

Optimasi Efisiensi Pengisian Baterai pada Sepeda Statis Berbasis Arduino menggunakan Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO)

Nevlin Ferdinand Suharya Wangga, Efendi S Wirateruna*, Angguh Prastoko

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang

*Correspondence: efendi.s.wirateruna@unisma.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan sistem pengisian baterai pada sepeda statis sebagai sumber energi terbarukan dengan memanfaatkan konversi energi mekanik dari kayuhan pengguna. Tujuan utama penelitian ini adalah meningkatkan efisiensi proses pengisian daya melalui penerapan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) pada pengendalian sinyal PWM berbasis mikrokontroler Arduino. Metode penelitian meliputi perancangan mekanik dan elektronik, integrasi sensor arus serta tegangan, implementasi rangkaian buck-boost, penerapan algoritma PSO, dan pengujian kinerja sistem. Pengujian dilakukan dengan membandingkan performa sebelum dan sesudah penerapan PSO, mencakup parameter tegangan, arus, daya keluaran, efisiensi, dan error MAPE. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan signifikan, di mana daya keluaran naik 36,5%, efisiensi sistem meningkat dari 23% menjadi 31,5%, serta error MAPE menurun dari 9,4% menjadi 4,1%. Penerapan PSO terbukti mampu mengoptimalkan duty cycle PWM secara adaptif terhadap perubahan beban dan putaran generator, sehingga proses pengisian baterai menjadi lebih stabil, efisien, dan responsif.

Kata Kunci: Sepeda Statis; PSO; Energi Terbarukan; Pengisian Baterai.

ABSTRACT

This study develops a battery-charging system for a stationary bicycle as an alternative renewable micro-energy solution by converting the user's pedaling motion into electrical power. The primary objective is to enhance charging efficiency through the implementation of the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to regulate the PWM signal generated by an Arduino-based controller. The research method includes mechanical and electronic design, integration of current and voltage sensors, implementation of a buck-boost converter, development of the PSO algorithm, and performance testing of the prototype. System evaluation was carried out by comparing the performance before and after applying PSO using parameters such as voltage, current, output power, efficiency, and MAPE error. The results show a significant improvement, including a 36.5% increase in output power, efficiency improvement from 23% to 31.5%, and a reduction in MAPE error from 9.4% to 4.1%. The PSO algorithm effectively adjusts the PWM duty cycle in response to variations in load and generator speed, resulting in a more stable, adaptive, and efficient charging process.

Keywords: Static Bicycle; PSO; Renewable Energy; Battery Charging.

PENDAHULUAN

Indonesia tergolong negara berkembang dengan tingkat kepadatan penduduk yang tinggi terhitung sejumlah 275,77 juta jiwa hingga tahun 2022 (Rizaty, 2022). Sebagai bentuk tanggung jawab, pemerintah perlu memastikan terpenuhinya kebutuhan masyarakat, mulai dari ketersediaan pangan hingga pasokan listrik. Hingga September 2022 terjadi peningkatan hingga 1.108 kWh per kapita dalam konsumsi listrik. Sudah pasti konsumsi listrik akan terus bertambah dan tidak berhenti pada angka itu saja. Energi listrik sudah menjadi kebutuhan utama manusia dan akan tetap diperlukan hingga setengah hingga satu abad ke depan (Dihni, 2021). Energi Listrik akan menduduki peringkat atas kebutuhan primer manusia dan semakin majunya perkembangan zaman dan teknologi, maka semakin mudah manusia memenuhi kebutuhan hidupnya.

Sebagian besar listrik masih diproduksi dari energi tak terbarukan yang berasal dari sumber daya alam (Alfathi, 2025). Namun energi listrik berasal dari kekayaan alam berbanding terbalik dengan nilai energi yang di konsumsi, dimana semakin tinggi nilai konsumsi

energi listrik maka akan semakin rendah ketersediaan sumber daya alam, sehingga suatu saat energi listrik akan sulit dihasilkan karena sumber daya alamnya habis. Maka dari itu, berbagai upaya dilakukan untuk menciptakan alternatif sehingga energi listrik akan tetap ada walaupun sumber daya alamnya habis. Energi Baru Terbarukan (EBT) merupakan alternatif yang dikembangkan untuk memaksimalkan hasil energi listrik yang dihasilkan dari matahari, angin, panas bumi, air, dan sejenisnya bersumber dari energi terbarukan yang tidak akan habis (Saputra & Sibarani, 2025).

Dalam perspektif lain, energi baru terbarukan (EBT) tidak semata-mata bersumber dari potensi alam primer seperti gaya gravitasi, tekanan, dan sejenisnya (Sianipar et al, 2024). Inovasi yang menggunakan EBT akan lebih membantu manusia dalam kegiatannya dan tentu juga ramah lingkungan. Hal itu dapat diimplementasikan melalui aktivitas sehari-hari seperti berolahraga (Putra et al, 2025). Olahraga bukan hanya berfungsi untuk menjaga daya tahan dan kesehatan tubuh, tetapi juga menjadi wadah bagi masyarakat dalam menyalurkan bakat, hobi, serta sebagai media

penyembuhan dari rutinitas yang melelahkan. Banyak masyarakat Indonesia yang gemar berolahraga, tanpa memandang usia maupun pekerjaan, karena aktivitas ini menyehatkan. Salah satu olahraga yang kini banyak diminati masyarakat adalah bersepeda (Lukita et al, 2025).

