama proses pemakaian sehingga sesuai digunakan sebagai sumber daya pada sistem yang dikembangkan. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa baterai LiFePO₄ mampu menyuplai energi secara stabil selama lebih dari 13 jam, dengan penurunan performa yang mulai terlihat ketika kapasitas baterai mendekati kondisi BMS cut-off.

3.5 Pengujian *Charging* dengan Panel Surya

Pengujian *charging* menggunakan panel surya dilakukan dengan menghubungkan panel surya ke baterai LiFePO₄ melalui SCC. Selama proses pengisian, parameter tegangan, arus, daya, *Energy In*, dan SoC direkam menggunakan sensor INA226. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik untuk menunjukkan karakteristik pengisian baterai selama proses berlangsung.



Gambar 15 Grafik Tegangan, Arus Dan Daya Terhadap Waktu



Gambar 16 Grafik Tegangan, Soc Dan Energi Keluar Terhadap Waktu

Berdasarkan Gambar 15 dan Gambar 16, tegangan baterai meningkat secara bertahap dari sekitar 13 V hingga 14,4 V, menunjukkan bahwa baterai terus menerima energi dari panel surya selama proses pengisian. Arus dan daya pengisian relatif stabil pada kisaran 1,0 A –1,2 A dan 14 W –17 W, dengan fluktuasi kecil yang dipengaruhi oleh perubahan intensitas cahaya matahari dan temperatur panel surya. Menjelang akhir pengujian, arus pengisian mulai menurun ketika tegangan baterai mencapai sekitar 14,4 V dan SoC mendekati 95%, yang menunjukkan bahwa baterai telah memasuki tahap akhir pengisian sehingga SCC PWM mengurangi arus pengisian. Sementara itu, nilai *Energy In* dan SoC terus meningkat secara bertahap selama proses pengujian, menandakan bahwa energi dari panel surya tersalurkan dengan baik ke baterai. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem pengisian menggunakan panel surya mampu bekerja secara stabil dan mengikuti karakteristik pengisian baterai LiFePO₄.

Tabel 1.4 Rekapitulasi 3 Sesi Pengujian *Charging* Baterai Menggunakan Panel Surya

Sesi	Tegangan Baterai Rata Rata (V)	Arus Charging Rata Rata (A)	Daya Rata Rata (W)	Energi In (Wh)	Durasi	Soc Awal	Soc Akhir
1	13,19 V	1,25 A	16,44 W	116,50 Wh	7h,4m	7,00%	44,20%
2	13,44 V	1,04 A	14,01 W	111,08 Wh	8h, 1m	44,00%	84,90%
3	13,63 V	1,17 A	15,95 W	27,49 Wh	1h, 46m	84,80%	94,80%

Berdasarkan Tabel 1.4, proses pengisian baterai menggunakan panel surya berlangsung dalam tiga sesi dengan total durasi 16 jam 51 menit dan menghasilkan total *Energy In* sebesar 255,07 Wh. Selama pengujian, tegangan baterai meningkat dari 13,19 V menjadi 13,63 V, sedangkan arus dan daya rata-rata berada pada kisaran 1,04–1,25 A dan 14,01–16,44 W. Variasi arus dan daya selama proses pengisian dipengaruhi oleh perubahan intensitas iradiasi matahari yang diterima panel surya. Ketika intensitas iradiasi meningkat, energi yang dikonversi oleh panel surya menjadi lebih besar sehingga arus pengisian dan daya keluaran cenderung meningkat. Sebaliknya, penurunan intensitas iradiasi akibat perubahan kondisi cuaca, sudut datang sinar matahari, atau bayangan pada permukaan panel menyebabkan arus pengisian berkurang sehingga daya yang disalurkan ke baterai menjadi lebih rendah.

