

# DESAIN PENGISIAN BATERAI SEPEDA LISTRIK DENGAN SOLAR CELL

**Candra Fahreza Ardhani, Wahyu Setyo Pambudi, Yuliyanto Agung Prabowo, Misbahul Munir, Novian Patria Uman Putra, Titiek Suheta.**

Program Studi Teknik Elektro; Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya; Jalan Arif Rahman Hakim 100 Surabaya,

## Keywords:

Sepeda Listrik, Panel Surya, Buck Converter, Pengisian Baterai, Energi Terbarukan

## Correspondent Email:

wahuyusp@itats.ac.id

**Abstrak.** Ketergantungan pengisian daya sepeda listrik pada jaringan listrik konvensional (PLN) membatasi penggunaan ketika akses listrik tidak tersedia. Makalah ini mengusulkan sistem pengisian baterai berbasis tenaga surya sebagai solusi mandiri dan ramah lingkungan. Sistem mengintegrasikan panel fotovoltaik, pengontrol pengisian, dan konverter DC–DC tipe buck untuk meregulasi tegangan sesuai kebutuhan baterai. Evaluasi kinerja dilakukan pada kondisi iradiasi matahari yang berubah-ubah untuk menilai kemampuan regulasi tegangan dan efisiensi. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem mampu mengisi baterai secara efektif dan menyediakan energi yang cukup untuk operasi harian sepeda listrik. Buck converter mempertahankan tegangan keluaran stabil dengan nilai rata-rata 13,01 V meskipun terjadi fluktuasi tegangan masukan fotovoltaik antara 10,09 V hingga 19,45 V. Sistem mencapai efisiensi sebesar 97,31% pada kondisi daya rendah. Selain itu, mekanisme kontrol mampu menjaga kestabilan pengisian pada variasi ekstrem iradiasi dan suhu. Sistem yang diusulkan menunjukkan solusi pengisian yang andal, mandiri, dan berkelanjutan tanpa ketergantungan pada jaringan listrik konvensional.



Copyright © [JITET](#) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

**Abstract.** The reliance of electric bicycle charging on the conventional power grid (PLN) limits usability when electrical access is unavailable. This paper proposes a solar-powered battery charging system as an independent and environmentally friendly solution. The system integrates a photovoltaic panel, charge controller, and buck DC–DC converter to regulate voltage according to battery requirements. Performance evaluation was conducted under varying solar irradiance conditions to assess voltage regulation and efficiency. Experimental results indicate that the system effectively charges the battery and supplies sufficient energy for daily electric bicycle operation. The buck converter maintains a stable output voltage with an average of 13.01 V despite photovoltaic input fluctuations between 10.09 V and 19.45 V. The system achieves an efficiency of 97.31% under low-power conditions. Moreover, the control mechanism preserves charging stability under extreme irradiance and temperature variations. The proposed system demonstrates a reliable, standalone, and sustainable charging solution without dependence on the conventional grid.

## 1. PENDAHULUAN

Pemerintah Indonesia dalam beberapa tahun terakhir aktif mendorong percepatan

penggunaan kendaraan listrik sebagai bagian dari upaya mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Salah satu bentuk

dukungan tersebut adalah arahan Presiden Republik Indonesia yang menetapkan bahwa hanya kendaraan listrik yang diperbolehkan beroperasi di kawasan Ibu Kota Nusantara (IKN). Kebijakan ini diharapkan dapat mempercepat transisi energi menuju sistem transportasi yang lebih ramah lingkungan serta menekan emisi gas buang dari kendaraan bermotor konvensional [1][2].

Sepeda listrik merupakan salah satu inovasi transportasi yang menggabungkan sepeda konvensional dengan motor listrik sebagai sumber tenaga bantu. Kehadiran motor listrik memungkinkan pengguna menempuh jarak yang lebih jauh dengan usaha fisik yang lebih ringan, terutama pada kondisi jalan menanjak atau perjalanan jarak menengah. Seiring dengan perkembangan teknologi, sepeda listrik mengalami peningkatan pada aspek efisiensi energi, daya tahan baterai, serta kenyamanan penggunaan, sehingga semakin diminati oleh masyarakat sebagai alternatif transportasi harian [3].

Di Desa Semampir, Kecamatan Cerme, Kabupaten Gresik, penggunaan sepeda listrik sebagai sarana transportasi utama terus meningkat. Sepeda listrik banyak dimanfaatkan untuk aktivitas sehari-hari seperti bekerja, berbelanja, maupun mengantar anak ke sekolah. Meskipun memberikan kemudahan dan efisiensi biaya operasional, meningkatnya penggunaan sepeda listrik juga berdampak pada konsumsi listrik rumah tangga akibat kebutuhan pengisian baterai, yang pada akhirnya dapat meningkatkan beban tagihan listrik bulanan [4].

