

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

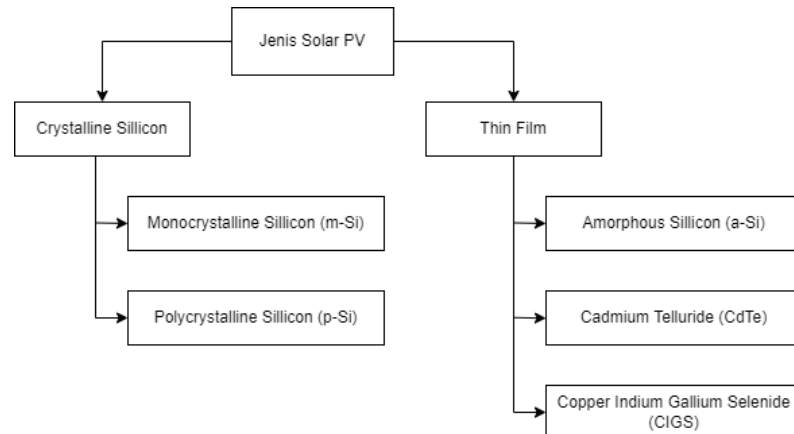
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah teknologi pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas dari sinar matahari yang dikonversi melalui proses fotovoltaik. Proses konversi terjadi pada modul PV yang tersusun dari banyak sel surya. Sel surya terdiri dari lapisan silikon (*Si*) murni dan bahan semikonduktor lainnya. Ketika sel surya menerima energi panas dari matahari yang berupa energi foton elektron di dalamnya akan tereksitasi dan bergerak bebas sehingga menghasilkan tegangan listrik arus searah (DC).

Sistem PLTS dapat dikategorikan berdasarkan lokasi pemasangannya menjadi dua tipe, yaitu sistem PLTS terpusat (*centralized PV plant*) dan sistem PLTS tersebar (*distributed PV plant*). Sementara itu, jika dilihat dari aplikasi dan konfigurasi operasinya, PLTS secara umum terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu sistem yang beroperasi tanpa terhubung ke jaringan listrik (*off-grid* atau *stand-alone PV system*), serta sistem yang terintegrasi dengan jaringan listrik (*on-grid* atau *grid-connected PV system*). Selain itu, apabila PLTS dikombinasikan dengan pembangkit listrik jenis lain dalam satu sistem, maka disebut sebagai sistem *hybrid*.

2.2. Jenis Solar Panel

Solar panel adalah suatu alat yang digunakan untuk mengkonversi atau mengubah energi surya menjadi energi listrik (Puriza et al., 2021). Untuk menentukan kualitas sebuah panel surya digunakan istilah efisiensi. Secara sederhana, untuk mengetahui efisiensi suatu panel surya adalah dengan membandingkan energi listrik yang dihasilkan dari suatu sel surya terhadap energi sinar matahari yang mengenai permukaan sel surya tersebut. Berdasarkan jenis material penyusunnya, panel surya dibagi menjadi 2 jenis yakni *crystalline silicon* dan *thin film* (Dhassa et al., 2014).



Gambar 2.1 Jenis Solar Panel (Celik et al., 2018)

2.2.1 Polycrystalline

Polycrystalline silicon atau *multicrystallien silicon* terbuat dari *cor-ingot* yang dibuat melalui proses metalurgi *grade silicon* dengan pemurnian bahan kimia yang kemudian akan didinginkan dan dipadatkan atau disebut *seimens process* (Mohammad Bagher, 2015). Panel surya *polycrystalline* lebih murah untuk diproduksi dibandingkan dengan panel surya jenis *monocrystalline*. Panel surya ini dapat menghasilkan daya keluaran yang sama dengan jenis *monocrystalline* namun memerlukan area yang lebih luas dan memiliki tingkat efisiensi lebih rendah yaitu hanya sekitar 10% (Kazici et al., 2018).



Gambar 2.2 Solar Panel *Polycrcyrtalline*

2.2.2 Monocrystalline

Monocrystalline sillicon (c-Si) atau *single crystal silicon* merupakan material yang paling baik digunakan pada pembuatan solar panel dalam

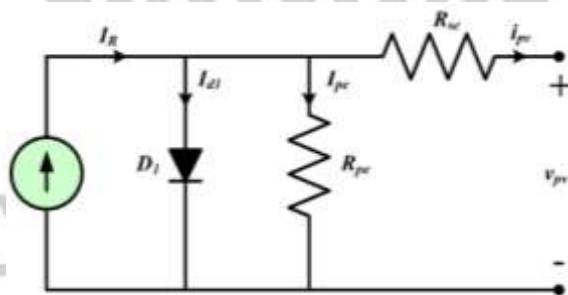
beberapa dekade terakhir (Mohammad Bagher, 2015). Solar panel *monocrystalline* mempunyai bentuk segidelapan dengan warna gelap dan biasanya dibuat menggunakan proses Czochralski. Solar panel jenis ini memiliki efisiensi yang tinggi hingga mencapai 17% jika dibandingkan dengan polycrystalline (Kazici et al., 2018). Efisiensi panel ini dapat menurun ketika kurangnya sinar matahari (redup) dan pada kondisi cuaca berawan, sehingga panel tidak dapat bekerja secara optimal.



Gambar 2.3 Solar Panel *Monocrytalline*

2.3. Model PV dan Karakteristik

Jenis konfigurasi model PV yang banyak digunakan ialah model satu dioda. Model PV satu dioda merupakan model sederhana namun mempunyai keunggulan akurasi yang tinggi (Shongwe & Hanif, 2015). Model PV satu dioda ditunjukkan pada Gambar 2.4 dimana secara umum membutuhkan 5 parameter (I_{pv} , I_D , R_{se} , R_{pe} , & a).



