

Sistem Kontrol Energi *Output Solar Charging Station* untuk Konsumen *Electric Vehicle*

Iradiratu Diah Prahmana, Karyatanti¹, Istiyo Winarno², dan Sendi Nurdiansah³

^{1,2,3}Universitas Hang Tuah, Surabaya

Jl. Arif Rahman Hakim No. 150, Kec. Keputih, Kota Surabaya, Jawa Timur 60111

e-mail: iradiratu@hangtuah.ac.id

Abstrak— Kebutuhan pengisian energi kendaraan listrik terus meningkat seiring berkembangnya kendaraan ramah lingkungan. Untuk menjamin efisiensi dan keandalan proses pengisian, dibutuhkan sistem kontrol energi yang akurat dan real-time. Penelitian ini merancang sistem kontrol energi berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan *Solar Charging Controller* (SCC) dan *Human Machine Interface* (HMI) sebagai antarmuka pengguna. Metode yang digunakan meliputi perancangan perangkat keras dan lunak, komunikasi RS-485 antara *ESP32* dan *inverter*, serta proteksi *overcharging* otomatis menggunakan *relay*. Sistem mampu membaca dan menampilkan data tegangan, arus, daya, dan energi secara *real-time*. Pengujian dilakukan dengan input nominal Rp250, Rp500, Rp750, dan Rp1000, dikonversi ke energi listrik berdasarkan tarif Rp2000/kWh. Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu mengontrol aliran daya secara akurat, dengan tingkat kesalahan pengukuran antara 2–4%. Fungsi *cut-off* otomatis bekerja efektif menghentikan pengisian saat energi mencapai batas nominal yang ditentukan. Sistem ini terbukti efisien, aman, dan transparan, serta mendukung pengisian energi kendaraan listrik secara berkelanjutan. Dengan kemampuan kontrol dan monitoring langsung, sistem ini layak diterapkan pada *Solar Charging Station* (SCS) untuk mendukung ekosistem kendaraan listrik di masa depan.

Kata kunci: ESP32, solar charging station, kontrol energi, HMI, kendaraan listrik

Abstract—. The demand for electric vehicle (EV) charging continues to grow alongside the development of environmentally friendly transportation. To ensure efficient and reliable charging, an accurate and real-time energy control system is required. This study designs an energy control system based on the ESP32 microcontroller, integrated with a Solar Charging Controller (SCC) and a Human Machine Interface (HMI) Nextion as the visual interface. The methodology includes hardware and software design, RS-485 communication between the ESP32 and the inverter, and the implementation of an automatic overcharging protection system using a relay. The system is capable of reading and displaying voltage, current, power, and energy data in real-time. Testing was conducted using nominal inputs of Rp250, Rp500, Rp750, and Rp1000, converted to electrical energy based on a tariff of Rp2000/kWh. The results show that the system accurately controls power flow, with a measurement error ranging from 2–4%. The automatic cut-off function effectively stops the charging process when the energy reaches the predefined limit. This system proves to be efficient, safe, and transparent, supporting sustainable EV charging. With real-time monitoring and control capabilities, this solar charging station is feasible for broader implementation to support electric vehicle adoption.

Keywords: energy control system, ESP32, solar charging station, HMI Nextion, electric vehicle

I. PENDAHULUAN

Energi terbarukan adalah sumber energi dari alam yang dapat diperbarui tanpa batas. Indonesia memiliki potensi besar dalam energi surya [1]. Dengan meningkatnya potensi energi surya maka diperlukan penggunaan kendaraan listrik (EV) sebagai bagian dari transisi energi bersih, kebutuhan infrastruktur pengisian yang efisien semakin mendesak. *Solar charging station* dengan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *off-grid* sebagai strategi dalam mencapai transisi energi pada sektor transportasi dengan mengurangi pemakaian energi listrik [2].

Dalam pengoperasian *Solar Charging Station* (SCS) untuk kendaraan listrik (*Electric Vehicle/EV*), terdapat sejumlah tantangan yang memengaruhi efisiensi dan keandalan sistem. Salah satu masalah utama adalah kurangnya sistem monitoring yang mampu mengelola konsumsi energi secara *realtime*. Sistem *solar charging*

station ini didesain untuk keperluan pengecasan energi pada motor listrik [3]. Keandalan sistem *solar charging station* harus didukung sistem kontrol yang baik, misalnya dengan menerapkan sistem monitoring energi secara *realtime* yang memungkinkan pengguna untuk mengetahui status pengisian energi secara akurat. Sistem ini dibuat menggunakan beberapa komponen, dimana menggunakan komponen elektronika seperti mikrokontroler ESP32, PZEM-017 dan yang lainnya [4].

Dalam sistem pengelolaan energi pada perangkat elektronik, pemantauan status baterai menjadi aspek penting untuk memastikan kinerja yang optimal serta mencegah kerusakan akibat pengisian energi yang berlebihan. Metode yang digunakan untuk memantau kapasitas baterai adalah dengan mengukur *State of Charge* (SOC). *SOC* Baterai berbasis *Graphical User Interface* (GUI) *Matlab* dengan menggunakan *Arduino*. Kelebihan dari rancangan ini adalah

SOC dapat dilihat dalam bentuk angka dan grafik yang ditampilkan dalam satu layar monitor *PC*, dilengkapi dengan proteksi *overcharging* baterai menggunakan *relay* yang akan dikendalikan oleh arduino. Arduino akan memutuskan kontak relay jika kapasitas baterai sudah penuh [5].