Pemanfaatan energi surya melalui teknologi sel surya menjadi solusi potensial untuk mengatasi permasalahan tersebut. Energi matahari dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif untuk stasiun pengisian sepeda listrik, terutama di daerah yang belum memiliki fasilitas pengisian khusus. Dalam sistem ini, energi listrik yang dihasilkan oleh sel surya disimpan ke dalam baterai melalui perangkat konverter yang berfungsi menyesuaikan tegangan dan arus agar sesuai dengan kebutuhan pengisian [5][6].

Baterai sebagai media penyimpanan energi memiliki karakteristik yang berbeda-beda tergantung pada jenisnya. Proses pengisian dan pengosongan baterai harus dilakukan dengan metode yang tepat untuk menghindari kerusakan dan memperpanjang umur pakai.

Salah satu jenis baterai yang banyak digunakan pada sistem energi terbarukan adalah Valve Regulated Lead Acid (VRLA) karena bersifat bebas perawatan, memiliki keandalan yang baik, serta umur pakai yang relatif panjang [7].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pengisian baterai sepeda listrik berbasis energi surya yang efisien dan aman. Sistem ini diharapkan dapat mendukung program pemerintah dalam meningkatkan penggunaan kendaraan listrik, mengurangi ketergantungan pada energi listrik konvensional, serta memberikan solusi pengisian baterai yang lebih ekonomis bagi Masyarakat [8].

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Panel Surya (*Photovoltaic*)

Sel fotovoltaik merupakan perangkat semikonduktor yang mengonversi energi foton matahari langsung menjadi energi listrik melalui efek fotoelektrik. Secara struktural, sel surya terdiri dari sambungan bahan semikonduktor tipe-P dan tipe-N. Panel surya yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis Polikristalin 120 Wp yang mampu menghasilkan tegangan nominal untuk sistem 12V DC [9].

Kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh variabel lingkungan, terutama intensitas iradiasi dan suhu kerja. Tegangan sirkuit terbuka ( $V_{oc}$ ) akan menurun seiring kenaikan suhu, di mana setiap kenaikan  $10^{\circ}\text{C}$  dari suhu standar ( $25^{\circ}\text{C}$ ) mengakibatkan penurunan daya sekitar 0,5%. Karakteristik elektrik panel surya direpresentasikan melalui kurva I-V (*Current-Voltage*) dan P-V (*Power-Voltage*), di mana terdapat titik daya maksimum (*Maximum Power Point/MPP*) sebagai parameter operasi optimal [10].

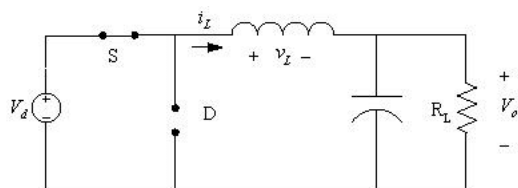
### 2.2 Baterai *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA)

Baterai VRLA, atau sering disebut *Sealed Lead Acid* (SLA), dipilih karena desainnya yang tertutup rapat (*maintenance-free*), sehingga meminimalkan risiko kebocoran elektrolit dan penguapan. Dalam sistem pengisian mandiri, baterai VRLA 12V 12Ah berfungsi sebagai media penyimpan energi yang andal untuk menyuplai beban secara kontinu. Baterai ini memiliki durabilitas tinggi dan sangat cocok dipadukan dengan sistem

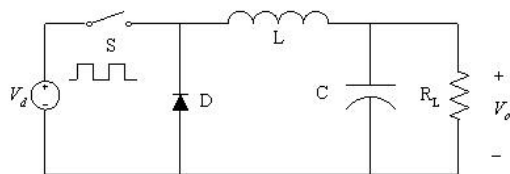
energi terbarukan yang membutuhkan siklus pengisian stabil [11].

### 2.3 Buck Converter

*Buck converter* adalah konverter daya DC-DC yang berfungsi menurunkan level tegangan masukan menjadi tegangan keluaran yang lebih rendah dengan efisiensi tinggi. Komponen utama penyusunnya meliputi MOSFET sebagai saklar elektronik, induktor untuk menyimpan energi magnetik, serta kapasitor filter untuk mereduksi riak tegangan (*voltage ripple*)[12][13].



Gambar 1. Rangkaian *Buck converter* fase-ON



Gambar 2. Rangkaian *Buck converter* fase-OFF

Prinsip kerja alat ini terbagi menjadi dua fase: fase ON (arus mengalir dari sumber ke beban melalui induktor) seperti yang ditunjukkan pada gambar 1 dan fase OFF (induktor melepaskan energi ke beban melalui dioda freewheeling) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Regulasi tegangan dilakukan dengan mengatur *Duty Cycle* (D) melalui sinyal PWM, sesuai dengan persamaan (1) [14]:

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (1)$$

Ket: D = Duty Cycle (%)  
 Vo = Tegangan Keluaran (V)  
 Vs = Vi = Tegangan Masukan (V)

Dalam penelitian ini, digunakan IC LM2596 yang memiliki frekuensi switching 150 kHz untuk memastikan konversi daya yang stabil dari panel surya ke baterai.

