

Metode *Maximum Power Point Tracking* pada Panel Surya: Sebuah Tinjauan Literatur

Gede Patrianaya Margayasa Wirsuyana¹, Rukmi Sari Hartati², Ida Bagus Gede Manuaba³

^{1,2,3}Program Studi Magister Teknik Elektro,
Fakultas Teknik,
Universitas Udayana, Denpasar

¹patrianayagede@gmail.com, ²rukmisari@unud.ac.id, ³ibgmanuaba@unud.ac.id

Abstrak

Metode pelacakan titik daya maksimum (MPPT) yang efisien memainkan peran penting untuk meningkatkan efisiensi sistem pembangkit *photovoltaic* (PV). Studi ini memberikan tinjauan tentang status metode MPPT saat ini untuk sistem PV yang diklasifikasikan ke dalam tiga kategori. Kategorisasi didasarkan pada karakteristik pelacakan dari metode yang dibahas. Pada penelitian ini juga dilakukan perbandingan antar metode MPPT berdasarkan tiga parameter yaitu waktu konvergensi, tingkat osilasi, dan efisiensi sebagai acuan pemilihan metode untuk membuat analisis yang komprehensif. Tinjauan literatur yang dijelaskan dalam penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi untuk mengatasi kesenjangan untuk penelitian lebih lanjut di bidang ini. Tinjauan komparatif dalam bentuk tabel juga disajikan di akhir pembahasan setiap kategori untuk mengevaluasi kinerja metode ini, yang akan membantu dalam memilih teknik yang sesuai untuk aplikasi tertentu. Hasil yang didapatkan adalah metode konvensional unggul pada waktu *tracking* yang cepat yaitu 0,08 s dengan menggunakan metode P&O sedangkan metode metaheuristik unggul pada efisiensi dan osilasi yang rendah yaitu metode PSO dengan efisiensi 99,98%.

Kata kunci: efisiensi, hibrid, konvensional, metaheuristik, MPPT, osilasi, PV, waktu konvergensi

Abstract

The efficient maximum power point tracking (MPPT) method plays an important role to improve the efficiency of photovoltaic (PV) generation systems. This study provides information on the current status of the MPPT method for PV systems classified into three categories. The categories are based on the search characteristics of the methods discussed. In this study, a comparison among MPPT methods was also carried out based on three parameters, namely convergence, oscillation rate, and efficiency as a reference for selecting methods to make a comprehensive analysis. The literature review described in this study can be used as a reference to address for further research in this area. A comparative overview in tabular form is also provided at the end of each category for selecting these methods, which will assist in the appropriate technique for a particular application. The results obtained are that the conventional method excels at a fast tracking time of 0.08 s using the P&O method while the metaheuristic method excels at efficiency and low oscillations, namely the PSO method with an efficiency of 99.98%.

Keywords: efficiency, hybrid, conventional, metaheuristic, MPPT, oscillation, PV, convergence time

1. Pendahuluan

Peningkatan tingkat emisi gas rumah kaca dan biaya bahan bakar adalah alasan utama di balik upaya untuk menggunakan berbagai sumber energi terbarukan [1], [2]. Di antara berbagai sumber energi berkelanjutan, energi matahari merupakan salah satu yang cocok karena bersih, bebas emisi dan mudah diubah langsung menjadi listrik dengan memanfaatkan sistem *photovoltaic* (PV) [3]. Pembangkit listrik tenaga surya telah menunjukkan potensi yang patut diperhatikan dalam memenuhi permintaan energi. Di Indonesia, potensi kapasitas pembangkit listrik berorientasi matahari merupakan yang paling besar yaitu 200 GWp atau lebih dari 50% dari total potensi energi terbarukan seluruhnya [4]. Diperkirakan kapasitas pembangkit PLTS akan mengalami pertumbuhan lebih cepat dengan semakin ekonomisnya harga listrik dari PLTS sehingga pada tahun 2050 mencapai 187 GWp atau 72% dari total kapasitas pembangkit [5]. Namun, penggunaan ekstensif sistem PV tidak begitu umum karena biaya awal yang tinggi. Sekali lagi, tidak ada jaminan bahwa energi yang dikirim dari PV menunjukkan kualitas daya keluaran yang baik dan stabil karena energi tersebut sepenuhnya bergantung pada radiasi berorientasi matahari dan suhu sekitar modul PV, wilayah sel, dan beban. Untuk operasi sel PV yang efisien dan kualitas daya yang baik di bawah kondisi iklim yang berubah-ubah, mekanisme yang tepat diperlukan untuk mencapai daya maksimum dari PV, yang dianggap sebagai pelacakan titik daya maksimum (MPPT) dalam literatur. MPPT meningkatkan efisiensi dan masa pakai modul PV [6].

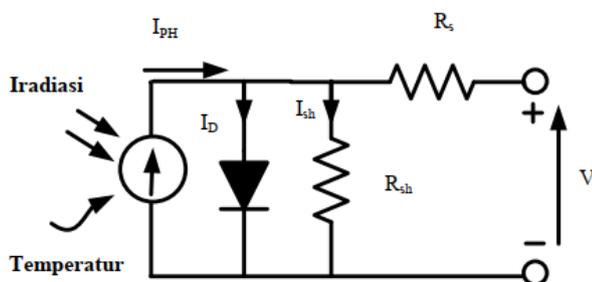
Para peneliti di seluruh dunia menciptakan berbagai metodologi untuk menghasilkan daya sebanyak yang diharapkan dari sumber energi terbarukan dan khususnya, dari panel surya. Sampai saat ini, sejumlah besar algoritma MPPT dapat diakses dalam literatur untuk sistem PV off-grid dan grid [7]. Pemilihan sistem MPPT tertentu dari berbagai metode MPPT yang ada merupakan hal yang membingungkan karena setiap metode memiliki kelebihan dan kelemahan tertentu [8]. Hingga saat ini, pengoperasian berbagai metode MPPT disajikan oleh berbagai makalah penelitian. Banyak penelitian juga telah diterbitkan untuk mengklasifikasikan metode ini. Seperti pada [9], yang melakukan studi perbandingan antar metode MPPT. Namun, tidak dijelaskan secara detail mengenai perbedaan dari metode konvensional, metaheuristik, dan hibrid secara mendetail dan juga parameter yang digunakan belum bisa diukur dengan jelas. Pada penelitian ini dilakukan upaya untuk mengkategorikan delapan metode MPPT yang dibahas ke dalam tiga kategori berdasarkan sifat pelacakan dan teknik komputasinya untuk menemukan MPP yang sebenarnya. Ketiga kelompok yang dikategorikan tersebut adalah metode konvensional, metode berbasis kecerdasan buatan (metaheuristik), dan metode hibrid atau kombinasi. Untuk mengetahui metode yang efisien juga dilakukan perbandingan pada masing-masing kategori berdasarkan tiga kriteria yaitu waktu konvergensi (waktu untuk mencapai kondisi *steady state*), tingkat osilasi, dan efisiensi. Tabel perbandingan dan cara kategorisasi akan membantu di masa depan untuk memilih metode MPPT yang sesuai untuk sistem PV.

