

Penerapan Algoritma *Particle Swarm Optimization* untuk Meningkatkan Efisiensi Daya Keluaran Panel Surya

Zindhu Maulana Ahmad Putra¹, Purwidi Asri², Faiz Romadloni³, Raimundus Risa Arnestanta⁴

Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Jalan Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

E-mail: ¹zindhu@ppns.ac.id, ²purwidi@ppns.ac.id, ³faizromadloni@student.ppns.ac.id, ⁴raimundusrisa19@student.ppns.ac.id

Abstrak— Salah satu sumber energi terbarukan yang paling banyak digunakan di Indonesia saat ini adalah tenaga surya. Pembangkit listrik tenaga surya sudah mulai menggeser eksistensi dari sumber energi konvensional seperti batubara dan minyak bumi. Namun terdapat permasalahan yang terjadi pada sistem perubahan energi ini. Salah satunya adalah tegangan dan arus yang didapatkan dari sistem *photovoltaic* pada panel surya yang nonlinear. Sehingga daya keluaran menjadi tidak maksimal. Perubahan radiasi sinar matahari dan suhu permukaan panel surya menjadi faktor utama terjadinya hal tersebut. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efisiensi daya keluaran panel surya dibutuhkan *Maximum Power Point Tracking*. Penelitian ini terfokus pada perancangan sistem *solar charge controller* berbasis *Maximum Power Point Tracking* dengan algoritma *Particle Swarm Optimization* yang berfungsi untuk mengatur nilai *Pulse Width Modulation* yang akan disalurkan ke DC-DC *buck boost converter* dengan tujuan untuk mengoptimalkan daya keluaran panel surya agar mendekati nilai *input* panel surya. Dari hasil penelitian, algoritma *Particle Swarm Optimization* mampu mengoptimasi daya *output* panel surya sebesar 176,88 W. Selain itu, perancangan dan pembuatan DC-DC *buck boost converter* dapat melakukan pengisian pada baterai 12 V, 24 V, dan 48 V serta menghasilkan efisiensi sebesar 50% sampai 65%.

Kata Kunci — Panel Surya, *Maximum Power Point Tracking*, *Buck Boost Converter*, *Particle Swarm Optimization*, *Pulse With Modulation*

I. PENDAHULUAN

Energi terbarukan menjadi pusat perhatian studi pada beberapa dekade terakhir. Hal ini disebabkan oleh sumber daya alam yang terpasok terus menerus secara alami, sehingga pemanfaatan energi terbarukan sangat potensial untuk dikembangkan dalam berbagai tujuan praktis [1]. Di antara keberagaman sumber energi terbarukan di alam, *International Energy Agency* (IEA) memprediksi kuat akan lonjakan ketersediaan energi matahari dibandingkan dengan sumber energi terbarukan yang lainnya. Ketersediaan cahaya matahari yang melimpah ini dapat diaplikasikan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Dengan menerapkan sistem Pembangkit listrik Tenaga Surya, maka akan didapatkan berbagai keuntungan, yaitu penggunaan yang mudah, biaya perawatan tergolong rendah, serta menghasilkan emisi yang kecil dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional seperti batubara. Kegiatan ini menghasilkan kontribusi tinggi dalam upaya meminimalisir polusi dunia [2][3]. Terlebih lagi, bagi negara beriklim tropis, ketersediaan sinar matahari sepanjang tahun tentu memberikan kelimpahan sumber daya listrik alternatif tanpa batas. Hal ini selaras dengan rencana pemerintah yang tercantum pada Rencana Umum Energi

Nasional (RUEN) tahun 2017 tentang pengembangan PLTS 6,5 GW pada tahun 2025 dan 45 GW pada tahun 2050 [4].

Salah satu hal yang menjadi permasalahan dalam pemanfaatan energi alternatif dari sinar matahari adalah proses pengendalian daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik. Sistem PLTS disusun oleh sejumlah komponen utama yang karakteristik kerjanya dapat menentukan daya keluaran, salah satunya adalah modul *photovoltaic* (PV). Dalam prinsip kerjanya, modul PV mengubah energi surya menjadi energi listrik dengan menerapkan prinsip efek *photovoltaic* [5]. PV pada sistem PLTS sangat dipengaruhi oleh kondisi radiasi matahari dan suhu permukaan panel surya. Radiasi matahari dan suhu permukaan pada panel surya bersifat fluktuatif dan tidak mampu menghasilkan daya maksimal sebagaimana perhitungan idealnya. Untuk itu, diperlukan solusi yang dapat meningkatkan efisiensi pembangkit dengan memaksimalkan daya keluaran [6]. Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah menggunakan metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Metode ini memanfaatkan teorema transfer daya maksimum untuk menentukan *Maximum Power Point* (MPP), yang artinya keluaran daya suatu rangkaian akan menjadi maksimal ketika impedansi sumber sesuai dengan pembebanan impedansi. Metode MPPT juga dapat mengoptimalkan daya keluaran sistem *photovoltaic* (PV) paralel hingga 91,2% dibandingkan daya yang dihasilkan tanpa menggunakan metode MPPT [7].

Secara fisik, metode MPPT dapat diaplikasikan dalam bentuk rangkaian *boost converter* yang dioptimalisasi menggunakan teknik tertentu berdasarkan kompleksitas waktu yang diperlukan metode untuk melacak MPP, biaya penerapan, serta kemudahan penerapan [8]. *Perturb & Observe* (P&O) menjadi algoritma paling sederhana dan umum digunakan dalam aplikasi MPPT. Keunggulan metode ini dapat dilihat dari segi kemudahan dan rendahnya biaya implementasi, karena hanya menggunakan satu sensor tegangan untuk mendeteksi tegangan *array* PV. Kompleksitas waktu yang dimiliki juga sangat sedikit ketika mendekati MPP. Namun, metode ini memiliki kelemahan yaitu daya yang dihasilkan berisikasi di sekitar daya maksimum pada operasi *steady state* [9]. Akibatnya, pelacakan menunjukkan hasil perhitungan MPP yang salah.