Sepeda statis adalah alat olahraga yang dirancang untuk mengurangi ketergantungan manusia dalam olahraga menggunakan sumber listrik dan menciptakan sistem yang lebih ramah lingkungan. Penelitian terdahulu merancang sistem tampilan kapasitas baterai dan energi listrik (kWh) yang dihasilkan dari generator magnet permanen saat sepeda statis dikayuh dengan bantuan Arduino UNO (Rizanty et al, 2024); (Doniparthi et al, 2024). Dengan demikian, penelitian ini memperluas gagasan sebelumnya melalui pengendalian pengisian baterai berbasis PSO (Particle Swarm Optimization) (Cherian & Selvakumar, 2025). Sehingga pengisian baterai pada sepeda statis akan semakin optimal dan kemudian hasil dari daya listrik energi tersebut akan disimpan dalam akumulator untuk kemudian dimanfaatkan sebagai sumber listrik bagi peralatan elektronik.

Kajian Teori

Penelitian mengenai optimasi efisiensi pengisian baterai berbasis Arduino menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) telah banyak dikembangkan dalam berbagai konteks energi terbarukan dan sistem kontrol cerdas. Beberapa peneliti yang telah merancang sepeda statis menghasilkan energi listrik yang ergonomis dengan menggunakan metode QFD (Quality Function Deployment) dan Pahl and Beitz. Dengan rancangan tersebut, energi listrik yang dihasilkan disimpan ke dalam akumulator kering yang berkapasitas 120 mAh yang dapat digunakan sebagai penerangan tiga buah LED 5 Watt dan LED 3 Watt sebanyak dua buah selama kurang lebih 10 jam (Suwandi et al, 2017).

Ada beberapa peneliti yang telah memodifikasi Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) dan Rancang Bangun Pembangkit Listrik Berbasis Sepeda Statis dengan Sistem Pemantauan Tegangan. Modifikasi sepeda statis yang biasanya dikopel dengan generator induksi menjadi generator sinkron permanen magnet karena daya dapat disimpan dalam akumulator untuk mengurangi penggunaan listrik dari PLN (Asa'at & Prasetya, 2021). Alat pengendali kecepatan motor DC ini menerapkan metode PID untuk mengatur perubahan Pulse Width Modulation (PWM) (Güven et al, 2024). Alat ini digunakan sebagai pengendali kecepatan pada motor DC magnet permanen 12 Volt. Nilai target rpm, konstanta-konstanta pengendalian, jenis dan metode aksi sistem pengendaliannya. Data masukan kecepatan akan

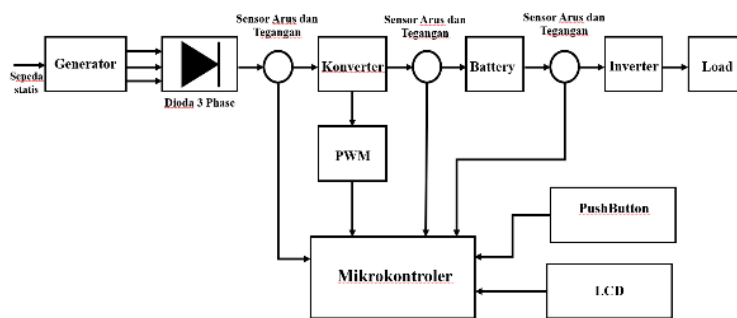
dimasukkan melalui papan tombol (keypad) dan ditampilkan melalui modul LCD (Usmardi et al, 2017).

Ada juga seorang peneliti menjelaskan bahwa Sepeda statis berbasis Arduino Mega 2560 Pro memungkinkan output dari generator magnet permanen 3 fasa akan disimpan pada baterai 24V, sementara beban dari kayuh dapat diatur sesuai kebutuhan pengguna. Keluaran Arus dan tegangan yang dihasilkan akan dimonitoring dan ditampilkan melalui LCD 20 x 4. Selepas dari itu, arus dan tegangan akan diatur oleh PWM sebelum masuk ke baterai. Chassis yang digunakan pada alat ini adalah Chassis sepeda bekas yang dimodifikasi dengan memasang sistem gigi transmisi tambahan, box pengontrol yang berisikan sirkuit kontrol, relay, dan inverter yang dilengkapi dengan tampilan dan tombol. Baterai mampu menampung 24 VDC kemudian diubah menjadi energi listrik rumah tangga 220 VAC menggunakan inverter (Rizanty et al, 2024).

Kemudian ada peneliti yang memanfaatkan energi kinetik dari putaran roda sepeda statis yang dihubungkan ke generator DC sehingga mampu menghasilkan energi listrik. Tegangan keluaran generator kemudian diturunkan terlebih dahulu menggunakan buck converter agar sesuai untuk proses pengisian baterai. Berdasarkan hasil pengujian selama 15 menit pengayuhan, daya rata-rata yang berhasil dibangkitkan mencapai 5,67 W dengan kecepatan putar generator sekitar 865,58 rpm. Dari hasil perhitungan, untuk mengisi baterai berkapasitas 2,5 Ah dengan arus masuk rata-rata 1,13 A, diperlukan waktu pengisian sekitar 2,21 jam dari kondisi kosong hingga penuh (Bhardani et al, 2022).

