

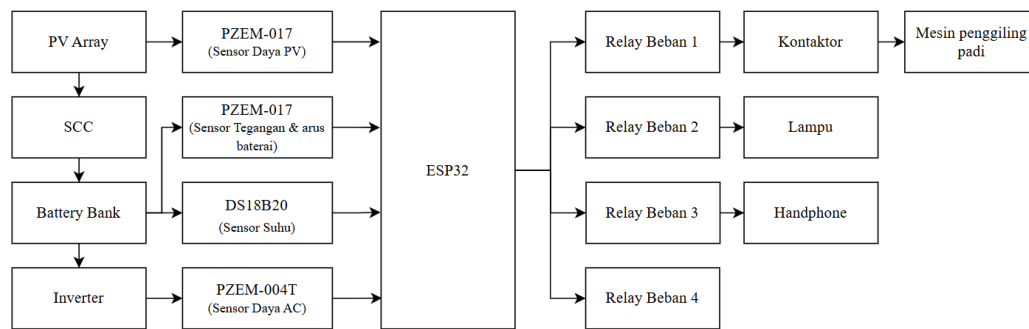
BAB 3

DESAIN DAN IMPLEMENTASI

3.1 Konsep Desain

Konsep desain sistem pada tugas akhir ini berfokus pada pengelolaan energi PLTS off-grid menggunakan logika fuzzy yang diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32. Sistem dirancang untuk memantau kondisi panel surya, baterai, dan beban secara real-time, kemudian menentukan mode operasi berdasarkan selisih daya serta menentukan level beban aktif menggunakan Fuzzy Logic Controller. Energi listrik dari PV array disalurkan menuju Solar Charge Controller (SCC) untuk mengatur pengisian battery bank. Daya dari baterai kemudian diteruskan ke inverter untuk menyuplai beban AC. Parameter daya AC pada sisi beban diukur menggunakan sensor PZEM-004T, sedangkan tegangan, arus, dan daya DC pada sisi panel surya serta baterai dipantau menggunakan sensor PZEM-017. Data tegangan dan arus baterai digunakan untuk memperkirakan nilai State of Charge (SoC) secara hybrid, yaitu dengan pendekatan tegangan baterai sebagai acuan awal dan Coulomb Counting sebagai metode pembaruan SoC. Selain itu, sensor DS18B20 digunakan untuk memantau suhu baterai.

Seluruh data hasil pengukuran diproses oleh ESP32 untuk menjalankan algoritma fuzzy berdasarkan variabel daya PV, daya beban, dan SoC baterai. Keluaran fuzzy digunakan untuk menentukan level beban aktif, sedangkan mode operasi ditentukan secara terpisah berdasarkan selisih antara daya PV dan daya beban. Relay pada masing-masing jalur beban kemudian dikendalikan untuk mengatur penyalan dan pemutusan beban sesuai kondisi energi yang tersedia. Dengan pendekatan ini, distribusi daya pada sistem PLTS off-grid dapat diatur secara adaptif, terutama ketika daya PV rendah atau kondisi baterai mulai menurun. Gambar 3.1 menunjukkan alur interaksi antar komponen sistem sebagai dasar perancangan perangkat keras dan perangkat lunak.



Gambar 3. 1 Blok Diagram Konsep Desain Sistem Manajemen Energi

3.2 Kondisi Eksisting PLTS

Sistem PLTS yang digunakan sebagai lokasi pemasangan prototipe EMS merupakan sistem off-grid yang sudah beroperasi untuk memenuhi kebutuhan energi peralatan pertanian. Berdasarkan observasi lapangan, beban utama yang disuplai meliputi mesin penggiling padi, lampu dan charger handphone. Berdasarkan hasil monitoring, beban ringan pada malam hari berada pada kisaran sekitar 27–50 W. Nilai tersebut diduga berasal dari penggunaan lampu dan tambahan beban kecil seperti charger handphone. Pada estimasi kebutuhan energi harian, lampu diasumsikan memiliki daya sekitar 27 W karena nilai tersebut muncul cukup stabil pada malam hari, sedangkan charger handphone diasumsikan memiliki daya 18 W. Selain itu, hasil monitoring juga menunjukkan bahwa daya mesin penggiling padi dapat mencapai sekitar 1.849,3 W saat beroperasi. Oleh karena itu, daya mesin penggiling padi pada estimasi kebutuhan energi harian dibulatkan dan diasumsikan sebesar 2.000 W untuk memberikan batas perhitungan yang lebih aman. Estimasi kebutuhan energi harian ditampilkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Beban Listrik pada Sistem PLTS Eksisting

No	Peralatan Listrik	Jumlah	Daya (W)	Durasi Operasi (jam/hari)	Energi per Hari (Wh)
1	Mesin penggiling padi	1 unit	2000	1,5	3000
2	Lampu	1 unit	27	11,5	310,5
3	Handphone	1 unit	18	3	54
Total energi harian					3.364,5 Wh

PLTS eksisting memiliki kapasitas array sekitar 3,85 kWp (7 modul @ 550 Wp) dengan bank baterai 48 V yang disusun dari 8 unit VRLA 12 V 200 Ah dalam konfigurasi 4S2P, menghasilkan kapasitas penyimpanan sekitar $\pm 19,2$ kWh. Sistem juga dilengkapi inverter satu fasa berkapasitas ± 5 –6 kW untuk melayani beban AC.

Tabel 3. 2 Konfigurasi Sistem PLTS Eksisting

No	Komponen	Spesifikasi Utama
1	Panel surya	7 modul @ 550 Wp $\rightarrow \pm 3,85$ kWp
2	Baterai VRLA	12 V 200 Ah $\times$ 8 unit
3	Kapasitas total baterai	$\pm 19,2$ kWh (48 V $\times$ 400 Ah)
4	Inverter	48 VDC $\rightarrow$ 220 VAC, kapasitas ± 5 –6 kW
5	Charge Controller	Tegangan kerja 48 V

Dari kondisi tersebut, sistem PLTS telah memiliki kapasitas pembangkitan dan penyimpanan energi yang cukup untuk menyuplai beban di lokasi penelitian. Namun, pengoperasian beban masih dilakukan secara manual dan belum mempertimbangkan kondisi baterai, daya PV, serta konsumsi beban secara real-time. Kondisi ini menjadi dasar pengembangan EMS berbasis logika fuzzy agar distribusi energi dapat diatur lebih terkontrol sesuai prioritas beban dan ketersediaan energi aktual pada sistem PLTS off-grid.

3.2.1 Analisis Kapasitas Baterai pada Sistem PLTS Eksisting

Sistem PLTS yang digunakan pada penelitian ini menggunakan bank baterai VRLA dengan tegangan nominal 48 V dan kapasitas 400 Ah. Spesifikasi tersebut merupakan bagian dari sistem PLTS eksisting yang telah tersedia sebelum penelitian dilakukan. Oleh karena itu, dilakukan verifikasi untuk mengetahui kesesuaian kapasitas baterai terhadap kebutuhan energi beban. Penggunaan sistem baterai dengan tegangan 48 V dipilih pada PLTS eksisting untuk mengurangi arus yang mengalir pada sistem ketika menyuplai beban berdaya relatif besar. Berdasarkan Persamaan (2.1), semakin tinggi tegangan sistem maka arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan daya yang sama akan semakin kecil. Sebagai contoh, mesin penggiling padi dengan daya 2.000 W memerlukan arus sekitar 41,67 A pada sistem 48 V, sedangkan pada sistem 24 V arus yang dibutuhkan mencapai 83,33 A. Arus yang lebih kecil akan mengurangi rugi-rugi daya pada penghantar

serta meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem dalam mengoperasikan beban utama.

