

BAB II DASAR TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian oleh Rijodi et al. menunjukkan bahwa penerapan logika fuzzy pada sistem *Energy Management System* (EMS) dalam *microgrid* hibrida mampu meningkatkan efisiensi operasional dari aspek teknis maupun ekonomi melalui optimalisasi penggunaan baterai. Hasil tersebut menunjukkan potensi logika fuzzy sebagai pengendali cerdas dalam sistem manajemen energi terintegrasi [5].

Studi oleh Rizqofani dkk. menunjukkan bahwa penerapan logika fuzzy pada *Cuk Converter* menghasilkan arus pengisian dengan *ripple* yang lebih rendah sehingga mampu meningkatkan kualitas pengisian dan memperpanjang umur pakai baterai. Hasil penelitian tersebut menunjukkan pentingnya metode kendali adaptif dalam meningkatkan kinerja sistem pengisian energi surya [6].

Penelitian oleh Irmawanto dkk. mengembangkan sistem manajemen daya berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan metode *Coulomb Counting* untuk pemantauan arus dan tegangan secara *real-time*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem monitoring yang terstruktur mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi sehingga mendukung pengelolaan daya yang lebih optimal [7].

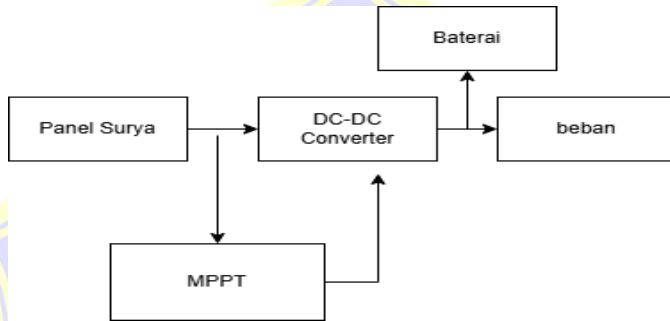
Penelitian oleh Ananda dkk. menunjukkan bahwa metode MPPT konvensional, seperti *Incremental Conductance* dan PID, memiliki keterbatasan dalam merespons perubahan kondisi lingkungan. Metode berbasis kecerdasan buatan, seperti *Fuzzy Logic Controller* (FLC), mampu memberikan kinerja yang lebih baik dalam meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem meskipun memiliki kompleksitas yang lebih tinggi [8].

Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis performa sistem MPPT fuzzy menggunakan boost converter dengan pengaruh irradiansi Kota Surabaya terhadap pengisian baterai dan suplai beban.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS adalah sistem yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik menggunakan modul fotovoltaik. Sistem ini umumnya terdiri dari panel surya, *charge controller*, baterai, inverter, dan beban. Kinerja system PLTS dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya : irradiansi matahari yang mudah berubah, perbedaan suhu, posisi, konfigurasi modul, bayangan / *shading*, dan sebagainya [9].



Gambar 2.1 Skema pembangkit Listrik Tenaga Surya

Sistem PLTS secara umum terdiri dari panel surya, solar charge controller, baterai, converter, inverter, dan beban. Pada penelitian ini sistem difokuskan pada analisis manajemen daya berbasis arsitektur Common DC Bus untuk menyuplai beban kontinu dan mengatur aliran pengisian/pengosongan baterai melalui Bidirectional DC-DC Converter.

Secara kelistrikan, sel surya dapat direpresentasikan menggunakan model rangkaian ekivalen dioda tunggal (*single-diode model*) yang terdiri dari sumber arus foton, dioda paralel, resistansi seri (R_s), dan resistansi shunt (R_{sh}). Model ini dipilih karena cukup akurat untuk merepresentasikan karakteristik nonlinear sel surya namun tetap sederhana secara komputasi sehingga umum digunakan dalam simulasi MATLAB/*Simulink*. Hubungan antara arus keluaran (I) dan tegangan keluaran (V) pada sel surya ideal dijelaskan melalui persamaan sebagai berikut [10] :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{V+I \cdot R_s}{n \cdot V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Keterangan:

I_{ph} : Arus foton (A)
 I_0 : Arus saturasi dioda (A)
 R_s : Resistansi seri (Ω)
 R_{sh} : Resistansi shunt (Ω)
 V_t : Tegangan termal (V)
 n : Faktor idealitas dioda

Nilai arus foton (I_{ph}) pada Persamaan (2.1) tidak bersifat konstan, melainkan berubah secara linear terhadap tingkat iradiasi matahari yang diterima serta dipengaruhi oleh temperatur sel. Hubungan tersebut dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$I_{ph} = [I_{sc,ref} + K_i(T - T_{ref})] \times \frac{G}{G_{ref}} \quad (2.2)$$

Keterangan:

$I_{sc,ref}$: arus hubung singkat pada kondisi standar/*Standard Test Condition* (A).

K_i : koefisien temperatur arus hubung singkat ($A/^{\circ}C$).

G : iradiasi matahari aktual (W/m^2).

G_{ref} : iradiasi referensi pada STC, yaitu $1000 W/m^2$.

T, T_{ref} : temperatur sel aktual dan temperatur referensi ($25^{\circ}C$).

Sementara itu, arus saturasi dioda (I_0) menyatakan besarnya arus bocor yang melewati sambungan p-n pada kondisi gelap, dan dapat diperoleh melalui hubungan dengan parameter tegangan rangkaian terbuka referensi sebagai berikut:

$$I_0 = \frac{I_{sc,ref}}{e^{\left(\frac{V_{oc,ref}}{n \cdot V_t}\right)} - 1} \quad (2.3)$$

Adapun tegangan termal (V_t) pada Persamaan (2.1) dan Persamaan (2.3) merupakan besaran yang bergantung pada temperatur mutlak sel surya, dirumuskan sebagai:

$$V_t = \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q} \quad (2.4)$$

Keterangan:

N_s : jumlah sel surya yang tersusun seri dalam satu modul.

k : konstanta Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K).

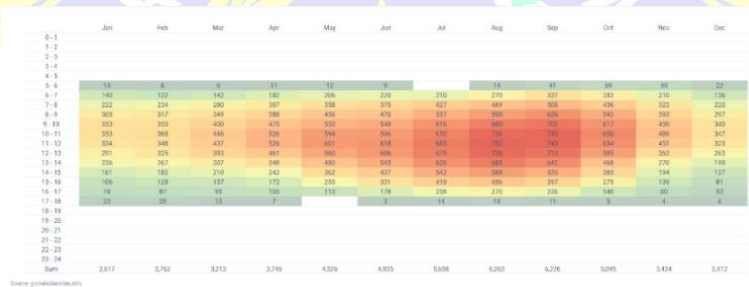
T : temperatur sel dalam Kelvin (K).

q : muatan elektron ($1,602 \times 10^{-19}$ C).

Kondisi Standar Pengujian atau *Standard Test Condition* (STC) yang menjadi acuan dalam Persamaan (2.2) hingga Persamaan (2.4) didefinisikan pada iradiasi 1000 W/m^2 , temperatur sel 25°C , dan spektrum massa udara AM 1,5. Seluruh parameter *datasheet* panel surya (V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp}) yang digunakan dalam pemodelan Simulink diacu pada kondisi STC tersebut.