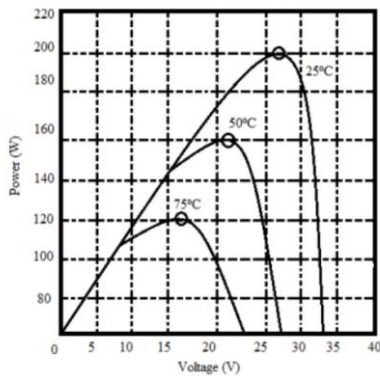
Untuk menghindari permasalahan tersebut, penelitian ini menggunakan algoritma *artificial intelligence* berupa *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk diterapkan pada *buck-boost converter*. Penggunaan metode ini didasarkan pada keunggulannya dalam konvergensi yang cepat dan solusi optimum global [10]. PSO memungkinkan pelacakan daya maksimum dengan menyesuaikan sistem MPPT, serta memperbaiki *duty cycle* secara berkala berdasarkan panduan prinsip pencarian lokal dan global. Penerapan metode ini juga

didukung oleh pemilihan tipe *converter* yang mampu menghasilkan tegangan keluaran stabil sesuai *set point* pada baterai. Rancangan *buck boost converter* dan penerapan MPPT menggunakan algoritma PSO ini diharapkan mampu mengatur keluaran daya dari panel surya menjadi lebih stabil dan efisien saat pengujian ke baterai, serta membandingkan daya keluaran sebelum dan sesudah penerapan MPPT pada panel surya.

II. BAHAN DAN METODE

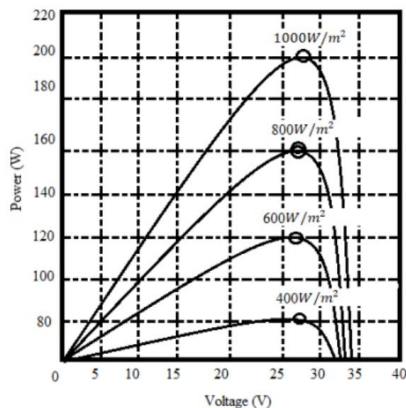
A. Karakteristik Panel Surya

Panel surya merupakan alat konversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik [11]. Dalam penerapannya, *output* yang dihasilkan oleh panel surya tidak selalu maksimum. Hal yang menyebabkannya adalah suhu permukaan panel dan iradiasi matahari yang selalu berubah-ubah.



Gambar 1. Kurva Karakteristik P-V Terhadap Perubahan Suhu

Gambar 1. menunjukkan hubungan antara suhu terhadap daya *output* dari panel surya. Panel surya dapat bekerja secara optimal apabila suhu normal pada 25 °C. Apabila melebihi dari suhu ideal, panel surya akan menghasilkan daya yang semakin menurun. Semakin suhu sekitar panel surya meningkat maka akan mempengaruhi tegangan *output* (Voc), dan dapat melemahkan daya *output* pada panel surya.



Gambar 2. Kurva Karakteristik P-V Terhadap Perubahan Iradiasi Matahari

Gambar 2 menunjukkan korelasi antara daya *output* panel surya terhadap perubahan iradiasi matahari. Panel surya dapat bekerja secara optimal, apabila iradiasi yang mengenai permukaan panel surya bernilai sekitar 1000 W/m^2 dan akan menghasilkan daya maksimum. Semakin sedikit iradiasi

mengenai panel surya, maka daya *output* juga akan semakin menurun.

B. Perhitungan Daya Input Panel Surya

Penelitian ini menggunakan panel surya dengan kapasitas 250 Wp dengan jenis *monocrystalline*. Panel surya tipe *monocrystalline* merupakan salah satu jenis panel surya yang memiliki efisiensi sebesar 24% dan menghasilkan daya listrik persatuan luas paling tinggi dibandingkan dengan tipe yang lainnya [12]. Spesifikasi lengkap dari panel surya yang digunakan dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Panel Surya Yang Digunakan

Parameter Model PV Solar 250 Wp (STC)	Nilai Parameter
Maximum Power (PMPP)	250 WP
Open Circuit Voltage (VOC)	36,3 V
Short Circuit Current (ISC)	8,75 A
Maximum Power Voltage (VMPP)	30,3 V
Maximum Power Current (IMPP)	8,25 A
Power Tolerance	0 ~ + 3%
Modul Efficiency	15,37%
Dimension	1640 x 992 x 35 mm

Untuk menghitung daya *input* dari panel surya maka perlu diketahui luas penampang panel surya terlebih dahulu. Berikut merupakan perhitungan luas penampang dari panel surya.

$$A = p \times l \quad (1)$$

$$A = 1640 \text{ mm} \times 992 \text{ mm}$$

$$A = 1,626 \text{ m}^2$$

Intensitas cahaya matahari diketahui dalam satuan lux, maka perlu dilakukan konversi menjadi W/m^2 . Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$1 \text{ lux} = 0,0079 \text{ W}/m^2 \quad (2)$$

Maka daya *input* panel surya dapat dihitung menggunakan data intensitas cahaya dengan persamaan sebagai berikut.

$$P_{in} = I_r \times A \quad (3)$$

Sebagai contoh, apabila intensitas cahaya matahari sebesar 50.000 lux, maka perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$P_{in} = 50.000 \text{ lux} \times 1,626 \text{ m}^2 \quad (4)$$

$$P_{in} = (50.000 \times 0,0079 \text{ W}/m^2) \times 1,626 \text{ m}^2$$

$$P_{in} = 395 \times 1,626$$

$$P_{in} = 642,27 \text{ W}$$

C. Maximum Power Point Tracking

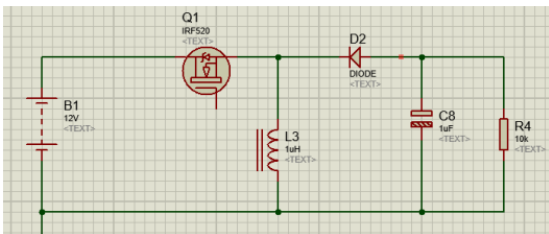
Keluaran dari sistem *photovoltaic* memiliki karakteristik yang berubah ubah dan bersifat *nonlinear* seperti pada kurva P-V. Hal ini yang menyebabkan titik puncaknya sering berubah sesuai dengan perubahan suhu dan radiasi dari sinar matahari. Oleh sebab itu, peran dari MPPT dibutuhkan

sebagai penentu titik kerja maksimal yang dihasilkan dari sistem *photovoltaic* dan menjaga supaya selalu berada pada titik tersebut [13].