Berdasarkan Tabel 3.1, total kebutuhan energi harian sistem sebesar 3.364,5 Wh/hari atau 3,36 kWh/hari. Dengan demikian, kapasitas energi baterai sekitar 5,7 kali lebih besar dibandingkan kebutuhan energi harian beban.

$$\frac{19.200}{3.364,5} = 5,71$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kapasitas baterai 48 V 400 Ah pada sistem PLTS eksisting masih memadai untuk memenuhi kebutuhan energi harian beban serta menyediakan cadangan energi ketika produksi daya panel surya menurun. Oleh karena itu, kapasitas baterai yang tersedia dinilai sesuai untuk mendukung implementasi sistem manajemen energi pada penelitian ini.

3.3 Spesifikasi Teknis

Bagian ini menjelaskan perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software) yang digunakan dalam perancangan sistem manajemen energi PLTS off-grid. Setiap komponen memiliki fungsi spesifik dalam proses pengukuran, pemrosesan data, hingga pengendalian beban. Deskripsi singkat dan spesifikasi dasar ditampilkan agar keterkaitan antarperangkat dapat dipahami secara menyeluruh.

3.3.1 Mikrokontroler ESP32

ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali untuk memproses data sensor dan menjalankan logika fuzzy. Mikrokontroler ini dipilih karena memiliki konektivitas wireless, ADC internal, dan kemampuan komputasi yang memadai untuk pengolahan data real-time.

Tabel 3. 3 Spesifikasi ESP32

Parameter	Spesifikasi
Arsitektur	Dual-core 32-bit
GPIO	±34 pin
ADC	12-bit
Komunikasi	Wi-Fi 2.4 GHz, Bluetooth BLE

(Sumber: Datasheet ESP32, 2016)

3.3.2 PZEM-017 (Sensor Daya DC)

PZEM-017 digunakan sebagai sensor pengukuran parameter listrik pada sisi DC sistem PLTS off-grid. Sensor ini mampu mengukur tegangan dan arus DC sehingga dapat digunakan untuk memantau kondisi daya pada panel surya dan baterai. Pada sistem ini, PZEM-017 dipasang pada jalur keluaran panel surya untuk memperoleh informasi daya PV, serta pada jalur baterai untuk mengukur tegangan dan arus baterai. Data arus baterai digunakan sebagai input metode Coulomb Counting untuk menghitung nilai State of Charge (SoC).

Tabel 3. 4 Spesifikasi Utama PZEM-017

Parameter	Spesifikasi Utama
Besaran terukur	Tegangan, arus, daya, energi
Rentang tegangan	0–300 V DC
Rentang arus	0–50/100/200/300 A (dengan shunt)
Akurasi	$\pm 1\%$
Metode pengukuran arus	Shunt resistor eksternal
Komunikasi	RS-485 (Modbus RTU)
Catu daya	5 V USB / 7–30 V terminal eksternal

(Sumber: Datasheet PZEM-017).

3.3.3 DS18B20

Pada penelitian ini, sensor DS18B20 digunakan untuk memantau suhu baterai sebagai indikator kondisi termal baterai dan sebagai parameter pendukung dalam sistem manajemen energi. Berdasarkan datasheet, sensor ini mampu mengukur suhu pada rentang -55°C hingga $+125^{\circ}\text{C}$ dengan akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pada kisaran penggunaan umum.

Tabel 3. 5 Spesifikasi Utama Sensor DS18B20

Parameter	Spesifikasi Utama
Rentang suhu kerja	-55°C sampai $+125^{\circ}\text{C}$
Akurasi	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (-10°C hingga $+85^{\circ}\text{C}$)
Resolusi	9–12 bit
Antarmuka	1-Wire digital
Tegangan kerja	3.0–5.5 V
Bentuk kemasan	TO-92, waterproof probe

(Sumber: Datasheet DS18B20).

3.3.4 Sensor PZEM-004T

PZEM digunakan untuk mengukur parameter listrik pada sisi AC, termasuk tegangan, arus, daya aktif, dan energi konsumsi.

Tabel 3. 6 Spesifikasi Dasar Sensor PZEM-004T

Parameter	Spesifikasi
Tegangan kerja	5 V DC
Rentang tegangan	80–260 V AC
Rentang arus	0–10 A (shunt) / 0–100 A (CT eksternal)
Rentang daya aktif	0–2.3 kW (10 A) / 0–23 kW (100 A)
Frekuensi	45–65 Hz
Faktor daya	0.00–1.00
Resolusi	Tegangan 0.1 V; Arus 0.001 A; Daya 0.1 W

(Sumber: Manual, n.d.)

3.3.5 Modul Relay

Relay berfungsi untuk mengendalikan beban berdasarkan keputusan fuzzy. Sistem menggunakan tiga relay untuk mengatur beban prioritas tinggi, sedang, dan rendah.

Tabel 3. 7 Spesifikasi Relay Modul

Parameter	Spesifikasi
Tegangan kendali	5 V DC
Jenis relay	Elektromekanis
Konfigurasi kontak	SPDT
Jumlah relay	3 buah
Fungsi	Switching beban
Kendali	ESP32
Aplikasi	Beban AC / DC

3.3.6 Power Supply

Power supply digunakan sebagai sumber tegangan DC untuk menyuplai kebutuhan sistem kontrol pada prototipe EMS. Pada penelitian ini, power supply yang digunakan merupakan switching power supply dengan keluaran 5 VDC dan arus maksimum 6 A, sehingga dapat digunakan untuk menyuplai ESP32, relay, serta perangkat pendukung sistem IoT. Spesifikasi power supply ditampilkan pada Tabel 3.8.

Tabel 3. 8 Datasheet Power Supply

Parameter	Spesifikasi
Jenis power supply	Switching power supply
Model	Jaring / rongga besi
Tegangan input	110 / 220 VAC $\pm 15\%$
Tegangan output	5 VDC
Arus output maksimum	6 A
Daya maksimum	30 W
Dimensi	11 $\times$ 8 $\times$ 3,5 cm
Fungsi	Menyuplai tegangan DC untuk sistem kontrol

3.3.7 Kontaktor

Kontaktor digunakan sebagai saklar utama untuk menghubungkan dan memutuskan suplai daya menuju beban motor, yaitu mesin penggiling padi. Pemilihan kontaktor dilakukan berdasarkan arus kerja beban. Berdasarkan hasil monitoring, daya mesin penggiling padi mencapai 1.849,3 W, sehingga pada perhitungan dibulatkan menjadi 2.000 W sebagai batas aman. maka arus kerja beban dapat dihitung sebagai berikut:

Dengan:

- $P = 2000 \text{ W}$
- $V = 220 \text{ V}$
- $\cos\phi = 0,9$

Maka:

$$I = \frac{P}{V \times \cos\phi}$$

$$I = \frac{2000}{220 \times 0,9}$$

$$I = \frac{2000}{198}$$

$$I = 10,1 \text{ A}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, arus kerja normal mesin penggiling padi adalah sekitar 10,1 A. Karena beban yang digunakan berupa motor, maka saat starting arus dapat meningkat sekitar 2–3 kali dari arus normal. Dengan demikian, perkiraan arus starting motor adalah:

$$I_{starting} = 3 \times I$$

$$I_{starting} = 3 \times 10,1$$

$$I_{starting} = 30,3 \text{ A}$$

Meskipun arus starting dapat mencapai sekitar 30,3 A, kondisi tersebut hanya terjadi sesaat ketika motor mulai beroperasi. Oleh karena itu, kontaktor 12 A masih dapat digunakan untuk mengendalikan beban motor dengan arus kerja normal sekitar 10,1 A.