Kebutuhan *system charging* untuk kendaraan listrik perlu diimbangi dengan penyediaan energi yang cukup dan efisien. Oleh karena itu, sistem kontrol energi output pada *solar charging station* (SCS) berperan penting dalam mengoptimalkan distribusi energi. Penelitian ini mengembangkan sistem kontrol energi *output solar charging station* untuk konsumen *electric vehicle*. Penggunaan mikrokontroler ESP 32 yaitu untuk integrasi dengan *inverter* agar dapat keluaran data arus, tegangan, dan energi dapat di *monitor* secara akurat. Dengan teknologi ini, sistem dapat mengontrol serta mengoptimalkan distribusi energi sesuai dengan kebutuhan kendaraan listrik. Selain itu, metode pemantauan dengan *HMI* memberikan gambaran kapasitas energi charging secara visual serta dilengkapi dengan proteksi *overcharging* menggunakan *relay* otomatis. Dengan adanya sistem kontrol yang cerdas, *solar charging station* dapat menyesuaikan energi keluaran berdasarkan kebutuhan pengguna *charging* motor.

II. STUDI PUSTAKA

A. *PLTS Sistem Off Grid*

Sistem *PLTS off-grid* merupakan sistem *PLTS* yang tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN. Sistem ini disebut juga sistem *standalone* karena sistem ini hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian modul surya[6].

Keunggulan *PLTS* dengan sistem *off-grid* adalah kemandirian energi, ramah lingkungan, dan keandalan pasokan listrik di daerah terpencil. Sistem ini memungkinkan pengguna untuk menghasilkan listrik secara mandiri tanpa bergantung pada jaringan listrik, mengurangi emisi karbon, serta tetap berfungsi saat terjadi pemadaman listrik berkat baterai penyimpanan.

B. *Inverter*

Sistem tenaga surya mengubah *radiasi surya* menjadi arus listrik searah (*DC*). Inverter di butuhkan untuk mengubah arus searah menjadi arus bolak balik (*AC*), jika beban membutuhkan arus listrik bolak balik. Tegangan masukan *DC* pada *inverter* adalah tegangan yang sama dengan tegangan baterai dan tegangan keluaran panel surya [7]

Dalam sistem AC satu fasa yang umum digunakan, nilai daya aktif (*real power*) dapat dihitung secara langsung dengan mengalikan nilai tegangan efektif (rata-rata *RMS*) dan arus efektif. Persamaan yang digunakan adalah:

$$P=V \times I \quad (1)$$

Dimana:

P: Daya (Watt)

V: Tegangan (Volt)

I: Arus (Ampere)

Selain itu, apabila energi berasal dari PLN dan melalui inverter ke baterai, maka perlu diperhitungkan juga efisiensi sistem. Persamaan yang digunakan adalah:

$$Energi Input PLN = \frac{Energi Baterai}{Efisiensi Charger} \quad (2)$$

Dimana:

Energi Input PLN: Energi yang diambil dari listrik PLN.

Energi Baterai: Energi yang masuk ke baterai.

Efisiensi Charger: 0,85 Efisiensi Charger

C. *Baterai*

Baterai merupakan kumpulan dari sel-sel elektrokimia (alat yang dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik atau sebaliknya) yang dihubungkan *seri*. Sel-sel baterai tidak sama dengan sel-sel *modul surya*, yang bekerja dengan prinsip yang sama sekali berlainan. Sel baterai terdiri dari sepasang *elektroda* (sering disebut *pelat*) yang terendam didalam larutan *elektrolit*, yang menghasilkan atau menimbulkan arus listrik [8].

Untuk mengetahui berapa banyak energi yang dapat disimpan dalam baterai, digunakan persamaan berikut:

$$E=V \times Ah \quad (3)$$

Dimana:

E: Energi (Wh)

V: Tegangan baterai

Ah: Kapasitas arus dalam ampere-jam

Perhitungan estimasi waktu dilakukan dengan mengonversi satuan energi dari *kWh* ke satuan Joule atau Watt-detik (*Wh* \times 3600 = *Ws*), lalu dibagi dengan daya yang digunakan. persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{Estimasi Detik} = \frac{\text{Energi (kWh)} \times 3600000}{\text{Daya (Watt)}} \quad (4)$$

Dimana:

Estimasi Detik: Waktu Pengisian

Energi (kWh): Energi yang ingin digunakan.

Daya (Watt): Daya aktual saat pengisian.

D. *Mikrokontroler ESP 32*

Mikrokontroler ESP32 merupakan *mikrokontroler* berbasis *SoC (System on Chip)* yang telah terintegrasi dengan konektivitas *Wi-Fi 802.11 b/g/n*, *Bluetooth* versi 4.2, serta berbagai *peripheral* pendukung. *ESP32* adalah chip yang cukup lengkap karena sudah mencakup prosesor, memori penyimpanan, dan akses terhadap *GPIO (General Purpose Input Output)* [9].

Energi yang berkurang selama proses pengisian dapat dihitung berdasarkan daya sesaat yang dikonsumsi kendaraan listrik. Persamaan yang digunakan untuk menghitung energi yang berkurang setiap detik adalah:

$$\text{Energi Berkurang} = \sum \text{kWh per menit} \quad (5)$$

Dimana:

Energi Berkurang = Energi Input awal

$\sum \text{kWh per menit} = \text{Countup}$ perhitungan akumulasi *kwh*

Untuk mengakumulasi energi yang digunakan setiap menit, juga digunakan persamaan:

$$\text{Energi per Menit} = \frac{P}{60} \quad (6)$$

Dimana:

P: Daya dalam satuan Watt

60: Dibagi 60 karena dalam 1 jam ada 60 menit.