Artikel ini disusun sebagai berikut. Pada Bagian 2, disajikan tinjauan Pustaka yang membahas model sistem PV surya dengan karakteristik I V, rangkaian ekivalen, pengaruh suhu dan iradiasi, PSC, dan MPPT. Metodologi penelitian yang membahas alur penelitian dijelaskan di Bagian 3. Tinjauan literatur berbagai metode MPPT dan perbandingannya ditunjukkan di Bagian 4. Diskusi keseluruhan tentang metode yang dibahas setelah meninjaunya juga dirinci di Bagian 4. Akhirnya, kesimpulan dari artikel ini diakhiri di Bagian 5.

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Photovoltaic (PV)

Photovoltaic dibuat dari begitu banyak bagian-bagian kecil yang disebut sel surya yang terkoneksi seri dan paralel untuk mendapatkan nilai tegangan dan arus yang dibutuhkan [10]. Kumpulan dari banyak sel surya disebut dengan modul atau panel surya. Ketika cahaya matahari yang berupa paket-paket partikel membentur mengenai sebuah material semikonduktor yang bersifat positif dan negatif, partikel-partikel disebut photon ini mentransfer energi karena benturannya terhadap material menyebabkan atom-atom material kehilangan elektronelektronnya. Elektron-elektron ini bergerak menuju permukaan dan menyebabkan permukaan yang berseberangan menjadi bermuatan positif. Apabila sebuah penghantar diletakkan diantara kedua perbedaan muatan diantara permukaan material seperti ini, dan benturan partikel photon terhadap material berlanjut secara konstan dan kontinyu, maka arus elektron akan terus bergerak dengan stabil. Begitulah energi listrik diproduksi oleh photovoltaic.

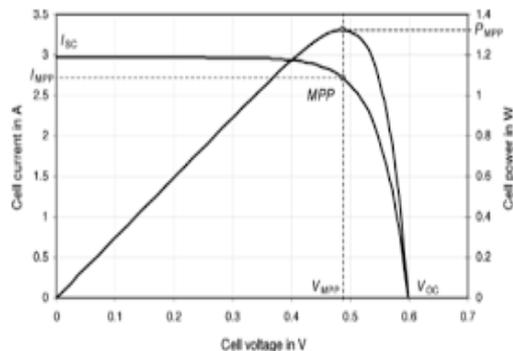


Gambar 1. Rangkaian ekuivalen panel surya [11]

Model ekuivalen dari *photovoltaic* dapat ditunjukkan pada Gambar 1 [11], di mana sebuah sel photovoltaic dimodelkan sebagai sumber arus yang diparalel dengan dioda, dan memiliki tahanan seri dan tahanan paralel terhadap bias diode. Dari Gambar 1 bisa didapatkan persamaan ekuivalen photovoltaic sebagaimana Persamaan (1).

$$I = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{(V+IR_s)q}{a kT}} - 1 \right) - \frac{(V+IR_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

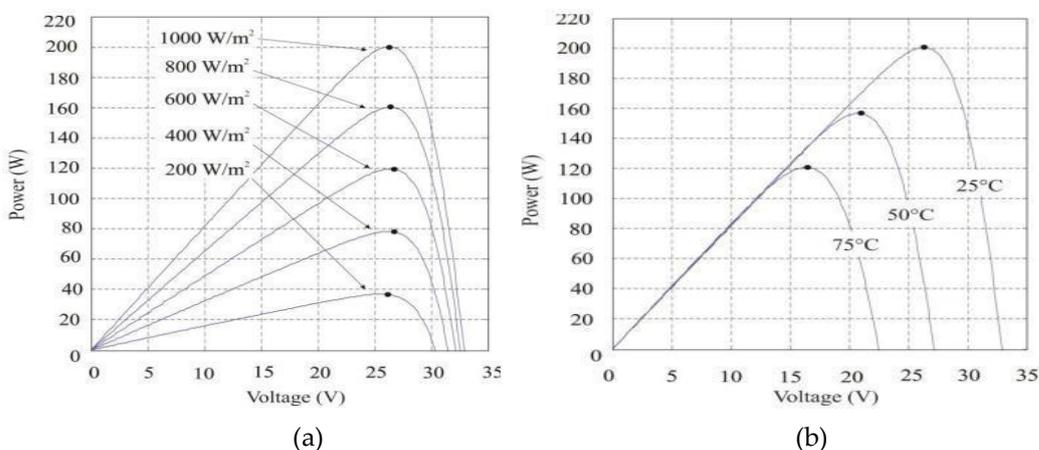
Di mana I dan V masing-masing adalah arus dan tegangan keluaran PV, I_{ph} adalah arus *photocurrent* yang terbangkit pada PV, I_o adalah arus saturasi diode, q adalah muatan elektron sebesar $1,6 \times 10^{-19}$ coulumb, k adalah konstanta Boltzman, T adalah temperature sel, R_s adalah resistensi seri sel, R_{sh} adalah resistensi paralel sel, serta a adalah factor kualitas diode (bernilai antara 1 dan 2).