### 2.4 Kontrol *Proportional-Integral* (PI)

Kontroler PI menggabungkan aksi proporsional untuk mempercepat respon sistem dan aksi integral untuk mengeliminasi kesalahan kondisi tunak (*steady-state error*). Parameter Kp (Proporsional) dan Ki (Integral) harus ditala secara presisi agar tegangan keluaran tetap berada pada *set point* meskipun terjadi fluktuasi pada sisi input[15]. Persamaan matematis kontroler PI dapat dilihat pada persamaan (2).

$$Co(t) = Kp \times e(t) + Ki \times \int e(t) dt \quad (2)$$

### 2.5 Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO adalah algoritma optimasi stokastik berbasis populasi yang meniru perilaku sosial kawanan burung atau ikan. Dalam sistem ini, PSO digunakan untuk mencari nilai optimal Kp dan Ki pada kontroler PI. Setiap "partikel" dalam populasi merepresentasikan kandidat solusi yang bergerak dalam ruang pencarian berdasarkan posisi terbaik pribadinya (*pbest*) dan posisi terbaik global dari seluruh kawanan (*gbest*). Proses iteratif ini terus berlangsung hingga sistem mencapai nilai *fitness* terbaik, yaitu respon sistem dengan *error* terkecil [12].

## 3. METODE PENELITIAN

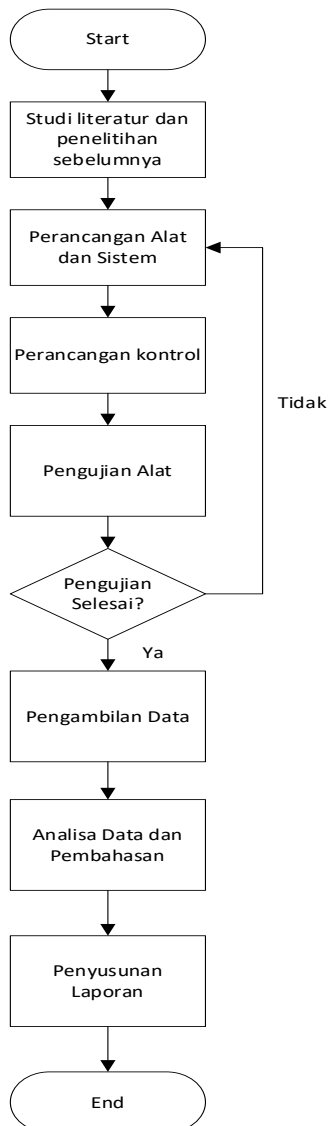
Pada bagian metode penelitian ini dibagi menjadi 2 bagian yaitu penjelasan alur penelitian dan penjelasan alur sistem.

### 3.1 Diagram Alur Penelitian

Tahapan penelitian disusun seperti pada gambar 3, secara sistematis untuk mencapai tujuan desain sistem pengisian yang optimal, meliputi langkah-langkah berikut ini :

1. Studi Literatur.  
Pengumpulan referensi terkait pengisian baterai sepeda listrik berbasis panel surya, regulasi tegangan, dan algoritma optimasi dari berbagai sumber ilmiah.
2. Perancangan Alat dan Sistem.  
Integrasi perangkat keras yang meliputi Panel Surya 120 WP, buck converter, sensor-sensor, dan mikrokontroler sebagai unit kendali pusat.
3. Perancangan Kontrol.  
Penentuan parameter Kp dan Ki menggunakan simulasi algoritma Particle

Swarm Optimization (PSO) pada MATLAB Simulink untuk menjamin kestabilan dan efisiensi konverter.



Gambar 3. Diagram Alur Penelitian

4. Pengujian Alat  
Validasi fungsional perangkat keras untuk memastikan sinkronisasi antara hasil simulasi dengan performa implementasi fisik.
5. Iterasi dan Perbaikan  
Evaluasi hasil pengujian; jika ditemukan ketidaksesuaian teknis, dilakukan modifikasi pada perancangan sistem hingga mencapai spesifikasi yang diinginkan.
6. Analisa Data:  
Pengambilan data performa akhir meliputi stabilitas tegangan dan efisiensi daya

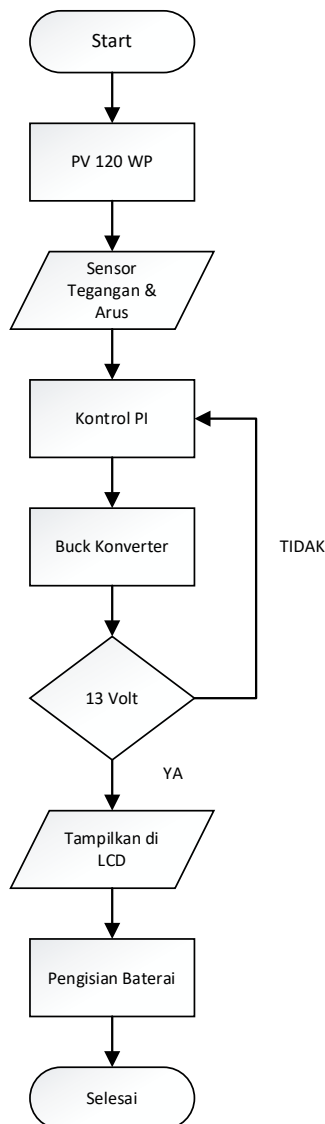
untuk dibandingkan dengan penelitian sebelumnya.

