

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jadwal Penelitian

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Bulan															
		Februari				Maret				April				Mei			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Identifikasi Masalah																
2	Studi Literatur																
3	Perancangan dan Pengujian Sistem																
4	Analisis dan evaluasi																
5	Penyusunan Laporan Akhir																

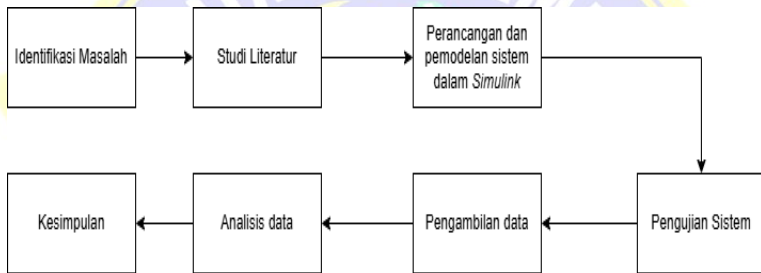
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari - Juni 2026 di Universitas Muhammadiyah Surabaya yang secara geografis berada pada koordinat -7,2602° LS (Lintang Selatan) dan 112,7890° BT (Bujur Timur). Penelitian ini meliputi pengumpulan data cuaca lokal, perancangan dan simulasi sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) berbasis *Fuzzy Logic Controller* (FLC) menggunakan MATLAB/Simulink R2021a, serta analisis hasil simulasi daya keluaran panel surya untuk mengevaluasi kinerja simulasi sistem yang dirancang.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

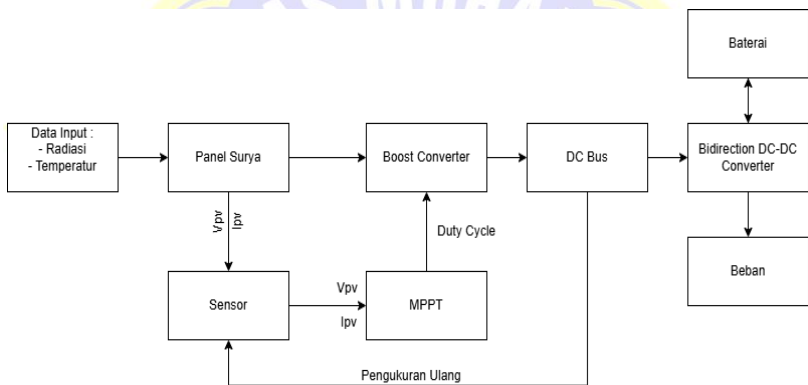
Secara garis besar, alur penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Mengidentifikasi masalah yang ada dalam system MPPT pada PLTS.
2. Melakukan studi literatur mengenai PLTS, MPPT, logika fuzzy, dan penelitian terdahulu yang relevan.
3. Menentukan spesifikasi kebutuhan daya dan merancang sistem PLTS yang sesuai.
4. Merancang skema manajemen pengisian daya berbasis fuzzy serta memilih variabel input dan output.
5. Mengimplementasikan sistem secara software.

6. Melakukan pengujian sistem pada berbagai kondisi iradiasi, temperature, baterai dan beban, serta mengumpulkan data simulasi.
7. Mengolah dan menganalisis data untuk mengevaluasi kinerja sistem.
8. Menyusun kesimpulan dan memberikan saran pengembangan lebih lanjut.

3.4 Perancangan Sistem Pada Matlab/Simulink

Sistem PLTS dalam penelitian ini dirancang menggunakan konfigurasi paralel melalui satu jalur bus DC bersama (*Common DC Bus*). Blok diagram interkoneksi antar komponen elektronika daya ditunjukkan pada Gambar 3.3:



Gambar 3.3 Diagram Blok Perancangan Sistem MPPT

Blok diagram pada Gambar 3.3 menunjukkan alur kerja sistem konversi energi surya yang dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi daya melalui metode *Fuzzy Logic Controller* dan manajemen penyimpanan energi pada baterai. Proses sistem dijelaskan sebagai berikut:

1. Data Input (Radiasi dan Temperatur)

Sistem menerima masukan berupa nilai radiasi matahari (irradiance) dan temperatur lingkungan yang digunakan sebagai parameter operasi panel surya. Besarnya radiasi matahari berpengaruh langsung terhadap arus keluaran panel, sedangkan temperatur mempengaruhi tegangan keluaran panel surya. Kedua parameter tersebut menjadi dasar dalam menentukan karakteristik daya yang dihasilkan oleh panel surya selama proses simulasi.

2. Panel Surya (Photovoltaic)

Panel surya berfungsi sebagai sumber energi utama yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Keluaran panel surya berupa tegangan panel (V_{pv}) dan arus panel (I_{pv}) yang nilainya berubah sesuai kondisi radiasi dan temperatur. Nilai daya inilah yang akan dioptimalkan oleh sistem MPPT agar panel surya selalu bekerja pada titik daya maksimum (Maximum Power Point).

3. Sensor Tegangan dan Arus

Sensor digunakan untuk mengukur tegangan dan arus keluaran panel surya secara real-time. Data hasil pengukuran berupa nilai V_{pv} dan I_{pv} dikirimkan ke kontroler MPPT sebagai masukan untuk menentukan duty cycle yang sesuai pada boost converter. Selain itu, sensor juga menerima sinyal umpan balik (feedback) dari sisi DC Bus untuk memastikan kondisi sistem tetap stabil selama proses pengisian baterai maupun penyediaan daya ke beban.

4. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT berfungsi untuk mencari titik operasi optimal panel surya sehingga daya yang dihasilkan selalu maksimum meskipun terjadi perubahan radiasi maupun temperatur. Berdasarkan nilai V_{pv} dan I_{pv} yang diterima dari sensor, MPPT menghitung duty cycle yang selanjutnya digunakan untuk mengendalikan boost converter. Dengan pengaturan duty cycle tersebut, titik kerja panel surya dapat dipertahankan pada kondisi Maximum Power Point (MPP). Pada penelitian ini algoritma MPPT yang digunakan adalah Fuzzy Logic Controller (FLC) yang memiliki kemampuan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

5. Boost Converter

Boost converter berfungsi sebagai konverter DC-DC penaik tegangan. Tegangan keluaran panel surya yang relatif rendah dinaikkan menjadi tegangan yang sesuai dengan kebutuhan DC Bus. Nilai duty cycle diperoleh dari kontrol MPPT sehingga tegangan keluaran dapat disesuaikan untuk mempertahankan titik daya maksimum panel surya.

6. DC Bus

DC Bus berfungsi sebagai pusat distribusi energi dalam sistem. Energi listrik yang telah ditingkatkan tegangannya oleh boost converter dikumpulkan pada DC Bus sebelum disalurkan menuju beban maupun

baterai melalui bidirectional DC-DC converter. DC Bus juga berperan sebagai titik pengukuran utama untuk menjaga kestabilan tegangan sistem selama proses operasi.