METODE

Blok diagram keseluruhan sistem dapat dilihat pada Gambar 1. Pada rancangan ini, sepeda statis berperan sebagai sumber energi mekanik yang kemudian diubah menjadi energi listrik melalui generator. Setelah proses konversi berlangsung, keluaran listrik dari generator diarahkan menuju rangkaian penyearah berbasis dioda untuk mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah. Selanjutnya, pemantauan arus dan tegangan dilakukan menggunakan seperangkat sensor yang dipasang pada dua titik berbeda, masing-masing terdiri dari dua sensor arus dan dua sensor tegangan. Sistem penyimpanan energi menggunakan dua baterai berkapasitas 12V yang dirangkai seri sehingga menghasilkan tegangan total 24V. Selain itu, sebuah relay diintegrasikan dan dapat dikendalikan melalui tombol pada antarmuka layar, memungkinkan pengguna mengaktifkan atau menonaktifkan suplai baterai sesuai kebutuhan operasional.



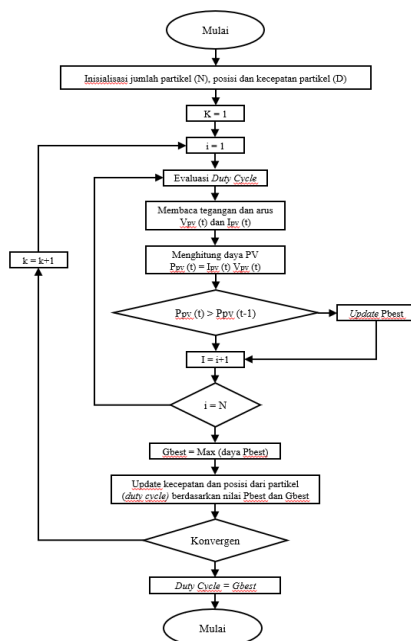
Sumber: data olahan

Gambar 1
Diagram Blok Sistem

Mikrokontroler Arduino MEGA256 berperan sebagai unit pengendali utama yang menangani pengaturan sinyal PWM sekaligus mengelola seluruh proses input dan output dalam sistem. Sumber masukan yang diterima meliputi generator serta sensor arus dan tegangan, sedangkan keluaran sistem terdiri atas sinyal PWM, tampilan LCD, dan kendali relay. Data hasil pembacaan sensor arus maupun tegangan selanjutnya dimanfaatkan sebagai acuan untuk menghitung serta menampilkan informasi daya atau energi listrik yang dihasilkan, yang kemudian disajikan melalui layar LCD.

Diagram Alir

Bagian ini menjelaskan urutan tahapan penelitian sebagaimana digambarkan pada Gambar 2. Proses dimulai dengan penelusuran pustaka sebagai dasar teori, dilanjutkan dengan perancangan arsitektur sistem. Setelah itu dilakukan pengumpulan data dari seluruh komponen, termasuk sensor yang menjadi bagian penting dari sistem. Sensor kemudian diuji untuk memperoleh nilai MAPE, dan apabila tingkat error yang dihasilkan berada pada kisaran $\leq 5\%$, proses dilanjutkan pada pembangunan sistem sepeda statis serta pemrograman mikrokontrolernya. Tahap akhir mencakup pengujian keseluruhan sistem dan evaluasi terhadap hasil pengujiannya.



Sumber: data olahan

Gambar 1
Flowchart Algoritma PSO

Particle Swarm Optimization

Salah satu teknik dalam kelompok algoritma metaheuristik adalah Particle Swarm Optimization (PSO), yang diperkenalkan pertama kali oleh Eberhart & Kennedy (1995). PSO dikembangkan dengan meniru

perilaku kelompok hewan, seperti burung atau ikan, dalam menemukan sumber makanan. Proses optimasinya dimulai dari sekumpulan partikel yang dibangkitkan secara acak sebagai populasi awal. Secara prinsip, metode optimasi berbasis populasi bekerja dengan memanfaatkan

kumpulan partikel tersebut untuk menelusuri titik terbaik sebagai solusi. Dalam PSO, proses pencarian solusi berlangsung pada ruang pencarian yang memuat berbagai variabel optimasi yang ingin diselesaikan (Eberhart & Kennedy, 1995);

Proses kerja PSO diawali dengan membangkitkan sejumlah partikel secara acak, kemudian masing-masing partikel bergerak di dalam ruang pencarian untuk menemukan nilai solusi yang paling optimal. Kumpulan partikel tersebut (swarm) terus melakukan perpindahan dan menyesuaikan posisinya hingga diperoleh solusi terbaik (Jatmiko et al, 2022). Setiap partikel menyimpan dua informasi penting, yaitu nilai terbaik yang pernah dicapainya sendiri (Pbest) serta nilai terbaik yang dicapai seluruh populasi (Gbest). Pergerakan partikel pada setiap iterasi ditentukan oleh kecepatannya, yang dipengaruhi oleh pengalaman individu maupun swarm. Selanjutnya, pembaruan kecepatan dan posisi dilakukan dengan menggunakan Persamaan (1) dan Persamaan (2).