Pada sistem MPPT, terdapat DC(Direct Current)-DC *converter* yang digunakan untuk mengubah titik operasi dari *photovoltaic* menjadi titik daya maksimal. Mekanisme MPPT yaitu dengan mengubah titik kerja pada kurva P-V *photovoltaic* untuk memaksimalkan daya yang dihasilkan. Metode MPPT umumnya mengukur arus dan tegangan pada panel surya pada waktu tertentu. Algoritma yang spesifik menangkap informasi tersebut untuk menghitung pengaturan yang harus diterapkan pada rangkaian agar daya yang dihasilkan lebih besar. Pengaturan ini biasanya diberikan dalam bentuk *duty cycle* untuk mengatur DC-DC *converter* [14].

D. Buck Boost Converter

Buck boost converter adalah perangkat elektronik yang dapat mengubah tegangan DC satu ke tegangan DC lainnya dengan level yang berbeda dan umumnya mengeluarkan *output* yang stabil [15]. Berikut merupakan rangkaian *buck boost converter* yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3. Rangkaian Buck Boost Converter

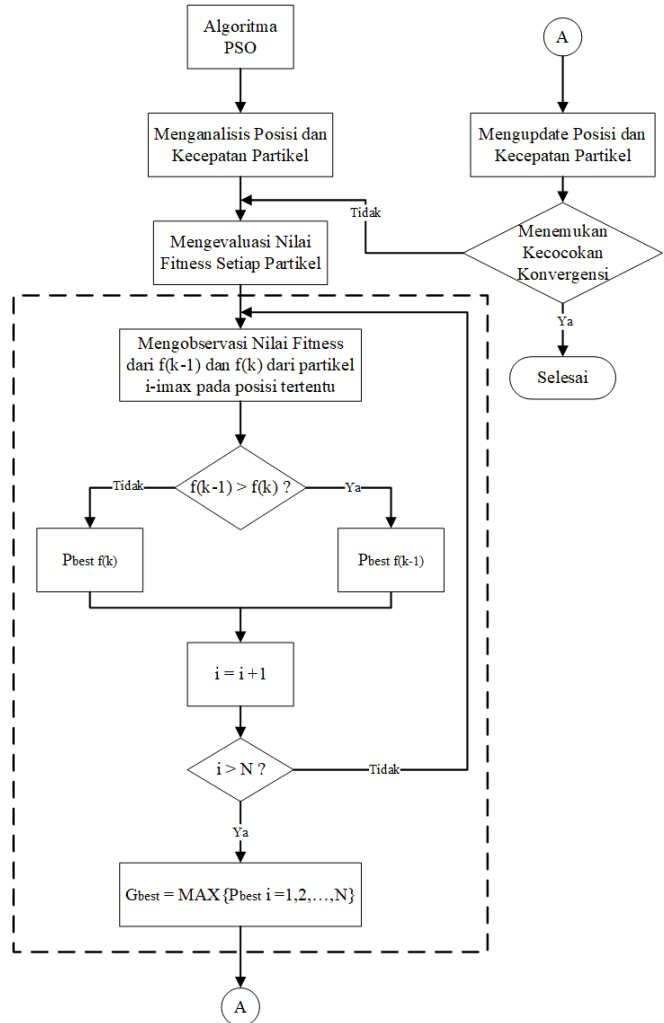
Buck-converter mengubah *input* tegangan yang tinggi menjadi *output* yang lebih rendah nilainya. Sedangkan *boost-converter* digunakan untuk menjadi *gain* dari tegangan *input* dan menghasilkan *output* tegangan yang nilainya lebih tinggi. Kemudian untuk *buck-boost converter* digunakan apabila memerlukan keluaran yang lebih besar atau kecil dari nilai *input*-nya.

E. Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization adalah suatu algoritma *heuristic* yang termasuk dalam kelompok metode optimasi. Algoritma ini menggabungkan teknik pencarian lokal (*local search*) dan pencarian global (*global search*). *Particle Swarm Optimization* dirancang untuk menyelesaikan masalah-masalah kompleks dengan cara membentuk suatu populasi partikel dengan posisi awal yang ditetapkan secara acak. Setiap partikel mewakili sebuah solusi potensial untuk masalah yang sedang dihadapi. Kemudian algoritma ini akan mengevaluasi nilai kecocokan (*fitness*) dari setiap partikel, yang menentukan sejauh mana partikel tersebut berhasil dalam memecahkan masalah [16].

Selama proses optimisasi, partikel-partikel tersebut memperbarui kecepatan (*velocity*) dan posisi mereka berdasarkan pengalaman pribadi serta pengetahuan bersama seluruh kelompok (*swarm*). Dengan memadukan informasi personal dan sosial, partikel-partikel ini dipandu menuju wilayah-wilayah yang menjanjikan dalam ruang pencarian. Perilaku kolaboratif ini memungkinkan kelompok tersebut untuk menjelajahi berbagai wilayah dan memanfaatkan area-

area yang menunjukkan potensi untuk mencapai solusi yang lebih baik.



Gambar 4. Tahapan Algoritma Particle Swarm Optimization [17]

Berdasarkan gambar 4, algoritma *Particle Swarm Optimization* dibagi menjadi 5 tahapan [17]. Berikut penjelasan dari masing masing tahapan.

1. Particle Swarm Optimization Initalitation

Pada tahap inialisasi, partikel-partikel akan diberikan posisi awal secara acak berdasarkan distribusi dalam ruang pencarian (*search space*). Terdapat beberapa parameter yang harus ditentukan pada tahap ini, seperti jumlah partikel yang akan digunakan, koefisien kognitif, koefisien sosial, batasan nilai maksimum dan minimum untuk bobot inersia, serta posisi dan kecepatan awal setiap partikel.