7. Bidirectional DC-DC Converter

Bidirectional DC-DC converter berfungsi mengatur aliran daya dua arah antara baterai dan DC Bus. Kondisi operasinya terdiri dari:

Mode Charging (pengisian baterai)

Mode Discharging (pelepasan energi baterai)

Ketika daya panel surya lebih besar dari kebutuhan beban, energi berlebih akan dialirkan ke baterai untuk proses pengisian. Sebaliknya, ketika daya panel surya tidak mencukupi, baterai akan menyuplai energi ke DC Bus untuk menjaga kontinuitas pasokan daya ke beban.

8. Baterai

Baterai berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik yang dihasilkan panel surya. Energi yang tersimpan dapat digunakan kembali ketika produksi daya panel surya menurun akibat perubahan cuaca atau pada saat kebutuhan beban meningkat.

9. Beban

Beban merupakan komponen yang memanfaatkan energi listrik yang dihasilkan sistem. Energi yang diterima beban dapat berasal langsung dari panel surya melalui DC Bus maupun dari baterai melalui bidirectional DC-DC converter. Keberadaan baterai memungkinkan beban tetap memperoleh suplai daya meskipun terjadi penurunan daya keluaran panel surya.

Alur Kerja Sistem

Secara keseluruhan, sistem bekerja dengan menerima masukan berupa radiasi matahari dan temperatur yang mempengaruhi karakteristik keluaran panel surya. Tegangan dan arus panel surya diukur oleh sensor, kemudian dikirimkan ke kontroler MPPT untuk menentukan duty cycle optimum. Duty cycle tersebut digunakan untuk mengendalikan boost converter sehingga daya maksimum dari panel surya dapat diperoleh. Energi yang telah dikondisikan selanjutnya disalurkan ke DC Bus sebagai pusat distribusi daya. Dari DC Bus, energi dapat digunakan langsung oleh beban atau disimpan ke baterai melalui bidirectional DC-DC converter. Ketika daya

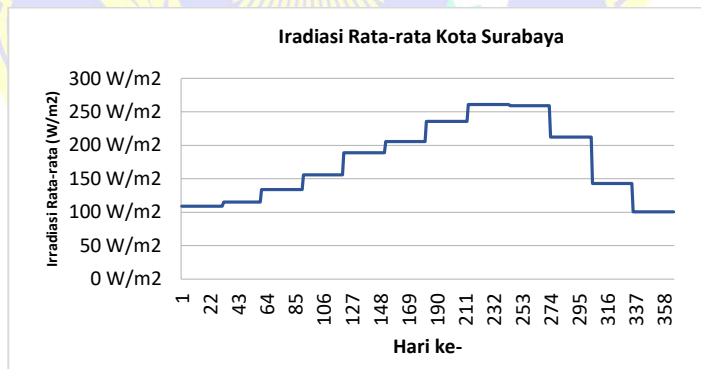
panel surya tidak mencukupi, baterai akan menyuplai energi kembali ke DC Bus sehingga kontinuitas pasokan daya ke beban tetap terjaga. Dengan mekanisme ini, sistem mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi surya dan menjaga kestabilan operasi secara keseluruhan.

3.4.1 Parameter Input Data

Data masukan yang digunakan dalam penelitian ini berupa data iradiasi matahari dan temperatur Kota Surabaya tahun 2025. Data tersebut digunakan sebagai parameter lingkungan yang memengaruhi karakteristik keluaran panel surya. Profil iradiasi dan temperatur dimasukkan ke dalam model simulasi menggunakan blok Signal Builder sehingga perubahan kondisi cuaca dapat direpresentasikan secara dinamis selama proses simulasi berlangsung. Parameter panel surya, boost converter, dan baterai juga ditentukan berdasarkan spesifikasi komponen yang digunakan pada penelitian ini.

1. Data Iradiasi Matahari

Berdasarkan data yang disajikan pada Gambar 3.4 dan Tabel 3.2, grafik profil radiasi matahari harian rata-rata di Kota Surabaya menunjukkan karakteristik pola distribusi yang melengkung simetris, khas bagi wilayah beriklim tropis. Nilai iradiasi mulai terdeteksi pada pukul 06:00 WIB seiring dengan terbitnya matahari dengan nilai awal sebesar $54,4 \text{ W/m}^2$, lalu mengalami kenaikan yang signifikan dari jam ke jam akibat posisi sudut datang matahari yang semakin tegak lurus terhadap permukaan bumi.



Gambar 3.4 Iradiasi Harian Kota Surabaya

Puncak intensitas radiasi harian rata-rata di Kota Surabaya tercatat pada siang hari, tepatnya pada pukul 10:00 WIB dengan nilai tertinggi mencapai 752 W/m^2 , dan relatif stabil di angka $567,5 \text{ W/m}^2$ pada pukul 12:00 WIB. Setelah melewati titik puncak tersebut, nilai iradiasi terpantau menurun secara bertahap seiring bergesernya posisi matahari dan kembali menyentuh angka 0 W/m^2 pada pukul 18:00 WIB seiring terbenamnya matahari. Selama periode malam hari (pukul 18:00 hingga 05:00 WIB), nilai iradiasi tetap konstan di angka 0 W/m^2 karena tidak adanya paparan fluks radiasi matahari yang diterima oleh permukaan bumi

Tabel 3.2 Rata-rata iradiasi Kota Surabaya

No	Bulan	Jumlah Hari	G Min (W/m^2)	G Maks (W/m^2)	G Rata-rata (W/m^2)
1	Januari	31	0,00	353	109,04
2	Februari	28	0,00	368	115,08
3	Maret	31	0,00	446	133,87
4	April	30	0,00	526	156,04
5	Mei	31	0,00	601	188,62
6	Juni	30	0,00	618	205,58
7	Juli	31	0,00	685	235,79
8	Agustus	31	0,00	752	260,95
9	September	30	0,00	745	259,37
10	Oktober	31	0,00	650	212,25
11	November	30	0,00	489	143,08
12	Desember	31	0,00	347	100,54

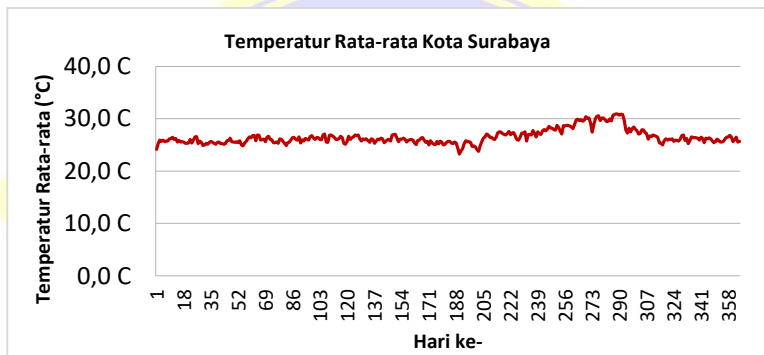
Gambar 3.4 menunjukkan profil iradiasi harian Kota Surabaya yang diperoleh dari Global Solar Atlas, sedangkan ringkasan statistik bulanan disajikan pada Tabel 3.2. Data ini selanjutnya digunakan sebagai parameter input untuk menentukan daya keluaran dan energi listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS pada simulasi.