2.2.2 Sumber Data Irradiasi Dan Temperatur

1. Sumber Data Irradiasi



Gambar 2.2 Global Horizontal Irradiance Kota Surabaya tahun 2025

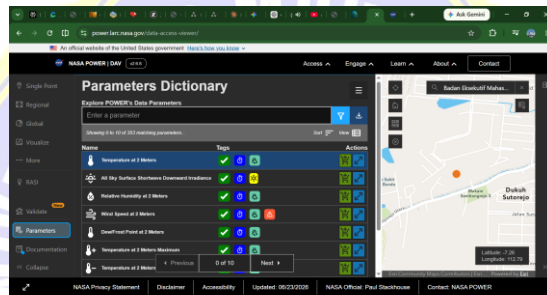
Tahapan pengambilan data melalui GSA adalah sebagai berikut:

1. Membuka situs globalsolaratlas.info.
2. Menentukan lokasi penelitian pada peta interaktif dengan memasukkan koordinat atau nama lokasi (dalam penelitian ini menggunakan koordinat Lokasi Universitas Muhammadiyah Surabaya).
3. Memilih menu Detailed Data atau Table untuk menampilkan data distribusi jam radiasi matahari (*sunshine hours*) per bulan.
4. Data yang ditampilkan berupa jumlah jam radiasi untuk setiap bulan (Januari sampai Desember).

5. Data tersebut kemudian diunduh dan diolah lebih lanjut sebagai data pendukung analisis potensi radiasi matahari di lokasi penelitian.

Data iradiasi yang digunakan meliputi nilai rata-rata iradiasi global pada bidang horizontal (*Global Horizontal Irradiance/GHI*) untuk wilayah Kota Surabaya. Data tersebut digunakan sebagai masukan dalam perhitungan energi yang diterima oleh modul fotovoltaik (PV), sehingga dapat menggambarkan potensi produksi energi listrik yang dihasilkan sistem PLTS. Pemanfaatan data dari Global Solar Atlas dipilih karena memiliki cakupan spasial yang luas, mudah diakses, serta banyak digunakan dalam studi kelayakan dan perancangan sistem energi surya.

2. Sumber Data Temperatur



Gambar 2.3 Temperatur Kota Surabaya

Selain data dari GSA, penelitian ini juga menggunakan data meteorologi dari *NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources)*, yaitu basis data yang dikembangkan oleh *NASA Langley Research Center* untuk menyediakan data parameter energi surya dan meteorologi berbasis satelit dan model reanalysis.

Tahapan pengambilan data melalui *NASA POWER Data Access Viewer (DAV)* adalah sebagai berikut:

1. Membuka situs power.larc.nasa.gov/data-access-viewer.
2. Memilih jenis pengambilan data, yaitu Single Point, untuk mendapatkan data pada satu titik koordinat lokasi penelitian.
3. Menentukan lokasi penelitian pada peta dengan memasukkan koordinat lintang dan bujur (dalam penelitian ini digunakan koordinat Latitude -7.26 dan Longitude 112.79 atau titik koordinat

Universitas Muhammadiyah Surabaya).Memilih menu Parameters untuk menentukan parameter meteorologi yang dibutuhkan.

4. Menentukan rentang waktu (time period) dan format keluaran data (misalnya CSV atau Excel).
5. Mengunduh data melalui menu Download.

Data yang diperoleh dari *NASA POWER* ini digunakan sebagai data pendukung untuk analisis kondisi meteorologi di lokasi penelitian, seperti suhu udara, kelembaban relatif, kecepatan angin, dan iradiasi matahari, yang selanjutnya dikombinasikan dengan data dari *Global Solar Atlas* untuk mendukung analisis potensi pemanfaatan energi surya secara lebih komprehensif.

Data temperatur dari *NASA POWER* digunakan sebagai masukan dalam perhitungan temperatur operasi modul panel surya dan koreksi efisiensi modul terhadap perubahan suhu. Dengan demikian, simulasi yang dilakukan tidak hanya mempertimbangkan besarnya energi surya yang tersedia, tetapi juga pengaruh kondisi lingkungan terhadap kinerja sistem PLTS.

Data iradiasi matahari merupakan salah satu parameter utama yang digunakan dalam pemodelan dan simulasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Pada penelitian ini, data iradiasi diperoleh dari *Global Solar Atlas* (GSA) yang dikembangkan oleh World Bank Group bekerja sama dengan Solargis. Platform ini menyediakan informasi potensi energi surya berdasarkan data satelit dan model meteorologi yang telah divalidasi secara internasional.

2.2.3 Panel Surya

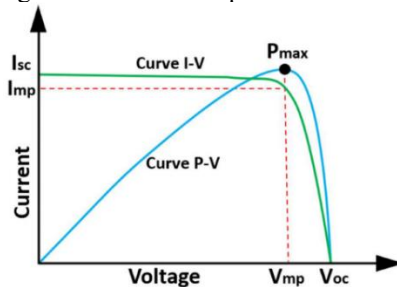
Panel surya tersusun dari sejumlah sel fotovoltaik yang berbasis material semikonduktor, umumnya monokristalin atau polikristalin. Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, energi foton akan membebaskan elektron sehingga menghasilkan arus listrik[11].

Beberapa parameter penting panel surya meliputi:

- *Open Circuit Voltage* (Voc)
- *Short Circuit Current* (Isc)
- *Maximum Power Voltage* (Vmpp)
- *Maximum Power Current* (Impp)

Karakteristik panel surya direpresentasikan dalam kurva arus-tegangan (I-V) dan daya-tegangan (P-V). Pada kurva tersebut terdapat satu titik operasi

yang sangat penting, yaitu *Maximum Power Point* (MPP), yaitu titik di mana hasil perkalian tegangan dan arus mencapai nilai maksimum [12].



Gambar 2.4 Kurva arus – tegangan dan daya-tegangan [13] .

Daya keluaran panel dapat dinyatakan secara sederhana sebagai:

$$P = V \times I \quad (2.5)$$

Sedangkan pada kondisi operasi optimal di titik MPP, daya keluaran maksimum dinyatakan sebagai:

$$P_{mp} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (2.6)$$

Dan kualitas *Fill Factor* panel surya dapat dinyatakan sebagai:

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.7)$$

Fill Factor menggambarkan seberapa “persegi” bentuk kurva I-V suatu panel surya; semakin mendekati nilai 1, semakin kecil rugi-rugi internal panel akibat resistansi seri dan resistansi shunt sehingga kualitas panel semakin baik.

Efisiensi konversi panel surya, yaitu perbandingan antara daya listrik maksimum yang dihasilkan terhadap daya radiasi matahari yang diterima oleh luas permukaan panel, dinyatakan sebagai:

$$\eta_{panel} = \frac{P_{mp}}{G \times A} \times 100\% \quad (2.8)$$

Keterangan:

- G : iradiasi matahari yang diterima permukaan panel (W/m^2).
- A : luas permukaan aktif panel surya (m^2).

Performa panel surya sangat fluktuatif dan dipengaruhi secara signifikan oleh dua faktor lingkungan utama:

1. Irradiasi Matahari (Irr)

Berbanding lurus dengan arus (I) yang dihasilkan. Penurunan Irradiasi matahari secara drastis menurunkan arus hubung singkat (I_{sc}), yang berakibat pada penurunan daya total.