2. Fitness Evaluation

Proses *fitness evaluation* merupakan langkah yang dilakukan untuk mengevaluasi nilai kecocokan (*fitness*) dari setiap partikel secara individual. Pada tahap ini, nilai *fitness* diukur berdasarkan kriteria yang telah ditentukan terkait dengan masalah yang sedang diselesaikan. Evaluasi ini bertujuan untuk menentukan sejauh mana masing-masing partikel berhasil dalam memecahkan masalah atau mencapai tujuan yang diinginkan.

3. Update Individual and Global Best Data

Pada tahap ini, dilakukan perbandingan antara nilai *fitness* yang baru saja dihitung dengan nilai *fitness* sebelumnya. Selain itu, dilakukan pembaruan nilai *Pbest* (*personal best*) dan *Gbest* (*global best*) sesuai dengan nilai *fitness* yang baru. Jika nilai *fitness* yang baru ditemukan lebih kecil dari pada sebelumnya, maka *Pbest* dan *Gbest* akan diperbarui dengan nilai *fitness* tersebut. Sebaliknya, jika nilai *fitness* yang baru ditemukan lebih besar dari sebelumnya, maka iterasi akan dilanjutkan tanpa melakukan perubahan pada *Pbest* dan *Gbest*.

Dalam konteks PSO, *Pbest* mengacu pada nilai *fitness* terbaik yang pernah dicapai oleh setiap partikel secara individu. *Pbest* menunjukkan kualitas solusi terbaik yang telah ditemukan oleh partikel itu sendiri sepanjang iterasi. Sementara itu, *Gbest* merujuk pada nilai *fitness* terbaik yang dicapai oleh seluruh populasi partikel. *Gbest* merupakan solusi terbaik yang ditemukan secara global oleh seluruh partikel dalam populasi.

4. Memperbarui Kecepatan dan Posisi Setiap Partikel

Tahapan ini dilakukan dengan menggunakan persamaan (5) dan (6).

$$V_{i+1} = WV_i + C_1 r_1 (LB_i - X_i) + C_2 r_2 (GB - X_i) \quad (5)$$

$$X_{i+1} = X_i + tv_{i+1} \quad (6)$$

Keterangan :

- V_i = Kecepatan partikel i
- C_1 = Faktor pembelajaran kognitif
- C_2 = Faktor pembelajaran sosial
- r_1 dan r_2 = Nomor distribusi acak
- LB_i = Posisi terbaik partikel lokal i
- GB = Posisi terbaik partikel global
- X_i = Posisi partikel ke- i
- X_{i+1} = Posisi partikel iterasi selanjutnya
- W = Bobot inersia

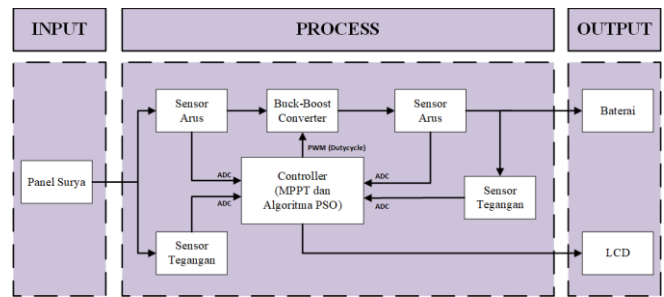
Momen inersia (W) dan *learning factor* (C_1 dan C_2) merupakan hal yang paling krusial dalam menentukan efisiensi pencarian dan tingkat keberhasilan algoritma *Particle Swarm Optimization*.

5. Convergence Determination

Tahapan terakhir dalam algoritma PSO adalah penentuan konvergensi (*convergence determination*). Pada tahap ini, dilakukan pemeriksaan terhadap kriteria konvergensi. Terdapat dua kondisi yang digunakan dalam algoritma ini. Pertama, konvergensi dapat tercapai jika kecepatan (*velocity*) dari semua partikel dalam populasi menjadi lebih kecil daripada suatu nilai ambang (*threshold*) yang ditentukan sebelumnya. Kedua, konvergensi juga dapat tercapai jika jumlah iterasi yang telah dilakukan mencapai batas maksimum yang telah ditentukan sebelumnya.

F. Desain dan Perancangan Sistem

Desain dan perancangan sistem dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar 5.

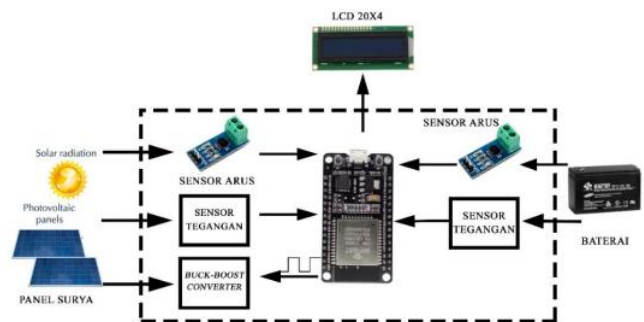


Gambar 5. Perancangan Sistem

Pada sistem ini, panel surya berfungsi sebagai *input* dari sistem dan baterai merupakan *output* dari sistem. Panel surya berfungsi sebagai penghasil sumber tegangan dan arus dari sinar matahari yang diserap. Sensor arus dan tegangan digunakan untuk membaca tegangan yang keluar dari panel surya dan dikirimkan ke mikrokontroler untuk dirubah terlebih dahulu dari *input analog* menjadi nilai *digital* (ADC). Perubahan nilai *digital* tersebut akan diproses ke dalam algoritma *Particle Swarm Optimization*. Hasil dari algoritma *Particle Swarm Optimization* berupa sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) untuk *switching* MOSFET berdasarkan pembacaan sensor tegangan beban (baterai) untuk menentukan *set point* yang diinginkan. Pembacaan sensor arus dan tegangan pada beban berfungsi sebagai *feedback* untuk kontrol agar sesuai dengan *set point* yang diinginkan dengan cara mengontrol nilai PWM untuk proses *charging* ke baterai.