Tabel 3. 9 Spesifikasi Utama Kontaktor

Parameter	Spesifikasi
Merek / Tipe	ABB A12-30-01
Tegangan koil	220 VAC
Rating arus	12 A
Kategori penggunaan	AC-3
Kontak utama	3 pole
Kontak bantu	1 NC
Fungsi	Saklar utama beban motor

3.3.8 Miniature Circuit Breaker (MCB) Keluaran Inverter

MCB keluaran inverter digunakan sebagai pengaman pada jalur keluaran inverter sebelum daya didistribusikan ke kontaktor dan beban. Komponen ini berfungsi untuk memutus aliran listrik apabila terjadi arus lebih atau hubung singkat sehingga inverter dan peralatan yang terhubung dapat terlindungi dari kerusakan. Pada sistem ini digunakan MCB 16 A pada jalur keluaran inverter. Rating tersebut dipilih karena sesuai dengan kebutuhan arus beban dan kapasitas rangkaian yang dilindungi, sehingga proteksi terhadap arus lebih dan hubung singkat dapat bekerja secara efektif.

Tabel 3. 10 Spesifikasi MCB Keluaran Inverter

Parameter	Spesifikasi
Merek / Tipe	Schneider C60H
Jumlah pole	2P
Arus nominal	16 A
Kurva trip	C Curve
Fungsi	Proteksi jalur kontaktor

3.3.9 MCB 6 A pada Jalur Soket Beban Ringan

MCB digunakan sebagai pengaman pada masing-masing jalur soket beban ringan. Pada sistem ini digunakan 3 buah MCB berkapasitas 6 A yang dipasang pada setiap jalur soket, sehingga apabila terjadi gangguan pada salah satu beban, jalur tersebut dapat terputus tanpa langsung memengaruhi jalur beban lainnya. Beban ringan yang digunakan pada sistem ini adalah lampu dan charger handphone.

Dengan tegangan kerja sebesar 220 V dan faktor daya diasumsikan 0,9.

1. Arus beban lampu

$$I = \frac{27}{220 \times 0,9}$$

$$I = \frac{27}{198}$$

$$I = 0,136A$$

2. Arus beban charger handphone

$$I = \frac{18}{220 \times 0,9}$$

$$I = \frac{18}{198}$$

$$I = 0,091A$$

Berdasarkan hasil perhitungan, arus beban lampu sebesar 0,136 A dan arus charger handphone sebesar 0,091 A. Nilai tersebut masih berada di bawah rating MCB 6 A, sehingga MCB 6 A dapat digunakan sebagai pengaman pada masing-masing jalur soket beban ringan. Penggunaan MCB pada tiap jalur memudahkan proses pemutusan dan pemeriksaan apabila terjadi gangguan pada salah satu beban.

Tabel 3. 11 Spesifikasi MCB 6A

Parameter	Spesifikasi
Jenis	Miniature Circuit Breaker (MCB)
Merek/Tipe	Merlin Gerin Multi9 C32N ABB SH201L E-T-A 4230-T110
Jumlah pole	1 pole
Arus nominal	6 A
Tegangan kerja	230/400 VAC

3.3.10 MCB 2 A pada Jalur Power Supply

MCB 2 A digunakan sebagai pengaman pada jalur suplai power supply 220 VAC ke 5 VDC. Power supply ini berfungsi untuk menyuplai tegangan DC ke sistem kontrol, seperti ESP32, modul relay, dan sensor-sensor pada sistem IoT. Pemasangan MCB 2 A bertujuan untuk memutus aliran listrik menuju power supply apabila terjadi arus lebih atau gangguan hubung singkat pada rangkaian kontrol. Power supply yang digunakan memiliki spesifikasi keluaran sebesar 5 VDC dengan arus maksimum 6 A, sehingga daya keluaran maksimum dapat dihitung sebagai berikut:

$$P = V \times I$$

$$P = 5 \times 6$$

$$P = 30 \text{ W}$$

Arus input power supply pada sisi AC dapat diperkirakan menggunakan persamaan:

$$I = \frac{P}{V \times \cos \phi}$$

$$I = \frac{30}{220 \times 0,9}$$

$$I = \frac{30}{198}$$

$$I = 0,152 \text{ A}$$

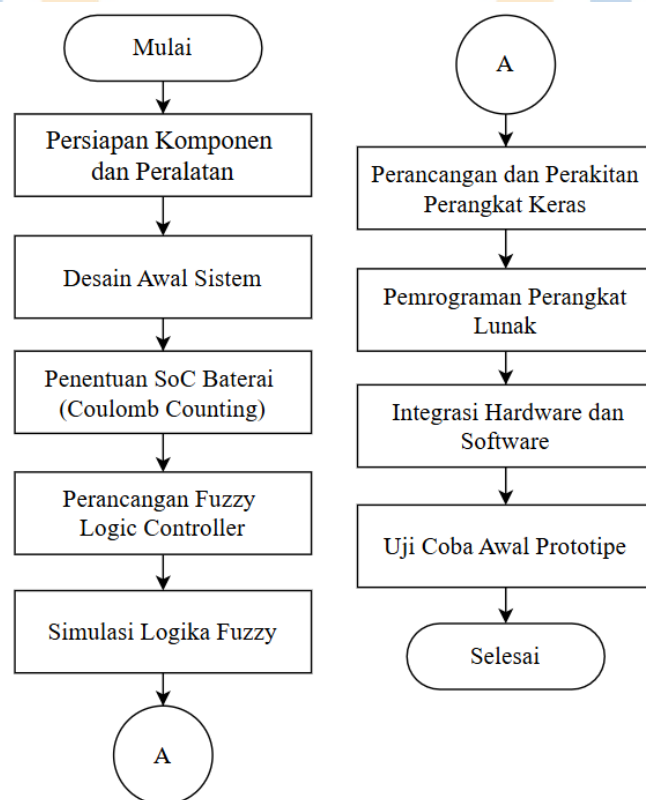
Berdasarkan hasil perhitungan, arus input power supply diperkirakan sebesar 0,152 A. Nilai tersebut masih jauh di bawah rating MCB 2 A, sehingga MCB 2 A mencukupi untuk digunakan sebagai proteksi pada jalur suplai power supply. Dengan adanya MCB ini, sistem kontrol memiliki proteksi tersendiri dan dapat diputus secara terpisah dari jalur beban utama maupun jalur stopkontak.