Gambar 2.4 Rangkaian Ekuivalen Solar PV (Manna et al., 2023)

Dari rangkaian Gambar 2.4 maka persamaan menurut (Sudhakar Babu et al., 2015) adalah

$$I = I_{pvn} - I_D - \frac{V + IR_{se}}{R_{pe}} \quad (2.1)$$

Dimana :

I = arus keluaran solar PV

I_{pvn} = sumber daya/arus

I_D = arus pada diode

V = tegangan

IR_{se} = resistan seri

R_{pe} = resistan paralel

Untuk mencari nilai I_D dapat menggunakan persamaan sebagai berikut (Sudhakar Babu et al., 2015) :

$$I_D = I_0 (e^{VD/aVt} - 1) \quad (2.2)$$

Dimana,

a = nilai konstanta ideal diode

Vt = tegangan termal

Tegangan termal dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut (Sudhakar Babu et al., 2015) :

$$Vt = \frac{NsKT}{q} \quad (2.3)$$

Dimana,

K = Konstanta Boltzmann ($1,3805 \times 10^{-23}$ J/K)

T = Temperatur cell (kelvin)

q = Elektro ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

Ns = Jumlah cell secara seri

Untuk memprediksi karakteristik solar PV dapat digunakan model matematis yang ditunjukkan oleh (Sudhakar Babu et al., 2015) pada persamaan berikut :

$$V_{oc} = V_{ocn} + V_t \ln \left(\frac{G}{G_n} \right) + k_v dT + \alpha \log \left(\frac{G}{G_n} \right) \quad (2.4)$$

$$V_{mp} = V_{mpn} + V_t \ln \left(\frac{G}{G_n} \right) + k_v dT + \beta V_t \log \left(\frac{G}{G_n} \right) \quad (2.5)$$

Sehingga persamaan arus pada solar PV menurut (Sudhakar Babu et al., 2015) adalah :

$$I = N_{pp} \left\{ I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_{se}}{V_t N_{ss}} \right) - 1 \right] \right\} - \left(\frac{V + IR_{se}}{R_{pe}} \right) \quad (2.6)$$

Dimana,

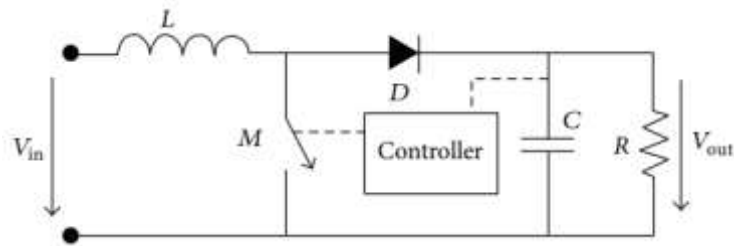
N_{pp} = jumlah modul yang terhubung secara paralel

N_{ss} = jumlah modul yang terhubung secara seri

Kinerja daya keluaran dari modul fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh temperatur. Peningkatan temperatur pada modul dapat menyebabkan penurunan performa atau dikenal dengan istilah *derating*, yaitu kondisi di mana daya output yang dihasilkan lebih rendah dari nilai nominalnya.

2.4. Konverter Penguat Tegangan (*Boost Converter*)

Boost converter biasa digunakan dalam rangkaian kontrol solar PV yang berfungsi untuk transfer energi yang dihasilkan solar PV ke beban. Inputan rangkaian *boost converter* adalah tegangan DC yang diperoleh dari solar PV dimana nilainya bervariasi tergantung dari perubahan temperatur dan iradiasi matahari (Kaouane et al., 2017). Rangkaian dasar dari *boost converter* terdiri dari tegangan sumber (V), diode (D), induktor (L), kapasitor (C), saklar elektronik (M) dan beban (R). Rangkaian *boost converter* ditunjukkan pada Gambar 2.5 dibawah ini :



Gambar 2.5 Topologi Boost Converter (Ali et al., 2014)

Konverter *DC to DC* jenis ini dapat meningkatkan tegangan *output* menjadi lebih besar dari tegangan *input*nya (Ebrahimi et al., 2015). Ketika saklar dihidupkan, diode akan berada dalam bias terbalik dan energi listrik akan disimpan di dalam induktor. Dengan demikian, kapasitor akan memasok arus ke beban. Saat saklar dimatikan, maka energi listrik yang tersimpan dalam induktor akan ditransfer ke kapasitor dan beban (Baharudin et al., 2017).

Boost converter memiliki dua mode operasi yaitu, *continuous conduction mode* (CCM) yang biasa digunakan untuk konversi daya agar lebih efisien dan *discontinuous conduction mode* (DCM) yang digunakan pada daya yang lebih rendah atau mode operasi *stand-by* (Hasaneen & Mohammed, 2008). Arus induktor lebih besar dari nol sepanjang waktu ketika dalam mode CCM, dan arus induktor turun ke nol setiap siklus *switching* ketika dalam mode DCM (Ali et al., 2014). Pada kondisi tunak (*steady state*), total perubahan arus pada induktor dalam satu periode baik saat saklar dalam kondisi menyala (*on*) maupun mati (*off*) adalah nol. Kondisi ini menghasilkan hubungan antara tegangan output dan tegangan input, yang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Sias, 2017):

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.7)$$

Dimana,

V_o = tegangan keluar yang diharapkan

V_i = tegangan masuk

D = *duty cycle*

Besarnya nilai resistansi yang digunakan pada rangkaian *boost converter* dapat ditentukan melalui perhitungan menggunakan persamaan berikut (Sias, 2017):

$$R = \frac{V_o}{I} \quad (2.8)$$

Dimana,

R = nilai resistif beban dalam rangkaian

V_o = tegangan keluaran

I = arus nominal panel surya

Induktor yang digunakan pada rangkaian *boost converter* berfungsi sebagai elemen penyimpan energi yang berperan dalam peningkatan tegangan setelah proses *switching*. Nilai minimum induktansi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Sias, 2017):

$$L_{min} = \frac{D (1 - D)^2 R}{2f} \quad (2.9)$$

Dimana,

D = *duty cycle*

R = nilai resistif beban dalam rangkaian

f = besar frekuensi PWM

Kapasitor yang digunakan dalam rangkaian *boost converter* berfungsi sebagai filter untuk meredam *noise* dan menjaga kestabilan tegangan keluaran. Nilai kapasitansi dapat ditentukan melalui perhitungan menggunakan persamaan berikut (Sias, 2017):

$$C = \frac{V_o D}{R \Delta V_o F} \quad (2.10)$$

Dimana,

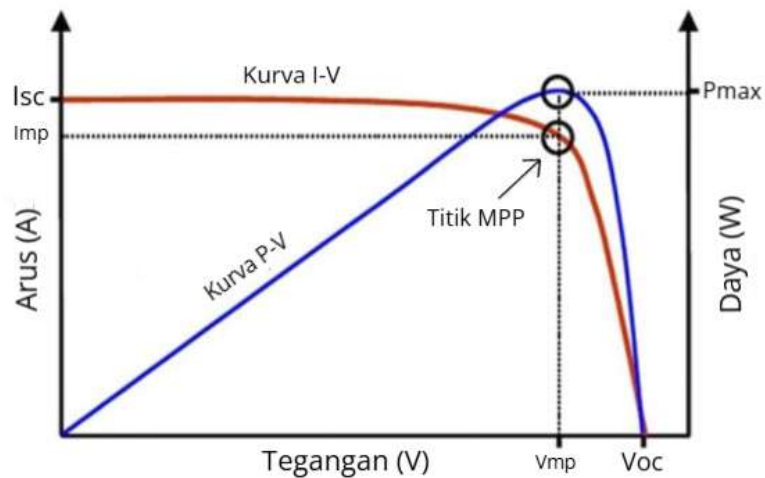
ΔV_o = rentang tegangan keluaran (*ripple voltage*)

