

BAB 4

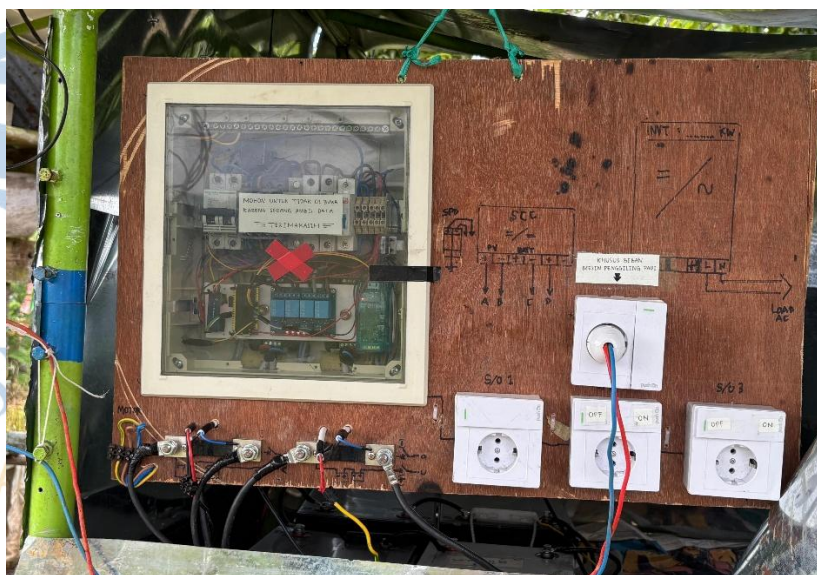
HASIL PROYEK

4.1 Integrasi Sistem IoT pada PLTS (Sistem Tenaga Surya Off-Grid)

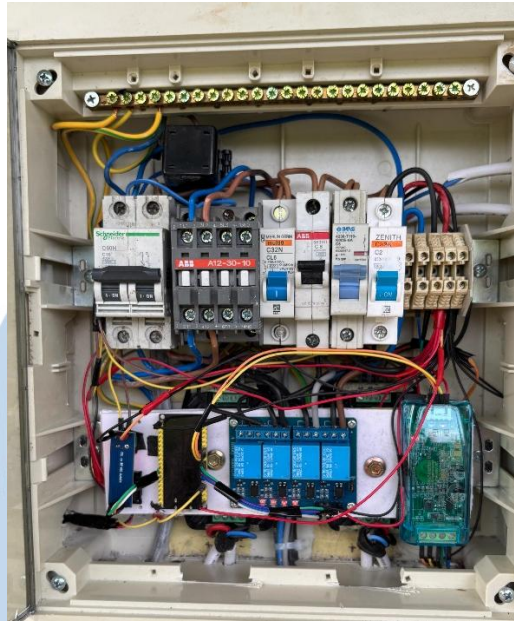
Sistem IoT diintegrasikan menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali dan pengolah data, di mana hasil pembacaan sensor PZEM-017, PZEM-004T, dan DS18B20 kemudian dikirimkan ke media monitoring agar kondisi sistem dapat dipantau secara real-time.

4.1.1 Implementasi Alat dan Panel Kontrol di Lapangan

Implementasi alat dilakukan dengan memasang perangkat sistem IoT dan komponen proteksi pada panel kontrol yang terhubung dengan sistem PLTS off-grid. Pada panel tersebut terdapat beberapa komponen utama, seperti ESP32, relay, power supply, MCB, kontaktor, dan sensor daya. Komponen-komponen tersebut dipasang untuk mendukung proses pemantauan parameter listrik serta pengendalian beban berdasarkan kondisi energi yang tersedia. Pemasangan panel kontrol dilakukan pada lokasi yang dekat dengan jalur baterai, inverter, dan beban agar pembacaan sensor dapat dilakukan secara langsung. Selain itu, penempatan komponen proteksi juga disesuaikan dengan jalur beban untuk menjaga keamanan sistem apabila terjadi arus lebih atau gangguan pada rangkaian.



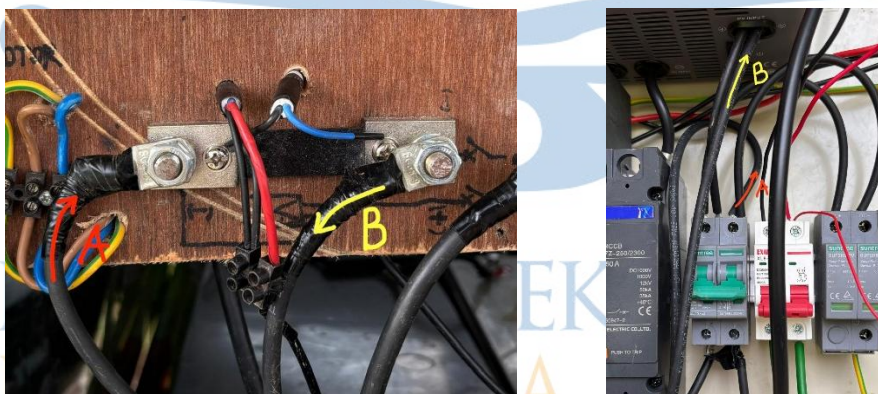
Gambar 4. 1 Alat Sistem IoT yang Telah Terpasang di Lapangan



Gambar 4. 2 Panel Proteksi dan Kontrol Sistem

4.1.2 Implementasi Titik Pembacaan Sensor

Titik pembacaan sensor pada sistem IoT ditentukan berdasarkan kebutuhan data utama dalam sistem manajemen energi PLTS off-grid. Setiap sensor dipasang pada bagian yang berbeda sesuai dengan parameter yang akan dipantau, yaitu sisi panel surya, sisi baterai, suhu baterai, dan sisi beban AC. Pembagian titik pembacaan ini bertujuan agar sistem dapat memperoleh data pembangkitan, penyimpanan, kondisi baterai, serta konsumsi energi secara menyeluruh sebelum data tersebut diproses oleh ESP32 dan ditampilkan pada media monitoring.



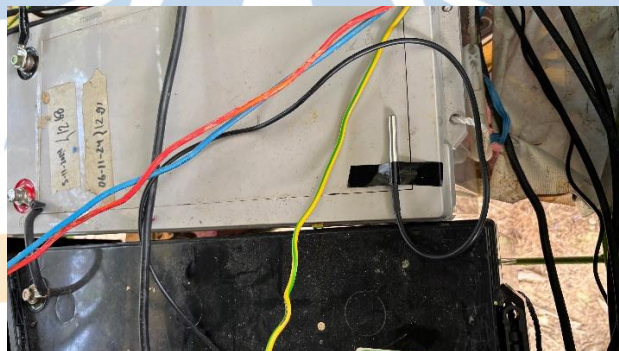
Gambar 4. 3 Titik Pembacaan Sensor pada Sisi Panel Surya

Gambar 4.3 menunjukkan titik pembacaan sensor PZEM-017 pada sisi panel surya. Titik A merupakan jalur keluaran dari panel surya setelah melewati MCB/proteksi PV yang kemudian masuk ke sisi shunt. Sementara itu, titik B merupakan jalur keluaran dari shunt yang diteruskan menuju input PV pada inverter/charge controller. Dengan pemasangan tersebut, sensor PZEM-017 dapat membaca arus yang melewati shunt serta tegangan pada sisi panel surya, sehingga nilai daya PV dapat diperoleh sebagai data pembangkitan energi pada sistem PLTS off-grid.



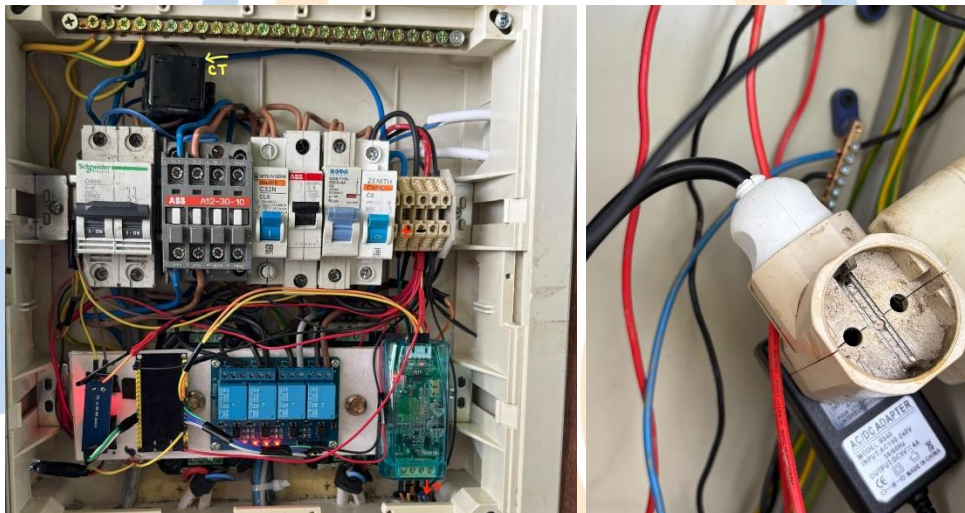
Gambar 4. 4 Titik Pembacaan Sensor pada Sisi Baterai

Gambar 4.4 menunjukkan titik pembacaan sensor PZEM-017 pada sisi baterai. Titik C merupakan jalur dari baterai yang masuk ke sisi shunt sebagai titik awal pembacaan arus baterai. Sementara itu, titik D merupakan jalur keluaran dari shunt yang diteruskan menuju inverter. Dengan pemasangan tersebut, sensor PZEM-017 dapat membaca parameter tegangan, arus, dan daya baterai, sehingga kondisi pengisian maupun pengosongan baterai dapat dipantau dan digunakan sebagai dasar estimasi State of Charge (SoC).



Gambar 4. 5 Titik Pembacaan Sensor Suhu pada Sisi Baterai

Gambar 4.5 menunjukkan titik pembacaan sensor suhu DS18B20 pada sisi baterai. Sensor suhu ditempelkan pada permukaan baterai untuk membaca kondisi suhu baterai selama sistem beroperasi. Data suhu yang diperoleh digunakan sebagai parameter pemantauan kondisi termal baterai, sehingga sistem dapat mengetahui apabila terjadi kenaikan suhu yang berpotensi memengaruhi keamanan dan kinerja baterai.