2. Data Temperatur

Profil temperatur harian rata-rata Kota Surabaya menunjukkan kecenderungan yang berkorelasi erat dengan fluktuasi intensitas iradiasi matahari. Berdasarkan Gambar 3.6 dan Tabel 3.3, pada waktu dini hari hingga menjelang pagi (pukul 00:00 sampai 05:00 WIB), suhu lingkungan berada pada kondisi minimum yang relatif stabil di rentang angka $24,8^\circ\text{C}$ hingga $25,2^\circ\text{C}$.

Suhu udara mulai merangkak naik sejak pukul 06:00 WIB (mencapai $27,3^\circ\text{C}$) akibat radiasi matahari yang mulai memanaskan permukaan bumi

dan atmosfer sekitarnya. Karakteristik yang menarik terlihat pada waktu terjadinya puncak temperatur harian. Suhu tertinggi tidak terjadi bersamaan dengan puncak iradiasi harian (pukul 11:00 WIB), melainkan mengalami pergeseran waktu (*time lag*) selama satu jam. Kenaikan suhu maksimal rata-rata tercatat terjadi pada pukul 12:00 WIB dengan nilai mencapai 34,9°C, dan bertahan di kisaran 34,4°C hingga 34,7°C hingga pukul 15:00 WIB. Fenomena penundaan ini wajar terjadi karena permukaan bumi membutuhkan waktu luang untuk menyerap dan mengakumulasi panas sebelum dilepaskan kembali ke udara. Memasuki sore hingga malam hari (setelah pukul 16:00 WIB), temperatur lingkungan perlahan-lahan menurun secara gradual hingga kembali ke angka 27,1°C pada pukul 23:00 WIB.



Gambar 3.5 Temperatur Harian Kota Surabaya

Tabel 3.3 Temperatur Rata-rata Kota Surabaya

No	Bulan	Jumlah Hari	T Min (°C)	T Maks (°C)	T Rata-rata (°C)
1	Januari	31	22,48	30,11	25,68
2	Februari	28	22,15	30,19	25,52
3	Maret	31	22,72	30,61	26,02
4	April	30	21,38	30,57	26,17
5	Mei	31	23,1	30,89	26,17
6	Juni	30	21,48	30,03	25,68
7	Juli	31	18,85	32,03	25,36
8	Agustus	31	20,3	34,87	27,05
9	September	30	21,74	37,44	28,76
10	Oktober	31	23,72	38,23	29,32

11	November	30	22,46	31,44	26,22
12	Desember	31	21,72	30,64	26,07

Temperatur Lingkungan dan Temperatur Sel Perlu ditegaskan bahwa data pada Tabel 3.3 di atas merupakan *temperatur lingkungan/udara ambient* (T_a) hasil pengukuran satelit NASA POWER pada ketinggian 2 meter di atas permukaan tanah, bukan temperatur permukaan sel surya secara langsung Sebagaimana telah dijelaskan pada Subbab 2.2.1 poin 2, temperatur yang secara langsung memengaruhi karakteristik elektrik panel surya (khususnya tegangan Voc pada Persamaan 2.5) adalah temperatur permukaan sel (T_{cell}), yang selalu lebih tinggi daripada T_a akibat konversi sebagian energi radiasi matahari menjadi panas pada permukaan panel.

Nilai T_{cell} dihitung menggunakan parameter Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) sesuai persamaan pada Subbab 2.2.1:

dengan $NOCT = 45^{\circ}\text{C}$ (sesuai spesifikasi datasheet panel surya yang digunakan, Tabel 3.5) dan G adalah iradiasi matahari pada saat yang bersamaan (W/m^2 , Tabel 3.2), sehingga koefisien $(NOCT - 20)/800 = (45 - 20)/800 = 0,03125$.

Perhitungan (bulan Agustus, kondisi rata-rata):

$$T_{cell} = 27,05 + (0,03125 \times 260,95)$$

$$T_{cell} = 27,05 + 8,15$$

$$T_{cell} = 35,20^{\circ}\text{C}$$

3. Karakteristik Data Cuaca

Tabel 3.4 Statistik Data Cuaca

Parameter	Nilai
Iradiasi Maksimum	752 W/m^2
Iradiasi Minimum	0,0 W/m^2
Iradiasi Rata-rata	176,68 W/m^2
Temperatur Maksimum	38,23 $^{\circ}\text{C}$
Temperatur Minimum	18,85 $^{\circ}\text{C}$
Temperatur Rata-rata	26,5 $^{\circ}\text{C}$

Karakteristik cuaca pada lokasi penelitian ditentukan oleh dua parameter utama, yaitu iradiasi matahari dan temperatur lingkungan. Kedua

parameter tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa sistem Photovoltaic (PV).

Peningkatan iradiasi matahari akan meningkatkan arus keluaran panel surya sehingga daya yang dihasilkan juga meningkat. Sebaliknya, kenaikan temperatur menyebabkan penurunan tegangan keluaran panel surya akibat berkurangnya tegangan rangkaian terbuka (open-circuit voltage). Kondisi tersebut dapat menurunkan efisiensi dan daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh sistem PV.

Oleh karena itu, kombinasi data iradiasi dan temperatur digunakan sebagai masukan simulasi untuk menggambarkan kondisi operasi sistem secara lebih realistis. Ringkasan statistik data cuaca yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.4

3.4.2 Perancangan Panel Surya

Panel surya merupakan komponen utama yang berfungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik. Besarnya energi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama intensitas iradiasi matahari dan temperatur sel surya. Pada penelitian ini, panel surya dimodelkan menggunakan blok Photovoltaic Array pada MATLAB/Simulink dengan parameter yang ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Karakteristik keluaran panel surya dinyatakan dalam bentuk tegangan (*voltage*) dan arus (*current*) yang berubah sesuai kondisi operasi. Besarnya daya keluaran panel surya diperoleh dari hasil perkalian antara tegangan dan arus keluaran panel, yang dapat dinyatakan sebagai dalam persamaan (2.2). Pada kondisi tertentu, panel surya memiliki satu titik operasi yang menghasilkan daya maksimum atau *Maximum Power Point* (MPP). Daya maksimum tersebut dapat dinyatakan pada persamaan (2.3).