C = nilai kapasitor

2.5. *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*

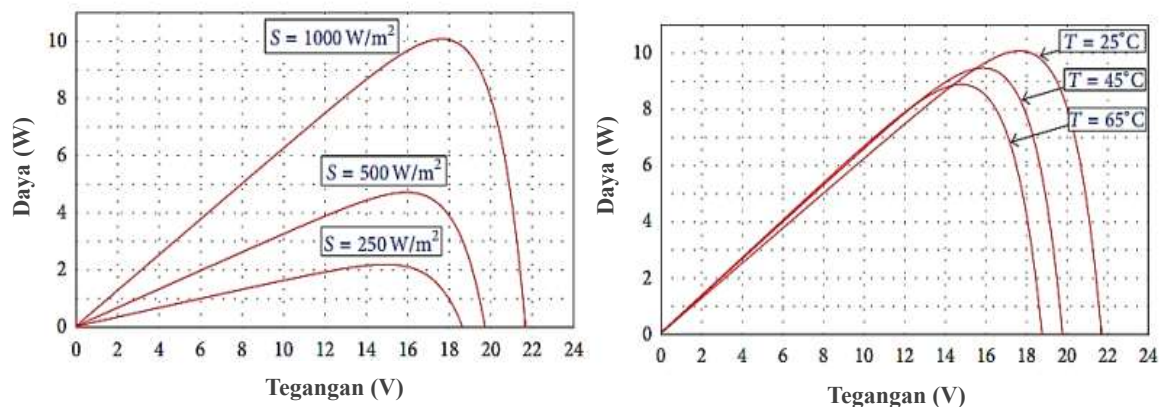
Nilai daya yang dihasilkan oleh panel surya akan selalu bervariasi tergantung pada temperatur lingkungan dan intensitas iradiasi matahari. Hal ini disebabkan tegangan dan arus yang dihasilkan tidak akan selalu berapada pada kondisi puncak (V_{max} dan I_{max}). Untuk menjaga nilai tegangan dan arus berada dalam kondisi optimal maka diperlukan suatu piranti pengendali daya yaitu *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). MPPT terdiri dari satu atau lebih konverter *DC to DC* dimana fungsi dari konverter tersebut adalah untuk melacak tegangan dan arus pada nilai tertentu sehingga panel surya dapat menghasilkan daya yang paling optimum melalui pengaturan nilai *duty cycle*. Pengaturan *duty cycle* dapat dilakukan dengan menambahkan suatu algoritma ke dalam mikrokontroler. MPPT berfungsi untuk memastikan bahwa operasi tegangan dan arus pada kurva karakteristik I-V dan P-V selalu berada pada titik daya maksimum (Kabalci et al., 2015)(Khazain et al., 2021).

Ketika panel surya dalam kondisi terbuka dan tidak terhubung ke beban (open circuit), tidak ada arus yang mengalir ($I = 0$), sehingga tegangan mencapai nilai maksimum yang dikenal sebagai tegangan *open circuit* (V_{oc}). Sebaliknya, ketika tegangan bernilai nol ($V = 0$) dan arus mencapai nilai maksimum, kondisi ini disebut arus *short circuit* (I_{sc}). Nilai V_{oc} dan I_{sc} umumnya tercantum dalam data teknis modul surya. Daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh panel surya disebut *Maximum Power Point* (MPP), yaitu daya listrik tertinggi yang diperoleh dari hasil perkalian antara arus maksimum (I_{mp}) dan tegangan maksimum (V_{mp}). Nilai I_{mp} dan V_{mp} diperoleh dari kurva karakteristik I-V pada titik MPP, yang merepresentasikan performa optimal dari panel surya.



Gambar 2.6 Kurva karakteristik I-V dan P-V pada panel surya (Sitanggang et al., 2021)

Gambar 2.7 dibawah ini menunjukkan pengaruh variasi nilai iradiasi dan temperatur terhadap kurva karakteristik panel surya. Semakin tinggi intensitas iradiasi yang diterima, maka arus yang dihasilkan panel akan meningkat, sehingga daya keluaran juga bertambah. Sebaliknya, kenaikan temperatur memberikan efek negatif terhadap performa panel. Semakin tinggi temperatur, daya yang dihasilkan justru menurun. Penurunan ini disebabkan oleh menurunnya kemampuan kerja komponen elektronik pada temperatur yang lebih tinggi (Sias, 2017).



Gambar 2.7 Kurva karakteristik panel surya pada nilai iradiasi dan temperatur yang berbeda – beda

Pengujian nilai *Open Circuit Voltage* (Voc) dan *Short Circuit Current* (Isc) dapat dianalisis melalui kurva karakteristik fotovoltaiik, yaitu kurva arus terhadap tegangan (I–V) dan daya terhadap tegangan (P–V). Sementara itu, perhitungan efisiensi pelacakan daya (*tracking efficiency*) dari sistem ditentukan menggunakan Persamaan (2.11) berikut :

$$\eta(\text{Efisiensi Tracking}) = \frac{P_{\text{tracking}}}{P_{\text{Karakteristik PV}}} \quad (2.11)$$

