

BAB III METODOLOGI

3.1 Jadwal Penelitian

Tabel 3.1 *Jadwal Penelitian*

No	Jenis Kegiatan	September				Oktober				November				Desember				Januari			
		Minggu ke																			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi literatur, identifikasi masalah, dan penyusunan proposal																				
2	Pengumpulan data iradiasi, parameter PLTS, dan profil beban																				
3	Perancangan model PLTS, inverter, dan EMS Fuzzy Mamdani																				
4	Simulasi sistem dan pengujian skenario																				
5	Analisis hasil simulasi dan evaluasi sistem																				
6	Penyusunan laporan skripsi, revisi, dan penyelesaian penelitian																				

Berikut adalah uraian dari jadwal penelitian:

1. Studi literatur, identifikasi masalah, dan penyusunan proposal penelitian.
Dilakukan dengan mengumpulkan referensi mengenai PLTS, inverter, EMS, dan Fuzzy Logic Mamdani serta menyusun rumusan masalah dan tujuan penelitian.
2. Pengumpulan data dan parameter sistem.
Meliputi pengumpulan data DNI dari Global Solar Atlas, spesifikasi panel surya dan inverter, serta profil beban Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya.
3. Perancangan model sistem.
Dilakukan dengan membangun model matematis PLTS, model inverter DC-AC, serta perancangan EMS menggunakan metode Fuzzy Logic Mamdani.
4. Simulasi dan pengujian sistem.
Dilakukan menggunakan script MATLAB untuk mengevaluasi performa sistem pada beberapa skenario pengujian.
5. Analisis hasil dan evaluasi sistem.
Dilakukan terhadap tingkat pemanfaatan energi PLTS, kontribusi energi terhadap beban, serta penghematan biaya listrik.
6. Penyusunan laporan dan revisi.
Dilakukan berdasarkan hasil penelitian dan masukan dari dosen pembimbing hingga penyelesaian skripsi.

3.2 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah metode studi literatur dan simulasi berbasis komputer. Metode studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan, menelaah, dan menganalisis berbagai sumber pustaka yang relevan seperti buku, jurnal ilmiah, skripsi terdahulu, standar teknis, dan publikasi ilmiah lainnya yang berkaitan dengan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), inverter, Energy Management System (EMS), serta metode Fuzzy Logic Mamdani.

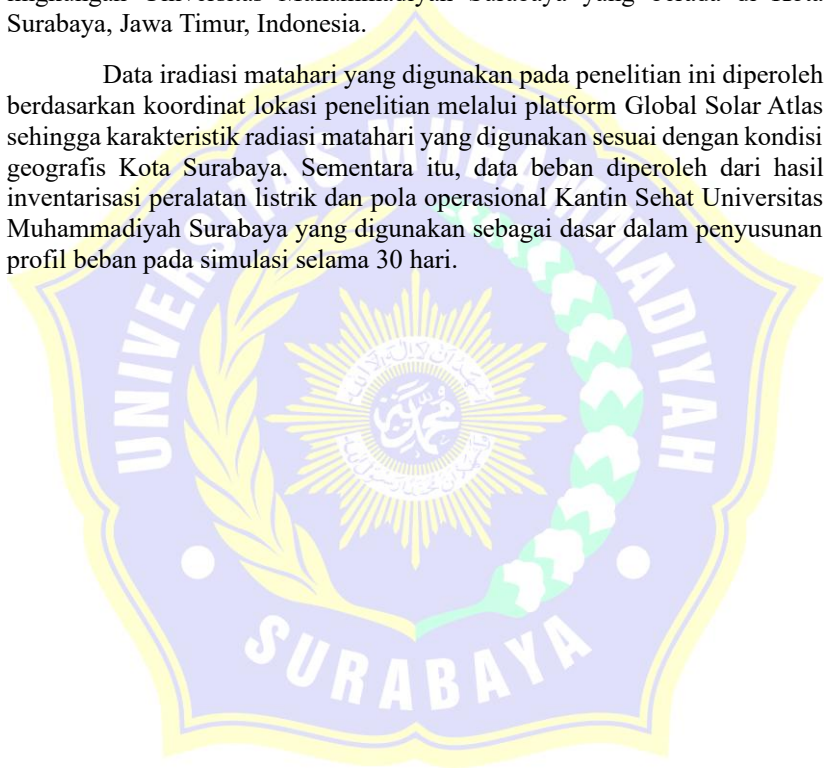
Selanjutnya dilakukan pemodelan matematis dan simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk menganalisis performa sistem EMS berbasis fuzzy pada PLTS dalam memenuhi kebutuhan beban Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya. Proses simulasi dilakukan berdasarkan data iradiasi matahari dan profil beban yang telah diperoleh, kemudian dilakukan pengujian pada beberapa skenario untuk

mengevaluasi tingkat pemanfaatan energi PLTS terhadap kebutuhan beban listrik.

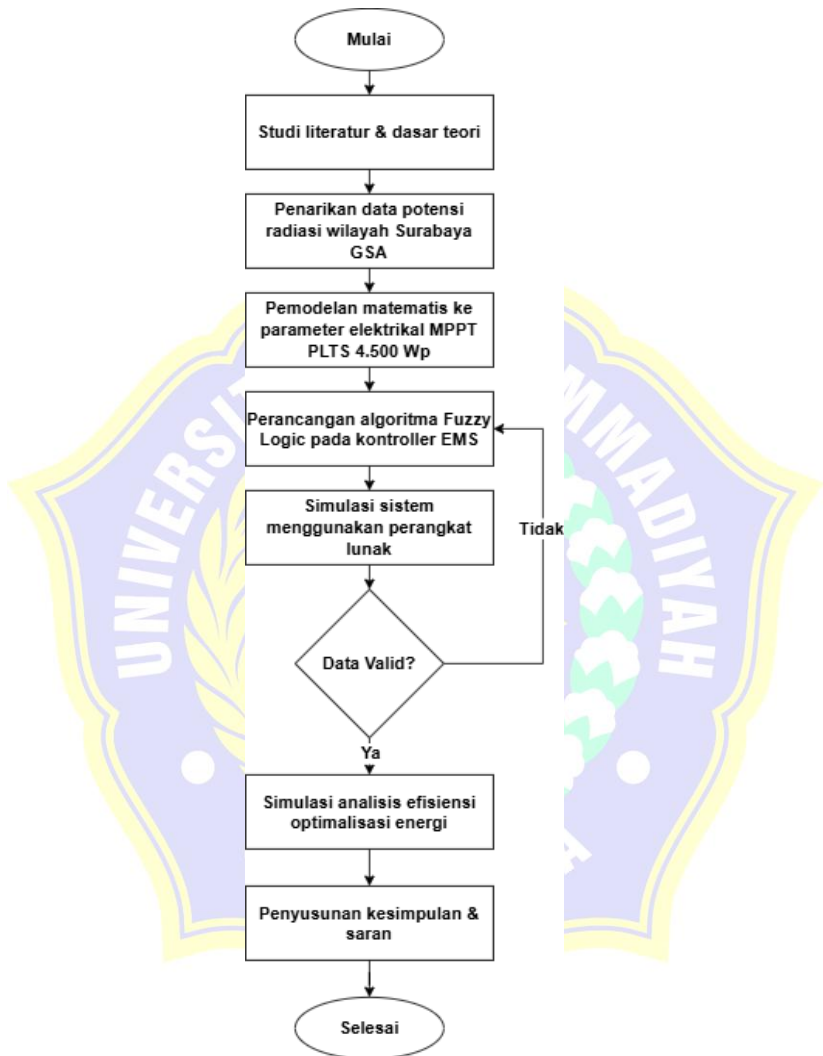
3.3 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang dirancang untuk melayani kebutuhan energi listrik Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya. Objek penelitian berlokasi di lingkungan Universitas Muhammadiyah Surabaya yang berada di Kota Surabaya, Jawa Timur, Indonesia.

Data iradiasi matahari yang digunakan pada penelitian ini diperoleh berdasarkan koordinat lokasi penelitian melalui platform Global Solar Atlas sehingga karakteristik radiasi matahari yang digunakan sesuai dengan kondisi geografis Kota Surabaya. Sementara itu, data beban diperoleh dari hasil inventarisasi peralatan listrik dan pola operasional Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya yang digunakan sebagai dasar dalam penyusunan profil beban pada simulasi selama 30 hari.