Tabel 3. 12 Spesifikasi MCB 2A

Parameter	Spesifikasi
Merek	Zenith
Jumlah pole	1 phase / single pole
Tegangan kerja	220 / 440 VAC
Arus nominal	2 A
Breaking capacity	6 kA

3.4 Tahapan Pembuatan Prototipe

Bagian ini menjelaskan langkah-langkah pembuatan prototipe sistem manajemen energi secara berurutan. Tahapan dilakukan mulai dari persiapan komponen, penyusunan desain awal, perancangan fuzzy beserta simulasinya, hingga perakitan perangkat keras, pemrograman, integrasi, dan uji coba awal. Setiap langkah dirancang agar proses perancangan sistem berjalan sistematis dan menghasilkan prototipe yang berfungsi sesuai kebutuhan.



Gambar 3. 2 Diagram Alir Tahapan Pembuatan Prototipe

3.4.1 Persiapan Komponen dan Peralatan

Tahap ini meliputi pemilihan dan pengecekan awal seluruh komponen yang akan digunakan, seperti ESP32, sensor PZEM-017, sensor PZEM-004T, modul relay, power supply, kontaktor serta MCB. Proses ini memastikan bahwa seluruh komponen berada dalam kondisi baik sebelum dirakit pada prototipe.

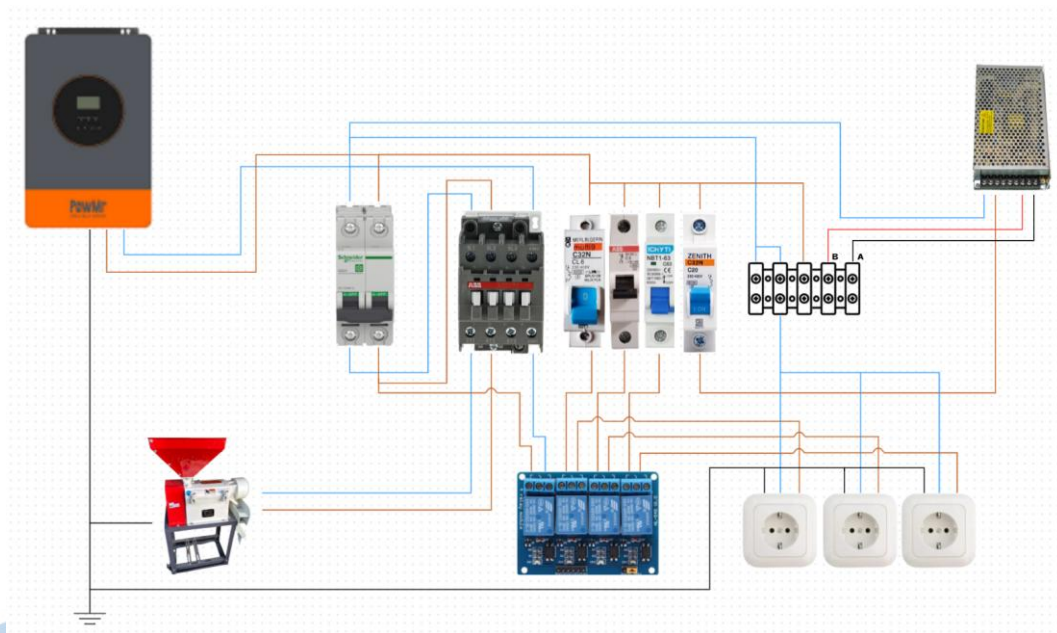
3.4.2 Desain Awal Sistem

Pada tahap ini disusun wiring diagram sistem sebagai acuan dalam proses perakitan perangkat keras. Wiring diagram menggambarkan hubungan antar komponen pada sistem, baik pada bagian pengaturan dan proteksi beban maupun pada bagian sistem IoT. Diagram ini digunakan untuk memastikan setiap komponen terhubung sesuai fungsi dan kebutuhan sistem.

1.) Wiring Sistem Pengaturan dan Proteksi Beban

Wiring sistem pengaturan dan proteksi beban ditunjukkan pada Gambar 3.3. Sistem ini dirancang untuk mengatur distribusi daya listrik sekaligus memberikan proteksi terhadap beban yang digunakan. Pada bagian awal, keluaran dari inverter dihubungkan ke Miniature Circuit Breaker (MCB) sebagai proteksi utama terhadap arus lebih dan hubung singkat. MCB ini kemudian terhubung ke kontaktor berkapasitas 25 A yang berfungsi sebagai saklar utama untuk menghidupkan dan mematikan beban utama, yaitu mesin penggiling padi. Pengoperasian kontaktor dikendalikan oleh modul relay yang terhubung dengan ESP32, sehingga kerja motor dapat dikontrol secara otomatis sesuai kondisi sistem.

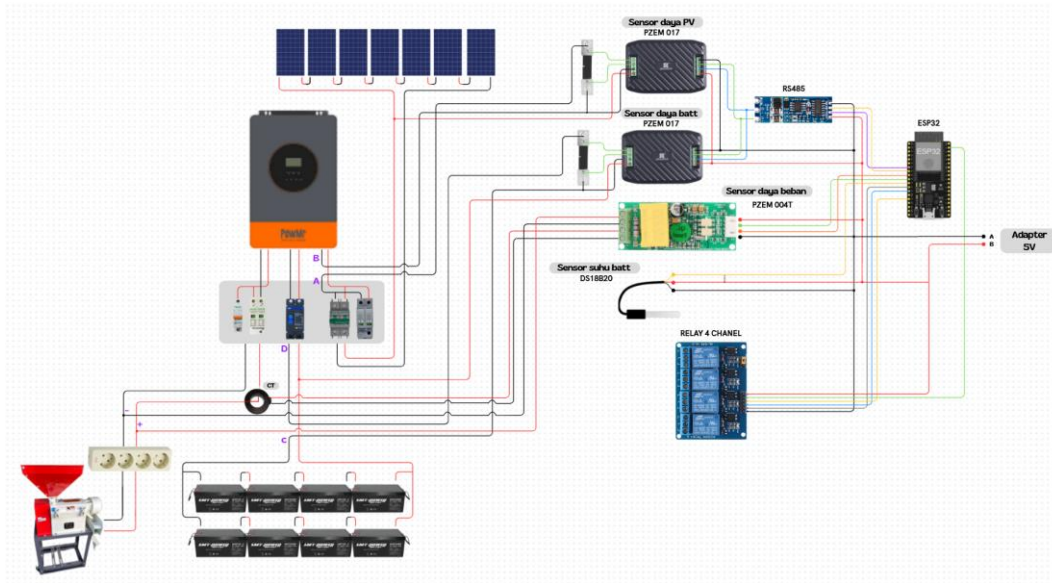
Pada jalur distribusi beban ringan, digunakan tiga buah Miniature Circuit Breaker (MCB) berkapasitas 6 A yang masing-masing terhubung ke stopkontak. MCB tersebut berfungsi sebagai proteksi individual pada setiap jalur beban, seperti lampu, charger handphone, dan jalur beban cadangan. Penggunaan MCB individual bertujuan untuk meningkatkan keamanan sistem, sehingga apabila terjadi arus lebih atau gangguan hubung singkat pada salah satu jalur beban, pemutusan hanya terjadi pada jalur tersebut tanpa mengganggu jalur beban lainnya. Setiap stopkontak dikendalikan melalui modul relay 4 channel yang terhubung dengan ESP32, sehingga sistem dapat menyalakan atau mematikan beban berdasarkan keputusan kendali. Selain itu, digunakan MCB berkapasitas 2 A sebagai proteksi pada jalur suplai power supply 220 VAC ke 5 VDC. Power supply ini berfungsi untuk menyuplai tegangan DC ke sistem kontrol, terutama ESP32, modul relay, dan sensor-sensor pada sistem IoT.