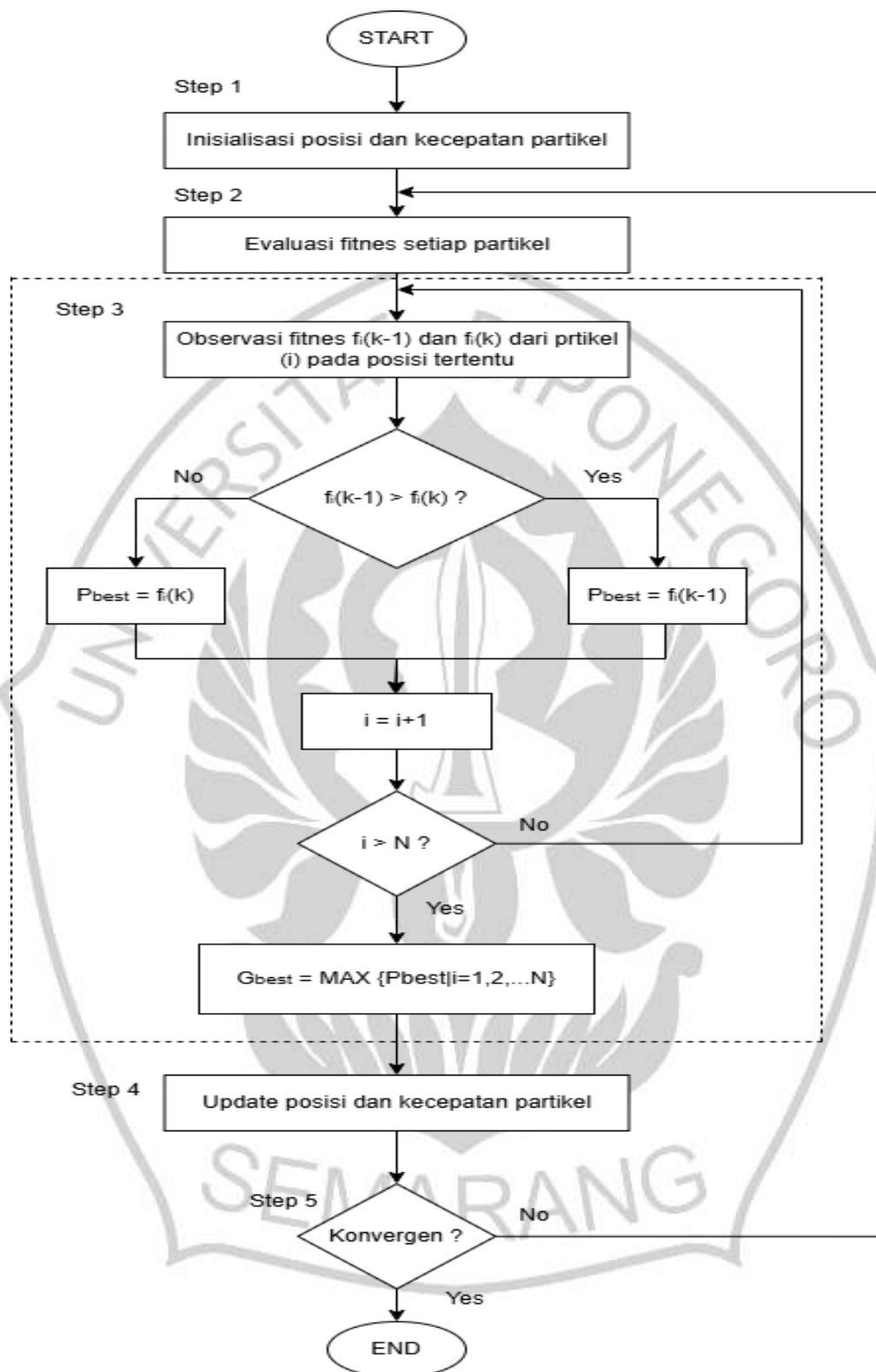
Untuk mencari tingkat efisiensi dapat menggunakan Persamaan 2.12 dibawah

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Nilai akhir} - \text{Nilai awal}}{\text{Nilai awal}} \times 100\% \quad (2.12)$$

2.6 Particle Swarm Optimization (PSO)

Pada tahun 1995 Kennedy dan Eberhart memperkenalkan algoritma PSO, PSO adalah teknik pencarian paralel metaheuristik yang digunakan untuk optimalisasi masalah nonlinier yang berkelanjutan. Metode itu ditemukan melalui simulasi model sosial yang disederhanakan. Algoritma PSO adalah algoritma adaptif yang didasarkan pada perilaku sosial sekelompok burung yang bergerak bersama-sama.

Perilaku sosial tersebut dipengaruhi dari tingkah laku setiap individunya serta pengaruh dari lingkungan individu tersebut. Dalam sistem PSO, partikel mengubah posisi mereka dengan terbang di sekitar ruang pencarian multi-dimensi sampai posisi yang relatif tidak berubah ditemukan, atau sampai batas komputasi terlampaui. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada dibawah ini tentang diagram alur program PSO.

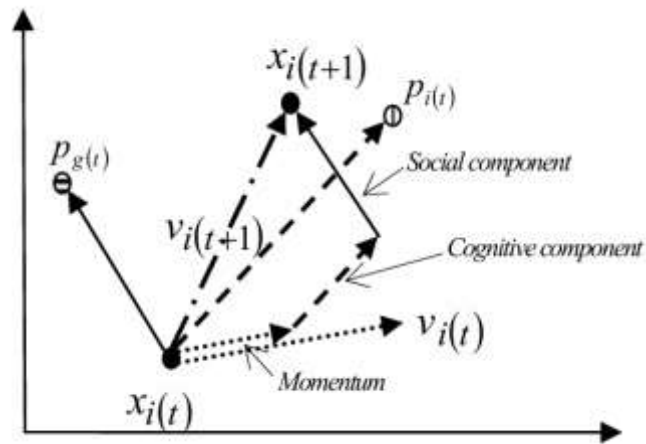


Gambar 2.8 Flowchart PSO (Cheng et al., 2015)

Alur kerja program PSO ditunjukkan pada Gambar 2.8. Berikut tahap implementasi metode PSO :

1. Tahap inisialisasi posisi dan kecepatan partikel terdapat beberapa parameter yang harus ditentukan yaitu inersia (w), *cognitive factor* ($C1$), *social factor* ($C2$), jumlah *swarm*, dan batas *duty cycle* minimum dan maksimum ($dmin$ dan $dmax$)
2. Proses selanjutnya dimulai dengan mengevaluasi fitness atau *duty cycle* untuk mendapatkan daya (P_{pv}) dimana tegangan (V_{pv}) dan arus (I_{pv}) diukur kemudian hasil tersebut dikalikan. *Duty cycle* didefinisikan sebagai partikel (i) dan nilai fitness didefinisikan sebagai daya keluaran solar PV.
3. Update $Pbest$ and $Gbest$ dengan membandingkan nilai *fitness* terbaru terhadap nilai *fitness* sebelumnya. Jika nilai *fitness* yang diperoleh lebih kecil (lebih baik) dibandingkan nilai sebelumnya, maka $Pbest$ dan $Gbest$ akan diperbarui sesuai nilai tersebut. Namun, jika nilai *fitness* yang baru lebih besar (lebih buruk), maka posisi $Pbest$ dan $Gbest$ tetap, dan algoritma akan melanjutkan ke iterasi berikutnya
4. Update kecepatan dan posisi setiap partikel (i) menggunakan persamaan 2.15, 2.16 dan 2.17 sesuai dengan nilai $Pbest$ dan $Gbest$ yang dihasilkan oleh fungsi fitness yang paling kecil.
5. *Convergence* adalah proses untuk menentukan hasil yang diperoleh sudah mendekati nilai optimum atau belum yaitu dengan cara memvalidasi batasan dari nilai yang telah ditentukan. Terdapat dua konvergensi yang digunakan, yaitu menemukan solusi optimal atau mencapai jumlah iterasi maksimum (Cheng et al., 2015).