3.4 Diagram alir Penelitian



Gambar 3.1 *Flowchart Diagram Alir Penelitian*

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan sistematis sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1, dimulai dari studi literatur mengenai PLTS, MPPT, data GSA, EMS, dan *Fuzzy Logic*. Selanjutnya, dilakukan identifikasi beban Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya untuk mendata kapasitas daya dan jam operasi peralatan listrik, diikuti penarikan data iradiasi wilayah Surabaya melalui GSA yang dikonversikan secara matematis menjadi parameter elektrik input MPPT sesuai kapasitas fisis PLTS 4.500 Wp. Langkah berikutnya adalah perancangan algoritma *Fuzzy Logic* pada kontroler EMS menggunakan 9 *rule base* Mamdani dan dilanjutkan dengan simulasi sistem menggunakan perangkat lunak. Pada tahap simulasi ini dilakukan pengujian validasi data, di mana jika data dinyatakan tidak valid maka alur akan kembali ke tahap perancangan algoritma *Fuzzy Logic* untuk kalibrasi ulang aturan atau fungsi keanggotaan, sedangkan jika data dinyatakan valid maka alur langsung berlanjut ke tahap evaluasi dan analisis efisiensi. Pada evaluasi akhir tersebut, tingkat kontribusi daya surya dianalisis berdasarkan 4 periode waktu (Pagi, Siang, Sore, Malam) serta komparasi hari kerja dan hari libur, lalu diakhiri dengan penarikan kesimpulan. Waktu dan Tempat Penelitian

3.5 Pengumpulan Data

Pada penelitian ini, data yang digunakan terdiri atas data iradiasi matahari, parameter sistem PLTS, serta profil beban listrik Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya. Data-data tersebut kemudian diolah untuk menghasilkan parameter masukan yang digunakan pada sistem *Energy Management System* (EMS) berbasis *Fuzzy Logic Mamdani*. Adapun tahapan pengumpulan dan pengolahan data pada penelitian ini dijelaskan pada subbab berikut..

3.5.1 Pengumpulan dan Pemodelan Karakteristik Data Radiasi DNI Wilayah Surabaya

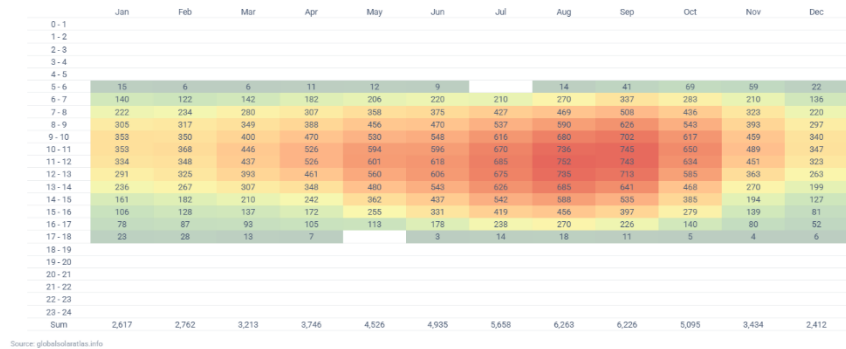
Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data radiasi matahari berupa Direct Normal Irradiance (DNI) sebagai data masukan dalam pemodelan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Data diperoleh melalui platform Global Solar Atlas (GSA) berdasarkan koordinat Universitas Muhammadiyah Surabaya, yaitu pada koordinat $07,260241^{\circ}$ LS dan $112,788991^{\circ}$ BT. GSA menyediakan profil rata-rata radiasi per jam untuk setiap bulan sepanjang tahun (13 titik data per jam, pukul 05.00–18.00), sehingga data yang diperoleh merupakan satu profil representatif bulan September, bukan pencatatan harian individual selama satu bulan penuh.

Karena Global Solar Atlas hanya menyediakan satu profil rata-rata per jam untuk bulan September (bukan data harian yang bervariasi selama 30 hari), data masukan simulasi 30 hari (720 titik data) disusun dengan menggabungkan dua komponen: (1) bentuk kurva radiasi per jam yang diambil langsung dari profil rata-rata GSA bulan September (puncak 745 W/m² pada pukul 10.00–11.00), dan (2) variasi puncak radiasi harian sebesar $\pm 8\%$ di sekitar nilai rata-rata tersebut sebagai asumsi peneliti untuk merepresentasikan fluktuasi cuaca harian yang wajar, dibangkitkan menggunakan pembangkit bilangan acak dengan nilai awal (seed) tetap agar hasil simulasi konsisten dan dapat diulang. Data yang telah disusun kemudian diverifikasi kelengkapannya dan disajikan dalam bentuk deret waktu (time series) sehingga siap digunakan sebagai data masukan pada proses pemodelan sistem PLTS di MATLAB.

Karakteristik data DNI yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 *Karakteristik Data Direct Normal Irradiance (DNI) Penelitian*

Parameter	Nilai
Sumber data	Global Solar Atlas
Jenis data	Direct Normal Irradiance (DNI)
Tahun data	2025
Periode simulasi	Sep-25
Interval data	1 jam
Lama simulasi	30 hari
Jumlah data	720 data
Koordinat lintang	07,260241° LS
Koordinat bujur	112,788991° BT



Gambar 3.2 Direct Normal Irradiance (DNI) Universitas Muhammadiyah Surabaya Tahun 2025 Berdasarkan Global Solar Atlas

(Sumber: Global Solar Atlas, diakses melalui <https://globalsolaratlas.info/map> menggunakan koordinat 07,260241° LS dan 112,788991° BT.)

Berdasarkan hasil ekstraksi data Direct Normal Irradiance (DNI) dari Global Solar Atlas yang ditunjukkan pada Gambar 3.2, diperoleh profil radiasi matahari berdasarkan distribusi waktu harian dan bulanan pada lokasi Universitas Muhammadiyah Surabaya. Nilai radiasi mulai terdeteksi pada sekitar pukul 05.00 WIB, kemudian meningkat hingga mencapai intensitas maksimum pada rentang pukul 10.00–13.00 WIB, sebelum menurun secara bertahap hingga mencapai nilai nol pada sekitar pukul 18.00 WIB.

Berdasarkan akumulasi radiasi bulanan, nilai DNI tertinggi terjadi pada bulan Agustus sebesar 6.263 Wh/m² dan September sebesar 6.226 Wh/m², sedangkan nilai terendah terjadi pada bulan Januari sebesar 2.617 Wh/m². Berdasarkan karakteristik tersebut, penelitian ini menggunakan data bulan September 2025 sebagai periode simulasi karena memiliki potensi radiasi yang tinggi serta sesuai untuk merepresentasikan kondisi operasi sistem PLTS.

Data DNI yang telah diperoleh selanjutnya diekstraksi dan disusun menjadi data deret waktu (*time series*) dengan interval satu jam untuk digunakan sebagai data masukan pada proses pemodelan sistem PLTS di MATLAB

3.5.2 Pengumpulan Data Parameter Sistem PLTS

Parameter sistem PLTS yang digunakan pada penelitian ini diperoleh berdasarkan spesifikasi teknis modul surya dan inverter yang digunakan pada proses pemodelan sistem. Sistem PLTS yang dirancang memiliki kapasitas total sebesar 4.500 Wp yang terdiri dari sembilan modul surya monocrystalline berkapasitas 500 Wp yang disusun secara seri.

Spesifikasi elektrik masing-masing modul surya yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 *Spesifikasi Elektrikal Nominal per Unit Panel Surya 500 Wp (Kondisi STC)*

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Daya Puncak (Maximum Power)	Pmax	500	Wp
Tegangan Daya Maksimum	Vmp	38,4	V
Arus Daya Maksimum	Imp	13,03	A
Tegangan Sirkuit Terbuka	Voc	46,4	V
Arus Hubung Singkat	Isc	13,79	A
Efisiensi Modul	η	21,3	%
Dimensi Panel (Panjang × Lebar)	–	2,18 × 1,10	m

Berdasarkan Tabel 3.3, panel surya yang digunakan memiliki daya nominal sebesar 500 Wp pada kondisi *Standard Test Condition* (STC) dengan tegangan maksimum daya (*Maximum Power Voltage* atau *Vmp*) sebesar 38,4 V dan arus maksimum daya (*Maximum Power Current* atau *Imp*) sebesar 13,03 A. Parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam pembentukan konfigurasi total sistem PLTS berkapasitas 4.500 Wp yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 3.4 Spesifikasi Total Array PLTS (9 Panel Seri, 4.500 Wp)

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Daya Puncak Total Array	Pmp_total	4.500	Wp
Tegangan Maksimum Total Array	Vmp_total	345,6	V
Arus Maksimum Total Array	Imp_total	13,03	A
Tegangan Sirkuit Terbuka Total	Voc_total	417,6	V
Arus Hubung Singkat Total	Isc_total	13,79	A
Luas Total Array	A	21,582	m ²
Faktor Rugi Operasional	Fk (operasional)	0,85	–
Faktor Rugi Validasi STC	Fk (STC)	0,98	–

Berdasarkan konfigurasi sembilan modul surya yang disusun secara seri sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.4, diperoleh kapasitas total sistem sebesar 4.500 Wp dengan tegangan maksimum daya total ($V_{mp,total}$) sebesar 345,6 V dan arus maksimum daya total ($I_{mp,total}$) sebesar 13,03 A. Selain itu, luas total area penyerapan modul surya yang digunakan pada penelitian ini sebesar 21,582 m².