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \times \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \times [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (2.9)$$

Keterangan :

I_{sc} : Arus hubung singkat pada kondisi saat ini.

$I_{sc,ref}$: Arus hubung singkat pada kondisi referensi.

G : Irradiasi matahari saat ini.

G_{ref} : Irradiasi matahari pada kondisi referensi.

α : Koefisien suhu untuk arus.

T : Suhu sel saat ini.

T_{ref} : Suhu sel pada kondisi referensi.

2. Temperatur Lingkungan Dan Sel Surya (T)

Berbanding terbalik dengan tegangan (V). Kenaikan suhu sel akibat panas matahari menurunkan tegangan hubung terbuka (V_{oc}) secara signifikan, sehingga efisiensi daya menurun.

Data cuaca yang digunakan dalam penelitian ini, baik dari Global Solar Atlas maupun BMKG, pada dasarnya merupakan temperatur udara lingkungan (ambient), sedangkan temperatur yang secara langsung memengaruhi karakteristik listrik sel surya adalah temperatur permukaan sel itu sendiri. Temperatur sel selalu lebih tinggi dibandingkan temperatur lingkungan karena sebagian energi radiasi matahari yang diserap panel diubah menjadi panas, tidak seluruhnya dikonversi menjadi energi listrik. Hubungan antara temperatur sel dan temperatur lingkungan dinyatakan melalui parameter Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) sebagai berikut:

$$T_{cell} = T_a + [(NOCT - 20) / 800] \times G \quad (2.10)$$

Keterangan:

T_{cell} : Temperatur sel surya pada kondisi operasi saat ini ($^{\circ}\text{C}$).

T_a : Temperatur lingkungan/udara ambient ($^{\circ}\text{C}$), diperoleh dari data cuaca aktual Kota Surabaya.

NOCT : Nominal Operating Cell Temperature, yaitu temperatur sel pada kondisi pengujian standar (umumnya 45°C berdasarkan datasheet modul surya).

G : Irradiasi matahari yang diterima permukaan panel (W/m^2).

800 : Irradiasi acuan pengujian NOCT (W/m^2).

Nilai T_{cell} hasil perhitungan inilah yang digunakan sebagai variabel T pada Persamaan (2.5) untuk menentukan pengaruh temperatur terhadap tegangan hubung terbuka (V_{oc}), sehingga kenaikan temperatur akibat pemanasan oleh radiasi matahari dapat direpresentasikan secara lebih realistis dalam simulasi performa panel surya sepanjang tahun, mengingat data cuaca yang tersedia berupa temperatur lingkungan dan bukan temperatur sel secara langsung.

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + \beta(T - T_{ref}) + V_t \cdot \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \quad (2.11)$$

Keterangan :

V_{oc} : Tegangan hubung terbuka pada kondisi saat ini.

$V_{oc,ref}$: Tegangan hubung terbuka kondisi referensi.

β : Koefisien suhu untuk tegangan.

V_t : Tegangan termal.

T, T_{ref}, G, G_{ref} : Sama seperti keterangan sebelumnya.

Untuk memprediksi daya keluaran pada kondisi lingkungan non-standar, digunakan model gabungan yang memperhitungkan pengaruh iradiasi dan suhu secara simultan [14]:

$$P_{max} = P_{STC} \times \left(\frac{G}{1000}\right) \times [1 + \gamma(T - 25)] \quad (2.12)$$

Keterangan :

P_{max}	: Daya maksimum pada kondisi saat ini.
P_{STC}	: Daya maksimum pada kondisi referensi.
γ	: Koefisien suhu untuk daya.

2.2.4 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan teknik pengendalian yang digunakan untuk memperoleh daya maksimum dari panel surya dengan cara mengatur titik operasi panel pada kondisi Maximum Power Point (MPP). Titik ini merupakan kombinasi nilai tegangan dan arus di mana panel surya menghasilkan daya paling besar pada kondisi Irradiasi dan temperatur tertentu. Pada sebuah MPPT dapat digunakan sebuah algoritma untuk mengontrol kinerja MPPT tersebut agar bekerja lebih maksimal [15].

Karakteristik keluaran panel surya bersifat nonlinear dan sangat dipengaruhi oleh perubahan intensitas radiasi matahari serta suhu lingkungan. Perubahan kondisi tersebut menyebabkan posisi titik daya maksimum pada kurva daya–tegangan (P–V) selalu berpindah. Oleh karena itu, diperlukan suatu algoritma pengendalian yang mampu secara dinamis menyesuaikan titik kerja panel agar selalu berada pada kondisi maksimum [16].

Secara umum, kinerja suatu algoritma MPPT dievaluasi berdasarkan tiga aspek utama, yaitu: (1) kecepatan pelacakan (*tracking speed*) dalam mencapai titik MPP saat terjadi perubahan iradiasi secara tiba-tiba, (2) tingkat osilasi (*steady-state oscillation*) di sekitar titik MPP pada kondisi tunak, dan (3) efisiensi pelacakan daya secara keseluruhan. Efisiensi MPPT pada sistem dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

Efisiensi MPPT pada sistem dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{out}}{P_{max}} 100 \% \quad (2.13)$$

di mana :

P_{out} = daya keluaran sistem

P_{max} = daya maksimum panel surya.

2.2.4.1 Perturb and Observe (P&O)

Metode P&O bekerja dengan cara memberikan gangguan (*perturb*) kecil pada tegangan panel surya (dengan mengubah *Duty Cycle*) dan mengamati

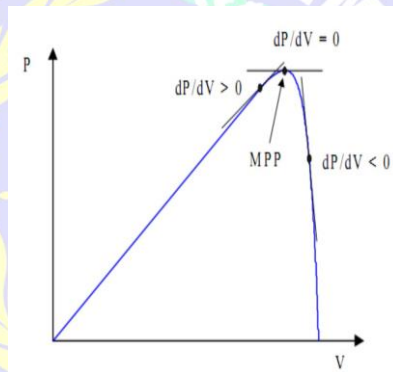
(*observe*) dampaknya terhadap daya keluaran. Jika daya meningkat, sistem akan terus memberikan gangguan ke arah yang sama [17]. Jika daya menurun, sistem akan berbalik arah gangguan. Proses ini dilakukan secara berulang. Terdapat 3 posisi titik yang berbeda pada kurva daya sel surya yang dijelaskan pada Persamaan (2-14) sampai Persamaan (2-16).

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad (2.16)$$

Ketiga persamaan di atas merupakan nilai perubahan daya terhadap perubahan tegangan pada panel surya. Berikut adalah posisi titik daya maksimum pada kurva sel surya yang dijelaskan pada Gambar 2.4.