Dalam penelitian ini, daya maksimum panel surya dimanfaatkan secara optimal menggunakan metode MPPT Fuzzy Logic yang mengatur duty cycle Boost Converter sehingga panel surya dapat beroperasi mendekati titik daya maksimum meskipun terjadi perubahan iradiasi dan temperatur. Model panel surya yang digunakan selanjutnya menjadi sumber masukan utama bagi sistem konverter DC-DC dan pengisian baterai LiFePO4 pada simulasi MATLAB/Simulink.

Tabel 3.5 Parameter Panel Surya

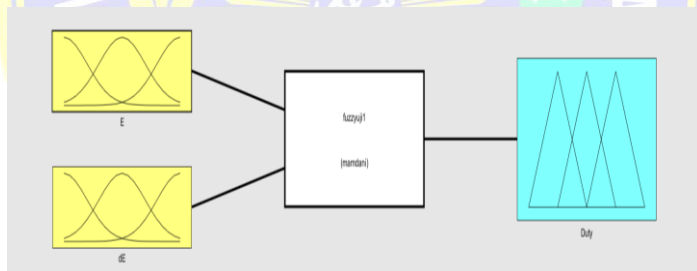
No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	Daya Per Modul	500	Wp

2	Tegangan MPP (V_{mp})	41	V
3	Arus MPP (I_{mp})	12.2	A
4	Tegangan Open Circuit (V_{oc})	49	V
5	Arus Short Circuit (I_{sc})	13.2	A
6	Total Daya Panel	1500	W _p

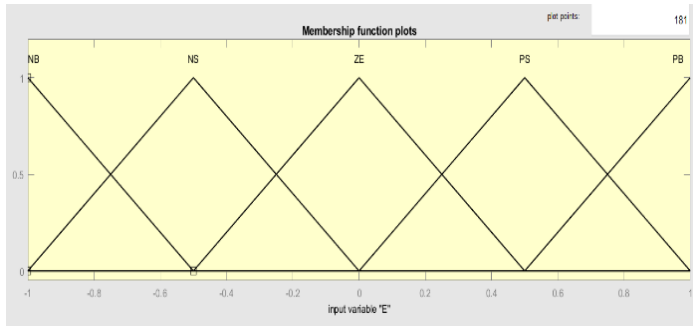
Array panel surya yang digunakan terdiri dari beberapa panel monocrystalline masing-masing berkapasitas 500 Wp dengan konfigurasi 1 seri dan 3 paralel (1S×3P). Parameter utama panel surya pada kondisi Standard Test Condition (STC) disajikan pada Tabel 3.5.

3.4.3 Perancangan Algoritma MPPT Fuzzy Logic Controller

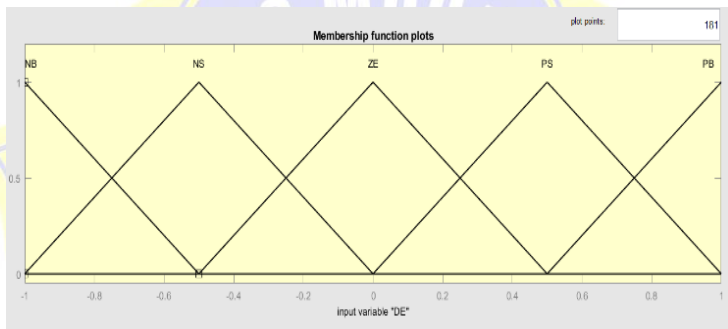
Blok *Fuzzy Logic Controller* dibangun menggunakan arsitektur Mamdani untuk memproses algoritma optimasi daya. Blok FLC dirancang secara sistematis dengan melibatkan dua parameter masukan berupa *Error* (E) dan *Delta Error* (Delta E), yang kemudian dipetakan menjadi sebuah parameter keluaran tunggal berbentuk nilai perubahan *Duty Cycle*. Struktur umum dari algoritma kontrol kecerdasan buatan ini ditunjukkan pada Gambar 3.6:



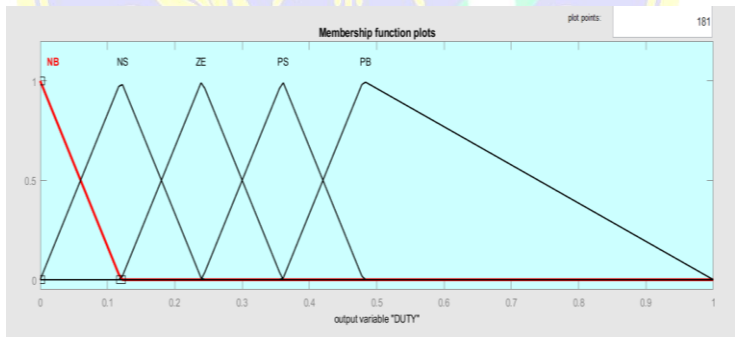
Gambar 3.6 Perancangan Algoritma Fuzzy



Gambar 3.7 Membership Function E



Gambar 3.8 Membership Function dE



Gambar 3.9 Membership Function Duty Cycle

Proses fuzzifikasi dilakukan dengan memetakan nilai tegas (*crisp*) input ke dalam himpunan fuzzy menggunakan fungsi keanggotaan (*membership function*). Gambar 3.7 dan Gambar 3.8 menyajikan pembagian kurva keanggotaan untuk masing-masing variabel input.

Himpunan fuzzy untuk kedua variabel input tersebut dibagi ke dalam 5 klasifikasi linguistik, yaitu: *Negative Big* (NB), *Negative Small* (NS), *Zero* (Z), *Positive Small* (PS), dan *Positive Big* (PB). Nilai keanggotaan ini kemudian dicocokkan dengan daerah *output* dari fungsi keanggotaan *Duty Cycle* yang digambarkan pada Gambar 3.11 berikut:

Tabel 3.6 Rule Base Fuzzy Logic MPPT (25 Aturan)

dE \ E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NS	ZE	PS	PB
NS	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	PS	PS	ZE	NS	NS
PB	PB	PS	ZE	NS	NB

Pengambilan keputusan inferensi didasarkan pada kombinasi aturan logika (*rule base*) yang dirancang untuk menggeser operasi PV menuju titik daya maksimum secepat mungkin tanpa menimbulkan osilasi yang besar. Matriks aturan keputusan fuzzy tersebut dirangkum lengkap pada Tabel 3.6.