7. Penyusunan Laporan.  
Dokumentasi seluruh hasil penelitian sebagai referensi teknis dalam optimalisasi pengisian daya berbasis energi terbarukan.

### 3.2 Diagram Alur system

Alur kerja sistem pada penelitian ini dikendalikan oleh mikrokontroler dengan urutan proses yang direpresentasikan melalui diagram alir pada gambar 4. Penjelasan dari tahapan-tahapan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Inisialisasi Sistem dan Sensor  
Proses dimulai dengan melakukan inisialisasi seluruh komponen sistem, termasuk pengaturan pin pada mikrokontroler serta aktivasi sensor-sensor yang terhubung.
2. Start & Inisialisasi PV  
Sistem dimulai dengan menerima energi dari PV (Photo-Voltaic) 120 WP sebagai sumber daya utama.
3. Pembacaan Sensor  
Sensor Tegangan & Arus bekerja untuk mendeteksi besaran nilai listrik yang dihasilkan oleh panel surya secara real-time.
4. Proses Kontrol (PI)  
Data dari sensor diproses menggunakan Kontrol PI (Proportional-Integral). Algoritma ini berfungsi untuk mengatur kestabilan keluaran sistem agar sesuai dengan target yang diinginkan.
5. Konversi Daya  
Sinyal kontrol kemudian diteruskan ke Buck Converter untuk menurunkan tegangan dari panel surya ke level yang aman untuk pengisian baterai.

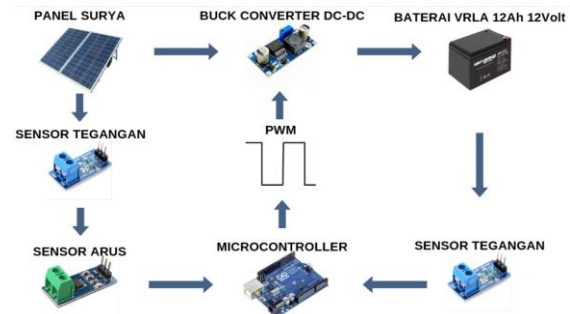


Gambar 4. Diagram Alur sistem

6. Percabangan Keputusan  
Sistem mengecek apakah tegangan sudah mencapai 13 Volt:  
Tidak (TIDAK): Jika belum mencapai 13V, sistem akan kembali ke tahap Kontrol PI untuk menyesuaikan ulang.  
Ya (YA): Jika sudah mencapai 13V, sistem lanjut ke tahap berikutnya.
7. Output & Pengisian  
Nilai parameter akan muncul pada Tampilan LCD, dan proses Pengisian Baterai berlangsung.
8. Selesai  
Proses mencapai titik akhir setelah baterai terisi sesuai parameter yang ditentukan.

### 3.3 Blok Diagram Sistem

Rancangan sistem pengisian didesain menggunakan solar cell, Rangkaian converter DC dengan tipe *buck converter*, rangkaian kontrol pembangkit dan beban. lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian sistem

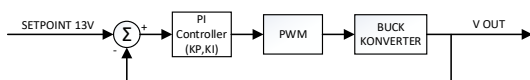
Sistem pengisian daya ini dirancang menggunakan arsitektur lingkaran tertutup (closed-loop system) berbasis mikrokontroler. Proses dimulai dengan akuisisi data real-time berupa tegangan dan arus dari panel surya menggunakan sensor INA219. Data ini krusial karena sifat keluaran panel surya yang fluktuatif terhadap intensitas iradiasi matahari dan suhu lingkungan.

Mekanisme regulasi tegangan dilakukan melalui feedback control pada baterai VRLA 12V. Mikrokontroler membandingkan tegangan baterai aktual dengan setpoint pengisian untuk menghitung sinyal kesalahan (error). Sinyal tersebut diproses menggunakan kontroler Proporsional-Integral (PI), di mana konstanta  $K_p$  dan  $K_i$  telah dioptimasi sebelumnya menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) untuk meminimalkan *Integral Time Absolute Error* (ITAE).

Keluaran dari kontroler PI dikonversi menjadi sinyal Pulse Width Modulation (PWM) yang mengendalikan *duty cycle* pada Buck Converter. *Buck converter* bertindak sebagai aktuator utama yang menurunkan tegangan tinggi fluktuatif dari panel surya menjadi tegangan DC yang stabil sesuai kebutuhan pengisian baterai. Integrasi kontrol PI-PSO ini menjamin proses pengisian berlangsung secara otomatis, aman, dan efisien, sekaligus memperpanjang siklus hidup baterai melalui regulasi daya yang presisi.

