

Analisis Kinerja Dan Implementasi Mppt Berbasis PSO Pada Sistem Panel Surya Untuk Peningkatan Efisiensi Energi

Suwitno¹⁾, Muhamad iqbal salaeh²⁾, Dian Yayan Sukma³⁾, Amir Hamzah⁴⁾,
Iswadi Hasyim Rosma⁵⁾, Nurhalim⁶⁾

^{1,2,3,4,5,6}Fakultas Teknik, Teknik Elektro, Universitas Riau,
Pekanbaru, Indonesia *Email Penulis :*
Suwitno@lecturer.unri.ac.id

Abstrak

Penggunaan panel surya sebagai sumber energi terbarukan seringkali kurang optimal akibat fluktuasi iradiasi matahari dan metode pembebanan langsung (*direct coupling*) yang memicu terjadinya jatuh tegangan (*voltage drop*). Untuk mengatasi permasalahan inefisiensi tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) cerdas menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang diintegrasikan dengan rangkaian *Boost Converter* pada panel surya berkapasitas 100 WP. Pengambilan data dan evaluasi kinerja sistem dilakukan melalui pengujian lapangan selama tujuh hari berturut-turut yang mencakup berbagai dinamika cuaca, mulai dari kondisi mendung ekstrem hingga panas terik. Hasil pengujian memvalidasi bahwa algoritma PSO beroperasi secara lincah dan adaptif dalam memanipulasi *duty cycle* untuk melacak Titik Daya Maksimum (MPP). Sistem ini terbukti sangat andal terutama pada kondisi iradiasi optimal (tinggi), di mana algoritma PSO sukses mencegah fenomena jatuh tegangan yang dialami oleh sistem tanpa kendali. Dari sisi perangkat keras, purwarupa *Boost Converter* menunjukkan kualitas konversi yang sangat baik dengan mempertahankan efisiensi secara konsisten di atas 92% pada setiap siklus pengujian harian (puncak 93,6%). Secara keseluruhan, sistem kendali MPPT PSO berhasil menghimpun total energi sebesar 2156 Wh selama tujuh hari pengujian, melampaui sistem konvensional tanpa MPPT yang hanya memanen 1507 Wh. Hal ini membuktikan bahwa purwarupa yang dirancang sukses memberikan persentase peningkatan ketersediaan energi total yang sangat signifikan sebesar 43.06%.

Kata Kunci: *Boost Converter*, Efisiensi Energi, *Maximum Power Point Tracking*, Panel Surya, *Particle Swarm Optimization*.

I. PENDAHULUAN

Transisi energi menuju sumber daya terbarukan menjadi urgensi global, termasuk di Indonesia, guna mengurangi ketergantungan pada energi fosil yang berdampak buruk pada lingkungan. Berdasarkan data PT. PLN (2023)[1], konsumsi listrik nasional mencapai 288.435,78 GWh, di mana bauran energinya masih sangat didominasi oleh pembangkit konvensional seperti PLTU (28,01%) dan PLTGU (16,57%), sedangkan energi terbarukan baru menempati porsi yang sangat minim (0,04%). Sebagai negara tropis yang berada di garis khatulistiwa,

Indonesia memiliki potensi energi surya yang melimpah sebagai alternatif solusi energi bersih melalui pemanfaatan sistem Photovoltaic (PV) [2].

Meskipun memiliki potensi besar, implementasi sistem PV dihadapkan pada tantangan fluktuasi daya keluaran akibat perubahan kondisi lingkungan seperti suhu dan iradiasi matahari [3]. Tantangan ini menjadi semakin kompleks ketika susunan panel surya mengalami kondisi partial shading (bayangan sebagian) akibat awan, pepohonan, atau struktur bangunan. Pada kondisi tersebut, kurva karakteristik daya-tegangan (P-V) tidak lagi membentuk satu puncak tunggal, melainkan menghasilkan puncak ganda atau multiple peaks [4][5].

Jika PV dihubungkan langsung ke beban tanpa sistem kendali yang tepat dalam kondisi ini, efisiensi konversi daya akan menurun secara drastis.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut dan memaksimalkan ekstraksi daya dari PV, diperlukan integrasi DC-DC converter, khususnya *Boost Converter*, yang dikendalikan oleh sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) [6]. MPPT konvensional seperti *Perturb & Observe* (P&O) atau *Incremental Conductance* umumnya efektif pada kondisi iradiasi seragam, namun memiliki keterbatasan dan rentan terjebak pada titik local maxima saat terjadi *partial shading* [7]. Oleh karena itu, pendekatan MPPT berbasis metaheuristik terus dikembangkan karena kemampuannya dalam melacak titik daya maksimum global (*Global Maximum Power Point*) secara lebih adaptif dan efisien [8].

Salah satu algoritma metaheuristik yang terbukti tangguh untuk sistem MPPT adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO). Penelitian terdahulu oleh Ferlita [9], menunjukkan bahwa PSO memiliki keunggulan signifikan dalam kecepatan tracking (0,732 detik) dibandingkan *Firefly Algorithm* (FA), menjadikannya sangat responsif terhadap perubahan cuaca yang dinamis. Studi lain oleh Hakim et al. [10] juga mengonfirmasi bahwa MPPT berbasis PSO mampu menghasilkan daya keluaran rata-rata yang lebih tinggi (16,79 W) dibandingkan *Artificial Bee Colony* (ABC) (14,52 W). Keunggulan utama PSO terletak pada kesederhanaan komputasinya, kemampuan menangani masalah non-linear, serta konvergensi yang cepat dan akurat.

Kinerja optimal sebuah sistem pembangkit surya sangat bergantung pada sinergi antara algoritma pelacak daya yang cepat dan konverter daya yang efisien [11]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan merancang sistem MPPT berbasis algoritma PSO yang diintegrasikan dengan *Boost Converter* guna mengoptimalkan daya keluaran panel surya.

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat dievaluasi secara komprehensif kinerja PSO dalam mengatasi kondisi fluktuasi iradiasi, sehingga mampu memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi PLTS yang lebih efisien, adaptif, dan andal di masa depan.

II. LANDASAN TEORI

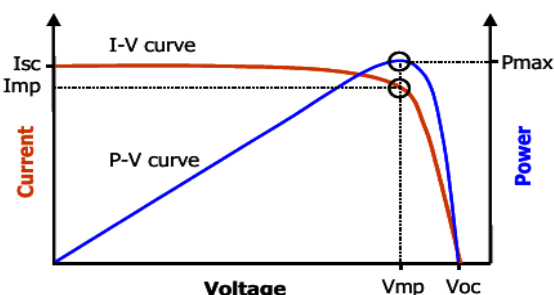
2.1 Photovoltaic (PV)



Gambar 2. 1 Photovoltaic (PV)

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Photovoltaic (PV) merupakan komponen utama berbahan semikonduktor yang berfungsi mengonversi iradiasi matahari secara langsung menjadi energi listrik arus searah (DC) [6]. Kinerja dan daya keluaran sistem PV sangat fluktuatif karena sangat bergantung pada kondisi lingkungan, khususnya intensitas iradiasi matahari dan suhu modul.

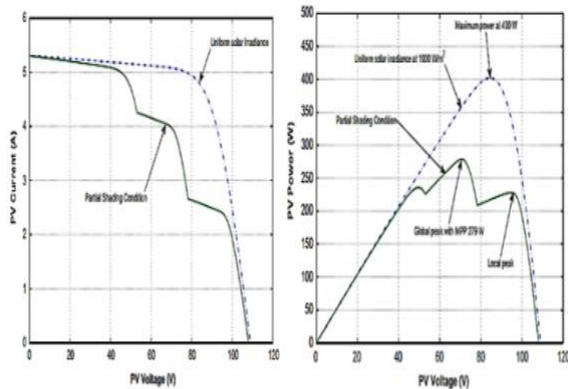
2.1.1 Karakteristik Photovoltaic dan Efek Partial Shading



Gambar 2. 2 Kurva I-V dan P-V dari modul PV

Kinerja modul *Photovoltaic* (PV) direpresentasikan melalui kurva karakteristik arus-tegangan (I-V) dan daya-tegangan (P-V). Kurva ini sangat dipengaruhi oleh intensitas iradiasi matahari dan suhu lingkungan. Pada kondisi normal dengan iradiasi seragam, kurva P-V hanya memiliki

satu titik puncak yang disebut *Maximum Power Point (MPP)*.