Proses ini terus berulang hingga kondisi konvergen tercapai, yaitu saat perubahan daya tidak signifikan. Akhirnya, *duty cycle* ditetapkan berdasarkan nilai $Gbest$, sehingga sistem dapat beroperasi pada titik daya maksimum.



Gambar 2.9 Ilustrasi Pergerakan Algoritma PSO

Algoritma didasarkan pada mekanisme pembaruan posisi lokal dan global dari setiap partikel dalam kelompok (swarm), yang dinyatakan dalam persamaan berikut (El Hammedi et al., 2023) :

Update kecepatan (El Hammedi et al., 2023):

$$v_i(t + 1) = \omega \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_{1i}(t) \cdot (Pbest(t) - x_i(t)) + c_2 \cdot r_{2i}(t) \cdot (Gbest(t) - x_i(t)) \quad (2.12)$$

Update posisi (El Hammedi et al., 2023):

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (2.13)$$

Dimana,

ω = koefisien inersia (konstan)

r_1, r_2 = nilai acak (antara 0–1)

c_1, c_2 = koefisien akselerasi (konstan)

$x_i(t)$ = posisi partikel (*duty cycle*) pada waktu ke t

$x_i(t + 1)$ = posisi partikel (*duty cycle*) pada waktu ke $t+1$

$v_i(t)$ = kecepatan partikel (*duty cycle*) pada waktu ke t

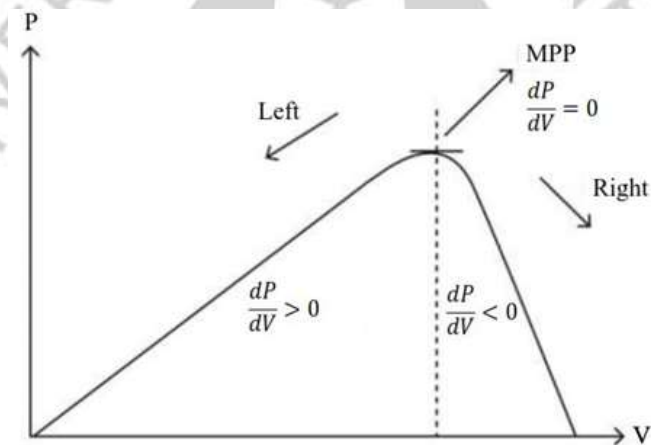
$v_i(t + 1)$ = kecepatan partikel (*duty cycle*) pada waktu ke $t+1$

$Pbest$ (P_i)= Individual terbaik dari setiap partikel

$Gbest$ (P_g)= posisi global terbaik dari semua partikel dalam swarm

2.7 Perturb & Observe

P&O adalah algoritma MPPT yang didasarkan pada algoritme berulang. Ide dasarnya adalah untuk secara terus menerus memberikan gangguan pada tegangan output, sehingga daya output secara konstan mendekati titik daya maksimum. Karena kemudahan aplikasi dan kesederhanaannya algoritma P&O merupakan salah satu cara yang paling banyak digunakan dan populer dalam teknologi MPPT. Metode P&O mendefinisikan kemiringan kurva karakteristik sama dengan nol pada titik MPP dan untuk bagian kiri bernilai positif, sedangkan untuk bagian kanan titik MPP bernilai negatif (Alzubaidi et al., 2022).



Gambar 2.10 Kurva P-V Algoritma P&O

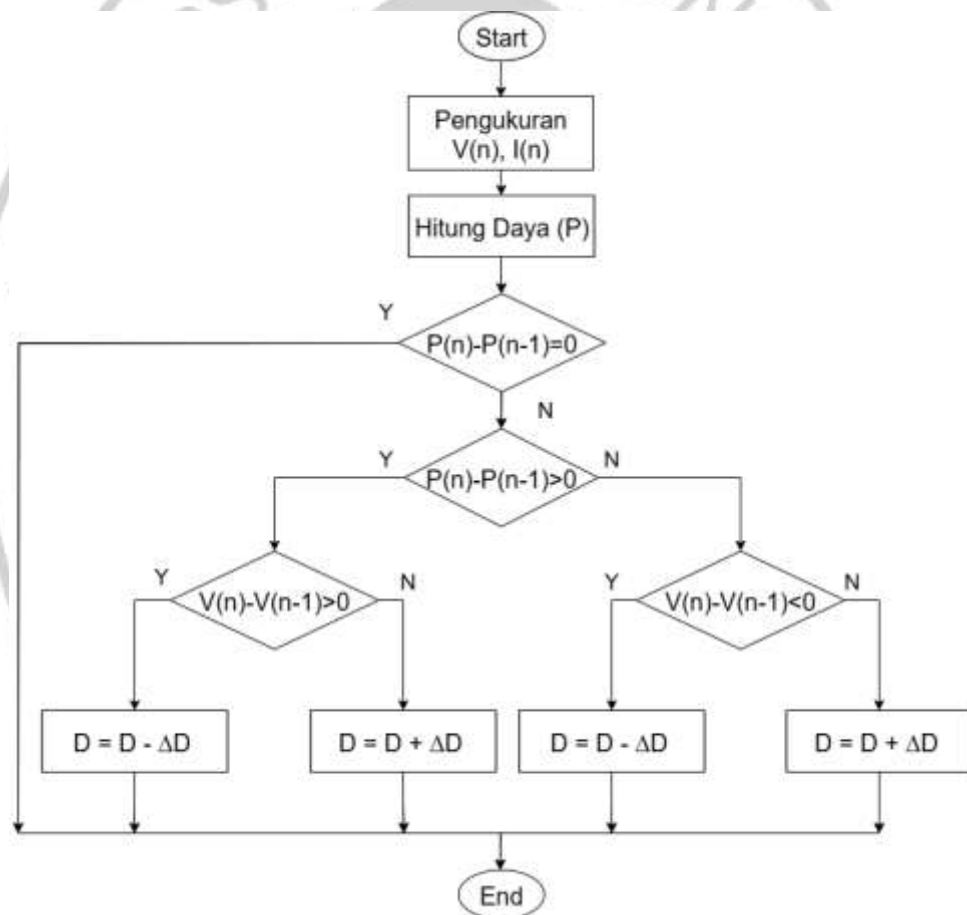
Berdasarkan Gambar 2.10 diketahui bahwa kurva P-V tersebut dapat dibagi menjadi 3 bagian yaitu bagian titik MPP, bagian sebelah kiri titik MPP, dan bagian kanan sebelah titik MPP. Jika dituliskan maka diperoleh persamaannya sebagai berikut (Yuhendri & Putra, 2020) :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{titik MPP} \quad (2.18)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{sebelah kiri titik MPP} \quad (2.19)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad \text{sebelah kanan titik MPP} \quad (2.20)$$