Gambar 2. Kurva karakteristik PV pada kondisi normal [12]

Daya yang dihasilkan panel surya ketika mendapat cahaya diperoleh dari kemampuan perangkat panel surya tersebut untuk memproduksi tegangan dan mengeluarkan arus ketika diberi beban pada waktu yang sama. Kemampuan ini direpresentasikan dalam karakteristik kurva (I-V) dan karakteristik kurva daya-tegangan (P-V) sesuai pada Gambar 2 [12]. Pada kurva I-V menggambarkan keadaan sebuah panel surya yang beroperasi secara normal. Panel surya akan menghasilkan energi maksimum jika nilai V_{mp} dan I_{mp} juga maksimum. Kurva I-V terdiri dari 3 hal penting yaitu *Maximum Power Point* (V_{mp} dan I_{mp}) ialah titik operasi, di mana maksimum *output* yang dihasilkan oleh panel surya saat kondisi operasional. *Open Circuit Voltage* (V_{oc}) ialah kapasitas tegangan maksimum yang dapat dicapai pada saat tidak adanya arus ($I=0$). Lalu *Short Circuit Current* (I_{sc}) ialah maksimum *output* arus dari panel surya yang dapat dikeluarkan dengan kondisi *short circuit* ($V=0$).

Beberapa faktor yang mempengaruhi besar tegangan *output* dari panel surya yaitu iradiasi matahari dan temperatur. Arus *output* sangat terpengaruh oleh intensitas cahaya matahari yang jatuh di atas permukaan panel surya. Ketika intensitas cahaya turun maka arus *output* kecil dan saat intensitas cahaya naik maka arus *output* akan bertambah besar. Selain itu radiasi matahari berpengaruh terhadap daya *output* panel surya, semakin besar intensitas radiasi matahari maka daya yang dihasilkan oleh sel surya juga akan mendekati maksimal. Selain itu, panel surya dapat beroperasi secara maksimum jika temperatur sel tetap normal pada 25° , kenaikan temperatur melebihi 25° akan melemahkan tegangan *output* (V_{oc}). Setiap kenaikan sebesar 1° dari 25° akan berkurang sekitar 0,4% pada total daya yang dihasilkan akan melemah $2\times$ lipat untuk kenaikan temperatur sel per 10° . Gambar 3a dan 3b menunjukkan grafik perbandingan kurva karakteristik PV dengan nilai iradiasi dan temperatur yang berbeda [13].

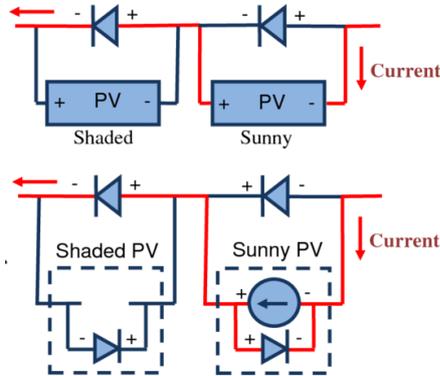


Gambar 3. Perbandingan kurva karakteristik PV [13] (a) iradiasi berbeda (b) temperatur berbeda

2.2. Partial Shading Condition (PSC)

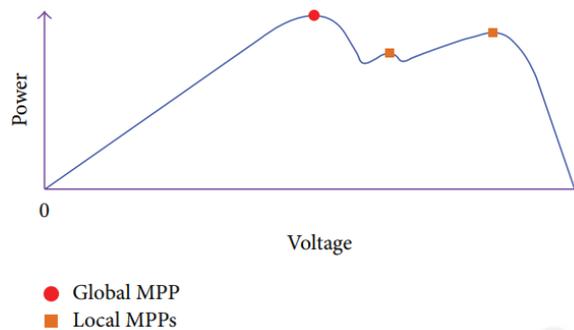
Kondisi partial shading adalah sebuah kejadian di mana beberapa panel surya pada sebuah PV Array menerima iradiasi matahari yang tidak sama (*non-uniform irradiance*) karena terbayangi sebagian oleh sebuah benda [14]. Daya yang dihasilkan dari panel yang terdapat *partial shading* lebih rendah dibanding panel yang tidak terkena *partial shading*. Panel surya yang terkena *partial shading* akan berubah fungsi seolah-olah menjadi hambatan serta menyerap arus dalam jumlah yang cukup besar dari panel surya yang tidak terbayangi. Hal tersebut dikarenakan sel surya yang tidak terkena matahari menjadi

bersifat resistif. Hal ini mampu merusak panel tersebut karena panas yang berlebihan dari arus tersebut. Untuk menghindari hal ini maka diperlukan pemasangan *bypass diode* yang dirangkai paralel di setiap panel seperti pada Gambar 4 [15]. *Bypass diode* ini menyediakan jalur sementara untuk proses konduksi arus saat terjadi fenomena *partial shading*.



Gambar 4. Dioda *bypass* pada panel surya [15]

Namun ada efek samping dari pemasangan *bypass diode* ini. Saat sebuah PV Array dalam keadaan iradiasi seragam (*uniform irradiance*), terdapat 1 puncak pada kurva karakteristik P-V yang menunjukkan puncak global atau *global peak*. Puncak ini menunjukkan daya maksimum pada PV Array tersebut. Ketika *partial shading* terjadi, muncul beberapa puncak pada kurva P-V karena pemasangan *bypass diode*. Akibatnya daya yang diserap oleh sistem konsumen tidak maksimal dan ada penurunan efisiensi yang cukup mempengaruhi kualitas daya dari sistem panel surya tersebut. Banyaknya puncak yang muncul tergantung dari konfigurasi PV String serta seberapa besar efek *partial shading*. Gambar 5 menunjukkan kurva P-V saat terjadi *partial shading* [16].



Gambar 5. Kurva P-V saat terjadi *partial shading* [16]

Puncak yang paling tinggi adalah *global peak* yang menunjukkan daya maksimum yang dihasilkan oleh PV String, sedangkan puncak lainnya adalah *local peak*. Hal ini bisa mengacaukan sistem MPPT dengan algoritma sederhana seperti P&O karena puncak yang dicari lebih dari 1. Namun, waktu terjadinya *partial shading* tidaklah konstan. Hal ini dikarenakan pola *partial shading* yang bisa berubah-ubah tergantung kondisi cuaca saat itu. Dengan pola *partial shading* yang sama, daya maksimum dari sistem PV menurun secara konstan dan berbanding terbalik dengan tingkat *partial shading*. Semakin tinggi efek *partial shading* maka daya maksimum panel surya yang dihasilkan semakin rendah. Hal ini dikarenakan sistem *photovoltaic* tergantung dari besarnya iradiasi matahari untuk menghasilkan daya listrik.