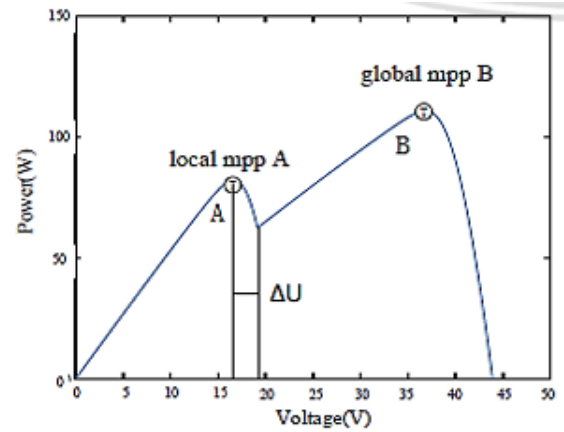


Gambar 2. 3 Kurva Karakteristik *Partial Shading Condicion (PSC)*

Namun, pada kondisi lapangan, modul surya kerap mengalami PSC akibat bayangan awan atau pepohonan. Penggunaan bypass diode pada modul surya untuk mencegah kerusakan sel pada kondisi PSC menyebabkan kurva P-V memiliki karakteristik multi-puncak (*multiple peaks*), yang terdiri dari beberapa *local peak* dan satu *global peak* [4]. Karakteristik kompleks ini menyebabkan metode pelacakan daya konvensional sering mengalami kegagalan karena terjebak pada *local peak*.

2.2 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT merupakan teknik kendali elektronik yang digunakan untuk mengekstraksi daya maksimal dari modul PV secara terus-menerus. Sistem ini beroperasi dengan cara mengatur nilai *duty cycle* pada konverter DC-DC, sehingga memaksakan titik operasi tegangan panel surya agar selalu berada tepat di titik MPP [12]. Pada kondisi lingkungan dengan iradiasi matahari yang merata, metode MPPT konvensional seperti *Perturb and Observe (P&O)* mampu bekerja dengan baik. Namun, ketika sistem mengalami PSC yang memunculkan karakteristik multi-puncak (*multiple peaks*) pada kurva daya, metode konvensional menunjukkan kelemahan mendasar [4].

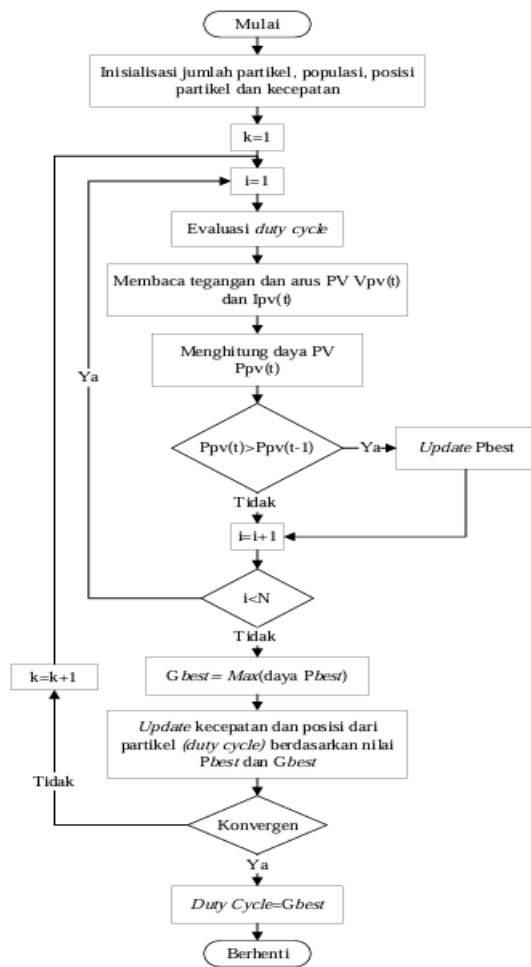


Gambar 2. 4 Tampak Dua Titik Puncak Daya: *Local Maximum Power Point (LMPP)* dan *Global Maximum Power Point (GMPP)*

Algoritma konvensional umumnya tidak mampu membedakan tingkat puncak daya, sehingga rentan terjebak pada titik puncak lokal (*local peak*) dan gagal mencapai puncak tertinggi sesungguhnya (*global peak*), yang berakibat pada penurunan efisiensi sistem secara drastis. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan percobaan algoritma PSO agar dapat mencapai titik *Global Maximum Power Point (GMPP)*.

2.2.1 MPPT Berbasis *Particle Swarm Optimization (PSO)*

Untuk mengatasi keterbatasan metode konvensional pada kondisi PSC, diterapkan algoritma metaheuristik yang memiliki kemampuan eksplorasi ruang pencarian yang lebih adaptif, seperti PSO [13]. Algoritma ini terinspirasi dari perilaku pergerakan kawanan burung (*bird flocking*). Dalam implementasi sistem MPPT, setiap "partikel" merepresentasikan nilai *duty cycle* dari konverter DC-DC yang sedang dievaluasi. Partikel-partikel ini akan terus bergerak dan memperbarui posisinya untuk melacak *global peak* dengan mengevaluasi rekam jejak posisi terbaik dari masing-masing individu (*Pbest*) dan membandingkannya dengan posisi terbaik dari seluruh kawanan (*Gbest*) [2] [13].



Gambar 2. 5 Diagram alir MPPT dengan PSO

Adapun Persamaan PSO dalam Pembaruan kecepatan (v) dan posisi (x) dari partikel ke- i pada iterasi ke- t diekspresikan secara matematis melalui Persamaan (1) dan (2):

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (Pbest_i - x_i(t)) + c_2 r_2 (Gbest - x_i(t)) \quad (1)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2)$$

Di mana, w merupakan bobot inersia yang mengontrol keseimbangan antara pencarian global dan lokal, c_1 dan c_2 adalah parameter akselerasi kognitif dan sosial, sedangkan r_1 dan r_2 adalah nilai probabilitas acak pada rentang 0 hingga 1.

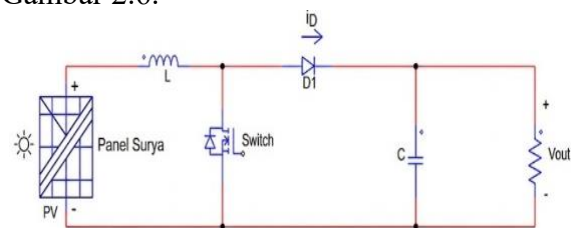
Keberhasilan dan kinerja algoritma pelacakan PSO ini kemudian dievaluasi

menggunakan parameter efisiensi pelacakan (η), yang diformulasikan sebagai rasio antara daya keluaran stabil yang berhasil dilacak (P_{out}) terhadap daya maksimum aktual yang dapat dibangkitkan sistem (P_{max}):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{max}} \times 100\% \quad (3)$$

2.3 Desain Boost Converter Sumber Listriknya Photovoltaik

Pada unit Konverter Boost DC-DC yang terhubung ke sistem PV, nilai parameter tegangan masukan konverter (V_i) bersifat tidak tetap atau tidak konstan. Hal ini disebabkan oleh fluktuasi intensitas cahaya matahari dan suhu pada panel surya. Sebagai akibatnya, tegangan keluaran (V_o) juga menjadi tidak konstan [14]. Untuk mempertahankan efisiensi sistem melalui pelacakan titik daya maksimum atau MPPT, nilai *Duty Cycle* (D) pada konverter harus terus berubah secara dinamis setiap saat [15]. Adapun konfigurasi rangkaian konverter DC-DC dengan sumber listrik dari fotovoltaik tersebut secara detail ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Rangkaian Boost Converter

Untuk mendesain parameter konverter boost pada sistem fotovoltaik (PV), langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut [14][16]:

Pertama: Menentukan spesifikasi modul PV penentuan spesifikasi dilakukan pada dua kondisi utama, yaitu: *Standard Test Condition* (STC): Digunakan untuk mengukur kinerja maksimal suatu panel surya pada kondisi radiasi 1000 W/m^2 dan suhu 25°C . Parameter yang digunakan adalah Tegangan Maksimum (V_{mp}) Arus Maksimum (I_{mp}), dan Daya Maksimum (P_{mp}) sesuai dengan data sheet fotovoltaik yang digunakan. Kondisi Buruk:

Dilakukan pada kondisi radiasi 50 W/m² dan temperatur 25°C Pada kondisi ini, kemampuan tegangan turun sebesar $\pm 10\%$ [16]. Tegangan maksimum yang dapat dibangkitkan adalah 90% dari nilai tegangan maksimum data sheet, dan daya maksimum yang diperoleh sebesar 5% dari daya maksimum data sheet.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai resistansi internal modul PV pada titik daya maksimum MPP. Perhitungan ini dilakukan pada kondisi radiasi 1000 W/m² dan suhu 25 °C dengan menggunakan pendekatan matematis sebagai berikut [16]:

$$R_{mp} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (4)$$

Untuk menghitung resistansi beban (Ro):

$$R_o = 2,5 \times R_{mp} (50 \text{ W/m}^2 \& 25^\circ\text{C}) \quad (5)$$

Menentukan nilai *duty cycle* pada MPP:

$$D_{mp} = 1 - \sqrt{\frac{R_{mp}}{R_o}} \quad (6)$$

Masing-masing untuk radiasi 1000 W/ m² dan suhu 25°C dan radiasi 50 W/ m² dan suhu 25°C.

Lalu Menghitung nilai tegangan *output* Vo dan arus *output* Io:

$$V_o = \frac{V_i}{1-D} \quad (7)$$

$$I_o = \frac{V_o}{R_o} \quad (8)$$

Masing-masing radiasi 1000 W/ m² dan suhu 25°C dan radiasi 50 W/ m² dan suhu 25°C.