3.4.3.1 Perhitungan dan Justifikasi Pemilihan Membership Function

Bentuk fungsi keanggotaan (*membership function*) yang digunakan pada seluruh variabel fuzzy, baik masukan *Error* (E) dan *Delta Error* (ΔE), maupun keluaran *Duty Cycle*, adalah fungsi segitiga (*triangular, trimf*) sesuai persamaan umum yang telah dijelaskan pada Subbab 2.2.3.4. Pemilihan bentuk segitiga ini didasarkan pada tiga pertimbangan utama:

1) *Beban komputasi rendah* fungsi segitiga hanya melibatkan operasi linear (perkalian dan penjumlahan sederhana) sehingga sesuai untuk dieksekusi berulang pada waktu cuplik (*sample time*) 10 μs yang digunakan pada blok

Zero Order Hold sebelum sinyal V_{pv} dan I_{pv} masuk ke *MATLAB Function* (Stateflow) penghitung E dan ΔE .

2) *Kemudahan interpretasi dan tuning* transisi keanggotaan yang linear memudahkan pemetaan istilah linguistik (“error kecil”, “error besar”) dan mempercepat proses *tuning* manual melalui *Fuzzy Logic Toolbox* MATLAB (FIS “ujifuzzy”).

3) *Kompromi akurasi dan kompleksitas* dibandingkan bentuk Gaussian atau trapesium yang membutuhkan parameter tambahan dan beban komputasi lebih besar, fungsi segitiga tetap memberikan akurasi pemetaan yang memadai untuk aplikasi MPPT dengan struktur yang paling sederhana (hanya 3 parameter per himpunan: batas kiri, puncak, batas kanan).

Setiap variabel fuzzy dipartisi menjadi 5 himpunan linguistik, yaitu *Negative Big* (NB), *Negative Small* (NS), *Zero* (ZE), *Positive Small* (PS), dan *Positive Big* (PB). Pemilihan jumlah 5 klasifikasi merupakan titik keseimbangan antara resolusi kendali dan kompleksitas basis aturan: partisi 5×5 menghasilkan 25 aturan (Tabel 3.6) yang masih mudah dirancang dan divalidasi secara manual, sedangkan partisi 7 level akan menghasilkan 49 aturan yang meningkatkan beban komputasi Stateflow tanpa peningkatan akurasi tracking yang signifikan, sementara partisi 3 level (NB, ZE, PB) dinilai terlalu kasar sehingga berpotensi menimbulkan osilasi besar di sekitar titik daya maksimum.

Tabel 3.7 Parameter Fungsi Keanggotaan (E) dan (ΔE)

Himpunan	Parameter trimf [a, b, c]	Titik puncak (b)	Universe of discourse
NB	[-1 ; -1 ; -0,5]	-1	[-1 , 1]
NS	[-1 ; -0,5 ; 0]	-0,5	[-1 , 1]
ZE	[-0,5 ; 0 ; 0,5]	0	[-1 , 1]
PS	[0 ; 0,5 ; 1]	0,5	[-1 , 1]
PB	[0,5 ; 1 ; 1]	1	[-1 , 1]

Nilai parameter di atas terbaca langsung dari FIS Editor MATLAB pada Gambar 3.7 dan Gambar 3.8, dengan kelima himpunan tersebar merata (jarak antar-puncak 0,5) sehingga tingkat sensitivitas terhadap perubahan nilai positif maupun negatif bersifat simetris.

Universe of discourse variabel E dan ΔE ditetapkan pada rentang ternormalisasi $[-1, 1]$. Nilai mentah $E(k) = P(k) - P(k-1)$ dan $\Delta E(k) = E(k) - E(k-1)$ (Persamaan 2.28 dan 2.29) memiliki satuan watt dan besarnya bergantung pada kapasitas total array PV (1500 Wp, Tabel 3.5), sehingga tidak praktis dijadikan langsung sebagai *universe of discourse* fuzzy. Oleh karena itu, sinyal E dan ΔE terlebih dahulu diskalakan melalui blok *Gain* sebesar 1/100 (untuk E) dan 1/50 (untuk ΔE) sebelum masuk ke *Fuzzy Logic Controller*, sehingga batas ± 1 pada *universe of discourse* merepresentasikan batas perubahan daya sebesar ± 100 W untuk E dan ± 50 W untuk ΔE antar-sampling. Rentang ini dipilih agar mencakup kondisi transien iradiasi yang cukup besar (misalnya akibat pergerakan awan) tanpa membuat sinyal masukan fuzzy terlalu sering “mentok” di ujung *universe of discourse*, sekaligus menjaga basis aturan tetap independen terhadap kapasitas absolut panel surya, sehingga FIS ini berpotensi digunakan ulang pada kapasitas array yang berbeda.

Berbeda dari variabel masukan yang dipartisi simetris, variabel keluaran *Duty Cycle* dipartisi secara tidak seragam (*non-uniform*) pada rentang $[0, 1]$ sesuai definisi fisis rasio *duty cycle* PWM (0–100%), sebagaimana terbaca pada Gambar 3.9. Empat himpunan pertama (NB, NS, ZE, PS) diberi lebar basis sempit dan seragam sebesar 0,12 sehingga menempati rentang 0–0,48, sedangkan himpunan PB diberi basis yang jauh lebih lebar (0,36–1).

Tabel 3.8 Parameter Fungsi Keanggotaan *Duty Cycle*

Himpunan	Parameter trimf [a, b, c]	Titik puncak (b)	Universe of discourse
NB	[0 ; 0 ; 0,12]	0	[0 , 1]
NS	[0 ; 0,12 ; 0,24]	0,12	[0 , 1]
ZE	[0,12 ; 0,24 ; 0,36]	0,24	[0 , 1]
PS	[0,24 ; 0,36 ; 0,48]	0,36	[0 , 1]
PB	[0,36 ; 0,48 ; 1]	0,48	[0 , 1]

Penyusunan tidak seragam ini bukan tanpa alasan. Berdasarkan perhitungan *duty cycle* nominal Boost Converter pada Subbab 3.4.4 (Tabel 3.8), diperoleh:

$$D = 1 - (V_{in} / V_{out})$$

$$D = 1 - (41 / 54)$$

$$D = 0,24 \text{ atau } 24\%$$

Nilai $D = 0,24$ tersebut secara eksak berada tepat pada titik puncak himpunan *Zero Error* (ZE) pada Tabel 3.8. Dengan kata lain, resolusi terhalus dari fungsi keanggotaan keluaran sengaja dipusatkan di sekitar titik kerja nominal boost converter, sehingga FLC memiliki presisi koreksi *duty cycle* yang tinggi ketika sistem berada di sekitar kondisi tunak (*steady-state*) tempat sistem paling sering beroperasi sementara himpunan PB yang lebar tetap menyediakan ruang koreksi besar dan cepat saat terjadi perubahan iradiasi mendadak yang membutuhkan pergeseran *duty cycle* signifikan, tanpa perlu menambah jumlah himpunan maupun jumlah aturan. Pendekatan pembagian non-uniform ini merupakan praktik umum pada perancangan FLC untuk menyeimbangkan kehalusan respons (mengurangi *chattering*) dengan kecepatan tanggap sistem.