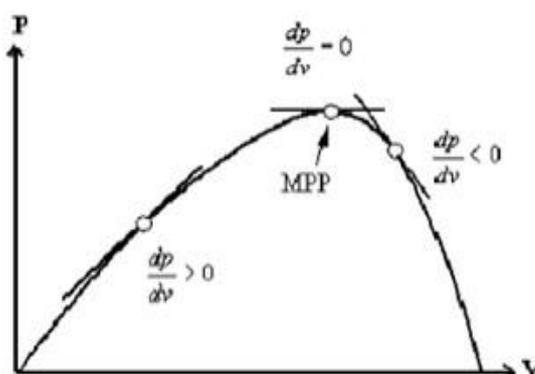
2.3. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) adalah sebuah metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai tegangan dan arus yang optimal sehingga didapat daya keluaran yang maksimal dari suatu panel surya [17]. Daya keluaran yang maksimal ini akan menghasilkan rasio daya yang tinggi dan mengurangi rugi-rugi pada panel surya. MPPT memerlukan dua komponen pendukung dalam pengoperasiannya yaitu arus *input* (I) dan tegangan *input* (V). Dua komponen ini dikombinasikan untuk mendapatkan nilai daya (P) seperti pada Persamaan (2).

$$P = V \times I \quad (2)$$

Secara matematis, untuk mencari titik maksimum pada suatu kurva parabola yaitu turunan pertama $f'(x)$ sama dengan nol. Turunan ini merupakan nilai kemiringan (gradien) garis singgung pada suatu kurva parabola. Gradien akan positif ketika kurva naik ($f'(x) > 0$) dan akan negatif ketika kurva turun ($f'(x) < 0$). Ketika pada kondisi maksimum, gradien sejajar dengan sumbu absis (x). Pada konsep MPPT, gradien ini sebagai slope (S). Sehingga untuk menentukan titik daya maksimum atau *Maximum Power Point* (MPP) diperoleh pada keadaan S sama dengan nol. S merupakan perbandingan perubahan daya (dP) dengan perubahan tegangan (dV).

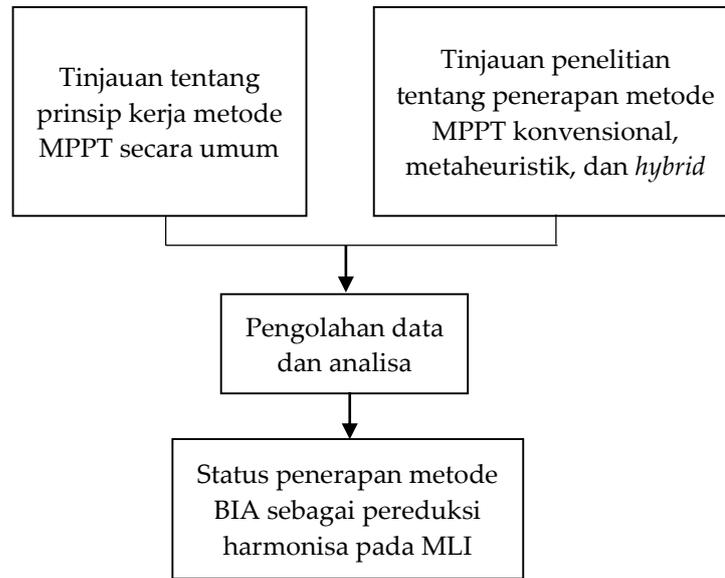
Prinsip kerja MPPT yang ditunjukkan pada Gambar 6 [18] yaitu menaikkan tegangan dan menurunkan tegangan kerja panel surya. Apabila tegangan (V) jatuh pada daerah sebelah kiri tegangan maksimum (V_{mpp}) atau ($V < V_{mpp}$), maka (V) akan dinaikkan sampai mencapai (V_{mpp}), begitu juga sebaliknya apabila (V) berada di sebelah kanan tegangan maksimum (V_{mpp}) atau ($V > V_{mpp}$), maka (V) akan diturunkan sampai mencapai (V_{mpp}). Setelah mencapai (V_{mpp}), secara otomatis daya keluaran juga akan maksimal (P_{mpp}), yang bertugas untuk menaikkan dan menurunkan tegangan adalah DC-DC converter.



Gambar 6. Prinsip kerja MPPT [18]

3. Metodologi Penelitian

Penelitian ini melakukan tinjauan dan perbandingan terhadap penerapan metode MPPT konvensional, metaheuristik, dan *hybrid* dilihat dari tiga kriteria yaitu waktu untuk mencapai *steady state*, tingkat osilasi, serta efisiensi yang dihasilkan. Data yang digunakan berasal dari artikel jurnal, publikasi *conference*, dan dokumen lainnya. Data ini diperoleh melalui pengindeks atau mesin pencari seperti Google Scholar, ResearchGate, dan IEEE Xplore. Skematik penelitian yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 7.



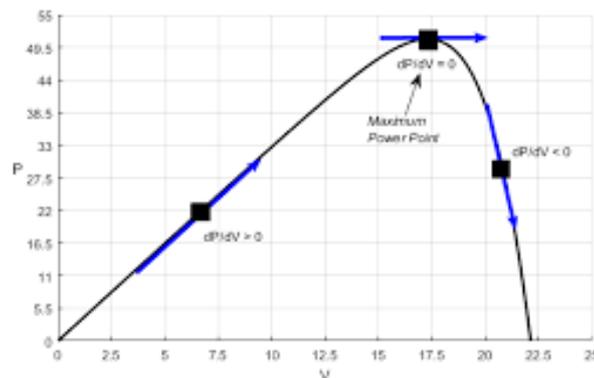
Gambar 7. Skematik penelitian

Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan. Tahapan pertama melakukan tinjauan literatur tentang gambaran dan prinsip kerja beberapa metode MPPT secara umum dan tinjauan penelitian tentang penerapan metode MPPT konvensional, metaheuristik, dan hibrid. Selanjutnya pada tahapan kedua dilakukan pengolahan data dan analisa dari hasil tinjauan literatur untuk dilakukan perbandingan dan mengetahui performa dari masing-masing metode MPPT yang diteliti. Pada tahapan ketiga dilakukan analisa mengenai status penerapan metode MPPT yang paling optimal untuk menghasilkan daya maksimal dengan kualitas yang baik dari panel surya.

4. Metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)

4.1. Metode Konvensional

Metode MPPT konvensional lebih mudah diimplementasikan dibandingkan dengan metode lain [7] karena menggunakan pengukuran sederhana menggunakan sensor tegangan, arus, temperature, dan iradiasi untuk mencapai MPP. Metode *Perturb & Observe* dan *Incremental Conductance* adalah salah satu yang termasuk metode MPPT konvensional.