Gambar 3. 3 Wiring Sistem Pengaturan dan Proteksi Beban

2.) Wiring Sistem IoT pada PLTS

Wiring sistem IoT pada PLTS ditunjukkan pada Gambar 3.4. Sistem ini dirancang untuk melakukan monitoring parameter listrik pada PLTS off-grid secara real-time. Pada sisi pembangkitan, panel surya berfungsi sebagai sumber energi utama yang terhubung ke Solar Charge Controller (SCC), baterai, dan inverter sebagai bagian dari sistem penyimpanan serta penyaluran energi. Pemantauan daya panel surya dilakukan menggunakan sensor PZEM-017 yang dipasang pada jalur keluaran panel surya untuk membaca tegangan, arus, dan daya PV. Sensor PZEM-017 lainnya dipasang pada sisi baterai untuk membaca tegangan, arus, dan daya baterai. Data dari sensor baterai digunakan untuk membantu estimasi State of Charge (SoC) dan mengetahui kondisi charge maupun discharge baterai. Pada sisi beban AC, sensor PZEM-004T digunakan untuk membaca tegangan, arus, daya, dan faktor daya beban. Komunikasi sensor PZEM-017 dengan ESP32 menggunakan protokol RS485 melalui modul konverter MAX485, sedangkan PZEM-004T menggunakan komunikasi serial TTL. Selain itu, sensor DS18B20 dipasang pada baterai untuk memantau suhu sebagai parameter tambahan. Seluruh data dari sensor dikirimkan ke ESP32 untuk diproses sebagai dasar monitoring dan pengambilan keputusan pada sistem EMS berbasis logika fuzzy.



Gambar 3. 4 Wiring Sistem IoT pada PLTS

3.4.3 Penentuan SoC Baterai Berbasis Tegangan dan Coulomb Counting

Penentuan nilai State of Charge (SoC) baterai pada sistem ini dilakukan menggunakan metode Coulomb Counting hybrid berbasis tegangan. Metode Coulomb Counting digunakan sebagaimana dijelaskan pada Bab 2 dengan mengacu pada Persamaan (2.2), yaitu berdasarkan akumulasi arus baterai terhadap waktu. Namun, pada sistem ini tegangan baterai juga digunakan sebagai acuan awal dan pendukung dalam menentukan kondisi baterai.

Pada saat sistem pertama kali dinyalakan, nilai SoC awal ditentukan berdasarkan tegangan baterai 48 V dengan pendekatan Open Circuit Voltage (OCV). Tegangan baterai yang terbaca dibandingkan dengan hubungan tegangan dan kapasitas baterai, sehingga diperoleh nilai estimasi awal SoC. Apabila tegangan baterai berada di atas batas tegangan penuh, maka nilai SoC awal dibatasi sebesar 100%. Setelah nilai SoC awal diperoleh, pembaruan SoC dilakukan menggunakan metode Coulomb Counting. Arus baterai dibaca secara real-time menggunakan sensor PZEM-017 yang dipasang pada jalur DC baterai, kemudian diproses oleh ESP32 secara periodik. Karena sensor PZEM-017 tidak dapat menentukan arah arus secara langsung, maka perubahan tegangan baterai digunakan untuk membantu menentukan apakah baterai sedang dalam kondisi charge atau discharge.

Pada saat baterai mengalami charge, arus dianggap bernilai positif sehingga nilai SoC bertambah. Sebaliknya, pada saat baterai mengalami discharge, arus dianggap bernilai negatif sehingga nilai SoC berkurang. Dengan demikian, tegangan baterai berperan sebagai acuan awal dan pendukung penentuan arah arus, sedangkan Coulomb Counting digunakan untuk memperbarui nilai SoC selama sistem beroperasi. Nilai SoC yang diperoleh kemudian dibatasi pada rentang 0–100% agar tetap sesuai dengan batas kapasitas baterai.

3.4.4 Sistem Proteksi Suhu Baterai

Sistem proteksi suhu baterai diperlukan untuk menjaga keamanan dan keandalan operasi baterai VRLA pada sistem PLTS off-grid. Berdasarkan karakteristik baterai VRLA, rentang suhu operasi yang direkomendasikan berada pada -15°C hingga 50°C . Operasi pada suhu yang melebihi batas tersebut dapat menyebabkan penurunan performa, mempercepat degradasi baterai, serta meningkatkan risiko kerusakan.

Pada penelitian ini, suhu baterai dipantau secara kontinu menggunakan sensor DS18B20. Untuk meningkatkan faktor keamanan dalam pengoperasian nyata di lapangan, batas suhu proteksi ditetapkan lebih rendah dari batas maksimum datasheet, yaitu $T_{\text{high}} = 45^{\circ}\text{C}$ sebagai *safety margin* sebelum mencapai suhu maksimum 50°C . Apabila suhu baterai memenuhi kondisi $T_{\text{bat}} \geq 45^{\circ}\text{C}$, maka sistem akan mengaktifkan mode proteksi, dengan tindakan sebagai berikut:

- Membatasi atau menghentikan proses discharge baterai,
- Melepaskan beban non-prioritas untuk mengurangi beban kerja baterai.

Sebaliknya, apabila suhu baterai berada di bawah batas tersebut, sistem akan beroperasi secara normal dan proses pengambilan keputusan dilanjutkan menggunakan sistem logika fuzzy. Dengan penerapan proteksi suhu ini, baterai VRLA dapat dioperasikan secara lebih aman tanpa mengganggu kinerja sistem manajemen energi.

3.4.5 Penentuan Mode Operasi Berdasarkan Selisih Daya

Penentuan mode operasi sistem dilakukan untuk mengetahui kondisi aliran energi pada sistem PLTS off-grid. Pada penelitian ini, mode operasi ditentukan berdasarkan selisih antara daya yang dihasilkan panel surya dan daya yang digunakan oleh beban. Pemisahan ini dilakukan agar mode operasi dapat menggambarkan kondisi energi aktual secara lebih tepat, sedangkan sistem fuzzy difokuskan untuk menentukan level beban aktif. Selisih daya antara daya PV dan daya beban dihitung menggunakan persamaan 2.5

Apabila nilai P_{net} bernilai negatif, maka daya PV belum mampu memenuhi kebutuhan beban, sehingga kekurangan daya disuplai oleh baterai. Pada kondisi ini, sistem berada pada mode Discharge. Apabila daya PV mampu memenuhi kebutuhan beban dan masih terdapat sisa daya, maka sistem berada pada mode Charge selama baterai belum mencapai kondisi penuh. Sementara itu, apabila daya PV dapat memenuhi kebutuhan beban tetapi baterai sudah berada pada kondisi penuh atau mendekati penuh, maka sistem berada pada mode Supply.