Dengan tarif Rp 2000 per kWh, energi yang diperoleh dari nominal rupiah menggunakan persamaan:

$$\text{Energi (kWh)} = \frac{\text{Nominal Rupiah}}{2000} \quad (7)$$

Dimana:

Nominal Rupiah : Input Pengguna

2000 : tarif per kWh

E. Human Machine Interface

Human Machine Interface (HMI) merupakan sistem yang berfungsi sebagai penghubung antara manusia dan teknologi mesin, yang memungkinkan pengguna untuk mengontrol serta memantau status operasional secara *realtime*. Sistem *HMI* biasanya bekerja secara *online* dan *realtime* dengan membaca data yang dikirimkan melalui *I/O port* yang digunakan oleh sistem *kontroller*-nya. Port yang umum digunakan untuk *kontroller* dan dibaca oleh *HMI* antara lain adalah *port COM*, *port USB*, *port RS232*, serta *port serial* lainnya [10].

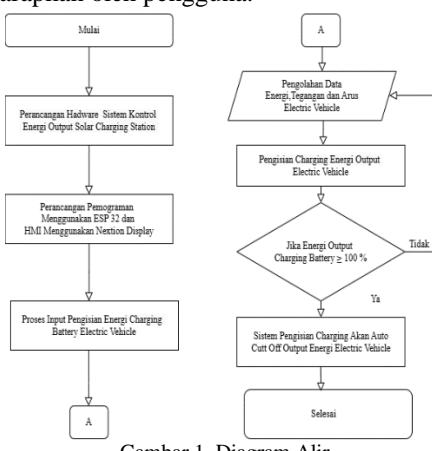
F. Solar Charging Station.

Solar Charging Station digunakan sebagai fasilitas pengisian daya untuk sepeda listrik. Sumber energi yang digunakan untuk menyuplai *charging station* ini berasal dari *panel surya* yang memanfaatkan energi matahari. Sistem *Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)* ini bersifat *off-grid*, artinya tidak terhubung ke jaringan listrik umum. *Panel surya* menangkap cahaya matahari pada siang hari, kemudian energi yang dihasilkan disalurkan melalui *regulator* dan disimpan di dalam *baterai*. Energi yang tersimpan ini digunakan untuk proses *charging* baterai sepeda listrik serta mendukung operasional peralatan sistem penyewaan sepeda [11].

III. METODE PENELITIAN

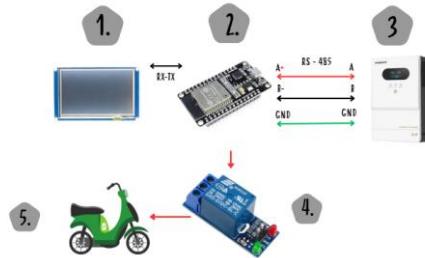
A. Diagram Alir

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sistem kontrol energi output pada *solar charging station* untuk konsumen *electric vehicle (EV)*. Penelitian mencakup beberapa tahapan yang dirancang untuk memastikan bahwa sistem yang dikembangkan dapat berfungsi dengan baik dan mampu memenuhi kebutuhan yang diharapkan oleh pengguna.



Gambar 1. Diagram Alir

Gambar 1 di atas menggambarkan alur kerja sistem dalam memantau energi selama proses pengisian daya sepeda motor listrik. Sistem ini dirancang menggunakan mikrokontroler *ESP32*, antarmuka *HMI Nextion*, serta komunikasi data melalui protokol *RS-485* yang terhubung ke *inverter* atau *charger*. Rangkaian tersebut mendukung pemantauan parameter penting seperti *tegangan*, *arus*, dan *energi* secara *real-time*.



Gambar 2. Perancangan Hardware

Gambar 2 merupakan perancangan *hardware monitoring* energi pada proses charging sepeda motor listrik menggunakan *ESP32*, *HMI Nextion*, dan koneksi *RS-485* ke *inverter/charger*. Penjelasan perancangan *hardware monitoring*.

Untuk memastikan proses pengisian daya kendaraan listrik berjalan efisien dan aman, sistem *Solar Charging Station (SCS)* dirancang dengan integrasi beberapa komponen utama yang saling terhubung dan dikendalikan secara otomatis. Sistem ini terdiri dari unit kontrol, *inverter*, mikrokontroler, antarmuka pengguna (*HMI*), serta *aktuator* berupa *relay* yang semuanya bekerja secara terintegrasi dalam satu kesatuan sistem pengisian. Diagram visual berikut memperlihatkan susunan dan fungsi masing-masing komponen dalam sistem secara menyeluruh.



Gambar 3. Integrasi Hardware

B. Modbus RS-485 ESP 32 ke Inverter

ESP32 terhubung dengan *inverter* melalui protokol komunikasi *Modbus RS-485*, memungkinkan pengambilan dan pengendalian data seperti arus, tegangan, dan daya secara *real-time*. Informasi yang diterima kemudian dianalisis oleh *ESP32* untuk memantau proses pengisian kendaraan listrik, termasuk mendeteksi potensi *overcharging*. Jika terdeteksi kondisi tidak normal, *ESP32* akan menginstruksikan *inverter* untuk menghentikan pengisian atau memutus sambungan guna mencegah kerusakan.

Agar komunikasi serial melalui *RS-485* berjalan optimal, diperlukan konfigurasi parameter seperti *baud rate* 9600 bps, data 8 bit, *stop bit* 1, dan tanpa *flow control*. Protokol

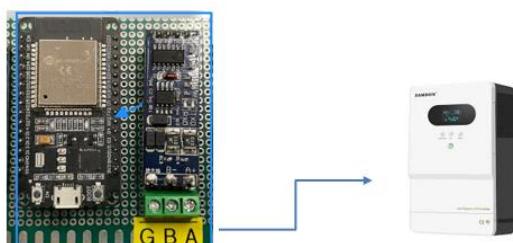
Modbus RTU digunakan untuk membaca data dari inverter zamdon dengan *function code* 04, yang mengakses *input register* bersifat *read-only* secara langsung dan *real-time*.