Penelitian ini menggunakan inverter dengan efisiensi konversi sebesar **97%** untuk mengubah energi listrik dari sisi DC menjadi energi listrik AC yang digunakan untuk melayani kebutuhan beban kantin. Berdasarkan Persamaan (2.13), kapasitas daya nominal pada sisi AC dihitung sebagai berikut:

$$P_{AC, rated} = 4500 \times 0,97 = 4365 \text{ W}$$

Sehingga diperoleh kapasitas daya nominal keluaran inverter sebesar 4365 W yang selanjutnya digunakan sebagai batas maksimum keluaran inverter pada proses simulasi dan pengujian sistem *Energy Management System* (EMS) berbasis *Fuzzy Logic Mamdani*.

3.5.3 Pengumpulan Data Beban Kantin

Data beban listrik pada penelitian ini diperoleh melalui proses inventarisasi seluruh peralatan listrik yang digunakan pada Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya. Proses inventarisasi dilakukan dengan mengidentifikasi jenis peralatan, jumlah unit, daya nominal masing-masing peralatan, serta durasi operasional harian untuk membentuk profil konsumsi energi yang mendekati kondisi operasional sebenarnya.

Data inventarisasi beban digunakan sebagai dasar dalam pembentukan profil beban harian yang selanjutnya digunakan pada proses simulasi sistem Energy Management System (EMS) berbasis Fuzzy Logic Mamdani. Adapun rincian inventarisasi beban listrik yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 *Data Inventarisasi Beban Listrik Riil Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya*

No	Peralatan	Daya (W)	Jumlah	Total Daya (W)	Lama Operasi (jam)
1	Monitor CCTV	15	1	15	24
2	PC Kasir	60	1	60	8
3	Kipas Angin	70	5	350	8
4	Printer Kasir	15	1	15	8
5	Router WiFi	10	1	10	24
6	TV LED	50	1	50	8
7	Mesin Press Sealer	300	1	300	8
8	Display Cooler	150	1	150	24
9	Magic Com (Cook)	300	5	1.500	8
10	Magic Com (Warm)	50	5	250	8
11	Exhaust Fan	30	5	150	8
12	Speaker Dinding	50	1	50	8
13	10 Lampu LED	10	10	100	24
14	CCTV	10	2	20	24
	Total		40	3.020	

Berdasarkan Tabel 3.5 diperoleh total daya terpasang sebesar 3.020 W yang terdiri atas beban operasional sebesar 2.725 W dan beban dasar (baseload) sebesar 295 W.

Beban operasional merupakan peralatan yang hanya beroperasi selama jam pelayanan kantin yaitu pada pukul 08.00 hingga 16.00 WIB, sedangkan beban dasar (baseload) merupakan peralatan yang tetap beroperasi selama 24 jam penuh untuk menjaga kontinuitas operasional fasilitas pendukung kantin. Display Cooler dikategorikan sebagai beban dasar karena berfungsi menjaga suhu produk tetap dingin secara berkelanjutan sehingga tidak dapat dimatikan di luar jam operasional kantin tanpa mengganggu kualitas produk yang disimpan.

Dengan demikian, profil beban pada penelitian ini dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu:

- Beban dasar (baseload) sebesar 295 W yang beroperasi selama 24 jam, terdiri atas Monitor CCTV, Router WiFi, Showcase Cooler, 10 Lampu LED, dan CCTV.
- Beban operasional sebesar 2.725 W yang beroperasi selama 8 jam setiap hari kerja, terdiri atas PC Kasir, Kipas Angin, Printer Kasir, TV LED, Mesin Press Sealer, Magic Com (Cook), Magic Com (Warm), Exhaust Fan, dan Speaker Dinding.

Akumulasi kedua kategori beban tersebut menghasilkan beban puncak sebesar 3.020 W yang digunakan sebagai skenario beban eksisting pada proses simulasi dan pengujian EMS berbasis Fuzzy Logic Mamdani.

Selain itu, pada hari Sabtu dan Minggu diasumsikan bahwa aktivitas operasional kantin tidak berlangsung sehingga hanya terdapat beban dasar sebesar 295 W yang tetap beroperasi selama 24 jam. Dengan asumsi simulasi dimulai pada hari Senin dan berlangsung selama 30 hari pada bulan September 2025, diperoleh sebanyak 22 hari kerja dan 8 hari akhir pekan.

Asumsi tersebut digunakan untuk menghasilkan profil konsumsi energi yang lebih mendekati kondisi operasional aktual Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya.

3.5.4 Klasifikasi Beban Berdasarkan Skema Suplai Daya

Sistem PLTS pada penelitian ini bersifat on-grid tanpa media penyimpanan energi (baterai), sehingga daya keluaran PLTS hanya tersedia pada rentang waktu iradiasi matahari aktif (pukul 05.00-18.00 WIB) dan bernilai nol di luar rentang tersebut. Karakteristik ini menyebabkan tidak seluruh peralatan pada Tabel 3.5 dapat diperlakukan secara seragam dalam hal sumber suplai dayanya, karena kesesuaian antara jam operasional peralatan dan jam ketersediaan daya PLTS, serta karakteristik kelistrikan masing-masing peralatan, berbeda-beda.

Oleh karena itu, pada penelitian ini setiap peralatan diklasifikasikan ke dalam tiga kelas suplai daya berdasarkan dua kriteria berikut.

1. Kesesuaian (overlap) jam operasi peralatan terhadap jam ketersediaan daya PLTS. Peralatan yang beroperasi penuh pada jam pelayanan kantin (08.00-16.00 WIB) berada dalam rentang jam matahari aktif, sehingga berpotensi disuplai penuh oleh PLTS. Sebaliknya, peralatan yang beroperasi 24 jam pasti memiliki sebagian jam operasi di luar jam matahari aktif (malam hari), sehingga wajib memiliki jalur suplai cadangan dari PLN.
2. Karakteristik dan besar daya peralatan. Peralatan dengan daya kecil dan bersifat resistif-stabil (tanpa lonjakan arus awal yang signifikan) aman dibebankan pada PLTS. Sebaliknya, peralatan berdaya besar dan/atau mengandung elemen pemanas atau motor dengan potensi lonjakan arus awal (inrush current) berisiko menimbulkan defisit daya tajam pada sistem PLTS yang tidak memiliki baterai penyangga, sehingga lebih aman apabila selalu disuplai oleh PLN.

Berdasarkan kedua kriteria tersebut, peralatan pada Tabel 3.5 dikelompokkan ke dalam tiga kelas sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Klasifikasi Beban Berdasarkan Skema Suplai Daya

No	Peralatan	Total Daya (W)	Lama Operasi	Kelas Suplai	Alasan Klasifikasi
1	Monitor CCTV	15	24 jam	Bergantian	Beban 24 jam, wajib punya cadangan PLN di malam hari
2	PC Kasir	60	8 jam	PLTS Prioritas	Jam operasi = jam matahari aktif, daya kecil-stabil
3	Kipas Angin	350	8 jam	PLTS Prioritas	Jam operasi = jam matahari aktif
4	Printer Kasir	15	8 jam	PLTS Prioritas	Daya kecil
5	Router WiFi	10	24 jam	Bergantian	Beban 24 jam
6	TV LED	50	8 jam	PLTS Prioritas	Non-kritikal, daya kecil
7	Mesin Press Sealer	300	8 jam	PLN Tetap	Elemen pemanas, potensi lonjakan daya
8	Display Cooler	150	24 jam	Bergantian	Beban 24 jam, menjaga suhu produk
9	Magic Com (Cook)	1.500	8 jam	PLN Tetap	Elemen pemanas daya besar, berisiko defisit PLTS
10	Magic Com (Warm)	250	8 jam	PLTS Prioritas	Daya lebih kecil dari mode cook, fleksibel
11	Exhaust Fan	150	8 jam	PLTS Prioritas	Jam operasi = jam matahari aktif
12	Speaker Dinding	50	8 jam	PLTS Prioritas	Non-kritikal, daya kecil
13	10 Lampu LED	100	24 jam	Bergantian	Beban 24 jam
14	CCTV	20	24 jam	Bergantian	Beban 24 jam, keamanan

Rekapitulasi daya terpasang per kelas suplai ditunjukkan pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 *Rekapitulasi Daya Terpasang per Kelas Suplai*

Kelas Suplai	Total Daya (W)	Jumlah Peralatan	Lama Operasi
PLTS Prioritas	925	7	8 jam (hari kerja)
PLN Tetap	1.800	2	8 jam (hari kerja)
Bergantian	295	5	24 jam (setiap hari)
Total	3.020	14	

Kelas PLTS Prioritas merupakan peralatan yang didahulukan menerima suplai daya dari PLTS karena jam operasinya bertepatan penuh dengan jam ketersediaan daya PLTS serta memiliki karakteristik daya yang aman dibebankan pada sistem tanpa baterai. Kelas PLN Tetap merupakan peralatan berdaya besar dengan elemen pemanas (Mesin Press Sealer dan Magic Com mode Cook) yang selalu disuplai oleh PLN untuk menjaga kestabilan operasional, mengingat kapasitas PLTS 4.500 Wp tanpa baterai berisiko mengalami defisit tajam apabila menanggung beban tersebut. Kelas Bergantian merupakan peralatan yang beroperasi 24 jam sehingga suplainya berpindah secara otomatis antara PLTS (siang, apabila daya mencukupi setelah kelas PLTS Prioritas terpenuhi) dan PLN (malam hari).