Penentuan mode operasi pada sistem ini adalah sebagai berikut:

1. Jika $PPV < P_{beban}$, maka sistem berada pada mode Discharge.
2. Jika $PPV \geq P_{beban}$ dan $SoC < 95\%$, maka sistem berada pada mode Charge.
3. Jika $PPV \geq P_{beban}$ dan $SoC \geq 95\%$, maka sistem berada pada mode Supply.

Mode Discharge menunjukkan bahwa baterai berperan dalam menyuplai beban karena daya PV tidak mencukupi. Mode Charge menunjukkan bahwa daya PV mampu menyuplai beban dan sisa daya yang tersedia digunakan untuk mengisi baterai. Mode Supply menunjukkan bahwa daya PV cukup untuk menyuplai beban, namun proses pengisian baterai tidak diprioritaskan karena kondisi SoC baterai sudah tinggi.

Dengan metode ini, mode operasi sistem dapat ditentukan berdasarkan keseimbangan daya aktual pada sistem. Hasil mode operasi kemudian ditampilkan pada media monitoring sebagai informasi kondisi aliran energi, sedangkan keputusan level beban aktif tetap ditentukan melalui Fuzzy Logic Controller berdasarkan nilai SoC, daya PV, dan daya beban.

3.4.6 Perancangan Fuzzy Logic Controller

Fuzzy Logic Controller (FLC) digunakan dalam penelitian ini untuk menentukan level beban aktif sistem PLTS off-grid secara adaptif berdasarkan kondisi baterai, keluaran panel surya, dan total beban. Metode fuzzy dipilih karena mampu menangani ketidakpastian dan dinamika perubahan iradiasi tanpa memerlukan model matematis yang kompleks. Pada penelitian ini, FLC dirancang menggunakan metode Mamdani dengan tiga variabel input dan satu variabel output.

1.) Fuzzifikasi

Pada tahap fuzzifikasi, setiap variabel input dikonversi dari nilai numerik menjadi nilai linguistik melalui fungsi keanggotaan. Variabel input yang digunakan terdiri atas tiga, yaitu State of Charge (SoC) baterai, daya panel surya (Ppv), dan daya beban total (Pbeban). Masing-masing variabel input dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy, yaitu rendah, sedang, dan tinggi, khusus untuk daya beban digunakan istilah ringan, sedang, dan berat.

Fungsi keanggotaan dirancang menggunakan kombinasi bentuk segitiga dan trapesium. Bentuk segitiga dipilih untuk kategori sedang karena sederhana dan efisien diimplementasikan pada sistem konversi energi surya, sedangkan bentuk trapesium digunakan untuk kategori rendah dan tinggi agar memberikan area nilai yang stabil pada kondisi ekstrem, misalnya saat daya PV sangat rendah atau SoC baterai sangat tinggi. Antarhimpunan dirancang saling tumpang tindih (overlap) agar perubahan keputusan fuzzy berlangsung halus dan tidak terjadi secara mendadak. Rancangan variabel, himpunan fuzzy, dan bentuk fungsi keanggotaan ditunjukkan pada Tabel 3.13.

Tabel 3. 13 Rancangan Variabel dan Himpunan Fuzzy

Variabel	Jenis	Himpunan Fuzzy	Bentuk Fungsi
SoC baterai	Input	Rendah, Sedang, Tinggi	Trapesium – Segitiga – Trapesium
Daya PV (Ppv)	Input	Rendah, Sedang, Tinggi	Trapesium – Segitiga – Trapesium
Daya beban (Pbeban)	Input	Ringan, Sedang, Berat	Trapesium – Segitiga – Trapesium
Level beban aktif	Output	Level 1, Level 2, Level 3	Trapesium – Segitiga – Trapesium

Keluaran sistem fuzzy berupa level beban aktif yang merepresentasikan tingkat prioritas beban yang dapat disuplai oleh sistem, dengan pembagian sebagai berikut:

- Level 1: hanya beban prioritas tinggi yang disuplai.
- Level 2: beban prioritas tinggi dan sedang disuplai.
- Level 3: seluruh beban, yaitu prioritas tinggi, sedang, dan rendah, dapat disuplai.

Adapun batas numerik (titik) setiap fungsi keanggotaan tidak ditetapkan pada tahap perancangan ini, melainkan ditentukan berdasarkan rentang nilai SoC, daya PV, dan daya beban hasil pengukuran di lapangan.

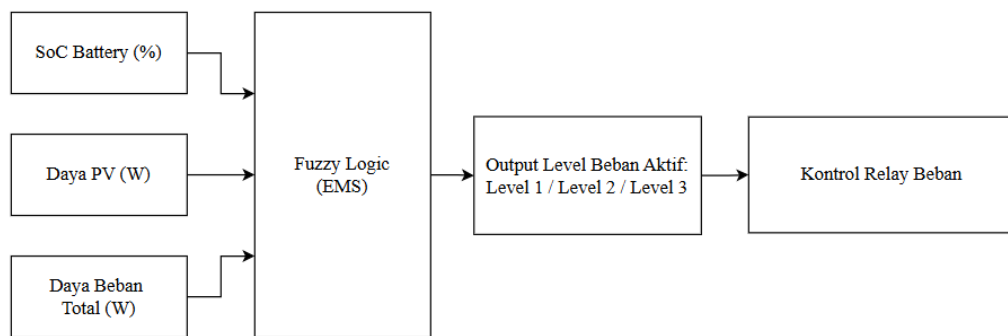
2.) Basis Aturan (Rule Base)

Basis aturan disusun dari kombinasi tiga variabel input yang masing-masing memiliki tiga himpunan, sehingga membentuk 27 aturan. Prinsip penyusunan aturan adalah menjaga baterai tetap berada pada kondisi aman, memanfaatkan daya PV ketika tersedia, serta membatasi beban ketika energi sistem tidak mencukupi. Dengan demikian, ketika SoC tinggi dan daya PV memadai, sistem cenderung mengizinkan lebih banyak beban (Level 3), sedangkan ketika SoC rendah atau beban melebihi kemampuan suplai, sistem membatasi beban pada level yang lebih rendah.

3.) Inferensi Fuzzy dan Defuzzifikasi

Proses inferensi dilakukan menggunakan metode Mamdani dengan operator MIN-MAX untuk menentukan derajat keaktifan setiap aturan berdasarkan nilai input SoC, daya PV, dan daya beban. Hasil inferensi dari seluruh aturan kemudian digabungkan melalui proses agregasi untuk membentuk himpunan keluaran fuzzy. Selanjutnya, defuzzifikasi dilakukan menggunakan metode centroid (center of gravity) untuk memperoleh nilai keluaran tegas (crisp), yang kemudian dipetakan menjadi Level 1, Level 2, atau Level 3. Nilai level beban aktif ini digunakan sebagai dasar pengaktifan relay beban sesuai tingkat prioritasnya, sedangkan mode operasi digunakan untuk menentukan arah dan kondisi aliran energi pada sistem PLTS off-grid.