Algoritma P&O bekerja berdasarkan gradien atau kemiringan kurva perubahan daya dengan perubahan tegangan (dP/dV). P&O memberikan gangguan (*perturbing*) dengan cara merubah nilai *duty cycle* sehingga akan menyebabkan nilai daya *output* menjadi bertambah atau berkurang. Setiap kali terjadi perubahan pada nilai *duty cycle*, sistem akan melakukan observasi terhadap perubahan daya yang dihasilkan. Jika daya saat ini lebih besar dibandingkan daya sebelumnya, maka *duty cycle* akan ditingkatkan. Sebaliknya, jika daya saat ini lebih kecil, maka *duty cycle* akan dikurangi. Berikut adalah *flowchart* algoritma P&O (Sitanggang et al., 2021)



Gambar 2.11 Flowchart P&O

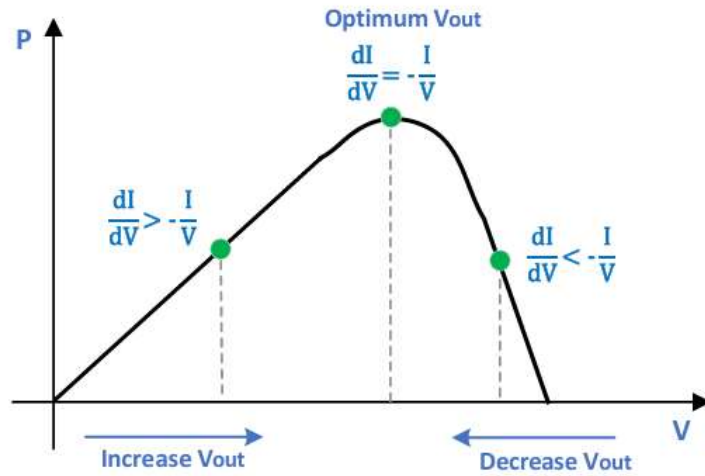
Gambar 2.11 menunjukan langkah kerja P&O pada sistem fotovoltaik. Berikut Langkah kerja algoritma P&O :

1. Inisialisasi sistem dilakukan dengan cara mengukur nilai tegangan (V) dan arus (I) pada solar PV. Nilai yang diperoleh digunakan untuk menghitung daya (P).
2. Perbandingan daya sekarang $P(n)$ dengan daya sebelumnya $P(n-1)$. Jika nilai daya tetap atau tidak terjadi perubahan maka *duty cycle* tidak berubah karena P&O menganggap sistem sudah mencapai titik MPP.
3. Pergerakan arah *perturb* ditentukan ketika terjadi perubahan daya dan tegangan. Terdapat empat kondisi perubahan arah *perturb* yakni kondisi jika terjadi kenaikan daya dan tegangan maka nilai *duty cycle* akan diturunkan untuk mencapai titik maksimum ($D = D - \Delta D$). Pada kondisi daya naik dan tegangan turun maka rasio *duty cycle* akan dinaikan agar daya output menjadi lebih besar ($D = D + \Delta D$). Jika daya turun dan tegangan naik maka *duty cycle* akan dinaikan ($D = D + \Delta D$). Jika daya turun dan tegangan turun *duty cycle* akan diturunkan ($D = D - \Delta D$).

Tingkat efisiensi metode ini sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai ΔD . Jika ΔD terlalu besar, sistem akan lebih cepat mencapai titik daya maksimum, namun akan menyebabkan fluktuasi di sekitar titik tersebut yang menimbulkan osilasi pada daya keluaran, sehingga menurunkan efisiensi. Sebaliknya, jika ΔD terlalu kecil, efisiensi sistem cenderung lebih tinggi karena osilasi berkurang, namun waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik maksimum menjadi lebih lama, yang menyebabkan sistem kurang responsif terhadap perubahan kondisi.

2.8 Incremental Conductance

Incremental conductance (InC) adalah algoritma yang dikembangkan berdasarkan gradien kurva karakteristik P-V dari sistem fotovoltaik dimana nilai MPP akan tercapai jika $dP/dV = 0$ (Khadidja et al., 2017). Metode incremental conductance bekerja berdasarkan kemiringan (*slope*) kurva daya array PV (Bulle et al., 2017).



Gambar 2.12 Kurva P-V Algoritma InC

Nilai MPP dapat dihitung dengan mempertimbangkan persamaan (2.21) dan (2.22) dibawah (Putri et al., 2015) :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \times I)}{dV} = V \left(\frac{dI}{dV} \right) + I \left(\frac{dV}{dV} \right) \quad (2.21)$$

$$\frac{dP}{dV} = V \left(\frac{dI}{dV} \right) + I \quad (2.22)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2.23)$$

Mengacu pada Persamaan (2.23) jika nilai dI/dV lebih besar dari $-I/V$, maka titik operasi panel surya berada di sisi kiri dari titik maksimum daya (*Maximum Power Point* atau MPP). Dalam kondisi ini, *duty cycle* perlu dikurangi agar tegangan sel surya meningkat menuju tegangan pada titik MPP. Sebaliknya, apabila dI/dV lebih kecil dari $-I/V$, maka titik operasi berada di sisi kanan MPP. Untuk itu, *duty cycle* perlu ditingkatkan agar tegangan turun dan mendekati tegangan maksimum daya. Proses ini akan berlangsung secara berulang hingga dI/dV sama dengan $-I/V$, yang menunjukkan bahwa tegangan referensi (V_{ref}) telah mencapai tegangan pada titik daya maksimum (V_{mpp}). Jika Persamaan (2.23) ditulis kembali maka persamaanya adalah (Wirateruna, 2022) :

$$-\frac{I}{V} = \left(\frac{dI}{dV}\right) \quad \text{ketika } \frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.24)$$

$$-\frac{I}{V} < \left(\frac{dI}{dV}\right) \quad \text{ketika } \frac{dP}{dV} > 0 \quad (2.25)$$