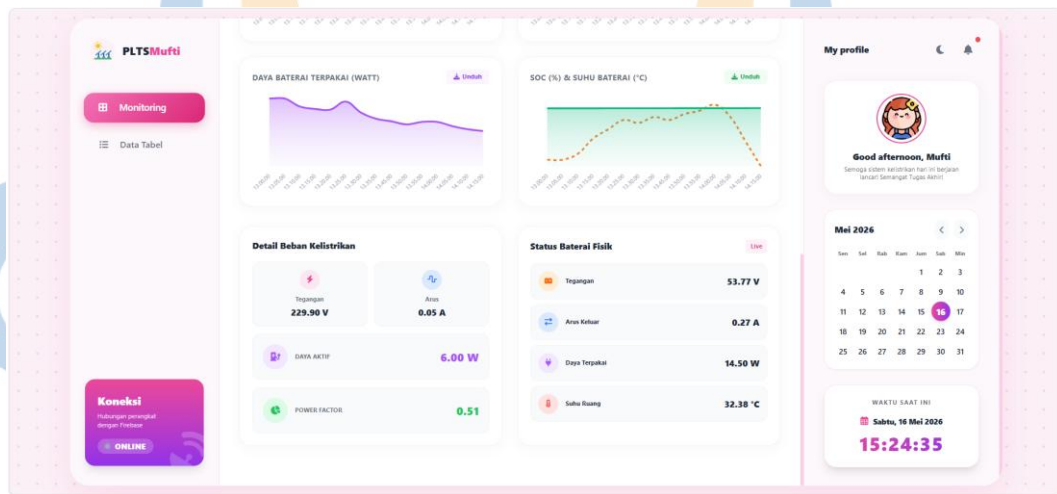
Gambar 4. 6 Titik Pembacaan Sensor pada Sisi Beban AC

Gambar 4.6 menunjukkan titik pembacaan sensor PZEM-004T pada sisi beban AC. Sumber AC berasal dari keluaran inverter yang telah terhubung ke stopkontak. Sensor PZEM-004T membaca arus beban menggunakan CT yang dipasang pada kabel fasa keluaran inverter, sedangkan pembacaan tegangan dilakukan melalui sambungan fasa dan netral pada terminal alat. Dengan pemasangan tersebut, sensor dapat membaca parameter beban AC berupa tegangan, arus, daya aktif, dan faktor daya yang digunakan untuk memantau konsumsi energi pada sistem PLTS off-grid.

4.1.3 Implementasi Monitoring Data Sensor

Implementasi monitoring dilakukan untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor secara real-time. Data yang diperoleh dari ESP32 dikirimkan ke media monitoring berupa web interface dan/atau Google Sheet. Media monitoring ini digunakan untuk menampilkan parameter sistem, seperti tegangan PV, arus PV,

daya PV, tegangan baterai, arus baterai, daya baterai, SoC, suhu baterai, tegangan beban, arus beban, daya beban, dan faktor daya. Web monitoring digunakan untuk memudahkan pemantauan kondisi sistem secara visual, sedangkan Google Sheet digunakan sebagai media pencatatan data agar hasil pembacaan sensor dapat disimpan dan dianalisis lebih lanjut. Pada penelitian ini, media monitoring tidak menjadi fokus utama perancangan, melainkan digunakan sebagai alat bantu untuk melihat dan merekam hasil pembacaan sensor selama pengujian sistem.



Gambar 4. 7 Tampilan Web Monitoring Sistem IoT

Data Penelitian Tugas Akhir Mufti													
File Edit Tampilan Sisipan Format Data Alat Ekstensi Bantuan													
100% 123 Default 10 B Z 123													
1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Waktu	Tegangan PV (V)	Arus PV (A)	Daya PV (W)	Tegangan Baterai (V)	Arus Baterai (A)	Daya Baterai (W)	SOC (%)	Suhu	Tegangan Beban (V)	Arus Beban (A)	Daya Beban (W)	Power Factor
178	21/04/2026 7:10:56	310.63	0.375	116.48625	51.18	0.29	14.8	95.43465	24.6875	230.5	0.085	16.4	0.84
179	21/04/2026 7:15:56	311.05	0.205	63.76525	51.21	0.12	6.1	95.43214	24.75	230.5	0.085	16.4	0.84
180	21/04/2026 7:20:55	310.63	0.205	63.67915	51.21	0.12	6.1	95.42964	24.9375	230.39999	0.085	16.4	0.84
181	21/04/2026 7:25:56	311.05	0.205	63.76525	51.22	0.12	6.1	95.42714	25.0625	230.39999	0.085	16.3	0.83
182	21/04/2026 7:30:55	311.89	0.285	92.00755	51.25	0.21	10.7	95.42277	25.25	230.39999	0.085	16.3	0.83
183	21/04/2026 7:35:55	311.95	0.445	138.81775	51.27	0.36	18.4	95.41527	25.4375	230.39999	0.085	16.4	0.84
184	21/04/2026 7:40:55	313.98	0.865	271.5927	51.51	0.78	40.1	95.39902	25.6875	230.39999	0.085	16.4	0.84
185	21/04/2026 7:45:55	315.10	1.375	433.2625	52.06	1.29	67.1	95.37214	25.875	230.3	0.085	16.3	0.83
186	21/04/2026 7:50:55	317.94	2.225	707.4165	52.86	2.14	113.1	95.32755	26.125	230.39999	0.085	16.6	0.85
187	21/04/2026 7:55:55	320.21	3.145	1007.06045	53.35	3.06	163.2	95.2638	26.375	230.3	0.085	16.5	0.84
188	21/04/2026 8:01:57	321.51	4.401	1414.96551	53.91	4.35	234.5	95.17318	26.5	230.39999	0.051	6	0.51
189	21/04/2026 8:05:56	322.32	3.91	1260.2712	53.85	3.86	207.8	95.09276	26.8125	230.39999	0.05	6	0.52
190	21/04/2026 8:11:55	323.33	3.72	1202.7876	53.84	3.67	197.5	95.0163	27.125	230.3	0.05	6	0.52
191	21/04/2026 8:15:56	323.30	3.64	1176.812	53.83	3.59	193.2	94.94151	27.25	230.3	0.05	6	0.52
192	21/04/2026 8:20:55	324.38	3.46	1122.3548	53.82	3.41	183.5	94.87047	27.5625	230.2	0.05	6.1	0.53
193	21/04/2026 8:25:56	324.94	3.359	1091.47346	53.82	3.31	178.10001	94.80151	27.8125	230.3	0.049	6.1	0.54
194	21/04/2026 8:30:56	325.64	3.12	1015.9968	53.8	3.07	165.10001	94.73756	27.9375	230.2	0.05	6	0.52
195	21/04/2026 8:35:55	325.46	3.101	1009.25146	53.79	3.05	164	94.67401	28.125	230.2	0.051	6.1	0.52
196	21/04/2026 8:40:56	325.36	2.98	969.5728	53.8	2.93	157.80001	94.61297	28.3125	230.2	0.05	5.9	0.51
197	21/04/2026 8:45:55	324.35	2.989	969.48215	53.81	2.94	158.2	94.55172	28.5	230.2	0.049	6.1	0.54
198	21/04/2026 8:50:55	323.26	2.91	940.6866	53.78	2.86	153.8	94.49214	28.625	230.2	0.05	6	0.52
199	21/04/2026 8:55:55	322.21	2.761	889.62181	53.79	2.71	145.7	94.43568	28.875	230.2	0.051	6	0.51
200	21/04/2026 9:00:55	321.72	2.58	830.0376	53.77	2.53	136	94.38297	29	230.10001	0.05	6	0.52

Gambar 4. 8 Tampilan Data Pembacaan Sensor pada Google Sheet

4.1.4 Hasil Integrasi Sistem IoT pada PLTS

Hasil integrasi menunjukkan bahwa sistem IoT dapat membaca parameter utama pada PLTS off-grid, baik dari sisi panel surya, baterai, maupun beban. Data dari sensor berhasil ditampilkan pada media monitoring sehingga perubahan kondisi sistem dapat diamati secara langsung. Parameter seperti daya PV, daya baterai, daya beban, SoC, dan suhu baterai dapat digunakan sebagai dasar untuk melihat kondisi ketersediaan energi pada sistem. Integrasi sistem juga menunjukkan bahwa perangkat kontrol dan proteksi telah terpasang pada panel sesuai dengan kebutuhan pengoperasian beban. Relay digunakan untuk mengatur penyalan dan pemutusan beban, sedangkan MCB, dan kontaktor digunakan sebagai bagian dari sistem proteksi dan pengendalian beban. Dengan demikian, sistem IoT yang telah dipasang dapat mendukung proses monitoring dan pengaturan energi pada PLTS off-grid di lapangan.

4.2 Pengujian dan Validasi Pembacaan Sensor

Pengujian dan validasi pembacaan sensor dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi sensor yang digunakan pada sistem monitoring PLTS off-grid. Sensor yang diuji meliputi sensor PZEM-017 sebagai pengukur parameter DC, sensor PZEM-004T sebagai pengukur parameter AC, dan sensor DS18B20 sebagai pengukur suhu baterai. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap pengukuran manual menggunakan alat ukur pembanding.

Nilai error digunakan untuk mengetahui besar penyimpangan pembacaan sensor terhadap pengukuran manual. Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai error adalah sebagai berikut.

$$\text{Error}(\%) = \left| \frac{\text{Nilai Sensor} - \text{Nilai Manual}}{\text{Nilai Manual}} \right| \times 100\%$$

Semakin kecil nilai error yang diperoleh, maka semakin baik tingkat kesesuaian pembacaan sensor terhadap alat ukur manual. Hasil pengujian ini digunakan sebagai dasar untuk memastikan bahwa data yang dibaca oleh sensor layak digunakan dalam proses monitoring dan pengambilan keputusan pada sistem manajemen energi.

4.2.1 Pengujian Sensor PZEM-017

Sensor PZEM-017 digunakan untuk membaca parameter listrik pada sisi DC, yaitu tegangan, arus, dan daya. Pada pengujian ini, hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan hasil pengukuran manual. Daya manual dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan persamaan daya DC.

$$P = V \times I$$

Hasil pengujian sensor PZEM-017 ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Sensor PZEM-017

Parameter	Pengukuran Manual	Pengukuran Sensor	Selisih	Error
Tegangan (V)	11,05 V	11,03 V	0,02 V	0,18%
Arus (A)	0,52 A	0,52 A	0,00 A	0,00%
Daya (W)	5,75 W	5,70 W	0,05 W	0,80%

Perhitungan daya manual pada sensor PZEM-017 adalah sebagai berikut.

$$P_{\text{manual}} = V_{\text{manual}} \times I_{\text{manual}}$$

$$P_{\text{manual}} = 11,05 \times 0,52$$

$$P_{\text{manual}} = 5,746 \text{ W} \approx 5,75 \text{ W}$$

Daya yang terbaca pada sensor PZEM-017 adalah sebesar 5,70 W. Selanjutnya dilakukan perhitungan error untuk masing-masing parameter.

Error tegangan:

$$\text{Error} = \left| \frac{11,03 - 11,05}{11,05} \right| \times 100\%$$

$$\text{Error} = 0,18\%$$

Error arus:

$$\text{Error} = \left| \frac{0,52 - 0,52}{0,52} \right| \times 100\%$$

$$\text{Error} = 0,00\%$$

Error daya:

$$\text{Error} = \left| \frac{5,70 - 5,746}{5,746} \right| \times 100\%$$

$$\text{Error} = 0,80\%$$

Berdasarkan hasil pengujian, sensor PZEM-017 memiliki error tegangan sebesar 0,18%, error arus sebesar 0,00%, dan error daya sebesar 0,80%. Nilai error tersebut relatif kecil, sehingga sensor PZEM-017 dapat digunakan untuk membaca parameter listrik DC pada sistem monitoring.