Rancangan Fuzzy Logic Controller pada tahap ini merupakan rancangan struktural yang menetapkan metode, variabel, bentuk fungsi keanggotaan, dan basis aturan sistem. Adapun parameter numerik fungsi keanggotaan dan susunan aturan secara lengkap ditentukan berdasarkan data hasil pengukuran di lapangan. Diagram perancangan Fuzzy Logic Controller secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Diagram Perancangan Fuzzy Logic Controller

3.4.7 Perancangan Sistem Prioritas Beban Berbasis Mikrokontroler

Perancangan Perancangan sistem prioritas beban bertujuan untuk mengatur aktivasi dan pemutusan beban AC secara adaptif pada sistem PLTS off-grid. Pada penelitian ini, mekanisme prioritas beban merupakan kelanjutan dari keluaran sistem logika fuzzy, khususnya output level beban aktif yang dihasilkan oleh Fuzzy Logic Controller (FLC).

Penetapan prioritas beban dilakukan dengan mengelompokkan beban ke dalam tiga tingkat berdasarkan fungsi, kebutuhan penggunaan, dan tingkat kepentingannya di lapangan. Mesin penggiling padi ditempatkan sebagai beban prioritas tinggi karena merupakan beban utama yang mendukung aktivitas pertanian. Meskipun memiliki daya paling besar, penggunaan mesin penggiling padi tidak dilakukan secara terus-menerus, melainkan hanya pada waktu tertentu seperti siang atau sore hari dan tidak digunakan setiap hari. Dengan demikian, beban ini tetap diprioritaskan ketika dibutuhkan dan kondisi energi sistem mencukupi. Lampu ditempatkan sebagai prioritas sedang karena digunakan pada

malam hingga pagi hari sebagai beban penerangan. Waktu penggunaan lampu berbeda dengan mesin penggiling padi, sehingga keduanya tidak saling bersaing secara langsung dalam penggunaan energi. Pada malam hari, mesin penggiling padi tidak digunakan, sehingga energi dari baterai dapat difokuskan untuk menyuplai lampu. Sementara itu, charger handphone ditempatkan sebagai prioritas rendah karena termasuk beban ringan dengan waktu penggunaan yang lebih fleksibel. Beban ini dapat digunakan ketika energi tersedia, tetapi dapat diputus lebih awal apabila sistem berada pada kondisi energi terbatas.

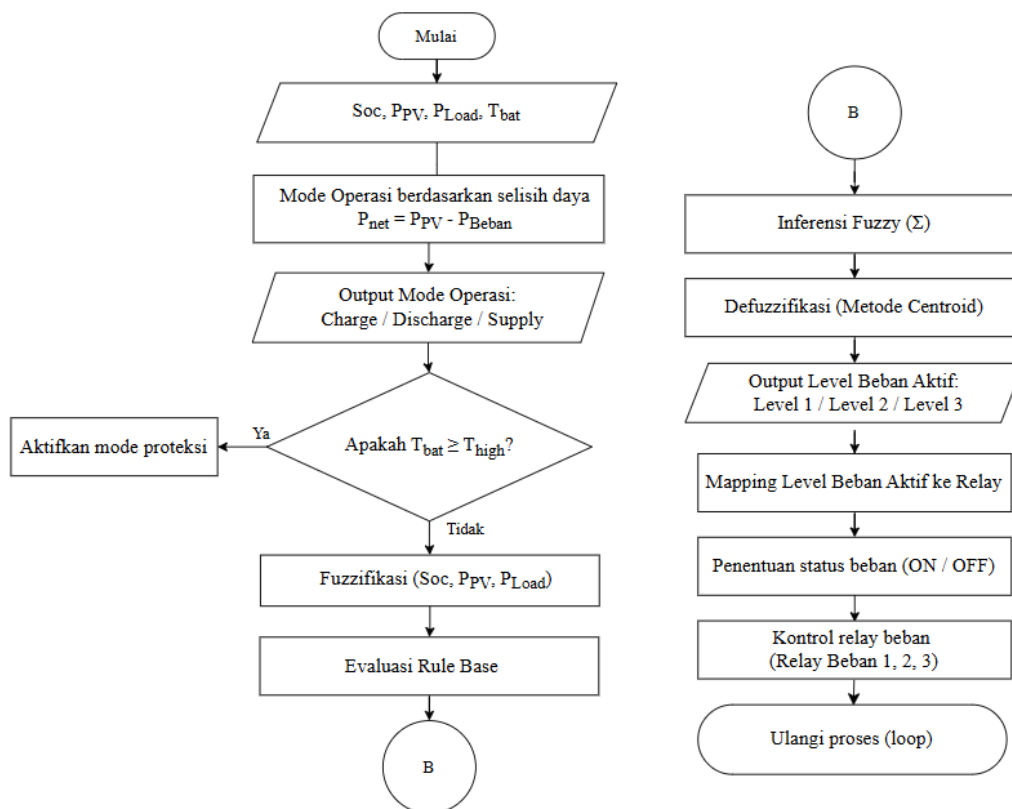
Tabel 3. 14 Penetapan Prioritas Beban Sistem PLTS Off-Grid

Kelompok	Beban	Prioritas
Beban 1	Mesin penggiling padi	Tinggi
Beban 2	Lampu	Sedang
Beban 3	Handphone	Rendah

Pengendalian beban dilakukan oleh mikrokontroler ESP32 berdasarkan nilai level beban aktif hasil defuzzifikasi sistem fuzzy. Level beban aktif menentukan kombinasi beban yang diizinkan untuk beroperasi sebagai berikut:

- Level 1: hanya beban prioritas tinggi yang diaktifkan,
- Level 2: beban prioritas tinggi dan sedang diaktifkan,
- Level 3: seluruh beban, yaitu prioritas tinggi, sedang, dan rendah diaktifkan.

Mikrokontroler ESP32 mengendalikan relay beban sesuai dengan level beban aktif tersebut tanpa memerlukan perhitungan tambahan daya tersedia. Dengan pendekatan ini, proses pengambilan keputusan beban sepenuhnya terintegrasi dengan sistem fuzzy sehingga sistem menjadi lebih sederhana, adaptif, dan konsisten terhadap perubahan kondisi energi. Seluruh proses pembacaan sensor, inferensi fuzzy, defuzzifikasi, serta pengaturan relay dieksekusi secara berulang (looping) pada program ESP32. Diagram alir yang menggambarkan integrasi proses ini ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Diagram alir Sistem Manajemen Energi PLTS Off-Grid

3.4.8 Simulasi Fuzzy Logic

Simulasi Fuzzy Logic dilakukan sebagai langkah verifikasi untuk memastikan bahwa Fuzzy Logic Controller (FLC) yang diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 menghasilkan keputusan yang sesuai dengan rancangan. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB Fuzzy Logic Toolbox (FIS Editor) dengan memodelkan fungsi keanggotaan dan basis aturan yang sama dengan rancangan sistem. Model simulasi ini digunakan sebagai acuan pembandingan terhadap keluaran FLC pada sistem nyata, yaitu dengan memasukkan kombinasi nilai input yang sama, meliputi State of Charge (SoC), daya PV, dan daya beban, ke kedua sistem, kemudian membandingkan level beban aktif yang dihasilkan. Hasil perbandingan antara keluaran simulasi MATLAB dan keluaran sistem di lapangan dibahas pada Bab 4, subbab Verifikasi Implementasi Fuzzy Logic Controller.