G. Perancangan Hardware

Perancangan hardware pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 6. Data yang dihasilkan oleh sensor tegangan dan sensor arus pada *solar cell* dan baterai akan diolah menggunakan metode *Particle Swarm Optimization*. *Output* data akan digunakan untuk PWM dalam *switching* MOSFET pada rangkaian *buck-boost converter*. Kemudian LCD digunakan untuk menampilkan data masukan dan keluaran dari sistem.

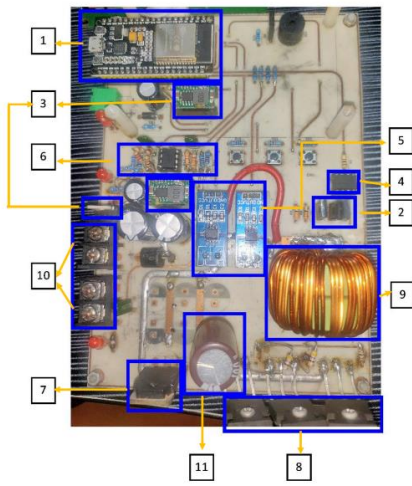


Gambar 6. Perancangan Hardware

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan Elektrik

Hasil dari perancangan elektrik berupa *Printed Circuit Board* (PCB) yang merupakan implementasi dari perancangan *hardware*.



Gambar 7. Hasil Rancangan Elektrik

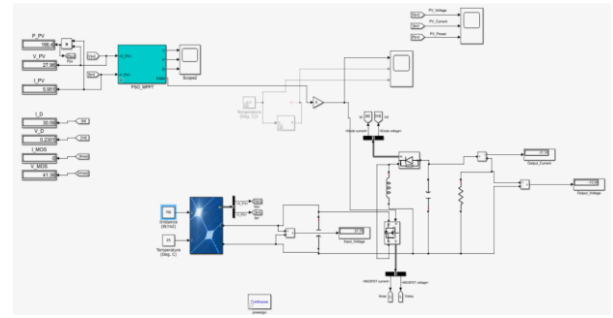
Gambar 7 merupakan hasil perancangan *buck-boost converter* menggunakan PCB cetak. Keseluruhan sistem baik dari sensor tegangan, sensor arus, LCD *monitoring*, *driver* MOSFET, mikrokontroller, rangkaian *buck-boost*, *input*, dan *output* telah dijadikan satu dalam PCB. *Buck-boost converter* pada gambar 7 menggunakan ESP32 yang berfungsi sebagai mikrokontroller dengan tegangan kerja DC 3,3 V – 5 V yang dari tegangan sumber dihubungkan ke modul regulator untuk menyesuaikan tegangan kerja ESP32. Berikut merupakan daftar komponen yang digunakan pada PCB.

1. ESP32 berfungsi sebagai kontrol sistem pada rangkaian *Buck-boost converter* yang dibuat.
2. Transistor BD139 dan BD140 berfungsi sebagai *driver* MOSFET, dengan menggunakan penguat *push pull* kelas AB.
3. Modul *Buck Regulator* dan IRF 740 berfungsi untuk menurunkan tegangan dari sumber menjadi 12 V, kemudian diubah menjadi 5 V agar dapat melakukan *drive* pada MOSFET.
4. Optocoupler 6N137 berfungsi sebagai pengaman dan pemisah kontak fisik antara jalur mikro dengan *driver* MOSFET.
5. Sensor ACS712 20 A berfungsi sebagai pendeteksi atau sensor arus pada keluaran panel surya dan *output* dari rangkaian *converter* yang terhubung dengan baterai.
6. Op-Amp *differential amplifier* berfungsi untuk pembacaan sensor tegangan dan menjadikan tegangan keluaran *buck-boost converter* menjadi *non-inverting*.
7. Dioda 2040 digunakan sebagai komponen *blocking* saat transistor mati.
8. MOSFET Hy4008 yang digunakan untuk mengatur *switching* mosfet dengan menurunkan atau menaikkan tegangan pada *converter*.
9. Induktor digunakan untuk menyimpan energi berupa arus. Sehingga ketika MOSFET dalam kondisi *off* maka induktor akan mengeluarkan energi tersebut.
10. Terminal Blok digunakan untuk tempat kabel konektor *input* dan *output*.
11. Kapasitor bipolar berfungsi sebagai penyalur energi dari induktor ke beban saat proses *switching*.

B. Pengujian Algoritma PSO

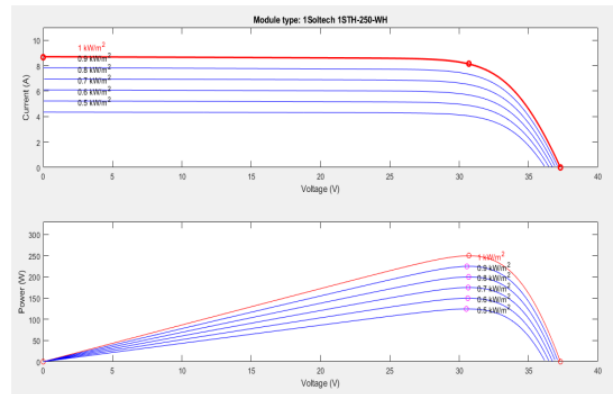
Simulasi MPPT pada matlab dilakukan untuk mengetahui kinerja algoritma *Particle Swarm Optimization* dan menilai

kemampuan kontroler dalam melakukan *tracking* MPP pada berbagai kondisi klimatik. Berikut adalah tampilan gambar rangkaian *converter* yang dimodelkan PSO.



Gambar 8. Simulasi Rangkain *Buck-Boost Converter* Pada Matlab

Panel surya yang digunakan berjenis *mono* dengan keluaran daya maksimum 250 W dengan tegangan maksimum (V_{mp}) sebesar 30,7 V dan arus maksimum (I_{mp}) sebesar 8,15 A. Untuk mengetahui karakteristik daya maksimum pada setiap kondisi iradiasi, pada matlab dapat diplot dengan memasukkan sinyal konstan pada blok PV. Berikut ini adalah kurva karakteristik daya-tegangan dan arus-tegangan di setiap iradiasi berbeda.