Gambar 8. Posisi dP/dV yang berbeda pada kurva P-V [19]

4.1.1. Metode *Perturb & Observe* (P&O)

Algoritma *Perturb and Observe* (P&O) merupakan jenis algoritma kontrol MPPT yang memiliki komputasi mudah dan cepat. P&O juga disebut dengan metode *hill climbing*, yang mengacu pada karakteristik P-V dari sel surya [19]. Seperti Gambar 8 terdapat 3 jenis titik yang berada pada 3 posisi yaitu $dP/dV > 0$, $dP/dV = 0$ dan $dP/dV < 0$. Saat $dP/dV > 0$ maka tegangan panel surya diganggu (*perturbed*) untuk memindahkan tegangan panel surya menuju titik MPP dan saat $dP/dV < 0$ maka algoritma P&O membalik arah gangguan [19], [20].

Penelitian penerapan metode P&O dilakukan pada [21], [22], dan [23]. Pada [22], dilakukan simulasi melalui Matlab dengan menggunakan *boost converter* sebagai media konversi energi. Pengujian dilakukan dengan mengubah nilai iradiasi dan temperatur. Dalam penelitiannya dihasilkan efisiensi daya sangat fluktuatif yaitu dengan nilai terendah 70,77% dan sempat menyentuh nilai tertinggi sebesar 99,99%. Hal ini bisa disebabkan karena osilasi yang dihasilkan tinggi karena perubahan kondisi cuaca sehingga daya yang dihasilkan tidak stabil. Waktu *tracking* yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi tunak juga sangat fluktuatif yaitu 0,4 – 3 s. Penelitian serupa juga dilakukan pada [23] yaitu penerapan metode P&O dalam kondisi berbayang. Dalam penelitiannya dihasilkan efisiensi daya dari metode P&O sebesar 84,71 – 99,98%. Efisiensi dari metode P&O lebih bervariasi dikarenakan osilasi yang cukup tinggi sehingga daya keluaran masih belum stabil. Waktu *tracking* yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi tunak oleh metode P&O selama 0,11 – 0,153 s. Sedangkan pada [21] disajikan perbandingan metode P&O dan metode ANN sebagai validasi. Media konversi energi yang digunakan adalah *buck boost converter*. Hasilnya, dihasilkan waktu *tracking* yang dibutuhkan adalah selama 0,08 s namun memiliki osilasi yang cukup tinggi mencapai 11,5% dengan efisiensi sebesar 99,28%.

4.1.2. Metode *Incremental Conductance* (IC)

Strategi ini pada dasarnya menggunakan cara yang sama dari P&O untuk mencapai MPP, namun menggunakan hubungan unik dari kurva IV (kurva arus-tegangan). Perhitungan ini memahami estimasi arus dan tegangan sel PV dan mengukur turunan dari arus sel PV (dI) dan tegangan sel PV (dV) [24]. Strategi IC tergantung pada bagaimana turunan dari daya keluaran P terhadap tegangan panel V ekuivalen dengan nol pada MPP. Dalam metode ini, semua data akan dimaksudkan untuk menggunakan kemiringan kurva P-V sistem dan melacak MPP dengan data tersebut. Jika kemiringan kurva P-V atau turunan dari daya larik PV ($dP=dV$) adalah nol, maka hanya proses pelacakan yang dilakukan. Setiap kali kondisi cuaca berubah dengan cepat, pelacakan MPP akan lebih sulit, dan laju pelacakan juga menurun dalam laju eksponensial karena perubahan kurva P-V yang konsisten.

Penelitian penerapan metode P&O dilakukan pada [25] dan [26]. Pada [25], penelitian penerapan metode IC dilakukan dengan menggunakan *SEPIC Converter* dan diuji dengan empat pola *shading* yang menghasilkan iradiasi berbeda-beda. Hasilnya, efisiensi yang dihasilkan cukup rendah sebesar 61,89% dengan osilasi yang cukup tinggi dan memiliki waktu *tracking* selama 0,3 s. Pada [26], penelitian dilakukan dengan menggunakan *buck boost converter* dan diuji dengan dua nilai iradiasi yaitu 500 W/m² dan 1000 W/m². Hasilnya, efisiensi yang dihasilkan sangat baik hamper mendekati 100% namun waktu *tracking* yang dihasilkan cukup lama yaitu selama 0,434 – 0,479 s dengan osilasi yang cukup tinggi.

4.2. Metode Metaheuristik

Metode metaheuristik pada dasarnya menggunakan kecerdasan buatan untuk mendeteksi daya optimal dari panel surya. Berbeda dengan metode konvensional, metode ini memiliki sistem komputasi yang lebih kompleks [27]. Metode PSO, GA, dan ANN merupakan jenis metode berbasis kecerdasan buatan.

4.2.1. Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO)

Algoritma PSO adalah metode optimasi global multi-fungsi yang dikembangkan dengan mensimulasikan perilaku mencari makan burung. Performanya yang luar biasa untuk memecahkan masalah multi-puncak dalam sistem multi-variabel telah diakui secara luas oleh para peneliti di berbagai bidang. Tujuan dari PSO adalah untuk menemukan partikel terbaik yang mewakili solusi optimal global, yaitu GMPP dari PV *array*. Partikel dapat berupa tegangan keluaran atau arus keluaran, dan fungsi tujuan dapat berupa daya keluaran. Dengan asumsi konverter dipasang, *duty ratio* dapat menjadi variabel kontrol. Namun, inisialisasi grup dan perubahan lingkungan memiliki dampak besar pada kinerjanya.

Penelitian penerapan metode PSO dilakukan pada [23] dan [28]. Pada [23], selain penerapan metode P&O, juga dilakukan perbandingan dengan metode PSO dalam kondisi berbayang. Dalam penelitiannya dihasilkan efisiensi daya dari metode PSO sebesar 99,84 – 99,98%. Efisiensi dari metode PSO lebih stabil dibandingkan dengan metode P&O dikarenakan osilasi yang dihasilkan lebih rendah sehingga daya keluaran lebih stabil. Namun waktu *tracking* yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi tunak oleh metode PSO sedikit lebih lama dibandingkan dengan metode P&O yaitu selama 0,11 – 0,172 s. Sedangkan pada [28], digunakan *flyback converter* sebagai media penerapan MPPT PSO. Hasilnya, efisiensi yang dihasilkan cukup tinggi sebesar 91,42% sedangkan waktu *tracking* yang diperlukan untuk mencapai kondisi tunak adalah selama 0,8 s dengan menghasilkan osilasi yang rendah.