Penurunan arus pengisian pada sesi akhir menunjukkan bahwa baterai telah mendekati kondisi penuh sehingga SCC PWM secara bertahap mengurangi arus pengisian sesuai karakteristik pengisian baterai LiFePO₄. Perbedaan *Energy In* pada setiap sesi dipengaruhi oleh kondisi awal SoC dan durasi pengisian. Meskipun sempat terjadi *reset* pada ESP32 dan sensor, data setelah sistem kembali normal tetap menunjukkan tren peningkatan *Energy In* dan SoC yang konsisten, sehingga hasil pengujian masih layak digunakan untuk analisis kinerja sistem pengisian tenaga surya.

3.6 Pengujian Sensor INA226

Untuk mengevaluasi kinerja sensor INA226, dilakukan analisis statistik menggunakan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) dan standar deviasi (SD). Nilai MAPE digunakan untuk menunjukkan tingkat akurasi sensor terhadap alat ukur referensi, sedangkan standar deviasi digunakan untuk menunjukkan konsistensi atau penyebaran error pada setiap skenario pengujian. Semakin kecil nilai MAPE menunjukkan

semakin tinggi akurasi sensor, sedangkan semakin kecil standar deviasi menunjukkan hasil pengukuran semakin stabil.

Tabel 1. 5 *Error* Sensor INA226

Skenario Pengujian	MAPE Tegangan (%)	SD Tegangan (%)	MAPE Arus (%)	SD Arus (%)
USB Charging	0,32	0,06	0,67	0,45
Wireless Charging	0,27	0,08	1,12	1,08
Ketahanan Baterai	0,53	0,18	0,61	0,63
Charging Panel Surya	0,42	0,42	1,29	0,87

Berdasarkan hasil analisis statistik pada Tabel 1.5, nilai MAPE pengukuran tegangan berada pada rentang 0,27–0,53%, sedangkan MAPE pengukuran arus berada pada rentang 0,61–1,29%. Seluruh nilai tersebut berada di bawah 2%, sehingga menunjukkan bahwa sensor INA226 memiliki tingkat akurasi yang baik dalam mengukur tegangan maupun arus pada seluruh skenario pengujian.

Pada pengujian USB Charging, diperoleh nilai MAPE tegangan sebesar 0,32% dengan standar deviasi 0,06%, sedangkan MAPE arus sebesar 0,67% dengan standar deviasi 0,45%. Nilai standar deviasi yang rendah menunjukkan bahwa hasil pengukuran sensor relatif konsisten selama proses pengisian melalui USB. Kondisi ini terjadi karena sumber daya USB memiliki tegangan dan arus keluaran yang relatif stabil sehingga fluktuasi pembacaan sensor sangat kecil.

Pada pengujian Wireless Charging, diperoleh nilai MAPE tegangan sebesar 0,27% dengan standar deviasi 0,08%, sedangkan MAPE arus sebesar 1,12% dengan standar deviasi 1,08%. Nilai standar deviasi arus yang lebih tinggi dibandingkan tegangan menunjukkan bahwa variasi pembacaan arus lebih besar. Hal ini disebabkan oleh perubahan efisiensi kopling induktif akibat pergeseran posisi antara kumparan pemancar dan penerima, sehingga arus keluaran berubah secara dinamis walaupun tegangan relatif stabil.

Pada pengujian ketahanan baterai, diperoleh nilai MAPE tegangan sebesar 0,53% dengan standar deviasi 0,18%, sedangkan MAPE arus sebesar 0,61% dengan standar deviasi 0,63%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor INA226 mampu mempertahankan akurasi pengukuran selama proses pelepasan energi baterai LiFePO₄. Variasi error yang terjadi dipengaruhi oleh perubahan tegangan terminal baterai selama proses discharge dan perubahan arus sesuai karakteristik beban yang digunakan.

Pada pengujian charging panel surya, diperoleh nilai MAPE tegangan sebesar 0,42% dengan standar deviasi 0,42%, sedangkan MAPE arus sebesar 1,29% dengan standar deviasi 0,87%. Nilai MAPE arus yang paling tinggi di antara seluruh skenario menunjukkan bahwa pengukuran arus pada sistem tenaga surya memiliki variasi yang lebih besar. Hal ini disebabkan oleh perubahan intensitas radiasi matahari, perubahan suhu permukaan panel surya, serta karakteristik kerja *solar charge controller* yang menyebabkan arus pengisian berubah secara dinamis selama proses pengujian.