Mekanisme perpindahan sumber daya pada kelas Bergantian bekerja sebagai berikut. Karena kelima peralatan pada kelas ini (Monitor CCTV, Router WiFi, Display Cooler, 10 Lampu LED, dan CCTV) menyala tanpa henti selama 24 jam, sumber dayanya harus berpindah otomatis mengikuti ketersediaan daya PLTS pada tiap jam pengamatan: pada siang hari (saat inverter PLTS aktif), kelas Bergantian mendapat prioritas kedua setelah kelas PLTS Prioritas terpenuhi, menggunakan sisa daya PLTS yang tersedia; pada malam hari (inverter tidak aktif), seluruh kebutuhan kelas Bergantian otomatis beralih dipasok PLN. Perpindahan ini ditentukan oleh hasil perhitungan alokasi daya pada setiap interval satu jam (bukan saklar fisik), sehingga istilah “Bergantian” merujuk pada pola alokasi sumber energi secara algoritmis dalam simulasi, bukan perangkat switching fisik antara PLTS dan PLN.

3.5.5 Skema Alokasi Prioritas Daya

Karena sistem PLTS tidak memiliki baterai, alokasi daya AC keluaran inverter kepada masing-masing kelas beban pada setiap interval waktu pengamatan dilakukan berdasarkan urutan prioritas berikut.

1. Daya AC PLTS didahulukan untuk memenuhi kebutuhan kelas PLTS Prioritas.
2. Apabila masih terdapat sisa daya AC PLTS setelah kelas PLTS Prioritas terpenuhi, sisa daya tersebut dialokasikan untuk memenuhi kebutuhan kelas Bergantian.
3. Kelas PLN Tetap selalu dipasok oleh PLN, tidak pernah dibebankan kepada PLTS.
4. Apabila daya AC PLTS tidak mencukupi kebutuhan kelas PLTS Prioritas maupun kelas Bergantian pada suatu interval waktu, kekurangan (defisit) tersebut secara otomatis dipenuhi oleh PLN.

Skema alokasi ini diterapkan pada setiap interval waktu (per jam) selama periode simulasi, sehingga total daya yang dipasok PLTS pada waktu tertentu merupakan penjumlahan dari daya yang berhasil dialokasikan ke kelas PLTS Prioritas dan kelas Bergantian, sedangkan total daya dari PLN merupakan penjumlahan dari kebutuhan kelas PLN Tetap ditambah defisit dari kedua kelas lainnya.

3.6 Perancangan Energy Management System (EMS)

Pada penelitian ini, sistem *Energy Management System* (EMS) dirancang untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi listrik yang dihasilkan oleh sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dalam memenuhi kebutuhan beban listrik Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya. Sistem EMS berfungsi sebagai mekanisme pengambilan keputusan yang mempertimbangkan kondisi produksi daya PLTS serta tingkat kebutuhan beban listrik pada setiap interval waktu pengamatan. Perlu ditegaskan bahwa EMS pada penelitian ini berperan sebagai sistem evaluasi dan pendukung keputusan, bukan sistem kendali otomatis yang menyalakan/mematikan atau memindahkan aliran daya secara langsung. Hal ini karena sistem PLTS bersifat *on-grid* tanpa baterai (BESS) maupun beban yang dapat dikendalikan, sehingga EMS berfungsi menilai dan mengklasifikasikan tingkat pemanfaatan energi PLTS terhadap kebutuhan beban pada setiap interval waktu.

Metode pengambilan keputusan yang digunakan pada penelitian ini adalah *Fuzzy Logic Mamdani* karena memiliki kemampuan dalam menangani ketidakpastian dan perubahan kondisi sistem yang bersifat dinamis, khususnya akibat fluktuasi produksi daya PLTS yang dipengaruhi oleh perubahan intensitas radiasi matahari. Selain itu, metode ini memungkinkan proses pengambilan keputusan dilakukan menggunakan pendekatan linguistik yang lebih mendekati cara berpikir manusia.

Pada perancangan sistem ini digunakan dua variabel masukan, yaitu daya keluaran PLTS pada sisi AC dan rasio pemenuhan beban, sedangkan variabel keluaran yang dihasilkan berupa tingkat pemanfaatan energi PLTS. Seluruh proses pengambilan keputusan dilakukan melalui tahapan fuzzifikasi, evaluasi aturan (*rule base*), inferensi Mamdani, dan defuzzifikasi menggunakan metode centroid untuk menghasilkan keluaran berupa nilai numerik tingkat pemanfaatan energi PLTS.

Tahapan perancangan sistem EMS berbasis *Fuzzy Logic Mamdani* pada penelitian ini meliputi penyusunan diagram blok sistem, pemodelan konversi daya inverter, perhitungan rasio pemenuhan beban, perancangan fungsi keanggotaan, penyusunan basis aturan (*rule base*), serta proses inferensi dan defuzzifikasi.

3.6.1 Rancang Bangun Sistem PLTS Terpasang

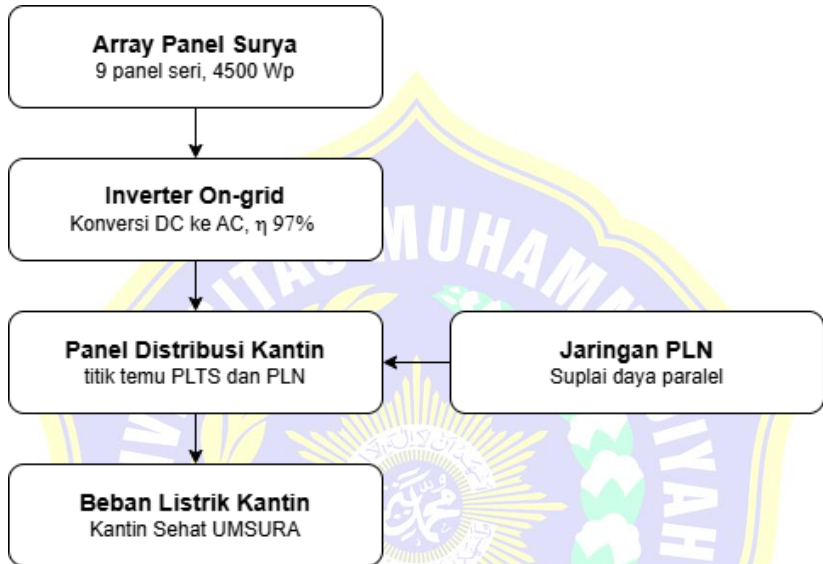
Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang menjadi objek penelitian ini telah terpasang secara fisik di atap (rooftop) Laboratorium Terpadu Universitas Muhammadiyah Surabaya untuk menyuplai kebutuhan listrik Kantin Sehat. Rancang bangun sistem meliputi konfigurasi array panel surya, struktur pemasangan, jalur pengkabelan, serta komponen elektrikal pendukung yang menghubungkan panel surya hingga ke beban.

a) Konfigurasi dan Orientasi array

Sistem terdiri atas 9 unit panel surya monocrystalline 500 Wp yang disusun secara seri (1 string), menghasilkan total kapasitas 4.500 Wp dengan tegangan total 345,6 V. Panel dipasang pada struktur dudukan tetap (fixed-mount rooftop bracket) di atap Laboratorium Terpadu dengan kemiringan (tilt angle) sebesar 10° – 12° dan orientasi menghadap Utara, disesuaikan dengan posisi geografis Surabaya ($07,26^{\circ}$ LS) agar penyerapan radiasi matahari optimal sepanjang tahun. Jarak antar baris panel diatur untuk meminimalkan self-shading antar modul pada pagi dan sore hari.

b) Diagram Instalasi (Single Line Diagram)

Berbeda dengan skema umum PLTS pada Gambar 2.1, instalasi riil di lokasi mengikuti jalur berikut:



Gambar 3.3 *Diagram Instalasi (Single Line Diagram) Sistem PLTS On-Grid Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya*