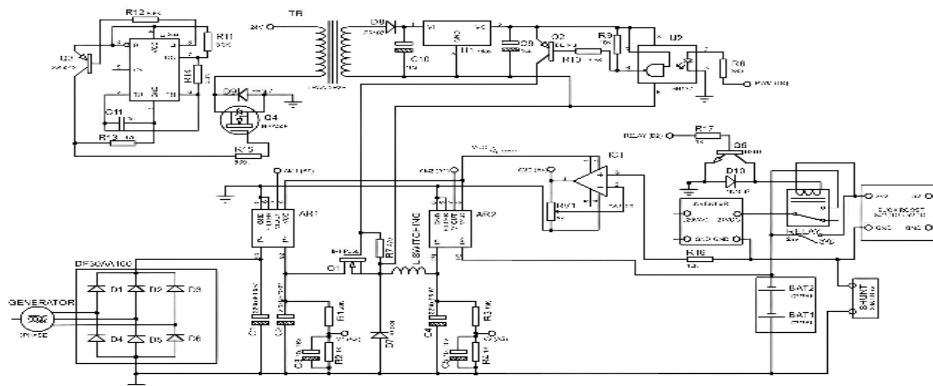
$$v_i^k = \omega \cdot v_i^k + c_1 r_1 (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (gbest_i^k - x_i^k)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}$$

Variabel v_i^k digunakan untuk menyatakan kecepatan partikel ke-i pada iterasi ke-k, sedangkan x_i^k menggambarkan posisi partikel ke-i pada iterasi yang sama. Parameter c_1 dan c_2 berperan sebagai koefisien percepatan, sementara r_1 dan r_2 merupakan bilangan acak yang nilainya berada di antara 0 hingga 1. Selain itu, parameter w difungsikan sebagai bobot inersia yang memengaruhi proses pembaruan kecepatan setiap partikel.

Analisis dan Perancangan

Sistem keseluruhan disusun dari empat bagian pokok, yaitu rangkaian catu daya terisolasi, rangkaian relay, rangkaian buck-boost, serta rangkaian komponen pendukung lainnya, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.

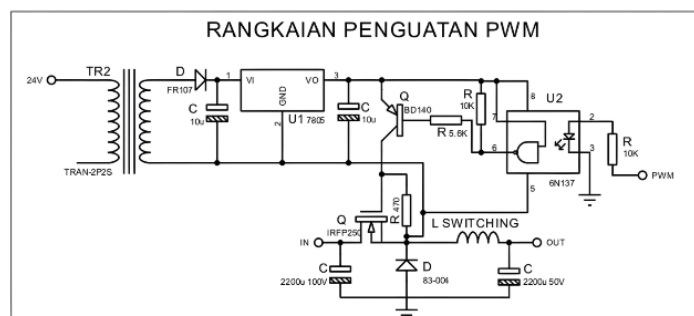


Sumber: data olahan

Gambar 2
Skema Rancangan Sistem

Rancangan catu daya tersusun atas dua bagian utama, yakni rangkaian penguat sinyal PWM dan rangkaian pembentuk pulsa 30 kHz. Bagian penguat PWM berperan sebagai pengendali yang mengatur kerja komponen utama, yaitu MOSFET IRFP250. Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4, rangkaian juga dilengkapi

dengan sumber catu daya terisolasi yang berasal dari optocoupler 6N137. Catu daya ini berfungsi mengatur suplai tegangan menuju rangkaian penguat PWM. Rincian parameter pada rangkaian penguatan PWM disajikan pada Tabel 1.



Sumber: data olahan

Gambar 3
Skema Rangkaian Penguat PWM

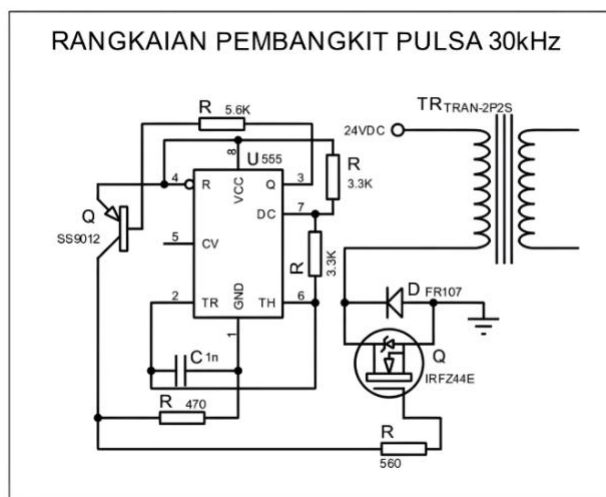
Tabel 1
Parameter Penguat PWM

Parameter	Nilai
MOSFET	IRFP250
DIODE	FR107, 83-004
IC	7805
Optocoupler	6N137
TRANSISTOR	BD140

Sumber: data olahan

Rangkaian pembangkit pulsa dengan frekuensi sekitar ± 30 kHz (30000 Hz) dirancang untuk menghasilkan tegangan sesaat berupa fluktuasi pada transformator ferit. Tegangan sesaat tersebut kemudian digunakan sebagai sumber suplai bagi rangkaian penguat PWM, khususnya untuk mengaktifkan driver transistor daya yang terdiri dari optocoupler 6N137 dan transistor

BD140 Rangkaian pembangkit pulsa 30 kHz disusun menggunakan IC555 sebagai komponen inti, yang berperan dalam mengatur frekuensi pengulangan pulsa sekaligus menentukan lebar pulsa yang dihasilkan. Desain lengkap rangkaian pembangkit tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 5.