### 3.4 Perancangan Rangkaian Simulasi PSO (Particle Swarm Optimization)

Simulasi ini difokuskan pada integrasi algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dengan model *Buck Converter* menggunakan perangkat lunak MATLAB. Tujuan utama simulasi adalah melakukan penalaan (*tuning*) parameter kontroler PI secara otomatis guna memperoleh respon sistem yang optimal dan stabil terhadap gangguan di mana alur sistem secara menyeluruh dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian sistem

Proses perancangan simulasi terbagi menjadi tiga struktur utama:

#### 1. Input

Identifikasi parameter fisik konverter (tegangan sumber, induktor, kapasitor) dan parameter konfigurasi PSO (ukuran populasi, batas iterasi, dan ruang pencarian  $K_p, K_i$ ).

#### 2. Proses

Iterasi stokastik PSO mengevaluasi setiap posisi partikel berdasarkan fungsi objektif *Integral Time Absolute Error* (ITAE) yang dihasilkan dari respon transien rangkaian.

#### 3. Output

Menghasilkan konstanta proporsional ( $K_p$ ) dan integral ( $K_i$ ) yang presisi, serta kurva konvergensi yang menunjukkan efisiensi pencarian algoritma.

Simulasi ini dirancang untuk meminimalkan *overshoot* tegangan dan mempercepat waktu kestabilan (*settling time*) pada *Buck Converter*. Hasil optimasi ini menjadi acuan utama dalam implementasi sistem kendali pada perangkat keras.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Deskripsi Alat

Hasil perancangan keseluruhan alat yang dirakit dengan komponen pendukung pada sistem pengisian baterai sepeda listrik dengan *solar cell* dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Alat keseluruhan

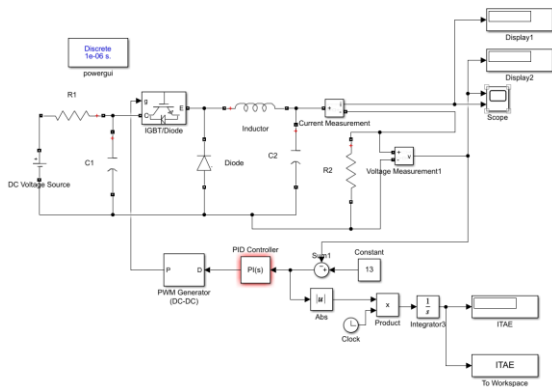
Hasil perancangan *buck converter* yang telah dirakit dengan komponen pendukungnya yang dapat dilihat pada gambar 8 dibawah ini.



Gambar 8. Rangkaian *Buck Converter*

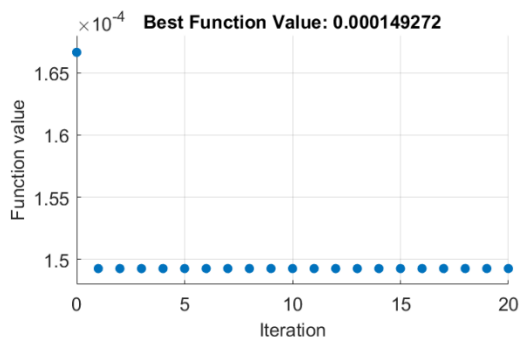
### 4.2. Optimasi Parameter Kontroler Berbasis PSO

Parameter kontroler Proportional-Integral (PI) yang telah diperoleh melalui proses optimasi menggunakan algoritma PSO pada tahap simulasi komputer, selanjutnya diimplementasikan secara langsung ke dalam unit embedded system pada perangkat keras pengisian baterai. Integrasi nilai konstanta proporsional ( $K_p$ ) dan konstanta integral ( $K_i$ ) hasil penalaan PSO ini memegang peranan krusial dalam mekanisme kendali lingkaran tertutup (*closed-loop control*), yang secara spesifik dirancang untuk mempertahankan stabilitas tegangan keluaran pada unit buck converter untuk rangkaian keseluruhan PSO dapat dilihat pada gambar 9.



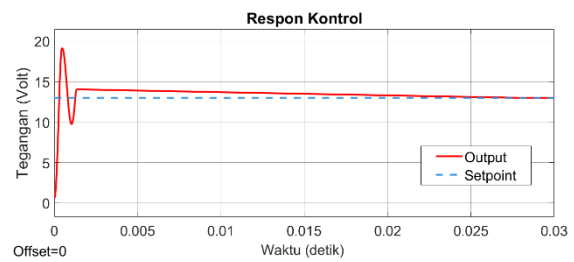
Gambar 9. Rangkaian keseluruhan PSO

Proses optimasi menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dilakukan untuk mendapatkan parameter kontroler PI ( $K_p$  dan  $K_i$ ) yang paling responsif. Eksperimen dijalankan dengan batas maksimal 20 iterasi dengan memantau nilai fungsi tujuan terbaik *Best function value* (*Best fval*). Berdasarkan kurva konvergensi, nilai *Best fval* menunjukkan penurunan tajam pada iterasi awal dan mencapai kondisi stabil mendekati nol pada iterasi ke 20 bernilai 0.000149272 yang dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 10. Hasil simulasi iterasi PSO

Parameter optimal hasil optimasi PSO selanjutnya diintegrasikan ke dalam model simulasi *buck converter*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan dan arus keluaran mampu mencapai titik stabil sesuai *setpoint* yang ditentukan dalam waktu transien yang singkat. Stabilitas respon ini, yang ditandai dengan grafik garis lurus pasca-transien, mengonfirmasi keberhasilan kontroler PI berbasis PSO dalam mencapai dan mempertahankan titik operasi sistem secara presisi yang dapat dilihat pada gambar 11.