Kemudian menghitung nilai riak tegangan *output* dan arus *output* yaitu Vi, dan Vo pada radiasi 1000 W/ m² dan suhu 25°C dan Io pada radiasi 50 W/ m² dan suhu 25°C, dengan nilai:

$$\Delta V_i = 0,002 \times V_i \text{ dan } \Delta V_o = 0,002 \times V_o \text{ serta } \Delta I_o = 0,4 \times I_o$$

Dan terakhir menghitung resistansi *input* yang dipantulkan (Ri) pada *input* modul PV: $R_i = R_o (1 - D^2)$, Dimana *duty cycle* (D) diambil pada kondisi STC. Dari Langkah pertama sampai terakhir diperoleh persamaan untuk menentukan nilai kapasitor *input* (Cin), Co, L.

$$C_i = \frac{4 \times V_{mp} \times D_{mp}}{\Delta V_i \times f \times R_i} \quad (9)$$

$$C_o = \frac{2 \times V_o \times D_{mp}}{\Delta V_o \times f \times R_o} \quad (10)$$

$$L = \frac{V_{mp} \times D_{mp}}{2 \times \Delta I_o \times f} \quad (11)$$

2.4 Pengendalian Pulse Width Modulation (PWM)

Dalam arsitektur sistem MPPT, PWM berfungsi sebagai antarmuka esensial antara sistem kendali digital (mikrokontroler) dan rangkaian daya (*Boost Converter*). Teknik modulasi ini mengendalikan penyaluran daya secara efisien dengan cara memanipulasi durasi kondisi aktif (ON) dan non-aktif (OFF) pada saklar elektronik (MOSFET) tanpa mengubah frekuensi pensaklarannya [17].

Parameter fundamental yang diatur oleh algoritma optimasi adalah *duty cycle* (D), yakni representasi persentase waktu saklar dalam kondisi ON (ton) terhadap total waktu satu periode gelombang (T). Secara matematis, formulasi *duty cycle* dinyatakan pada Persamaan:

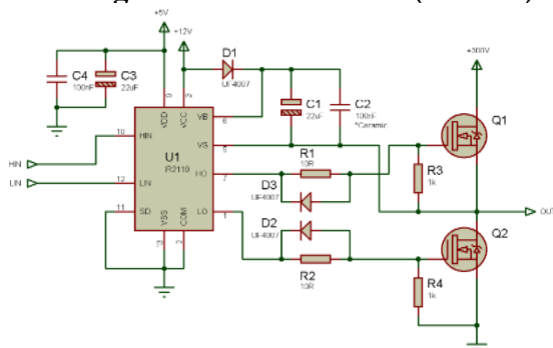
$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{of}} \times 100\% = \frac{t_{on}}{T} \times 100\% \quad (12)$$

Dengan memodifikasi nilai *duty cycle* secara dinamis berdasarkan kalkulasi algoritma PSO, mikrokontroler memicu gerbang (*gate*) MOSFET untuk menyesuaikan tegangan rata-rata dan arus keluaran modul surya.

33

Sinergi ini memastikan bahwa sistem konverter dapat terus menggeser dan menahan titik operasi PV tepat pada daya maksimumnya, terlepas dari fluktuasi iradiasi matahari [18].

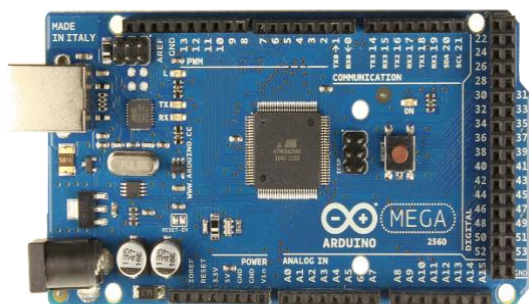
2.5 Rangkaian Driver Mosfet (IR2110)



Gambar 2. 7 Rangkaian Driver Mosfet (IR2110)

Pengoperasian MOSFET pada sisi atas (*high-side*) dalam konfigurasi *Boost Converter* memerlukan sirkuit driver khusus untuk memastikan proses switching yang efisien. Pada penelitian ini, IC IR2110 digunakan sebagai high-side driver yang berfungsi mengonversi sinyal kendali PWM dari mikrokontroler menjadi pemacu gerbang (*gate*) MOSFET. Karena sistem menggunakan MOSFET tipe N-channel pada tegangan input tinggi (+300 V), maka diterapkan teknik bootstrap yang terdiri dari dioda *fast recovery* UF4007 serta kombinasi kapasitor 22 µF dan 100 nF. Mekanisme ini krusial untuk mengangkat tegangan gate melampaui tegangan source sehingga nilai V_{GS} tetap positif dan memadai untuk mengaktifkan MOSFET secara penuh.

2.6 Arduino Atmega 2560



Gambar 2. 8 Arduino Atmega 2560

34

Pusat kendali sistem diimplementasikan menggunakan mikrokontroler ATmega2560. Kapasitas memori flash sebesar 256 KB dan kecepatan clock 16 MHz pada mikrokontroler ini dipilih karena sangat memadai untuk mengakomodasi kompleksitas memori dan komputasi iteratif dari algoritma PSO [19] [20].

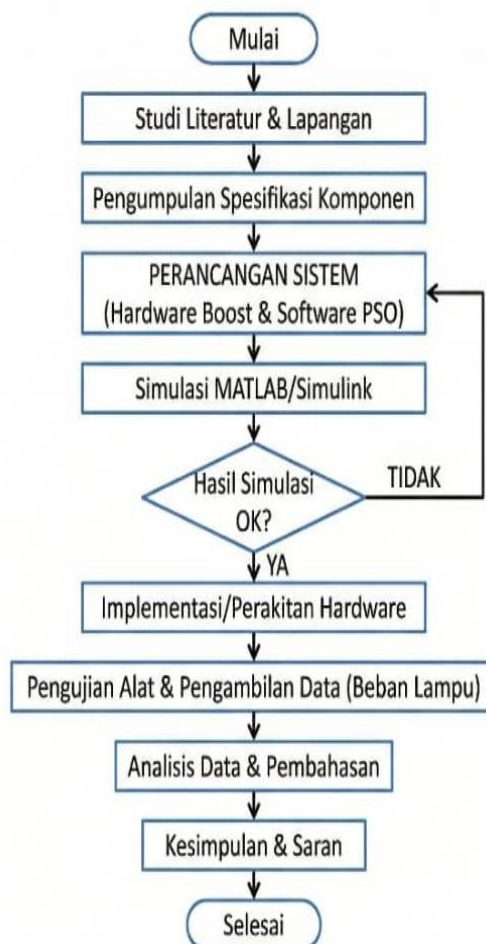
III. METODE PENELITIAN

3.1 Umum

Metode penelitian adalah serangkaian langkah sistematis yang mencakup berbagai tahapan dalam pelaksanaan penelitian skripsi. Untuk menjawab pertanyaan penelitian dan mencapai tujuan penelitian ini.

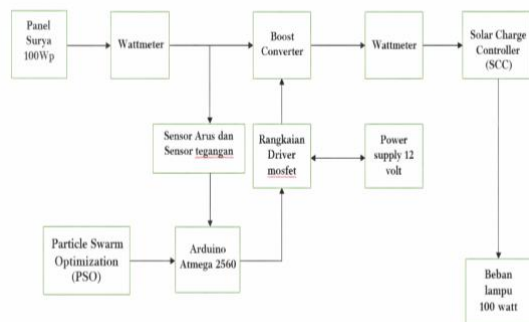
3.2 Alur Penelitian

Alur penelitian adalah langkah-langkah atau tahapan yang dilakukan dalam penelitian. Berikut *Flowchart* dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian

3.3 Skema Perancangan Pengujian



Gambar 3. 2 Skema Perancangan Sistem

Penelitian ini mengusulkan desain dan implementasi perangkat keras sistem MPPT berbasis algoritma PSO yang diintegrasikan dengan *Boost Converter*. Prototipe sistem dirancang untuk mengekstraksi daya maksimal dari modul panel surya berkapasitas 100 Wp secara adaptif terhadap fluktuasi iradiasi matahari dan suhu lingkungan.

Secara arsitektural, rancangan sistem beroperasi dalam sebuah siklus kendali tertutup (*closed-loop control*). Parameter energi keluaran aktual dari modul PV dipantau secara real-time melalui modul sensor arus dan sensor tegangan. Data pembacaan sensor tersebut diakuisisi oleh mikrokontroler ATmega2560 yang bertindak sebagai unit komputasi utama. Di dalam mikrokontroler, program algoritma PSO secara iteratif mengevaluasi turunan daya terhadap tegangan untuk menemukan dan mengunci GMPP.

Output komputasi dari algoritma PSO kemudian diterjemahkan menjadi sinyal kendali *Pulse Width Modulation* (PWM). Untuk memastikan proses pensaklaran berjalan sempurna, sinyal PWM diumpankan melalui rangkaian driver MOSFET (dengan catu daya 12 V) untuk memperkuat level tegangan pemicuan *gate*. Sinyal teramplifikasi ini mengontrol *duty cycle* pada *Boost Converter* untuk melakukan optimasi step-up tegangan kerja PV menuju titik ekuilibrium terbaiknya.