3.4.3.2 Perhitungan Numerik Fuzzifikasi hingga Defuzzifikasi

Untuk mengilustrasikan penerapan parameter membership function pada Tabel 3.6a dan Tabel 3.6b, berikut diberikan satu contoh perhitungan manual menggunakan tiga sampel daya panel surya berurutan $P(k-2)$, $P(k-1)$, dan $P(k)$:

$$P(k-2) = 1150 \text{ W}; \quad P(k-1) = 1180 \text{ W}; \quad P(k) = 1225 \text{ W}$$

a. Perhitungan Error dan Delta Error (Persamaan 2.28 dan 2.29)

$$E(k) = P(k) - P(k-1)$$

$$E(k) = 1225 - 1180$$

$$E(k) = 45 \text{ W}$$

$$E(k-1) = P(k-1) - P(k-2)$$

$$E(k-1) = 1180 - 1150$$

$$E(k-1) = 30 \text{ W}$$

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

$$\Delta E(k) = 45 - 30$$

$$\Delta E(k) = 15 \text{ W}$$

b. Normalisasi ke Universe of Discourse [-1, 1]

$$Enorm = E(k) \times (1/100)$$

$$Enorm = 45 \times 0,01$$

$$Enorm = 0,45$$

$$\Delta Enorm = \Delta E(k) \times (1/50)$$

$$\Delta Enorm = 15 \times 0,02$$

$$\Delta Enorm = 0,30$$

c. Fuzzifikasi

Nilai $Enorm = 0,45$ dan $\Delta Enorm = 0,30$ dipetakan ke fungsi keanggotaan pada Tabel 3.6a menggunakan persamaan segitiga umum yang telah didefinisikan pada Subbab 2.2.3.4. Kedua nilai berada pada daerah tumpang tindih (overlap) antara himpunan ZE dan PS:

$$\mu_{ZE}(0,45) = (0,5 - 0,45) / (0,5 - 0) = 0,10$$

$$\mu_{PS}(0,45) = (0,45 - 0) / (0,5 - 0) = 0,90$$

$$\mu_{ZE}(0,30) = (0,5 - 0,30) / (0,5 - 0) = 0,40$$

$$\mu_{PS}(0,30) = (0,30 - 0) / (0,5 - 0) = 0,60$$

d. Inferensi

Karena hanya himpunan ZE dan PS pada kedua variabel yang memiliki derajat keanggotaan tak-nol, terdapat 4 aturan aktif dari 25 aturan pada Tabel 3.6. Kekuatan penyulutan (*firing strength*) tiap aturan dihitung menggunakan operator minimum (Persamaan 2.24):

Tabel 3.9 Inferensi Fuzzy ZE dan PS

No	Aturan (JIKA-MAKA)	μE	$\mu \Delta E$	Output	Firing strength = $\min(\mu E, \mu \Delta E)$
1	JIKA E=ZE DAN ΔE =ZE MAKA ΔD =ZE	0,10	0,40	ZE	0,10
2	JIKA E=PS DAN ΔE =ZE MAKA ΔD =ZE	0,90	0,40	ZE	0,40

3	JIKA E=ZE DAN ΔE=PS MAKA ΔD=ZE	0,10	0,60	ZE	0,10
4	JIKA E=PS DAN ΔE=PS MAKA ΔD=NS	0,90	0,60	NS	0,60

Hasil keempat aturan kemudian diagregasi per himpunan output menggunakan operator maksimum (Persamaan 2.25):

$$\mu_{ZE,agregat} = \max(0,10 ; 0,40 ; 0,10)$$

$$\mu_{ZE,agregat} = 0,40$$

$$\mu_{NS,agregat} = \max(0,60)$$

$$\mu_{NS,agregat} = 0,60$$

e. Defuzzifikasi (Center of Gravity / Weighted Average, Persamaan 2.27)

Dengan menggunakan titik puncak (representative crisp value) tiap himpunan output pada Tabel 3.8, yaitu zZE = 0,24 dan zNS = 0,12, nilai ΔD hasil defuzzifikasi diperoleh sebagai:

$$\Delta D = (\mu_{ZE} \cdot z_{ZE} + \mu_{NS} \cdot z_{NS}) / (\mu_{ZE} + \mu_{NS})$$

$$\Delta D = (0,40 \times 0,24 + 0,60 \times 0,12) / (0,40 + 0,60)$$

$$\Delta D = (0,096 + 0,072) / 1,0$$

$$\Delta D = 0,168$$

f. Pembaruan Duty Cycle (Persamaan 2.30)

Dengan mengasumsikan duty cycle sebelumnya berada pada titik operasi nominal hasil perancangan boost converter, $D(k-1) = 0,24$ (Subbab 3.4.4), maka duty cycle baru menjadi:

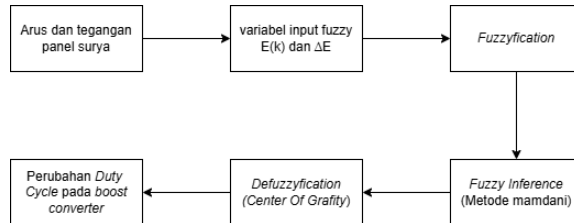
$$D(k) = D(k-1) + \Delta D(k)$$

$$D(k) = 0,24 + 0,168$$

$$D(k) = 0,408$$

Perlu dicatat bahwa contoh di atas menggunakan selisih daya yang relatif besar ($\Delta P = 45$ W) agar proses fuzzifikasi-inferensi-defuzzifikasi mudah diikuti secara manual. Pada simulasi aktual, waktu cuplik pembacaan Vpv dan Ipv adalah 10 μs (Zero-Order Hold), sehingga ΔP antar-sampel pada kondisi normal jauh lebih kecil dan nilai ΔD yang dihasilkan tiap iterasi juga

jauh lebih halus. Duty cycle akhir kemudian bergerak secara bertahap (bukan melompat) menuju titik kerja baru, sesuai prinsip kerja adaptif FLC yang menjadi salah satu keunggulannya dibandingkan metode P&O konvensional dengan ΔD tetap, sebagaimana telah dijelaskan pada Subbab 2.2.3.1.



Gambar 3.10 Diagram Blok Algoritma FLC

Diagram blok pada gambar menunjukkan alur kerja algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT) berbasis Fuzzy Logic Controller (FLC) yang digunakan untuk mengatur duty cycle pada boost converter agar panel surya selalu bekerja pada titik daya maksimum (Maximum Power Point). Sistem ini bekerja dengan membaca parameter keluaran panel surya, kemudian diproses menggunakan logika fuzzy untuk menentukan perubahan duty cycle secara adaptif terhadap perubahan kondisi iradiasi dan temperatur.