Proteksi yang dipasang meliputi DC fuse/circuit breaker pada sisi keluaran panel, surge protection device (SPD) untuk mengantisipasi sambaran petir, serta AC circuit breaker pada sisi keluaran inverter sebelum masuk ke panel distribusi kantin yang terhubung paralel dengan jaringan PLN.

c) Tabel Spesifikasi Sistem Terpasang

Tabel 3.8 *Tabel Spesifikasi Sistem Terpasang*

No.	Komponen	Spesifikasi	Jumlah
1.	Panel Surya	Monocrystalline 500 Wp, Vmp 38,4 V	9 unit (seri)
2.	Struktur Mounting	Fixed rooftop bracket, tilt 10°–12°, azimuth utara	1 set
3.	Inverter	On-grid, kapasitas 5 kW (keluaran efektif ± 4.365 W, η 97%)	1 unit
4.	Proteksi DC	Fuse/breaker DC + SPD	1 set
5.	Proteksi AC	Circuit breaker AC	1 set
6.	Panel Distribusi	AC Distribution Box (paralel dengan PLN)	1 unit
7.	Luas Total Array	21,582 m ²	-

d) Justifikasi Rancangan

Pemilihan konfigurasi seri untuk 9 panel didasarkan pada kesesuaian tegangan kerja terhadap rentang input inverter yang digunakan, sedangkan penempatan pada rooftop Laboratorium Terpadu dipilih karena posisinya yang tidak terhalang bangunan atau vegetasi di sekitarnya sehingga potensi shading loss dapat diminimalkan. Sistem tetap terhubung paralel dengan jaringan PLN (on-grid) sehingga kebutuhan beban kantin dapat dipenuhi secara bergantian atau bersamaan oleh PLTS dan PLN sesuai kondisi produksi daya.

3.6.2 Algoritma Energi Management System

Berdasarkan tahapan perancangan yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, proses kerja EMS berbasis Fuzzy Logic Mamdani pada penelitian ini dapat disusun ke dalam suatu algoritma yang menggambarkan urutan langkah pengolahan data secara sistematis, mulai dari akuisisi data hingga diperoleh keluaran berupa tingkat pemanfaatan energi PLTS. Algoritma ini menjadi acuan implementasi sistem pada perangkat lunak MATLAB serta menjadi dasar penjelasan rinci pada sub-bab berikutnya.

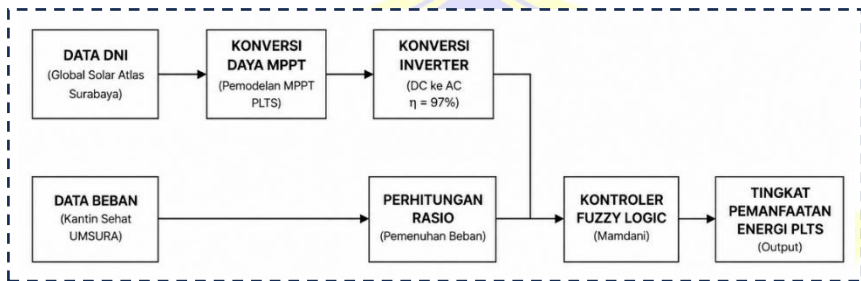
Algoritma kerja EMS berbasis Fuzzy Logic Mamdani pada penelitian ini disusun sebagai berikut:

1. Membaca data DNI dan data beban kantin pada interval waktu tertentu.
2. Menghitung daya keluaran MPPT: $P_{dc} = G \times A \times \eta \times F_k$.
3. Menghitung daya keluaran inverter (AC): $P_{ac} = P_{dc} \times \eta_{inv}$.
4. Menghitung rasio pemenuhan beban: $R = (P_{ac}/P_{beban}) \times 100\%$.
5. Melakukan fuzzifikasi terhadap P_{ac} dan R menggunakan fungsi keanggotaan yang telah ditetapkan.
6. Mengevaluasi seluruh aturan (rule base) menggunakan operator MIN.
7. Menggabungkan hasil evaluasi aturan menggunakan operator MAX (agregasi).
8. Melakukan defuzzifikasi dengan metode centroid untuk memperoleh nilai keluaran tegas.
9. Mengklasifikasikan nilai keluaran ke dalam kategori Kurang Optimal, Optimal, atau Sangat Optimal.
10. Mengulangi langkah 1–9 untuk seluruh interval waktu selama periode simulasi.

Berdasarkan algoritma tersebut, proses EMS berlangsung secara berulang (iteratif) pada setiap interval waktu pengamatan selama periode simulasi, sehingga diperoleh rekaman tingkat pemanfaatan energi PLTS secara menyeluruh

3.6.3 Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem EMS berbasis Fuzzy Logic Mamdani yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.3. Diagram blok tersebut menggambarkan alur proses pengolahan data mulai dari pengambilan data masukan, pemodelan sistem PLTS, proses pengambilan keputusan menggunakan metode Fuzzy Logic Mamdani, hingga menghasilkan keluaran berupa tingkat pemanfaatan energi PLTS.



Gambar 3.4 *Diagram Blok System*

Berdasarkan Gambar 3.3, sistem Energy Management System (EMS) berbasis Fuzzy Logic Mamdani dirancang menggunakan dua sumber data masukan, yaitu data Direct Normal Irradiance (DNI) dari Global Solar Atlas dan data beban listrik Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya. Data DNI diproses melalui tahapan pemodelan daya MPPT dan konversi inverter untuk memperoleh daya keluaran PLTS sisi AC, sedangkan data beban digunakan untuk menghitung rasio pemenuhan beban. Kedua variabel tersebut selanjutnya menjadi masukan pada kontroler Fuzzy Logic Mamdani untuk menghasilkan keluaran berupa tingkat pemanfaatan energi PLTS sebagai dasar pengambilan keputusan dalam sistem EMS.

Berdasarkan diagram blok tersebut, tahapan kerja sistem dijelaskan sebagai berikut:

1. Tahap Akuisisi Data dan Pemodelan Daya PLTS

Pada tahap pertama digunakan data Direct Normal Irradiance (DNI) yang diperoleh dari Global Solar Atlas berdasarkan koordinat Universitas Muhammadiyah Surabaya. Data DNI selanjutnya digunakan sebagai masukan pada proses pemodelan daya MPPT untuk memperoleh daya keluaran maksimum panel surya. Daya keluaran tersebut kemudian dikonversi oleh inverter dari sisi DC menjadi daya AC menggunakan efisiensi inverter sebesar 97%, sehingga diperoleh daya keluaran PLTS yang digunakan sebagai variabel masukan pertama pada sistem Fuzzy Logic.

2. Tahap Perhitungan Rasio Pemenuhan Beban

Secara bersamaan, data konsumsi daya Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya digunakan sebagai data beban penelitian. Nilai daya keluaran PLTS sisi AC dibandingkan dengan kebutuhan daya beban untuk menghitung rasio pemenuhan beban dalam bentuk persentase. Nilai rasio tersebut digunakan sebagai variabel masukan kedua pada sistem Fuzzy Logic.

3. Tahap Proses Fuzzy Logic Mamdani

Dua variabel masukan, yaitu daya keluaran PLTS dan rasio pemenuhan beban, diproses menggunakan metode Fuzzy Logic Mamdani. Tahapan yang dilakukan meliputi proses fuzzifikasi, evaluasi menggunakan basis aturan (*rule base*), inferensi, dan defuzzifikasi sehingga menghasilkan nilai keluaran berupa tingkat pemanfaatan energi PLTS.

4. Tahap Keluaran Sistem

Keluaran sistem berupa tingkat pemanfaatan energi PLTS yang menunjukkan hasil keputusan EMS dalam mengoptimalkan penggunaan energi surya untuk memenuhi kebutuhan beban Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya selama periode simulasi.

3.6.4 Pemodelan Konversi Daya Inverter

Setelah diperoleh data daya keluaran panel surya hasil pemodelan Maximum Power Point Tracking (MPPT), tahap selanjutnya adalah melakukan konversi daya inverter. Proses ini bertujuan untuk memperoleh daya keluaran pada sisi arus bolak-balik (AC) yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan beban listrik Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya.

Proses konversi dilakukan dengan menggunakan data keluaran MPPT pada setiap interval waktu pengamatan dan mempertimbangkan efisiensi inverter sebesar 97%. Nilai daya keluaran AC dihitung untuk seluruh data simulasi sehingga diperoleh profil daya keluaran inverter selama periode pengamatan. Hasil konversi tersebut kemudian disimpan sebagai data keluaran inverter dan digunakan sebagai masukan pada tahap perhitungan rasio pemenuhan beban.

Tahapan perhitungan konversi daya inverter pada penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Mengambil data daya keluaran MPPT pada setiap interval waktu pengamatan.
2. Menerapkan efisiensi inverter sebesar 97% untuk memperoleh daya keluaran sisi AC.
3. Menghasilkan profil daya keluaran inverter dalam bentuk deret waktu (*time series*).
4. Menyimpan hasil konversi sebagai data masukan untuk proses perhitungan rasio pemenuhan beban.