Gambar 9. Kurva Karakteristik Panel Surya 250 Wp

Selanjutnya dilakukan pengujian dengan variasi perubahan radiasi matahari mulai dari 600 W/m^2 hingga 900 W/m^2 dengan suhu konstan ideal sebesar $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Pengujian dilakukan untuk menguji algoritma *Particle Swarm Optimization* yang telah dibuat dan diimplementasikan pada *hardware buck-boost converter* yang telah dirancang dengan nilai komponen yang telah sesuai dengan perhitungan. Hasil pengujian ketika terjadi perubahan iradiasi matahari dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil Simulasi Algoritma Menggunakan Matlab

I_{radiasi} (W/m^2)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	Efisiensi (%)
600	33,28	3,55	11,81	9,84	120,06	116,21	96,79
700	27,96	5,95	13,47	11,23	166,4	151,27	90,91
800	31,3	5,2	13,33	11,11	162,76	148,10	90,99
900	32,7	6,45	12,68	15,22	211,5	192,99	91,25

$I_{radiasi}$ (W/m ²)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	Effisiensi (%)
Rata – rata							92,49

Berdasarkan parameter yang telah disimulasikan pada matlab sesuai tabel 2, telah didapatkan rata-rata efisiensi ketika menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* sebesar 92,49% dengan beban 1,2 Ω sesuai karakteristik *converter* yang telah dirancang. Dengan begitu, program pada matlab telah berhasil dijalankan dan disimulasikan. Sehingga, tahap selanjutnya akan dilakukan konversi dari program matlab kedalam program mikrokontroler agar dapat diimplementasikan pada *hardware* yang telah dibuat.

Percobaan algoritma *Particle Swarm Optimization* dilakukan dengan jumlah partikel yang berbeda mulai dari 10, 30, dan 50 partikel. Manipulasi dilakukan dengan tujuan untuk melihat dan menentukan jumlah partikel yang akurat ketika mencari daya maksimum yang dikeluarkan oleh *input* sebelum diaplikasikan menggunakan panel surya. Berikut adalah pengujian ketika menggunakan jumlah partikel sebanyak 10, 30, dan 50.

Tabel 3. Pengujian Algoritma Dengan Perbedaan Jumlah Partikel

Σ Partikel	Pengujian Ke-	$V_{tracking}$ (V)	$I_{tracking}$ (A)	P_{in} (W)	$P_{tracking}$ (W)	Akurasi (%)
10	1	27,32	5,98	180	163,37	90,76
	2	25,37	5,83	180	147,91	82,17
	3	26,73	5,99	180	160,11	88,95
	Rata-rata					87,30
30	1	30	5,26	180	157,80	87,67
	2	28,39	5,99	180	170,06	94,48
	3	29,63	5,98	180	177,19	98,44
	Rata-rata					93,53
50	1	29,99	5,92	180	177,54	98,63
	2	30	5,83	180	174,90	97,17
	3	30	5,97	180	179,10	99,50
	Rata-rata					98,43

Berdasarkan hasil pengujian ketika menggunakan jumlah 10 partikel, didapatkan akurasi dalam mencari titik daya maksimum masih rendah yaitu rata-rata akurasi sebesar 87,3% dengan daya *tracking* maksimal yang diperoleh sebesar 163,37 W. Maka akan dilakukan uji coba yang kedua dengan menambahkan 30 partikel.

Berdasarkan hasil pengujian ketika menggunakan jumlah 30 partikel, didapatkan akurasi dalam mencari titik daya maksimal meningkat dibanding dengan 10 partikel. Rata-rata akurasi yang didapatkan mencapai 93,53% dan daya *tracking* maksimal yang diperoleh sebesar 177,19 W. Namun, untuk menguji keakuratan dari algoritma, maka jumlah partikel akan ditingkatkan menjadi 50 partikel.

Hasil pengujian ketika menambahkan jumlah partikel menjadi 50 partikel, didapatkan akurasi dalam mencari titik daya maksimum mendekati daya keluaran sebenarnya. Tingkat akurasi rata-rata sebesar 98,43%. daya *tracking* maksimal yang diperoleh sebesar 179,10 W. Oleh karena itu, pada penelitian ini jumlah partikel yang digunakan sebanyak 50 partikel, karena akurasi yang dihasilkan lebih optimal dan mendekati tegangan keluaran sumber *input*.

C. Pengujian *Converter* Dengan Panel Surya Menggunakan Baterai

Pengujian *converter buck-boost* dengan *solar cell* bertujuan untuk mengetahui kesesuaian kinerja *converter* dengan karakteristik *converter buck-boost* beserta efisiensi yang dihasilkan ketika dihubungkan dengan *output* baterai. Pada pengujian ini, *buck-boost converter* menggunakan baterai 12 V, 24 V, dan 48 V. Berikut adalah data pengujian baterai 12 V dengan tegangan awal 11,2 V dan dilakukan pengisian hingga tegangan maksimum 13,8 V.

Tabel 4. Data Pengujian *Converter* Pada Baterai 12 Volt

Me nit Ke-	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	V Baterai (V)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η
5	29,5	3,8	13,7	4,6	11,2	112,14	63,02	56,20
10	29,6	3,77	13,75	4,58	11,8	111,59	62,98	56,43
15	30,2	3,67	13,8	4,52	12,1	110,83	62,38	56,28
20	32,2	3,15	13,6	4,46	12,6	101,43	60,66	59,80
25	31,3	3,49	14,25	3,91	12,9	109,24	55,72	51,01
30	31	3,5	14,31	3,84	13,1	108,50	54,95	50,65
35	30,5	3,6	14,33	3,81	13,3	109,80	54,60	49,72
40	30,1	3,61	14,35	3,77	13,4	108,66	54,10	49,79
45	29,7	3,76	14,39	3,73	13,6	111,67	53,67	48,06
50	29,5	3,79	14,39	3,72	13,8	111,81	53,53	47,88
Effisiensi Rata-Rata								52,58