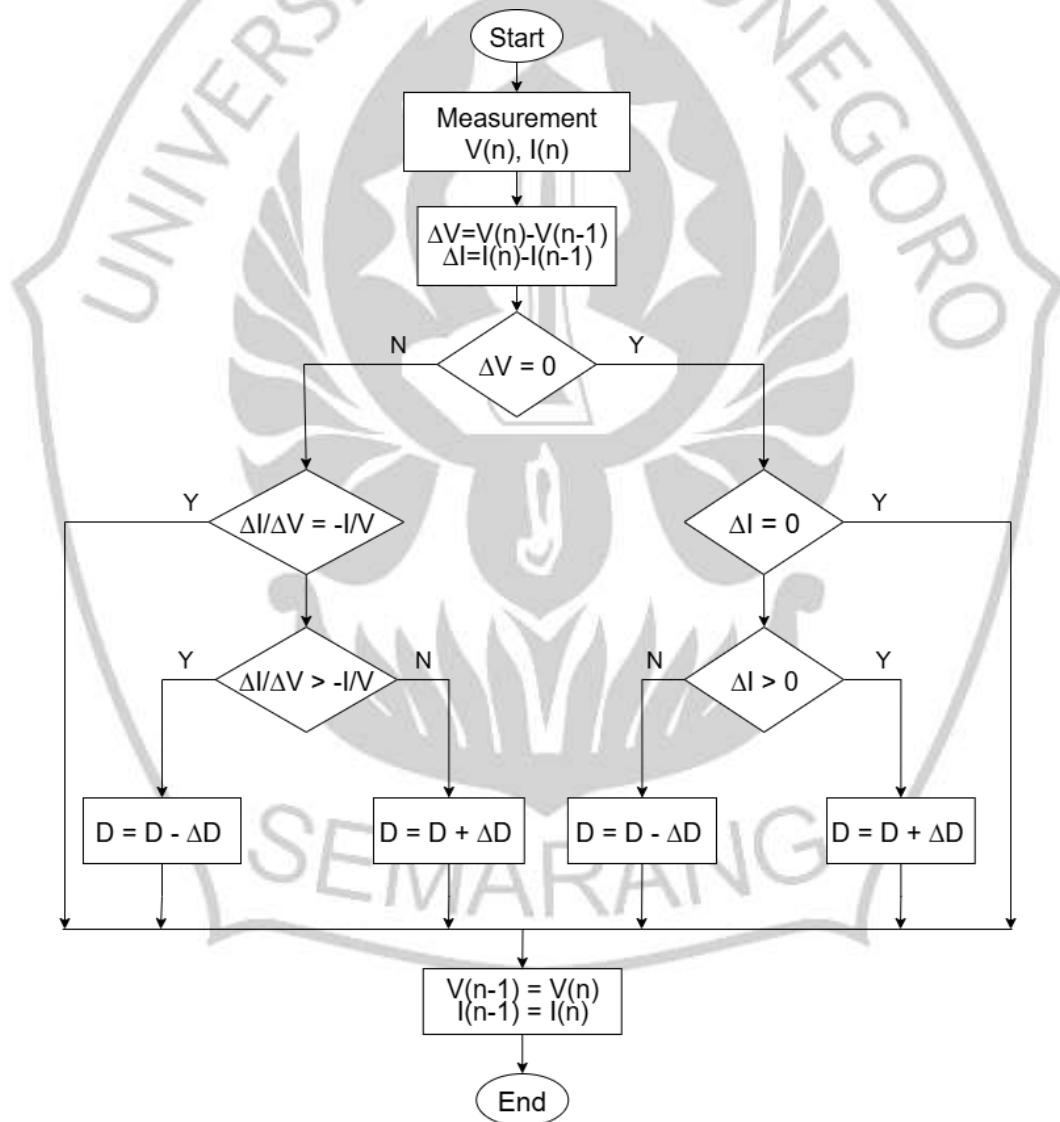
$$-\frac{I}{V} > \left(\frac{dI}{dV}\right) \quad \text{ketika } \frac{dP}{dV} < 0 \quad (2.26)$$

Pada metode *Incremental Conductance* (InC), titik *Maximum Power Point* (MPP) dicapai dengan membandingkan nilai *instantaneous conductance* (I_{pv}/V_{pv}) dengan *incremental conductance* (dI/dV). *Instantaneous conductance* atau konduktansi sesaat merupakan hasil pembagian antara arus dan tegangan (I/V), sedangkan *incremental conductance* diperoleh dari perbandingan antara perubahan arus terhadap perubahan tegangan (dI/dV). Simbol (d) menunjukkan besarnya perubahan suatu variabel dalam selang waktu sampling (dt) yang telah ditentukan (Bulle et al., 2017).

Implementasi algoritma InC terhadap MPPT ditunjukkan pada Gambar 2.16. Pada Gambar tersebut diketahui $V(n)$ dan $I(n)$ adalah tegangan dan arus yang dihasilkan oleh panel surya akan diinisialisasi sebagai ΔV dan ΔI . Nilai ΔV merupakan selisih antara tegangan terbaru $V(n)$ dan tegangan sebelumnya $V(n-1)$, sedangkan ΔI merupakan selisih antara arus terbaru $I(n)$ dan arus sebelumnya $I(n-1)$. Setelah nilai terbaru dibaca oleh program, perhitungan dilakukan dengan membandingkan nilai baru dan lama, kemudian menentukan apakah ΔV bernilai nol. Jika $\Delta V = 0$, maka ΔI akan diperiksa untuk menentukan apakah bernilai nol atau tidak.