4.2.2. Metode *Artificial Neural Network* (ANN)

Artificial Neural Network (ANN) merupakan salah satu algoritma yang sering digunakan untuk menyelesaikan masalah yang kompleks. ANN adalah model matematika yang memiliki urutan kerja seperti kerja biologis jaringan saraf tiruan, dan dimodelkan dengan struktur matematika [29]. ANN merupakan sistem pemrosesan yang saling berhubungan dan bertukar informasi, seperti sistem neuron di otak. Setiap proses memiliki nilai konstan yang disebut bobot dan bias dan kemudian memiliki aktivasi di setiap neuron. ANN memiliki beberapa keunggulan diantaranya pelatihan off-line, respon cepat, pemetaan nonlinier, upaya komputasi yang lebih sedikit, operasi yang kuat, dan dapat memecahkan masalah yang rumit.

Penelitian penerapan metode ANN dilakukan pada [21] dan [26]. Pada [21], disajikan perbandingan metode P&O dan metode ANN sebagai validasi. Media konversi energi yang digunakan adalah *buck boost converter*. Hasilnya, dihasilkan waktu *tracking* yang dibutuhkan adalah selama 0,063 s dengan tanpa osilasi yang dihasilkan dan mempunyai efisiensi sebesar 99,97%. Hasil ini lebih baik jika dibandingkan metode P&O pada penelitian ini juga dengan variabel dan parameter yang sama. Penelitian juga dilakukan dalam [26], penelitian dilakukan dengan menggunakan *buck boost converter* dan diuji dengan dua nilai iradiasi yaitu 500 W/m² dan 1000 W/m². Hasilnya, efisiensi yang dihasilkan sangat baik yaitu sebesar 90,6 – 99,25% dengan waktu *tracking* yang dihasilkan cukup lama yaitu selama 0,065 – 0,083 s dengan osilasi yang cukup tinggi.

4.2.3. Metode *Differential Evolution* (DE)

Differential Evolution (DE) adalah salah satu algoritma evolusioner yang mengoptimalkan masalah dengan secara iteratif meningkatkan solusi kandidat dalam populasi sampai solusi terbaik diperoleh. DE merupakan salah satu algoritma berbasis populasi yang paling banyak digunakan karena memiliki struktur yang sederhana, konvergensi yang cepat, ketahanan yang baik dan mudah untuk dilaksanakan [30]. Kurva P-V dari *photovoltaic* dapat terdiri dari beberapa titik daya maksimum di bawah kondisi berbayang. Ini dapat membingungkan algoritma MPPT konvensional untuk menemukan GMPP yang sebenarnya. DE mampu melacak GMPP karena bergantung pada ruang pencarian yang luas pada kurva P-V, gangguan stokastiknya juga membantu algoritma untuk menjelajahi ruang pencarian dengan lebih baik. Algoritma DE mudah diimplementasikan karena hanya beberapa parameter yang diperlukan untuk diatur seperti Np (ukuran populasi), f (faktor mutasi) dan Cr (laju persilangan). Parameter-parameter ini perlu disetel dalam desain sistem awal untuk memberikan hasil yang baik pada proses optimasi. Proses optimasi DE meliputi inisialisasi, mutasi, *crossover*, dan seleksi.

Penelitian penerapan metode ANN dilakukan pada [31] dan [32]. Pada [31], penelitian dilakukan melalui simulasi dengan *software* PSIM. Simulasi dilakukan dengan kondisi *partial shading* dengan empat pola *shading* dengan variasi nilai iradiasi yaitu 600 – 1000 W/m². Perangkat untuk penerapan MPPT menggunakan *boost converter*. Hasilnya, MPPT DE mampu menghasilkan efisiensi sebesar 99,9% dengan kecepatan waktu *tracking* selama 0,309 s. Osilasi yang dihasilkan cenderung tinggi di awal saat melakukan *tracking*, namun menjadi stabil setelah mencapai MPP. Sedangkan pada [32], dilakukan penelitian serupa dengan menggunakan perangkat *buck converter* dan menggunakan tiga pola *shading*. Penelitian ini menghasilkan efisiensi MPPT sebesar 98,6 – 99,1% dengan waktu *tracking* 0,075 – 0,14 s dengan osilasi yang sama seperti penelitian sebelumnya.

4.3. Metode Hibrid

Metode hibrid merupakan gabungan antara metode konvensional dan metode kecerdasan buatan. Metode ini dibuat dengan tujuan untuk mengatasi permasalahan yang dihasilkan kedua metode tersebut sehingga tercipta sistem MPPT yang lebih optimal. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai kombinasi metode MPPT ANN – IC, PSO – IC, dan ANN – P&O.

Penelitian [26] membahas mengenai kombinasi metode ANN yang merupakan metode metaheuristic dan metode IC yang merupakan metode konvensional. Kombinasi dua metode ini diharapkan menghasilkan performa MPPT yang lebih baik dibandingkan hanya berdiri sendiri. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *buck boost converter* dan diuji dengan dua nilai iradiasi yaitu 500 W/m² dan 1000 W/m². Hasilnya, efisiensi yang dihasilkan sangat baik yaitu sebesar 100% dengan waktu *tracking* yang dihasilkan cukup lama yaitu selama 0,057 – 0,068 s. Hasil ini lebih baik dibandingkan performa metode MPPT ANN dan IC yang berdiri sendiri. Namun sangat disayangkan osilasi yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan jika masing-masing metode berdiri sendiri. Lalu pada [25], dilakukan penelitian dengan kombinasi metode PSO dan metode IC. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *SEPIC Converter* dan diuji dengan empat pola *shading* yang menghasilkan iradiasi berbeda-beda. Hasilnya, efisiensi rata-rata yang dihasilkan cukup tinggi sebesar 99,66% dengan osilasi yang mirip dengan yang dihasilkan metode PSO dan memiliki waktu *tracking* selama 0,34 s yang masih lebih lama jika dibandingkan dengan metode IC. Sedangkan pada [33], kombinasi metode ANN dan P&O dilakukan

menggunakan *boost converter* dan diuji dengan tiga nilai iradiasi berbeda yaitu 600, 800, dan 1000 W/m². Hasilnya, metode yang diusulkan mampu menghasilkan efisiensi sebesar 97,67% pada kondisi cuaca normal dan sebesar 97,52% pada kondisi cuaca berubah-ubah. Osilasi yang dihasilkan juga relatif rendah jika dibandingkan dengan metode P&O, dan waktu *tracking* yang dibutuhkan tidak disebutkan secara tertulis namun jika dilihat pada data gambar bisa dikatakan hampir mencapai 1 s.