3.4.9 Perakitan Perangkat Keras

Tahap perakitan perangkat keras dilakukan dengan menyusun rancangan koneksi antar komponen yang akan digunakan pada prototipe sistem manajemen energi. Penyusunan wiring diagram direncanakan mencakup hubungan antara sensor arus dan tegangan pada jalur DC dan AC, mikrokontroler ESP32, modul relay untuk pengendalian beban, power supply, serta sistem proteksi beban. Setelah rancangan wiring disusun, seluruh komponen akan dirakit pada papan prototipe dengan memperhatikan keteraturan jalur kabel dan keamanan koneksi. Pemeriksaan kelistrikan dilakukan untuk memastikan tidak terdapat kesalahan sambungan, tegangan berlebih, maupun potensi short circuit sebelum sistem diaktifkan.

3.4.10 Pemrograman Perangkat Lunak

Pemrograman perangkat lunak difokuskan pada penyusunan kode ESP32 untuk mendukung seluruh fungsi pada prototipe sistem. Program yang dirancang meliputi proses pembacaan sensor, perhitungan daya PV dan daya beban, estimasi SoC baterai, penerapan Fuzzy Logic Controller sesuai rule base yang telah dirancang, serta pengendalian relay. Kode yang telah disusun akan diunggah ke mikrokontroler dan diuji secara bertahap untuk memastikan setiap bagian bekerja sesuai tujuan.

3.4.11 Integrasi Hardware dan Software

Tahap integrasi dilakukan setelah perakitan perangkat keras dan pemrograman perangkat lunak selesai. Mikrokontroler ESP32 akan dihubungkan dengan seluruh sensor dan modul kendali sesuai wiring diagram yang telah direncanakan. Pengujian awal dilakukan untuk memastikan data sensor dapat terbaca dengan benar, logika fuzzy berjalan sesuai rancangan, serta relay mampu merespons perubahan kondisi sistem.

3.4.12 Uji Coba Awal Prototipe

Uji coba awal prototipe dilakukan untuk memastikan bahwa sistem manajemen energi berbasis logika fuzzy Mamdani dapat berfungsi sesuai dengan rancangan setelah proses integrasi perangkat keras dan perangkat lunak selesai.

Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kinerja pembacaan sensor, proses perhitungan State of Charge (SoC), implementasi Fuzzy Logic Controller, serta pengendalian beban melalui relay.

Pada tahap uji coba awal, pengamatan dilakukan terhadap respons sistem terhadap perubahan kondisi energi, termasuk perubahan nilai daya panel surya, daya beban, dan SoC baterai. Selain itu, diamati pula perubahan keluaran sistem fuzzy berupa level beban aktif, serta mode operasi yang ditentukan berdasarkan selisih daya PV dan daya beban, serta kesesuaian status relay beban yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32. Hasil uji coba awal ini digunakan untuk memastikan bahwa sistem telah beroperasi secara fungsional sebelum dilakukan pengujian lanjutan.

3.5 Metode Implementasi

Pada tahap implementasi, sistem direalisasikan dari bentuk rancangan menjadi prototipe yang dapat berfungsi sesuai tujuan penelitian. Proses implementasi meliputi perakitan sensor, integrasi perangkat keras dengan mikrokontroler, pemrosesan data hasil pengukuran, serta penerapan sistem logika fuzzy untuk menentukan level beban aktif, serta penentuan mode operasi berdasarkan selisih daya PV dan daya beban. Seluruh komponen dipasang dan diuji secara bertahap untuk memastikan sistem bekerja sesuai rancangan pada kondisi nyata.

3.5.1 Implementasi Pembacaan Sensor

Implementasi pembacaan sensor dilakukan untuk memperoleh data parameter kelistrikan dan kondisi baterai yang dibutuhkan dalam sistem manajemen energi PLTS off-grid. Sensor yang digunakan pada sistem ini meliputi sensor daya DC, sensor daya AC, dan sensor suhu baterai, yang seluruhnya terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32. Pembacaan parameter pada sisi DC dilakukan menggunakan sensor PZEM-017, yang digunakan untuk mengukur tegangan dan arus DC pada panel surya serta baterai. Data arus baterai yang diperoleh dari sensor ini digunakan sebagai dasar perhitungan *State of Charge* (SoC) baterai menggunakan metode hybrid Coulomb Counting. Pada sisi AC, sensor PZEM-

004T digunakan untuk mengukur tegangan, arus, dan daya beban pada keluaran inverter, sehingga kondisi beban sistem dapat dipantau secara real-time. Selain parameter kelistrikan, suhu baterai dipantau menggunakan sensor DS18B20 yang dipasang pada permukaan baterai. Data suhu digunakan sebagai parameter keselamatan sistem dan tidak dilibatkan secara langsung dalam perhitungan SoC. Apabila suhu baterai melebihi batas yang telah ditentukan, sistem akan mengaktifkan mode proteksi untuk membatasi pengoperasian sistem.

Seluruh data sensor dibaca secara real-time oleh mikrokontroler ESP32 dengan interval pembaruan yang tetap dan digunakan sebagai input dalam proses perhitungan SoC serta pengambilan keputusan pada sistem logika fuzzy. Untuk keperluan pengujian dan analisis kinerja sistem, data sensor direkam pada rentang waktu 24 jam dengan interval waktu 5 menit, sehingga respons sistem terhadap perubahan kondisi energi harian dapat dianalisis secara representatif.

3.5.2 Integrasi Sensor dengan Sistem Fuzzy

Data Ppv dari sensor PZEM-017, SoC baterai, dan Pbeban dari sensor PZEM-004T diproses oleh mikrokontroler ESP32 dan selanjutnya menjadi input pada modul logika fuzzy. Pada tahap ini, sistem fuzzy menerima nilai numerik hasil pembacaan sensor yang telah dikonversi, kemudian mengolahnya berdasarkan fungsi keanggotaan dan rule base. Hasil keluaran sistem fuzzy berupa level beban aktif, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar pengendalian relay beban sesuai dengan kondisi energi sistem.

3.5.3 Pengendalian Beban Melalui Relay

Keluaran sistem fuzzy digunakan sebagai dasar pengendalian modul relay yang terhubung ke beban. Berdasarkan level beban aktif yang dihasilkan oleh sistem fuzzy, mikrokontroler ESP32 menentukan status relay untuk mengaktifkan atau menonaktifkan beban sesuai kondisi ketersediaan energi. Beban dengan prioritas lebih rendah akan dilepaskan ketika energi tidak mencukupi dan diaktifkan kembali saat kondisi memungkinkan. Tahap ini merupakan implementasi akhir yang menghubungkan keputusan sistem fuzzy dengan aktuator fisik pada sistem.