Setiap parameter seperti tegangan input, tegangan output, dan arus beban disimpan pada alamat *register* yang berbeda. Nilai-nilai yang diperoleh dari *register* ini biasanya berupa data digital mentah yang harus dikalikan dengan faktor skala tertentu agar dapat ditampilkan dalam satuan yang sesuai. Tabel 1 menyajikan tiga parameter utama yang digunakan dalam sistem *monitoring*, beserta alamat *register* dan satuannya:

Tabel 1. Data Modbus Zamdon

No.	Nama Variabel	Alamat	Function Code	Satuan
1	Tegangan Output	3001	4	Volt
2	Arus Beban	3003	4	Ampere
3	Power	3005	4	Watt

Untuk mengimplementasikan komunikasi data tersebut, diperlukan sambungan fisik antara inverter dan mikrokontroler menggunakan jalur komunikasi *RS-485*. Gambar 4 menunjukkan diagram *wiring* antara *inverter zamdon* dengan mikrokontroler *ESP32* yang digunakan dalam sistem *charging station* untuk *electric vehicle*. Untuk memastikan komunikasi berjalan dengan baik, diperlukan penggunaan modul konverter *RS-485* ke *TTL* yang kompatibel dengan level tegangan *ESP32*. Selain itu, perhatian khusus juga harus diberikan pada polaritas sambungan A dan B agar tidak terjadi kesalahan transmisi data.



Gambar 4. Esp 32 Rs-485 To Inverter

Gambar *ESP32* membaca parameter penting seperti tegangan output, arus beban, dan daya output secara *real-time* dari *inverter*, serta digunakan untuk kebutuhan pemantauan dan pengendalian sistem pengisian daya kendaraan listrik (*EV Charging Station*).

```
// ===== Modbus =====
void readOutputVoltage() {
    uint8_t result = node.readInputRegisters(0x3001, 1);
    if (result == node.ku808Success) {
        voltage = node.getResponseBuffer(0) / 10.0;
        Serial.print("Output Voltage: "); Serial.println(voltage);
    } else {
        Serial.println("Gagal baca tegangan.");
    }
}

void readLoadCurrent() {
    uint8_t result = node.readInputRegisters(0x3003, 1);
    if (result == node.ku808Success) {
        current = node.getResponseBuffer(0) / 10.0;
        Serial.print("Load Current: "); Serial.println(current);
    } else {
        Serial.println("Gagal baca arus.");
    }
}

void readLoadPower() {
    uint8_t result = node.readInputRegisters(0x3005, 1);
    if (result == node.ku808Success) {
        uint16_t rawPower = node.getResponseBuffer(0);
        power = (rawPower < 5) ? 0.0 : rawPower * 1.0;
        Serial.print("Load Power: "); Serial.println(power);
    } else {
        Serial.println("Gagal baca daya.");
    }
}
```

Gambar 5. Coding Pembacaan Modbus

C. Hmi Dan Esp 32

Dalam penelitian ini, perancangan *Human Machine Interface (HMI)* dan mikrokontroler *ESP32* dilakukan untuk memantau data operasional proses pengisian daya kendaraan listrik secara *real-time*. Parameter seperti arus, tegangan, dan energi yang dibaca oleh *ESP32* akan dikirimkan melalui koneksi *RS-485* yang terhubung langsung ke *HMI*. *HMI* berperan sebagai antarmuka yang memungkinkan pengguna untuk memasukkan data energi dan mengaktifkan proses pengisian daya pada motor listrik.

Data operasional yang diterima oleh *ESP32* akan diproses untuk mendeteksi status pengisian, termasuk kondisi *overload* atau *overcharging*. Jika kondisi tersebut terdeteksi, *ESP32* akan mengirimkan perintah untuk memutus aliran listrik pada sistem pengisian daya motor kendaraan. Informasi terkait kondisi motor kendaraan ini akan ditampilkan secara visual melalui *HMI*, misalnya dengan menyalanya indikator lampu saat terjadi kondisi tidak normal, serta tampilan grafik dari data yang terbaca..



Gambar 6.Hmi dan Esp 32

D. Tampilan Monitoring

Tampilan *monitoring* arus dan energi dalam penelitian ini dirancang untuk menyajikan visualisasi secara *real-time* terhadap kondisi operasional motor saat proses pengisian daya berlangsung. Data arus dan daya yang dihasilkan oleh motor selama pengisian dianalisis oleh mikrokontroler *ESP32*, lalu ditampilkan pada layar *Human Machine Interface (HMI)*.



Gambar 7.Tampilan Monitoring

E. Charger Input Control

Dalam sistem pengisian energi listrik ini, tidak hanya dilakukan pemantauan parameter seperti tegangan, arus, dan daya, tetapi juga disediakan fitur input nilai *Rupiah* untuk dikonversi menjadi energi listrik dalam satuan *kWh*. Fitur ini dirancang agar pengguna dapat menentukan sendiri nominal uang yang ingin digunakan untuk mengisi daya pada kendaraan listrik. Dengan begitu, sistem menjadi lebih fleksibel dan efisien, terutama dalam konteks penggunaan komersial seperti stasiun pengisian kendaraan listrik umum. Antarmuka input tersebut dirancang menggunakan *Nextion Editor*, di mana pengguna dapat berinteraksi langsung melalui layar sentuh untuk menginput data..