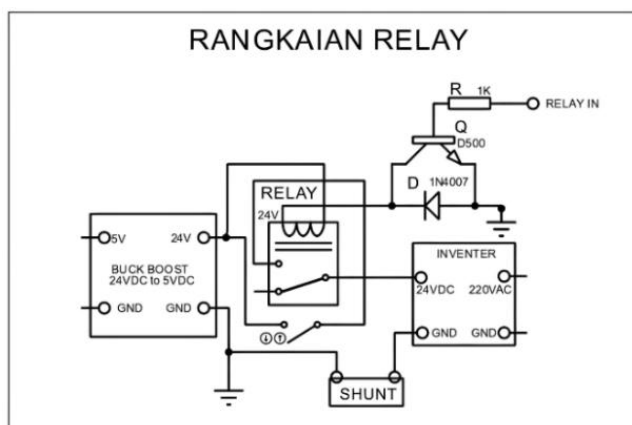


Sumber: data olahan

Gambar 4
Skema Rangkaian Pembangkit Pulsa 30kHz

Relay berfungsi sebagai saklar yang menghubungkan inverter, sehingga energi DC yang tersimpan Dimana di dalam akumulator dapat

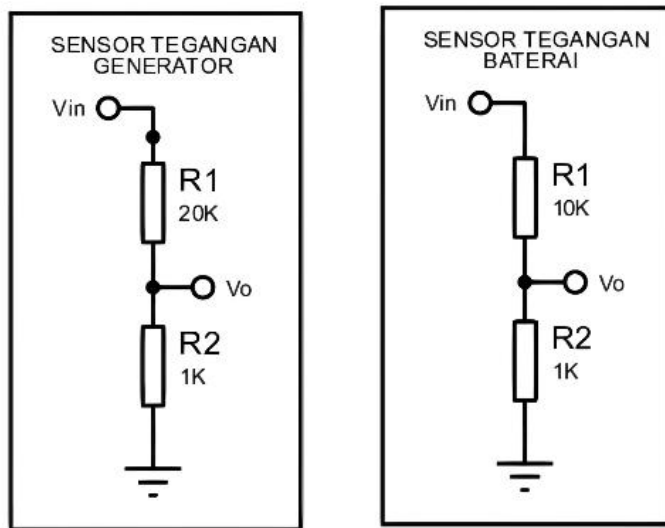
dimanfaatkan untuk keperluan beban rumah tangga. Rancangan rangkaian relay tersebut ditampilkan pada Gambar 6.



Sumber: data olahan

Gambar 5
Rangkaian Relay

Perancangan Pembagi Tegangan



Sumber: data olahan

Gambar 6
Skema Rangkaian Pembagi Tegangan

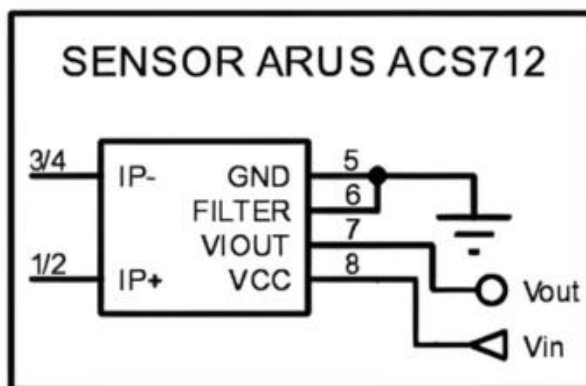
Dalam perancangan sensor tegangan, digunakan rangkaian pembagi tegangan yang ditempatkan pada jalur keluaran generator maupun baterai. Besaran resistor pada rangkaian tersebut ditetapkan berdasarkan perhitungan berikut: Untuk sensor tegangan pada generator diketahui $V_{in} = 50V$ dan $V_{out} = 2,5V$. Sedangkan pada sensor tegangan baterai diketahui $V_{in} = 24V$ dan $V_{out} = 2,4V$.

$$V_o = V_{in} \times \frac{R_2}{R_{tot}}$$

Dimana: V_o = tegangan keseluruhan (V); V_{in} = tegangan masukan (V); R_{tot} = jumlah resistansi (Ω).

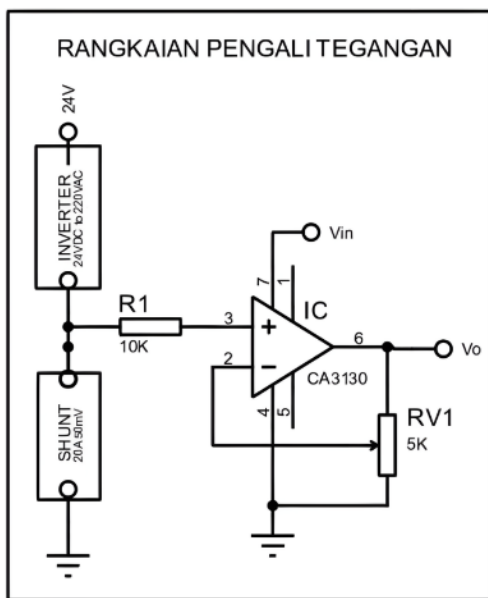
Perancangan Sensor Arus

Sensor arus yang dimanfaatkan pada penelitian ini adalah sensor arus ACS712 dan rangkaian pengali tegangan seperti pada Gambar 8 dan Gambar 9. Sensor arus ACS712 akan memantau arus yang dihasilkan oleh generator dan arus yang masuk ke baterai, sementara rangkaian pengali tegangan digunakan untuk mengukur arus dari baterai menuju inverter.