Hasil data pengujian *converter* pada pengisian Baterai 12 V, 5 Ah hingga kondisi penuh sampai tegangan 13,8 V dengan menggunakan *input* panel surya memakan waktu selama 50 menit dengan efisiensi rata-rata yang dihasilkan adalah 52,58%. Selanjutnya dilakukan pengujian kedua dengan pengisian baterai 24 V. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Pengujian *Converter* Pada Baterai 24 Volt

Me nit Ke-	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	V Baterai (V)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η
5	29,31	3,81	25,7	2,66	24,3	111,67	68,36	61,22
10	30,49	3,42	25,8	2,33	24,5	104,28	60,11	57,65
15	29,64	3,44	25,9	2,36	24,8	101,96	61,12	59,95
20	28,51	3,9	26	2,29	25,1	111,19	59,54	53,55
25	29,4	3,46	25,8	2,3	25,4	101,72	59,34	58,33
30	29,21	3,47	26	2,29	25,6	101,36	59,54	58,74
35	30,1	3,2	26,2	2,13	25,9	96,32	55,81	57,94
40	31,8	3,17	26,5	1,77	26,3	100,81	46,91	46,53
45	30,6	3,53	26,8	1,73	26,6	108,02	46,36	42,92

Me nit Ke-	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	V Baterai (V)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η
50	29,5	3,7 9	27,4	1,53	26,8	111,81	41,92	37,50
55	29,3	3,6	27,4	1,6	26,9	105,48	43,84	41,56
Efisiensi Rata-Rata								52,35

Hasil data pengujian *converter* pada pengisian baterai 24 V, 5 Ah hingga kondisi penuh dengan menggunakan *input* panel surya memakan waktu kurang lebih 1 jam dengan efisiensi rata-rata yang dihasilkan sebesar 52,35%. Kemudian pengujian yang ketiga dengan melakukan percobaan pengisian pada baterai 48 V. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Data Pengujian *Converter* Pada Baterai 48 Volt

Me nit Ke-	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	V Baterai (V)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η
5	26,9 6	4,7 2	51,8	1,46	49,7	127,25	75,63	59,43
10	27,2	4,6 2	51,7	1,42	49,9	125,66	73,41	58,42
15	27,3	4,6	51,7	1,45	50,4	125,58	74,97	59,70
20	28,6	4,1 2	51,6	1,32	50,6	117,83	68,11	57,80
25	30	3,1 5	53,3	0,99	50,7	94,50	52,77	55,84
30	27,5	4,3	53,2	1,12	51,1	118,25	59,58	50,39
35	28,2	4,2 1	54,2	0,95	51,4	118,72	51,49	43,37
40	29,8	3,9 1	54,3	0,92	51,8	116,52	49,96	42,87
45	30	3,2	54,3	0,9	52	96,00	48,87	50,91
50	29,7	4	54,1	0,96	52,4	118,80	51,94	43,72
Efisiensi Rata-Rata								52,24

Hasil data pengujian konverter pada pengisian baterai 48 V, hingga kondisi penuh dengan menggunakan *input* panel surya memakan waktu kurang lebih 50 menit dengan efisiensi rata-rata yang dihasilkan sebesar 52,24%.

D. Perbandingan Pengujian MPPT Dan Tanpa MPPT

Pada integrasi *software* dan *hardware* dilakukan pengujian PV yang terhubung dengan *converter* dan terintegrasi dengan algoritma *Particle Swarm Optimization*. Pengujian ini menggunakan beban resistor 7 ohm. Pengujian dilakukan mulai pukul 09.00-13.00 WIB. Untuk menguji akurasi *tracking*, pertama MPPT diuji dengan menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* dan kedua dilakukan pengujian tanpa metode dengan menggunakan potensiometer. Berikut merupakan pencarian data maksimal menggunakan algoritma PSO dengan beban resistor.

Tabel 7. Pengujian MPPT Menggunakan Resistor

Waktu	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} max (W)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{out} max (W)	η
09:00	25,3	6,89	174,32	26,4	3,5	92,4	53,01
10:00	26,1 2	6,49	169,52	27,3	3,62	98,83	58,30
11:00	25,2	6,98	175,9	28,1	3,71	104,25	59,27
12:00	26,4	6,7	176,88	28,2 4	3,94	111,27	62,91
13:00	25,6	6,4	163,84	27,3	3,58	97,73	59,65
Efisiensi Rata-rata							58,62

Pengujian integrasi *hardware* dan *software* menggunakan MPPT didapatkan rata-rata efisiensi sebesar 58,62% dengan pelacakan daya input tertinggi pada jam 12.00 sebesar 176,88 W. Selanjutnya, di waktu yang sama dan kondisi cuaca yang sama akan dijalankan metode PWM dengan menggunakan potensiometer. Dilakukan pengujian tanpa metode dengan mengatur nilai *duty cycle*. Berikut adalah hasil pengujian tanpa metode.

Tabel 8. Pengujian Tanpa Metode dengan Potensiometer

Waktu	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} max (W)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{out} max (W)	η
09:00	22,4	6,9	154,56	26,4	2,65	69,96	45,26
10:00	23,2 2	6,4	148,61	25,2 1	2,8	70,59	47,50
11:00	24,1	6,77	163,16	28,1	2,9	81,49	49,95
12:00	24,7	6,3	155,61	27,6	3,1	85,56	54,98
13:00	23,2 2	6,8	157,90	25,4	3,58	90,93	57,59
Efisiensi Rata-Rata							51,06

Berdasarkan hasil pengujian tabel 7 dan tabel 8, dapat diketahui bahwa nilai P_{in} max menggunakan metode PSO menghasilkan nilai daya yang lebih maksimal dengan selisih peningkatan terbesar 21,27 W. Sedangkan, efisiensi rata-rata yang dihasilkan ketika menggunakan metode dan tanpa metode menunjukkan peningkatan sebesar 7,56%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan MPPT algoritma *Particle Swarm Optimization* daya yang dihasilkan dapat lebih baik dan optimal dibanding tanpa menggunakan metode MPPT.