4.2.2 Pengujian Sensor PZEM-004T

Sensor PZEM-004T digunakan untuk membaca parameter listrik pada sisi AC, yaitu tegangan, arus, daya aktif, dan faktor daya. Pada pengujian ini, daya manual dihitung menggunakan nilai tegangan manual, arus manual, dan faktor daya yang terbaca pada sensor. Hal ini dilakukan karena pengukuran manual hanya mencakup tegangan dan arus, sedangkan nilai faktor daya diperoleh dari pembacaan sensor PZEM-004T. Persamaan daya aktif AC yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$P = V \times I \times PF$$

Hasil pengujian sensor PZEM-004T ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Sensor PZEM-004T

Parameter	Pengukuran Manual	Pengukuran Sensor	Selisih	Error
Tegangan (V)	221,8 V	222,70 V	0,90 V	0,41%
Arus (A)	0,30 A	0,30 A	0,00 A	0,00%
Daya (W)	41,25 W	41,60 W	0,35 W	0,84%
Faktor Daya	-	0,62	-	-

Perhitungan daya manual pada sensor PZEM-004T adalah sebagai berikut.

$$P_{\text{manual}} = V_{\text{manual}} \times I_{\text{manual}} \times PF$$

$$P_{\text{manual}} = 221,8 \times 0,30 \times 0,62$$

$$P_{\text{manual}} = 41,2548 \text{ W} \approx 41,25 \text{ W}$$

Daya yang terbaca pada sensor PZEM-004T adalah sebesar 41,60 W. Selanjutnya dilakukan perhitungan error untuk masing-masing parameter.

Error tegangan:

$$\text{Error} = \left| \frac{222,70 - 221,8}{221,8} \right| \times 100\%$$

$$\text{Error} = 0,41\%$$

Error arus:

$$\text{Error} = \left| \frac{0,30 - 0,30}{0,30} \right| \times 100\%$$

$$\text{Error} = 0,00\%$$

Error daya:

$$\text{Error} = \left| \frac{41,60 - 41,2548}{41,2548} \right| \times 100\%$$

$$\text{Error} = 0,84\%$$

Berdasarkan hasil pengujian, sensor PZEM-004T memiliki error tegangan sebesar 0,41%, error arus sebesar 0,00%, dan error daya sebesar 0,84%. Nilai error tersebut menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T mampu membaca parameter listrik AC dengan tingkat penyimpangan yang kecil terhadap hasil pengukuran manual.

4.2.3 Pengujian Sensor DS18B20

Sensor DS18B20 digunakan untuk membaca suhu baterai pada sistem PLTS off-grid. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor DS18B20 terhadap alat ukur suhu manual. Hasil pengujian sensor DS18B20 ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Sensor DS18B20

Parameter	Pengukuran Manual	Pengukuran Sensor	Selisih	Error
Suhu	28,1 °C	28,87 °C	0,77 °C	2,74%

Perhitungan error sensor DS18B20 adalah sebagai berikut.

$$\text{Error} = \left| \frac{28,87 - 28,1}{28,1} \right| \times 100\%$$

$$\text{Error} = \left| \frac{0,77}{28,1} \right| \times 100\%$$

$$\text{Error} = 2,74\%$$

Berdasarkan hasil pengujian, sensor DS18B20 memiliki error sebesar 2,74% terhadap alat ukur manual. Nilai error tersebut masih tergolong kecil, sehingga sensor DS18B20 dapat digunakan sebagai sensor pemantauan suhu baterai pada sistem monitoring PLTS off-grid.

4.2.4 Hasil Pengujian Sensor

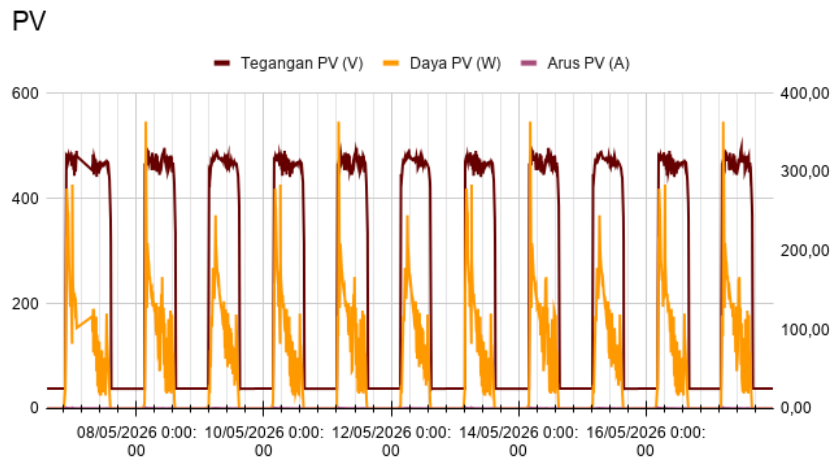
Berdasarkan hasil pengujian, seluruh sensor memiliki nilai error yang relatif kecil. Sensor PZEM-017 memiliki error maksimum sebesar 0,80% pada parameter daya DC, sedangkan sensor PZEM-004T memiliki error maksimum sebesar 0,84% pada parameter daya AC. Sensor DS18B20 memiliki error suhu sebesar 2,74%. Secara keseluruhan, nilai error seluruh sensor masih berada di bawah 5%, sehingga sensor yang digunakan dapat dikatakan cukup akurat dan layak digunakan untuk sistem monitoring pada PLTS off-grid. Hasil validasi ini menunjukkan bahwa data pembacaan sensor dapat digunakan sebagai dasar dalam analisis performa sistem, seperti analisis daya PV, daya baterai, daya beban, State of Charge baterai, dan suhu baterai. Dengan demikian, sensor yang digunakan telah memenuhi kebutuhan akuisisi data pada sistem manajemen energi PLTS off-grid.

4.3 Analisis Kurva Performa (Daya Baterai, Beban, dan Daya PV)

Pada sub-bab ini, dilakukan analisis terhadap daya PV, daya baterai, dan daya beban yang tercatat selama kurang lebih satu minggu. Data ini memberikan gambaran tentang bagaimana sistem PLTS off-grid beroperasi, dan bagaimana daya dari panel surya (PV) digunakan untuk mengisi baterai dan menyuplai beban.

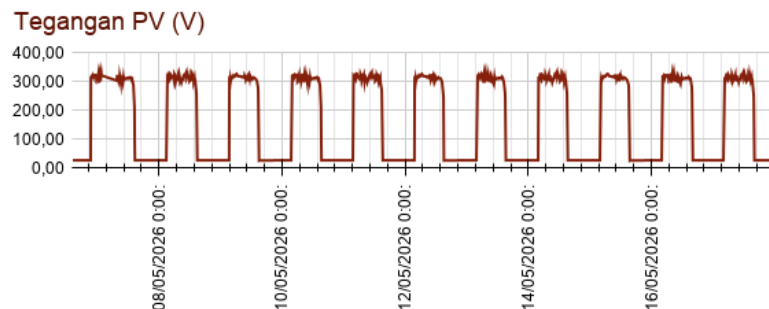
4.3.1 Analisis Daya Panel Surya (PV)

Kurva daya panel surya menunjukkan bagaimana daya yang dihasilkan oleh panel surya berubah sepanjang waktu, dari pagi hingga sore. Data yang dikumpulkan menunjukkan tiga parameter utama: tegangan PV, arus PV, dan daya PV. Berdasarkan pengamatan selama satu minggu, kurva daya PV menunjukkan pola fluktuasi yang konsisten sesuai dengan perubahan intensitas cahaya matahari.



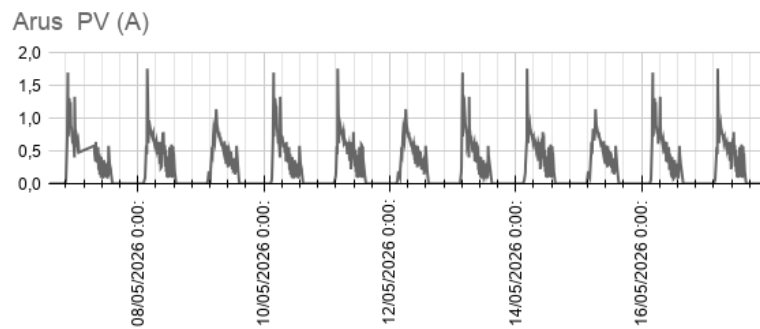
Gambar 4. 9 Kurva Daya PV (Tegangan, Arus, Daya)

Kurva ini menunjukkan fluktuasi tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan oleh panel surya sepanjang periode pengamatan. Tegangan dan arus berfluktuasi tajam sesuai dengan perubahan intensitas cahaya matahari, yang mempengaruhi daya yang dihasilkan oleh panel surya. Pada siang hari, ketika intensitas cahaya matahari tinggi, daya yang dihasilkan oleh panel surya mencapai puncaknya, sementara pada pagi dan sore hari, daya menurun mengikuti penurunan intensitas cahaya.



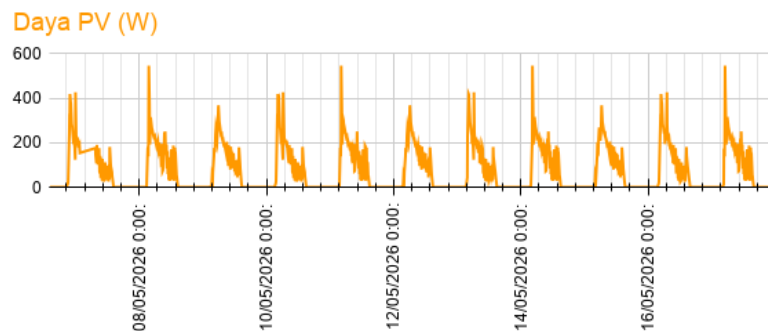
Gambar 4. 10 Kurva Tegangan PV (V)

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa rata-rata tegangan yang tercatat adalah 163,80 V, dengan nilai maksimum 330,65 V dan nilai minimum 25,7 V. Tegangan ini berfluktuasi sepanjang hari, mengikuti perubahan intensitas cahaya matahari.



Gambar 4. 11 Kurva Arus PV (A)

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa rata-rata arus yang dihasilkan oleh panel surya adalah 0,65 A, dengan nilai maksimum 1,76 A dan nilai minimum 0 A. Arus ini meningkat sesuai dengan intensitas cahaya matahari yang lebih kuat pada siang hari, dan menurun pada pagi serta sore hari.