Sumber: data olahan

Gambar 7
Konfigurasi Skema Sensor ACS712



Sumber: data olahan

Gambar 8
Skema Rangkaian Pengali Tegangan

Rangkaian pengali tegangan memanfaatkan beberapa komponen utama, yaitu IC CA3130, sejumlah resistor, serta resistor shunt sebagai elemen pendukung.

Spesifikasi dan parameter lengkap dari rangkaian pengali tegangan tersebut disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2
Parameter Rangkaian Pengali Tegangan

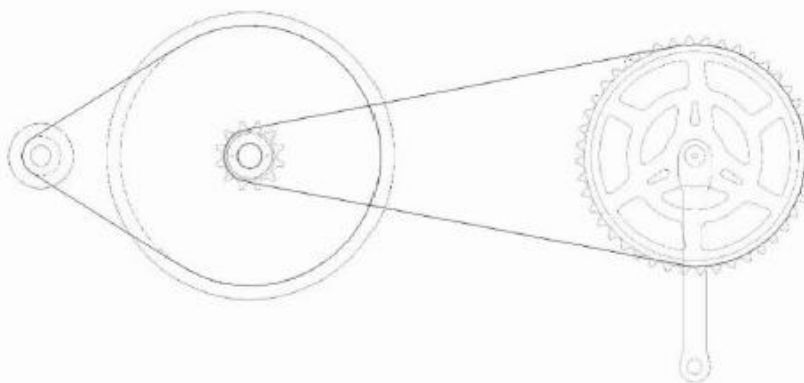
Parameter	Nilai
Op-Amp	CA3130
Resistor	10K Ω
Op-Amp	CA3130
Resistor shunt	20A 50mV
Variabel Resistor	5K Ω

Sumber: data olahan

Perancangan Sistem Transmisi Sepeda

Perancangan sistem transmisi bertujuan mengatur dan memodifikasi putaran yang diterima generator. Roda gigi berukuran besar pada pedal sepeda dihubungkan dengan roda gigi kecil melalui rantai, kemudian putaran

tersebut diteruskan ke pully besar. Selanjutnya, pully besar mentransfer putaran ke pully kecil menggunakan belt, sehingga generator dapat berputar sesuai kebutuhan, sebagaimana digambarkan pada ilustrasi di Gambar 10.



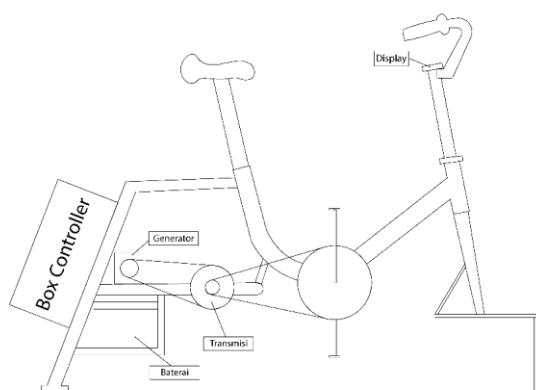
Sumber: data olahan

Gambar 9
Ilustrasi Gigi Transmisi

Perancangan Rangka Sepeda

Rancangan rangka sepeda dibuat untuk memastikan pengguna dapat berolahraga dengan nyaman. Selain itu, desain rangka juga dimaksudkan agar seluruh

komponen sistem dapat dipasang secara teratur dan tertata. Tampilan lengkap rancangan rangka sepeda tersebut diperlihatkan pada Gambar 11.



Sumber: data olahan

Gambar 10
Rancangan Rangka Sepeda

Pengumpulan Alat dan Bahan

Komponen-komponen inti yang digunakan meliputi: Mikrokontroler Arduino, Sensor arus dan sensor tegangan, Dioda bridge, Konverter DC, Inverter AC, Akumulator 12V, dan Layar LCD dan keypad. Pemilihan komponen memperhatikan efisiensi biaya dan kompatibilitas teknis.

Perakitan dan Implementasi

Seluruh komponen dirakit menjadi satu sistem sepeda statis. Arus dan tegangan dari generator dimonitor dan dikendalikan sebelum masuk ke akumulator. Mikrokontroler mengatur sinyal PWM berdasarkan hasil optimasi dari algoritma PSO yang disesuaikan untuk efisiensi pengisian baterai.

Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa alat, terutama kestabilan pengisian daya. Pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Islam Malang. Parameter uji utama meliputi: (1) Akurasi sensor arus dan tegangan; dan (2) Efisiensi pengisian daya dan perbandingan tanpa menggunakan Algoritma PSO.