Guna keperluan pengujian dan validasi unjuk kerja, energi listrik keluaran konverter distabilkan terlebih dahulu melalui *Solar Charge Controller* (SCC) sebelum didisipasikan pada beban resistif

berupa lampu berdaya 100 W.

Pemantauan instrumen ukur (wattmeter) ditempatkan secara terpusat pada dua titik: sisi masukan (setelah modul PV) dan sisi keluaran (setelah konverter). Konfigurasi ini memungkinkan evaluasi komprehensif terhadap efisiensi pelacakan algoritma PSO sekaligus efisiensi konversi daya sistem secara keseluruhan dibandingkan dengan konfigurasi tanpa kendali MPPT.

3.4 Perancangan Panel Surya dan *Boost Converter*

Untuk menunjukkan bahwa kinerja desain pemilihan nilai parameter pada konverter boost sudah sesuai dengan rancangan yang akan mengendalikan panel surya berbasis MPPT PSO. Pada penelitian ini digunakan PV Model *Monocrystalline* MS100M-36.

Tabel 3.1. Spesifikasi Panel Surya Model Monocrystalline MS100M-36

<i>Electrical Characteristics</i>	<i>Parameter Value</i>
<i>Maximum Power (W)</i>	100
<i>Open Circuit Voltage Voc (V)</i>	26,01
<i>Voltage at Maximum Power Point Vmp (V)</i>	22,64
<i>Operating Temperature (°C)</i>	-40 to +80
<i>Cells per module (Ncell)</i>	36
<i>Short-circuit Current Isc (A)</i>	4,64
<i>Current at Maximum Power Point Imp (A)</i>	4,43
<i>Tolerance (%)</i>	0 ~ +5%
<i>Dimension</i>	±1005 x 670 x 35 mm

Kondisi buruk, 50W/m² pada 25°C, 0,05 dari 1000W/m².

$$P_{mp} = 100 \times 0,05 = 5 \text{ Watt}$$

$$V_{mp} = 0,9 \times 22,64 \text{ V} = 20,376 \text{ V}$$

$$I_{mp} = \frac{P_{mp}}{V_{mp}} = \frac{5W}{20,376} = 0,245 \text{ A}$$

Resistansi internal susunan PV pada mpp, Rmp dihitung untuk kondisi STC dan terburuk

$$R_{mp} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} = \frac{22,64V}{4,43} = 5,11 \text{ ohms}$$

$$R_{mp} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} = \frac{20,376}{0,245} = 86,16 \text{ ohms}$$

35

Resistansi beban *Boost Converter* dihitung pada kondisi terburuk susunan PV, karena jumlah yang dihasilkan pada STC adalah 2,5:

$$R_o = 2,5 \times 83,16 \text{ ohm} = 207,9 \text{ ohm}$$

$$D_{mp} = 1 - \sqrt{\frac{R_{mp}}{R_o}} D_{mp} = 1 - \sqrt{\frac{5,11}{207,9}}$$

$$D_{mp} = 0,8432 \text{ pada kondisi STC}$$

$$D_{mp} = 1 - \sqrt{\frac{83,16}{207,9}}$$

$$D_{mp} = 0,3675 \text{ pada kondisi buruk}$$

Untuk tegangan *output* dan arus *output* untuk STC

$$V_o = \frac{V_i}{1-D}$$

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$V_o = \frac{22,64V}{1-0,8432} = 144,387 V$$

$$I_o = \frac{144,387}{207,9} = 0,694 A$$

Untuk tegangan *output* dan arus *output* pada kondisi buruk

$$V_o = \frac{20,376V}{1-0,3675} = 32,205 V$$

$$I_o = \frac{32,205}{207,9} = 0,1551 A$$

Menentukan riak tegangan dan arus, riak tegangan adalah 0,2% dari tegangan masukan dan riak arus adalah 40% dari arus keluaran.

$$\Delta V_i = 0,002 \times 22,67V = 0,045V$$

$$\Delta V_o = 0,002 \times 144,387 V = 0,28877V$$

$$\Delta I_o = 0,4 \times 0,1551 A = 0,062A$$

Untuk menghitung resistensi masukan yang dipantulkan dari susunan PV

$$R_i = R_o (1-D^2)$$

$$R_i = 207,9 \times (1 - 0,8432^2)$$

$$R_i = 60,08 \text{ ohm}$$

36

$$C_I = \frac{4 \times V_{mp} \times D_{mp}}{\Delta V_i \times f \times R_i}$$

$$C_I = \frac{4 \times 22,64 \times 0,8432}{0,045 \times 25000 \times 60,08}$$

$$C_I = 0,000564 \quad F$$

$$C_o = \frac{2 \times V_o \times D_{mp}}{\Delta V_o \times f \times R_o}$$

$$C_o = \frac{2 \times 144,387 \times 0,8432}{0,28877V \times 25000 \times 60,08}$$

$$C_o = 0,000162 F$$

$$L = \frac{V_{mp} \times D_{mp}}{2 \times \Delta I_o f} = \frac{20,376 \times 0,3675}{2 \times 0,062 \times 25000}$$

$$L = 0,002415H$$

3.5 Perancangan Pengaturan Parameter Untuk Algoritma PSO

Langkah pertama untuk memulai algoritma PSO adalah menentukan nilai parameter yang akan digunakan.

Tabel 3.2. Pengaturan Parameter Untuk Algoritma PSO

Parameter	Nilai
Jumlah Partikel (N)	5
Bobot inersia (W)	0.7 – 0.3
cognition-only learning factor (C ₁)	1
Social-only learning factor (C ₂)	2
Nilai toleransi (ε ₁)	1

- **Jumlah Partikel (N):** Ditetapkan sebanyak 5 partikel. Hal ini disesuaikan dengan keterbatasan pemrosesan pada mikrokontroler. Literatur dari Rezk dan Fathy (2017) serta Hakim et al. (2020) juga mendukung bahwa 5–10 partikel sudah cukup untuk mencapai konvergensi

dengan cepat faktor Pembelajaran (C_1 dan C_2): Ditetapkan $C_1 = 1$ (cognition-only) dan $C_2 = 2$ (social-only). Tujuannya adalah memperkuat kontribusi global *best* agar

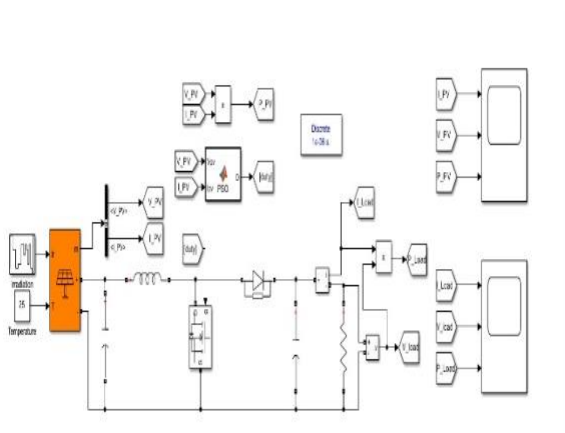
- partikel lebih patuh menuju daya maksimum global, sehingga sistem lebih stabil.
- **Bobot Inersia (W):** Dibuat linier menurun dari 0.7 ke 0.3. Inersia besar di awal (0.7) membantu eksplorasi area yang luas, sedangkan di akhir iterasi inersia direndahkan (0.3) agar eksploitasi lebih halus dan cepat konvergen.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Simulasi Sistem MPPT PSO

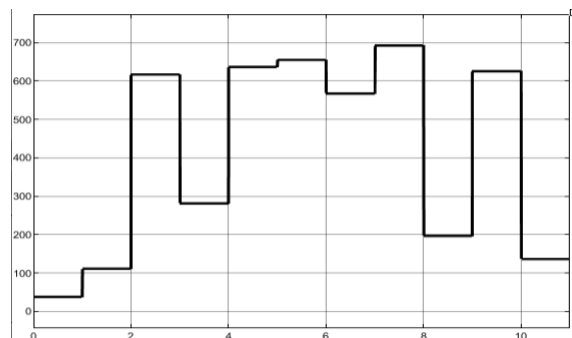
4.1.1 Pengujian Single PV

Rangkaian sistem PV dengan algoritma PSO dirancang menggunakan MATLAB R2023b sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1 berikut:



Gambar 4. 1 Rangkaian PV Menggunakan Algoritma PSO

Pengujian simulasi PV dengan optimasi algoritma PSO ini dilakukan dengan iradiasi yang berubah-ubah untuk menggambarkan iradiasi yang fluktuatif adapun nilai iradiasinya: (27.9, 110.28, 616.04, 280.21, 635.49, 654.59, 567.8, 692.24, 196.63, 624.2, 136.8) W/m^2 . Berikut data iradiasi yang digunakan pada pengujian simulasi:



Gambar 4. 2 Data Simulasi Iradiasi Matahari

Iradiasi disimulasikan selama 11 detik dengan perubahan yang cukup signifikan untuk menguji respons adaptif sistem terhadap Perubahan. Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 menampilkan keluaran sistem sebelum dan sesudah penerapan PSO. Hasil tersebut digunakan untuk menganalisis kemampuan algoritma PSO dalam melacak titik daya maksimum secara cepat dan akurat.