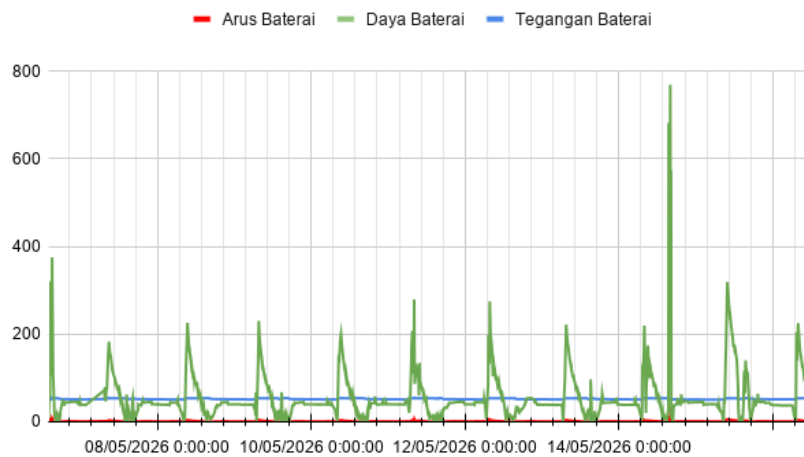
Gambar 4. 12 Kurva Daya PV (W)

Gambar 4.12 menunjukkan bahwa rata-rata daya yang dihasilkan oleh panel surya adalah 143,80 W, dengan puncak mencapai 545,84 W pada siang hari ketika intensitas cahaya matahari maksimum. Nilai minimum tercatat pada 0 W saat sinar matahari menghilang.

4.3.2 Analisis Daya Baterai

Kurva daya baterai menunjukkan bagaimana tegangan, arus, dan daya pada baterai berfluktuasi sepanjang waktu. Data yang dikumpulkan selama satu minggu memberikan gambaran tentang bagaimana baterai mengisi daya pada siang hari dan mengeluarkan daya pada malam hari untuk menyuplai beban.

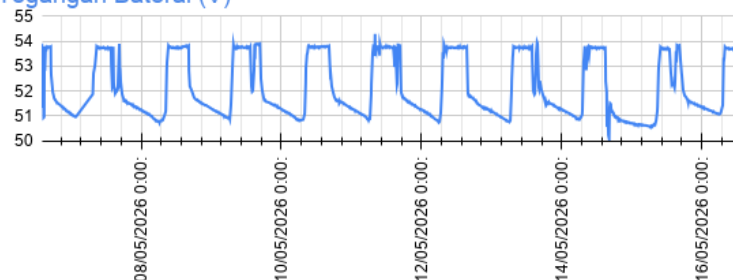
Baterai



Gambar 4. 13 Kurva Baterai (Tegangan, Arus, Daya)

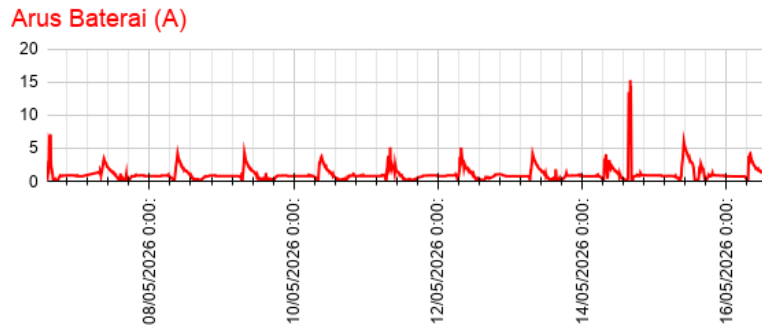
Gambar 4.13 menunjukkan perubahan tegangan, arus, dan daya baterai selama periode pengamatan. Pada kurva tersebut terlihat adanya dua fluktuasi yang cukup menonjol pada arus dan daya baterai. Fluktuasi ini terjadi karena adanya peningkatan konsumsi daya beban secara tiba-tiba ketika mesin penggiling padi dioperasikan. Hal tersebut diperkuat oleh data pada kurva beban yang menunjukkan kenaikan arus dan daya pada waktu yang bersamaan, dengan daya beban mencapai nilai puncak saat mesin penggiling padi bekerja. Ketika beban motor mulai aktif, inverter membutuhkan daya yang lebih besar dari baterai, sehingga arus baterai meningkat dan daya baterai ikut naik. Pada saat yang sama, tegangan baterai mengalami penurunan sesaat atau voltage drop akibat kenaikan arus beban. Dengan demikian, fluktuasi pada kurva baterai berkaitan langsung dengan perubahan beban sistem, khususnya saat mesin penggiling padi hidup, bukan hanya akibat proses pengisian dan pengosongan baterai secara umum.

Tegangan Baterai (V)



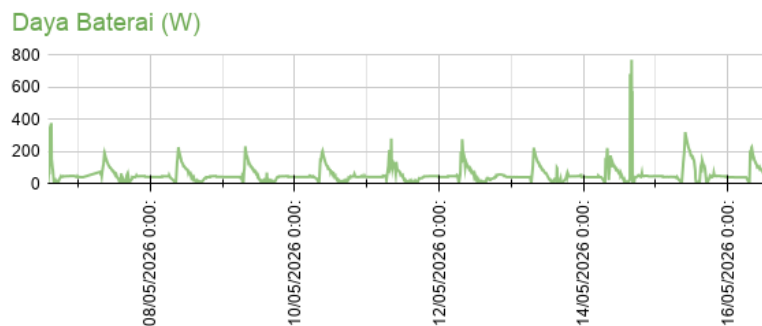
Gambar 4. 14 Kurva Tegangan Baterai (V)

Rata-rata tegangan baterai yang tercatat selama periode pengamatan adalah 52,15208367 V, dengan nilai maksimum 54,5 V dan nilai minimum 50,09 V. Tegangan ini berfluktuasi sepanjang waktu mengikuti proses pengisian dan penggunaan daya baterai.



Gambar 4. 15 Kurva Arus Baterai (A)

Rata-rata arus yang tercatat pada baterai adalah 0,9531810137 A, dengan nilai maksimum 15,31 A dan nilai minimum 0,02 A. Arus ini meningkat saat baterai digunakan untuk menyuplai daya dan menurun saat proses pengisian berlangsung.



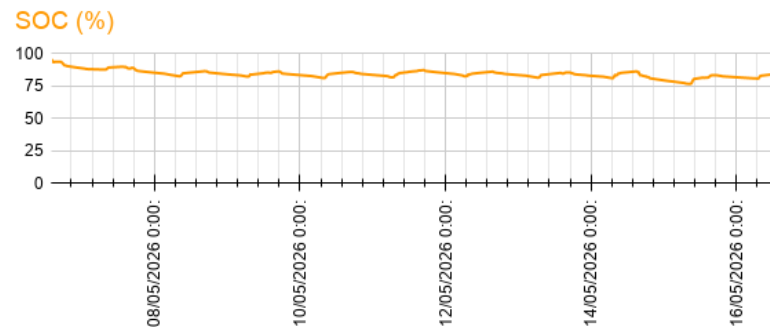
Gambar 4. 16 Kurva Daya Baterai (W)

Rata-rata daya yang dihasilkan atau digunakan oleh baterai adalah 49,97142395 W, dengan nilai maksimum 769 W dan nilai minimum 1 W. Daya ini mencerminkan pengisian dan penggunaan daya oleh baterai pada berbagai waktu sepanjang hari.

4.3.3 Analisis Karakteristik Pengisian Baterai Berdasarkan SoC Baterai

State of Charge (SOC) merupakan parameter yang menunjukkan tingkat energi yang tersimpan pada baterai terhadap kapasitas nominalnya. Pada penelitian ini, perubahan nilai SOC digunakan untuk menganalisis karakteristik proses

pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) baterai selama sistem PLTS *off-grid* beroperasi. Berbeda dengan proses pengisian baterai secara konvensional, baterai pada sistem ini mengalami proses *charging* dan *discharging* secara bergantian karena energi yang dihasilkan panel surya tidak hanya digunakan untuk mengisi baterai, tetapi juga secara langsung menyuplai kebutuhan beban.



Gambar 4. 17 Kurva State of Charge (SoC) Baterai (%)

Berdasarkan Gambar 4.17, nilai SOC baterai mengalami fluktuasi selama periode pengujian dengan rentang 86,90% hingga 96,03%. Fluktuasi tersebut menunjukkan bahwa baterai terus mengalami siklus pengisian dan pengosongan mengikuti kondisi operasi sistem. Nilai SOC tidak kembali mencapai 100%, tetapi cenderung berada pada kisaran 93-96% setelah mengalami proses pemulihan. Kondisi ini menunjukkan bahwa baterai selalu bekerja untuk menjaga kontinuitas suplai energi, sehingga proses pengisian tidak pernah berlangsung secara penuh tanpa adanya konsumsi daya oleh beban. Untuk mengetahui karakteristik proses pengisian dan pengosongan baterai, dilakukan identifikasi terhadap perubahan nilai SOC berdasarkan waktu pengujian. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 4 Kondisi Iradiasi, Daya PV, dan Perubahan SOC

Tanggal	Kondisi	Rentang Waktu	SOC Awal (%)	SOC Akhir (%)	Durasi
19 Juni 2026	Charging	07.15-17.35	86,90	92,91	10 jam 20 menit
19-20 Juni 2026	Discharging	17.35-07.00	92,91	91,87	13 jam 25 menit
20 Juni 2026	Charging	07.00-17.00	91,87	94,87	10 jam
20-21 Juni 2026	Discharging	17.00-07.00	94,87	93,64	14 jam

Berdasarkan Tabel 4.8, proses pengisian baterai berlangsung pada siang hari ketika panel surya mulai menghasilkan energi listrik, sedangkan proses pengosongan terjadi pada sore hingga pagi hari ketika energi dari panel surya berkurang atau tidak tersedia. Selama periode pengujian, waktu efektif pengisian baterai berlangsung sekitar 10 jam per hari, sedangkan proses pengosongan berlangsung sekitar 13-14 jam per hari. Hal ini menunjukkan bahwa baterai berfungsi sebagai penyimpan energi pada siang hari sekaligus sebagai sumber energi utama pada malam hari untuk menjaga kontinuitas suplai daya ke beban.

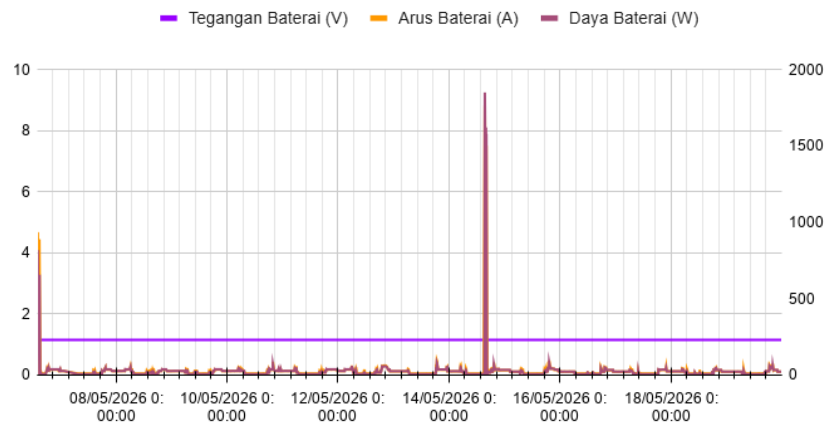
Nilai SOC terendah selama pengujian terjadi pada tanggal 19 Juni 2026 pukul 07.15, yaitu sebesar 86,90%. Setelah itu, baterai mengalami proses pengisian hingga nilai SOC meningkat menjadi 92,91% pada pukul 17.35 di hari yang sama. Setelah mengalami proses *discharging* pada malam hari, proses pengisian kembali berlangsung pada tanggal 20 Juni 2026 hingga mencapai nilai 94,87% pada pukul 17.00. Dengan demikian, proses pemulihan SOC dari kondisi terendah hingga mencapai nilai tertinggi setelahnya berlangsung selama sekitar 33 jam 45 menit, yang terdiri atas dua periode *charging* dan satu periode *discharging*.