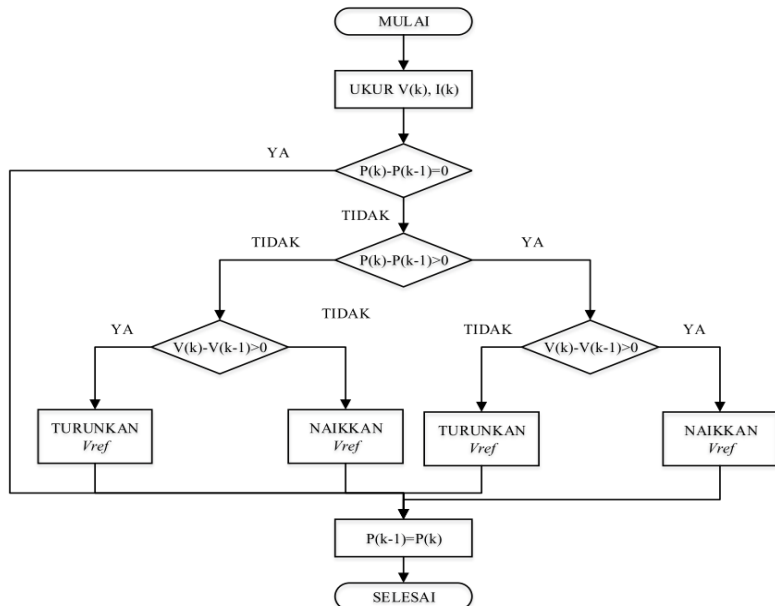


Gambar 2.5 kurva daya sel surya

Berdasarkan pada Gambar 2.5 di atas, Persamaan (2.14) berada di sebelah kiri dari titik MPP sedangkan Persamaan (2.16) berada di sebelah kanan. Apabila tegangan kerja sel surya diganggu (perturbed) dan berada pada posisi sebelah kiri, perturbation dilakukan untuk memindahkan tegangan kerja sel surya maju ke arah titik MPP. Apabila perubahan titik kerja berada di sebelah kanan, algoritma P and O membalik arah perturbation sehingga titik kerja berada pada titik MPP [18]. Flowchart algoritma P and O dijelaskan pada Gambar 2.5.

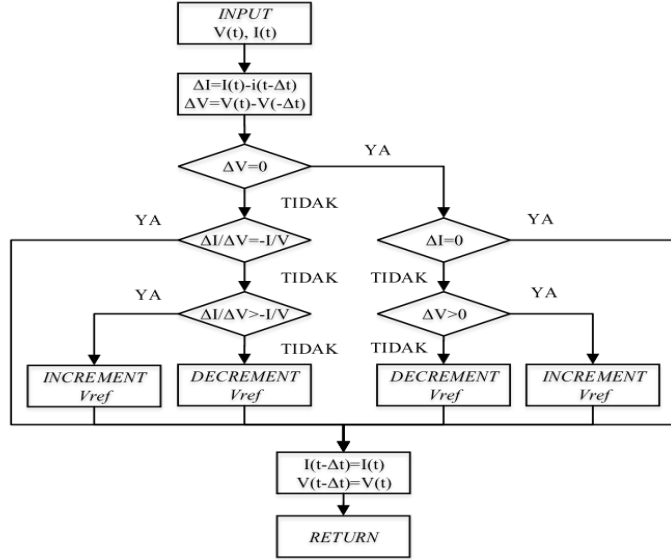
Berdasarkan pada Gambar 2.6 di atas, perubahan nilai *perturb* yang diberikan bernilai tetap. Nilai ΔD yang besar mempercepat proses pelacakan

namun menimbulkan osilasi yang besar di sekitar titik MPP pada kondisi tunak, sedangkan nilai ΔD yang kecil memperkecil osilasi tetapi memperlambat respons transien. Permasalahan waktu penjajakan dan osilasi pada titik MPP inilah yang menjadi salah satu motivasi digunakannya metode kendali adaptif seperti *Fuzzy Logic Controller* pada penelitian ini, karena besar langkah perubahan *duty cycle* dapat disesuaikan secara dinamis, tidak tetap seperti pada metode P&O konvensional.



Gambar 2.6 Algoritma P&O

2.2.4.2 Metode Incremental Conductance



Gambar 2.7 Flowchart metode Inc

Metode *Incremental Conductance* (IncCond) didasarkan pada fakta bahwa turunan daya terhadap tegangan pada titik daya maksimum bernilai nol. Karena $P = V \times I$, maka turunan daya terhadap tegangan dapat diturunkan menjadi hubungan antara konduktansi sesaat (I/V) dan konduktansi inkremental (dI/dV) sebagai berikut [19].

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \text{ (pada titik MPP)} \quad (2.17)$$

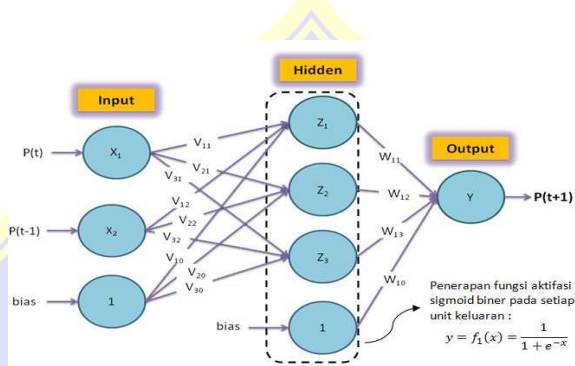
$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ (di sebelah kiri MPP)} \quad (2.18)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ (di sebelah kanan MPP)} \quad (2.19)$$

Algoritma ini membandingkan konduktansi inkremental dengan konduktansi sesaat pada setiap siklus pencuplikan untuk menentukan arah pergeseran *duty cycle* menuju titik MPP. Dibandingkan dengan P&O, metode IncCond secara teori mampu mendeteksi kondisi tunak dengan lebih tepat karena memiliki kriteria berhenti yang jelas ($dI/dV = -I/V$), namun implementasinya lebih sensitif terhadap derau (*noise*) pengukuran akibat adanya proses pembagian dua besaran yang berubah kecil (dI dan dV).

2.2.4.3 Artificial Neural Network (ANN)

ANN merupakan metode kecerdasan buatan yang terinspirasi dari cara kerja jaringan saraf biologis. Dalam sistem MPPT, ANN digunakan untuk memetakan hubungan antara parameter input seperti tegangan, arus, temperatur, dan Irradiasi terhadap nilai duty cycle optimal [20]. Jaringan saraf tiruan terdiri dari beberapa lapisan utama pada gambar 2.8 dibawah.



Gambar 2.8 Struktur Dasar ANN

Proses kerja ANN dimulai dengan pelatihan menggunakan dataset karakteristik panel surya. Setiap neuron pada lapisan tersembunyi mengolah sinyal masukan melalui penjumlahan berbobot yang kemudian dilewatkan pada fungsi aktivasi, dinyatakan sebagai:

$$y = f(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b) \quad (2.20)$$

di mana x_i adalah nilai masukan ke- i , w_i adalah bobot koneksi, b adalah nilai *bias*, dan $f(\cdot)$ adalah fungsi aktivasi (umumnya *sigmoid* atau *tan-sigmoid*). Setelah proses pelatihan (*training*) selesai menggunakan algoritma *backpropagation*, jaringan saraf mampu memprediksi nilai *duty cycle* yang mendekati titik daya maksimum tanpa memerlukan model matematis eksplisit dari panel surya.