IV. KESIMPULAN

Setelah dilakukan penelitian dengan berbagai pengujian, maka perancangan *buck-boost converter* yang dilakukan berhasil diaplikasikan pada panel surya dan diintegrasikan dengan algoritma MPPT *Particle Swarm Optimization*. Pengaturan daya keluaran panel surya yang bervariasi pada pengisian baterai 12 V, 24 V, dan 48 V menunjukkan bahwa dengan metode MPPT, keluaran *converter* menjadi lebih stabil dan mendekati nilai daya maksimum panel surya (PMPP). Daya maksimum tertinggi yang dapat dicapai adalah 176,88 W. Kemudian hasil pengujian *hardware* menunjukkan kenaikan daya keluaran panel surya sebesar 21,27 W ketika menggunakan metode MPPT dibandingkan dengan tanpa menggunakan MPPT.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Jasa, I. P. Ardana, and D. A. I. Weking, "Sosialisasi Program Ibm-Pemanfaatan Energi Terbarukan (Solar Cell) Untuk Fasilitas Umum Masyarakat Pedesaan," *Bul. Udayana Mengabdi*, vol. 16, no. 2, pp. 93–99, 2017.
- [2] J. G. Daud, N. Lumondo, and A. Mokotoloy, "Potensi Tenaga Surya sebagai Energi Alternatif di Masa Depan," vol. 7, pp. 4966–4969, 2023.
- [3] S. Sulistiyanto, T. P. Aperilian Damara, A. Mustaqim, A. Devyce, and R. Adawiyah, "'JAYUS' Meja Payung Solar Cell," *J. Tek. Elektro dan Komput. TRIAC*, vol. 8, no. 1, pp. 23–25, 2021, doi: 10.21107/triac.v8i1.10237.
- [4] N. M. Neli Lestari, I. N. Satya Kumara, and I. A. Dwi Giriantari, "Review Status Panel Surya Di Indonesia Menuju Realisasi Kapasitas Plts Nasional 6500 Mw," *J. SPEKTRUM*, vol. 8, no. 1, p. 27, 2021, doi: 10.24843/spektrum.2021.v08.i01.p4.
- [5] K. Ranabhat, L. Patrikeev, A. A. evna Revina, K. Andrianov, V. Lapshinsky, and E. Sofronova, "An introduction to solar cell technology," *J. Appl. Eng. Sci.*, vol. 14, no. 4, pp. 481–491, 2016, doi: 10.5937/jaes14-10879.
- [6] D. Ayu Kade Wida, K. Sumaja, and P. Putu Hadi Wiguna, "Analisis Hubungan Intensitas Radiasi Dan Lama Penyinaran Matahari Dengan Parameter Cuaca Di Stasiun Meteorologi Ngurah Rai Serta Pengaruhnya Terhadap Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di Bali Selatan," *Bul. Meteo Ngurah Rai*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2019.
- [7] M. I. Fadriantama and R. M. S. Adinandra, "Analisis Perbandingan Kinerja Algoritme Perturb And Observe (P&O) Dan Incremental Conductance (IC) Pada Sistem Kendali Maximum Power Point Tracker (MPPT) Untuk Sistem Photovoltaic (PV) Paralel," *J. Chem. Inf. Model.*, no. 1c, pp. 1–6, 2018.
- [8] R. I. Putri, H. Setiawan, B. Irawan, Y. Yunus, T. S. Patma, and E. R. K. Pradani, "Fuzzy Maximum Power Point Tracking (MPPT) controller for photovoltaic system on mini greenhouse," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1402, no. 3, pp. 0–6, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1402/3/033109.
- [9] R. M. Akbar, I. Hidayat, K. B. Adam, F. T. Elektro, and U. Telkom, "Dengan Maximum Power Point Tracking Menggunakan Metode Perturb and Observe Design and Implementation of Buck Boost Converter With Maximum Power Point Tracking Using Perturb and Observe Method," vol. 3, no. 3, pp. 1–7, 2016.
- [10] I. Soesanti and R. Syahputra, "Analisis Kinerja Metode Fuzzy Teroptimasi PSO untuk Strategi Kendali MPPT pada Sistem Solar Photovoltaic," *J. Tek. Elektro*, vol. 13, no. 2, pp. 98–108, 2021, doi: 10.15294/jte.v13i2.33477.
- [11] A. Julisman, I. D. Sara, and R. H. Siregar, "Prototipe Pemanfaatan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Pada Sistem Otomasi Atap Stadion Bola," *KITEKTRO J. Online Tek. Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 35–42, 2017.
- [12] T. K. Energi, T. Mesin, and P. N. Medan, "Analisis Solar Cell 200 Wp Listrik Kapasitas 450 Watt Untuk Rumah Petani Terpencil," pp. 1102–1109, 2022.
- [13] T. Haryanto, "Perancangan Energi Terbarukan Solar Panel Untuk Essential Load Dengan Sistem Switch," *J. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 1, p. 43, 2021, doi: 10.22441/jtm.v10i1.4779.
- [14] A. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. Van Swaaij, and M. Zeman, "Solar energy: fundamentals, technology and systems," *Delft Delft Univ. Technol.*, 2014.
- [15] S. Utami, "Implementasi Algoritma Perturb and Observe untuk Mengoptimasi Daya Keluaran Solar Cell Menggunakan MPPT," *J. INFOTEL Inform. - Telekomun. - Elektron.*, vol. 9, no. 1, pp. 92–99, 2017.
- [16] I. Kusmarna, L. K. Wardhani, and M. Safrizal, "Aplikasi Penjadwalan Mata Kuliah Menggunakan Algoritma Particle Swarm Optimization (Pso)," *J. Tek. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 1–8, 2015, doi: 10.15408/jti.v8i2.2441.
- [17] P. C. Cheng, B. R. Peng, Y. H. Liu, Y. S. Cheng, and J. W. Huang, "Optimization of a fuzzy-logic-control-based MPPT algorithm using the particle Swarm optimization technique," *Energies*, vol. 8, no. 6, pp. 5338–5360, 2015, doi: 10.3390/en8065338.