Secara umum, faktor penyebab error sensor INA226 pada seluruh pengujian meliputi toleransi resistor *shunt* pada modul INA226, resolusi ADC internal sensor, gangguan (*noise*) pada komunikasi I²C dengan ESP32, toleransi alat ukur referensi, serta perubahan kondisi operasi pada setiap skenario pengujian. Meskipun demikian, seluruh nilai MAPE yang diperoleh berada di bawah 2% dengan standar deviasi yang relatif kecil, sehingga sensor INA226 dinilai mampu memberikan hasil pengukuran yang akurat dan konsisten untuk sistem monitoring pengisian daya portabel berbasis IoT.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian, sistem pengisian daya nirkabel dan USB portabel berbasis panel surya dengan monitoring IoT berhasil direalisasikan menggunakan panel surya, SCC PWM, baterai LiFePO₄ 12 V 20 Ah, modul wireless charging, USB fast charging, sensor INA226, dan ESP32. Sistem mampu menyimpan energi dari panel surya serta menyalurkannya ke beban USB dan wireless charging, dengan energi pengisian masing-masing sebesar 255,07 Wh dan 257,98 Wh pada dua percobaan. Pengujian ketahanan baterai juga menunjukkan sistem mampu menyuplai beban hingga mencapai batas cut-off BMS, dengan perubahan SOC yang sesuai karakteristik baterai LiFePO₄. Namun, penelitian masih memiliki keterbatasan berupa penggunaan SCC tipe PWM, pengujian yang belum mencakup berbagai kondisi cuaca, serta belum dilakukannya analisis kuantitatif efisiensi wireless charging berdasarkan jarak, alignment, dan koefisien kopling kumparan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Mahendra Widyartono, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan ilmu yang sangat berharga selama proses penyusunan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada Fakultas Vokasi Universitas Negeri Surabaya, khususnya Program Studi Sarjana Terapan Teknik Listrik, atas fasilitas dan

dukungan akademis yang diberikan. Secara khusus, penulis berterima kasih kepada orang tua dan keluarga tercinta atas doa yang tiada henti, kasih sayang, serta dukungan moril maupun materil yang menjadi kekuatan terbesar bagi penulis. Tidak lupa, terima kasih disampaikan kepada rekan-rekan mahasiswa Teknik Listrik Universitas negeri surabaya atas diskusi, saran, dan kebersamaan yang saling menguatkan dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Semoga seluruh kebaikan dan bantuan yang telah diberikan oleh berbagai pihak mendapatkan balasan yang berlimpah.