Gambar 11. Hasil grafik tegangan dan arus pada Matlab

Setelah mencapai batas maksimal 10 iterasi, proses optimasi PSO berhasil memperoleh nilai parameter optimal yaitu  $K_p = 1000$  dan  $K_i = 0$ . Implementasi parameter tersebut pada kontroler menunjukkan performa yang superior dibandingkan penalaan manual. Hal ini dibuktikan dengan minimnya selisih kesalahan (*error*) serta respon transien yang jauh lebih stabil, di mana sistem mampu mencapai kondisi tunak (*steady state*) tanpa adanya fluktuasi yang merugikan bagi keamanan pengisian baterai. Hasil nilai  $K_p$  dan  $K_i$  dapat dilihat pada gambar 12.

```
cost =
    1.4927e-04
    10          220    0.0001493    0.0001493    9
Optimization ended: number of iterations exceeded OPTIONS.MaxIterations.
=== HASIL OPTIMASI PSO ===
x1 = 1000.000000
x2 = 0.000000
fmin: 0.000149 | exitflag: 0 | iter: 10 | funccount: 220 | time: 1216.810s
```

Gambar 12. Hasil nilai  $K_p$  dan  $K_i$  dari simulasi

Nilai koefisien kontroler PI ( $K_p$  dan  $K_i$ ) yang telah dioptimasi melalui algoritma PSO selanjutnya diimplementasikan ke dalam prototipe fisik *buck converter*. Tahap ini diikuti dengan serangkaian pengujian fungsional secara langsung guna memvalidasi kinerja sistem pada kondisi operasional nyata. Proses validasi dilakukan dengan membandingkan respon transien perangkat keras terhadap data simulasi, guna memastikan bahwa sistem mampu beradaptasi dengan dinamika beban dan fluktuasi input dari panel surya secara presisi.

### 4.3. Pengujian Kapasitas Output Panel Surya.

Analisis kinerja panel surya dilakukan melalui observasi terhadap output listrik di bawah pengaruh variabel lingkungan yang dinamis. Pengambilan data dilakukan secara

ekstensif pada periode produktif harian untuk menjamin representasi performa sistem yang optimal. Hasil pengujian menunjukkan adanya fluktuasi nilai tegangan (V), arus (A), dan daya (W) yang berbanding lurus dengan perubahan intensitas iradiasi matahari serta suhu lingkungan. Pengujian sistem konversi energi berbasis panel surya ini, yang datanya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus Output Panel Surya

Jam	Tegangan (V)	Arus (A)	Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Suhu (°C)
7:00	18.92	0.23	43	32.66
8:00	19.05	0.19	73	30.68
9:00	18.57	0.20	72	31.71
10:00	19.02	0.20	76	36.54
11:00	19.29	0.20	80	33.62
12:00	19.32	0.18	74	34.17
13:00	18.99	0.22	14	31.94
14:00	18.13	0.19	16	32.13
15:00	15.09	0.21	14	30.31
16:00	13.87	0.11	7	27.47

Berdasarkan Tabel 1 tersebut, sistem menunjukkan stabilitas tegangan operasional di kisaran 18,13 V hingga 19,32 V pada periode pagi hingga siang hari. Puncak intensitas iradiasi tercatat pada pukul 11:00 sebesar 80 W/m<sup>2</sup> yang menghasilkan tegangan kerja optimal sebesar 19,29 V. Namun, memasuki pukul 15:00 hingga 16:00, terjadi penurunan signifikan pada nilai iradiasi (turun hingga 7 W/m<sup>2</sup>) yang secara linear berdampak pada penurunan tegangan menjadi 13,87 V dan arus menjadi 0,11 A.

#### 4.4. Pengujian Kapasitas pada Buck Converter.

Bagian ini memaparkan implementasi parameter optimal Kp dan Ki hasil optimasi Particle Swarm Optimization (PSO) ke dalam perangkat keras sistem pengisian baterai sepeda listrik. Analisis difokuskan pada validasi kinerja sistem secara real-time untuk membuktikan peningkatan efisiensi dan kestabilan regulasi daya pasca-optimasi. Data komprehensif mengenai respon sistem dalam kondisi operasional aktual tersebut disajikan

pada Tabel 2 sebagai dasar interpretasi performa alat.