4.2. Perbandingan Performa Metode MPPT

Setelah meninjau berbagai literatur tentang penerapan metode MPPT konvensional maupun berbasis kecerdasan buatan (metaheuristik) dan hibrid, maka dilakukan perbandingan performa dari metode yang digunakan. Ada tiga indikator yang menjadi parameter kualitas dan kehandalan dari sistem yang dirancang. Indikator pertama yaitu dengan membandingkan waktu *tracking* sampai mencapai kondisi *steady state*. Semakin cepat waktu yang dihasilkan maka semakin handal metode tersebut jika diaplikasikan di berbagai kondisi cuaca. Indikator selanjutnya dilihat dari nilai efisiensi yang dihasilkan dari metode yang digunakan. Semakin besar efisiensi, semakin baik keandalan sistem karena rugi-rugi daya semakin kecil. Dan indikator ketiga adalah tingkat osilasi di mana semakin rendah osilasi maka semakin stabil daya keluaran dari metode tersebut. Tabel 1 menunjukkan perbandingan performa metode MPPT dari berbagai literatur.

Tabel 1. Perbandingan performa metode MPPT

Ref.	Metode	Kategori	Kriteria		
			Waktu <i>Tracking</i>	Tingkat Osilasi	Efisiensi
[22]	P&O	Konvensional	0,4 – 3 s	Tinggi	70,77 – 99,99%
[23]	P&O	Konvensional	0,11 – 0,153 s	Tinggi	84,71 – 99,98%
[21]	P&O	Konvensional	0,08 s	Tinggi	99,28%
[25]	IC	Konvensional	0,3 s	Tinggi	61,89%
[26]	IC	Konvensional	0,434 – 0,479 s	Tinggi	100%
[23]	PSO	Metaheuristik	0,11 – 0,172 s	Rendah	99,84 – 99,98%
[28]	PSO	Metaheuristik	0,8 s	Rendah	91,42%
[21]	ANN	Metaheuristik	0,063 s	Rendah	99,97%
[26]	ANN	Metaheuristik	0,065 – 0,083 s	Rendah	90,6 – 99,25%
[31]	DE	Metaheuristik	0,309 s	Rendah	99,9%
[32]	DE	Metaheuristik	0,075 – 0,14 s	Rendah	98,6 – 99,1%
[26]	ANN – IC	Hibrid	0,057 – 0,068 s	Tinggi	100%
[25]	PSO – IC	Hibrid	0,34 s	Rendah	99,66%
[33]	ANN – P&O	Hibrid	± 1 s	Rendah	97,52 – 97,67%

Dapat dilihat bahwa metode MPPT konvensional menghasilkan tingkat osilasi yang tinggi yang menyebabkan efisiensi yang dihasilkan cenderung rendah dan sangat fluktuatif. Sedangkan metode metaheuristik mempunyai efisiensi yang tinggi dan cenderung stabil karena mempunyai tingkat osilasi yang rendah. Namun waktu *tracking* dari metode metaheuristik masih belum memuaskan dan kebanyakan masih lebih lama dibandingkan dengan metode konvensional P&O yang mampu mencapai *steady state* hanya dengan waktu 0,08 s. Pada metode hibrid, waktu *tracking* yang dihasilkan oleh kombinasi metode PSO – IC dan metode ANN – P&O masih tergolong lama jika dibandingkan dengan metode ANN – IC, namun di saat yang bersamaan tingkat osilasi metode ANN – IC masih cukup tinggi sehingga tidak ada yang benar-benar unggul di semua indikator yang digunakan. Dari analisa tersebut, maka dapat dikatakan bahwa keunggulan metode konvensional terdapat pada waktu *tracking* yang cukup cepat dibandingkan dengan metode lainnya, sedangkan keunggulan yang terdapat pada metode

metaheuristik ada pada tingkat osilasi yang rendah dan efisiensi yang tinggi, namun cukup lama untuk mencapai keadaan tunak. Metode hybrid yang diteliti juga masih mempunyai performa yang belum maksimal jika dilihat dari tiga indikator tersebut sehingga perlu diteliti lagi kombinasi metode yang paling cocok.

5. Kesimpulan

Maximum Power Point Tracking (MPPT) adalah sebuah metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai tegangan dan arus yang optimal sehingga didapat daya keluaran yang maksimal dari suatu panel surya. Masing-masing metode MPPT baik itu konvensional, metaheuristik, dan hybrid mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Keunggulan metode konvensional terdapat pada waktu *tracking* yang cukup cepat dibandingkan dengan metode lainnya, sedangkan keunggulan yang terdapat pada metode metaheuristik ada pada tingkat osilasi yang rendah dan efisiensi yang tinggi. Metode hybrid yang diteliti juga masih mempunyai performa yang belum maksimal jika dilihat dari tiga indikator tersebut sehingga perlu diteliti lagi kombinasi metode yang paling cocok untuk mencapai performa metode MPPT yang paling optimal.