Meskipun nilai SOC mengalami peningkatan selama proses pengisian, baterai tidak kembali mencapai kondisi penuh (100%), melainkan hanya mencapai sekitar 96,03% selama periode pengujian. Hal ini disebabkan energi yang dihasilkan panel surya tidak hanya digunakan untuk mengisi baterai, tetapi juga digunakan untuk menyuplai kebutuhan beban sesuai kondisi operasi sistem. Oleh karena itu, baterai mengalami proses *charging* dan *discharging* secara bergantian sehingga perubahan nilai SOC bersifat dinamis.

4.3.4 Analisis Daya Beban

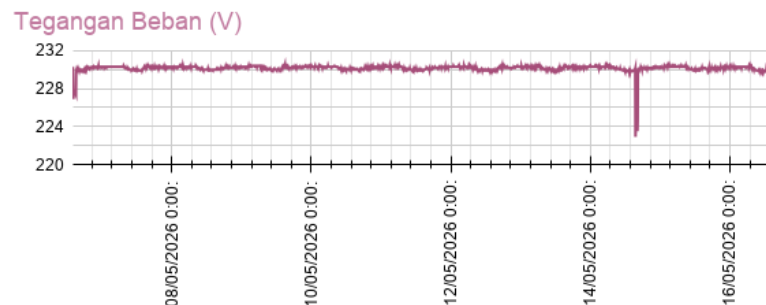
Kurva daya beban menunjukkan bagaimana tegangan, arus, dan daya yang digunakan oleh beban berfluktuasi sepanjang waktu. Data yang dikumpulkan memberikan gambaran tentang konsumsi daya oleh beban yang terhubung ke sistem, termasuk variasi yang terjadi ketika mesin penggiling padi dioperasikan.

Beban



Gambar 4. 18 Kurva Beban (Tegangan, Arus, Daya)

Kurva ini menggambarkan fluktuasi tegangan, arus, dan daya yang digunakan oleh beban sepanjang waktu, dengan data yang diambil selama 24 jam. Beban utama yang digunakan adalah mesin penggiling padi, yang menyebabkan fluktuasi arus dan daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan saat beban lain digunakan.



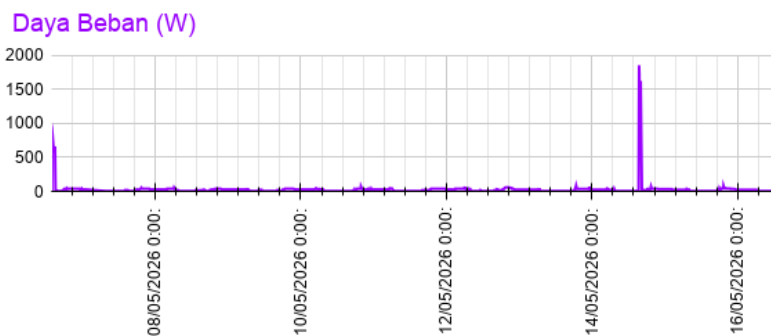
Gambar 4. 19 Kurva Tegangan Beban (V)

Rata-rata tegangan yang tercatat pada sistem beban adalah 230,2152847 V, dengan nilai maksimum 230,60001 V dan nilai minimum 222,8999 V. Tegangan ini cenderung stabil, meskipun sedikit fluktuasi terjadi akibat perubahan konsumsi daya oleh beban.



Gambar 4. 20 Kurva Arus Beban (A)

Rata-rata arus yang digunakan oleh beban adalah 0,13 A, dengan nilai maksimum 8,82 A dan nilai minimum 0,048 A. Arus meningkat secara signifikan saat mesin penggiling padi dioperasikan, terutama pada periode tertentu saat mesin membutuhkan daya lebih tinggi.



Gambar 4. 21 Kurva Daya Beban (W)

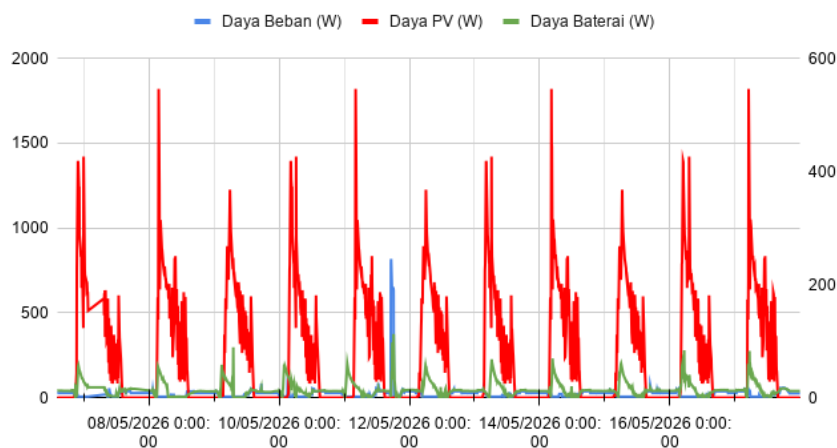
Rata-rata daya yang digunakan oleh beban adalah 23,87 W, dengan puncak tercatat pada 1849,30 W. Nilai minimum tercatat pada 5,3 W saat mesin tidak beroperasi. Fluktuasi daya ini sangat tergantung pada variasi penggunaan alat, dengan puncak daya terjadi saat mesin penggiling padi beroperasi.

Analisis hubungan antara daya PV, daya baterai, dan daya beban yang terjadi sepanjang waktu. Ketiga komponen ini sangat saling terkait dalam sistem PLTS off-grid, di mana daya PV yang dihasilkan oleh panel surya digunakan untuk mengisi daya baterai dan menyuplai daya beban. Kurva yang ditampilkan memberikan gambaran menyeluruh tentang bagaimana energi berpindah dari panel

surya, ke baterai, dan akhirnya disuplai ke beban. Pada kurva ini, daya PV (ditunjukkan dengan garis merah) mencerminkan jumlah energi yang dihasilkan oleh panel surya dan berfluktuasi tergantung pada intensitas cahaya matahari yang tersedia. Daya baterai (garis hijau) menunjukkan bagaimana energi disalurkan ke baterai atau digunakan untuk menyuplai beban. Daya beban (garis biru) mencerminkan konsumsi daya oleh peralatan yang terhubung ke sistem, seperti mesin penggiling padi.

Dalam pengamatan selama satu minggu, terlihat bahwa daya PV meningkat seiring dengan terbitnya matahari, mencapai puncaknya pada siang hari, dan menurun pada sore hari. Pada saat yang sama, daya baterai mulai terisi saat daya PV cukup untuk mengisi baterai dan menyuplai beban. Ketika daya PV menurun pada sore hari dan malam hari, daya baterai digunakan untuk memenuhi kebutuhan daya beban. Dengan menganalisis ketiga kurva ini secara bersamaan, dapat disimpulkan bahwa sistem PLTS off-grid berfungsi dengan efisien dalam mengelola energi. Dayanya dialihkan antara panel surya, baterai, dan beban, tergantung pada waktu dan kondisi yang ada. Sistem ini memastikan bahwa daya PV yang berlimpah di siang hari dimanfaatkan untuk mengisi baterai, dan saat daya PV menurun, daya baterai digunakan untuk menyuplai daya beban secara kontinu.

Baterai vs Beban vs PV



Gambar 4. 22 Baterai vs Beban vs PV

Grafik ini menunjukkan hubungan antara daya PV (garis merah), daya baterai (garis hijau), dan daya beban (garis biru) sepanjang waktu. Daya PV dihasilkan oleh panel surya, yang kemudian mengisi baterai dan menyuplai daya ke beban.

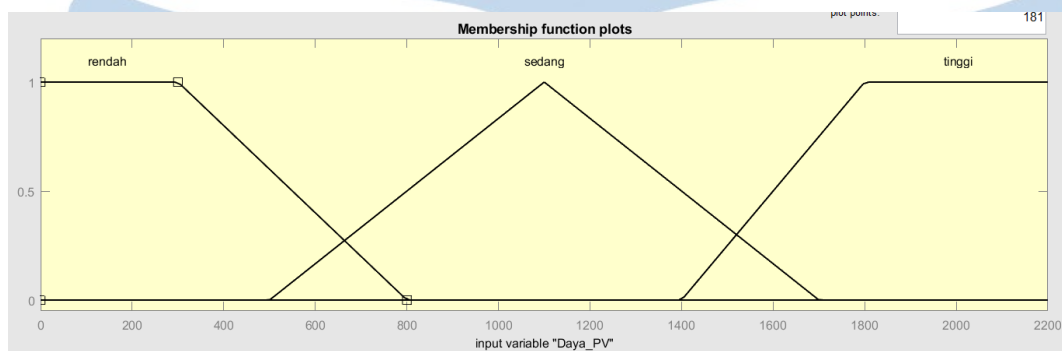
4.4 Perancangan Fungsi Keanggotaan Fuzzy Berdasarkan Data Lapangan

Berdasarkan hasil pengukuran awal pada tahap perancangan, daya PV memiliki nilai minimum 0 W, rata-rata 143,80 W, dan maksimum 545,84 W, dan maksimum sebesar 545,84 W. Nilai SoC baterai berada pada rentang 86,90% hingga 96,03%, Sementara itu, daya beban memiliki nilai minimum sebesar 5,3 W, rata-rata sebesar 23,8 W, dan maksimum sebesar 1.849,30005 W. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan batas fungsi keanggotaan agar sistem fuzzy yang dirancang tetap sesuai dengan kondisi aktual di lapangan.

Fungsi keanggotaan yang digunakan terdiri dari bentuk trapesium dan segitiga. Fungsi trapesium digunakan pada kategori yang berada di sisi rendah dan tinggi karena dapat memberikan area nilai yang lebih stabil pada kondisi ekstrem. Sementara itu, fungsi segitiga digunakan pada kategori sedang karena kategori ini berperan sebagai daerah transisi antara kondisi rendah dan tinggi. Adanya overlap antar fungsi keanggotaan bertujuan agar perubahan keputusan fuzzy tidak terjadi secara tiba-tiba, melainkan berlangsung lebih halus sesuai perubahan kondisi sistem.