Apabila ΔV dan ΔI bernilai nol, hal ini menunjukkan bahwa impedansi tidak mengalami perubahan, sehingga nilai referensi gangguan (*disturbance*) tetap sama seperti sebelumnya. Jika $\Delta V = 0$ namun $\Delta I \neq 0$, maka hal tersebut mengindikasikan adanya perubahan intensitas cahaya. Dalam kondisi ini, jika perubahan arus bernilai positif, maka tegangan referensi V referensi akan dinaikkan. Sebaliknya, jika perubahan arus bernilai negatif, maka V referensi akan diturunkan. Jika $\Delta V \neq 0$, maka perlu dilakukan pemeriksaan terhadap Persamaan (2.24). Apabila persamaan

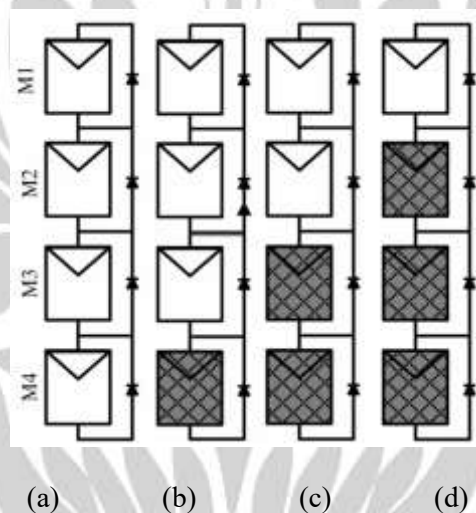
tersebut terpenuhi, kemiringan kurva daya adalah nol, yang berarti sistem telah mencapai titik daya maksimum (*Maximum Power Point*). Namun, jika nilai *incremental conductance* lebih besar dari nilai *negative instantaneous conductance*, maka kemiringan kurva daya bersifat positif dan V referensi perlu ditingkatkan. Sebaliknya, jika tidak terpenuhi, maka V referensi harus diturunkan. Langkah akhir dalam metode ini adalah memperbarui nilai tegangan dan arus sebelumnya dengan menetapkan $V(n-1) = V(n)$ dan $I(n-1) = I(n)$. Setelah proses pembaruan ini selesai, algoritma kembali ke tahap awal untuk membaca nilai tegangan dan arus melalui sensor.



Gambar 2.13 Flowchart InC

2.9 Bentuk Bayangan Partial Panel Surya

Panel surya terdiri dari beberapa modul PV yang terhubung secara seri dan parallel. Daya yang dihasilkan dari panel surya berasal dari kombinasi antar modul PV yang terkena iradiasi cahaya matahari yang diterima. Bayangan partial dapat muncul disebabkan oleh pohon, awan, gedung tinggi, dll yang dapat mengakibatkan kehilangan daya maksimal modul PV. Bayangan yang mengenai sebagian area panel terbukti menurunkan daya secara tidak proporsional karena menimbulkan ketidakseimbangan arus antarsel, sedangkan penurunan iradiasi yang terjadi secara merata pada seluruh permukaan panel hanya menyebabkan penurunan daya yang sebanding dengan berkurangnya intensitas cahaya (Sarkar et al., 2024). Untuk mendapatkan daya maksimal dari modul PV pada saat kondisi bayangan partial dapat menggunakan teknik MPP (Hazman & Asnil, 2022).

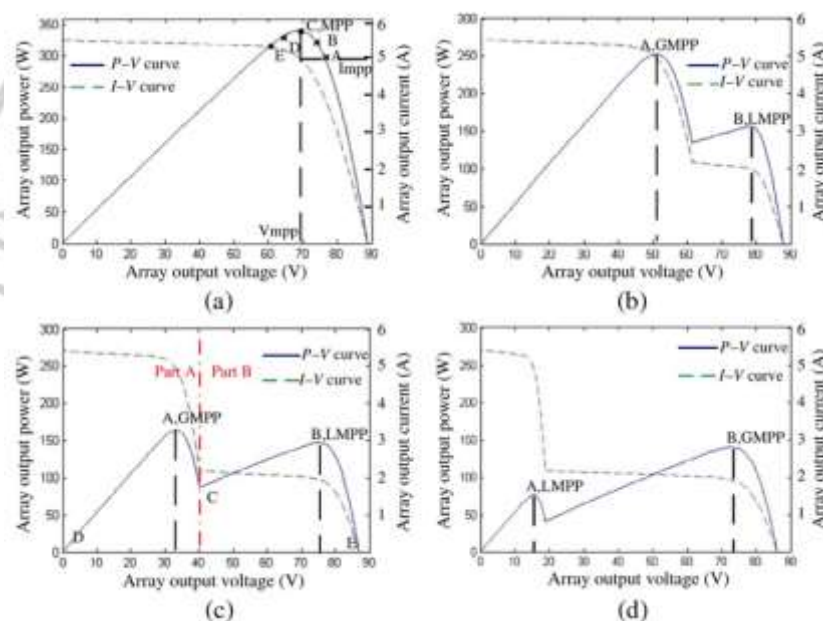


Gambar 2.14 Solar PV dalam kondisi bayangan partial (Chen et al., 2014)

Modul PV yang terkena bayangan partial tidak dapat menghasilkan arus sehingga akan berubah menjadi beban dan modul PV menjadi panas, jika dibiarkan terus menerus maka dapat merusak modul PV. Untuk mencegah hal tersebut maka modul PV perlu dipasang *diode bypass*. Gambar 2.14 menunjukkan modul PV yang dilengkapi dengan *diode bypass* yang berfungsi untuk mengalirkan arus saat modul dalam keadaan bayangan partial maupun disaat modul terdapat beberapa cell yang rusak. Gambar 2.14 (a) menunjukkan modul PV pada *Standart Test Condition* (STC)

atau kondisi normal. Gambar 2.14 (b - d) modul PV mengalami kondisi bayangan partial sehingga panel berubah menjadi beban (EFENDI et al., 2022).

Bypass diode dipasang secara paralel terhadap modul fotovoltaik dengan tujuan untuk mengalirkan arus saat panel tidak mampu menghasilkan listrik, seperti pada kondisi bayangan parsial. Dalam kondisi normal, arus mengalir melalui sumber arus (*current source*). Namun, ketika terjadi hambatan pada modul, arus akan dialihkan melewati *bypass diode*. Oleh karena itu, *bypass diode* merupakan komponen penting yang wajib dipasang pada setiap modul PV sebagai sistem proteksi untuk mencegah kerusakan akibat ketidakseimbangan distribusi iradiasi.



Gambar 2.15 Kurva Karakteristik P-V dan I-V Modul PV Dalam Kondisi Bayangan Partial (Chen et al., 2014)

Gambar 2.15 (a) menunjukkan kurva karakteristik P-V dan I-V dalam keadaan STC. Pada Gambar 2.15 (b – d) terdapat 2 puncak kurva P-V yang disebabkan oleh pengaruh diode bypass, puncak pertama (A) adalah *Global Maximum Power Point* (GMPP) dan puncak (B) atau *Local Maximum Power Point* (LMPP). GMPP adalah titik daya maksimum global panel surya (P-V) yang memberikan output secara maksimal. Titik GMPP ini adalah target utama yang harus dicapai oleh MPPT dengan algoritma P&O, InC, dan PSO (Chen et al., 2014).