Tabel 4. 1 Hasil Simulasi Kinerja Sistem PV dengan MPPT PSO pada Berbagai Tingkat Iradiasi

IRADIASI (W/m^2)	V_PV (Volt)	I_PV (Ampere)	P_PV (Watt)	V_OUT (Volt)	I_OUT (Ampere)	P_OUT (Watt)
27.9	5.08	0.83	4.26	4.28	0.83	3.7
110.28	8.19	1.44	11.8	7.39	1.44	10.7
616.04	15.4	2.86	44.1	14.6	2.86	41.8
280.21	9.8	1.77	17.4	9.05	1.77	16.06
635.49	15.8	2.95	46.8	15	2.95	44.5
654.59	16.3	3.03	49.6	15.52	3.03	47.2
567.8	14.2	2.76	39.7	13.5	2.7	36.5
692.24	17.4	3.35	58.29	16.6	3.25	54
196.63	10.3	1.84	18.92	9.43	1.84	17.4
624.2	15.62	2.9	45.2	14.8	2.9	43
136.8	8.81	1.64	14.4	8	1.57	12.52

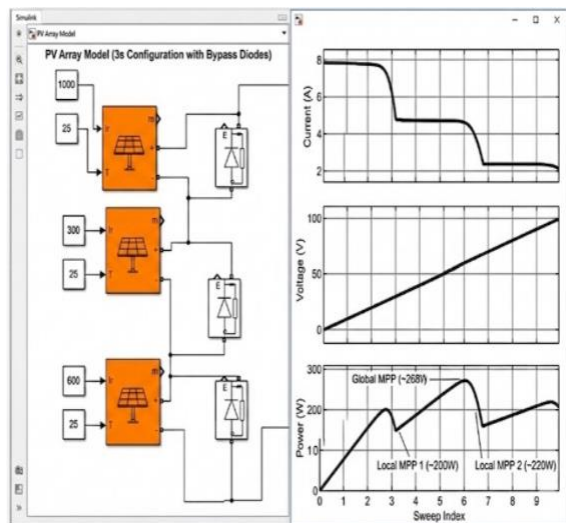
Berdasarkan data pada Tabel 4.1, Dapat dilihat pada metode PSO mempunyai daya optimal pada nilai 54 Watt dengan efisiensi 92 % pada Iradiasi 692,24 (W/m^2). terlihat bahwa sistem menghasilkan efisiensi konversi daya yang tinggi, khususnya pada kondisi iradiasi tinggi. Efisiensi ini sejalan dengan menurunnya daya yang dihasilkan oleh panel PV akibat penurunan intensitas cahaya.

Hal ini menunjukkan bahwa algoritma PSO tetap mampu mempertahankan performa sistem dengan cukup baik meskipun terjadi variasi besar pada kondisi iradiasi, yang memperkuat efektivitas metode ini dalam sistem MPPT berbasis kendali adaptif.

4.1.2 Pengujian Kinerja Algoritma pada Kondisi Partial Shading

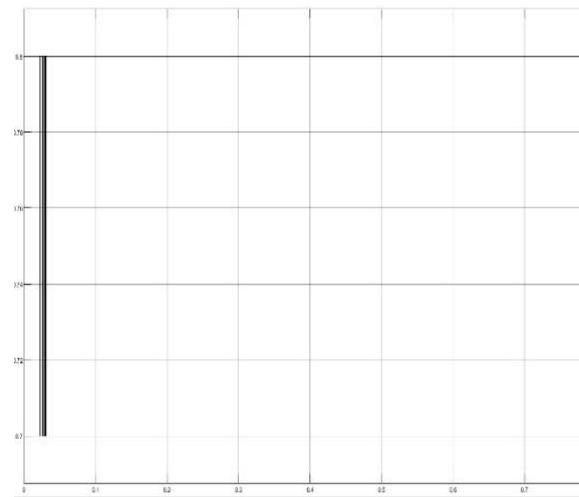
Evaluasi kinerja algoritma PSO dikomparasikan secara langsung dengan algoritma konvensional P&O menggunakan konfigurasi array PV 3-seri (3s). Pengujian ini disimulasikan di bawah scenario PSC dengan tingkat iradiasi yang dimodifikasi pada masing-masing modul : modul pertama 1000 W/m², modul kedua 300 W/m², dan modul ketiga 600 W/m². Ketidakseimbangan iradiasi ini secara teoritis menghasilkan kurva daya-tegangan (P-V) dengan karakteristik multiple peaks, yang terdiri dari dua *Local Maximum Power Point* (LMPP) di kisaran 200 W dan 220 W, serta satu GMPP bernilai 268 W.

Pola bayangan pada array PV dan kurva karakteristik yang dihasilkan dari kasus pertama ditunjukkan pada Gambar 4.3 berikut.

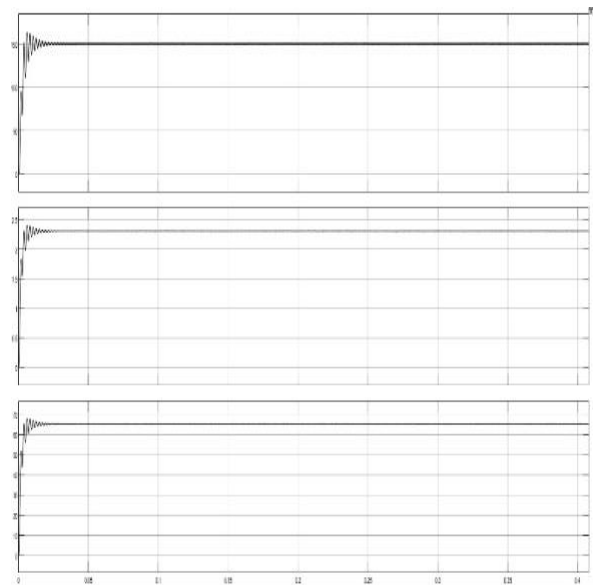


Gambar 4.3 Pola bayangan pada array PV 3s dan Kurva Arus, Tegangan, dan GMPP

• Respons Pelacakan Algoritma P&O



Gambar 4.4 Pergerakan *Duty Cycle* Algoritma PnO



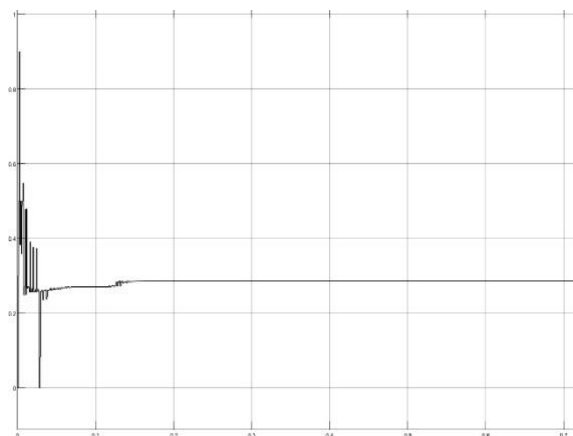
Gambar 4.5 Kurva Daya, Arus, dan Tegangan dari Hasil Pengujian Algoritma PnO pada *Partial Sheding*

Berdasarkan hasil pengujian, algoritma P&O menunjukkan respons konvergensi awal yang sangat cepat, mencapai kondisi steady-state dalam waktu kurang dari 0,05 detik. Namun, pelacakan daya terhenti pada kisaran 150 W (dengan tegangan 65 V dan arus 2,3 A).

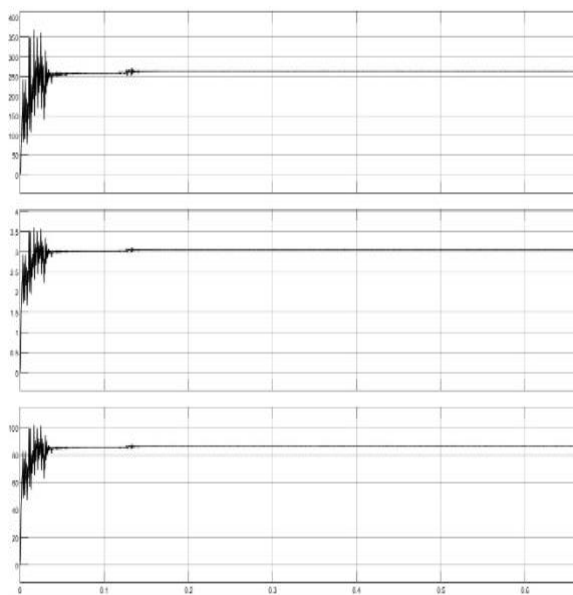
Pada titik ini, pergerakan *duty cycle* konverter merespons secara statis dan terkunci pada nilai 0,8. Kondisi ini membuktikan kelemahan fundamental P&O saat menghadapi kondisi PSC.

Algoritma ini langsung menghentikan pencarian ketika mendeteksi puncak pertama (*hill climbing principle*), sehingga sistem terjebak secara prematur pada LMPP (*Local Maximum Power Point*).