Tabel 4. 5 Fungsi Keanggotaan Daya PV (Ppv)

Variabel	Himpunan Fuzzy	Bentuk Fungsi	Titik Fungsi Keanggotaan
Daya PV	Rendah	Trapesium	[0, 0, 300, 800]
Daya PV	Sedang	Segitiga	[500, 1100, 1700]
Daya PV	Tinggi	Trapesium	[1400, 1800, 2200, 2200]

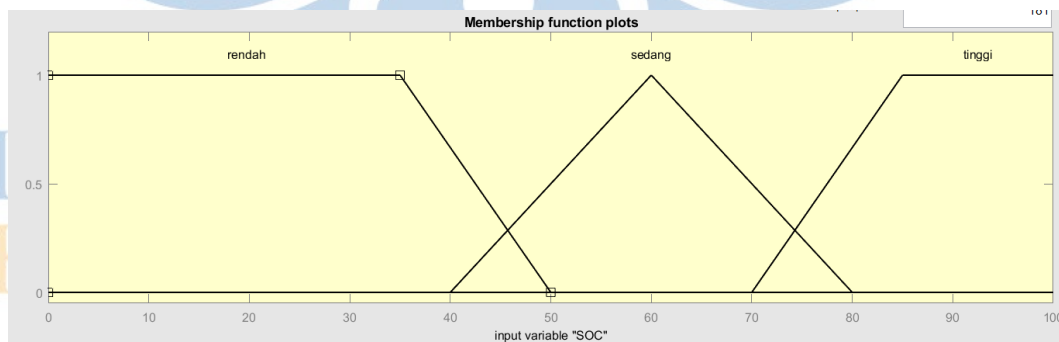


Gambar 4. 23 Fungsi Keanggotaan Daya PV

Berdasarkan hasil pengukuran selama periode pengamatan, daya PV memiliki nilai minimum sebesar 0 W, rata-rata sebesar 143,80 W, dan maksimum sebesar 545,84 W. Nilai tersebut tidak mencerminkan kapasitas maksimum panel surya, melainkan daya yang ditarik sistem pada kondisi pengujian, karena baterai sebagian besar berada pada *State of Charge* (SoC) tinggi disertai daya beban yang relatif ringan, sehingga *Solar Charge Controller* (SCC) membatasi arus yang ditarik dari panel surya. Dengan demikian, daya PV yang terukur cenderung rendah meskipun array PLTS memiliki kapasitas terpasang sebesar 3,85 kWp (7 modul @ 550 Wp) yang secara fisik mampu menghasilkan daya jauh lebih besar. Oleh karena itu, batas tertinggi fungsi keanggotaan tetap ditetapkan hingga 2.200 W, yaitu sedikit di atas daya beban puncak sistem (mesin penggiling padi $\pm 1.849,3$ W), agar sistem fuzzy tetap mampu merepresentasikan kondisi ketika daya PV meningkat signifikan dan dapat menyuplai seluruh beban secara langsung, misalnya saat SoC baterai rendah dan iradiasi matahari tinggi sehingga arus panel tidak dibatasi oleh SCC. Kategori rendah dibuat dominan pada rentang 0–300 W karena sebagian besar nilai daya PV selama pengamatan, dengan rata-rata 143,80 W, berada pada rentang tersebut, sedangkan kategori sedang dan tinggi dibuat saling *overlap* agar sistem tetap mampu membaca kondisi transisi saat daya PV mulai meningkat pada siang hari.

Tabel 4. 6 Fungsi Keanggotaan State of Charge (SoC)

Variabel	Himpunan Fuzzy	Bentuk Fungsi	Titik Fungsi Keanggotaan
SoC	Rendah	Trapeسيوم	[0, 0, 35, 50]
SoC	Sedang	Segitiga	[40, 60, 80]
SoC	Tinggi	Trapeسيوم	[70, 85, 100, 100]

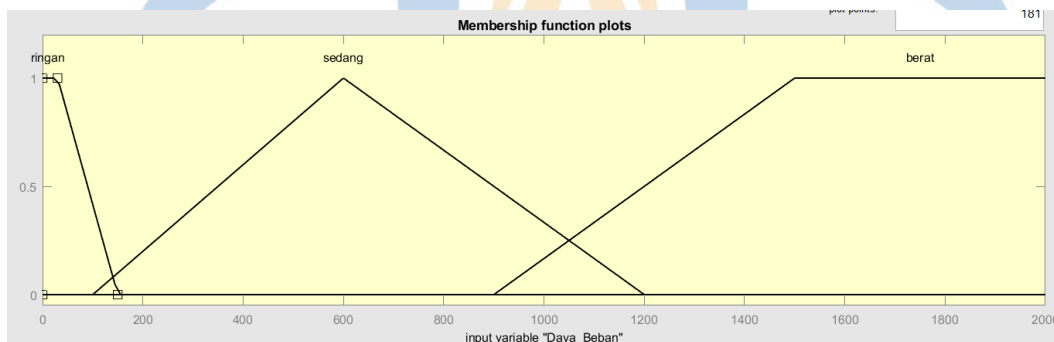


Gambar 4. 24 Fungsi Keanggotaan State of Charge

Range SoC tetap disusun pada rentang 0–100% karena sistem fuzzy perlu mampu membaca seluruh kemungkinan kondisi baterai, mulai dari rendah hingga penuh. Meskipun hasil pengamatan menunjukkan nilai SoC berada pada rentang 86,90% hingga 96,03%, fungsi keanggotaan SoC tidak dipersempit hanya pada rentang tersebut. Hal ini dilakukan agar sistem tetap dapat memberikan keputusan apabila baterai berada pada kondisi rendah di luar periode pengamatan. Kategori rendah dibuat sampai 50% sebagai batas kehati-hatian, kategori sedang berada pada rentang transisi 40–80%, sedangkan kategori tinggi dimulai dari 70% karena nilai tersebut menunjukkan kondisi baterai yang cukup aman untuk menyuplai beban.

Tabel 4. 7 Fungsi Keanggotaan Daya Beban (Pbeban)

Variabel	Himpunan Fuzzy	Bentuk Fungsi	Titik Fungsi Keanggotaan
Daya Beban	Ringan	Trapesium	[0, 0, 30, 150]
Daya Beban	Sedang	Segitiga	[100, 600, 1200]
Daya Beban	Berat	Trapesium	[900, 1500, 2000, 2000]

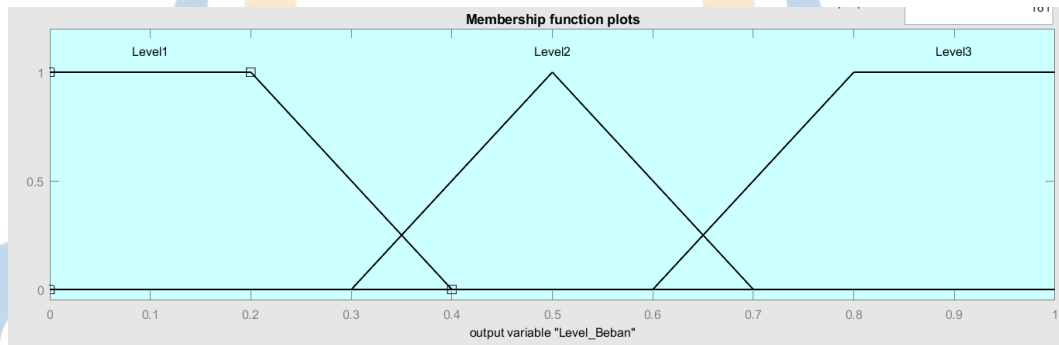


Gambar 4. 25 Fungsi Keanggotaan Daya Beban

Range daya beban disesuaikan dengan kondisi pengujian lapangan, di mana daya beban maksimum mencapai 1.849,30005 W saat mesin penggiling padi beroperasi. Kategori ringan tetap dibuat dominan pada rentang rendah karena rata-rata daya beban hanya sekitar 23,8 W, yang menunjukkan bahwa sebagian besar waktu sistem hanya menyuplai beban kecil seperti lampu dan charger handphone. Kategori sedang digunakan untuk membaca kondisi ketika beban mulai meningkat, sedangkan kategori berat diperluas hingga mendekati 2.000 W sebagai toleransi terhadap daya puncak mesin penggiling padi yang mencapai sekitar 1.849,3 W.

Tabel 4. 8 Fungsi Keanggotaan Output Level Beban Aktif

Output	Himpunan Fuzzy	Bentuk Fungsi	Titik Fungsi Keanggotaan
Level Bebar	Level 1	Trapesium	[0, 0, 0,20, 0,40]
Level Bebar	Level 2	Segitiga	[0,30, 0,50, 0,70]
Level Bebar	Level 3	Trapesium	[0,60, 0,80, 1,00, 1,00]



Gambar 4. 26 Fungsi Keanggotaan Output Level Beban Aktif

Level beban aktif digunakan untuk menentukan jumlah beban yang dapat disuplai oleh sistem. Level 1 menunjukkan kondisi energi terbatas sehingga hanya beban prioritas utama yang diaktifkan. Level 2 menunjukkan kondisi energi cukup untuk mengaktifkan beban prioritas utama dan sebagian beban tambahan. Level 3 menunjukkan kondisi energi aman sehingga seluruh beban dapat diaktifkan.

4.4.1 Rule Base Fuzzy Logic Controller

Rule base disusun berdasarkan hubungan antara kondisi SoC baterai, daya PV, dan daya beban. Aturan fuzzy dibuat sebanyak 27 aturan, sesuai dengan kombinasi tiga input yang masing-masing memiliki tiga himpunan fuzzy. Prinsip dasar penyusunan aturan adalah menjaga baterai tetap berada pada kondisi aman, memanfaatkan daya PV saat tersedia, serta membatasi beban ketika energi sistem tidak mencukupi.

Tabel 4. 9 Rule Base Fuzzy Logic Controller

No	SoC	Daya PV	Daya Beban	Level Beban Aktif
1	Rendah	Rendah	Ringan	Level 1
2	Rendah	Rendah	Sedang	Level 1
3	Rendah	Rendah	Berat	Level 1
4	Rendah	Sedang	Ringan	Level 2
5	Rendah	Sedang	Sedang	Level 1
6	Rendah	Sedang	Berat	Level 1
7	Rendah	Tinggi	Ringan	Level 2
8	Rendah	Tinggi	Sedang	Level 2
9	Rendah	Tinggi	Berat	Level 2
10	Sedang	Rendah	Ringan	Level 2
11	Sedang	Rendah	Sedang	Level 1
12	Sedang	Rendah	Berat	Level 1
13	Sedang	Sedang	Ringan	Level 2
14	Sedang	Sedang	Sedang	Level 2
15	Sedang	Sedang	Berat	Level 2
16	Sedang	Tinggi	Ringan	Level 3
17	Sedang	Tinggi	Sedang	Level 3
18	Sedang	Tinggi	Berat	Level 3
19	Tinggi	Rendah	Ringan	Level 3
20	Tinggi	Rendah	Sedang	Level 2
21	Tinggi	Rendah	Berat	Level 2
22	Tinggi	Sedang	Ringan	Level 3
23	Tinggi	Sedang	Sedang	Level 3
24	Tinggi	Sedang	Berat	Level 3
25	Tinggi	Tinggi	Ringan	Level 3
26	Tinggi	Tinggi	Sedang	Level 3
27	Tinggi	Tinggi	Berat	Level 3

Aturan tersebut menunjukkan bahwa ketika SoC rendah dan daya PV rendah, sistem diarahkan ke Level 1, sehingga hanya beban prioritas utama yang diaktifkan. Ketika daya PV meningkat, level beban dapat dinaikkan secara bertahap sesuai kondisi SoC dan besar daya beban yang digunakan. Pada kondisi SoC sedang, sistem cenderung mengizinkan Level 2 karena baterai masih berada pada kondisi cukup aman, namun pembatasan beban tetap dilakukan apabila daya PV rendah atau daya beban meningkat. Ketika SoC tinggi, sistem mengizinkan level beban yang lebih besar karena kapasitas baterai masih mencukupi untuk menyuplai beban. Dengan demikian, rule base fuzzy digunakan untuk menentukan level beban aktif berdasarkan kondisi SoC, daya PV, dan daya beban, sedangkan mode operasi sistem ditentukan secara terpisah berdasarkan selisih daya antara daya PV dan daya beban.