Tabel 3.9 *Parameter Pemodelan Konversi Daya Inverter*

Parameter	Nilai	Keterangan
Data masukan	Daya keluaran MPPT	Hasil perhitungan MPPT
Efisiensi inverter	97%	Efisiensi inverter yang digunakan
Data keluaran	Daya keluaran AC	Digunakan pada tahap perhitungan rasio beban

Berdasarkan parameter pada Tabel 3.6, proses konversi daya inverter dilakukan dengan menggunakan data keluaran MPPT sebagai data masukan dan efisiensi inverter sebesar 97%. Hasil proses konversi berupa daya keluaran AC kemudian digunakan sebagai data masukan pada tahap perhitungan rasio pemenuhan beban. Dengan demikian, seluruh data keluaran inverter telah siap digunakan pada proses selanjutnya.

3.6.5 Perhitungan Rasio Pemenuhan Beban

Penerapan Persamaan (2.14) pada penelitian ini disesuaikan agar hanya memperhitungkan beban yang menjadi tanggung jawab PLTS, yaitu penjumlahan kelas PLTS Prioritas dan kelas Bergantian, tanpa mengikutsertakan kelas PLN Tetap yang secara kebijakan alokasi memang tidak pernah dibebankan kepada PLTS. Apabila seluruh beban (termasuk PLN Tetap) tetap digunakan sebagai penyebut sesuai definisi umum, nilai rasio akan secara sistematis menjadi rendah meskipun PLTS telah memenuhi seluruh kebutuhan beban yang memang menjadi tanggung jawabnya, sehingga tidak mencerminkan kinerja PLTS secara adil. Dengan demikian, Persamaan (2.14) diterapkan pada penelitian ini dalam bentuk:

$$R = \left(\frac{P_{PLTS}}{P_{Tanggung\ PLTS}} \right) \times 100\%$$

dengan $P_{Tanggung\ PLTS}$ merupakan jumlah daya kelas PLTS Prioritas dan kelas Bergantian pada interval waktu yang sama (W), menggantikan pada P_{Beban} definisi umum Persamaan (2.14). R tetap merupakan persentase

pemenuhan beban oleh PLTS (%), dan P_{PLTS} adalah daya keluaran AC inverter PLTS (W).

3.6.6 Fungsi Keanggotaan

Setelah diperoleh nilai daya keluaran PLTS dan rasio pemenuhan beban, tahap selanjutnya adalah merancang fungsi keanggotaan (*membership function*) sebagai dasar proses fuzzifikasi pada sistem Fuzzy Logic Mamdani. Fungsi keanggotaan digunakan untuk memetakan nilai tegas (*crisp value*) dari setiap variabel ke dalam himpunan linguistik sehingga dapat diproses pada tahap inferensi fuzzy.

Pada penelitian ini digunakan dua variabel masukan (*input*), yaitu daya keluaran PLTS dan rasio pemenuhan beban, serta satu variabel keluaran (*output*), yaitu tingkat pemanfaatan energi PLTS. Masing-masing variabel direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga (*triangular membership function*) karena memiliki bentuk yang sederhana, mudah diimplementasikan, serta mampu merepresentasikan perubahan kondisi antarhimpunan linguistik secara bertahap.

Penentuan domain dan parameter fungsi keanggotaan dilakukan berdasarkan karakteristik data hasil pemodelan daya keluaran PLTS serta hasil perhitungan rasio pemenuhan beban selama periode simulasi. Variabel yang digunakan pada sistem Fuzzy Logic Mamdani dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.8.

Tabel 3.10 Variabel Sistem Fuzzy Logic Mamdani

Variabel	Jenis Variabel	Keterangan
Daya Keluaran PLTS	Input 1	Daya keluaran inverter (W)
Rasio Pemenuhan Beban	Input 2	Rasio pemenuhan beban PLTS (%)
Tingkat Pemanfaatan Energi	Output	Tingkat pemanfaatan energi PLTS (%)

Berdasarkan Tabel 3.8, sistem Fuzzy Logic Mamdani menggunakan dua variabel masukan dan satu variabel keluaran. Setiap variabel dibentuk ke dalam tiga himpunan linguistik dengan fungsi keanggotaan berbentuk

segitiga (*triangular membership function*). Penentuan parameter fungsi keanggotaan dan domain masing-masing variabel disesuaikan dengan karakteristik data penelitian sehingga proses inferensi dapat menggambarkan kondisi sistem secara lebih representatif.

3.6.6.1 Fungsi Keanggotaan Daya Keluaran PLTS (Input 1)

Variabel daya keluaran PLTS merupakan variabel masukan (*input*) pertama pada sistem Fuzzy Logic Mamdani yang diperoleh dari hasil pemodelan daya keluaran inverter. Variabel ini digunakan untuk merepresentasikan besarnya daya yang dihasilkan sistem PLTS pada setiap interval waktu pengamatan sebelum diproses pada tahap inferensi fuzzy.

Pada penelitian ini, fungsi keanggotaan daya keluaran PLTS dibentuk menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga (*triangular membership function*) yang terdiri atas tiga himpunan linguistik, yaitu Rendah, Sedang, dan Tinggi. Penentuan parameter fungsi keanggotaan dilakukan berdasarkan rentang daya keluaran PLTS hasil simulasi sehingga mampu merepresentasikan perubahan kondisi daya secara bertahap.

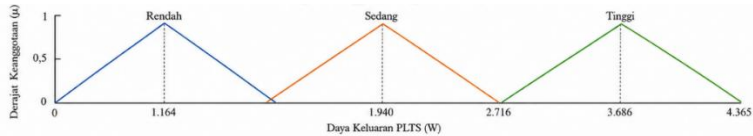
Parameter fungsi keanggotaan variabel daya keluaran PLTS ditunjukkan pada Tabel 3.9.

Tabel 3.11 Fungsi Keanggotaan Input 1 – Daya Keluaran PLTS

Himpunan Fuzzy	Parameter Fungsi Segitiga [a, b, c]	Domain (W)
Rendah	[0, 485, 1.164]	0 – 1.164
Sedang	[776, 1.940, 3.104]	776 – 3.104
Tinggi	[2.716, 3.686, 4.365]	2.716 – 4.365

Berdasarkan Tabel 3.9, fungsi keanggotaan variabel daya keluaran PLTS dibentuk menggunakan parameter fungsi segitiga [a, b, c]. Himpunan Rendah memiliki parameter [0, 485, 1.164], himpunan Sedang memiliki parameter [776, 1.940, 3.104], sedangkan himpunan Tinggi memiliki parameter [2.716, 3.686, 4.365]. Parameter tersebut menunjukkan titik awal, titik puncak, dan titik akhir dari masing-masing fungsi keanggotaan yang digunakan pada proses fuzzifikasi.

Bentuk fungsi keanggotaan variabel daya keluaran PLTS ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Fungsi Keanggotaan Input 1 – Daya Keluaran PLTS

Berdasarkan Gambar 3.5, fungsi keanggotaan daya keluaran PLTS terdiri atas tiga himpunan linguistik yang saling beririsan (*overlap*), yaitu Rendah, Sedang, dan Tinggi. Daerah irisan antarhimpunan memungkinkan satu nilai daya keluaran memiliki lebih dari satu derajat keanggotaan, sehingga transisi antar kondisi daya berlangsung secara bertahap. Karakteristik tersebut mendukung proses inferensi pada sistem Fuzzy Logic Mamdani dalam menghasilkan keputusan yang lebih adaptif terhadap perubahan daya keluaran PLTS.

3.6.6.2 Fungsi Keanggotaan Rasio Pemenuhan Beban (Input 2)

Variabel rasio pemenuhan beban merupakan variabel masukan (*input*) kedua pada sistem Fuzzy Logic Mamdani yang diperoleh dari hasil perhitungan rasio antara daya keluaran PLTS terhadap kebutuhan daya beban. Variabel ini digunakan untuk merepresentasikan tingkat kemampuan sistem PLTS dalam memenuhi kebutuhan energi listrik pada setiap interval waktu pengamatan.

Pada penelitian ini, fungsi keanggotaan variabel rasio pemenuhan beban dibentuk menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga (*triangular membership function*) yang terdiri atas tiga himpunan linguistik, yaitu Kurang, Cukup, dan Lebih. Penentuan parameter fungsi keanggotaan dilakukan berdasarkan rentang nilai rasio pemenuhan beban sehingga mampu merepresentasikan kondisi pemenuhan beban secara bertahap sebelum dilakukan proses inferensi fuzzy.