Tabel 2. Pengujian Kapasitas Pada Buck Converter

Jam	Tegangan Output (V)	Arus Output (A)
7:00	13.27	0.23
8:00	13.22	0.18
9:00	13.29	0.22
10:00	13.54	0.2
11:00	13.48	0.22
12:00	13.26	0.2
13:00	13.43	0.19
14:00	13.36	0.17
15:00	13.45	0.19
16:00	12.94	0.11

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa kontroler PI-PSO berhasil menjaga stabilitas tegangan keluaran pada rentang 12,94 V hingga 13,54 V meskipun terjadi fluktuasi input. Hal ini membuktikan efektivitas parameter Kp dan Ki dalam meminimalkan error steady-state dan mencegah overshoot arus, sehingga proses pengisian baterai VRLA 12V berlangsung aman. Secara keseluruhan, hasil eksperimen ini memvalidasi bahwa optimasi PSO meningkatkan akurasi kendali dan respon transien sistem pada kondisi operasional nyata.

#### 4.5. Pengujian Buck Converter Dengan PWM

Pengujian ini dilakukan dengan memberikan variasi nilai PWM secara bertahap untuk mengamati respons perubahan tegangan output pada sisi buck converter. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi kemampuan buck converter dalam menurunkan tegangan input sesuai dengan nilai PWM yang diberikan, serta untuk memastikan kestabilan dan pola perubahan tegangan output yang konsisten terhadap variasi sinyal kendali.

Data pada Tabel 3 mengkonfirmasi kemampuan buck converter dalam meregulasi tegangan secara dinamis melalui penyesuaian duty cycle (11,37% – 99,22%). Meskipun tegangan input dari panel surya berfluktuasi, sistem secara konsisten mempertahankan

tegangan output pada rentang stabil 12,94 V – 13,54 V. Hal ini membuktikan bahwa mekanisme step-down dan algoritma kendali yang dirancang berfungsi efektif sebagai aktuator yang andal untuk menjaga kestabilan titik operasi pengisian baterai.

Tabel 3. Pengujian *Buck Converter* Dengan PWM

Jam	Tegangan Input (V)	PWM	Duty Cycle	Tegangan Output (V)
7:00	18.92	52	20.39%	13.27
8:00	19.05	253	99.22%	13.22
9:00	18.57	145	56.86%	13.29
10:00	19.02	58	22.75%	13.54
11:00	19.29	180	70.59%	13.48
12:00	19.32	187	73.33%	13.26
13:00	18.99	68	26.67%	13.43
14:00	18.13	121	47.45%	13.36
15:00	15.09	29	11.37%	13.45
16:00	13.87	183	71.76%	12.94

#### 4.6. Pengujian Efisiensi Pengisian pada Baterai

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi optimalitas transfer energi dari sumber daya ke baterai dengan mengukur parameter tegangan, arus, dan daya pada rangkaian pengisian. Fokus utama pengujian adalah mengidentifikasi rugi-rugi daya (*power losses*) yang disebabkan oleh hambatan komponen elektronik, karakteristik internal baterai, serta faktor lingkungan. Data yang diperoleh berfungsi sebagai instrumen evaluasi untuk menilai apakah efisiensi sistem telah memenuhi spesifikasi desain dan standar performa yang diharapkan.

Hasil pengujian pada Tabel 4 menunjukkan efisiensi pengisian baterai berkisar antara 57,51% hingga 97,26%. Variasi ini dipengaruhi oleh dinamika beban, disipasi panas komponen, dan penyesuaian duty cycle untuk menjaga stabilitas tegangan. Capaian efisiensi tertinggi pada daya rendah (97,26%) mengkonfirmasi bahwa rugi-rugi daya dapat diminimalisasi secara efektif. Secara keseluruhan, sistem terbukti mampu menyalurkan daya secara berkelanjutan dan memenuhi spesifikasi teknis untuk kebutuhan energi baterai sepeda listrik.

Tabel 4. Pengujian Efisiensi Pengisian pada Baterai

Jam	Daya Input (W)	Daya Output (W)	Efisiensi (%)
7:00	4.22	3.05	72.31
8:00	4.14	2.38	57.51
9:00	4.22	2.92	69.2
10:00	3.96	2.71	68.43
11:00	3.95	2.97	78.1
12:00	3.92	2.65	67.76
13:00	3.54	2.55	72.07
14:00	3.5	2.27	64.86
15:00	3.25	2.56	78.77
16:00	1.46	1.42	97.26

#### 5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merealisasikan sistem pengisian baterai sepeda listrik berbasis sel surya untuk baterai VRLA 12V/12Ah. Dengan implementasi parameter kontrol PI ( $K_p = 1000$  dan  $K_i = 0$ ), sistem menunjukkan respon proporsional yang agresif dalam mencapai target tegangan. Buck converter terbukti andal dalam meregulasi tegangan keluaran rata-rata pada 13,01 V, meskipun tegangan input dari panel surya berfluktuasi ekstrem antara 10,09 V hingga 19,45 V.