Gambar 8. Input Charger

Pada Gambar 8 *Input Charging*, antarmuka dirancang agar pengguna dapat dengan mudah memasukkan nominal uang yang akan digunakan untuk proses pengisian daya kendaraan listrik. *Input* dilakukan melalui *keypad* numerik yang terdiri atas tombol angka *b0* hingga *b9*, tombol *DEL* (*b10*) untuk menghapus satu digit terakhir, serta tombol *CLC* (*b11*) untuk menghapus seluruh *input* sekaligus. Keseluruhan *keypad* ini ditempatkan di bagian tengah layar untuk akses yang ergonomis.

Di sisi kanan atas halaman, terdapat dua buah komponen *input teks*, yaitu:

- *t0* yang berfungsi untuk menampilkan nilai nominal uang (dalam Rupiah) yang telah dimasukkan melalui *keypad*.
- *t1* yang akan menampilkan hasil konversi dari nominal tersebut ke dalam satuan energi listrik (kWh) sebagai Charger Input.

Proses konversi dari nominal uang ke satuan energi dilakukan secara otomatis setelah pengguna menekan tombol *ENTER* (*b12*). Sistem akan menghitung jumlah energi yang setara berdasarkan persamaan (7) dan hasilnya langsung ditampilkan di kolom *t1*.

$$\text{Energi (kWh)} = \frac{250}{2000} = 0,125 \text{ kWh}$$

Dari hasil perhitungan pada rumus, diperoleh nilai energi sebesar 0,125 kWh dari *input* nominal sebesar 250 rupiah. Nilai energi ini menjadi dasar dalam proses selanjutnya, yaitu estimasi durasi pengisian dan pengaturan batas maksimum energi yang akan disalurkan ke kendaraan listrik.

F. Beban Motor Listrik

Pada penelitian ini, perancangan beban dimodelkan dengan menggunakan referensi spesifikasi dari motor listrik. Data yang digunakan adalah kapasitas energi yang dibutuhkan oleh sepeda motor listrik. Pemodelan beban disesuaikan dengan kondisi *real*, di mana sepeda motor listrik diparkir dalam rentang waktu yang tidak tentu, tergantung pada kebutuhan dalam kurun waktu 24 jam. Beban motor listrik ditentukan oleh kebutuhan daya (Watt) yang dapat dipenuhi oleh kapasitas baterai yang tersedia. Sebagai contoh, sepeda motor listrik dengan daya motor yang lebih tinggi akan membutuhkan baterai dengan kapasitas yang lebih besar untuk mendukung durasi pengisian (*charging*) yang memadai. Tabel 2 menunjukkan beban maksimum kendaraan listrik yang digunakan dalam perancangan simulasi..

No	Beban Motor Listrik	Energi (W)	Kapasitas Baterai (V)
1	Sepeda Motor Listrik	500 W	48V 20Ah

G. Data Monitoring

Selama proses pengujian, data *monitoring* dikumpulkan dan dianalisis menggunakan *mikrokontroler* *ESP32*, kemudian ditampilkan secara *real-time* melalui antarmuka *HMI* (*Human Machine Interface*). Parameter utama yang dimonitor dalam sistem ini meliputi:

- Tegangan pengisian (*Volt*)
- Arus pengisian (*Ampere*)
- Total energi (*Watt-hour*)

Perhitungan energi dilakukan berdasarkan rumus dasar kelistrikan yang telah dijelaskan pada persamaan (3) sehingga memungkinkan sistem untuk mencatat dan menghitung penggunaan energi secara akurat selama proses pengisian berlangsung.

$$\text{Energi} = \text{V} \times \text{Ah} = 48 \times 20 = 960 \text{ Wh}$$

Data dicatat secara berkala untuk menganalisis kebutuhan energi dari berbagai jenis kendaraan listrik sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 2

Hasil *monitoring* menunjukkan bahwa kendaraan dengan daya motor dan kapasitas baterai yang lebih tinggi memerlukan arus pengisian yang lebih besar serta waktu pengisian yang lebih lama. Selain itu, pemantauan ini juga memberikan informasi yang relevan untuk membandingkan hasil pengukuran aktual dengan prediksi perhitungan secara teoritis. Lebih lanjut, sistem monitoring ini juga bermanfaat dalam mengevaluasi efisiensi pengisian serta menjadi dasar dalam pengembangan fitur kontrol dan proteksi yang lebih adaptif. Dengan tersedianya data secara *real-time*, pengguna dapat mengambil keputusan yang lebih tepat terkait pengelolaan energi dan pengisian daya kendaraan listrik.

H. Perhitungan Estimasi Energi

Pengambilan data dalam sistem kontrol energi output pada *solar charging station* untuk konsumen kendaraan listrik dilakukan dengan bantuan *inverter* dan *mikrokontroler* *ESP32*, guna memastikan proses pengisian daya berlangsung secara efisien dan stabil. *Inverter* berperan dalam mencatat parameter penting seperti daya yang dihasilkan panel surya, tegangan dan arus *input-output*, status pengisian baterai (*charging*, *float*, *standby*), serta efisiensi konversi energi.