4.4.2 Verifikasi Implementasi Fuzzy Logic Controller

Untuk memastikan bahwa Fuzzy Logic Controller yang diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 telah bekerja sesuai dengan rancangan, dilakukan verifikasi dengan membandingkan keluaran sistem terhadap model fuzzy acuan yang dibuat menggunakan MATLAB Fuzzy Logic Toolbox (FIS Editor). Fungsi keanggotaan dan rule base pada model MATLAB disusun identik dengan rancangan pada Tabel 4.4–4.8. Sejumlah kombinasi nilai input yang sama, yaitu daya PV, SoC, dan daya beban yang diambil dari data lapangan, dimasukkan ke kedua sistem, kemudian nilai keluaran hasil defuzzifikasi (level value) dibandingkan. Hasil perbandingan ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Perbandingan Keluaran Fuzzy ESP32 dan Simulasi MATLAB

Waktu	P_PV (W)	SoC (%)	P_Beban (W)	Level Value (ESP32)	Level Value (MATLAB)	Level
17/06/2026 14:25	125,7	100	17,6	0,844	0,847	Level 3
17/06/2026 14:30	622,9	100	658,0	0,622	0,624	Level 2
17/06/2026 14:35	603,6	100	644,7	0,603	0,605	Level 2
17/06/2026 14:45	0	99,30	720,7	0,500	0,500	Level 2

Waktu	P_PV (W)	SoC (%)	P_Beban (W)	Level Value (ESP32)	Level Value (MATLAB)	Level
17/06/2026 15:00	0	98,90	698,8	0,500	0,500	Level 2
17/06/2026 15:25	234,2	98,88	632,1	0,500	0,500	Level 2
17/06/2026 15:30	243,7	98,91	5,0	0,844	0,847	Level 3
17/06/2026 15:45	405,9	99,07	6,2	0,836	0,839	Level 3
18/06/2026 16:15	133,8	94,16	1.484,9	0,500	0,500	Level 2
18/06/2026 16:35	134,1	91,34	1.751,2	0,500	0,500	Level 2

Berdasarkan Tabel 4.10, nilai keluaran fuzzy dari implementasi pada ESP32 sangat mendekati nilai keluaran simulasi MATLAB pada seluruh kondisi input yang diuji. Selisih nilai level value hanya berkisar antara 0,000 hingga 0,003, dengan selisih rata-rata sekitar 0,001 (di bawah 0,2%) dan selisih maksimum 0,003 (sekitar 0,3%). Selain itu, kategori level beban aktif yang dihasilkan kedua sistem identik pada seluruh data, yaitu sepuluh dari sepuluh kondisi menghasilkan keputusan level yang sama. Selisih kecil pada nilai level value tersebut disebabkan oleh perbedaan implementasi numerik pada proses defuzzifikasi centroid antara pustaka fuzzy yang digunakan pada ESP32 dan MATLAB, namun perbedaan tersebut tidak mengubah keputusan level beban aktif. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa implementasi Fuzzy Logic Controller pada mikrokontroler ESP32 telah sesuai dengan rancangan dan menghasilkan keputusan yang valid, sehingga layak digunakan untuk pengujian sistem pada kondisi lapangan yang dibahas pada subbab berikutnya.

4.5 Pengujian Mode Operasi, Fuzzy, dan Pengendalian Relay

Pengujian mode operasi, fuzzy, dan pengendalian relay dilakukan untuk mengetahui kesesuaian keputusan sistem terhadap kondisi energi aktual pada PLTS off-grid. Data yang digunakan dalam pengujian ini diperoleh dari hasil monitoring sistem, meliputi daya PV, State of Charge (SoC) baterai, daya beban, mode operasi, level beban aktif, rule aktif, serta status relay. Pada sistem ini, mode operasi ditentukan berdasarkan selisih daya antara daya PV dan daya beban. Sementara itu,

level beban aktif ditentukan menggunakan Fuzzy Logic Controller berdasarkan input SoC baterai, daya PV, dan daya beban. Dengan demikian, mode operasi digunakan untuk menunjukkan kondisi aliran energi sistem, sedangkan level beban aktif digunakan untuk menentukan beban yang dapat disuplai oleh sistem.

4.5.1 Hasil Pengujian Mode Operasi Berdasarkan Selisih Daya

Mode operasi sistem ditentukan berdasarkan nilai selisih daya antara daya PV dan daya beban. Apabila daya PV lebih kecil dari daya beban, maka sistem berada pada mode Discharge karena baterai menyuplai kekurangan daya. Apabila daya PV lebih besar dari daya beban dan SoC baterai belum mencapai batas penuh, maka sistem berada pada mode Charge. Sementara itu, apabila daya PV lebih besar dari daya beban dan SoC baterai sudah tinggi, maka sistem berada pada mode Supply. Beberapa sampel hasil pengujian mode operasi berdasarkan data monitoring ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Mode Operasi Berdasarkan Selisih Daya

Waktu	Daya PV (W)	SoC (%)	Daya Beban (W)	Pnet (W)	Mode Operasi
03/06/2026 23:55:56	0	96,24986	18,3	-18,3	Discharge
04/06/2026 07:00:56	11,1496	94,59858	10,3	0,8496	Charge
04/06/2026 07:30:55	545,83759	94,74895	7,6	538,23761	Charge
04/06/2026 08:55:55	245,02939	95,10648	6,1	238,92938	Supply
04/06/2026 17:55:55	31,8087	96,02797	16,3	15,5087	Supply
04/06/2026 18:10:55	5,3046	95,8752	22,3	-16,9954	Discharge

Berdasarkan Tabel 4.11, mode operasi sistem berubah mengikuti kondisi selisih daya. Pada malam hari, daya PV bernilai 0 W, sedangkan beban masih aktif, sehingga nilai Pnet bernilai negatif dan sistem berada pada mode Discharge. Kondisi ini menunjukkan bahwa kebutuhan daya beban dipenuhi oleh baterai.

Pada pagi hari, daya PV mulai terbaca dan nilainya sudah lebih besar daripada daya beban. Ketika SoC baterai masih berada di bawah 95%, sistem berada pada mode

Charge karena daya PV mampu menyuplai beban dan masih terdapat sisa daya yang dapat digunakan untuk mengisi baterai. Selanjutnya, ketika SoC baterai sudah berada di atas 95%, sistem masuk ke mode Supply. Pada kondisi ini, daya PV masih mampu memenuhi kebutuhan beban, tetapi pengisian baterai tidak diprioritaskan karena kondisi baterai sudah mendekati penuh. Pada sore menjelang malam, daya PV kembali menurun. Ketika daya PV masih lebih besar dari daya beban, sistem tetap berada pada mode Supply. Namun, ketika daya PV lebih kecil daripada daya beban, sistem kembali masuk ke mode Discharge karena baterai kembali digunakan untuk menyuplai kekurangan daya beban.

4.5.2 Hasil Pengujian Output Fuzzy Berdasarkan Data Monitoring

Pengujian output fuzzy dilakukan untuk mengetahui level beban aktif yang dihasilkan sistem berdasarkan kondisi *State of Charge* (SoC) baterai, daya PV, dan daya beban. Agar respons sistem dapat dievaluasi secara menyeluruh, pengamatan diperluas pada periode dengan variasi beban dan iradiasi yang lebih beragam, sehingga keputusan fuzzy yang dihasilkan tidak terbatas pada satu kondisi saja. Berdasarkan hasil pengujian, sistem mengaktifkan aturan yang berbeda-beda sesuai kondisi energi aktual, yaitu Rule 19, Rule 20, Rule 21, dan Rule 23, dengan keluaran level beban aktif yang bervariasi antara Level 2 dan Level 3. Beberapa sampel hasil pengujian output fuzzy ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Hasil Pengujian Output Fuzzy dan Status Relay

Waktu	Daya PV (W)	SoC (%)	Daya Beban (W)	Rule Aktif	Alpha	Level	R1/R2/R3/R4
17/06/2026 14:25	125,7	100,00	17,6	Rule 19	1,000	Level 3	ON/ON/ON/ON
17/06/2026 14:30	622,9	100,00	658,0	Rule 20 Rule 23	0,354	Level 2	ON/ON/OFF/OFF
17/06/2026 14:35	603,6	100,00	644,7	Rule 20 Rule 23	0,393	Level 2	ON/ON/OFF/OFF
17/06/2026 14:45	0,0	99,30	720,7	Rule 20	0,799	Level 2	ON/ON/OFF/OFF
17/06/2026 15:00	0,0	98,90	698,8	Rule 20	0,835	Level 2	ON/ON/OFF/OFF
17/06/2026 15:25	234,2	98,88	632,1	Rule 20	0,947	Level 2	ON/ON/OFF/OFF
17/06/2026 15:30	243,7	98,91	5,0	Rule 19	1,000	Level 3	ON/ON/ON/ON

Waktu	Daya PV (W)	SoC (%)	Daya Beban (W)	Rule Aktif	Alpha	Level	R1/R2/R3/R4
17/06/2026 15:45	405,9	99,07	6,2	Rule 19	0,788	Level 3	ON/ON/ON/ON
18/06/2026 16:15	133,8	94,16	1.484,9	Rule 21	0,975	Level 2	ON/ON/OFF/OFF
18/06/2026 16:35	134,1	91,34	1.751,2	Rule 21	1,000	Level 2	ON/ON/OFF/OFF

Berdasarkan Tabel 4.12, level beban aktif yang dihasilkan sistem berubah mengikuti kondisi daya beban dan SoC baterai. Ketika daya beban ringan, yaitu di bawah 30 W, dan SoC baterai berada pada kategori tinggi, sistem mengaktifkan Rule 19 dan menghasilkan Level 3, sehingga seluruh relay (R1–R4) berada pada kondisi ON dan seluruh beban dapat disuplai. Sebaliknya, ketika daya beban meningkat ke kategori sedang, yaitu sekitar 630–720 W, sistem mengaktifkan Rule 20 dan menghasilkan Level 2, sehingga relay prioritas rendah (R3 dan R4) dilepas, sedangkan beban prioritas tinggi dan sedang (R1 dan R2) tetap aktif. Kondisi Level 2 juga muncul ketika mesin penggiling padi beroperasi dengan daya beban berat, yaitu sekitar 1.500–1.750 W, yang mengaktifkan Rule 21. Dengan demikian, sistem terbukti menyesuaikan level beban aktif terhadap besarnya daya beban yang terhubung.