1. Arus dan Tegangan Panel Surya

Tahap pertama pada algoritma FLC adalah pembacaan parameter keluaran panel surya berupa arus (I) dan tegangan (V). Kedua parameter ini digunakan untuk menghitung daya keluaran panel surya. Hubungan daya panel surya diperoleh melalui persamaan (2.2).

Nilai arus dan tegangan ini diperoleh secara real-time dari model panel surya pada MATLAB/Simulink. Perubahan nilai tersebut dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti intensitas cahaya matahari dan temperatur panel.

2. Variabel Input Fuzzy

Setelah daya dihitung, sistem akan menentukan dua variabel input fuzzy yaitu Error $E(k)$ dan perubahan error $\Delta E(k)$. Kedua parameter ini digunakan untuk mengetahui arah perubahan titik operasi panel surya terhadap titik daya maksimum.

3. Fuzzification

Tahap fuzzification merupakan proses mengubah nilai numerik dari error dan delta error menjadi nilai linguistik fuzzy. Pada tahap ini, nilai input crisp akan dipetakan ke dalam membership function. Setiap kategori direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga atau trapesium. Proses ini memungkinkan sistem fuzzy memahami kondisi sistem secara linguistik seperti “error kecil”, “error besar”, atau “perubahan cepat”.

Keuntungan fuzzification adalah sistem dapat tetap bekerja meskipun terdapat ketidakpastian atau fluktuasi pada sinyal panel surya.

4. Fuzzy Inference Engine

Tahap fuzzy inference merupakan inti dari sistem FLC. Pada bagian ini dilakukan proses pengambilan keputusan berdasarkan rule base fuzzy yang telah dirancang dalam aturan “JIKA”-“MAKA”.

Proses inference menentukan respons sistem terhadap perubahan kondisi panel surya. Hasil dari tahap ini berupa nilai fuzzy output yang merepresentasikan perubahan duty cycle boost converter.

5. Defuzzification (Center of Gravity)

Keluaran dari fuzzy inference masih berupa nilai fuzzy sehingga perlu diubah menjadi nilai numerik (crisp output). Proses ini disebut defuzzification. Metode yang digunakan pada diagram adalah metode Center of Gravity (COG) atau centroid. Metode ini menghitung titik pusat area fuzzy output sehingga menghasilkan nilai duty cycle yang halus dan stabil. Persamaan metode centroid pada persamaan (2.27)

6. Perubahan Duty Cycle pada Boost Converter

Nilai output hasil defuzzifikasi digunakan untuk mengatur duty cycle PWM pada boost converter. Perubahan duty cycle akan mempengaruhi tegangan keluaran converter sehingga titik operasi panel surya dapat digeser menuju Maximum Power Point. Hubungan duty cycle boost converter dapat dilihat pada persamaan (2.9).

3.4.4 Perancangan Boost Converter

Boost converter merupakan rangkaian DC-DC converter yang digunakan untuk menaikkan tegangan keluaran panel surya agar sesuai dengan kebutuhan sistem. Pada penelitian ini, boost converter berfungsi sebagai

penghubung antara panel surya dengan baterai dan beban sehingga daya keluaran dapat dioptimalkan menggunakan metode (MPPT) berbasis Fuzzy Logic Controller (FLC). Tegangan keluaran panel surya yang berubah-ubah akibat perubahan iradiasi dan temperatur menyebabkan perlunya pengaturan tegangan secara otomatis agar sistem tetap bekerja pada titik daya maksimum. Pengaturan tersebut dilakukan dengan mengendalikan duty cycle PWM pada mosfet switching boost converter.

Prinsip kerja boost converter terdiri dari dua kondisi, yaitu switch ON dan switch OFF. Pada saat switch ON, mosfet aktif sehingga arus mengalir menuju induktor dan energi disimpan dalam bentuk medan magnet, sedangkan dioda berada pada kondisi reverse bias. Ketika switch OFF, energi yang tersimpan pada induktor dilepaskan menuju kapasitor dan beban melalui dioda sehingga menghasilkan tegangan output yang lebih tinggi dibandingkan tegangan input. Besarnya tegangan output dipengaruhi oleh duty cycle dengan persamaan (2.9).

Boost converter pada simulasi MATLAB/Simulink R2021a terdiri dari beberapa komponen utama yaitu induktor, mosfet, dioda, kapasitor, dan beban. Induktor digunakan untuk menyimpan energi, mosfet berfungsi sebagai switching elektronik yang dikontrol PWM, dioda berfungsi mencegah arus balik, sedangkan kapasitor digunakan untuk mereduksi ripple tegangan output. Duty cycle diperoleh dari keluaran fuzzy logic controller berdasarkan nilai error dan delta error hasil perhitungan MPPT. Output boost converter kemudian dianalisis berdasarkan parameter tegangan output, arus output, ripple tegangan, kestabilan sistem, dan efisiensi converter untuk mengetahui performa sistem dalam mempertahankan titik daya maksimum panel surya.

Boost Converter dirancang dengan frekuensi switching 20 kHz. Nilai komponen L dan C dihitung berdasarkan tegangan input dari panel surya ($V_{mp} = 41 \text{ V}$) dan tegangan output nominal ($V_{out} = 54 \text{ V}$ sesuai tegangan bulk baterai 48V LiFePO4).

Untuk memastikan sistem bekerja pada mode Continuous Conduction Mode (CCM), nilai Duty Cycle awal dihitung terlebih dahulu:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

$$D = 1 - \frac{41}{54}$$

$$D = 0,24 \text{ atau } 24\%$$

Perhitungan nilai Induktansi minimum (L_{min}) menggunakan Persamaan (2.5) dengan asumsi ripple arus (ΔI_L) sebesar 20% dari arus input rata-rata

$$I_{in} = 36,6 \text{ A},$$

$$\Delta I_L = 7,32 \text{ A}$$

$$L_{min} = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_s}$$

$$L_{min} = \frac{41 \cdot 0,24}{7,32 \cdot 20000}$$

$$L_{min} = 67,2 \mu\text{H}$$

Untuk menjamin stabilitas sistem dan meminimalkan ripple arus secara absolut, nilai induktansi yang dipilih dibuat jauh lebih besar dari perhitungan minimum, yaitu $L = 1,2 \text{ mH}$.