Untuk mendukung pengambilan keputusan yang tepat dalam manajemen energi, sistem ini dilengkapi dengan fitur perhitungan estimasi durasi pengisian energi. Estimasi ini didasarkan pada jumlah energi yang tersedia dan daya konsumsi aktual, yang dihitung menggunakan persamaan (1) untuk memperoleh nilai *daya* (*power*), serta rumus untuk

memperoleh estimasi waktu pengisian dalam satuan *detik (seconds)*.

$$\begin{aligned} P &= VxI \\ P &= 222,4 \times 2,6 \\ P &= 578,24 \text{ W} \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, diperoleh daya sebesar 578,24 W (*Watt*), yang merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus aktual selama proses pengisian. Nilai daya ini menjadi acuan dalam menghitung estimasi waktu pengisian energi ke baterai menggunakan persamaan (4) yaitu:

$$\text{Estimasi Detik} = \frac{0,12 \times 3,600,000}{578,24} = 746,72 \text{ Detik}$$

Artinya, dibutuhkan waktu sekitar 747 *detik* atau sekitar 12 menit 27 detik untuk menyuplai energi sebesar 0,12 kWh ke baterai motor listrik dengan daya pengisian sebesar 578,24 W. Estimasi ini bersifat dinamis dan dapat berubah sesuai dengan kondisi beban dan efisiensi sistem selama proses pengisian berlangsung. Penerapan kedua rumus tersebut memungkinkan sistem untuk memperkirakan waktu pengisian secara akurat berdasarkan profil konsumsi energi dari kendaraan listrik

I. Perhitungan Data Output Charger

Dalam proses pengisian baterai kendaraan listrik, besarnya energi dari sistem *charger* sangat menentukan kecepatan pengisian. Semakin besar daya yang diberikan oleh *charger*, maka semakin cepat energi dapat dialirkan ke dalam baterai. Namun demikian, laju pengisian tersebut tetap harus disesuaikan dengan spesifikasi teknis baterai agar tidak menimbulkan risiko kerusakan pada sel baterai akibat pengisian berlebih (*overcharging*).

Untuk mengetahui jumlah energi yang dapat disimpan dalam baterai, dilakukan perhitungan berdasarkan tegangan (*V*) dan kapasitas arus (*Ah*) dari baterai. Perhitungan ini menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan daya dari sumber listrik, serta dalam merancang sistem *charger* yang sesuai.

Estimasi energi total (*E*) yang dapat disimpan dalam baterai dihitung menggunakan persamaan (3) diketahui spesifikasi baterai kendaraan listrik sebagai berikut:

- Tegangan baterai = 48 V
- Kapasitas baterai = 20 Ah

$$E = 48 \text{ V} \times 20 \text{ Ah} = 960 \text{ Wh} = 0,96 \text{ kWh}$$

Artinya, baterai mampu menyimpan energi sebesar 0,96 kWh. Jika pengisian dilakukan menggunakan sumber listrik PLN 220V, maka harus diperhitungkan efisiensi dari *charger*. Apabila efisiensi *charger* sebesar 85%, maka energi listrik yang harus disuplai dari PLN dapat dihitung menggunakan persamaan (2):

$$\text{Energi input PLN} = 0,96 \text{ kWh} / 0,85 \approx 1,13 \text{ kWh}$$

Dengan demikian, untuk mengisi penuh baterai 48V 20Ah diperlukan energi dari jaringan listrik sebesar kurang lebih 1,13 kWh.

J. Implementasi Cut-Off Charging Otomatis

Salah satu fitur utama dalam sistem kontrol energi pada *solar charging station* untuk konsumen kendaraan listrik adalah *cut-off charging* otomatis. Fitur ini merupakan mekanisme penting yang dirancang untuk menghentikan aliran energi dari *charger* ke baterai secara otomatis ketika kapasitas pengisian telah mencapai batas yang ditentukan, baik berdasarkan *input* nominal pengguna maupun kapasitas maksimal baterai. Tujuan utama dari mekanisme ini adalah untuk menjaga keamanan dan umur pakai baterai, menghindari kondisi *overcharging*, serta memastikan proses pengisian berjalan efisien dan akurat.

Sistem ini bekerja secara terintegrasi menggunakan *inverter* dan mikrokontroler *ESP32*. *Inverter* bertugas membaca dan memantau parameter kelistrikan seperti tegangan dan arus pengisian secara kontinu, sedangkan *ESP32* melakukan kalkulasi dan kontrol berdasarkan data *real-time* yang diperoleh. Selama proses pengisian berlangsung, *ESP32* menghitung daya yang digunakan menggunakan persamaan (1):

$$\begin{aligned} P &= VxI \\ P &= 222,4 \times 2,6 \\ P &= 578,24 \text{ W} \end{aligned}$$

Data menunjukkan nilai tegangan sebesar 222,4 V dan arus sebesar 2,6 A. Maka daya listrik yang dihasilkan pada saat itu adalah 578,24 W.

Memperkirakan estimasi waktu pengisian menggunakan persamaan (4):

$$\text{Estimasi Detik} = \frac{0,12 \times 3,600,000}{578,24} = 746,72 \text{ Detik}$$

Karena data akuisisi dilakukan setiap satu menit, maka energi yang disalurkan dalam satu menit tersebut dengan menggunakan persamaan (6):

$$\text{Energi per menit} = \frac{P}{60}$$

$$578,24 \text{ W} \times (1/60) = 9,637 \text{ Wh} \text{ atau setara dengan } 0,009637 \text{ kWh.}$$

Perhitungan energi ini terus dilakukan dan diakumulasi setiap menit. Misalnya, dalam tiga menit awal proses pengisian, total energi yang sudah disalurkan adalah sebesar 0,028812 kWh berdasarkan penjumlahan dari energi-energi per menit sebelumnya. Ketika sistem mendeteksi bahwa nilai total energi yang telah diberikan mencapai 0,12 kWh—yang merupakan nilai target berdasarkan *input* nominal pengguna sebesar Rp250—maka *ESP32* secara otomatis mengaktifkan fitur *cut-off* dan memutus aliran daya ke baterai. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa energi yang diberikan tidak melebihi kapasitas yang dibayar pengguna sekaligus melindungi baterai dari risiko *overcharging*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Skenario Pengisian Charging Motor Listrik dengan Rp250

Dalam skenario ini, dilakukan simulasi pengisian energi pada sepeda motor listrik dengan kondisi awal baterai

berada di 20%. Proses pengisian menggunakan solar charging station yang terhubung ke inverter dan dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32. Pengguna memulai pengisian dengan memasukkan uang sebesar Rp250, yang secara otomatis dikonversi oleh sistem menjadi energi sebesar 0,125 kWh berdasarkan tarif Rp2.000 per kWh.