Pada kondisi transisi, yaitu ketika daya PV meningkat hingga memasuki kategori sedang (sekitar 600 W), terlihat bahwa lebih dari satu aturan aktif secara bersamaan, yaitu Rule 20 dan Rule 23. Hal ini terjadi karena fungsi keanggotaan pada setiap variabel input sengaja dirancang saling *overlap*, sehingga satu nilai input dapat memiliki derajat keanggotaan lebih dari nol pada dua himpunan fuzzy sekaligus. Pada kondisi tersebut, daya PV berada pada daerah tumpang tindih antara himpunan "Rendah" [0, 0, 300, 800] dan "Sedang" [500, 1100, 1700], sehingga memiliki derajat keanggotaan "Rendah" sebesar 0,393 sekaligus "Sedang" sebesar 0,173. Karena nilai SoC (Tinggi) dan daya beban (Sedang) pada saat itu sama-sama tetap, dua kombinasi aturan yang antesedennya terpenuhi ikut aktif, yaitu Rule 20 (SoC Tinggi, PV Rendah, Beban Sedang) dan Rule 23 (SoC Tinggi, PV Sedang, Beban Sedang), yang hanya berbeda pada kategori daya PV.

Derajat keaktifan (alpha) setiap aturan dihitung sebagai nilai minimum dari derajat keanggotaan ketiga inputnya menggunakan operator AND, sehingga Rule

20 aktif dengan alpha 0,393 dan Rule 23 aktif dengan alpha 0,173, mengikuti derajat keanggotaan daya PV yang menjadi faktor pembatas. Pada metode Mamdani, seluruh aturan yang aktif tidak saling meniadakan, melainkan digabungkan melalui proses agregasi terlebih dahulu, kemudian dilakukan defuzzifikasi untuk menghasilkan satu nilai keluaran tunggal. Hal inilah yang menyebabkan nilai hasil defuzzifikasi pada kondisi transisi bergeser mendekati batas antara Level 2 dan Level 3, yaitu sekitar 0,60–0,62, sehingga perpindahan keputusan sistem berlangsung secara bertahap dan tidak terjadi secara mendadak. Nilai alpha pada hasil pengujian juga bervariasi pada rentang 0,354 hingga 1,000. Variasi ini menunjukkan bahwa derajat keanggotaan input terhadap masing-masing himpunan fuzzy berbeda-beda sesuai kondisi aktual sistem. Dengan demikian, hasil pengujian membuktikan bahwa *Fuzzy Logic Controller* bekerja secara dinamis dalam menentukan level beban aktif, tidak menghasilkan satu keputusan tetap, melainkan menyesuaikan keluarannya berdasarkan kombinasi nilai SoC, daya PV, dan daya beban yang terukur pada sistem PLTS *off-grid*.

4.5.3 Pengujian Pengendalian Relay Berdasarkan Level Beban Aktif

Pengendalian relay dilakukan berdasarkan keluaran level beban aktif dari Fuzzy Logic Controller. Level 1 menunjukkan bahwa hanya beban prioritas tinggi yang diaktifkan, Level 2 menunjukkan bahwa beban prioritas tinggi dan sedang diaktifkan, sedangkan Level 3 menunjukkan bahwa seluruh beban dapat diaktifkan. Hubungan antara level beban aktif dan status relay ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Hubungan Level Beban Aktif dan Status Relay

Level Beban Aktif	R1 (Prioritas Tinggi)	R2 (Prioritas Sedang)	R3 (Prioritas Rendah)	R4 (Prioritas Rendah)
Level 1	ON	OFF	OFF	OFF
Level 2	ON	ON	OFF	OFF
Level 3	ON	ON	ON	ON

Berdasarkan hasil pengujian, status relay berubah mengikuti level beban aktif yang dihasilkan sistem. Ketika sistem menghasilkan Level 3, yaitu saat daya beban ringan dan kondisi energi mencukupi, seluruh relay (R1–R4) berada pada kondisi ON sehingga seluruh beban disuplai. Sebaliknya, ketika sistem menghasilkan Level 2 akibat peningkatan daya beban, misalnya saat mesin penggiling padi beroperasi, relay prioritas rendah R3 dan R4 berada pada kondisi OFF, sedangkan relay prioritas tinggi dan sedang R1 dan R2 tetap ON. Hal ini menunjukkan bahwa sistem benar-benar melakukan pelepasan beban non-prioritas ketika kondisi energi terbatas, dan kembali mengaktifkan seluruh relay ketika kondisi energi mencukupi. Dengan demikian, perintah dari Fuzzy Logic Controller dapat diteruskan ke relay secara konsisten untuk mengatur beban sesuai level yang dihasilkan.

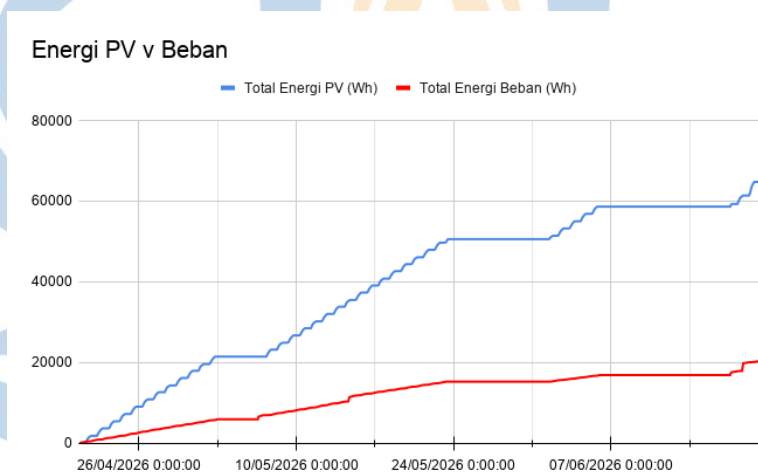
4.5.4 Evaluasi Hasil Pengujian Sistem

Berdasarkan hasil pengujian, mode operasi sistem berubah sesuai dengan nilai selisih daya antara daya PV dan daya beban. Saat daya PV lebih kecil dari daya beban, sistem berada pada mode Discharge. Saat daya PV lebih besar dari daya beban dan SoC belum mencapai 95%, sistem berada pada mode Charge. Sementara itu, saat daya PV lebih besar dari daya beban dan SoC sudah mencapai atau melebihi 95%, sistem berada pada mode Supply. Ketiga mode tersebut teramati selama pengujian, sehingga penentuan mode operasi terbukti berfungsi sesuai rancangan. Hasil pengujian fuzzy menunjukkan bahwa level beban aktif yang dihasilkan sistem bervariasi antara Level 2 dan Level 3, dengan aturan yang aktif meliputi Rule 19, Rule 20, Rule 21, dan Rule 23, bergantung pada kombinasi nilai SoC, daya PV, dan daya beban. Ketika daya beban ringan dan SoC baterai berada pada kategori tinggi, sistem menghasilkan Level 3 sehingga seluruh beban diaktifkan. Sebaliknya, ketika daya beban meningkat ke kategori sedang maupun berat, sistem menghasilkan Level 2 sehingga beban prioritas rendah dilepas untuk menjaga kecukupan energi. Variasi keputusan ini menunjukkan bahwa Fuzzy Logic Controller mampu menyesuaikan level beban aktif secara adaptif terhadap perubahan kondisi energi, tidak hanya menghasilkan satu keputusan tetap.

Secara keseluruhan, sistem telah mampu menentukan mode operasi berdasarkan selisih daya, menentukan level beban aktif berdasarkan Fuzzy Logic Controller, serta mengendalikan relay sesuai dengan level beban yang dihasilkan. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem manajemen energi dapat bekerja sesuai dengan konsep yang dirancang, yaitu memantau kondisi energi, menentukan kondisi aliran daya, dan mengatur beban berdasarkan prioritas secara adaptif.

4.6 Analisis Energi

Analisis energi dilakukan untuk mengetahui akumulasi energi yang dihasilkan panel surya dan energi yang dikonsumsi beban selama periode pengujian. Nilai energi diperoleh dengan mengalikan daya pada setiap interval pencatatan (5 menit) dengan durasinya, kemudian mengakumulasiannya sepanjang periode pengamatan, sebagaimana dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.3. Grafik akumulasi energi PV dan energi beban selama periode pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.27.



Gambar 4. 27 Grafik Akumulasi Energi PV dan Beban

Berdasarkan Gambar 4.27, total energi yang dihasilkan panel surya selama periode pengujian mencapai 66.680,16 Wh atau sekitar 66,68 kWh, sedangkan total energi yang dikonsumsi beban hanya sebesar 20.656,89 Wh atau sekitar 20,66 kWh. Rangkuman akumulasi energi ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Akumulasi Energi Selama Periode Pengujian

Parameter	Nilai
Total energi PV	66.680,16 Wh (66,68 kWh)
Total energi beban	20.656,89 Wh (20,66 kWh)
Selisih energi kumulatif (PV – beban)	46.023,27 Wh (46,02 kWh)
Rasio pemanfaatan energi (beban/PV)	30,98%

Hasil tersebut menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan panel surya selama periode pengujian lebih besar dibandingkan energi yang dikonsumsi oleh beban. Selisih energi kumulatif sebesar 46.023,27 Wh atau sekitar 46,02 kWh menunjukkan bahwa produksi energi panel surya melebihi kebutuhan energi beban selama periode pengujian. Hasil analisis ini juga sejalan dengan pembahasan pada Subbab 4.3.3 yang menunjukkan bahwa nilai State of Charge (SOC) baterai berada pada rentang 86,90% hingga 96,03% selama pengujian. Nilai SOC yang cenderung berada pada kategori tinggi menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan panel surya secara umum mampu memenuhi kebutuhan energi beban sekaligus mempertahankan kapasitas energi baterai pada kondisi yang aman. Kondisi tersebut menyebabkan keluaran *Fuzzy Logic Controller* lebih sering berada pada Level 3, yaitu seluruh beban diizinkan beroperasi karena ketersediaan energi masih mencukupi. Peralihan ke Level 2 hanya terjadi ketika daya beban meningkat sesaat, terutama saat mesin penggiling padi mulai beroperasi sehingga sistem membatasi beban untuk menjaga keseimbangan energi.

Perlu dicatat bahwa energi PV yang terukur merupakan energi yang benar-benar disalurkan oleh panel surya setelah melalui proses pengaturan oleh Solar Charge Controller (SCC). Ketika baterai telah mendekati kondisi penuh, SCC membatasi arus pengisian sehingga sebagian potensi energi panel surya tidak dimanfaatkan. Dengan demikian, potensi energi panel surya yang sebenarnya dapat lebih besar dibandingkan energi yang tercatat selama pengujian. Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas pembangkitan PLTS *off-grid* masih lebih besar dibandingkan kebutuhan energi beban pada sistem.