2.2.4.4 Fuzzy Logic Controller (FLC)

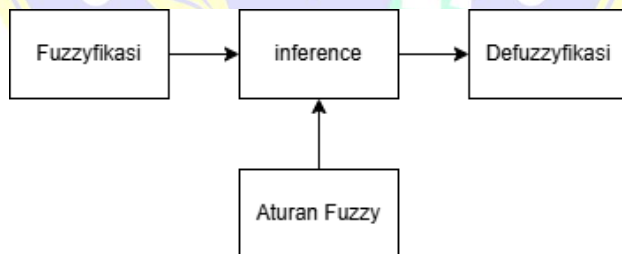
Fuzzy Logic Controller (FLC) merupakan salah satu metode kendali berbasis kecerdasan buatan yang banyak digunakan pada sistem Maximum Power Point Tracking (MPPT) karena mampu menangani sistem nonlinear tanpa memerlukan model matematis yang kompleks. Pada sistem

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), karakteristik keluaran panel surya sangat dipengaruhi oleh perubahan intensitas radiasi matahari dan temperatur lingkungan. Perubahan tersebut menyebabkan hubungan antara arus,

tegangan, dan daya bersifat nonlinear serta berubah secara dinamis terhadap kondisi operasi [21]. Oleh karena itu, diperlukan metode pengendalian yang mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan secara cepat dan akurat. Dalam hal ini, logika fuzzy menjadi salah satu metode yang sesuai karena memiliki kemampuan adaptif dan respons yang baik terhadap sistem yang bersifat nonlinear.

Logika fuzzy merupakan pengembangan dari logika Boolean klasik yang hanya mengenal dua kondisi tegas, yaitu 0 (false) dan 1 (true). Berbeda dengan logika klasik, logika fuzzy menggunakan konsep derajat keanggotaan dengan rentang nilai kontinu antara 0 hingga 1. Konsep tersebut memungkinkan sistem untuk merepresentasikan ketidakpastian dan ambiguitas yang sering terjadi pada sistem nyata. Pada aplikasi MPPT, logika fuzzy digunakan untuk menentukan perubahan duty cycle konverter DC–DC agar panel surya dapat bekerja sedekat mungkin dengan titik daya maksimum atau Maximum Power Point (MPP).

Secara umum, sistem fuzzy terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, inferensi fuzzy, dan defuzzifikasi. Tahap fuzzifikasi berfungsi mengubah data numerik hasil pembacaan sensor menjadi variabel linguistik. Selanjutnya, tahap inferensi fuzzy digunakan untuk menentukan keputusan berdasarkan aturan logika fuzzy yang telah dirancang sebelumnya. Hasil dari proses inferensi kemudian dikonversi kembali menjadi nilai numerik pada tahap defuzzifikasi sehingga dapat digunakan sebagai sinyal kendali pada sistem yang ditunjukkan oleh gambar 2.9.



Gambar 2.9 Blok Diagram Kendali Logika Fuzzy

Dalam implementasinya, sistem fuzzy dibangun menggunakan empat blok utama yang saling terintegrasi, yaitu fuzzifikasi, basis aturan (*rule base*), *inference engine*, dan defuzzifikasi. Fuzzifikasi berfungsi mengubah

nilai masukan nyata (*crisp input*) menjadi bentuk linguistik fuzzy menggunakan fungsi keanggotaan (*membership function*), umumnya berbentuk segitiga (*triangular*) yang dinyatakan sebagai

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (2.21)$$

di mana a , b , dan c berturut-turut adalah batas kiri, puncak, dan batas kanan dari fungsi keanggotaan segitiga, sedangkan $\mu(x)$ menyatakan derajat keanggotaan nilai masukan x terhadap suatu himpunan fuzzy, dengan rentang $0 \leq \mu(x) \leq 1$.

Basis aturan merupakan kumpulan aturan IF-THEN yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan sistem [22]. Inference engine bertugas memproses aturan fuzzy berdasarkan kondisi input yang diterima, sedangkan defuzzifikasi digunakan untuk mengubah hasil keluaran fuzzy menjadi nilai nyata (*crisp output*).

Pada proses pengambilan keputusan, metode inferensi fuzzy yang digunakan adalah metode Mamdani. Metode Mamdani dipilih karena memiliki struktur logika yang sederhana, mudah dipahami, dan mampu merepresentasikan hubungan antarvariabel dalam bentuk aturan linguistik. Pada metode ini, bagian anteseden (“JIKA”) dan konsekuen (“MAKA”) direpresentasikan menggunakan variabel linguistik sehingga proses pengendalian menjadi lebih intuitif dan mudah dianalisis. Untuk setiap aturan, derajat keanggotaan keluaran diperoleh melalui operasi minimum terhadap derajat keanggotaan anteseden (implikasi Mamdani), kemudian hasil dari seluruh aturan yang aktif digabungkan melalui operasi maksimum (agregasi):

$$\mu_i = \min(\mu_E(E), \mu_{\Delta E}(\Delta E)) \quad (2.22)$$

$$\mu_{agregat}(z) = \max_i(\mu_i(z)) \quad (2.23)$$

Tahap akhir dari sistem fuzzy adalah defuzzifikasi, yaitu proses konversi hasil agregasi himpunan fuzzy keluaran menjadi satu nilai *crisp* yang akan digunakan sebagai sinyal kendali *duty cycle*. Pada penelitian ini digunakan metode *Center of Gravity* (COG)/*centroid*, yang dinyatakan sebagai:

$$z^* = \frac{\int \mu_{agregat}(z) \cdot z \, dz}{\int \mu_{agregat}(z) \, dz} \quad (2.24)$$

atau dalam bentuk diskret yang diimplementasikan pada simulasi

$$\text{digital: } z^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (2.25)$$

Di mana z_i adalah nilai keluaran *crisp* pada singleton/aturan ke- i , dan μ_i adalah derajat keanggotaan hasil agregasi pada aturan tersebut. Metode *centroid* dipilih karena menghasilkan keluaran yang lebih halus (*smooth*) dibandingkan metode defuzzifikasi lain seperti *Mean of Maximum* (MOM), sehingga perubahan *duty cycle* yang dihasilkan tidak menimbulkan lonjakan (*chattering*) yang berlebihan pada sinyal PWM.

Dalam sistem MPPT berbasis fuzzy, variabel input yang digunakan adalah *error* (E) dan *delta error* (ΔE). Pada penelitian ini, nilai *error* dihitung berdasarkan selisih daya keluaran panel surya, bukan gradien (dP/dV), untuk menghindari terjadinya pembagian dengan nol (*division by zero*) saat simulasi digital ketika perubahan tegangan mendekati nol. Nilai *error* dirumuskan sebagai berikut:

$$E(k) = P(k) - P(k - 1) \quad (2.26)$$

Sedangkan *delta error* merupakan perubahan nilai *error* pada dua periode pengukuran berturut-turut yang dirumuskan sebagai:

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (2.27)$$

Keluaran akhir dari FLC berupa perubahan *duty cycle* (ΔD) hasil defuzzifikasi pada Persamaan (2.27) yang kemudian diakumulasikan terhadap nilai *duty cycle* sebelumnya untuk memperoleh sinyal kendali baru:

$$D(k) = D(k - 1) + \Delta D(k) \quad (2.28)$$

Di mana:

- $E(k)$: Nilai error pada sampling ke- k .
- $\Delta E(k)$: Nilai perubahan error pada sampling ke- k .
- $P(k)$: Nilai daya pada sampling ke- k .
- $P(k-1)$: Nilai daya pada sampling sebelumnya.

$D(k)$: *Duty cycle* keluaran pada sampling ke-k.