Tabel 3. Pengisian charging Rp 250 (2000/kWh)

Tanggal (HH-BB-TTTT)	Waktu (WIB)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Nominal (Rp)	Energi (kWh)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
23/06/2025	14:54:44	222,4	2,6	578,24	250	0,12
23/06/2025	14:55:44	221,2	2,6	575,12	250	0,12
23/06/2025	14:56:44	221,3	2,6	575,38	250	0,1
23/06/2025	14:57:45	224,1	2,5	560,25	250	0,1
23/06/2025	14:58:45	214,9	2,5	537,25	250	0,09
23/06/2025	14:59:45	217,5	2,4	522	250	0,08
23/06/2025	15:00:45	221,5	2,3	509,45	250	0,08
23/06/2025	15:01:46	220,5	2,3	507,15	250	0,07
23/06/2025	15:02:46	223,5	2,2	491,7	250	0,06
23/06/2025	15:03:46	222,8	2,2	490,16	250	0,05
23/06/2025	15:04:46	225,9	2,1	474,39	250	0,04
23/06/2025	15:05:47	223,4	2,1	469,14	250	0,03
23/06/2025	15:06:47	220,8	2,1	463,68	250	0,02
23/06/2025	15:07:47	229,3	2	458,6	250	0,01
23/06/2025	15:08:47	0	0	0	250	0

Tabel 3 menyajikan data pengisian energi secara berkala, di mana nilai tegangan dan arus menurun seiring waktu sehingga daya juga ikut turun. Energi tercatat menurun dari 0,12 kWh hingga mencapai 0, yang menandakan bahwa proses pengisian telah selesai secara otomatis. Nilai nominal tetap berada di angka Rp250, menunjukkan bahwa sistem menggunakan skema *prabayar*.

Tabel 4. Monitoring Pengisian Energi dengan Batas 0,12 kWh pada Charging

Daya (W)	Nominal (Rp)	Energi (kWh)	wH	kWh	Total kWh	Kondisi
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
578,24	250	0,12	9,6373	0,00963733	0,009637333	CHARGER
575,12	250	0,12	9,5853	0,00958533	0,019222667	CHARGER
575,38	250	0,1	9,5896	0,00958966	0,028812333	CHARGER
560,25	250	0,1	9,3375	0,0093375	0,038149833	CHARGER
537,25	250	0,09	8,9541	0,00895416	0,047104	CHARGER
522	250	0,08	8,7	0,0087	0,055804	CHARGER
509,45	250	0,08	8,4908	0,00849083	0,064294833	CHARGER
507,15	250	0,07	8,4525	0,0084525	0,072747333	CHARGER
491,7	250	0,06	8,195	0,008195	0,080942333	CHARGER
490,16	250	0,05	8,1693	0,00816933	0,089111667	CHARGER
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
474,39	250	0,04	7,9065	0,0079065	0,097018167	CHARGER
469,14	250	0,03	7,819	0,007819	0,104837167	CHARGER
463,68	250	0,02	7,728	0,007728	0,112565167	CHARGER
458,6	250	0,01	7,6433	0,0076433	0,1202085	SELESAI
0	250	0	0	0	0	SELESAI

Tabel 4 menampilkan proses pengisian baterai sepeda motor listrik menggunakan *Solar Charging Station*, dengan daya keluaran sistem berkisar antara 458 hingga 578 Watt dan total energi yang tersalur sebesar 0,1202 kWh. Energi tersebut merupakan sebagian dari kapasitas baterai 48 V 20 Ah (0,96 kWh), di mana hanya sebagian yang digunakan untuk menyesuaikan dengan batas *input* energi. Sistem secara otomatis menghentikan pengisian saat energi yang tersalurkan telah mencapai batas yang ditentukan pengguna, ditandai dengan status *selesai* pada *HMI* dan pemutusan arus dari *charger* ke baterai. Mekanisme *cut-off* ini membuktikan bahwa sistem bekerja sesuai logika pemrograman sekaligus memberikan umpan balik *real-time* kepada pengguna.

B. Analisis Hasil Pengujian Sistem

Bagian ini menyajikan analisis hasil pengujian terhadap sistem kontrol energi output *Solar Charging Station (SCS)* untuk konsumen kendaraan listrik. Tujuan pengujian adalah untuk memverifikasi apakah sistem mampu menyalurkan energi sesuai dengan nominal *Rupiah* yang dimasukkan oleh pengguna serta memastikan perlindungan terhadap kondisi *overcharging*.

Pengujian sistem dilakukan dengan memasukkan *input* nominal sebesar Rp250, yang secara sistem dikonversi menjadi 0,125 kWh berdasarkan tarif Rp2.000/kWh. Selama proses pengisian, sistem mencatat parameter tegangan, arus, daya, dan energi. Nilai-nilai ini dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam menyalurkan energi secara tepat

Tabel 5. Rata-rata analisa

Parameter	Nilai Rata-rata
Tegangan (V)	216,7
Arus (A)	2,29
Daya (W)	495,37
Energi Aktual (kWh)	0,1202
Waktu Pengisian (menit)	14

Sistem berhasil menghentikan pengisian secara otomatis saat energi mencapai ±0,1202 kWh, sedikit di bawah batas teoritis 0,125 kWh. Status “selesai” muncul di tampilan *HMI*, menandakan bahwa fungsi proteksi *cut-off* otomatis bekerja dengan baik. Dengan daya rata-rata sekitar 495 W, sistem mampu menyuplai energi sesuai nominal pengguna dalam waktu ±14 menit, menyesuaikan perubahan tegangan dan arus selama proses pengisian.