REFERENSI

- [1] M. A. Raihan and E. Fitriani, "Rancang Bangun Wireless Charging Portable untuk Smartphone Menggunakan Panel Surya," *Zetroem*, vol. 6, no. 1, 2024, DOI: 10.36526/ztr.v6i1.3575.
- [2] B. Putri, "Design Smart Charging Wireless Menggunakan Baterai *Lead Acid* Dengan Metode *Fuzzy*," *Jurnal Locus Penelitian dan Pengabdian*, vol. 1, no. 9, pp. 425–432, 2022, DOI: 10.36418/locus.v1i6.140.
- [3] W. Aribowo, "Golden Jackal Optimization for Parameters Estimation of Photovoltaic Models," *Science & Technology Asia*, pp. 198–209, 2023, doi: 10.14456/scitechasia.2023.55.
- [4] W. Aribowo *et al.*, "Enhancing Photovoltaic Parameters Based on Modified Puma Optimizer," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 14, no. 3, pp. 1667–1680, 2025, DOI: 10.11591/eei.v14i3.8977.
- [5] M. A. Falacchi, A. L. Wardani, M. Widiyartono, and R. Rahmadian, "Design of Solar Panel Utilization as a Mobile Phone Charger Station Box in Online Ojek Places," in *Proceeding of International Joint Conference on UNESA*, 2024, DOI: 10.26740/pijcu.v2i1.3782.
- [6] Z. Noer, M. Fathurrahman, A. N. P. Siregar, M. Awanda, M. A. A. Agus, and L. F. Siahaan, "Solar-Based Smartphone Charging Stations with Voltage, Current, and Power Monitoring," *Journal of Technomaterial Physics*, vol. 5, no. 2, pp. 111–117, Aug. 2023, DOI: 10.32734/jotpv5i2.13348.
- [7] R. Ferdiansyah, N. Arif, D. Putra, A. D. Nafi, and B. Tamam, "Solar Panel Charger Battery," DOI: 10.70134/identik.v2i4.579.
- [8] M. S. Udin, A. C. Hermawan, W. Aribowo, and R. Rahmadian, "Rancang Bangun *Drip Irrigation System* Menggunakan Pompa Bertenaga Surya Dengan Kontrol Penyiraman Berbasis *Node-Red*," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 12, no. 2, pp. 98–105, 2023, DOI: 10.26740/jte.v12n2.p98-105.
- [9] M. T. Setiawan, I. Winarno, and B. Y. Dewantara, "Implementasi *Internet of Things* dalam Rancang Bangun Sistem Monitoring pada *Solar Cell* Berbasis Web," *JEECOM: Journal of Electrical Engineering and Computer*, vol. 3, no. 1, pp. 34–38, 2021, DOI: 10.33650/jeeecom.v3i1.1981.
- [10] G. W. Kurniawan, I. Agung, and P. Rahardjo, "Rancang Bangun Sistem Pemantauan Panel Surya Berbasis *Internet of Things*," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 22, no. 1, p. 133, 2023, DOI: 10.24843/MITE.2023.v22i01.P17.
- [11] R. Arief, W. Aribowo, R. Rahmadian, and A. C. Hermawan, "Monitoring Arus dan Tegangan Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan ESP8266 Berbasis *Node-Red*," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 12, no. 3, pp. 1–10, 2023, DOI: 10.26740/jte.v12n3.p1-10.
- [12] O. Okpatrioka, "Research and Development (R&D) Penelitian yang Inovatif dalam Pendidikan," *Dharma Acariya Nusantara: Jurnal Pendidikan, Bahasa dan Budaya*, vol. 1, no. 1, pp. 86–100, 2023, DOI: 10.47861/jdan.v1i1.154.
- [13] S. Sutoyo, F. Yudhanto, and M. S. H. Achmad, "Optimasi Kegiatan Usaha Mebel Ranting Jati dan Rotan Melalui Aplikasi Teknologi Ramah Lingkungan Berbasis *Renewable Energy*," *Surya Abdimas*, vol. 7, no. 4, pp. 704–714, 2023, DOI: 10.37729/abdimas.v7i4.3398.
- [14] K. G. Martikha and A. C. Hermawan, "Rancang Bangun Alat Pengusir Hama Tenaga Surya Menggunakan Sinar Ultraviolet dan Suara pada Pertanian Padi," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 13, no. 1, pp. 73–78, 2024, DOI: 10.26740/jte.v13n1.p73-78.
- [15] S. Sutoyo, "Enhancing Technological Awareness and Innovation Among Migrant Children Through a Child-Friendly Electricity Initiative: A Case in Malaysia," in *Proceeding International Conference of Community Service*, 2025, DOI: 10.18196/iccs.v3i2.1059.
- [16] S. Sutoyo, P. Rachmawati, M. A. Shomad, and B. T. Sasongko, "Education on the Utilization of Solar Energy to Realize Mosques with Energy Independence: Application of Renewable Energy in Minhajul Huda Mosque," in *Proceeding International Conference of Technology on Community and Environmental Development*, pp. 176–183, 2023, DOI: 10.18196/ictced.v1i1.22.
- [17] T. E. S. Putri, M. Syai'in, and I. Munadhif, "The Estimation of State of Charge for 4S2P Lithium-Ion Battery Using Kalman Filter and Coulomb Counting," *Journal of Applied Smart Electrical Network and Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 48–56, 2025, DOI: 10.52158/jasens.v6i01.1166.