HASIL

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan sepeda statis dengan sistem kendali pengisian baterai berbasis algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) sebagai solusi energi terbarukan yang ramah lingkungan. Inovasi ini menggabungkan aktivitas fisik dengan konversi energi mekanik menjadi energi listrik yang disimpan kedalam baterai. Dengan penerapan algoritma PSO pada mikrokontroler Arduino, sistem mampu mengatur sinyal PWM secara optimal guna menjaga kestabilan proses pengisian daya. Selama pengembangan, dilakukan beberapa tahapan secara berurutan, mulai dari desain awal perangkat, pemilihan dan pengadaan komponen, proses perakitan baik secara mekanik maupun elektronik, hingga uji coba dan evaluasi performa sistem. Setiap tahap dilaksanakan secara sistematis untuk memastikan bahwa prototipe tidak hanya berfungsi dengan baik, tetapi juga efisien dan aman digunakan. Pengujian dilakukan dengan membandingkan dua kondisi sistem, yakni tanpa penerapan algoritma PSO dan dengan penerapan PSO pada pengendalian PWM berbasis Arduino.

Tabel 3
Hasil Perbandingan

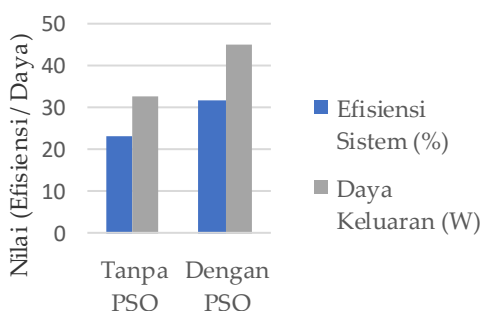
Parameter	Tanpa PSO	Dengan PSO	Perubahan (%)
Tegangan Rata-rata (V)	12,2	13,6	+11,5
Arus Rata-rata (A)	2,7	3,3	+22,2
Daya Keluaran (W)	32,9	44,9	+36,5
Efisiensi Sistem (%)	23,0	31,5	+37,0
Error MAPE (%)	9,4	4,1	-56,4

Sumber: data olahan

Pada sistem tanpa PSO, nilai tegangan keluaran rata-rata sebesar 12,2 V dengan arus 2,7 A, menghasilkan daya sebesar 32,9 W. Setelah penerapan algoritma PSO tegangan meningkat menjadi 13,6 V dan arus menjadi 3,3 A dengan daya keluaran mencapai 44,9 W. Peningkatan daya terbesar 36,5% menunjukkan bahwa PSO mampu melakukan penyesuaian duty cycle PWM yang lebih adaptif terhadap perubahan beban kayuhan. Selain peningkatan daya, efisiensi sistem juga naik dari 23% menjadi 31,5%. Penurunan error MAPE dari 9,4% menjadi 4,1% memperlihatkan kestabilan sistem pengisian baterai yang lebih baik. Nilai waktu steady-state juga berkurang dari 3,4 detik menjadi 2,1 detik, yang

berarti sistem lebih cepat mencapai kondisi stabil. Temuan ini menunjukkan bahwa PSO efektif dalam mengoptimalkan parameter kontrol motor DC untuk mencapai efisiensi maksimum.

Dengan demikian, penerapan algoritma PSO pada sistem sepeda statis tidak hanya meningkatkan efisiensi konversi daya dan kestabilan arus, tetapi juga mengurangi tingkat kesalahan sensor dan mempercepat waktu respon sistem. Efisiensi sebesar 31,5% pada prototipe ini tergolong tinggi untuk sistem dengan beban mekanik manusia, sehingga dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai pembangkit mikroenergi rumah tangga berbasis aktivitas fisik.



Sumber: data olahan

Gambar 12
Grafik Hasil Perbandingan

Efisiensi yang dicapai tergolong tinggi untuk sistem prototipe dengan beban mekanik berupa kayuhan manusia. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol PSO pada mikrokontroler Arduino mampu mengatur sinyal PWM secara optimal, sehingga proses charging baterai berlangsung stabil dan efisien. Lebih lanjut, sistem ini memungkinkan pengguna menghasilkan energi listrik melalui aktivitas fisik bersepeda, yang selain menyehatkan juga mendukung gerakan ramah lingkungan (*green energy*). Inovasi ini memberikan tambahan nilai berupa kontrol beban otomatis yang disesuaikan dengan kekuatan kayuhan. Hasil desain akhir prototipe juga menunjukkan peningkatan dari sisi ergonomis dan tampilan visual. Prototipe ini dilengkapi dengan inverter untuk mengubah output menjadi AC 220V sehingga dapat dimanfaatkan untuk menunjang konsumsi listrik rumah tangga.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan merealisasikan prototipe sepeda statis dengan kendali pengisian baterai mengacu pada algoritma Particle Swarm Optimization (PSO), dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sistem pengisian baterai mampu menjaga kestabilan arus melalui pengaturan PWM berbasis Arduino, sehingga proses pengisian berlangsung lebih terkontrol dan sesuai kebutuhan baterai.