C. Analisis Error Pengukuran Energi Sistem

Pengujian sistem kontrol energi output dilakukan dengan membandingkan nilai energi teoritis berdasarkan konversi nominal *uang* terhadap nilai energi aktual yang terbaca pada sistem *monitoring*. Tujuannya adalah untuk mengevaluasi tingkat ketelitian sistem dalam mendistribusikan energi kepada pengguna sesuai dengan tarif Rp2.000/kWh.

Tabel 6. Eror analisis Pengukuran

Parameter	Nilai
Energi Teoritis (kWh)	0,125
Energi Aktual (kWh)	0,1202
Selisih Energi (kWh)	0,0048
Tingkat Error (%)	3,84%
Rugi per Charging (Rp)	Rp9,6

Tingkat *error* sebesar 3,84% masih berada dalam batas toleransi pengukuran sistem berbasis mikrokontroler ($\pm 5\%$). Nilai kerugian secara ekonomi juga sangat kecil dan masih dapat diterima dalam skala operasional..

V. KESIMPULAN

Pengujian dilakukan dengan beberapa skenario nominal input (Rp250) untuk mengevaluasi keandalan sistem dalam menyalurkan energi sesuai nilai yang dimasukkan oleh pengguna. Pada pengujian dengan Rp250, sistem menghasilkan energi aktual sebesar 0,1202 kWh dari nilai teoritis 0,125 kWh, dengan daya rata-rata 495,37 Watt, tegangan 216,7 Volt, dan arus 2,29 Ampere. Pengisian berlangsung sekitar 14 menit sebelum sistem otomatis menghentikan aliran daya. Selisih antara energi teoritis dan aktual berkisar 2%–4%, masih dalam batas wajar dan menunjukkan akurasi sistem cukup baik. Fitur pemutusan otomatis berhasil menghentikan pengisian tepat saat energi mendekati batas sesuai konversi nominal. Sistem ini efisien dan memberikan kejelasan bagi pengguna karena energi yang diterima sesuai dengan uang yang dibayarkan. Rugi pengisian hanya sekitar Rp10–25 per sesi, tergolong kecil dan menunjukkan sistem bekerja efektif.

REFRENSI

- [1] S. Sriyadi, Y. Z. Arief, S. Wilyanti, and R. R. Al-Hakim, “Desain Plts Atap Spklu Di Pln Unit Induk Distribusi Jakarta Raya,” *Electro Luceat*, vol. 9, no. 1, pp. 50–63, 2023, doi: 10.32531/jelekn.v9i1.597.
- [2] R. Adolph, “PERENCANAAN CHARGING STATION KENDARAAN LISTRIK DENGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ON-GRID,” pp. 1–23, 2021.
- [3] H. Budiati, L. Agung Heriputrantri, and L. Jacobus, “Implementasi Solar Charging Station Dan Digitalisasi Sistem Lelang Hasil Panen Untuk Meningkatkan Jumlah Pengunjung Di Embung Sendangtirto,” *Jabb*, vol. 4, no. 2, p. 2023, 2023, [Online]. Available: <https://sendangtirtosid.slemankab.go.id/first>.
- [4] P. G. I. Adistantaya, “Rancang Bangun Charging Station menggunakan Panel Surya Berbasis Internet of Things Untuk Perangkat Elektronik,” pp. 1–3, 2023.
- [5] R. Firanda and M. Yuhendri, “Monitoring State Of Charge Accumulator Berbasis Graphical User Interface Menggunakan Arduino,” *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 2, no. 1, pp. 11–16, 2021, doi: 10.24036/jtein.v2i1.95.
- [6] A. W. Hasanah, “Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off Grid 6,4 KWp Untuk 1 Unit Rumah Tinggal,” *Energi & Kelistrikan*, vol. 13, no. 1, pp. 20–25, 2021, doi: 10.33322/energi.v13i1.965.
- [7] Al Bahar A.K Kusuma C.W, “Perencanaan PLTS Untuk Rumah Tinggal Dengan Kapasitas Daya Terpasang 450 VA,” *J. Ilm. Elektron.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–23, 2016.
- [8] Y. Yamato and B. B. Rijadi, “Analisis Kebutuhan Modul Surya Dan Baterai Pada Sistem Penerangan Jalan Umum (PJU),” *J. Elektro Tek.*, vol. 1, no. 1, pp. 30–38, 2022, [Online]. Available: <https://journal.unpak.ac.id/index.php/JET/article/view/4819>.
- [9] M. N. Nizam, Haris Yuana, and Zunita Wulansari, “Mikrokontroler Esp 32 Sebagai Alat Monitoring Pintu Berbasis Web,” *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.*, vol. 6, no. 2, pp. 767–772, 2022, doi: 10.36040/jati.v6i2.5713.

- [10] H. Haryanto and S. Hidayat, “Perancangan HMI (Human Machine Interface) Untuk Pengendalian Kecepatan Motor DC,” *Setrum Sist. Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, vol. 1, no. 2, p. 58, 2021, doi: 10.36055/setrum.v1i2.476.
- [11] A. Setyawan and A. Ulinuha, “Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off Grid Untuk Supply Charge Station,” *Transmisi*, vol. 24, no. 1, pp. 23–28, 2022, doi: 10.14710/transmisi.24.1.23–28.