- Respons Pelacakan Algoritma PSO



Gambar 4. 6 Pergerakan *Duty Cyle* Algoritma PSO



Gambar 4. 7 Kurva Daya, Arus, dan Tegangan dari Hasil Pengujian Algoritma PSO pada *Partical Shedding*

Analisis terhadap algoritma PSO menunjukkan dinamika pencarian duty cycle yang jauh lebih adaptif. Pada fase awal inisialisasi (0 hingga 0,15 detik), grafik daya maupun *duty cycle* menunjukkan fluktuasi transien yang tinggi.

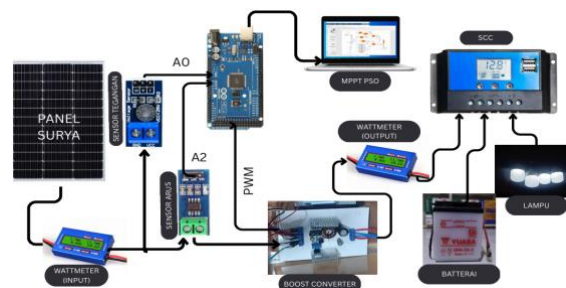
Osilasi ini merupakan representasi perilaku alami kawanan partikel PSO yang sedang disebar (dieksplorasi) untuk memindai seluruh rentang kurva P-V guna mendeteksi global peak.

Setelah fase pencarian menyeluruh selesai, algoritma PSO berhasil melakukan konvergensi dan menetapkan nilai duty cycle optimal secara stabil di kisaran 0,3.

Optimalisasi duty cycle ini berhasil menarik titik operasi sistem keluar dari area LMPP dan menguncinya di area GMPP, dengan ekstraksi daya maksimal yang stabil di kisaran 264 W (tegangan 83 V dan arus 3,7 A).

Secara komparatif, meskipun algoritma PSO membutuhkan durasi pelacakan inisial yang sedikit lebih lama untuk meredam osilasi transien (0,15 detik) dibandingkan P&O (0,05 detik), akan tetapi algoritma PSO berhasil mengatasi kompleksitas kurva multiple peaks (*partical shedding*) dengan nilai output daya 264 W dibandingkan dengan algoritma konvensional P&O yang terjebak di LMPP dengan nilai output daya 150 W.

4.2 Pengujian Perangkat Keras (*Hardware*)



Gambar 4. 8 Rangkaian Instalasi Pengujian PLTS

Realisasi perangkat keras sistem kendali dieksekusi dalam bentuk purwarupa *Printed Circuit Board* (PCB) yang mengintegrasikan *Boost Converter* dengan unit pemrosesan mikrokontroler ATmega2560.

Topologi *Boost Converter* dirancang menggunakan induktor inti toroid sebagai media penyimpanan energi magnetik utama, dipadukan dengan kapasitor elektrolit untuk meredam riak (*ripple*) tegangan pada sisi keluaran. Sistem switching dikendalikan oleh IC driver MOSFET IR2110 yang bertugas mengamplifikasi sinyal PWM dari mikrokontroler untuk memicu gerbang (gate) MOSFET dengan presisi tinggi.

Guna melindungi modul surya dari aliran arus balik (reverse current), sistem juga dilengkapi dengan Dioda Schottky berkecepatan tinggi pada sisi masukan. Pengujian kinerja perangkat keras dilakukan menggunakan topologi kalang tertutup (closed-loop).

Modul photovoltaic berkapasitas 100 Wp dihubungkan ke sisi masukan konverter yang telah dilengkapi dengan modul sensor arus dan tegangan untuk keperluan akuisisi data secara real-time. Berdasarkan umpan balik sensor tersebut, mikrokontroler mengeksekusi algoritma PSO guna menentukan nilai duty cycle optimal secara dinamis. Daya yang telah dikonversi kemudian dilewatkan melalui SCC sebagai penstabil tegangan (clamping) sebelum disalurkan ke beban resistif berupa susunan lampu DC 100 Watt.

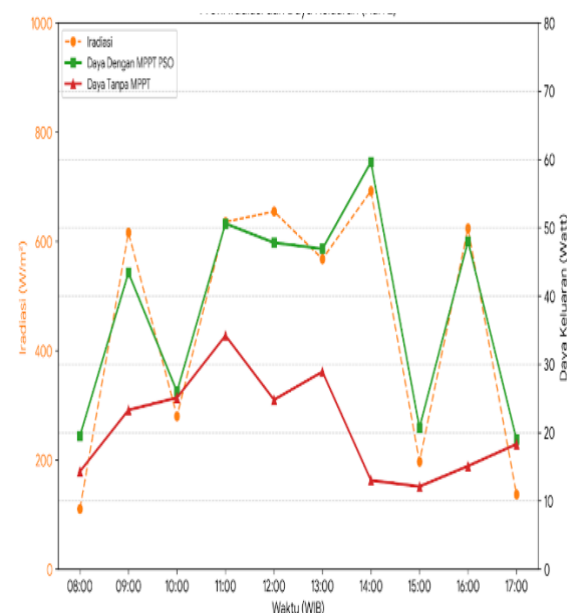
Untuk memvalidasi keandalan algoritma dan perangkat keras, prosedur pengujian lapangan dilaksanakan secara komparatif antara sistem berbasis MPPT PSO dan sistem konvensional (tanpa MPPT). Pengambilan data empiris difokuskan pada parameter kelistrikan (tegangan, arus, daya, dan akumulasi energi) serta intensitas iradiasi yang direkam setiap jam dari pukul 07.00 hingga 17.00 WIB selama tujuh hari berturut-turut.

Untuk menjamin evaluasi kinerja yang komprehensif dan efisien, analisis dibatasi pada dua kondisi batas yang secara representatif mencakup seluruh rentang operasional sistem, sehingga pengulangan data dapat dieliminasi. Skenario pertama (Hari ke-1) merepresentasikan kondisi operasional ideal dengan cuaca cerah berawan yang relatif stabil, sedangkan skenario kedua (Hari ke-7) merepresentasikan kondisi terburuk (*worst-case scenario*) dengan dominasi mendung pekat dan iradiasi rendah sepanjang hari.

4.2.1 Data Pengujian Hari Pertama

Tabel 4. 2 Data Pengujian Hari Pertama

JAM	IRADIASI (W/m ²)	SUHU (°C)	DENGAN MPPT PSO						TANPA MPPT PSO					
			Tegangan (V)		Arus (A)		Daya (W)		Tegangan (V)		Arus (A)		Daya (W)	
			In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out
7:00	27.9	29.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8:00	110.28	29.1	13.72	12.96	1.52	1.51	20.9	19.5	12.95	12.93	1.14	1.11	14.7	14.3
9:00	616.04	29.6	15.05	14.02	3.09	3.1	46.5	43.4	13.47	13.06	1.98	1.79	26.6	23.3
10:00	280.21	30	13.86	12.98	2.06	2.01	28.5	26	14.01	13.62	1.83	1.85	25.6	25.1
11:00	635.49	30.5	15.26	14.10	3.71	3.59	56.6	50.6	18.19	13.29	2.34	2.58	42.5	34.2
12:00	654.59	31.5	14.95	13.94	3.42	3.43	51.1	47.8	19.28	14.43	1.77	1.72	34.1	24.8
13:00	567.8	31.5	15.06	14.03	3.32	3.35	49.9	46.9	17.36	13.00	2.11	2.23	36.6	28.9
14:00	692.24	31.7	15.85	14.65	4.24	4.07	67.2	59.6	18.95	13.83	1.06	0.94	20	13
15:00	196.63	32.6	12.60	12.60	1.74	1.65	23.3	20.7	15.41	13.04	1.17	0.93	17.7	12.1
16:00	624.2	32.9	15.34	14.27	3.40	3.37	52.1	48	18.49	13.08	1.23	1.06	22.6	20
17:00	136.8	32	13.18	12.48	1.47	1.57	19.3	19	15.68	15.45	1.20	1.09	18.9	16.6



Gambar 4. 9 Grafik Profil Iradiasi dan Daya (Hari 1)

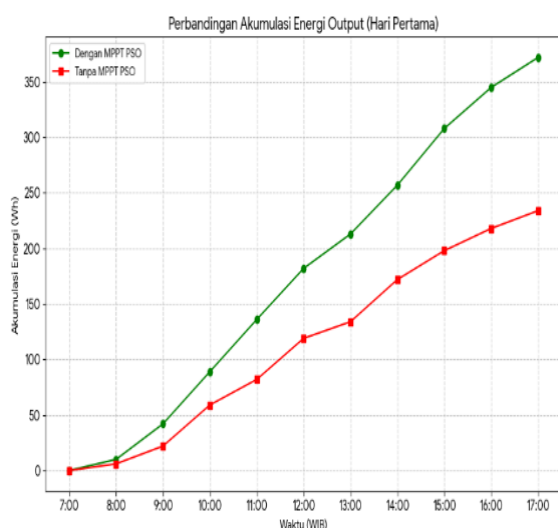
Berdasarkan data dan grafik di atas, kondisi cuaca pada hari pertama. Hari Pertama memiliki beberapa rentang iradiasi yang tinggi namun diselingi penurunan akibat awan, seperti yang terlihat pada pukul 12.00 WIB (654,59 W/m²), turun di pukul

13.00 WIB ($567,8 \text{ W/m}^2$), kembali memuncak di pukul 14.00 WIB ($692,24 \text{ W/m}^2$), dan mengalami lonjakan lagi di sore hari pada pukul 16.00 WIB ($624,2 \text{ W/m}^2$).