Daftar Pustaka

- [1] P. V. Rosu, A. T. Plesca, G. Gabor, and G. Chiriac, "Optimizing the Operation of Photovoltaic Panel Systems," *EPE 2020 - Proc. 2020 11th Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng.*, no. Epe, pp. 318–321, 2020.
- [2] C. Pica, R. Munteanu, S. Pavel, and H. Beleiu, "Modeling of Photovoltaic Panels," *EPE 2018 - Proc. 2018 10th Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng.*, pp. 769–773, 2018.
- [3] G. Resch, A. Held, T. Faber, C. Panzer, and R. Haas, "Potentials and prospects for renewable energies at global scale," pp. 1–15.
- [4] A. C. A. Praditya Tampubolon, "Laporan Status Energi Bersih Indonesia," *Iesr*, pp. 1–23, 2019, [Online]. Available: www.iesr.or.id
- [5] Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, "Indonesia Energy Outlook 2019," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [6] M. Mosa, M. B. Shadmand, R. S. Balog, and H. A. Rub, "Efficient maximum power point tracking using model predictive control for photovoltaic systems under dynamic weather condition," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 11, pp. 1401–1409, 2017.
- [7] B. Bendib, H. Belmili, and F. Krim, "A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 637–648, 2015.
- [8] P. Bhatnagar and R. K. Nema, "Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 224–241, 2013.
- [9] O. Singh and S. K. Gupta, "A review on recent Mppt techniques for photovoltaic system," *2018 IEEMA Eng. Infin. Conf. eTechNxT 2018*, pp. 1–6, 2018.
- [10] M. V. Dambhare, B. Butey, and S. V. Moharil, "Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1913, no. 1, 2021.
- [11] N. Ayub Windarko, M. Nizar Habibi, M. Ari Bagus Nugroho, and E. Prasetyono, "Simulator Panel Surya Ekonomis untuk Pengujian MPPT pada Kondisi Berbayang

- Sebagian (Low Cost PV Photovoltaic Simulator for MPPT Testing under Partial Shading)," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 9, no. 1, pp. 110–115, 2020.
- [12] F. E. Tahiri, K. Chikh, M. Khafallah, A. Saad, and D. Breuil, "Modeling and performance analysis of a solar PV power system under irradiation and load variations," *2017 14th Int. Multi-Conference Syst. Signals Devices, SSD 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 234–238, 2017.
- [13] A. Balyan, P. Singh, V. T. R, and S. M. Prabhu, "P-V and I-V Characteristics of Solar Cell," *Des. Eng.*, no. 6, pp. 520–528, 2021, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/352381037>
- [14] V. Waghmare-Ujgare and M. D. Goudar, "Exploration of partial shading condition in photovoltaic array," *2017 Int. Conf. Energy, Commun. Data Anal. Soft Comput. ICECDS 2017*, pp. 931–936, 2018.
- [15] J. Johnson, W. Bower, and M. Quintana, "Electrical and thermal finite element modeling of arc faults in photovoltaic bypass diodes," *World Renew. Energy Forum, WREF 2012, Incl. World Renew. Energy Congr. XII Color. Renew. Energy Soc. Annu. Conf.*, vol. 3, no. January, pp. 2059–2066, 2012.
- [16] H. Li, J. Peng, W. Liu, Z. Huang, and K. C. Lin, "A Newton-based extremum seeking MPPT method for photovoltaic systems with stochastic perturbations," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2014, 2014.
- [17] N. Karami, N. Moubayed, and R. Outbib, "General review and classification of different MPPT Techniques," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, no. July 2016, pp. 1–18, 2017.
- [18] S. Salman, X. Ai, and Z. Wu, "Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200W PV system," *Prot. Control Mod. Power Syst.*, vol. 3, no. 1, 2018.
- [19] M. Hassani, S. Mekhilef, A. Patrick Hu, and N. R. Watson, "A novel MPPT algorithm for load protection based on output sensing control," *Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, no. December, pp. 1120–1124, 2011.
- [20] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005.
- [21] M. N. Habibi, M. S. W. Jati, N. A. Windarko, and A. Tjahjono, "Maximum Power Point Tracking Menggunakan Algoritma Artificial Neural Network Berbasis Arus Hubung Singkat Panel Surya," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 16, no. 2, pp. 57–64, 2020.
- [22] W. Hayder, A. Abid, M. Ben Hamed, and L. Sbita, "MPPT based on P&O method under partially shading," in *Proceedings of the 17th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2020*, 2020, pp. 538–542.
- [23] M. I. Bahrudin, *Optimisasi Daya Photovoltaic pada kondisi Partially Shaded dengan Maximum Power Point Tracker (MPPT) Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization (PSO) Double Diode Model*. 2018.
- [24] R. B. Bollipo, S. Mikkili, and P. K. Bonthagorla, "Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 9–33, 2021.
- [25] K. U. Ahmad, Suhariningsih, and F. D. Murdianto, "Hybrid modified pso – ic methods based mppt to overcome partial shading," *Int. J. Electr. Eng. Informatics*, vol. 13, no. 2, pp. 430–448, 2021.
- [26] M. N. Habibi, N. Ayub Windarko, and A. Tjahjono, "Hybrid Maximum Power Point

- Tracking Using Artificial Neural Network-Incremental Conduction with Short Circuit Current of Solar Panel,” in *IES 2019 - International Electronics Symposium: The Role of Techno-Intelligence in Creating an Open Energy System Towards Energy Democracy, Proceedings*, 2019, pp. 63–69.
- [27] A. Tabrizi, I. K. International, M. Rahmani, and I. K. International, “Review some of the metaheuristic optimization algorithms in MPPT,” *First Natl. Conf. Renew. Energy Optim.*, no. February, pp. 1–10, 1399.
- [28] D. S. Yanaratri, L. P. SR, I. Ferdiansyah, and R. P. Eviningsih, “Desain dan Implementasi MPPT PSO pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga,” *JTT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 9, no. 1, pp. 34–43, 2021.
- [29] Q. D. Phan, D. K. Le, H. L. Hong, M. P. Le, and N. T. D. Vu, “The new MPPT algorithm using ANN-based PV,” *2010 Int. Forum Strateg. Technol. IFOST 2010*, pp. 402–407, 2010.
- [30] S. Das and P. N. Suganthan, “Differential evolution: A survey of the state-of-the-art,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 15, no. 1, pp. 4–31, 2011.
- [31] A. P. Firmanza, M. N. Habibi, N. A. Windarko, and D. S. Yanaratri, “Differential Evolution-based MPPT with Dual Mutation for PV Array under Partial Shading Condition,” in *EECCIS 2020 - 2020 10th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls, and Informatics Seminar*, 2020, pp. 198–203.
- [32] M. D. Haq, “Perancangan Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Panel Surya Dengan Kondisi Partial Shading Menggunakan Differential Evolution,” *Suara Tek. J. Ilm.*, vol. 12, no. 1, p. 38, 2021.
- [33] M. Kesraoui, A. Benine, and N. Boudhina, “Combination of an Improved P&O Technique with ANN for MPPT of a Solar PV System,” in *ICREGA' 14 - Renewable Energy: Generation and Applications, Springer Proceedings in Energy*, 2014, pp. 557–570.