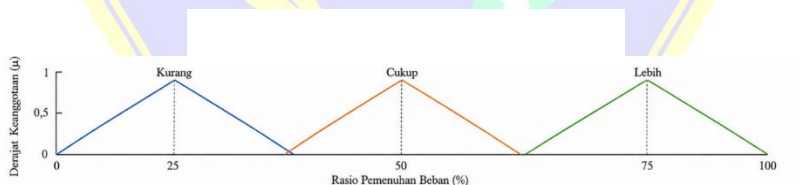
Parameter fungsi keanggotaan variabel rasio pemenuhan beban ditunjukkan pada Tabel 3.10.

Tabel 3.12 Fungsi Keanggotaan Input 2 – Rasio Pemenuhan Beban

Himpunan Fuzzy	Parameter Fungsi Segitiga [a, b, c]	Domain (%)
Kurang	[0, 25, 50]	0 – 50
Cukup	[25, 50, 75]	25 – 75
Lebih	[50, 75, 100]	50 – 100

Berdasarkan Tabel 3.10, fungsi keanggotaan variabel rasio pemenuhan beban dibentuk menggunakan parameter fungsi segitiga [a, b, c]. Himpunan Kurang memiliki parameter [0, 25, 50], himpunan Cukup memiliki parameter [25, 50, 75], sedangkan himpunan Lebih memiliki parameter [50, 75, 100]. Parameter tersebut menunjukkan batas awal, titik puncak, dan batas akhir dari masing-masing fungsi keanggotaan yang digunakan pada proses fuzzifikasi.

Bentuk fungsi keanggotaan variabel rasio pemenuhan beban ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Fungsi Keanggotaan Input 2 – Rasio Pemenuhan Beban

Berdasarkan Gambar 3.6, fungsi keanggotaan variabel rasio pemenuhan beban terdiri atas tiga himpunan linguistik, yaitu Kurang, Cukup, dan Lebih, yang saling beririsan (*overlap*). Daerah irisan tersebut memungkinkan suatu nilai rasio pemenuhan beban memiliki lebih dari satu derajat keanggotaan pada himpunan yang berbeda. Dengan demikian, proses transisi antarhimpunan linguistik berlangsung secara bertahap sehingga sistem Fuzzy Logic Mamdani dapat menghasilkan proses inferensi yang lebih fleksibel sesuai dengan variasi tingkat pemenuhan beban.

3.6.6.3 Fungsi Keanggotaan Tingkat Pemanfaatan Energi (Output)

Variabel tingkat pemanfaatan energi PLTS merupakan variabel keluaran (*output*) pada sistem Fuzzy Logic Mamdani yang digunakan untuk menunjukkan hasil keputusan Energy Management System (EMS) dalam mengevaluasi tingkat pemanfaatan energi PLTS terhadap kebutuhan beban. Nilai keluaran ini diperoleh setelah melalui proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi berdasarkan kombinasi nilai dari kedua variabel masukan.

Pada penelitian ini, fungsi keanggotaan variabel tingkat pemanfaatan energi dibentuk menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga (*triangular membership function*) yang terdiri atas tiga himpunan linguistik, yaitu Kurang Optimal, Optimal, dan Sangat Optimal. Penentuan parameter fungsi keanggotaan dilakukan berdasarkan domain keluaran yang telah ditetapkan sehingga mampu merepresentasikan tingkat pemanfaatan energi secara bertahap.

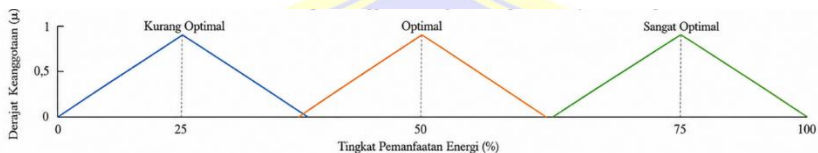
Parameter fungsi keanggotaan variabel tingkat pemanfaatan energi ditunjukkan pada Tabel 3.11.

Tabel 3.13 Fungsi Keanggotaan Output – Tingkat Pemanfaatan Energi

Himpunan Fuzzy	Parameter Fungsi Segitiga [a, b, c]	Domain (%)
Kurang Optimal	[0, 25, 50]	0 – 50
Optimal	[25, 50, 75]	25 – 75
Sangat Optimal	[50, 75, 100]	50 – 100

Berdasarkan Tabel 3.11, fungsi keanggotaan variabel tingkat pemanfaatan energi dibentuk menggunakan parameter fungsi segitiga [a, b, c]. Himpunan Kurang Optimal memiliki parameter [0, 25, 50], himpunan Optimal memiliki parameter [25, 50, 75], sedangkan himpunan Sangat Optimal memiliki parameter [50, 75, 100]. Parameter tersebut menunjukkan batas awal, titik puncak, dan batas akhir masing-masing fungsi keanggotaan yang digunakan untuk menghasilkan keluaran sistem.

Bentuk fungsi keanggotaan variabel tingkat pemanfaatan energi ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Fungsi Keanggotaan Output – Tingkat Pemanfaatan Energi

Berdasarkan Gambar 3.7, fungsi keanggotaan variabel tingkat pemanfaatan energi terdiri atas tiga himpunan linguistik yang saling beririsan (*overlap*), yaitu Kurang Optimal, Optimal, dan Sangat Optimal. Daerah irisan antarhimpunan memungkinkan hasil inferensi memiliki transisi yang lebih halus sehingga keluaran sistem dapat merepresentasikan tingkat pemanfaatan energi PLTS secara lebih adaptif terhadap perubahan kondisi daya keluaran dan rasio pemenuhan beban.

3.6.7 Basis Aturan (Rule Base)

Setelah fungsi keanggotaan untuk seluruh variabel selesai dirancang, tahap berikutnya adalah menyusun basis aturan (*rule base*) sebagai dasar pengambilan keputusan pada sistem Fuzzy Logic Mamdani. Basis aturan berfungsi untuk menghubungkan kedua variabel masukan, yaitu daya keluaran PLTS dan rasio pemenuhan beban, dengan variabel keluaran berupa tingkat pemanfaatan energi PLTS.

Pada penelitian ini, aturan fuzzy disusun dalam bentuk pernyataan IF–THEN. Setiap aturan merepresentasikan hubungan antara kondisi daya keluaran PLTS dan rasio pemenuhan beban sehingga menghasilkan keputusan tingkat pemanfaatan energi yang sesuai. Karena masing-masing

variabel masukan memiliki tiga himpunan linguistik, maka diperoleh sebanyak 9 kombinasi aturan yang digunakan dalam proses inferensi.

Basis aturan yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.12.

Tabel 3.14 Basis Aturan Fuzzy Logic Mamdani

Daya Keluaran PLTS	Rasio Pemenuhan Beban	Tingkat Pemanfaatan Energi
Rendah	Kurang	Kurang Optimal
Rendah	Cukup	Kurang Optimal
Rendah	Lebih	Optimal
Sedang	Kurang	Kurang Optimal
Sedang	Cukup	Optimal
Sedang	Lebih	Sangat Optimal
Tinggi	Kurang	Optimal
Tinggi	Cukup	Sangat Optimal
Tinggi	Lebih	Sangat Optimal

Berdasarkan Tabel 3.12, setiap aturan fuzzy dibentuk dari kombinasi himpunan linguistik pada kedua variabel masukan sehingga menghasilkan satu keputusan pada variabel keluaran. Seluruh aturan tersebut kemudian diimplementasikan ke dalam Fuzzy Inference System (FIS) sebagai dasar proses inferensi untuk menentukan tingkat pemanfaatan energi PLTS pada setiap interval waktu pengamatan.

3.6.8 Proses Inferensi dan Defuzzifikasi

Tahap terakhir dalam perancangan Energy Management System (EMS) adalah proses inferensi dan defuzzifikasi menggunakan metode Fuzzy Logic Mamdani. Tahap ini bertujuan untuk menghasilkan nilai keluaran berupa tingkat pemanfaatan energi PLTS berdasarkan nilai daya keluaran PLTS dan rasio pemenuhan beban yang telah melalui proses fuzzifikasi.

Proses inferensi dilakukan dengan mengevaluasi setiap nilai masukan terhadap seluruh aturan pada basis aturan (*rule base*) menggunakan mekanisme inferensi Mamdani. Hasil evaluasi berupa himpunan fuzzy keluaran yang kemudian diproses menggunakan metode defuzzifikasi centroid untuk memperoleh nilai keluaran dalam bentuk nilai tegas (*crisp output*). Nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai hasil keputusan sistem dalam menentukan tingkat pemanfaatan energi PLTS.

Tahapan proses inferensi dan defuzzifikasi pada penelitian ini dilakukan sebagai berikut.

1. Memasukkan nilai daya keluaran PLTS dan rasio pemenuhan beban sebagai variabel masukan.
2. Melakukan proses fuzzifikasi berdasarkan fungsi keanggotaan masing-masing variabel.
3. Mengevaluasi seluruh aturan fuzzy menggunakan metode inferensi Mamdani.
4. Menggabungkan hasil evaluasi aturan menjadi himpunan fuzzy keluaran.
5. Melakukan proses defuzzifikasi menggunakan metode **centroid** untuk memperoleh nilai keluaran (*crisp output*).
6. Menghasilkan nilai tingkat pemanfaatan energi PLTS sebagai keluaran sistem EMS.