Daya keluaran maksimum yang mampu diserap sistem pada hari kedua tercatat pada pukul 14.00 WIB, di mana kendali MPPT PSO berhasil membangkitkan daya keluaran sebesar 59,6 Watt. Pada kondisi pembebanan dan iradiasi yang persis sama, sistem konvensional tanpa MPPT mengalami jatuh tegangan yang parah sehingga hanya mampu mentransfer daya sebesar 13 Watt. Hal ini membuktikan pada saat iradiasi tinggi algoritma PSO mampu mempertahankan/ menjaga stabilitas daya peak.

Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran Energi (Wh) Hari Ketujuh (07:00 – 17:00)

JAM	DENGAN MPPT PSO		TANPA MPPT PSO	
	Energi (Wh)		Energi (Wh)	
	In	Out	In	Out
7:00	0	0	0	0
8:00	10	10	7	6
9:00	45	42	37	22
10:00	95	89	70	59
11:00	146	136	110	82
12:00	195	182	142	119
13:00	228	213	163	134
14:00	275	257	212	172
15:00	330	308	238	198
16:00	370	345	257	218
17:00	400	372	274	234



Gambar 4. 10 Grafik Akumulasi Energi (Hari 1)

Konsistensi peningkatan daya keluaran yang dipertahankan oleh sistem MPPT secara langsung berdampak pada perolehan total energi harian. Jika dilihat pada grafik akumulasi di atas, laju penyerapan energi (Wh) sistem MPPT PSO (garis hijau) bergerak stabil dan melampaui sistem tanpa kendali (garis merah) sejak awal pengujian.

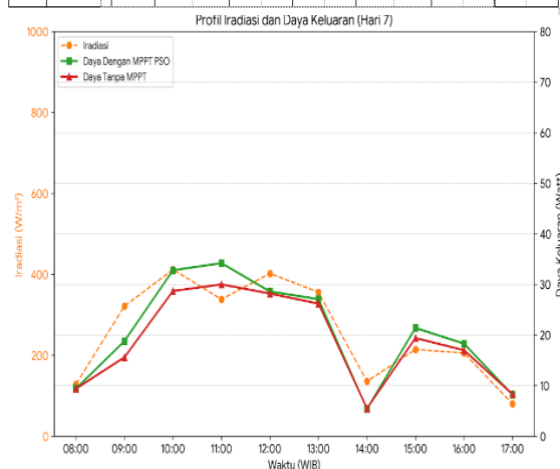
Pada akhir pengujian pukul 17.00 WIB, hari kedua mencatatkan rekor perolehan energi tertinggi selama masa pengujian. Sistem MPPT PSO menerima total akumulasi energi masukan dari panel surya sebesar 399 Wh dan sukses mentransfer total energi keluaran ke sisi beban sebesar 372 Wh.

Dengan membandingkan rasio energi masukan dan keluaran tersebut, efisiensi konversi perangkat keras (*Hardware efficiency*) *Boost Converter* pada hari kedua tercatat sangat optimal, yaitu mencapai 93,2%.

4.2.2 Data Pengujian Hari Ketujuh

Tabel 4. 4 Data Pengujian Hari Ketujuh

JAM	IRADIASI (W/m ²)	SUHU (°C)	DENGAN MPPT PSO			TANPA MPPT PSO		
			Tegangan (V)		Daya (W)	Tegangan (V)		Daya (W)
			In	Out		In	Out	
7:00	40.3	28	-	-	-	-	-	-
8:00	128.2	28.7	13.15	12.47	0.79	0.76	10.3	9.4
9:00	321.2	29	13.69	12.9	1.47	1.46	20.1	18.8
10:00	411.8	29.1	14.18	13.15	2.54	2.5	36	32.8
11:00	338.24	30	14.37	13.29	2.67	2.58	38.4	34.2
12:00	402.28	30.6	14.20	13.22	2.18	2.17	30.9	28.6
13:00	355.7	30	13.98	13.05	2.13	2.08	29.7	27.1
14:00	135.56	29.3	12.59	12.09	0.46	0.45	5.7	5.4
15:00	214.48	30	13.25	12.41	1.74	1.73	23	21.4
16:00	205.63	30	13.05	12.26	1.51	1.50	19.7	18.3
17:00	89.94	29.4	13.11	12.54	0.67	0.66	8.7	8.2



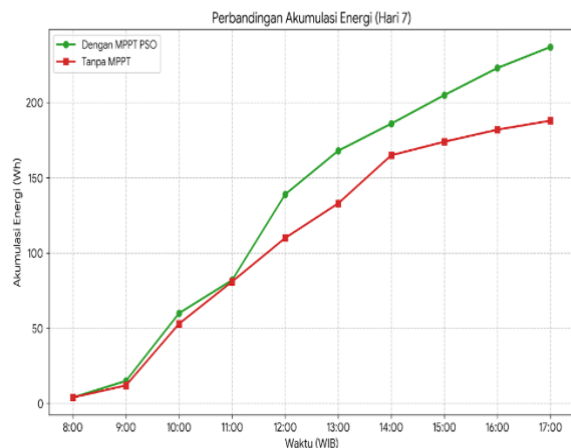
Gambar 4. 11 Grafik Profil Iradiasi dan Daya (Hari 7)

Grafik pengujian hari terakhir mengonfirmasi dominasi cuaca mendung sepanjang hari. Intensitas iradiasi mayoritas tertahan di bawah rentang 400 W/m^2 , dengan puncak iradiasi hanya menyentuh level $411,8 \text{ W/m}^2$ pada pukul 10.00 WIB. Daya keluaran terbesar yang dihasilkan oleh sistem MPPT tercatat pada pukul 11.00 WIB dengan nilai 34,2 Watt (pada iradiasi $338,24 \text{ W/m}^2$).

Meskipun beroperasi di bawah suplai daya matahari yang sangat terbatas, algoritma MPPT PSO secara konsisten berupaya melacak titik daya terbaik. Kemampuan ini terbukti dari minimnya dampak jatuh tegangan (*voltage drop*) pada sisi beban dibandingkan sistem konvensional, sehingga penyaluran arus dapat dimaksimalkan terlepas dari minimnya cahaya.

Tabel 4. 5 Hasil Pengukuran Energi (Wh)
Hari Ketujuh (07:00 – 17:00)

JAM	DENGAN MPPT PSO		TANPA MPPT PSO	
	Energi (Wh)		Energi (Wh)	
	In	Out	In	Out
7:00	0	0	0	0
8:00	5	4	5	4
9:00	16	15	14	12
10:00	64	60	57	53
11:00	88	82	93	81
12:00	150	139	127	110
13:00	182	168	150	133
14:00	201	186	175	165
15:00	220	205	185	174
16:00	240	223	204	182
17:00	254	237	211	188



Gambar 4. 12 Grafik Akumulasi Energi
(Hari 7)

Dampak dari pelacakan daya yang presisi pada kondisi low irradiation ini terlihat pada konsistensi penyerapan akumulasi energi. Pada akhir pengujian, sistem Boost Converter mencatatkan perolehan energi masukan sebesar 254 Wh dan sukses menyalurkan energi keluaran sebesar 237 Wh.

Data tersebut membuktikan bahwa efisiensi konversi perangkat keras pada hari terakhir pengujian tetap konsisten dan kokoh di angka 93,3%. Keberhasilan purwarupa dalam mempertahankan efisiensi di atas 92% selama tujuh hari berturut-turut merupakan indikator utama kesuksesan rancangan perangkat keras. Sistem kendali MPPT PSO menutup pengujian lapangan ini dengan total akumulasi energi 237 Wh, yang terbukti jauh lebih baik dibandingkan sistem tanpa MPPT yang hanya sanggup menghimpun 188 Wh.

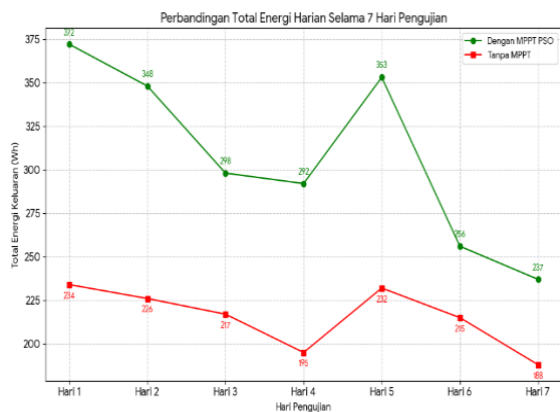
4.3 Akumulasi Energi dan Efisiensi Konverter Selama 7 Hari Pengujian

Keberhasilan implementasi MPPT secara fundamental ditentukan oleh kemampuan sistem dalam mengakumulasi energi aktual secara optimal sepanjang siklus operasi harian. Dalam konteks ini, integrasi *Boost Converter* pada konfigurasi kalang tertutup berperan signifikan dalam menekan rugi-rugi daya, khususnya yang berasal dari mekanisme switching, sehingga meningkatkan efisiensi konversi energi secara keseluruhan. Hasil pengujian eksperimental selama tujuh hari menunjukkan bahwa efisiensi perangkat keras berada pada kondisi yang stabil dan konsisten, dengan rentang nilai antara 92,4% hingga mencapai puncak 93,6% pada hari ke-5.