2.2.5 Boost Converter

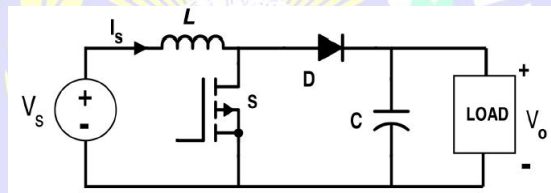
Boost Converter adalah jenis konverter daya DC-DC switching yang menaikkan tegangan masukan ke tegangan keluaran yang lebih tinggi. Komponen utamanya adalah induktor, sakelar daya (MOSFET/IGBT), dioda, dan kapasitor filter.

Kedaaan ON:

Sakelar daya tertutup, arus mengalir melalui induktor, menyimpan energi dalam bentuk medan magnet. Dioda memblokir arus balik dari beban.

Kedaaan OFF:

Sakelar daya terbuka, induktor melepaskan energi yang tersimpan, menjumlahkan tegangannya dengan tegangan masukan untuk memaksa arus mengalir melalui dioda ke kapasitor keluaran dan beban.



Gambar 2.10 Boost Converter [23].

Tegangan keluaran ideal (V_{out}) pada *Boost Converter* ditentukan oleh tegangan masukan (V_{in}) dan siklus kerja (*Duty cycle, D*) dari sakelar daya dalam kondisi *Continuous Conduction Mode* (CCM). Hubungan ini diperoleh dari prinsip kesetimbangan *volt-second* pada induktor, yaitu dengan menyamakan luas tegangan induktor selama fase ON dan fase OFF dalam satu periode pensaklaran, sehingga dinyatakan dalam persamaan:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (2.29)$$

Keterangan:

V_{out} = tegangan keluaran (V)

V_{in} = tegangan masukan (V)

$$D = \text{duty cycle}$$

Di mana $0 < D < 1$. Persamaan (2.29) dapat disusun ulang untuk memperoleh nilai *duty cycle* yang diperlukan agar tercapai tegangan keluaran tertentu, yaitu:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (2.30)$$

Perubahan *Duty Cycle* (dikontrol oleh mikrokontroler melalui sinyal PWM) secara langsung mengubah impedansi beban input yang dilihat oleh panel surya, yang merupakan prinsip dasar pelacakan MPP [24].

2.2.5.1 Penentuan Boost Converter

Tegangan output pada boost converter ditapis dengan kapasitor yang memiliki kapasitansi (C) dan Equivalent Series Resistance (ESR) sebesar r_c . Selain itu kapasitor juga sebagai penyimpan energi pada saat switch off. Pada switching power supply, fungsi dari induktor adalah sebagai penyimpan energi dan menentukan nilai ripple arus. Rangkaian boost converter pada penelitian ini bekerja pada mode CCM sehingga besar kapasitor dan induktor dapat ditentukan melalui Persamaan (2.31) dan Persamaan (2.32) sebagai berikut.

$$C_{min} = \frac{I_{out} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f} \quad (2.31)$$

$$L_{min} = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f} \quad (2.32)$$

Keterangan :

C_{min} : besar kapsitor (F).

L_{min} : besar inductor minimum.

V_0 : tegangan output (V).

D : Duty Cycle (%).

V_r : tegangan ripple (V).

R : beban (Ω).

f : frekuensi *switching* (Hz).

Pemilihan nilai induktor lebih besar dari L_{min} ($L > L_{min}$) agar sistem boost converter bekerja pada mode CCM. Besar nilai L setidaknya lebih besar

25% dari nilai $L_{\min}$. Besarnya ripple arus induktor (ΔI_L) yang menjadi acuan pada Persamaan (2.33) dan (2.34) itu sendiri dapat dinyatakan sebagai:

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} \cdot D}{L \cdot f} \quad (2.33)$$

Jika sistem beroperasi dengan nilai induktansi L lebih kecil dari $L_{\min}$, maka arus induktor akan turun mencapai nol sebelum akhir periode *switching*, sehingga konverter bekerja pada mode *Discontinuous Conduction Mode* (DCM) yang menyebabkan riak tegangan keluaran dan tegangan panel surya menjadi lebih besar serta mempersulit proses pelacakan MPP. Dan untuk mengetahui kualitas output dari boost converter dapat menggunakan persamaan berikut:

$$Ripple = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{avg}} \times 100\% \quad (2.34)$$

Selain kualitas *ripple*, efisiensi konversi daya *boost converter* juga menjadi parameter penting dalam evaluasi kinerja, yang dinyatakan sebagai perbandingan antara daya keluaran dan daya masukan konverter:

$$\eta_{boost} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.35)$$

Nilai efisiensi ini dipengaruhi oleh rugi-rugi konduksi pada sakelar dan dioda, rugi-rugi *switching*, serta rugi-rugi resistansi parasit pada induktor dan kapasitor.

2.2.6 Bidirectional DC-DC Converter (BDC)

2.2.6.1 Prinsip Dasar Bidirectional DC-DC Converter

Bidirectional DC-DC Converter (BDC) adalah perangkat elektronika daya yang dirancang untuk dapat mengalirkan energi listrik secara dua arah (bolak-balik) antara dua sumber tegangan DC yang berbeda tingkatan potensialnya dengan efisiensi tinggi. Pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), BDC bertindak sebagai pengatur utama dalam manajemen pengisian dan pengosongan energi (*charging/discharging*) pada baterai [25].

Topologi yang paling umum digunakan untuk skala kecil hingga menengah adalah BDC Non-Terisolasi tipe *Half-Bridge* (Setengah Jembatan). Topologi ini dipilih karena memiliki struktur yang sederhana, jumlah komponen aktif yang minimal, serta efisiensi kerja yang tinggi. Rangkaian ini terdiri dari dua buah sakelar daya semikonduktor aktif (MOSFET atau IGBT) yang dikontrol secara komplementer, sebuah induktor (L), dan kapasitor filter (C) di kedua sisinya. 2.2.6.2 Mode Operasi BDC

Berdasarkan arah aliran dayanya, BDC beroperasi secara bergantian dalam dua mode utama yang dikendalikan oleh nilai *duty cycle* (siklus kerja) dari sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM):

1. Mode Turun Tegangan (*Buck Mode / Charging*)

Mode ini aktif ketika daya yang dihasilkan oleh panel surya melalui *boost converter* MPPT mengalami surplus atau melebihi daya yang dibutuhkan oleh beban ($P_{pv} > P_{Load}$). Pada kondisi ini, aliran daya bergerak dari jalur *DC Bus* menuju ke baterai. Sakelar sisi atas (*High-Side Switch*, Q1) bertindak sebagai sakelar aktif yang memotong tegangan, sedangkan sakelar sisi bawah (*Low-Side Switch*, Q2) bertindak sebagai dioda komutasi (*freewheeling*). Hubungan matematis tegangan pada mode *Buck* dinyatakan dalam Persamaan (2.36):

$$V_{bat} = D_{buck} \cdot V_{bus} \quad (2.36)$$

Dimana :

D_{buck} = *duty cycle* sakelar Q1.

V_{bat} = tegangan terminal baterai.

V_{bus} = tegangan kerja *Common DC Bus*.