Sistem mencapai efisiensi puncak sebesar 97,31% dengan rata-rata daya keluaran 50,67 Watt. Secara keseluruhan, mekanisme kontrol yang dirancang efektif menjaga stabilitas pengisian terhadap dinamika iradiasi matahari dan suhu, sehingga memenuhi spesifikasi teknis untuk sistem pengisian baterai yang optimal dan stabil.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing dan seluruh pihak di Program Studi Teknik Elektro Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya yang telah memberikan bimbingan, fasilitas, serta masukan yang sangat berarti dalam penyusunan dan pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan mahasiswa/kerja yang telah memberikan semangat dan dukungan selama proses simulasi

dan penyusunan laporan ini. Semoga penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif bagi pengembangan sistem kontrol di bidang teknik elektro.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Nur and A. Barry, "Optimalisasi Waktu Pengisian Dengan Smart Dual Charger Plug And Play Pada Kendaraan Listrik Bertenagakan Baterai SLA/VRLA," *JTAM ROTARY*, vol. 6, no. 2, Art. no. 2, Sep. 2024, doi: 10.20527/jtam\_rotary.v6i2.13070.
- [2] W. C. Ningrat, W. D. Mufty, W. R. Yustian, K. D. Virgiawan, and A. N. Hamid, "Pengisian Baterai VRLA Dengan Metode Tegangan Konstan Berbasis Kontrol PI," *J. Eng. Innov.*, vol. 1, no. 1, Art. no. 1, Dec. 2023.
- [3] P. Gunoto, E. Susanti, F. A. Riberu, O. W. B. Butar, and W. Pratama, *Perancangan Alat Pengisian Daya Pada Sepeda Listrik Menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)*. PT. Penerbit Qriset Indonesia, 2025.
- [4] L. A. M. Putri and H. Malau, "Efektivitas Penggunaan Sepeda Listrik Berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 45 Tahun 2020 di Kota Padang," *J. ISO J. Ilmu Sos. Polit. Dan Hum.*, vol. 4, no. 2, pp. 15–15, Aug. 2024, doi: 10.53697/iso.v4i2.1828.
- [5] E. Ginanjar, A. Mashar, and W. B. Mursanto, "Perancangan Buck Boost Converter Pada Sistem Pengisian Baterai Untuk Panel Surya Kapasitas 50 Wp," *Pros. Ind. Res. Workshop Natl. Semin.*, vol. 13, no. 01, Art. no. 01, Aug. 2022, doi: 10.35313/irwns.v13i01.4243.
- [6] W. Latifah, M. Nuzuluddin, and I. K. D. Patwari, "Rancang Bangun Kontrol Charger Station Dengan Panel Surya Berbasis Mikrokontroler," *J. Print. J. Pengemb. Rekayasa Inform. Dan Komput.*, vol. 2, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2024.
- [7] W. S. Pambudi, R. A. Firmansyah, T. Suheta, and N. K. Wicaksono, "Analisis Penggunaan Baterai Lead Acid dan Lithium Ion dengan Sumber Solar Panel," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 11, no. 2, Art. no. 2, Apr. 2023, doi: 10.26760/elkomika.v11i2.392.
- [8] "(PDF) Status Perkembangan Sepeda Listrik Dan Motor Listrik Di Indonesia," *ResearchGate*, Oct. 2024, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2021.v08.i04.p2.
- [9] A. Maulana and K. P. Pratama, "Bacistikbel : Battery Charger Sepeda Listrik Berbasis Panel Surya," May 2022, Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/39203>
- [10] "Rancang Bangun Sepeda Listrik Menggunakan Panel Surya Sebagai Pengisi Baterai | Nainggolan | Jurnal Poli-Teknologi." Accessed: Oct. 02, 2024. [Online]. Available: <https://prosiding-old.pnj.ac.id/index.php/politeknologi/article/view/861>
- [11] W. D. Mufty, D. O. Anggriawan, and M. Z. Efendi, "BATERAI CHARGER VRLA DENGAN METODE CONSTANT CURRENT CONSTANT VOLTAGE BERBASIS KONTROL PI," *Pros. Semin. Nas. Terap. Ris. Inov. SENTRINOV*, vol. 6, no. 1, Art. no. 1, Nov. 2020.
- [12] M. H. As-Sidqi, R. Firmansyah, B. Suprianto, and M. S. Zuhrie, "Pengoimalan Parameter Kontrol PI pada Buck Converter DC-DC Menggunakan Metode PSO," *J. Tek. ELEKTRO*, vol. 14, no. 3, pp. 305–310, Oct. 2025, doi: 10.26740/jte.v14n3.p305-310.
- [13] A. M. Alfikri and S. Rahayu, "Rancang Bangun Buck Converter Efisiensi Tinggi Dengan Pengendali Arduino Nano Berbasis Simulasi Multisim 14.2," *KILAT*, vol. 12, no. 2, pp. 148–159, 2023.
- [14] A. Wibowo and A. Huda, "Rancang Bangun Buck-Boost Converter Sebagai Charger Baterai Controller Berbasis Pwm Dengan Sumber Photovoltaic," *Elektr. Borneo*, vol. 10, no. 1, Art. no. 1, May 2024, doi: 10.35334/eb.v10i1.5066.
- [15] K. Hidayat, M. C. Hasani, N. A. Mardiyah, and M. Effendy, "Strategi Pengisian Baterai pada Sistem Panel Surya Standalone Berbasis Kontrol PI Multi-Loop," *J. Tek. Elektro*, vol. 13, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2021, doi: 10.15294/jte.v13i1.29765.