Perhitungan nilai Kapasitor minimum (C_{min}) menggunakan Persamaan (2.11) dengan asumsi ripple tegangan (ΔV_{out}) sebesar 1% dari tegangan output (0,54 V):

$$C_{min} = \frac{I_{out} \cdot D}{\Delta V_{out} \cdot f_s}$$

$$C_{min} = \frac{27,7 \cdot 0,24}{0,54 \cdot 20000}$$

$$C_{min} = 615 \mu\text{F}$$

Tabel 3.10 Parameter Boost Converter

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1.	Tegangan Output (Vout) Target	54	V
2.	Frekuensi Switching (fsw)	20	kHz
3.	Induktansi (L)	1.2	mH

4.	Kapasitor Output (Cout)	1000	μF
----	-------------------------	------	---------------

3.4.5 Perancangan Parameter Sistem Penyimpanan Energi

Sistem penyimpanan energi (*energy storage system*) dalam pemodelan PLTS skala kecil ini menggunakan baterai jenis *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO₄). Pemilihan jenis baterai ini didasarkan pada karakteristik teknisnya yang memiliki efisiensi pengisian daya yang tinggi, tingkat kedalaman pengosongan (*Depth of Discharge/DoD*) yang besar, serta *cycle life* yang jauh lebih panjang dibandingkan baterai konvensional jenis *lead-acid*. Di dalam model Simulink, komponen baterai dikonfigurasi pada tegangan nominal sistem sebesar 48V dengan kapasitas arus total sebesar 200Ah. Untuk menghitung total kapasitas energi teoritis (Ebat) yang mampu disimpan di dalam sistem penyimpanan ini, digunakan pendekatan persamaan matematis pada persamaan (2.46):

Berdasarkan parameter perencanaan tersebut, total akumulasi daya tampung energi bersih pada sistem penyimpanan dirancang sebesar:

$$E_{bat} = 48V \times 200 \text{ Ah}$$

$$E_{bat} = 9.600 \text{ Wh}$$

$$E_{bat} = 9,6 \text{ kWh}$$

Tabel 3.11 Parameter Baterai 48V/200Ah

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	Tegangan Nominal Sistem	48	V
2	Kapasitas	200	Ah
4	Tegangan Bulk Charge	56,8	V
5	Tegangan Float	54.4	V
6	Tegangan Cut-off Discharge	53.2	V
7	DOD Maksimum	90	%

8	DOD Minimum	20	%
---	-------------	----	---

Dalam implementasi *software* MATLAB/Simulink, blok baterai dimodelkan secara dinamis menggunakan parameter *State of Charge* (SoC) sebagai indikator utama untuk memantau persentase pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*). Blok ini akan menerima suplai arus searah hasil konversi dari *Boost Converter* yang regulasi tegangannya telah dioptimalkan secara adaptif oleh *Fuzzy Logic Controller* (FLC) guna mencegah kondisi *overcharging*. Sistem penyimpanan energi menggunakan baterai dengan kapasitas 200 Ah pada tegangan nominal 48 V. Parameter baterai disajikan pada Tabel 3.8.

3.4.6 Perancangan Parameter Beban Elektrik

Beban elektrik pada penelitian analisis ini direpresentasikan sebagai beban resistif murni (Rbeban) yang terhubung secara paralel pada jalur *Common DC Bus* bersama dengan terminal baterai dan sisi keluaran *Boost Converter*. Penentuan nilai parameter resistansi beban disesuaikan dengan target konsumsi daya nominal, yaitu sebesar 450Watt pada tegangan kerja sistem 48VDC. Nilai resistansi spesifik dari beban tersebut dihitung secara matematis menggunakan hukum Ohm dan formulasi daya elektrik dalam persamaan (2.4)

Dengan mensubstitusikan nilai parameter perencanaan sistem ke dalam rumus tersebut, maka diperoleh nilai resistansi beban sebesar:

$$R_{beban} = \frac{48^2}{450} = 5,12 \, \Omega$$

Arus nominal (Ibeban) yang ditarik oleh beban resistif konstan ini dari sistem pada kondisi tegangan mantap (*steady-state*) dinyatakan melalui persamaan:

$$I_{beban} = \frac{P_{nominal}}{V_{bus}}$$

$$I_{beban} = \frac{450}{48}$$

$$I_{beban} = 3,125 \text{ A}$$

Model beban resistif murni senilai 5,12 ohm ini akan disimulasikan secara kontinu sepanjang pengujian untuk menganalisis keandalan dan stabilitas distribusi daya dari panel surya (1500Wp) maupun baterai dalam mempertahankan level tegangan bus tetap berada pada batasan aman 48V di tengah fluktuasi cuaca ekstrem.

3.4.7 Spesifikasi Profil Beban

Penelitian ini menggunakan profil beban 24 jam yang merepresentasikan siklus penggunaan listrik harian dengan lima fase utama. Fokus utama desain adalah memastikan beban resistif mampu mensimulasikan dinamika daya berikut:

Tabel 3.12 Spesifikasi Profil Beban

Rentang Waktu	Fase Beban	Target Daya (Ptarget)	Karakteristik Beban
00:00–05:00	Dini Hari	60–75 W	Baseload (R tinggi)
06:00–08:00	Pagi	219 W	Puncak lokal
09:00–16:00	Siang	110–130 W	Beban stabil
17:00–21:00	Sore–Malam	420 W	Peak demand (R rendah)
22:00–23:00	Malam	90–140 W	Penurunan beban

Implementasi dilakukan dengan menyesuaikan nilai resistansi (R) untuk mencapai target daya. Penentuan Resistansi:

3.5 Skenario Jalannya Simulasi dan Analisis Performa Tahunan

1. Pengujian MPPT Fuzzy Logic terhadap Perubahan Iradiasi

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan MPPT Fuzzy Logic dalam melacak titik daya maksimum (Maximum Power Point) saat terjadi perubahan iradiasi matahari. Pada pengujian ini, temperatur panel surya dijaga konstan sebesar 25°C, sedangkan nilai iradiasi divariasikan menggunakan Signal Builder pada MATLAB/Simulink. Parameter yang diamati meliputi tegangan panel surya (Vpv), arus panel surya (Ipv), daya keluaran (Ppv), dan duty cycle. Hasil pengujian digunakan untuk menganalisis respons dan stabilitas MPPT terhadap perubahan kondisi lingkungan.

2. Pengujian Perbandingan Sistem Dengan MPPT P&O dan Dengan MPPT

Pengujian ini dilakukan untuk membandingkan kinerja sistem PLTS yang menggunakan MPPT Fuzzy Logic dengan sistem dengan MPPT P&O. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan, arus, daya keluaran, dan efisiensi sistem. Hasil pengujian digunakan untuk mengetahui peningkatan performa yang diperoleh melalui penerapan MPPT Fuzzy Logic pada sistem PLTS.

3. Pengujian Efisiensi Sistem dan Pengisian Baterai

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi sistem serta kinerja pengisian baterai. Parameter yang diamati meliputi daya masukan panel surya, daya keluaran sistem, efisiensi, tegangan baterai, arus pengisian, dan State of Charge (SOC). Hasil pengujian digunakan untuk mengetahui efektivitas sistem dalam memanfaatkan energi surya dan mendukung proses penyimpanan energi pada baterai.