Nilai keluaran yang diperoleh dari proses inferensi dan defuzzifikasi selanjutnya digunakan sebagai hasil keputusan sistem dalam mengevaluasi tingkat pemanfaatan energi PLTS selama periode simulasi. Tahapan tersebut mengakhiri proses perancangan Energy Management System (EMS) berbasis Fuzzy Logic Mamdani pada penelitian ini.

3.7 Contoh Perhitungan

a) Konversi DNI → Daya MPPT → Daya Inverter

$$P_{dc} = G \times A \times \eta \times F_k = 801,01 \times 21,582 \times 0,213 \times 0,85 = 3.129,9 \text{ W}$$
$$P_{ac} = P_{dc} \times \eta_{inv} = 3.129,9 \times 0,97 = 3.036,0 \text{ W}$$

b) Perhitungan Energi Harian

Jika $P_{ac} = 3.036\text{W}$ selama 1 jam pengamatan: $E = P \times t = 3,036\text{kWh}$.

c) Rasio Pemenuhan Beban

Pada jam kantin buka (08.00-16.00 WIB), beban tanggung jawab PLTS merupakan penjumlahan kelas PLTS Prioritas (925 W) dan kelas Bergantian (295 W):

$$P_{Tanggung\ PLTS} = 929 + 295 = 1.220 \text{ W}$$

Jika daya AC PLTS pada jam tersebut sebesar 3.036 W:

$$R = \frac{3.036}{1.220} \times 100\% = 248,9\% \rightarrow \text{dibatasi maksimum } 100\%$$

d) Fuzzifikasi & Inferensi Mamdani

Misal $P_{ac} = 2.900\text{W}$, Rasio = 60%:

- $\mu(\text{Sedang}) = 0,175$; $\mu(\text{Tinggi}) = 0,190$ (variabel daya)
- $\mu(\text{Cukup}) = 0,6$; $\mu(\text{Lebih}) = 0,4$ (variabel rasio)

Rule aktif (operator MIN):

- Sedang $\wedge$ Cukup → Optimal, $\alpha = \min(0,175; 0,6) = 0,175$
- Sedang $\wedge$ Lebih → Sangat Optimal, $\alpha = \min(0,175; 0,4) = 0,175$
- Tinggi $\wedge$ Cukup → Sangat Optimal, $\alpha = \min(0,190; 0,6) = 0,190$
- Tinggi $\wedge$ Lebih → Sangat Optimal, $\alpha = \min(0,190; 0,4) = 0,190$

Agregasi (operator MAX): Optimal = 0,175 ; Sangat Optimal = 0,190

Defuzzifikasi (ilustrasi pendekatan weighted-average dari centroid):

$$z^* \approx \frac{(0,175 \times 50) + (0,190 \times 75)}{0,175 + 0,190} \approx 63,0\%$$

e) Perhitungan Penghematan Biaya

Jika $E_{beban} = 28,880 \text{ kWh/hari}$, $E_{PLN} = 18,235 \text{ kWh/hari}$ (hari ke-1, Tabel 4.5), tarif $T = \text{Rp}1.444,70/\text{kWh}$:

$$C_{PLN} = 18,235 \times 1.444,70 = \text{Rp}26.344,10$$

$$C_{TanpaPLTS} = 28,880 \times 1.444,70 = \text{Rp}41.722,94$$

$$S = 41.722,94 - 26.344,10 = \text{Rp}15.378,83$$

3.8 Skenario pengujian dan analisis

Tahapan skenario pengujian dan analisis pada penelitian ini dirancang untuk memvalidasi model sistem serta mengevaluasi performa Energy Management System (EMS) berbasis Fuzzy Logic Mamdani dalam menentukan tingkat pemanfaatan energi PLTS terhadap kebutuhan beban Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya. Pengujian dilakukan melalui beberapa skenario untuk memastikan kesesuaian model yang dikembangkan serta mengetahui kinerja sistem pada kondisi kebutuhan energi yang berbeda.

3.8.1 Pengujian Validitas Matematis Hasil Konversi Iradiasi

Skenario pertama difokuskan untuk menguji tingkat validitas matematis hasil konversi data iradiasi matahari (Direct Normal Irradiation/DNI) yang diperoleh dari basis data Global Solar Atlas (GSA) menjadi daya keluaran PLTS. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan matematis terhadap spesifikasi teknis sistem PLTS berkapasitas 4.500 Wp yang digunakan pada penelitian.

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa model konversi yang digunakan mampu menghasilkan nilai daya yang masih berada dalam batas operasional sistem sehingga dapat digunakan sebagai data masukan pada simulasi Energy Management System (EMS). Dengan demikian, potensi kesalahan pemodelan berupa over-estimation maupun under-estimation dapat diminimalkan sebelum proses simulasi dilakukan.

3.8.2 Pengujian Kinerja Sistem pada Kondisi Beban Eksisting

Skenario kedua dilakukan menggunakan data beban aktual Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya yang diperoleh dari hasil inventarisasi peralatan listrik. Pada skenario ini, sistem EMS berbasis Fuzzy Logic Mamdani diuji menggunakan kombinasi data daya keluaran PLTS dan kebutuhan beban kantin selama periode simulasi satu bulan.

Pengujian dilakukan untuk mengetahui tingkat pemanfaatan energi PLTS dalam memenuhi kebutuhan beban listrik kantin pada kondisi operasional normal. Selain itu, dilakukan analisis terhadap rasio pemenuhan beban, tingkat reduksi penggunaan energi listrik dari jaringan PLN, serta potensi penghematan biaya listrik yang diperoleh dari pemanfaatan energi PLTS.

3.8.3 Pengujian Kinerja Sistem pada Kondisi Peningkatan Beban

Skenario ketiga dilakukan dengan mensimulasikan kondisi peningkatan kebutuhan energi listrik sebagai representasi perkembangan aktivitas operasional kantin di masa mendatang. Pada skenario ini, kapasitas beban ditingkatkan dari kondisi eksisting sebesar 3020 W menjadi 5000 W untuk mengevaluasi kemampuan sistem *Energy Management System* (EMS) berbasis *Fuzzy Logic Mamdani* dalam mengelola pemanfaatan energi PLTS pada kondisi kebutuhan daya yang lebih tinggi. Nilai beban 5000 W dipilih sebagai skenario peningkatan yang representatif untuk menggambarkan kemungkinan pertumbuhan konsumsi energi di masa mendatang sekaligus menguji respons sistem terhadap perubahan kebutuhan daya yang signifikan.

Hasil simulasi pada skenario penambahan beban kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi pada kondisi eksisting. Analisis dilakukan untuk mengetahui perubahan tingkat pemenuhan kebutuhan energi, pemanfaatan energi PLTS, penggunaan energi listrik dari jaringan PLN, serta potensi penghematan biaya listrik yang dapat dicapai oleh sistem pada masing-masing kondisi operasi.

3.9 Analisis Investasi Sistem PLTS

Tabel 3.15 *Estimasi Biaya Investasi Sistem PLTS On-Grid 4.500 Wp*

No	Komponen	Spesifikasi	Estimasi Biaya (Rp)
1	Panel Surya	Monocrystalline 500 Wp × 9 unit	18.000.000
2	Inverter On-Grid	On-grid, kapasitas 5 kW (keluaran efektif ±4.365 W, η 97%)	15.000.000
3	Struktur Mounting	Rooftop bracket, tilt 10–12°	5.000.000
4	Kabel & BOS	Kabel DC/AC, connector, proteksi	5.000.000
5	Instalasi & Commissioning	Jasa pemasangan dan pengujian	7.000.000
	Total Investasi		50.000.000

Perhitungan payback period menggunakan Persamaan 2.19:

$$PP = \frac{I_{total}}{S_{tahunan}}$$

Contoh perhitungan (skenario beban aktual):
Berdasarkan Tabel 4.11, proyeksi penghematan tahunan pada skenario beban aktual adalah Rp4.572.704,24, sehingga:

$$PP = 50.000.000 / 4.572.704,24 \approx 10,94 \text{ tahun}$$

Pada skenario peningkatan beban, proyeksi penghematan tahunan adalah Rp6.498.536,04:

$$PP = 50.000.000 / 6.498.536,04 \approx 7,69 \text{ tahun}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa investasi PLTS akan kembali lebih cepat pada skenario peningkatan beban, karena kebutuhan energi yang lebih besar menyebabkan penghematan absolut terhadap biaya PLN juga meningkat, meskipun kontribusi *persentase* PLTS terhadap total beban menurun (35,53% dibanding 37,59%).