2. Mode Naik Tegangan (*Boost Mode / Discharging*)

Mode ini bekerja secara otomatis ketika sistem mengalami defisit daya atau saat panel surya tidak menghasilkan energi akibat tertutup awan tebal maupun pada malam hari ($P_{pv} < P_{Load}$). Pada mode ini, baterai akan mengalirkan energinya kembali ke jalur *DC Bus* untuk menyuplai beban. Sakelar sisi bawah (Q2) bertindak sebagai sakelar utama untuk menaikkan tegangan nominal baterai yang lebih rendah ke level tegangan bus yang lebih tinggi, sementara Q1 berfungsi sebagai komutator. Hubungan matematis tegangan pada mode *Boost*.

Sistem menggunakan *bidirectional converter* untuk mengelola aliran daya antara baterai dan *DC Bus*. Pada mode *discharging* (Boost), baterai menyuplai daya ke *bus* dengan tegangan output yang diatur oleh rasio tugas (*Dboost*) sesuai persamaan:

$$V_{bus} = \frac{V_{bat}}{1 - D_{boost}} \quad (2.37)$$

Dimana D_{boost} adalah *duty cycle* dari sakelar Q2. Untuk menjaga integritas saklar dan mencegah kondisi *shoot-through* yang dapat merusak

komponen, sistem menerapkan *dead-time* sebesar 1–2 μs pada setiap transisi pensaklaran. Parameter ini memastikan bahwa kedua saklar tidak berada dalam kondisi ON secara bersamaan. Untuk mencegah terjadinya hubung singkat (*short circuit*), kontroler harus menyisipkan *dead-time* yang presisi pada saat perpindahan penyalan antara Q1 dan Q2. Secara keseluruhan, aliran daya pada arsitektur *Common DC Bus* harus memenuhi kesetimbangan daya sesaat antara daya yang dibangkitkan panel surya (P_{pv}), daya yang diserap/dilepas baterai (P_{bat}), dan daya yang dikonsumsi beban (P_{load}), yang dinyatakan sebagai:

$$P_{pv} = P_{load} \pm P_{bat} \quad (2.38)$$

di mana tanda $+P_{bat}$ berlaku saat baterai mengisi (menyerap kelebihan daya PV), dan $-P_{bat}$ berlaku saat baterai mengosongkan (menyuplai kekurangan daya PV terhadap beban).

2.2.6.3 Konsep *Common DC Bus*

Common DC Bus (Bus DC Bersama) adalah konfigurasi sistem tenaga listrik terdistribusi di mana seluruh sumber pembangkitan (dalam hal ini panel surya melalui MPPT *Boost Converter*), sistem penyimpanan energi (baterai melalui BDC), dan beban DC dihubungkan secara paralel pada satu jalur tegangan DC utama yang sama.

Dalam *Common DC Bus*, baterai tidak lagi berhadapan langsung secara pasif dengan beban, melainkan dikendalikan secara aktif lewat *Bidirectional Converter*. Peran dinamis baterai terbagi menjadi dua kondisi sesuai dengan fluktuasi cuaca:

1. Kondisi Pengisian (*Charging Mode*)

Ketika iradiasi matahari di Surabaya sedang terik dan MPPT Fuzzy berhasil memproduksi daya yang besar ($P_{pv} > P_{Load}$), kelebihan daya tersebut akan diserap oleh baterai. Tegangan terminal baterai akan merangkak naik seiring dengan meningkatnya nilai SoC.

2. Kondisi Pengosongan (*Discharging Mode*)

Ketika cuaca mendung atau malam hari ($P_{pv} < P_{Load}$), baterai bertindak sebagai sumber energi utama. Arus akan mengalir keluar dari baterai menuju *DC Bus* untuk menjaga agar beban resistif tetap mendapatkan suplai tegangan stabil pada level 48 V.

2.2.7 Sistem Penyimpanan Energi Berbasis Baterai LiFePO₄

2.2.7.1 Karakteristik Utama Baterai LiFePO4

Baterai *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO4) merupakan salah satu teknologi penyimpanan energi elektrokimia sekunder (dapat diisi ulang) yang paling ideal untuk diaplikasikan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (*off-grid* atau *hybrid*) [26]. Dalam penelitian manajemen daya berbasis *Common DC Bus* ini, baterai LiFePO4 dipilih karena memiliki beberapa keunggulan teknis yang signifikan dibandingkan jenis baterai konvensional seperti *Lead-Acid* (Aki), antara lain:

1. Kepadatan energi tinggi serta mampu menyimpan energi lebih besar dalam volume dan bobot yang lebih ringkas.
2. Siklus hidup (*Cycle Life*) yang panjang serta dapat beroperasi antara 2000 hingga 5000 siklus pengisian-pengosongan dengan penurunan kapasitas yang minimal.
3. Stabilitas termal dan keamanan yang tinggi serta Memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap fenomena *thermal runaway* (kelebihan panas), sehingga sangat aman digunakan pada cuaca tropis ekstrem seperti Kota Surabaya.

Secara elektrik, baterai dapat dimodelkan sebagai rangkaian ekivalen sederhana berupa sumber tegangan ideal (*Open Circuit Voltage*, $V_{oc,bat}$) yang tersusun seri dengan resistansi internal (R_{int}). Tegangan terminal baterai yang teramati pada terminal keluaran dipengaruhi oleh jatuh tegangan pada resistansi internal tersebut, dinyatakan sebagai:

$$V_{bat} = V_{oc,bat} - I_{bat} \cdot R_{int} \quad (2.39)$$

Tanda arus I_{bat} bernilai positif saat baterai melepaskan energi (*discharge*) dan bernilai negatif saat baterai menerima energi (*charge*), sehingga tegangan terminal akan sedikit lebih rendah dari $V_{oc,bat}$ saat *discharge* dan sedikit lebih tinggi saat *charge*.

$$E_{bat} = V_{nom} \cdot C_{bat} \quad (2.40)$$

Energi yang dapat disimpan oleh baterai dihitung berdasarkan hasil perkalian antara tegangan nominal dan kapasitas sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.40). Persamaan ini digunakan untuk menentukan kapasitas energi total yang dimiliki baterai dalam satuan Watt-hour (Wh). Tegangan nominal merupakan tegangan kerja rata-rata baterai selama proses pengisian maupun pengosongan, sedangkan kapasitas baterai menyatakan

jumlah muatan listrik yang dapat disimpan dalam satuan Ampere-hour (Ah). Dengan mengetahui kedua parameter tersebut, dapat diperkirakan besarnya energi yang tersedia untuk menyuplai beban maupun menyimpan energi hasil konversi panel surya. Secara matematis, energi baterai dirumuskan sebagai:

2.2.6.2 Parameter Elektrikal dalam Pemodelan Baterai

Untuk melakukan analisis kinerja dan simulasi dinamika baterai pada MATLAB/Simulink, terdapat beberapa parameter penting yang harus didefinisikan dan dipantau secara kontinu:

1. Kapasitas Nominal (C_{nom})

Dinyatakan dalam satuan Ampere-hour (Ah), yang menunjukkan total muatan listrik yang dapat dikeluarkan oleh baterai pada kondisi arus konstan tertentu hingga tegangannya mencapai tegangan batas bawah (*cut-off voltage*).

2. Tegangan Nominal dan Tegangan Kerja (V_{bat})

Tegangan terminal aktual baterai yang nilainya berubah secara dinamis tergantung pada arah aliran arus (apakah sedang diisi oleh BDC pada mode *Buck* atau dikosongkan pada mode *Boost*) serta dipengaruhi oleh resistansi internal baterai sesuai Persamaan (2.39).