Stabilitas ini mengindikasikan bahwa sistem memiliki tingkat keandalan yang tinggi serta mampu mempertahankan performa optimal meskipun terjadi variasi kondisi operasional harian.

Tabel 4. 6 Perbandingan Akumulasi Energi Keluaran Selama 7 Hari Pengujian

Hari Pengujian	Kondisi Cuaca Dominan	Energi Keluaran dengan MPPT PSO (Wh)	Energi Keluaran Tanpa MPPT (Wh)
Hari Pertama	Cerah berawan (Fluktuasi ringan)	372	234
Hari Kedua	Fluktuatif signifikan (Cerah ke mendung)	348	226
Hari Ketiga	Iradiasi rendah (Mendung)	298	217
Hari Keempat	Dua fase ekstrem (Cerah ke mendung pekat)	292	195
Hari Kelima	Cerah ideal dan stabil (Fluktuasi ringan)	353	232
Hari Keenam	Sangat fluktuatif (Mendung ekstrem sore hari)	256	215
Hari Ketujuh	Mendung dominan sepanjang hari	237	188



Gambar 4. 13 Perbandingan Energi Selama Pengujian

Secara keseluruhan, sistem yang terintegrasi dengan MPPT PSO sukses menghimpun total energi sebesar 2156 Wh, sedangkan sistem konvensional hanya mampu memanen energi sebesar 1507 Wh. Untuk mengetahui seberapa besar dampak pemasangan alat ini terhadap ketersediaan energi, dilakukan perhitungan persentase peningkatan (*percentage increase*) menggunakan persamaan berikut:

$$Peningkatan = \frac{Total\ Energi_{MPPT\ PSO} - Total\ Energi_{Tanpa\ MPPT}}{Total\ Energi_{Tanpa\ MPPT}} \times 100\%$$

$$Peningkatan\ \% = \frac{2156\ Wh - 1507\ Wh}{1507\ Wh} \times 100\% = 43.06\%$$

Berdasarkan perhitungan matematis tersebut, dapat disimpulkan bahwa penggunaan algoritma PSO mampu memberikan tambahan ketersediaan energi total sebesar **43.06 %** dibandingkan sistem tanpa kendali.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian lapangan dan analisis data terhadap purwarupa MPPT berbasis PSO, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

Keberhasilan Pelacakan GMPP: Integrasi perangkat keras *Boost Converter* dan algoritma PSO berhasil beroperasi secara stabil dan *real-time*. Pada kondisi partial shading, algoritma PSO terbukti mampu menemukan dan mengunci GMPP, mengatasi keterbatasan algoritma konvensional P&O yang hanya mampu melacak LMPP.

Efisiensi Perangkat Keras: Sistem MPPT beroperasi dengan tingkat responsivitas yang tinggi dalam mempertahankan tegangan kerja panel surya. Kinerja ini dioptimalkan oleh *Boost Converter* yang mencatatkan efisiensi konversi daya stabil di atas 92% (maksimal 93,6%), membuktikan rendahnya rugi-rugi daya (power losses) pada perangkat keras.

Peningkatan Ketersediaan Energi: Penerapan sistem MPPT PSO memberikan peningkatan ekstraksi energi yang signifikan. Selama tujuh hari pengujian, sistem ini mampu menghasilkan total energi sebesar 2.156 Wh. Jika dibandingkan dengan sistem tanpa MPPT yang hanya menghasilkan 1.507 Wh, implementasi metode ini terbukti mampu meningkatkan total ketersediaan energi sebesar 43,06%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Universitas Riau yang telah mendukung terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT. PLN, "Statistik 2 pln 3," vol. 03001–25, no. 03001, pp. 1–102, 2023, [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2025/09/Statistik-PLN-2023-Ind.pdf>
- [2] M. R. Al Haqq, I. Chlissodin, and A. A. Soebroto, "Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Panel Surya dalam Kondisi Berbayang Sebagian dengan Particle Swarm Optimization (PSO)," *Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 5, no. 8, pp. 3524–3537, 2021, [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- [3] A. S. Ghifari, Rihan Muhammad Al, Muhammad Arsyad, "Wahana Fisika Pengaruh Parameter Cuaca Terhadap Intensitas Radiasi," vol. 9, no. 2, pp. 83–97, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal.upi.edu/index.php/wafi/article/view/73960>
- [4] J. Li, Y. Wu, S. Ma, M. Chen, B. Zhang, and B. Jiang, "Analysis of photovoltaic array maximum power point tracking under uniform environment and partial shading condition: A review," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 13235–13252, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.09.192.
- [5] L. L. L. Zhuoli Zhao, Runteng Cheng, Baiping Yan, Jiexiong Zhang, Zehan Zhang, Mingyu Zhang, "A dynamic particles MPPT method for photovoltaic systems under partial shading conditions," *Energy Convers. Manag.*, vol. Volume 220, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113070>
- [6] A. Faizal and B. Setyaji, "Desain Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Panel Surya Menggunakan Metode Sliding Mode Control," *J. Sains, Teknol. dan Ind.*, vol. 14, no. 1, pp. 22–31, 2019, doi: 10.24014/sitekin.v14i1.2103.
- [7] K. Sundareswaran, S. Peddapati, and S. Palani, "MPPT of PV systems under partial shaded conditions through a colony of flashing fireflies," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 2, pp. 463–472, 2014, doi: 10.1109/TEC.2014.2298237.
- [8] H. Rezk and A. Fathy, "Simulation of global MPPT based on teaching–learning-based optimization technique for partially shaded PV system," *Electr. Eng.*, vol. 99, no. 3, pp. 847–859, 2017, doi: 10.1007/s00202-016-0449-3.
- [9] O. Ferlita, "Maximum Power Point Tracking Optimization in Photovoltaic Array Using Particle Swarm Optimization and Firefly Algorithm," pp. 1–75, 2018, [Online]. Available: <https://repository.ub.ac.id/162321/>
- [10] E. A. Hakim, T. Al Ghufuran, M. Effendy, and N. Setyawan, "MPPT Menggunakan Algoritme Particle Swarm Optimization dan Artificial Bee Colony," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 9, no. 2, pp. 218–224, 2020, doi: 10.22146/jnteti.v9i2.81.
- [11] M. S. ENDÍZ, "Performance Analysis of P&O and Pso Mppt Algorithms for Pv Systems Under Partial Shading," *Konya J. Eng. Sci.*, no. March, pp. 84–99, 2023, doi: 10.36306/konjes.1359177.
- [12] S. Utami, "Implementasi Algoritma Perturb and Observe untuk Mengoptimasi Daya Keluaran Solar Cell Menggunakan MPPT," *J. Infotel*, vol. 9, no. 1, p. 92, 2017, [Online]. Available: <http://ejournal.st3telkom.ac.id/index.php/infotel/article/view/165>
- [13] N. Setyawan, E. A. Hakim, and Z. Zulfatman, "Signature Pso: Modified Particle Swarm Optimization Dengan Fuzzy Signature Dan Implementasi Pada Optimalisasi Kendali Lqr," *Multitek Indones.*, vol. 13, no. 2, p. 29, 2020, doi: 10.24269/mtkind.v13i2.2227.

- [14] Suwitno, Iwantono, Suwondo, E. Firdaus, Mubarak, and S. E. Kornita, "Analisis dan Simulasi Boost Converter untuk Meningkatkan Efisiensi Sistem Photovoltaik," ... *Semin. Nas. Has.* ..., pp. 62–67, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal.uniks.ac.id/index.php/ProsidingUniks/article/view/3750>
- [15] D. W. Hart, *Power Electronic*, 4th ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2011. [Online]. Available: www.elsolucionario.net
- [16] A. Sadick, "Maximum Power Point Tracking Simulation for Photovoltaic Systems Using Perturb and Observe Algorithm," in *Solar Radiation - Enabling Technologies, Recent Innovations, and Advancements for Energy Transition*, 2024. doi: 10.5772/intechopen.111632.
- [17] M. H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*, 4th ed. Pearson, 2014.
- [18] B. Subudhi and R. Pradhan, "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 89–98, 2013, doi: 10.1109/TSTE.2012.2202294.
- [19] Microchip Technology Inc., "ATmega2560 Complete Datasheet," 2023. [Online]. Available: <https://ww1.microchip.com/download/en/DeviceDoc/ATmega640-1280-1281-2560-2561-Datasheet-DS40002211A.pdf>
- [20] M. A. Mazidi, S. Naimi, and S. Naimi, *The AVR Microcontroller and Embedded Systems: Using Assembly and C*, 1st ed. 2011.