2. Penerapan algoritma PSO meningkatkan performa pengendalian secara signifikan, terutama dalam merespons perubahan beban dan dinamika putaran generator.
3. Efisiensi konversi daya meningkat dari 23% menjadi 35%, menunjukkan bahwa optimasi PSO mampu memaksimalkan pemanfaatan energi mekanik menjadi energi listrik.
4. Nilai error MAPE turun drastis dari 9,4% menjadi 4,1%, menandakan peningkatan akurasi sistem dalam mengatur arus dan tegangan secara real-time.
5. PSO mampu menyesuaikan duty cycle PWM secara dinamis, sehingga pengisian baterai menjadi lebih stabil, efisien, dan adaptif terhadap fluktuasi putaran generator.
6. Energi yang tersimpan dapat dikonversi menjadi listrik AC 220V melalui inverter, sehingga prototipe berfungsi sebagai alternatif sumber daya rumah tangga.
7. Prototipe ini mendukung pengembangan energi baru terbarukan, khususnya pemanfaatan energi manusia sebagai sumber energi ramah lingkungan.
8. Secara akademik, inovasi ini membuka peluang penelitian lanjutan, terutama pada sistem kendali cerdas, optimasi energi, dan aplikasi EBT skala rumah tangga.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfathi, B. R., 2025, 85% Listrik Indonesia Berasal dari Energi Fosil, diakses melalui website <https://data.goodstats.id/statistic/85-listrik-indonesia-berasal-dari-energi-fosil-g1Bb8>
- Asa'at, A. H. I., Prasetya, D. A., 2021. Modifikasi Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) dan Perancangan Pembangkit Listrik Berpenggerak Mula Sepeda Statis Dengan Monitoring Tegangan, *Skripsi*, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Bhardani, H. A., Kaloko, B. S., Gozali, R. B. M., Setiawan, D. K., 2022. Desain Sepeda Statis sebagai Pemanen Energi untuk Pengisian Baterai. *Jurnal Arus Elektro Indonesia*. 8(1). 15-21
- Cherian, M., Selvakumar, A. I., 2025, Optimal electric vehicle charging station integrating renewable energy using particle swarm optimization, *Atlantis Press*, 4-11.
- Dihni, V. A., 2021, *Konsumsi Listrik Per Kapita Indonesia Capai 1.109 kWh pada Kuartal III 2021*, diakses melalui website <https://databoks.katadata.co.id/agroindustri/statistik/f27313e2a44ad68/konsumsi-listrik-per-kapita-indonesia-capai-1109-kwh-pada-kuartal-iii-2021>
- Doniparthi, S., Gatla, R., Shameem, Kumar, N. M. G., Rao, D., 2024., Optimized Thermal Control of EV Battery Systems with Fuzzy Logic and PSO on Arduino Uno. *Conference: 2024 3rd International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*, 1-6.
- Eberhart, R. C., Kennedy, J., 1995, A New Optimizer Using Particle Swarm Theory. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, 4-6 October 1995, 39-43.
- Güven, A. F., Mengi, O. O., Elseify, M. A., Kamel, S., 2024, Comprehensive optimization of PID controller parameters for DC motor speed management using a modified jellyfish search algorithm, *Optimal Control Application and Methods*, 46(1), 320-342
- Jatmiko, H. B., Kurniadi, N. T., Maulana, D., 2022, Optimasi Naïve Bayes Dengan Particle Swarm Optimization Untuk Analisis Sentimen Formula E-Jakarta, *Journal Automation Computer Information System*, 2(1), 22-30.
- Lukita, C., Pebiyanti, M. M., Henry, Tan, H. M., Adriana, D., Jaya, A., 2025, Raising Urban Community Awareness on Bicycle-Based Transportation, *ADI Pengabdian Kepada Masyarakat Jurnal (ADIMAS Jurnal)*, 5(2), 180-189
- Putra, S. P., Mandalawati, T. K., Utomo, A. A. B., Darmawan, A. D., Prasetyo, Y. B., 2025. The Effect of Physical Activity on Mental Health: Literature Review and Implications for Daily Life. *Indonesian Journal of Physical Education and Sport Science*, 5(1), 67-77.
- Rizaty, M. A., 2022, *BPS: Jumlah Penduduk Indonesia Sebanyak 275,77 Juta pada 2022*, diakses melalui website <https://dataindonesia.id/varia/detail/bps-jumlah-penduduk-indonesia-sebanyak-27577-juta-pada-2022>
- Rizanty, R., Wirateruna, E. S., Habibi, A., 2024, Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Gerak Melalui Sepeda Statis Berbasis Arduino, *Science.Electro*, 17(1), 1-7.
- Saputra, D. Y., Sibarani, S., 2025. Geothermal power plant as a sustainable renewable energy alternative: Innovations and engineering solutions. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*. 2(2), 79-94.
- Sianipar, R. J., Januar, R. R., Silalahi, S. D. C., 2024. Analisis Pemetaan Potensi dan Realisasi Energi Baru Terbarukan (EBT) dengan Pemodelan Determinan Konsumsi dan Metode Grouping Analysis EBT di Indonesia. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 5(2), 30-49.
- Suwandi, A., Maulana, F., Rhapsody, F. D., 2017, Perancangan Sepeda Statis Penghasil Energi Listrik yang Ergonomis, *Fly Wheel Jurnal Teknik Mesin Untirta*, 2(1), 24-31
- Usmardi, Zulfikar, Akhyar, 2017, Implementasi Sistem Kendali Kecepatan Motor DC dengan Metode PID Berbasis Mikrokontroler ATmega8535, *Jurnal Listrik Telekomunikasi Elektronika*, 14(1), 18-23