3. *C-rate*

C-rate menyatakan besarnya arus pengisian/pengosongan baterai relatif terhadap kapasitas nominalnya, dinyatakan sebagai:

$$C_{rate} = \frac{I_{bat}}{C_{nom}} \quad (2.41)$$

Sebagai contoh, arus pengosongan sebesar 1C pada baterai 200 Ah berarti baterai dikosongkan dengan arus 200 A dalam waktu satu jam. Nilai C-rate yang tinggi secara terus-menerus dapat mempercepat degradasi kapasitas baterai.

4. *State of Charge* (SoC)

SoC merupakan parameter yang menunjukkan persentase kapasitas muatan yang masih tersisa di dalam baterai relatif terhadap kapasitas maksimumnya. Nilai SoC 100% menandakan baterai terisi penuh, sedangkan 0% menandakan baterai kosong. Secara matematis dalam simulasi, nilai SoC

dihitung menggunakan metode *Coulomb Counting* melalui Persamaan (2.42):

$$SoC(t) = SoC(t_0) - \frac{1}{C_{nom}} \int_{t_0}^t I_{bat}(\tau) d\tau \quad (2.42)$$

Dimana:

$SoC(t_0)$: nilai SoC awal.

$I_{bat}(t)$: arus transien baterai.

C_{nom} : kapasitas total baterai dalam satuan Ampere-detik (As).

5. *Depth of Discharge (DoD)*

DoD adalah persentase kapasitas baterai yang telah dikosongkan. Nilai DoD berbanding terbalik dengan SoC:

$$DoD = 100\% - SoC \quad (2.43)$$

Untuk menjaga umur ekonomis baterai LiFePO₄, batas aman pengosongan (*Maximum DoD*) dalam penelitian ini adalah 80% (atau menyisakan SoC minimal 20%).

6. *State of Health (SoH)*

SoH menggambarkan tingkat kesehatan atau degradasi kapasitas baterai dibandingkan dengan kondisi barunya, dinyatakan sebagai:

$$SoH = \frac{C_{aktual}}{C_{rated}} \times 100\% \quad (2.44)$$

dimana C_{aktual} adalah kapasitas terukur baterai pada kondisi saat ini dan C_{rated} adalah kapasitas nominal baterai pada kondisi baru. Meskipun SoH tidak dihitung secara langsung pada simulasi jangka pendek dalam penelitian ini, parameter ini penting sebagai dasar proyeksi umur pakai baterai dalam operasi jangka panjang.

2.2.7 Profil Beban Dinamis dalam Sistem Mandiri

Beban dalam sistem *off-grid* bersifat dinamis, yang berarti kebutuhan daya tidak konstan sepanjang waktu. Pemahaman mendalam mengenai profil beban sangat krusial karena menentukan efisiensi sistem penyimpanan energi. Beban listrik dikategorikan sebagai beban resistif murni, di mana konsumsi daya dipengaruhi langsung oleh variasi tegangan sumber dan resistansi beban itu sendiri[27].

Dalam kondisi praktis, beban tidak selalu memiliki resistansi tetap. Untuk mensimulasikan profil beban rumah tangga 24 jam, digunakan pendekatan resistansi variabel. Hubungan daya dan resistansi, daya (P) yang diserap beban mengikuti hukum Ohm untuk daya, yaitu:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (2.45)$$

$$R_{beban} = \frac{V^2}{P_{nominal}} \quad (2.46)$$

Dimana:

R_{beban} = Nilai resistansi beban elektrik Ohm.

V_{bus} = Tegangan operasional pada jalur *DC Bus* (48V).

$P_{nominal}$ = Konsumsi daya nominal beban target (450W)

Karena adanya fluktuasi tegangan, daya yang benar-benar terserap adalah:

$$P_{aktual} = \frac{V_{bat(terukur)}^2}{R_{terpasang}} \quad (2.47)$$

Dimana V adalah tegangan baterai (V_{bat}) dan R adalah resistansi beban. Untuk mengevaluasi total kebutuhan energi harian sistem, daya beban pada setiap interval waktu diintegrasikan terhadap durasi pembebanan, dinyatakan sebagai:

$$E_{harian} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \Delta t_i \quad (2.48)$$

di mana P_i adalah daya beban pada interval ke- i , Δt_i adalah durasi interval tersebut (jam), dan n adalah jumlah total interval dalam satu hari. Nilai E_{harian} ini digunakan sebagai acuan dalam menentukan kapasitas baterai minimum yang diperlukan agar sistem mampu bertahan pada kondisi tanpa pasokan dari panel surya (*autonomy days*).

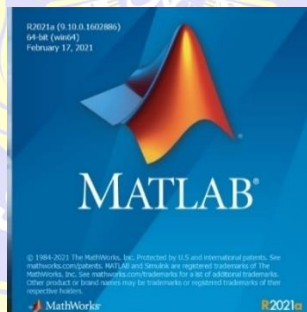
2.2.8 MATLAB/Simulink

MATLAB (Matrix Laboratory) merupakan perangkat lunak komputasi numerik yang banyak digunakan dalam bidang teknik untuk analisis, pemodelan, simulasi, dan pengolahan data. Salah satu fitur utama yang dimiliki MATLAB adalah Simulink, yaitu lingkungan simulasi berbasis diagram blok yang memungkinkan pengguna membangun dan menganalisis suatu sistem secara visual. Dalam penelitian di bidang sistem tenaga listrik dan energi terbarukan, MATLAB/Simulink sering digunakan untuk

memodelkan karakteristik komponen, menganalisis performa sistem, serta mengevaluasi strategi pengendalian sebelum diterapkan pada perangkat keras. Kemampuan tersebut menjadikan MATLAB/Simulink sebagai salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam penelitian dan pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) [28].

Pada penelitian ini, MATLAB/Simulink digunakan sebagai media simulasi untuk memodelkan sistem PLTS yang terdiri dari panel surya, Boost Converter, baterai LiFePO₄, dan sistem pengendalian MPPT berbasis Fuzzy Logic. Simulasi dilakukan untuk mengetahui karakteristik kinerja sistem pada berbagai kondisi operasi serta membandingkan performa sistem yang menggunakan MPPT dan sistem dengan MPPT P&O.

Proses simulasi pada Simulink dijalankan menggunakan metode penyelesaian persamaan diferensial (*solver*) secara numerik dengan langkah waktu simulasi (*time step*, T_s) tertentu, sehingga keseluruhan variabel dinamis sistem seperti arus induktor, tegangan kapasitor, dan SoC baterai dihitung secara iteratif pada setiap langkah waktu. Pemilihan nilai T_s yang cukup kecil diperlukan agar hasil simulasi dapat merepresentasikan dinamika pensaklaran (*switching*) konverter secara akurat tanpa menyebabkan beban komputasi yang berlebihan.



Gambar 2.10 Software Matlab R2021a

Hasil simulasi yang diperoleh berupa data tegangan, arus, daya, serta efisiensi sistem yang kemudian digunakan sebagai dasar analisis dan pembahasan pada penelitian ini. Dengan menggunakan MATLAB/Simulink, proses pengujian dapat dilakukan secara lebih fleksibel, efisien, dan aman tanpa harus melakukan implementasi langsung pada perangkat keras.